

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Controllo di carrozzina per il superamento di barriere architettoniche

Relatore

Giuseppe Quaglia

Co-relatore

Walter Franco

Candidato

Roberto Bellincioni

Dicembre 2020

SOMMARIO

Il tema delle barriere architettoniche ricopre una particolare importanza nella società. La loro eliminazione o, nei casi in cui ciò non sia possibile, il loro facile superamento è fondamentale per permettere a tutte le persone costrette in sedia a rotelle di affrontare le pratiche quotidiane nel modo più semplice possibile. In questa tesi viene affrontato il superamento di un gradino compiuto dalla carrozzina automatica Wheelchair.q05, necessario qualora l'utente della carrozzina si trovi di fronte a tale barriera architettonica e voglia superarla in totale autonomia, sfruttando una sequenza automatica. Il testo contiene in primo luogo una presentazione della carrozzina e lo studio delle fasi di salita e discesa di un gradino. Successivamente viene presentato il modo in cui tali sequenze sono state simulate attraverso il software Adams, con lo scopo di riprodurre su computer i movimenti della carrozzina nel modo più fedele possibile. Il passaggio successivo consiste nello studio teorico e pratico di un sistema di riconoscimento dei gradini basato su un Lidar laser scanner. Inizialmente ne è stato simulato il comportamento su Matlab e sono stati creati gli algoritmi adibiti a ricavare le misure dell'ostacolo. In seguito, si è passati alla realizzazione delle prove sperimentali utili a dimostrare l'effettiva funzionalità del Lidar, perfezionare gli algoritmi creati in precedenza e progettare il sistema di comunicazione tra il laser scanner e il controllore Speedgoat montato sulla sedia. Infine, è stato realizzato su Matlab/Simulink il sistema di controllo degli attuatori che costituiscono la sedia e sono state realizzate le sequenze di salita di un singolo gradino e di configurazione in marcia in piano sotto forma di macchina a stati. Terminata la tesi, si ha una carrozzina in grado di riconoscere un gradino in salita di qualsiasi altezza da una distanza variabile e capace di compiere i movimenti automatici necessari per superarlo; l'ultimo capitolo prevede l'esecuzione di una serie di test di salita di un gradino e di configurazione in marcia in piano.

1 Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione..... | 9 |
| 1.1 | Classificazione dei dispositivi montascale..... | 9 |
| 1.1.1 | Montascale fissi..... | 10 |
| 1.1.2 | Montascale mobili..... | 10 |
| 1.1.3 | Carrozine montascale | 12 |
| 1.2 | Riepilogo..... | 19 |
| 1.3 | Requisiti di progetto Wheelchair.q..... | 20 |
| 1.3.1 | Caratteristiche di una scala..... | 20 |
| 1.3.2 | Requisiti geometrici e funzionali | 22 |
| 1.3.3 | Altri requisiti..... | 22 |
| 1.4 | Versioni precedenti di Wheelchair.Q | 23 |
| 1.4.1 | Wheelchair.q01..... | 23 |
| 1.4.2 | Wheelchair.q02..... | 24 |
| 1.4.3 | Wheelchair.q03..... | 24 |
| 1.4.4 | Wheelchair.q04..... | 25 |
| 2 | Cinematica e sequenze automatiche | 27 |
| 2.1 | Generalità | 27 |
| 2.2 | Struttura cinematica..... | 28 |
| 2.3 | Sequenza A – Salita di un singolo gradino | 37 |
| 2.3.1 | Fase combinata A0-A1-A2..... | 40 |
| 2.3.2 | Fase A3..... | 42 |
| 2.3.3 | Fase A4..... | 43 |
| 2.3.4 | Fase A5..... | 44 |
| 2.3.5 | Fase A6..... | 45 |
| 2.3.6 | Fase A7..... | 47 |
| 2.3.7 | Fase A8..... | 48 |
| 2.3.8 | Fase A9..... | 49 |

Introduzione

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4 | Sequenza B – Discesa di un singolo gradino | 51 |
| 2.4.1 | Fase B0..... | 53 |
| 2.4.2 | Fase B1..... | 54 |
| 2.4.3 | Fase B2..... | 55 |
| 2.4.4 | Fase B3..... | 55 |
| 2.4.5 | Fase B4: | 57 |
| 2.4.6 | Fase B5..... | 57 |
| 2.4.7 | Fase B6..... | 58 |
| 2.4.8 | Fase B7..... | 60 |
| 2.4.9 | Fase B8..... | 61 |
| 2.4.10 | Fase B9..... | 61 |
| 3 | Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino | 63 |
| 3.1 | Creazione del modello 3D..... | 63 |
| 3.2 | Introduzione a MSC Adams View..... | 70 |
| 3.3 | Primi passi per la creazione del modello fisico della carrozzina | 72 |
| 3.4 | Creazione dei vincoli | 78 |
| 3.5 | Creazione delle forze di contatto..... | 85 |
| 3.6 | Creazione degli input di movimento | 88 |
| 3.7 | Inserimento dei Coupler..... | 94 |
| 3.8 | Inserimento del meccanismo di sospensione..... | 97 |
| 3.9 | Aggiunta dei rotismi epicicloidali | 106 |
| 3.10 | Creazione dei sistemi di controllo per l'avanzamento della carrozzina | 117 |
| 3.11 | Inserimento del gradino e della massa utente | 125 |
| 3.12 | Creazione delle spline..... | 126 |
| 3.13 | Struttura delle simulazioni..... | 130 |
| 3.14 | Simulazione della salita del gradino (sequenza A) | 131 |
| 3.14.1 | Fase combinata A0-A1-A2..... | 132 |
| 3.14.2 | Fasi A3 A4 A5..... | 133 |

Introduzione

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.14.3 | Fasi A6 A7 A8 A9 | 134 |
| 3.14.4 | Considerazioni e confronto con la sequenza eseguita con il prototipo..... | 135 |
| 3.15 | Simulazione della discesa del gradino (sequenza B)..... | 136 |
| 3.15.1 | Fasi B0 B1 | 136 |
| 3.15.2 | Fase B2..... | 137 |
| 3.15.3 | Fasi B3 B4 B5..... | 138 |
| 3.15.4 | Fasi B6 B7 B8 B9 | 139 |
| 3.15.5 | Considerazioni sulla simulazione B | 140 |
| 4 | Lidar e rilevazione gradino..... | 141 |
| 4.1 | Il sensore Lidar..... | 141 |
| 4.2 | Collegamento Lidar / Computer – Prima versione | 144 |
| 4.3 | Collegamento Lidar / Computer – Seconda versione | 146 |
| 4.4 | Collegamento Lidar / Speedgoat | 148 |
| 4.5 | Simulazione del Lidar – scansione e misurazione gradino in salita | 150 |
| 4.6 | Prove sperimentali di scansione e misurazione gradino in salita | 159 |
| 4.7 | Scansione e rilevazione del gradino con Speedgoat e sequenza logica | 171 |
| 4.7.1 | Sequenza logica delle scansioni..... | 178 |
| 4.8 | Posizionamento del Lidar sulla carrozzina..... | 180 |
| 5 | Sistemi di controllo degli attuatori | 183 |
| 5.1 | Controllo delle ruote pivotanti | 183 |
| 5.2 | Controllo del tripode | 185 |
| 5.2.1 | Approfondimento sulla gestione della rotazione del tripode | 188 |
| 5.3 | Controllo delle ruote solari | 190 |
| 5.3.1 | Prove per il settaggio dei controllori PID delle ruote solari | 196 |
| 6 | Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano..... | 199 |
| 6.1 | Organizzazione di base del modello Simulink..... | 199 |
| 6.2 | Modalità Salita gradino, interfaccia generale e funzionamento di base | 201 |
| 6.3 | Modalità Salita gradino, sezione comandi e feedback | 204 |

Introduzione

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4 | Modalità Salita gradino, sezione controllo attuatori e settaggi..... | 208 |
| 6.5 | Modalità Salita gradino, sezione grafici..... | 209 |
| 6.6 | Modalità Salita gradino, sezione sequenza automatica di Salita gradino | 211 |
| 6.7 | Modalità Salita gradino, funzionamento di una macchina a stati..... | 213 |
| 6.8 | Modalità Salita gradino, macchina a stati Salita gradino vista nel dettaglio | 216 |
| 6.8.1 | Stato "Scansione Lidar" | 217 |
| 6.8.2 | Stato "Attesa" | 218 |
| 6.8.3 | Stato "Creazione matrice Lidar" | 221 |
| 6.8.4 | Stato "Misurazione gradino in salita" | 222 |
| 6.8.5 | Stato "Ritorno in attesa 1" | 224 |
| 6.8.6 | Stato "Ritorno in attesa 2" | 224 |
| 6.8.7 | Stato "Avvicinamento per la seconda misurazione" | 225 |
| 6.8.8 | Stato "Calcolo degli angoli" | 228 |
| 6.8.9 | Stato "A0-A1-A2" | 229 |
| 6.8.10 | Stato "A3" | 232 |
| 6.8.11 | Stato "A4" | 234 |
| 6.8.12 | Stato "A5" | 236 |
| 6.8.13 | Stato "A6" | 238 |
| 6.8.14 | Stato "A7" | 240 |
| 6.8.15 | Stato "A8" | 242 |
| 6.8.16 | Stato "A9" | 244 |
| 6.8.17 | Stato "Fine sequenza" | 246 |
| 6.9 | Modalità Marcia in piano, sequenza logica e interfaccia generale..... | 247 |
| 6.10 | Modalità Marcia in piano, sezione sequenza automatica di Marcia in piano .. | 250 |
| 6.11 | Modalità Marcia in piano, macchina a stati vista nel dettaglio | 252 |
| 6.11.1 | Stato "Attesa" | 252 |
| 6.11.2 | Stato "Riconfigurazione" | 254 |
| 6.11.3 | Stato "Movimento" | 255 |
| 7 | Test delle sequenze automatiche | 257 |

Introduzione

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.1 | Istruzioni per l'utilizzo della carrozzina | 257 |
| 7.2 | Prove di Salita del gradino | 262 |
| 7.2.1 | Prova n° 6..... | 265 |
| 7.2.2 | Prova n° 7..... | 266 |
| 7.2.3 | Grafici della Prova n° 6..... | 267 |
| 7.2.4 | Grafici della Prova n° 7 | 270 |
| 7.2.5 | Foto della Prova n° 1 | 273 |
| 7.2.6 | Commenti sulle prove, sui grafici e valutazioni su migliorie future | 278 |
| 7.3 | Prove di configurazione in Marcia in piano | 284 |
| 7.3.1 | Grafici della Prova n° 1 | 285 |
| 7.3.2 | Grafici della Prova n° 2..... | 286 |
| 8 | Conclusioni | 287 |
| 9 | Bibliografia | 289 |
| 10 | Ringraziamenti..... | 290 |

1 Introduzione

Nel mondo, circa 650 milioni di persone soffrono di almeno una forma di disabilità. Gli studi indicano che di queste il 10% necessita di una sedia a rotelle [1]. Per queste persone uno degli ostacoli principali sono le barriere architettoniche, cioè tutti quegli elementi costruttivi che limitano o impediscono gli spostamenti e l'accesso a luoghi e servizi. L'eliminazione delle barriere architettoniche rappresenterebbe la soluzione applicata alla radice del problema, ma nel caso in cui questo non sia possibile, è necessario dotare l'utente dei mezzi necessari a superare tale ostacolo. Il progetto *Wheelchair.Q* propone la realizzazione di un dispositivo montascale elettrico capace di superare singoli gradini e scale in piena autonomia, in entrambi i sensi di marcia. Nei prossimi paragrafi verranno presentati una serie di dispositivi ideati a tale scopo, alcuni già presenti sul mercato, e dei quali saranno analizzati pregi e difetti.

1.1 Classificazione dei dispositivi montascale

Secondo la Norma *ISO 7176-28:2012* [2], i dispositivi montascale si possono classificare rispetto a 3 aspetti:

1. Tipo di operatore
 - I. *Operato da un assistente*: sono quei dispositivi che hanno bisogno di una persona diversa da quella trasportata per consentire il superamento delle scale.
 - II. *Operato dall'utente*: sono quei dispositivi controllati direttamente dall'occupante.
2. Modalità di stabilizzazione
 - I. *Autostabilizzato*: sono quei dispositivi che sono in qualsiasi condizione e superficie stabili staticamente quando sono sottoposti solamente alla forza di gravità.
 - II. *Manualmente stabilizzato*: sono quei dispositivi che vengono stabilizzati mediante l'applicazione di forze erogate dal controllore.
3. Presenza del sedile
 - I. *Sedia montascale*: sono quei dispositivi montascale che includono il sedile per l'utente.
 - II. *Trasportatore montascale*: sono quei dispositivi capaci di trasportare una sedia a rotelle caricata con l'utente.

Una distinzione più pratica è la seguente:

1. Montascale fissi

2. Montascale mobili
3. Carrozine montascale

1.1.1 Montascale fissi

I montascale fissi (Figura 1.1) vengono suddivisi in “piattaforme elevatrici” o “sedie montascale”. Nel primo caso sono dotati di una pedana sulla quale può essere trasportata esclusivamente una carrozzina. Sono dotati di ringhiere e sistemi di sicurezza che hanno lo scopo di evitare la caduta della piattaforma in caso di guasto. Nel secondo caso sono dotati di una sedia che permette di ospitare un utente il quale solitamente può camminare, ma incontra difficoltà o è impossibilitato ad affrontare intere rampe di scale. È un dispositivo che permette di salire più rampe di scale senza alcuna interruzione e che può essere azionato in completa autonomia dall’utente, essendo però di complessa installazione e di grande ingombro, è uno strumento poco diffuso.



Figura 1.1 – Montascale fissi. Logic (sinistra), Vimec Capri (destra).

1.1.2 Montascale mobili

Sono degli strumenti che vengono utilizzati in accoppiata con le carrozzine (Figura 1.2), consentendo di superare rampe di scale e gradini singoli. Rispetto ai montascale fissi sono poco ingombranti, ma necessitano di un operatore esterno per renderli utilizzabili. Possono essere a cingoli o a ruote. Nel primo caso si ha il vantaggio di avere un sistema molto stabile e dal movimento regolare, ma anche pesante, inefficiente e che obbliga alla presenza di un operatore che gestisca e controlli le fasi di transizione tra marcia in piano e marcia su scale.

Introduzione



Figura 1.2 – Montascale mobile a cingoli Vimec T09 Roby.

I montascale mobili a ruote (Figura 1.3) possono essere costituiti da un sedile per ospitare l'utente oppure possono agganciare direttamente l'intera carrozzina. Sono solitamente composti da due ruote per la marcia in piano e da un meccanismo a quadrilatero articolato o biella-manovella per permettere il superamento degli ostacoli. Sono più leggeri e manovrabili rispetto a quelli a cingoli, ma non garantiscono una fase di superamento ostacolo regolare ed inoltre necessitano di un operatore esterno che li controlli.



Figura 1.3 – Montascale mobili a ruote. Tecnosan (sinistra), Yack N 961 (destra).

Una terza tipologia di montascale mobile è quello definito a "zampe rotanti" (Figura 1.4), costituito da due telai di forma triangolare che ospitano 3 ruote folli ciascuno. Grazie all'ausilio

Introduzione

di un operatore esterno che esegue la fase di salita della rampa di scale, i telai ruotano e portano consecutivamente in appoggio sui gradini superiori le singole ruote. Anche se la fase di salita che ne risulta non è uniforme, si tratta di uno strumento compatto e che presenta meccanismi semplici ed un numero ridotto di motori, per questo è il meccanismo che è stato scelto per essere la base del progetto Wheelchair.Q, con l'intento di integrarlo in una carrozzina tradizionale che possa essere usata tutti i giorni.



Figura 1.4 – Montascale mobile a zampe rotanti Scoiattolo.

1.1.3 Carrozzine montascale

Si tratta di carrozzine che sono in grado di unire le capacità di movimento in piano delle carrozzine tradizionali alla possibilità di affrontare scalinate e gradini senza la presenza di un operatore esterno.

1. *Carrozzine montascale commerciali*: sono attualmente presenti pochi modelli sul mercato e sono caratterizzati da costi elevati.
 - I. *I-Bot*: carrozzina costituita da due ruote che possono ruotare attorno al telaio, consentendo di muoversi in marcia in piano mantenendo un solo punto di contatto e premettendo di superare ostacoli (Figura 1.5). L'equilibrio in

Introduzione

marcia viene garantito in modo dinamico attraverso un sistema di controllo molto complesso; è molto compatta e dalla struttura semplice.



Figura 1.5 – I-Bot.

- II. *SCEWO*: si basa sul mantenimento in marcia dell'equilibrio dinamico (Figura 1.6), ma sfrutta un cingolo motorizzato nelle fasi di superamento ostacoli e di transizione.



Figura 1.6 - SCEWO.

- III. *B-Free*: si basa su un sistema di cingoli che movimentano la sedia sia in marcia in piano che in superamento ostacolo e durante le fasi di transizione (Figura 1.7). Si tratta di un sistema complesso ed energeticamente poco efficiente.

Introduzione



Figura 1.7 – B-Free.

- IV. *TopChair*: dotata di un doppio sistema di locomozione cingoli/ruote per gestire le fasi di transizione, si tratta di un meccanismo molto complesso (Figura 1.8).



Figura 1.8 – TopChair.

2. *Carrozine create per brevetti e pubblicazioni*: si presentano con diversi tipi di locomozione: locomozione su *zampe*; locomozione su *cingolo* e locomozione su *ruote*. Ogni tipologia di locomozione presenta vantaggi e svantaggi, per questo la maggior parte dei brevetti presenta un sistema ibrido (Tabella 1.1) con lo scopo di ottenere una migliore efficienza energetica.

Introduzione

Tabella 1.1 – Tipologie di locomozione.

| Tipologia | Vantaggi | Svantaggi |
|----------------|--|--|
| Zampe | Ottima capacità nel superamento ostacoli | Struttura meccanica complessa |
| Cingolo | Regolarità e sicurezza in salita scale | Bassa efficienza in marcia in piano e scarsa manovrabilità |
| Ruote | Ottima manovrabilità ed efficienza | Scarsa abilità nel superamento ostacoli |

- I. *Carrozzine a zampe*: sono in grado di superare facilmente gli ostacoli, ma presentano strutture meccaniche molto complesse e sono equipaggiate con numerosi sensori per il controllo dei movimenti e dell'equilibrio (Figura 1.9).



Figura 1.9 – Carrozzina a zampe Bang.

- II. *Carrozzine a ruote e cingoli*: sistema ibrido in cui le ruote vengono utilizzate in marcia in piano e i cingoli in fase di salita scale; è una struttura pesante, costituita da una doppia motorizzazione (Figura 1.10).

Introduzione

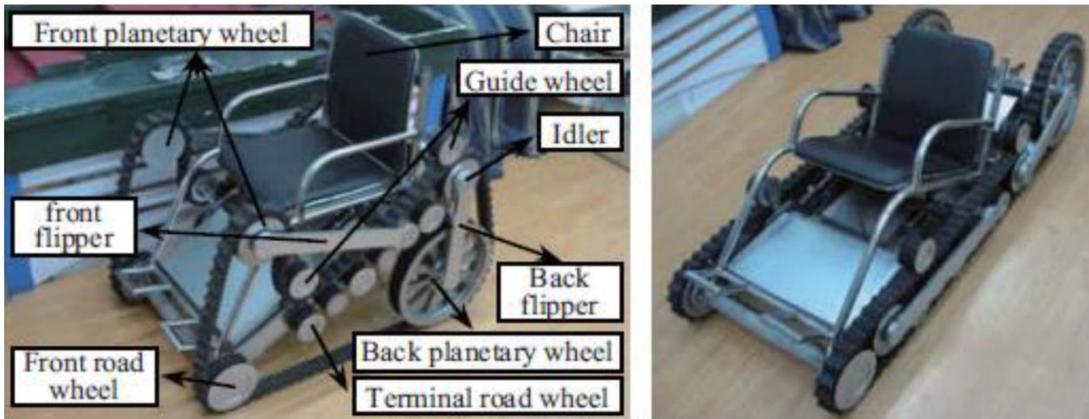


Figura 1.10 – Carrozzina a ruote e cingoli Yu.

- III. *Carrozzine a ruote e zampe*: uniscono la capacità delle ruote di marciare in piano con efficienza all'agilità delle zampe (Figura 1.11). Il sistema di leveraggi e bracci adottato permette di sollevare di volta in volta le ruote anteriori e posteriori e portarle sul gradino più alto. Non avendo cingoli la struttura è molto leggera, ma necessita comunque di molti sensori, attuatori e di un complesso sistema di controllo.

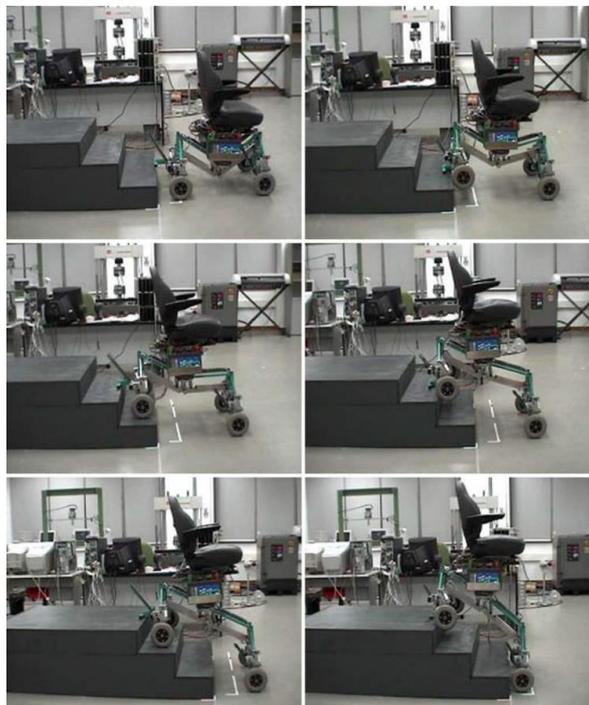


Figura 1.11 – Carrozzina a ruote e zampe R. Morales.

Introduzione

- IV. *Carrozzine a zampe rotanti*: sono costituite da un gruppo di ruote collegate al telaio attraverso un'unità motrice rotante. Permette di superare gli ostacoli con molta semplicità e senza ricorrere a numerosi sensori. Ha un grosso limite che è la mancanza di un terzo appoggio che permetta all'utente di essere autonomo, rendendo necessaria la presenza di un utente esterno per compensare l'instabilità della sedia. Nel primo modello mostrato (Figura 1.12) la carrozzina ha due unità motrici e sei ruote, una per ogni vertice dell'unità rotante.

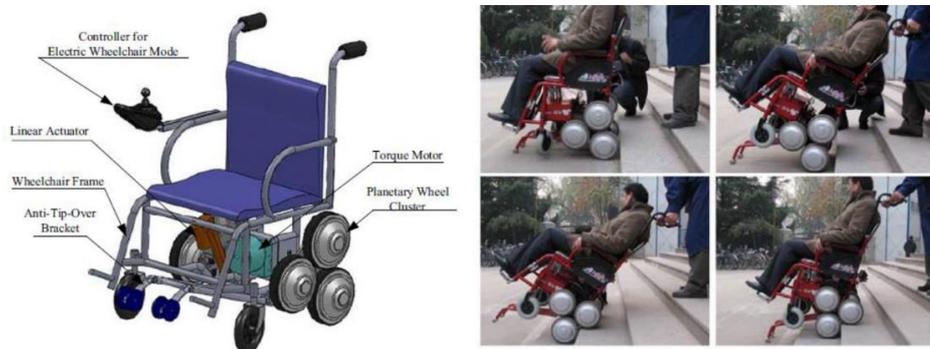


Figura 1.12 – Carrozzina a zampe rotanti L.Fang – Modello 1.

Una seconda variante (Figura 1.13) possiede le unità di locomozione costituite da quattro ruote poste ai vertici di un quadrilatero articolato. Questo sistema permette di avere la stabilità necessaria ad evitare la presenza di un utente esterno.

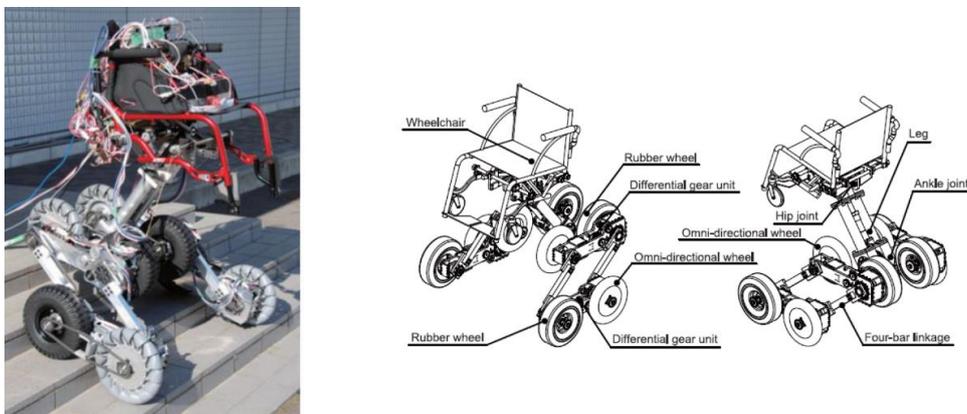


Figura 1.13 – Carrozzina a zampe rotanti Sugahara – Modello 2.

Introduzione

Una terza variante (Figura 1.14) utilizza quattro unità di locomozione motorizzate costituite da un telaio con tre bracci, ciascuno dei quali porta una ruota all'estremità. Ciascuna unità di locomozione ha due gradi di libertà: la rotazione delle ruote rispetto alla struttura dell'unità di locomozione e la rotazione dell'unità di locomozione attorno a telaio. In totale si hanno otto attuatori per otto gradi di libertà. Si ha inoltre un telaio allungabile in modo passivo, che permette la salita e discesa delle scale.

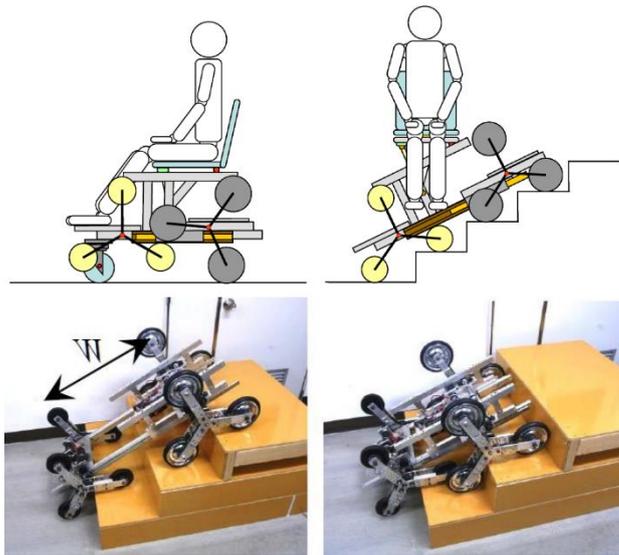


Figura 1.14 – Carrozzina a zampe rotanti Yamamoto – Modello 3.

Una quarta variante (Figura 1.15) possiede due unità di locomozione costituite da un telaio a tre bracci ciascuno dei quali monta una ruota all'estremità. In questo caso l'equilibrio della struttura è garantito da due pattini anteriori e due pattini posteriori articolati rispetto al telaio, i quali strisciano rispetto alle scale fornendo dei punti di contatto aggiuntivi. In questo caso sia il meccanismo articolato che il sistema di controllo sono molto complessi.

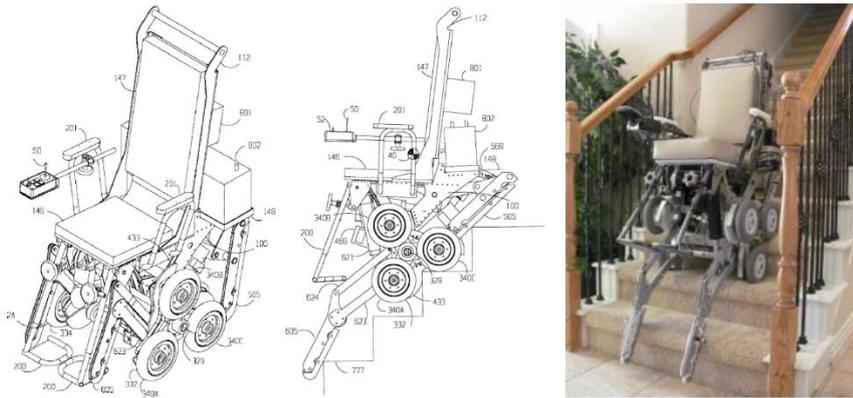


Figura 1.15 – Carrozzina a zampe rotanti Cox – Modello 4.

1.2 Riepilogo

La panoramica introdotta ha permesso di analizzare diversi tipi di soluzioni costruttive e di individuarne punti di forza e di debolezza. L'obiettivo è dunque quello di realizzare una carrozzina in grado di muoversi in marcia in piano come una normale carrozzina elettrica e di essere in grado di superare singoli gradini e intere rampe di scale, sia in salita che in discesa, in maniera stabile, sicura e autonoma. Deve anche essere leggera, di dimensioni contenute ed utilizzabile in ambienti interni ed esterni. Infine deve essere semplice dal punto di vista meccanico e dei sistemi di controllo, nonché esteticamente gradevole. Le carrozzine montascale autostabilizzanti operate dall'utente sono quelle che nel complesso offrono le caratteristiche migliori e sono la base del progetto *Wheelchair.Q*. L'obiettivo del progetto è quello di realizzare una carrozzina con le caratteristiche viste in precedenza e che vada a superare alcuni limiti riscontrati nei vari dispositivi mostrati in questo capitolo. Nello specifico tali limiti riguardano:

1. Dimensioni eccessive per l'utilizzo in ambienti interni;
2. Bassa efficienza dei cingoli motorizzati durante la locomozione;
3. Difficoltà nel gestire la transizione tra moto piano e moto su scala;
4. Complessità della struttura meccanica;
5. Complessità del sistema di controllo.

Analizzato lo stato dell'arte, le caratteristiche negative e positive dei vari modelli e protipi è possibile identificare i requisiti di progetto della carrozzina che si vuole costruire.

1.3 Requisiti di progetto Wheelchair.q

I requisiti di progetto della carrozzina riguardano le tipologie di scale che il dispositivo deve essere in grado di superare e una serie di vincoli geometrici e funzionali che hanno lo scopo di giungere agli obiettivi visti in precedenza. Per la definizione di tali vincoli si è fatto riferimento alla normativa *ISO 7176-28:2012* [2]. Nella norma si ha una classificazione dei dispositivi in base alle caratteristiche di funzionamento e sono descritti inoltre i requisiti di sicurezza e i metodi di prova per verificarne il funzionamento. Ad esempio, la norma richiede che il dispositivo si trovi sempre in condizione di equilibrio statico in qualsiasi configurazione assunta per il superamento delle barriere architettoniche.

1.3.1 Caratteristiche di una scala

A livello geometrico (Figura 1.16) una scala è definita nella seguente maniera (Tabella 1.2):

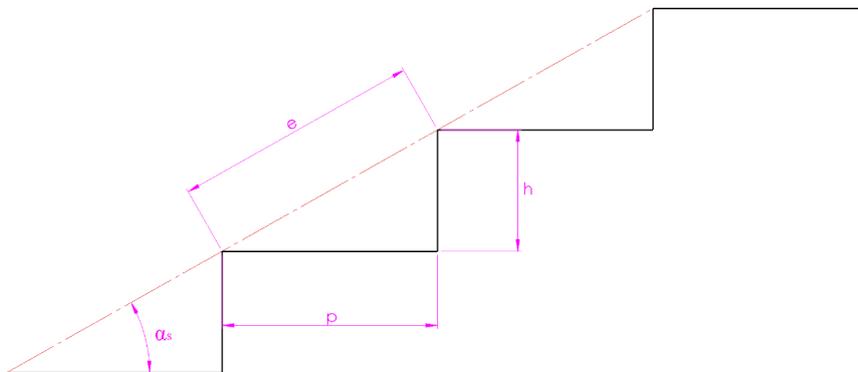


Figura 1.16 – Geometria scala

Tabella 1.2 – Geometria scala.

| Simbolo | Descrizione |
|------------|----------------|
| p | Pedata |
| h | Alzata |
| e | Passo scalino |
| α_s | Pendenza scala |

Introduzione

La normativa *UNI10804-gen1999* [3] dice che possono essere definite tre tipologie di scale classificate a seconda della tipologia d'uso. La norma fa riferimento alla formula di "Blondel" legando i parametri p e h secondo l'equazione:

$$2h + p = 620 \div 640 \quad \text{Pubblico e Privato principale}$$

$$2h + p = 600 \div 660 \quad \text{Privato secondario}$$

Applicando tale equazione si ricavano i parametri caratteristici per le tre tipologie di scale (Tabella 1.3):

Tabella 1.3 – Tipologie di scale.

| Destinazione d'uso | p (mm) | h (mm) | α_s (°) | e (mm) |
|---------------------------|----------|----------|----------------|----------|
| Publico | 300 | 170 | 29.5 | 345 |
| Privato principale | 250 | 190 | 37 | 314 |
| Privato secondario | 220 | 210 | 43.7 | 304 |

Come requisiti di progetto sono state considerate le scale con destinazione d'uso "Pubblico" e "Privato principale". La tipologia "Privato secondario" è stata scartata in quanto poco diffusa, ma estremamente impegnativa dal punto di vista progettuale. Durante la fase di progettazione è stata inoltre definita un'altra tipologia di scala detta "Scala nominale" la quale ha un passo e^* pari a 277.19 mm. Tale caratteristica permette al punto P del tripode (Figura 1.17) di avere una traiettoria definita come un susseguirsi di archi di circonferenza centrati in W e di raggio pari alla circonferenza PW (i punti P e W saranno definiti nel seguente capitolo).

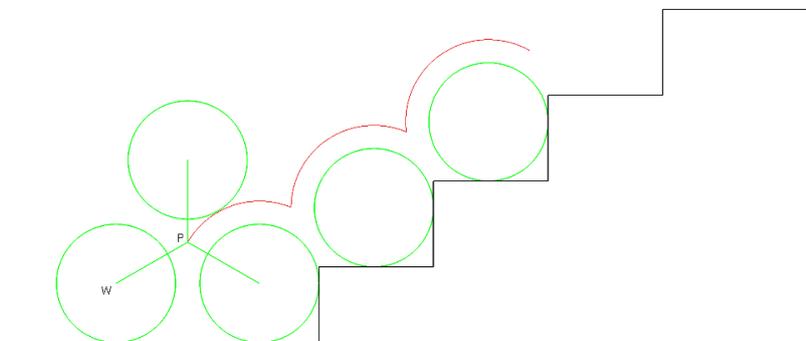


Figura 1.17 – Scala nominale

Introduzione

Applicando alla scala nominale la formula di Blondel si ottiene un valore pari a 555, pertanto questo tipo di scala non è a norma, viene utilizzata soltanto come riferimento per lo studio della cinematica del punto P, rendendola più semplice. Inoltre il valore della pedata nominale risulta inferiore a quelli che si trovano nelle scale a norma, questo assicura che la ruota anteriore del tripode dopo la rotazione del portatreno in fase di salita/discesa scale, non si trovi mai nella situazione in cui tocchi l'alzata del gradino successivo prima di raggiungere una condizione di appoggio stabile sulla pedata. Tale scala possiede le seguenti dimensioni (Tabella 1.4):

| Tabella 1.4 – Scala nominale. | | | |
|-------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
| p (mm) | h (mm) | α_s (°) | e (mm) |
| 221.32 | 166.78 | 37 | 277.13 |

1.3.2 Requisiti geometrici e funzionali

Nella Tabella 1.5 sono elencati alcune caratteristiche che rientrano tra i requisiti di progetto:

| Tabella 1.5 – Requisiti. | |
|---|---------------|
| Grandezza | Valore |
| Larghezza massima veicolo | 0.65 – 0.7 m |
| Velocità massima in marcia in piano | 10 km/h |
| Pendenza massima rampa | 10° |
| Velocità massima di avanzamento su rampa | 5 km/h |
| Velocità di salita scala | 5 s/scalino |
| Altezza massimo scalino superabile | 240 mm |
| Altezza massimo scalino superabile in marcia avanti | 200 mm |

1.3.3 Altri requisiti

Nella maggior parte delle carrozzine la sequenza di salita di un singolo gradino e di salita di un'intera scala vengono effettuate allo stesso modo e con l'utente posizionato di spalle rispetto all'ostacolo. Nel caso qui proposto le due sequenze sono diversificate: la salita di un singolo gradino avviene con l'utente rivolto verso di esso, sfruttando la capacità del tripode di arrampicarsi, mentre la salita di una scala avviene con l'utente girato di spalle, sfruttando il cingolo motorizzato. Questo permette, nel caso di superamento di marciapiedi o singoli

ostacoli, di risparmiare molto tempo. Anche la discesa di un singolo gradino avviene con l'utente rivolto verso di esso, sfruttando il tripode, mentre la discesa di una scala avviene con l'utente rivolto verso di essa, ma sfruttando il cingolo. Affrontare gli ostacoli frontalmente, che sia in salita o che sia in discesa, ha anche una forte componente psicologica, garantendo all'utente un maggiore senso di sicurezza rispetto al dare le spalle all'ostacolo e fare totale affidamento alla macchina.

1.4 Versioni precedenti di Wheelchair.Q

In questo capitolo verranno mostrate tutte le versioni precedenti che hanno portato alla realizzazione del prototipo definitivo *q05*, ciascuna con evidenziate le sue problematiche. Il prototipo *q05* è stato l'unico realizzato fisicamente.

1.4.1 *Wheelchair.q01*

La prima versione della carrozzina (Figura 1.18) è caratterizzata da due unità di locomozione posteriori e da due unità folli anteriori. È in grado di salire le scale con semplicità, ma presenta diversi problemi: è lunga e ingombrante, poco manovrabile e non è possibile controllare la rotazione del gruppo di locomozione. Questo porta alla conseguenza che in discesa la struttura sia lasciata in caduta libera, condizione non accettabile dalla normativa.

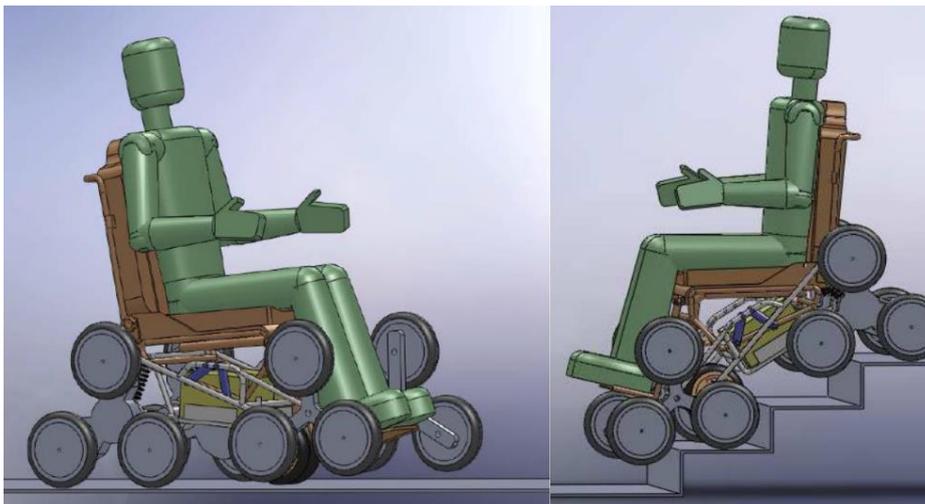


Figura 1.18 – Wheelchair.q01

1.4.2 *Wheelchair.q02*

Riducendo la dimensione delle unità folli anteriori viene ridotto l'ingombro della struttura. Una criticità è la presenza di oscillazioni durante il moto di salita e discesa, dovute alla mancata sincronizzazione tra unità anteriori e posteriori (Figura 1.19). Tale problema viene risolto da un sistema di attuazione della sedia che garantisce all'utente una traiettoria regolare.

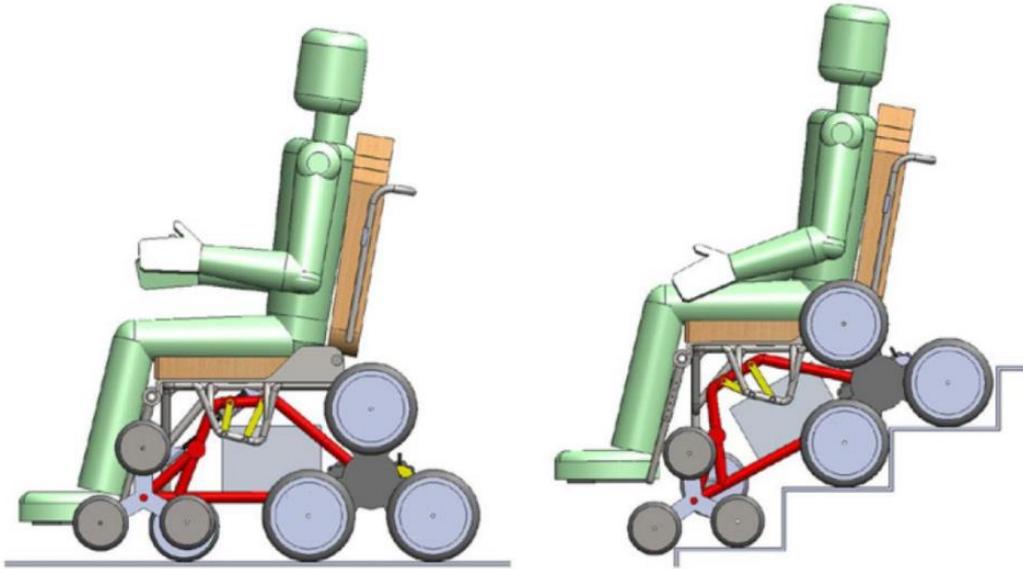


Figura 1.19 - Wheelchair.q02

1.4.3 *Wheelchair.q03*

Per risolvere il problema delle oscillazioni le unità folli anteriori vengono sostituite con delle ruote pivotanti per la condizione di marcia in piano, mentre è stato introdotto un cingolo non motorizzato né frenato per il moto su scala (Figura 1.20). La struttura diventa così più compatta, inoltre il problema della discesa delle scale viene risolto gestendo il moto dell'unità di locomozione tramite un terzo motore collegato tramite un albero e due coppie di ruote dentate alla struttura del portatreno di entrambe le unità di locomozione.

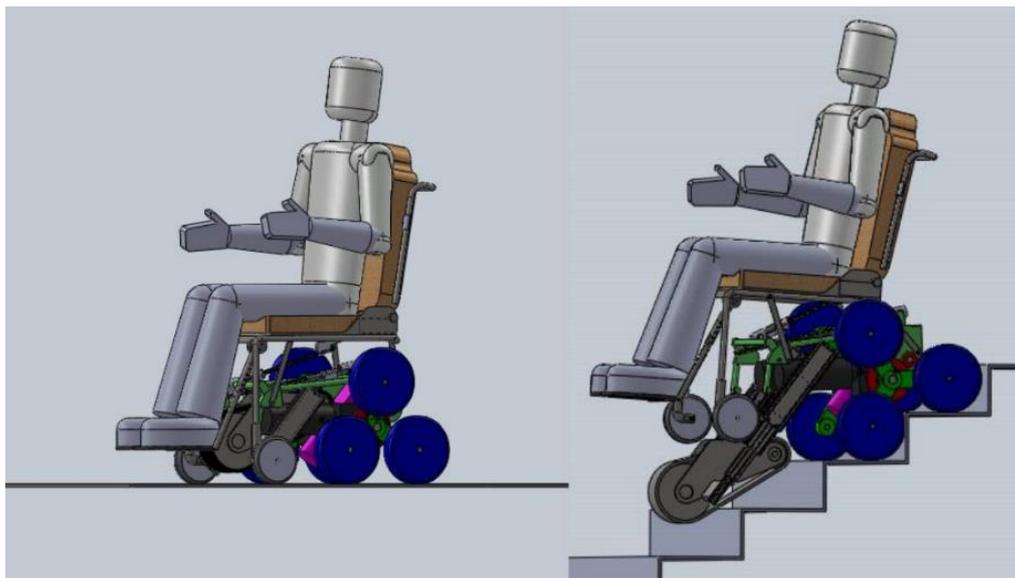


Figura 1.20 - Wheelchair.q03

1.4.4 Wheelchair.q04

Questa versione consiste in un'ottimizzazione della terza versione, con riduzione degli ingombri e semplificazione dei meccanismi, inoltre si è cercato di avvicinare il più possibile l'utente alla scala per migliorare la stabilità del sistema (Figura 1.21). E' stato inoltre ottimizzato il cingolo per ridurre le oscillazioni e aumentare l'efficienza.

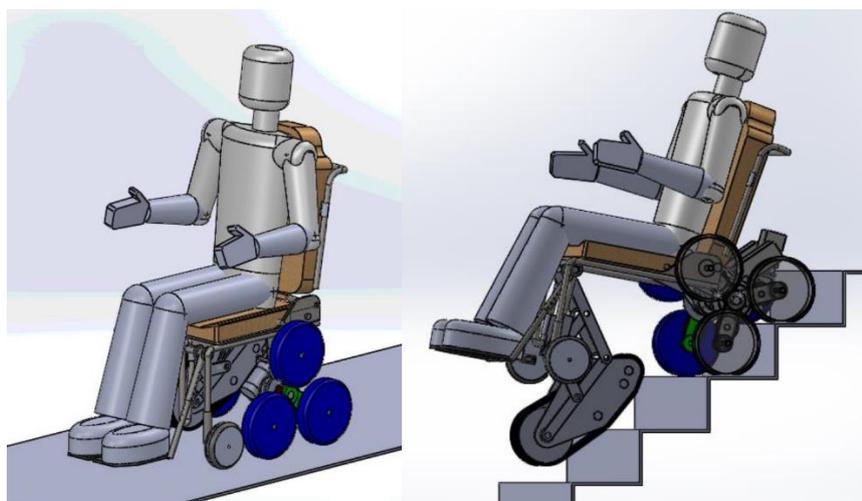


Figura 1.21 - Wheelchair.q04

Introduzione

L'ultima versione, denominata Wheelchair.q05, che presentata nel prossimo capitolo, nasce con lo scopo di rendere più semplice, compatto, stabile e confortevole il prototipo q04. E' una versione profondamente rivista del modello q04 ed è stata l'unica realizzata fisicamente.

2 Cinematica e sequenze automatiche

2.1 Generalità

In questo capitolo verranno mostrati gli schemi cinematici della carrozzina *Wheelchair.q05* e le sue caratteristiche principali, prestando attenzione ai sistemi di riferimento e alle convenzioni utilizzate per la descrizione del sistema. Verranno inoltre studiate le sequenze automatiche che la carrozzina dovrà essere in grado di eseguire per superare un gradino. Gli schemi derivano da un processo di sintesi cinematica svolto nelle tesi precedenti [4] che hanno permesso di definire la struttura della carrozzina e dei meccanismi che la compongono. I punti chiave del processo di sintesi cinematica sono:

1. L'unità di locomozione posizionata anteriormente che garantisce un'appropriata distribuzione a terra delle forze di contatto;
2. Il cingolo ha una lunghezza tale che garantisce sempre il contatto con due gradini consecutivi della scala, questo permette di avere una regolarità del movimento in salita e in discesa;
3. Le dimensioni del tripode sono tali da consentire il superamento di scale costruite secondo normativa (*UNI10804-gen1999* [3]) e nel contempo ridurre al minimo le irregolarità della traiettoria del tripode stesso;
4. La struttura del telaio permette di regolare altezza e inclinazione della sedia, correggendo le irregolarità della traiettoria del tripode durante la salita e discesa scale, migliorando il comfort dell'utente.

I risultati della sintesi cinematica hanno permesso quindi di realizzare lo schema base della sedia che è illustrato nel *Capitolo 2.2*, uno scheletro sul quale è stato inizialmente realizzato il modello 3D e poi costruito il prototipo. Tale schema, inoltre, è servito come punto di partenza per studiare le sequenze automatiche.

2.2 Struttura cinematica

La carrozzina elettrica *Wheelchair.q05* (Figura 2.1, Tabella 2.1) è costituita dai seguenti elementi cinematici:

1. *Sotto-telaio PC* (in rosso): è la struttura di base sulla quale sono vincolati gli altri elementi cinematici e la maggior parte degli attuatori. La sua inclinazione rispetto al piano orizzontale può variare a causa del movimento del gruppo di locomozione e del gruppo pivotanti.
2. *Gruppo di locomozione (tripode o portatreno)* (in verde): è l'elemento cinematico che, potendo ruotare attorno al punto P di 360° in entrambi i sensi, permette alla carrozzina di superare ostacoli come gradini o scale. I tripodi sinistro e destro ruotano in modo sincronizzato in quanto vincolati e sono entrambi movimentati da un singolo motoriduttore che trasferisce loro il movimento tramite un albero in comune e due cinghie. All'interno di ogni tripode è presente un rotismo epicicloidale che consente, imponendo una rotazione ad una ruota dentata solare vincolata nel punto P, di ruotare in modo sincronizzato i tre pneumatici attorno ai punti W. Il movimento viene imposto alla ruota solare da un motoriduttore direttamente collegato ad essa; è presente un motoriduttore per tripode, consentendo di imporre movimenti diversi agli pneumatici del lato sinistro e destro, questo permette alla carrozzina di avanzare, indietreggiare e curvare sul piano. I movimenti di rotazione del tripode e spostamento della carrozzina possono avvenire in contemporanea o in modo separato, essendo controllati in totale da 3 attuatori diversi.
3. *Gruppo pivotanti* (in celeste): si tratta di un insieme di due aste vincolate a due ruote pivotanti folli che ruotano in entrambi i sensi ed in modo sincronizzato attorno al punto D, movimentate da un singolo motoriduttore. Consentono di modificare l'inclinazione del sotto-telaio PC, con l'effetto principale di modificare la posizione del baricentro della carrozzina rispetto al tripode. Solitamente lavorano in sinergia con il gruppo di locomozione per modificare o mantenere costante l'inclinazione della carrozzina.

4. *Gruppo cingolo* (magenta): elemento costituito da un'asta e da un cingolo non motorizzato che ruota attorno al punto E grazie ad un motoriduttore. Consente di creare un terzo punto di appoggio nelle fasi di superamento di una scala.
5. *Sotto-telaio RC* (blu): elemento incernierato al sotto-telaio PC nel punto C, il quale può ruotare rispetto ad esso grazie ad un motoriduttore posizionato sotto la seduta. Quest'ultima è vincolata al sotto-telaio RC ed è regolabile lungo il segmento RC. La rotazione reciproca tra i due sotto-telai consente di inclinare la seduta, ottimizzando la posizione del baricentro della carrozzina e il livello di comfort dell'utente.

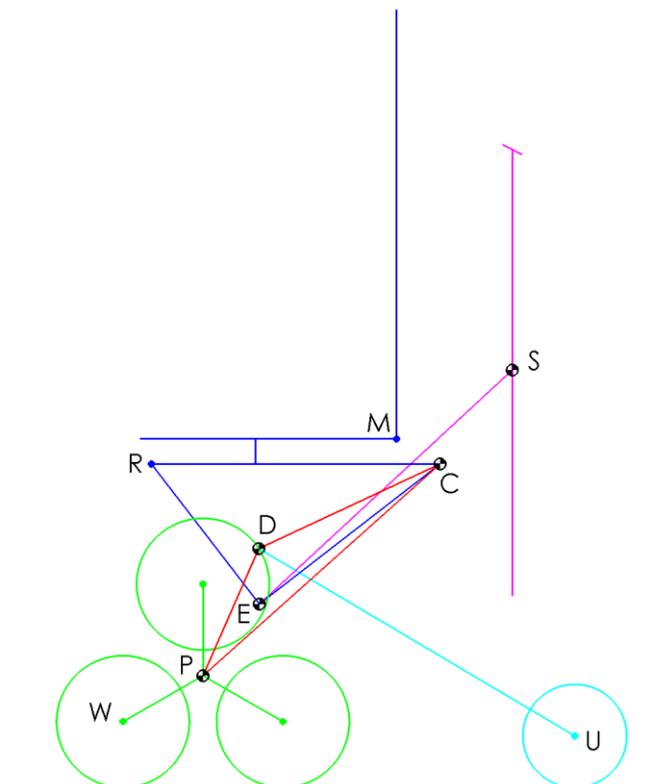


Figura 2.1 – Schema Wheelchair.q05.

Tabella 2.1 – Elementi cinematici.

| Colore | Elemento |
|---------|--|
| Verde | Gruppo di locomozione (tripode o portatreno) |
| Rosso | Sotto-telaio PC |
| Blu | Sotto-telaio RC |
| Celeste | Gruppo pivotanti |
| Magenta | Gruppo cingolo |

La struttura possiede i seguenti gradi di libertà (Tabella 2.2):

1. La rotazione del gruppo di locomozione attorno al punto P. Il movimento viene impresso da un motoriduttore che permette una rotazione sincronizzata dei tripodi di 360° in entrambi i sensi. La posizione del gruppo di locomozione rispetto al sotto-telaio PC viene definita dall'angolo θ_P .
2. La rotazione del gruppo pivotanti attorno al punto D. Le due aste possono sollevarsi o abbassarsi in modo sincronizzato grazie al movimento impresso da un motoriduttore. La posizione del gruppo pivotanti rispetto al sotto-telaio PC viene definita dall'angolo θ_{DU} .
3. La rotazione del sotto-telaio RC attorno al punto C. Il sotto-telaio RC, e quindi la seduta, può alzarsi o abbassarsi grazie al movimento impresso da un motoriduttore. La posizione del sotto-telaio RC rispetto a quella del sotto-telaio PC viene definita dall'angolo β .
4. La rotazione del gruppo cingolo attorno al punto E. L'asta che supporta il cingolo può alzarsi o abbassarsi grazie al movimento impresso da un motoriduttore. La posizione dell'asta rispetto al sotto-telaio RC viene definita dall'angolo θ_{ES} .
5. La rotazione del cingolo attorno al punto S dell'asta che lo supporta. È un movimento libero. La posizione del cingolo rispetto all'asta viene definita dall'angolo θ_T .
6. Lo scorrimento in entrambi i sensi del cingolo. È un movimento libero, si tratta cioè di un cingolo folle.
7. La rotazione delle ruote folli vincolate sul punto U delle rispettive aste.
8. La rotazione della ruota solare sinistra posizionata nel punto P. Essa può ruotare a velocità diverse e in entrambi i sensi grazie al movimento impresso da un motoriduttore.
9. La rotazione della ruota solare destra posizionata nel punto P. Essa può ruotare a velocità diverse e in entrambi i sensi grazie al movimento impresso da un motoriduttore. Combinata alla rotazione della ruota solare sinistra, permette alla carrozzina di avanzare, indietreggiare, curvare e ruotare sul posto.

Tabella 2.2 – Gradi di libertà.

| Angolo | Descrizione | Range angolo (°) | Attuato |
|------------------|---|-------------------------------|---------|
| ϑ_P | Rotazione del gruppo di locomozione attorno al punto P del sotto-telaio PC | Rotazione completa | Sì |
| ϑ_{DU} | Abbassamento/sollevamento del gruppo pivotanti attorno al punto D del sotto-telaio PC | 10 ÷ 122 | Sì |
| β | Abbassamento/sollevamento del sotto-telaio RC attorno al punto C del sotto-telaio PC | 29 ÷ 47 | Sì |
| ϑ_{ES} | Abbassamento/sollevamento dell'asta che regge il cingolo attorno al punto E del sotto-telaio RC | -4 ÷ 30 | Sì |
| ϑ_T | Rotazione del cingolo attorno al punto S dell'asta a cui è vincolato | 0 ÷ 40 | No |
| / | Scorrimento del cingolo all'interno del suo telaio vincolato al punto S | Scorrimento senza limitazioni | No |
| / | Rotazione delle ruote pivotanti attorno al punto U delle aste a cui sono vincolate. | Rotazione completa | No |
| / | Rotazione della ruota solare sinistra attorno al punto P | Rotazione completa | Sì |
| / | Rotazione della ruota solare destra attorno al punto P | Rotazione completa | Sì |

Per visualizzare graficamente il funzionamento dei gradi di libertà e rappresentare le quote geometriche della carrozzina è prima necessario studiare le convenzioni utilizzate per la definizione della struttura e del suo funzionamento (Tabella 2.3).

Tabella 2.3 – Convenzioni.

| Simbolo | Significato |
|---------------|--|
| l_{ij} | Lunghezza tra la cerniera/punto i e la cerniera/punto j |
| ϑ | Angolo tra due sistemi di riferimento mobili |
| Θ | Angolo tra un sistema di riferimento mobile e un sistema di riferimento fisso parallelo al piano di appoggio |
| α_{ij} | Angolo fisso che descrive la posizione di un punto/cerniera |
| (x,y) | Sistema di riferimento mobile |
| (X,Y) | Sistema di riferimento fisso |
| β | Angolo relativo tra i due sotto-telai |

Cinematica e sequenze automatiche

È inoltre fondamentale comprendere la definizione degli angoli e le loro convenzioni di segno in base ai sistemi di riferimento che verranno inseriti nello schema della carrozzina (Figura 2.2).

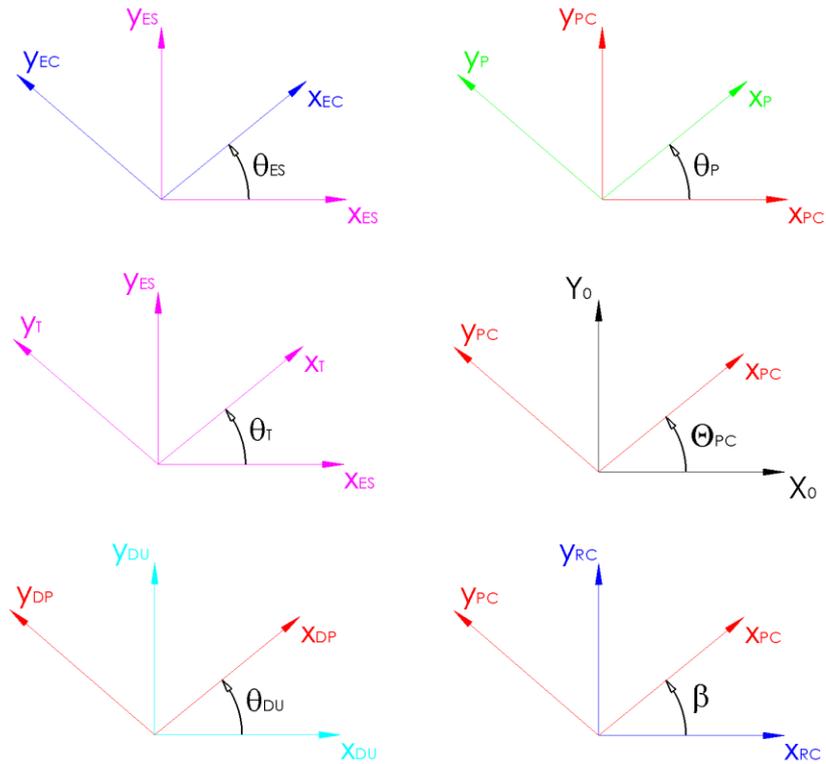


Figura 2.2 – Definizione angoli e convenzioni di segno.

Cinematica e sequenze automatiche

Ora che sono note tutte le convenzioni è possibile rappresentare le grandezze geometriche elencate in *Tabella 2.4* e *Tabella 2.5* e la disposizione degli angoli che definiscono i gradi di libertà (*Tabella 2.2*) con i relativi sistemi di riferimento (*Figura 2.3*).

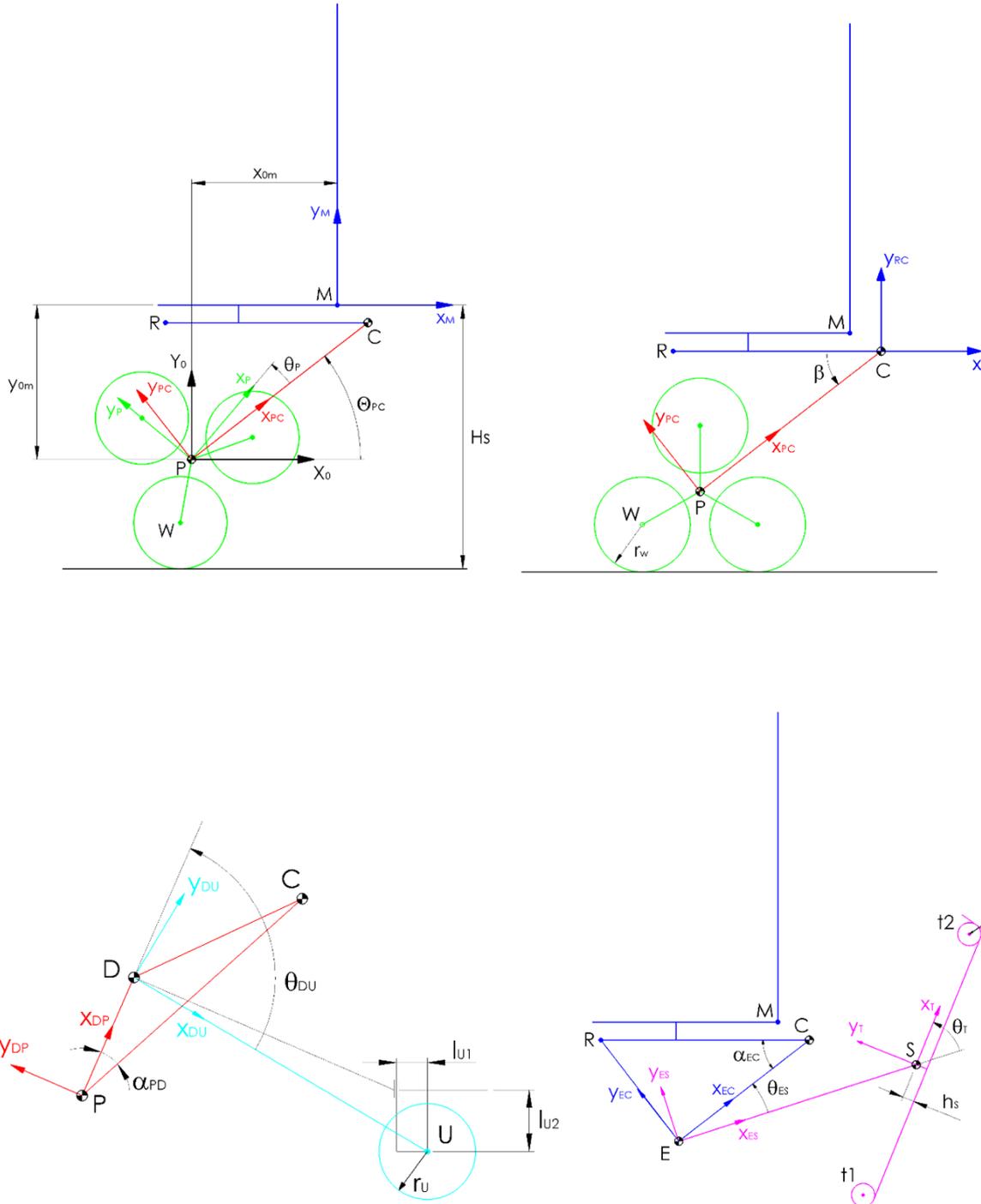


Figura 2.3 - Angoli e grandezze caratteristiche.

I gradi di libertà elencati in *Tabella 2.2* hanno dei campi di mobilità visibili in *Figura 2.4* e *Figura 2.5*.

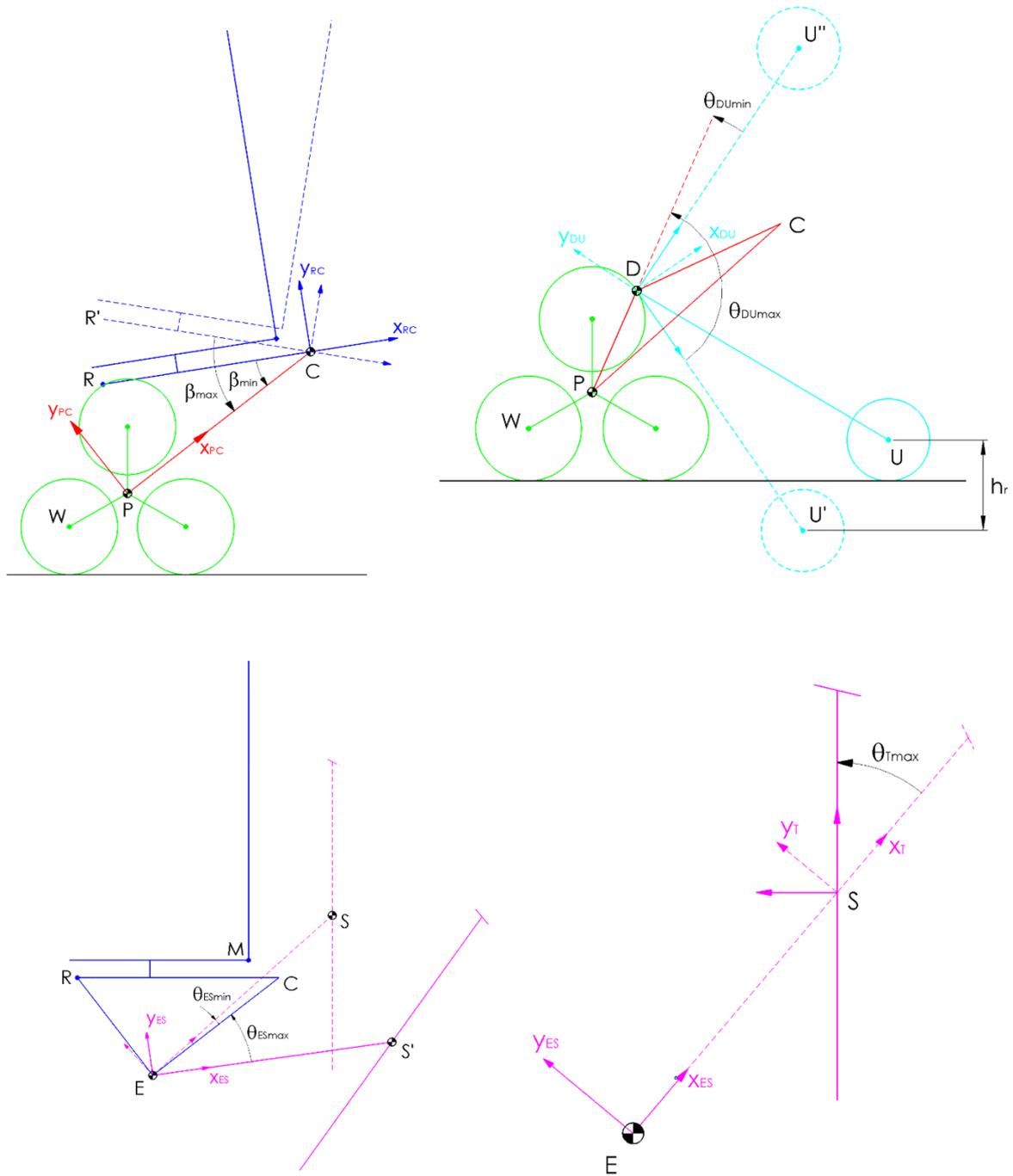


Figura 2.4 - Campi di mobilità e gradi di libertà - Parte 1.

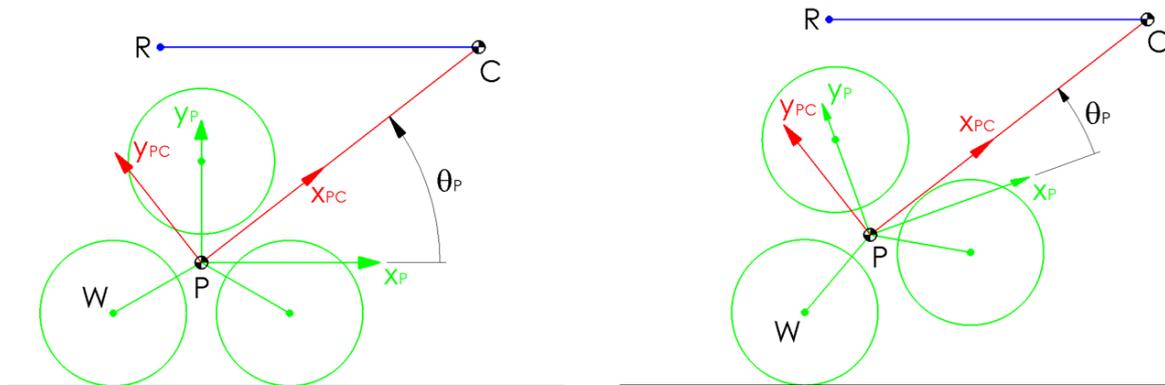


Figura 2.5 - Campi di mobilità e gradi di libertà - Parte 2.

È ora possibile elencare le quote geometriche di tutti gli elementi della struttura (Tabella 2.4, Tabella 2.5).

Tabella 2.4- Lunghezze e raggi.

| Lunghezze e raggi | Valore (mm) |
|-------------------|-------------|
| l_{PW} | 160 |
| l_{PC} | 552.64 |
| r_W | 115 |
| h_s | 35 |
| l_{ES} | 599 |
| l_{CE} | 397.26 |
| l_{st1} | 395 |
| l_{st2} | 385 |
| r_t | 27.44 |
| l_{PD} | 246 |
| l_{DU} | 637.64 |
| l_{U1} | 69.5 |
| l_{U2} | 113.22 |
| r_U | 56 |
| H_s | 580 |
| x_m | 360 |
| y_m | 386 |

Tabella 2.5 – Angoli.

| Angoli | Valore (°) |
|---------------|------------|
| α_{EC} | 38 |
| α_{PD} | 24.47 |

La carrozzina, come vedremo nel *Capitolo 7*, è dotata di una modalità chiamata “*Marcia in piano*”; in tale condizione (Tabella 2.6) la carrozzina si trova nella configurazione ottimale di tutti i suoi gradi di libertà per procedere su strada. L’utente si trova in una posizione perfettamente orizzontale e si ha un consumo minimo di energia, avendo un solo pneumatico per tripode a contatto con il terreno. Tale condizione verrà usata come configurazione di default della carrozzina nelle simulazioni presenti nel *Capitolo 3*.

Tabella 2.6 – Angoli di funzionamento in marcia in piano con una ruota del tripode poggiata.

| Angoli | Valore (°) |
|-------------------|------------|
| β_0 | 38 |
| ϑ_{P0} | -32 |
| ϑ_{DU0} | 98.07 |
| ϑ_{ES0} | 0 |
| ϑ_{T0} | 40 |
| Θ_{PC0} | 38 |

Nel caso si vogliano mantenere due pneumatici per tripode a contatto con il terreno la configurazione dei gradi di libertà cambia nel seguente modo (Tabella 2.7); si tratta in ogni caso di una condizione sconsigliata in condizioni di marcia su strada in quanto aumenta il consumo energetico necessario per gli spostamenti. Può essere invece utile su terreni cedevoli per distribuire il carico normale in più punti di contatto.

Tabella 2.7 – Angoli di funzionamento in marcia in piano con due ruote del tripode poggiate.

| Angoli | Valore (°) |
|--------------------|------------|
| β_{00} | 38 |
| ϑ_{P00} | -38 |
| ϑ_{DU00} | 96.53 |
| ϑ_{ES00} | 0 |
| ϑ_{T00} | 40 |
| Θ_{PC00} | 38 |

2.3 Sequenza A – Salita di un singolo gradino

La sequenza di *Salita gradino* rappresenta il focus principale del lavoro di tesi; si tratta di un processo da automatizzare che consentirebbe alla carrozzina, partendo da una configurazione qualsiasi dei suoi gradi di libertà, di superare in modo totalmente autonomo un singolo gradino posto di fronte ad essa, azionando gli attuatori in base alla distanza di partenza dal gradino e all'altezza di esso. Le grandezze geometriche del gradino vengono rilevate grazie ad un sensore Lidar (descritto nel *Capitolo 4*) azionato dall'utente nel momento in cui vuole procedere con il superamento dell'ostacolo.

La logica di processo (Figura 2.6) viene descritta qui di seguito. L'utente, in seguito ad un normale spostamento su strada, si trova di fronte ad un gradino (ad esempio un marciapiede) ed è costretto a fermarsi; i gradi di libertà della carrozzina possono trovarsi in qualsiasi configurazione di partenza. L'utente seleziona tramite la propria interfaccia la "*Modalità di Salita gradino*" e preme l'interruttore che permette al Lidar di iniziare la scansione dell'ostacolo. Il Lidar procede con l'estrapolazione delle grandezze geometriche del gradino: distanza della carrozzina dal gradino (d), altezza del gradino (h), spazio successivo al gradino (e) ed esegue una valutazione sulla sua superabilità basata sulle caratteristiche fisiche della carrozzina e geometriche del gradino (*condizione*). Se il gradino viene rilevato ad una distanza (d) troppo grande per garantire una buona precisione delle altre grandezze, la carrozzina esegue in modo autonomo un avvicinamento al gradino e, una volta terminato l'avanzamento, ripete la scansione e l'estrapolazione delle quote (in tale caso si parlerà nella trattazione di "*Scansione grossolana*" e "*Scansione di precisione*"); se il Lidar rileva il gradino ad una distanza che consente da subito misurazioni accurate e il gradino viene ritenuto superabile, la carrozzina procede con la sequenza automatica (in tale caso si parlerà nella trattazione di sola "*Scansione di precisione*"). Nel caso in cui il gradino sia valutato non superabile la carrozzina non procede con la sequenza automatica. L'algoritmo ricava quindi, a partire dalla distanza (d) e dall'altezza del gradino (h) i segnali da inviare ai sistemi di controllo degli attuatori e procede con la sequenza di superamento dell'ostacolo. Una volta completato il procedimento la carrozzina torna governabile dall'utente. In Tabella 2.8 è presente un riepilogo delle grandezze visibili nello schema.

Cinematica e sequenze automatiche

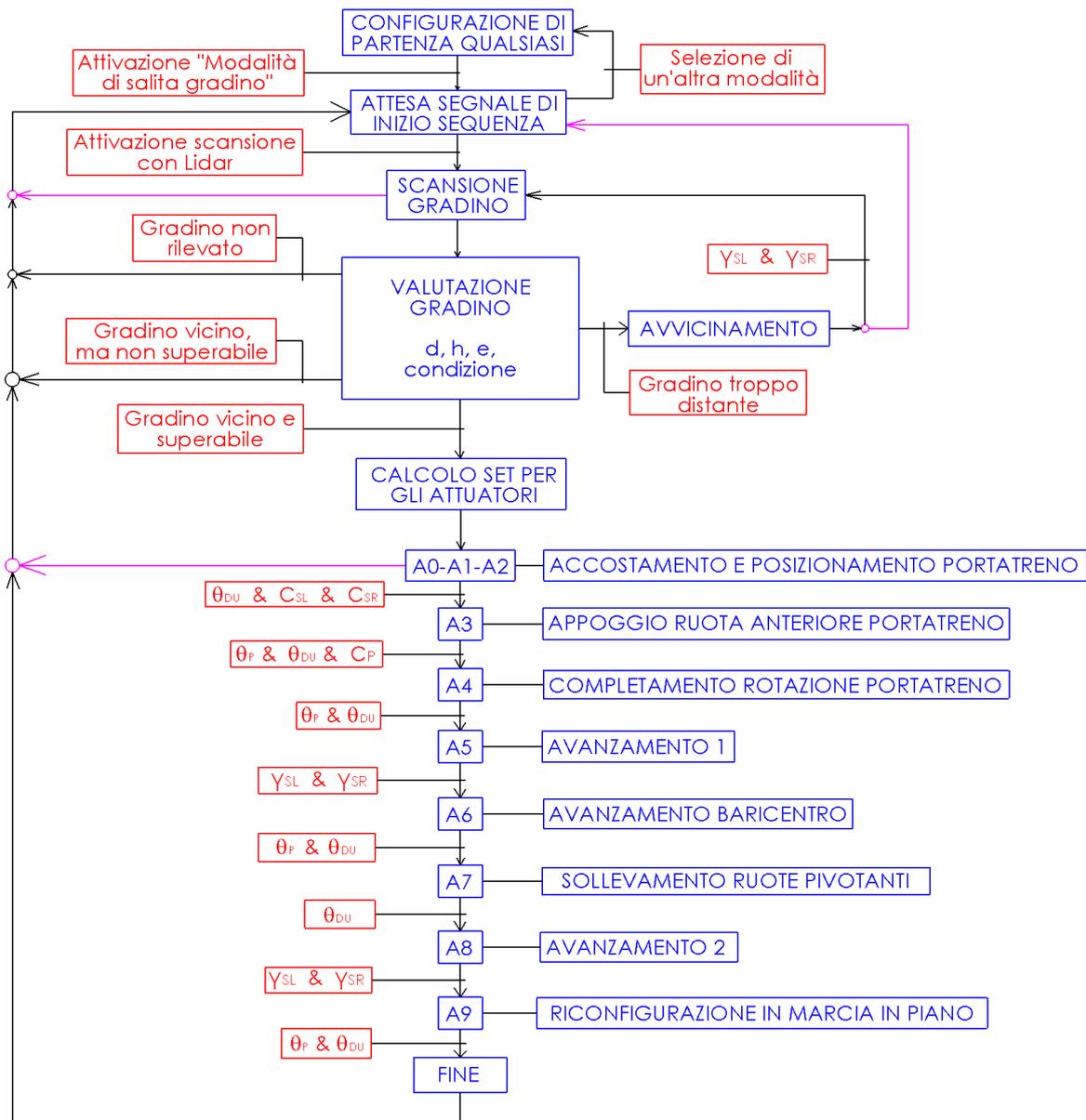


Figura 2.6 – Schema logico – Sequenza A – Salita gradino.

Tabella 2.8 – Grandezze di Figura 2.6

| Simbolo | Significato |
|---------------|---|
| d | Distanza tra la carrozzina e il gradino, rilevata dal Lidar (mm). |
| h | Altezza del gradino, rilevata dal Lidar (mm). |
| e | Spazio successivo al gradino, rilevato dal Lidar (mm). |
| condizione | Valutazione sulla superabilità del gradino. Vale 0 se non è superabile; vale 1 se è superabile. |
| γ_{SL} | Angolo di rotazione compiuto dalla ruota solare sinistra (rad). |
| γ_{SR} | Angolo di rotazione compiuto dalla ruota solare destra (rad). |
| ϑ_P | Angolo tripodi (°). |

Cinematica e sequenze automatiche

| | |
|------------------|---|
| ϑ_{DU} | Angolo ruote pivotanti ($^{\circ}$). |
| C_{SL} | Coppia applicata alla ruota solare sinistra (Nm). |
| C_{SR} | Coppia applicata alla ruota solare destra (Nm). |
| C_P | Coppia applicata ai tripodi (Nm). |

Lo schema presentato (Figura 2.6) verrà usato nel *Capitolo 6* come modello per costruire la macchina a stati che permette l'esecuzione della sequenza automatica di salita gradino. Su tale schema logico vengono fatte le seguenti considerazioni:

1. In blu sono visibili le *fasi* (chiamate anche *azioni* o *stati*) che vengono compiute durante la sequenza automatica. In rosso sono visibili le *transizioni*: una transizione si trova in mezzo a due fasi e solo quando risulta verificata viene abilitato il passaggio alla fase successiva. Le frecce nere costituiscono i percorsi che può compiere la sequenza automatica. Le frecce fucsia rappresentano i punti dai quali l'utente può riprendere il controllo della carrozzina e bloccare la sequenza.
2. Le prime 3 transizioni visibili dall'alto vengono verificate tramite l'utilizzo di selettori e pulsanti da parte dell'utente. Tutte le altre transizioni vengono eseguite in automatico dalla macchina a stati la quale va ad eseguire le verifiche necessarie sulle variabili presentate in Tabella 2.8, le quali vengono estrapolate dal Lidar e da tutti i sensori presenti sulla carrozzina. Il principio di funzionamento generale prevede che in ogni fase vengano inviati dei segnali di set agli attuatori che sono richiamati in quella specifica fase, il confronto di questi set con i feedback generati dai sensori permette all'algoritmo di comprendere quando può entrare in funzione la fase successiva.
3. Il metodo con cui il Lidar scansiona il gradino, estrapola le sue grandezze geometriche ed i parametri in base ai quali compie la scelta su quale percorso seguire vengono approfonditi nel *Capitolo 4*.
4. I metodi di calcolo per ricavare i set da inviare agli attuatori in base all'altezza del gradino sono stati affrontati in modo approfondito sulla tesi di Perez [5].
5. Le fasi effettive della salita del gradino (A0-A1-A2 / A9) vengono descritte nei prossimi paragrafi; i sistemi di controllo che permettono di inviare i segnali agli attuatori che le eseguono vengono descritti nel *Capitolo 5*, mentre la realizzazione della macchina a stati su Simulink viene affrontata nel *Capitolo 6*. I test reali sulla sequenza vengono eseguiti nel *Capitolo 7*.

6. Il setup attuale della carrozzina prevede un solo Lidar posto sul lato sinistro di essa. Questo non permette di misurare l'angolo di imbardata tra la carrozzina ed il gradino, precludendo la possibilità di effettuarne la correzione. Nelle future tesi uno degli obiettivi sarà quello di aggiungere il secondo Lidar, inserendo questa nuova possibilità.
7. All'interno della fase A6 ed A9 dovrebbe essere anche presente la variazione dell'angolo β (inclinazione del sedile). Tale movimentazione è stata inserita nei prossimi paragrafi ed è stata simulata su Adams nel *Capitolo 3*, ma non è stato possibile realizzarla nella pratica in quanto il motoriduttore che controlla tale grado di libertà è attualmente rotto. Lo schema visto (Figura 2.6) rispecchia dunque ciò che è stato fatto nelle prove in laboratorio. Nelle future tesi, una volta risolto il problema, potrà essere inserita questa possibilità, insieme a delle valutazioni precise sulla sua utilità in base all'effettiva variazione del baricentro che provoca.

2.3.1 Fase combinata A0-A1-A2

In questa fase (Figura 2.7) avvengono in contemporanea:

1. Avvicinamento lento della carrozzina verso il gradino fino a toccarlo.
2. Rotazione dei tripodi fino a che gli pneumatici assumono una posizione a triangolo rovesciato ($\theta_P = 22^\circ$). Il verso di rotazione dei tripodi viene scelto in modo tale da raggiungere tale posizione con il minor angolo di rotazione possibile.
3. Compensazione della variazione dell'angolo Θ_{PC} causata dalla rotazione dei tripodi grazie all'abbassamento delle ruote pivotanti.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è indipendente dall'altezza del gradino.
2. Inclinazione costante della sedia utente.
3. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
4. Inclinazione del sotto-telaio PC costante ($\Theta_{PC} = 38^\circ$).
5. L'avvicinamento viene gestito dai motoriduttori che controllano la rotazione delle ruote solari in anello chiuso grazie alla misurazione della distanza dal gradino generata dal Lidar e dai rilevamenti odometrici.

6. La configurazione di partenza della sedia vista in questo (Figura 2.7) e nei futuri schemi (nonché nelle simulazioni su Adams del *Capitolo 3*) corrisponde alla configurazione di *marcia in piano*. Durante la realizzazione dei sistemi di controllo (*Capitolo 5*) si vedrà che la carrozzina può partire da una posizione casuale di tutti i gradi di libertà.
7. Il movimento contemporaneo del motore che governa i tripodi e dei motori che governano le ruote solari fa sì che fino a che la rotazione dei tripodi non è completa la sedia stazioni sullo stesso punto; una volta terminata la rotazione dei tripodi inizia l'avanzamento verso il gradino.

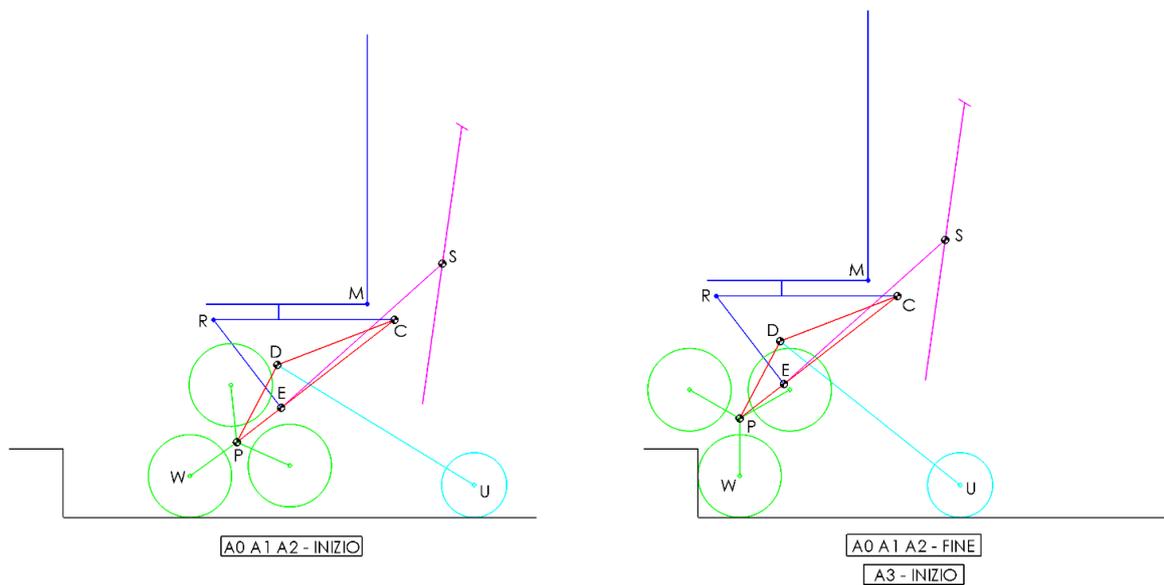


Figura 2.7 – Fase combinata A0-A1-A2.

Nella Tabella 2.9 e in quelle mostrate per le fasi successive vengono indicate delle variazioni di esempio dei gradi di libertà per un gradino di altezza pari a 68 mm (corrispondente all'altezza della pedana presente in laboratorio e su cui sono state fatte le prove), ricavate grazie allo studio eseguito sulla tesi di *Perez* [5].

| Tabella 2.9 – Fase combinata A0-A1-A2. | | |
|--|------------|----------|
| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
| \mathfrak{S}_P | -32 | 22 |
| \mathfrak{S}_{DU} | 98.07 | 105.7 |

La fase A3 si innesca quando si verificano entrambe le condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. La coppia rilevata sui motori delle ruote solari supera un certo valore, indicando che gli pneumatici hanno toccato il gradino. Non è quindi necessario fare un controllo sull'angolo di rotazione compiuto dalle ruote solari come veniva fatto nella fase di avvicinamento per la scansione di precisione in quanto è un metodo molto meno sicuro per attivare la fase successiva.

2.3.2 Fase A3

In questa fase (Figura 2.8, Tabella 2.10) avvengono in contemporanea:

1. Appoggio delle ruote anteriori del tripode sullo scalino.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti per compensare la variazione di Θ_{PC} .

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino.
2. Inclinazione costante della sedia utente.
3. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
4. Inclinazione del sotto-telaio PC costante ($\Theta_{PC} = 38^\circ$).

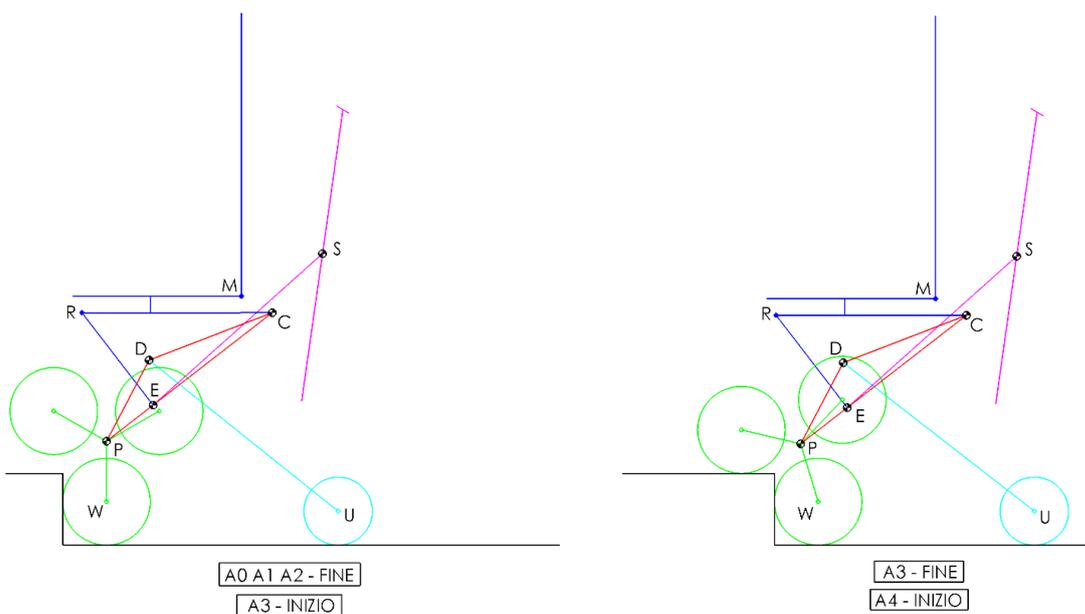


Figura 2.8 – Fase A3.

| Tabella 2.10 – Fase A3. | | |
|-------------------------|------------|----------|
| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
| ϑ_P | 22 | 67.8 |
| ϑ_{DU} | 105.7 | 99.9 |

La fase A4 si innesca quando si verificano in contemporanea queste condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. La coppia rilevata sul motore del portatreno supera un certo valore, indicando che i tripodi stanno sollevando la parte anteriore della carrozzina.

2.3.3 Fase A4

In questa fase (Figura 2.9, Tabella 2.11) avvengono in contemporanea:

1. Completamento della rotazione del tripode; gli pneumatici sono ora allineati con il piano successivo al gradino.
2. Abbassamento delle ruote pivotanti per compensare la variazione di Θ_{PC} .

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino.
2. Inclinazione costante della sedia utente.
3. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
4. Inclinazione del sotto-telaio PC costante ($\Theta_{PC} = 38^\circ$).

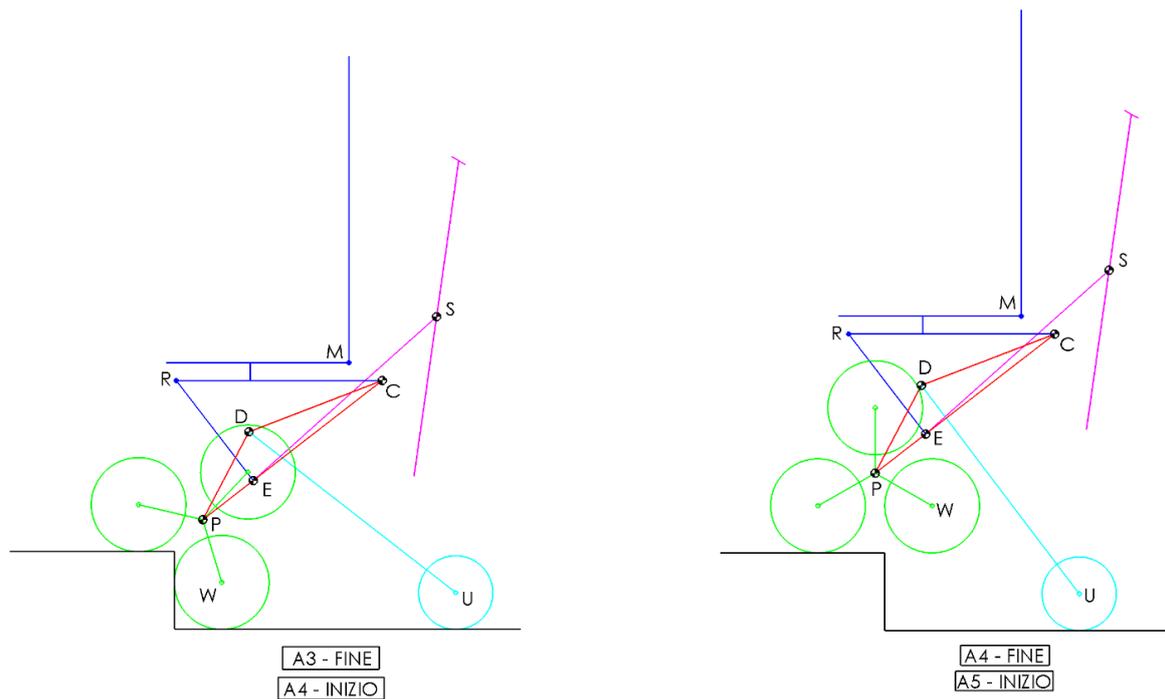


Figura 2.9 – Fase A4.

Tabella 2.11 – Fase A4.

| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
|---------------------|------------|----------|
| \mathfrak{g}_P | 67.8 | 82 |
| \mathfrak{g}_{DU} | 99.9 | 104.3 |

La fase A5 si innesca quando si verificano entrambe le condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.

2.3.4 Fase A5

In questa fase (Figura 2.10) avviene un lento avanzamento della carrozzina di una distanza abbastanza grande da avere un buon margine di sicurezza tra lo pneumatico posteriore dei tripodi il bordo dello scalino (almeno 150 mm). Tale distanza viene inserita nell'algoritmo ed è fissa. Non si ha variazione degli altri gradi di libertà.

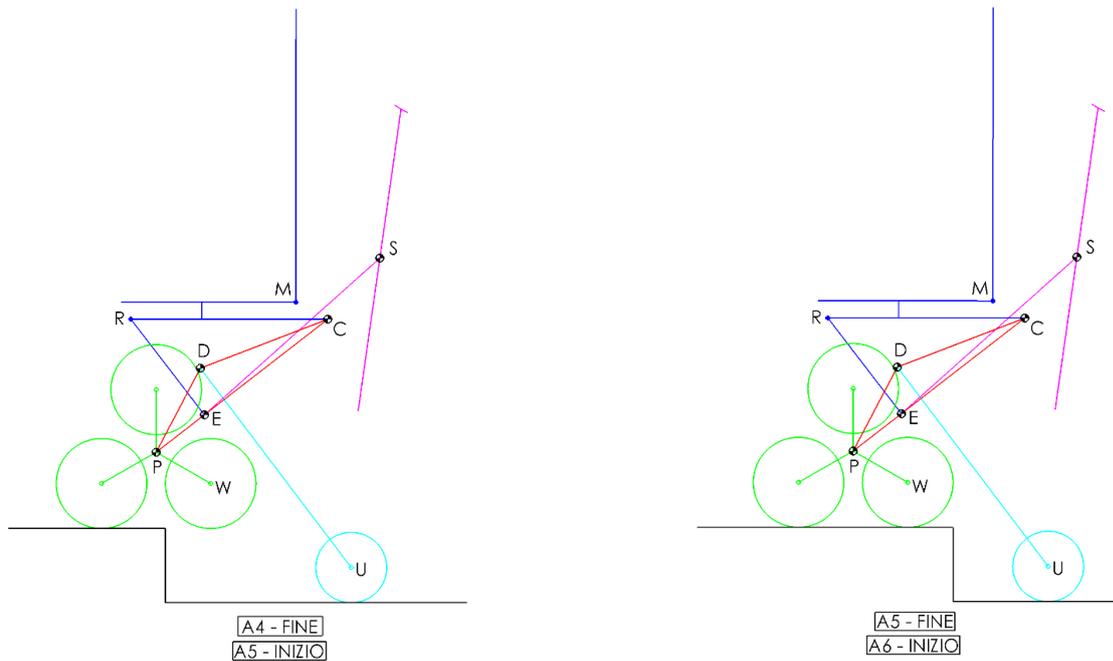


Figura 2.10 – Fase A5.

La fase A6 si innesca quando l'angolo di rotazione delle ruote solari ha raggiunto il valore imposto.

2.3.5 Fase A6

In questa fase (Figura 2.11, Tabella 2.12) avvengono in contemporanea:

1. Abbassamento delle ruote pivotanti (con conseguente aumento di Θ_{PC}) fino a scaricare il peso dell'intera struttura tra i due pneumatici dei tripodi. Questo consente alla carrozzina di restare in equilibrio statico sui tripodi anche venendo a mancare il contatto delle ruote pivotanti con il piano nella fase A7.
2. Contemporanea rotazione all'indietro dei tripodi in modo tale da restare sempre con i due pneumatici a contatto con il piano.
3. Solo in questa trattazione teorica e su Adams si introduce il sollevamento della seduta (aumento dell'angolo β), in quanto il motoriduttore adibito al movimento è guasto. È possibile scaricare il peso sui tripodi in modo semplice senza agire su β

(come fatto nelle prove di laboratorio), ma solo sulle pivotanti e sui tripodi; la variazione di β può avvenire anche solo per questioni di confort dell'utente.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino e da quando si vuole aumentare l'angolo Θ_{PC} .
2. Si ha un aumento di Θ_{PC} costante ed imposto tramite l'algoritmo. Attualmente l'aumento dell'angolo Θ_{PC} è pari a 15° ed è stato scelto tramite delle prove in laboratorio in modo tale da avere una buona stabilità della carrozzina quando si trova in equilibrio sui soli tripodi. Nelle future tesi verranno eseguiti studi approfonditi sul baricentro, sulla sua variazione in base alla modifica di tutti i gradi di libertà della carrozzina e sul suo spostamento in base alla posizione e tipologia di utente che utilizza la carrozzina, in modo da ottimizzare il valore di Θ_{PC} da raggiungere.
3. Sollevando la sedia (aumentando β) si può compensare l'inclinazione in avanti della seduta dovuta all'aumento di Θ_{PC} , migliorando il comfort dell'utente; questo ha il risvolto negativo di indietreggiare il baricentro, riducendo la stabilità della carrozzina. Si è ipotizzato un aumento di β fino a 47° .
4. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.

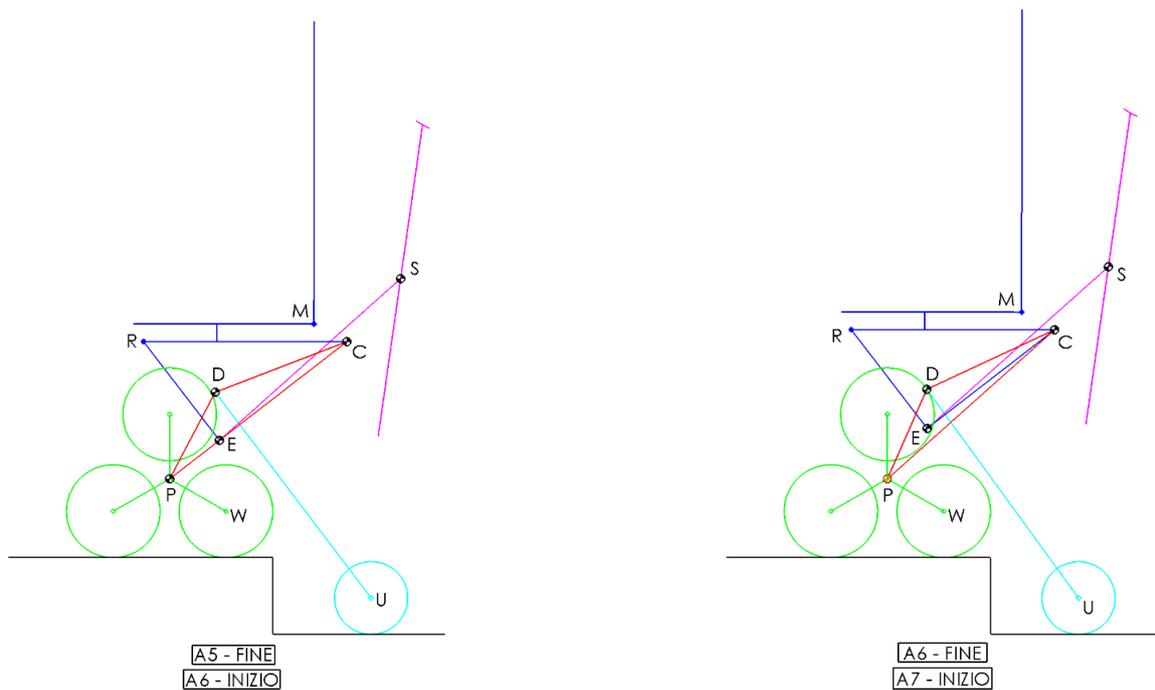


Figura 2.11 – Fase A6.

Tabella 2.12 – Fase A6.

| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
|--------------------|------------|----------|
| \mathcal{G}_P | 82 | 67 |
| \mathcal{G}_{DU} | 104.3 | 122 |
| β | 38 | 47 |
| Θ_{PC} | 38 | 53 |

La fase A7 si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. L'angolo della seduta ha raggiunto il valore imposto (solo in questa trattazione teorica).

2.3.6 Fase A7

In questa fase (Figura 2.12, Tabella 2.13) avviene il solo sollevamento delle ruote pivotanti, le quali si allineano al piano superiore del gradino. La sedia resta in equilibrio statico sui tripodi grazie alla variazione di Θ_{PC} eseguita nella fase A6.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo delle pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino.
2. Non si ha variazione degli altri gradi di libertà.

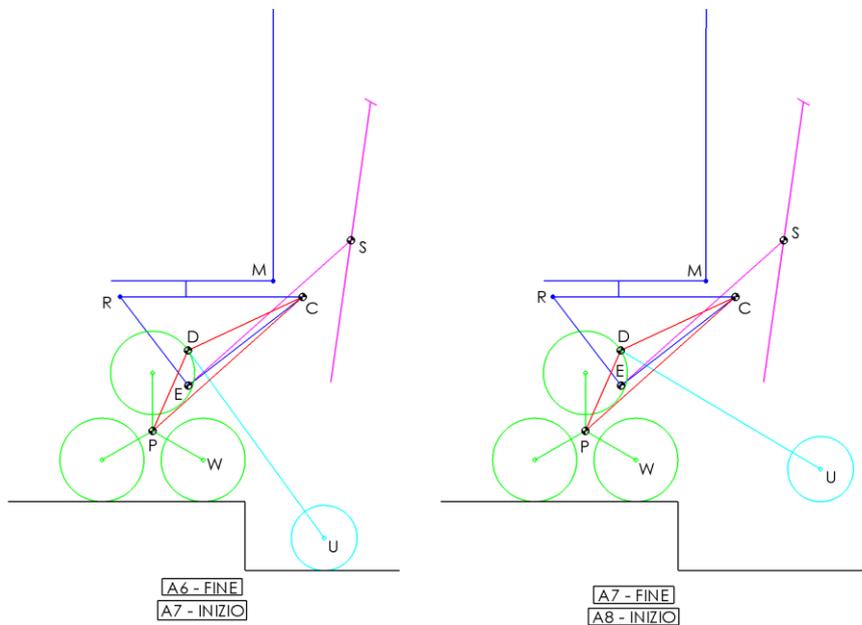


Figura 2.12 – Fase A7.

Tabella 2.13 – Fase A7.

| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
|------------------|------------|----------|
| ϑ_P | 67 | 67 |
| ϑ_{DU} | 122 | 114 |
| β | 47 | 47 |
| Θ_{PC} | 53 | 53 |

La fase A8 si innesca quando l'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.

2.3.7 Fase A8

In questa fase (Figura 2.13) avviene un lento avanzamento della carrozzina di una distanza abbastanza grande da avere un buon margine di sicurezza tra le ruote pivotanti e il bordo dello scalino (almeno 250 mm). Tale distanza viene inserita nell'algoritmo ed è fissa. Non si ha variazione degli altri gradi di libertà.

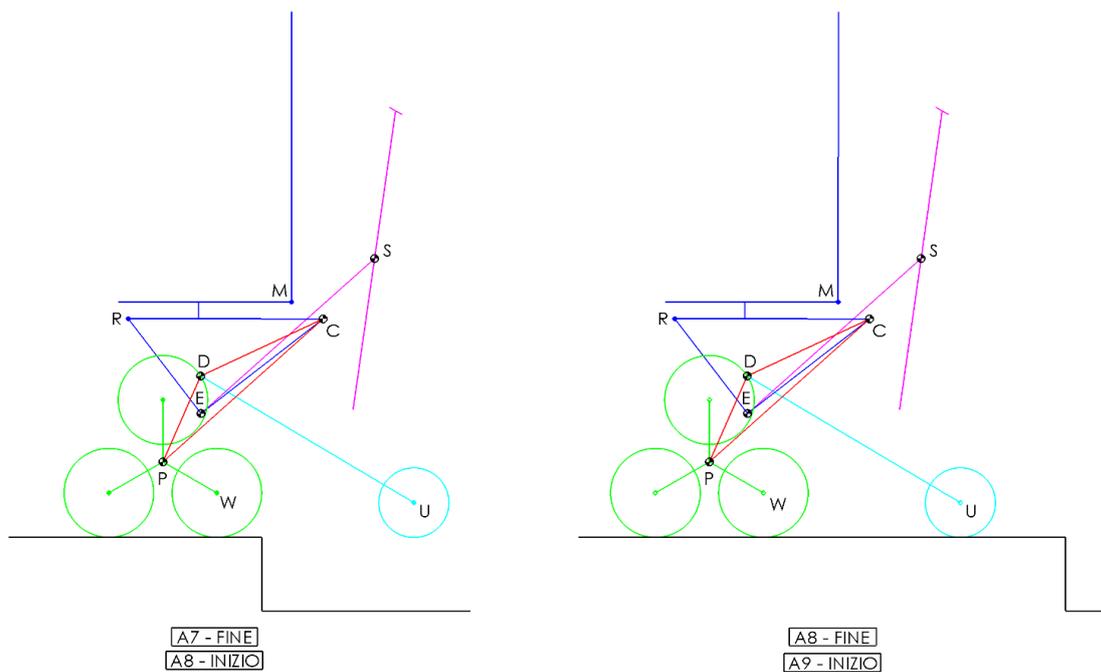


Figura 2.13 – Fase A8.

La fase A9 si innesca quando l'angolo di rotazione delle ruote solari ha raggiunto il valore imposto.

2.3.8 Fase A9

In questa fase (Figura 2.14, Tabella 2.14) avvengono in contemporanea:

1. Rotazione in avanti del tripode.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti.
3. Abbassamento del sedile (solo in questa trattazione teorica).

Avviene in particolare il posizionamento della sedia nella configurazione di marcia in piano, rendendola utilizzabile per i successivi spostamenti.

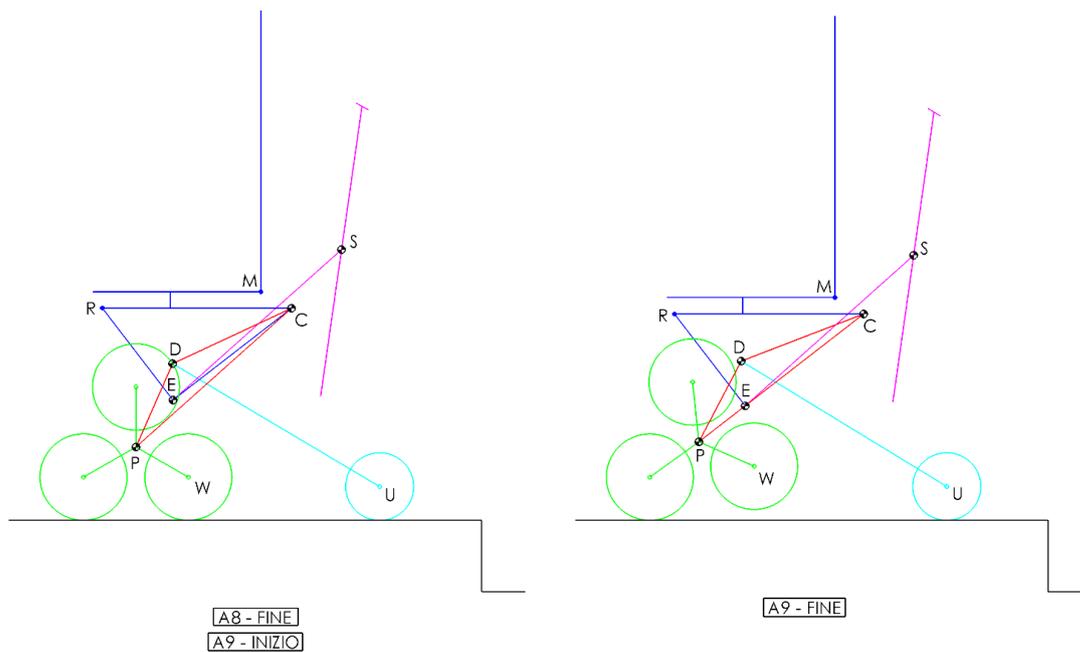


Figura 2.14 – Fase A9.

Tabella 2.14 – Fase A9.

| Gradi di libertà | Inizio (°) | Fine (°) |
|---------------------|------------|----------|
| \mathfrak{G}_P | 67 | 88 |
| \mathfrak{G}_{DU} | 122 | 98.07 |
| β | 47 | 38 |
| Θ_{PC} | 53 | 38 |

La fine della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. L'angolo della seduta ha raggiunto il valore imposto (solo in questa trattazione teorica).

2.4 Sequenza B – Discesa di un singolo gradino

In questa sezione viene eseguita un'introduzione della sequenza di *Discesa gradino*, la cui trattazione si limita alla definizione qui di seguito delle fasi e alla sua simulazione su Adams (*Capitolo 3*). Si tratta di un processo automatico che consente alla carrozzina, partendo da una configurazione qualsiasi dei suoi gradi di libertà, di scendere in modo totalmente autonomo un singolo gradino posto di fronte ad essa, azionando gli attuatori in base alla distanza di partenza dal gradino e all'altezza di esso. Le grandezze geometriche del gradino vengono rilevate grazie ad un sensore Lidar (descritto nel *Capitolo 4*) azionato dall'utente nel momento in cui vuole procedere con il superamento dell'ostacolo. La logica di processo (Figura 2.15) è analoga a quella della salita gradino vista nella sezione precedente, con la sola variazione delle azioni compiute all'interno delle fasi.

Lo schema presentato (Figura 2.15) è una base teorica per la costruzione della futura macchina a stati che permetterà l'esecuzione della sequenza automatica di salita gradino, pertanto potrà subire delle modifiche sulla base delle necessità e dei problemi che si risconteranno in fase di test in laboratorio. Su tale schema logico vengono fatte le seguenti considerazioni:

1. Le frecce fucsia che indicano i punti in cui l'utente può prendere il controllo della carrozzina sono situate in punti diversi rispetto alla sequenza di salita.
2. Il metodo con cui il Lidar scansiona il gradino, estrapola le sue grandezze geometriche ed i parametri in base ai quali compie la scelta su quale percorso seguire vengono approfonditi nel *Capitolo 4* per il solo gradino in salita, ma sono facilmente adattabili a questa casistica.
3. I metodi di calcolo per ricavare i set da inviare agli attuatori in base all'altezza del gradino sono stati affrontati in modo approfondito sulla tesi di *Perez [5]* su un ulteriore script.
4. Le fasi effettive della salita del gradino (B0 / B9) vengono descritte nelle prossime sezioni. È importante notare che le transizioni sono state ipotizzate solo sulla carta, ma non hanno alcun riscontro pratico tramite test di laboratorio, questo significa potrebbero non rappresentare la soluzione definitiva (in particolare l'utilizzo della coppia sul portatreno nelle transizioni indicate potrebbe non essere semplice e per questo potrebbe andare eliminata).

5. Anche in questo caso, in futuro, sarà consigliato inserire un secondo Lidar per la misurazione dell'angolo di imbardata della carrozzina.
6. All'interno della fase B6 ed B9 è stata inserita la variazione dell'angolo β (inclinazione del sedile) nonostante l'attuatore sia in questo momento guasto. È stato fatto in quanto la sequenza è stata solo teorizzata e simulata e si presume che per le future prove di laboratorio il componente verrà sostituito.

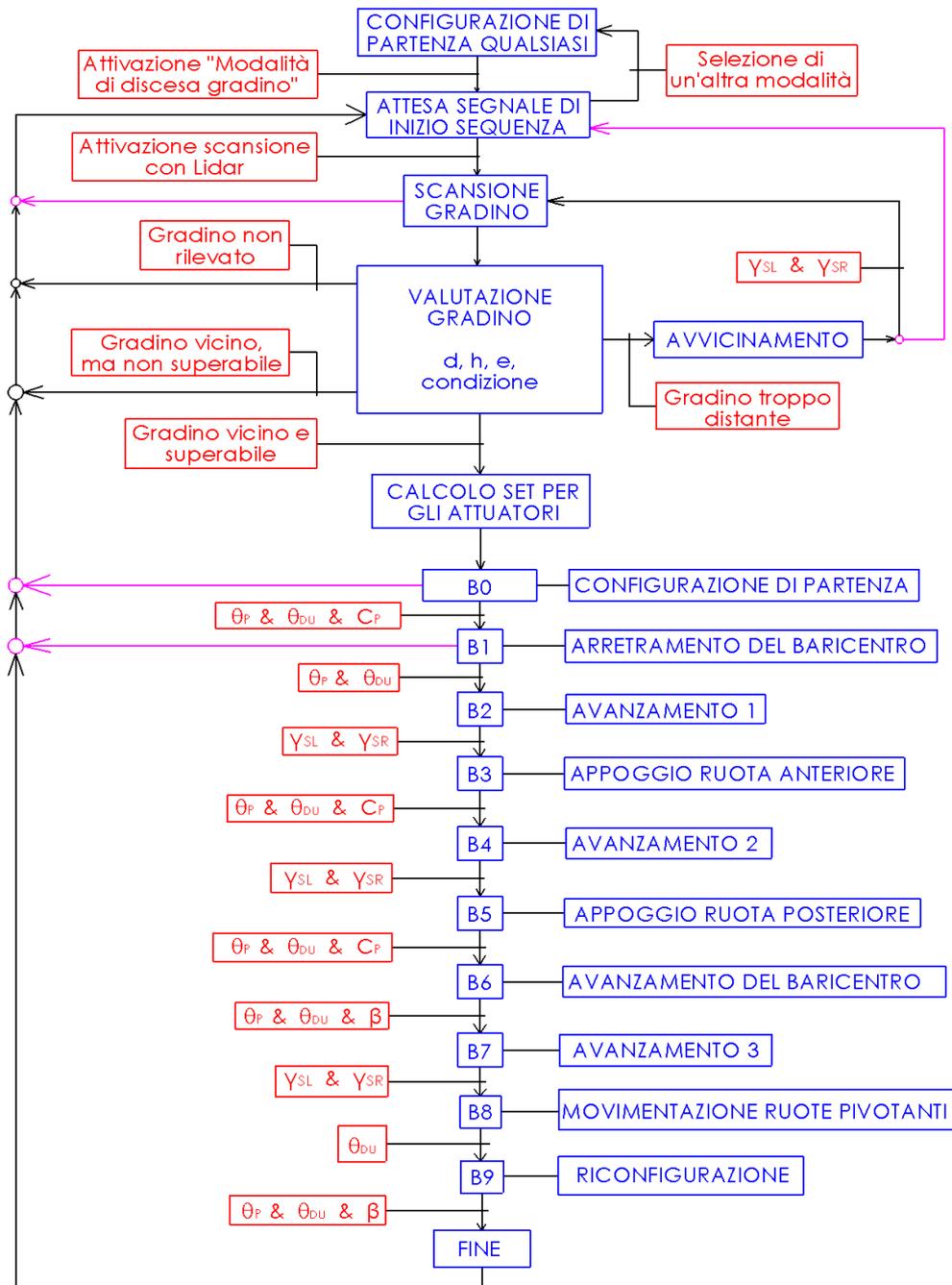


Figura 2.15 – Schema logico – Sequenza B – Discesa gradino.

2.4.1 Fase B0

In questa fase avvengono (Figura 2.16):

1. Rotazione dei tripodi con lo scopo di avere due pneumatici a contatto con il piano; tale rotazione avviene nel senso di rotazione che permette di arrivare in questa configurazione compiendo il minor angolo possibile.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti con lo scopo di mantenere costante l'angolo Θ_{PC} .

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è indipendente dall'altezza del gradino.
2. Inclinazione costante della sedia utente.
3. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
4. Inclinazione del sotto-telaio PC costante ($\Theta_{PC} = 38^\circ$).
5. La configurazione di partenza della carrozzina vista in questo (Figura 2.16) e nei futuri schemi (nonché nelle simulazioni su Adams del *Capitolo 3*) corrisponde alla configurazione di *marcia in piano*. Sarà richiesto però che la carrozzina possa partire da una posizione casuale di tutti i gradi di libertà.

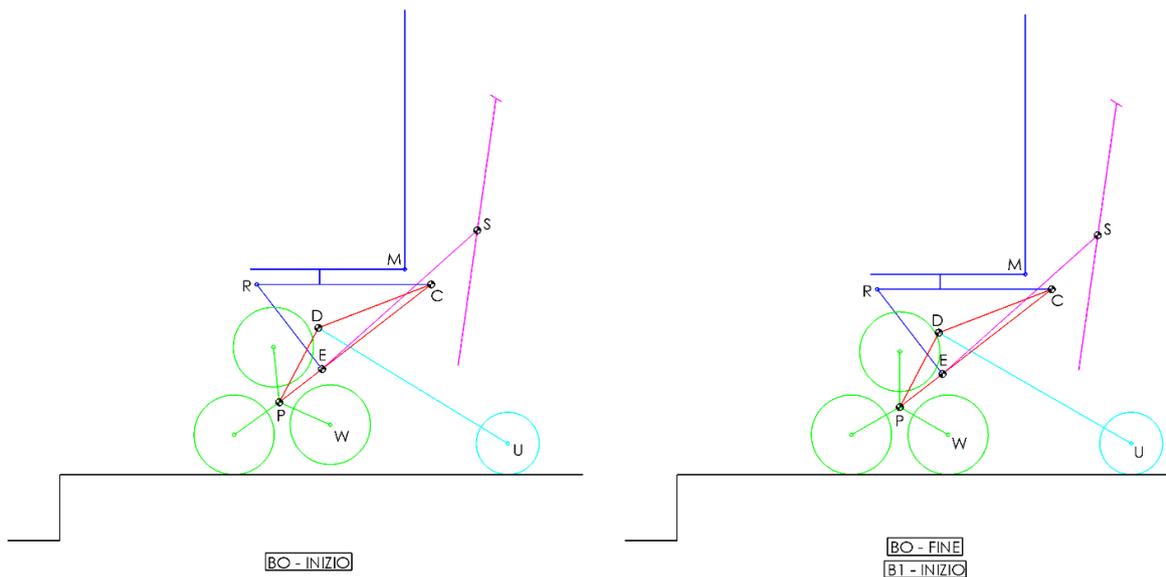


Figura 2.16 – Fase B0.

La fase B1 della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. Si è verificato un picco sulla coppia misurata sul motore del portatreno.

2.4.2 Fase B1

In questa fase avvengono (Figura 2.17):

1. Rotazione dei tripodi in avanti con lo scopo di avere sempre due pneumatici a contatto con il piano
2. Sollevamento delle ruote pivotanti con lo scopo di arretrare il baricentro della sedia diminuendo l'angolo Θ_{PC} .

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. Si ha una inclinazione all'indietro della sedia utente.
2. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
3. Diminuzione di Θ_{PC} .
4. Il baricentro, al termine della fase, si troverà tra la ruota posteriore del tripode e le pivotanti.

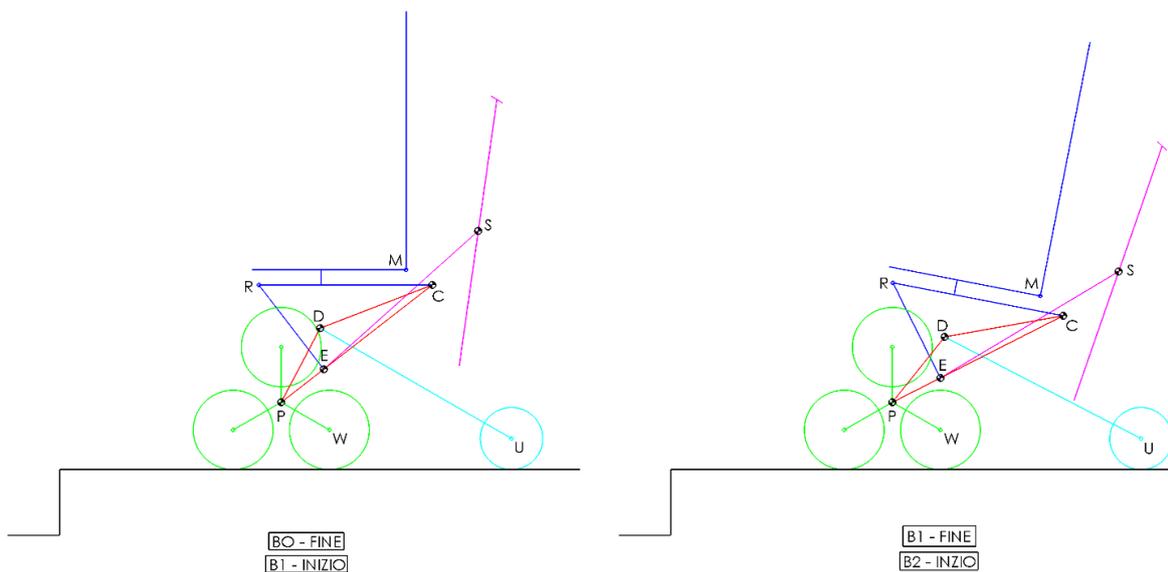


Figura 2.17 – Fase B1.

La fase B1 della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.

2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.

2.4.3 Fase B2

In questa fase (Figura 2.18) avviene un lento avanzamento della carrozzina di una distanza abbastanza grande da far sporgere la ruota anteriore oltre il bordo del gradino. Tale distanza viene imposta dalla misurazione effettuata con il Lidar; questo significa che la precisione richiesta, vista la pericolosità della fase, è molto più alta rispetto alla precisione che si aveva per compiere l'avvicinamento o la fase A0-A1-A2 della sequenza di salita gradino. Questo impone una forte riduzione degli errori di misura e costituisce una ulteriore motivazione per utilizzare un secondo Lidar che possa misurare in parallelo con il primo, permettendo una maggiore sicurezza sulle misurazioni.

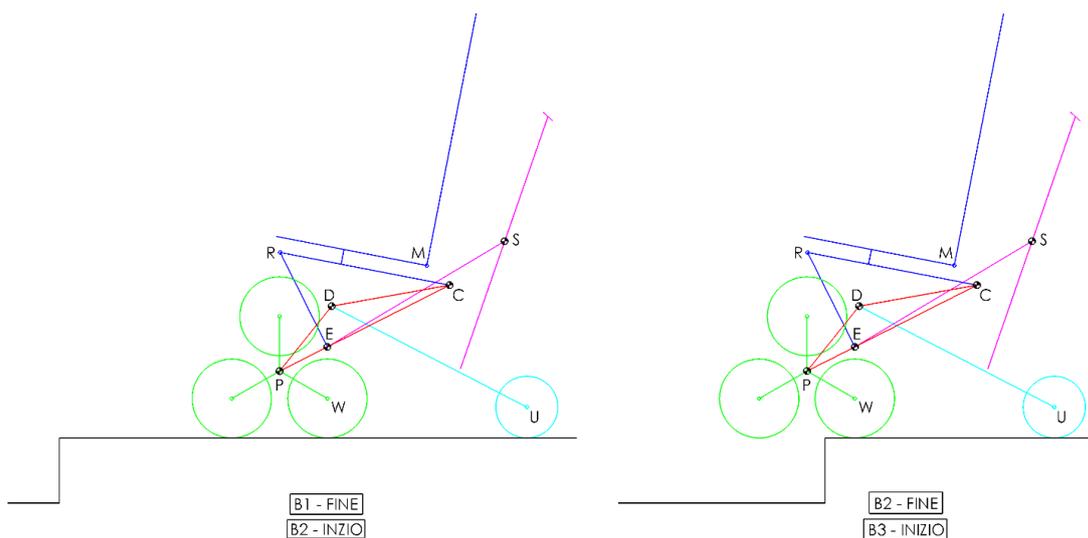


Figura 2.18 – Fase B2.

La fase B3 si innesca quando le ruote solare hanno compiuto l'angolo di rotazioni imposto dal riferimento creato dal Lidar.

2.4.4 Fase B3

In questa fase avvengono (Figura 2.19):

1. Rotazione dei tripodi in avanti con lo scopo di poggiare gli pneumatici anteriori sul piano inferiore.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti con lo scopo accompagnare tale rotazione dei tripodi.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. Resta l'inclinazione all'indietro della sedia utente.
2. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
3. L'angolo Θ_{PC} resta costante.
4. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino.

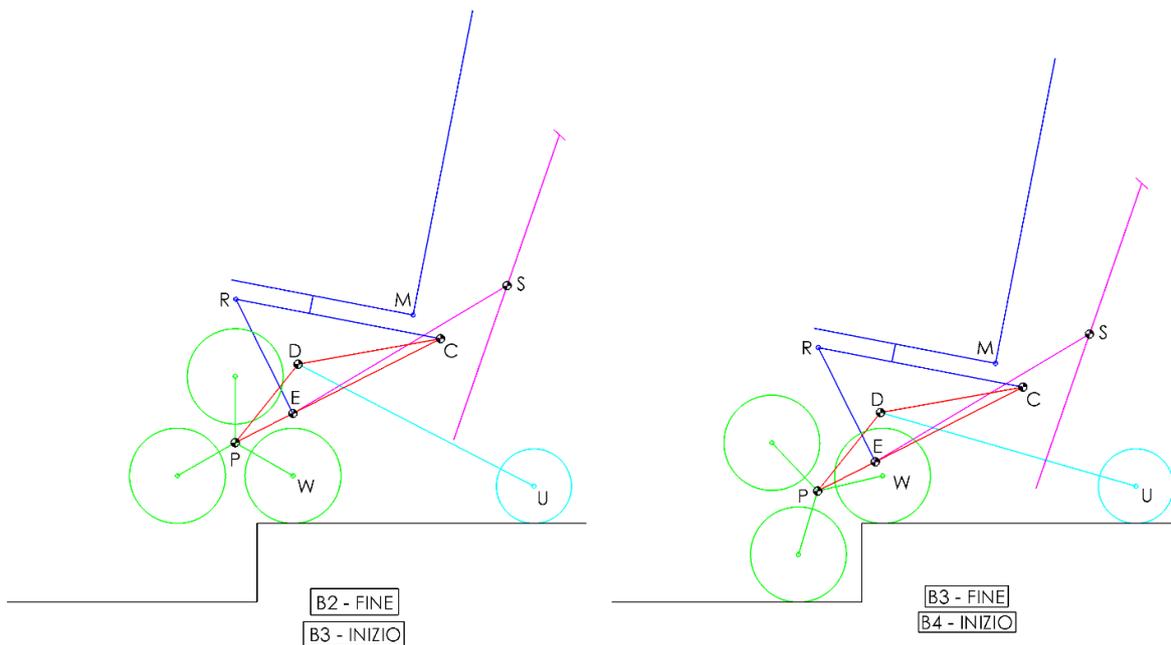


Figura 2.19 – Fase B3.

La fase B4 della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. Si è verificato un picco sulla coppia misurata sul motore del portatreno.

2.4.5 Fase B4:

In questa fase (Figura 2.20) avviene un lento avanzamento della carrozzina di una distanza abbastanza grande da far sporgere la ruota posteriore oltre il bordo del gradino di una distanza sufficiente da non farla andare a contatto con il gradino nella fase B5. Tale distanza è costante e viene imposta all'interno dell'algoritmo di discesa, indipendentemente dall'altezza del gradino.

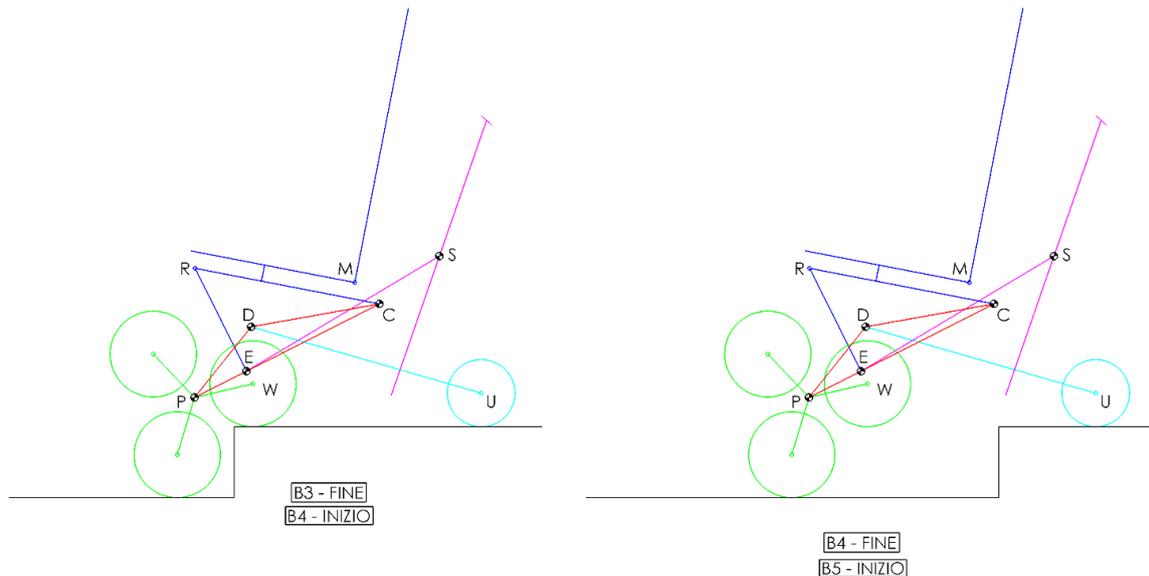


Figura 2.20 – Fase B4.

La fase B5 si innesca quando le ruote solare hanno compiuto l'angolo di rotazioni imposto dal riferimento creato dal Lidar.

2.4.6 Fase B5

In questa fase avvengono (Figura 2.21):

1. Rotazione dei tripodi all'indietro con lo scopo di poggiare gli pneumatici posteriori sul piano inferiore.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti con lo scopo accompagnare tale rotazione dei tripodi.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. Resta l'inclinazione all'indietro della sedia utente.
2. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.
3. L'angolo Θ_{PC} resta costante.
4. L'angolo di arrivo di tripodi e pivotanti è dipendente dall'altezza del gradino.

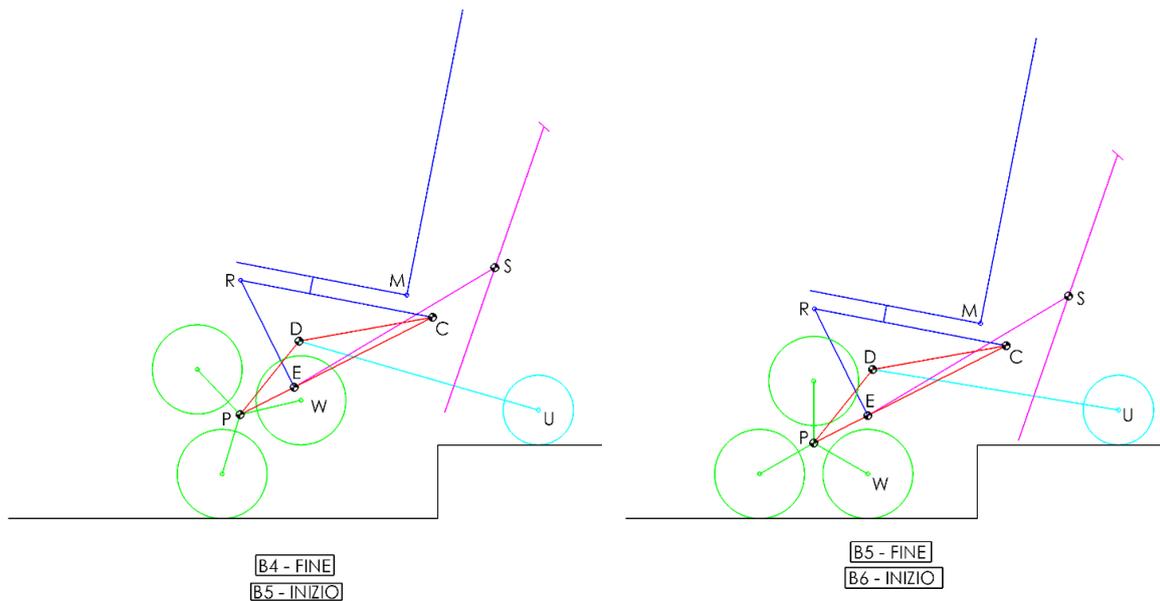


Figura 2.21 – Fase B5.

La fase B6 della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. Si è verificato un picco sulla coppia misurata sul motore del portatreno.

2.4.7 Fase B6

In questa fase (Figura 2.22) avvengono in contemporanea:

1. Abbassamento delle ruote pivotanti (con conseguente aumento di Θ_{PC}) fino a scaricare il peso dell'intera struttura tra i due pneumatici dei tripodi. Questo consente alla carrozzina di restare in equilibrio statico sui tripodi anche venendo a mancare il contatto delle ruote pivotanti con il piano nella fase B7.

2. Contemporanea rotazione all'indietro dei tripodi in modo tale da restare sempre con i due pneumatici a contatto con il piano.
3. Sollevamento della seduta con lo scopo di migliorare il comfort dell'utente.

La fase presenta le seguenti caratteristiche:

1. Gli angoli di arrivo di tripodi e pivotanti sono dipendenti dall'altezza del gradino e da quando si vuole aumentare l'angolo Θ_{PC} .
2. Si ha un aumento di Θ_{PC} costante ed imposto tramite l'algoritmo. Su tale angolo valgono le stesse considerazioni fatte per la salita del gradino
3. Sollevando la sedia (aumentando β) si può compensare l'inclinazione in avanti della seduta dovuta all'aumento di Θ_{PC} , migliorando il comfort dell'utente; questo ha il risvolto negativo di indietreggiare il baricentro, riducendo la stabilità della carrozzina.
4. Le ruote pivotanti sono a contatto con il piano di appoggio.

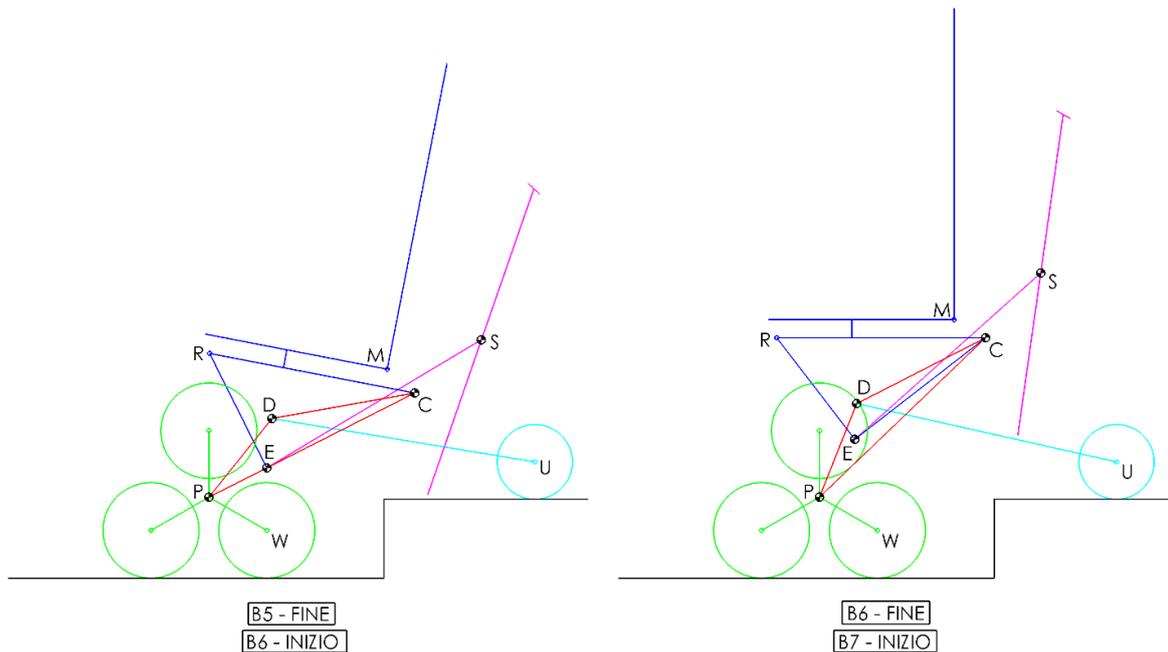


Figura 2.22 – Fase B6.

La fase B7 della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. L'angolo della seduta ha raggiunto il valore imposto.

2.4.8 Fase B7

In questa fase (Figura 2.23) avviene un lento avanzamento della carrozzina, in equilibrio statico sui tripodi, di una distanza abbastanza grande da far sporgere le ruote pivotanti oltre il bordo del gradino di una distanza sufficiente da non farle andare a contatto con esso. Tale distanza è costante e viene imposta all'interno dell'algoritmo di discesa, indipendentemente dall'altezza del gradino.

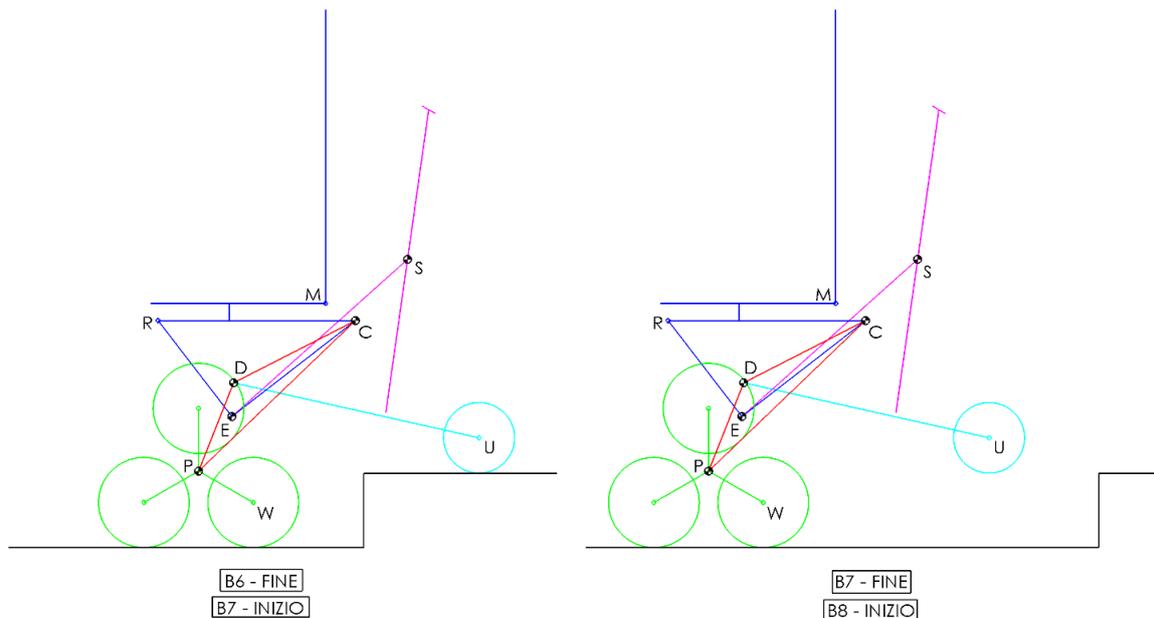


Figura 2.23 – Fase B7.

La fase B8 si innesca quando le ruote solare hanno compiuto l'angolo di rotazioni imposto dal riferimento creato.

2.4.9 Fase B8

In questa fase avviene (Figura 2.24) un abbassamento delle ruote pivotanti con lo scopo di portarle a contatto con il piano. L'angolo raggiunto dipende dall'altezza del gradino.

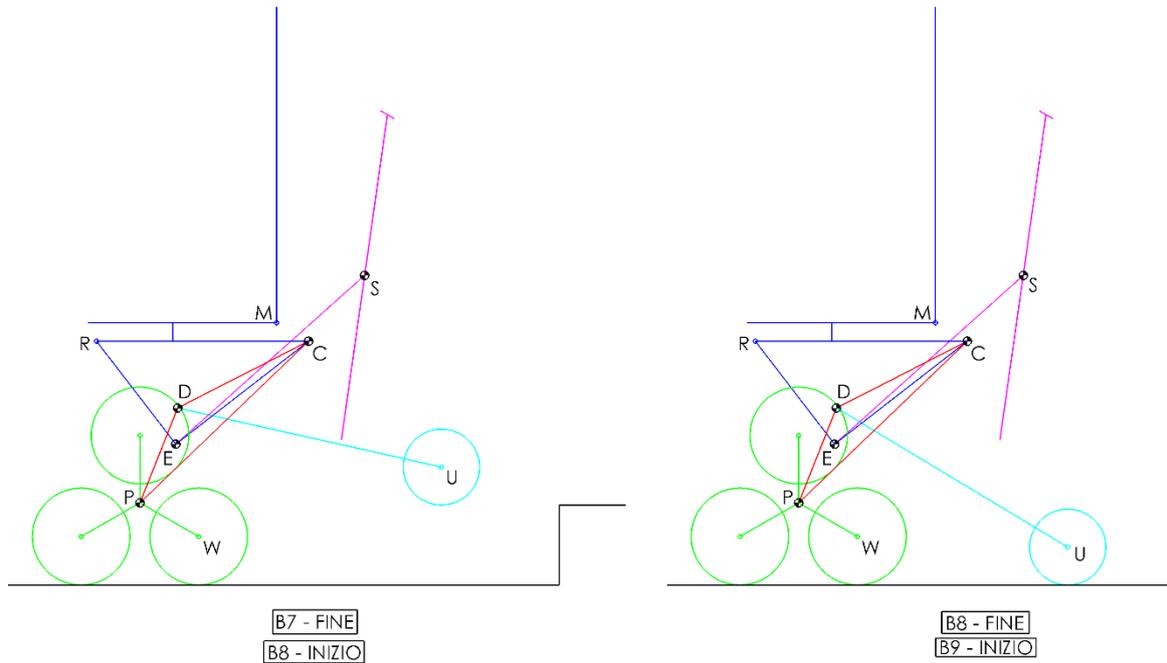


Figura 2.24 – Fase B8.

La fase B9 della sequenza automatica si innesca quando l'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.

2.4.10 Fase B9

In questa fase (Figura 2.25) avvengono in contemporanea:

1. Rotazione in avanti del tripode.
2. Sollevamento delle ruote pivotanti.
3. Abbassamento del sedile.

Avviene in particolare il posizionamento della sedia nella configurazione di marcia in piano, rendendola utilizzabile per i successivi spostamenti.

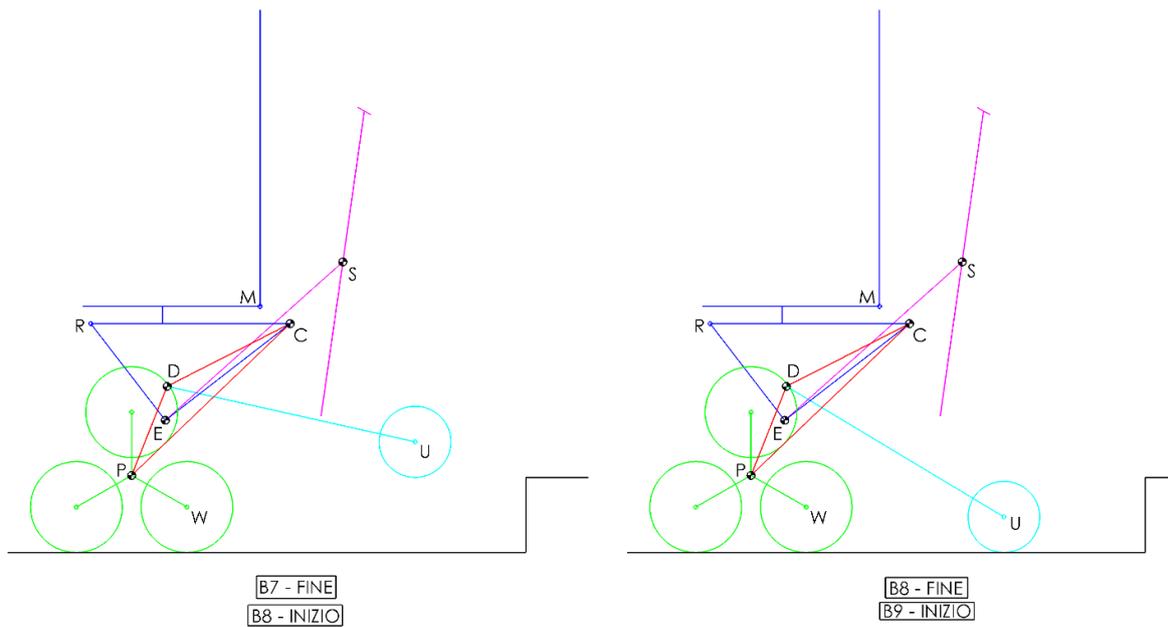


Figura 2.25 – Fase B9.

La fine della sequenza automatica si innesca quando si verificano in contemporanea le seguenti condizioni:

1. L'angolo delle ruote pivotanti ha raggiunto il valore imposto.
2. L'angolo dei tripodi ha raggiunto il valore imposto.
3. L'angolo della seduta ha raggiunto il valore imposto (solo in questa trattazione teorica).

3 Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

In questo capitolo viene trattata la simulazione di un modello 3D semplificato della sedia, tale modello viene utilizzato per riprodurre le fasi di salita e discesa del singolo gradino così come alcuni movimenti base. Lo scopo è quello di verificare che le varie sottofasi in cui si dividono le sequenze siano tutte eseguite correttamente prima di andare a replicarle sul prototipo reale. I software utilizzati sono: *Solidworks 2017*, *Adams View 2018* e *Matlab R2016a*.

3.1 Creazione del modello 3D

La prima fase di questo processo consiste nella creazione su Solidworks di un modello 3D della sedia. Tale modello deve avere le seguenti caratteristiche:

1. A livello geometrico deve andare a riprodurre tutti i link cinematici e i vincoli del prototipo finale, inoltre i link e tutti i componenti fondamentali della sedia, come ad esempio le ruote, devono avere le dimensioni del modello reale, in modo da permettere una riproduzione dei movimenti il più fedele possibile.
2. A livello cinematico deve possedere gli stessi gradi di libertà del prototipo.
3. Le parti di cui è composto l'assieme deve avere una forma tale da riprodurre il più fedelmente possibile la posizione esatta del loro baricentro, inoltre dovranno possedere la massa della loro controparte reale.
4. Il modello deve essere il più semplice possibile in modo da rendere più leggera per il computer la fase di simulazione.

Il punto di partenza più adatto per rispettare tali condizioni è lo schema cinematico della carrozzina presentato nel *Capitolo 2* (Figura 3.1). Tale schema consiste in una riproduzione fedele, ma semplificata di tutte le caratteristiche geometriche, cinematiche e fisiche della sedia, di conseguenza si è partiti da esso per realizzare il modello 3D; il modello semplificato è composto dai blocchi indicati in Tabella 3.1.

| Tabella 3.1 – Blocchi del modello | |
|-----------------------------------|--|
| Colore | Blocco |
| Verde | Gruppo di locomozione (tripode o portatreno) |
| Rosso | Sotto-telaio PC |
| Blu | Sotto-telaio RC |
| Celeste | Gruppo pivotanti |
| Magenta | Cingolo |

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

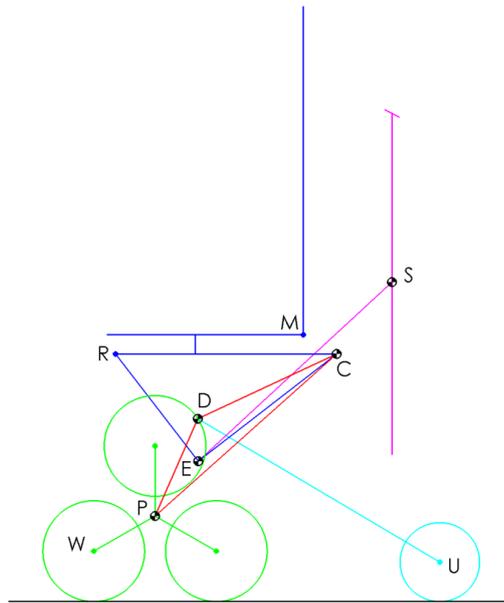


Figura 3.1 – Schema a blocchi della carrozzina.

Tali blocchi sono stati ulteriormente scomposti (Figura 3.2) in modo tale da permettere la riproduzione di tutti i gradi di libertà ed andare ad individuare tutte le parti che unite andranno a comporre l'assieme finale.

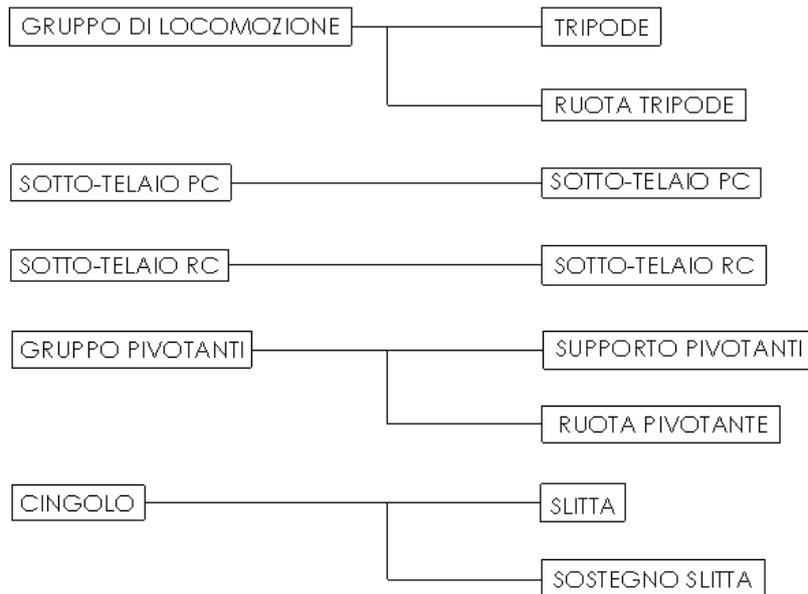


Figura 3.2 – Parti del modello della carrozzina.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

A tali parti ne sono state aggiunte poi due ulteriori: una sfera di massa 80 kg, rappresentate l'utente medio ed un piano sul quale verrà fatta muovere in fase di simulazione la sedia. Da notare che nelle seguenti immagini dell'assieme finale alcune di esse non presentano la sfera dell'utente in quanto questa è stata inserita nel modello direttamente su Adams e solo successivamente è stata introdotta in alcuni assiemi su Solidworks per effettuare delle verifiche sulla posizione del baricentro. In Tabella 3.2 viene presentato l'elenco completo delle parti costituenti il modello 3D finale e nelle Figura 3.3, 3.4 e 3.5 è visibile la loro realizzazione.

| Tabella 3.2 – Elenco parti assieme 3D della carrozzina | |
|--|----------|
| Parti | Quantità |
| Tripode | 2 |
| Ruota tripode | 6 |
| Sotto-telaio PC | 1 |
| Sotto-telaio RC | 1 |
| Supporto pivotanti | 2 |
| Ruota pivotante | 2 |
| Slitta | 1 |
| Sostegno slitta | 1 |
| Parti extra | |
| Parti extra | Quantità |
| Piano di appoggio | 1 |
| Utente | 1 |

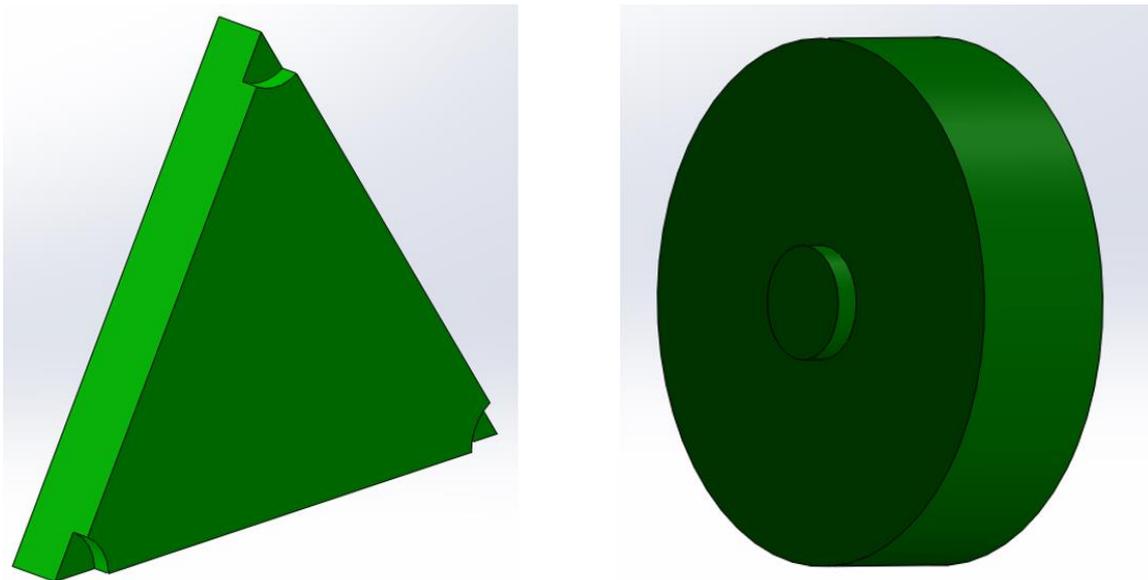


Figura 3.3 – Tripode (sx) e ruota tripode (dx)

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

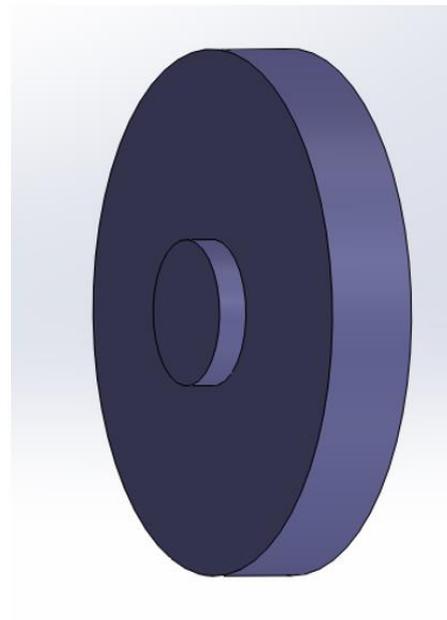
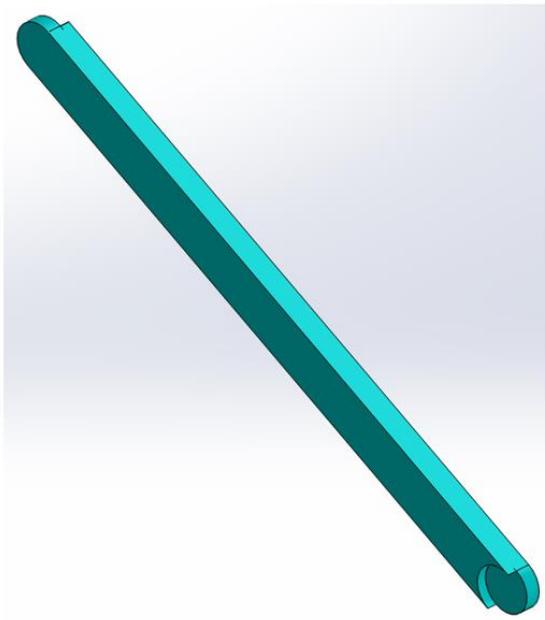
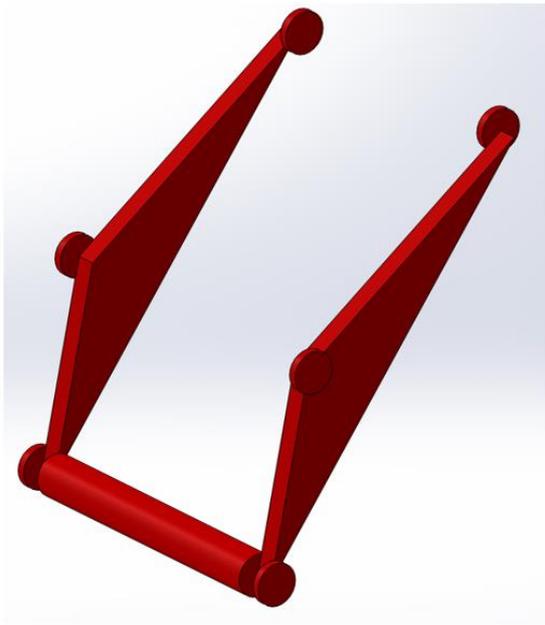


Figura 3.4 – Sotto-telaio PC (alto-sx), sotto-telaio RC (alto-dx), supporto pivotanti (basso-sx), ruota pivotanti (basso-dx).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

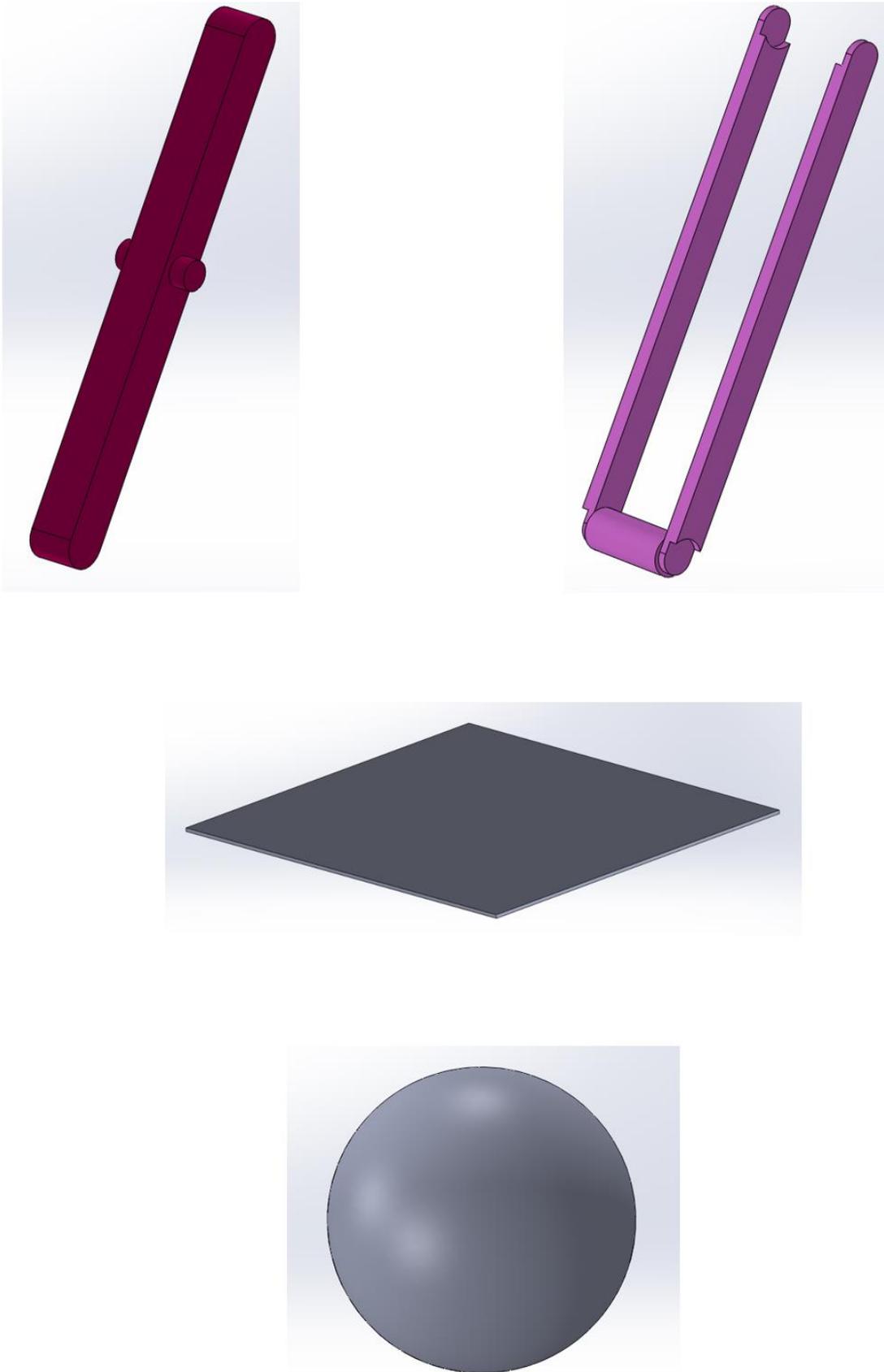


Figura 3.5 – Slitta (alto-sx), supporto slitta (alto-dx), Piano di appoggio (centro), utente (basso).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Si può notare come i 3D realizzati rispecchino molto da vicino le controparti mostrate inizialmente nello schema cinematico, questo sia per avere una corrispondenza geometrica con le quote fondamentali dei link di tale schema (tali misure sono reperibili nel *Capitolo 2*), sia per permettere una riproduzione della posizione del baricentro il più fedele possibile. Sono presenti poi una serie di quote come ad esempio gli spessori che non sono fondamentali per riprodurre fedelmente il modello, ma si è comunque cercato di renderle più vicine possibile a quelle del vero telaio della sedia. Infine, si possono notare alcuni piccoli cilindri e slot circolari su ognuna delle parti che hanno lo scopo di rendere semplice ed intuitivo l'assemblaggio dell'assieme finale. Prima di procedere con la creazione dell'assieme sono state assegnate ad ognuna delle parti le masse adeguate (Tabella 3.3).

| Parti | Massa (kg) | Quantità |
|----------------------------|------------|----------|
| Tripode | 9.75 | 2 |
| Ruota tripode | 1 | 6 |
| Sotto-telaio PC | 49.4 | 1 |
| Sotto-telaio RC | 28.3 | 1 |
| Supporto pivotanti | 3 | 2 |
| Ruota pivotante | 3 | 2 |
| Slitta | 4 | 1 |
| Sostegno slitta | 4.1 | 1 |
| Utente | 80 | 1 |
| Totale | 203.3 | |
| Totale approssimato | 200 | |

Tali masse sono state ottenute dalla tesi di *Perez* [5] e sono state ricavate andando a sommare le masse dei singoli componenti che costituiscono ciascuna delle parti. Per esempio, i sottotelai PC ed RC comprendono tutta la motorizzazione ed elettronica che grava su ciascuno di essi, oltre che al telaio stesso. Il totale approssimato indicato in tabella è un valore di comodo che verrà utilizzato in alcune future valutazioni.

L'ultimo step per la realizzazione del modello 3D è la creazione dell'assieme, ottenuta andando ad accoppiare le parti elencate in precedenza. Fondamentale è la posizione dell'origine degli assi, che deve essere decisa con criterio. La posizione dell'origine sull'assieme 3D su Solidworks sarà infatti la stessa che ritroveremo su Adams ed una scelta intelligente permetterà di semplificare notevolmente la realizzazione di nuove geometrie,

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

accoppiamenti e misurazioni su Adams. Nel nostro caso si è scelto il punto intermedio posto sull'asse congiungente i due tripodi ed a partire da esso sono stati realizzati tutti gli accoppiamenti planari ed assiali necessari a costruire la sedia. Infine, è stato posizionato il piano assicurandosi che ci fosse tangenza con le ruote del modello.

Di seguito (Figura 3.6, 3.7 e 3.8) è possibile vedere l'assieme completo, in cui le parti sono state posizionate tramite relazioni in modo tale da riprodurre la posizione dei gradi di libertà della *marcia in piano* visti nel Capitolo 2.

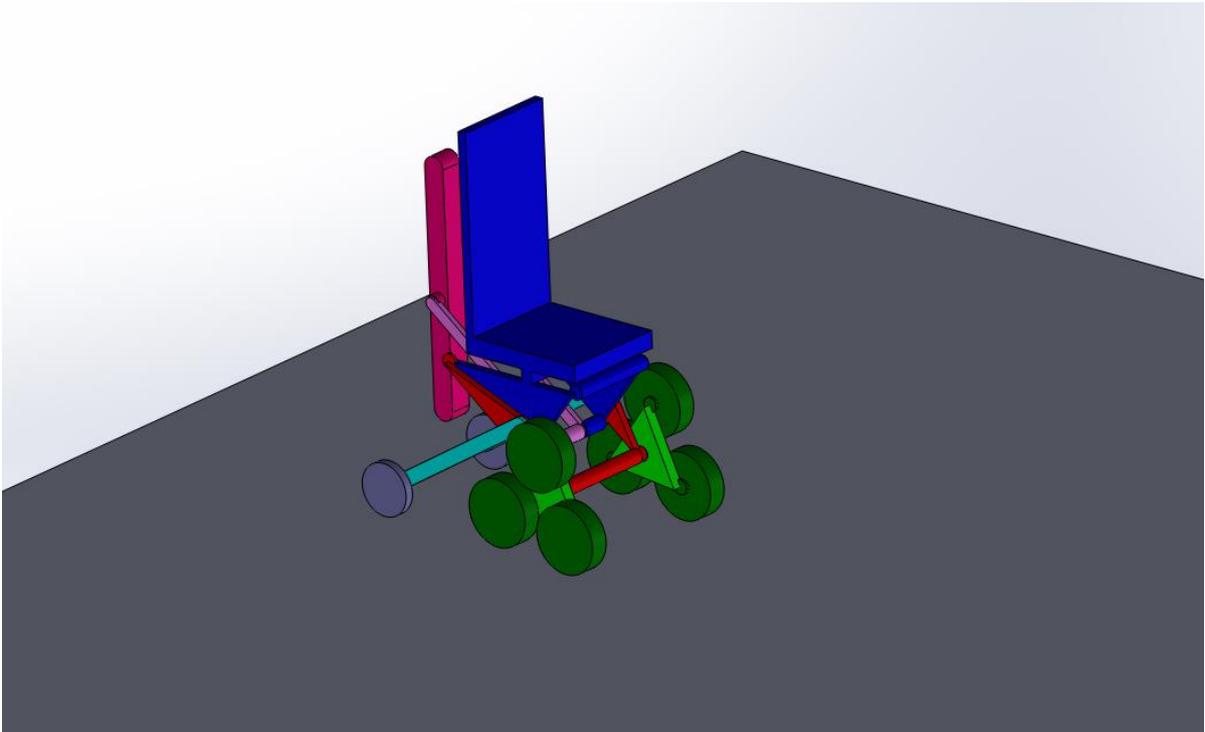


Figura 3.6 – Assieme carrozzina.

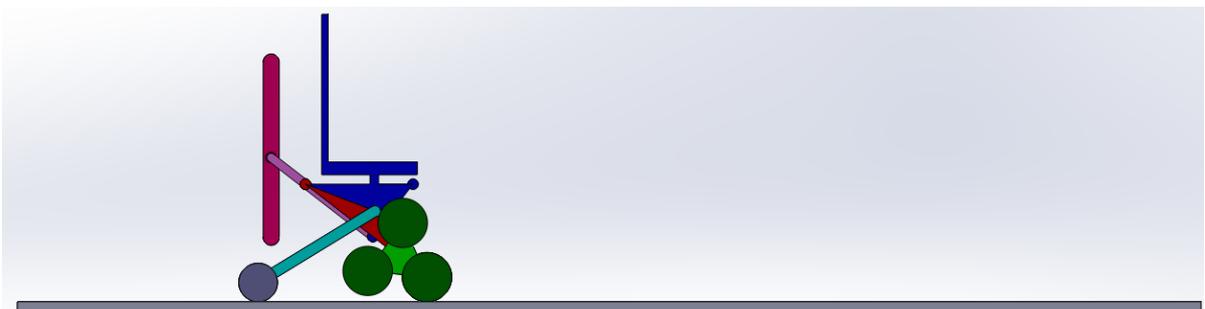


Figura 3.7 – Assieme carrozzina.

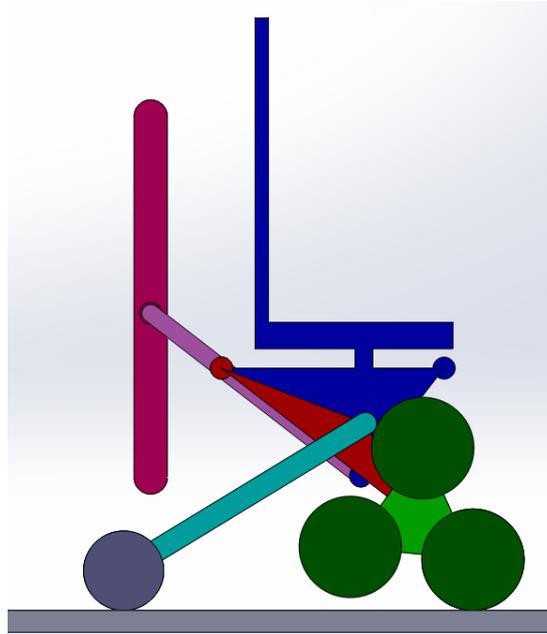


Figura 3.8 – Assieme carrozzina.

Tale assieme è ancora statico, non si muove in quanto la posizione dell'origine degli assi deve rimanere quella decisa in principio. L'assieme è stato infine salvato ed esportato come file Parasolid (File X_T), con lo scopo di renderlo utilizzabile all'interno del software di simulazione Adams.

3.2 Introduzione a MSC Adams View

MSC Adams (Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems) è un software di simulazione dinamica multibody. Adams dispone di un'interfaccia utente grafica completa per modellare l'intero assieme meccanico, oppure permette di importare tali assiami da software esterni. In particolare, è possibile costruire un sistema meccanico all'interno di uno spazio tridimensionale oppure importare file di geometria come i Parasolid.

Il software ha molteplici funzioni utili, di seguito sono elencate le principali:

1. Creazioni di parti 3D rigide o con proprietà di flessibilità;
2. Inserimento di giunti (ad esempio incastri, cerniere, carrelli) che permettono di vincolare il movimento di due corpi qualsiasi;
3. Creazione di ingranaggi;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

4. Permette di inserire ad un qualsiasi giunto un input di movimento rotazionale o traslazionale, tale input può essere di posizione, velocità o accelerazione, inoltre si possono inserire le condizioni iniziali;
5. Si possono inserire forze applicate su punti, molle, coppie ed altri input dinamici;
6. Si possono simulare attriti e forze di contatto;
7. Permette di gestire i dati numerici attraverso spline, matrici, funzioni e altre metodologie;
8. Permette di simulare i sistemi di controllo;
9. Permette di ottenere facilmente qualsiasi tipo di misura cinematica e dinamica, oltre che a creare misurazioni personalizzate;
10. Permette di simulare ingranaggi, cuscinetti, cinghie, catene, cavi, camme e motori elettrici.
11. Simula nel tempo il sistema fisico creato, con gli step di tempo decisi dall'utente e con la possibilità di ricavare qualsiasi tipo di misurazione all'interno della simulazione.

Nella Figura 3.10 è presente un esempio del modello fisico del carrello di atterraggio con sospensione di un aereo creato su Adams View.

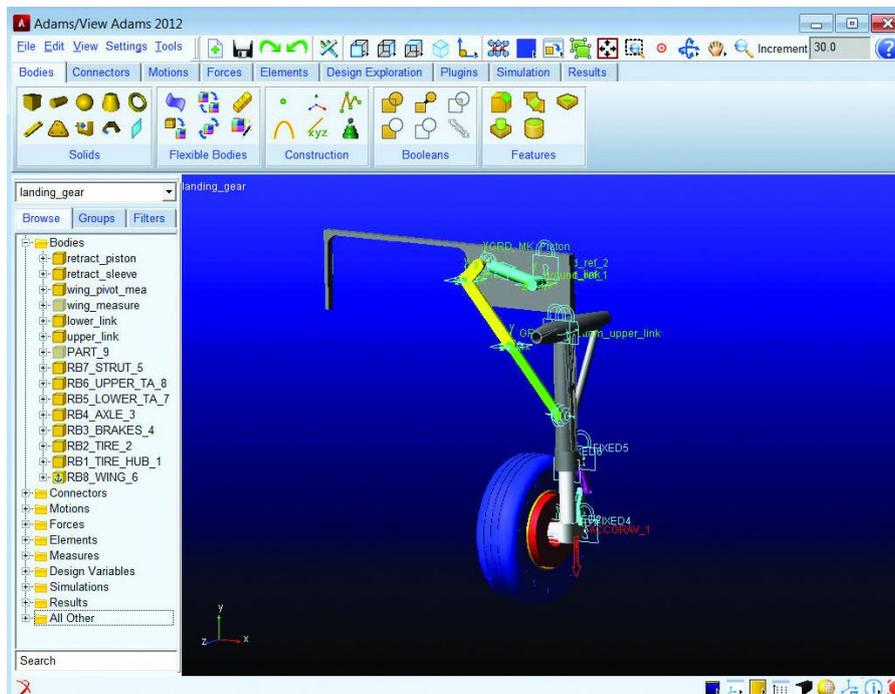


Figura 3.10 – Modello di carrello di un aereo.

3.3 Primi passi per la creazione del modello fisico della carrozzina

Una volta avviato il software *Adams View 2018* si presenta una schermata dalla quale si può creare un nuovo modello oppure aprirne uno già esistente (figura 3.11), per iniziare si seleziona *New Model*.

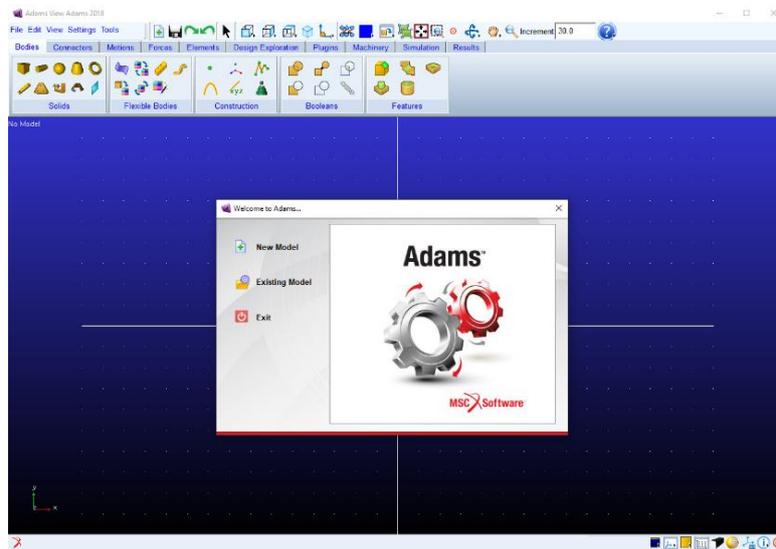


Figura 3.11 – New model.

Una nuova finestra (Figura 3.12) permette di inserire i parametri base del nostro modello:

1. *Model Name*: si inserisce un nome a scelta per il modello, sono consigliati nomi senza spazi e con parole che non facciano riferimento a funzioni presenti all'interno del software;
2. *Gravity*: permette di scegliere se inserire oppure no un'accelerazione di gravità, per adesso si sceglie *Earth Normal (-Global Y)*, cioè una gravità terrestre diretta verso l'asse -Y del sistema di coordinate globali del modello;
3. *Units*: permette di inserire le unità di misura di default che si desiderano, di conseguenza all'interno del modello, quando sarà necessario, basterà inserire i valori numerici senza indicare le relative unità di misura. In questo caso si sceglie il tradizionale *MMKS*;
4. *Working Directory*: si può scegliere la cartella (Figura 3.13) all'interno della quale salvare il modello, è fortemente consigliato salvare all'interno di un percorso analogo a quello mostrato nelle seguenti figure. Il file che verrà creato all'interno di

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

tale percorso sarà un file che possiede il nome del modello precedentemente indicato e la tipologia .bin.

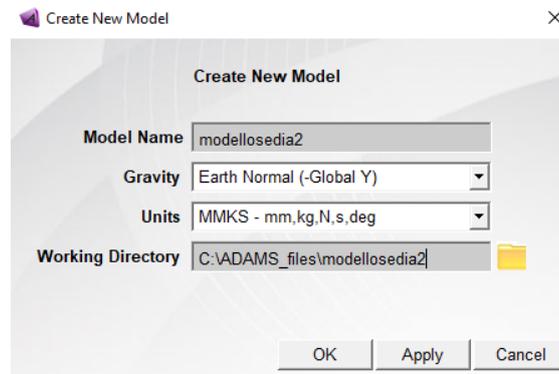


Figura 3.12 – Create New model.

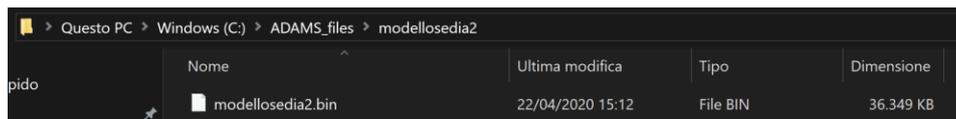


Figura 3.13 – Scelta cartella.

A questo punto si trova di fronte all'interfaccia grafica del software, il modello è aperto, ma è ancora vuoto. Per inserire nel modello il file 3D Parasolid creato precedentemente su Solidworks è necessario andare su *File > Import* ed inserire i seguenti parametri (Figura 3.14):

1. *File Type*: permette di inserire la tipologia di file 3D da importare, si sceglie *Parasolid*;
2. *File To Read*: cliccando con il tasto destro del mouse e scegliendo *Browse...* si può inserire il file Parasolid. Da notare che ogni volta in cui si incontra un box vuoto simile sarà possibile agire su di esso tramite il tasto destro del mouse;
3. *Model Name*: si inserisce il nome del modello già deciso in precedenza;

Le opzioni e opzioni *File Type* e *Ref. Markers* vanno lasciate come in figura, mentre *Explode Assembly* va selezionato, come da impostazioni di default.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

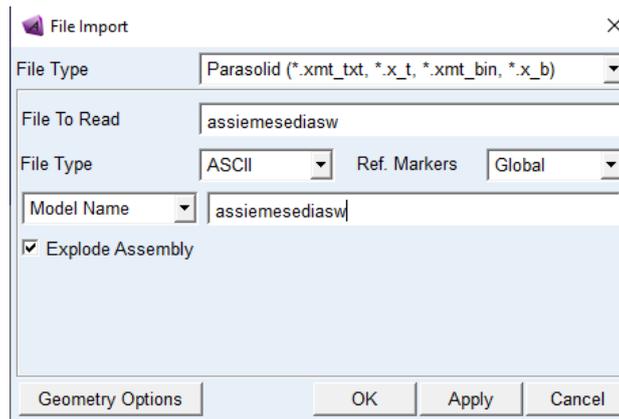


Figura 3.14 – File import.

Una volta completato questo passaggio si trova di fronte alla carrozzina inserita all'interno dell'ambiente Adams (Figura 3.15).

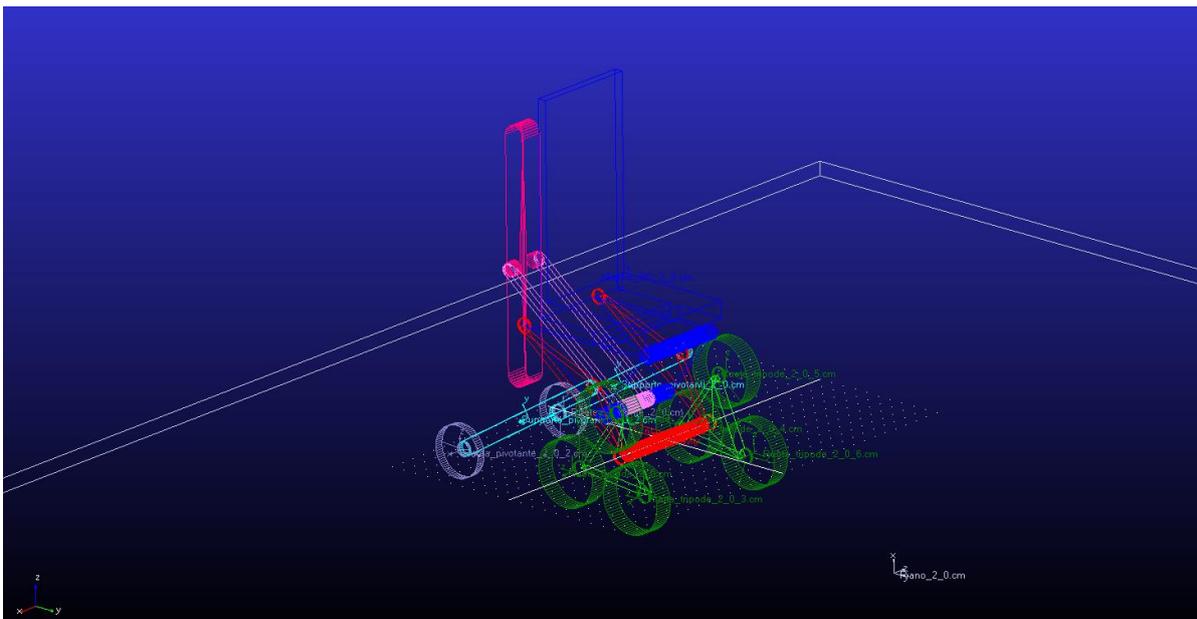


Figura 3.15 – Carrozzina importata su Adams.

Si possono notare le singole parti, facilmente identificabili dalle colorazioni che sono state date su Solidworks, nonché le indicazioni dei loro centri di massa e sistemi di riferimento locali (se non compaiono cliccare *v* sulla tastiera). Fondamentale è la posizione dell'origine del sistema di coordinate globale, il modello conserva l'informazione data sul file di Solidworks e l'origine degli assi si trova di conseguenza dove ci si aspettava, cioè nel punto intermedio

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

possa essere spostata ed orientata ovunque a seconda delle necessità. Per terminare, selezionando il box *Set Orientation...* è possibile selezionarne l'orientazione.

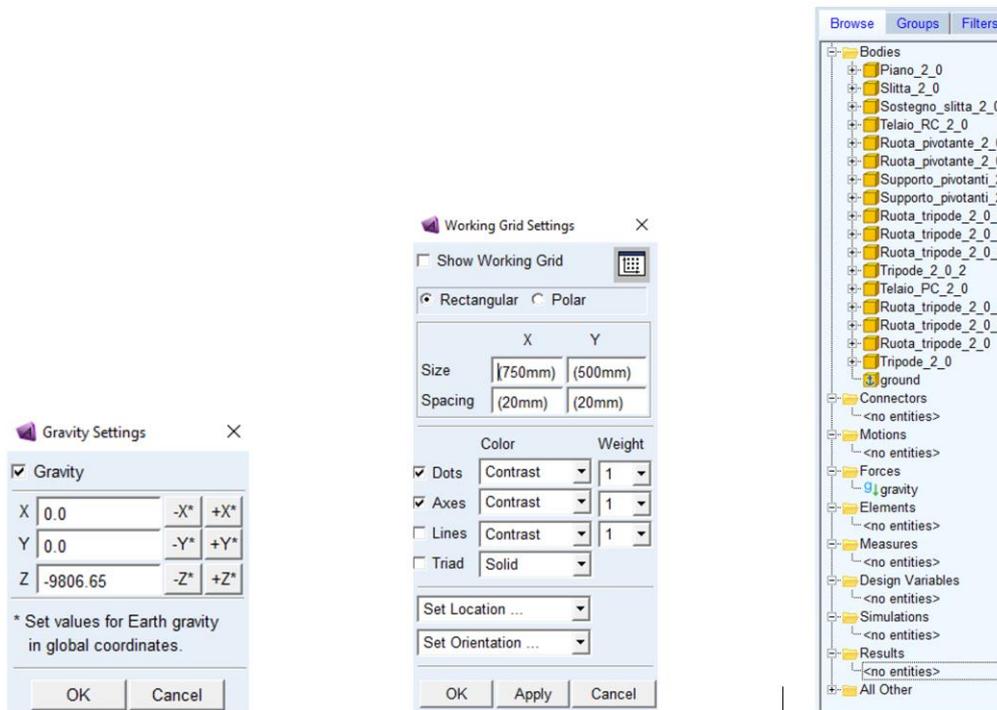


Figura 3.17 – Settaggi Adams e Bodies carrozzina.

Completata l'impostazione dell'ambiente di lavoro, è possibile muovere il modello, ruotarlo e compiere degli zoom tramite i tasti *t*, *r* e *z* della tastiera, in aggiunta agli strumenti presenti sulla barra superiore dell'interfaccia. E' importante analizzare la finestra *Browse* posta sulla sinistra della schermata. Essa contiene tutti gli elementi che costituiscono il modello:

1. *Bodies*: contiene tutte le parti che compongono l'assieme (Figura 3.17) Solidworks che è stato precedentemente importato, più lo sfondo (*ground*). Da qui è possibile evidenziare una parte, modificarne le proprietà di massa e le condizioni iniziali di posizione e velocità, modificarne lo stile grafico, visualizzarne le informazioni e ricavarne diverse misure base;
2. *Connectors*: raccoglie tutti i vincoli che verranno inseriti. E' importante notare come il modello attuale non possieda alcun vincolo, nonostante su Solidworks siano stati eseguiti degli accoppiamenti. Questi ultimi in ambiente Adams danno solo una collocazione spaziale iniziale alle parti ma, senza vincoli, una volta avviata la simulazione tali parti semplicemente si dividono e vengono attratte caoticamente

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

dalla forza di gravità. Da qui è possibile imporre delle condizioni iniziali ai vincoli ed effettuare misurazioni direttamente su di essi;

3. *Motions*: raccoglie tutti gli input cinematici inseriti nel modello. E' possibile modificarne tipologia, condizioni iniziali e input numerici;
4. *Forces*: raccoglie tutte le forze e coppie esterne, la gravità, molle e forze di contatto sulle quali si potrà agire per modificarne le proprietà fisiche;
5. *Elements*: contiene le entità numeriche utilizzate nel software, come matrici o spline di dati. Verranno usate principalmente per creare gli input per i Motions;
6. *Measures*: raccoglie tutte le misure introdotte nel modello;
7. *Design Variables*: contiene i dati dei sistemi di controllo.

La prima cosa da verificare è che le proprietà di massa delle singole parti siano state importate correttamente (Figura 3.18). Andando su *Browse*, cliccando con il destro su una qualsiasi parte e selezionando *Info* è possibile effettuare tale controllo osservando la riga *Mass* della nuova schermata. Se tale informazione fosse per qualche motivo nulla bisognerebbe invece selezionare *Modify* anziché *Info*, aprendo così una diversa finestra. In tale schermata si seleziona *Mass Properties* dal menù a tendina *Category* e *User Input* dal menù a tendina *Define Mass By*, infine si inserisce il valore della massa all'interno del box *Mass*.

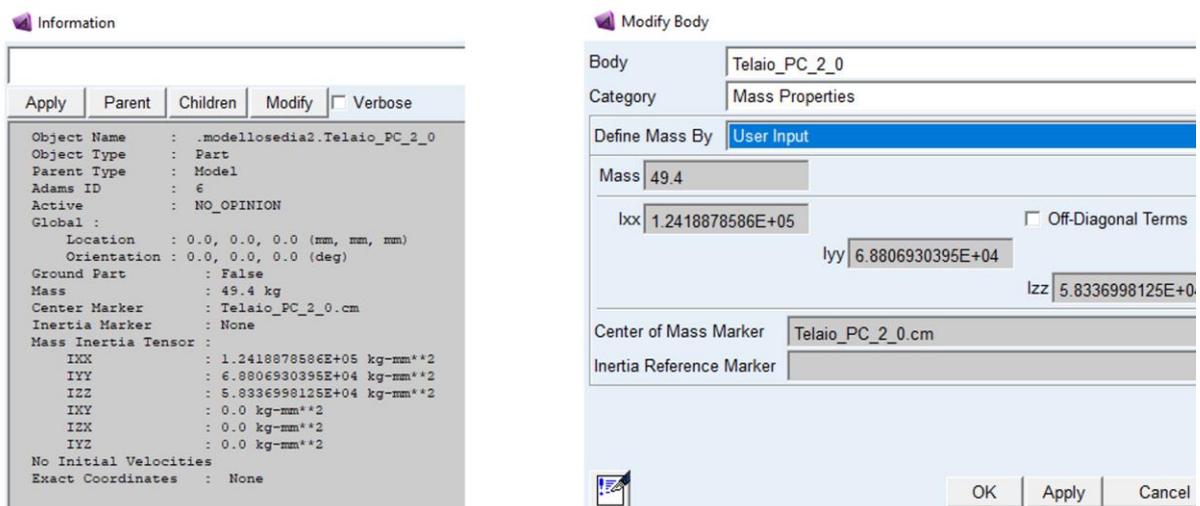


Figura 3.18 – Settaggio masse.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Sono inoltre molto comode le possibilità di personalizzazione visiva delle parti (Figura 3.19). Cliccando con il destro una parte e selezionando *Appearance* è possibile modificarne il colore e la renderizzazione da *Wireframe* a *Filled*, per ottenere dei solidi trasparenti o pieni a seconda delle esigenze.

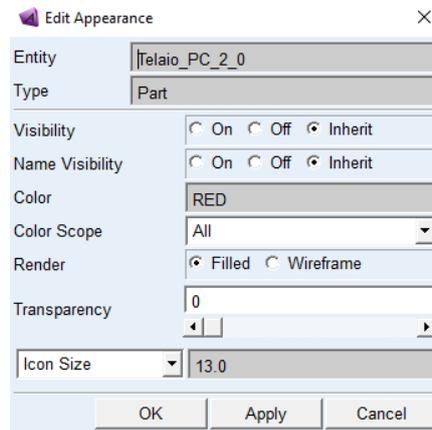


Figura 3.19 – Settaggio visivo delle parti.

3.4 Creazione dei vincoli

La creazione dei vincoli è la prima vera fase che deve essere compiuta per creare il sistema fisico. Andando sulla scheda *Connectors*, sezione *Joints*, è possibile scegliere la tipologia di vincolo voluto. Quelli che verranno utilizzati sono (Figura 3.20):

1. Fixed joint;
2. Revolute joint;
3. Translational joint.



Figura 3.20 – Vincoli

I fixed joint (Figura 3.21) verranno utilizzati per fissare un corpo ad un altro in un punto ben definito dello spazio. Per fare questo è necessario cliccare sull'icona del lucchetto, portando all'apertura di una nuova schermata posta sopra la scheda *Browse*. Da cui si procede alla creazione del vincolo tramite le seguenti opzioni:

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

1. Il primo menù a tendina permette di scegliere quanti corpi e punti dello spazio sono implicati nel vincolo. Nel caso in esame sarà sempre necessario vincolare un corpo 1 ad un corpo 2 in un punto dello spazio, si utilizza *2 Bodies – 1 Location*;
2. Il secondo menù a tendina permette di scegliere l'orientazione del vincolo. Per comodità si utilizzerà sempre *Normal To Grid*, nel caso dei fixed joint tale orientazione è in ogni caso ininfluyente;
3. *1st e 2nd*: si può scegliere se si vogliono vincolare dei corpi o delle curve qui si utilizzeranno sempre dei corpi selezionando *Pick Body* per entrambi.

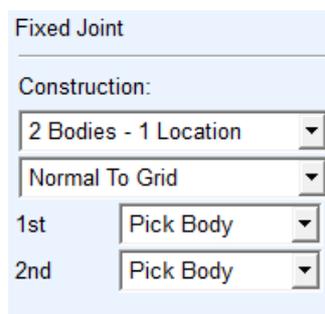


Figura 3.21 – Fixed joint.

I revolute joint verranno utilizzati per creare una cerniera con lo scopo di vincolare un corpo 1 ad un corpo 2 mantenendo la possibilità ai due corpi di ruotare l'uno rispetto all'altro. Le opzioni usate sono le stesse scelte per i fixed joint, avendo l'accortezza di orientare la *Working Grid* perpendicolarmente all'asse di rotazione del vincolo visto che si usa l'opzione *Normal To Grid*.

I translational joint permettono di creare una guida prismatica con lo scopo di vincolare un corpo 1 ad un corpo 2 mantenendo la possibilità per i due corpi di scorrere l'uno rispetto all'altro lungo la direzione imposta da un vettore scelto durante la creazione del vincolo. Le impostazioni scelte sono dunque le stesse di prima tranne che per il secondo menù a tendina nel quale va selezionato *Pick Geometry Feature*.

Di seguito (Tabella 3.4) viene presentata una tabella che racchiude tutti i vincoli necessari ad unire le parti e a creare il sistema cinematico della sedia visto all'inizio del capitolo.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

| Tabella 3.4 – Vincoli del modello | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Nome vincolo | Tipologia | 1st Body | 2nd Body |
| Slitta-SostegnoSlitta | Revolute (attorno all' asse x) | Sostegno slitta | Slitta |
| SostegnoSlitta-RC | Revolute(x) | Telaio RC | Sostegno slitta |
| RuotaPiv1-SupportoPiv1 | Revolute(x) | Supporto pivotante 1 | Ruota pivotante 1 |
| RuotaPiv2-SupportoPiv2 | Revolute(x) | Supporto pivotante 2 | Ruota pivotante 2 |
| SupportoPiv1-PC | Revolute(x) | Telaio PC | Supporto pivotante 1 |
| SupportoPiv2-PC | Revolute(x) | Telaio PC | Supporto pivotante 2 |
| RC-PC | Revolute(x) | Telaio RC | Telaio PC |
| Tripode1-PC | Revolute(x) | Tripode 1 | Telaio PC |
| Tripode2-PC | Revolute(x) | Tripode 2 | Telaio PC |
| RuotaTrip1-Tripode1 | Revolute(x) | Ruota tripode 1 | Tripode 1 |
| RuotaTrip2-Tripode1 | Revolute(x) | Ruota tripode 3 | Tripode 1 |
| RuotaTrip3-Tripode1 | Revolute(x) | Ruota tripode 3 | Tripode 1 |
| RuotaTrip4-Tripode2 | Revolute(x) | Ruota tripode 4 | Tripode 2 |
| RuotaTrip5-Tripode2 | Revolute(x) | Ruota tripode 5 | Tripode 2 |
| RuotaTrip6-Tripode2 | Revolute(x) | Ruota tripode 6 | Tripode 2 |
| Piano-Sfondo | Fixed | Piano | Sfondo |

NB: I nomi dei vincoli e dei corpi presenti nella tabella non corrispondono in modo esatto a quelli presenti nel file Adams in quanto tali nomi sono stati abbreviati o modificati per rendere più comoda e veloce la creazione del modello al computer. I nomi qui presenti sono completi in modo tale da rendere comprensibili i vincoli e le parti che li compongono. Inoltre andando avanti nella trattazione verranno aggiunte delle parti 3D che porteranno alla modifica di tali vincoli e all'aggiunta di ulteriori.

Di seguito viene mostrata la creazione del vincolo di tipologia *Revolute* Slitta-SostegnoSlitta:

1. Inizialmente va orientata la *Working Grid* ragionando sulla direzione che avrà l'asse di rotazione del vincolo. In questo caso l'opzione *Set Orientation...* andrà impostata su *Global YZ*. La posizione della griglia è invece ininfluenza.
2. Una volta selezionata l'icona *Create a Revolute Joint* ed inserite le opzioni viste in precedenza, sarà necessario, come da istruzioni riportate sulla barra inferiore dell'interfaccia (Figura 3.22), selezionare direttamente sul modello il primo corpo, cioè il sostegno della slitta come indicato in tabella.

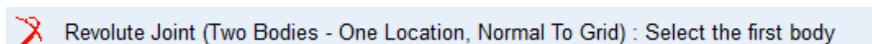


Figura 3.22 – Istruzioni 1.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

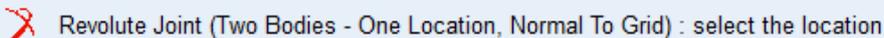
3. Si procede selezionando il secondo corpo, cioè la slitta, come da istruzioni (Figura 3.23).



Revolute Joint (Two Bodies - One Location, Normal To Grid) : Select the second body

Figura 3.23 – Istruzioni 2.

4. Infine si seleziona la posizione del vincolo (Figura 3.24). Il punto scelto può essere uno qualsiasi che si trovi sull'asse di rotazione del vincolo, il fatto che il punto appartenga al primo corpo o al secondo non è importante, cioè che conta è che si trovi lungo l'asse di rotazione. Tali punti vengono generati automaticamente durante la creazione/importazione della geometria e vengono visualizzati con un nome riportante una lettera maiuscola seguita da un numero (es: E48). In questo caso i profili cilindrici e circolari creati su Solidworks danno un grosso aiuto in quanto portano, durante alla fase di importazione del modello, alla creazione automatica di una serie di punti situati lungo gli assi di tali cilindri. Questo porta al fatto che basti semplicemente scorrere il mouse lungo gli assi di simmetria di tali cilindri per individuare un buon numero di punti che è possibile selezionare.



Revolute Joint (Two Bodies - One Location, Normal To Grid) : select the location

Figura 3.24 – Istruzioni 3.

Introduzione ai Marker:

Se le geometrie in questione non portano alla creazione automatica di alcun punto diventa necessario creare dei Marker: i Marker sono dei punti presenti all'interno del modello, possono essere globali o propri della singola parte e vengono generati automaticamente durante la creazione/importazione della geometria oppure possono essere creati manualmente. Andando su *Browse > Bodies* ed aprendo la cartella relativa ad una qualsiasi parte è possibile vedere l'elenco dei suoi Marker creati automaticamente (es: MARKER_180) assieme al Marker cm del centro di massa della parte. Selezionando un qualsiasi Marker è possibile modificarne la posizione e rinominarlo.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Per creare invece un Marker è necessario andare su *Bodies > Costruction > Marker*, portando all'apertura della seguente schermata posta sopra *Browse* (Figura 3.25).



Figura 3.25 – Marker.

Dal primo box è possibile selezionare se vincolare un Marker allo sfondo o ad una parte (di solito si seleziona *Add to Part*), mentre dal secondo box si può selezionare l'orientazione della terna di assi propria del Marker. In seguito si seleziona dal modello 3D prima la parte a cui si vuole vincolare il Marker e poi il punto su cui posizionarlo. Se il punto, come prevedibile, non è presente basta cliccare con il destro sullo sfondo per aprire una finestra in cui inserire le coordinate X-Y-Z relative all'origine volute (Figura 3.26).

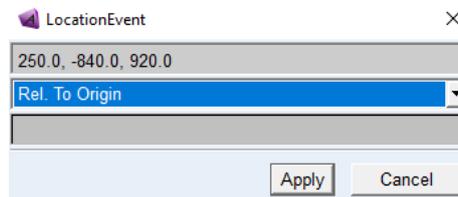


Figura 3.26 – Posizionamento punto.

Durante la creazione dei vincoli tuttavia non sarà necessario inserire alcun Marker in quanto basteranno i punti generati automaticamente dalle geometrie create su Solidworks, rendendo il processo molto più veloce.

5. Infine è possibile osservare il vincolo creato (se non è visibile si preme *v* sulla tastiera) e verificarne l'asse di rotazione (Figura 3.27 e 3.28). Tale vincolo è rinominabile andando su *Browse*, selezionando con il destro il vincolo all'interno della cartella *Connectors* e cliccando *Rename*, il nuovo nome è inseribile nel box *New Name*. Selezionando invece *Info* o *Modify* è possibile avere un riassunto delle

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

caratteristiche del vincolo oppure modificarne i parametri ed effettuare misurazioni.

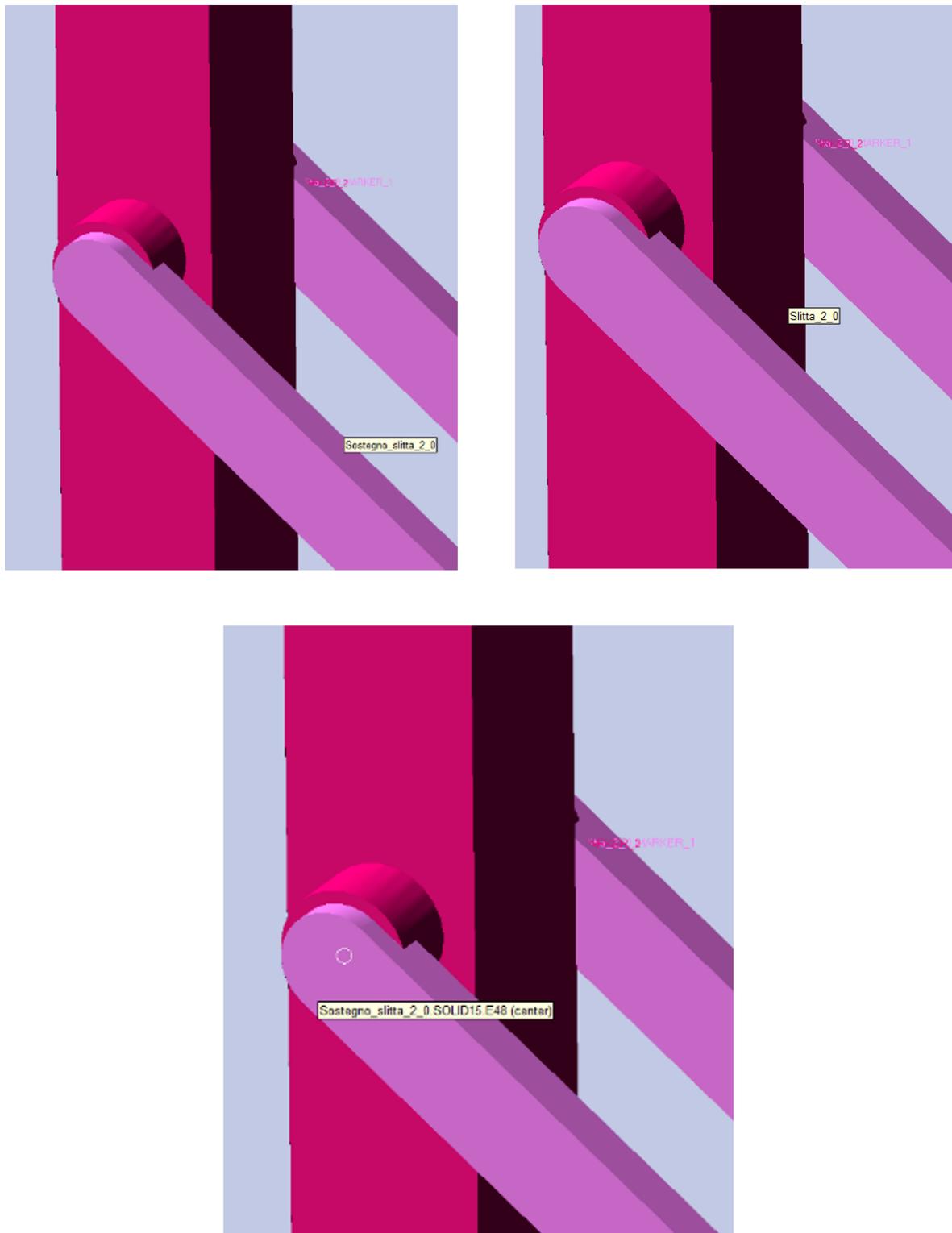


Figura 3.27 – Selezione dei corpi e del punto che permettono la creazione del vincolo.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

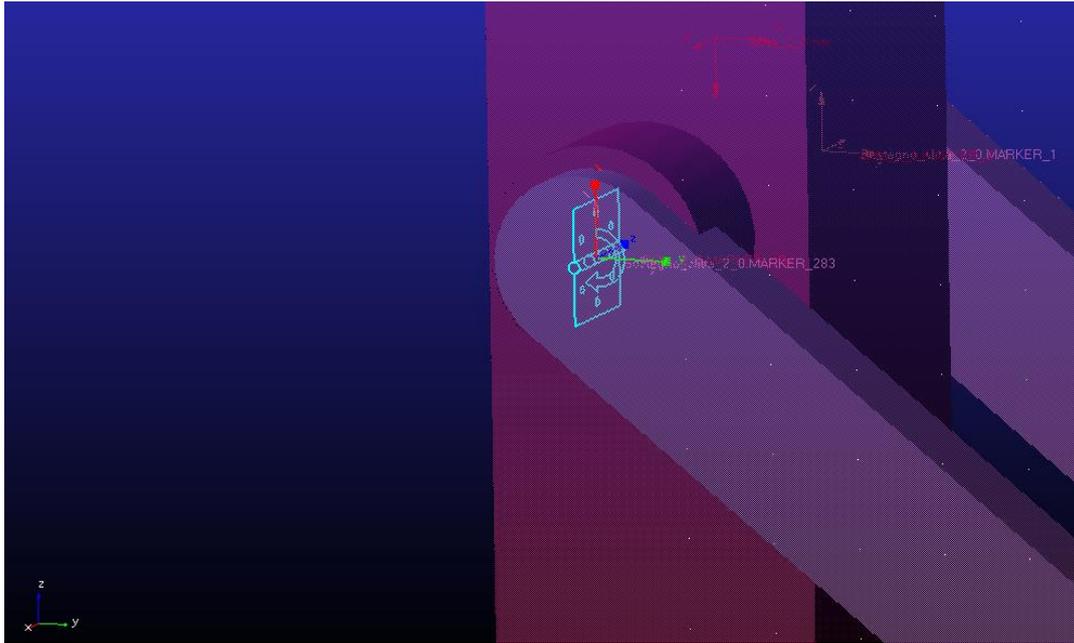


Figura 3.28 – Vincolo ultimato.

Il procedimento è analogo per tutte le altre cerniere.

Per quanto riguarda il vincolo di tipo *fixed* che blocca il piano rispetto allo sfondo segue gli stessi passaggi dei vincoli di tipo *revolute*, tranne per il fatto che la griglia può essere orientata in qualsiasi modo e che il punto su cui creare il vincolo può essere uno qualsiasi. Di seguito viene mostrato il risultato finale (Figura 3.29).

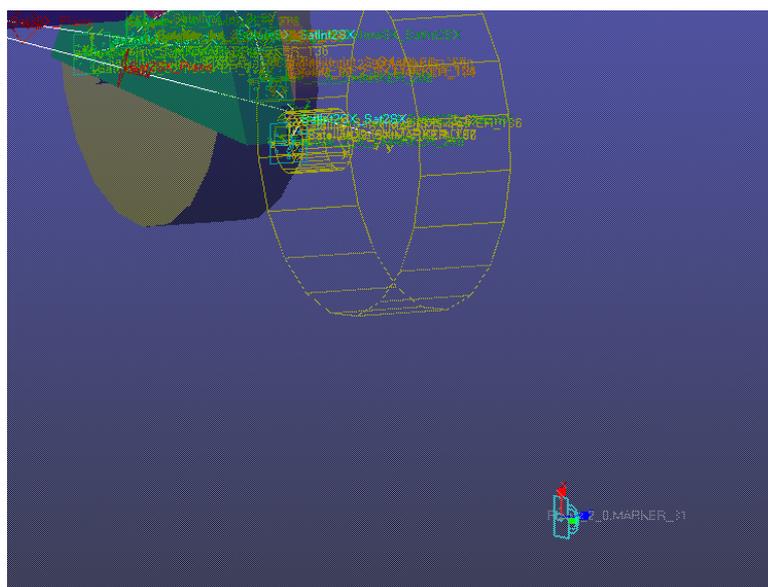


Figura 3.29 – Vincolo di tipo fixed.

3.5 Creazione delle forze di contatto

Giunti a questo punto il modello cinematico di base della sedia è completo, ma prima di dargli dei movimenti bisogna che esso interagisca con l'ambiente che lo circonda, in questo caso il piano di appoggio. Avviare una simulazione ora porterebbe infatti la sedia a sprofondare verso l'asse -Z trascinata dalla forza di gravità, attraversando il piano e non producendo alcuna interazione con esso. Ciò che si vuole ricreare sono quindi le reazioni vincolari e le forze di attrito che si generano al contatto di ognuna delle otto ruote con il piano e che permettono alla sedia di stare in equilibrio statico. Non è necessario ricreare i contatti tra altre parti della sedia e il piano in quanto entrerebbero in azione solamente in caso di ribaltamento e appesantirebbero inutilmente il modello; non viene neanche simulato il contatto tra slitta e piano in quanto nelle simulazioni di salita/discesa gradino viste non è un elemento che entra in gioco.

All'interno di Adams è presente la possibilità di creare le forze che si generano al contatto tra due corpi andando su *Forces > Special Forces > Create a Contact*. Selezionata l'icona si apre una finestra all'interno della quale si possono scegliere il tipo di contatto voluto e i valori numerici che ne determinano l'azione, in particolare si hanno:

1. *Contact Name*: si sceglie a piacere il nome della forza di contatto;
2. *Contact Type*: si sceglie la tipologia delle entità che vanno a contatto, nel nostro caso saranno sempre due corpi solidi e quindi si sceglie *Solid to Solid*;
3. *I Solid(s)*: si inserisce a piacere il primo dei due solidi che andranno a contatto tra di loro, nel nostro caso sarà una delle otto ruote che vanno a contatto con il piano;
4. *J Solid(s)*: si inserisce il secondo solido che va a contatto, in questo caso sarà sempre il piano;
5. *Force Display*: attivare l'opzione con un determinato colore è consigliato in quanto permette di visualizzare le forze di contatto tramite dei vettori reazione vincolare e attrito che si modificano in tempo reale durante la simulazione;
6. *Normal Force*: permette di definire le reazioni vincolari nei seguenti modi:
 - I. *User Defined*: attraverso una funzione inserita dall'utente;
 - II. *Restitution*: a seconda dei valori dati a *Penalty* e *Restitution Coefficient*, permette di ricreare l'intero range che va dall'urto elastico all'urto completamente anelastico;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

III. *Impact*: consente di simulare l'urto in modo più realistico andando ad impostare i seguenti valori:

- a) Stiffness (rigidezza);
- b) Force Exponent (esponente di forza);
- c) Damping (smorzamento);
- d) Penetration Depth (profondità di penetrazione).

7. *Friction Force*: permette di simulare le forze di attrito nei seguenti modi:

- I. *User Defined*: attraverso una funzione inserita dall'utente;
- II. *None*: crea un modello senza attrito;
- III. *Coulomb*: utilizza il modello dell'attrito coulombiano, inserendo in input i seguenti parametri:

- a) Coulomb Friction;
- b) Static Coefficient (coefficiente di attrito statico);
- c) Dynamic Coefficient (coefficiente di attrito dinamico);
- d) Stiction Transition Vel.;
- e) Friction Transition Vel.

Nel modello verranno utilizzati sempre una reazione vincolare di tipo *Impact* ed una forza di attrito di tipologia *Coulomb*. Di seguito viene presentato l'elenco di tutte le forze di contatto da inserire all'interno del modello (Tabella 3.5).

| Nome forza di contatto | I Solid | J Solid |
|------------------------|-------------------|---------|
| RuotaTrip1-Piano | Ruota tripode 1 | Piano |
| RuotaTrip2-Piano | Ruota tripode 2 | Piano |
| RuotaTrip3-Piano | Ruota tripode 3 | Piano |
| RuotaTrip4-Piano | Ruota tripode 4 | Piano |
| RuotaTrip5-Piano | Ruota tripode 5 | Piano |
| RuotaTrip6-Piano | Ruota tripode 6 | Piano |
| RuotaPiv1-Piano | Ruota pivotante 1 | Piano |
| RuotaPiv2-Piano | Ruota pivotante 2 | Piano |

Le forze create saranno elencate nella schermata *Browse*, all'interno della cartella *Forces*, insieme ad esse è visibile anche la forza di gravità. Viene ora mostrato l'esempio di creazione della forza di contatto RuotaTrip1-Piano:

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

1. Si seleziona l'icona *Create a Contact* (Figura 3.30), aprendo la finestra in cui inserire i dati numerici che permettono di modellare il contatto;



Figura 3.30 – Create a Contact.

2. Si inseriscono i dati presenti nella seguente immagine (Figura 3.31); come per il discorso già fatto sui vincoli alcuni nomi differiscono da quelli in tabella. Da notare che nella casella *J Solid(s)* sono presenti due solidi: il piano e il gradino. Per ora si inserisce solamente il piano in quanto il gradino verrà realizzato in 3D e poi inserito successivamente;

Una finestra di dialogo software intitolata "Modify Contact".

| | |
|---|--------------------------|
| Contact Name | Sat1_Piano |
| Contact Type | Solid to Solid |
| I Solid(s) | Satellite_1.CYLINDER_114 |
| J Solid(s) | SOLID17,Gradino |
| <input checked="" type="checkbox"/> Force Display | Red |
| Normal Force | Impact |
| Stiffness | 1.0E+05 |
| Force Exponent | 2.2 |
| Damping | 10.0 |
| Penetration Depth | 0.1 |
| <input type="checkbox"/> Augmented Lagrangian | |
| Friction Force | Coulomb |
| Coulomb Friction | On |
| Static Coefficient | 0.3 |
| Dynamic Coefficient | 75.0 |
| Stiction Transition Vel. | 100.0 |
| Friction Transition Vel. | 1000.0 |
| OK Apply Close | |

Figura 3.31 – Modify Contact.

3. Infine si può notare visivamente (Figura 3.32) come viene rappresentato il contatto su Adams: questo avviene tramite una retta che lega la ruota del tripode con

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

l'origine degli assi globale ed un riquadro rosso dotato di freccia che punta verso di esso.

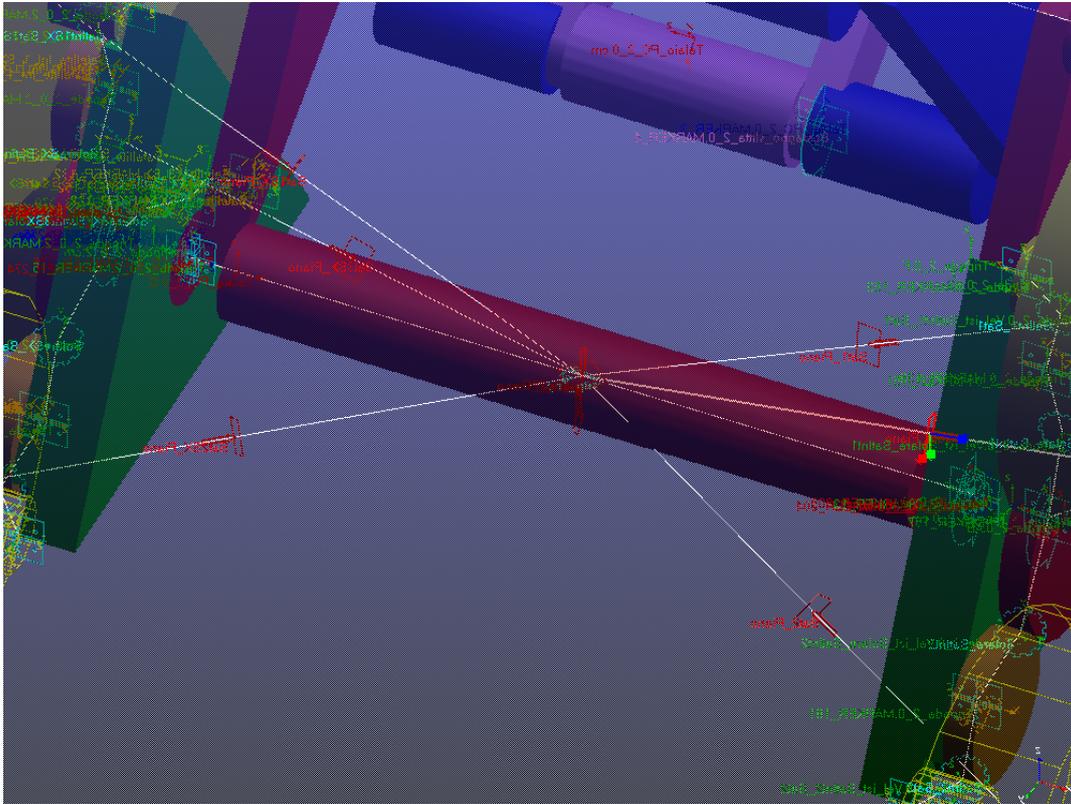


Figura 3.32 – Forze di contatto.

Tale procedimento va ripetuto per tutti gli altri contatti elencati in tabella avendo l'accortezza di inserire un *Dynamic Coefficient* di 0.1 nel vaso dei due contatti tra ruote pivotanti e piano.

3.6 Creazione degli input di movimento

Completato il modello fisico di base della sedia è necessario imporre dei movimenti (Figura 3.33) sui gradi di libertà in quanto, avviare la simulazione senza di essi, porterebbe le varie parti a ruotare liberamente l'una rispetto all'altra. Il risultato sarebbe quello di un modello 3D senza alcuna cerniera bloccata o dotata di movimenti prestabiliti e che si appoggerebbe al suolo. Gli input di movimento vengono creati grazie ai *Motion* ed applicati ai vincoli creati in precedenza. Andando su *Motions > Joint Motions* è possibile individuarne due tipologie:

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

1. Translational Joint Motion.
2. Rotational Joint Motion.



Figura 3.33 – Joint Motions.

I *Translational Joint Motion* si utilizzano per imporre dei movimenti ai *Translational Joint*, ma nel nostro caso non verranno usati in quanto la sedia non ne è dotata.

I *Rotational Joint Motion* si utilizzano per imporre dei movimenti ai *Revolute Joint* e saranno la tipologia di *Motion* che verrà usata nel nostro caso. Per applicarne uno su una cerniera è necessario cliccare sulla relativa icona, aprendo così una nuova schermata al di sopra della scheda *Browse* (Figura 3.34). A questo punto è sufficiente inserire la velocità di rotazione all'interno del box *Rot. Speed* e cliccare il vincolo di tipologia *Revolute* sul quale si vuole applicare il *Motion* direttamente dal modello 3D.

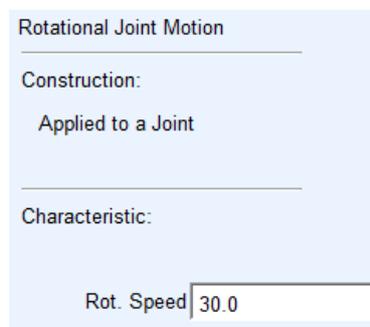


Figura 3.34 – Joint Motions.

Una volta creato il *Motion* esso apparirà su *Browse > Motions* e sarà possibile modificarne i parametri attraverso un doppio clic facendo comparire una nuova finestra con le seguenti caselle:

1. *Name*: nome a piacere assegnato al *Motion*;
2. *Joint*: vincolo al quale è stato assegnato;
3. *Joint Type*: tipologia di *Motion* scelta, nel nostro caso sarà sempre *revolute*;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

4. *Direction*: collegata alla tipologia di vincolo, nel nostro caso sarà sempre *Rotational*;
5. *Define Using*: in questo box si specifica come si vuole imporre l'input di movimento, se attraverso una funzione o una subroutine, nel nostro caso sarà sempre attraverso una *Function*;
6. *Function (time)*: in questo box si può inserire la funzione voluta. Nel nostro caso varierà da un input all'altro e tali funzioni verranno analizzate in seguito, ma è comunque possibile inserire semplici funzioni per esercitarsi con il modello. Ad esempio "30d*time" impone sul Motion una rotazione di 30 gradi (deg) al secondo;
7. *Type*: indica se la funzione è di spostamento, velocità o di accelerazione. Nel nostro caso le funzioni saranno simili a quella indicata nell'esempio precedente la quale è una funzione di spazio (si legge 30 gradi al secondo), quindi useremo sempre una tipologia *Displacement*;
8. *Displacement IC e Velocity IC*: nel caso si scelgano funzioni basate sulla velocità o l'accelerazione è possibile inserire le condizioni iniziali di spostamento e velocità;

Di seguito (Figura 3.35) è mostrato un esempio della finestra di modifica di un *Motion* applicato al vincolo che lega il sotto-telaio PC con il sotto-telaio RC. Impostando ad esempio una *Function (time)* pari a 0 in *Displacement* si ottiene un movimento reciproco tra le parti nullo e il vincolo risulta bloccato.

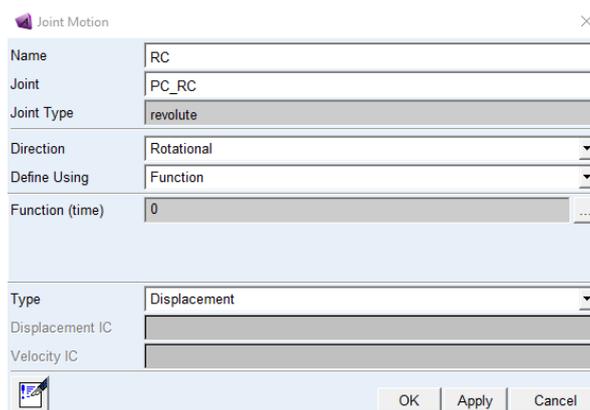


Figura 3.35 – Rotational Joint Motion - Modifica.

Di seguito viene presentato l'elenco dei *Motion* (Tabella 3.6) inizialmente applicati alla sedia e la loro collocazione (Figura 3.36 e 3.37).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

| Tabella 3.6 – Elenco Motion modello carrozzina | | |
|--|-------------------------|--------------------------------|
| Nome Motion | Vincolo di applicazione | Movimento |
| Ruota1 | RuotaTrip1-Tripode1 | Avanzamento lato sinistro |
| Ruota4 | RuotaTrip4-Tripode2 | Avanzamento lato destro |
| Tripode2 | Tripode2-PC | Variazione di ϑ_P |
| RC | RC-PC | Variazione di β |
| SostegnoSlitta | SostegnoSlitta-RC | Variazione di ϑ_{ES} |
| Slitta | Slitta-SostegnoSlitta | Variazione di ϑ_T |
| SupportoPiv2 | SupportoPiv2-PC | Variazione di ϑ_{DU} |

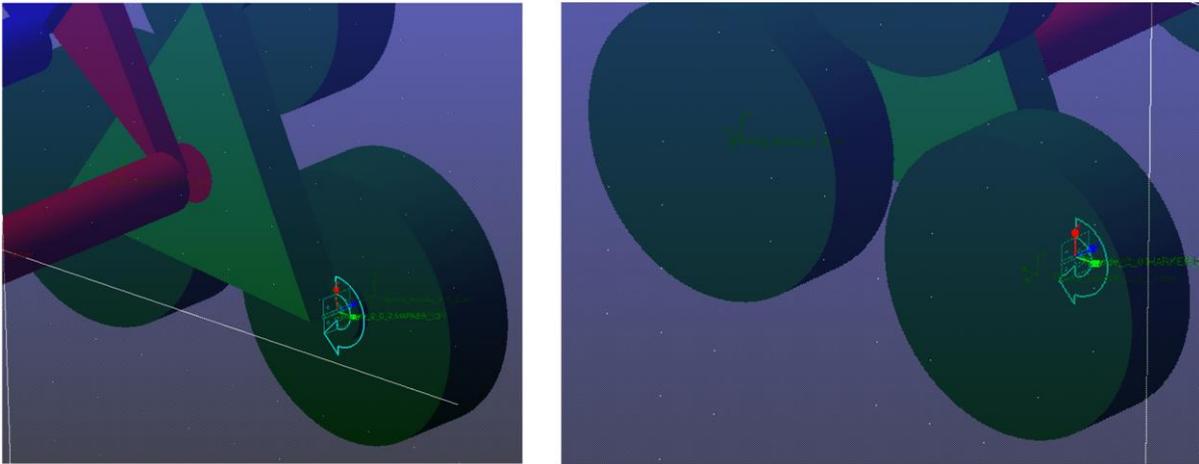


Figura 3.36 –Motions Ruota1 e Ruota4.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

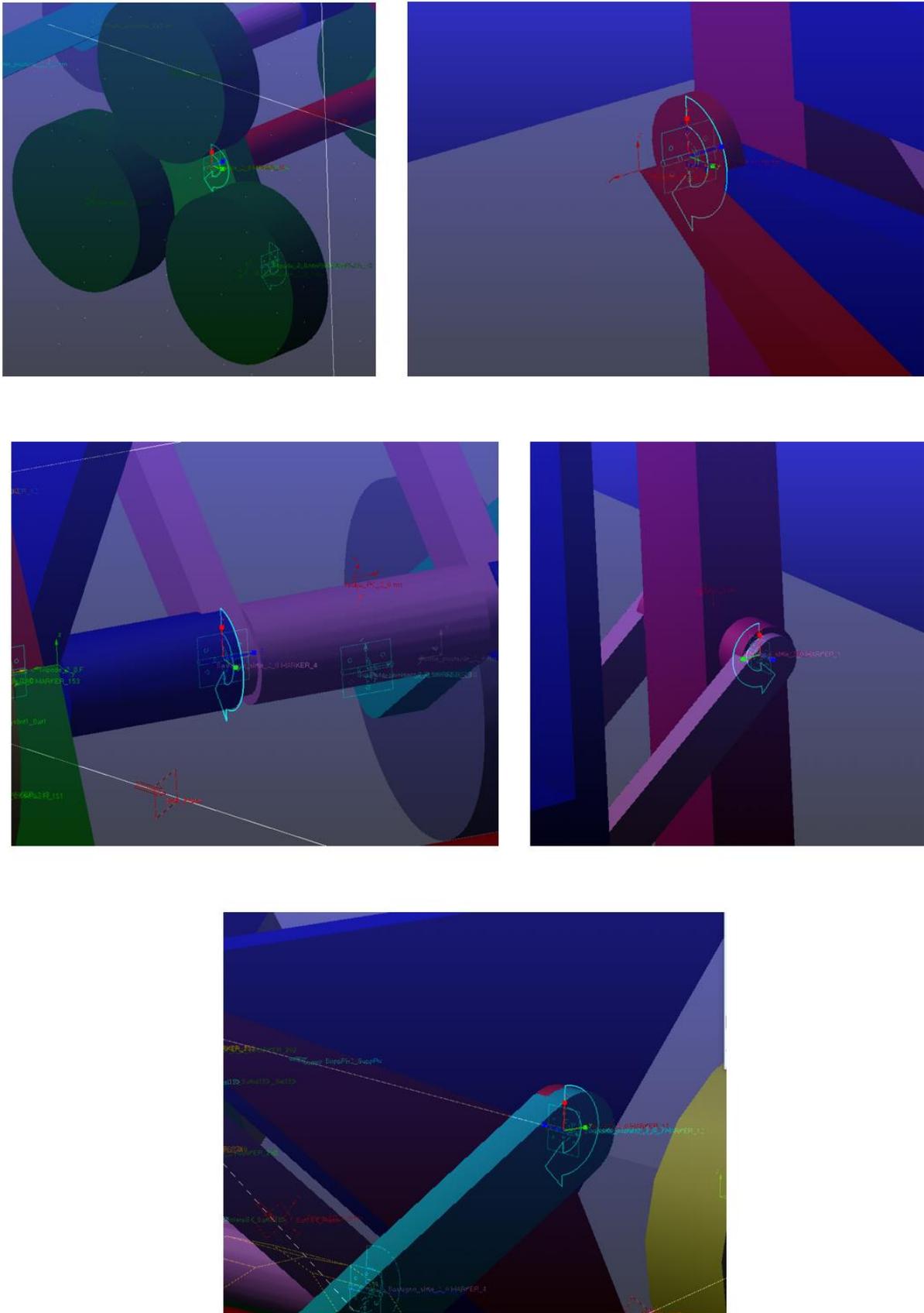


Figura 3.37 – Motions Tripode2, RC, SostegnoSlitta, Slitta, SupportoPiv2 (dall' alto-sx al basso-dx)

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Il *Motion Ruota1* permette al lato sinistro della sedia di avanzare o retrocedere. In questa configurazione iniziale della sedia è stato, per semplicità, posto direttamente sul vincolo che lega la ruota stessa al tripode, ma nei prossimi paragrafi verrà spostato a seguito della realizzazione in 3D dell'ingranaggio epicicloidale che trasmetterà il movimento dalla ruota dentata solare fino ai tre pneumatici, il tutto per un maggiore realismo del modello. In mancanza di tale meccanismo, per far sì che tutte e tre le ruote vincolate al tripode si muovano allo stesso modo, viene utilizzato uno strumento di Adams chiamato "*Coupler*", che verrà analizzato nella sezione 3.7.

Il *Motion Ruota2* lavora esattamente come il *Motion Ruota1*, ma agisce sul lato destro della sedia. E' possibile far avanzare la sedia impostando delle semplici funzioni su entrambi i *Motion* (es: $10d*time$), facendo in modo che siano uguali in modulo per ottenere una traiettoria rettilinea, oppure diverse per far curvare la sedia. Invertendo i segni si può anche ottenere l'arretramento della sedia.

Il *Motion Tripode2* simula il movimento imposto dal motore adibito alla variazione dell'angolo ϑ_P , siccome i due tripodi sono legati allo stesso albero compiono gli stessi movimenti, di conseguenza verrà utilizzato un *Coupler* per far sì che il lato sinistro si muova come il destro.

Il *Motion RC* simula il movimento imposto dal motore adibito alla variazione dell'angolo β , mentre il *Motion SostegnoSlitta* simula il movimento imposto dal motore adibito alla variazione dell'angolo ϑ_{ES} .

Il *Motion Slitta* non simula alcun motore presente sulla sedia, ma serve solo per avere la possibilità all'interno della simulazione di bloccare l'oscillazione della slitta, impostando il valore della funzione a 0.

Il *Motion SupportoPiv2* simula il movimento imposto supporto della ruota pivotante destra, con lo scopo di variarne l'angolo ϑ_{DU} . Nella realtà il movimento imposto dal motore si trasferisce ad entrambi i supporti, di conseguenza verrà applicato un *Coupler* per far sì che il supporto di sinistra si muova allo stesso modo.

La descrizione delle funzioni usate per simulare le fasi di salita/discesa del gradino verrà effettuata nei *Capitoli 3.14* e *3.15*.

3.7 Inserimento dei Coupler

Il *Coupler* è uno strumento di Adams che permette di trasferire il movimento esercitato grazie ad un *Motion* su un vincolo 1 ad un vincolo 2. Per creare un *Coupler* è sufficiente:

1. Andare su Connectors > Couplers > Joint (Add-On Constraint): Coupler e cliccare sulla relativa icona (Figura 3.38).



Figura 3.38 - Coupler.

2. Cliccare direttamente sul modello 3D il vincolo dal quale si vuole trasmettere il movimento (Figura 3.39).



Figura 3.39 – Selezione driver joint.

3. Cliccare direttamente sul modello 3D il vincolo sul quale si vuole trasmettere il movimento (Figura 3.40).



Figura 3.40 – Selezione coupled joint.

4. Una volta creato il *Coupler* è possibile andarne a modificare le impostazioni facendo doppio clic sul *Coupler* stesso posto in *Browse > All Other > Couplers*, questo apre una finestra con i seguenti box:

- I. *Name*: presenta il nome del *Coupler* scelto a piacere;
- II. Il secondo box dall'alto indica a quanti vincoli si vuole trasmettere il movimento. Scegliendo *Two Joint Coupler* il moto verrà trasmesso ad un solo vincolo, scegliendo *Three Joint Coupler* il moto verrà trasmesso a due vincoli;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

- III. Il box a fianco permette di inserire la modalità con cui vogliamo controllare il valore del moto sui vincoli che lo ricevono. Nel nostro caso useremo sempre *By Scales* che permette di scalare il valore del moto presente sul vincolo che lo trasmette tramite un fattore numerico;
- IV. *Driver*: indica il vincolo che invia il moto;
- V. *Coupled*: indica il vincolo che riceve il moto. Nel caso di un *Three Joint Coupler* saranno due;
- VI. *Freedom Type*: indica se il moto è di rotazione o traslazione, non è modificabile e nel nostro caso sarà sempre di tipo *Rotational*;
- VII. *Scale*: usando una impostazione *By Scales* è possibile inserire in questo box un fattore di moltiplicazione che varia l'intensità del moto tra i due vincoli. Nel nostro caso avremo sempre dei *Coupler* che dovranno trasmettere il moto al *Coupled Joint* esattamente con lo stesso modulo e verso di rotazione. Questo si fa imponendo un fattore -1 sul *Driver Joint* ed un fattore 1 sul *Coupled Joint*. Andare a modificare il valore di questi fattori porta ad una moltiplicazione/demoltiplicazione del moto tra i due vincoli, introducendo di fatto un rapporto di trasmissione. Variare il segno permette di modificare il verso di rotazione del moto da un vincolo all'altro.

Di seguito (Tabella 3.7) vengono elencati i *Coupler* inizialmente presenti nel modello e l'esempio della schermata relativa ad uno di essi.

| Tabella 3.7 – Elenco Couplers modello carrozzina | | | |
|--|---------------------|---------------------|--|
| Nome Coupler | Tipologia | Driver Joint | Coupled Joint |
| RuotaTrip1-2&3 | Three Joint Coupler | RuotaTrip1-Tripode1 | RuotaTrip2-Tripode1 RuotaTrip3-Tripode1 |
| RuotaTrip4-5&6 | Three Joint Coupler | RuotaTrip4-Tripode2 | RuotaTrip5-Tripode2 RuotaTrip6-Tripode2 |
| Tripode2-1 | Two Joint Coupler | Tripode2-PC | Tripode1-PC |
| SupportoPiv2-1 | Two Joint Coupler | SupportoPiv2-PC | SupportoPiv1-PC |

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Grazie ai *Coupler* ciascun *Coupled Joint* sarà in grado di replicare esattamente lo stesso movimento imposto dal *Motion* al *Driver Joint* con il quale è legato (Figura 3.41).

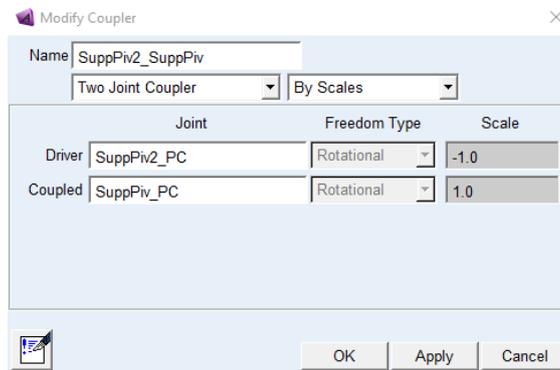


Figura 3.41 – Modify Coupler.

Raffigurazione dei Coupler relativi ai tripodi e ai supporti delle pivotanti in Figura 3.42.

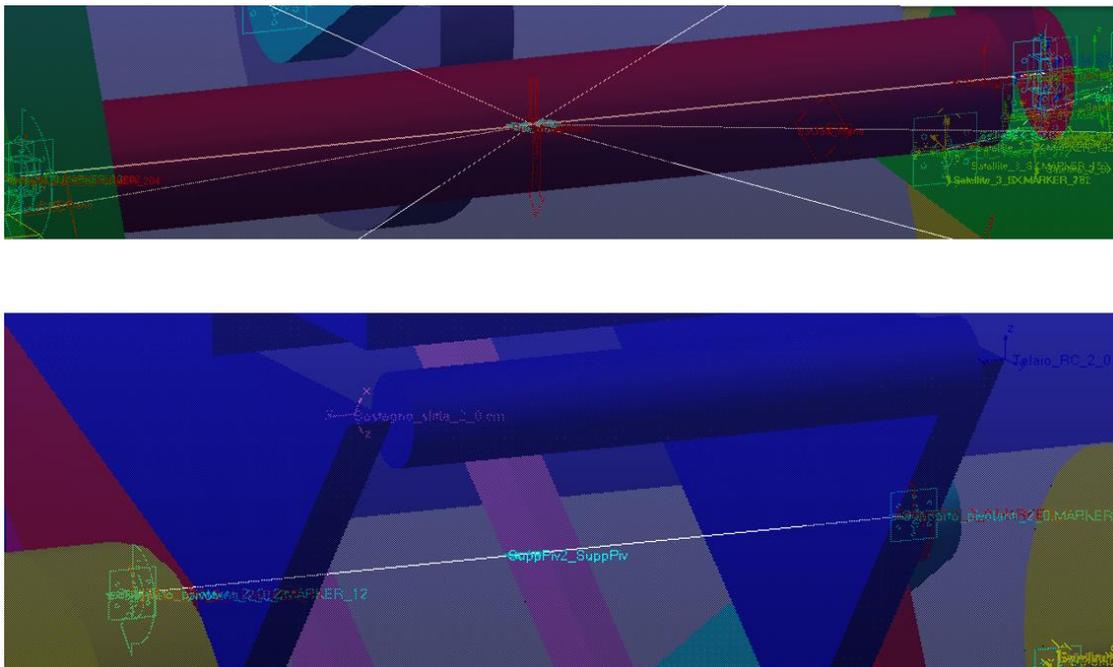


Figura 3.42 – Couplers modello carrozzina.

Giunti a questo punto è possibile fare delle prove di avanzamento della sedia o di movimentazione dei singoli gradi di libertà imponendo semplici funzioni ai *Motion*, questo in quanto il modello base della sedia è completato e nei successivi paragrafi saranno introdotte delle modifiche con lo scopo di renderlo più simile al prototipo reale.

3.8 Inserimento del meccanismo di sospensione

Il prototipo della sedia possiede una sospensione realizzata sfruttando i tendicinghia della trasmissione del motore del portatreno (Figura 3.43, Tabella 3.8), con lo scopo di dare un certo grado di elasticità alla struttura.

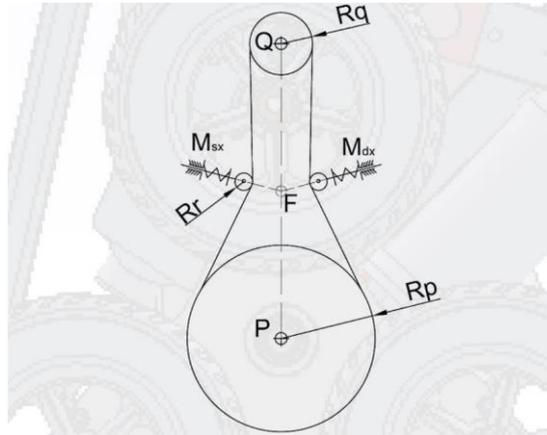


Figura 3.43 – Sospensione.

Tabella 3.8 – Legenda sospensione.

| Nome | Descrizione |
|----------|--|
| Q | Asse di rotazione della puleggia $z = 14$ |
| P | Asse di rotazione della puleggia $z = 42$ |
| F | Intersezione delle rette di azione dei tenditori |
| PQ | Interasse |
| Msx, Mdx | Molla sinistra e destra |
| Rr | Raggio delle rotelle |
| Rq | Raggio puleggia $z14$ |
| Rp | Raggio puleggia $z42$ |

Sul modello Adams sono state effettuate delle modifiche con lo scopo di simulare tale sospensione. Non è stato realizzato un meccanismo composto da pulegge e cinghia come nel prototipo reale, ma è stato simulato il suo comportamento inserendo una nuova parte 3D chiamata "Dummy" tra il tripode ed il sotto-telaio PC. Il Tripode è stato poi vincolato al Dummy grazie ad una cerniera (*Revolute Joint*), mentre il Dummy è stato vincolato al sotto-telaio PC tramite un carrello (*Translational Joint*) con lo scopo di consentirgli la traslazione in direzione verticale. Infine è stata aggiunta una molla grazie alla funzione di Adams *Create a Translational*

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Spring-Damper. Tale processo è stato ripetuto su entrambi i lati della sedia. Di seguito viene mostrato il procedimento nel dettaglio:

1. Per prima cosa è stato creato il componente *Dummy*. Il suo scopo è solamente quello di fare da collegamento intermedio tra il tripode ed il sotto-telaio PC, di conseguenza può avere forma e collocazione qualsiasi, inoltre essendo di fatto una parte extra aggiunta successivamente si è deciso di dare al componente massa e momenti d'inerzia nulli, in modo da renderla ininfluenza sul comportamento della sedia. Come forma si è scelto un cilindro, per crearlo è necessario andare su *Bodies > Solids > RigidBody: Cylinder*, aprendo così una nuova schermata (Figura 3.44) sopra la scheda *Browse*. In tale schermata nel primo box si sceglie *New Part* in modo da creare il cilindro come una nuova parte, andando poi a selezionare le due caselline *Length* e *Radius* è possibile fissare lunghezza e raggio a piacere del cilindro nei relativi box.

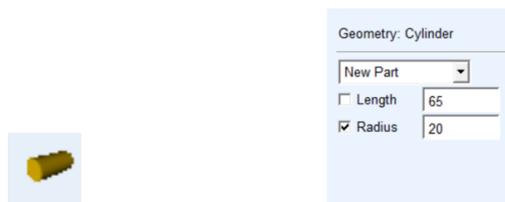


Figura 3.44 – Creazione cilindro Dummy.

Seguendo le istruzioni (Figura 3.45) è necessario cliccare su un primo punto di riferimento geometrico per impostare il luogo in cui si trova la prima faccia del cilindro, successivamente si clicca su un secondo punto per impostare la posizione della seconda faccia (se i punti non compaiono è possibile cliccare con il tasto destro sullo sfondo per inserire direttamente le coordinate volute). Di seguito è mostrata la collocazione scelta per il *Dummy*, ma come già detto può essere posizionato a piacere sempre nella zona tra tripode e sotto-telaio PC. In questo caso si è scelto di crearlo nascosto all'interno del tripode stesso.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

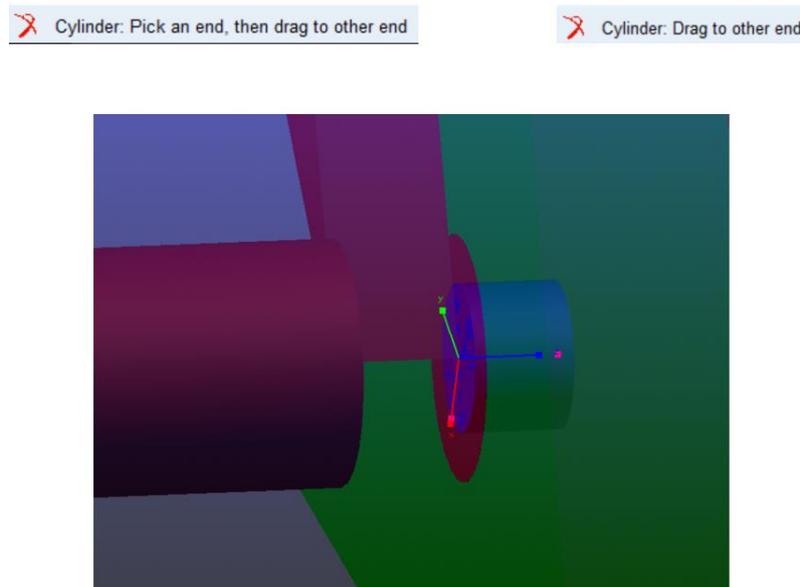


Figura 3.45 – Posizionamento cilindro Dummy.

Dalla scheda *Browse > Bodies* è infine necessario modificare massa e i tre momenti di inerzia del componente rendendoli nulli (Figura 3.46).

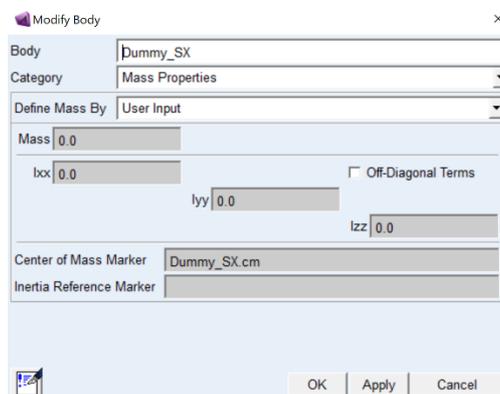


Figura 3.46 – Massa cilindro Dummy.

Si ripete il procedimento anche per l'altro lato della sedia, ottenendo così al termine del processo due nuove parti all'interno del modello (Tabella 3.9), visibili all'interno della scheda *Browse > Bodies*.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

| Tabella 3.9 – Legenda sospensione. | |
|------------------------------------|-------|
| Nome nuove parti | Massa |
| Dummy 1 | 0 |
| Dummy 2 | 0 |

- Il processo continua con l'eliminazione di alcuni vecchi vincoli i quali vengono sostituiti con dei nuovi, necessari per simulare la sospensione. In particolare su ogni lato della sedia viene eliminato il vincolo che lega il tripode al sotto-telaio PC (dalla scheda *Browse > Connectors* si clicca con il tasto destro del mouse sul vincolo e si seleziona *Delete*), sostituendolo con una cerniera (*Revolute Joint*) che lega il tripode al Dummy (Figura 3.46), seguendo il procedimento già mostrato nel capitolo relativo ai vincoli.

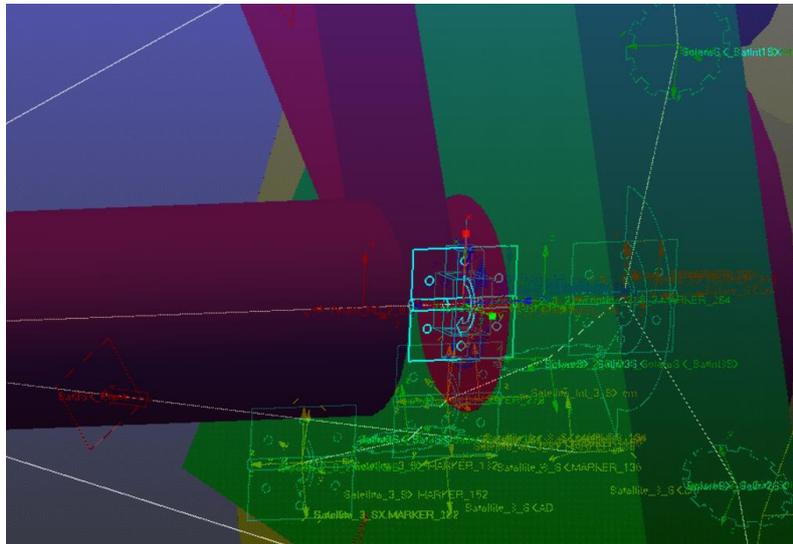


Figura 3.46 – Massa cilindro Dummy.

In seguito si aggiunge il carrello (*Translational Joint*) che lega il Dummy al sotto-telaio PC. Per creare il carrello è necessario andare su *Connectors > Joints > Create a Translational Joint* e scegliere dai box le opzioni *2 Bodies – 1 Location, Pick Geometric Feature*, come primo corpo il Dummy e come secondo corpo il sotto-telaio PC. Come da istruzioni si seleziona poi un punto geometrico che può essere lo stesso che si è usato per la cerniera ed infine si sceglie un versore che si trovi sul punto scelto in precedenza e che punti lungo l'asse globale +Z. Di seguito sono presentate delle immagini di esempio (Figura 3.47).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

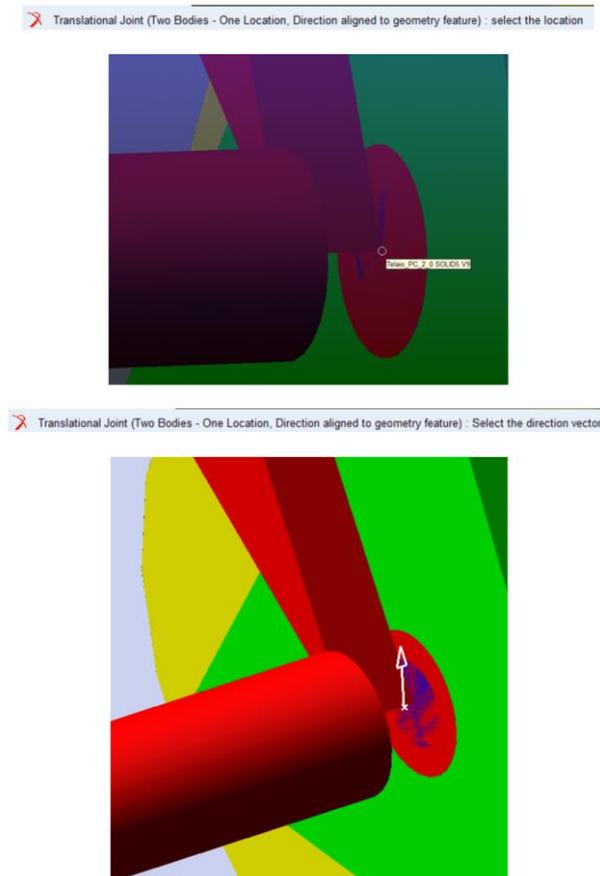


Figura 3.47 – Translational Joint.

Questo è il risultato finale in cui si vede il carrello evidenziato che punta nella direzione globale +Z e in secondo piano si vede la cerniera (Figura 3.48).

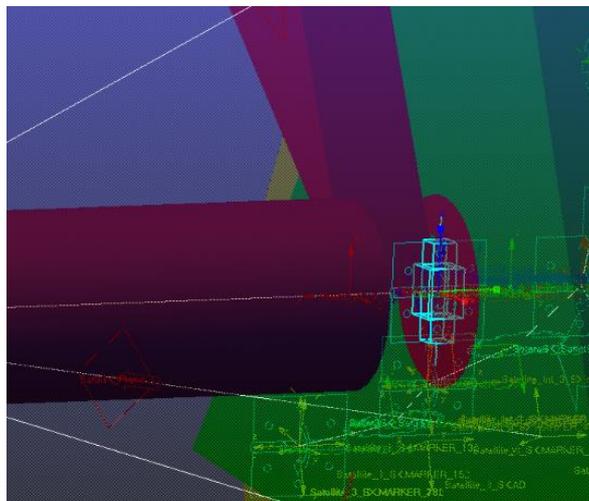


Figura 3.48 – Translational Joint - assi.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Viene infine presentato un riepilogo dei vincoli eliminati ed aggiunti (Tabella 3.10 e 3.11).

| Tabella 3.10 – Modifiche ai vincoli. | |
|--------------------------------------|------------------|
| Vincoli da eliminare | Tipologia |
| Tripode1-PC | Revolute |
| Tripode2-PC | Revolute |

| Tabella 3.11 – Modifiche ai vincoli. | | | |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Vincoli da aggiungere | Tipologia | 1st Body | 2nd Body |
| Tripode1-Dummy1 | Revolute | Tripode 1 | Dummy 1 |
| Tripode2-Dummy2 | Revolute | Tripode 2 | Dummy 2 |
| Dummy1-PC | Translational | Dummy 1 | Telaio PC |
| Dummy2-PC | Translational | Dummy 2 | Telaio PC |

Il risultato è che durante la simulazione si avrà il tripode che può ruotare rispetto al Dummy ed il Dummy che trasla verticalmente rispetto al sotto-telaio PC, questo porterà tutto il gruppo composto dal Dummy, il tripode e le tre ruote a traslare lungo la direzione dettata dal carrello. In assenza di una forza che contrasti tale movimento, avviando la simulazione, si avrà inevitabilmente un crollo della sedia sotto il suo stesso peso, per questo sarà necessario inserire una molla.

- Un passaggio che è necessario fare prima di inserire la molla è quello di controllare che il *Motion* applicato al vincolo che legava Tripode 2 e sotto-telaio PC sia ora applicato al nuovo vincolo che lega Tripode 2 e Dummy 2. Se il cambio di vincolo non è avvenuto in automatico sarà necessario modificarlo manualmente da *Browse > Motion > Tripode2 > Modify*, oppure cancellare tale Motion ed inserirne uno nuovo applicato al nuovo vincolo (Tabella 3.12).

| Tabella 3.12 – Modifiche ai Motion. | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Vecchio Motion | Vincolo di applicazione |
| Tripode2 | Tripode2-PC |
| Nuovo Motion | Vincolo di applicazione |
| Tripode2 | Tripode2-Dummy2 |

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Allo stesso modo va modificato o ricreato il *Coupler* che trasmetteva il moto dal Tripode 2 al Tripode 1, inserendo i nuovi vincoli (Tabella 3.13).

| Vecchio Coupler | Tipologia | Driver Joint | Coupled Joint |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| Tripode2-1 | Two Joint Coupler | Tripode2-PC | Tripode1-PC |
| Nuovo Coupler | Tipologia | Driver Joint | Coupled Joint |
| Tripode2-1 | Two Joint Coupler | Tripode2-Dummy2 | Tripode1-Dummy1 |

4. L'ultimo passaggio consiste nell'inserire una molla (Figura 3.49) per ogni lato della sedia che contrasti il movimento del relativo carrello. Andando su *Forces > Flexible Connections > Create a Translational Spring-Damper*, si apre una nuova schermata sopra la scheda *Browse*, dalla quale è possibile inserire la rigidità K ed il coefficiente di smorzamento C del gruppo molla-smorzatore che si vuole creare. Per ora è possibile inserire dei valori a piacere.

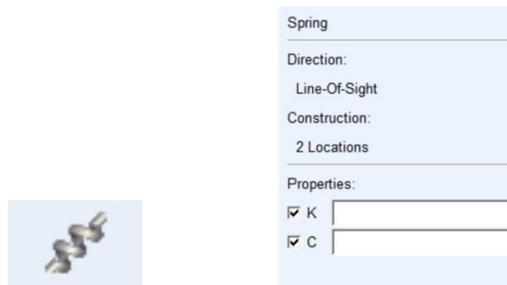


Figura 3.49 – Molla.

Come da istruzioni (Figura 3.50) è necessario cliccare sul modello un primo punto che sarà associato all' *Action Body*. Tale punto può trovarsi sul luogo utilizzato in precedenza per posizionare i nuovi vincoli, ma deve essere associato al Dummy. Per essere sicuri di scegliere il punto corretto basta cliccare con il tasto destro nei pressi del punto e selezionare un marker costituito dal prefisso Dummy1. per il lato sinistro o Dummy2. per il lato destro.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

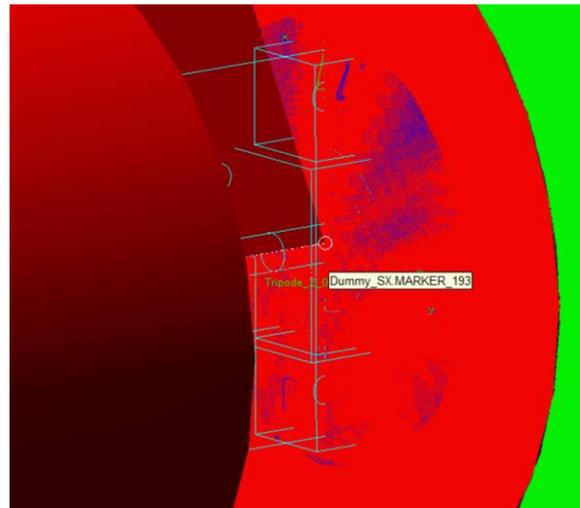


Figura 3.50 – Creazione molla, primo punto.

Per completare la molla (Figura 3.51) è necessario cliccare dal modello un secondo punto che è quello associato al *Reaction Body*. Tale punto può trovarsi sovrapposto a quello associato all'*Action Body*, ma deve essere associato al sotto-telaio PC. Come nel passaggio precedente basta verificare che il Marker scelto sia preceduto dal prefisso PC.

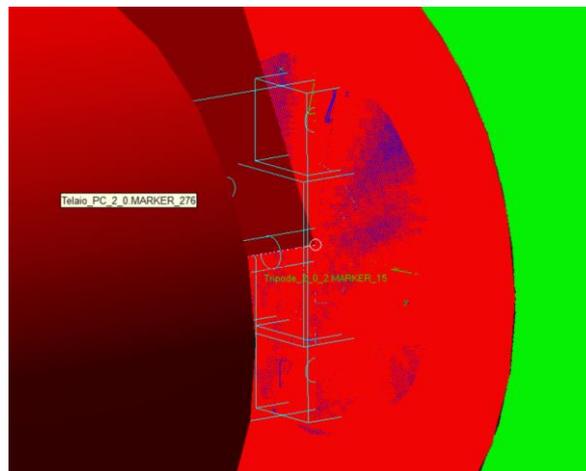


Figura 3.51 – Creazione molla, secondo punto.

In questo modo sono stati posizionati i due estremi della molla, il primo legato al Dummy (che a sua volta è vincolato al tripode e alle ruote) ed il secondo legato al sotto-telaio PC. La molla eserciterà tra gli estremi una forza che si opporrà alla loro

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

traslazione reciproca causata dalla caduta del telaio sotto il suo stesso peso rispetto alla direzione del carrello. Andando su *Browse > Forces* e facendo doppio clic sulla molla appena creata è possibile modificarne (Figura 3.52) i parametri fisici di rigidezza (*Stiffness Coefficient*) e di smorzamento (*Damping Coefficient*), mentre le restanti opzioni grafiche restano come da default. I valori inseriti in ciascuna delle due molle sono quelli mostrati nella successiva figura e sono stati ricavati dalla tesi Perez.

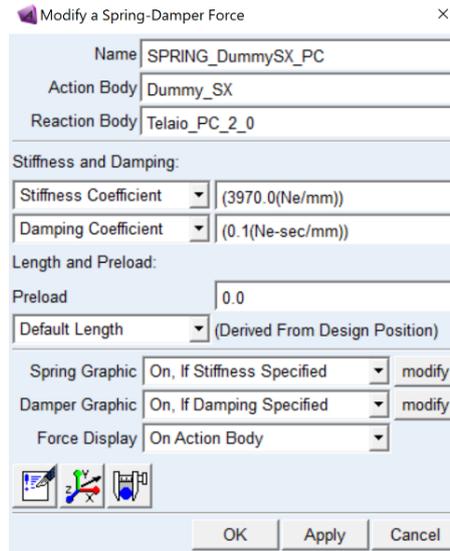


Figura 3.52 – Modifica parametri molla.

Giocando con il valore della rigidezza è possibile, durante la simulazione, apprezzare l'escursione compiuta dalla molla, soprattutto con valori del coefficiente bassi. Di seguito è presente un riepilogo delle molle (Tabella 3.14).

Tabella 3.14 – Molle.

| Nome molla | Action Body | Reaction Body | Stiffness (N/mm) | Damping (N*s/mm) |
|------------|-------------|---------------|------------------|------------------|
| Molla 1 | Dummy 1 | Telaio PC | 3970 | 0.1 |
| Molla 2 | Dummy 2 | Telaio PC | 3970 | 0.1 |

3.9 Aggiunta dei rotismi epicicloidali

Il gruppo di locomozione (Figura 3.53) della sedia è costituito da tre elementi fondamentali:

1. Tripodi contenenti i rotismi epicicloidali (riquadri in verde)
2. Gruppo di trasmissione del portatreno (riquadro azzurro)
3. Motori (2xM1 in rosso che movimentano separatamente i solari dei due rotismi epicicloidali e 1xM2 che movimenta attraverso due cinghie i due tripodi)

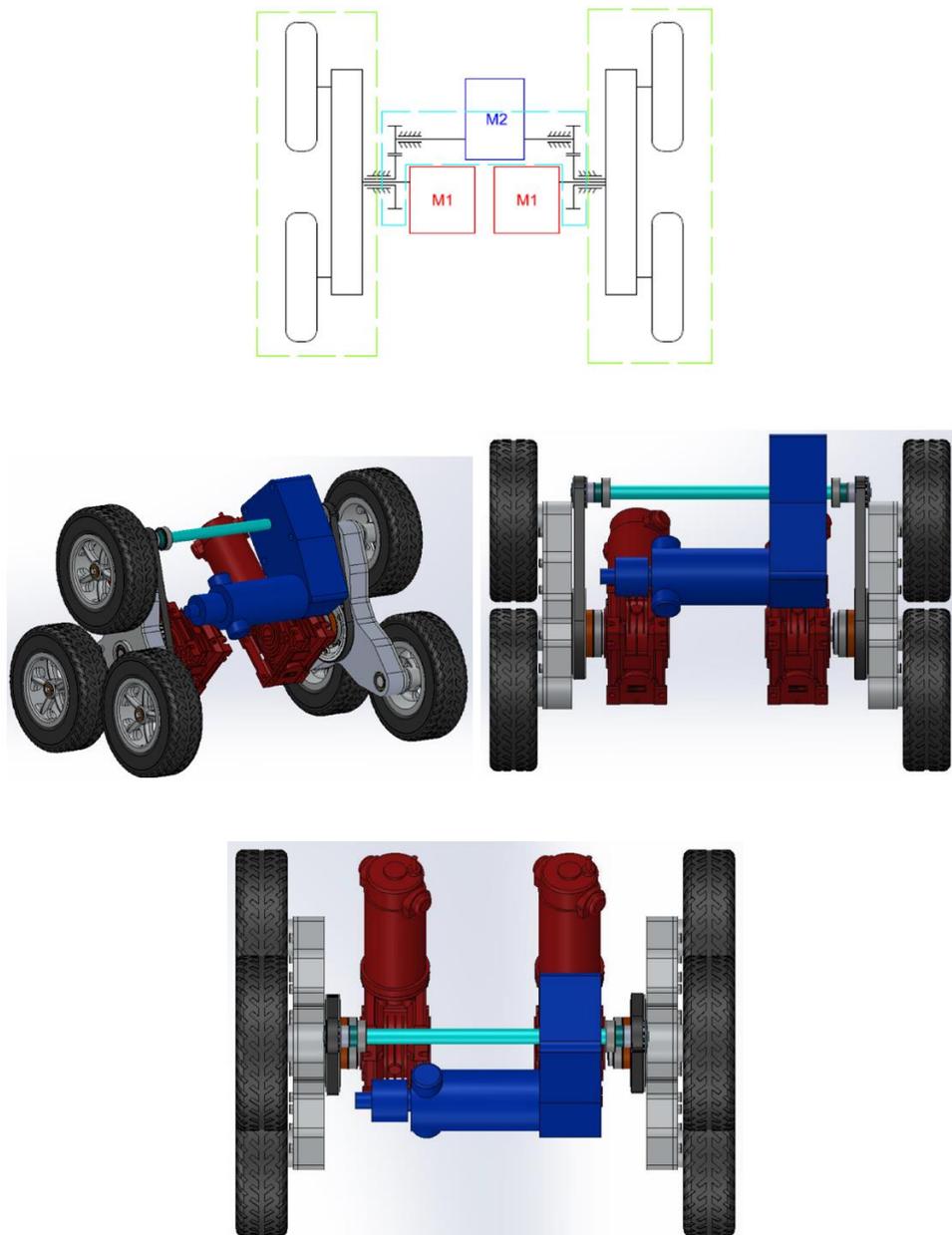


Figura 3.53 – Gruppo di locomozione.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

L'obiettivo è quello di ricreare sul modello Adams il rotismo epicicloidale posto all'interno del tripode, in modo da poter imprimere il movimento generato dai due motori M1 direttamente sulle rispettive solari, anziché sulle ruote poste sul tripode, il tutto con lo scopo di ottenere un modello più simile alla realtà.

Il tripode (Figura 3.54) è una struttura composta da tre bracci disposti a 120° in cui ciascun braccio termina con una ruota. Il meccanismo al suo interno è di tipo epicicloidale; il moto è trasmesso dal motore M1 direttamente sull'ingranaggio centrale (solare), poi ai tre satelliti folli ed infine alle tre ruote.

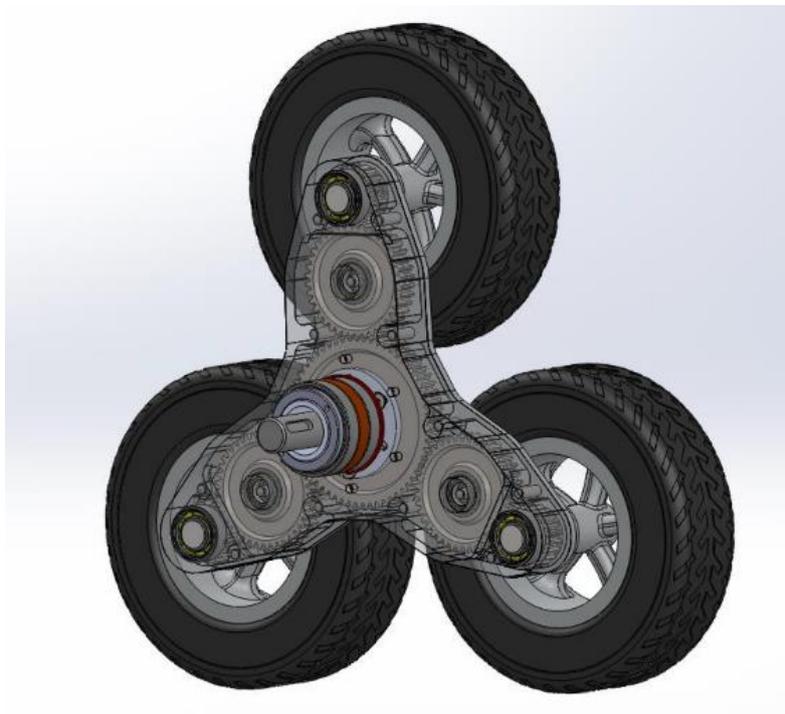


Figura 3.54 – Tripode con rotismo epicicloidale.

Nel dettaglio si hanno (Figura 3.55, Tabella 3.15):

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

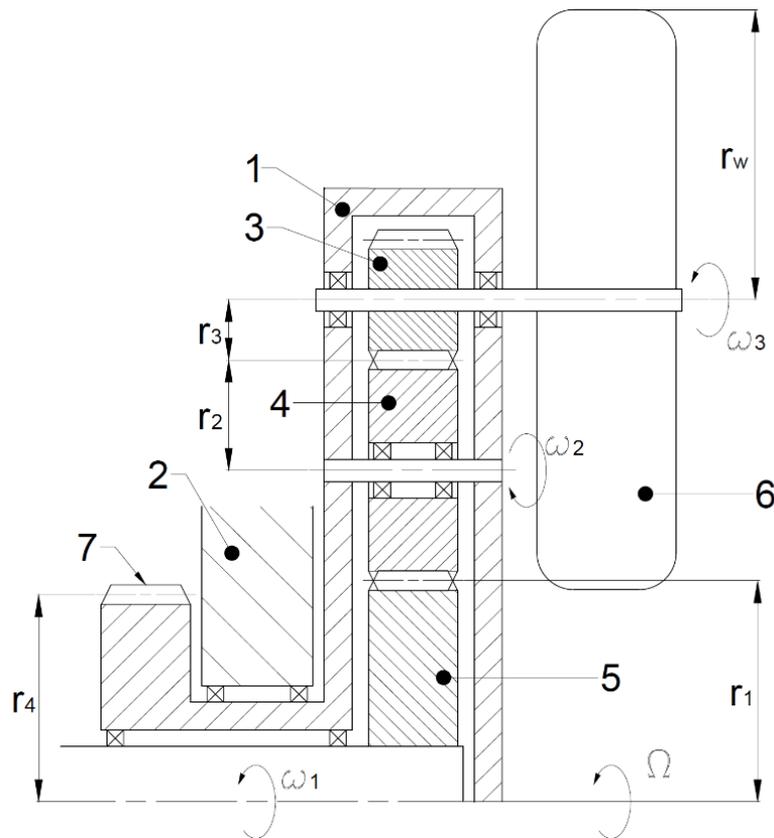


Figura 3.55 – Tripode con rotismo epicicloidale – Dettaglio.

Tabella 3.15 – Gruppo di locomozione - Legenda.

| Numero | Nome | Quota | Valore quota (mm) | Velocità angolare |
|--------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|
| 1 | Portatreno | | | |
| 2 | Telaio PC | | | |
| 3 | Satellite esterno | r_3 | 20 | ω_3 |
| 4 | Satellite interno | r_2 | 40 | ω_2 |
| 5 | Solare | r_1 | 60 | ω_1 |
| 6 | Ruota | r_w | 115 | ω_3 |
| 7 | Puleggia | r_4 | | Ω |

Su Adams si modelleranno dunque la solare, i tre satelliti interni folli e i tre satelliti esterni solidali alle tre ruote. Per questione di semplicità, siccome sono come già detto solidali, ogni ruota e il suo corrispettivo satellite esterno saranno realizzati in un'unica parte. Disegnate le parti verranno posizionati i vincoli, inserito il *Motion* direttamente sul vincolo della solare ed infine modellati gli ingranamenti tramite la funzione *Gear*. Di seguito vengono presentati i passaggi dettagliati:

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

1. Il primo passaggio consiste nella modellazione delle parti in 3D che compongono il rotismo. Per prima cosa vengono eliminate le vecchie ruote che sono vincolate ai tripodi in quanto andranno sostituite con delle nuove ruote modificate. Nel processo vengono eliminati anche tutti i vincoli, i Motion, i Coupler e le forze associate ad esse.

Tabella 3.16 – Eliminazione features.

| Parti da eliminare | Vincoli eliminati | Motion eliminati | Forze eliminate | Coupler eliminati |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| Ruota tripode 1 | RuotaTrip1-Tripode1 | Ruota1 | RuotaTrip1-Piano | RuotaTrip1-2&3 |
| Ruota tripode 2 | RuotaTrip2-Tripode1 | | RuotaTrip2-Piano | |
| Ruota tripode 3 | RuotaTrip3-Tripode1 | | RuotaTrip3-Piano | |
| Ruota tripode 4 | RuotaTrip4-Tripode2 | Ruota4 | RuotaTrip4-Piano | RuotaTrip4-5&6 |
| Ruota tripode 5 | RuotaTrip5-Tripode2 | | RuotaTrip5-Piano | |
| Ruota tripode 6 | RuotaTrip6-Tripode2 | | RuotaTrip6-Piano | |

La prima nuova parte che si crea è il solare, il quale viene modellato (come visto in precedenza per i Dummy) come un cilindro di altezza 16 mm e raggio 60 mm, posto sulla faccia esterna del tripode e centrato rispetto al suo asse (Figura 3.56 e 3.57).

La seconda parte che si crea sono i tre satelliti interni (folli), i quali vengono modellati come dei cilindri di altezza 16 mm e raggio 40 mm, posizionati (come mostrato nelle figure successive) ad una distanza pari a 100 mm dall'asse del solare ogni 120°. Per posizionare tali cilindri sarà prima necessario creare tre Marker posti sul tripode (usando l'opzione *Add to Part*) e fissati nei centri di rotazione delle tre ruote folli (impostabili tramite l'inserimento delle loro coordinate globali durante la creazione dei Marker, come visto nel capitolo sui vincoli).

La terza parte che si crea sono i tre pneumatici solidali ai satelliti esterni. Per prima cosa si realizzano i satelliti esterni modellati come piccoli cilindri di altezza 36 mm e raggio 20 mm e posizionati ai vertici del tripode (come mostrato nelle figure successive). Come seconda cosa si crea lo pneumatico modellato con un cilindro di

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

altezza 65 mm, raggio 115 mm e posizionato come in figura e lo si unisce al relativo satellite esterno usando l'opzione *Add to Part* (selezionata durante la creazione dello pneumatico stesso). Il risultato finale sono tre parti composte da due cilindri sovrapposti ciascuna, rappresentanti il satellite esterno e lo pneumatico.

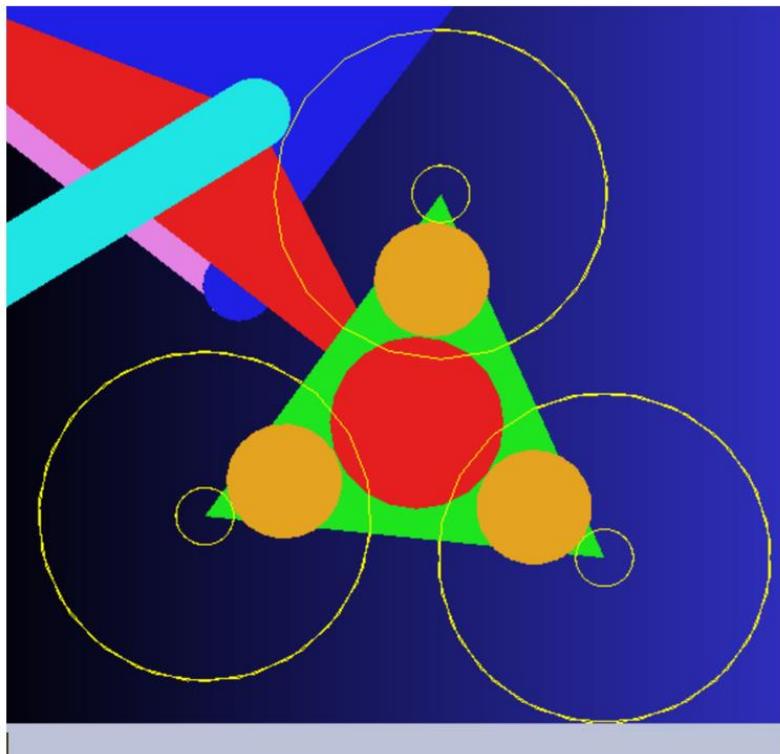
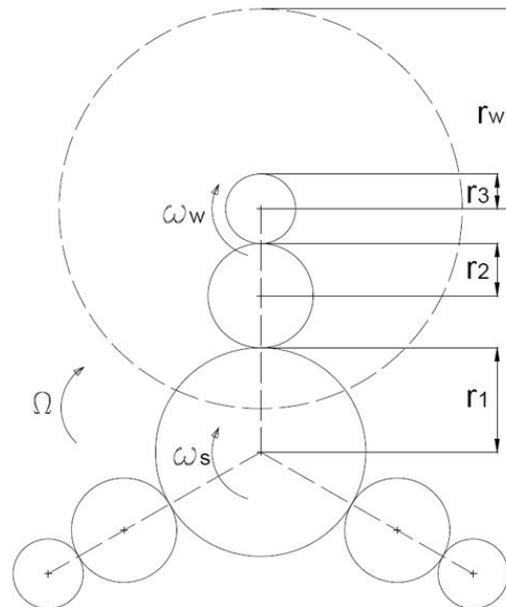


Figura 3.56 – Tripode con rotismo epicicloidale.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

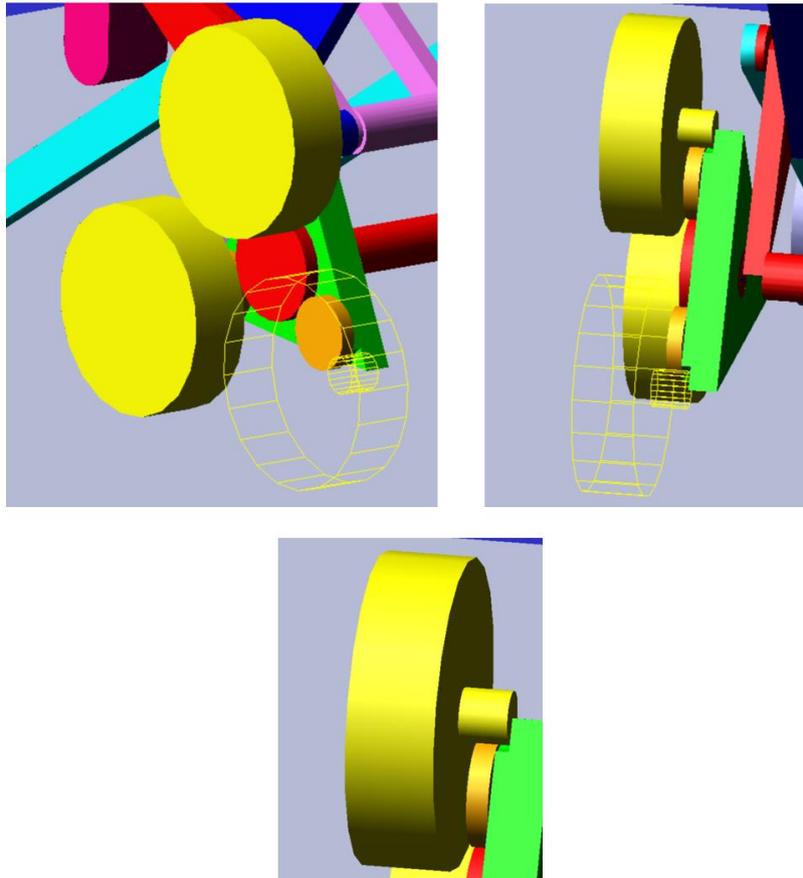


Figura 3.57 – Tripode con rotismo epicicloidale.

Il tutto va ripetuto per entrambi i tripodi. Di seguito è presente il riepilogo delle nuove parti (Tabella 3.17).

| Tabella 3.17 – Nuove parti. | |
|-----------------------------|------------|
| Nuove parti | Massa (kg) |
| Solare 1 | 0.5 |
| Solare 2 | 0.5 |
| Satellite interno 1 | 0.25 |
| Satellite interno 2 | 0.25 |
| Satellite interno 3 | 0.25 |
| Satellite interno 4 | 0.25 |
| Satellite interno 5 | 0.25 |
| Satellite interno 6 | 0.25 |
| Ruota esterna 1 | 1 |
| Ruota esterna 2 | 1 |
| Ruota esterna 3 | 1 |
| Ruota esterna 4 | 1 |
| Ruota esterna 5 | 1 |
| Ruota esterna 6 | 1 |

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

2. Il secondo passaggio consiste nella creazione dei vincoli (Tabella 3.18) che fissano le nuove parti create al tripode. Si tratta di semplici cerniere poste sul centro di rotazione di ogni ruota:

| Tabella 3.18 – Nuovi vincoli. | | | |
|-------------------------------|-----------|---------------------|-----------|
| Nuovi vincoli | Tipologia | 1st Body | 2nd Body |
| Solare1-Tripode1 | Revolute | Solare 1 | Tripode 1 |
| Solare2-Tripode2 | Revolute | Solare 2 | Tripode 2 |
| SatInt1-Tripode1 | Revolute | Satellite interno 1 | Tripode 1 |
| SatInt2-Tripode1 | Revolute | Satellite interno 2 | Tripode 1 |
| SatInt3-Tripode1 | Revolute | Satellite interno 3 | Tripode 1 |
| SatInt4-Tripode2 | Revolute | Satellite interno 4 | Tripode 2 |
| SatInt5-Tripode2 | Revolute | Satellite interno 5 | Tripode 2 |
| SatInt6-Tripode2 | Revolute | Satellite interno 6 | Tripode 2 |
| RuotaEst1-Tripode1 | Revolute | Ruota esterna 1 | Tripode 1 |
| RuotaEst2-Tripode1 | Revolute | Ruota esterna 2 | Tripode 1 |
| RuotaEst3-Tripode1 | Revolute | Ruota esterna 3 | Tripode 1 |
| RuotaEst4-Tripode2 | Revolute | Ruota esterna 4 | Tripode 2 |
| RuotaEst5-Tripode2 | Revolute | Ruota esterna 5 | Tripode 2 |
| RuotaEst6-Tripode2 | Revolute | Ruota esterna 6 | Tripode 2 |

3. Il terzo passaggio consiste nella creazione dei Motion applicati alle solari (Tabella 3.19). Si tratta sempre di *Rotational Joint Motion* aventi le medesime impostazioni di quelli eliminati nel primo passaggio. La differenza è che questi vengono applicati sui vincoli che legano le solari ai tripodi, simulando così l'input di movimento generato dai due motori elettrici in maniera realistica. Le funzioni associate ai Motion verranno analizzate nei *Capitoli 3.14* e *3.15*.

| Tabella 3.19 – Nuovi Motion. | | |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Nuovi Motion | Vincolo di applicazione | Movimento |
| Sol1 | Solare1-Tripode1 | Avanzamento lato sinistro |
| Sol2 | Solare2-Tripode2 | Avanzamento lato destro |

4. Il quarto passaggio consiste nel ricreare le forze di contatto tra le ruote esterne e il piano di appoggio, usando le medesime impostazioni presenti in quelle eliminate (Tabella 3.20).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Tabella 3.20 – Nuove forze di contatto.

| Nuovi Motion | Vincolo di applicazione | Movimento |
|-----------------|-------------------------|-----------|
| RuotaEst1-Piano | Ruota esterna 1 | Piano |
| RuotaEst2-Piano | Ruota esterna 2 | Piano |
| RuotaEst3-Piano | Ruota esterna 3 | Piano |
| RuotaEst4-Piano | Ruota esterna 4 | Piano |
| RuotaEst5-Piano | Ruota esterna 5 | Piano |
| RuotaEst6-Piano | Ruota esterna 6 | Piano |

5. Il quinto ed ultimo passaggio consiste nella creazione degli ingranamenti (Figura 3.58). Per realizzare un ingranaggio è necessario andare *su Connectors > Couplers > Joint (Add-On Constraint): Gear*, aprendo una nuova finestra dalla quale si inseriscono i parametri dell'ingranamento:

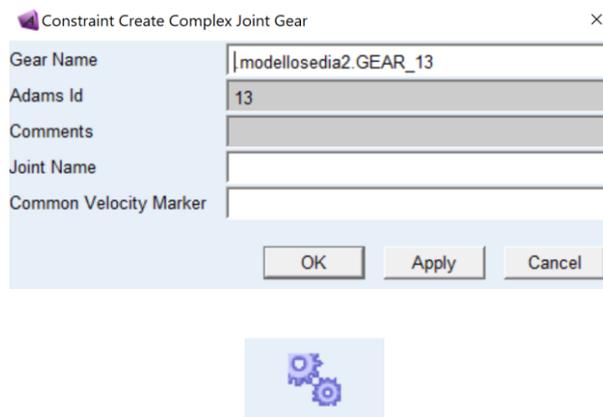


Figura 3.58 – Creazione ingranamento.

- I. *Gear Name*: si inserisce a piacere il nome dell'ingranaggio;
- II. *Adams Id*: è l'identificativo dell'ingranaggio e viene assegnato automaticamente;
- III. *Comments*: si possono inserire commenti opzionali;
- IV. *Joint Name*: si inseriscono, separati da una virgola, i nomi dei due vincoli (cerniere) attorno ai quali ruotano le due ruote dentate che compongono l'ingranaggio. Nell'ordine di inseriscono prima il *Driver Joint* e poi il *Coupled Joint*;
- V. *Common Velocity Marker*: si inserisce il nome del Marker posizionato nel punto di contatto tra i raggi primitivi delle ruote dentate e giacente sul loro interasse.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

È importante notare come questo ingranaggio sia di fatto un Coupler che imprime sul *Coupled Joint* un movimento dato dal moto presente sul *Driver Joint* e dal rapporto di trasmissione. Tale rapporto viene calcolato da Adams sulla base della posizione reciproca delle due cerniere e del punto di contatto tra le circonferenze primitive. Non viene dunque esercitato alcun tipo di contatto reale tra le ruote dentate che compongono l'ingranamento, ma il movimento risultante che si vedrà sulle ruote condotte sarà impresso su ognuna di esse singolarmente tramite il proprio *Coupled Joint*.

Di seguito viene presentato nel dettaglio il procedimento di creazione dell'ingranaggio ottenuto ingranando la Solare 1 con il Satellite interno 2:

- I. Il primo passaggio consiste nel creare il *Common Velocity Marker*, cioè il Marker posizionato nel punto di contatto tra i due cilindri. Tale Marker, durante la creazione, va fissato sul tripode grazie all'opzione *Add to Part*. Le coordinate per il posizionamento sono ricavabili tramite un semplice disegno schematico della struttura del rotismo epicicloidale. Una volta creato il Marker e assegnatogli un nome per renderlo riconoscibile (es: *VM-Solare1-SatInt2*), esso va orientato con l'asse x uscente dal piano del tripode e l'asse z perpendicolare all'interasse tra le ruote, con la freccia orientata verso un senso di rotazione del solare a scelta, ad esempio quello che porta la carrozzina a spostarsi in avanti.
- II. Il secondo e ultimo passaggio consiste nel creare l'ingranaggio tramite lo strumento *Joint (Add-On Constraint): Gear* (Figura 3.59). Per prima cosa si sceglie un nome a piacere (es: *Solare1-SatInt2*). Nella casella *Joint Name* si inseriscono poi il *Driver Joint* ed il *Coupled Joint* separati da una virgola (*Solare1-Tripode1, SatInt2-Tripode1*), infine nella casella *Common Velocity Marker* si inserisce il Marker *VM-Solare1-SatInt2*.

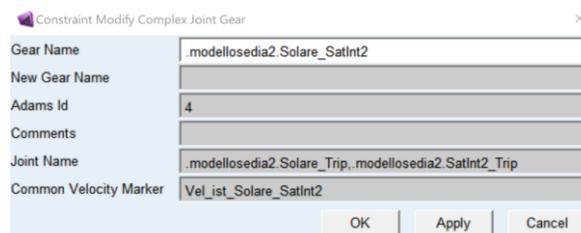


Figura 3.59 – Modifica ingranamento.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Il risultato finale dovrebbe essere come quello mostrato nella Figura 3.60. Si notano il Marker orientato come indicato nel punto A e l'icona della ruota dentata creatasi al termine del punto B. È importante che l'orientamento del Marker e di conseguenza quello della ruota dentata stilizzata siano identici a quelli mostrati in figura, in modo da garantire il corretto rapporto di trasmissione tra le ruote ed il corretto verso di rotazione della ruota condotta.

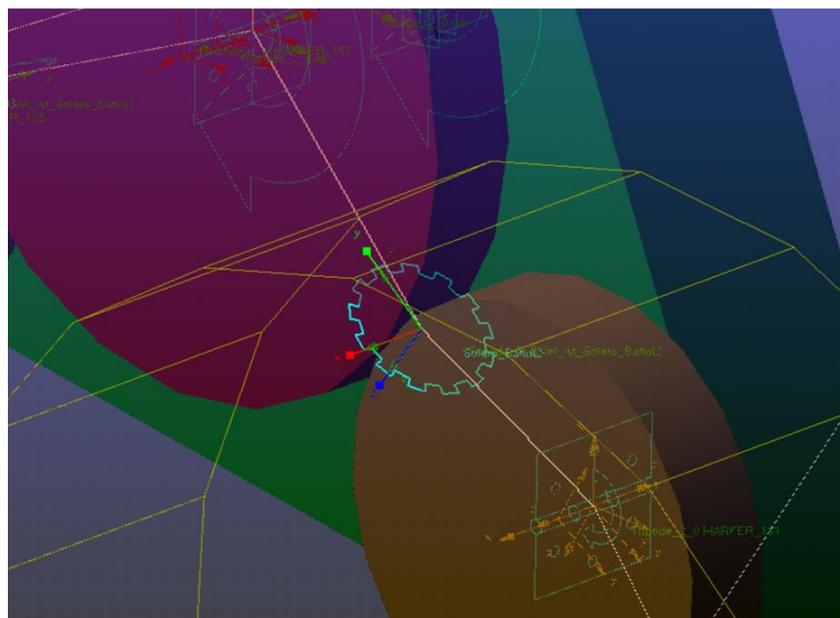
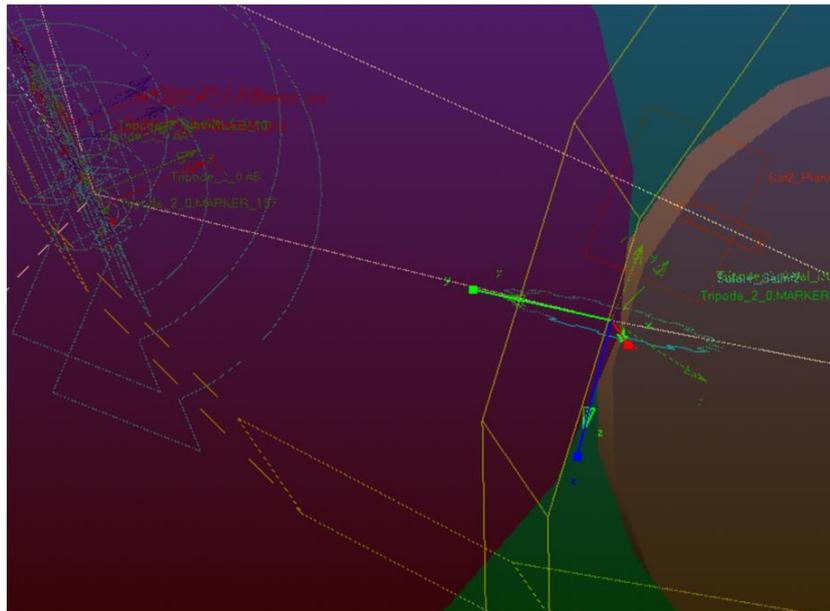


Figura 3.60 – Ingranamento

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

È necessario fare attenzione, nel momento in cui si creano invece i Marker posizionati tra i satelliti interni e i satelliti esterni, posizionare i *Common Velocity Marker* con l'asse z che punti verso il senso di rotazione che spinge la carrozzina in avanti come scelto prima. Questo implica che tali Marker abbiano l'asse z che punti nel verso di rotazione opposto rispetto a quello visto nell'esempio precedente. Inoltre, quando si ripete l'intero processo per il secondo tripode i marker devono sempre seguire la logica indicata in precedenza.

Questo è il risultato finale (Figura 3.61). Avviata la simulazione ed inserita una funzione in input al Motion applicato sul vincolo tra solare e tripode si ottiene così il movimento dei tre satelliti interni e delle tre ruote esterne, completando il rotismo epicicloidale. In Tabella 3.21 si ha un riepilogo degli ingranamenti.

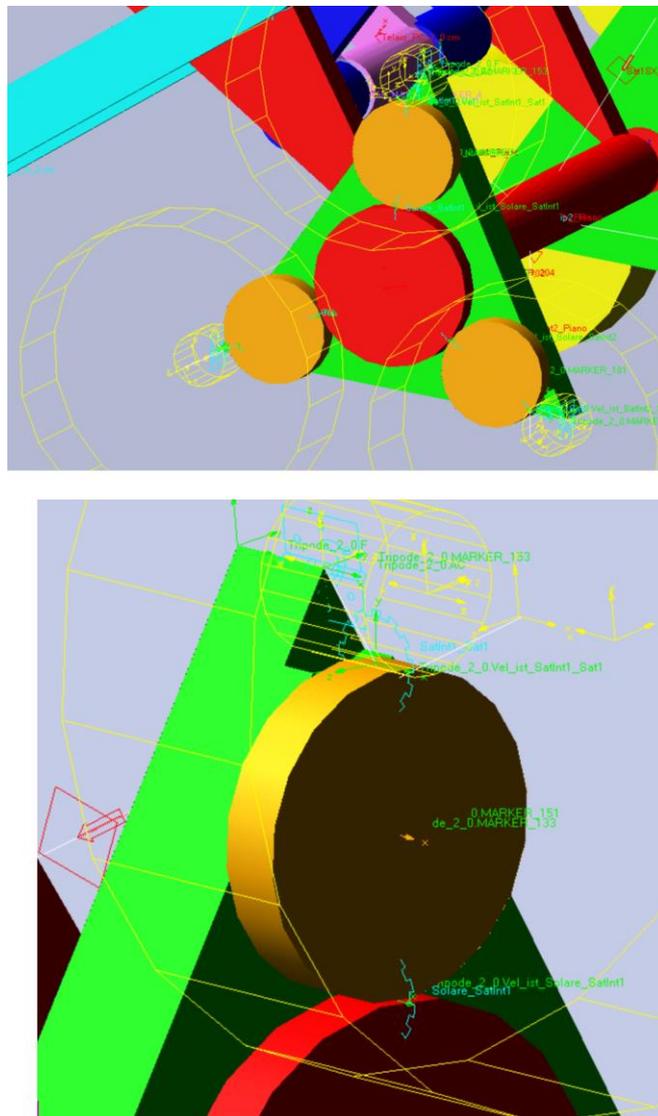


Figura 3.61 – Rotismo epicicloidale.

Tabella 3.21 – Riepilogo ingranamenti.

| Ingranaggio | Driver Joint | Coupled Joint | Common Velocity Marker |
|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|
| Solare1-SatInt1 | Solare1-Tripode1 | SatInt1-Tripode1 | VM-Solare1-SatInt1 |
| Solare1-SatInt2 | Solare1-Tripode1 | SatInt2-Tripode1 | VM-Solare1-SatInt2 |
| Solare1-SatInt3 | Solare1-Tripode1 | SatInt3-Tripode1 | VM-Solare1-SatInt3 |
| SatInt1-RuotaEst1 | SatInt1-Tripode1 | RuotaEst1-Tripode1 | VM-SatInt1-RuotaEst1 |
| SatInt2-RuotaEst2 | SatInt2-Tripode1 | RuotaEst2-Tripode1 | VM-SatInt2-RuotaEst2 |
| SatInt3-RuotaEst3 | SatInt3-Tripode1 | RuotaEst3-Tripode1 | VM-SatInt3-RuotaEst3 |
| Solare2-SatInt4 | Solare2-Tripode2 | SatInt4-Tripode2 | VM-Solare2-SatInt4 |
| Solare2-SatInt5 | Solare2-Tripode2 | SatInt5-Tripode2 | VM-Solare2-SatInt5 |
| Solare2-SatInt6 | Solare2-Tripode2 | SatInt6-Tripode2 | VM-Solare2-SatInt6 |
| SatInt4-RuotaEst4 | SatInt4-Tripode2 | RuotaEst4-Tripode2 | VM-SatInt4-RuotaEst4 |
| SatInt5-RuotaEst5 | SatInt5-Tripode2 | RuotaEst5-Tripode2 | VM-SatInt5-RuotaEst5 |
| SatInt6-RuotaEst6 | SatInt6-Tripode2 | RuotaEst6-Tripode2 | VM-SatInt6-RuotaEst6 |

3.10 Creazione dei sistemi di controllo per l'avanzamento della carrozzina

Prima di procedere con la definizione delle funzioni utilizzate all'interno dei Motion è necessario costruire due sistemi di controllo in anello chiuso. Questi vengono utilizzati per gestire separatamente i due motori che comandano le ruote solari durante le fasi A0-A1-A2 e B2, per far avanzare la carrozzina.

È importante dire che si tratta di due sistemi di controllo semplificati per operare all'interno di Adams e la loro logica di funzionamento non corrisponde a quella vista nel *Capitolo 2* e che verrà replicata nei sistemi di controllo realizzati su Simulink (*Capitolo 5*) per comandare il prototipo reale nella sequenza automatica (*Capitolo 6*).

In queste due fasi di spostamento, la carrozzina copre una distanza variabile fino a raggiungere il gradino. Il sistema di controllo confronta la distanza della carrozzina dal gradino con la distanza di SET (di arrivo) scelta e comanda i motori delle solari per avvicinarla fino al punto prestabilito. Avendo due sistemi di controllo che operano separatamente sulle due ruote solari è possibile aver la correzione dell'angolo di imbardata, cosa che nel prototipo reale non è attualmente possibile fare perché non è possibile misurare l'angolo con un singolo Lidar.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Di seguito viene descritto il procedimento usato per realizzare il sistema di controllo del lato destro per la fase A0_A1_A2, propedeutica alla salita del gradino:

1. Per definire gli elementi che compongono il sistema di controllo è necessario cliccare su *Elements > Controls Toolkit*, aprendo una nuova finestra (Figura 3.62). Questa presenta sulla parte superiore dieci riquadri che costituiscono tutti gli elementi con i quali si può costruire il sistema di controllo. Purtroppo, Adams non supporta una modalità grafica, quindi è molto importante creare autonomamente i propri schemi a mano o su altri software per avere ben chiari i passaggi da compiere.

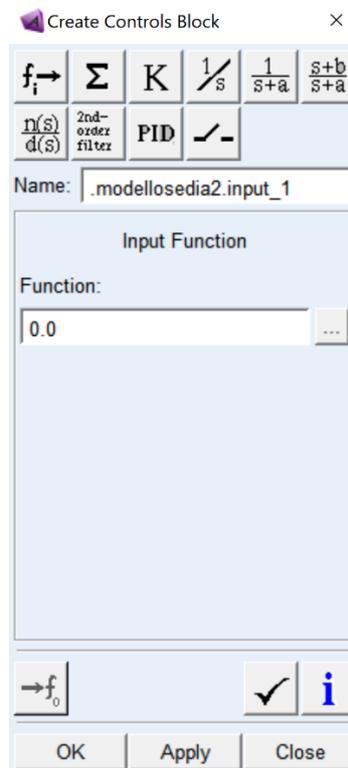


Figura 3.62 – Controls Toolkit.

Il primo elemento da definire è il SET, questo si può creare cliccando sul primo riquadro *Create an input-signal block*. All'interno della casella *Name* si può inserire un nome a piacere (*A0_A1_A2_SET*), mentre nella casella *Function* sarà sufficiente inserire

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

la distanza orizzontale dal gradino che vogliamo avere al termine del processo di avvicinamento (Figura 3.63). Come visto nel Capitolo 2, desideriamo arrivare con la ruota anteriore del tripode a contatto con il gradino. Ipotizzando che la misurazione venga eseguita a partire dal centro di tale ruota basterà inserire 115, cioè il raggio delle ruote del tripode in millimetri.

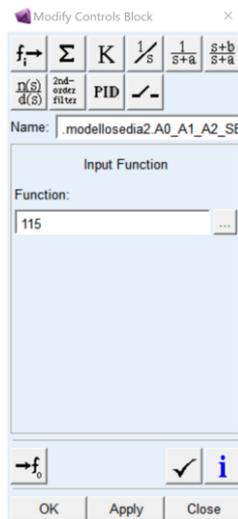


Figura 3.63 – Creazione set.

2. Il SET va confrontato con il Feedback (FB), cioè la misurazione della distanza tra il gradino e il centro della ruota anteriore, come deciso nel passaggio precedente. Prima di definire il blocco è quindi necessario creare tale misura.

Creazione della misura:

- I. Si definisce un Marker posizionato su uno dei bordi del gradino (Figura 3.64), facendo attenzione che abbia la terna degli assi orientata come quella del sistema di riferimento globale;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

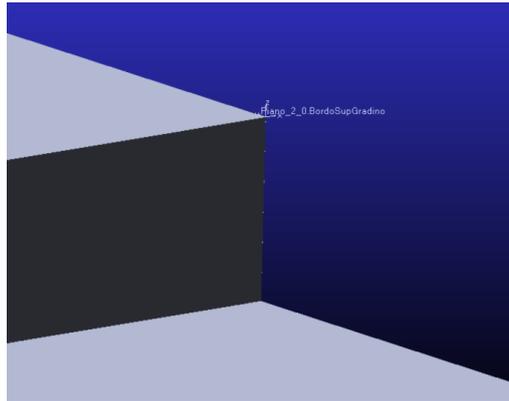
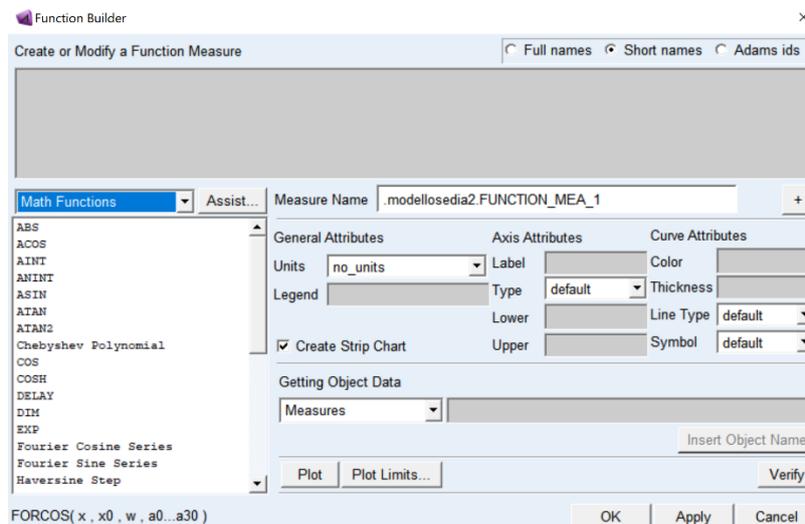


Figura 3.64 – Marker gradino.

- II. La misurazione si definisce in *Design Exploration > Measures > Create a new Function Measure* (Figura 3.65). All'interno dello spazio grigio è possibile inserire la funzione per ottenere la misura, ciò che si scriverà sarà del tipo: $DY(\text{Marker_Gradino}, \text{Marker_CentroDiMassaRuotaAnterioreTripode})$. Questa funzione misura la distanza lungo l'asse globale Y tra i due Marker posti all'interno della parentesi. Non è necessario creare il secondo Marker in quanto viene creato automaticamente da Adams e lo si può trovare nella sezione *Browse > Bodies*. Nella casella *Measure Name* si inserisce il nome scelto per la misura ($A0_A1_A2_FB_Misura$), mentre le altre impostazioni vengono lasciate di default.



Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino



Figura 3.65 – Creazione misura.

Una volta definita la quota sarà sufficiente tornare nella finestra del *Controls Toolkit* (Figura 3.66), definire un nuovo blocco in input, ma questa volta inserire all'interno della casella *Function* la misura *A0_A1_A2_FB_Misura*. Infine, si sceglie un nome per il blocco (*A0_A1_A2_FB*).

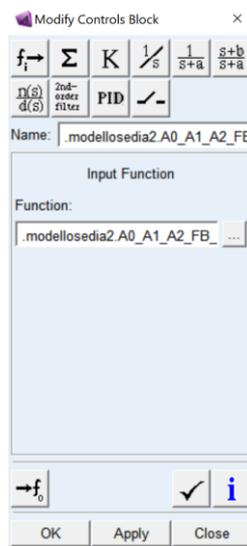


Figura 3.66 – Creazione feedback.

3. A questo punto si definisce l'errore (e) come la differenza tra SET (*A0_A1_A2_SET*) e FB (*A0_A1_A2_FB*). Si crea cliccando sul secondo riquadro *Create a summing-junction block* (Figura 3.67). Nella prima casella si inserisce il SET, mentre nella seconda il FB. È importante cliccare la casellina posta di fianco al secondo riquadro (trasformandola in un meno) per far sì che il FB venga sottratto al SET. Si inserisce infine un nome a piacere (*A0_A1_A2_ERRORE*).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

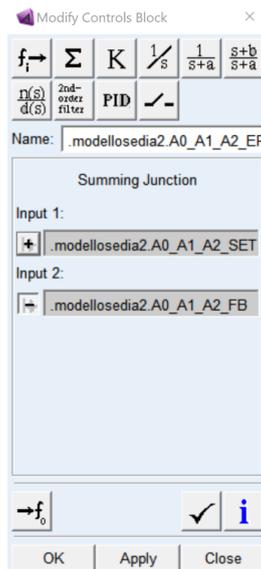


Figura 3.67 – Creazione errore.

4. Si definisce un nuovo blocco utile per la definizione del PID. Questo blocco è il FB negato (Figura 3.68); per crearlo è sufficiente selezionare la terza casella *Create a gain block*, inserire in input il FB (*A0_A1_A2_FB*) ed inserire in *Gain* il valore -1. Il blocco moltiplica il FB per -1 restituendo il negato del FB. Si sceglie infine un nome a piacere (*A0_A1_A2_FBnegativo*).

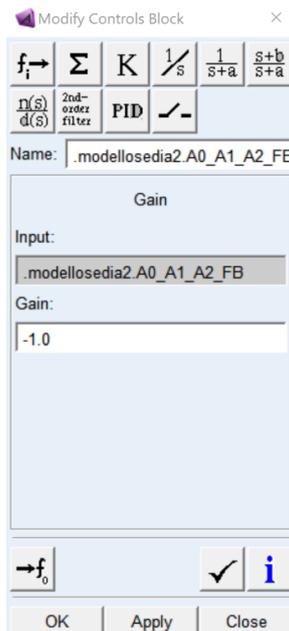


Figura 3.68 – Creazione feedback negativo.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

5.

L'e

rrore viene inserito in input in un blocco PID con lo scopo di generare il segnale di riferimento (REF) da inviare al Motion della solare destra (Figura 3.69). Per creare il blocco del PID si clicca sul penultimo riquadro *Create a PID-controller block*. Nella casella *Input* si inserisce l'errore (*A0_A1_A2_ERRORE*) e nella casella *Derivative input* si inserisce invece il FB negato (*A0_A1_A2_FBnegativo*). I valori del PID assegnati sono quelli mostrati in figura. Si sceglie infine un nome a piacere (*A0_A1_A2_REF*).

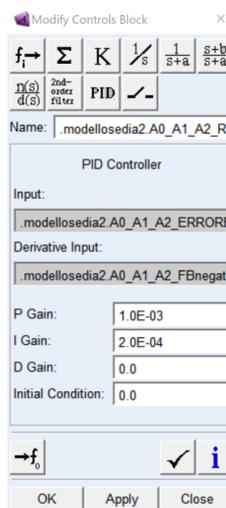


Figura 3.69 – Creazione PID.

6. Il riferimento (REF) non può venire inserito direttamente nel Motion, ma bisogna estrarne la misurazione. Per fare questo è sufficiente andare su *Browse > All Other > UDE Instances*, aprire il blocco *A0_A1_A2_REF* e cliccare sul riquadro in basso a sinistra *Create an output measure for this block*. Si inserisce in *Name* un nome a piacere (*A0_A1_A2_REF_Misura*). Questa misura, situata nella cartella *Browse > Measures*, potrà essere inserita nel Motion come vedremo nei *Capitoli 3.14 e 3.15*. Una volta avviata la simulazione l'errore, e quindi il REF, sarà massimo, portando la sedia ad avanzare verso il gradino; man mano che la sedia si avvicina il REF diminuirà di valore riducendone la velocità di spostamento, fino a fermarsi una volta raggiunta la distanza di set.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Lo stesso procedimento va ripetuto per il lato sinistro, ricordando che la misura del FB va rifatta usando come Marker il centro di massa della ruota anteriore sinistra e che l'unico blocco che non è necessario rifare è quello del SET, in quando il suo valore non cambia tra i due lati della sedia. Cliccando invece sull'icona in basso a destra *List information on control block connections* si ottiene un riepilogo di tutti i blocchi creati. In questo caso la schermata finale dovrà essere analoga alla seguente (Figura 3.70):

```
Summary of Controls Blocks in Model .modellosedia2

A0_A1_A2_SET (controls_input)
  Input function: 115
  Output(s) to : A0_A1_A2_ERRORE (controls_sum), A0_A1_A2_SX_ERRORE (controls_sum)
  Referenced by : (no other references)

A0_A1_A2_FB (controls_input)
  Input function: .modellosedia2.A0_A1_A2_FB_Misura
  Output(s) to : A0_A1_A2_ERRORE (controls_sum), A0_A1_A2_FBnegativo (controls_gain)
  Referenced by : (no other references)

A0_A1_A2_SX_FB (controls_input)
  Input function: .modellosedia2.A0_A1_A2_SX_FB_Misura
  Output(s) to : A0_A1_A2_SX_ERRORE (controls_sum), A0_A1_A2_SX_FBnegativo (controls_gain)
  Referenced by : (no other references)

A0_A1_A2_FBnegativo (controls_gain)
  Input(s) from : A0_A1_A2_FB (controls_input)
  Output(s) to : A0_A1_A2_REF (controls_pid)
  Referenced by : (no other references)

A0_A1_A2_SX_FBnegativo (controls_gain)
  Input(s) from : A0_A1_A2_SX_FB (controls_input)
  Output(s) to : A0_A1_A2_SX_REF (controls_pid)
  Referenced by : (no other references)

A0_A1_A2_ERRORE (controls_sum)
  Input(s) from : A0_A1_A2_SET (controls_input), A0_A1_A2_FB (controls_input)
  Output(s) to : A0_A1_A2_REF (controls_pid)
  Referenced by : A0_A1_A2_ERRORE_Misura (Measure_Solver_Computed)

A0_A1_A2_SX_ERRORE (controls_sum)
  Input(s) from : A0_A1_A2_SET (controls_input), A0_A1_A2_SX_FB (controls_input)
  Output(s) to : A0_A1_A2_SX_REF (controls_pid)
  Referenced by : A0_A1_A2_SX_ERRORE_Misura (Measure_Solver_Computed)

A0_A1_A2_REF (controls_pid)
  Input(s) from : A0_A1_A2_ERRORE (controls_sum), A0_A1_A2_FBnegativo (controls_gain)
  Output(s) to : (no outputs)
  Referenced by : A0_A1_A2_REF_Misura (Measure_Solver_Computed)

A0_A1_A2_SX_REF (controls_pid)
  Input(s) from : A0_A1_A2_SX_ERRORE (controls_sum), A0_A1_A2_SX_FBnegativo (controls_gain)
  Output(s) to : (no outputs)
  Referenced by : A0_A1_A2_SX_REF_Misura (Measure_Solver_Computed)
```

Figura 3.70 – Riepilogo grandezze sistema di controllo.

3.11 Inserimento del gradino e della massa utente

Prima di procedere con la simulazione è necessario creare il gradino da scavalcare (Figura 3.71). Questo viene fatto direttamente all'interno dell'ambiente Adams sfruttando gli strumenti di modellazione 3D. Il gradino viene modellato come un parallelepipedo appoggiato sul Piano. Per crearlo bisogna cliccare su *Bodies > Geometry: Box*, selezionare *Add to Part* e cliccare sul Piano ed infine inserire le coordinate di due angoli opposti del gradino come indicato dalle istruzioni. Di seguito viene presentato il risultato finale. L'altezza del gradino consigliata è di 190 mm in quanto è quella che è stata usata nelle prove eseguite nei Capitoli 3.14 e 3.15, mentre la distanza tra il gradino e la sedia è a piacere, ma è consigliata di almeno un metro per apprezzare l'avvicinamento eseguito dal sistema di controllo e lasciare lo spazio sufficiente ad eseguire eventuali manovre.

È necessario inoltre aggiornare le otto forze di contatto precedentemente create, inserendo nella casella *J Solid(s)*, oltre al piano precedentemente selezionato, anche il gradino appena creato. Questo in quanto, nonostante il gradino sia stato aggiunto al Body del piano, viene comunque trattato come un solido separato. Per trovarne il nome è necessario andare su *Bodies > Piano*.

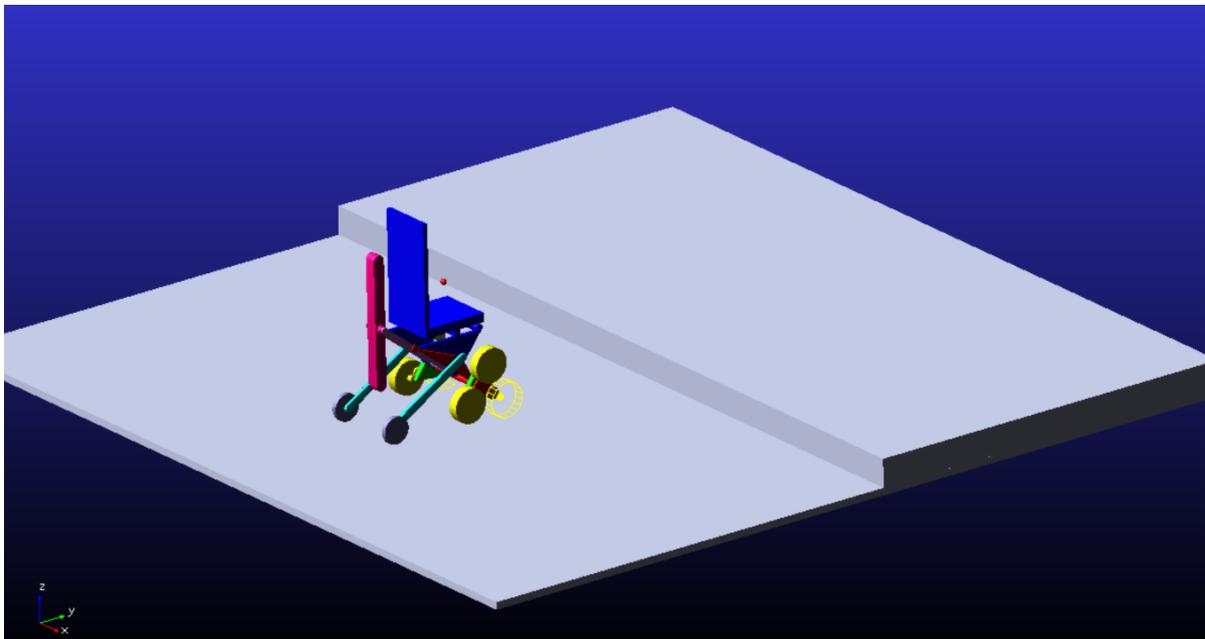


Figura 3.71 – Aspetto finale del modello Adams.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

La massa di chi siede sulla sedia viene idealizzata con una sfera di piccole dimensioni di 80 kg, vincolata al sotto-telaio RC e posta nella posizione del baricentro dell'utente. Viene creata cliccando su *Bodies > RigidBody: Sphere*, selezionando *New Part*, cliccare sulla casellina ed inserire un raggio a piacere ed infine inserire le coordinate del baricentro dell'utente. Bisogna inserire poi la massa di 80 kg ed infine conviene rinominare la nuova parte in *Utente*. Per vincolare la sfera al telaio RC (Figura 3.72) si crea un nuovo vincolo ad incastro con le seguenti caratteristiche e lo si posiziona al centro della sfera (Tabella 3.22).

| Tabella 3.22 – Nuovi vincoli. | | | |
|-------------------------------|-----------|----------|-----------|
| Nome vincolo | Tipologia | 1st Body | 2nd Body |
| Utente-RC | Fixed | Utente | Telaio RC |

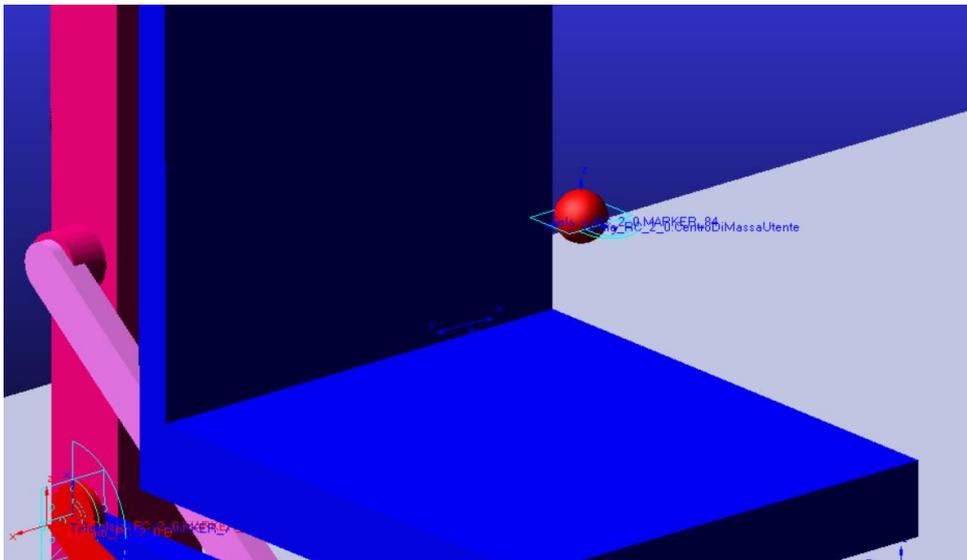


Figura 3.72 – Vincolo utente-sedia.

3.12 Creazione delle spline

Attraverso lo script di Matlab elaborato nella tesi di *Perez* [5], inserendo un'altezza del gradino a scelta in input è possibile ottenere delle matrici che contengono le variazioni degli angoli caratteristici della sedia rispetto il loro valore iniziale, per tutte le fasi che compongono le sequenze A e B viste nel *Capitolo 2*. Queste matrici sono costituite da un numero variabile di righe e da due colonne: la prima colonna contiene un riferimento temporale (i valori di tempo

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

non sono ancora realistici, il tempo serve come riferimento), mentre la seconda colonna contiene la variazione di uno degli angoli caratteristici in radianti rispetto al valore iniziale dell'angolo. È possibile comandare i Motion su Adams sfruttando tali matrici, controllandoli dunque in posizione nel tempo. Per fare ciò è prima necessario creare le *Spline*. Le Spline sono delle entità matematiche simili a matrici, costituite da un numero variabile di righe e da due colonne; la loro caratteristica è che nella prima colonna (X) contengono una variabile indipendente, mentre nella seconda colonna contengono una variabile dipendente (Y).

Per creare una Spline (Figura 3.73) è necessario andare su *Elements > Data Elements > Build a 2D or 3D data Spline*, aprendo la finestra di creazione della Spline. Una volta scelto il nome è sufficiente copiare e incollare le matrici generate dallo script di Matlab per ottenere le Spline. Le impostazioni sulla destra generalmente non servono, ma è possibile visualizzare le Spline sottoforma di grafico usando la funzione *View As > Plot*.

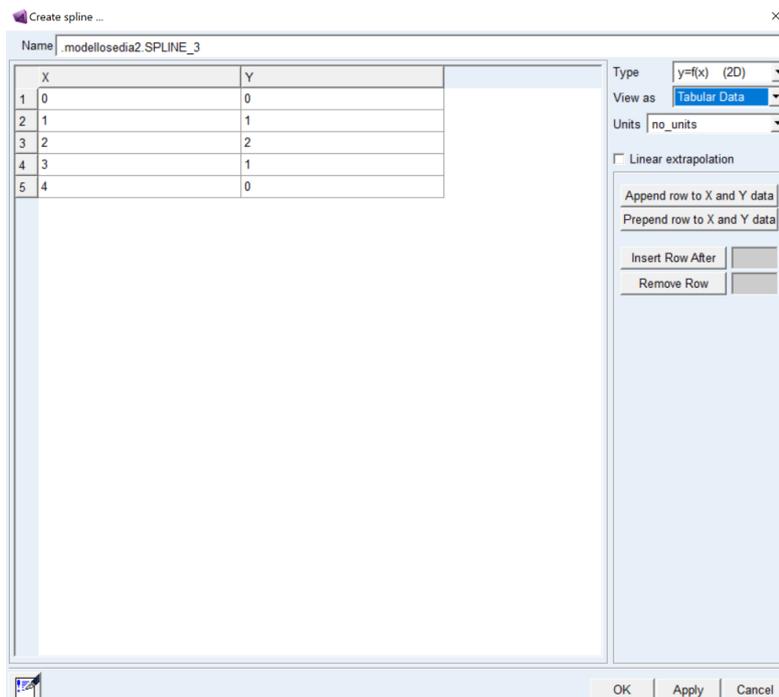


Figura 3.73 – Creazione spline.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Di seguito è possibile visualizzare la Spline che permette di controllare l'angolo θ_P durante la fase A0_A1_A2 (Figura 3.74).

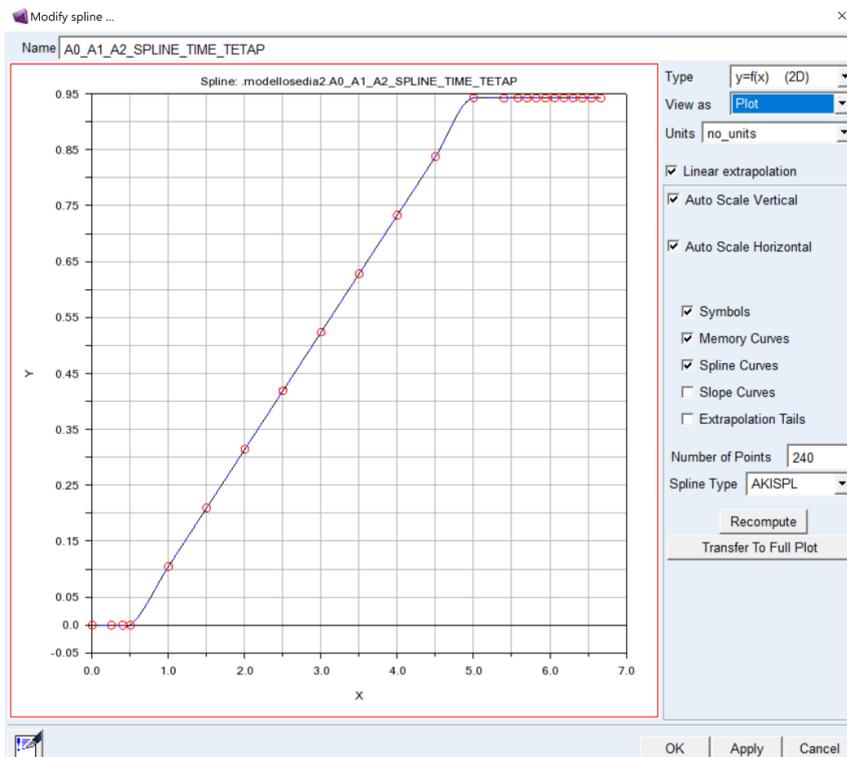
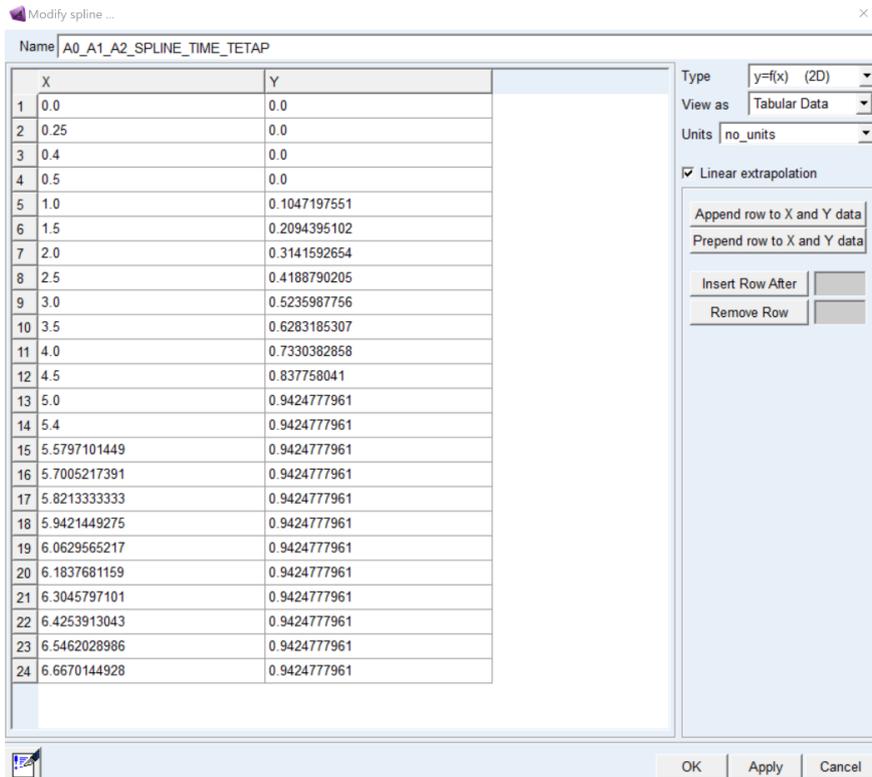


Figura 3.74 – A0-A1-A2, spline.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

Una volta creata una Spline, ad esempio quella necessaria a controllare l'angolo ϑ_P durante la fase A0_A1_A2, è necessario aprire il Motion *Tripode2* (adibito alla variazione di ϑ_P) ed inserire nell'apposita casella una *Function (time)* denominata CUBSPL, costituita dalla seguente struttura (Figura 3.75):

```
CUBSPL( 1st_Indep_Var , 2nd_Indep_Var , Spline_Name , Deriv_Order)
```

Figura 3.75 – Creazione spline.

1. *1st_Indep_Var*: è la variabile indipendente, il tempo. Si inserisce per questo sempre "time";
2. *2nd_Indep_Var*: è un'eventuale seconda variabile indipendente. Si usa nel caso delle Spline di tipologia 3D. Nel nostro caso le Spline create sono sempre di tipo 2D, di conseguenza è sufficiente inserire sempre "0" per indicare che non esiste la seconda variabile indipendente;
3. *Spline_Name*: si inserisce il nome della Spline con la quale vogliamo controllare il Motion (es: "A0_A1_A2_SPLINE_TIME_TETAP" per controllare il tripode durante la fase A0_A1_A2);
4. *Deriv_Order*: si inserisce l'ordine della derivata da applicare alla spline, nel nostro caso sarà sempre "0".

Una volta avviata la simulazione il Motion verrà controllato in posizione, seguendo nel tempo i punti imposti dalla Spline.

3.13 Struttura delle simulazioni

Per avviare una simulazione su Adams è necessario cliccare su *Simulation > Simulate > Run an interactive simulation*, aprendo la finestra di simulazione, descritta in seguito (Figura 3.76):

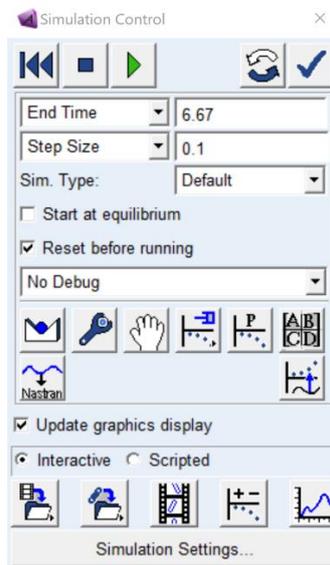


Figura 3.76 – Finestra simulazioni.

1. Nella prima casella è possibile indicare il tempo di durata della simulazione. Nel nostro caso useremo sempre l'opzione *End Time*, inserendo nella casella adiacente il tempo in secondi indicato nell'ultima riga delle Spline associate alla simulazione. Nel caso in cui non siano presenti Spline, come nel caso degli avvicinamenti o dei semplici spostamenti si inserisce il tempo necessario a completare il percorso prestabilito;
2. Nella seconda casella è possibile, con l'opzione *Step Size*, inserire la durata in secondi degli step di simulazione, oppure inserire gli il numero di step in cui suddividere il tempo di simulazione usando l'opzione *Steps*. Nel nostro caso si useranno sempre *Step Size* da 0.1 secondi per avere una buona precisione, ma non rendere la simulazione troppo pesante;
3. *Sim Type*: permette di impostare la tipologia di simulazione, nel nostro caso lasceremo sempre l'opzione *Default*;

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

4. *Start at equilibrium*: se selezionata permette di iniziare la simulazione nella condizione della sedia di equilibrio statico. È utile nel caso di errori all'avvio della simulazione;
5. Le icone in basso permettono di salvare una simulazione, archivarne il video, le misurazioni e visualizzarne tutti i parametri voluti;
6. Le icone superiori permettono di avviare e fermare la simulazione, oppure di rivederla.

La complessità delle sequenze di salita e discesa ha reso necessario suddividerle in diverse simulazioni, ognuna comprendente un numero variabile tra le due e le tre sottofasi. Questo per gestire meglio alcune situazioni delicate come gli avvicinamenti eseguiti con il PID, sia per rendere più leggere e semplici da creare le simulazioni.

La sequenza di salita del gradino (A) è stata suddivisa in tre simulazioni separate:

1. A0-A1-A2
2. A3 + A4 + A5
3. A6 + A7 + A8 + A9

Gli step mostrati fino ad ora permettono di eseguire la simulazione A0-A1-A2. Per eseguire la seconda è necessario copiare il file Adams, dargli un nuovo nome e modificare la configurazione di partenza della sedia in modo che coincida con quella finale della fase A0-A1-A2.

La sequenza di discesa del gradino (B) è stata suddivisa in quattro simulazioni separate:

1. B0 + B1
2. B2
3. B3 + B4 + B5
4. B6 + B7 + B8 + B9

3.14 Simulazione della salita del gradino (sequenza A)

Ora che il modello fisico è completo è possibile effettuare una serie di simulazioni; in questo capitolo si affronta la salita di un gradino singolo alto 190 mm, ovvero la sequenza A presentata nel *Capitolo 2*.

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.14.1 Fase combinata A0-A1-A2

Per simulare la fase è necessario inserire le funzioni nel tempo (Tabella 3.24) all'interno dei Motion che si devono attivare durante di essa ed avviare la simulazione (Figura 3.77).

| Motion | Function (time) |
|----------------|--|
| Sol1 | -.modellosedia2.A0_A1_A2_SX_REF_Misura*time |
| Sol2 | -.modellosedia2.A0_A1_A2_REF_Misura*time |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , A0_A1_A2_SPLINE_TIME_TETAP, 0) |
| RC | 0 |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , A0_A1_A2_SPLINE_TIME_TETADU, 0) |

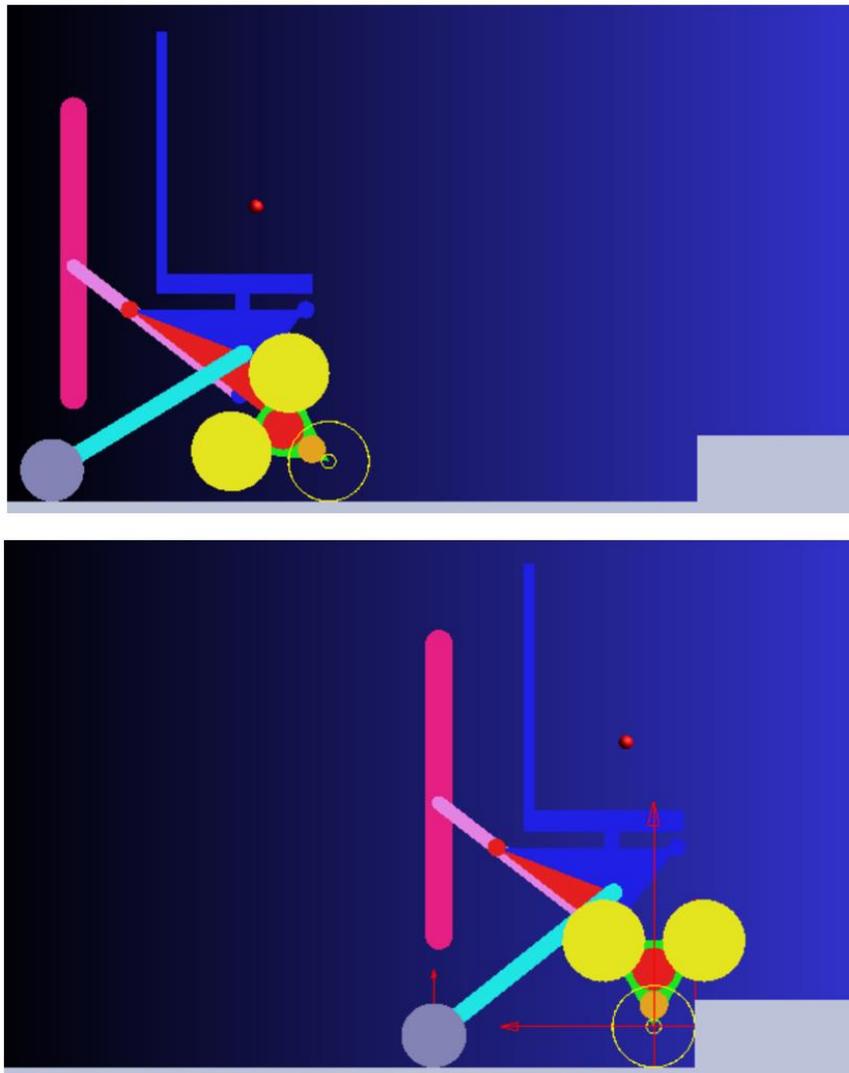


Figura 3.77 – Fase combinata A0-A1-A2 – inizio (sopra), fine (sotto).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.14.2 Fasi A3 A4 A5

| Tabella 3.24 – Funzioni nel tempo | |
|-----------------------------------|--|
| Motion | Function (time) |
| Sol1 | STEP(time , 6 , 0 , 8.437 , 36.66d) |
| Sol2 | STEP(time , 6 , 0 , 8.437 , 36.66d) |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , A3_A4_A5_SPLINE_TIME_TETAP, 0) |
| RC | 0 |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , A3_A4_A5_SPLINE_TIME_TETADU, 0) |

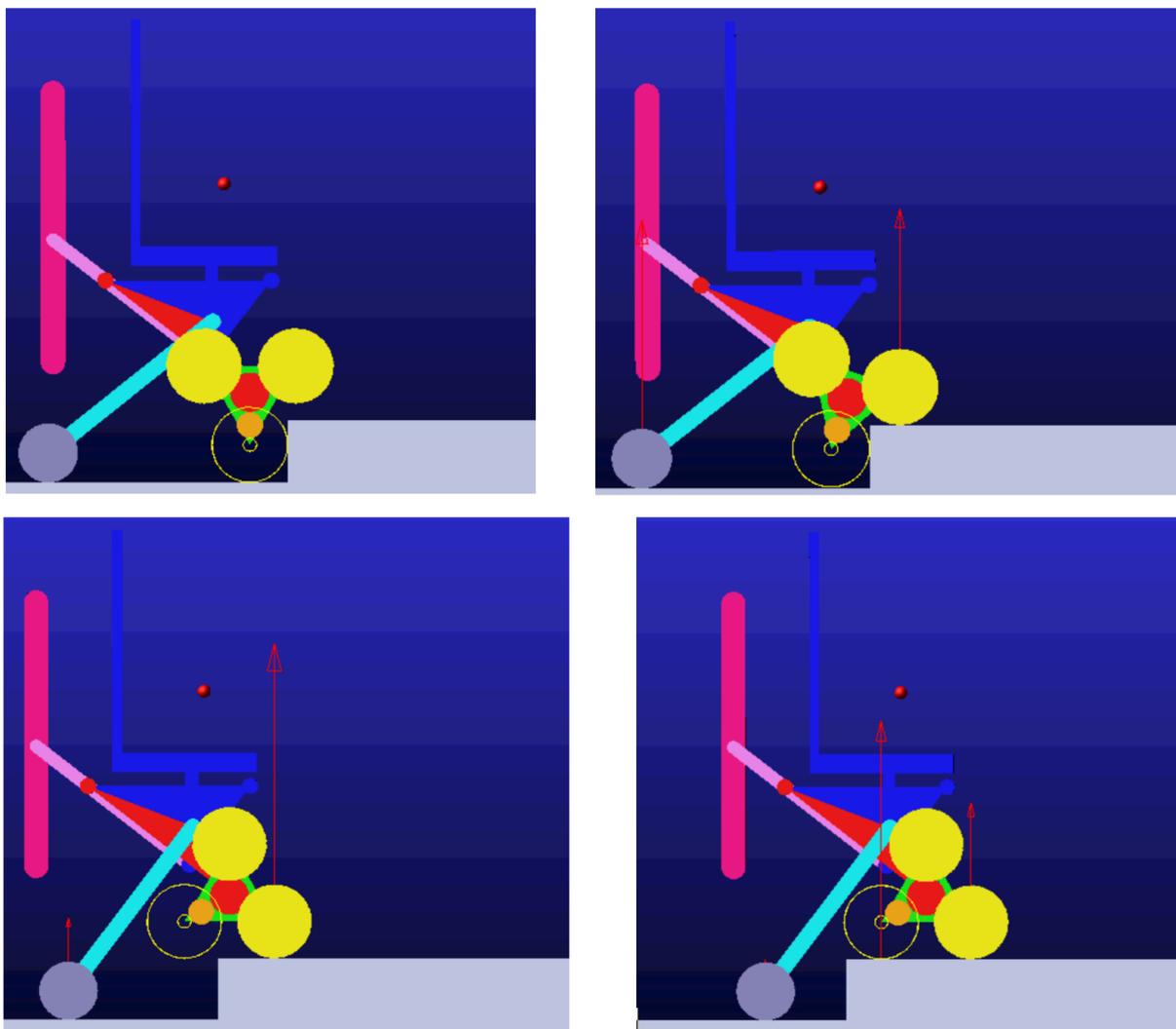


Figura 3.78 – Fasi A3 A4 A5 – inizio A3 (alto sx), inizio A4 (alto dx), inizio A5 (basso sx), fine A5 (basso dx).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.14.3 Fasi A6 A7 A8 A9

| Motion | Function (time) |
|----------------|---|
| Sol1 | STEP(time , 4.21 , 0 , 10.43 , 113.33d) |
| Sol2 | STEP(time , 4.21 , 0 , 10.43 , 113.33d) |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , A6_A7_A8_A9_SPLINE_TIME_TETAP, 0) |
| RC | CUBSPL(time , 0 , A6_A7_A8_A9_SPLINE_TIME_BETA, 0) |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , A6_A7_A8_A9_SPLINE_TIME_TETADU, 0) |

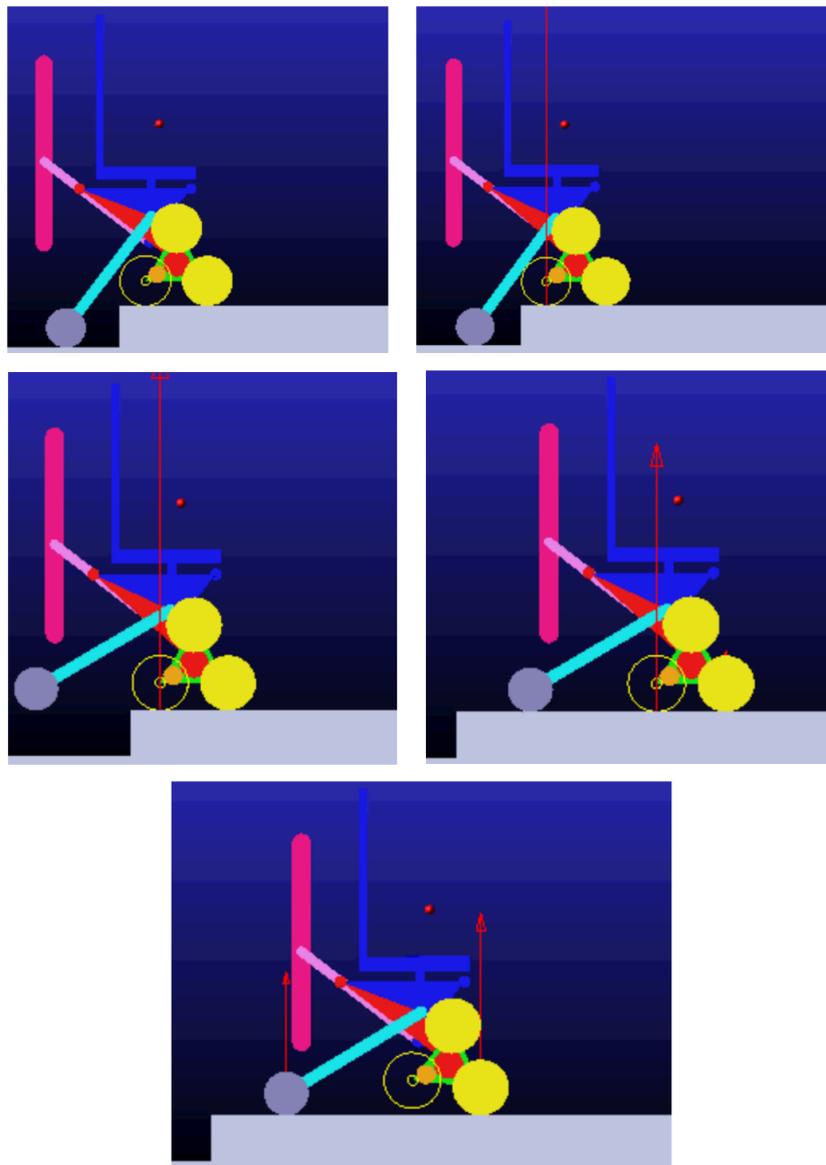


Figura 3.79 – Fasi A6 A7 A8 A9 – inizio A6 (alto sx), inizio A7 (alto dx), inizio A8 (metà sx), inizio A9 (metà dx), fine A9 (basso).

3.14.4 Considerazioni e confronto con la sequenza eseguita con il prototipo

È possibile fare delle considerazioni qualitative sulla simulazione effettuata ed effettuare un confronto con la sequenza realizzata con il prototipo nel *Capitolo 7*:

1. Nella simulazione della fase combinata A0-A1-A2 la rotazione del tripode e la traslazione avvengono in contemporanea. Nelle prove eseguite con il prototipo, nonostante vengano inviati i segnali per eseguire tali azioni contemporaneamente, succede che il tripode inizia a girare e la carrozzina resta sul posto; una volta terminata la rotazione del tripode, la carrozzina inizia ad avanzare. Questo succede in quanto il sistema di controllo che regola l'azione delle solari (spiegato nel dettaglio nel *Capitolo 5.3*) è tarato in maniera tale da compensare l'indietreggiamento della carrozzina causato dalla rotazione in avanti del tripode facendo ruotare gli pneumatici in avanti; il risultato è che durante la rotazione del tripode la carrozzina resta ferma sul posto ed inizia ad avanzare solo a rotazione completata.
2. Nella simulazione della fase A4 lo pneumatico anteriore del tripode, aggrappandosi al gradino, trascina leggermente in avanti la carrozzina. Nella prova con il prototipo, invece, la carrozzina tende a restare sul posto. Questo è dovuto al modello di contatto tra pneumatico e terreno che è stato realizzato facendo delle assunzioni semplificative, come ad esempio che il contatto tra le parti avvenga in un solo punto, mentre nella realtà si ha un'area di contatto estesa.
3. Nella simulazione della fase A5 la carrozzina arriva con la ruota posteriore del tripode che è a filo con il gradino. Come discusso nel *Capitolo 2*, con il prototipo reale si è deciso di farla andare 150 mm oltre tale distanza, per avere maggior sicurezza nella fase successiva.
4. Nella simulazione delle fasi A6 e A7 si nota come, con un aumento dell'angolo Θ_{PC} di 6° , si abbia un forte picco della reazione vincolare sulla ruota posteriore del tripode, indicando che la coordinata orizzontale del baricentro è molto vicina al punto di contatto tra ruota e pavimento. Tenendo conto del fatto che si tratta di un modello semplificato e che la posizione esatta del baricentro verrà studiata in modo approfondito nelle tesi successive, questa simulazione ci dà un'indicazione di come questa rappresenti la fase più delicata di tutta la sequenza di salita gradino. Nella

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

sequenza effettuata con il prototipo, un aumento di Θ_{PC} di 6° non si è rivelato infatti sufficiente a scaricare il peso della carrozzina tra le due ruote del tripode, segno che la posizione del baricentro andrà studiata in maniera più approfondita in futuro. Come visto nel *Capitolo 2.3.5*, per il prototipo si è scelto di conseguenza un aumento di Θ_{PC} di 15° , valore capace di garantire una buona stabilità, in attesa di studi più approfonditi a riguardo.

3.15 Simulazione della discesa del gradino (sequenza B)

In questo capitolo si affronta la discesa di un gradino alto 190 mm.

3.15.1 Fasi B0 B1

| Tabella 3.26 – Funzioni nel tempo | |
|-----------------------------------|---|
| Motion | Function (time) |
| Sol1 | 0 |
| Sol2 | 0 |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , B0_B1_SPLINE_TIME_TETAP, 0) |
| RC | 0 |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , B0_B1_SPLINE_TIME_TETADU, 0) |

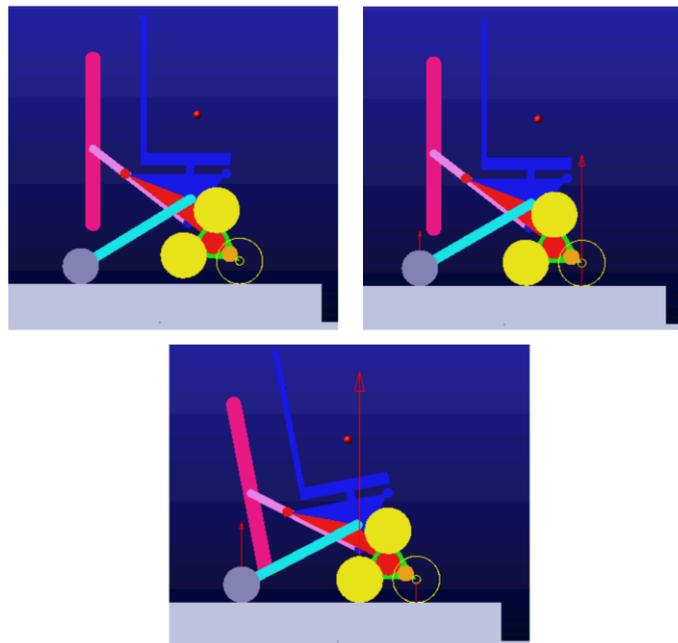


Figura 3.80 – Fasi B0 B1 – inizio B0 (alto sx), inizio B1 (alto dx), fine B1 (basso).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.15.2 Fase B2

| Tabella 3.27 – Funzioni nel tempo | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Motion | Function (time) |
| Sol1 | .modellosedia2.B2_REF_Misura*time |
| Sol2 | .modellosedia2.B2_SX_REF_Misura*time |
| Tripode2 | 0 |
| RC | 0 |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | 0 |

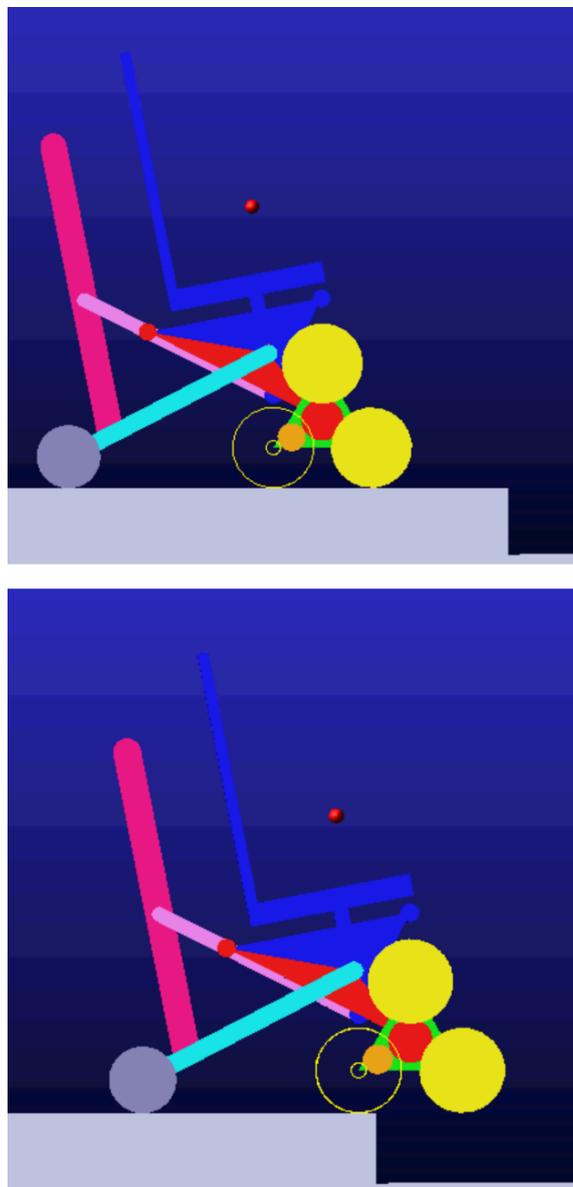


Figura 3.81 – inizio B2 (alto), fine B2 (basso).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.15.3 Fasi B3 B4 B5

| Tabella 3.28 – Funzioni nel tempo | |
|-----------------------------------|---|
| Motion | Function (time) |
| Sol1 | STEP(time , 3.6069 , 0 , 5.961 , -50d) |
| Sol2 | STEP(time , 3.6069 , 0 , 5.961 , -50d) |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , B3_B4_B5_SPLINE_TIME_TETAP , 0) |
| RC | 0 |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , B3_B4_B5_SPLINE_TIME_TETADU , 0) |

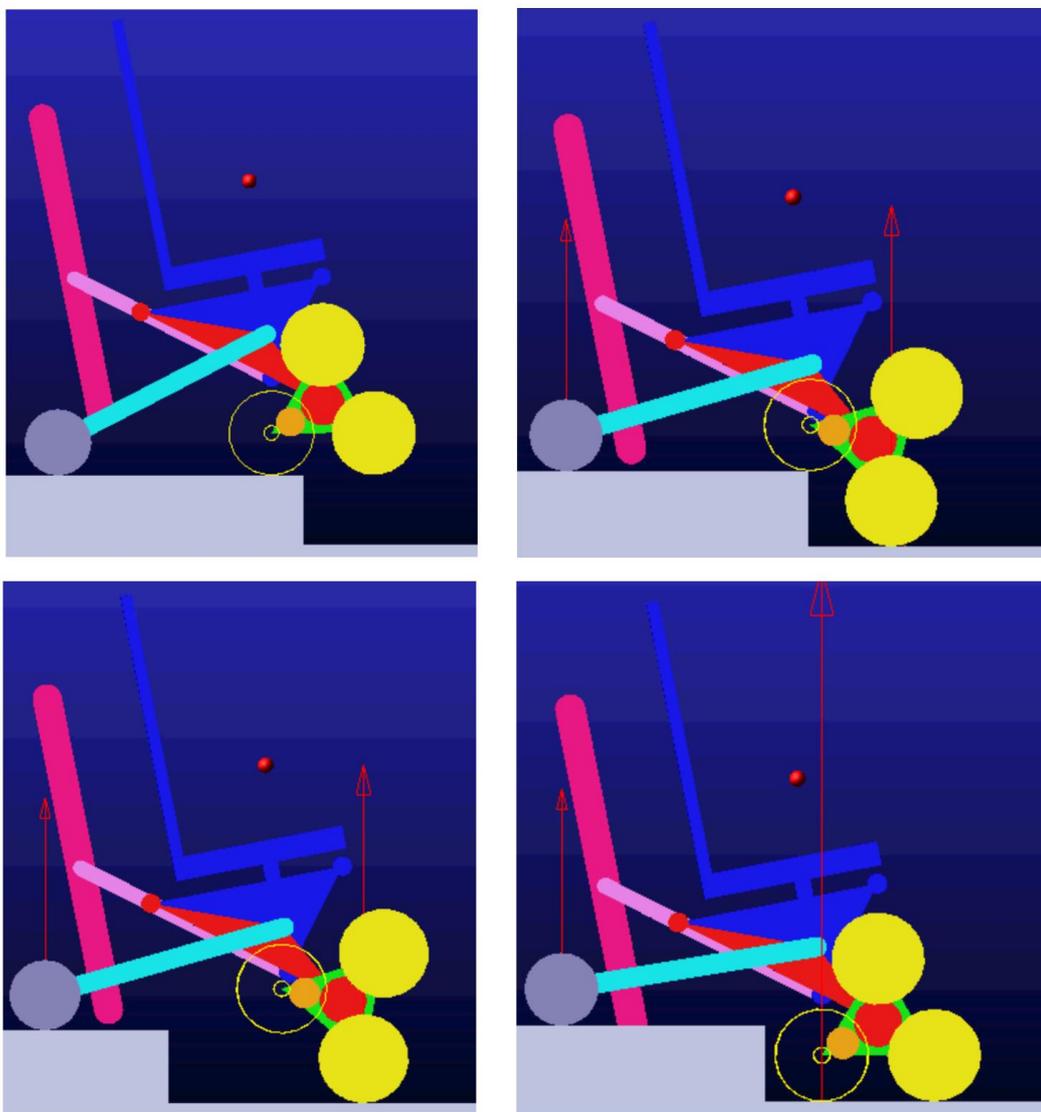


Figura 3.82 – Fasi B3 B4 B5 – inizio B3 (alto sx), inizio B4 (alto dx), inizio B5 (basso sx), fine B5 (basso dx).

Simulazione delle sequenze di salita e discesa gradino

3.15.4 Fasi B6 B7 B8 B9

| Tabella 3.29 – Funzioni nel tempo | |
|-----------------------------------|---|
| Motion | Function (time) |
| Sol1 | STEP(time , 1.4167 , 0 , 5.8316 , -99d) |
| Sol2 | STEP(time , 1.4167 , 0 , 5.8316 , -99d) |
| Tripode2 | CUBSPL(time , 0 , B6_B7_B8_B9_SPLINE_TIME_TETAP, 0) |
| RC | CUBSPL(time , 0 , B6_B7_B8_B9_SPLINE_TIME_BETA, 0) |
| SostegnoSlitta | 0 |
| Slitta | 0 |
| SupportoPiv2 | CUBSPL(time , 0 , B6_B7_B8_B9_SPLINE_TIME_TETADU, 0) |

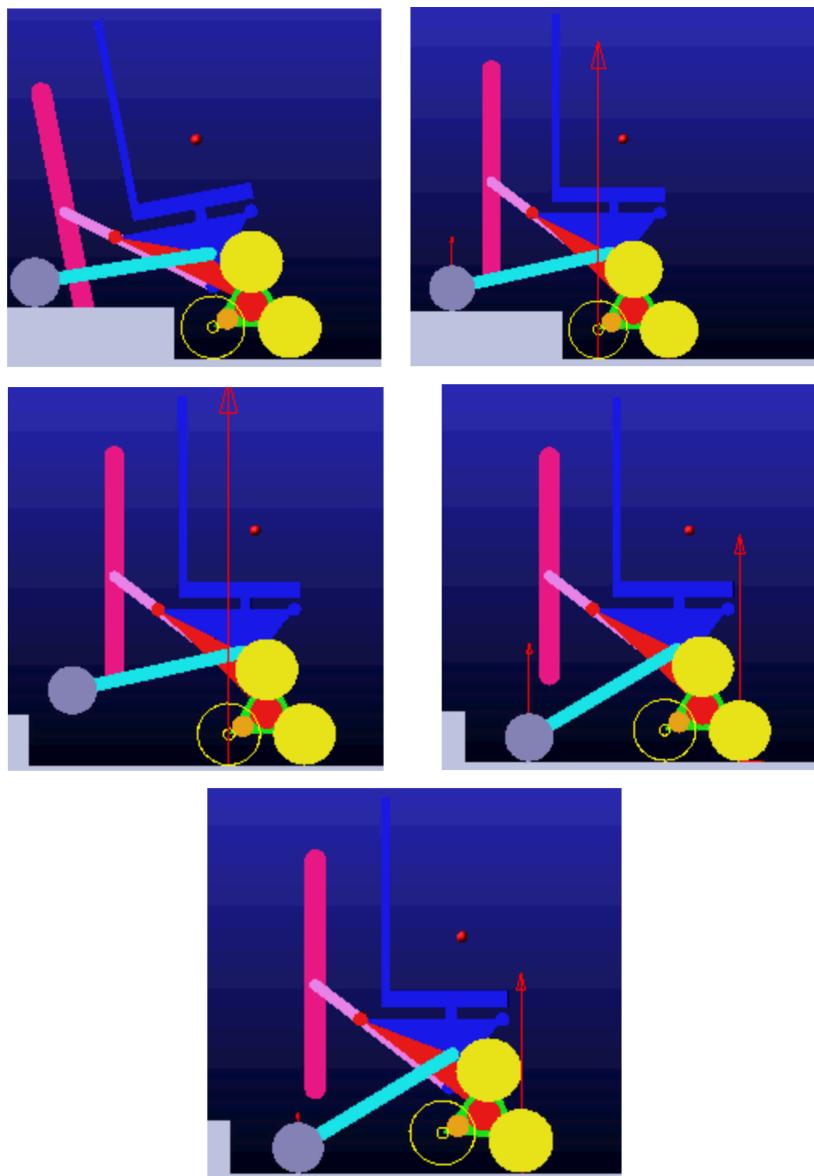


Figura 3.83 – Fasi B6 B7 B8 B9 – inizio B6 (alto sx), inizio B7 (alto dx), inizio B8 (metà sx), inizio B9 (metà dx), fine B9 (basso).

3.15.5 Considerazioni sulla simulazione B

Valgono tutte le considerazioni fatte nel *Capitolo 2.4*. Come per la sequenza A, si nota che nelle fasi B7 e B8 si ha un picco della reazione vincolare sulla ruota posteriore del tripode, indicando che la coordinata orizzontale del baricentro è molto vicina al punto di contatto tra ruota e pavimento. Tenendo conto del fatto che si tratta di un modello semplificato e che la posizione esatta del baricentro verrà studiata in modo approfondito nelle tesi successive, questa simulazione ci dà un'indicazione di come questa rappresenti la fase più delicata di tutta la sequenza di discesa gradino.

4 Lidar e rilevazione gradino

4.1 Il sensore Lidar

Per individuare e ricavare le quote dei gradini presenti davanti alla carrozzina si è scelto di utilizzare un Lidar, il prodotto in questione è realizzato dalla Slamtec ed è il modello RPLIDAR A1M8 (Figura 4.1). Si tratta in uno scanner laser che opera a 360° in due dimensioni e permette di mappare l'ambiente circostante fino a 12 metri di distanza (6 metri per il modello A1M8-R4) tramite la creazione di una nuvola di punti. Lo scanner può lavorare in ambienti chiusi o aperti, anche senza esposizione diretta alla luce solare e la sua frequenza di scansione ottimale è di 5.5 Hz, ma può essere portata a 10 Hz.

Il Lidar è costituito da un sistema di scansione e da un motore; dopo averlo azionato il sistema inizia a ruotare e a scannerizzare l'ambiente. L'utente può ottenere i dati della scansione attraverso l'interfaccia di comunicazione (Porta seriale/USB).



Figura 4.1 – RPLIDAR A1M8.

Il Lidar si basa sulla triangolazione del laser (Figura 4.2) e misura la distanza emettendo un segnale laser modulato che viene riflesso dall'oggetto che incontra sul suo cammino. Il segnale che torna indietro viene catturato dal sistema di acquisizione del Lidar ed il DSP contenuto al suo interno processa i dati ottenuti restituendo in output i valori in coordinate polari di distanza e angolo calcolati rispetto al sistema di riferimento centrato sul Lidar.

Lidar e rilevazione gradino

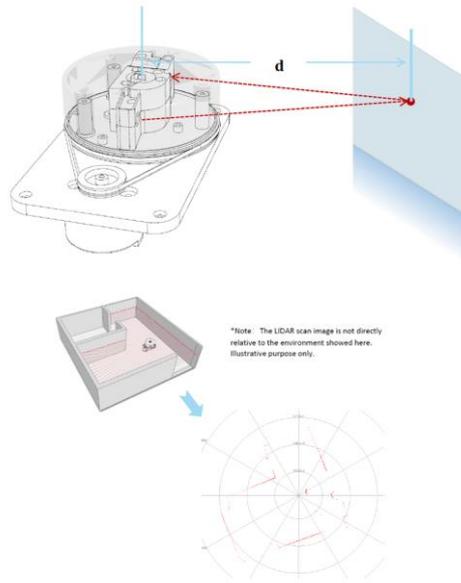


Figura 4.2 – Triangolazione del segnale.

Scheda tecnica del Lidar (Figura 4.3):

| Item | Unit | Min | Typical | Max | Comments |
|---------------------|-----------------|------|---|------|--|
| Distance Range | Meter(m) | TBD | A1M8-R4 and the belowing models 0.15 - 6 | TBD | White objects |
| Angular Range | Degree | n/a | 0-360 | n/a | |
| Scan Field Flatness | Degree | -1.5 | | 1.5 | |
| Distance Resolution | mm | n/a | <0.5 <1% of the distance | n/a | <1.5 meters All distance range* |
| Angular Resolution | Degree | n/a | <1 | n/a | 5.5Hz scan rate |
| Sample Duration | Millisecond(ms) | n/a | 0.125 | n/a | |
| Sample Frequency | Hz | n/a | >8000 | 8010 | |
| Scan Rate | Hz | 1 | 5.5 | 10 | Typical value is measured when RPLIDAR A1 takes 360 samples per scan |

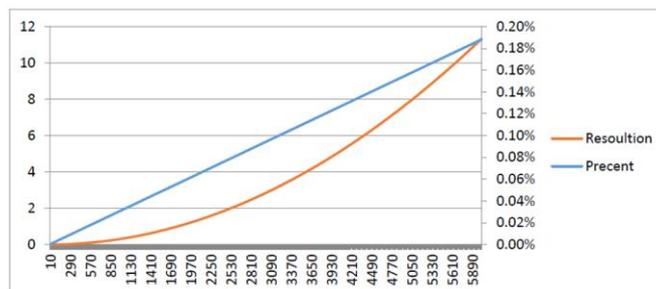


Figura 4.3 – Scheda tecnica RPLIDAR A1M8.

Lidar e rilevazione gradino

I dati che vengono mandati in output dal Lidar contengono le informazioni mostrate in *Figura 4.4.1*. Per ogni punto scansionato, il Lidar invia le sue coordinate polari (distanza dall'origine del sistema di riferimento (mm) ed angolo rispetto all'asse x (°)), in accordo con il sistema di riferimento presente in *Figura 4.4.2*.

| Data Type | Unit | Description |
|------------|-----------|--|
| Distance | mm | Current measured distance value between the rotating core of the RPLIDAR A1 and the sampling point |
| Heading | degree | Current heading angle of the measurement |
| Quality | level | Quality of the measurement |
| Start Flag | (Boolean) | Flag of a new scan |

Figura 4.4.1 – Struttura segnali in output Lidar.

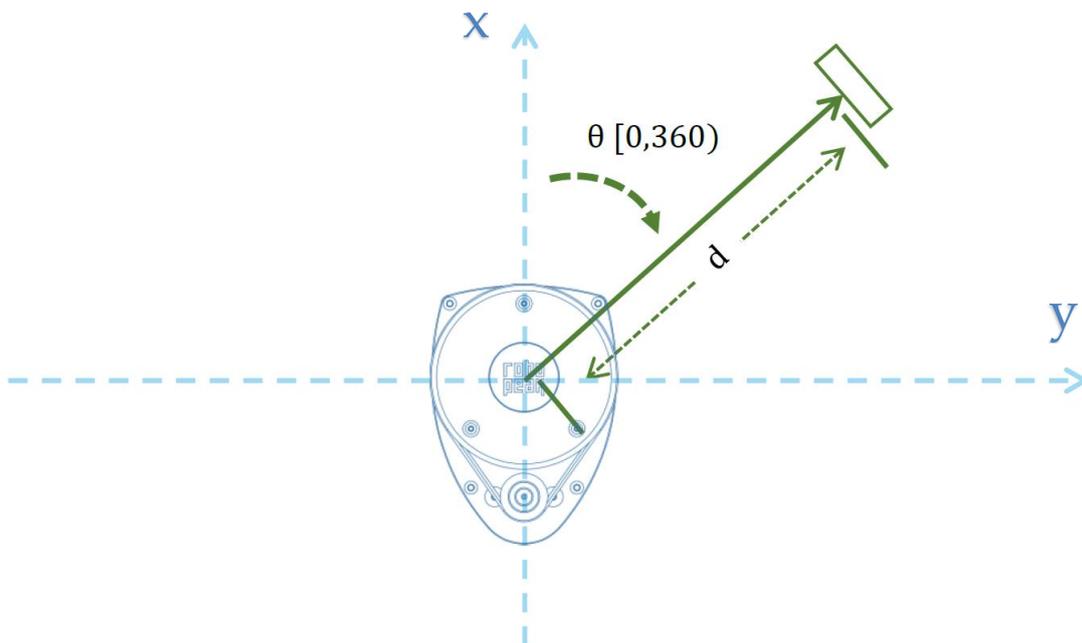


Figura 4.4.2 – Sistema di riferimento del Lidar.

Lidar e rilevazione gradino

Il kit completo fornito nella confezione contiene (Figura 4.5 e 4.6):

1. RPLIDAR A1M8 (RPLIDAR Module)
2. Adattatore USB (USB Adapter)
3. Cavo di comunicazione per il Lidar (RPLIDAR communication cable)

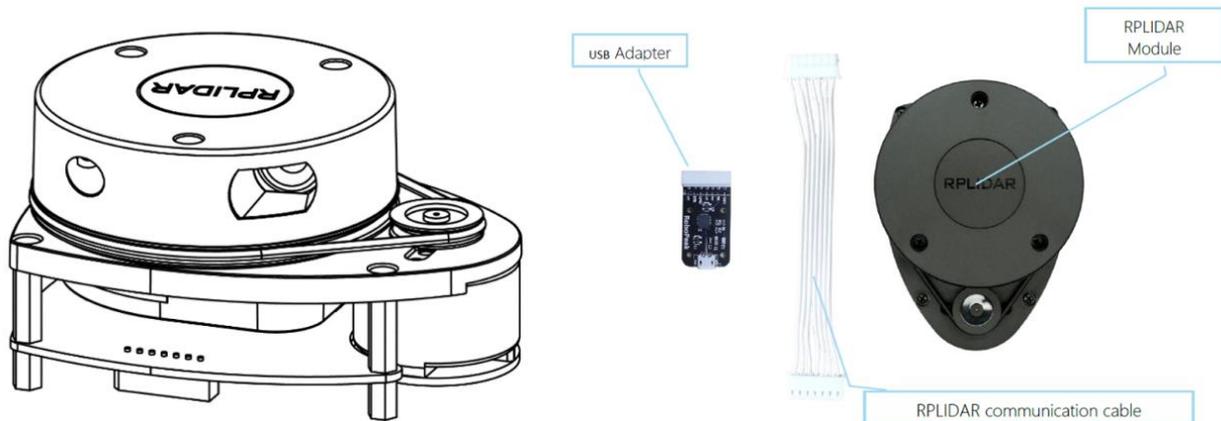


Figura 4.5 – Kit Lidar.

Il Lidar viene azionato da un motore che può essere controllato nella velocità di rotazione, determinando la frequenza di scansione. L'adattatore USB invece fornisce l'alimentazione al Lidar e ne converte l'interfaccia seriale interna UART in una più classica interfaccia USB.



Figura 4.6 – Kit Lidar.

4.2 Collegamento Lidar / Computer – Prima versione

In questo capitolo viene presentato il primo metodo usato per collegare il Lidar al PC del laboratorio ed effettuare così le prime prove di scansione dell'ambiente circostante. Il Lidar può essere facilmente connesso al PC nel seguente modo:

Lidar e rilevazione gradino

1. Connettere il Lidar all'adattatore USB usando il cavo di comunicazione (Figura 4.7).

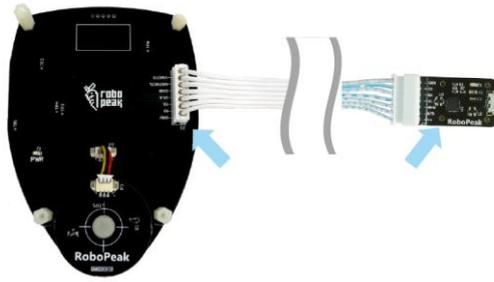


Figura 4.7 – Lidar/adattatore USB.

2. Connettere l'adattatore USB al PC usando il cavo Micro-USB/USB-A (Figura 4.8). Dopo aver completato il collegamento il Lidar inizierà a scannerizzare l'ambiente e si accenderà un LED verde posto sulla parte inferiore del Lidar.



Figura 4.8 – Adattatore USB e cavo Micro-USB.

3. L'adattatore USB converte il segnale UART in un segnale USB usando il chip CP2102. E' necessario installare i driver di tale chip che si possono trovare nell' SDK fornito o scaricati presso il sito ufficiale di Silicon Labs¹. Dopo aver connesso il Lidar al PC (Figura 4.9) è necessario trovare il file "CP210x VCP Windows" e scegliere il corretto sistema operativo (x86 per un OS a 32-bit oppure x64 per un OS a 64-bit).

¹ <http://www.silabs.com/products/interface/usb-bridges/Pages/usb-bridges.aspx>

Lidar e rilevazione gradino

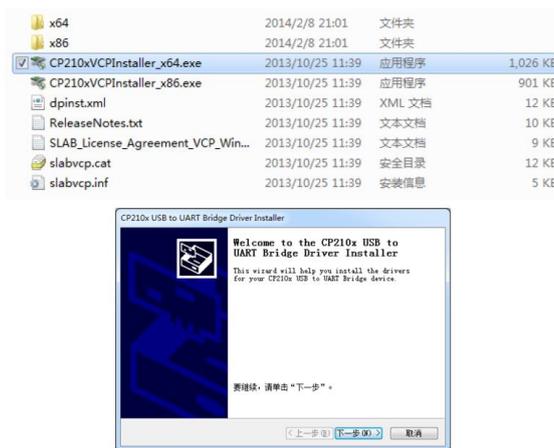


Figura 4.9 – Installazione driver.

Dopo aver installato i driver sarà possibile vedere il Lidar e prendere nota della Porta COM assegnatagli in *Pannello di Controllo* > *Visualizza dispositivi e stampanti* (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Porta COM.

4.3 Collegamento Lidar / Computer – Seconda versione

Il secondo metodo utilizzato per collegare il Lidar al PC prevede l'interposizione tra i due di una scheda Arduino. Tale metodo si è rivelato necessario in quanto lo Speedgoat presente sulla carrozzina non supporta determinate funzioni di Matlab per il controllo del Lidar e la cui esecuzione viene quindi affidata ad Arduino, inoltre il Lidar si interfaccia solo attraverso una porta USB. È quindi necessario introdurre un elemento intermedio che converta i dati del Lidar in un formato leggibile e che possa interfacciarsi con la porta seriale di Speedgoat. La scelta è

Lidar e rilevazione gradino

ricaduta su Arduino, una serie di microcontrollori facili da programmare e relativamente economici. In particolare, si è scelta una scheda Arduino Mega data la necessità di almeno due porte seriali/USB e la maggiore potenza di calcolo. Utilizzando una libreria proprietaria del Lidar è possibile utilizzare Arduino per decodificare i pacchetti dati dello strumento. Dai pacchetti è quindi possibile estrarre le informazioni necessarie (distanza, angolo e qualità di misura) della singola scansione, condizionarle parzialmente per snellire la trasmissione dati ed infine inviarle sulla porta seriale connessa a Speedgoat con un protocollo facilmente interpretabile.

In questo capitolo si studia il collegamento Lidar > Arduino > PC, propedeutico al collegamento definitivo Lidar > Arduino > Speedgoat che verrà studiato nel Capitolo 4.4. Il Lidar è stato connesso al PC nel seguente modo:

1. Connettere un capo del cavo di comunicazione al Lidar.
2. Connettere l'altro capo del cavo di comunicazione alla scheda Arduino Mega 2560 usando dei cavi Jumper, secondo lo schema presentato in Figura 4.11.

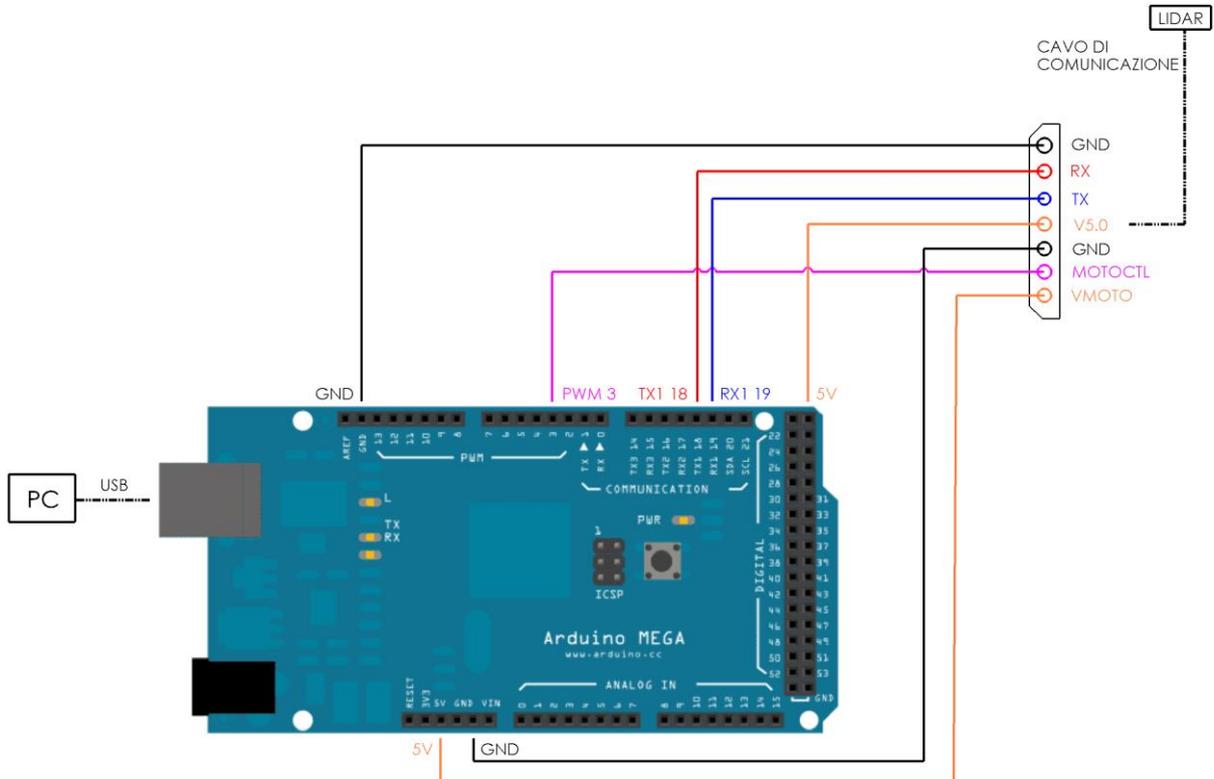


Figura 4.11 – Collegamento Lidar/Arduino/PC.

3. Collegare la scheda Arduino al PC tramite un cavo USB-B/USB-A.

Il risultato finale viene presentato in Figura 4.12. Attraverso tale metodo di collegamento è stato studiato il metodo di acquisizione dati da USB tramite Simulink ed è stato scritto lo script di Matlab che esegue il processamento dei dati e l'extrapolazione delle quote del gradino.

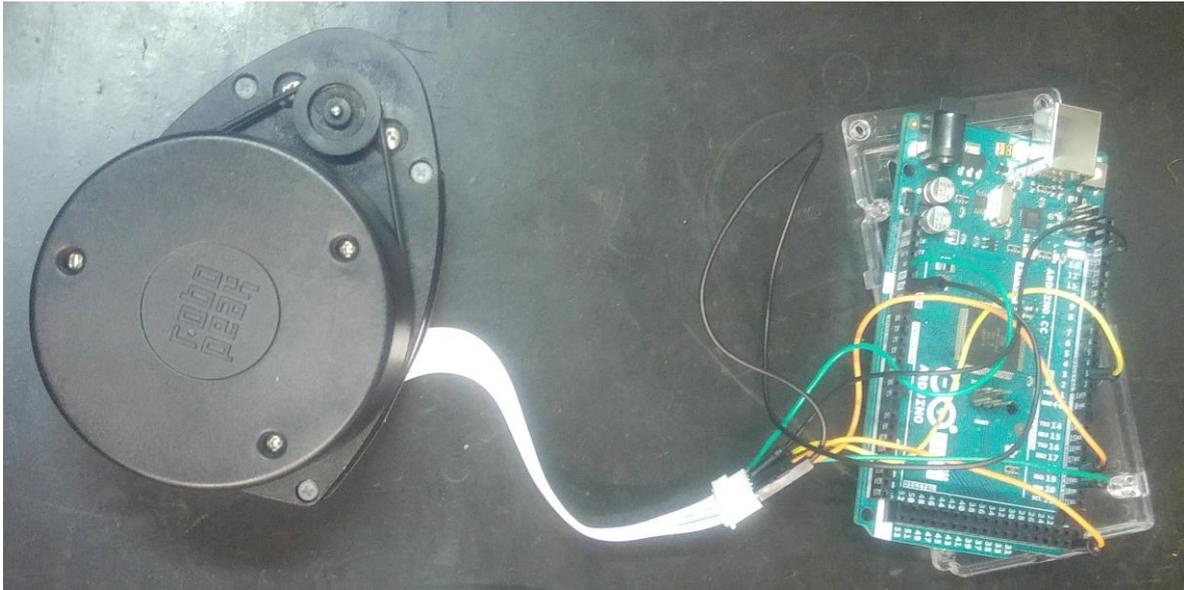


Figura 4.12 – Collegamento Lidar/Arduino.

4.4 Collegamento Lidar / Speedgoat

Il setup definitivo per la raccolta dei dati prevede un collegamento Lidar > Arduino > Speedgoat. La connessione tra Lidar e scheda Arduino tramite cavetti Jumper (vista nel *Capitolo 4.3*) resta invariata. La connessione tra Arduino e Speedgoat avviene nel seguente modo:

1. Collegare Arduino ad una delle porte USB presenti sullo Speedgoat tramite il cavo USB-B/USB-A. Tali porte non sono abilitate a ricevere i dati inviati dal Lidar, ma ne garantiscono l'alimentazione.

Lidar e rilevazione gradino

2. Collegare Arduino alla porta seriale COM1 (di tipologia RS232) presente sullo Speedgoat utilizzando un adattatore TTL/RS232 (MAX3232) posto direttamente sulla porta seriale e collegato alla scheda Arduino tramite cavi Jumper (Figura 4.13).

I collegamenti sullo Speedgoat sono visibili in Figura 4.14.

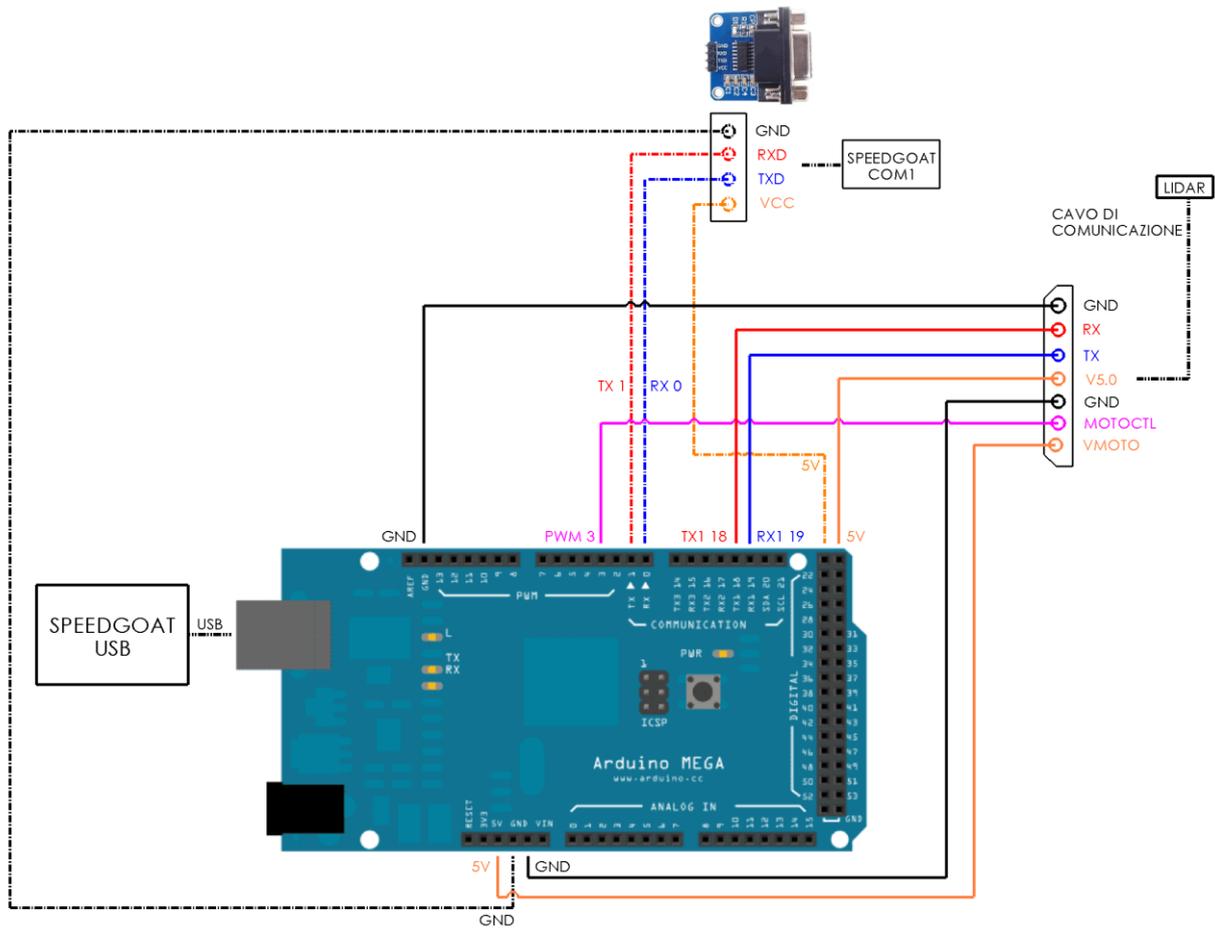


Figura 4.13 – Collegamento Lidar/Arduino/Speedgoat.

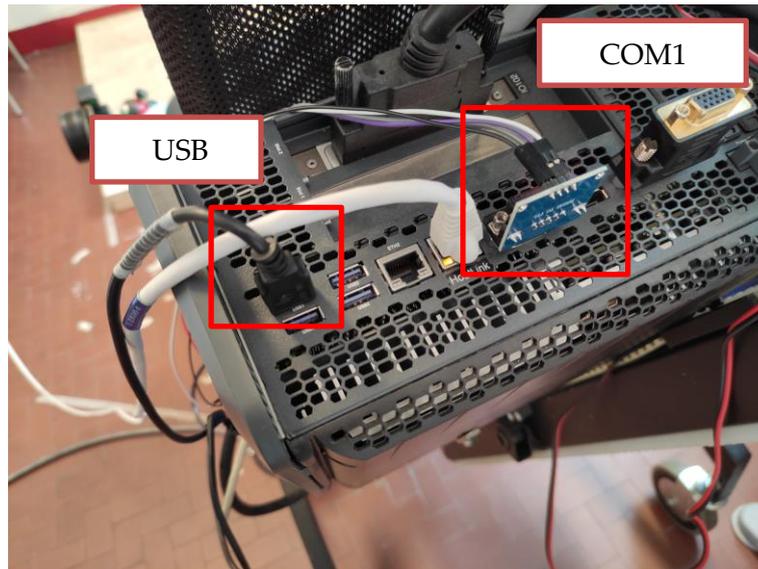


Figura 4.14 – Collegamenti su Speedgoat.

Una volta eseguite le prove di acquisizione dati su PC verrà utilizzato questo setup per replicarle su Speedgoat.

4.5 Simulazione del Lidar – scansione e misurazione gradino in salita

Prima di utilizzare il Lidar ed iniziarne il lavoro di sperimentazione è stato simulato il suo comportamento attraverso l'uso di Matlab R2016a. E' stato creato un algoritmo in grado di simulare la raccolta dei punti del gradino in coordinate polari effettuata dal Lidar tenendo conto delle incertezze di misura; inoltre è stato ideato il metodo utile a ricavare le misure principali del gradino a partire dalla nuvola di punti catturata. L'algoritmo per l'estrapolazione delle quote del gradino ideato in questa simulazione teorica è stato in particolare molto utile in quanto è stato una base di partenza che ha necessitato poi di poche modifiche per essere adattata allo script di riconoscimento del gradino usato nelle prove pratiche con il Lidar.

Lo scenario introdotto nella simulazione è il seguente (Figura 4.15): il Lidar è stato posto al centro di un sistema di coordinate cartesiane e polari, ad un'altezza dal terreno pari ad h_{lidar} . Sotto di esso è presente il gradino che si intende scannerizzare e di cui si vogliono ricavare le misure fondamentali:

1. h : altezza del gradino;

Lidar e rilevazione gradino

2. d : distanza del lidar dal gradino;
3. e : spazio disponibile dopo il gradino.

Lo script di Matlab (Figura 4.16) crea un gradino di dimensioni scelte a priori e posiziona il Lidar, il tutto usando le coordinate cartesiane. Vengono poi calcolati i punti rilevati dal Lidar in coordinate polari e a questi vengono aggiunte le incertezze radiali e angolari (da scheda tecnica). Vengono quindi ricalcolati i punti in coordinate cartesiane, questa volta influenzati dagli errori di incertezza introdotti in precedenza, questo permette di ottenere una simulazione dei punti del profilo del gradino catturati nella realtà dal Lidar. Grazie ai punti ottenuti vengono infine calcolate le grandezze principali del gradino soggette agli errori di misura del Lidar.

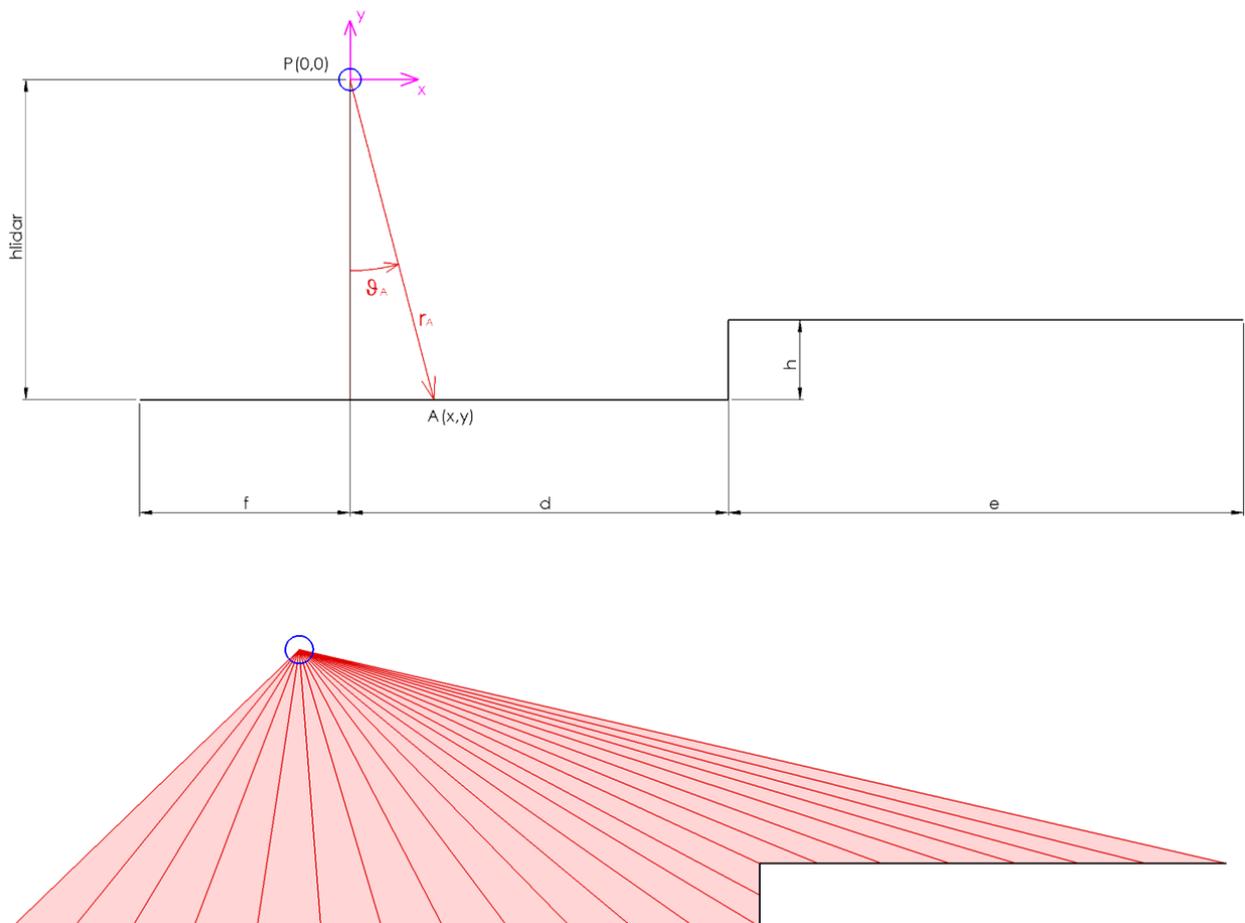


Figura 4.15 – Scenario della simulazione Lidar.

Lidar e rilevazione gradino

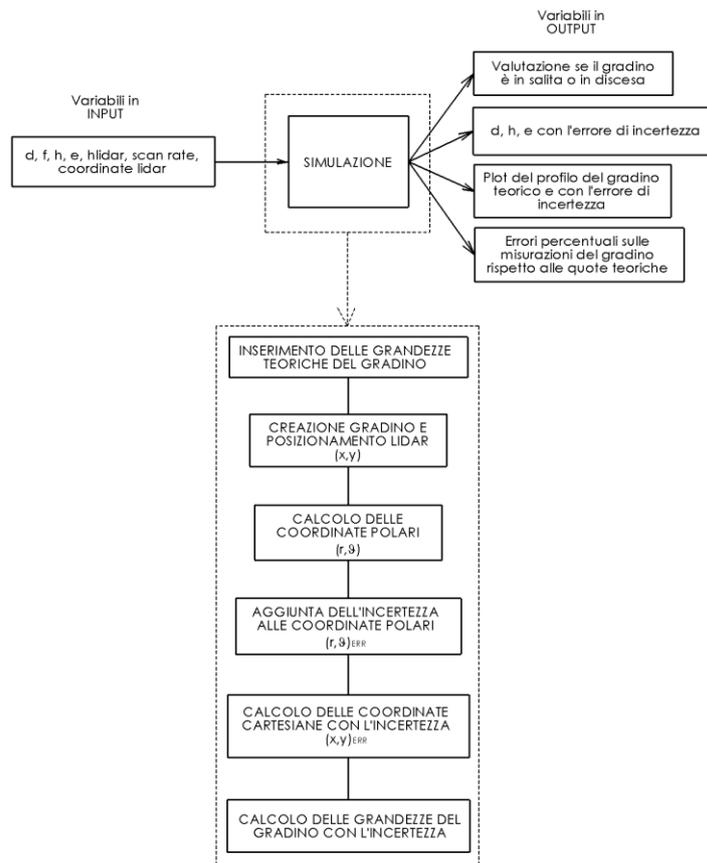


Figura 4.16 – Algoritmo della simulazione.

L'ultimo punto della simulazione, ovvero il calcolo delle grandezze geometriche del gradino, merita un approfondimento sul metodo utilizzato per ricavarne le quote.

1. Facendo riferimento alla Figura 4.17. L'algoritmo scorre da sinistra a destra tutti i punti del gradino (in figura per motivi di chiarezza il gradino è rappresentato con dei segmenti perfetti, nella simulazione a questo punto il gradino è costituito da un notevole numero di punti che si discostano in modo casuale da tale linea teorica) e cerca il primo punto la cui coordinata "y" si discosta dalla coordinata "lidar" di un valore pari al "limite superiore"; tale punto viene definito "mark1" e la sua coordinata "x" rispetto al Lidar rappresenta la distanza del Lidar stesso dal gradino (d). Il valore della variabile "limite superiore" deve essere tale da essere chiaramente fuori dalla banda di incertezza dei punti del gradino, in modo tale che la rilevazione di tale punto indichi la presenza certa di un ostacolo verticale, ma non deve essere troppo

Lidar e rilevazione gradino

grande da portare a non rilevare gradini di dimensioni piccole. La scelta di tale variabile verrà affrontata nel *Capitolo 4.6* attraverso le prove pratiche.

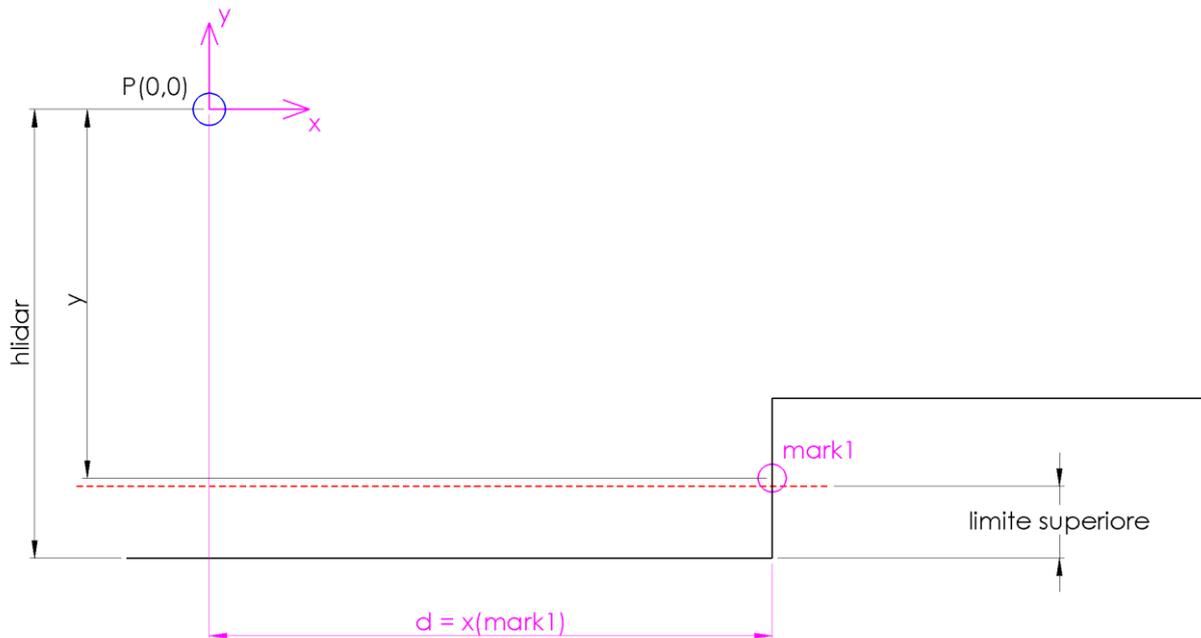


Figura 4.17 – Calcolo distanza dal gradino (d).

2. Facendo riferimento alla Figura 4.18. L'algoritmo parte da " $mark1$ " e scorre verso destra i punti del gradino fino a quando non ne trova uno che abbia una coordinata " x " che si discosta dalla coordinata " x " del punto " $mark1$ " di un valore pari alla variabile " $limite destro$ ". Tale punto viene definito " $mark2$ " e la differenza tra l'altezza del Lidar (h_{lidar}) e la sua coordinata " y " permette di ricavare l'altezza del gradino (h). La scelta della variabile " $limite destro$ " deve essere tale da uscire dalla banda di incertezza del segmento verticale del gradino, ma in sostanza è molto più semplice rispetto alla scelta di quella precedente in quanto non ci sono limitazioni sulla sua grandezza; si è scelto un ragionevole valore di "115 mm".

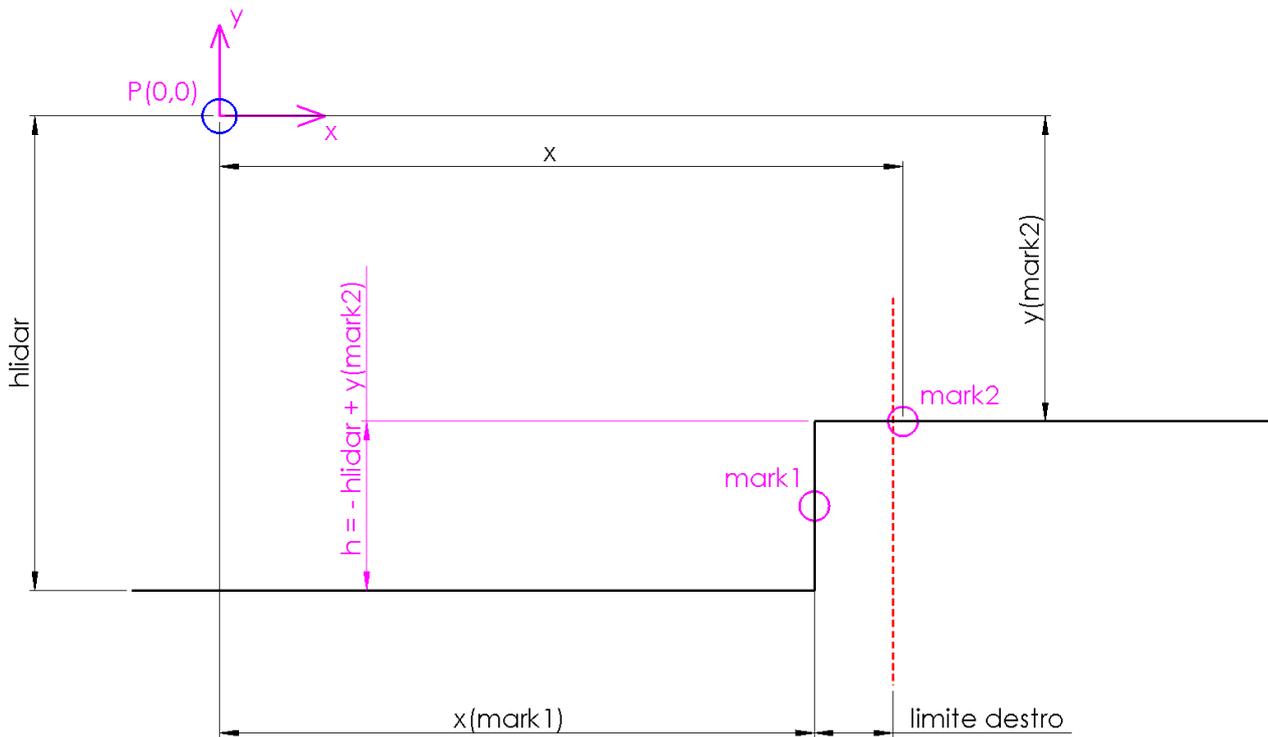


Figura 4.18 – Calcolo altezza del gradino (h).

3. Facendo riferimento alla Figura 4.19. L'algoritmo scorre verso destra i punti a partire da "mark2" e si ferma nel momento in cui trova un punto la cui coordinata "y" esce da una banda definita dalla variabile "limite piano". Tale punto viene chiamato "mark3" e rappresenta l'ultimo punto dello spazio disponibile dopo il gradino (nella realtà potrebbe essere un muro o un altro tipo di ostacolo). Sottraendo la sua coordinata "x" alla distanza "d" si ottiene lo spazio che può accogliere la carrozzina (e) dopo la sequenza di salita. Il valore di "limite piano" deve essere abbastanza grande da escludere la banda di incertezza ed eventuali piccole variazioni di pendenza del gradino, ma non troppo grande da generare la possibilità di non rilevare possibili piccoli ostacoli. La scelta di tale variabile verrà affrontata nel *Capitolo 4.6* attraverso le prove pratiche.

Lidar e rilevazione gradino

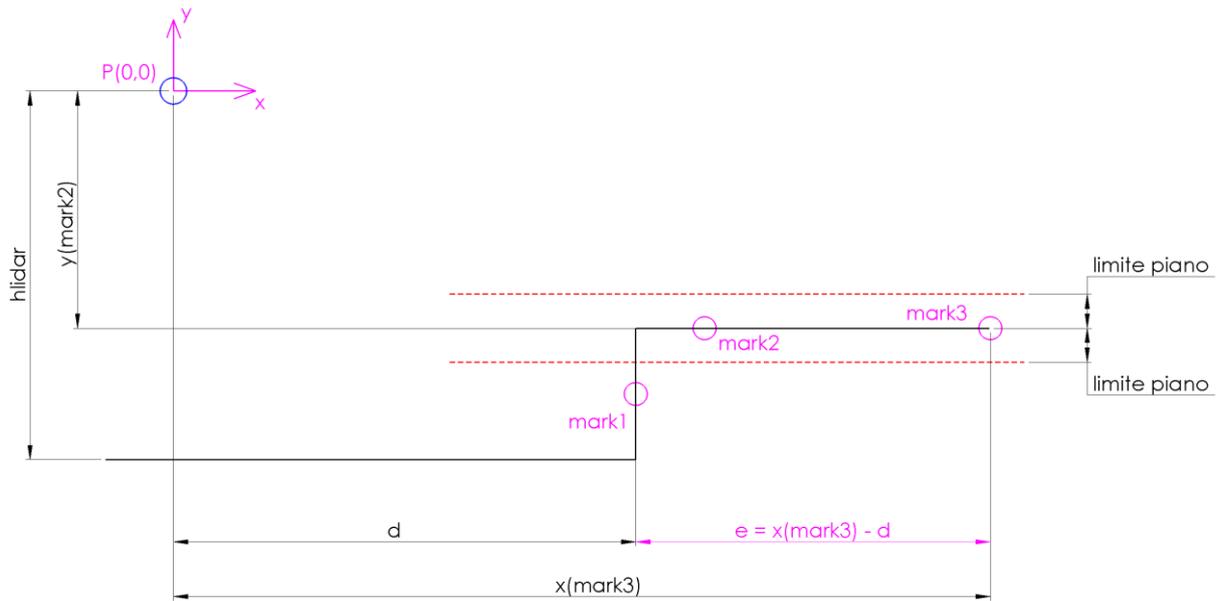


Figura 4.19 – Calcolo dello spazio successivo al gradino (e).

Di seguito viene presentato un esempio prodotto da tale simulazione:

Esempio:

Dati in input:

$d = 1000;$ (mm)

$f = 500;$ (mm)

$h = 68;$ (mm)

$e = 2000;$ (mm)

$h_{lidar} = 500;$ (mm) Altezza del Lidar

$scan\ rate = 5;$ (Hz) Frequenza di campionamento del Lidar

L'algoritmo manda in output i grafici in Figura 4.20 e 4.21.

Lidar e rilevazione gradino

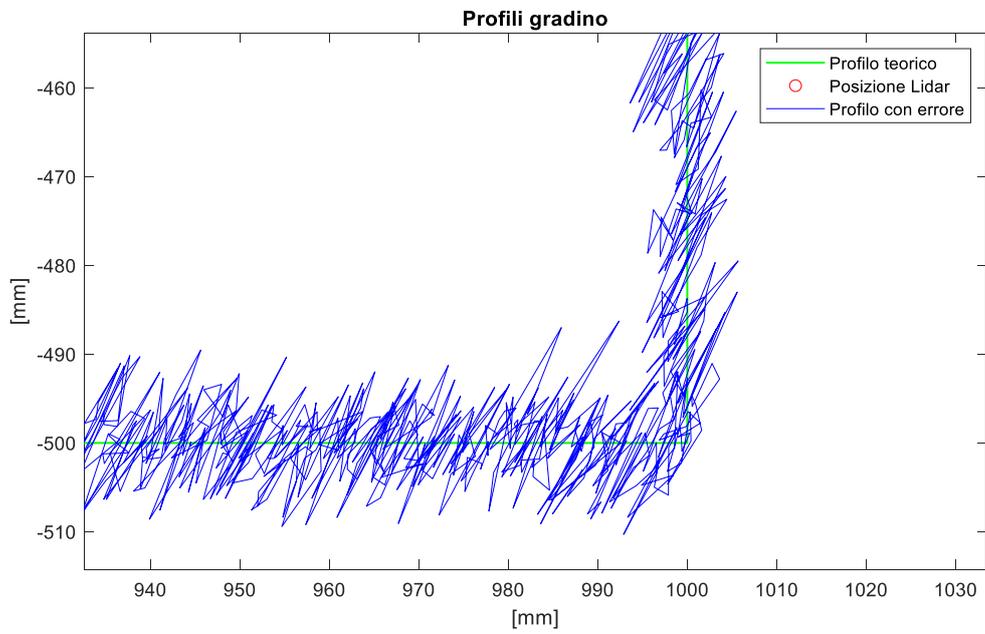
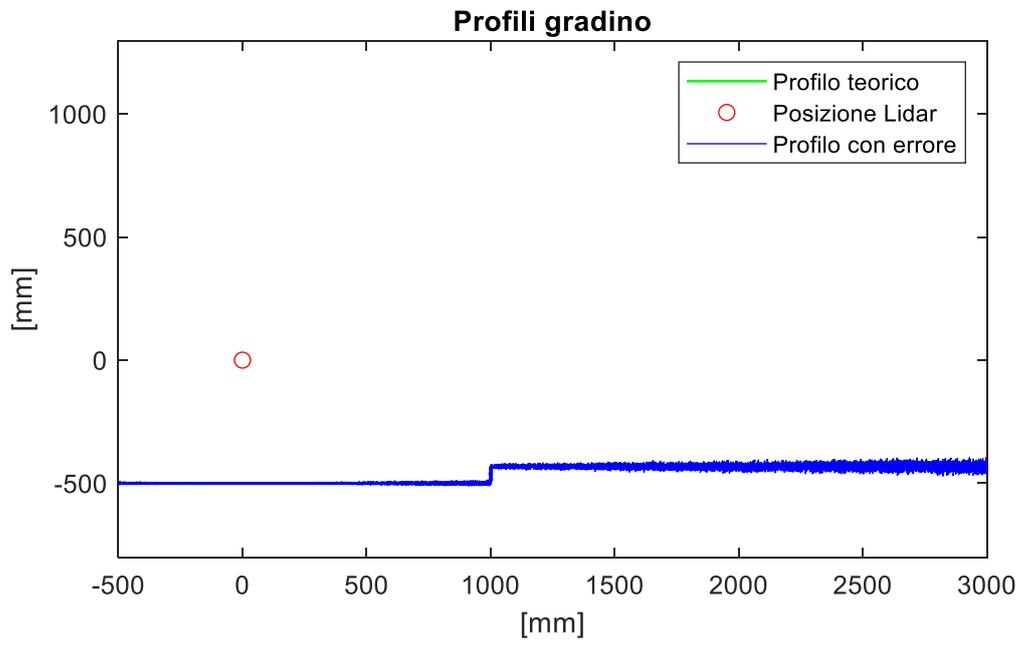
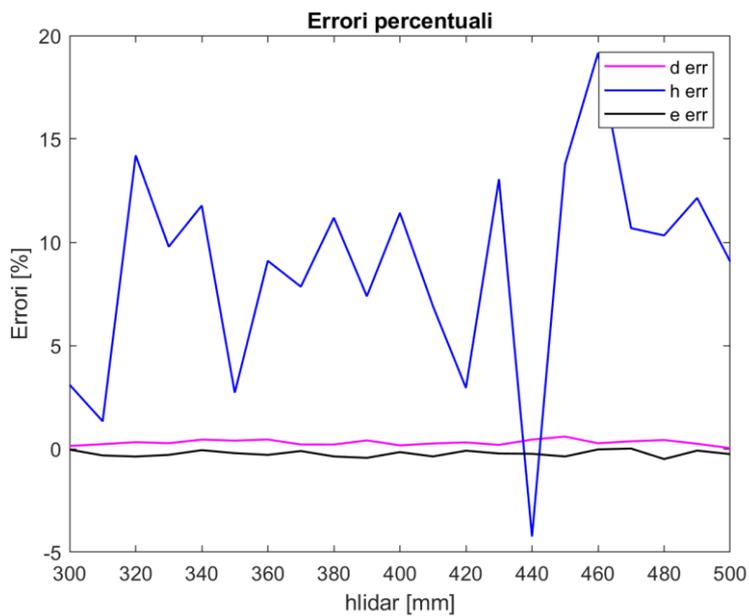
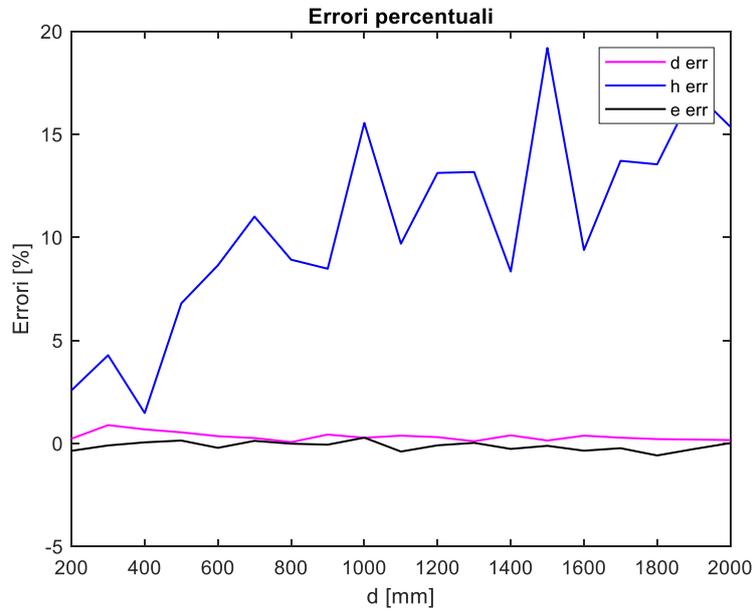


Figura 4.20 – Gradino teorico e rilevato dal Lidar – Plot intero (alto), dettaglio (basso)

Lidar e rilevazione gradino

Lo script restituisce una rappresentazione (Figura 4.20) del profilo teorico e del profilo rilevato dal lidar. Si nota come all'aumentare della distanza dal Lidar aumentino gli errori sulla rilevazione del gradino in quanto la precisione del Lidar peggiora con l'aumentare della distanza.



Lidar e rilevazione gradino

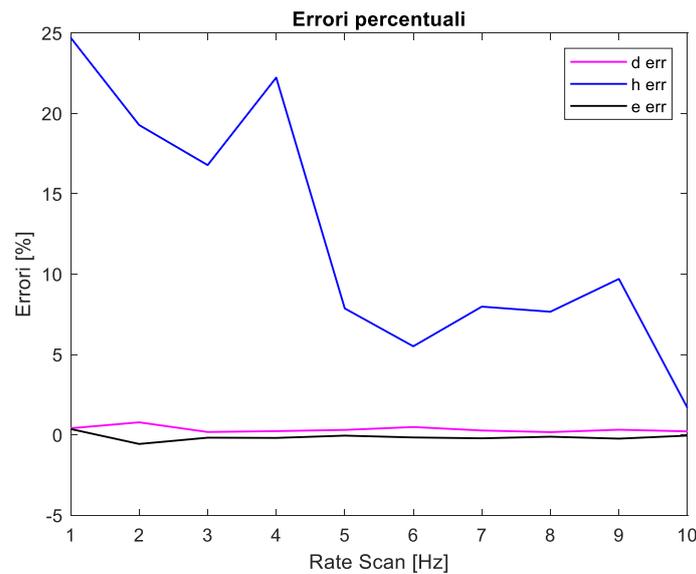


Figura 4.21 – Calcolo degli errori percentuali tra misure teoriche e rilevate. (a) Al variare della distanza del Lidar dal gradino. (b) Al variare dell'altezza del Lidar. (c) Al variare della frequenza di campionamento del Lidar.

Lo script inoltre crea dei grafici (Figura 4.21) che visualizzano l'andamento degli errori relativi tra quote teoriche e rilevate al variare di diversi parametri, che possono essere: d , h_{lidar} e $scan\ rate$ (frequenza di campionamento del Lidar).

$$errore\ percentuale = \frac{|quota\ rilevata - quota\ teorica|}{quota\ teorica} 100$$

Si nota (Figura 4.21) come la variabile più soggetta ad errore sia l'altezza del gradino ($h\ err$) il cui errore di misura cala di molto con l'avvicinarsi del Lidar al gradino e con l'aumento della frequenza di scansione (la quale media maggiormente gli errori di misura introdotti); non si hanno grosse variazioni invece al variare dell'altezza del Lidar. Questa prova può darci indicazioni sul fatto che, quando si andranno ad effettuare la scansione di precisione (introdotta nel *Capitolo 2*), essa dovrà essere probabilmente eseguita al di sotto di 1 metro di distanza dal gradino per contenere gli errori; inoltre dice che l'altezza a cui verrà montato il Lidar non influirà molto, quindi si cercherà di montarlo dove più comodo sul telaio della carrozzina; infine dice che una frequenza di scansione di 5.5 Hz è un giusto compromesso tra precisione e quantità di dati.

4.6 Prove sperimentali di scansione e misurazione gradino in salita

Terminata la fase di simulazioni teoriche si procede con l'esecuzione di prove reali con il Lidar. Il setup utilizzato è quello costituito da Lidar > Arduino > PC descritto nel *Capitolo 4.3*. È stato per prima cosa progettato un modello con Simulink R2016a chiamato "Ricevitore_dati.slx" (Figura 4.22.1) che permettesse di ricevere i dati inviati dal Lidar attraverso la porta USB e salvarli sul Workspace di Matlab.

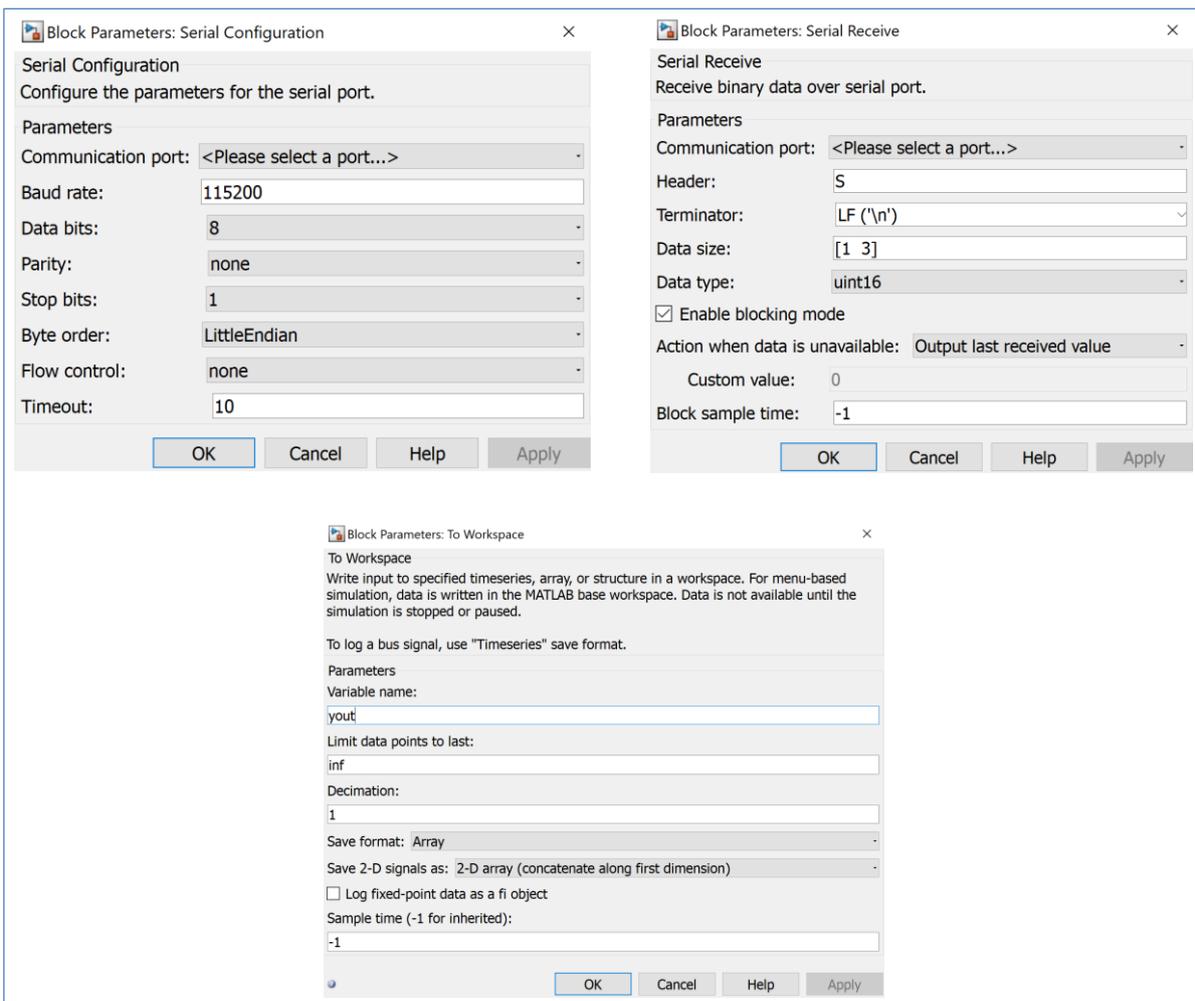
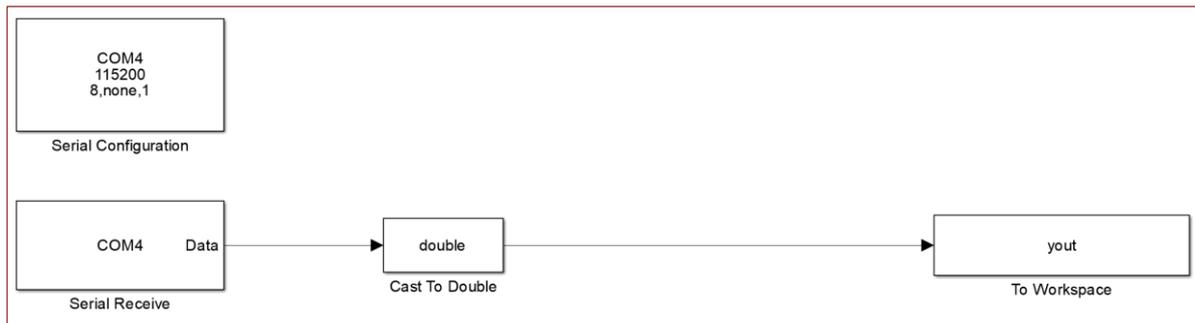


Figura 4.22.1 – Ricevitore dati

Tale modello Simulink utilizza i blocchi:

1. *Serial Configuration*: all'interno di questo blocco si seleziona dal menu a tendina la porta COM alla quale è connesso il cavo USB, visualizzabile nella sezione "Gestione Dispositivi e stampanti" di Windows. Vengono inoltre impostati i parametri di trasferimento dei bit come indicato in Figura 4.22 (tali valori sono le impostazioni di un protocollo personalizzato fatto ad hoc per avere una sincronizzazione semplice).

Serial Receive: tale blocco riceve dalla porta COM selezionata le sequenze di bit provenienti da Arduino; ogni sequenza di bit è un messaggio che descrive la posizione di un punto rilevato. In particolare, una sequenza di bit è costituita da un *Header* (la lettera "S") che segnala l'inizio del messaggio e da 3 numeri interi a 16 bit positivi (uint16: $2^{16} = 65536$) che rappresentano multipli della distanza (mm), dell'angolo ($^{\circ}$) e la qualità del raggio riflesso del punto rilevato (Figura 4.22.2). Il blocco organizza i 3 numeri rilevati in un vettore 1x3. La qualità del raggio riflesso è massima attorno a 10, decade se scende molto al di sotto o al di sopra di questo valore (es: 1 oppure 30).

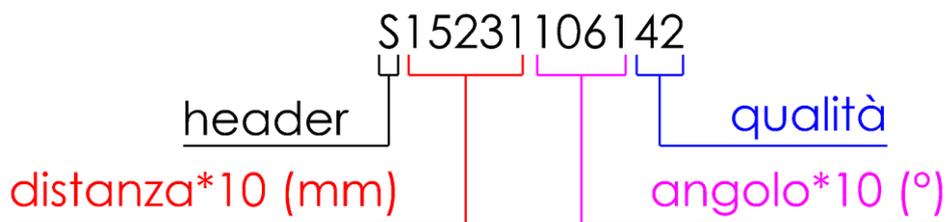


Figura 4.22.2 – Struttura di un messaggio, rappresenta un punto scansionato.

2. *To Workspace*: Riceve il vettore riga 1x3 contenente divisi in 3 colonne la distanza, l'angolo e la qualità della misura e lo invia al workspace con la variabile "yout".

Per eseguire la scansione di un gradino basta simulare questo modello per 5 secondi e con un "time step" di 0.001 (lo stesso che verrà usato nella macchina a stati della carrozzina) per ottenere 5000 punti, ritenuti sufficienti a garantire una buona rilevazione. A fine simulazione si avrà sul Workspace una matrice 5000x3 contenente le coordinate di tutti i punti rilevati.

Lidar e rilevazione gradino

Il setup attuale non consente di catturare una nuvola di punti pulita, ma si riceve un'immagine molto sporca che va di conseguenza processata prima di passarla all'algoritmo che ricava le grandezze geometriche del gradino.

È stato quindi realizzato uno script su Matlab R2016a chiamato "*Manipolazione_dati.m*" che esegue entrambi i compiti; di seguito viene presentato un esempio di scansione di una pedana, processing dei dati e calcolo delle quote del gradino, con la spiegazione di tutti i passaggi presenti all'interno dello script.

Esempio e spiegazione:

1. Per prima cosa il Lidar viene posizionato su un cavalletto (Figura 4.23.1) e collegato al PC tramite il setup visto nel *Capitolo 4.3*. Il cavalletto viene disposto davanti alla pedana di legno usata per la prova la quale possiede le seguenti misure geometriche:

- I. Altezza (h) = 68 mm
- II. Lunghezza (e) = 1100 mm

Il Lidar viene posizionato nel seguente modo:

- I. Distanza dalla pedana (d) = 500 mm
- II. Altezza cavalletto (h_{lidar}) = 525 mm

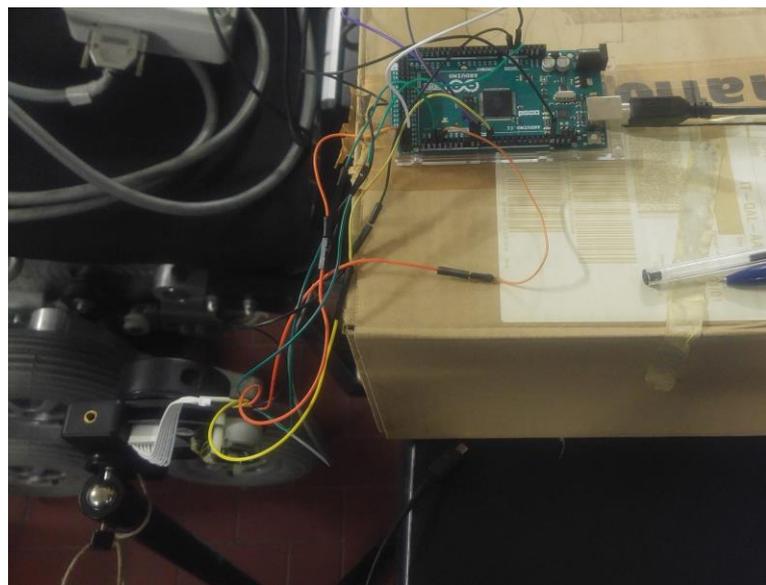


Figura 4.23.1 – Setup esperimento.

Lidar e rilevazione gradino

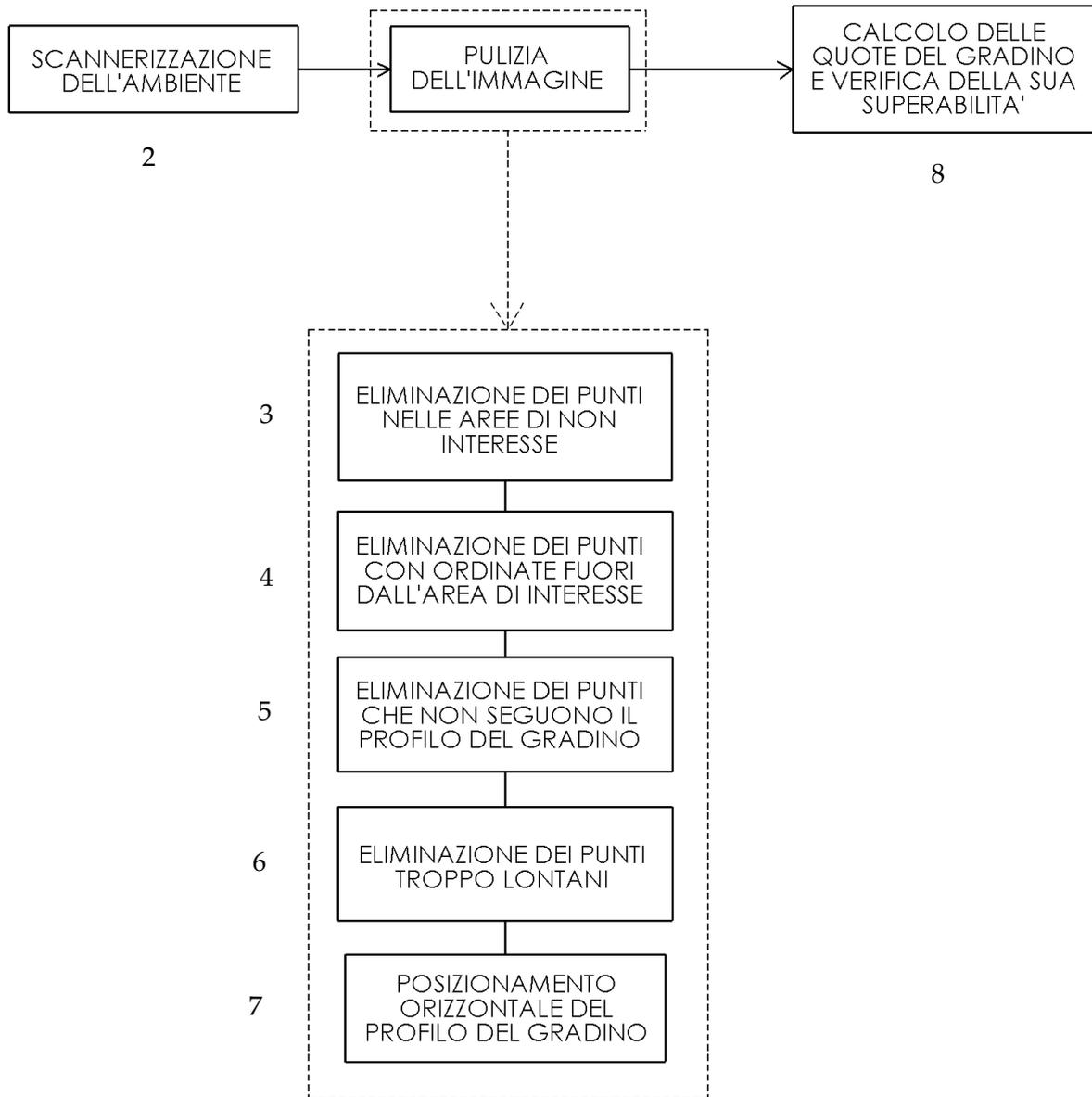


Figura 4.23.2 – Sequenza di acquisizione, pulizia immagine e misura del gradino.

L'algoritmo di pulizia dell'immagine scansionata opera secondo lo schema presentato in *Figura 4.23.2*. I numeri posti di fianco alle varie fasi rimandano ai punti di questo elenco puntato per i dettagli relativi alle fasi.

Lidar e rilevazione gradino

2. Si apre lo script *"Manipolazione_dati.m"* e lo si esegue. Il primo passaggio che esso compie è quello di avviare la simulazione del file *"Ricevitore_dati.slx"* visto in precedenza, scansionando così per 5 secondi la pedana. Dalla matrice di 5000 punti vengono estrapolati 3 vettori colonna contenenti distanza (mm), angolo ($^{\circ}$) e qualità dei punti (in coordinate polari, secondo il sistema di riferimento presentato nel *Capitolo 4.1* e visibile in *Figura 4.25*); i punti vengono rappresentati in un grafico (*Figura 4.24*). Si notano il pavimento, la pedana posta di fronte al Lidar, il muro posto dietro al Lidar ed il soffitto. La misura è molto sporca e va processata prima di ricavare le quote del gradino. Lo scopo è quello di ottenere il solo profilo del gradino.

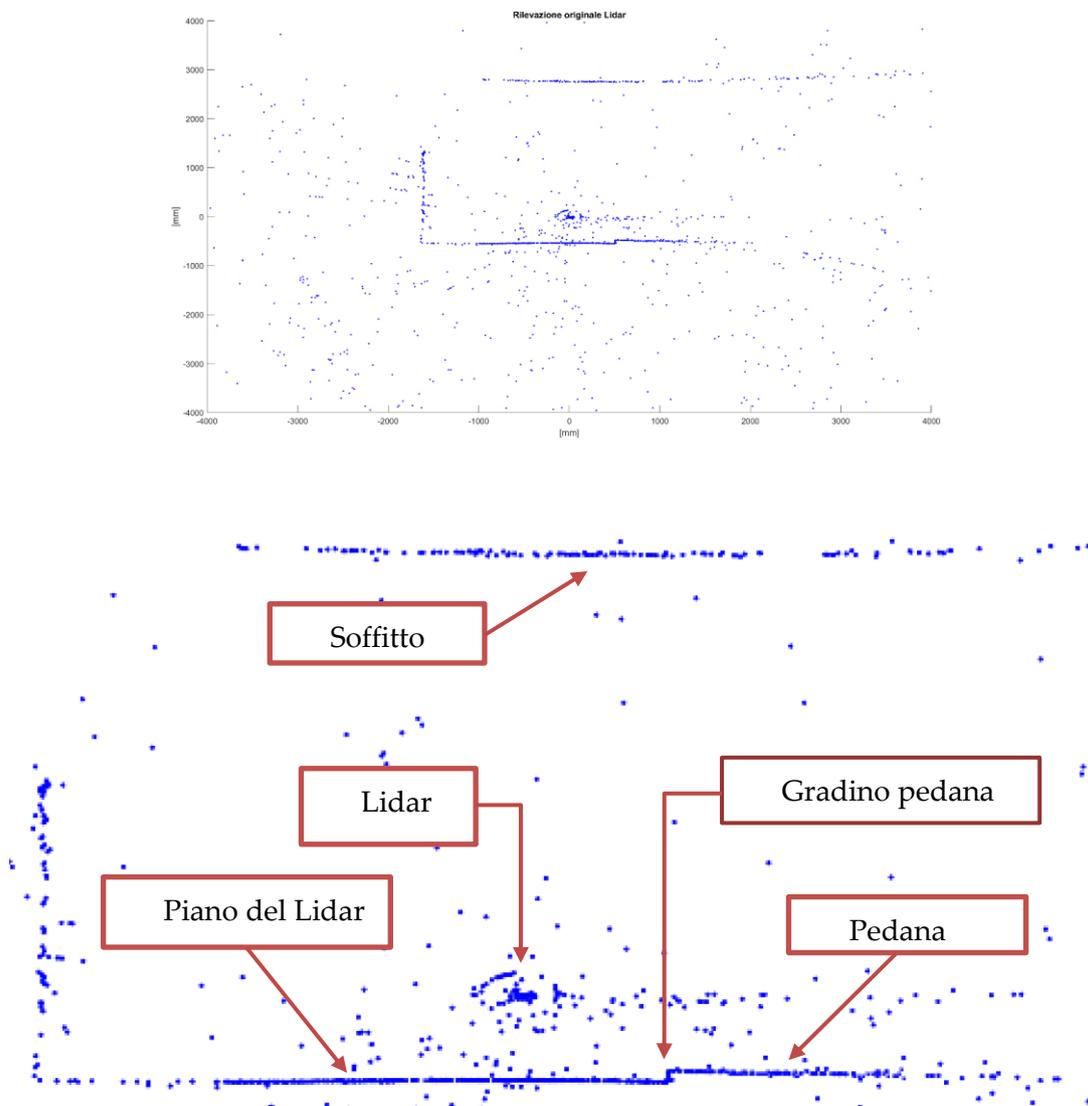


Figura 4.24 – Rilevazione originale del Lidar (sopra), dettaglio (sotto).

Lidar e rilevazione gradino

3. Vengono ora eliminati tutti i punti che si trovano al di fuori di un'area definita di interesse (270° - 355°), cioè la sola porzione di spazio in cui il gradino può esistere (Figura 4.25). Il valore di 355° è stato scelto in modo tale che non causi problemi a rilevare distanze dal Lidar fino a 4 metri, anche con gradini alti 240 mm.

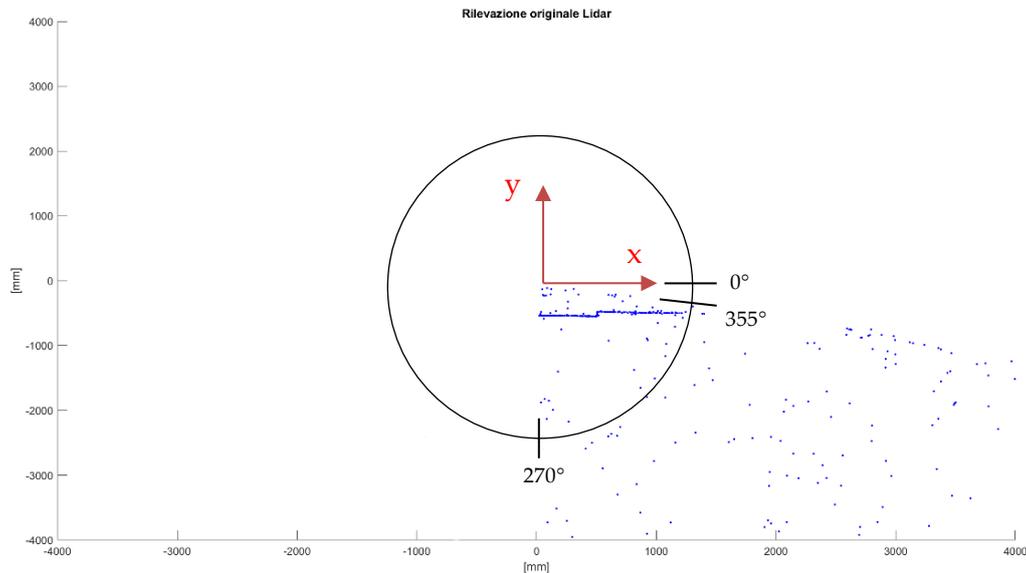


Figura 4.25 – Prima correzione della scansione e sistema di riferimento del Lidar.

4. Vengono eliminati tutti i punti che si trovano sotto al piano della stanza e ad un'altezza troppo grande per un gradino (Figura 4.26). Per eliminare i punti al di sotto del piano si cancellano tutti i punti al di sotto di 150 mm a partire dall'ordinata rappresentate l'altezza del Lidar ($hlidar$, nota a priori dal montaggio); per eliminare i punti troppo in alto si eliminano i punti che vanno oltre la somma tra l'altezza massima del gradino superabile dalla carrozzina ($h_{max} = 240$ mm) ed una soglia di altri 150 mm di sicurezza a partire sempre dall'ordinata $hlidar$. La soglia di sicurezza è stata inserita per non rischiare di cancellare porzioni del profilo del gradino.

Lidar e rilevazione gradino

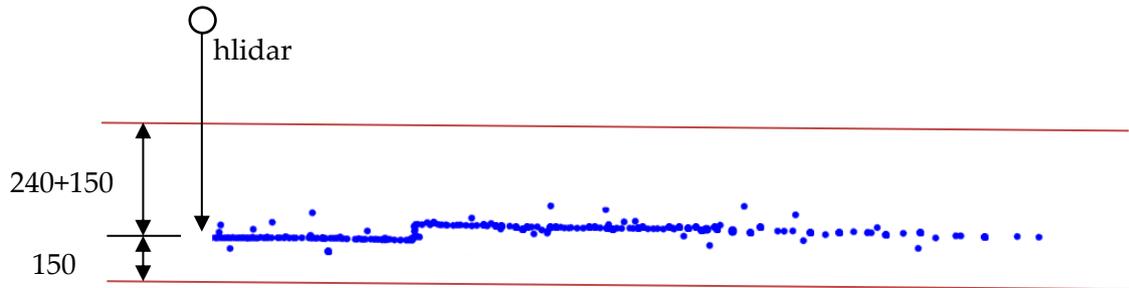
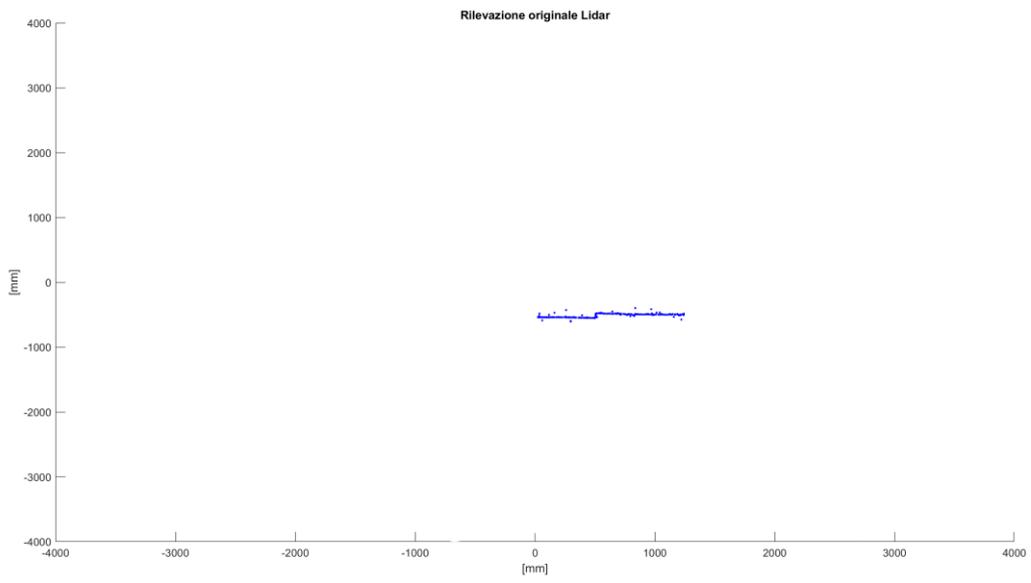


Figura 4.26 – Seconda correzione della scansione (sopra), dettaglio (sotto).

5. Per eliminare gli ultimi punti rimasti che non appartengono al profilo del gradino si utilizza la "media mobile". L'algoritmo scorre i punti rimasti e per ognuno di questi va a considerare i 3 punti immediatamente alla sua sinistra ed i 3 punti alla sua destra. Dei 7 punti in totale che si hanno viene calcolata l'ordinata media e confrontata con l'ordinata del punto centrale. Se il punto centrale ha un'ordinata che si discosta di più di 10 mm da quella media il punto viene eliminato. Il processo viene ripetuto per tutti i punti andando di volta in volta ad eliminare i punti che escono dai criteri scelti. Tutto questo viene eseguito 2 volte, per pulire meglio i dati. Il risultato è il profilo del gradino finalmente ripulito (Figura 4.27). Tali modalità di calcolo della media mobile (su 7 punti, con soglia a 10 mm ed esecuzione ripetuta 2 volte) sono state scelte a seguito di numerose prove; tale configurazione permette di ottenere ottimi risultati in modo consistente.

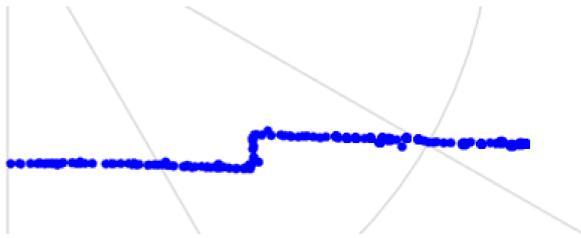


Figura 4.27 – Terza correzione della scansione - dettaglio

6. Eseguendo diverse prove si è notato che spesso restano dei punti molto distanti dal Lidar la cui misurazione è molto imprecisa e può causare problemi, per questo l'algoritmo analizza quali sono le distanze in coordinate polari dei punti rimasti, seleziona i punti più distanti (dal 99% in su del valore massimo di distanza rilevata) e li elimina.
7. Prima di analizzare le quote del gradino un ultimo passaggio consiste in un'eventuale rotazione del profilo del gradino in modo tale da renderlo perfettamente orizzontale (Figura 4.28). Questo è un passaggio importante in quanto l'orizzontalità del gradino è importante per far sì che le quote misurate siano

corrette. La rotazione avviene prendendo due punti che si trovano nel piano successivo al Lidar ad un angolo rispettivamente di 270° e 285° , calcolando il coefficiente angolare della retta che li unisce e sottraendone il valore all'angolo di tutti i punti del profilo. Questo causa una rotazione di tutto il profilo attorno all'origine del sistema di coordinate, ottenendo l'orizzontalità del profilo. Il valore di 285° non causa problemi in quanto non si troverà mai sul punto del gradino quando il Lidar sarà posizionato sulla carrozzina. Tale sistema è utile soprattutto in caso di pendenze in diretta prossimità del gradino; nelle prove in laboratorio, essendo il pavimento orizzontale, questa parte dell'algoritmo di fatto interviene in maniera impercettibile, risultando più utile in scenari esterni.

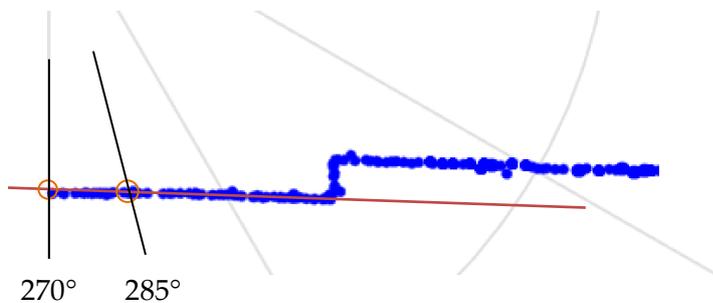


Figura 4.28 – Inclinazione profilo gradino - dettaglio

8. Lo script ricava infine le quote geometriche del gradino, usando l'algoritmo descritto nel *Capitolo 4.5*. Eseguendo un considerevole numero di prove sono stati scelti i parametri descritti in tale capitolo:

- I. Limite superiore = 15 mm
- II. Limite destro = 115 mm
- III. Limite piano = $h * 1.2$ mm

In particolare, il valore di "Limite superiore" è abbastanza grande da uscire fuori dal rumore della rilevazione dei punti, ma è abbastanza piccolo da permettere di misurare qualsiasi tipo di gradino.

Lidar e rilevazione gradino

In Figura 4.29 è presente la rilevazione finale del gradino con l'indicazione dei punti "Mark" descritti nel *Capitolo 4.5*.

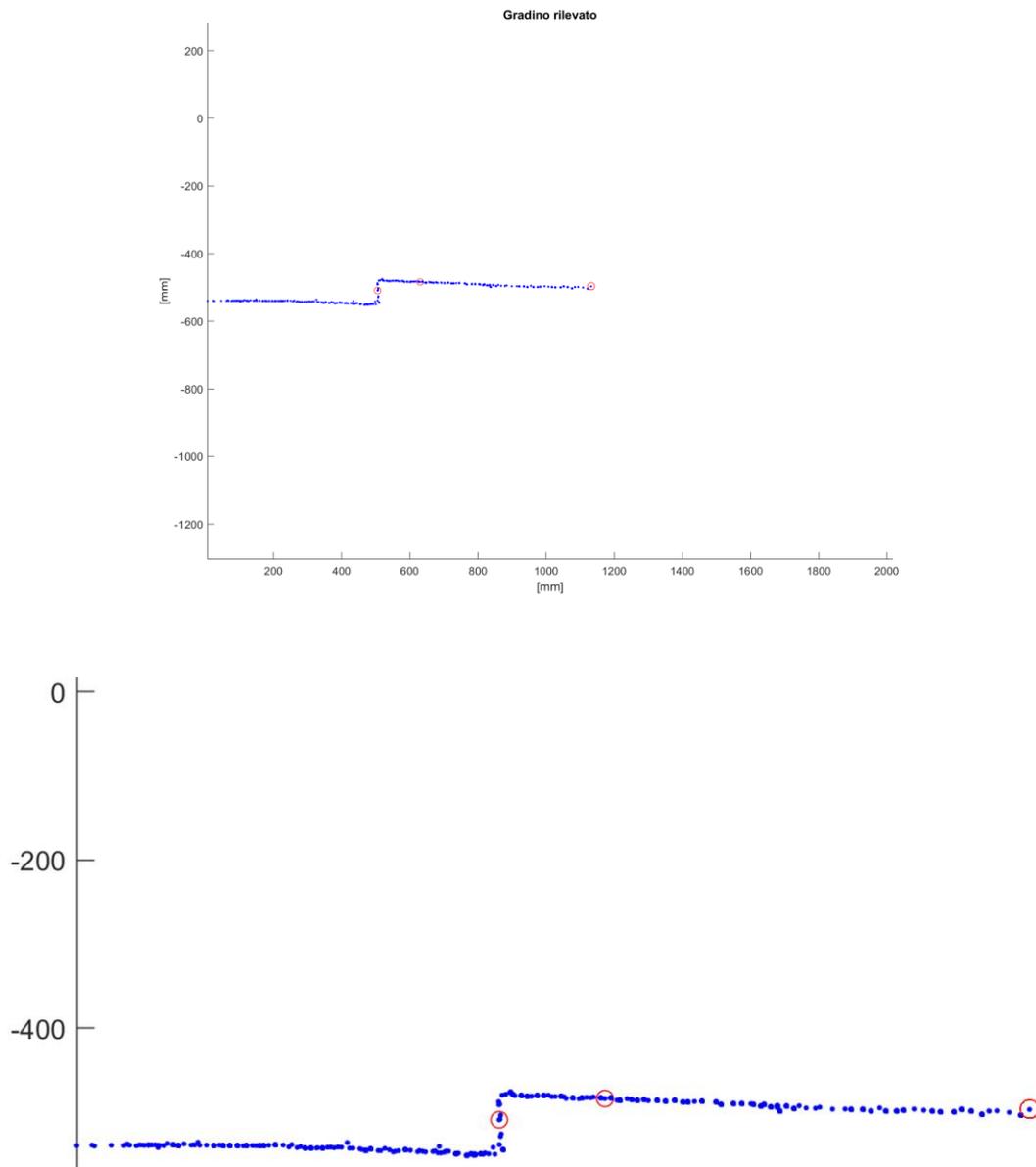


Figura 4.29 – Risultato finale (sopra), dettaglio (sotto).

Oltre alle quote geometriche del gradino (d , h ed e) l'algoritmo manda in output anche una variabile chiamata "condizione". La variabile condizione vale 1 se il gradino è superabile; vale 0 se non è superabile. Le condizioni di superabilità sono dettate dall'ingombro in lunghezza

Lidar e rilevazione gradino

della sedia e dalla sua capacità di superare gradino alti al massimo 240 mm (h_{max}); in particolare si ha che il gradino è superabile (condizione = 1) se:

$$h \leq h_{max} \quad \& \quad e \geq e_{min}$$

con

$$h_{max} = 240 \text{ mm} \quad e_{min} = 1400 \text{ mm}$$

Lo script restituisce quindi i risultati delle quote rilevate del gradino (Tabella 4.1).

| Tabella 5.1 – Quote rilevate dal Lidar nell'esperimento. | | | |
|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Misura (mm) | Dati dell'esperimento (mm) | Quote rilevate dal Lidar (mm) | Errore percentuale |
| d | 500 | 506 | 1.2% |
| h | 68 | 64 | -5.8% |
| e | 1100 | 1154 | 4.9% |
| Condizione (0/1) | 0 | 0 | |

Prima di fare le conclusioni vengono riportate altre prove (Tabella 5.2):

| Tabella 5.2 – Quote rilevate dal Lidar in altre prove. | | | |
|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Misura (mm) | Dati dell'esperimento (mm) | Quote rilevate dal Lidar (mm) | Errore percentuale |
| PROVA 1 | | | |
| d | 1000 | 1064 | 6.4% |
| h | 68 | 79 | 17.6% |
| e | 1100 | 1289 | 17.2% |
| Condizione (0/1) | 0 | 0 | |
| PROVA 2 | | | |
| d | 1500 | 1783 | 18.8% |
| h | 68 | 41 | -39.7% |
| e | 1100 | 1477 | 34.2% |
| Condizione (0/1) | 0 | 1 | |
| PROVA 3 | | | |
| d | 500 | 531 | 6.2% |
| h | 68 | 71 | 4.4% |
| e | 1500 | 1710 | 14% |
| Condizione (0/1) | 1 | 1 | |
| PROVA 4 | | | |
| d | 1000 | 1098 | 9.8% |
| h | 68 | 77 | 13.2% |
| e | 1500 | 1823 | 21.5% |
| Condizione (0/1) | 1 | 1 | |

Lidar e rilevazione gradino

Al termine del *Capitolo 7* sono presenti ulteriori 10 prove di scansione, eseguite con il Lidar fissato alla carrozzina e direttamente collegato allo Speedgoat.

Si è evidenziato che:

1. Nella prova a 1500 mm di distanza si sono ottenuti degli errori su h e su e troppo grandi (questo ha portato a rilevare il gradino come superabile nonostante non lo fosse); mentre l'errore sulla distanza (d), nonostante sia del 18.8%, è ancora accettabile.
2. Nelle due prove a 1000 mm di distanza si sono ottenuti degli errori su h e su e più contenuti, ma ancora troppo grandi per consentire una rilevazione adeguata del gradino; mentre la rilevazione della distanza è risultata buona, ma in entrambi i casi sovrastimata di quasi il 10%.
3. Nelle due prove a 500 mm si sono rilevati eccellenti risultati per tutte le grandezze, risultando quindi una distanza molto buona anche per ottenere una condizione sulla superabilità del gradino affidabile.
4. Le prove eseguite nel *Capitolo 7* a corredo delle sequenze di superamento del gradino hanno evidenziato come previsto gli stessi comportamenti.

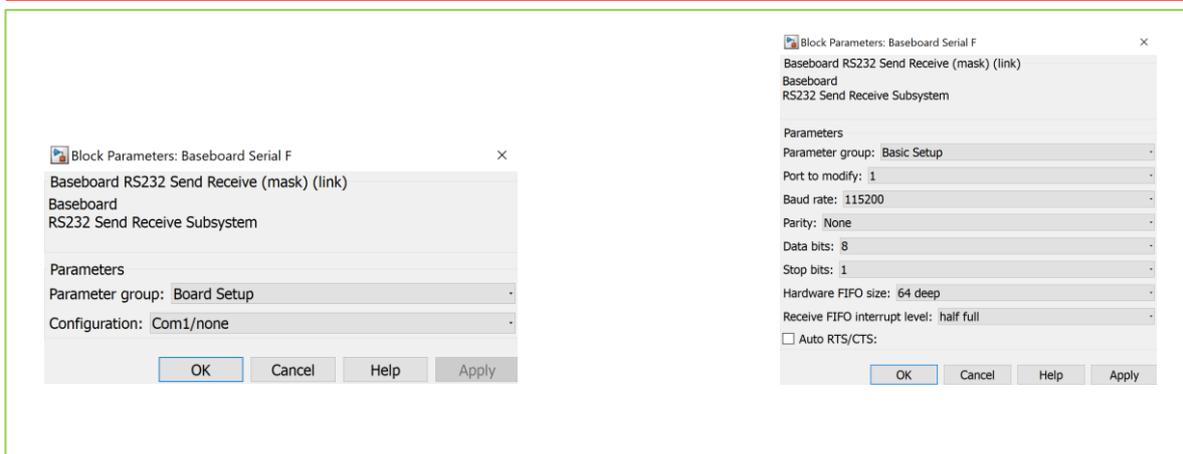
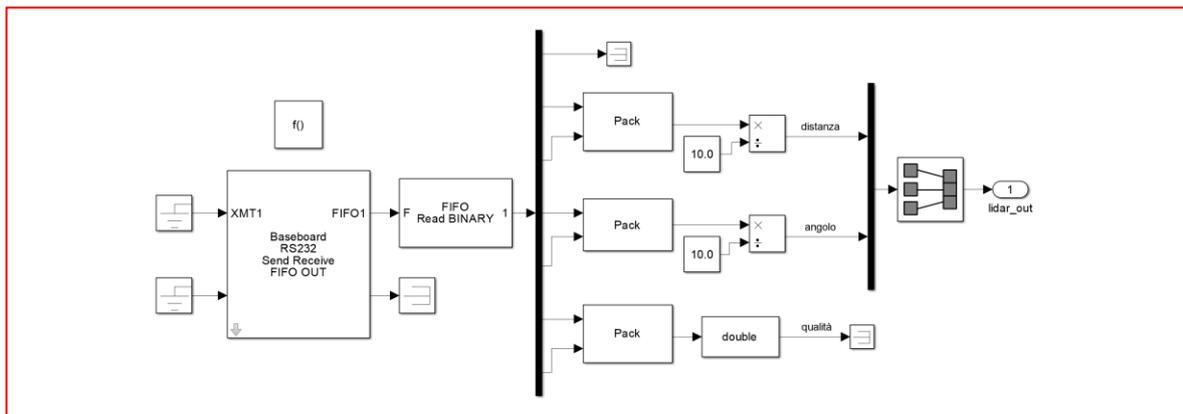
Queste prove hanno portato alle seguenti conclusioni (confermate dalle prove eseguite nel *Capitolo 7*):

1. La misurazione della distanza dal gradino è generalmente buona fino a 1500 mm di distanza dal gradino, con una tendenza alla sovrastima della distanza.
2. La misurazione dell'altezza del gradino è ottima al di sotto degli 800 mm di distanza, poco affidabile oltre.
3. La misurazione dello spazio successivo al gradino è buona al di sotto del metro, poco affidabile oltre. Presenta notevoli sovrastime nel caso in cui (come nelle prove del *Capitolo 7*) la pedana sia molto lunga. Questa tendenza alla sovrastima delle distanze è stata valutata intrinseca del sistema Lidar in utilizzo; potrebbe essere corretta con dei fattori correttivi o, meglio, sfruttando il setup a doppio Lidar che dovrà essere implementato in futuro, utilizzandolo per migliorare le rilevazioni, ottenendo dati più puliti e precisi.

Da tali conclusioni è stata definita meglio la sequenza automatica introdotta nel *Capitolo 2* che permette di discriminare tra quando è necessaria una sola scansione per avviare la sequenza di salita gradino oppure quando è necessaria una prima scansione grossolana, un avvicinamento ed una seconda scansione di precisione. Nel prossimo capitolo verrà affrontato questo ultimo tema.

4.7 Scansione e rilevazione del gradino con Speedgoat e sequenza logica

Una volta completate le prove eseguite dal PC si è passati al controllore Speedgoat, utilizzando il setup descritto nel *Capitolo 4.4*. Per avviare la carrozzina si utilizzino le istruzioni presenti nel *Capitolo 7.1*. Per eseguire le scansioni passando per lo Speedgoat è stato necessario per prima cosa modificare il modello Simulink “*Ricevitore_dati.slx*” visto nel *Capitolo 4.6* per far sì che il controllore Speedgoat ricevesse i dati inviati dal Lidar attraverso la porta seriale di tipo RS232 chiamata COM1. Il nuovo modello è in Figura 4.30.1.



Lidar e rilevazione gradino

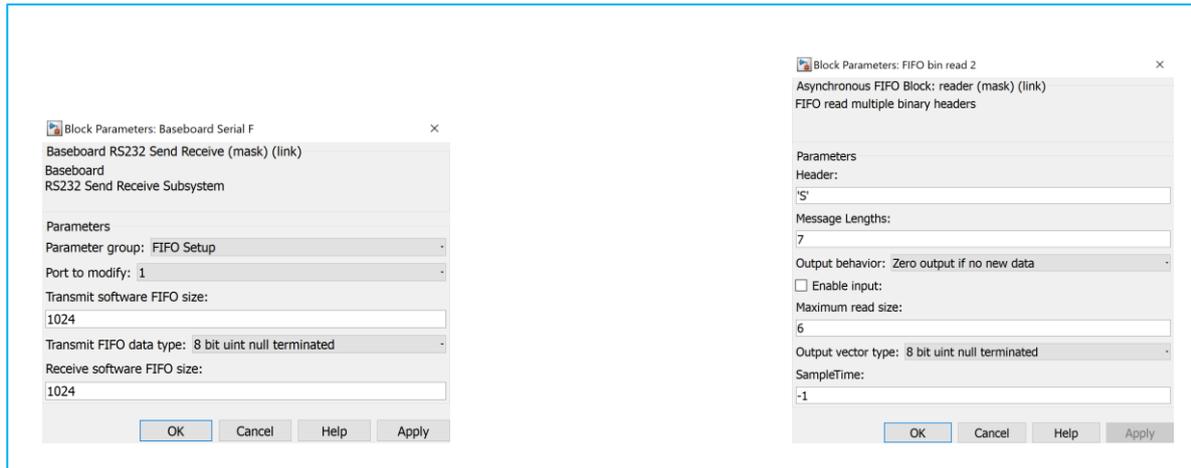


Figura 4.30.1 – Modello Simulink acquisizione verso Speedgoat.

Tale modello Simulink utilizza i blocchi:

1. *Baseboard Serial F*: da tale blocco si seleziona la porta da cui ricevere i dati dal Lidar (Com1) e si impostano i parametri di trasferimento dei bit.
2. *FIFO bin read*: da questo blocco si impostano i parametri delle sequenze di bit da leggere. I singoli messaggi (come visto nel *Capitolo 4.6*) sono costituiti da un *Header* (la lettera "S"), sono lunghi 7 byte (1 byte per l'Header; 2 byte, cioè un numero da 16 bit, per la lunghezza; 2 byte per l'angolo e 2 byte per la qualità) e di tali messaggi vanno letti solamente gli ultimi 6 byte i quali contengono le rilevazioni che ci interessano.
3. All'interno del messaggio, le misure di distanza, angolo e qualità vengono tutte lette dal blocco come due numeri da 8 bit posti uno dopo l'altro i quali vengono sommati usando il blocco "*Byte packing*" creando un singolo numero da 16 bit.
4. Le misure di distanza e angolo vengono concatenate in un vettore (*lidar_out*) riga 1x2 che costituisce la misurazione delle coordinate polari (mm, °) di un singolo punto rilevato dal Lidar.

Questo modello Simulink, quando caricato sullo Speedgoat, può operare solo se inserito in una "*Simulink Function*" posta all'interno della macchina a stati che gestisce la scansione e la successiva sequenza di salita. La funzione manderà in output il vettore (chiamato "*lidar_out*") contenente le coordinate polari del punto scansionato. Per la spiegazione di come questa funzione, chiamata "*scan_lidar*" (schema logico della funzione in Figura 4.30.2), è stata posizionata e di come opera all'interno della sequenza automatica di salita gradino si rimanda al *Capitolo 6.8*.

Lidar e rilevazione gradino

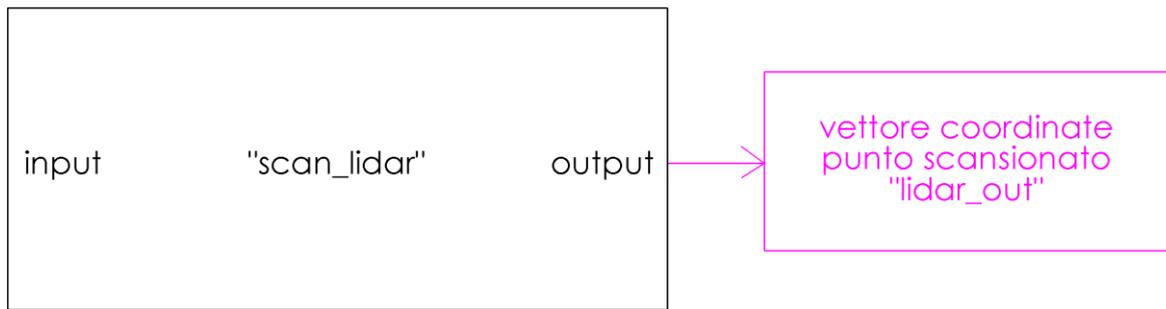


Figura 4.30.2 – Schema logico funzione "scan_lidar".

Una seconda modifica necessaria a fare funzionare la scansione e misurazione del gradino tramite Speedgoat è stata quella di convertire lo script "Manipolazione_dati.m" visto nel *Capitolo 4.6* in una "MATLAB Function" chiamata "ricerca_gradino_salita", inserita anch'essa nella macchina a stati della sequenza di salita. Tale funzione Matlab è stata inserita nella macchina a stati secondo la logica introdotta nel *Capitolo 2* e che verrà approfondita nel *Capitolo 4.7.1*; la realizzazione pratica di tale sequenza logica è spiegata nel *Capitolo 6*. In *Figura 4.30.3* viene presentato lo schema logico della funzione la quale restituisce in output, oltre alle quote del gradino e alla valutazione di superabilità, tre nuove variabili che verranno spiegate nel prossimo elenco puntato.

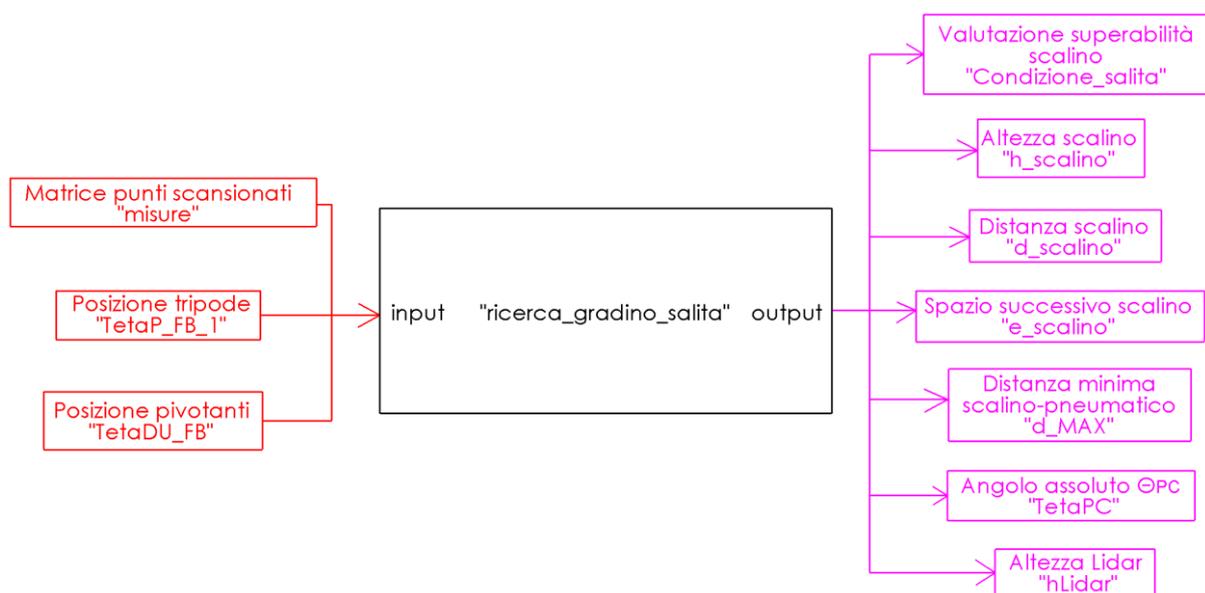


Figura 4.30.3 – Schema logico funzione "ricerca_gradino_salita".

Lidar e rilevazione gradino

Contestualmente alle modifiche di codice necessarie a convertire uno script in una funzione sono state eseguite le seguenti modifiche al codice originale:

1. Mentre in precedenza l'altezza di montaggio del Lidar (utile per pulire l'immagine) era un valore costante che veniva inserito in input allo script, ora può variare in quanto il Lidar (la cui posizione sarà vincolata al sotto-telaio PC) può alzarsi o abbassarsi a seconda della variazione degli angoli θ_P e θ_{DU} . Inoltre, la variazione di questi due angoli provoca una rotazione del Lidar il quale rischia di non essere più allineato con il gradino. È stata quindi aggiunta una parte di codice che, grazie ai valori di θ_P e θ_{DU} ricevuti dai sensori, permette di ricavare il valore dell'angolo θ_{PC} (Figura 4.31 e 4.32). Tramite gli schemi presenti in Figura 4.31 e 4.32 è stata scritta l'equazione 1, dalla quale viene ricavato θ_{PC} .

$$Eq1: r_U + l_{DU} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_{PD} + \theta_{PC} - \theta_{DU}\right) = r_W + l_{PD} \sin(\alpha_{PD} + \theta_{PC}) + l_{PW} \sin\left(30\frac{\pi}{180} + \Delta\theta_P\right)$$

$$\text{Con: } \delta = \alpha_{PD} + \theta_{PC}$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{PD} - \theta_{PC}$$

$$w = \pi - \theta_{DU} - \gamma = \pi - \frac{\pi}{2} + \alpha_{PD} + \theta_{PC} - \theta_{DU} = \frac{\pi}{2} + \alpha_{PD} + \theta_{PC} - \theta_{DU}$$

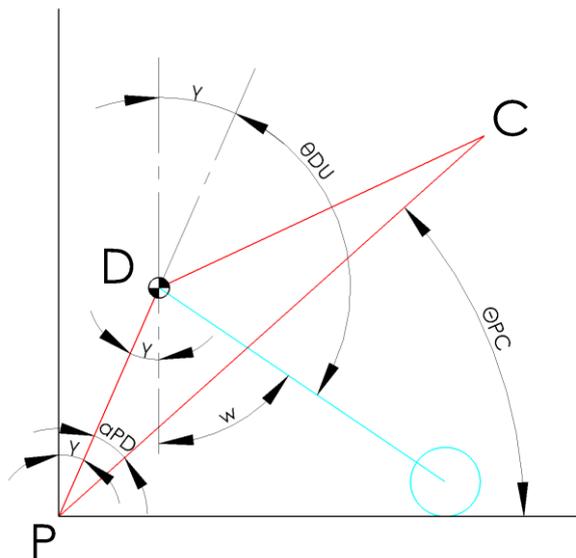


Figura 4.31 – Calcolo di θ_{PC} . Definizione di w .

Lidar e rilevazione gradino

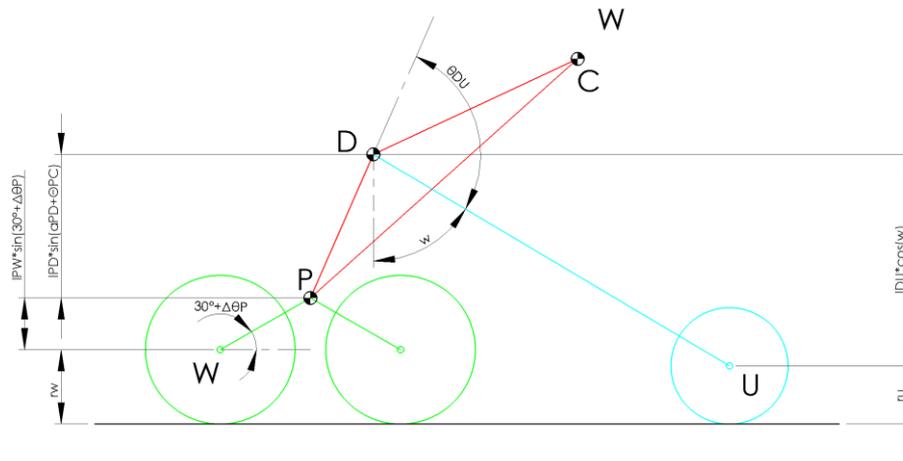


Figura 4.32 – Calcolo di θ_{PC} . Definizione di Eq1.

Si nota che $\Delta\theta_P$ rappresenta la variazione di angolo del tripode rispetto alla posizione con due ruote poggiate a terra (Figura 4.33).

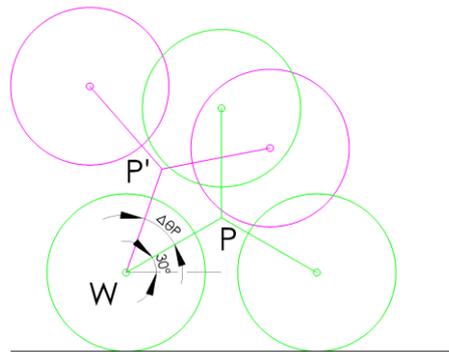


Figura 4.33 – Definizione di $\Delta\theta_P$.

Grazie a θ_{PC} è stata così calcolata l'altezza del Lidar (ordinata del punto L) dall'Equazione 2 (Figura 4.34), note le due coordinate che identificano la posizione di montaggio del Lidar: l_{PL} e l'angolo α_{PL} tra il segmento PD e il segmento PL. Questi due dati dovranno essere aggiornati all'interno della funzione Matlab una volta che sarà stato eseguito il montaggio.

$$Eq2: \quad h_{Lidar} = r_W + l_{PL} \cos\left(\alpha_{PL} + \theta_{PC} \frac{\pi}{180} + \alpha_{PD} - \frac{\pi}{2}\right) + l_{PW} \sin\left(30 \frac{\pi}{180} + \Delta\theta_P\right)$$

Lidar e rilevazione gradino

$$\text{Con: } z = \alpha_{PL} + \theta_{PC} \frac{\pi}{180} + \alpha_{PD} - \frac{\pi}{2}$$

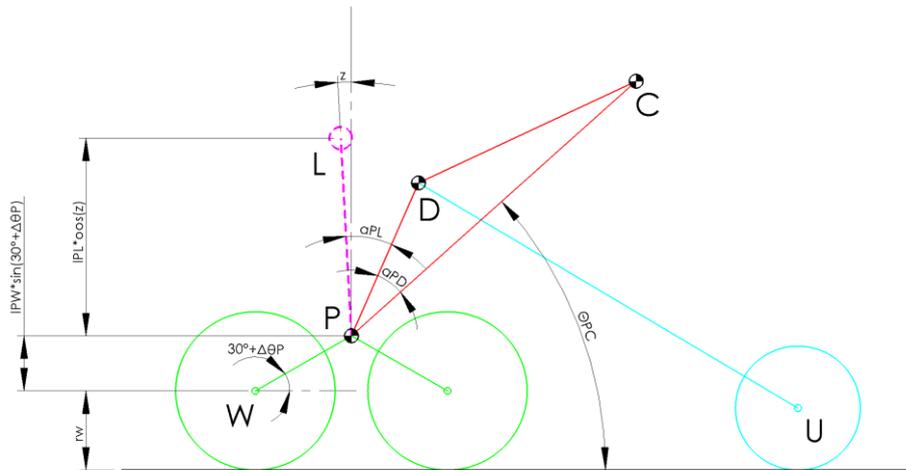


Figura 4.34 – Calcolo altezza Lidar (punto L). Definizione dell'Eq2.

L'altezza del Lidar (h_{Lidar}) opera all'interno della funzione per fare il processing dei dati, ma è stata anche inserita come output della funzione insieme a θ_{PC} nel caso possa essere utile in futuro per altri scopi.

Il Lidar, quando $\theta_{PC} = 38^\circ$ (marcia in piano), possiede il proprio sistema di riferimento allineato con il pavimento e la scansione del gradino viene eseguita correttamente; se l'angolo θ_{PC} è diverso la scansione sarà ruotata della differenza rispetto a 38° (Figura 4.35). Nell'algoritmo quindi gli angoli di tutti i punti vengono ora ruotati della differenza tra θ_{PC} e 38° .

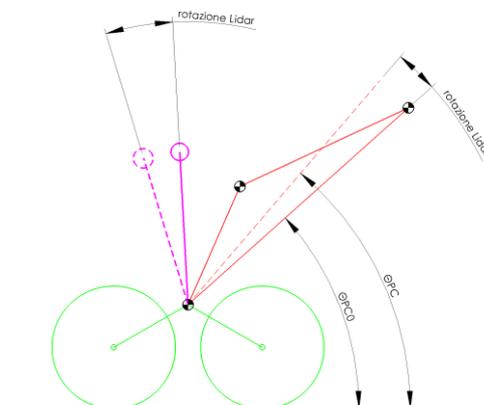


Figura 4.35 – Rotazione Lidar al variare di θ_{PC} .

Lidar e rilevazione gradino

Queste modifiche al codice permettono di scansionare il gradino a partire da qualsiasi configurazione dei gradi di libertà della carrozzina. Significa che l'utente può eseguire la sequenza di salita gradino senza preoccuparsi di dover riconfigurare la sedia in una posizione standard.

2. In base alla distanza (d) rilevata tra gradino e Lidar, la funzione calcola (Eq.3 e Eq.4) inoltre la distanza (Figura 4.36) che c'è tra lo pneumatico più vicino al gradino ed il gradino (d_{MAX}) conoscendo, grazie ai sensori, la posizione in cui si trova il tripode.

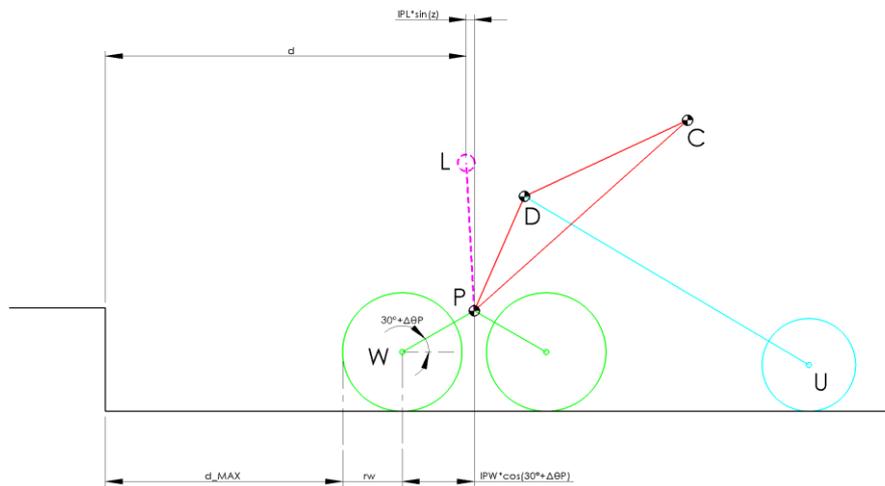


Figura 4.36 – Calcolo di d_{MAX} .

$$Eq3: d_{MAX} = d + l_{PL} \sin\left(\alpha_{PL} + \theta_{PC} \frac{\pi}{180} + \alpha_{PD} - \frac{\pi}{2}\right) - l_{PW} \cos\left(30 \frac{\pi}{180} + \Delta\theta_P\right) - r_W$$

$$Eq4: d_{MAX} = d + l_{PL} \sin\left(\alpha_{PL} + \theta_{PC} \frac{\pi}{180} + \alpha_{PD} - \frac{\pi}{2}\right) + l_{PW} \sin\left(30 \frac{\pi}{180} + \Delta\theta_P - \frac{\pi}{2}\right) - r_W$$

L'equazione 3 è valida quando $TetaP_FB_1$ (si rimanda al *Capitolo 5* per la definizione) è compresa tra $82^\circ \div 120^\circ$ e $0^\circ \div 22^\circ$; l'equazione 4 è valida quando è compresa tra $22^\circ \div 82^\circ$.

La variabile d_{MAX} viene mandata in output alla funzione "ricerca_gradino_salita" e sarà utile nella sequenza automatica per effettuare lo spostamento della fase A0-A1-A2.

4.7.1 Sequenza logica delle scansioni

Viene ora descritta la sequenza logica con cui avviene la scansione del gradino ed i criteri con cui si procede alla sequenza di salita del gradino che sono stati introdotti nel *Capitolo 2.3*, ma non descritti nel dettaglio. Facendo riferimento alla Figura 4.31 si ha questa sequenza (si fa riferimento anche ai blocchi della macchina a stati progettata nel *Capitolo 6* per avere un'associazione diretta con lo schema logico):

- I. *Attesa segnale di inizio sequenza (ATTESA nella macchina a stati)*: in questa fase la carrozzina si trova di fronte al gradino, in una qualsiasi configurazione dei suoi gradi di libertà; è in attesa del segnale (ad esempio la pressione di un interruttore) che dà il via alla scansione del gradino.
- II. *Scansione gradino (CREAZIONE_MATRICE_LIDAR nella macchina a stati)*: in questa fase avviene la scansione del gradino.
- III. *Valutazione gradino (MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA nella macchina a stati)*: in questa fase vengono ricavate le quote del gradino (d , h , e) e la *condizione* di superabilità (si ricorda che la condizione vale 1 se il gradino è superabile e vale 0 se non è superabile) attraverso la funzione Matlab descritta in precedenza “*ricerca_gradino_salita*”.

Si hanno ora 4 possibilità, che vengono controllate nel seguente ordine:

1. Se la funzione restituisce $d = 0$ e *condizione* = 0 significa che non è stato rilevato alcun gradino di fronte al Lidar e la sequenza ritorna allo stato di attesa (*RITORNO_IN_ATTESA_1 nella macchina a stati*).
2. Se la funzione restituisce $d > 800$ significa che la sedia è posizionata troppo distante dal gradino per fornire indicazioni precise su h , e e sulla *condizione*, quindi la sequenza entra nella fase di *Avvicinamento* in cui viene eseguito uno spostamento automatico della carrozzina fino ad arrivare alla distanza di 700 mm dal gradino (*AVVICINAMENTO_PER_LA_SECONDA_MISURAZIONE nella macchina a stati*); viene quindi eseguita una seconda scansione. In questo caso si dice che sono avvenute in sequenza: *scansione grossolana* > *avvicinamento* > *scansione di precisione*. Il valore discriminante di 800 mm è stato scelto in base alle conclusioni fatte nel *Capitolo 4.6* in cui si è notato che le misurazioni delle quote del gradino e della condizione di superabilità diventano molto affidabili al di sotto di questa quota. Il fatto che la fase di

Lidar e rilevazione gradino

avvicinamento porti la sedia a 700 mm è fatto per evitare sia di andare a ridosso del gradino con il poggiapiedi e sia per evitare di creare una zona di comportamento incerto attorno agli 800 mm.

3. Se la funzione restituisce $d \leq 800$ e $condizione = 0$ significa che la scansione è avvenuta ad una distanza che garantisce misurazioni affidabili e che il gradino non è stato ritenuto superabile; la sequenza torna alla fase di attesa (*RITORNO_IN_ATTESA_1 nella macchina a stati*). Se si è raggiunta tale fase a seguito di due scansioni si parla sempre di *scansione grossolana* e *scansione di precisione*; se si è arrivati a seguito di una sola scansione (senza avvicinamento) si dice che è avvenuta la sola *scansione di precisione*.
4. Se la funzione restituisce $d \leq 800$ e $condizione = 1$ significa che la scansione è avvenuta ad una distanza che garantisce misurazioni affidabili e che il gradino è stato ritenuto superabile; la sequenza procede quindi alla fase in cui vengono calcolati i set degli attuatori (*CALCOLO_DEGLI_ANGOLI sulla macchina a stati*) e poi alla sequenza vera e propria di salita. Si fanno anche qui le stesse considerazioni sulla nomenclatura delle scansioni.

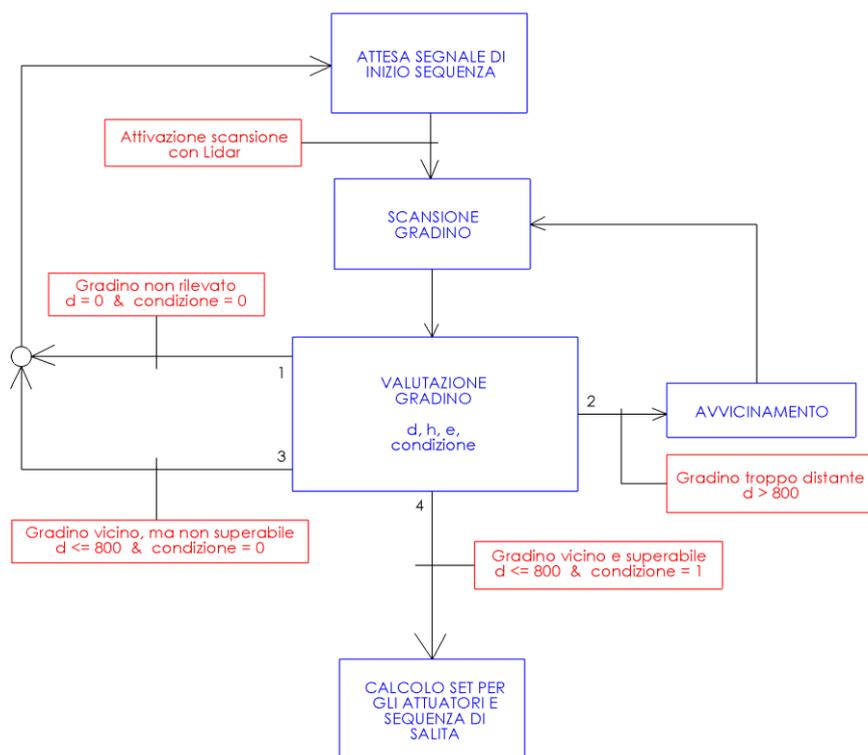


Figura 4.31 – Sequenza logica scansioni

4.8 Posizionamento del Lidar sulla carrozzina

È stata progettata una staffa (Figura 4.32) per effettuare il futuro posizionamento del Lidar sul sotto-telaio PC; essa è dotata di tre piccole asole per regolare l'orientazione del Lidar e la sua forma è stata ideata con l'obiettivo di ridurre il più possibile gli ingombri e al tempo stesso garantire al raggio emesso dal Lidar un percorso verso il gradino sempre libero da ostacoli. Tale staffa è stata realizzata in maniera specchiata per i due lati della carrozzina, in previsione della futura introduzione del secondo Lidar (Figura 4.33).

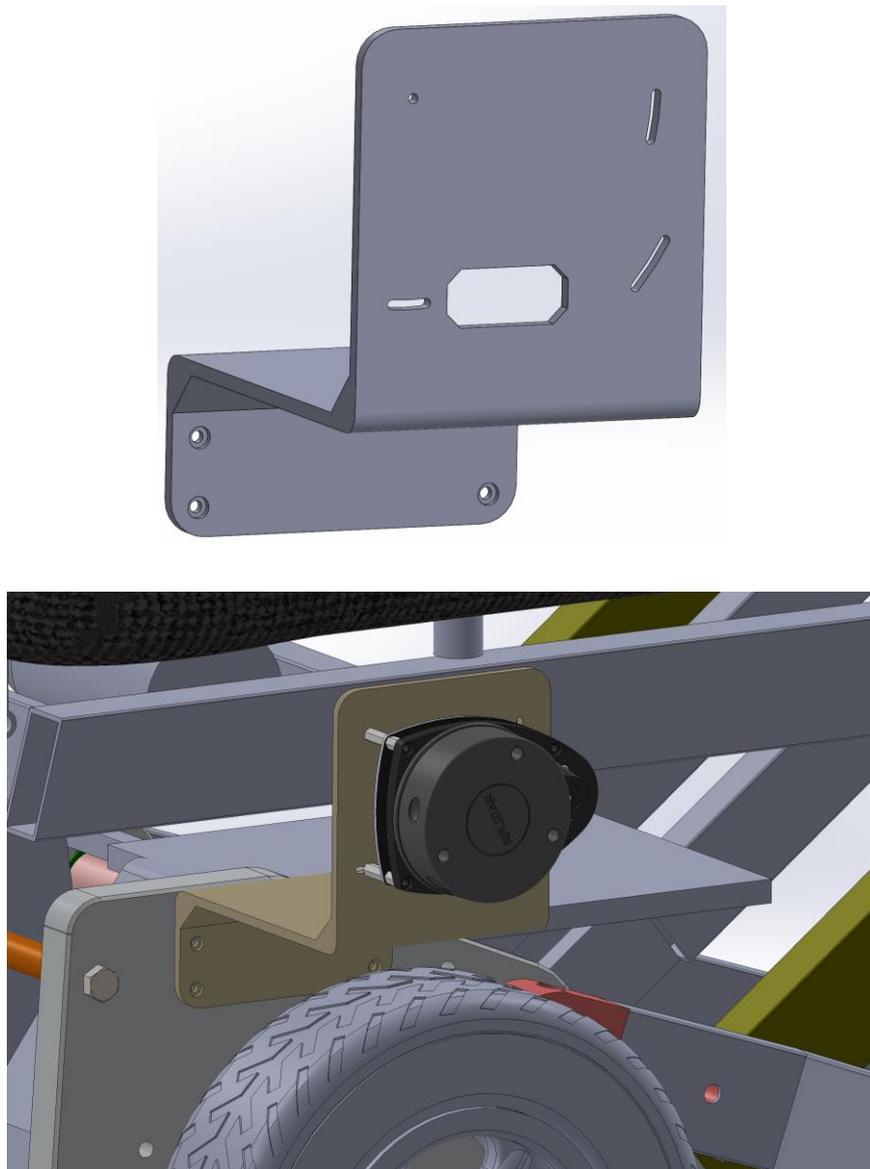


Figura 4.32 – Staffa per il Lidar (sopra), posizionamento di massima (sotto).

Lidar e rilevazione gradino

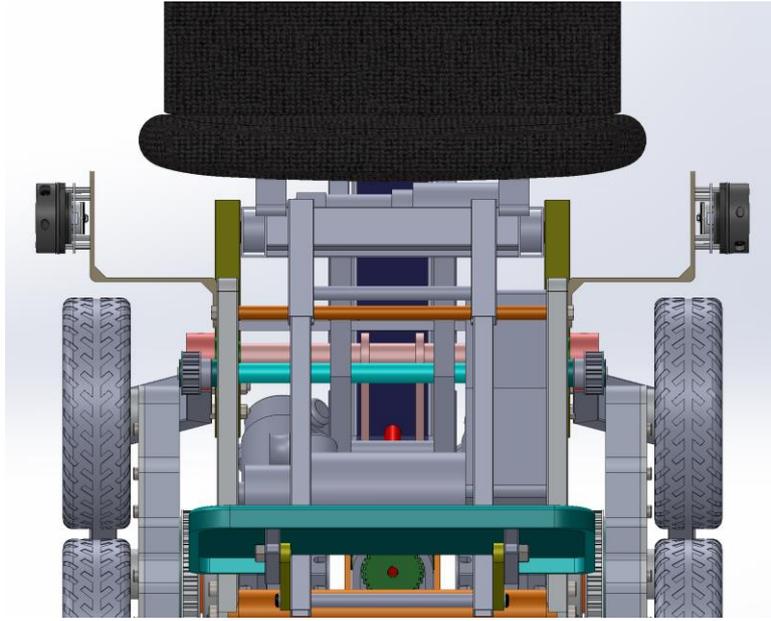


Figura 4.33 – Staffe posizionate sul sotto-telaio PC.

Come indicato nel *Capitolo 4.7*, una volta posizionato in maniera definitiva il Lidar, sarà necessario andare sulla funzione “*ricerca_gradino_salita*” presente all’interno della macchina a stati della sequenza di Salita gradino e modificare il valore dei dati α_{PL} ed l_{PL} (Figura 4.34).

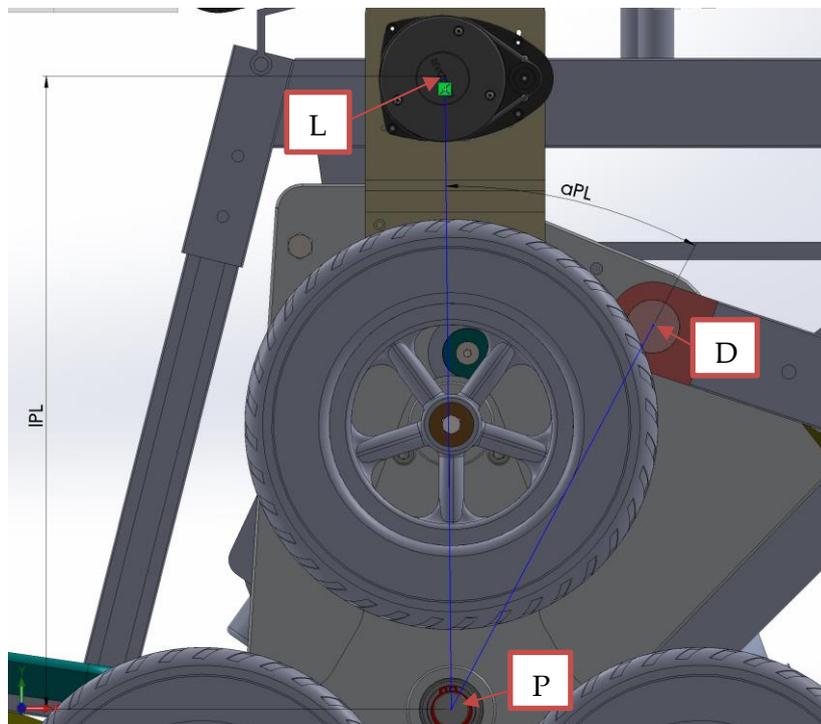


Figura 4.34 – Distanza radiale e angolo di posizionamento del Lidar.

Lidar e rilevazione gradino

È inoltre fondamentale posizionare la staffa ed il Lidar lungo le asole in modo tale che il suo asse orizzontale sia parallelo al pavimento nelle condizioni di marcia in piano, cioè quando $\theta_{PC} = 38^\circ$ (Figura 4.35); in alternativa è necessario andare a modificare nella formula che calcola il valore della correzione dell'orientazione del Lidar il valore di partenza dell'angolo θ_{PC} .

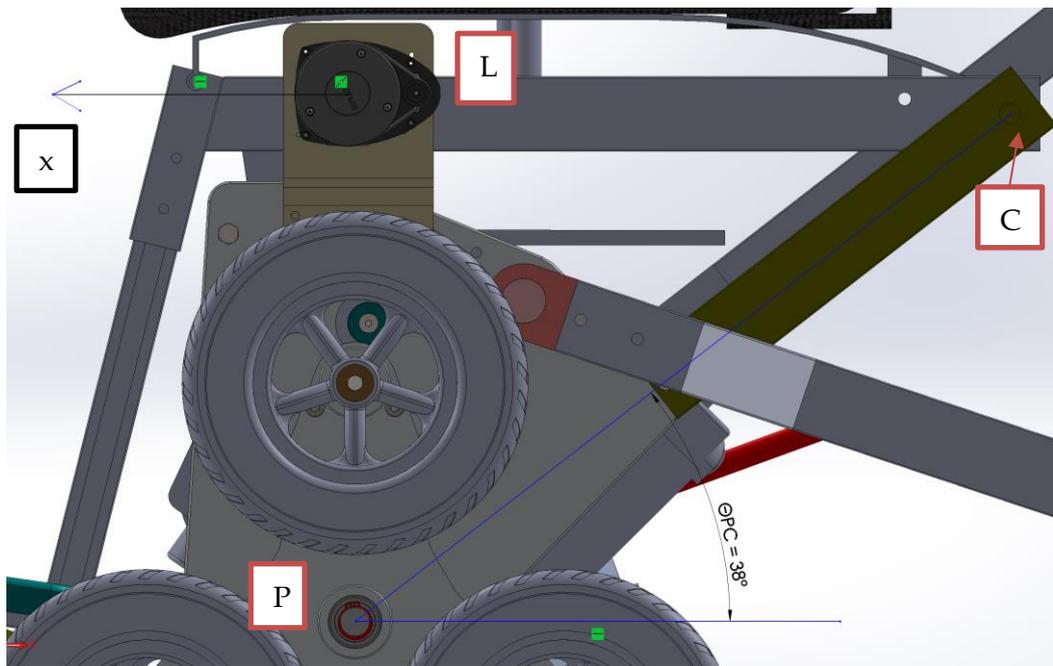


Figura 4.35 – Asse orizzontale del Lidar.

Le staffe sono state realizzate con il metodo della stampa 3D.

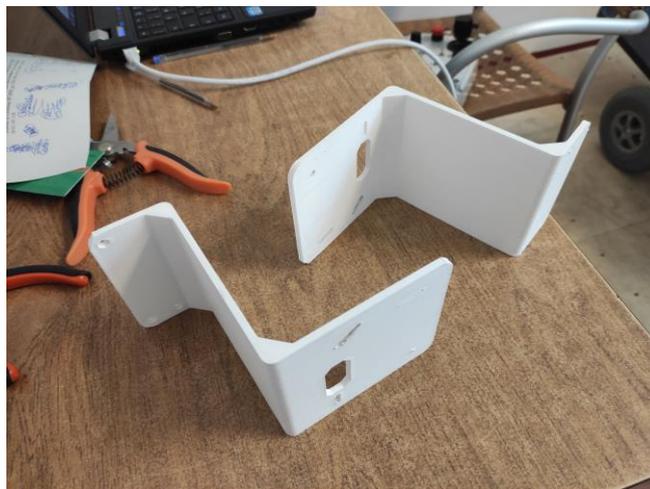


Figura 4.36 – Staffe stampate in 3D.

5 Sistemi di controllo degli attuatori

In questo capitolo vengono presentati i sistemi di controllo con cui vengono movimentati gli attuatori presenti sulla carrozzina durante le sequenze automatiche.

5.1 Controllo delle ruote pivotanti

Si tratta di un sistema di controllo in posizione in anello chiuso (Figura 5.1) nel quale viene imposto un angolo θ_{DU} di riferimento ($\theta_{DU,SET}$) in gradi e, tramite il confronto con l'angolo θ_{DU} assunto dalle pivotanti ($\theta_{DU,FB}$), viene calcolato l'angolo θ_{DU} di errore ($\theta_{DU,ERR}$). L'angolo di errore passa attraverso un sistema di controllo (C) che genera il segnale in Volt di riferimento ($V_{,REF}$) necessario ad azionare l'attuatore (A). Si genera così il movimento delle ruote pivotanti che tendono ad assumere l'angolo imposto con il SET fino a portare ad una situazione di errore nullo, in cui il raggiungimento del riferimento è completato e le pivotanti si fermano.

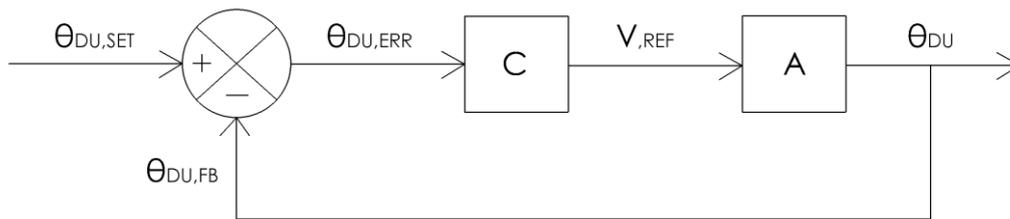


Figura 5.1 – Sistema di controllo in anello chiuso delle ruote pivotanti.

Tale sistema di controllo è stato realizzato su Simulink all'interno di un sottosistema (Figura 5.2) che riceve in ingresso $\theta_{DU,SET}$ e $\theta_{DU,FB}$ in gradi, mentre restituisce in output i segnali di riferimento in Volt di abbassamento e sollevamento delle ruote pivotanti (Tabella 5.1).

Tabella 5.1 – Segnali in uscita dal sistema di controllo.

| Simbolo | Descrizione |
|---|--|
| <i>TetaDU_SET</i> | Valore dell'angolo θ_{DU} che si vuole che venga raggiunto dalle ruote pivotanti (°). |
| <i>TetaDU_FB</i> | Valore dell'angolo θ_{DU} posseduto dalle ruote pivotanti (°). |
| <i>D_STARTM,WA</i> ^{SG} | Segnale avvio abbassamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0/5 V). |

Sistemi di controllo degli attuatori

| | |
|----------------------|--|
| $D_{STARTM,WB}^{SG}$ | Segnale avvio sollevamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0/5 V). |
|----------------------|--|

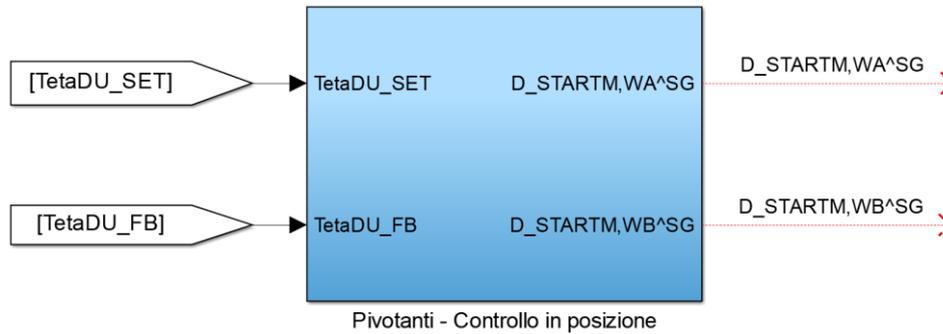


Figura 5.2 – Sottosistema di controllo delle ruote pivotanti.

Si rendono necessari due segnali in quanto ognuno di essi controlla autonomamente l'abbassamento o il sollevamento delle ruote. Nel caso in cui le si vogliano abbassare, si invieranno i segnali: $D_{STARTM,WA}^{SG} = 5 V$; $D_{STARTM,WB}^{SG} = 0 V$, mentre nel caso in cui le si vogliano sollevare, si invieranno i segnali: $D_{STARTM,WA}^{SG} = 0 V$; $D_{STARTM,WB}^{SG} = 5 V$.

Il sottosistema nel dettaglio (Figura 5.3) agisce nel seguente modo: viene calcolata la differenza tra $\theta_{DU,SET}$ e $\theta_{DU,FB}$ in gradi e l'errore risultante viene mandato in un blocco "Dead Zone" che invia in output tale errore solo se si trova al di fuori di una banda compresa tra -0.4 e 0.2 gradi; questo permette di evitare che l'attuatore venga attivato da un errore troppo piccolo o dal rumore che l'errore possiede a causa della misurazione del feedback effettuata tramite trasduttore. I valori della banda sono stati ottenuti facendo delle prove sperimentali nei quali la velocità delle pivotanti era fissata e si è lavorato per ottenere gli errori statici i più piccoli possibile. L'errore viene poi mandato in input a due blocchi "Switch" che operano in parallelo: se l'errore è positivo, e dunque si vogliono abbassare le ruote, il primo blocco manda un segnale di 5 V verso l'azionamento che ne determina l'abbassamento, mentre il secondo blocco manda un segnale di 0 V verso l'azionamento che ne determina il sollevamento; nel caso di errore positivo, dunque di sollevamento, i blocchi operano in maniera opposta. Gli output ai blocchi Switch vanno direttamente verso gli azionamenti senza passare attraverso alcun tipo di controllo, in quanto il loro valore può essere solo pari a 0 o 5 V.

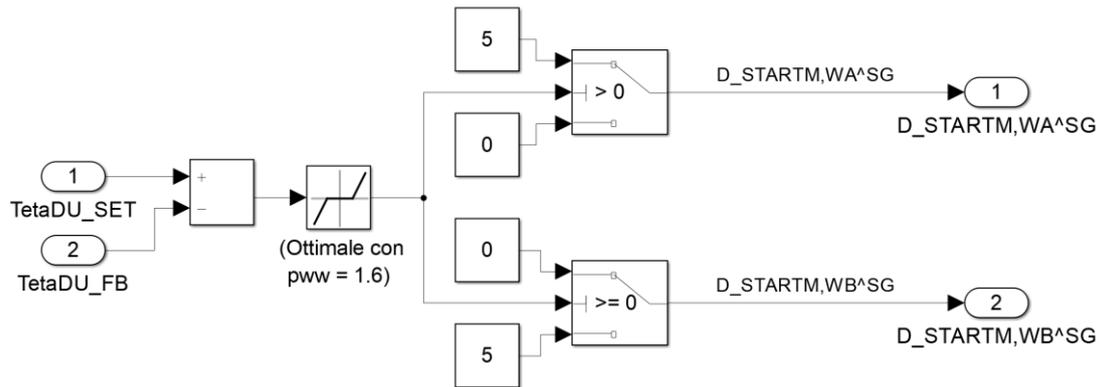


Figura 5.3 – Sottosistema di controllo delle ruote pivotanti, dettaglio.

5.2 Controllo del tripode

Si tratta di un sistema di controllo in posizione in anello chiuso (Figura 5.4) nel quale viene imposta una variazione (variazione = angolo finale - angolo iniziale) di riferimento dell'angolo θ_P ($\Delta\theta_{P,SET}$) in gradi e, tramite il confronto con l'angolo θ_P inizialmente assunto dalla carrozzina ($\theta_{P,FB,INIZIALE}$), viene calcolato l'angolo di riferimento che dovrà essere raggiunto ($\theta_{P,SET}$). Questo viene confrontato con l'angolo θ_P assunto in tempo reale dal tripode ($\theta_{P,FB}$) ottenendo così l'angolo di errore ($\theta_{P,ERR}$). L'errore entra nel sistema di controllo (C) che produce il segnale in Volt di riferimento ($V_{,REF}$) da mandare all'attuatore (A). Si genera così il movimento del tripode che tende a correggere l'errore fino al completamento del delta di rotazione imposto con la conseguente fine della rotazione.

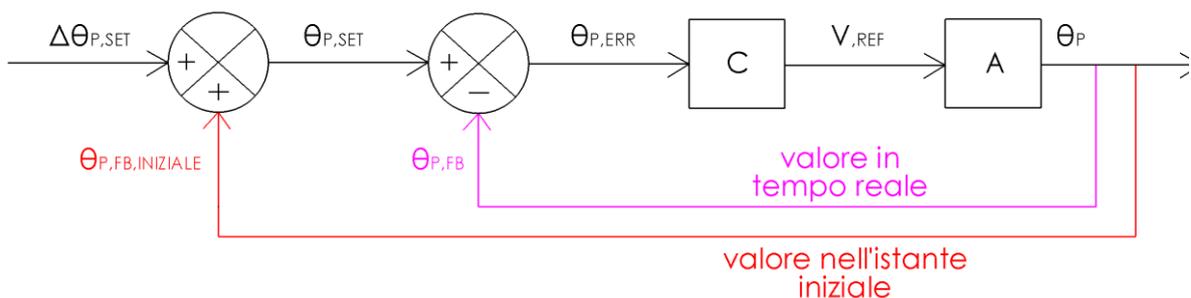


Figura 5.4 – Sistema di controllo in anello chiuso del tripode.

Tale sistema di controllo è stato realizzato su Simulink all'interno di un sottosistema (Figura 5.5) che riceve in input e manda in output i segnali elencati nella Tabella 5.2.

Sistemi di controllo degli attuatori

Tabella 5.2 – Segnali in ingresso e uscita dal sistema di controllo.

| Simbolo | Descrizione |
|-------------------------------------|--|
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). |
| <i>TetaP_FB_1</i> | Feedback della posizione del tripode. Varia in un range da 0° a 120°, azzerandosi ogni terzo di giro (°). |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. |
| <i>Tripode_Int</i> | Valore della componente integrativa del PID. |
| $V_{RIFM,P}^{SG}$ | Riferimento di velocità azionamento tripodì da controllore Speedgoat (± 10 V). |
| <i>TetaP_SET</i> | Valore dell'angolo di riferimento che il tripode deve raggiungere al termine della rotazione. È la somma tra <i>D_TetaP_SET</i> e il valore iniziale di <i>TetaP_FB_1</i> . Può uscire dal range 0÷120° (°). |
| <i>TetaP_FB_2</i> | Valore del Feedback opportunamente modificato in modo da poter variare al di fuori del range 0÷120° ed essere confrontabile con <i>TetaP_SET</i> (°). |
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare che viene corretto. È la differenza tra <i>TetaP_SET</i> e <i>TetaP_FB_2</i> (°). |

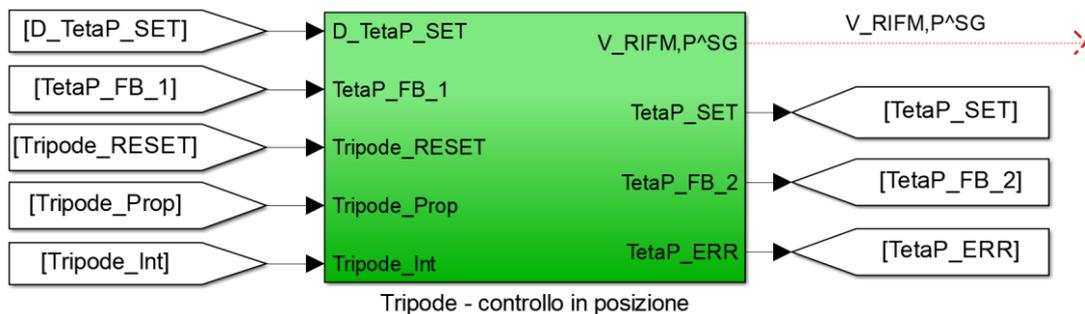


Figura 5.5 – Sottosistema di controllo del tripode.

Il sottosistema nel dettaglio (Figura 5.6) agisce nel seguente modo: viene calcolata la somma tra *D_TetaP_SET* e il valore di *TetaP_FB_1* iniziale, ottenendo così l'angolo *TetaP_SET* che vuole essere raggiunto dal tripode. Il valore iniziale di *TetaP_FB_1* viene memorizzato e mandato al blocco somma attraverso un "Triggered Subsystem", cioè un sottosistema che, all'aumentare o al diminuire di una variabile di controllo (*Tripode_RESET*) memorizza il valore

Sistemi di controllo degli attuatori

in ingresso ($In1$) e lo restituisce in output ($Out1$) fino ad una successiva variazione della variabile di controllo; questo permette di mantenere un valore di $TetaP_SET$ costante durante tutta la movimentazione del tripode. Il valore di $TetaP_SET$ viene poi confrontato con $TetaP_FB_2$ e fatto passare per una Dead Zone ($-0.05 \div 0.05$), ottenendo così l'errore angolare da dover correggere, $TetaP_ERR$. Siccome $TetaP_FB_1$ copre un range che va da 0 a 120° non può essere utilizzata nel calcolo dell'errore; al suo posto viene utilizzata $TetaP_FB_2$, una variabile in output dalla funzione Matlab "Conteggio giri" che può uscire da tale range, diventando confrontabile con $TetaP_SET$. La funzione "Conteggio giri" opera grazie ad un "Resettable Subsystem" chiamato "Reset conteggio giri", il quale permette di tenere il conto di ogni volta in cui vengono superati 0 o 120° e che può venire azzerato con la variabile $Tripode_RESET$. L'errore viene inviato in un controllore PID che riceve i valori del proporzionale e dell'integrativo (nelle sequenze automatiche il valore della componente integrativa sarà sempre pari a 0) in input dall'esterno del sottosistema di controllo e che applica una saturazione del segnale in uscita compresa tra $\pm 3 V$, per evitare movimenti troppo rapidi del tripode. L'uscita del PID rappresenta quindi il segnale di riferimento in Volt che viene inviato all'azionamento e risulta negativo per le rotazioni in avanti del tripode oppure positivi per quelle all'indietro.

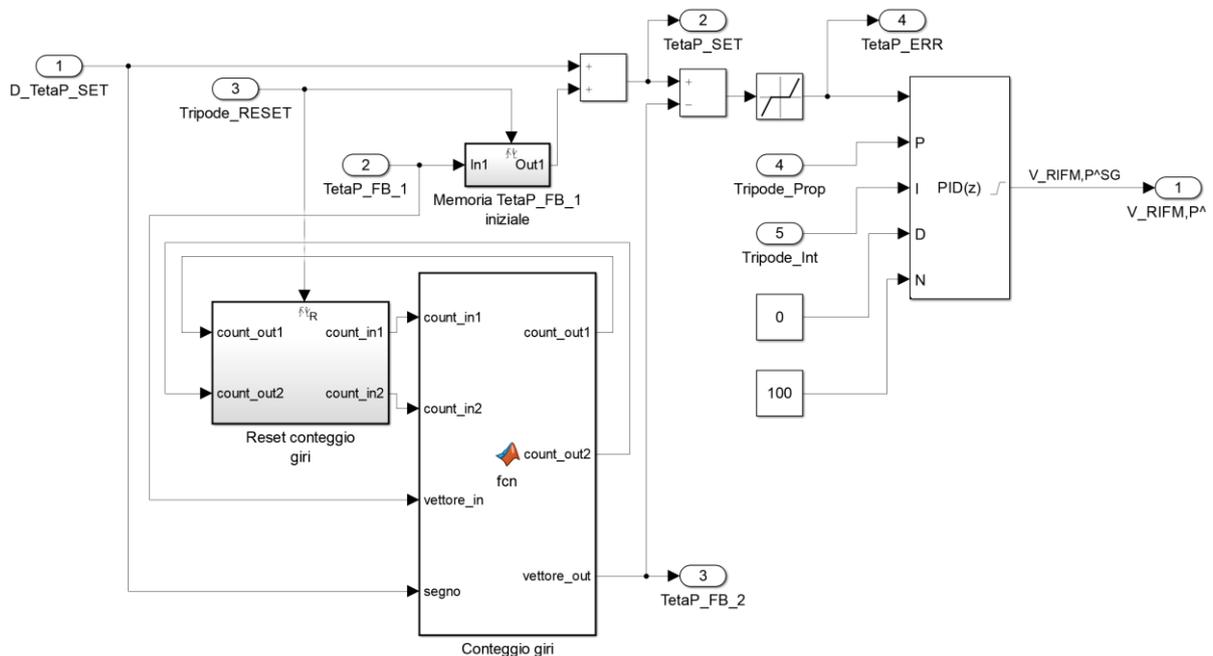


Figura 5.6 – Sottosistema di controllo del tripode, dettaglio.

5.2.1 Approfondimento sulla gestione della rotazione del tripode

La differenza principale tra il sistema di controllo che movimentata le ruote pivotanti ed il sistema di controllo che muove il tripode consiste nella scelta della tipologia di angolo di set da imporre. Nel primo caso si sceglie di imporre un angolo assoluto da raggiungere ($\theta_{DU,SET}$); nel secondo caso si sceglie di imporre una variazione dell'angolo assunto dal tripode ($\Delta\theta_{P,SET}$). Questa scelta è stata fatta per due motivi principali:

1. Permette di scegliere il verso di rotazione del tripode (Figura 5.7). Nel caso in cui $\Delta\theta_{P,SET}$ sia positivo si avrà una rotazione in avanti; nel caso in cui sia negativo si avrà una rotazione all'indietro. Diventa così possibile raggiungere la stessa configurazione del tripode imponendo la rotazione nel verso che si preferisce.

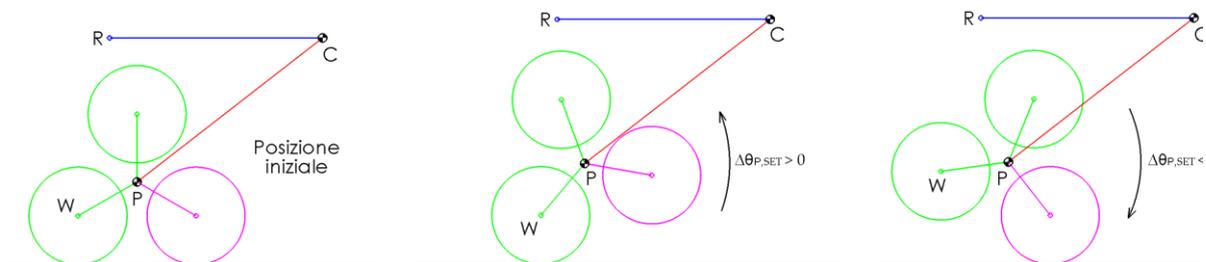


Figura 5.7 – Verso di rotazione del tripode.

2. La funzione Matlab che dà in output gli angoli di riferimento da raggiungere nelle varie fasi della sequenza automatica di Salita gradino, solo per il tripode utilizza proprio il sistema basato sulla variazione dell'angolo con segno.

È necessario, inoltre, fare un approfondimento sulla gestione della misurazione della posizione del tripode. Il trasduttore di posizione restituisce una misura dell'angolo limitata in un range che va da 0° a 120° e che si ripete ogni terzo di giro, cioè a parità di configurazione del tripode ($TetaP_FB_1$). In Figura 5.8 è possibile vedere il comportamento della variabile $TetaP_FB_1$ al variare della posizione del tripode e il suo confronto con l'angolo θ_P definito nel Capitolo 2; si noti come nella vignetta 1 e 5 l'angolo segnato dal trasduttore sia lo stesso, nonostante il tripode abbia compiuto una rotazione in avanti di 120° . Nel caso di rotazione all'indietro del tripode, la variabile $TetaP_FB_1$ passerebbe, nell'ordine, da 82° a 22° a $0^\circ/120^\circ$ ad 88° per tornare infine ad 82° .

Sistemi di controllo degli attuatori

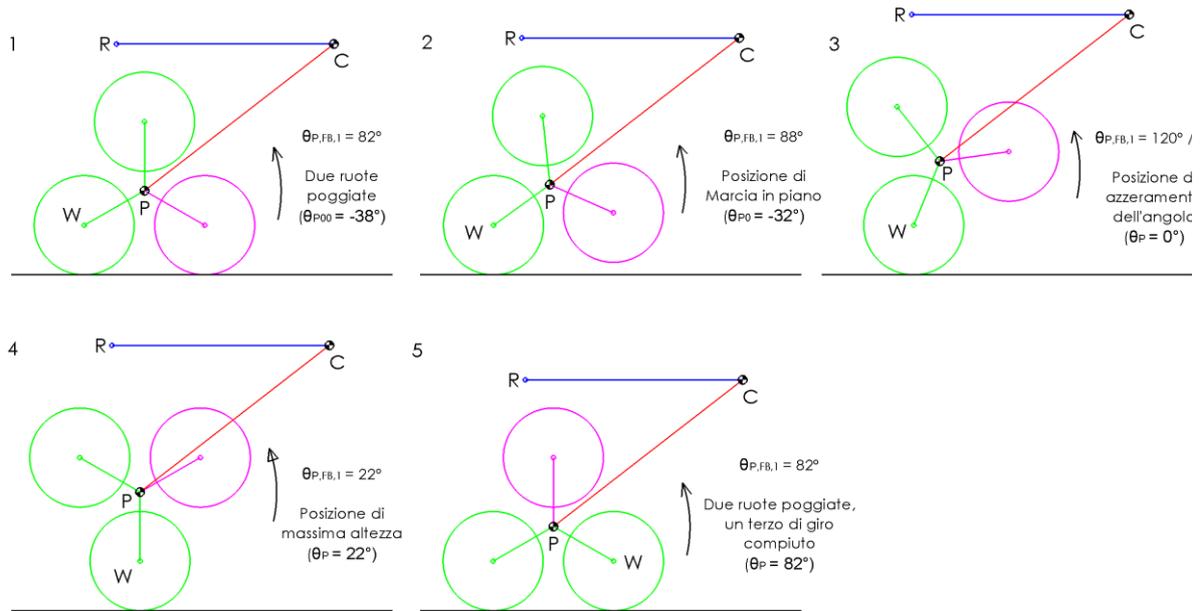


Figura 5.8 – Posizione del tripode misurata dal trasduttore, $TetaP_FB_1$.

Il problema nell'utilizzare tale variabile ($TetaP_FB_1$) è che, una volta sommata a D_TetaP_SET , il suo risultato ($TetaP_SET$) può andare oltre i 120° quando viene imposta una rotazione in avanti, oppure può andare al di sotto degli 0° (valori negativi) quando viene imposta una rotazione all'indietro. Questo comporta che nel momento in cui si deve calcolare l'errore tra $TetaP_SET$ e $TetaP_FB_1$, le due variabili non siano più confrontabili, trovandosi in range diversi. Per questo motivo viene utilizzata la funzione Matlab "Conteggio giri" che svolge il seguente compito: quando la variabile $TetaP_FB_1$ supera i 120° (andando a zero), la funzione restituisce in output la variabile $TetaP_FB_2 = TetaP_FB_1 + 120^\circ$, estendendo il range del feedback e rendendolo confrontabile con $TetaP_SET$. Questo processo viene ripetuto ad ogni terzo di giro del tripode, rendendo il range del feedback ($TetaP_FB_2$) sempre confrontabile con $TetaP_SET$. Lo stesso ragionamento viene applicato per le rotazioni del tripode all'indietro: quando la variabile $TetaP_FB_1$ scende sotto gli 0° (andando in valori negativi), la funzione restituisce in output la variabile $TetaP_FB_2 = TetaP_FB_1 - 120^\circ$, estendendo il range del feedback e rendendolo confrontabile con $TetaP_SET$. Anche in questo caso il processo viene ripetuto ad ogni terzo di giro del tripode, rendendo il range del feedback ($TetaP_FB_2$) sempre confrontabile con $TetaP_SET$.

5.3 Controllo delle ruote solari

Si ha un sistema di controllo in anello chiuso (Figura 5.12) in cui viene imposta la distanza orizzontale di traslazione in millimetri (Δx_{SET}) che si vuole far compiere ad ognuno dei due lati della carrozzina. Si tratta di uno spostamento relativo (Figura 5.9), dalla posizione generica in cui si trova la carrozzina essa avanza di un valore pari a Δx_{SET} se il valore della variabile è positivo, o arretra di un valore pari a Δx_{SET} se il valore della variabile è negativo. La scelta di lavorare con spostamenti relativi e non con degli spostamenti assoluti inseriti in un sistema di riferimento è perché con il primo metodo si ha molta flessibilità e maggiore intuitività nel gestire le traslazioni presenti nelle fasi della sequenza automatica di Salita gradino; all'interno della macchina a stati che esegue la sequenza, è infatti sufficiente inserire la distanza relativa che si vuole far compiere alla carrozzina, in qualsiasi posizione essa si trovi.

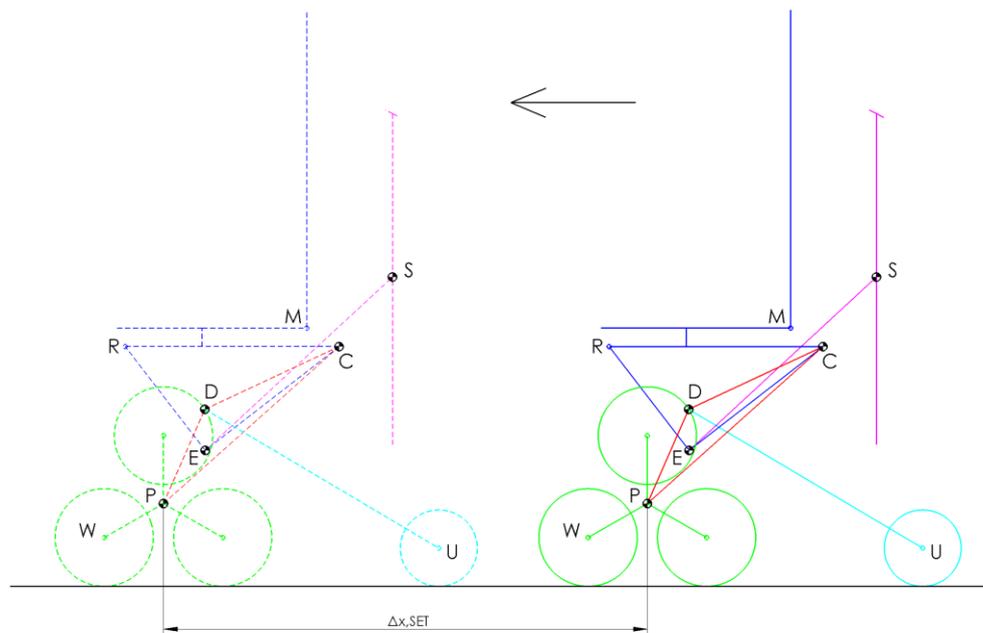


Figura 5.9 – Avanzamento della carrozzina; $\Delta x_{SET} > 0$.

La distanza relativa Δx_{SET} viene divisa per il raggio dello pneumatico (r_w), ottenendo l'angolo in radianti ($\gamma_{w,SET}$) di cui dovrà ruotare lo pneumatico per compiere il movimento imposto (Figura 5.10). Questa formula è applicabile in quanto le traslazioni compiute dalla carrozzina durante le sequenze automatiche avvengono senza slittamenti, in moto di rotolamento puro; questo è dovuto al fatto che le fasi di traslazione sono state tarate (Capitolo 5.3.1) con delle

dinamiche molto lente, senza accelerazioni e decelerazioni brusche. L'ipotesi di moto di rotolamento puro inizia a diventare più debole negli spostamenti con due ruote poggiate a terra, ma verrà assunta valida anche in questi casi in quanto tali movimenti avvengono, in ogni caso, con dinamiche molto lente.

$$\gamma_{W,SET} = \frac{\Delta x_{SET}}{r_W}$$

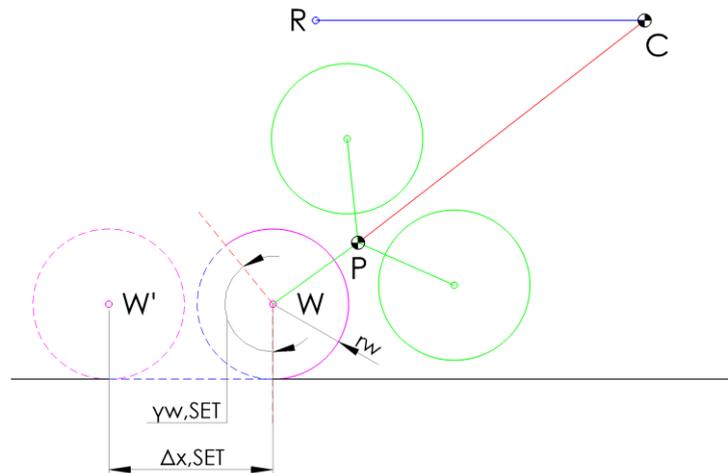


Figura 5.10 – Avanzamento della carrozzina; $\Delta x_{SET} > 0$.

Viene ora affrontata una parentesi sul rotismo epicicloidale presente all'interno del tripode, necessaria a comprendere il funzionamento del sistema di controllo.

Il rotismo epicicloidale:

Il funzionamento del rotismo epicicloidale (presentato graficamente nel *Capitolo 3.9* e visibile in *Figura 5.11*) viene descritto a livello matematico dalla formula di Willis (*Eq1*), la quale lega la velocità angolare di rotazione della ruota solare ($\dot{\gamma}_S$) con la velocità angolare di rotazione della ruota satellite più esterna vincolata allo pneumatico ($\dot{\gamma}_W$) e con la velocità angolare di rotazione del tripode ($\dot{\theta}_P$), utilizzando il rapporto di trasmissione (k_E) del tripode (in condizioni di $\dot{\theta}_P = 0$) definito nell'equazione numero 3. Considerando l'ipotesi di non tenere conto dei transitori di tempo, l'equazione numero 1 è integrabile nel tempo ottenendo l'equazione numero 2, la quale è una relazione analoga alla prima, ma che lega tra loro gli spostamenti angolari compiuti dalla ruota solare, dallo pneumatico e dal tripode. Grazie a questa formula è possibile

Sistemi di controllo degli attuatori

risalire, a partire dalle rotazioni angolari imposte agli pneumatici sotto ipotesi di rotolamento puro ($\gamma_{W,SET}$) e al tripode ($\Delta\theta_{P,SET}$) all'angolo di cui deve ruotare la solare ($\gamma_{S,SET}$).

$$Eq1: \quad \dot{\gamma}_S k_E = \dot{\gamma}_W + (k_E - 1)\dot{\theta}_P$$

$$\dot{\gamma}_S = \frac{1}{k_E} [\dot{\gamma}_W + (k_E - 1)\dot{\theta}_P]$$

$$\int_{t_0}^{t_f} \dot{\gamma}_S dt = \frac{1}{k_E} [\int_{t_0}^{t_f} \dot{\gamma}_W dt + (k_E - 1) \int_{t_0}^{t_f} \dot{\theta}_P dt]$$

$$\gamma_{Sf} - \gamma_{S0} = \frac{1}{k_E} [(\gamma_{Wf} - \gamma_{W0}) + (k_E - 1)\theta_P]$$

$$Eq2: \quad \gamma_S = \frac{1}{k_E} [\gamma_W + (k_E - 1)\theta_P]$$

$$Eq3: \quad k_E = \frac{r_S}{r_P} = 3$$

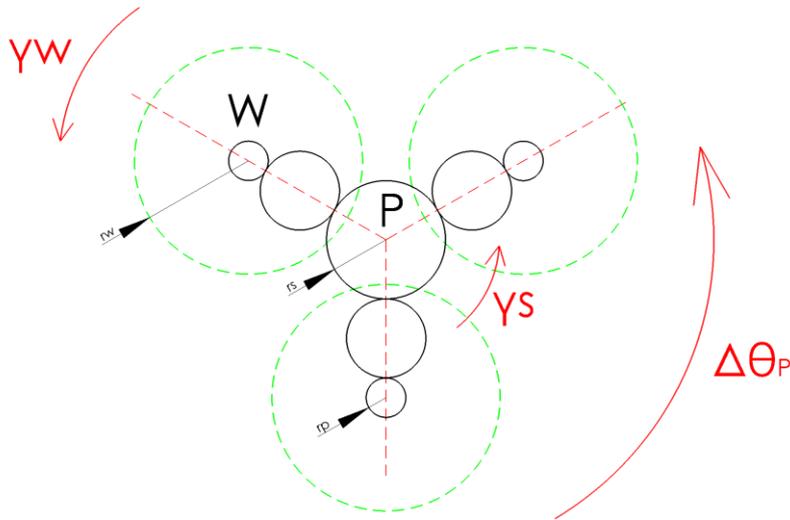


Figura 5.11 – Grandezze del rotismo epicicloidale.

Si torna ora al sistema in anello chiuso. Siccome il confronto tra set e feedback (Figura 5.12) viene fatto rispetto all'angolo di rotazione della ruota solare in radianti (γ_S), il valore di $\gamma_{S,SET}$ viene trovato utilizzando la formula di Willis applicata al rotismo epicicloidale vista precedentemente. Risulta quindi necessario includere tra gli input del sistema di controllo anche l'angolo di rotazione convertito in radianti imposto al tripode ($\Delta\theta_{P,SET}$). Dal confronto tra $\gamma_{S,SET}$ e $\gamma_{S,FB}$ si ottiene l'errore ($\gamma_{S,ERR}$), il quale passa attraverso il controllo (C) che genera il segnale di riferimento in Volt (V_{REF}) che va al motore. Il valore di $\gamma_{S,FB}$ viene ottenuto partendo

Sistemi di controllo degli attuatori

dalla velocità in radianti al secondo a cui gira il motore che controlla la solare ($\dot{\gamma}_{MS}$), ricavata grazie ad un encoder ottico montato su ognuno dei due motoriduttori che controllano le due solari; dividendo per il rapporto di trasmissione del motoriduttore (i_s) si ottiene la velocità di rotazione angolare della solare ($\dot{\gamma}_s$), integrandola si ottiene infine l'angolo di rotazione in radianti compiuto dalla solare ($\gamma_{s,FB}$). Questo sistema permette di generare le opportune rotazioni della solare necessarie a far avanzare la sedia e compensare l'eventuale rotazione contemporanea del tripode, questo significa inoltre che in caso di sola rotazione del tripode, la solare compenserà da sola il naturale avanzamento o indietro di della sedia, facendola restare sul posto.

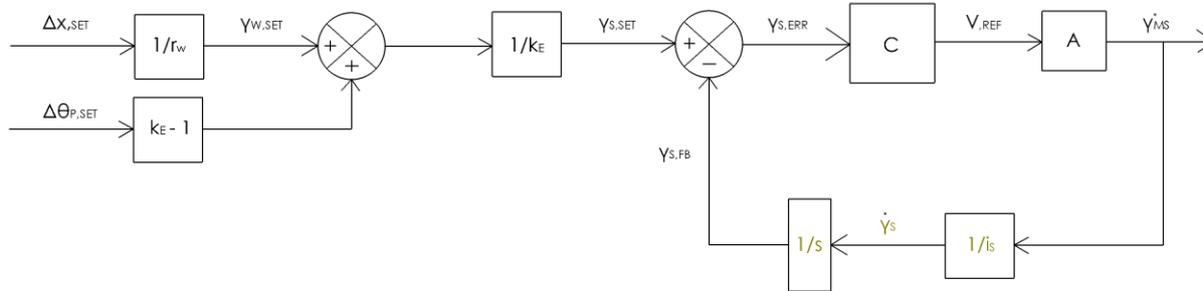


Figura 5.12 – Sistema di controllo in anello chiuso di una ruota solare.

Tale sistema di controllo viene applicato alle due solari in modo separato, imponendo una distanza di traslazione per il lato sinistro ed una per il lato destro. Il controllo è stato realizzato su Simulink all'interno di un sottosistema (Figura 5.13) che riceve in input e manda in output i segnali elencati nella Tabella 5.3.

Sistemi di controllo degli attuatori

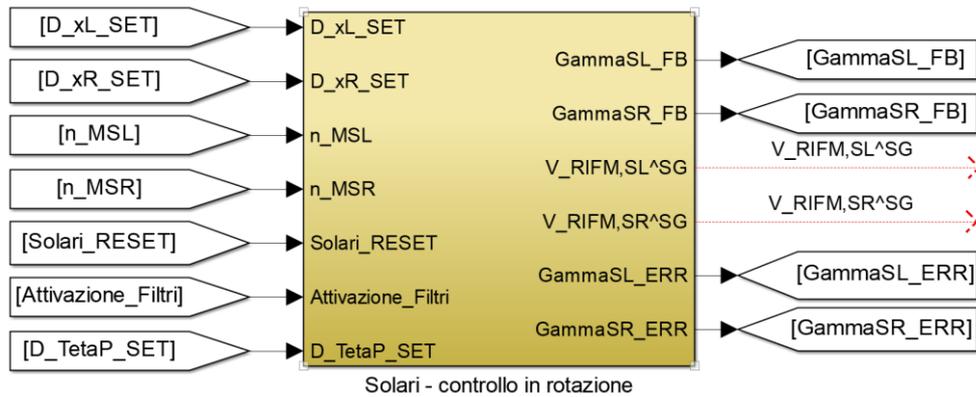


Figura 5.13 – Sottosistema di controllo delle solari.

Tabella 5.3 – Segnali in ingresso e uscita dal sistema di controllo.

| Simbolo | Descrizione |
|--------------------------------------|---|
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). |
| <i>n_MSL</i> | Velocità di rotazione del motore che controlla la solare sinistra (rpm). |
| <i>n_MSR</i> | Velocità di rotazione del motore che controlla la solare sinistra (rpm). |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). |
| <i>Attivazione_Filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). |
| <i>GammaSL_FB</i> | Valore di feedback dell'angolo di rotazione compiuto dalla solare sinistra (rad). |
| <i>GammaSR_FB</i> | Valore di feedback dell'angolo di rotazione compiuto dalla solare destra (rad). |
| $V_{RIFM,SL}^{SG}$ | Riferimento azionamento ruota solare sinistra da controllore Speedgoat (± 10 V). |
| $V_{RIFM,SR}^{SG}$ | Riferimento azionamento ruota solare destra da controllore Speedgoat (± 10 V). |
| <i>GammaSL_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare sinistra (rad). |
| <i>GammaSR_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare destra (rad). |

Il sottosistema nel dettaglio (Figura 5.14) agisce nel seguente modo: per ciascuna delle due solari vengono mandati in input la distanza orizzontale che i rispettivi lati della sedia dovranno percorrere (D_{xL_SET} e D_{xR_SET}) e l'angolo di rotazione del tripode D_TetaP_SET . I tre input passano attraverso dei filtri del primo ordine che ne smorzano il gradino, questo permette di avere un graduale arrivo al valore di set scelto, limitando il valore dell'errore e quindi del segnale inviato agli azionamenti nei primi istanti; così facendo si evitano accelerazioni brusche della carrozzina e si ottiene un comportamento caratterizzato da dinamiche molto lente. Prendendo in esame il lato sinistro della sedia, la distanza orizzontale viene divisa per il raggio dello pneumatico (115 mm) ottenendo l'angolo di rotazione dello pneumatico in radianti, mentre l'angolo di rotazione del tripode (D_TetaP_SET) viene trasformato in radianti e moltiplicato per $k_E - 1$; i due risultati vengono sommati e divisi per il rapporto di trasmissione k_E , ottenendo l'angolo di rotazione di set che la solare sinistra dovrà compiere per effettuare la traslazione della carrozzina e la rotazione del tripode. Il feedback della velocità di rotazione del motore che controlla la solare sinistra (n_MSL) viene diviso per il rapporto di trasmissione del motoriduttore (i_S) e trasformato in radianti al secondo; viene poi inviato come input ad un integratore che permette di ricavare l'angolo di rotazione in radianti compiuto dalla solare sinistra ($GammaSL_FB$). I valori di set e feedback vengono confrontati ricavando l'errore ($GammaSL_ERR$), il quale passa in una banda morta (-0.05÷0.05) e si separa entrando in due PID separati (dettagli nel *Capitolo 5.3.1*): il PID inferiore (verde) entra in azione in tutti i casi in cui la distanza di traslazione sia superiore a 150 mm (Parametri: P = 0.15; I = 0.05; D = 0; N = 100), il PID superiore (azzurro) quando è inferiore o uguale a 150 mm (Parametri: P = 0.35; I = 0; D = 0; N = 100); entrambi possiedono una saturazione che arriva a ± 0.3 V, per evitare velocità inutilmente elevate nelle sequenze automatiche. L'uscita dei PID va direttamente all'azionamento del motore sinistro (V_RIFM,SL^SG). Lo stesso ragionamento viene applicato al motore che controlla la ruota solare destra.

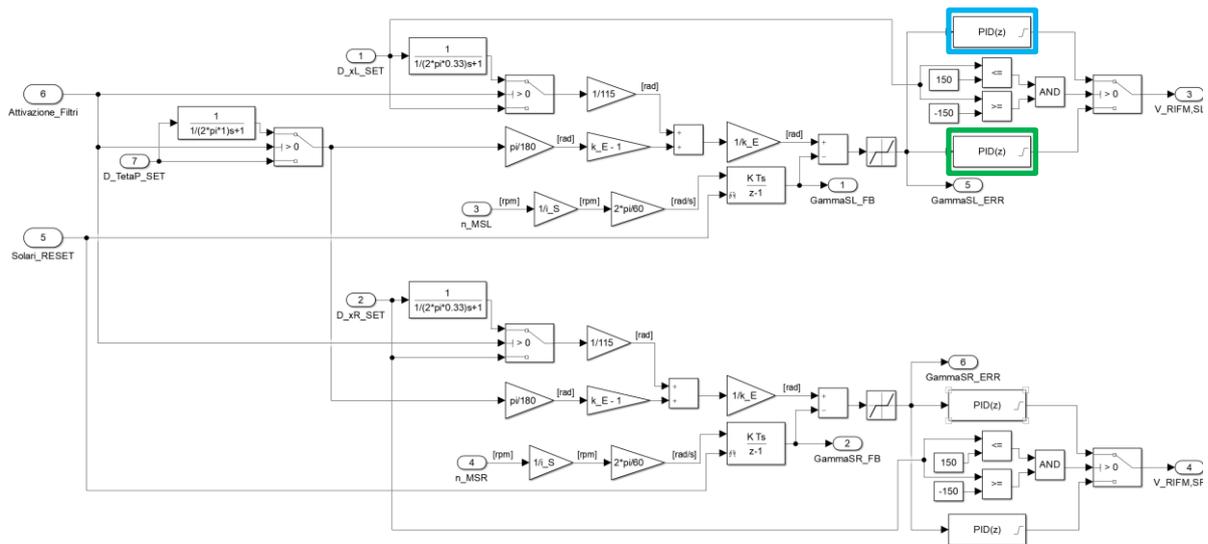


Figura 5.14 – Sottosistema di controllo delle solari.

5.3.1 Prove per il settaggio dei controllori PID delle ruote solari

La scelta dei valori delle componenti proporzionale ed integrativa dei controllori PID è stata fatta sulla base di diverse prove in laboratorio. Sono state inizialmente settate le zone morte e i filtri del primo ordine come visto nel Capitolo 5.3 ed in seguito sono state programmate le prove da eseguire (Tabella 5.4); tali prove sono costituite da una traslazione in avanti della carrozzina accompagnata da una rotazione in avanti del tripode che può essere nulla o arrivare fino a 60°. I requisiti per considerare una prova avvenuta con successo sono i seguenti:

1. Avere una partenza dolce, senza scatti e slittamenti degli pneumatici.
2. Mantenere una velocità di traslazione di circa 10 cm/s, abbastanza lenta da muoversi in sicurezza, ma non troppo da rendere le sequenze di traslazione troppo lunghe.
3. La carrozzina deve arrivare alla distanza prefissata.

Per eseguire le prove, la carrozzina è stata posizionata sul pavimento del laboratorio con un metro a nastro al suo fianco (Figura 5.15.1); si è scelto poi di partire con una distanza di traslazione di 1000 mm accompagnata da una rotazione del tripode di 60°. Durante la prova i valori del PID sono stati settati nel seguente modo: inizialmente si è lavorato sulla componente proporzionale, partendo da $P = 0$ e $I = 0$ (carrozzina troppo lenta); si è passati a $P = 0.5$ e $I = 0$ (carrozzina troppo veloce e scattante); dopo ulteriori prove si è giunti a $P = 0.15$ e $I = 0$ (carrozzina che rispetta i requisiti 1 e 2). Si noti come la componente proporzionale è

responsabile della reattività generale del sistema. Si è poi lavorato sulla componente integrativa la quale è responsabile di ridurre l'errore statico, si è notato infatti che aumentando tale valore la carrozzina tende a fermarsi più a ridosso del punto di arrivo scelto. Partendo con $P = 0.15$ e $I = 0.0001$ (carrozzina che arriva a 900 mm); si è passati a $P = 0.15$ e $I = 0.01$ (arriva a 950 mm); si è passati a $P = 0.15$ e $I = 0.005$ (arriva a 1100 mm); infine si è scelto $P = 0.15$ e $I = 0.003$ (carrozzina che rispetta i requisiti 1, 2 e 3). La prova è stata ripetuta per tutte le casistiche viste in Tabella 5.4 (caselle verdi), confermando i valori del PID scelti (esempio di prova di avanzamento di 450 mm in *Figura 5.15.2*, ottenuta con i valori del PID definitivi). Con questi valori la carrozzina arriva esattamente al valore di distanza impostato, compensando la rotazione del tripode con un ulteriore movimento delle ruote solari; tale ottimizzazione del PID però non è adatta alla sequenza automatica di salita gradino in quanto queste traslazioni sono molto precise, ma anche molto lente a ridosso del punto di arrivo. Si è deciso quindi di alzare di molto la componente integrativa per fare arrivare la carrozzina a ridosso del set con una velocità tra i 5 e i 10 cm/s per poi bloccarla nel punto corretto tramite il controllo degli errori nella sequenza automatica. Sebbene quindi i valori trovati fossero corretti per una prova di precisione, per la sequenza automatica si sono scelti $P = 0.15$ e $I = 0.05$.

Sono state poi eseguite delle prove (Tabella 5.4 caselle in azzurro) con rotazioni del tripode accompagnate da traslazioni molto brevi o nulle (0 mm /150 mm): in questo caso il contributo al set inviato dalla distanza di traslazione è talmente basso che non riesce a compensare la rotazione del tripode, causando un arretramento della sedia anziché un suo stare sul posto o avanzare. Per questi casi si è scelto di utilizzare un secondo PID con dei settaggi appositi pari a $P = 0.35$ e $I = 0$; la maggiore componente proporzionale compensa il set piccolo e permette alle solari di dare abbastanza rotazione da evitare l'indietreggiamento della carrozzina, ottenendo che quando si ruota solo il tripode la carrozzina resta sul posto o compie le piccole distanze fino a 150 mm impostate. Nella sequenza automatica di salita gradino questi valori si sono rivelati adatti, in particolare nelle fasi A3 e A4 in cui il tripode ruota e la carrozzina resta ferma sul posto, senza indietreggiare o avanzare a ridosso del gradino, causando sfregamenti con gli pneumatici.

Sistemi di controllo degli attuatori

Tabella 5.4 – Prove con rotazione delle solari e del tripode avvenute con successo.

| D_TetaP_SET (°) | D_xL_SET e D_xR_SET (mm) | | | | | |
|-----------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| | 0 | 150 | 250 | 500 | 1000 | 1500 |
| 0 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| 60 | | | | | | |



Figura 5.15.1 – Carrozzina e metro a nastro.

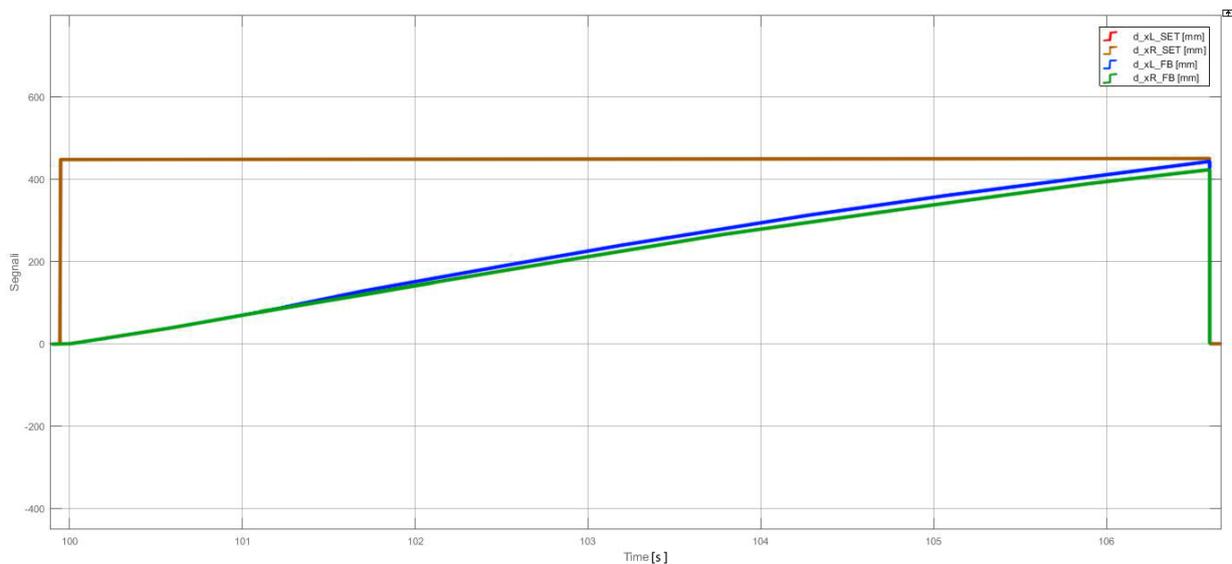


Figura 5.15.2 – Prova di avanzamento.

6 Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

In questo capitolo viene per prima cosa presentato il modello Simulink con cui è stata realizzata la sequenza automatica di Salita del singolo gradino. Questa è stata progettata sfruttando il plugin di Simulink "Stateflow", utile per la creazione della macchina a stati che replica i ragionamenti effettuati in precedenza sulla logica di funzionamento della sequenza. In seguito viene presentata la realizzazione della sequenza automatica di configurazione in Marcia in piano.

6.1 Organizzazione di base del modello Simulink

Il modello Simulink (Figura 6.1) è costituito da un primo livello che presenta le seguenti sezioni:

1. *Gestioni dei segnali in input*: si tratta della sezione adibita a smistare i segnali che vengono ricevuti dal controllore Speedgoat; produce tre vettori in output:
 - I. *Interf_sign*: raccoglie i segnali provenienti dall'interfaccia utente;
 - II. *Mode_sign*: raccoglie i segnali provenienti dall'interfaccia utente adibiti alla selezione delle diverse modalità di funzionamento della carrozzina;
 - III. *Monitor_sign*: raccoglie tutti i segnali in Volt provenienti dai trasduttori montati sulla carrozzina.
2. *Trasformazione dei segnali dei trasduttori*: si tratta della sezione adibita alla trasformazione dei segnali in Volt ricevuti dai trasduttori (contenuti nel vettore in input *Monitor_sign*) nelle rispettive grandezze fisiche come coppie, velocità di rotazione e angoli. Il vettore che raccoglie le grandezze fisiche generato in output si chiama *Monitor_val*.
3. *Modalità di funzionamento*: si tratta della sezione contenente i sottosistemi adibiti alla gestione delle singole modalità di funzionamento della sedia; questi ricevono in input i vettori *Interf_sign*, *Monitor_val* e *Mode_var* e producono in output i vettori

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

contenenti tutti i segnali in Volt di riferimento in uscita dallo Speedgoat e diretti agli azionamenti. Le modalità di funzionamento ipotizzate sono 7:

- I. *Salita gradino*: gestisce in automatico il superamento di un singolo gradino;
- II. *Discesa gradino*: gestisce in automatico la discesa di un singolo gradino;
- III. *Salita scala*: gestisce in automatico la salita di un'intera scala;
- IV. *Discesa scala*: gestisce in automatico la discesa di un'intera scala;
- V. *Marcia in piano*: gestisce in automatico la riconfigurazione della carrozzina nelle condizioni di marcia in piano, lasciando all'utente la sola gestione manuale degli spostamenti tramite il joystick;
- VI. *Manuale*: modalità che lascia all'utente il totale controllo di ogni aspetto della carrozzina;
- VII. *Stop*: modalità di emergenza attivabile tramite il fungo di emergenza e che disabilita completamente tutti gli output in uscita dallo Speedgoat, bloccando del tutto la sedia in qualsiasi momento.

Attualmente le modalità di funzionamento completate sono quelle di *Salita gradino*, *Marcia in piano*, *Manuale* e *Stop* e sono visualizzabili in questa sezione del modello Simulink ognuna all'interno del proprio sottosistema. In questo capitolo si affronteranno la progettazione delle modalità di *Salita gradino* e di *Marcia in piano*; le modalità *Manuale* e *Stop* sono descritte in modo dettagliato nella tesi di *Martini*[4]. Ogni sottosistema manda in output il vettore contenente i rispettivi segnali da inviare agli azionamenti:

- I. *Stop_out*: vettore con i segnali verso gli azionamenti prodotti dalla modalità *Stop*;
 - II. *Man_out*: vettore con i segnali verso gli azionamenti prodotti dalla modalità *Manuale*;
 - III. *SalGrad_out*: vettore con i segnali verso gli azionamenti prodotti dalla modalità *Salita gradino*;
 - IV. *MarPiano_out*: vettore con i segnali verso gli azionamenti prodotti dalla modalità *Marcia in piano*.
4. *Gestione dei segnali in output*: si tratta della sezione adibita a smistare i segnali diretti agli azionamenti e provenienti dalle singole modalità di funzionamento. In base alla

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

posizione dello switch presente sull'interfaccia utente viene scelto il vettore della modalità di funzionamento che si vuole utilizzare, il quale viene inviato gli azionamenti. Gli input *Mode_sign* e *Monitor_val* permettono la scelta della modalità tramite lo switch, mentre l'output *Mode_var* è un segnale che tiene conto della modalità di funzionamento in cui ci si trova attualmente.

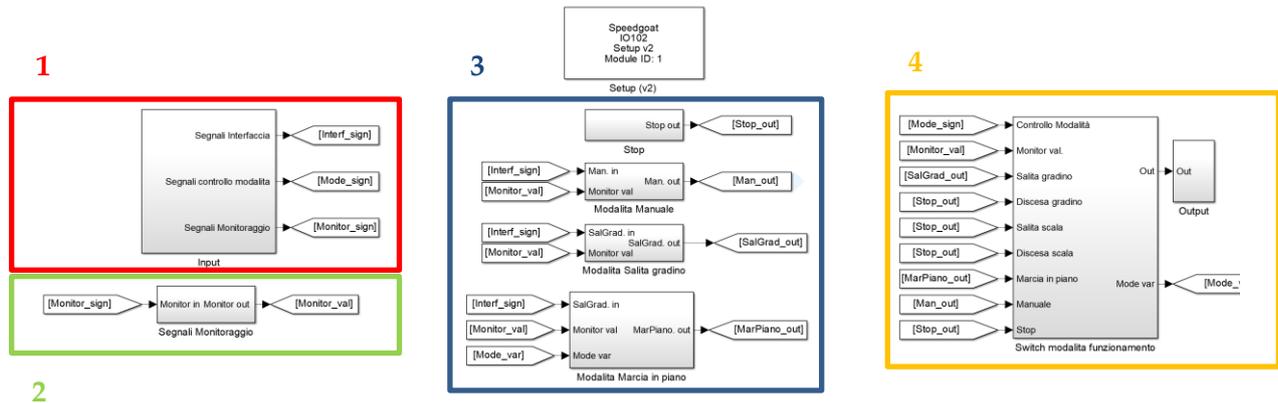


Figura 6.1 – Schema Simulink – Primo livello.

6.2 Modalità Salita gradino, interfaccia generale e funzionamento di base

Entrando nella modalità di Salita gradino (Figura 6.2.1) è possibile notare la suddivisione dell'area di lavoro in quattro diverse sezioni, qui presentate e poi descritte nel dettaglio nei successivi paragrafi:

1. *Comandi e feedback:* i vettori in input *Interf_sign* e *Monitor_val* vengono mostrati in tutte le loro componenti e, tramite l'utilizzo dei blocchi "Goto", si crea un setup che rende veloce la scelta e l'utilizzo dei segnali per la creazione della sequenza automatica.
2. *Sequenza automatica di Salita gradino:* è l'area contenente la "Stateflow Chart" o "Macchina a stati" che gestisce la logica della sequenza di salita. In input (lato sinistro) riceve i feedback dai trasduttori, gli errori provenienti dai sistemi di controllo e alcuni comandi provenienti dall'interfaccia utente; in output (lato destro) invia i set di distanze e angoli e altre variabili verso i sistemi di controllo e i grafici.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

3. *Controllo attuatori e settaggi*: è l'area in cui sono presenti i sistemi di controllo mostrati nel *Capitolo 5*; questi ricevono i set e le altre variabili utili per il loro funzionamento dalla macchina a stati, mentre ricevono i feedback dal vettore *Monitor_val*. raccoglie tutti i segnali da inviare agli attuatori nel vettore in uscita *SalGrad_out*. Sono presenti poi altri settaggi che ricevono i rispettivi segnali sempre dalla macchina a stati. Tutti i segnali prodotti vengono raccolti nel vettore in uscita *SalGrad_out* che verrà inviato agli attuatori tramite la sezione quattro del primo livello mostrata nel *Capitolo 6.1*.
4. *Sezione grafici*: area che raccoglie tutti i grafici utili per la catalogazione delle prove e la verifica della loro corretta esecuzione.

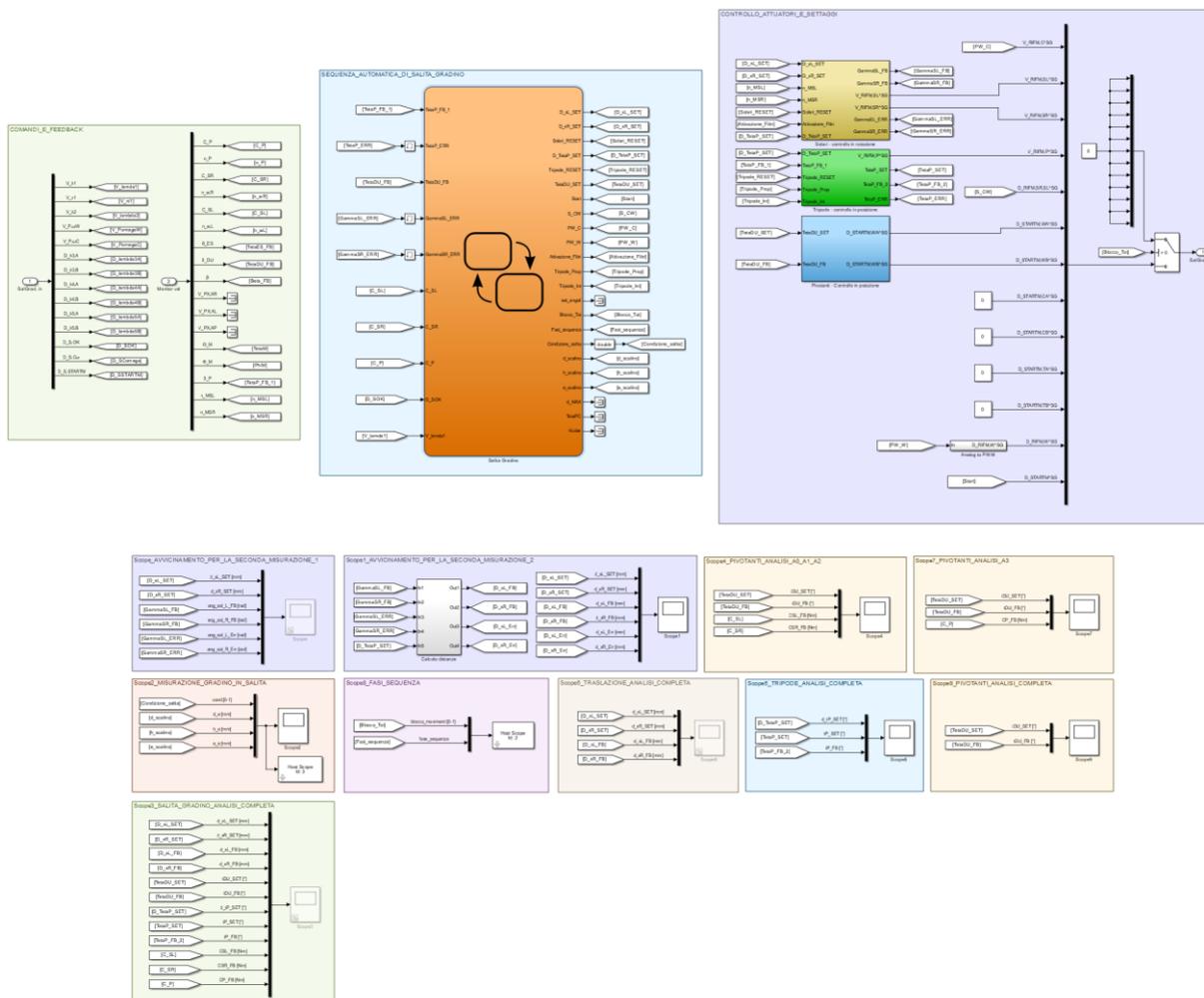


Figura 6.2.1 – Sottosistema della modalità di Salita gradino.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

Questa interfaccia è stata realizzata sulla base dello schema logico in *Figura 6.2.2*. Si può vedere come nello stateflow entrino i feedback provenienti dai sensori (in verde), gli errori calcolati all'interno dei sistemi di controllo (in rosso) ed i segnali provenienti dall'interfaccia utente (in marrone), approfonditi nel *Capitolo 6.3*; il loro scopo è principalmente quello di fare da variabili di controllo per il passaggio tra le varie fasi che compongono la macchina a stati (spiegate nel *Capitolo 6.8*) presente all'interno dello stateflow chart. Inoltre, dallo stateflow si hanno in uscita i valori di set diretti ai sistemi di controllo (in arancione), visti nel *Capitolo 5*, e le altre variabili di controllo dirette agli azionamenti (in viola), approfondite nel *Capitolo 6.4*. All'interno dello stateflow avviene la sequenza automatica di Salita gradino vista nel *Capitolo 2*; in *Figura 6.2.2* si ha però una rappresentazione diversa: non si ha una visualizzazione delle singole fasi come visto nel *Capitolo 2*, ma si mostra il percorso delle grandezze principali, fino ad ora descritte, all'interno dello stateflow.

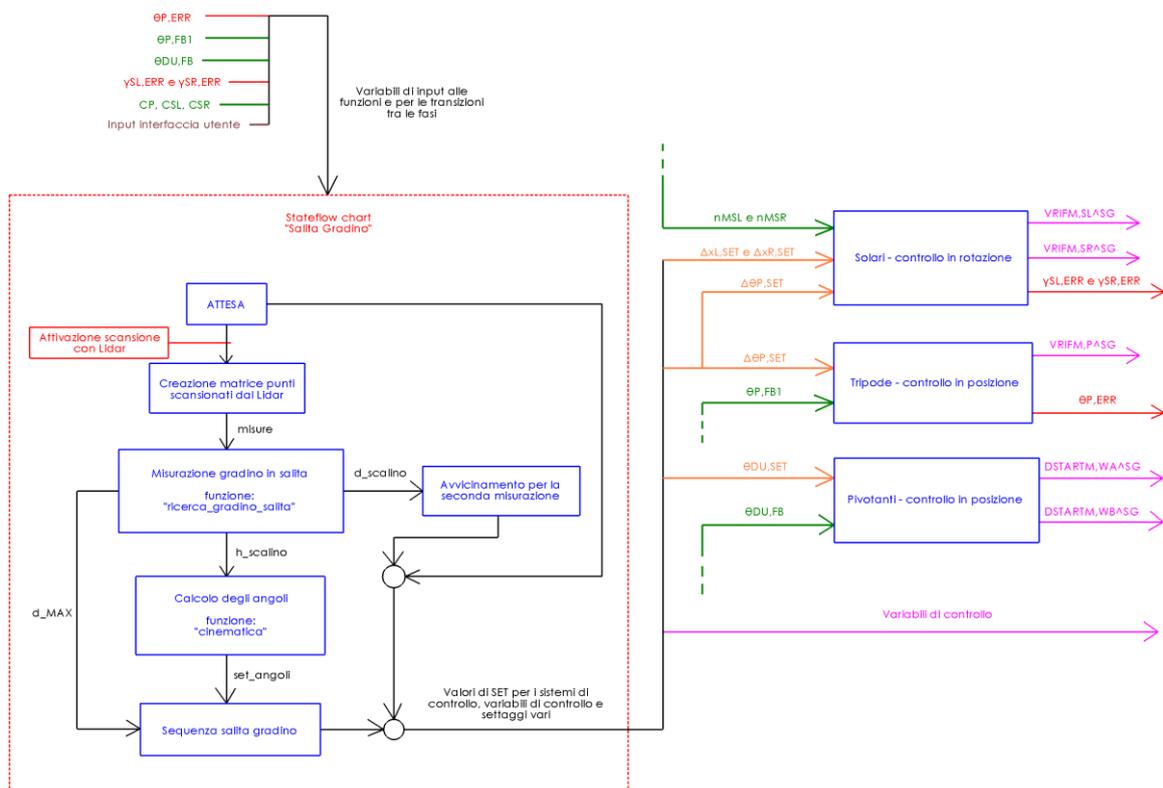


Figura 6.2.2 – Schema logico di funzionamento della modalità di Salita gradino

6.3 Modalità Salita gradino, sezione comandi e feedback

Questa sezione (Figura 6.3.1) ha lo scopo di raccogliere tutte le componenti dei vettori in input *Interf_sign* (Tabella 6.1) e *Monitor_val* (Tabella 6.2), andando a creare una “Libreria” da cui andare a prendere, secondo le proprie necessità, i segnali di cui si ha bisogno per costruire la sequenza automatica. Viene fatto un uso massiccio dei blocchi “Goto” i quali inviano il proprio segnale ai blocchi “From” che possiedono lo stesso nome (Tag), presenti nelle altre sezioni; questo permette di evitare un eccessivo disordine causato dalla presenza di un elevato numero di linee di collegamento. I segnali del vettore *Interf_sign* provengono dall’interfaccia utente (telecomando della carrozzina), l’elenco dei pulsanti da cui provengono i segnali è visibile nella Figura 6.3.2 [6].

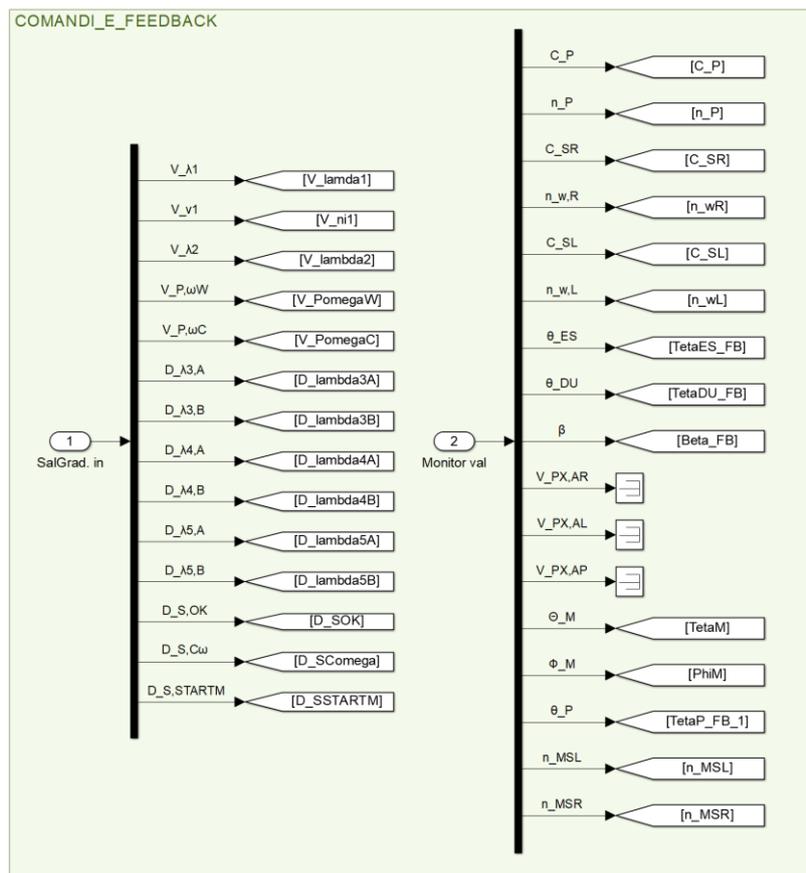


Figura 6.3.1 – Modalità di Salita gradino - sezione comandi e feedback.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

Tabella 6.1 – Componenti del vettore *Interf_sign*.

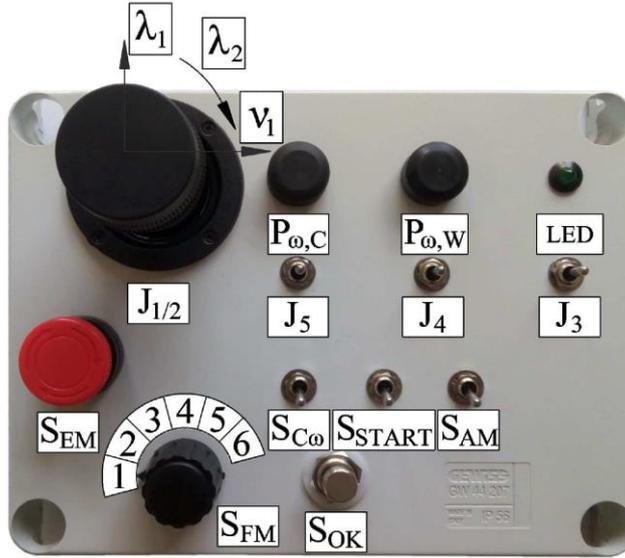
| Simbolo | Descrizione |
|-------------------|--|
| $V_{\lambda 1}$ | Riferimento azionamento ruota solare destra da interfaccia utente (± 10 V). |
| $V_{\nu 1}$ | Riferimento azionamento ruota solare sinistra da interfaccia utente (± 10 V). |
| $V_{\lambda 2}$ | Riferimento azionamento tripodi da interfaccia utente (± 10 V). |
| $V_{P,\omega W}$ | Riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da interfaccia utente (0÷10 V). |
| $V_{P,\omega C}$ | Riferimento di velocità azionamento sedile da interfaccia utente (0÷10 V). |
| $V_{\lambda 3,A}$ | Segnale avvio estensione attuatore cingolo da interfaccia utente (0/5 V). |
| $V_{\lambda 3,B}$ | Segnale avvio accorciamento attuatore cingolo da interfaccia utente (0/5 V). |
| $V_{\lambda 4,A}$ | Segnale avvio abbassamento ruote pivotanti da interfaccia utente (0/5 V). |
| $V_{\lambda 4,B}$ | Segnale avvio sollevamento ruote pivotanti da interfaccia utente (0/5 V). |
| $V_{\lambda 5,A}$ | Segnale avvio abbassamento sedile da interfaccia utente (0/5 V). |
| $V_{\lambda 5,B}$ | Segnale avvio sollevamento sedile da interfaccia utente (0/5 V). |
| $D_{S,OK}$ | Segnale avvio scansione Lidar da interfaccia utente (0/1 V). |
| $D_{S,C\omega}$ | Segnale commutazione controllo coppia/velocità ruote solari da interfaccia utente (0/5 V). |
| $D_{S,STARTM}$ | Segnale abilitazione azionamenti unità di locomozione e sblocco dei freni da interfaccia utente (0/5 V). |

Tabella 6.2 – Componenti del vettore *Monitor_val*.

| Simbolo | Descrizione |
|-------------------|--|
| C_P | Coppia applicata ai tripodi (Nm). |
| n_P | Velocità di rotazione dei tripodi (rpm). |
| C_{SR} | Coppia applicata alla ruota solare destra (Nm). |
| $n_{w,R}$ | Velocità di rotazione delle ruote gommate di destra (rpm). |
| C_{SL} | Coppia applicata alla ruota solare sinistra (Nm). |
| $n_{w,L}$ | Velocità di rotazione delle ruote gommate di sinistra (rpm). |
| θ_{ES_FB} | Angolo del cingolo (°). |
| θ_{DU_FB} | Angolo delle ruote pivotanti (°). |
| β_FB | Angolo della seduta (°). |
| $V_{PX,AR}$ | Segnale sensore di soglia anteriore destro (V). |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | |
|---------------------|---|
| $V_{PX,AL}$ | Segnale sensore di soglia anteriore sinistro (V). |
| $V_{PX,P}$ | Segnale sensore di soglia posteriore (V). |
| θ_M | Angolo assoluto del telaio PC ($^\circ$). |
| ϕ_M | Angolo di rollio della seduta ($^\circ$). |
| $\theta_{P_FB_1}$ | Angolo del tripode compreso tra 0 e 120 ($^\circ$). |
| n_{MSL} | Velocità di rotazione motore della ruota solare sinistra (rpm). |
| n_{MSR} | Velocità di rotazione motore della ruota solare destra (rpm). |



| | | | | |
|-----------|-------------|--|---|---|
| $J_{1/2}$ | λ_1 | ↑ | $V_{\lambda_1} > 0$ | Velocità positiva ruota solare destra ($\omega_{SR} > 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | | • | $V_{\lambda_1} = 0$ | Arresto ruota solare destra ($\omega_{SR} = 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | | ↓ | $V_{\lambda_1} < 0$ | Velocità negativa ruota solare destra ($\omega_{SR} < 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | v_1 | → | $V_{v_1} > 0$ | Velocità positiva ruota solare sinistra ($\omega_{SL} > 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | | • | $V_{v_1} = 0$ | Arresto ruota solare sinistra ($\omega_{SL} = 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | | ← | $V_{v_1} < 0$ | Velocità negativa ruota solare sinistra ($\omega_{SL} < 0$) (solo modalità manuale cablata) |
| | λ_2 | ↻ | $V_{\lambda_2} > 0$ | Velocità negativa tripodi ($\Omega < 0$) |
| | | • | $V_{\lambda_2} = 0$ | Arresto tripodi ($\Omega = 0$) |
| | | ↻ | $V_{\lambda_2} < 0$ | Velocità positiva tripodi ($\Omega > 0$) |
| J_3 | ↑ | $D_{\lambda_3,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda_3,B} = 5 \text{ V}$ | Accorciamento attuatore cingolo ($\dot{\theta}_{ES} < 0$) | |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | | |
|--------------------|------------|--|--|
| | ● | $D_{\lambda 3,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda 3,B} = 0 \text{ V}$ | Arresto attuatore cingolo ($\dot{\theta}_{ES} = 0$) |
| | ↓ | $D_{\lambda 3,A} = 5 \text{ V}, D_{\lambda 3,B} = 0 \text{ V}$ | Allungamento attuatore cingolo ($\dot{\theta}_{ES} > 0$) |
| J ₄ | ↑ | $D_{\lambda 4,A} = 5 \text{ V}, D_{\lambda 4,B} = 0 \text{ V}$ | Sollevamento ruote pivotanti ($\dot{\theta}_{DU} < 0$) |
| | ● | $D_{\lambda 4,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda 4,B} = 0 \text{ V}$ | Arresto ruote pivotanti ($\dot{\theta}_{DU} = 0$) |
| | ↓ | $D_{\lambda 4,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda 4,B} = 5 \text{ V}$ | Abbassamento ruote pivotanti ($\dot{\theta}_{DU} > 0$) |
| J ₅ | ↑ | $D_{\lambda 5,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda 5,B} = 5 \text{ V}$ | Sollevamento sedile ($\dot{\beta} > 0$) |
| | ● | $D_{\lambda 5,A} = 0 \text{ V}, D_{\lambda 5,B} = 0 \text{ V}$ | Arresto sedile ($\dot{\beta} = 0$) |
| | ↓ | $D_{\lambda 5,A} = 5 \text{ V}, D_{\lambda 5,B} = 0 \text{ V}$ | Abbassamento sedile ($\dot{\beta} < 0$) |
| P _{ωC} | ↻ | $V_{P\omega C} \uparrow$ | Incremento riferimento di velocità azionamento sedile |
| | ↺ | $V_{P\omega C} \downarrow$ | Decremento riferimento di velocità azionamento sedile |
| P _{ωW} | ↻ | $V_{P\omega W} \uparrow$ | Incremento riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti |
| | ↺ | $V_{P\omega W} \downarrow$ | Decremento riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti |
| S _{Cω} | ↑ | $D_{S,C\omega} = 5 \text{ V}$ | Attivazione controllo coppia azionamenti ruote solari |
| | ↓ | $D_{S,C\omega} = 0 \text{ V}$ | Attivazione controllo velocità azionamenti ruote solari |
| S _{AM} | ↑ | $D_{S,AM} = 0 \text{ V}$ | Attivazione modalità tramite controllore |
| | ↓ | $D_{S,AM} = 5 \text{ V}$ | Attivazione modalità manuale cablata |
| S _{START} | ↑ | $D_{S,STARTM} = 5 \text{ V}$ | Abilitazione azionamenti ruote solari e tripodi |
| | ↓ | $D_{S,STARTM} = 0 \text{ V}$ | Disabilitazione azionamenti ruote solari e tripodi |
| S _{OK} | Premuto | $D_{S,OK} = 5 \text{ V}$ | - |
| | Rilasciato | $D_{S,OK} = 0 \text{ V}$ | - |
| S _{EM} | Premuto | $D_{S,EM} = 0 \text{ V}$ | Disalimentazione azionamenti |
| | ↻ | $D_{S,EM} = 5 \text{ V}$ | Alimentazione azionamenti |
| S _{FM} | ↻ - ↺ | $V_{S,FM} \uparrow - V_{S,FM} \downarrow$ | Variazione modalità di funzionamento (vedi Tabella 6-8) |

Figura 6.3.2 – Telecomando (sopra), descrizione interfaccia utente (sotto).

6.4 Modalità Salita gradino, sezione controllo attuatori e settaggi

Questa sezione (Figura 6.4) ha lo scopo di andare a creare tutti i riferimenti in Volt diretti agli attuatori (Tabella 6.3), raccolti nel vettore in output *SalGrad_out*. I riferimenti per la movimentazione delle ruote solari (V_{RIFM,SL^SG} ; V_{RIFM,SR^SG}), dei tripodi (V_{RIFM,P^SG}) e delle ruote pivotanti (D_{STARTM,WA^SG} ; D_{STARTM,WB^SG}) vengono creati nei rispettivi sistemi di controllo già descritti nel *Capitolo 5*; questi ricevono le grandezze di set e le variabili di funzionamento dalla macchina a stati, mentre ricevono i feedback dal vettore *Monitor_val*. I riferimenti per la movimentazione del sedile (D_{STARTM,CA^SG} ; D_{STARTM,CB^SG}) e del il cingolo (D_{STARTM,TA^SG} ; D_{STARTM,TB^SG}) non sono presenti in quanto al momento guasti sulla carrozzina, ma verranno implementati in futuro in modo del tutto analogo a quanto fatto con il sottosistema di controllo in posizione delle ruote pivotanti. Gli altri riferimenti (V_{RIFM,C^SG} ; D_{RIFM,SR,SL^SG} ; D_{RIFM,W^SG} ; D_{STARTM^SG}) ricevono i rispettivi valori in Volt sempre dalla macchina a stati. Prima del vettore in uscita è presente uno Switch che consente, dando un valore maggiore di zero al segnale *Blocco_Tot*, di bloccare totalmente tutti gli azionamenti, ottenendo lo stesso effetto che si ha nella modalità "Stop" descritta nel *Capitolo 6.1*; tale segnale arriva direttamente dalla macchina a stati ed è utile per bloccare la sedia in determinate fasi della sequenza automatica.

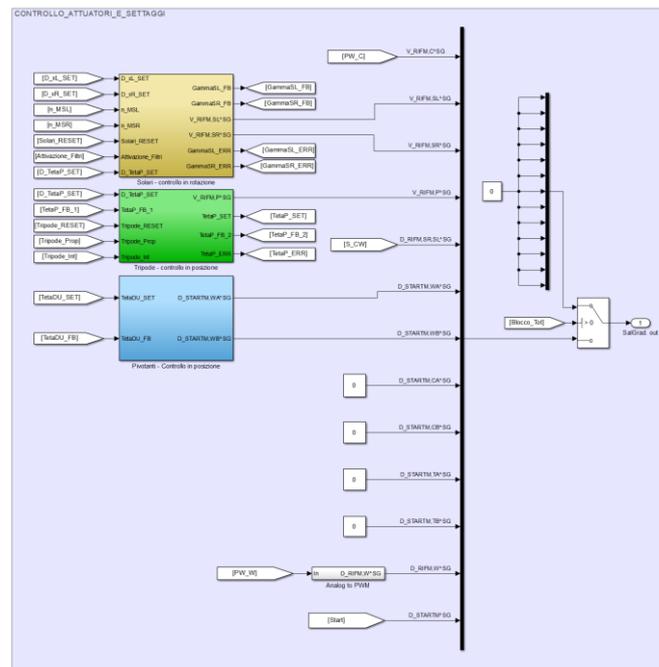


Figura 6.4 – Modalità di Salita gradino - sezione controllo attuatori e settaggi.

Tabella 6.3 – Componenti del vettore *SalGrad_out*.

| Simbolo | Descrizione |
|-----------------------|---|
| $V_{RIFM,C}^{SG}$ | Riferimento di velocità azionamento sedile da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| $V_{RIFM,SL}^{SG}$ | Riferimento azionamento ruota solare sinistra da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| $V_{RIFM,SR}^{SG}$ | Riferimento azionamento ruota solare destra da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| $V_{RIFM,P}^{SG}$ | Riferimento di velocità azionamento tripodì da controllore Speedgoat (± 10 V). |
| $D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$ | Segnale commutazione controllo coppia/velocità ruote solari da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,WA}^{SG}$ | Segnale avvio abbassamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,WB}^{SG}$ | Segnale avvio sollevamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,CA}^{SG}$ | Segnale avvio abbassamento sedile da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,CB}^{SG}$ | Segnale avvio sollevamento sedile da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,TA}^{SG}$ | Segnale avvio estensione attuatore cingolo da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{STARTM,TB}^{SG}$ | Segnale avvio accorciamento attuatore cingolo da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| $D_{RIFM,W}^{SG}$ | Riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| D_{STARTM}^{SG} | Segnale abilitazione azionamenti unità di locomozione e sblocco freni da controllore Speedgoat (0/1 V). |

6.5 Modalità Salita gradino, sezione grafici

Questa sezione (Figura 6.5) raccoglie tutti i grafici (Tabella 6.4) utili a studiare il comportamento della sedia durante le fasi automatiche; è possibile verificare il corretto raggiungimento dei set imposti ai diversi attuatori, verificare in quale fase della sequenza automatica ci si trova e verificare la correttezza delle misurazioni effettuate dal Lidar. Tutti i

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

segnali provengono dalle sezioni viste nei *Paragrafi 5.3 e 5.4* e dalla sezione contenente la macchina a stati.

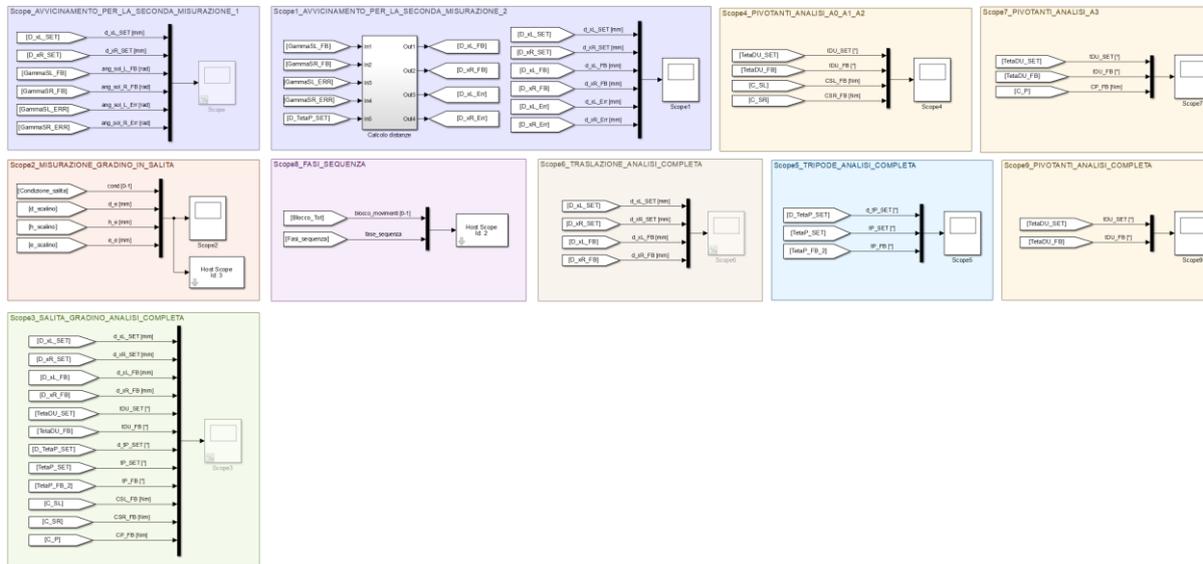


Figura 6.5 – Modalità di Salita gradino - sezione grafici.

Tabella 6.4 – Descrizione dei grafici.

| Nome | Descrizione |
|---|--|
| Scope - Avvicinamento per la seconda misurazione 1 | Grafico utile per verificare il comportamento delle ruote solari durante il primo avvicinamento automatico. |
| Scope1 - Avvicinamento per la seconda misurazione 2 | Grafico utile per verificare le distanze orizzontali compiute dalla carrozzina durante il primo avvicinamento automatico. |
| Scope4 – Pivotanti analisi A0 A1 A2 | Grafico utile per verificare il comportamento delle ruote pivotanti e verificare le coppie a cui sono sottoposte le ruote solari durante la fase A0A1A2. |
| Scope7 – Pivotanti analisi A3 | Grafico utile per verificare il comportamento delle ruote pivotanti e verificare le coppie a cui sono sottoposti i tripodi durante la fase A3. |
| Scope9 – Pivotanti analisi completa | Grafico utile per verificare il comportamento delle ruote pivotanti durante la sequenza di salita gradino. |
| Scope5 – Tripode analisi completa | Grafico utile per verificare il comportamento dei tripodi durante la sequenza di salita gradino. |
| Scope6 – Traslazione analisi completa | Grafico utile per verificare le distanze orizzontali compiute dalla carrozzina durante la sequenza di salita gradino. |
| Scope8 – Fasi sequenza | Grafico utile per verificare in quale fase della sequenza di salita gradino ci si trova e se è attivato il blocco degli azionamenti. |
| Scope2 – Misurazione gradino in salita | Grafico utile per verificare ad ogni misurazione compiuta dal Lidar che la distanza dal gradino, la sua altezza, lo |

| | |
|--|---|
| | spazio successivo e la superabilità rilevate con l'algoritmo e le misurazioni riflettano quelle reali. |
| Scope3 – Salita gradino analisi completa | Grafico utile per verificare tutti gli aspetti della carrozzina durante la sequenza di salita gradino. Di difficile lettura, ma utile per controllare il passaggio da una fase all'altra della sequenza automatica. |

6.6 Modalità Salita gradino, sezione sequenza automatica di Salita gradino

Questa sezione (Figura 6.6.1) contiene la "Stateflow Chart" o *macchina a stati* che permette di eseguire la sequenza automatica di salita gradino. Il chart (in arancione) presenta il lato sinistro in cui arrivano tutte le grandezze in input alla macchina a stati e il lato destro in cui partono le grandezze in output prodotte al suo interno. Le grandezze in input sono alcuni tra i feedback provenienti dal vettore *Monitor_val*, gli errori provenienti dai sistemi di controllo e i comandi da interfaccia utente provenienti dal vettore *Interf_sign*. Interposti tra i segnali provenienti dai sistemi di controllo ed il chart sono presenti tre blocchi "Memory", utili a mandare in input un segnale durante il primo "step time" di esecuzione della simulazione, quando non si ha ancora nulla in uscita dai sistemi di controllo. Le grandezze in output sono: i set di distanze e angoli diretti ai sistemi di controllo visti nel *Capitolo 5*; le variabili utili a controllare i suddetti sistemi; i restanti segnali che compongono il vettore *SalGrad_out* e i segnali diretti ai grafici per la

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

visualizzazione delle misurazioni effettuate dal Lidar e delle fasi. Tutti i segnali che non sono stati descritti fino ad ora nella trattazione sono presenti nella *Tabella 6.5*.

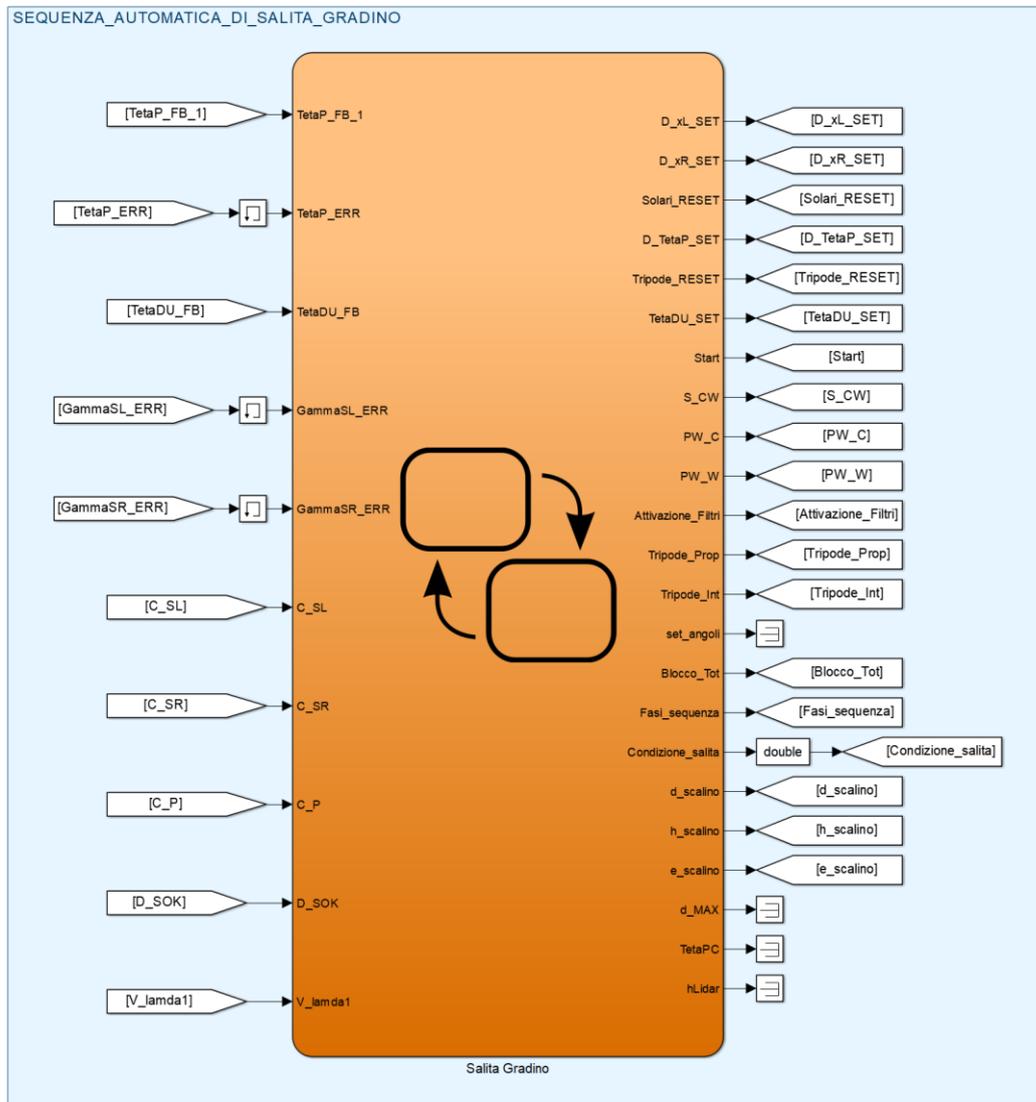


Figura 6.6.1 – Modalità di Salita gradino - sezione sequenza automatica di Salita gradino.

Tabella 6.5 – Restanti segnali in uscita dallo *Stateflow Chart*.

| Simbolo | Descrizione |
|--------------|---|
| Start | Corrisponde al segnale D_{STARTM}^{SG} di abilitazione azionamenti unità di locomozione e sblocco freni da controllore Speedgoat (0/1 V). |
| S_CW | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$ di commutazione controllo velocità/coppia ruote solari da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| PW_C | Corrisponde al segnale $V_{RIFM,C}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento sedile da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| PW_W | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,W}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0÷10 V). |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | |
|---------------------------------|---|
| <i>set_angoli</i> | Vettore che raccoglie tutti gli angoli di set della sequenza automatica e diretti ai sistemi di controllo. Al momento inutilizzato, può essere interessante se rappresentato in un grafico |
| <i>Blocco_Tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). |
| <i>Fasi_sequenza</i> | Variabile che indica in quale fase si trova la sequenza di salita gradino (0÷7). |
| <i>Condizione_salita</i> | Variabile che indica se il gradino rilevato dal Lidar è superabile oppure no (0/1). |
| <i>d_scalino</i> | Variabile che rappresenta la distanza rilevata tra il Lidar e lo scalino (mm). |
| <i>h_scalino</i> | Variabile che rappresenta l'altezza del gradino rilevato dal Lidar (mm). |
| <i>e_scalino</i> | Variabile che rappresenta lo spazio successivo al gradino rilevato dal Lidar (mm). |
| <i>d_MAX</i> | Variabile che rappresenta lo spazio tra il gradino e il bordo dello pneumatico più vicino ad esso, ricavata grazie alle misurazioni con il Lidar e alla geometria (mm). |
| <i>TetaPC</i> | Angolo assoluto tra Telaio PC e orizzontale, ricavato grazie ai segnali prodotti dai trasduttori e alla geometria (°). |
| <i>hLidar</i> | Altezza di montaggio del Lidar, ricavato grazie ai segnali prodotti dai trasduttori e alla geometria (mm). Gli ultimi tre segnali sono inutilizzati, ma può essere interessante visualizzarli in dei grafici. |

6.7 Modalità Salita gradino, funzionamento di una macchina a stati

Una volta entrati nella *Stateflow Chart "Salita Gradino"* è possibile visualizzare la macchina a stati che permette di eseguire la sequenza automatica. Una macchina a stati funziona nel seguente modo:

1. L'elemento fondamentale è costituito dagli "*state*" o "*stati*", dei rettangoli gialli che rappresentano le fasi all'interno delle quali si può trovare la sequenza automatica. All'interno di uno stato si ha la prima riga in cui è riportato il suo nome "*state name*" e le righe seguenti in cui sono riportate le istruzioni "*state actions*", generalmente semplici, da eseguire al suo interno. Le istruzioni sono precedute dalla "*type of state action*", una riga di codice che definisce quando devono essere eseguite, ci sono diverse modalità di esecuzione delle istruzioni:
 - I. *Entry* o *en*: le istruzioni che la succedono vengono eseguite nel time step in cui la simulazione entra nello stato;
 - II. *During* o *du*: le istruzioni che la succedono vengono eseguite ripetutamente in tutti i time step in cui la simulazione si trova all'interno dello stato;

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

- III. *Exit* o *ex*: le istruzioni che la succedono vengono eseguite nel time step in cui la simulazione esce dallo stato.
- IV. *On after(n,tick)*: le istruzioni che la succedono avvengono dopo n time step dal momento di entrata nello stato.

Le modalità di esecuzione possono essere all'occorrenza combinate (ad esempio: *en, du*;) ed è possibile inserire all'interno di uno stesso stato diversi paragrafi di istruzioni ognuno preceduto dal proprio stato, per coprire più casistiche. Gli stati possono essere posizionati uno dentro l'altro: lo stato più esterno prende il nome di "*parent*", quelli più interni prendono il nome di "*children*"; quando la simulazione si trova in uno stato children si ha obbligatoriamente che il rispettivo stato parent sia anch'esso attivo.

2. Gli stati sono collegati tra loro da frecce blu chiamate "*transitions*" o "*transizioni*" che determinano il passaggio da uno stato all'altro. Le transizioni possono essere vuote oppure possono presentare delle linee di codice di diversa tipologia:

- I. [*conditions*]: il passaggio da uno stato all'altro si verifica solo nel caso in cui la condizione sia verificata;
- II. {*conditional actions*}; al momento del passaggio da uno stato all'altro viene eseguita la riga di codice contenuta nelle parentesi graffe;
- III. [*conditions*]{*conditional actions*}; il passaggio da uno stato all'altro si verifica solo nel caso in cui la condizione tra parentesi quadre sia verificata. Questo innesca l'esecuzione del codice contenuto tra le parentesi graffe.

In tutti i casi si può precedere le istruzioni con le parole "*after(n,tick)*", ciò significa che il controllo della condizione avverrà solo dopo n time step dall'entrata nello stato da cui la transizione parte. Nel caso in cui più transizioni partano in uscita da uno stato, il controllo delle condizioni avverrà seguendo una numerazione visibile a schermo. Esiste infine una tipologia speciale di transizione chiamata "*default transition*", costituita da un pallino e da una freccia blu che punta verso uno stato, questo stato rappresenta il punto di partenza della simulazione all'interno del chart. Nel caso di un modello *parent* e *children* si avrà una *default transition* per lo stato *parent* e una *default transition* per uno

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

degli stati *children*. Le *default transitions* possono contenere delle *conditional actions*.

3. I "*junction*" sono dei cerchi arancioni che servono per gestire le transizioni. Nel caso più semplice possono venire usati per convogliare più transizioni su di essi e farne partire una sola o l'opposto; possono essere usati per dare ordine alla macchina a stati o, nei casi più complessi, per creare cicli *if*, *loop for* e *while*.
4. Le "*Simulink function*" e le "*MATLAB function*" sono dei box contenenti funzioni Simulink o Matlab che possono venire richiamati all'interno degli stati nella classica maniera in cui sia farebbe in uno script di Matlab. Sono usate per mandare in output delle grandezze che non sarebbe possibile ricavare con le limitazioni sull'utilizzo di funzioni complesse imposte dal chart dello stateflow.

In una macchina a stati si ha il passaggio da uno stato all'altro in base al verificarsi delle condizioni contenute nelle transizioni; durante la simulazione il programma passa da una fase all'altra e staziona all'interno di determinate fasi fino al verificarsi delle transizioni che ne determinano l'uscita. All'interno di ogni stato vengono eseguite le istruzioni che costituiscono una fase o sottofase di una sequenza automatica. In ogni step time vengono presi tutti i valori dei segnali in input, mentre i segnali in output vengono mandati in uscita; solo i segnali in output che si modificano all'interno dello stato in cui si trova la simulazione vengono aggiornati, i segnali determinati negli stati precedenti non vengono più modificati a meno di non tornarci attraverso le successive transizioni.

6.8 Modalità Salita gradino, macchina a stati Salita gradino vista nel dettaglio

La macchina a stati è costituita da uno stato di tipo *parent* e da una lunga serie di stati di tipo *children*; lo stato *parent* esegue le scansioni del gradino con il Lidar, gli stati *children* gestiscono le singole fasi della sequenza automatica descritta nel *Capitolo 2* e riproposta in *Figura 6.6.2*. Nelle seguenti sezioni verranno descritti tutti gli stati che costituiscono lo stateflow i quali ricalcano totalmente le fasi presenti nella *Figura 6.6.2*.

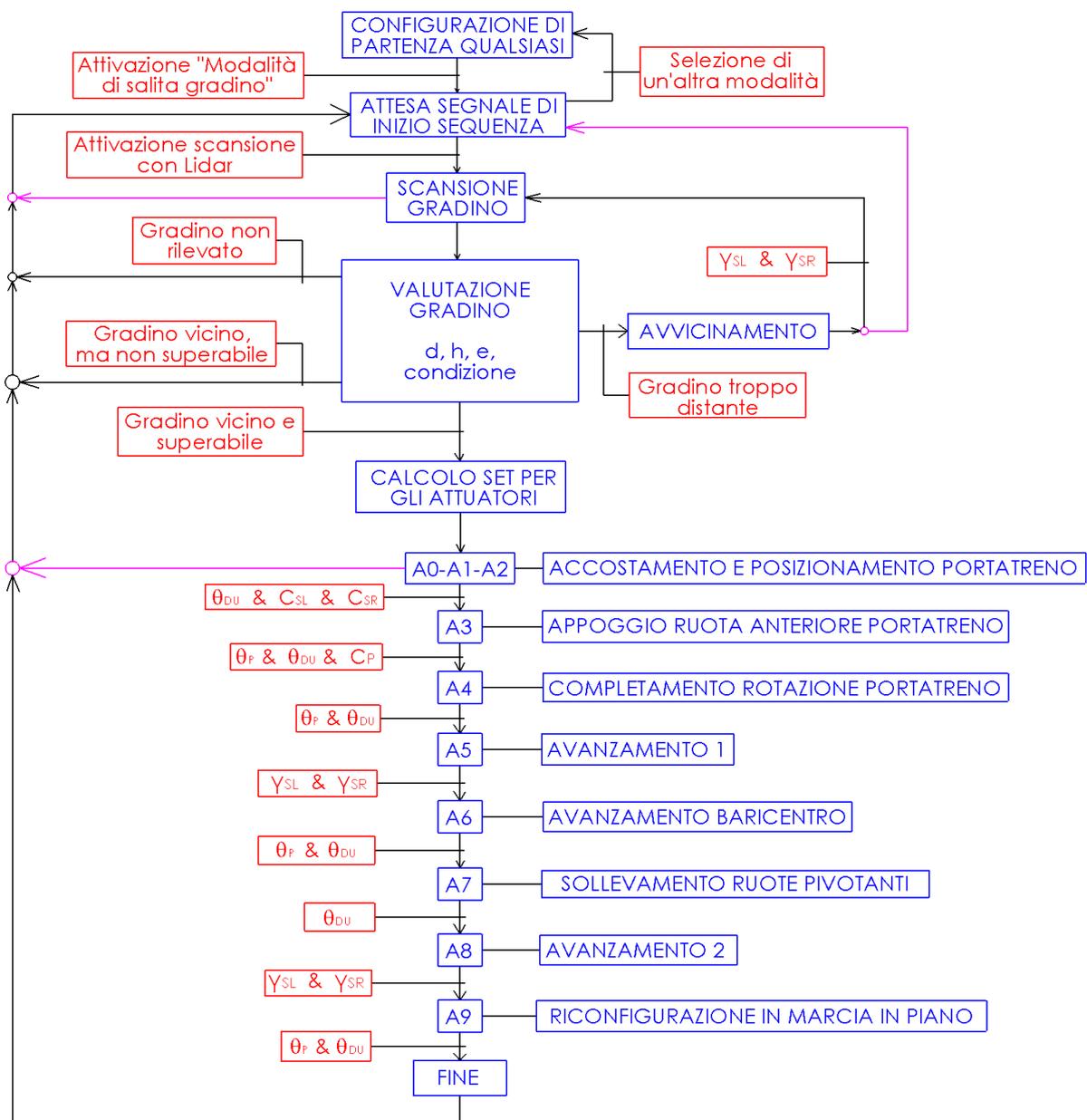


Figura 6.6.2 – Sequenza logica di Salita gradino.

6.8.1 Stato "Scansione Lidar"

Appena avviata la simulazione la *default transition* entra nello stato "SCANSIONE_LIDAR" (Figura 6.7); questo stato di tipo *parent* resta attivo durante l'intera simulazione e ad ogni step time ripete l'istruzione di eseguire la funzione Simulink "scan_lidar", già spiegata nel dettaglio nel Capitolo 4. Tale funzione (Figura 6.8), ogni volta che viene richiamata, restituisce in output un vettore 1x2 chiamato "lidar_out" contenente le coordinate polari di un punto rilevato dal Lidar; il primo componente del vettore è la distanza in millimetri del punto, il secondo componente è il suo angolo in gradi. Ad ogni step time il vettore lidar_out viene sovrascritto, questo perché il Lidar gira e scansiona costantemente durante tutta la simulazione, anche quando non serve, in quanto il setup attuale non consente di fermare il Lidar tramite codice Matlab/Simulink. Questo significa che la quasi totalità dei punti scansionati viene cancellata, il loro salvataggio su una matrice avviene, quando richiesto, all'interno di uno degli stati children che saranno descritti in seguito. Una miglioria da fare in futuro sarà quella di rendere l'accensione/spegnimento e velocità di rotazione del Lidar controllabili all'interno della macchina a stati, in modo da poter accendere e scansionare solamente quando necessario.

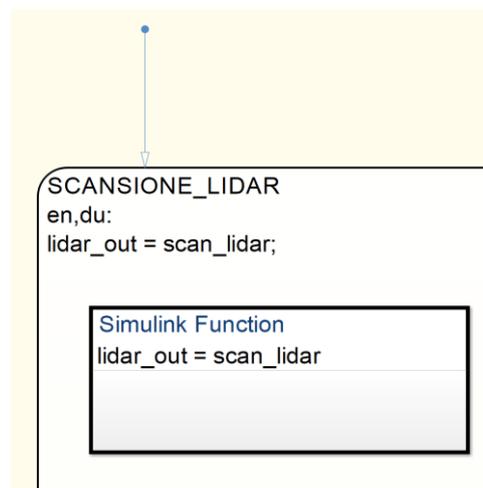


Figura 6.7 – Stato "Scansione Lidar" – Dettaglio.

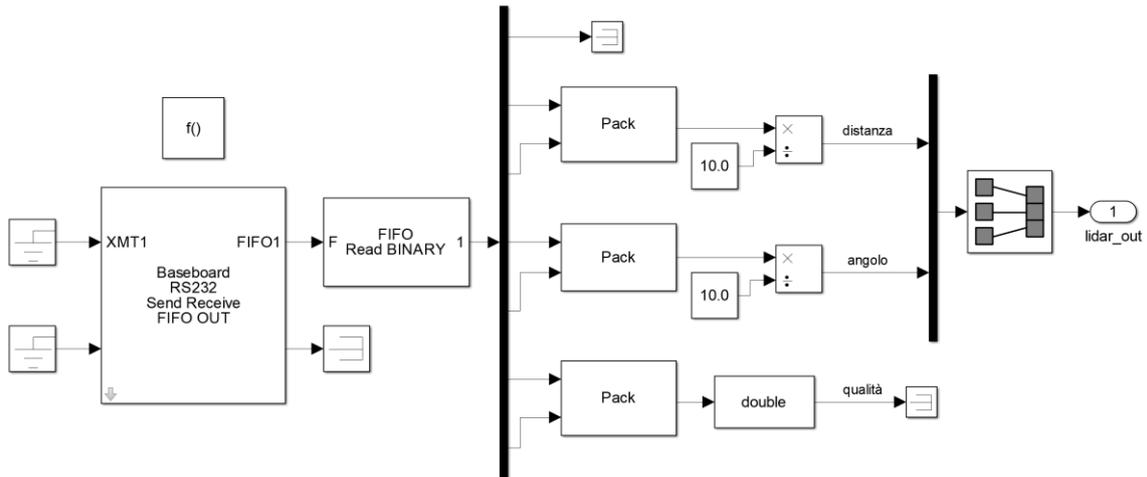


Figura 6.8 – Funzione Simulink “scan_lidar”.

6.8.2 Stato “Attesa”

Contemporaneamente all’entrata nello stato parent “SCANSIONE_LIDAR” si ha l’entrata, tramite una seconda default transition, nel primo stato di tipo children “ATTESA” (Figura 6.9). Prima dell’ingresso nello stato viene definita una matrice 5000x2 di zeri chiamata “*misure*”, questa sarà la variabile in cui verranno salvati, quando richiesto, i punti scansionati dal Lidar. La macchina a stati resta all’interno dello stato *Attesa* fino a quando non viene selezionata tramite lo switch la modalità di salita gradino (per abilitare l’invio degli output di questa modalità agli azionamenti selezionando la posizione numero 6 del selettore S_{FM}) e successivamente viene premuto il tasto “ $D_{S,OK}$ ” dall’interfaccia utente. Fino a che la macchina a stati si trova all’interno dello stato *Attesa* è possibile selezionare liberamente le altre modalità tramite lo switch e compiere i movimenti che si vuole; lo scopo di questo stato è infatti quello di essere una fase temporanea in cui la sequenza di salita gradino aspetta di venire avviata una volta che l’utente ha posizionato la sedia di fronte al gradino ed è pronto ad iniziare la scansione con il Lidar. Una volta premuto il tasto $D_{S,OK}$ è possibile tornare allo stato *Attesa* aspettando la naturale conclusione della sequenza automatica oppure spingendo in avanti il joystick in qualsiasi momento. All’interno dello stato vengono inizializzate la maggior parte delle variabili che serviranno per far funzionare la sequenza automatica; il loro utilizzo viene spiegato nel dettaglio in *Tabella 6.6*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

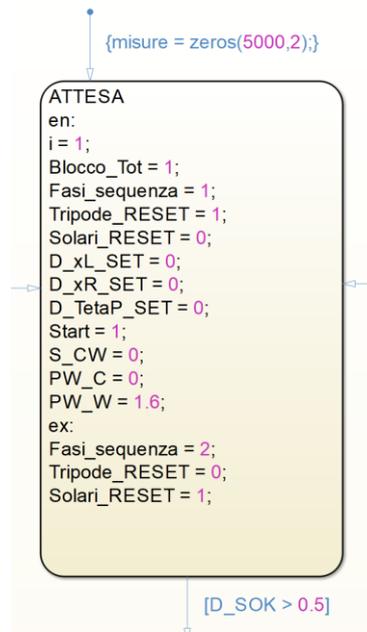


Figura 6.9 – Stato “Attesa”.

Tabella 6.6 – Variabili dello stato “Attesa”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|--|
| <i>i</i> | Variabile che serve a conteggiare il numero di scansioni effettuate dal Lidar. | Viene inizializzata ad 1. |
| <i>Blocco_Tot</i> | Variabile che provoca l’annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene inizializzata ad 1, bloccando la sedia nel momento in cui si è attivata la modalità salita gradino con lo switch, ma si è ancora nello stato di <i>Attesa</i> . |
| <i>Fasi_sequenza</i> | Variabile che indica in quale fase si trova la sequenza di salita gradino (0÷7). | Viene inizializzata ad 1, numero che identificata che la sedia è in stato di attesa. All’uscita dallo stato diventa 2, numero che identifica la fase di scansione Lidar e di calcolo dei parametri del gradino. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene inizializzata ad 1. È importante notare che questo non causa il reset del conteggio e il salvataggio dell’angolo; ciò che lo causa è il successivo abbassamento a 0 una volta che si esce dallo stato di attesa. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l’azzeramento dell’integratore che conta l’angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene inizializzata a 0. È importante notare che questo non causa il reset dell’integratore; ciò che lo causa è il successivo innalzamento ad 1 una volta che si esce dallo stato di attesa. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|---------------------------|---|--|
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene inizializzata a 0; nonostante l'integratore non sia ancora azzerato questo non causa problemi in quanto <i>Blocco_Tot</i> vale 1 e la sedia è forzatamente bloccata. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene inizializzata a 0; nonostante l'integratore non sia ancora azzerato questo non causa problemi in quanto <i>Blocco_Tot</i> vale 1 e la sedia è forzatamente bloccata. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene inizializzata a 0; nonostante l'angolo iniziale non sia ancora azzerato questo non causa problemi in quanto <i>Blocco_Tot</i> vale 1 e la sedia è forzatamente bloccata. |
| <i>Start</i> | Corrisponde al segnale D_{STARTM}^{SG} di abilitazione azionamenti unità di locomozione e sblocco freni da controllore Speedgoat (0/1 V). | Viene inizializzato ad 1 (azionamenti abilitati e freni sbloccati) e viene lasciato così per tutta la sequenza in quanto il blocco degli azionamenti viene fatto con la variabile <i>Blocco_Tot</i> . |
| <i>S_CW</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$ di commutazione controllo velocità/coppia ruote solari da controllore Speedgoat (0/5 V). | Viene inizializzato a 0 (controllo in velocità) e viene lasciato così per tutta la sequenza. |
| <i>PW_C</i> | Corrisponde al segnale $V_{RIFM,C}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento sedile da controllore Speedgoat (0÷10 V). | Viene inizializzato a 0 e lasciato così per tutta la sequenza di salita in quanto l'azionamento del sedile è rotto e non è stato possibile effettuare test sul valore ottimale da dare. |
| <i>PW_W</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,W}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0÷10 V). | Viene inizializzato ad 1.6 e lasciato così per tutta la sequenza di salita in quanto è il valore ottimale per coniugare una velocità di movimento delle pivotanti non troppo lenta ed una ottima precisione di raggiungimento del set imposto (errori nell'ordine del decimo di grado). Può essere un valore che in futuro si può pensare di modificare per velocizzare alcune fasi della sequenza automatica. |
| <i>misure</i> | Matrice 5000x2 contenente 5000 punti rilevati in 5 secondi di scansione consecutivi del Lidar (1 punto ogni step time di 0.001). | Inizializzazione della matrice di zeri. |
| <i>D_SOK</i> | Segnale avvio scansione Lidar da interfaccia utente (0/1 V). | Si ha l'uscita dello stato di attesa quando super il valore di 0.5 V, cioè quando il tasto viene premuto. |

6.8.3 Stato "Creazione matrice Lidar"

Una volta premuto il tasto $D_{S,OK}$ si entra nello stato "CREAZIONE_MATRICE_LIDAR" (Figura 6.10), che esegue la fase di salvataggio dei punti scansionati dal Lidar all'interno della matrice *measure*. Appena entrati nello stato avviene il salvataggio del primo punto nella riga 1 della matrice *measure* e il successivo aumento di una unità della variabile di conteggio *i*. Successivamente vengono controllate le due transizioni in uscita dallo stato: la transizione numero 1 si verifica solo quando la variabile di conteggio raggiunge il valore di 5001, la transizione numero 2 si verifica quando il joystick viene spinto in avanti, annullando il salvataggio dei punti in qualsiasi momento si voglia e tornando alla fase di *Attesa*. Se nessuna delle due transizioni viene verificata la simulazione resta all'interno dello stato, ripetendo il codice (in quanto la *type of state action* è di tipologia *en,du:*) e salvando il secondo punto scansionato dal Lidar nella seconda riga della matrice (in quanto $i = 2$); di fatto si è realizzato un ciclo for con la variabile di conteggio *i* che va da 1 a 5001 e che ad ogni giro salva un punto nuovo in una riga nuova della matrice. Una volta salvati 5000 punti in tutte le righe della matrice, il valore di *i* diventa 5001 e la prima transizione viene verificata, passando allo stato successivo. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.7*.

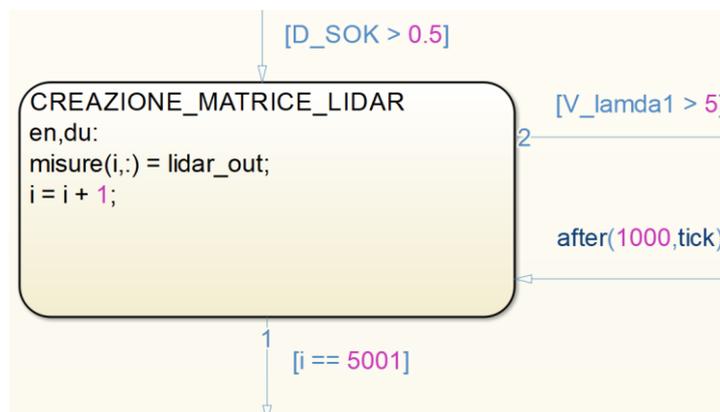


Figura 6.10 – Stato "Creazione matrice Lidar".

Tabella 6.7 – Variabili dello stato "Creazione matrice Lidar".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|----------|--|---|
| <i>i</i> | Variabile che serve a conteggiare il numero di scansioni effettuate dal Lidar che vengono salvate nella matrice. | Passa da 1 a 5001 a ciclo for completato. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|-----------------------------------|---|--|
| <i>misure</i> | Matrice 5000x2 contenente 5000 punti rilevati e salvati in 5 secondi di scansione consecutivi del Lidar (1 punto ogni step time di 0.001). | Ad ogni step time viene sovrascritta una riga fino ad ottenere una matrice di 5000 punti (righe) con distanza nella prima colonna e angolo nella seconda. |
| <i>lidar_out</i> | Vettore 1x2 contenente le coordinate polari di un punto scansionato dal Lidar. Nella prima colonna si ha la distanza (mm) nella seconda colonna si ha l'angolo (°). | Ad ogni step time le sue componenti assumono il valore delle coordinate di un punto diverso. Il valore viene ricevuto dallo stato <i>parent</i> che esegue continuamente la scansione dei punti. |
| $V_{\lambda 1}$ | Riferimento azionamento ruota solare destra da interfaccia utente (± 10 V). | Se superato il valore di 5 V (joystick spinto a mezza corsa) si torna nello stato <i>Attesa</i> . |

6.8.4 Stato "Misurazione gradino in salita"

Una volta terminato il salvataggio della matrice dei punti scansionati dal Lidar si entra nello stato "MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA" (Figura 6.11); il suo scopo è quello di richiamare la funzione Matlab "ricerca_gradino_salita" ed ottenere in output le dimensioni del gradino. Una volta eseguita questa operazione avviene il controllo delle transizioni in uscita secondo l'ordine ed i criteri visti nello schema logico presentato nel *Capitolo 4*; a seconda dei risultati mandati in output dalla funzione si ha il passaggio ad uno dei quattro stati successivi possibili. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.8*.

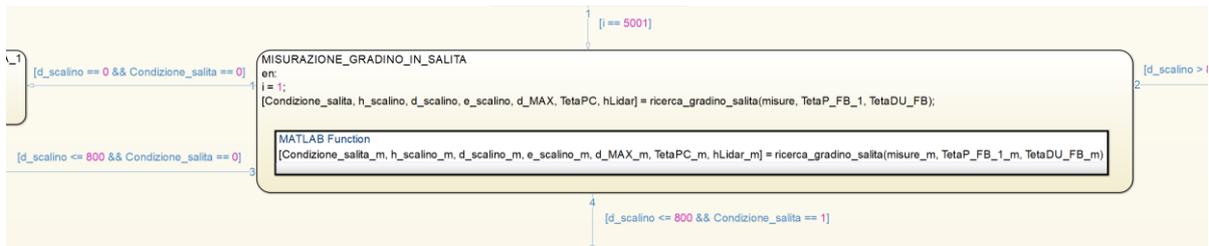


Figura 6.11 – Stato "Misurazione gradino in salita".

Tabella 6.8 – Variabili dello stato "Misurazione gradino in salita".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|----------------------|--|--|
| <i>i</i> | Variabile che serve a conteggiare il numero di scansioni effettuate dal Lidar che vengono salvate nella matrice. | Viene inizializzata ad 1 in preparazione dei futuri salvataggi di nuove scansioni. |
| <i>misure</i> | Matrice 5000x2 contenente 5000 punti rilevati e salvati in 5 secondi di scansione consecutivi del Lidar | Viene mandata in input alla funzione che ricava le dimensioni geometriche |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| | (1 punto ogni step time di 0.001). | del gradino a partire dai punti salvati all'interno di essa. |
| <i>TetaP_FB_1</i> | Feedback della posizione del tripode. Varia in un range da 0° a 120°, azzerandosi ogni terzo di giro (°). | Viene mandato in input alla funzione che ricava le dimensioni geometriche del gradino. Il suo scopo è quello di contribuire ai calcoli necessari a ricavare <i>d_MAX</i> , <i>TetaPC</i> e <i>hLidar</i> (descritti nei prossimi punti). |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene mandato in input alla funzione che ricava le dimensioni geometriche del gradino. Il suo scopo è quello di contribuire ai calcoli necessari a ricavare <i>d_MAX</i> , <i>TetaPC</i> e <i>hLidar</i> (descritti nei prossimi punti). |
| <i>Condizione_salita</i> | Variabile che indica se il gradino rilevato dal Lidar è superabile oppure no (0/1). | Viene mandata in output dalla funzione, è una discriminante fondamentale per scegliere lo stato in cui avanzare. |
| <i>h_scalino</i> | Variabile che rappresenta l'altezza del gradino rilevato dal Lidar (mm). | Viene mandata in output dalla funzione, il suo valore verrà utilizzato più avanti per calcolare gli angoli di set che dovranno essere imposti ai sistemi di controllo in tutte le fasi della sequenza automatica. |
| <i>d_scalino</i> | Variabile che rappresenta la distanza rilevata tra il Lidar e lo scalino (mm). | Viene mandata in output dalla funzione, è una discriminante fondamentale per scegliere lo stato in cui avanzare e serve per impostare il set della distanza di avvicinamento della carrozzina in uno dei prossimi stati. |
| <i>e_scalino</i> | Variabile che rappresenta lo spazio successivo al gradino rilevato dal Lidar (mm). | Viene mandata in output dalla funzione, la sua utilità si trova all'interno della funzione stessa, viene inserita tra gli output solo per visualizzarne l'andamento nell'apposito grafico. |
| <i>d_MAX</i> | Variabile che rappresenta lo spazio tra il gradino e il bordo dello pneumatico più vicino ad esso, ricavata grazie alle misurazioni con il Lidar e alla geometria (mm). | Viene mandata in output dalla funzione, utile per impostare il set della distanza di avanzamento di precisione della carrozzina in uno dei prossimi stati. |
| <i>TetaPC</i> | Angolo assoluto tra Telaio PC e orizzontale, ricavato grazie ai segnali prodotti dai trasduttori e alla geometria (°). | Viene mandata in output dalla funzione, la sua utilità si trova all'interno della funzione stessa, viene inserita tra gli output solo per visualizzarne l'andamento in un possibile grafico. |
| <i>hLidar</i> | Altezza di montaggio del Lidar, ricavata grazie ai segnali prodotti dai trasduttori e alla geometria (mm). Gli ultimi tre segnali sono | Viene mandata in output dalla funzione, la sua utilità si trova all'interno della funzione stessa, viene inserita tra gli output solo per |

inutilizzati, ma può essere visualizzarne l'andamento in un interessante visualizzarli in dei possibile grafico.
grafici.

Da notare che le variabili in input e output all'interno della funzione *ricerca_gradino_salita* assumono un nome che è: *"nome della variabile all'esterno della funzione_m"* in quanto Stateflow non permette che abbiano lo stesso nome. I dettagli sul funzionamento della funzione Matlab *ricerca_gradino_salita* sono stati illustrati nel *Capitolo 4*.

6.8.5 Stato "Ritorno in attesa 1"

Nel caso in cui il Lidar non abbia rilevato alcun gradino (come visto nel *Capitolo 4*) la simulazione entra nello stato *"RITORNO_IN_ATTESA_1"* (Figura 6.12); il suo scopo è unicamente quello di modificare la variabile *"Fasi_sequenza"* al valore 7 per il tempo di 1 secondo (1000 step time da 0.001 s) in modo tale da poter visualizzare nell'apposito grafico che sia avvenuto correttamente il passaggio all'interno di questo stato. Al termine del secondo dall'entrata nello stato viene controllata la transizione (priva di condizioni) e la simulazione torna nello stato di *Attesa*.

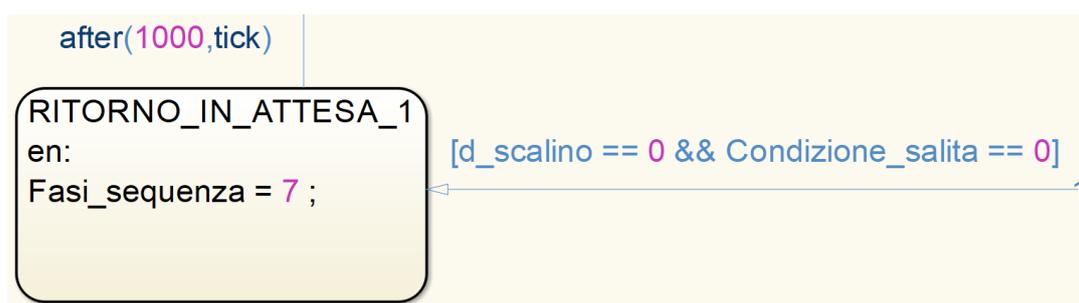


Figura 6.12 – Stato "Ritorno in attesa 1".

6.8.6 Stato "Ritorno in attesa 2"

Nel caso in cui la scansione abbia rilevato un gradino non superabile (come visto nel *Capitolo 4*) la simulazione entra nello stato *"RITORNO_IN_ATTESA_2"* (Figura 6.13); il suo scopo è unicamente quello di modificare la variabile *"Fasi_sequenza"* al valore 6 per il tempo

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

di 1 secondo (1000 step time da 0.001 s) in modo tale da poter visualizzare nell'apposito grafico che sia avvenuto correttamente il passaggio all'interno di questo stato. Al termine del secondo dall'entrata nello stato viene controllata la transizione (priva di condizioni) e la simulazione torna nello stato di *Attesa*.



Figura 6.13 – Stato “Ritorno in attesa 2”.

6.8.7 Stato “Avvicinamento per la seconda misurazione”

Nel caso in cui il Lidar abbia rilevato un gradino ad una distanza superiore ad 800 mm (come visto nel *Capitolo 4*) la simulazione entra nello stato “AVVICINAMENTO_PER_LA_SECONDA_MISURAZIONE” (Figura 6.14); il suo scopo è quello di eseguire l'avvicinamento necessario a portare la sedia ad una distanza di 700 mm dal gradino, in modo tale da poter effettuare una seconda scansione più precisa. Una volta entrati nello stato gli azionamenti vengono sbloccati e la sedia inizia lentamente ad avanzare; dopo un secondo dall'ingresso nello stato l'algoritmo inizia a controllare l'errore sull'angolo delle solari; la transizione si attiva quando l'errore sulle solari è sufficientemente piccolo da garantire che si sia compiuta la distanza voluta con una buona precisione e si ha così il ritorno allo stato *Creazione matrice Lidar* per eseguire una seconda scansione del gradino. Durante l'avvicinamento è possibile tornare allo stato di *Attesa* spingendo il joystick in avanti. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.9*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

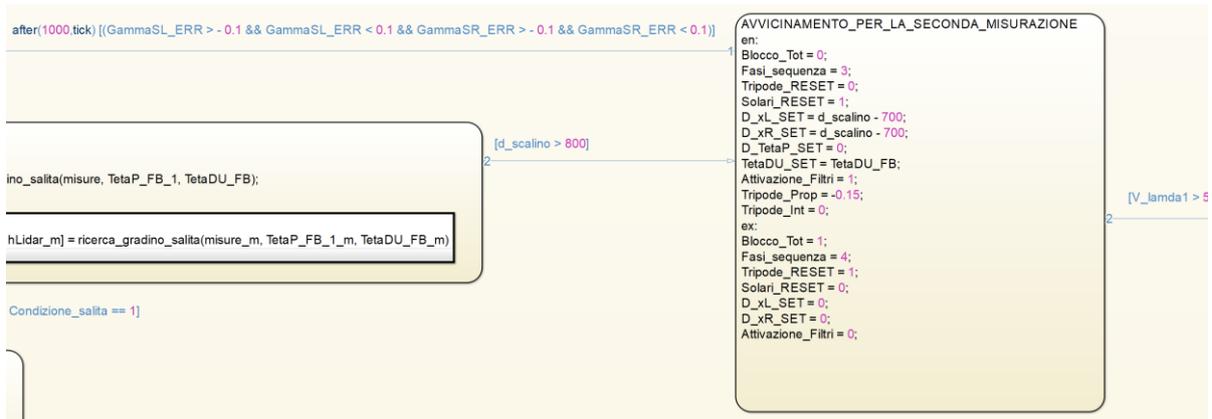


Figura 6.14 – Stato “Avvicinamento per la seconda misurazione”.

Tabella 6.9 – Variabili dello stato “Avvicinamento per la seconda misurazione”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|----------------------|---|--|
| Blocco_tot | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata a 0 una volta entrati nello stato, in modo da attivare gli azionamenti ed abilitare il movimento della carrozzina. In uscita dallo stato viene riportata ad 1 e la carrozzina si blocca. |
| Fasi_sequenza | Variabile che indica in quale fase si trova la sequenza di salita gradino (0÷7). | Diventa pari a 3 una volta entrati nello stato, indicando la fase di avvicinamento. Una volta completato il movimento diventa pari a 4, indicando la fase in cui si ha la seconda scansione nello stato <i>Creazione matrice Lidar</i> . |
| Tripode_RESET | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene di nuovo inizializzata a 0 come precauzione nel caso in cui la carrozzina abbia un problema e faccia più di un avvicinamento come previsto nello schema logico visto nel <i>Capitolo 2</i> . In uscita dallo stato diventa 1, eseguendo il salvataggio dell'angolo e il reset del conteggio. |
| Solari_RESET | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene di nuovo inizializzata ad 1 come precauzione nel caso in cui la carrozzina abbia un problema e faccia più di un avvicinamento come previsto nello schema logico visto nel <i>Capitolo 2</i> . In uscita dallo stato diventa 0, eseguendo il reset dell'integratore. |
| D_xL_SET | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene impostata la distanza che deve percorrere il lato sinistro della sedia, pari alla distanza rilevata dal gradino |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|--|---|
| | | sottratta a 700. Questo permette di portare la sedia alla distanza di 700 mm dal gradino che è stata decisa per effettuare la scansione di precisione. Viene azzerata una volta usciti dallo stato. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene impostata la distanza che deve percorrere il lato destro della sedia, pari alla distanza rilevata dal gradino sottratta a 700. Questo permette di portare la sedia alla distanza di 700 mm dal gradino che è stata decisa per effettuare la scansione di precisione. Viene azzerata una volta usciti dallo stato. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene ancora inizializzata a 0, in modo da non far compiere alcuna rotazione al tripode. Se in futuro si vorrà far compiere già all'interno di questo stato un movimento al tripode bisognerà inserirne il valore del set qui. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposta uguale al valore misurato con il trasduttore di posizione (<i>TetaDU_FB</i>), ottenendo il risultato di non aver alcun movimento delle pivotanti. Se in futuro si vorrà far compiere già all'interno di questo stato un movimento alle pivotanti bisognerà inserirne il valore del set qui. |
| <i>Attivazione filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene portata ad 1 una volta entrati nello stato, attivando i filtri che permettono di ammorbidire l'input del set a gradino sulle solari. In uscita dallo stato viene riportata a zero in modo da poter azzerare istantaneamente il set delle distanze orizzontali. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.15, valore adatto ad avere una rotazione non troppo lenta del tripode. |
| <i>Tripode_Int</i> | Valore della componente integrativa del PID. | Viene imposta a 0 in quanto non serve avere una componente integrativa sulla rotazione del tripode. |
| <i>GammaSL_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare sinistra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. In futuro si potrà perfezionare questo valore per aumentare ulteriormente la precisione di avanzamento. |
| <i>GammaSR_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare destra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. In futuro si |

potrà perfezionare questo valore per aumentare ulteriormente la precisione di avanzamento.

6.8.8 Stato "Calcolo degli angoli"

Nel caso in cui il Lidar abbia rilevato un gradino superabile ad una distanza pari o inferiore ad 800 mm si entra nello stato "CALCOLO_DEGLI_ANGOLI" (Figura 6.15); il suo scopo è quello di eseguire la funzione Matlab chiamata "cinematica" che, data in input l'altezza del gradino rilevata, restituisce in output un vettore contenente i set di tutti gli angoli per ogni fase della sequenza di salita. Una volta ricavato il vettore si ha il passaggio diretto allo stato successivo. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in Tabella 6.10. Il funzionamento dettagliato della funzione Matlab *cinematica* è stato affrontato nella tesi di Perez [5]; all'interno di essa sono state effettuate solo le modifiche necessarie a far funzionare il precedente script nel controllore Speedgoat e per organizzare i valori degli angoli nel vettore in output "set_angoli".

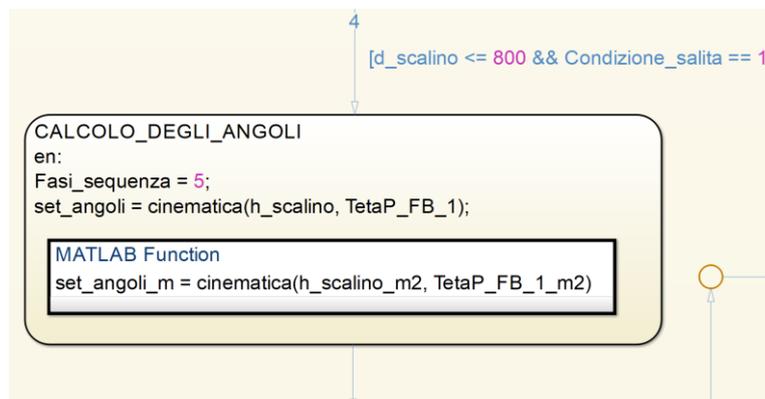


Figura 6.15 – Stato "Calcolo degli angoli".

Tabella 6.10 – Variabili dello stato "Calcolo degli angoli".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|----------------------|--|---|
| Fasi_sequenza | Variabile che indica in quale fase si trova la sequenza di salita gradino (0÷7). | Viene portata a 5, valore che manterrà fino al termine della sequenza di salita gradino che identifica. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|--------------------------|---|--|
| <i>h_scalino</i> | Variabile che rappresenta l'altezza del gradino rilevato dal Lidar (mm). | Viene mandata in input alla funzione <i>cinematica</i> . Permette attraverso formule geometriche di ricavare i set di tutti gli angoli per ogni fase della salita. |
| <i>TetaP_FB_1</i> | Feedback della posizione del tripode. Varia in un range da 0° a 120°, azzerandosi ogni terzo di giro (°). | Viene mandata in input alla funzione <i>cinematica</i> . Permette di impostare il set di rotazione del tripode nello stato successivo (fase <i>A0A1A2</i> , componente " <i>set_angoli(1)</i> ") in modo tale da scegliere autonomamente il senso di rotazione migliore per terminare la rotazione il più velocemente possibile. Permette inoltre di eseguire tale operazione con un angolo del tripode di partenza casuale. |
| <i>set_angoli</i> | Vettore colonna 11x1 contenente i set di tutti gli angoli per ogni fase della salita (°). | Viene mandato in output dalla funzione Matlab <i>cinematica</i> . Vengono assegnati i valori alle sue componenti grazie a calcoli geometrici basati sull'altezza del gradino. |

6.8.9 Stato "A0-A1-A2"

Completato il calcolo degli angoli di set la macchina a stati procede con la prima fase della sequenza automatica all'interno dello stato "A0_A1_A2" (Figura 6.16). Gli azionamenti vengono sbloccati e vengono imposti gli angoli di set per i tripodi e le ruote pivotanti. La distanza di traslazione che viene imposta è pari a d_{MAX} sommato ad un valore (175 mm) che assicura che gli pneumatici vadano sempre in battuta sul gradino con una certa quantità di moto. Dopo 3 secondi dall'ingresso nello stato inizia il controllo della transizione in uscita diretta allo stato "A3", analizzando i feedback delle coppie sulle ruote solari e della posizione delle ruote pivotanti; non viene usato l'errore sull'angolo di rotazione delle solari in quanto la comparsa di un picco di coppia sulle solari è già garanzia che la sedia abbia raggiunto e toccato lo scalino. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.11*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

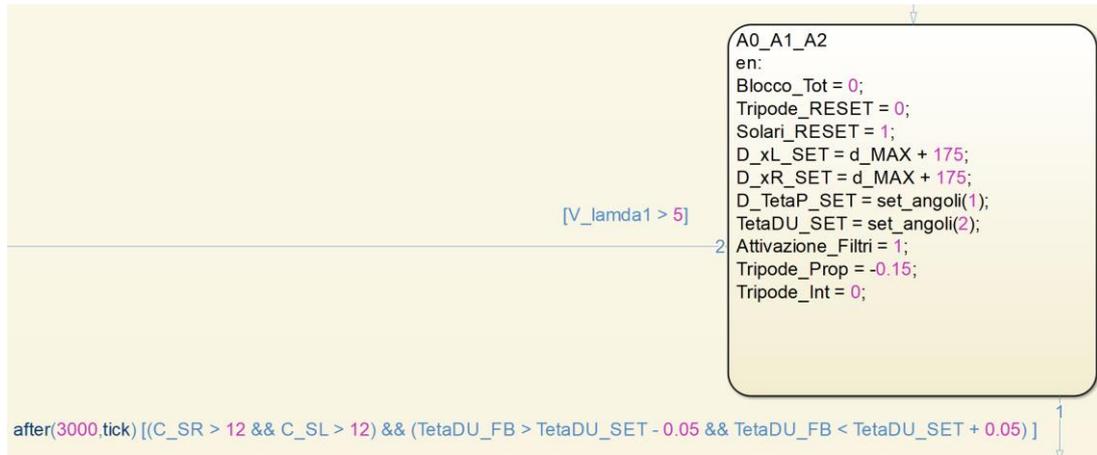


Figura 6.16 – Stato “A0-A1-A2”.

Tabella 6.11 – Variabili dello stato “A0-A1-A2”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|---|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata a 0 una volta entrati nello stato, in modo da attivare gli azionamenti ed abilitare il movimento della carrozzina. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset di sicurezza in seguito all'eventuale passaggio nello stato “Avvicinamento per la seconda misurazione”. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset di sicurezza in seguito all'eventuale passaggio nello stato “Avvicinamento per la seconda misurazione”. |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene impostata la distanza che deve percorrere il lato sinistro della sedia, pari alla distanza disponibile tra pneumatico e gradino (<i>d_MAX</i>) addizionata ad un valore di sicurezza (175 mm) che renda certa il contatto con il gradino. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene impostata la distanza che deve percorrere il lato destro della sedia, pari alla distanza disponibile tra pneumatico e gradino (<i>d_MAX</i>) addizionata ad un valore di sicurezza (175 mm) che renda certa il contatto con il gradino. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|--|---|
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene imposto l'angolo di rotazione del tripode di set, contenuto nella prima componente del vettore <i>set_angoli</i> . |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella seconda componente del vettore <i>set_angoli</i> . |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene portata ad 1 una volta entrati nello stato, attivando i filtri che permettono di ammorbidire l'input del set a gradino sulle solari. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.15, valore adatto ad avere una rotazione non troppo lenta del tripode. |
| <i>Tripode_Int</i> | Valore della componente integrativa del PID. | Viene imposta a 0 in quanto non serve avere una componente integrativa sulla rotazione del tripode. |
| <i>C_SR</i> | Coppia applicata alla ruota solare destra (Nm). | Viene utilizzata per controllarne il superamento di un valore di soglia (12 Nm) che sblocca il passaggio allo stato successivo A3. |
| <i>C_SL</i> | Coppia applicata alla ruota solare sinistra (Nm). | Viene utilizzata per controllarne il superamento di un valore di soglia (12 Nm) che sblocca il passaggio allo stato A3. |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.05^\circ$ e sbloccando così lo stato A3. |

In futuro, come detto nel *Capitolo 6.8.7*, una seconda possibilità potrà essere quella di spostare le rotazioni del tripode e delle ruote pivotanti all'interno dello stato *Avvicinamento per la seconda misurazione*, nel caso in cui si effettui la prima delle due scansioni da una distanza superiore ad 800 mm; sarà necessario mantenere invece questi movimenti all'interno dello stato *A0-A1-A2* nel caso in cui si effettui la prima ed unica scansione da una distanza inferiore ad 800 mm. In futuro inoltre potrebbe essere utile, soprattutto nel caso di una sola scansione, modificare le velocità di rotazione dei tripodi e delle ruote pivotanti per evitare che, ad esempio, partendo da una distanza molto ravvicinata rispetto al gradino ed avendo contemporaneamente grandi delta di rotazione da compiere sul tripode e sulle pivotanti si giunga alla situazione in cui la sedia arriva in battuta sul gradino mentre il tripode e/o le

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

pivotanti non hanno ancora terminato il loro movimento, causando uno sfregamento degli pneumatici sulla faccia verticale del gradino.

6.8.10 Stato "A3"

Completato lo stato "A0-A1-A2" si ha l'ingresso nello stato "A3" (Figura 6.17). Nel primo mezzo secondo dall'entrata nello stato non viene data alcuna istruzione nuova agli azionamenti, in modo da consentire agli attuatori di compiere le ultime correzioni necessarie a ridurre il più possibile gli errori. Raggiunto il mezzo secondo (*on after(500,tick)*) avviene il bloccaggio degli azionamenti, il reset delle variabili e l'azzeramento di tutti i set; questo è necessario per poter dare i successivi set partendo sempre dal valore zero, evitando comportamenti indesiderati degli attuatori come overshoot iniziali. Dopo sei decimi di secondo vengono sbloccati gli azionamenti ed imposti i nuovi angoli di set per il tripode e le ruote pivotanti. Dopo un secondo e mezzo dall'ingresso nello stato avviene il controllo della transizione in uscita diretta allo stato "A4", vengono controllate la coppia sui tripodi e gli errori sull'angolo di ruote pivotanti e tripodi. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.12*.

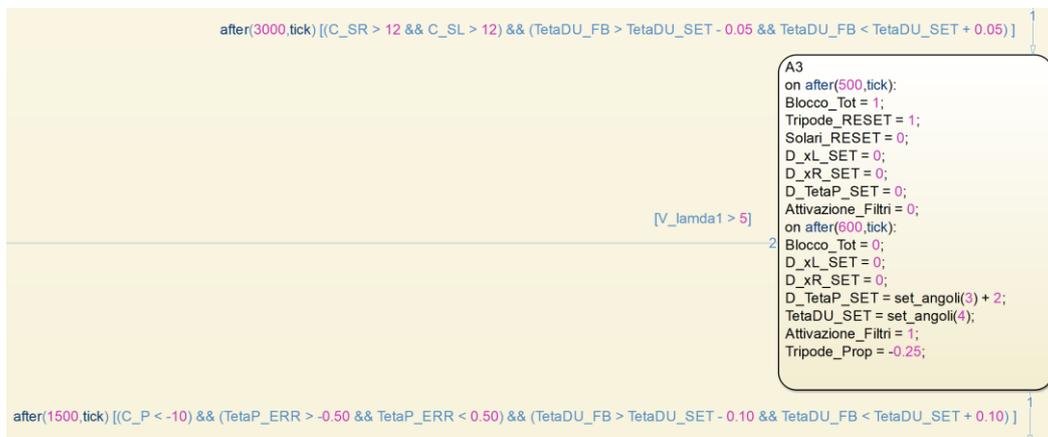


Figura 6.17 – Stato "A3".

Tabella 6.12 – Variabili dello stato "A3".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-------------------|---|---|
| Blocco_tot | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| | contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato "A0-A1-A2". |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato "A0-A1-A2". |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene azzerata in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene azzerata in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene inizialmente azzerata; in seguito viene imposto l'angolo di rotazione contenuto nella terza componente del vettore <i>set_angoli</i> . Tale valore viene maggiorato di 2° per assicurare una presa salda al gradino ed un conseguente picco di coppia sui tripodi abbastanza netto da rendere facile il verificarsi della transizione per il passaggio allo stato "A4". |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella quarta componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non è necessario azzerarlo inizialmente in quanto il set è il valore stesso dell'angolo da raggiungere e non si tratta di un delta di posizione. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.25, valore adatto ad esercitare una forza sul gradino abbastanza alta da sollevare la parte frontale della carrozzina senza fatica. |
| <i>C_P</i> | Coppia applicata ai tripodi (Nm). | Viene utilizzata per controllarne il superamento di un valore di soglia (-10 Nm) che sblocca il passaggio allo stato successivo A4. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|-------------------------|---|---|
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare che viene corretto. È la differenza tra <i>TetaP_SET</i> e <i>TetaP_FB_2</i> (°). | Viene verificato quando il suo valore diventa compresa tra $\pm 0.50^\circ$, sbloccando così lo stato <i>A4</i> . |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.10^\circ$ e sbloccando così lo stato <i>A4</i> . |

In questa fase bisogna verificare che la carrozzina non abbia, tra il completamento della rotazione del tripode e l'inizio dello stato *A4*, la tendenza ad avanzare lentamente fino a fare toccare lo pneumatico posteriore con il gradino, causando uno sforzo sulla ruota e degli sfregamenti non voluti. Nel caso in cui questo problema si presentasse una soluzione è quella di ridurre leggermente la componente proporzionale nei 2 PID che controllano la compensazione delle solari nei casi di avanzamenti inferiori a 150 mm, posti all'interno del sottosistema "*Solari – Controllo in rotazione*" (dettagli nel *Capitolo 5*).

6.8.11 Stato "*A4*"

Completato lo stato "*A3*" si ha l'ingresso nello stato "*A4*" (Figura 6.18). Come nello stato *A3*, si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti ed in seguito azzerare gli azionamenti che nella fase precedente hanno assunto valori diversi da zero. Dopo sei decimi di secondo si sbloccano gli azionamenti e si danno i set ai tripodi e alle ruote pivotanti. Dopo un secondo dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "*A5*", in cui si controllano l'errore sul tripode e sulle ruote pivotanti. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.13*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

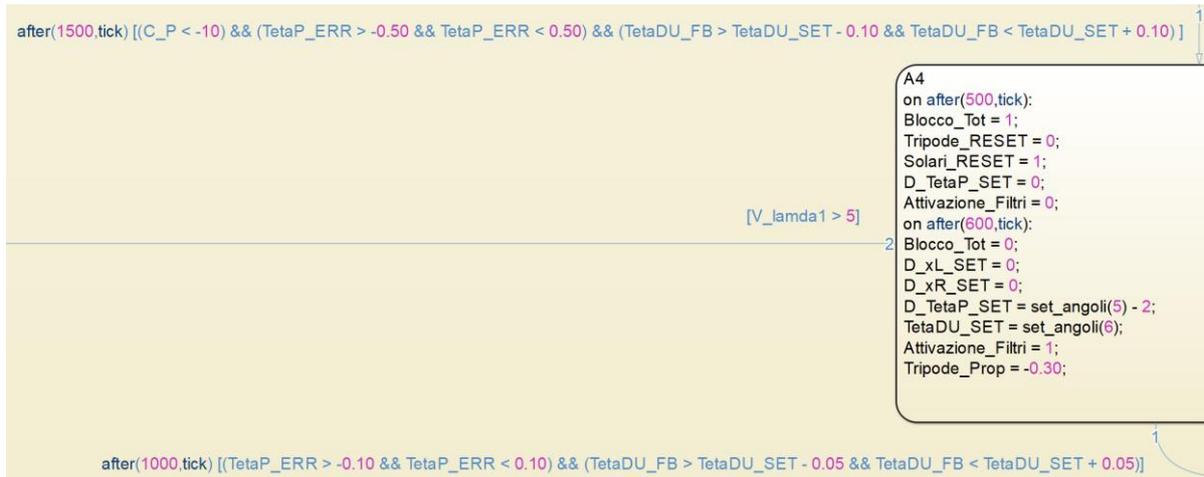


Figura 6.18 – Stato “A4”.

Tabella 6.13 – Variabili dello stato “A4”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|--|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato “A3”. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato “A3”. |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Resta zero in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Resta zero in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene inizialmente azzerata; in seguito viene imposto l'angolo di rotazione contenuto nella quinta componente del vettore <i>set_angoli</i> . Tale valore viene sottratto di 2° per compensare i due |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|--|--|
| | | gradi in più che sono stati dati alla rotazione nello stato A3. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella sesta componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non è necessario azzerarlo inizialmente in quanto il set è il valore stesso dell'angolo da raggiungere e non si tratta di un delta di posizione. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.30 per garantire al tripode la forza necessaria ad alzare la parte anteriore della sedia con una certa agilità |
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare che viene corretto. la differenza tra TetaP_SET e TetaP_FB_2 (°). | Viene verificato quando il suo valore diventa compresa tra $\pm 0.10^\circ$, sbloccando così lo stato A5. |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.05^\circ$ e sbloccando così lo stato A5. |

6.8.12 Stato "A5"

Completato lo stato "A4" si ha l'ingresso nello stato "A5" (Figura 6.19). Come nello stato A4, si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti ed in seguito azzerare gli azionamenti che nella fase precedente hanno assunto valori diversi da zero. Dopo sei decimi di secondo si sbloccano gli azionamenti e si danno i set di avanzamento alle solari e l'angolo alle ruote pivotanti, il quale non cambia rispetto allo stato precedente. Dopo un secondo dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "A6", in cui si controlla l'errore sulle solari in modo da passare alla fase successiva una volta coperta la distanza impostata. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.14*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

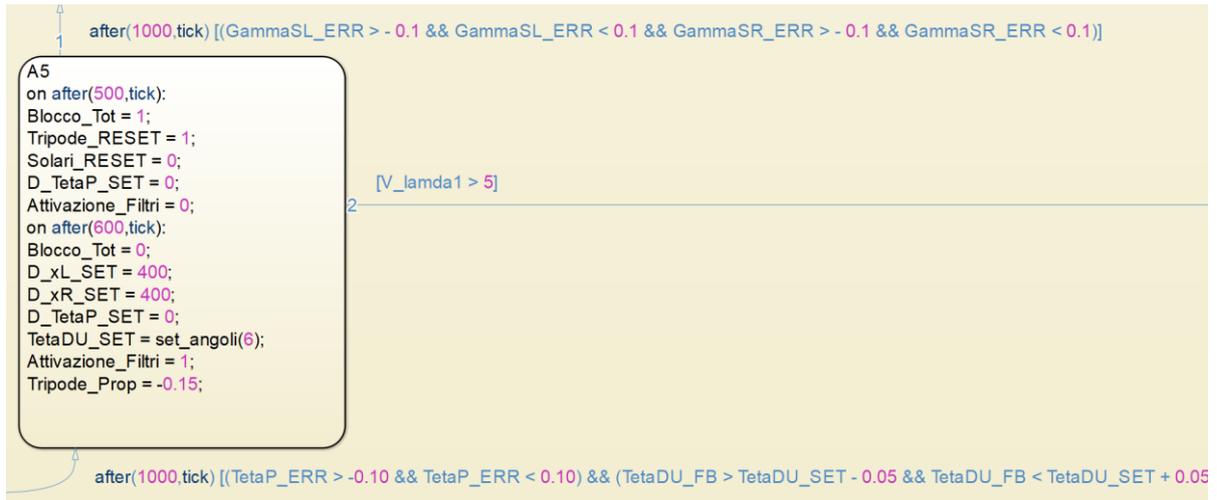


Figura 6.19 – Stato “A5”.

Tabella 6.14 – Variabili dello stato “A5”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|--|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato “A4”. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato “A4”. |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene imposto un avanzamento di 400 mm; distanza sufficiente ad avere entrambe le ruote del tripode che sono a contatto con il piano con un margine di sicurezza sufficientemente grande rispetto alla faccia verticale del gradino. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene imposto un avanzamento di 400 mm; distanza sufficiente ad avere entrambe le ruote del tripode che sono a contatto con il piano con un margine di sicurezza sufficientemente grande rispetto alla faccia verticale del gradino. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|--|--|
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene azzerata in quanto non si deve avere rotazione del tripode. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella sesta componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non cambia rispetto allo stato A4. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.15, valore di default. |
| <i>GammaSL_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare sinistra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. |
| <i>GammaSR_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare destra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. |

6.8.13 Stato "A6"

Completato lo stato "A5" si ha l'ingresso nello stato "A6" (Figura 6.20). Come nello stato A5, si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti ed in seguito azzerare gli azionamenti che nella fase precedente hanno assunto valori diversi da zero. Dopo sei decimi di secondo si sbloccano gli azionamenti e si danno i set degli angoli ai tripodi e alle ruote pivotanti. Dopo un secondo dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "A7", in cui si controlla l'errore sull'angolo compiuto dai tripodi e dalle ruote pivotanti. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.15*. L'angolo di rotazione del tripode, contenuto nella componente numero 7 del vettore *set_angoli*, è modificabile a piacere all'interno della funzione Matlab *cinematica*, nella prima riga del paragrafo "*fase 6 avanzamento baricentro*"; si può così scegliere di quanti gradi inclinare in avanti la carrozzina (variazione di $Teta_{PC}$ = variazione di $Teta_P$) per trovare il delta di inclinazione (ora di 15°) che permette di scaricare il baricentro tra le due ruote dei tripodi nel modo più sicuro possibile. L'algoritmo

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

della funzione calcola il conseguente angolo che devono assumere le pivotanti in modo autonomo.



Figura 6.20 – Stato “A6”.

Tabella 6.15 – Variabili dello stato “A6”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|---|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato “A5”. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato “A5”. |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene azzerata, la sedia non deve avanzare. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene azzerata, la sedia non deve avanzare. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in | Viene imposto l'angolo di rotazione contenuto nella settima componente del vettore <i>set_angoli</i> (attualmente è pari a |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|---------------------------|--|--|
| | avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | -15°). Tale valore viene sottratto di 4° per una rotazione all'indietro extra del tripode, in modo tale che lo pneumatico posteriore si impunti meglio sul piano d'appoggio, rendendo la carrozzina molto più stabile nel successivo stato A7 (non si ha così, nella fase A7, il verificarsi di una inclinazione all'indietro della carrozzina dovuta alla compressione dello pneumatico posteriore nel momento in cui si sollevano le ruote pivotanti e il peso si scarica tutti tra le ruote dei tripodi). |
| TetaDU_SET | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nell'ottava componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non è necessario azzerarlo inizialmente in quanto il set è il valore stesso dell'angolo da raggiungere e non si tratta di un delta di posizione. |
| Attivazione_filtri | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| Tripode_Prop | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.05, valore che causa una rotazione molto lenta del tripode per ottenere un movimento armonioso con lo spostamento delle ruote pivotanti ed evitare che uno dei due pneumatici del tripode che sono a contatto con il terreno si stacchi da terra in quanto troppo lento o troppo veloce a ruotare. |
| TetaP_ERR | Rappresenta l'errore angolare che viene corretto. È la differenza tra TetaP_SET e TetaP_FB_2 (°). | Viene verificato quando il suo valore diventa compresa tra $\pm 0.50^\circ$, sbloccando così lo stato A7. |
| TetaDU_FB | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.50^\circ$ e sbloccando così lo stato A7. |

6.8.14 Stato "A7"

Completato lo stato "A6" si ha l'ingresso nello stato "A7" (Figura 6.21). Si aspetta un secondo per far terminare i movimenti ed in seguito azzerare gli azionamenti che nella fase precedente hanno assunto valori diversi da zero. Dopo undici decimi di secondo si sbloccano gli

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

azionamenti e si impone l'angolo di set alle ruote pivotanti. Dopo un secondo e mezzo dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "A8", in cui si controlla l'errore sull'angolo compiuto dalle ruote pivotanti. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in Tabella 6.16.

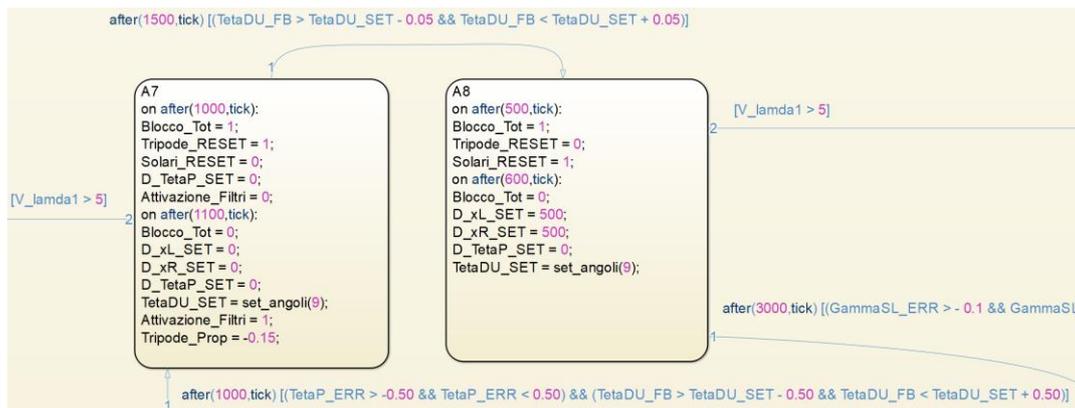


Figura 6.21 – Stato "A7".

Tabella 6.16 – Variabili dello stato "A7".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|---|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato "A6". |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato "A6". |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene azzerata, la sedia non deve avanzare. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene azzerata, la sedia non deve avanzare. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|--|---|
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene azzerata in quanto il tripode non deve ruotare. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella nona componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non è necessario azzerarlo inizialmente in quanto il set è il valore stesso dell'angolo da raggiungere e non si tratta di un delta di posizione. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| <i>Tripode_Prop</i> | Valore della componente proporzionale del PID. | Viene imposta a -0.15, valore di default. |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.05^\circ$ e sbloccando così lo stato A8. |

6.8.15 Stato "A8"

Completato lo stato "A7" si ha l'ingresso nello stato "A8" (Figura 6.22). Si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti e resettare le variabili. Sei decimi di secondo dopo l'ingresso nello stato si sbloccano gli azionamenti e si impone l'avanzamento alle ruote solari; l'angolo assunto dalle ruote pivotanti non cambia. Dopo tre secondi dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "A9", in cui si controlla l'errore sull'angolo compiuto dalle ruote solari, per assicurarsi che la carrozzina abbia compiuto il giusto avanzamento. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.17*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

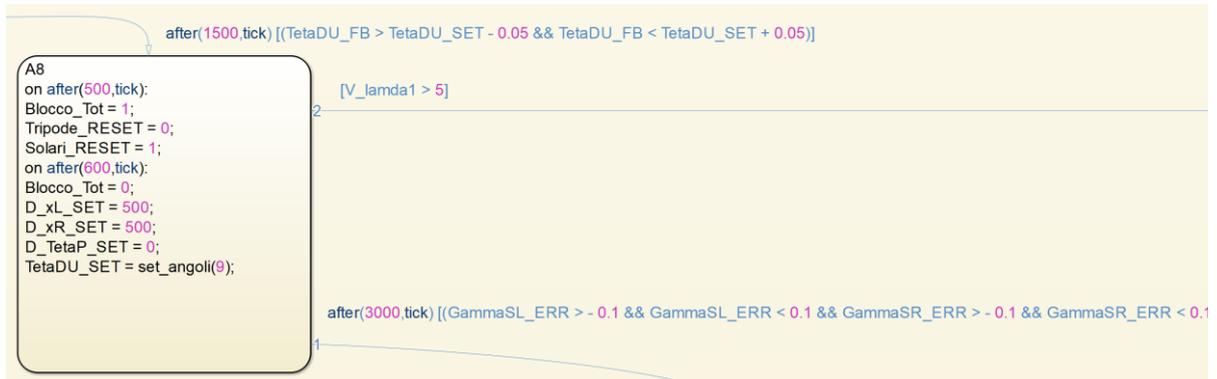


Figura 6.22 – Stato “A8”.

Tabella 6.17 – Variabili dello stato “A8”.

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|--|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l’annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata inizialmente ad 1 durante l’azzeramento degli angoli di set; in seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato “A7”. |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l’azzeramento dell’integratore che conta l’angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato “A7”. |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene imposto un avanzamento di 500 mm; distanza sufficiente ad avere sufficiente spazio tra le ruote pivotanti ed il bordo del gradino. Tale spazio serve per eseguire la fase A9 in sicurezza. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene imposto un avanzamento di 500 mm; distanza sufficiente ad avere sufficiente spazio tra le ruote pivotanti ed il bordo del gradino. Tale spazio serve per eseguire la fase A9 in sicurezza. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all’indietro (°). | Vale zero in quanto non si deve avere rotazione del tripode. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|---------------------------|--|---|
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nella nona componente del vettore <i>set_angoli</i> . Non cambia rispetto allo stato <i>A7</i> . |
| <i>GammaSL_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare sinistra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. |
| <i>GammaSR_ERR</i> | Errore dell'angolo di rotazione della solare destra (rad). | Si ha l'attivazione della transizione nel momento in cui il valore dell'errore è compreso tra ± 0.1 radianti. |

6.8.16 Stato "A9"

Completato lo stato "A8" si ha l'ingresso nello stato "A9" (Figura 6.23). Si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti e resettare le variabili. Sei decimi di secondo dopo l'ingresso nello stato si sbloccano gli azionamenti e si impongono gli angoli di set ai tripodi e alle ruote pivotanti. Dopo un secondo dall'ingresso nello stato si ha il controllo della transizione verso lo stato "FINE_SEQUENZA", in cui si controlla l'errore sull'angolo compiuto dai tripodi e dalle pivotanti. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.18*.

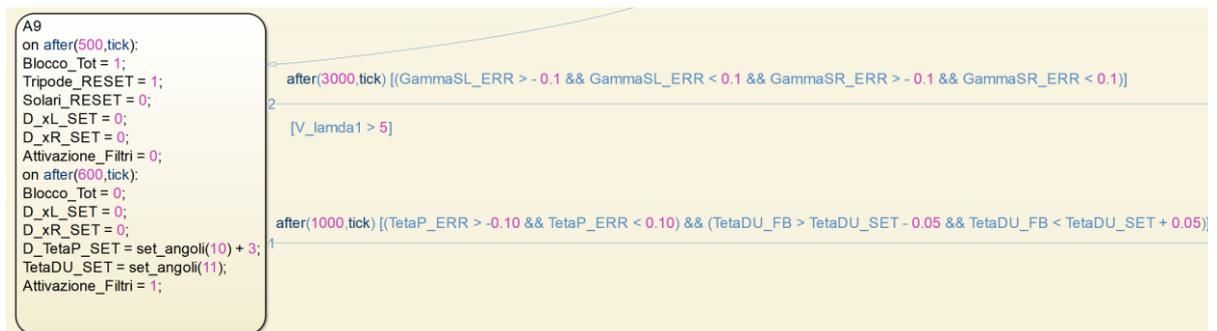


Figura 6.23 – Stato "A9".

Tabella 6.18 – Variabili dello stato "A9".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|--------------------------|---|---|
| <i>Blocco_tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali | Viene portata inizialmente ad 1 durante l'azzeramento degli angoli di set; in |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|----------------------------------|---|--|
| | contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | seguito viene portata a 0 per consentire il completamento della fase. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato "A8". |
| <i>Solari_RESET</i> | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato "A8". |
| <i>D_xL_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato sinistro della sedia (mm). | Viene azzerata in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_xR_SET</i> | Distanza di traslazione orizzontale che deve compiere il lato destro della sedia (mm). | Viene azzerata in quanto la carrozzina non deve avanzare. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene imposto l'angolo di rotazione contenuto nella decima componente del vettore <i>set_angoli</i> (modificabile nel paragrafo "Generazione del vettore per Simulink", della funzione <i>cinematica</i>). Tale valore permette di tornare ad un angolo del tripode corrispondente a quello di marcia in piano (<i>TetaP_FB_1</i> = 88°). Il valore viene addizionato con 3° di rotazione in avanti per compensare la rotazione in eccesso all'indietro che è stata imposta nella fase A6. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che devono raggiungere le ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di set delle ruote pivotanti, contenuto nell'undicesima componente del vettore <i>set_angoli</i> . È pari a 98°, l'angolo della posizione di marcia in piano. Non è necessario azzerarlo inizialmente in quanto il set è il valore stesso dell'angolo da raggiungere e non si tratta di un delta di posizione. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set ed in seguito riportata ad 1 per inviare i nuovi set. |
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare che viene corretto. È la differenza tra <i>TetaP_SET</i> e <i>TetaP_FB_2</i> (°). | Viene verificato quando il suo valore diventa compresa tra $\pm 0.10^\circ$, sbloccando così lo stato <i>FINE_SEQUENZA</i> . |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo delle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che |

l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.05^\circ$ e sbloccando così lo stato *FINE SEQUENZA*.

6.8.17 Stato "Fine sequenza"

Completato lo stato "A9" si ha l'ingresso nello stato "FINE_SEQUENZA" (Figura 6.24). Si aspetta mezzo secondo per far terminare i movimenti. Poi si resettano le variabili e si bloccano gli azionamenti. Dopo un secondo si ha il ritorno nello stato *Attesa*. La sequenza di salita gradino è così terminata ed è possibile scegliere tramite switch la modalità di funzionamento della sedia voluta, oppure affrontare un nuovo gradino ripetendo la sequenza premendo il bottone D_{SOK} . Riepilogo dettagliato delle variabili usate in *Tabella 6.19*.

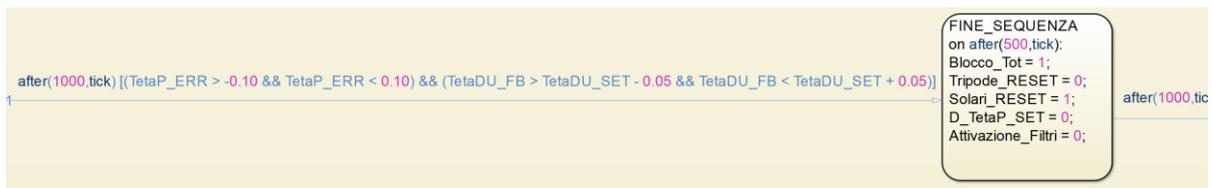


Figura 6.24 – Stato "Fine sequenza".

Tabella 6.19 – Variabili dello stato "Fine sequenza".

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|----------------------|---|--|
| Blocco_tot | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>SalGrad_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Viene portata ad 1, bloccando gli azionamenti e i freni. |
| Tripode_RESET | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di <i>TetaP_FB_1</i> e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portata a 0 per eseguire un reset in seguito allo stato "A9". |
| Solari_RESET | Variabile il cui aumento o diminuzione permette l'azzeramento dell'integratore che conta l'angolo di rotazione compiuto dalla solare <i>GammaSL_FB</i> e <i>GammaSR_FB</i> (0/1). | Viene portata ad 1 per eseguire un reset in seguito allo stato "A9". |

| | | |
|----------------------------------|--|--|
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene azzerata. |
| <i>Attivazione_filtri</i> | Variabile che permette di attivare o disattivare i filtri del primo ordine applicati ai valori di set della distanza di traslazione e rotazione del tripode. | Viene inizialmente portata a 0 per azzerare i set. |

In tutte le fasi è stata mantenuta la possibilità di tornare allo stato “*ATTESA*” tramite la pressione in avanti del joystick, per comodità durante la sperimentazione. Terminata la sperimentazione in laboratorio, questa possibilità è stata lasciata solo nelle fasi indicate nel *Capitolo 2.3*.

6.9 Modalità Marcia in piano, sequenza logica e interfaccia generale

La modalità automatica di *Marcia in piano* (Figura 6.25) consente, a partire da una qualsiasi configurazione dei gradi di libertà, di riconfigurarli nelle loro posizioni ottimali (Tabella 6.20) scelte per gli spostamenti ordinari. In seguito al completamento della sequenza all'utente viene lasciato solo il controllo degli spostamenti della carrozzina tramite il joystick, mentre tutti gli altri gradi di libertà e settaggi restano bloccati.

Tabella 6.20 – Angoli di funzionamento in *Marcia in piano*.

| Angoli | Valore (°) |
|-------------------|-------------------|
| β_0 | 38 |
| ϑ_{P0} | -32 |
| ϑ_{DU0} | 98.07 |
| ϑ_{ES0} | 0 |
| ϑ_{T0} | 40 |
| Θ_{PC0} | 38 |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

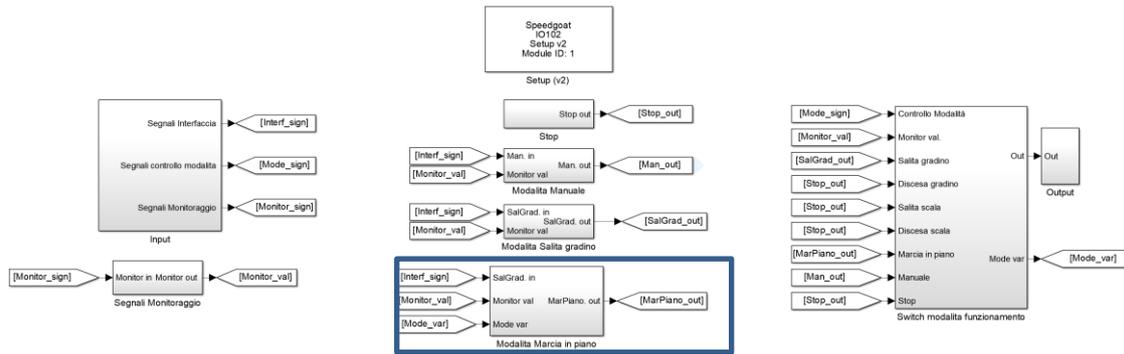


Figura 6.25 – Modalità di Marcia in piano – Schema di primo livello.

La sequenza logica (Figura 6.26) su cui è stata progettata la macchina a stati che esegue la modalità di *Marcia in piano* è la seguente. L'utente di trova sulla carrozzina e vuole configurarla nella posizione di *Marcia in piano*, ottimale per gli spostamenti su strada. Per farlo attiva tramite lo switch (posizione 5 del selettore S_{FM}) la *modalità di Marcia in piano* e preme un interruttore per avviare la riconfigurazione dei gradi di libertà della carrozzina. Il sistema esegue un controllo sull'errore tra angoli imposti e rilevati e ferma il movimento nel momento in cui avranno raggiunto la posizione prestabilita; a quel punto l'utente potrà muoversi liberamente sfruttando il joystick, mentre tutti gli altri comandi resteranno inutilizzabili. Quando vuole l'utente può selezionare altre modalità dal selettore, come la modalità *Manuale* per tornare ad avere il pieno controllo di tutti gli attuatori della carrozzina oppure può usare liberamente le varie modalità di superamento ostacolo automatiche. È importante notare come, essendo guasti, non siano presenti i controlli della seduta e del cingolo, che andranno inseriti in futuro in modo estremamente simile a quanto fatto con il controllo delle pivotanti.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

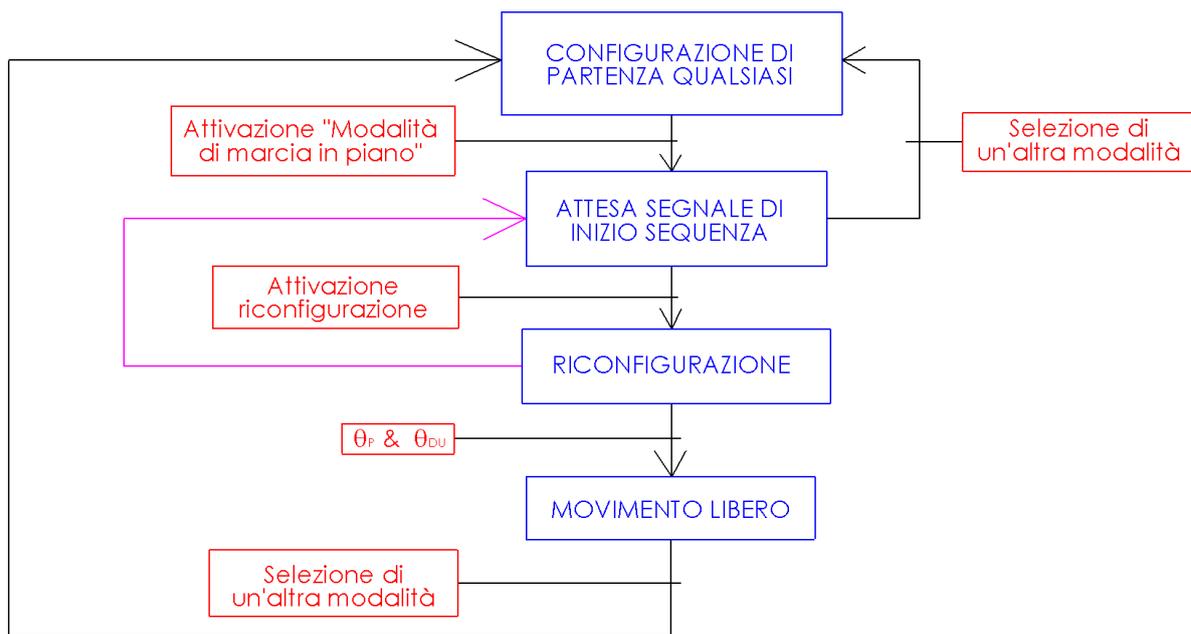


Figura 6.26 – Modalità di Marcia in piano, schema logico.

Una volta entrati nel sottosistema adibito a realizzare tale modalità (Figura 6.27) è possibile notare che l'impianto di base è simile a quello realizzato per la modalità di Salita gradino, con le seguenti differenze:

1. All'interno della sezione "Comandi e feedback" si ha la presenza del segnale "Mode_var", il quale assume un valore diverso in base alla modalità automatica scelta tramite lo switch (S_{FM}) dall'interfaccia utente.
2. All'interno della sezione "Sequenza automatica di marcia in piano" si ha un nuovo Stateflow che contiene la macchina a stati che realizza la sequenza automatica. Tale macchina a stati verrà descritta nel dettaglio nei successivi paragrafi.
3. All'interno della sezione "Controllo attuatori e settaggi" le differenze consistono in:
 - I. Presenza del sottosistema "Cinematica/dinamica joystick SL SR", il quale riceve in input i comandi impressi tramite il joystick ed impone i movimenti alle ruote solari per eseguire gli spostamenti su strada. Tale sottosistema viene descritto nel dettaglio nella tesi di Martini [6].
 - II. Il sottosistema "Tripode-Controllo in posizione" non riceve più in input i settaggi del controllore PID in quanto non variano durante la sequenza.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

- III. Il segnale $D_STARTMSG$ può essere controllato tramite l'interfaccia utente dall'interruttore S_{START} .

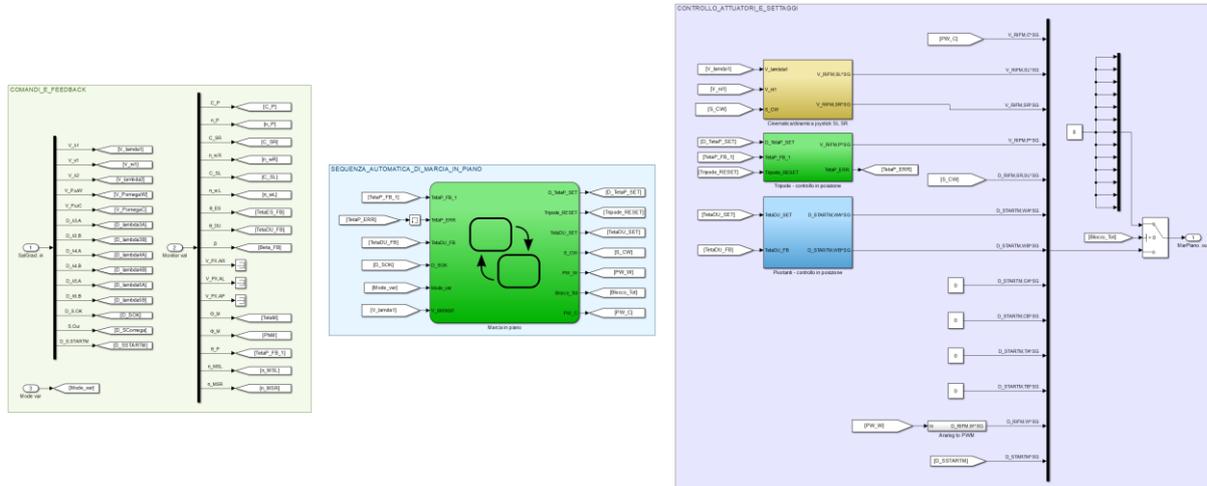


Figura 6.27 – Modalità di Marcia in piano.

6.10 Modalità Marcia in piano, sezione sequenza automatica di Marcia in piano

La *Stateflow Chart* (Figura 6.28) possiede gli stessi criteri di funzionamento visti per la salita del gradino. In Tabella 6.21 vengono riassunte le grandezze in input/output di questa modalità.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

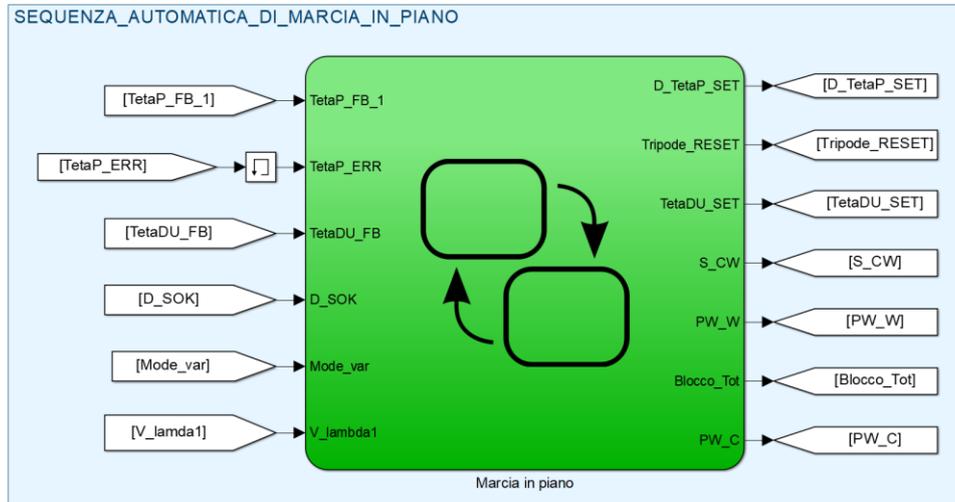


Figura 6.28 – Modalità di Marcia in piano – Sezione sequenza automatica di Marcia in piano.

Tabella 6.21 – Segnali di input/output della *Stateflow Chart*.

| Simbolo | Descrizione |
|-----------------------------|--|
| <i>TetaP_FB_1</i> | Feedback della posizione del tripode. Varia in un range da 0° a 120°, azzerandosi ogni terzo di giro (°). |
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare sul tripode che viene corretto (°). |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo assunto dalle ruote pivotanti (°). |
| <i>D_SOK</i> | Segnale avvio riconfigurazione in posizione di Marcia in piano, eseguito da interfaccia utente tramite il pulsante SOK (0/1 V). |
| <i>Mode_var</i> | Segnale inviato dallo switch (selettore S _{FM}). Assume i seguenti valori: 1 – Salita gradino; 2- Discesa gradino; 3 – Salita scala; 4 – Discesa scala; 5 – Marcia in piano; 6 – Modalità manuale; 7 – Stop. |
| <i>V_lambda1</i> | Riferimento azionamento ruota solare destra da interfaccia utente (± 10 V). |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che si vuole far raggiungere alle ruote pivotanti (°). |
| <i>S_CW</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$ di commutazione controllo velocità/coppia ruote solari da controllore Speedgoat (0/5 V). |
| <i>PW_W</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,W}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0÷10 V). |
| <i>Blocco_Tot</i> | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>MarPiano_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). |
| <i>PW_C</i> | Corrisponde al segnale $V_{RIFM,C}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento sedile da controllore Speedgoat (0÷10 V). |

6.11 Modalità Marcia in piano, macchina a stati vista nel dettaglio

La sequenza automatica (Figura 6.29) è costituita da 3 stati distinti.

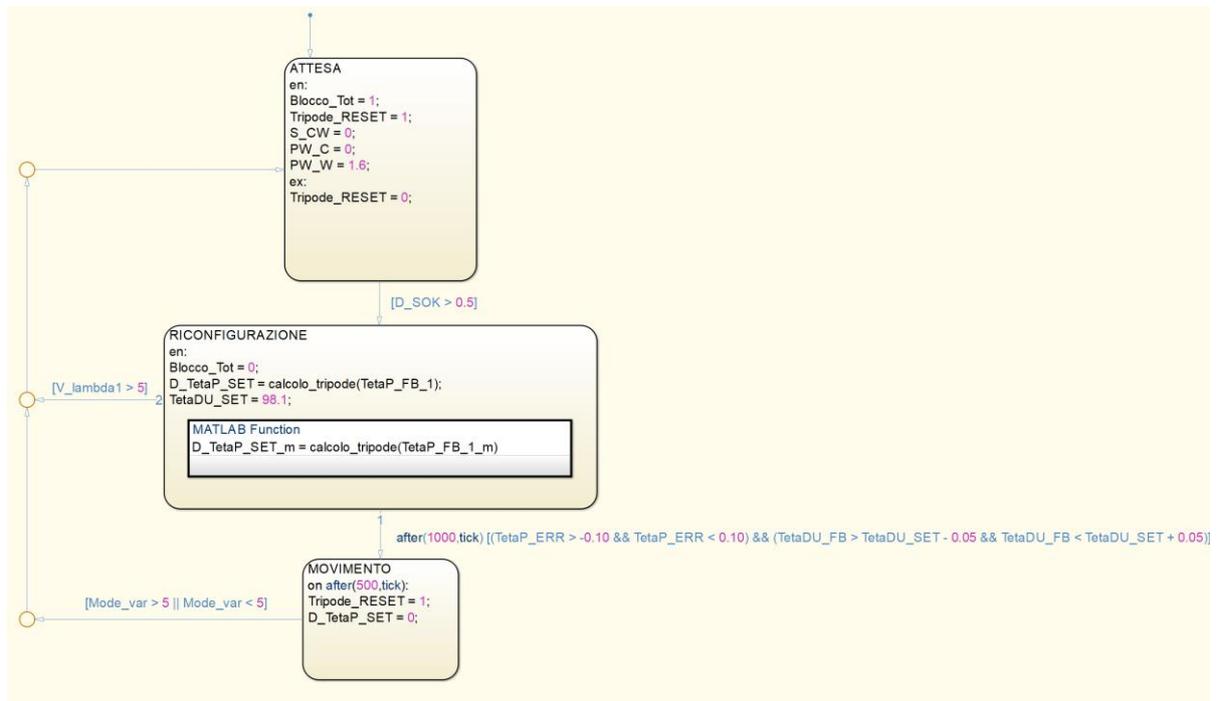


Figura 6.29 – Modalità di Marcia in piano – Macchina a stati.

6.11.1 Stato "Attesa"

Avviata la simulazione, la sequenza entra nello stato "ATTESA" (Figura 6.30) tramite la default transition. La macchina a stati resta all'interno dello stato *Attesa* fino a quando non viene selezionata tramite lo switch la modalità di Marcia in piano (per abilitare l'invio degli output di questa modalità agli azionamenti selezionando la posizione numero 5 del selettore S_{FM}) e successivamente viene premuto il tasto " $D_{S,OK}$ " dall'interfaccia utente. Fino a che la macchina a stati si trova all'interno dello stato *Attesa* è possibile selezionare liberamente le altre modalità tramite lo switch e compiere i movimenti che si vuole; lo scopo di questo stato è infatti quello di essere una fase temporanea in cui la sequenza di Marcia in piano aspetta di essere avviata. All'interno dello stato vengono inizializzate la maggior parte delle variabili che serviranno per far funzionare la sequenza automatica; il loro utilizzo viene spiegato nel dettaglio in *Tabella 6.22*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

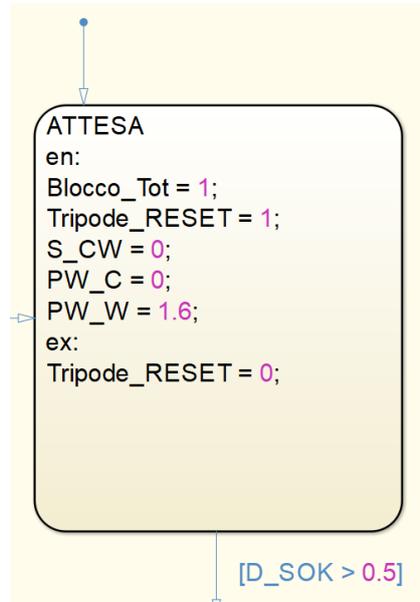


Figura 6.30 – Stato “Attesa”.

Tabella 6.22 – Variabili dello stato “Attesa”

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|---|---|
| <i>Blocco_Tot</i> | Variabile che provoca l’annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>MarPiano_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Assume il valore 1, ottenendo il blocco totale di tutti gli azionamenti. |
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene inizializzata ad 1. È importante notare che questo non causa il reset del conteggio e il salvataggio dell’angolo; ciò che lo causa è il successivo abbassamento a 0 una volta che si esce dallo stato di attesa. |
| <i>S_CW</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$ di commutazione controllo velocità/coppia ruote solari da controllore Speedgoat (0/5 V). | Viene inizializzato a 0 (controllo in velocità) e viene lasciato così per tutta la sequenza. |
| <i>PW_W</i> | Corrisponde al segnale $D_{RIFM,W}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore Speedgoat (0÷10 V). | Viene inizializzato ad 1.6 e lasciato così per tutta la sequenza di salita in quanto è il valore ottimale per coniugare una velocità di movimento delle pivotanti non troppo lenta ed una ottima precisione di raggiungimento del set imposto (errori nell’ordine del decimo di grado). |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|--------------|---|---|
| PW_C | Corrisponde al segnale $V_{RIFM,C}^{SG}$ di riferimento di velocità azionamento sedile da controllore Speedgoat (0÷10 V). | Viene inizializzato a 0 e lasciato così per tutta la sequenza di salita in quanto l'azionamento del sedile è rotto e non è stato possibile effettuare test sul valore ottimale da dare. |
| D_SOK | Segnale avvio riconfigurazione in posizione di Marcia in piano, eseguito da interfaccia utente tramite il pulsante SOK (0/1 V). | Si ha l'uscita dello stato di attesa quando supera il valore di 0.5 V, cioè quando il tasto viene premuto. |

6.11.2 Stato "Riconfigurazione"

Una volta entrato nello stato "RICONFIGURAZIONE" (Figura 6.31) avviene lo sblocco degli azionamenti e viene richiamata la funzione Matlab "calcolo_tripode"; il suo scopo è quello di calcolare il valore dell'angolo di rotazione da imporre al tripode (D_TetaP_SET) per ottenere la configurazione di marcia in piano. Viene inoltre imposto l'angolo delle ruote pivotanti da raggiungere. Dopo 1 secondo dall'ingresso dello stato avviene il controllo della transizione in uscita verso lo stato "MOVIMENTO" la quale controlla che l'errore sul tripode e sulle pivotanti sia all'interno di un certo range che permetta di considerare la riconfigurazione completata. In qualsiasi momento è possibile tornare allo stato *Attesa* spingendo in avanti il joystick. Riepilogo delle variabili usate in *Tabella 6.23*.



Figura 6.31 – Stato "Riconfigurazione".

Tabella 6.23 – Variabili dello stato "Riconfigurazione"

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-------------------|--|---|
| Blocco_Tot | Variabile che provoca l'annullamento di tutti i segnali contenuti in <i>MarPiano_out</i> , causando il blocco totale della carrozzina (0/1). | Assume il valore 0, ottenendo lo sblocco totale di tutti gli azionamenti. |

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

| | | |
|---------------------------|---|---|
| <i>TetaP_FB_1</i> | Feedback della posizione del tripode. Varia in un range da 0° a 120°, azzerandosi ogni terzo di giro (°). | Viene mandato in input alla funzione " <i>calcolo_tripode</i> " per conoscere la posizione del tripode e ricavare di quanti gradi dovrà ruotare e in che senso di rotazione per configurarsi in maniera corretta. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Valore in output dalla funzione " <i>calcolo_tripode</i> " che indica la rotazione che deve compiere il tripode per configurarsi in maniera corretta. |
| <i>TetaDU_SET</i> | Angolo che si vuole far raggiungere alle ruote pivotanti (°). | Viene imposto l'angolo di 98.1°, come da definizione da Marcia in piano. |
| <i>TetaP_ERR</i> | Rappresenta l'errore angolare sul tripode che viene corretto (°). | Viene verificato quando il suo valore diventa compreso tra $\pm 0.10^\circ$, sbloccando così lo stato " <i>Movimento</i> ". |
| <i>TetaDU_FB</i> | Angolo assunto dalle ruote pivotanti (°). | Viene confrontato con il valore imposto di set (<i>TetaDU_SET</i>), verificando che l'errore tra i due sia compreso tra $\pm 0.05^\circ$ e sbloccando così lo stato " <i>Movimento</i> ". |

6.11.3 Stato "*Movimento*"

Una volta entrato nello stato "*MOVIMENTO*" (Figura 6.32) avviene il reset della posizione del tripode e il suo set di rotazione viene portato a zero. In questa fase l'utente può controllare solo gli spostamenti della carrozzina usando il joystick, mentre la posizione di tutti gli altri gradi di libertà e dei vari settaggi sono bloccati nella configurazione di Marcia in piano. Nel momento in cui l'utente sceglie un'altra modalità tramite il selettore S_{FM} viene verificata la transizione in uscita e la sequenza torna alla modalità di *Attesa*, in questo modo qualsiasi variazione ai gradi di libertà venga fatta nelle altre modalità potrà venire nuovamente corretta rieseguendo il ciclo di questa macchina a stati. Le variabili vengono descritte nel dettaglio nella *Tabella 6.24*.

Sequenze automatiche di Salita gradino e di configurazione in Marcia in piano

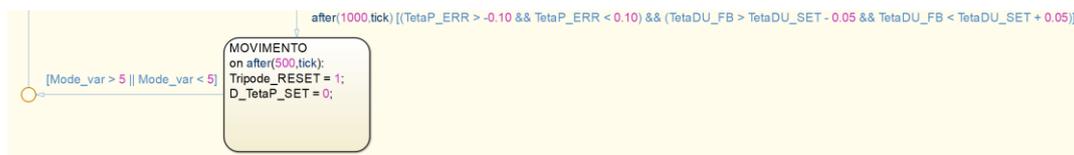


Figura 6.32 – Stato “Movimento”.

Tabella 6.24 – Variabili dello stato “Movimento”

| Simbolo | Descrizione | Valore |
|-----------------------------|--|--|
| <i>Tripode_RESET</i> | Variabile il cui innalzamento o abbassamento in valore permette la memorizzazione del valore di TetaP_FB_1 e il reset del conteggio dei giri del tripode (0/1). | Viene portato ad 1 memorizzando l'angolo del tripode raggiunto al termine della riconfigurazione ed azzerando il conteggio dei giri. |
| <i>D_TetaP_SET</i> | Delta di rotazione che si vuole far compiere al tripode. Con segno positivo se la rotazione voluta è in avanti, con segno negativo se è all'indietro (°). | Viene portato a 0 per non causare più la rotazione del tripode (assieme al reset della variabile <i>Tripode_RESET</i>) nella fase in cui l'utente controlla gli spostamenti della carrozzina. |
| <i>Mode_var</i> | Segnale inviato dallo switch (selettore S _{FM}). Assume i seguenti valori: 1 – Salita gradino; 2- Discesa gradino; 3 – Salita scala; 4 – Discesa scala; 5 – Marcia in piano; 6 – Modalità manuale; 7 – Stop. | La transizione si verifica nel momento in cui assume un valore diverso da 5, indicando che si è usciti dalla modalità di Marcia in piano. |

7 Test delle sequenze automatiche

In questo capitolo vengono mostrati i test di sequenza automatica di salita gradino. Per ogni prova vengono fornite le condizioni di partenza, i risultati che ci si aspetta sulla carta, i risultati invece ottenuti con la prova, i grafici utili a mostrare l'andamento della prova e delle immagini. Inizialmente viene presentato il metodo con cui è possibile mettere in funzione la carrozzina, in modo tale che leggendo questo capitolo un utente o un nuovo tesista possa prima imparare ad utilizzarla e poi replicare le prove.

7.1 Istruzioni per l'utilizzo della carrozzina

I seguenti passaggi permettono di imparare ad avviare la carrozzina ed utilizzare le modalità di funzionamento ad ora implementate.

1. Avviare l'apposito computer portatile fornito dal Politecnico di Torino.
2. Inserire le credenziali fornite nella nota presente insieme al PC.
3. Avviare *Matlab R2016a* come amministratore.
4. Accendere la carrozzina tramite l'apposito interruttore (Figura 7.1), verificando che per sicurezza il pulsante di emergenza rosso (S_{EM}), posto sull'interfaccia utente, sia premuto (Figura 7.2).

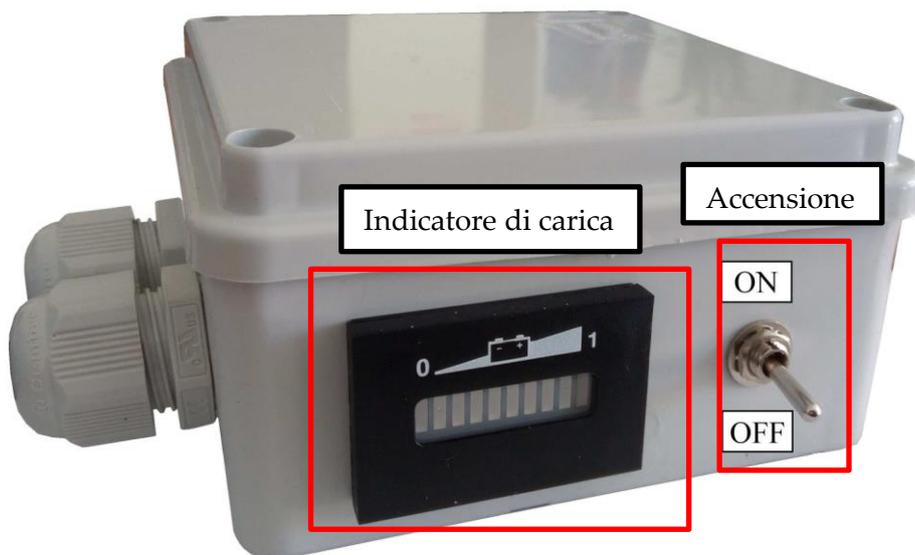


Figura 7.1 – Interruttore di accensione e indicatore di carica.

Test delle sequenze automatiche

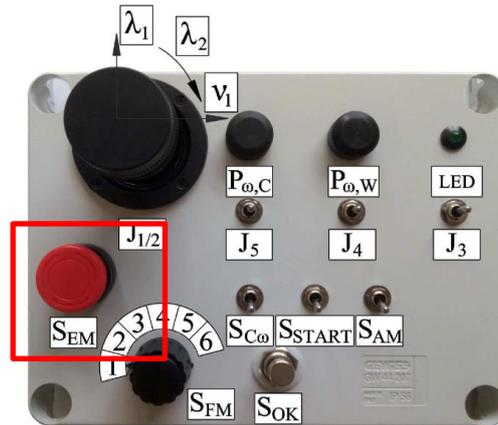


Figura 7.2 – Pulsante di emergenza S_{EM} .

5. Se la carrozzina non si accende (l'indicatore di carica a fianco dell'interruttore di accensione non si illumina) significa che la batteria è scarica. Collegare quindi l'alimentatore all'apposito cavo presente nella parte posteriore destra della carrozzina (Figura 7.3) ed attendere che avvenga la ricarica. Evitare di lasciare il prototipo il laboratorio collegato alla presa di corrente durante le ore notturne.



Figura 7.3 – Cavo di collegamento per l'alimentatore.

Test delle sequenze automatiche

6. Verificare che il Lidar sia collegato correttamente alla scheda Arduino. Verificare (Figura 7.4) che il cavo USB che collega Arduino con lo Speedgoat sia collegato e che l'adattatore seriale che collega Arduino con la porta COM1 (connettore RS232) presente sullo Speedgoat sia collegato anch'esso (per i dettagli su tutti i collegamenti tra Lidar/Arduino/Speedgoat vedere il *Capitolo 4*). Il Lidar deve iniziare a girare. Collegare il pc portatile al controllore Speedgoat con il cavo Ethernet fornito; fare attenzione ad utilizzare la porta "HostLink" posta di fianco al connettore seriale.

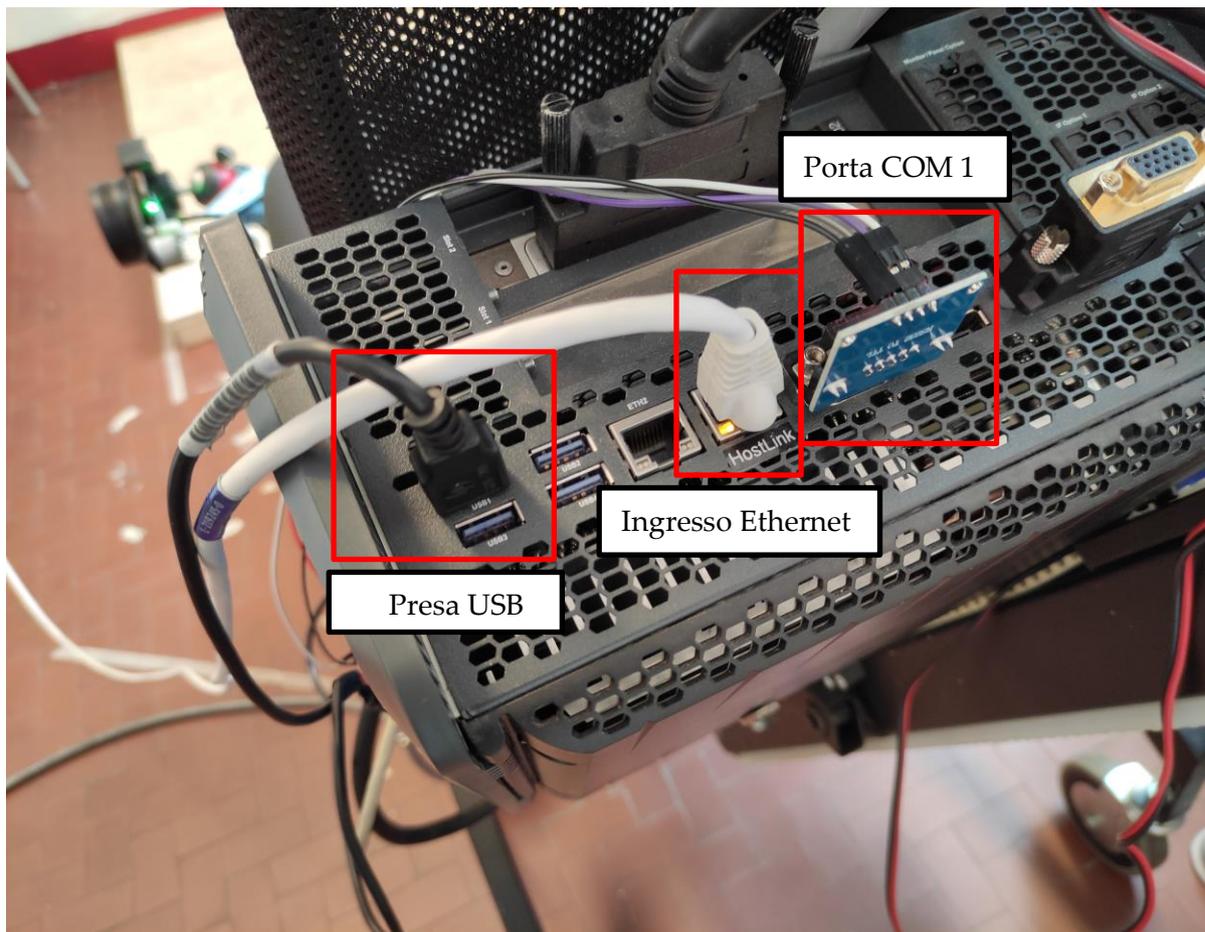


Figura 7.4 – Collegamenti Arduino/Speedgoat e collegamento PC/Ethernet.

7. Digitare sulla "Command Window" di Matlab il comando "`>> slrtexplr`" per aprire l'interfaccia di "Simulink Real-Time Explorer". Una volta aperta l'interfaccia fare clic su *MATLAB Session > TargetPC1 > Properties* (Figura 7.5). Andare su *Boot configuration* e cliccare su *Create boot disk* (Figura 7.6). Una volta comparsa la notifica

Test delle sequenze automatiche

sulla parte bassa destra dello schermo bisogna riavviare la carrozzina tramite l'interruttore di accensione.

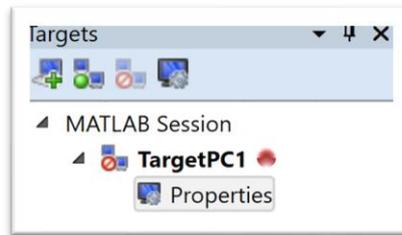


Figura 7.5 – Schermata Simulink Real-Time Explorer - Targets.

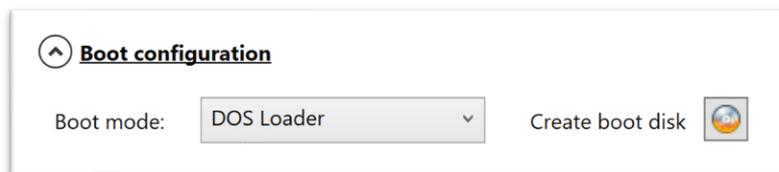


Figura 7.6 – Schermata Simulink Real-Time Explorer - Targets.

8. Attendere una trentina di secondi e digitare sulla *Command Window* il comando "`>> slrtpingtarget`". Se restituisce a schermo il messaggio "*success*" significa che la sedia comunica correttamente con il PC; se restituisce "*failed*" significa che non si ha comunicazione. Nel secondo caso il problema è risolvibile riavviando nuovamente da carrozzina senza ripetere i punti fino al 7.
9. Aprire il file "*Modalita_manuale.slx*" da Matlab facendo attenzione che la cartella contenente il file, chiamata "*Modalità manuale_non originale*" sia aperta nella colonna sinistra "*Current Folder*" e visibile nella barra percorso file in alto (Figura 7.7).

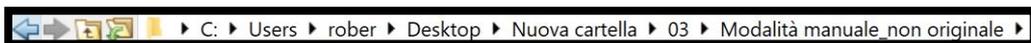


Figura 7.7 – Es di percorso file (percorso non corrispondente a quello del PC del Poli).

10. Sul modello Simulink cliccare su "*Build Model*" (Figura 7.8) ed attendere senza cliccare da nessuna parte che il procedimento sia ultimato (possono essere necessari anche un paio di minuti). Cliccare su "*Connect To Target*" ed attendere nuovamente

Test delle sequenze automatiche

che il procedimento sia ultimato senza cliccare a schermo per evitare crash del programma (anche qui possono volerci fino ad un paio di minuti). Cliccare infine su "Run". Facendo così, il modello Simulink è stato compilato, trasferito sullo Speedgoat e la simulazione avviata. Quando si desidera interrompere la simulazione schiacciare il tasto "Stop". È importante ricordare che ad ogni modifica del modello Simulink va ripetuto l'intero punto 10.



Figura 7.8 – Comandi per la simulazione

11. (Opzionale) Tornare sulla schermata di *Simulink Real-Time Explorer*, andare sulla finestra "Panels" (Figura 7.9) e cliccare con il destro su "Instrument Panels", poi cliccare "Existing..." e aprire "Pannello_monitoraggio.slrtip" per visualizzare il pannello di monitoraggio che mostra in tempo reale le grandezze principali ricevute dai trasduttori posti sulla carrozzina.



Figura 7.9 – Scheda Panels

12. Prima di utilizzare liberamente la sedia occorre effettuare l'operazione preliminare di sincronizzazione del trasduttore di posizione del tripode, necessaria ogni volta che la sedia viene accesa. Per farla è sufficiente selezionare tramite switch la *Modalità manuale* (posizione numero 6 del selettore S_{FM}) (Figura 7.10), sbloccare il pulsante di emergenza S_{EM} , e ruotare il tripode di almeno 120° in qualsiasi senso tramite la torsione del joystick (λ_2). Tramite il pannello di monitoraggio è possibile verificare la sincronizzazione; quando si hanno due ruote del tripode a contatto con il terreno con un angolo θ_P di circa 82° significa che l'angolo è sincronizzato correttamente ed

Test delle sequenze automatiche

è possibile utilizzare la carrozzina e tutte sue le modalità di funzionamento ad ora disponibili.

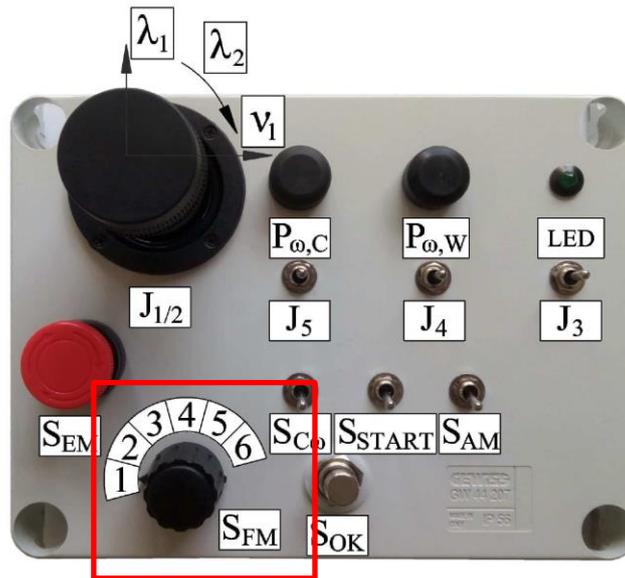


Figura 7.10 – Switch modalità di funzionamento S_{FM} .

NORME DI UTILIZZO: In fase di sperimentazione è importante ricordare che ogni volta che non si usa la carrozzina il pulsante di emergenza va premuto per sicurezza, anche se si distoglie l'attenzione per brevi istanti di tempo. Fare attenzione che i cavi non siano di intralcio. Operare sempre in condizioni di sicurezza, tenendo il dito appoggiato al pulsante di emergenza durante le sequenze automatiche. Non stazionare in prossimità della sedia.

7.2 Prove di Salita del gradino

Sono state effettuate 7 prove (Tabella 7.1, Tabella 7.2 e Tabella 7.3): le prime 4 con la pedana standard alta 68 mm presente in laboratorio; la quinta, la sesta e la settima con la stessa pedana, ma rialzata a 90 mm grazie a degli inserti in legno. In ogni prova la carrozzina è stata posizionata di fronte al gradino ad una distanza diversa e con angoli dei tripodi e delle ruote pivotanti casuali (per fare questo la carrozzina è stata movimentata grazie alla *Modalità manuale*, utilizzabile con la posizione numero 6 del selettore S_{FM}). Una volta scelta la posizione di partenza è necessario selezionare tramite lo switch la *Modalità di salita gradino* (posizione numero 1 del selettore S_{FM}); facendo questo vengono inviati agli azionamenti gli output

Test delle sequenze automatiche

prodotti dalla macchina a stati vista nel *Capitolo 6*, in particolare è attivo lo stato *Attesa* (durante questo stato gli azionamenti sono bloccati e non si può spostare la carrozzina in alcuno modo, per farlo occorre andare nella *Modalità manuale* o di *Marcia in piano*). Per iniziare la sequenza di salita gradino è quindi sufficiente premere l'interruttore S_{OK} , che innesca tutta la sequenza automatica vista nel *Capitolo 6*. Per visualizzare gli angoli di partenza è stato usato il pannello di monitoraggio descritto nel *Capitolo 7.1*.

| Tabella 7.1 – Risultati prove salita gradino – Parte 1 | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------|---|--------------------|---|----|------|------------------|
| N° prova | Distanza di partenza (mm) | | Angoli di partenza (°) | | Distanza per scansione di precisione (mm) | | Valori gradino scansione di precisione (mm) | | | |
| | Teorica | Rilevata Lidar (d) | θ_p 0 ÷ 120 | θ_{DU} | Teorica | Rilevata col metro | d | h | e | condizione (0/1) |
| 1 | 1400 | 1587 | 92 | 99.4 | 700 | 500 | 500 | 69 | 1816 | 1 |
| 2 | 1000 | 1099 | 116 | 97.3 | 700 | 690 | 714 | 67 | 1800 | 1 |
| 3 | 600 | 658 | 93 | 88 | 600 | / | 658 | 63 | 1810 | 1 |
| 4 | 800 | 1051 | 72 | 95 | 700 | 600 | 568 | 72 | 1695 | 1 |
| 5 | 1000 | 1078 | 87 | 98 | 700 | 600 | 681 | 98 | 1784 | 1 |
| 6 | 1000 | 1069 | 88 | 102.7 | 700 | 681 | 712 | 92 | 1802 | 1 |
| 7 | 500 | 510 | 89 | 98 | 500 | / | 510 | 88 | 1820 | 1 |

| Tabella 7.2 – Risultati prove salita gradino – Parte 2 | | | | |
|--|--------------------|----------|--------|-----------------------|
| N° prova | Tempo sequenza (s) | | | Avvicinamento (si/no) |
| | Avvicinamento | A0-A1-A2 | Totale | |
| 1 | 25 | 18 | 1:54 | Sì |
| 2 | 12 | 19 | 1:30 | Sì |
| 3 | / | 24 | 1:23 | No |
| 4 | 12 | 20 | 1:41 | Sì |
| 5 | 12 | 21 | 1:47 | Sì |
| 6 | 12 | 18 | 1:35 | Sì |
| 7 | / | 17 | 1:30 | No |

Tabella 7.3 - Parametri delle Tabelle 7.1 e 7.2.

| Nome | Descrizione |
|--|---|
| N° prova | Identifica la prova di salita gradino. Le prime 4 sono state eseguite con un gradino di altezza (h) pari a 68 mm; la numero 5 è stata eseguita con un gradino di altezza (h) pari a 90 mm. In tutte e cinque le prove lo spazio disponibile dopo il gradino (e) è pari a 1500 mm e il gradino è sempre superabile (condizione = 1). |
| Distanza di partenza – Teorica (mm) | Rappresenta la distanza dal gradino a cui viene posizionata la carrozzina prima di iniziare la sequenza automatica. Viene misurata con un metro a nastro posizionato sul pavimento. |

Test delle sequenze automatiche

| | |
|--|--|
| <i>Distanza di partenza – Rilevata Lidar (mm)</i> | Rappresenta la distanza dal gradino (d) che viene rilevata dalla prima scansione eseguita dal Lidar. |
| <i>Angoli di partenza – θ_p (°)</i> | Rappresenta l'angolo del tripode (0÷120°), rilevato attraverso il pannello di monitoraggio, che assume la carrozzina all'inizio della sequenza automatica. La sua posizione è stata scelta casualmente. |
| <i>Angoli di partenza – θ_{DU} (°)</i> | Rappresenta l'angolo delle ruote pivotanti, rilevato attraverso il pannello di monitoraggio, che assume la carrozzina all'inizio della sequenza automatica. La sua posizione è stata scelta casualmente. |
| <i>Distanza per scansione di precisione – Teorica (mm)</i> | Rappresenta la distanza dal gradino a cui dovrebbe arrivare la carrozzina in seguito alla fase di avvicinamento e dove dovrebbe partire la scansione di precisione; è fissata a 700 mm. |
| <i>Distanza per scansione di precisione – Rilevata col metro (mm)</i> | Rappresenta la distanza dal gradino a cui arriva la carrozzina in seguito alla fase di avvicinamento e dove parte la scansione di precisione. Viene misurata con il metro a nastro. |
| <i>Valori gradino scansione di precisione – d (mm)</i> | Rappresenta la distanza dal gradino misurata dal Lidar durante la scansione di precisione. |
| <i>Valori gradino scansione di precisione – h (mm)</i> | Rappresenta l'altezza del gradino misurata dal Lidar durante la scansione di precisione. |
| <i>Valori gradino scansione di precisione – e (mm)</i> | Rappresenta lo spazio successivo al gradino misurato dal Lidar durante la scansione di precisione. |
| <i>Valori gradino scansione di precisione – Condizione (0/1)</i> | Rappresenta la valutazione della superabilità (No = 0; Si = 1) del gradino effettuata durante la scansione di precisione. |
| <i>Tempo sequenza – avvicinamento (s)</i> | Tempo necessario a completare la fase di avvicinamento |
| <i>Tempo sequenza – A0 – A1 – A2 (s)</i> | Tempo necessario a completare la fase A0-A1-A2. |
| <i>Tempo sequenza – Totale (s)</i> | Tempo necessario a completare l'intera sequenza automatica di salita gradino. |
| <i>Avvicinamento (sì/no)</i> | Indica se all'interno della sequenza automatica è stata eseguita la fase di avvicinamento. Come previsto nella prova numero 3 non si è verificata in quanto la carrozzina partiva da una distanza pari a 600 mm ed ha eseguito subito la scansione di precisione, per poi iniziare la fase A0-A1-A2. |

Di seguito verrà descritta nel dettaglio l'esecuzione della prova numero 6 e della prova numero 7; verranno inoltre mostrati i grafici di entrambe le prove. Le altre prove non vengono descritte in quanto analoghe; i loro risultati sono visibili in Tabella 7.1 e 7.2. Al termine del capitolo verranno tratte le conclusioni di tutte le prove per ipotizzare futuri miglioramenti della sequenza.

7.2.1 Prova n° 6

In questa prova la carrozzina è stata posta ad una distanza pari a 1000 mm dal gradino (verificata con il metro a nastro), con un angolo del tripode casuale e pari a 88° ed un angolo delle ruote pivotanti casuale e pari a 102.7° (gli angoli sono visibili in tempo reale dal pannello di monitoraggio). Una volta terminato il posizionamento della carrozzina è stata selezionata la modalità di *Salita Gradino* (posizione numero 1 del selettore S_{FM}) ed è stato premuto l'interruttore S_{OK} . La sequenza automatica ha attraversato i seguenti stati della macchina a stati (è indicato anche il valore della variabile "*Fasi_sequenza*", utile a identificare le fasi della sequenza automatica):

1. *ATTESA* (*Fasi_sequenza* = 1): prima di premere l'interruttore S_{OK} la carrozzina è ferma, posizionata come illustrato in precedenza ed è pronta ad iniziare la sequenza automatica. Quando si vuole procedere basta premere l'interruttore S_{OK} .
2. *CREAZIONE_MATRICE_LIDAR* (*Fasi_sequenza* = 2): inizia la scansione grossolana, della durata di 5 secondi, la carrozzina è sempre bloccata.
3. *MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA* (*Fasi_sequenza* = 2): avviene il calcolo dei parametri geometrici del gradino.
4. *AVVICINAMENTO_PER_LA_SECONDA_MISURAZIONE* (*Fasi_sequenza* = 3): il Lidar rileva una distanza dal gradino $d = 1069$ mm, superiore ai 800 mm. Si innesca quindi la fase di avvicinamento (durato 125 secondi), che deve portare la carrozzina ad una distanza di 700 mm dal gradino per eseguire la scansione di precisione. Terminato l'avvicinamento si rileva con il metro la distanza dal gradino al quale è effettivamente arrivata la carrozzina, pari a 681 mm.
5. *CREAZIONE_MATRICE_LIDAR* (*Fasi_sequenza* = 4): avviene la scansione di precisione, della durata di 5 secondi, la carrozzina è bloccata.
6. *MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA* (*Fasi_sequenza* = 4): avviene il calcolo dei parametri geometrici del gradino.
7. *CALCOLO_DEGLI_ANGOLI* (*Fasi_sequenza* = 5): il Lidar rileva una distanza dal gradino $d = 712$ mm e valuta il gradino come superabile (condizione = 1), di conseguenza la macchina a stati procede con il calcolo del set degli angoli propedeutico all'esecuzione della fase di salita.

Test delle sequenze automatiche

8. *A0_A1_A2 / FINE_SEQUENZA* (*Fasi_sequenza* = 5): avviene l'intera sequenza automatica. La fase A0-A1-A2 dura 18 secondi; l'intera sequenza, dalla scansione grossolana fino al completamento, è durata 1 minuto e 35 secondi.
9. *ATTESA* (*Fasi_sequenza* = 1): la carrozzina torna autonomamente in attesa, bloccandosi. La prova è terminata.
10. Si preme *Stop* sul modello Simulink ed è ora possibile aprire i grafici descritti nel *Capitolo 6.5*, cliccando direttamente su di essi.

7.2.2 Prova n° 7

In questa prova la carrozzina è stata posta ad una distanza pari a 500 mm dal gradino (verificata con il metro a nastro), con un angolo del tripode casuale e pari a 89° ed un angolo delle ruote pivotanti casuale e pari a 98° (gli angoli sono visibili in tempo reale dal pannello di monitoraggio). Una volta terminato il posizionamento della carrozzina è stata selezionata la modalità di *Salita Gradino* (posizione numero 1 del selettore S_{FM}) ed è stato premuto l'interruttore S_{OK} . La sequenza automatica ha attraversato i seguenti stati della macchina a stati (è indicato anche il valore della variabile "*Fasi_sequenza*", utile a identificare le fasi della sequenza automatica):

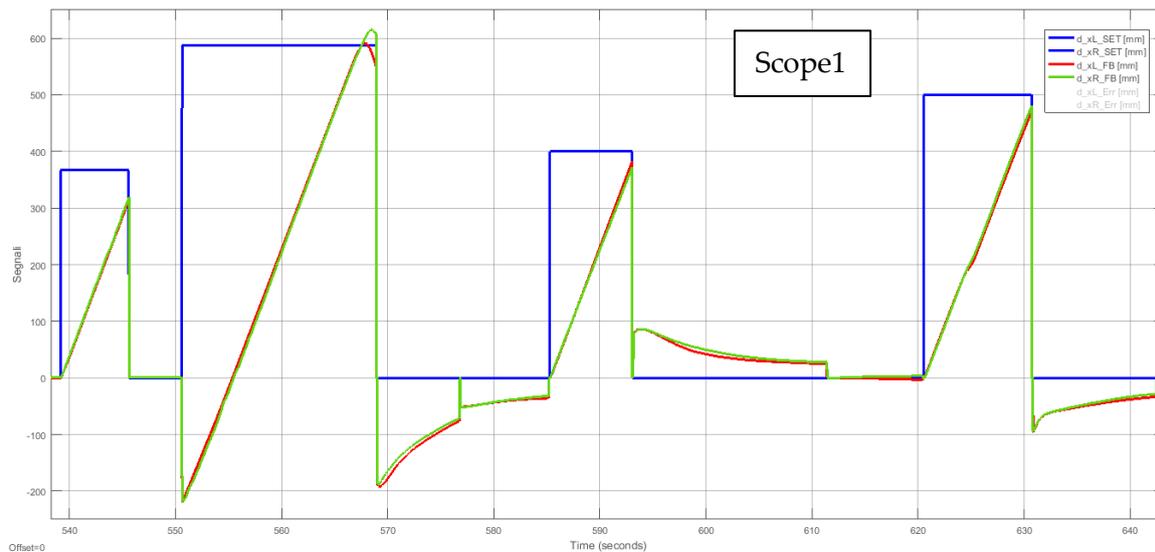
1. *ATTESA* (*Fasi_sequenza* = 1): prima di premere l'interruttore S_{OK} la carrozzina è ferma, posizionata come illustrato in precedenza ed è pronta ad iniziare la sequenza automatica. Quando si vuole procedere basta premere l'interruttore S_{OK} .
2. *CREAZIONE_MATRICE_LIDAR* (*Fasi_sequenza* = 2): la scansione eseguita sarà di precisione in quanto ci si trova ad una distanza inferiore a 800 mm dal gradino. La sua durata è di 5 secondi e la carrozzina è sempre bloccata.
3. *MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA* (*Fasi_sequenza* = 2): avviene il calcolo dei parametri geometrici del gradino.
4. *CALCOLO_DEGLI_ANGOLI* (*Fasi_sequenza* = 5): il Lidar rileva una distanza dal gradino $d = 510$ mm e valuta il gradino come superabile (condizione = 1), di conseguenza la macchina a stati procede con il calcolo del set degli angoli propedeutico all'esecuzione della fase di salita.

Test delle sequenze automatiche

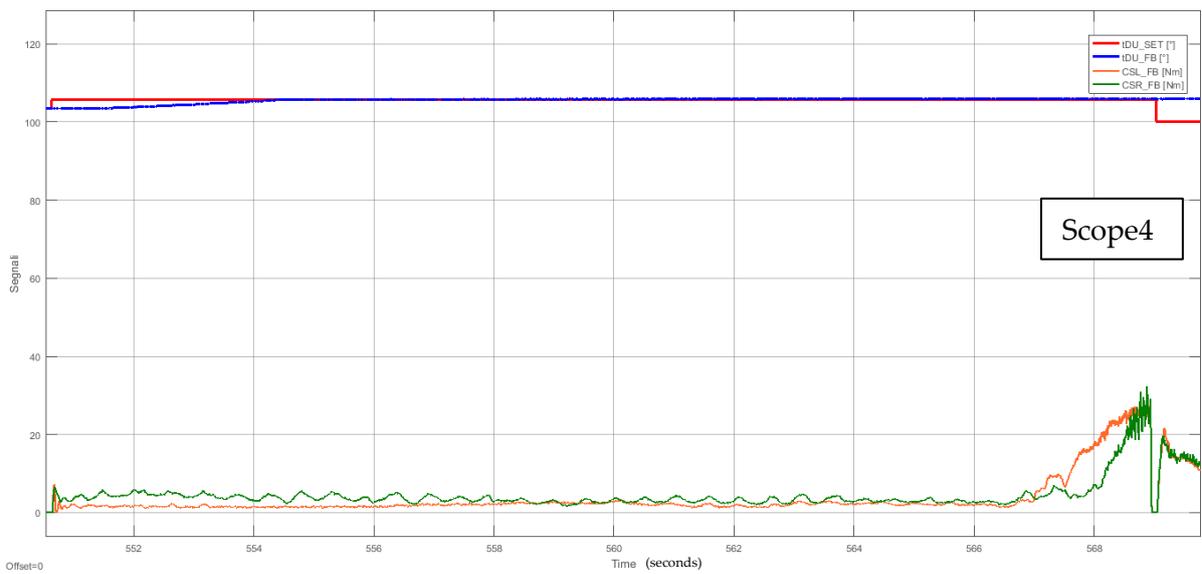
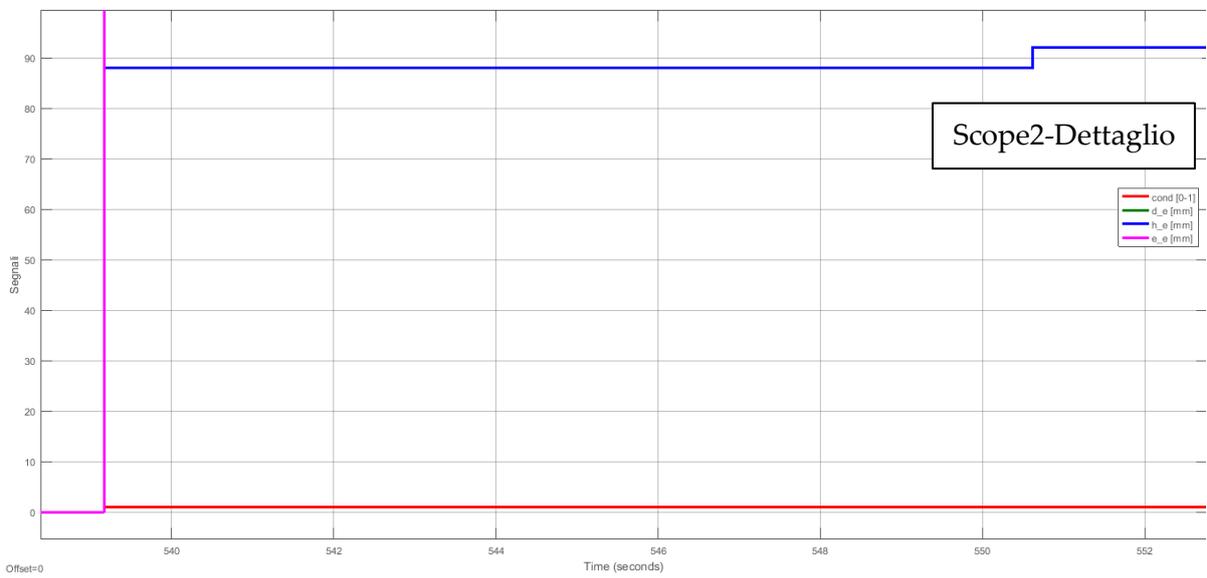
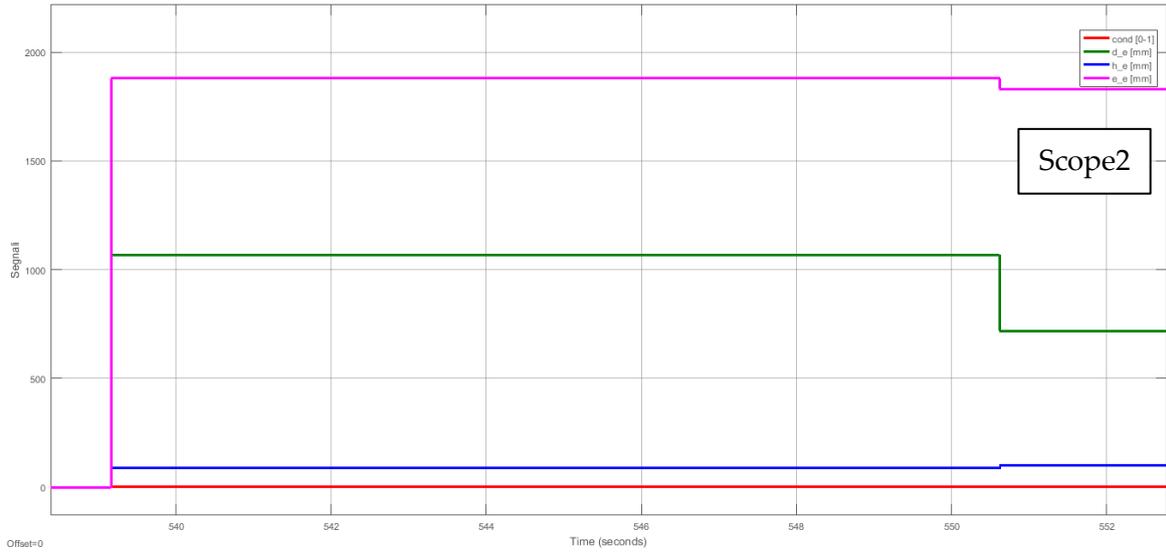
5. *A0_A1_A2 / FINE_SEQUENZA* (*Fasi_sequenza* = 5): avviene l'intera sequenza automatica. La fase A0-A1-A2 dura 17 secondi; l'intera sequenza, dalla scansione di precisione fino al completamento, è durata 1 minuto e 30 secondi.
6. *ATTESA* (*Fasi_sequenza* = 1): la carrozzina torna autonomamente in attesa, bloccandosi. La prova è terminata.
7. Si preme *Stop* sul modello Simulink ed è ora possibile aprire i grafici descritti nel *Capitolo 6.5* cliccando direttamente su di essi.

Per le prove 6 e 7 vengono mostrati i grafici denominati: *Scope1*, *Scope2*, *Scope2 in dettaglio*, *Scope4*, *Scope5*, *Scope7* e *Scope9*, descritti nel *Capitolo 6.5*.

7.2.3 Grafici della Prova n° 6



Test delle sequenze automatiche



Test delle sequenze automatiche

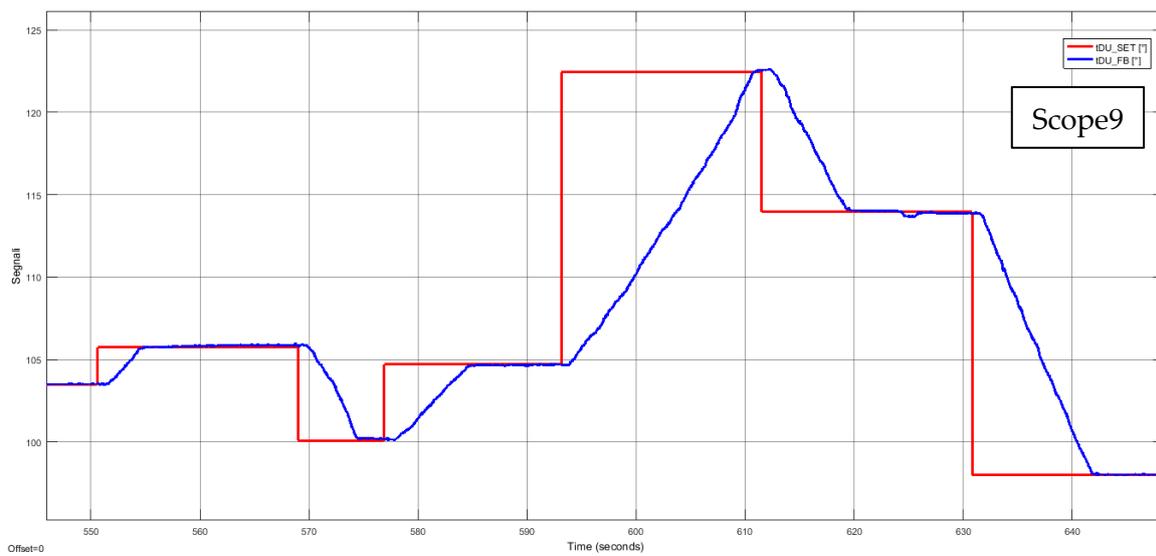
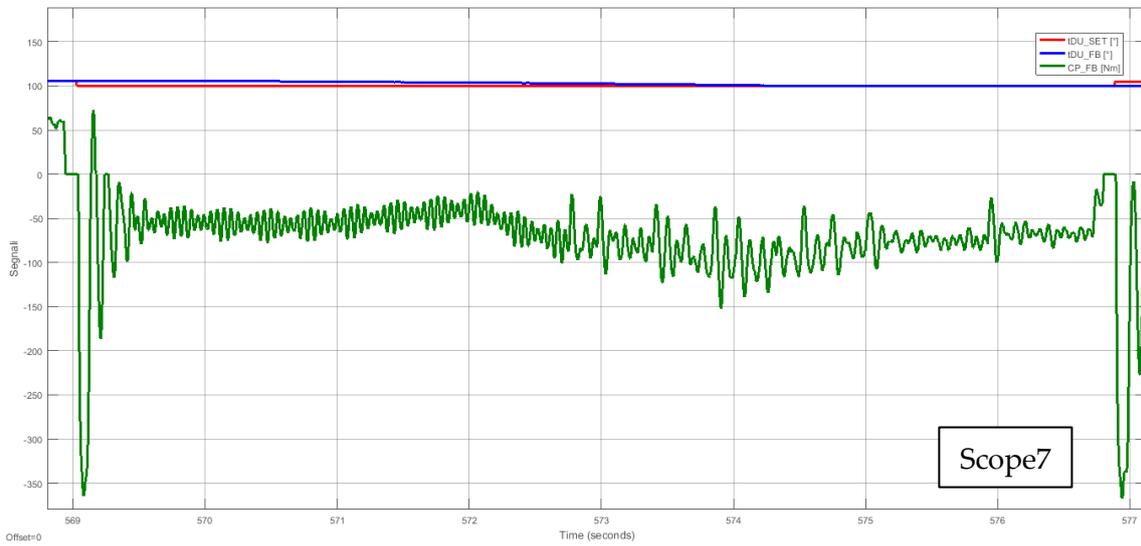
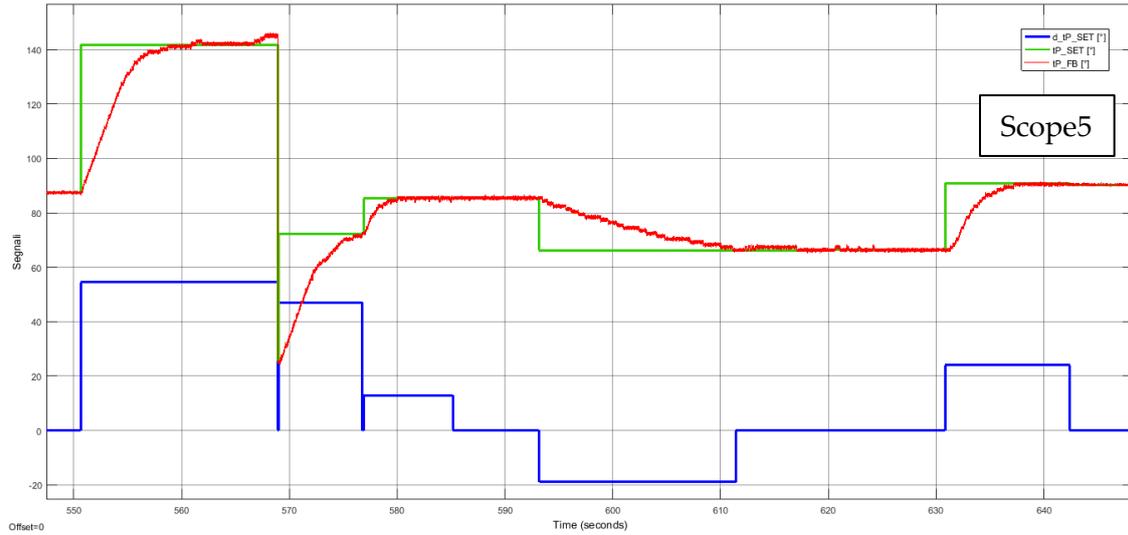
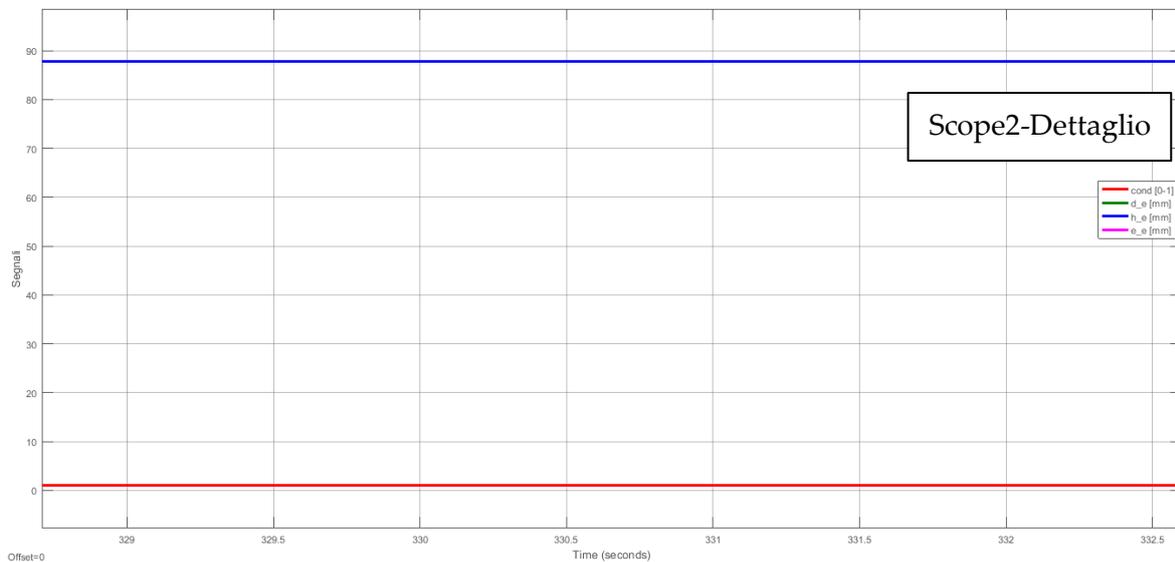
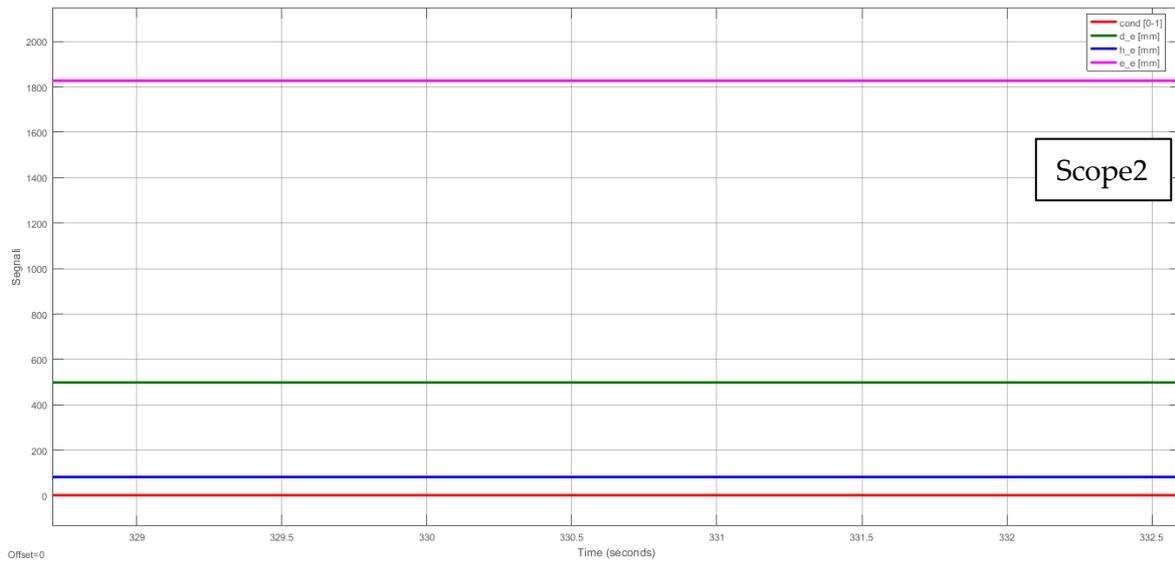
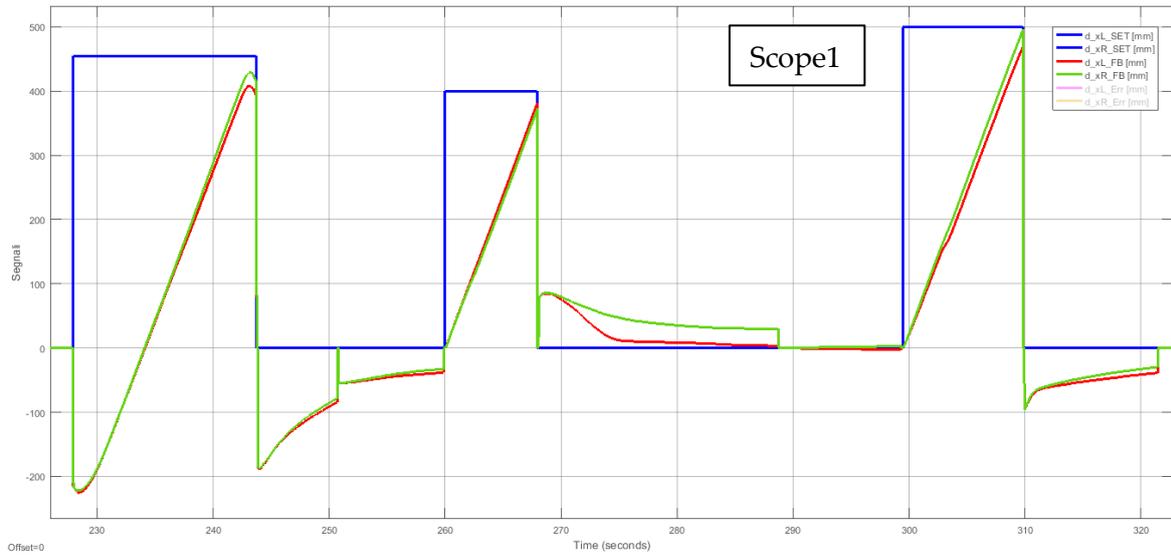


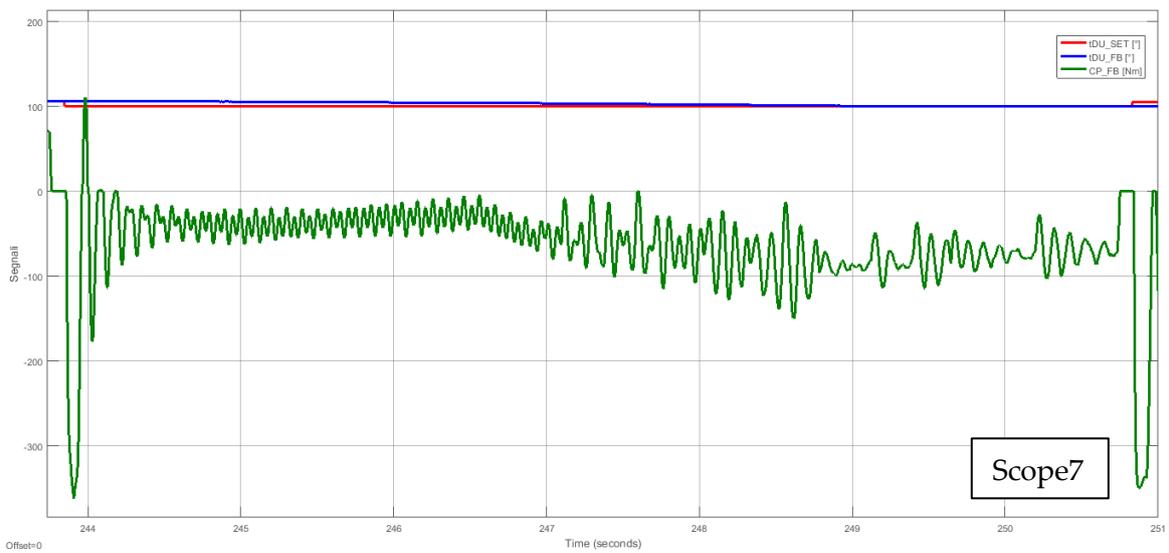
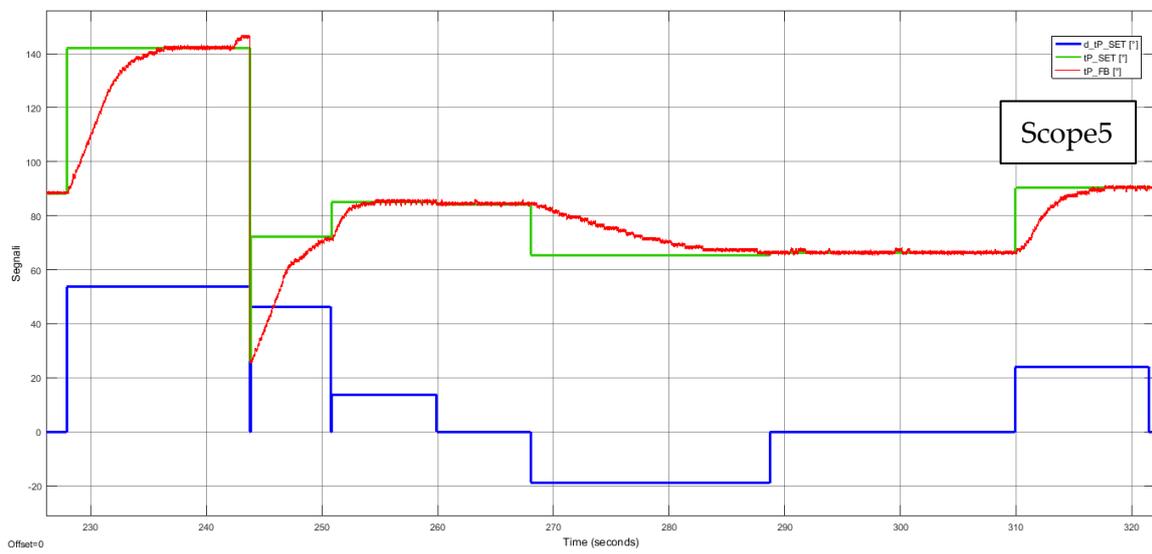
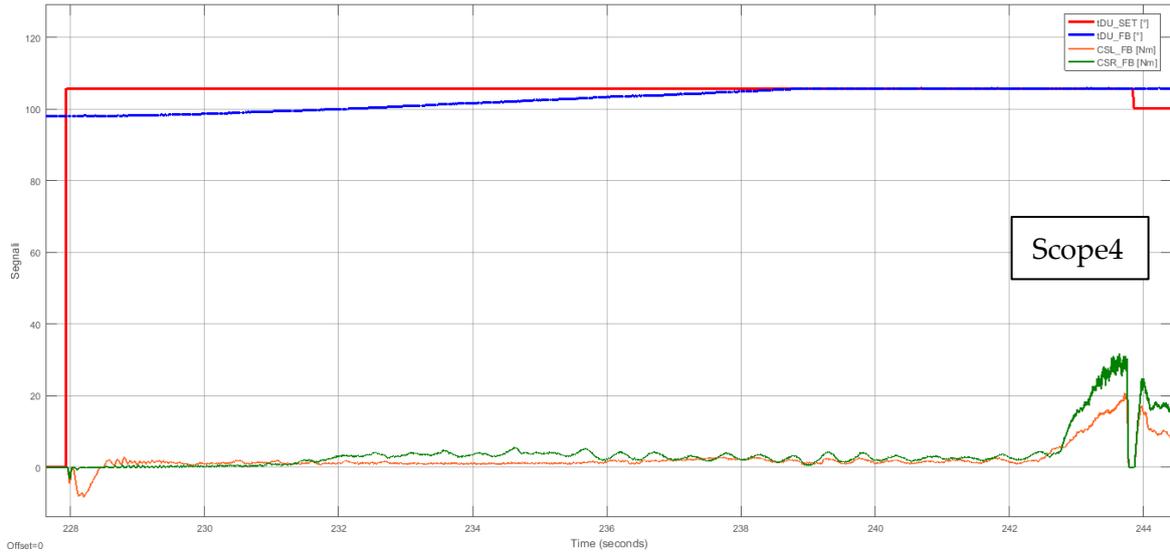
Figura 7.11 – Grafici Prova n° 6

Test delle sequenze automatiche

7.2.4 Grafici della Prova n° 7



Test delle sequenze automatiche



Test delle sequenze automatiche

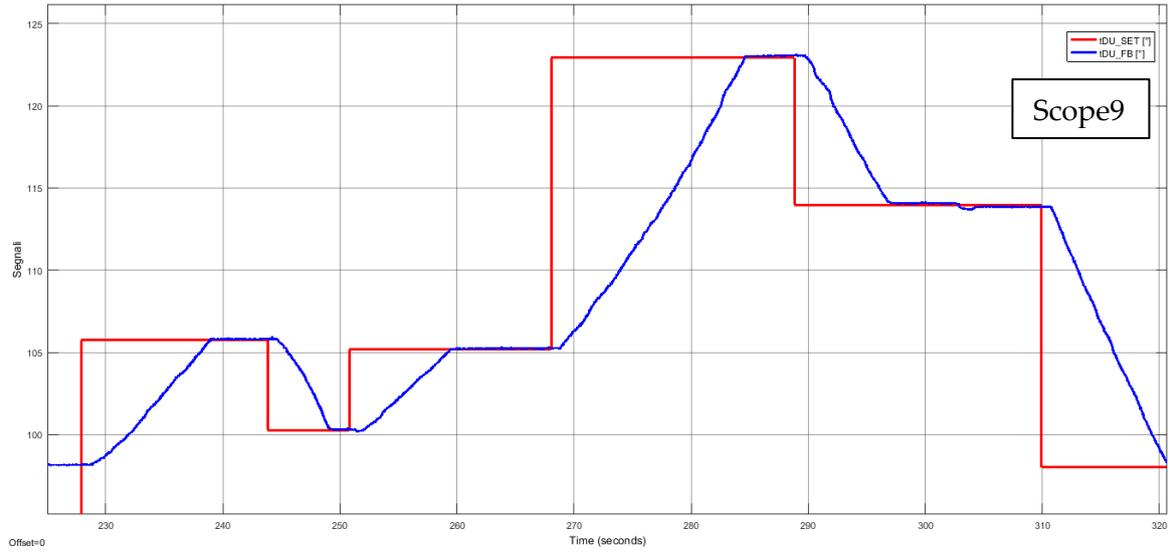
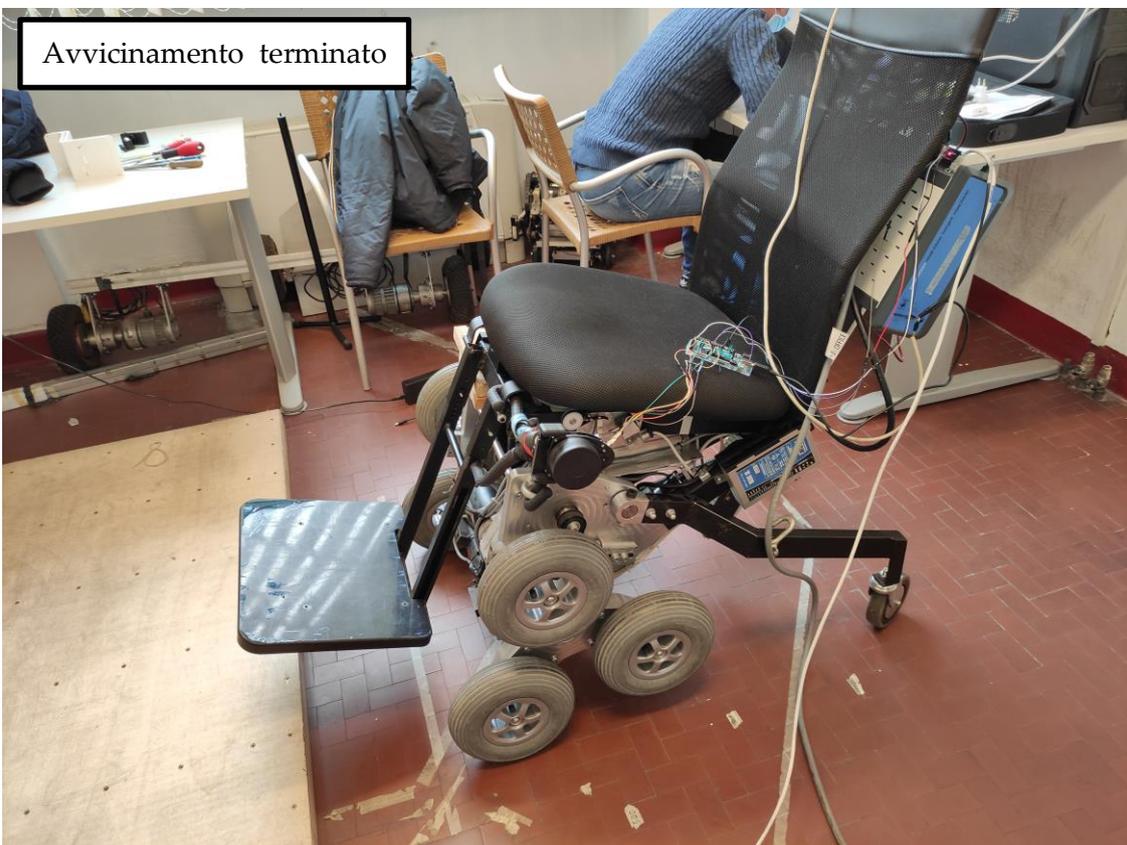


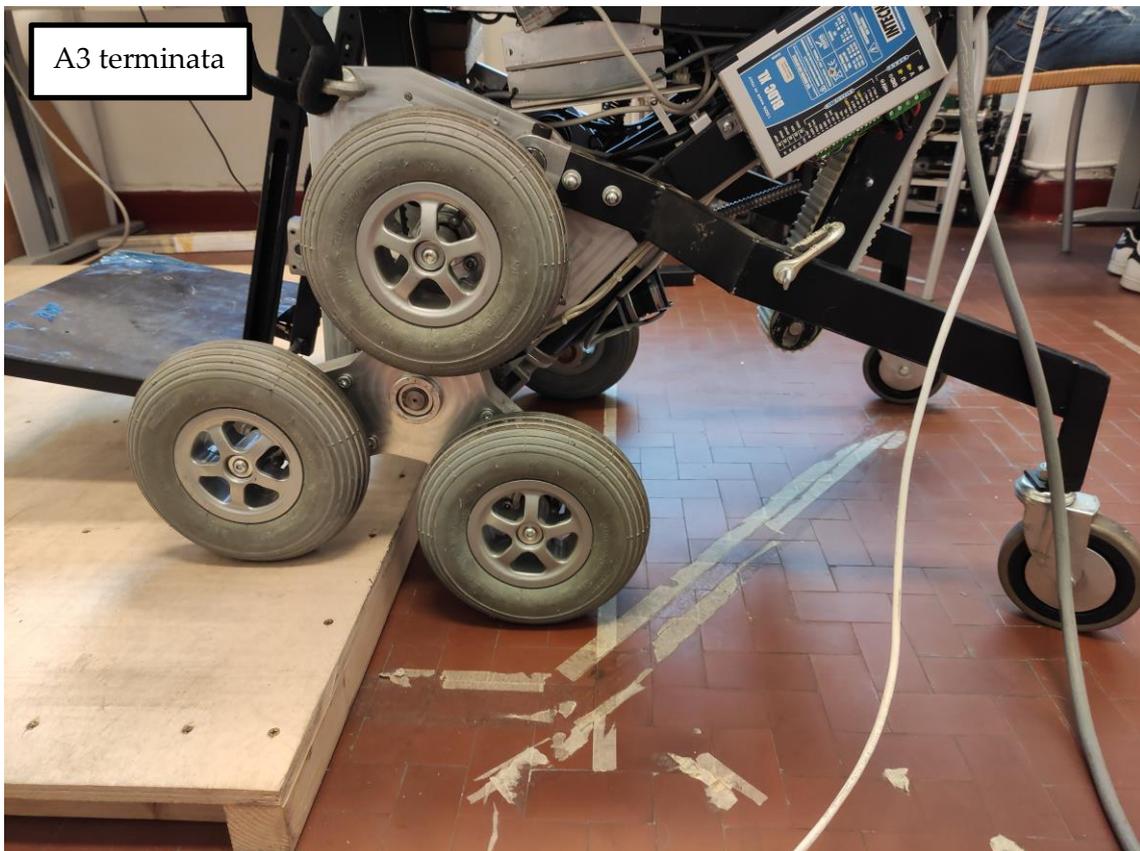
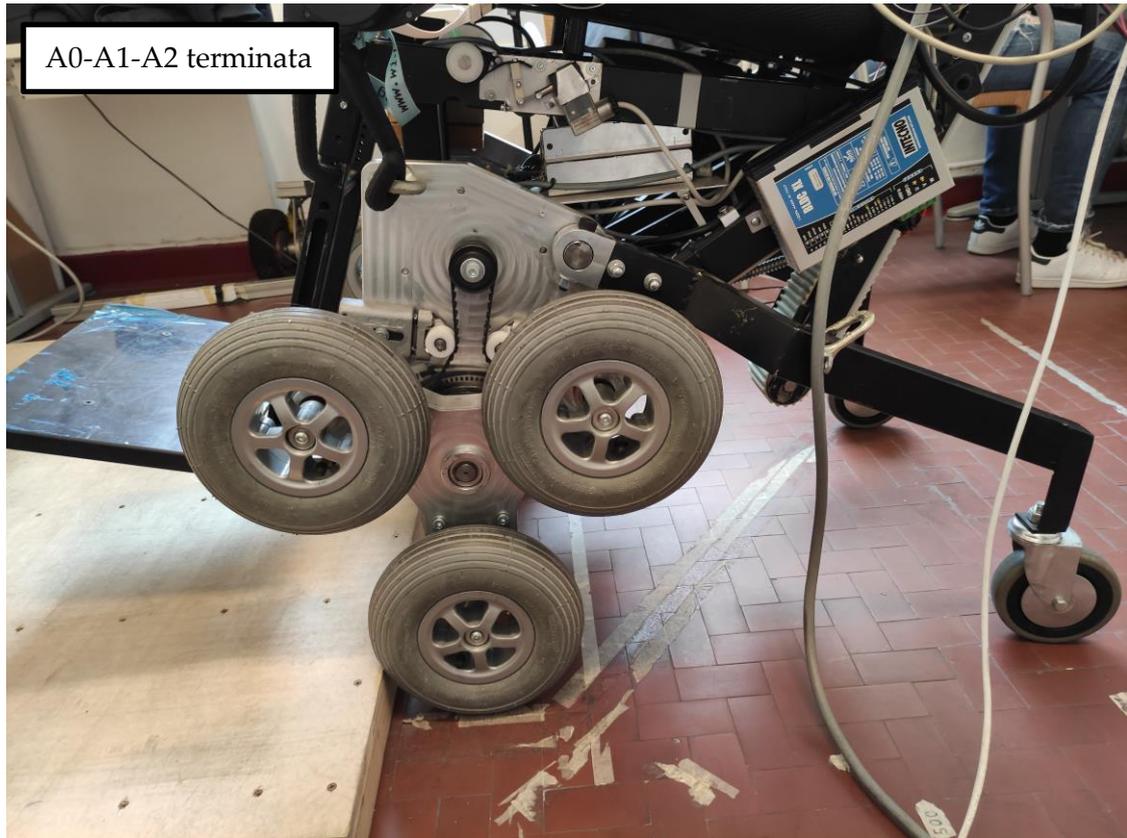
Figura 7.12 – Grafici Prova n° 7.

Test delle sequenze automatiche

7.2.5 Foto della Prova n° 1



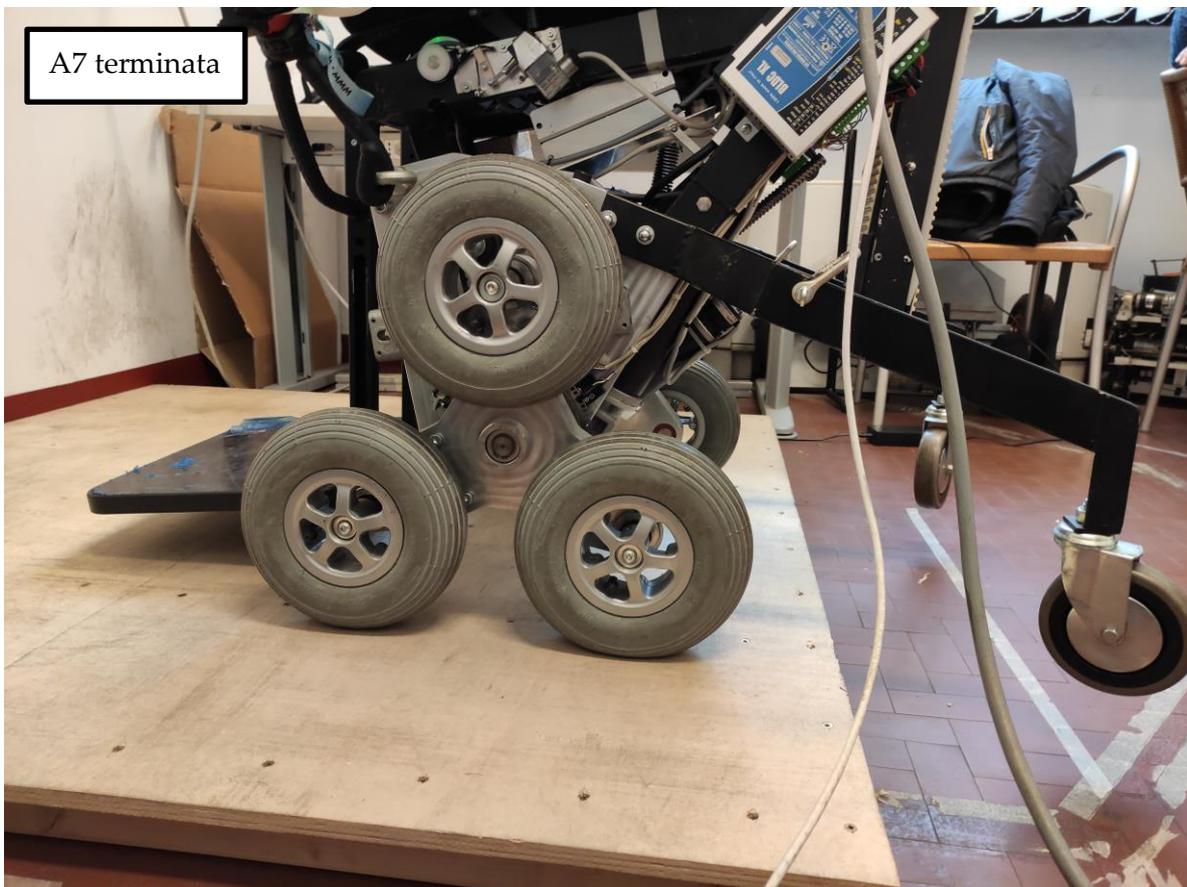
Test delle sequenze automatiche



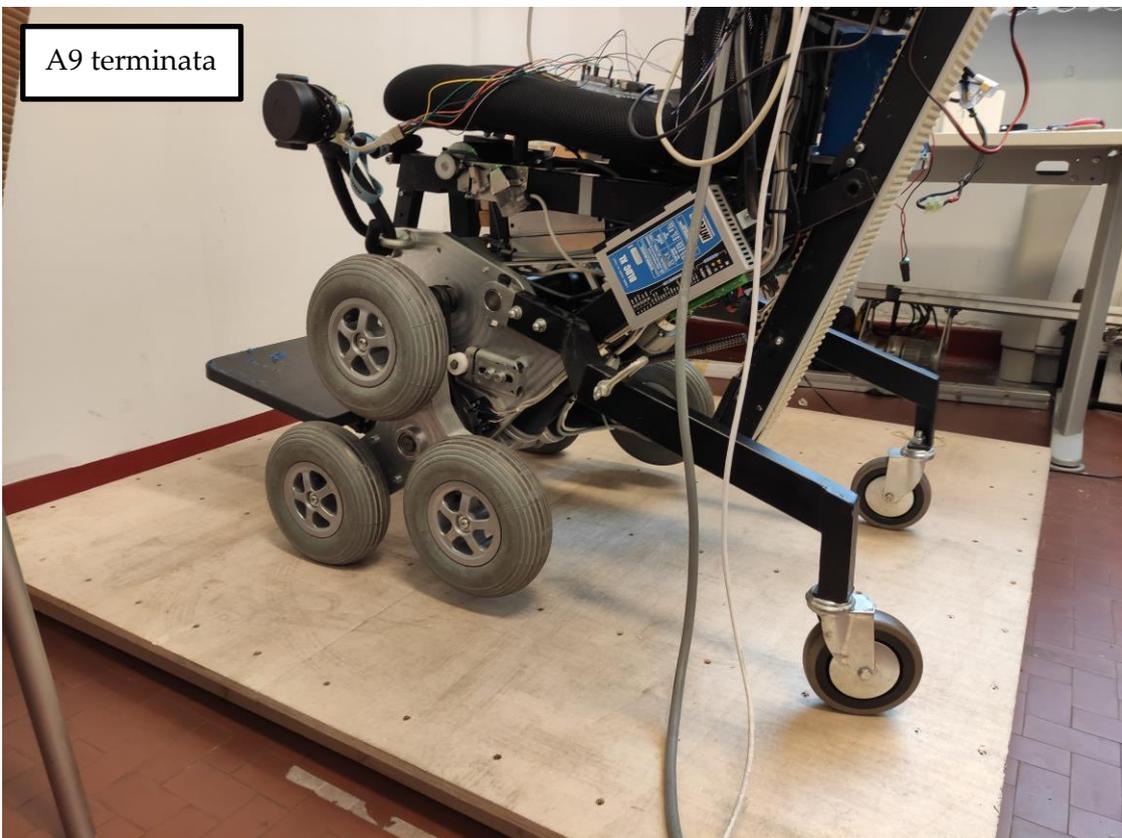
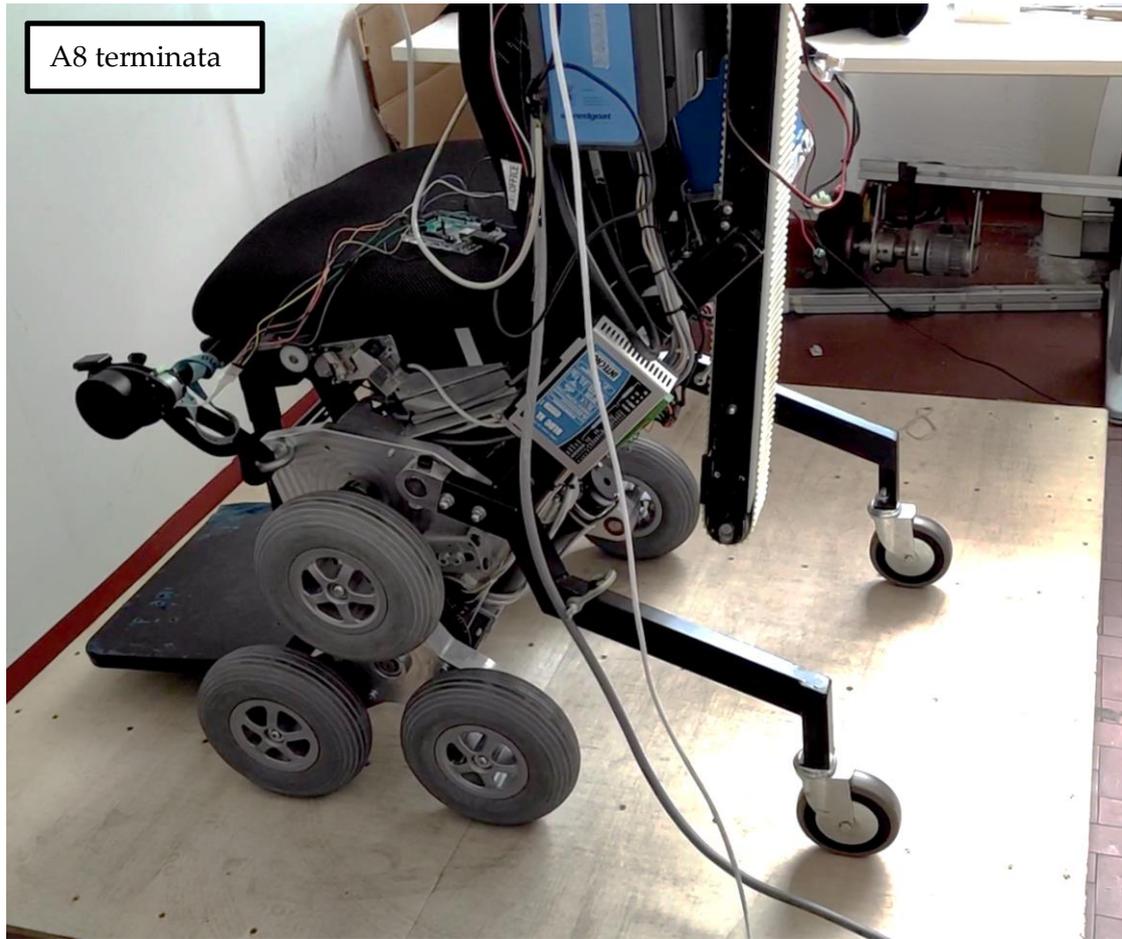
Test delle sequenze automatiche



Test delle sequenze automatiche



Test delle sequenze automatiche



7.2.6 *Commenti sulle prove, sui grafici e valutazioni su migliorie future*

1. Non sono state eseguite prove partendo da una distanza dal gradino superiore a 1500 mm a causa della mancanza di spazio. In ogni caso si sconsiglia, con il setup attuale del Lidar, di eseguire scansioni grossolane oltre a questa distanza in quanto si avrebbe una perdita di precisione eccessiva della misurazione della distanza dal gradino.
2. Con il setup attuale a singolo Lidar è impossibile correggere eventuali errori dell'angolo di imbardata della sedia rispetto al gradino, di conseguenza la sedia deve sempre venire posizionata allineata al gradino. Piccoli angoli di imbardata vengono corretti in ogni caso al termine della fase A0-A1-A2, perché è necessario che entrambi gli pneumatici dei due tripodi siano a contatto con la faccia verticale del gradino in modo tale che si abbia un picco di coppia in entrambe le ruote solari che attivi l'ingresso nella fase A3. Di conseguenza se uno pneumatico entra in contatto con il gradino per primo la sequenza automatica aspetterà che anche il secondo entri in contatto col gradino prima di innescare la fase A3. In futuro verrà predisposto un secondo Lidar che, in collaborazione con quello già presente, permetta di calcolare l'angolo di imbardata e consenta di imprimere distanze di traslazione di set diverse alle due ruote solari, permettendo alla carrozzina di eseguire traiettorie curve e correggere l'angolo di imbardata già prima di entrare in contatto con il gradino.
3. La scansione grossolana (ovvero la scansione che viene eseguita se la carrozzina parte da una distanza superiore ad 800 mm dal gradino) ha il solo scopo di restituire la distanza dal gradino per impostare l'avvicinamento che porterà poi alla scansione di precisione; in *Tabella 7.4* sono riportati i risultati della scansione grossolana per le prove viste in precedenza. Si può notare come in tutti i casi la distanza dal gradino venga sovrastimata di circa il 10%; siccome è stato verificato in sede di prova che l'algoritmo di calcolo delle misure del gradino (presentato nel *Capitolo 4*) ha operato in maniera corretta, la conclusione è la stessa che è stata presentata nel *Capitolo 4* e cioè che tale errore sia intrinseco delle misurazioni prodotte dal Lidar in questione. Tale errore potrà essere in futuro corretto tramite un fattore correttivo oppure, ipotesi migliore, sfruttando il setup a doppio Lidar e con nuovo Arduino che verrà

Test delle sequenze automatiche

montato sulla sedia in futuro. Tale setup permetterà di ottenere misure più pulite e consentirà di mediare le misurazioni dei due Lidar.

| N° prova | Distanza di partenza (mm) | | Errore percentuale sulla distanza di partenza $\frac{ Rilevata Lidar - Teorica }{Teorica} \cdot 100$ |
|----------|---------------------------|--------------------|---|
| | Teorica | Rilevata Lidar (d) | |
| 1 | 1400 | 1587 | +13.3% |
| 2 | 1000 | 1099 | +9.9% |
| 3 | / | / | / |
| 4 | 800 | 1051 | +31.3% |
| 5 | 1000 | 1078 | +7.23% |
| 6 | 1000 | 1069 | +6.9% |
| 7 | / | / | / |

4. In seguito alla scansione grossolana avviene la fase di avvicinamento; in *Tabella 7.5* sono presentati i risultati della fase di avvicinamento. Si può notare come la distanza dal gradino a cui si ferma la carrozzina a seguito dell'avvicinamento (misurata con il metro a nastro) sia minore in media del 16% rispetto a quella programmata durante l'ideazione della sequenza automatica ed il progetto della macchina a stati. La motivazione è principalmente una: nella fase precedente il Lidar ha sovrastimato la distanza della carrozzina dal gradino e quindi viene inviato un set ai motori che governano le solari più grande del previsto, facendo percorrere alla sedia una distanza maggiore. Nella Prova 1, invece che traslare di $1400-700 = 700$ mm, la carrozzina trasla di $1587-700 = 887$ mm, arrivando ad una distanza dal gradino pari a 513 mm (500 mm rilevati con il metro a nastro) anziché 700 mm come programmato. Una seconda fonte di errore, decisamente più trascurabile, può essere dovuta al fatto che la transizione della macchina a stati in uscita dallo stato "AVVICINAMENTO_PER_LA_SECONDA_MISURAZIONE" abbia una tolleranza sull'errore troppo alta; in realtà i ± 0.1 rad che sono stati dati corrispondono, in traslazione pura, a circa ± 4 mm, rappresentando dunque una fonte di errore molto piccolo. L'errore rilevato sull'avvicinamento è dunque una conseguenza dell'errore di misura manifestato dal Lidar e potrà essere limitato applicando le modifiche ipotizzate nel punto 3.

Test delle sequenze automatiche

| Tabella 7.5 – Errore sull'avvicinamento | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|---|--------------------|--|
| N° prova | Distanza di partenza (mm) | | Distanza per scansione di precisione (mm) | | Errore percentuale sulla distanza per scansione di precisione $\frac{ Rilevata\ metro - Teorica }{Teorica} \cdot 100$ |
| | Teorica | Rilevata Lidar (d) | Teorica | Rilevata col metro | |
| 1 | 1400 | 1587 | 700 | 500 | -20% |
| 2 | 1000 | 1099 | 700 | 690 | -1.4% |
| 3 | / | / | / | / | / |
| 4 | 800 | 1051 | 700 | 600 | -14.2% |
| 5 | 1000 | 1078 | 700 | 600 | -14.2% |
| 6 | 1000 | 1069 | 700 | 681 | -2.7% |
| 7 | / | / | / | / | / |

5. In seguito all'avvicinamento avviene la scansione di precisione che restituisce tutte le dimensioni del gradino e la condizione di superabilità (Tabella 7.6). Tali valutazioni vengono fatte solo ora, ad una distanza inferiore ad 800 mm, in quanto con il setup attuale il Lidar migliora notevolmente la sua precisione. In Tabella 7.7 vengono calcolati gli errori percentuali sulle misurazioni compiute, tenendo conto che l'altezza del gradino (h) è pari a 68 mm nelle prime quattro prove ed è pari a 90 mm nella quinta; inoltre lo spazio successivo al gradino (e) è sempre pari a 1500 ed entrambi gli scalini sono considerati superabili (condizione = 1) dall'algoritmo. Si nota come gli errori sulla distanza (d) e sull'altezza del gradino (h) siano molto contenuti, segno che a questa distanza e con questo setup del Lidar si riescono ad ottenere ottimi risultati. La misura dello spazio successivo al gradino, per gli stessi motivi visti nel punto 3, risulta sovrastimata di quasi il 20%; questo succede in quanto l'errore intrinseco del Lidar diventa molto influente a distanze di oltre un metro e mezzo. Questo errore può essere risolto con le stesse strategie viste nel punto 3.

| Tabella 7.6 – Scansione di precisione | | | | | |
|---------------------------------------|--|---|----|------|------------------|
| N° prova | Distanza per scansione di precisione rilevata col metro (mm) | Valori gradino scansione di precisione (mm) | | | |
| | | d | h | e | condizione (0/1) |
| 1 | 500 | 500 | 69 | 1816 | 1 |
| 2 | 690 | 714 | 67 | 1800 | 1 |
| 3 | 600 | 658 | 63 | 1810 | 1 |
| 4 | 600 | 568 | 72 | 1695 | 1 |

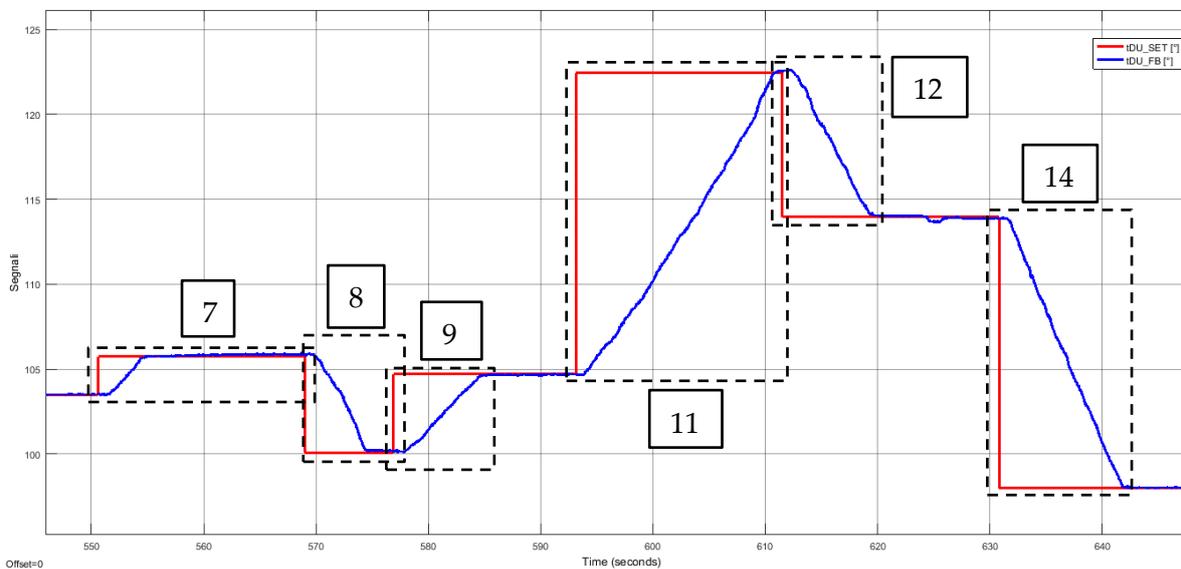
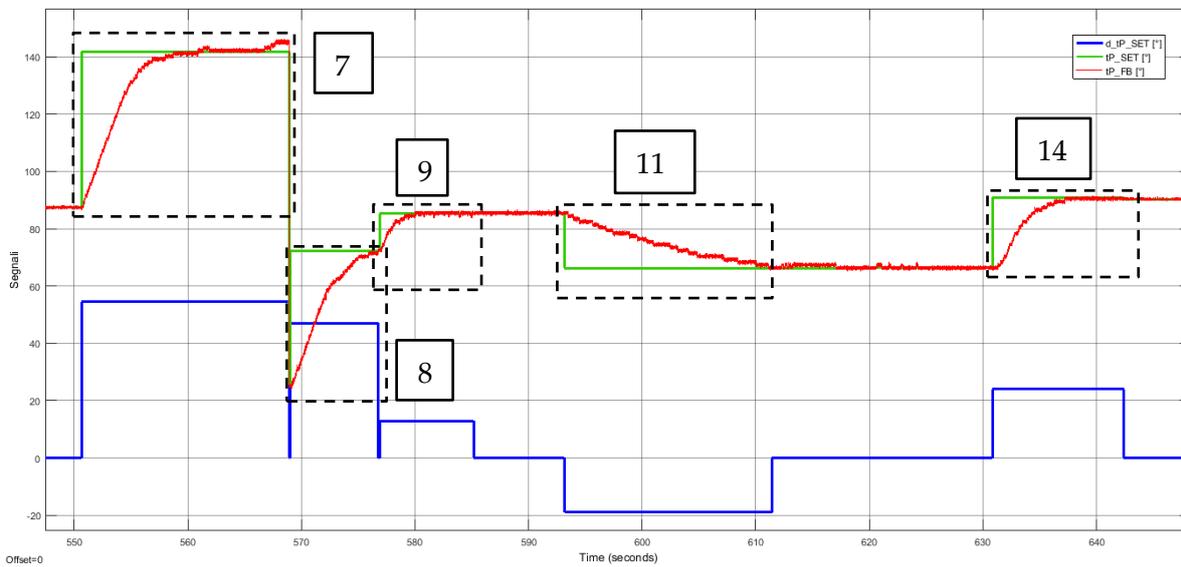
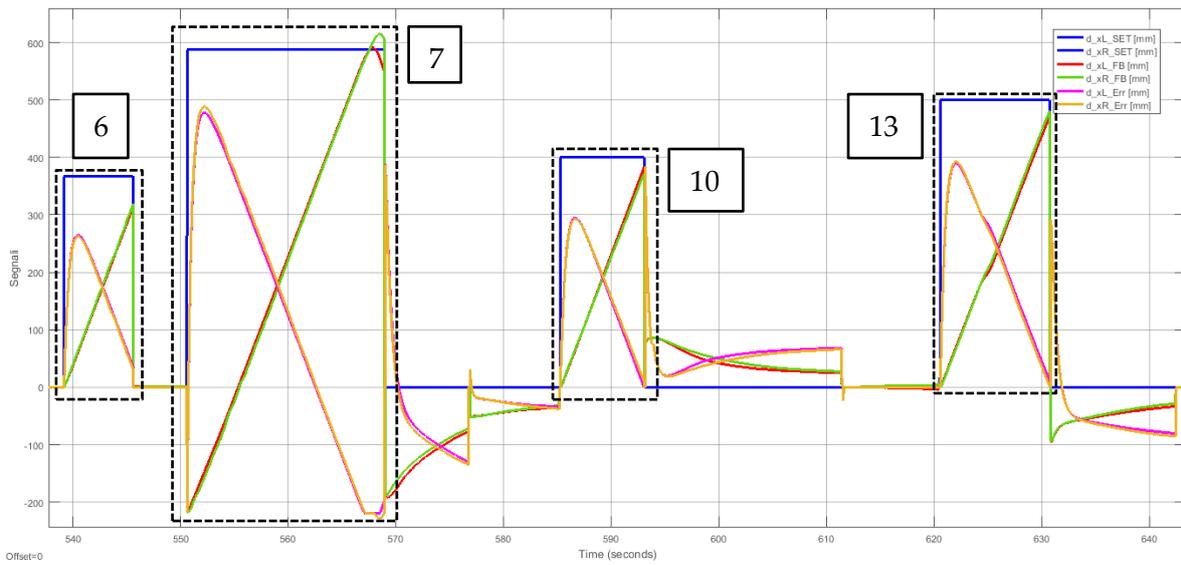
Test delle sequenze automatiche

| | | | | | |
|---|-----|-----|----|------|---|
| 5 | 600 | 681 | 98 | 1784 | 1 |
| 6 | 681 | 712 | 92 | 1802 | 1 |
| 7 | 500 | 510 | 88 | 1820 | 1 |

| Tabella 7.7 – Errore della scansione di precisione | | | | | | |
|--|--|----------------|----------------|--|-------|--------|
| N° prova | Distanza per scansione di precisione rilevata col metro (mm) – d teorica | h teorica (mm) | e teorica (mm) | Errori percentuali | | |
| | | | | $\frac{ Misura Lidar - Teorica }{Teorica} \cdot 100$ | | |
| | | | | d | h | e |
| 1 | 500 | 68 | 1500 | 0% | +1.5% | +21% |
| 2 | 690 | 68 | 1500 | +3.4% | -1.5% | +20% |
| 3 | 600 | 68 | 1500 | +9.6% | -7.3% | +20.6% |
| 4 | 600 | 68 | 1500 | -5.3% | +5.9% | +13% |
| 5 | 600 | 90 | 1500 | +13.5% | +8.8% | +18.9% |
| 6 | 681 | 90 | 1500 | +4.5% | +2.2% | +20% |
| 7 | 500 | 90 | 1500 | +1.9% | -2.2% | +21.3% |

6. Da questo punto in poi verranno analizzati i grafici della Prova 6 presenti alla fine di questo punto; ognuno dei grafici analizzati presenta dei riquadri con posto di fianco un numero, tale numero indica il punto dell'elenco a cui fa riferimento quella specifica sezione di grafico. Tornando alla fase di avvicinamento (stato `AVVICINAMENTO_PER_LA_SECONDA_MISURAZIONE`) è possibile vedere l'andamento della traslazione nella parte sinistra dello *Scope1*: si notano il set a gradino uguale per le due solari; i rispettivi errori che tendono a zero (non hanno un andamento lineare in quanto nei sistemi di controllo sono presenti i filtri del primo ordine che attenuano il set a gradino nei primi istanti) ed infine si notano i feedback della distanza percorsa. La fase termina prima che i feedback abbiano raggiunto il set. L'errore è molto ridotto (-4 cm), ma può essere minimizzato riducendo la tolleranza sull'errore delle solari nella transizione in uscita dalla fase.

Test delle sequenze automatiche



Test delle sequenze automatiche

Figura 7.13 – Scope1/Scope5/Scope9 – Traslazione/tripode/pivotanti.

7. Durante la fase A0-A1-A2 (stato A0_A1_A2) si hanno contemporaneamente la traslazione in avanti della carrozzina, la rotazione del tripode ed il movimento delle ruote pivotanti. Per quanto riguarda la traslazione si nota come il feedback parta da un valore negativo e copra una distanza effettivamente maggiore di quella che viene imposta con il set; questo perché una parte della rotazione della solare serve per compensare l'indietreggiamento causato dalla rotazione del tripode, come visto nel Capitolo 5. Per quanto riguarda il tripode si nota che al termine della fase si ha un leggero overshoot, causato dal fatto che i due tripodi vanno a contatto con il gradino e vengono leggermente spinti in avanti. Sull'inseguimento del set compiuto dalle pivotanti non si ha nulla da segnalare.
8. Durante la fase A3 (stato A3) si hanno contemporaneamente la rotazione del tripode ed il movimento delle ruote pivotanti. Per quanto riguarda il tripode si nota in giallo il set di delta di rotazione che viene imposto al sistema di controllo ed in arancione il feedback.
9. Durante la fase A4 (stato A4) si hanno contemporaneamente la rotazione del tripode ed il movimento delle ruote pivotanti.
10. Durante la fase A5 (stato A5) si ha la traslazione della carrozzina in avanti; valgono le stesse considerazioni fatte per il punto 6.
11. Durante la fase A6 (stato A6) si hanno contemporaneamente la rotazione del tripode ed il movimento delle ruote pivotanti. Per quanto riguarda le pivotanti si nota un leggero errore statico, non riscontrato però in altre prove.
12. Durante la fase A7 (stato A7) si ha correttamente il raggiungimento del set da parte delle ruote pivotanti.
13. Durante la fase A8 (stato A8) si ha l'avanzamento della carrozzina; si fanno le stesse considerazioni del punto 6. Si nota che si ha una leggera fluttuazione dell'angolo delle pivotanti dovuta al fatto che esse sbattono leggermente contro lo spigolo del gradino durante l'avanzamento della carrozzina.
14. Durante la fase A9 (stato A9) i tripodi e le pivotanti si riconfigurano per ottenere la posizione di marcia in piano. Raggiungono correttamente gli angoli imposti.

7.3 Prove di configurazione in Marcia in piano

Sono state effettuate 2 prove (Tabella 7.8): nella prima si è effettuata la configurazione in Marcia in piano con una rotazione del tripode all'indietro, nella seconda con una rotazione in avanti. In ogni prova la carrozzina è stata posizionata con angoli dei tripodi e delle ruote pivotanti casuali (per fare questo la carrozzina è stata movimentata grazie alla *Modalità manuale*, utilizzabile con la posizione numero 6 del selettore S_{FM}). Una volta scelta la posizione di partenza è necessario selezionare tramite lo switch la *Modalità di Marcia in piano* (posizione numero 5 del selettore S_{FM}); facendo questo vengono inviati agli azionamenti gli output prodotti dalla macchina a stati vista nel *Capitolo 6.11*, in particolare è inizialmente attivo lo stato *Attesa* (durante questo stato gli azionamenti sono bloccati e non si può spostare la carrozzina in alcuno modo, per farlo occorre andare nella *Modalità manuale* o di *Marcia in piano*). Per iniziare la sequenza di configurazione in marcia in piano è quindi sufficiente premere l'interruttore S_{OK} , che innesca tutta la sequenza automatica vista nel *Capitolo 6.11*. Per visualizzare gli angoli di partenza è stato usato il pannello di monitoraggio descritto nel *Capitolo 7.1*.

| N° prova | θ_p 0 ÷ 120 (°) | | θ_{DU} (°) | |
|----------|---------------------------|--------|-------------------|--------|
| | Partenza | Arrivo | Partenza | Arrivo |
| 1 | 115 | 88 | 110.8 | 98 |
| 2 | 28 | 88 | 109 | 98 |

In entrambe le prove, gli attuatori hanno portato, in pochi secondi, i tripodi e le ruote pivotanti nelle proprie posizioni corrette di Marcia in piano, indicate nella *Tabella 6.20*.

La macchina a stati (*Capitolo 6.11*) ha quindi attraversato gli stati "ATTESA", "RICONFIGURAZIONE" ed è giunta nello stato "MOVIMENTO" che permette di controllare la carrozzina solo attraverso il joystick.

In *Figura 7.14* e *7.15* sono visibili i grafici relativi alle due prove.

Test delle sequenze automatiche

7.3.1 Grafici della Prova n° 1

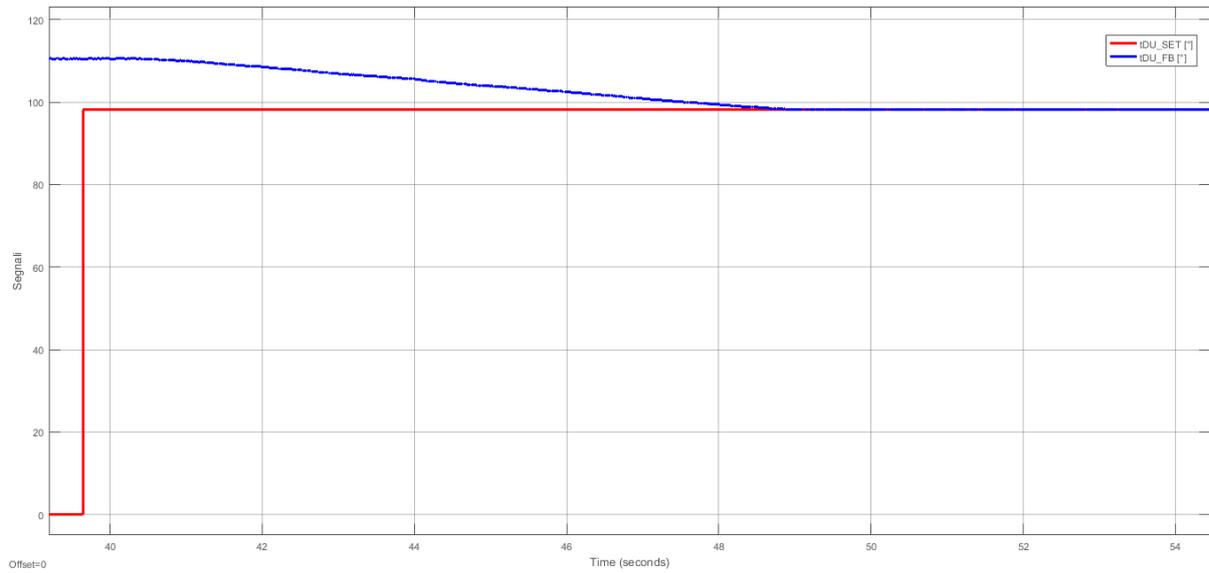
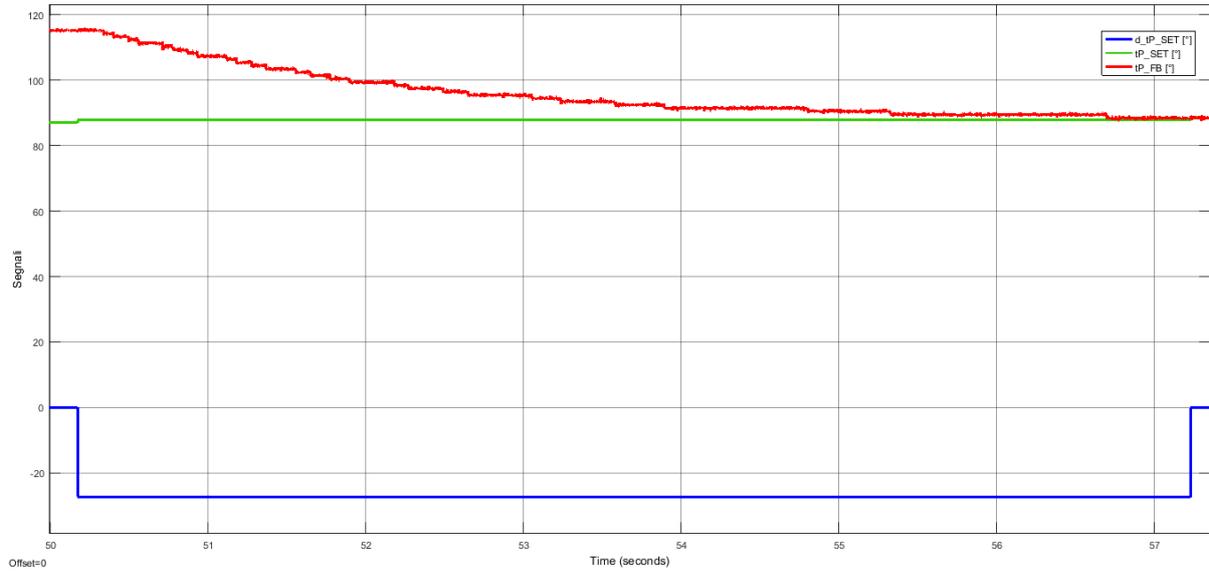


Figura 7.14 – Scope5/Scope9 - Configurazione di tripodi (alto) e ruote pivotanti (basso)

Test delle sequenze automatiche

7.3.2 Grafici della Prova n° 2

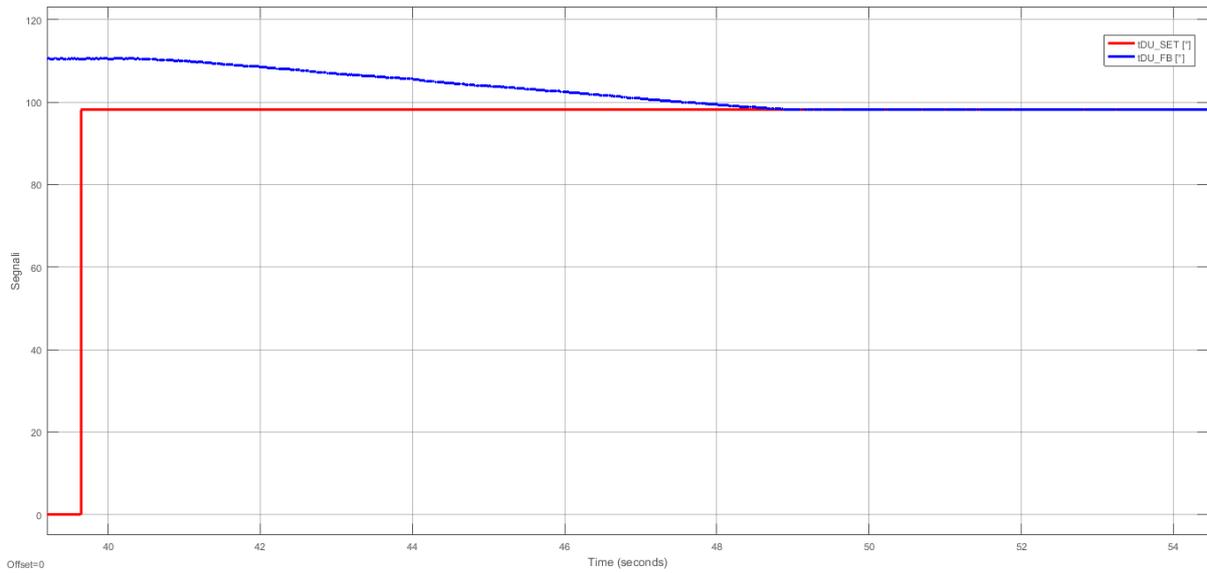
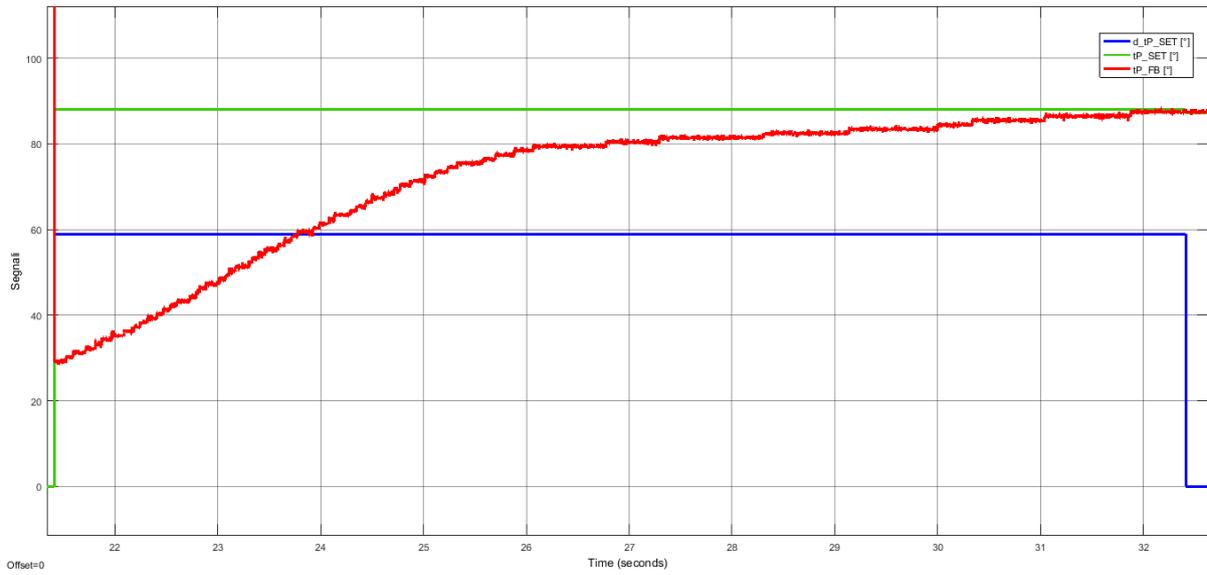


Figura 7.15 – Scope5/Scope9 - Configurazione di tripodi (alto) e ruote pivotanti (basso)

8 Conclusioni

Terminato il lavoro di tesi, l'attività fatta sulla carrozzina *Wheelchair.q05* ha portato ai seguenti passi avanti:

1. Definizione dettagliata delle logiche delle sequenze automatiche di Salita gradino, Discesa gradino e di configurazione in Marcia in piano, tenendo conto del setup a singolo Lidar attualmente usato per la rilevazione del gradino e delle limitazioni che esso comporta.
2. Attività di simulazione eseguita sulle fasi di Salita gradino e Discesa gradino, che ha permesso di capire che in futuro sarà necessario sviluppare un preciso metodo di controllo della posizione del baricentro per adattare i movimenti degli attuatori della carrozzina ed eseguire le fasi più rischiose in sicurezza.
3. Attività teorica e sperimentale sul sensore Lidar utilizzato per rilevare e misurare il gradino. Sviluppo dell'algoritmo utile a calcolare le dimensioni del gradino e a valutarne la superabilità. Infine, si è giunti alla sua collocazione nella carrozzina ed utilizzo nelle sequenze di Salita gradino.
4. Realizzazione dei sistemi di controllo in anello chiuso per la movimentazione degli attuatori della carrozzina.
5. Realizzazione delle sequenze automatiche di Salita gradino e configurazione in Marcia in piano.
6. Attività di sperimentazione sulle sequenze automatiche progettate.

Dal lavoro svolto si sono rivelati necessari i seguenti sviluppi futuri:

1. Introduzione di un secondo Lidar per verificare e correggere l'angolo di imbardata della carrozzina rispetto al gradino. Sarà necessario: studiare la sua implementazione nella logica delle sequenze automatiche già progettate; ideare un sistema più efficiente per la raccolta dei dati da parte dei Lidar, utilizzando possibilmente un controllore migliore al posto di Arduino ed infine eseguire i test di scansione e misurazione con i due Lidar ed implementare il loro utilizzo all'interno della macchina a stati della sequenza di Salita gradino.

Conclusioni

2. Studio approfondito della posizione del baricentro, della sua variazione in base ai gradi di libertà della carrozzina e di un metodo pratico per misurarne lo spostamento. Il tutto con lo scopo di rendere sicuri i momenti più critici delle fasi automatiche.
3. Riparazione degli attuatori che movimentano la seduta ed il cingolo e loro introduzione nelle sequenze automatiche.
4. Realizzazione delle macchine a stati che eseguono le sequenze automatiche di discesa gradino, salita scala e discesa scala.

9 Bibliografia

- [1] W. L. C.-i.-P. Data, "Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less-resourced settings".
- [2] *ISO 7176-28:2012*.
- [3] *UNI10804-gen1999*.
- [4] M. Nisi, «Sviluppo di una carrozzina elettrica per il superamento delle barriere architettoniche,» 2013.
- [5] B. Perez, «Progettazione esecutiva di una carrozzina elettrica per il superamento delle barriere architettoniche».
- [6] F. Martini, «Sistema di controllo di una carrozzina elettrica per il superamento delle barriere architettoniche».

10 Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Giuseppe Quaglia e Andrea Botta per avermi guidato nella stesura della Tesi di Laurea.