POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Sistema di controllo di una carrozzina montascale per il superamento di barriere architettoniche

Relatore

Candidato

Giacomo Frison

Giuseppe Quaglia

Correlatore

Andrea Botta

Aprile 2022

SOMMARIO

Il problema delle barriere architettoniche interessa una parte considerevole della popolazione. Si prevede che in futuro il numero delle persone affette da disabilità motoria aumenterà. Per questo motivo sarà sempre più importante porre particolare attenzione alla progettazione di infrastrutture pubbliche al fine di diminuire il numero di barriere architettoniche in esse presenti. Con la consapevolezza che non tutte le barriere architettoniche potranno essere eliminate, a questo lavoro si deve aggiungere quello di creare strumenti che ne permettano il superamento in autonomia da parte della persona affetta da disabilità motoria.

In particolare, un aiuto può arrivare dalla creazione di carrozzine che siano in grado, in modo efficiente e sicuro, di superare singoli scalini e intere gradinate in modo automatico. Per questo motivo si è pensato alla creazione della carrozzina Wheelchair.q05. Questa carrozzina, allo stato attuale, è in grado, in automatico, di superare un gradino sia in salita che in discesa.

Il seguente lavoro di tesi tratta lo studio di un sistema di controllo per il superamento di un singolo gradino sia in salita che in discesa. L'obbiettivo è quello di rendere la traiettoria percorsa dall'utente in queste fasi più controllata e liscia di quanto riuscisse a fare fino ad ora. Inoltre, con questo sistema di controllo gli arti che compongono la carrozzina si muovono in sincronismo facendo riferimento ad un arto principale. Questo permette di controllare oltre alla traiettoria anche l'assetto dell'utente in modo da ottenere un superamento più sicuro, veloce e confortevole dell'ostacolo. Il sistema di controllo è stato verificato tramite script Matlab ed è stato implementato sperimentalmente il caso di salita del singolo scalino, velocizzando l'operazione.

Inoltre, è stato fatto uno studio utile per trovare le tre coordinate spaziali del baricentro dell'utente conoscendo i dati in arrivo da quattro celle di carico e dall'inclinometro del sedile.

Infine, è stato fatto un lavoro sul sistema di visione della carrozzina per poter spegnere e accendere il lidar e ottenere direttamente dalla scheda di acquisizione dati Teensy le dimensioni del gradino da superare.

1 Indice

2	Ind	ice d	elle figure	vi			
3	Ind	Indice delle Tabellexii					
1	Inti	odu	zione	13			
	1.1	Cla	ssificazione dei dispositivi montascale	13			
	1.1	.1	Montascale fissi				
	1.1	.2	Montascale mobili	14			
	1.1	.3	Carrozzine montascale				
	1.2	Mo	tivi che hanno spinto alla progettazione di Wheelchair.q	22			
	1.3	Eve	oluzione di Wheelchair.q	22			
	1.3	.1	Wheelchair.q01	23			
	1.3	.2	Wheelchair.q02				
	1.3	.3	Wheelchair.q03	24			
	1.3	.4	Wheelchair.q04	25			
	1.4	Wł	neelchair.q05: Sistemi di riferimento e dimensioni	25			
2	Cin	emat	tica	27			
	2.1	Str	uttura generale				
	2.1	.1	Approfondimento sul tripode				
	2.2	Sca	le da normativa – vincoli di progetto	30			
	2.3	Sist	temi di riferimento e caratteristiche di Wheelchair.q	33			
3	Seq	uenz	ze automatiche di salita e discesa gradino				
	3.1	Fas	i salita gradino				
	3.1	.1	Fasi A0_A1_A2 - Originale				
	3.1	.2	Fase A3 - Originale				
	3.1	.3	Fasi A0_A1 – Nuove				
	3.1	.4	Fasi A2_A3 - Nuove				
	3.1	.5	Fase A4				
	3.1	.6	Fase A5				

	3.1	.7	Fase A64	4
	3.1	.8	Fasi A7, A8, A9	5
3	8.2	Fas	i discesa gradino 4	7
4	Log	ica d	i controllo sequenze automatiche5	1
4	.1	Sali	ta singolo gradino5	1
	4.1	.1	Prima Fase5	8
	4.1	.2	Seconda Fase	0
	4.1	.3	Approfondimento calcolo $\theta PC0$ e $\alpha 0$	1
	4.1	.4	Avanzamento solari nella Seconda Fase	3
	4.1	.5	Studio Prima e Seconda fase con script Matlab6	4
	4.1	.6	Margini di stabilità nelle fasi7	3
	4.1	.7	Raccordi delle velocità del tripode nella salita gradino7	7
	4.1	.8	Altro sistema di controllo in salita8	0
4	.2	Dis	cesa singolo gradino	4
5	Stu	dio si	ıl baricentro e celle di carico9	0
5	5.1	Bar	icentro di un utente su carrozzina da Normativa ISO-7176-11	2
5	5.2	Pos	izione del baricentro utente da corrente assorbita da attuatore sedile9	4
5	5.3	Pos	izione del baricentro utente da celle di carico e inclinometro sedile10	0
	5.3	.1	Lettura della posizione del baricentro dell'utente con sedia orizzontale: $\Delta \gamma = \Theta M = 106$	0
de	5.3 ell'ut	.2 ente d	Proiezione sull'orizzontale della distanza tra le celle di carico posteriori e il baricentri con $\Delta \gamma = \Theta M \neq 0$	0 9
	5.3	.3	Calcolo dell'altezza del baricentro con peso spostato sulle sole celle posteriori	1
	5.3	.4	Calcolo dell'altezza del baricentro dell'utente con inclinazione qualsiasi della sedia 11	3
di	5.3 sces	.5 a grac	Sfruttare la conoscenza del baricentro dell'utente nelle fasi automatiche di salita lino – inclinazione di sicurezza del telaio PC11	e 4
	5.3	.6	Approfondimento su x1Gut	9
	5.3	.7	Possibili migliorie da fare in futuro12	0
6	Lav	oro s	ul lidar e interfacciamento via seriale12	2
6	5.1	Fur	zionamento Lidar	2

6	5.1.1	Modello Simulink – Ricevitore dati		
6.2	5.2 Problemi della vecchia disposizione			
6.3	Nu	Nuova disposizione lidar		
6	6.3.1 Scheda millefori e collegamenti 6.4 Migliorie nuova disposizione			
6.4				
6	.4.1	Programmazione scheda Teensy		
6	5.4.2	Sketch utilizzabili e modalità di interfacciamento		
7 0	perazi	oni preliminari all'implementazione del sistema di controllo		
7.1	Cal	ibrazione angolo di feedback del portatreno		
7.2	Pro	ve a gradino di velocità del portatreno del tripode		
8 In	nplem	entazione del sistema di controllo in salita gradino		
8.1	Sch	ema generale del controllore della salita gradino		
8.2	Sez	ione "Controllo attuatori"		
8	8.2.1	Controllo solari		
8	8.2.2	Controllo portatreno del tripode		
8	8.2.3	Controllo pivotanti		
8	8.2.4	Controllo assetto sedile		
8.3	Ma	cchina a stati – Salita automatica gradino		
8	8.3.1	Fase ATTESA		
8	8.3.2	Fase MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA		
8	8.3.3	Fase CALCOLO_DEGLI_ANGOLI		
8	8.3.4	Fase A0_A1		
8	8.3.5	Fase A2_A3_Prima_Fase		
8	8.3.6	Fase A4_Seconda_Fase		
8	8.3.7	Fase A5		
8	8.3.8	Fase A6		
8	8.3.9	Fasi A7, A8, A9, FINE_SEQUENZA		
8.4	Ris	ultati sistema di controllo salita gradino		
8	8.4.1	Traiettorie reali		

9	Conclusioni	
10	Bibliografia	

2 Indice delle figure

Figura 1-1 Montascale fissi: (a) Servoscala a piattaforma (Stannah), [2]; (b) Sedia
montascale (Contact Srl), [3] 14
Figura 1-2 Montascale mobile a cingolo, Vimec T09 – Roby, [4] 15
Figura 1-3 Montascale mobili a ruote Yack KSP: sedile integrato (sx), aggancio sedia a
rotelle (centro), sistema di sollevamento (dx), [5]15
Figura 1-4 Montascale a zampe rotanti, Scoiattolo (TGR), [6] 16
Figura 1-5 Carrozzina Toyota "I-Bot", [7]17
Figura 1-6 Carrozzina montascale "B-Free", [8]17
Figura 1-7 Carrozzina montascale: "TopChair" (sinistra), [9], "Scewo" (destra), [10] 18
Figura 1-8 Carrozzina con sistema di locomozione a zampe: "Sugahara et al.", [11] 19
Figura 1-9 Carrozzina a ruote e cingoli "Yu et al.", [12]
Figura 1-10 Carrozzina a ruote e zampe "R. Morales et al.", [13]
Figura 1-11 Carrozzina "RT-Mover P-type 2", [14]21
Figura 1-12 Carrozzina a zampe rotanti, [15]21
Figura 1-13 Carrozzina a zampe rotanti con interasse variabile, [16]
Figura 1-14 Wheelchair.q0123
Figura 1-15 Wheelchair.q0224
Figura 1-16 Wheelchair.q0324
Figura 1-17 Wheelchair.q0425
Figura 1-18 Wheelchair.q0526
Figura 1-19 Wheelchair.q05 – Moto su scala26
Figura 2-1 Struttura cinematica Wheelchair.q27
Figura 2-2 Struttura Tripode
Figura 2-3 Schema Tripode
Figura 2-4 Parametri scala
Figura 2-5 Scala nominale
Figura 2-6 Definizione degli angoli caratteristici di Wheelchair.q
Figura 2-7
Figura 2-8

	Figura 2-9	36
	Figura 2-10	36
	Figura 3-1 Fase A0_A1_A2 - Originale	39
	Figura 3-2 Fase A3 – Originale	40
	Figura 3-3 Fase A0_A1 - Nuova	41
	Figura 3-4 Fase A2_A3 – Nuova – Prima fase	42
	Figura 3-5 Fase A4 – Nuova - Seconda fase	43
	Figura 3-6 Fase A5	44
	Figura 3-7 Fase A6	45
	Figura 3-8 Fase A7	46
	Figura 3-9 Fase A8	46
	Figura 3-10 Fase A9	47
	Figura 3-11 Fasi D1 a D3	48
	Figura 3-12 Fase D4	49
	Figura 3-13 Fase D7	49
	Figura 4-1 Traiettorie attuali punti P e C in fasi A2, A3, A4	52
	Figura 4-2 Nuova traiettoria lineare punto C in fasi A2, A3, A4	53
	Figura 4-3 Controllo per assetto sedile costante	53
	Figura 4-4 Schema geometrico per sviluppo controllo arti di Wheelchair.q – Salita grad	lino
		54
	Figura 4-5 Angoli per controllo traiettoria salita gradino in funzione di hgradino	56
	Figura 4-6 Angolo Master e angoli di set controllo - salita gradino	57
	Figura 4-7 Lunghezze ausiliarie utilizzate per relazioni angoli di SET – Salita gradino	58
	Figura 4-8 Altezza assoluta punto D	60
	Figura 4-9 Angoli di configurazione iniziale fase controllata	62
	Figura 4-10 Avanzamento solari Seconda Fase	63
	Figura 4-11 Configurazioni salita controllata scalino Prima Fase	65
	Figura 4-12 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase - NO azioname	ento
so	lari	66
	Figura 4-13 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase – Azionamento solar	ri 66
	Figura 4-14 Configurazioni salita controllata scalino Fasi – NO azionamento solari	67

Figura 4-15 Configurazioni salita controllata scalino Fasi – Azionamento solari	67
Figura 4-16 β in funzione di $\Delta \theta P$, Prima e Seconda fase	68
Figura 4-17 θDU in funzione di $\Delta \theta P$, Prima e Seconda fase	69
Figura 4-18 θPC in funzione di $\Delta \theta P$, Prima e Seconda fase	70
Figura 4-19 β in funzione di $\Delta \theta P$ e <i>t</i> , Prima e Seconda fase	71
Figura 4-20 θDU in funzione di $\Delta \theta P$ e <i>t</i> , Prima e Seconda fase	71
Figura 4-21 VC in funzione di $\Delta \theta P$ e t, Prima e Seconda fase	72
Figura 4-22 Posizione baricentro utente da normativa ISO-7176-11	73
Figura 4-23 Posizione sperimentale baricentro di Wheelchair.q, Fonte [19]	74
Figura 4-24 Baricentro masse sospese (sx) e masse non sospese (dx), Fonte [18]	75
Figura 4-25 Configurazione iniziale salita gradino - Baricentri	76
Figura 4-26 Margini stabilità, fasi Prima e Seconda	77
Figura 4-27 Tratti a velocità costante del tripode nelle due Fasi	78
Figura 4-28 Raccordi tratti a velocità costante del tripode nelle due Fasi	79
Figura 4-29 Schema sistema di controllo alternativo salita gradino	82
Figura 4-30 Configurazioni salita controllata scalino Prima Fase – lungo <i>αsn</i>	83
Figura 4-31 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase – lungo <i>αsn</i>	84
Figura 4-32 Configurazioni salita controllata scalino Prima e Seconda Fase – lungo asn	84
Figura 4-33 Fase D4 – discesa tripode da gradino – Fonte immagine [18]	85
Figura 4-34 Controllo discesa gradino – traiettoria e assetto	86
Figura 4-35 Massima distanza del tripode dal bordo del gradino per la discesa	87
Figura 4-36 Lunghezze ausiliarie utilizzate per relazioni angoli di SET – Discesa gradin	1089
Figura 5-1 Margine di stabilità fasi delicate	90
Figura 5-2 Coordinate baricentro utente/manichino	92
Figura 5-3 Manichino 80/100kg	93
Figura 5-4 Caratteristica Coppia - corrente motore <i>β</i> , Fonte: [20]	95
Figura 5-5 Schema azionamento assetto sedile carrozzina e baricentri masse sospese	97
Figura 5-6 Schema di corpo libero del "sottosistema RC"	98
Figura 5-7 Schema di corpo libero del "sottosistema PC"	99
Figura 5-8 Schema di corpo libero del "sottosistema corda"	99
Figura 5-9 Schema di attacco della sedia di Wheelchair.q al sotto-telaio RC	101

Figura 5-10 Dettaglio dei punti di attacco delle celle di carico 102
Figura 5-11 Cella di carico a Donut, Vetek 247W, [22]103
Figura 5-12 CAD della boccola per adattamento foro cella di carico 103
Figura 5-13 Zona di trasmissione del peso dell'utente prima della sensorizzazione 104
Figura 5-14 Zona di trasmissione del peso dell'utente dopo la sensorizzazione 105
Figura 5-15 Zona di trasmissione del peso dell'utente dopo la sensorizzazione –
ingrandimento
Figura 5-16 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale107
Figura 5-17 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su [XRC, ZRC]. 108
Figura 5-18 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su [XRC, YRC]. 108
Figura 5-19 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su [YRC, ZRC] . 108
Figura 5-20 Distanza orizzontale tra celle di carico posteriori e baricentro utente - sedia
inclinata111
Figura 5-21 Inclinazione sedia per calcolo dell'altezza del baricentro dell'utente 112
Figura 5-22 Inclinazione sedia, caso limite con peso dell'utente completamente sulle celle
posteriori
Figura 5-23 Schema per calcolare l'altezza del baricentro dell'utente 114
Figura 5-24 Configurazione di inizio per spostare il baricentro tra le ruote del tripode 115
Figura 5-25 Spostamento baricentro totale a margine di sicurezza 116
Figura 5-26 Schema per trovare angolo telaio PC di sicurezza 118
Figura 5-27 Definizione di <i>x</i> 1 <i>Gut</i> 119
Figura 6-1 Funzionamento Lidar 122
Figura 6-2 RPLIDAR A1 – SLAMTEC 123
Figura 6-3 Performance acquisizione RPLIDAR A1123
Figura 6-4 Specifiche sull'alimentazione del Sistema Lidar124
Figura 6-5 Modello Simulink "Ricevitore_dati", Fonte [17] 125
Figura 6-6 Vecchia disposizione lidar, Fonte [18]126
Figura 6-7 Convertitore TTL/RS232 e porte USB Speedgoat127
Figura 6-8 Nuova disposizione lidar 129
Figura 6-9 Nuova disposizione lidar - vista dall'alto (sx) e vista frontale (dx)130
Figura 6-10 Schema collegamenti Lidar, Teensy, Speedgoat, Pc

Figura 6-11 Scheda millefori con Teensy - Fronte	132
Figura 6-12 Scheda millefori con Teensy - Retro	133
Figura 6-13 Scansione lidar - vecchia configurazione	134
Figura 6-14 Scansione lidar - vecchia configurazione - particolare	135
Figura 6-15 Angoli misurati da Arduino - vecchia configurazione	136
Figura 6-16 Scansione lidar - nuova configurazione	137
Figura 6-17 Scansione lidar - nuova configurazione – particolare	137
Figura 6-18 Angoli misurati da Teensy - nuova configurazione	138
Figura 6-19 Dimensioni gradino sul monitor seriale dell'IDE	143
Figura 7-1 Sezione "Segnali Monitoraggio"	146
Figura 7-2 Sotto-funzione Simulink calcolo feedback angolo portatreno	146
Figura 7-3 Calibrazione controllore	148
Figura 7-4 Prova a gradino di velocità del tripode, maschera esterna	149
Figura 7-5 Prova a gradino di velocità del tripode, struttura esterna	149
Figura 7-6 Esterno macchina a stati prova a gradino di velocità	150
Figura 7-7 Interno macchina a stati, gradino di velocità del portatreno	151
Figura 7-8 Sezione "Controllo degli azionamenti", prova a gradino di velocità	152
Figura 7-9 Controllo portatreno per set di velocità	153
Figura 7-10 Modifica controllo solari per il gradino di velocità del portatreno	154
Figura 7-11 Risultato prova a gradino di velocità, parametri ottimizzati: asse x in [s]	155
Figura 8-1 Modalità salita gradino, esterno	156
Figura 8-2 Modalità salita gradino, interno - sezioni	157
Figura 8-3 Controllo solari	160
Figura 8-4 Modifica al Controllore delle solari	161
Figura 8-5 Controllore portatreno tripode, esterno	162
Figura 8-6 Logica di gestione angoli	163
Figura 8-7 Controllore portatreno tripode, interno	163
Figura 8-8 Controllore portatreno tripode, aggiunta per controllo velocità	165
Figura 8-9 Controllore ruote pivotanti, esterno	166
Figura 8-10 Controllore ruote pivotanti, interno	167
Figura 8-11 Controllore ruote pivotanti, ingrandimento su modifiche	168

Figura 8-12 Controllore assetto sedile, esterno	168
Figura 8-13 Controllore assetto sedile, interno	169
Figura 8-14 Logica funzionamento macchina a stati, fonte [17]	173
Figura 8-15 Fase ATTESA	174
Figura 8-16 Fase fittizia all'uscita dall'ATTESA	175
Figura 8-17 Fase MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA	176
Figura 8-18 Fase CALCOLO_DEGLI_ANGOLI	177
Figura 8-19 Fase A0_A1	178
Figura 8-20 Fase A2_A3_Prima_Fase	179
Figura 8-21 Fase A4_Seconda_Fase	180
Figura 8-22 Fase A5	181
Figura 8-23 Fase A6	182
Figura 8-24 fase e Numero_fase sperimentali	183
Figura 8-25 Angolo di rotazione del tripode nelle fasi Prima e Seconda sperimentale	e 184
Figura 8-26 Velocità di rotazione del tripode nelle fasi Prima e Seconda	185
Figura 8-27 Angolo Beta in Prima e Seconda Fase	186
Figura 8-28 Angolo Beta in Prima e Seconda Fase, ingrandimento	187
Figura 8-29 Risultato atteso dal modello Matlab, Beta	188
Figura 8-30 Angolo pivotanti in Prima e Seconda Fase	189
Figura 8-31 Angolo pivotanti in Prima e Seconda Fase, ingrandimento	190
Figura 8-32 Risultato atteso dal modello Matlab, Pivotanti	191
Figura 8-33 Risultato traiettorie vecchio sistema di controllo	192
Figura 8-34 Risultato traiettorie nuovo sistema di controllo	193
Figura 8-35 Traiettoria completa da modello Matlab	194
Figura 8-36 Prima fase - Modello Matlab vs Realtà	194
Figura 8-37 Seconda fase - Modello Matlab vs Realtà	195

3 Indice delle Tabelle

Tabella 1-1 Vantaggi e svantaggi dei diversi sistemi di locomozione	18
Tabella 2-1 Scale da normativa	31
Tabella 2-2 Requisiti geometrici e funzionali Wheelchair.q	32
Tabella 2-3 Convenzioni sulla nomenclatura	33
Tabella 2-4 Dimensioni di Wheelchair.q	36
Tabella 2-5 Angoli posizione marcia in piano	37
Tabella 4-1 Arti di Wheelchair.q utilizzati nel sistema di controllo per il superament	to di
un gradino	51
Tabella 4-2 Limiti azionamenti	64
Tabella 4-3 Coordinate baricentro utente da normativa ISO-7176-11	73
Tabella 4-4 Posizione sperimentale baricentro Wheelchair.q, Fonte [4]	74
Tabella 4-5 Posizione baricentro carrozzina da modello Solidworks, Fonte [18]	75
Tabella 5-1 Posizione baricentro manichino 100kg -> torso + upper leg -> Normativa	ISO-
7176-11	92
Tabella 5-2 Posizione baricentro totale manichini ISO-7176-11 - [21]	92
Tabella 8-1 Segnali di riferimento in uscita da "Modalità Salita gradino", fonte [17]	. 158
Tabella 8-2 Elenco Input e Output Macchina a stati	. 169

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), in tutto il mondo più di un miliardo di persone, pari a circa il 15% della popolazione mondiale vive con qualche forma di disabilità. Di queste circa un quinto è costretto ad affrontare importanti difficoltà quotidianamente. In particolare, si stima che, di questi, circa 65 milioni di persone necessitino dell'utilizzo di una sedia a rotelle [1]. Le persone affette da disabilità motorie sono in buona parte anziane. Considerando l'aumento della prospettiva di vita media della popolazione è quindi verosimile che in futuro il numero di persone che saranno costrette ad usufruire di una sedia a rotelle aumenterà.

Tra le barriere architettoniche, quelle più frequentemente incontrate sono gradinate e singoli gradini. Per questo motivo disporre di un mezzo che riesca ad affrontarle in modo sicuro, automatizzato e veloce è di fondamentale importanza. Il progetto Wheelchair.q nasce proprio per soddisfare questa necessità.

1.1 Classificazione dei dispositivi montascale

Da Normativa ISO 7176-28:2012, i dispositivi per il superamento di singoli scalini o intere gradinate si distinguono per:

- tipo di operatore che aziona il dispositivo;
- modalità di stabilizzazione: intrinseca nella carrozzina o con necessità dell'applicazione di forze di stabilizzazione da parte di un operatore;
- presenza o assenza del sedile.

Un'altra classificazione possibile dei dispositivi montascale è la seguente:

- Montascale fissi;
- Montascale mobili;
- Carrozzine montascale.

1.1.1 Montascale fissi

I montascale fissi possono essere divisi in due tipologie:

- Con piattaforma elevatrice;
- Con sedile.

La prima tipologia presenta una piattaforma sulla quale la persona affetta da disabilità deve salire rimanendo sulla carrozzina. È generalmente necessario che un operatore avvii la salita o la discesa della piattaforma. Un esempio è riportato nella Figura 1-1a.

La seconda tipologia presenta una sedia sulla quale l'utente si deve posizionare. Generalmente questo tipo di dispositivo è utilizzato da persone in grado di camminare, ma che hanno difficoltà o sono impossibilitati a salire o scendere le scale. Questo dispositivo è comandabile dall'utente stesso e permette di percorrere gradinate velocemente, ma non è possibile trasportare eventuali carrozzine. Un esempio è riportato nella Figura 1-1b.

I montascale fissi richiedono il posizionamento di infrastrutture ingombranti.



Figura 1-1 Montascale fissi: (a) Servoscala a piattaforma (Stannah), [2]; (b) Sedia montascale (Contact Srl), [3]

1.1.2 Montascale mobili

I montascale mobili sono dispositivi trasportabili, quindi meno ingombranti dei montascale fissi. Generalmente sono separati dalla carrozzina e possono essere usati all'occorrenza a condizione di averli con sé.

Ne esistono di due tipi: a cingoli e a ruote.

I primi consentono un moto più fluido e sicuro lungo la scala in quanto il cingolo permette di avere sempre l'appoggio su almeno due gradini. Sono però pesanti e le fasi di ingresso e uscita dalla gradinata devono essere gestite con attenzione. Un esempio è riportato nella Figura 1-2.



Figura 1-2 Montascale mobile a cingolo, Vimec T09 – Roby, [4]

Il secondo tipo di montascale mobile è più leggero di quello con cingolo. Possono presentare un sedile integrato su cui spostare l'utente, oppure, possono agganciarsi alla carrozzina.

Con i montascale mobili a ruote, però, si ottiene un moto meno uniforme rispetto a quello garantito dal cingolo. Inoltre, è necessaria la presenza di una persona che dia stabilità al montascale che altrimenti non lo sarebbe. Due esempi sono riportati nella Figura 1-3.



Figura 1-3 Montascale mobili a ruote Yack KSP: sedile integrato (sx), aggancio sedia a rotelle (centro), sistema di sollevamento (dx), [5]

Esiste poi una terza tipologia di dispositivo montascale mobile a ruote detto "a zampe rotanti". Un esempio è presentato in Figura 1-4.



Figura 1-4 Montascale a zampe rotanti, Scoiattolo (TGR), [6]

Anche questo dispositivo richiede l'intervento di una persona esterna che fornisca stabilità al sistema. È però un sistema compatto e robusto che promette di essere efficiente nella marcia in piano. Proprio per questo motivo, come si vedrà, si è pensato di utilizzare il tripode come elemento di base per il progetto di Wheelchair.q.

1.1.3 Carrozzine montascale

Per il superamento di gradini singoli o intere gradinate, sono nate delle carrozzine dette "carrozzine montascale". Ne esistono di due tipi:

- commerciali;
- per brevetti o per pubblicazioni.

1.1.3.1 Carrozzine montascale commerciali

Sul mercato esistono un numero limitato di carrozzine montascale e sono poco diffuse. Ciò perché, oltre al costo elevato, tutte le carrozzine montascale attualmente in commercio presentano degli svantaggi. Di seguito si riportano degli esempi di queste carrozzine.

La Figura 1-5 mostra la carrozzina "I-Bot".



Figura 1-5 Carrozzina Toyota "I-Bot", [7]

Questa carrozzina si muove stando principalmente in appoggio su 2 delle 4 ruote locomotrici. Il punto di appoggio, quindi, idealmente è un punto e sulla sua verticale deve cadere il baricentro totale della carrozzina. Questa condizione è garantita da un continuo spostamento delle ruote a contatto con il terreno. Si tratta, perciò, di un equilibrio dinamico e non statico: qualora dovesse venire a mancare corrente ai motori delle ruote di locomozione, la carrozzina cadrebbe. Non è una condizione accettabile.

La Figura 1-6 mostra la carrozzina montascale "B-Free".



Figura 1-6 Carrozzina montascale "B-Free", [8]

Si tratta di una carrozzina con sistema di locomozione a cingoli. Garantisce un moto costante e sicuro su scala in quanto si trova in appoggio sempre su più punti. In questo caso è garantita la stabilità statica. Purtroppo, però, il sistema a cingolo è poco efficiente nella marcia in piano.

Per cercare di ovviare a questi problemi, sono nate delle soluzioni che prevedano la presenza di un gruppo di locomozione a ruote per una marcia in piano efficiente e un gruppo di locomozione a cingolo per la marcia su scala. Due esempi sono riportati nella Figura 1-7.



Figura 1-7 Carrozzina montascale: "TopChair" (sinistra), [9], "Scewo" (destra), [10]

Entrambe queste ultime carrozzine diventano però molto complicate. Inoltre, la "Scewo" si trova in stabilità dinamica e non statica durante la marcia in piano.

1.1.3.2 Carrozzine montascale brevettate e per la ricerca

Nell'ambito della ricerca sono nate diverse soluzioni che possono essere catalogate a seconda del tipo di sistema di locomozione utilizzato. La Tabella 1-1 propone una possibile suddivisione e sottolinea vantaggi e svantaggi dei sistemi di locomozione individuati.

Tabella 1-1 Vantaggi e svantaggi dei diversi sistemi di locomozione

Tipologia	Vantaggi				Svantaggi				
Zampe	Ottima	capacità	di	superamento	Struttura	meccanica	e	di	controllo

	ostacoli	complessa
 Cingolo	Regolarità e sicurezza in salita scala	Bassa efficienza in marcia in piano e
		scarsa manovrabilità
 Ruote	Ottima manovrabilità ed efficienza	Scarsa abilità nel superamento ostacoli

Carrozzine a zampe

Un esempio di carrozzina a zampe è riportato nella Figura 1-8.



Figura 1-8 Carrozzina con sistema di locomozione a zampe: "Sugahara et al.", [11]

Come si può vedere questa carrozzina è in grado di superare gradini anche non di forma tradizionale. È però necessaria una struttura, dei sistemi di visione e di controllo complessi. Inoltre, è un sistema poco efficiente per la marcia in piano.

Carrozzine a cingoli

Queste carrozzine utilizzano il cingolo per fornire all'utente un moto sicuro e uniforme sulle rampe di scale. Come svantaggio, però, hanno bassa efficienza.

Un esempio è riportato nella Figura 1-9. Come si può notare dall'immagine, la carrozzina è anche riconfigurabile.



Figura 1-9 Carrozzina a ruote e cingoli "Yu et al.", [12]

Esistono poi delle soluzioni che cercano di mischiare i sistemi sopra elencati, ad esempio come combinazione di ruote e zampe. Le immagini Figura 1-10 e Figura 1-11 ne sono un esempio.



Figura 1-10 Carrozzina a ruote e zampe "R. Morales et al.", [13]



Figura 1-11 Carrozzina "RT-Mover P-type 2", [14]

Carrozzine a zampe rotanti

Un ultimo tipo di carrozzine per il superamento delle gradinate è rappresentato dalle carrozzine a zampe rotanti. Come per i montascale a zampe rotanti l'elemento caratterizzante della carrozzina è la struttura trilobata ai cui vertici si trovano delle ruote gommate. Un esempio è riportato in Figura 1-12.



Figura 1-12 Carrozzina a zampe rotanti, [15]

È una soluzione interessante in quanto garantisce un moto efficiente in piano e stabile su scala. Manca però un punto di appoggio posteriore che perciò deve essere fornito da un'altra persona.

Un altro esempio di applicazione delle zampe rotanti è riportato nella Figura 1-13.



Figura 1-13 Carrozzina a zampe rotanti con interasse variabile, [16]

In questo caso vengono utilizzate quattro zampe rotanti con interasse variabile per adattarsi al meglio al tipo di gradinata.

1.2 Motivi che hanno spinto alla progettazione di Wheelchair.q

Come si è visto, esistono molti tipi di carrozzine montascale in grado di superare ostacoli. Tutte però presentano degli svantaggi. Gli svantaggi possono essere: necessità di intervento da parte di una persona esterna; stabilità della carrozzina dinamica e non statica; movimentazione poco efficiente su cingolo; sistema di controllo complesso; moto poco uniforme.

Per questo motivo si è pensato ad una soluzione che cercasse di risolvere questi problemi. Da qui è nato il progetto di Wheelchair.q.

1.3 Evoluzione di Wheelchair.q

Durante la fase di progettazione di Wheelchair.q si è passati attraverso varie configurazioni del dispositivo. Con ogni nuova configurazione si è cercato di migliorare la sedia ed il suo funzionamento sotto vari punti di vista. L'elemento fondamentale e fondante di tutte le configurazioni di carrozzina è, però, il tripode.

Di seguito una panoramica sui vari prototipi che si sono susseguiti con i loro pro e contro prima di giungere alla configurazione attuale di Wheelchair.q.

1.3.1 Wheelchair.q01

La prima versione di Wheelchair.q è riportata nella Figura 1-14. Essa è costituita da due gruppi rotanti trilobati detti "tripodi". Solo quelli posteriori sono motorizzati. Questa soluzione ha come svantaggio quello di essere ingombrante e poco manovrabile. È in grado di salire una gradinata in modo efficiente e semplice, mentre non è in grado di controllare la discesa, con la conseguente caduta libera della carrozzina stessa: questa caratteristica non è accettabile.



Figura 1-14 Wheelchair.q01

1.3.2 Wheelchair.q02

La seconda versione di Wheelchair.q è riportata in Figura 1-15. Gli ingombri sono ridotti grazie all'utilizzo di un tripode più piccolo di quello della prima versione e l'assetto dell'utente è ora controllabile con il sistema a quadrilatero che compone il telaio. Sono però ancora presenti oscillazioni causate dai tripodi. Queste oscillazioni si ripercuotono sull'utente e sono compensate solo parzialmente dal telaio.

La manovrabilità è ancora difficile con la carrozzina in questa configurazione.



Figura 1-15 Wheelchair.q02

1.3.3 Wheelchair.q03

La terza versione di Wheelchair.q è riportata in Figura 1-16. Nella marcia in piano (a sinistra) la carrozzina poggia sui tripodi posteriori e su delle ruote pivotanti folli. Nella marcia su scala, invece, la carrozzina poggia sulle ruote del tripode che danno anche il moto alla carrozzina e su un cingolo che si abbassa per questa fase. Ne risulta un moto più uniforme grazie al cingolo. Purtroppo, però, il sistema di posizionamento del cingolo risulta essere molto complesso ed ingombrante. Inoltre, la posizione del baricentro dell'utente rimarrebbe troppo distante dalla scala e questo potrebbe dare problemi di instabilità. Per questi motivi si è passati ad un'altra configurazione di carrozzina.



Figura 1-16 Wheelchair.q03

1.3.4 Wheelchair.q04

La quarta versione di Wheelchair.q è riportata in Figura 1-17. Questa versione è funzionalmente simile alla precedente, ma è stato ripensato il sistema di estrazione del cingolo per permettere un posizionamento dell'utente più vicino alla scala. Con questa versione, inoltre, si è pensato ad una ottimizzazione della forma del cingolo per ottenere un moto dell'utente più uniforme.



Figura 1-17 Wheelchair.q04

1.4 Wheelchair.q05: Sistemi di riferimento e dimensioni

La versione definitiva di Wheelchair.q è riportata in Figura 1-18. È presente l'elemento tripode, ma è stato spostato sull'anteriore per avere più manovrabilità nella marcia in piano e più trazione nella marcia su scala. È presente una coppia di ruote pivotanti folli in grado di ruotare attorno ad un fulcro. In questo modo si possono abbassare per il moto in marcia in piano e su gradino singolo, mentre si possono sollevare per il superamento di intere gradinate. Le ruote pivotanti vengono anche utilizzate, in combinazione con il tripode, per superare sia in salita che in discesa singoli gradini. Inoltre, i singoli gradini sono superabili sia in salita che in discesa in marcia avanti: questo richiede un minore tempo per il superamento dell'ostacolo e fornisce un senso di maggiore sicurezza all'utente.

Per il moto su scala, invece, lavorano insieme il tripode e il cingolo posto dietro la sedia dell'utente. Il cingolo è folle e serve, quindi, solo come secondo punto di appoggio e viene abbassato solo quando necessario. Il moto su scala (Figura 1-19) avviene in avanti per la

discesa e all'indietro per la salita. Questo per avere sempre le ruote del tripode il più possibile cariche di peso per evitare slittamenti delle gomme.



Figura 1-18 Wheelchair.q05



Figura 1-19 Wheelchair.q05 – Moto su scala

Nel capitolo seguente vengono mostrati la struttura cinematica e i sistemi di riferimento adottati per la costruzione di questo prototipo.

2.1 Struttura generale

In questa sezione vengono riprese le informazioni che riguardano la struttura cinematica della carrozzina, la nomenclatura di riferimento e i sistemi di riferimento interni.

La struttura cinematica di Wheelchair.q viene mostrata in Figura 2-1. È composta da:

- Gruppo di locomozione, in verde;
- Sotto-telaio PC, in rosso;
- Sotto-telaio RC, in blu;
- Ruote pivotanti, in ciano;
- Cingolo, in magenta;
- Sedia, in nero.



Figura 2-1 Struttura cinematica Wheelchair.q

Il *gruppo di locomozione* è composto da un tripode alle cui estremità sono incernierate delle ruote gommate. Il tripode è composto da una struttura a rotismo epicicloidale. Il portatreno è la struttura a guscio esterna che ruota attorno al punto P. La ruota dentata con centro in P è

la solare che, per mezzo di ruote dentate folli di rimando, invia il moto alle ruote dentate dei satelliti. Le ruote dentate satelliti sono quelle che muovono, coassialmente, le ruote gommate ciascuna con centro in una W. Portatreno e ruote solari vengono azionate separatamente, ma i due portatreni (sinistro e destro) si muovono insieme perché azionati da un unico motore. Le ruote solari sinistra e destra, invece, sono azionate da due motori distinti: in questo modo è possibile anche far ruotare la carrozzina sul posto. Il gruppo di locomozione viene utilizzato sia nelle fasi di movimento sul piano sia nelle fasi di superamento degli ostacoli.

Il *sotto-telaio PC* collega il gruppo di locomozione con il sotto-telaio superiore RC. Al sottotelaio PC nel punto D è vincolato il sistema delle ruote pivotanti. Il movimento del sottotelaio PC è possibile grazie al movimento del portatreno del tripode e alla movimentazione delle ruote pivotanti. La sua inclinazione può essere utilizzata per controllare la traiettoria della sedia e, volendo, in parte anche la sua inclinazione (come fatto in [17]).

Il *sotto-telaio RC* è incernierato in C con il sotto-telaio inferiore PC. È movimentato da un motore rotativo che, grazie ad un sistema a cavo e pulegge di rimando, modifica l'inclinazione relativa tra i 2 sotto-telai. È utilizzato per controllare l'assetto della sedia di Wheelchair.q nelle fasi controllate. Al sotto-telaio RC è incernierato, nel punto E, il sistema di attuazione del cingolo.

Le *ruote pivotanti* sono collegate al sotto-telaio PC tramite una cerniera posta nel punto D. Il moto delle pivotanti è un moto di rotazione attorno a tale cerniera. L'azionamento è operato da un motore rotativo che mette in rotazione la vite di un sistema vite-madrevite. La madrevite adotta un sistema a ricircolo di sfere ed è incernierata nel punto D_1 , parte di un sistema di leveraggio solidale alle ruote pivotanti. La rotazione del motore e della vite permette la rotazione delle pivotanti. Le pivotanti sono utilizzate come punti di appoggio della carrozzina nella marcia in piano e sono utilizzati per il superamento dei singoli gradini sia in salita che in discesa.

Il *cingolo* è collegato al sotto-telaio RC tramite la cerniera in E. Il suo azionamento è affidato ad un attuatore lineare che determina la rotazione del braccio del cingolo attorno al punto E. Il cingolo è utilizzato per il superamento di intere gradinate. La sua lunghezza è dettata dalla necessità di avere sempre il cingolo a contatto con almeno due gradini consecutivi.

La *sedia*, infine, si muove solidalmente al sotto-telaio RC. La sedia e il sotto-telaio RC sono paralleli quindi l'inclinazione assoluta di una coincide con l'inclinazione dell'altra.

2.1.1 Approfondimento sul tripode

La struttura reale del tripode è riportata in Figura 2-2. Sono visibili:

- La ruota dentata solare al centro (raggio r_S), indicata con il numero 1;
- Le ruote dentate folli di rimando (raggio *r*_{P1}), numero 2;
- Le ruote dentate satellite (numero 3, raggio r_P) imperniate solidamente alle gomme del tripode (raggio r_W);
- La scatola di contenimento del meccanismo (numero 4) che ha come funzione quella di "portatreno" del "sistema tripode". Il suo "raggio" è pari alla distanza tra il centro del tripode e i centri delle ruote gommate: il suo valore viene indicato come *l*_{PW};
- Il disco dentato per il trasferimento del moto al portatreno tramite una cinghia dentata, numero 5. La ruota fonica che serve per ottenere il feedback sull'angolo del portatreno è calettata solidalmente a questo disco. Nel paragrafo 7.1, si parlerà proprio della calibrazione relativa a questo angolo di feedback e a questa ruota fonica.



Figura 2-2 Struttura Tripode

Schematicamente il tripode si può rappresentare come riportato in Figura 2-3, dove r_S , r_{P1} e r_P sono i raggi primitivi delle ruote dentate rispettivamente della solare, delle ruote folli di rimando e dei satelliti. Con P si indica il centro di rotazione della solare e del portatreno del tripode, mentre con W si indica il centro di uno dei satelliti o di una delle ruote gommate.



Figura 2-3 Schema Tripode

Come accennato, la struttura funziona come un rotismo epicicloidale, pertanto, vale l'equazione di Willis che nel caso specifico è esprimibile come:

$$\omega_S = \frac{1}{k_E} \cdot \omega_W + \frac{k_E - 1}{k_E} \Omega$$

Dove:

- $k_E = \frac{r_s}{r_p}$ è il rapporto di trasmissione tra ruota solare e ruote satellite. Nel caso specifico vale 3;
- ω_W è la velocità di rotazione angolare delle ruote gommate;
- Ω è la velocità di rotazione angolare del portareno.

2.2 Scale da normativa – vincoli di progetto

Al fine di creare una carrozzina che riesca a superare efficacemente gradini singoli e intere gradinate, si è fatto uno studio sui tipi di scale esistenti. In particolare, si è fatto riferimento alla normativa *UNI 10804-gen1999* che definisce la geometria che una scala deve avere per essere a norma.

Una scala è definita da tre parametri: alzata (*h*), pedata (*p*), passo dello scalino (*e*). È possibile, inoltre, introdurre l'angolo relativo alla pendenza della scala (α_s).

Nella Figura 2-4 sono riportati questi parametri.



Figura 2-4 Parametri scala

Secondo la normativa *UNI 10804-gen1999* esistono tre tipi di scale. Esse cambiano a seconda della destinazione di utilizzo.

Utilizzando la formula di Blondel, è possibile legare i parametri *p* e *h* della scala:

$$2 \cdot h + p = 620 \div 640$$

Questa equazione, applicata alle tre tipologie di scala esistenti permette di calcolare le dimensioni di queste scale:

Destinazione d'uso	p [mm]	<i>h</i> [<i>mm</i>]	α_s [°]	<i>e</i> [<i>mm</i>]
Pubblico	300	170	29,5	345
Privato principale	250	190	37	314
Privato secondario	220	210	43,7	221

Tabella 2-1 Scale da normativa

In fase progettuale si sono prese in considerazione i primi due tipi di scala: di tipo pubblico e di tipo privato principale in quanto sono le più frequentemente utilizzate sia all'interno che all'esterno. Le scale di tipo privato secondario sono state scartate in quanto poco utilizzate e avrebbero richiesto scelte molto stringenti in fase progettuale.

Nel corso della trattazione si farà riferimento anche ad una scala particolare, non esistente in normativa, ma che è utile per fare alcuni ragionamenti anche in ottica del sistema di controllo sviluppato in questo lavoro di tesi.

Si introduce quindi la "scala nominale", ovvero una scala che, date le dimensioni di una struttura trilobata (chiamata tripode) e l'altezza dei gradini, definisce univocamente la pedata di questa scala.

Facendo riferimento alla Figura 2-5 e, in particolare, alla retta rossa, si può definire l'angolo della scala nominale (α_s^n) come:

$$\alpha_s^n = \sin^{-1}\left(\frac{h}{l_{PW} \cdot \sqrt{3}}\right)$$

Dove l_{PW} è la lunghezza di un braccio del tripode (si veda la Figura 2-5).

L'angolo della scala nominale sarà utile per la trattazione anche nel caso di salita e discesa di un singolo gradino. Dall'altezza del gradino si ricaverà l'angolo α_s^n associato che verrà utilizzato per ragionamenti geometrici.

È importante notare che anche la retta blu passante per i centri delle ruote del tripode è inclinata esattamente di α_s^n (le due rette sono parallele).



Figura 2-5 Scala nominale

I requisiti geometrici e funzionali richiesti a Wheelchair.q sono riportati nella Tabella 2-2.

Tabella 2-2 Requisiti geometrici e funzionali Wheelchair.q

Grandezza	Valore
Larghezza massima veicolo	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

Infine, si è fatto riferimento anche alla normativa *ISO 7176-28:2012*. Questa normativa da delle linee guida sui test da svolgere per capire se una carrozzina risulta sicura nel suo funzionamento.

In particolare, una caratteristica fondamentale per una carrozzina è che questa deve essere stabile staticamente in ogni situazione del suo utilizzo. Si è quindi lavorato per progettare una carrozzina che soddisfi questo requisito fondamentale e da questo vincolo sono nate diverse delle scelte progettuali di Wheelchair.q.

Un ultimo aspetto interessante nella progettazione di Wheelchair.q è stato quello di prevedere che il superamento dei singoli gradini venisse fatto in marcia avanti, ovvero con l'utente rivolto in avanti e verso lo scalino, sia in salita che in discesa.

2.3 Sistemi di riferimento e caratteristiche di Wheelchair.q

Si passa ora a definire quali sono le dimensioni, le caratteristiche degli azionamenti e i sistemi di riferimento che definiscono la cinematica di Wheelchair.q.

Convenzionalmente si utilizza la nomenclatura riportata in Tabella 2-3.

Tabella 2-3 Convenzioni sulla nomenclatura

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 f	
	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	Eccezione di angolo tra i sistemi di riferimento mobili dei sotto-telai PC e RC
---	---

Nella Figura 2-6 si riportano i sistemi di riferimento della carrozzina e gli angoli che definiscono le loro posizioni reciproche. Il sistema di riferimento $[X_0, Y_0]$ è l'unico sistema di riferimento assoluto esterno a Wheelchair.q.



Figura 2-6 Definizione degli angoli caratteristici di Wheelchair.q

Le seguenti figure (Figura 2-7, Figura 2-8, Figura 2-9, Figura 2-10) sono utili per capire dove sono applicati tali sistemi di riferimento e per visualizzare quali sono i gradi di libertà di Wheelchair.q.




Figura 2-7



Figura 2-8

Cinematica





Figura 2-10

La Tabella 2-4 riporta le dimensioni geometriche di Wheelchair.q.

Tabella 2-4 Dimensioni di Wheelchair.q

Dimensione	Valore [mm]		
l_{PW}	160		
l_{PC}	552,64		
l _{RC}	500		

Cinematica

l_{ES}	599
l _{CE}	397,26
l_{PD}	246
l _{DU}	637,64
l_{U1}	69,5
l_{U2}	113,22
l_{st1}	395
l _{st2}	385
r_W	115
r_U	56
r_T	27,44
h_S	35
x _m	360
\mathcal{Y}_m	386
α_{EC}	38 [°]
α_{PD}	24,47 [°]

Infine, la Tabella 2-5 riporta gli angoli che la carrozzina ha nella "posizione di marcia in piano". Questa è la configurazione che la carrozzina adotta per i movimenti in piano per ridurre la richiesta di corrente di azionamento delle solari, in quanto il contatto con le ruote dei tripodi avviene solo su una gomma per tripode, mantenendo comunque un'ampia base di appoggio della carrozzina.

TT 1 11 O F	• • • •	• •	•	•	•
Tabella 2-5) Angoli	posizione	marcia	1n	plano
					P

Angolo	Valore [°]	Azionato
β	38	Sì
$ heta_{DU}$	98,1	Sì
$ heta_P$	88 = 120 - 32	Sì
$\Theta_{PC} = \theta_{PC}$	38	No

In questo capitolo vengono riprese alcune delle fasi e delle sottofasi del controllore di Wheelchair.q per il superamento del singolo gradino sia in salita che in discesa. Questa sezione è necessaria per capire dove vengono inseriti i sistemi di controllo descritti nei prossimi capitoli.

3.1 Fasi salita gradino

Per superare il singolo gradino in salita sono necessarie dieci sottofasi di movimentazione della carrozzina. Sono numerate da A0 ad A9. Per le specifiche sugli angoli di set che Wheelchair.q deve raggiungere nelle varie sottofasi si rimanda al lavoro presentato in [17].

Per completezza di seguito vengono presentate tutte le fasi per mostrare dove vengono fatti i lavori di modifica al sistema di controllo.

3.1.1 Fasi A0_A1_A2 - Originale

Le Fasi A0, A1 e A2 sono originariamente accorpate in un'unica sottofase della macchina a stati del sistema di controllo presentato nel Capitolo 8. In questa sottofase si ha l'avvicinamento della carrozzina al gradino con contemporanea rotazione del tripode per portarlo ad assumere una configurazione a triangolo rovesciato. Il sistema di controllo della carrozzina ha il compito di mantenere costante l'inclinazione assoluta del telaio PC compensando l'aumento quota del punto P con una rotazione delle ruote pivotanti. La Figura 3-1 riporta le configurazioni di inizio e fine di questa sottofase.



Figura 3-1 Fase A0_A1_A2 - Originale

In realtà, questa come anche le altre fasi, non hanno un vero e proprio controllo dell'assetto e della traiettoria della sedia: all'interno delle sottofasi gli arti di Wheelchair.q si muovono da un angolo iniziale ad uno finale di set in modo autonomo senza sapere cosa stanno facendo gli altri arti. Per questo motivo quello che si ottiene realmente non è esatte il controllo dell'assetto del telaio PC teorico.

3.1.2 Fase A3 - Originale

Nella Fase A3 si ha il completamento della rotazione del tripode attorno al centro della ruota W_1 con appoggio della ruota W_2 sul piano superiore del gradino. Anche in questa fase il sistema di controllo dovrebbe mantenere il telaio PC della carrozzina allo stesso angolo di inclinazione grazie alle ruote pivotanti. La Figura 3-2 riporta le configurazioni di inizio e fine della fase A3 originale.



Figura 3-2 Fase A3 – Originale

3.1.3 Fasi A0_A1 – Nuove

Al fine di ottenere delle traiettorie realmente controllate e un controllo dell'assetto della sedia continuo, si è reso necessario modificare le fasi A0, A1, A2 e A3 dividendole in modo diverso da quanto originariamente fatto.

In particolare, le Fasi A0 e A1 rimangono unite in una fase che prevede l'avanzamento di Wheelchair.q fino al contatto con il gradino. Contemporaneamente la sedia viene fatta ruotare all'indietro aumentando l'angolo β da 38°, se in marcia in piano, fino ad un β_{salita} pari a 44°. Questo arretramento serve per spostare il baricentro dell'utente più distante dal punto di appoggio della ruota W_1 aumentando la stabilità della carrozzina nella fase successiva. Inoltre, aiuta la sedia a non toccare il gradino nell'avvicinamento prima di iniziare la rotazione del tripode nella fase successiva e aiuta ad aumentare il senso di sicurezza dell'occupante. Le configurazioni di inizio e fine della Fase A0_A1 sono riportate in Figura 3-3.



Figura 3-3 Fase A0_A1 - Nuova

La Fase A0_A1 termina con la configurazione di inizio della "Prima fase", uno degli argomenti centrali del lavoro di tesi.

3.1.4 Fasi A2_A3 - Nuove

Le Fasi A2 e A3 vengono accorpate in un'unica fase chiamata Fase A2_A3. Questa è la fase chiamata "Prima fase" e verrà meglio studiata nel capitolo 4.

In questa fase avviene la rotazione completa del tripode attorno al centro della ruota W_1 fino a toccare con la ruota W_2 il piano superiore del gradino. Le configurazioni iniziale e finale di tale fase sono riportate in Figura 3-4.

In questa fase le pivotanti e il sedile vengono controllati in posizione in modo continuo in funzione dell'angolo di rotazione del tripode per ottenere una traiettoria rettilinea del punto C e mantenere un assetto ad inclinazione assoluta costante della sedia pari a quello di inizio fase. Ai controllori di pivotanti e azionamento sedile arriva in ingresso il feedback di variazione dell'angolo del tripode. Questo angolo viene rielaborato "geometricamente" secondo quanto spiegato nei prossimi capitoli ottenendo due angoli di set da seguire in ogni momento (β^{SET} , θ_{DU}^{SET}).



Figura 3-4 Fase A2_A3 - Nuova - Prima fase

La configurazione conclusiva di questa "Prima fase" coincide con quella conclusiva della Fase A3 originale a parte per l'inclinazione della sedia (angolo β).

3.1.5 Fase A4

Nella nuova Fase A4 si completa la rotazione del tripode "attorno al gradino" portando in rotazione il tripode rispetto al centro della ruota W_2 .

Nella versione originale in [17], si cerca sempre di mantenere costante l'inclinazione del telaio PC (e quindi l'inclinazione assoluta della sedia). Nella nuova versione vengono realmente controllati la traiettoria del punto C della sedia e l'inclinazione assoluta della sedia. Anche in questo caso, per fare questi controlli le ruote pivotanti e il motore del telaio RC fanno riferimento all'angolo di rotazione del tripode. Questa Fase è chiamata "Seconda fase".

La "Seconda fase" è mostrata nella Figura 3-5. La configurazione finale della nuova Fase A4 coincide con la configurazione finale della Fase A4 originale a parte per l'inclinazione della sedia.



Figura 3-5 Fase A4 – Nuova - Seconda fase

3.1.6 Fase A5

Nella Fase A5 avviene solamente una rotazione delle solari. Il resto degli azionamenti rimane passivo e vengono attivati i freni. La fase A5 è riportata in Figura 3-6.

La sedia rimane inclinata all'indietro con $\beta = \beta_{salita}$: questo è utile in quanto l'angolo che β deve raggiungere nella fase successiva (A6) è più vicino a questo angolo che a quello corrispondente ad una inclinazione orizzontale della sedia ($\beta = 38^\circ$ siccome $\theta_{PC} = 38^\circ$ alla fine della Fase A4 precedente).



Figura 3-6 Fase A5

3.1.7 Fase A6

Nella Fase A6 il telaio PC viene fatto ruotare abbassando le ruote pivotanti (aumentando l'angolo θ_{DU}) e, in caso di presenza di un utente, aumentando l'angolo β per portare la seduta di Wheelchair.q in configurazione orizzontale. Contemporaneamente alla rotazione delle pivotanti viene fatta anche una rotazione in senso antiorario del tripode per mantenere tutte le 4 ruote del tripode a contatto con il suolo. La fase A6 è presentata nelle configurazioni iniziale e finale in Figura 3-7.

La fase A6 rimane invariata concettualmente a quella presentata in [17], ma per il calcolo degli angoli di set che le pivotanti e il telaio RC (β) devono raggiungere in questa fase viene proposto uno studio nel capitolo 5 di questo lavoro di tesi: viene presa in considerazione la posizione del baricentro dell'utente che influenza fortemente la posizione del baricentro totale del sistema "Wheelchair.q + utente". Alla fine di questa fase, infatti, tale sistema dovrà poggiare interamente sulle sole ruote del tripode (W_1 e W_2), ovvero è necessario spostare il baricentro totale all'interno dei punti di appoggio offerti dalle ruote del tripode.

In questa fase, come nelle successive, non viene fatto un controllo continuo sugli arti della carrozzina, ma a ciascuno viene imposto un angolo di set che deve essere raggiunto indipendentemente dalla configurazione degli altri arti.



Figura 3-7 Fase A6

Fino alla fase A6 ci si è soffermati maggiormente in quanto nel lavoro di tesi vengono presentate delle modifiche e dei suggerimenti di modifiche al modello originale. Ora vengono presentate velocemente le restanti fasi che rimangono sostanzialmente invariate rispetto al modello originario presentato in [17].

3.1.8 Fasi A7, A8, A9

La Fase A7 (Figura 3-8) prevede il sollevamento delle ruote pivotanti fino a portarle a livello con il piano superiore del gradino. I restanti azionamenti di Wheelchair.q rimangono fermi.



La Fase A8 (Figura 3-9) prevede un avanzamento della carrozzina grazie ad una rotazione in avanti delle solari. Gli altri arti di Wheelchair.q non vengono azionati.



Figura 3-9 Fase A8

Infine, come mostrato in Figura 3-10, la Fase A9 consiste in un riposizionamento della carrozzina in configurazione di "marcia in piano". Terminata questa fase la carrozzina è pronta a ripartire sotto i comandi dell'utente.



Figura 3-10 Fase A9

3.2 Fasi discesa gradino

Per una descrizione accurata riguardo la gestione della discesa del singolo gradino si rimanda al lavoro in [18]. In questo paragrafo si riprende la Fase su cui si vuole intervenire per un controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile di Wheelchair.q.

In particolare, partendo da una configurazione iniziale di movimento della carrozzina (verosimilmente dalla posizione di marcia in piano della carrozzina) si azionano gli arti di Wheelchair.q per portarla ad una configurazione di discesa del gradino. La carrozzina viene fatta avanzare fino al bordo del gradino dove due sensori di distanza rilevano quando le ruote anteriori del tripode hanno superato tale limite. Se uno dei due sensori misura una distanza maggiore dell'altro, vuol dire che quel sensore ha già superato il bordo, mentre l'altro deve ancora superarlo. Questo significa che la carrozzina deve raddrizzarsi agendo sulle solari per compiere una rotazione della carrozzina sul posto.

Una volta raddrizzata, la carrozzina si trova nella configurazione di "inizio Fase D4": proprio in questa fase deve lavorare il sistema di controllo presentato nel paragrafo 4.2.

La Figura 3-11 riporta il passaggio dalla posizione di marcia in piano alla configurazione di inizio Fase D4 per la discesa del tripode dal gradino. Anche se si suppone che il tripode sia in posizione orizzontale quando inizia la fase D4, si prevede che possa invece esistere un piccolo angolo di inclinazione del tripode (α_0) tra le ruote W_1 e W_2 : anche nello studio del sistema di controllo presentato nel paragrafo 4.2 si prevede questa possibilità.



Figura 3-11 Fasi D1 a D3

La Fase D4, mostrata in Figura 3-12, prevede una rotazione del tripode in senso orario "attorno al gradino". Nel sistema di controllo presentato in [18] la traiettoria e l'assetto della sedia, però, non sono controllati in continuo: anche in questo caso nella sottofase gli arti di Wheelchair.q si muovono da un angolo inziale ad uno finale indipendentemente dalla configurazione degli altri arti. Con il sistema di controllo presentato nel paragrafo 4.2, invece, si propone un sistema di controllo che mantenga costante l'inclinazione della sedia agendo su β e che permetta di far seguire al punto C una traiettoria rettilinea. La traiettoria seguita ha stesso punto di partenza e di arrivo del sistema già esistente e di conseguenza è facilmente integrabile. Anche in questo caso, $\beta e \theta_{DU}$ si muovono in funzione dell'angolo di rotazione del portatreno del tripode ($\Delta \theta_P$).



Figura 3-12 Fase D4

Dalla fase D4 si procede fino alla fase D7. Nella Fase D7, riportata in Figura 3-13, si ha lo spostamento del baricentro del sistema "sedia + utente" tra i punti di appoggio forniti dalle quattro ruote del tripode. Anche in questo caso, come si spiega nel paragrafo 5.3.5, è possibile ottenere la configurazione da dare alla carrozzina in funzione della posizione ed entità del baricentro dell'utente e dell'altezza del gradino per ottenere una distribuzione sicura dei pesi.



Figura 3-13 Fase D7

Infine, le restanti fasi prevedono un avanzamento di Wheelchair.q con appoggio sulle sole ruote del tripode e un successivo riposizionamento della carrozzina nella configurazione di marcia in piano.

In questo paragrafo si è data una panoramica di quali sono le fasi che compongono il sistema di controllo della carrozzina sia per la salita che per la discesa del singolo gradino e si è chiarito dove vengono apportate le modifiche ai loro sistemi di controllo.

4 Logica di controllo sequenze automatiche

In questo capitolo si approfondisce la logica utilizzata per rendere più sicure le fasi di salita e discesa del singolo gradino.

In particolare, si introduce un sistema di controllo che permette di rendere le traiettorie ben definite e più regolari di quelle attualmente percorse dall'utente durante il superamento di questi ostacoli. È importante notare che con questa logica gli arti di Wheelchair.q lavorano insieme per far percorrere all'utente le traiettorie volute: infatti, gli arti faranno riferimento ad un solo arto principale detto "Master" e si muovono in funzione di questo.

Questa è un'importante novità, perché permette anche di fare un controllo di posizione degli arti che seguono l'arto Master che a sua volta segue una sua logica di azionamento influenzata dal gradino che si è in procinto di superare e dalla configurazione di inizio sequenza automatica della carrozzina.

Gli arti che la sedia utilizza per il superamento dei singoli gradini sono riportati nella Tabella 4-1. Nella Tabella 4-1 sono riportate anche le principali caratteristiche di Wheelchair.q che è fondamentale conoscere per avere i limiti di attuabilità degli arti.

Tabella 4-1 Arti di Wheelchair	q utilizzati nel sistema di controllo	per il superamento	di un gradino
--------------------------------	---------------------------------------	--------------------	---------------

Arto	Tipo	Variabile	Limiti	Limite	Tipo di controllo
			azionamento	velocità	
Tripode	Principale -	$\Delta heta_p$	No limite	$\pm (0,4 \div 0,3)$	Velocità e posizione
	Master		(FB di 120° in	[rad/s]	
			120°)		
Pivotanti	Segue - Slave	$ heta_{DU}$	35,4 ° ÷ 126°	±10 [°/s]	Posizione
Sedile	Segue - Slave	β	32,7 ° ÷ 47,8°	±8 [°/s]	Posizione
Solari	Segue - Slave	γ_{SL}	No limite	_	Posizione

4.1 Salita singolo gradino

Il controllo di seguito proposto si riferisce alle fasi A2, A3 e A4 della salita gradino presentate nel Capitolo 3.

Attualmente la carrozzina, quando arriva a contatto con il gradino da superare in salita, attiva la rotazione del tripode "attorno al gradino". Questo, quindi, trasmette al punto P una traiettoria composta da due archi di circonferenza, come mostrato in arancione in Figura 4-1.

Il problema è che, ad ora, questa traiettoria si trasmette identicamente al punto C e quindi all'utente. In realtà, dato che nel sistema di controllo attuale gli arti nelle varie sottofasi si muovono autonomamente per raggiungere i propri angoli di SET, la traiettoria del punto C non seguirà esattamente i due archi di circonferenza del punto P, ma delle traiettorie simili e non ben definite.



Figura 4-1 Traiettorie attuali punti P e C in fasi A2, A3, A4

Quello che si vuole fare, quindi, è cercare di rendere la traiettoria del punto C più lineare e definita e di fare in modo che l'inclinazione (o assetto) della sedia dell'utente sia costante lungo tutte le fasi A2, A3 e A4. Il risultato è mostrato in Figura 4-2 con le due rette in verde scuro. È presente anche una retta in verde più fine e tratteggiata che rappresenta quello che si può ottenere in termini di traiettoria se, oltre alle pivotanti e all'angolo di inclinazione del sedile, si controllano anche le solari del tripode nella Seconda fase rettilinea. L'argomento è approfondito nei prossimi capitoli. Logica di controllo sequenze automatiche



Figura 4-2 Nuova traiettoria lineare punto C in fasi A2, A3, A4

Per quanto riguarda l'inclinazione della sedia, in pratica, bisogna agire sull'angolo β di inclinazione relativa tra i telai PC ed RC. Sarà, quindi, necessario compensare la rotazione del telaio PC (il cui angolo di riferimento è Θ_{PC}) con una variazione uguale dell'angolo β come riportato in Figura 4-3. Nella figura la generica variazione dell'angolo $\Theta_{PC} = \Theta_{PC}$ viene indicata con $\Delta\theta$.



Figura 4-3 Controllo per assetto sedile costante

Dal punto di vista analitico e geometrico, si sono cercate delle relazioni che permettessero di legare gli angoli θ_{DU} (delle pivotanti) e β (dell'assetto sedile) all'angolo di rotazione del

tripode $\Delta \theta_P$ (o angolo di rotazione del portatreno - relativo) nelle Fasi a controllo di traiettoria e di inclinazione (assetto).

Per raggiungere questo obiettivo si è fatto riferimento alla Figura 4-4.



Figura 4-4 Schema geometrico per sviluppo controllo arti di Wheelchair.q - Salita gradino

Nella Figura 4-4 la carrozzina è riportata nella sua quasi-interezza solo all'inizio delle fasi di controllo, quando approccia il gradino e non nel resto del controllo. Questa scelta è stata fatta solo per non rendere ulteriormente confusionario il disegno. Solamente il tripode è disegnato nelle tre configurazioni che delimitano le fasi di controllo.

Come si può vedere nella Figura 4-4, la traiettoria percorsa dal punto C è divisa in due parti rettilinee: $C_0 \rightarrow C_{1/2} \in C_{1/2} \rightarrow C_f$.

Il primo tratto ($C_0 \rightarrow C_{1/2}$) fa parte di quella che è chiamata "Prima fase" del sistema di controllo, il secondo tratto ($C_{1/2} \rightarrow C_f$) della "Seconda fase" del sistema di controllo. Nella prima fase la carrozzina ruota attorno al punto W_1 , mentre nella seconda fase la rotazione avviene attorno a W'_2 .

La carrozzina può approcciare il gradino con qualsiasi angolo iniziale α_{piano}^0 che da ora in avanti è chiamato α_0 per brevità. In pratica è l'angolo che il tripode ha rispetto alla condizione con due ruote poggiate a terra quando arriva a contatto con il gradino. Inoltre, la carrozzina può iniziare la salita gradino con qualsiasi angolo delle pivotanti θ_{DU} .

Nella Prima fase il tripode compie una rotazione pari a $\Delta \theta'_P$ e nella seconda pari a $\Delta \theta''_P$. Questi angoli sono funzione dell'altezza del gradino e di α_0 .

Funzione dell'altezza del gradino *h* e dell'angolo α_0 sono anche gli angoli "di salita" α_1 e α_2 . Questi angoli sono definiti a partire dai punti di inizio e fine degli archi di rotazione del tripode rispettivamente nella prima e nella seconda fase. I punti C_0 , $C_{1/2}$ e C_f sono coincidenti con i punti raggiunti dal punto C della carrozzina con l'attuale sistema di controllo ben definito in [17].

Infine, nello schema viene riportata la retta inclinata dell'angolo della scala nominale α_s^n relativa all'altezza del gradino che la carrozzina deve affrontare.

Con riferimento alla Figura 4-4, si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\alpha_{1} = tg^{-1} \left(\frac{sen(30^{\circ} + \alpha_{s}^{n}) - sen(30^{\circ} + \alpha_{0})}{cos(30^{\circ} + \alpha_{s}^{n}) + cos(30^{\circ} + \alpha_{0})} \right)$$
$$\alpha_{2} = tg^{-1} \left(\frac{sen(30^{\circ}) - sen(30^{\circ} - \alpha_{s}^{n})}{cos(30^{\circ} - \alpha_{s}^{n}) - cos(30^{\circ})} \right)$$

E importante notare che imponendo al punto C la traiettoria qui proposta, si ottiene un moto più sicuro durante questa "rotazione del tripode attorno al gradino". Questo perché tale sistema di controllo tende a mantenere il punto C arretrato rispetto al gradino per più tempo rispetto al controllo che prevede la traiettoria con due archi di circonferenza. È una caratteristica intrinseca di questo sistema di controllo. È importante in quanto, come si vedrà nel paragrafo 4.1.6, il margine di stabilità riferito alla ruota W_1 (ovvero la distanza orizzontale tra il baricentro totale del sistema "sedia + utente" e il centro della ruota W_1) si assottiglia man mano che la rotazione del tripode avanza nella Prima fase. Il margine di stabilità raggiunto alla fine della Prima fase seguendo la traiettoria rettilinea è lo stesso che se si seguisse la traiettoria curvilinea, ma ci si avvicina più tardi nella rotazione, ovvero quando la ruota W_2 di trova a contatto con il gradino superiore. In quel punto, di fatto, il margine di stabilità aumenta immediatamente in quanto si riferisce alla ruota W_2 che diventa il nuovo punto di appoggio.

Studiando α_1 e α_2 in funzione di α_s^n , ovvero dell'altezza del gradino *h*, grazie ad una funzione Matlab, si trova quanto riportato in Figura 4-5. Nello stesso grafico viene riportato anche l'angolo α_s^n .

Come si può notare, l'angolo α_1 della Prima fase è negativo per gradini bassi. Diventa tanto più negativo quanto più il gradino è basso e quanto più α_0 è grande. Questa cosa è facilmente giustificabile pensando al fatto che la retta inclinata di α_1 ha come estremi gli stessi punti estremi del primo arco di circonferenza percorso da P: se il primo punto si trova più in alto del secondo (il punto di passaggio dalla Prima alla Seconda fase), la retta che li congiunge sarà inclinata di un angolo "negativo". Questa condizione si può verificare quindi per *h* piccoli e/o α_0 grandi.

L'angolo α_2 , invece, non dipende da α_0 , ma solo da *h*. Il suo valore massimo è 90° e corrisponde ad un *h* di 240*mm*. In questo caso si ha che la seconda retta è verticale.



Figura 4-5 Angoli per controllo traiettoria salita gradino in funzione di h_{gradino}

Facendo ancora riferimento alla Figura 4-4, i due angoli evidenziati in gialli ($\Delta \theta'_p \in \Delta \theta''_p$) sono gli angoli di cui ruota il portatreno rispettivamente nella Prima e nella Seconda fase. L'angolo $\Delta \theta'_p$ è funzione dell'angolo α_0 e di *h*; l'angolo $\Delta \theta''_p$ è funzione dell'altezza *h* del gradino. In particolare, si ha che:

$$\Delta \theta'_{\rm p} = 120^{\circ} - \alpha_s^n - \alpha_0$$
$$\Delta \theta''_{\rm p} = \alpha_s^n$$

Questo sistema si integra bene con il controllo attualmente utilizzato dalla carrozzina in quanto la configurazione della carrozzina nelle tre fasi fondamentali (ovvero quelle in cui C si trova in C_0 , $C_{1/2}$ e C_f) del moto è la stessa prevista nelle tesi [17] e [19].

Fatte queste premesse, si può passare alla trattazione più pratica che ha permesso di trovare le relazioni necessarie e trovare gli angoli di set θ_{DU}^{SET} e β^{SET} in ogni punto delle due fasi di controllo.

Nella Figura 4-6 si riporta in giallo l'angolo Master $\Delta \theta_p$ che è l'angolo di rotazione del tripode. Vale zero all'inizio della fase controllata, quindi non necessariamente con le ruote del tripode poggiate a terra, e cresce fino a $\Delta \theta'_p$ nella prima fase e riparte da zero nella seconda fase per terminare a $\Delta \theta'_p$.

In viola, invece, solo riportati gli angoli di set θ_{DU}^{SET} e β^{SET} che seguono in ogni istante l'angolo master.

Nell'immagine viene colorata la carrozzina in una configurazione generica del controllo.



Figura 4-6 Angolo Master e angoli di set controllo - salita gradino

Per trovare le relazioni necessarie si sono introdotte alcune lunghezze riportate in blu nella Figura 4-7. In particolare:

h_P e *h_{P2}* sono rispettivamente le distanze tra *W*₁ e *P* e tra *W*₂' e *P* in una configurazione generica lungo le direzioni perpendicolari ad *α*₁ ed a *α*₂. Varia per via della rotazione dei bracci del tripode;

- h_{PC} e h_{PC_2} sono le distanze tra P e *C* in una configurazione generica anche in questo caso lungo la direzione perpendicolare a α_1 e a α_2 . Sarà compito del telaio PC compensare la sua variazione;
- *h_{CW1}* e *h_{CW2}* sono la somma dei primi termini e come vincolo vengono imposti pari ad una costante.



Figura 4-7 Lunghezze ausiliarie utilizzate per relazioni angoli di SET – Salita gradino

In particolare, si possono scrivere le seguenti relazioni.

4.1.1 Prima Fase

Per la prima fase si impone che sia pari ad una costante:

$$h_{CW_1} = h_{PC} + h_P = cost$$

E, in particolare:

$$h_{CW_1} = l_{PC} \cdot sen(\theta_{PC_0} + \alpha_1) + l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0 + \alpha_1) = cost$$

Questa relazione permette di trovare un valore ben preciso di h_{CW_1} se si conoscono θ_{PC_0} , ovvero l'angolo assoluto che ha il sotto-telaio PC quando approccia il gradino e α_0 . Un approfondimento sul loro calcolo conoscendo θ_{DU} e θ_P è riportato di seguito nel paragrafo 4.1.3. È possibile, inoltre, scrivere h_P in funzione di $\Delta \theta_p$ (come sopra definito e rappresentato in giallo nella Figura 4-7):

$$h_P = l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0 + \alpha_1 + \Delta\theta_P)$$

Di conseguenza, è possibile calcolare h_{PC} come:

$$h_{PC} = l_{PC} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_1)$$

Da cui si può ricavare θ_{PC} , funzione di $\Delta \theta_P$, importante per il calcolo di β :

$$\theta_{\rm PC}(\Delta\theta_P) = sen^{-1}\left(\frac{h_{PC}}{l_{PC}}\right) - \alpha_1$$

Da qui, infatti, si imporrà nel sistema di controllo dell'assetto del sedile (e del suo motore) che:

$$\beta^{SET} = \beta_{salita} + \Delta\beta$$

Con:

- β_{salita} = angolo di partenza con piccola reclinazione dell'utente. 42°, ovvero una reclinazione di 4° se con partenza in marcia in piano, sembra essere un buon compromesso (un approfondimento è riportato nei prossimi paragrafi nello studio della traiettoria con script Matlab;
- $\Delta\beta = \Delta\theta_{PC} = \theta_{PC}(generico) \theta_{PC_0} = \Delta\beta(\Delta\theta_P)$

Si deve, infine, trovare il legame tra $\Delta \theta_P$ e θ_{DU} . Facendo riferimento alla Figura 4-8 possiamo scrivere $h_D^{assoluta}$ in due modi:

$$\begin{cases} h_D^{assoluta} = r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0 + \Delta\theta_P) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) \\ h_D^{assoluta} = r_U + l_{DU} \cdot sen(\theta_{DU} - (\theta_{PC} + \alpha_{PD})) \end{cases}$$

Dalla prima equazione troviamo $h_D^{assoluta}$ che viene usata nella seconda per trovare θ_{DU} :

$$\theta_{DU} = sen^{-1} \left(\frac{h_D^{assoluta} - r_U}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD} = \theta_{DU}^{SET}$$

Logica di controllo sequenze automatiche



Figura 4-8 Altezza assoluta punto D

A questo punto la Prima fase è definita in qualsiasi punto del suo campo di esistenza e per qualsiasi configurazione di arrivo e per qualsiasi altezza del gradino.

Si passa ora alla trattazione della Seconda fase.

4.1.2 Seconda Fase

La Seconda fase risulta essere molto simile alla Prima fase come metodologia di studio. Di seguito si riportano le relazioni della fase.

Con riferimento alla Figura 4-7, si impone che la distanza h_{CW_2} si mantenga costante e pari alla somma delle altre due componenti.

$$h_{CW_2} = h_{PC_2} + h_{P_2} = cost$$

È possibile scrivere h_{CW_2} come:

$$h_{CW_2} = l_{PC} \cdot sen(\theta_{PC_{1-2}} + \alpha_2) + l_{PW} \cdot \cos(60^\circ - \alpha_2 + \alpha_S^n)$$

Dove $\theta_{PC_{1-2}}$ è l'angolo che il telaio PC ha alla fine della prima fase. Pertanto, si calcola dall'equazione di θ_{PC} della prima fase relativa all'angolo di uscita dalla prima fase che vale $\Delta \theta_P$ ('end 1') = 120° – $\alpha_S^n - \alpha_0$.

 h_{CW_2} risulta, pertanto, completamente definita.

È possibile poi scrivere h_{P_2} come:

$$h_{P_2} = l_{PW} \cdot \cos(60^\circ - \alpha_2 + \alpha_S^n - \Delta \theta_P^{\text{II}})$$

 $\Delta \theta_P^{\text{II}}$ è l'angolo di rotazione del tripode nella seconda fase e parte da zero all'inizio della seconda fase. Si ricorda che le altre componenti sono delle costanti riferite al gradino.

Si può, quindi, scrivere h_{PC_2} in due modi:

$$h_{PC_2} = h_{CW_2} - h_{P_2}$$
$$h_{PC_2} = l_{PC} \cdot \cos(\alpha_2 + \theta_{PC} - 90^\circ)$$

Dall'ultima relazione si può ricavare l'angolo del telaio PC (θ_{PC}):

$$\theta_{PC}(\Delta \theta_P) = \cos^{-1}\left(\frac{h_{PC}}{l_{PC}}\right) + 90^\circ - \alpha_2 \equiv \beta^{SET}$$

Anche in questo caso è possibile scrivere l'altezza del punto D in due modi:

$$\begin{cases} h_D^{assoluta} = h + r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ - \alpha_S^n + \Delta \theta_P^{II}) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) \\ h_D^{assoluta} = r_U + l_{DU} \cdot sen(\theta_{DU} - (\theta_{PC} + \alpha_{PD})) \end{cases}$$

Dalla prima si ricava $h_D^{assoluta}$ e dalla seconda θ_{DU} di set:

$$\theta_{DU}^{SET} = sen^{-1} \left(\frac{h_D^{assoluta} - r_U}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD}$$

4.1.3 Approfondimento calcolo $\theta_{PC_0} e \alpha_0$

Il sistema di controllo descritto in questo capitolo per funzionare ha bisogno di conoscere l'angolo di inclinazione del sotto-telaio PC (θ_{PC_0}) e l'angolo di inclinazione del tripode (α_0) nel momento in cui approcciano il gradino.

Per calcolare questi due angoli, risulta agevole utilizzare le informazioni ottenute dall'inclinometro del sedile (angolo θ_M di beccheggio), dal potenziometro delle ruote pivotanti (angolo θ_{DU}) e dall'angolo β relativo tra i sotto-telai PC e RC. Per i seguenti ragionamenti si faccia riferimento alla Figura 4-9.

L'angolo β è l'angolo relativo tra PC e RC: se il piano della seduta della sedia è in posizione orizzontale rispetto ad un sistema di riferimento assoluto quale quello del pavimento e se ci troviamo in piano, allora l'angolo assoluto di PC vale esattamente β . Se, invece, il piano della sedia ha angolo assoluto diverso da zero (sedia inclinata, $\theta_M \neq 0$), allora θ_{PC}^0 ha inclinazione funzione anche dell'angolo θ_M .

In generale:

$$\theta_{PC}^0 = \beta^0 - \theta_M^0$$

dove l'angolo della sedia θ_M è positivo se la sedia è inclinata all'indietro, come per la configurazione di salita e discesa gradino. L'angolo θ_M in ingresso a Speedgoat rispetta già questa convenzione.

Se la carrozzina si trovasse su una superficie inclinata, l'inclinometro segnerebbe un angolo non nullo anche se il piano della seduta della sedia fosse parallela al terreno. Questo porterebbe un errore sul calcolo dell'angolo θ_{PC}^0 . Per ovviare a questo problema si può fare una misurazione appena inizia il superamento automatico del gradino, ovvero quando il lidar scansiona il gradino: in quel momento la carrozzina dovrebbe trovarsi con sedia orizzontale. Si dovrebbe depurare quindi l'angolo θ_M^0 dell'angolo " θ_M misurato durante la misurazione del lidar".

Per trovare α_0 , invece, è possibile scrivere h_D^{vert} guardando il punto D sia dal lato del tripode e del telaio PC sia dal lato delle pivotanti:

$$\begin{cases} h_D^{vert} = r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) \\ h_D^{vert} = r_U + l_{DU} \cdot sen(\theta_{DU} - (\theta_{PC} + \alpha_{PD})) \end{cases}$$

Una volta calcolato θ_{PC}^0 della seconda definizione si conosce tutto, della prima manca solo α_0 che quindi risulta valere:



Figura 4-9 Angoli di configurazione iniziale fase controllata

In questo modo la configurazione della carrozzina risulta completamente definita. È stato scritto uno script Matlab per verificare tali equazioni: inserendo i parametri della configurazione di marcia in piano si ottiene un θ_{PC}^0 di 38° e un α_0 di 5,997°, quindi circa 6° (il valore che dovrebbe risultare).

4.1.4 Avanzamento solari nella Seconda Fase

È stato fatto uno studio sulla possibilità di far avanzare la carrozzina durante la Seconda Fase tramite una rotazione delle ruote del tripode (ovvero di imporre una rotazione alle solari). Anche in questo caso si è cercato un legame tra l'angolo di rotazione del tripode $\Delta \theta_P$ e l'avanzamento orizzontale della carrozzina. Di seguito si riporta quanto trovato.

Con riferimento alla Figura 4-10 è possibile scrivere che l'avanzamento orizzontale ΔX_{W_2} delle ruote gommate in funzione dell'angolo di rotazione del portatreno della seconda fase è pari all'arretramento del centro W_1 durante la rotazione e vale:

$$\Delta X_{W_2} = 2 \cdot l_{PW} \cdot \cos(30^\circ) \cdot \cos(\alpha_S^n - \Delta \theta_P^{II}) - 2 \cdot l_{PW} \cdot \cos(30^\circ) \cdot \cos(\alpha_S^n)$$

In questo modo è possibile ottenere un moto verticale della ruota con centro W_1 e un moto in avanti anche del punto C della sedia che si va a sommare al moto rettilineo della seconda fase finora descritta. Anche in questo caso lo spostamento ΔX_{W_2} è funzione del generico angolo di rotazione del tripode della seconda fase ($\Delta \theta_P^{II}$). Per la traiettoria che si ottiene si rimanda al capitolo successivo riguardante la simulazione Matlab.



Figura 4-10 Avanzamento solari Seconda Fase

Nonostante sia interessante come controllo in quanto permetterebbe di accelerare leggermente la fase di superamento gradino e di ottenere una traiettoria meno inclinata nella Seconda fase, nella pratica non è stato applicato al controllo reale. Questa scelta è dovuta al fatto che si vogliono evitare slittamenti della ruota con centro W_2 a cui viene già richiesto di mantenere il contatto con il piano superiore del gradino. Se si chiedesse di imporre anche un moto in avanti si potrebbe incorrere in uno slittamento della gomma soprattutto su fondi con basso coefficiente di aderenza e questo non sarebbe accettabile in quanto pericoloso.

4.1.5 Studio Prima e Seconda fase con script Matlab

Prima di provare ad applicare il sistema di controllo su Wheelchair.q, è stata fatta una simulazione tramite uno script Matlab. È stato utile sia per verificare che non ci fossero errori nelle relazioni trovate, che per impostare i limiti di velocità e di movimento degli arti della carrozzina.

Inizialmente è stata fatta una ricerca dei valori massimi di velocità e di range di movimento di: tripode, ruote pivotanti e sotto-telaio RC. Si riportata di seguito la Tabella 4-2 che riassume tali limiti.

Arto	Variabile	Limiti	Limite
		azionamento	velocità
Tripode	$\Delta heta_p$	No limite	$\pm (0,4 \div 0,3)$
		(FB di 120° in	[rad/s]
		120°)	
Pivotanti	$ heta_{DU}$	35,4 ° ÷ 126°	±10 [°/s]
Sedile	β	32,7 ° ÷ 47,8°	±8 [°/s]

Tabella 4-2 Limiti azionamenti

Per il tripode, in fase sperimentale, si è notato che è in grado di ruotare ad una velocità di 0,4 [rad/s] solo in alcuni tratti di arco, quando, cioè, il carico a cui è sottoposto è minore. La velocità che sono realmente in grado di mantenere per tutta la circonferenza di rotazione è di circa 0,32/0,35 [rad/s]. Questi limiti sono reperibili in [20].

Si è verificato, inoltre, che tra le due fasi non ci fossero discontinuità dal punto di vista degli angoli degli azionamenti ($\theta_{DU} \in \beta$).

Il risultato della simulazione è riportato in Figura 4-11, Figura 4-12 e Figura 4-13. In particolare, per la Seconda fase è possibile ottenere due traiettorie: una rettilinea, se non si attuano le solari; una non rettilinea se, come spiegato nel paragrafo 4.1.4, si attuano le solari.

Le simulazioni in questo caso riportano una condizione iniziale della carrozzina in posizione di marcia in piano, un angolo di salita della sedia β di 44° (ovvero una inclinazione assoluta della sedia di 6° da mantenere costante nelle fasi) e un gradino di altezza 160mm. Quello che si mantiene costante durante la salita non è l'angolo β , ma l'inclinazione assoluta della seduta: infatti, i segmenti blu si mantengono paralleli lungo tutte le fasi.

Nelle prossime figure in cui viene rappresentata Wheelchair.q in vari punti della Prima fase e della Seconda fase i quadrati sono da [200*mm* x 200*mm*].



Configurazioni salita controllata scalino PRIMA FASE

Figura 4-11 Configurazioni salita controllata scalino Prima Fase

Logica di controllo sequenze automatiche



Configurazioni salita controllata scalino SECONDA FASE

Figura 4-12 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase - NO azionamento solari



Configurazioni salita controllata scalino SECONDA FASE

Figura 4-13 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase - Azionamento solari

Come anticipato, azionando le solari nella seconda fase, si ottiene una traiettoria non rettilinea del punto C, comunque continua.

Quello che si ottiene mettendo insieme le due fasi in entrambi i casi è riportato in Figura 4-14 e Figura 4-15.

Logica di controllo sequenze automatiche



Configurazioni salita controllata scalino PRIMA e SECONDA FASE

Figura 4-14 Configurazioni salita controllata scalino Fasi - NO azionamento solari



Configurazioni salita controllata scalino PRIMA e SECONDA FASE

Figura 4-15 Configurazioni salita controllata scalino Fasi – Azionamento solari

Come si può vedere le traiettorie sono continue in entrambi i casi. È presente il cambio di pendenza della traiettoria del punto C, più evidente nel caso senza il controllo sulle solari.

Nella pratica è stato implementato un sistema di controllo che nella Seconda fase tiene solo ferme le solari per evitare lo slittamento della ruota superiore (W_2) e strisciamento della ruota W_1 contro il gradino.

Per verificare che con questo sistema di controllo i limiti di azionamento degli angoli della sedia vengano rispettati e per vedere che non ci siano discontinuità di azionamento degli angoli, è stato diagrammato l'andamento di β e θ_{DU} in funzione dell'angolo di rotazione del tripode $\Delta \theta_P$ assoluto e pari a 0 all'inizio della prima fase controllata. I risultati valgono sempre per le condizioni sopra specificate ($\beta^{Inizio} = 44^\circ$, condizione iniziale di marcia in piano e $h_{scalino} = 160mm$) e sono riportati in Figura 4-16 e Figura 4-17. Si riportano anche i limiti di attuabilità di β e θ_{DU} .

Da queste simulazioni si è evidenziato che il β^{inizio} deve valere tra 41° e 45° per poter superare tutte le altezze di gradino affrontabili dalla sedia. 44° è un buon compromesso.

Per quanto riguarda l'angolo θ_{DU} , invece, bisogna evidenziare che l'altezza massima di scalino superabile è pari a 213mm. Questo è un limite intrinseco della carrozzina in quanto θ_{DU} è limitato superiormente dalla struttura di Wheelchair.q: con uno scalino con questa altezza, l'angolo θ_{DU} termina la seconda fase avendo raggiunto il suo valore massimo.

Questo suggerisce, in realtà, che il gradino realmente superabile sarà più basso di 213mm in quanto è necessaria un'ulteriore rotazione di θ_{DU} dopo le due fasi qui descritte per spostare il baricentro tra le sole ruote del tripode.



β in funzione di $\Delta \theta_{n}$ PRIMA e SECONDA FASE

Figura 4-16 β in funzione di $\Delta \theta_P$, Prima e Seconda fase

Logica di controllo sequenze automatiche



Figura 4-17 θ_{DU} in funzione di $\Delta \theta_P$, Prima e Seconda fase

Tenendo in considerazione i limiti sull'altezza del gradino superabile, i limiti di angolo vengono rispettati e sia β che θ_{DU} si muovono con continuità.

In Figura 4-18 si riporta anche l'angolo del telaio PC (θ_{PC}) durante le due fasi. In questo caso non sono presenti rette di limite massimo e minimo in quanto non ha un limite intrinseco, ma il suo limite è dettato principalmente dai limiti di θ_{DU} . Nell'immagine, con l'asterisco si indica l'angolo di transizione tra Prima e Seconda fase. Anche in questo caso si ottiene un andamento continuo dell'angolo θ_{PC} . Il fatto che nei tre punti di inizio Prima fase, passaggio da Prima a Seconda fase e di conclusione della Seconda fase il valore di θ_{PC} sia di 38° conferma che i punti di inizio e fine delle due fasi controllate coincidono con quelle già utilizzate nel modello originale presentato in [17].



Figura 4-18 θ_{PC} in funzione di $\Delta \theta_P$, Prima e Seconda fase

Al fine di scegliere la velocità di rotazione del tripode limite nelle due fasi, è stato studiato anche l'andamento delle velocità $\dot{\beta}$ e $\dot{\theta}_{DU}$ in funzione dell'angolo $\Delta \theta_P$ per varie velocità di ingresso del tripode $\dot{\theta}_P$. In questa prima fase si è fatto uno studio a $\dot{\theta}_P = cost$ nelle due fasi, senza considerare accelerazioni di velocità per rendere il moto più raccordato.

Per rispettare i limiti di velocità di $\dot{\theta}_{DU}$ e $\dot{\beta}$ si è visto che le velocità massime imponibili a $\dot{\theta}_P$ valgono 0,4 [*rad/s*] e 0,3 [*rad/s*] rispettivamente per la Prima e per la Seconda fase. In questo modo si ottengono gli andamenti di velocità riportati in Figura 4-19 e Figura 4-20 sia in funzione del tempo che in funzione dell'angolo di rotazione del tripode ($\Delta \theta_P$).

Come si può osservare, i limiti di velocità dei due azionamenti riportati in giallo e viola sono rispettati e il salto di velocità tra prima e seconda fase è limitato. Come viene presentato nel paragrafo 4.1.7 è stato fatto un lavoro per raccordare la velocità di rotazione del tripode in tre punti (inizio-accelerazione, raccordo fasi prima e seconda, fine-decelerazione), e quindi le velocità degli azionamenti saranno leggermente diverse da quelle riportate in questi grafici, ma solo in tali punti.
Logica di controllo sequenze automatiche



Figura 4-19 $\dot{\beta}$ in funzione di $\Delta \theta_P$ e *t*, Prima e Seconda fase



Figura 4-20 $\dot{\theta}_{DU}$ in funzione di $\Delta \theta_P$ e *t*, Prima e Seconda fase

Infine, è stata calcolata la velocità lineare del punto C nelle due fasi. Anche questa velocità è stata diagrammata in funzione del tempo e dell'angolo $\Delta \theta_P$. Il risultato viene riportato in Figura 4-21.

E importante notare che questo parametro è fondamentale per il comfort e la sensazione di sicurezza provata dall'utente. Come si può vedere, la velocità del punto C parte da zero e sale in modo continuo fino al passaggio di fase (Prima -> Seconda) per poi riscendere a zero alla fine della seconda fase. Nonostante questo risultato sia stato ottenuto dall'imposizione di θ_P costante a tratti, quanto ottenuto risulta già abbastanza soddisfacente anche dal punto di vista delle due velocità di V_C al contatto tra prima e seconda fase. È presente un piccolo salto di velocità, ma contenuto: questo verrà mitigato ulteriormente con le cubiche di velocità presentate più avanti e grazie al fatto che Wheelchair.q è un sistema non perfettamente rigido, ma smorza parzialmente eventuali discontinuità e vibrazioni.



Figura 4-21 V_C in funzione di $\Delta \theta_P$ e t, Prima e Seconda fase

È stato fatto uno studio simile riguardante le accelerazioni di β e θ_{DU} , ma risulta poco importante in quanto questi sono azionamenti che hanno un metodo di funzionamento ON/OFF in base alle posizioni di set e di fb (e al loro errore). Di conseguenza si omette questa parte.

4.1.6 Margini di stabilità nelle fasi

I margini di stabilità della carrozzina sono stati verificati al fine di assicurarsi che la carrozzina fosse stabile durante le due fasi. Per conoscere i margini di stabilita della carrozzina è necessario conoscere la posizione del baricentro della carrozzina al variare della configurazione degli arti e la posizione del baricentro dell'utente.

La posizione del baricentro dell'utente reale è verificabile, ad esempio, tramite informazioni ricevute da celle di carico poste sotto la seduta di Wheelchair.q, come spiegato nel Capitolo 5. Per lo studio qui presentato si è fatto riferimento alla normativa ISO-7176-11 relativa ai manichini per i test su sedie a rotelle. La posizione del baricentro dell'utente è quindi definita da normativa ed è valida per manichini da 80kg. Le coordinate, con riferimento alla Figura 4-22, sono riportate nella Tabella 4-3.

Quota	Valore [mm]
$x_{G_{ut}}$	204
$y_{G_{ut}}$	272

Tabella 4-3 Coordinate baricentro utente da normativa ISO-7176-11



Figura 4-22 Posizione baricentro utente da normativa ISO-7176-11

La posizione del baricentro di Wheelchair.q, invece, è stata ottenuta da ricerche condotte in [18] e in [19].

In [19] era stata condotta una misurazione sperimentale della posizione del baricentro della carrozzina in alcune configurazioni: erano state usate quattro bilance poste sotto Wheelchair.q e dai dati estratti si era giunti a determinare la posizione del baricentro rispetto al punto P. I risultati, riportati in Tabella 4-4, erano stati espressi in coordinate polari ed erano riferiti alla Figura 4-23:



Tabella 4-4 Posizione sperimentale baricentro Wheelchair.q, Fonte [4]

Figura 4-23 Posizione sperimentale baricentro di Wheelchair.q, Fonte [19]

La carrozzina era ancora in fase di sensorizzazione, quindi il baricentro non era ancora esattamente quello attuale, ma molto simile. La massa della sedia rilevata era di 111kg. Il baricentro non era stato diviso in masse sospese e masse non sospese in questo studio.

In [18] è presente, invece, uno studio che separa le masse sospese da quelle non sospese. In particolare, le masse sospese sono quelle attaccate al sotto-telaio RC, mentre quelle non sospese sono quelle attaccate al sotto-telaio PC. In [18] la loro posizione era stata trovata dal modello Solidworks di Wheelchair.q con le rispettive masse.

I valori ottenuti sono riportati nella Tabella 4-5 e fanno riferimento alla Figura 4-24.

Quota	Valore [mm]	Massa [kg]
$x_{PG_{SM}}$	186,53	30.7
$y_{PG_{SM}}$	373,47	00)/
$x_{PG_{NSM}}$	58,28	76.9
$y_{PG_{NSM}}$	46,60	, 0,5

Tabella 4-5 Posizione baricentro carrozzina da modello Solidworks, Fonte [18]



Figura 4-24 Baricentro masse sospese (sx) e masse non sospese (dx), Fonte [18]

Per trovare la posizione totale del baricentro del sistema "utente + carrozzina" in tutte le configurazioni delle due fasi finora descritte, si è proceduto in due modi diversi.

Per quanto riguarda l'informazione ottenuta da [19], si è ipotizza, per semplicità, che la posizione del baricentro della carrozzina si sposti lungo la direzione orizzontale, durante le due fasi e rispetto al punto P, in funzione dell'angolo del telaio PC (θ_{PC}).

Per quanto riguarda, invece, le informazioni ottenute da [18], si ipotizza che solo le masse non sospese si muovano rispetto a P seguendo l'angolo θ_{PC} , mentre quelle sospese si muovono in base alla variazione sia di θ_{PC} che di β .

Le posizioni dei baricentri quando la carrozzina si trova nella posizione di inizio salita sono riportate nella Figura 4-25. I baricentri sono facilmente distinguibili in quanto quello che si ottiene dalle informazioni in [18] è denominato con dei pedici "s" nella legenda, mentre quello che si ottiene dalle informazioni riportate in [19] è evidenziato con degli asterischi. Logica di controllo sequenze automatiche



Configurazione iniziale salita controllata scalino

Figura 4-25 Configurazione iniziale salita gradino - Baricentri

La proiezione del baricentro totale del sistema "sedia + utente" (G_{TOT} e $G_{TOT}s$ nella figura qui sopra) permette di conoscere i margini di stabilità della carrozzina durante le due fasi di controllo. Nella Prima fase tale proiezione dovrà stare tra le ruote pivotanti e la prima ruota a contatto con il gradino da superare, mentre nella seconda fase tra le pivotanti e la ruota a contatto con il piano superiore.

I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 4-26. Vengono riportati i margini di stabilità ϵ in funzione dell'angolo di rotazione del portatreno $\Delta \theta_P$.

Con ϵ_w si indica la distanza orizzontale tra il baricentro totale e la ruota del tripode in appoggio in quella fase (W_1 nella prima fase e W_2 nella seconda fase).

Con ϵ_U , invece, si indica la distanza orizzontale tra il baricentro totale e le ruote pivotanti.

Anche in questo caso si riportano sia i risultati ottenuti da [18] che da [19].

Come si può notare, le due approssimazioni portano a risultati molto simili. Inoltre, i margini di stabilità non si azzerano e non diventano negativi. Ciò vuol dire che la sedia non rischia il ribaltamento con questo sistema di controllo.

Una nota interessante riguarda il valore finale del margine di stabilità della seconda fase ϵ_w (riga gialla e puntini rossi). Il valore di ϵ_w in quella configurazione vale circa 270*mm*: questo valore risulta inferiore alla distanza tra i centri di due ruote del tripode. Tale distanza, infatti, vale: $2 \cdot l_{PW} \cdot \cos(30^\circ) = 277,13mm$. Questo suggerisce che al termine di queste due

fasi il baricentro totale, anche nella realtà, si trovi già all'interno dell'area di appoggio delle sole ruote del tripode (a patto che ci sia un passeggiero a bordo di Wheelchair.q).

Sarà comunque ancora necessario avanzare il baricentro totale della carrozzina agendo sugli azionamenti per aumentare l'angolo θ_{PC} . È, però, necessario conoscere il peso e la posizione del baricentro dell'utente presente sulla carrozzina per definire l'angolo ottimale di PC per avere un margine di stabilità sicuro: questa necessità giustifica lo studio riportato nel Capitolo 5.



Figura 4-26 Margini stabilità, fasi Prima e Seconda

4.1.7 Raccordi delle velocità del tripode nella salita gradino

Per evitare accelerazioni e decelerazioni brusche da parte del tripode durante le due Fasi controllate, si è pesato di inserire delle cubiche di velocità per raccordare i passaggi a gradino di velocità di set del tripode.

In particolare, si ha la situazione riassunta nella Figura 4-27. La Prima fase viene coperta da un set di velocità al tripode costante e pari a $\dot{\theta}_P = \omega_1 = \omega_P^{1aF} = 0.4 [rad/s]$: viene preceduta da una fase in cui il tripode non ruota (la fase A0 di avvicinamento al gradino); si conclude con l'inizio della seconda fase a $\dot{\theta}_P = \omega_2 = \omega_P^{2aF} = 0.3 [rad/s]$. La Seconda fase, a

sua volta, si conclude con una velocità del tripode che deve essere pari a zero. Sono quindi presenti tre salti di velocità.



Figura 4-27 Tratti a velocità costante del tripode nelle due Fasi

La soluzione è stata quella di raccordare questi salti di velocità utilizzando tre cubiche, come riportato in Figura 4-28.

Le tre cubiche si sviluppano su tre archi di rotazione denominati $\Delta \theta_P^c(0 \rightarrow 1)$, $\Delta \theta_P^c(1 \rightarrow 2)$ e $\Delta \theta_P^c(2 \rightarrow 0)$.

I valori di angolo coperti dalle tre cubiche sono, per qualsiasi altezza di scalino:

- $\Delta \theta_P^c(0 \rightarrow 1) = 10^\circ;$
- $\Delta \theta_P^c(1 \rightarrow 2) = 10^\circ;$
- $\quad \Delta \theta_P^c(2 \to 0) = 5^\circ.$

Questo permette di utilizzare questi valori per tutti i tipi di gradino superabili da Wheelchair.q.

Le prime due cubiche si sviluppano all'inizio e alla fine della Prima fase. La terza nella Seconda fase. La scelta di sviluppare la seconda cubica completamente nella Prima fase è stata fatta sia per una semplicità di realizzazione del programma di controllo effettivo, sia, soprattutto, per arrivare all'inizio della seconda fase con la velocità massima ammissibile dagli azionamenti delle pivotanti e del sedile (secondo quanto discusso nel paragrafo precedente), ma non oltre. Se si entrasse nella seconda fase con una velocità del tripode troppo alta, sicuramente non si riuscirebbe ad avere una velocità sufficiente dai due azionamenti di θ_{DU} e β per soddisfare il controllo in posizione e assetto del sedile.



Figura 4-28 Raccordi tratti a velocità costante del tripode nelle due Fasi

Una cubica ha forma:

$$y(x) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$$

e necessita, quindi, di quattro condizioni al contorno per essere definita.

La sua derivata è:

$$\dot{y}(x) = 3 \cdot a_3 \cdot x^2 + 2 \cdot a_2 \cdot x + a_1$$

Nel caso specifico: $y(x) = \dot{\theta}_P(\Delta \theta_P) = \omega_P(\Delta \theta_P)$, ovvero la velocità di rotazione del tripode è funzione dell'angolo di rotazione della Fase in cui la carrozzina si trova.

Le quattro condizioni al contorno si ottengono a partire dalla conoscenza della velocità y(x) all'inizio e alla fine della singola cubica e dall'imposizione di tangenza orizzontale all'inizio e alla fine (accelerazioni del tripode \dot{y} nulle).

Pertanto, per ciascuna cubica, si deve risolvere il seguente sistema a quattro equazioni e quattro incognite (a_3, a_2, a_1, a_0):

$$\begin{cases} y(x=0) = \omega_{inizio\ cubica} = \dot{\theta}_P(inizio) \\ y(x=\Delta\theta_P^c(fine\ cubica)) = \omega_{fine\ cubica} = \dot{\theta}_P(fine) \\ \dot{y}(x=0) = 0 \\ \dot{y}(x=\Delta\theta_P^c(fine\ cubica)) = 0 \end{cases}$$

Per la prima cubica si ottiene:

Logica di controllo sequenze automatiche

$$\begin{cases} a_0 = 0\\ a_1 = 0\\ a_2 = 3 \cdot \frac{\omega_1}{\left(\Delta \theta_P^c(0 \to 1)\right)^2}\\ a_3 = -2 \cdot \frac{\omega_1}{\left(\Delta \theta_P^c(0 \to 1)\right)^3} \end{cases}$$

Per la seconda cubica si ottiene:

$$\begin{cases} a_0 = \omega_1 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = 3 \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{\left(\Delta \theta_P^c (1 \to 2)\right)^2} \\ a_3 = -2 \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{\left(\Delta \theta_P^c (1 \to 2)\right)^3} \end{cases}$$

Infine, per la terza cubica si ottiene:

$$\begin{cases} a_0 = \omega_2 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = -3 \cdot \frac{\omega_2}{\left(\Delta \theta_P^c(2 \to 0)\right)^2} \\ a_3 = 2 \cdot \frac{\omega_2}{\left(\Delta \theta_P^c(2 \to 0)\right)^3} \end{cases}$$

Queste equazioni sono da implementare in una *Matlab function* nel controllore Speedgoat e, una volta estratti i valori delle quattro costanti, mandati in input al controllore del tripode/portatreno. Gli altri attuatori (pivotanti e telaio RC dell'assetto della sedia) seguiranno il moto con il loro sistema di controllo.

4.1.8 Altro sistema di controllo in salita

Di seguito si descrive brevemente un primo sistema di controllo ideato per far salire la carrozzina lungo un'unica retta, invece di farla salire, come fino a qui descritto, lungo le due rette inclinate di α_1 e α_2 .

È importante sottolineare che questa idea è stata abbandonata in quanto presenta diversi svantaggi. Si riporta solo per completezza.

L'idea di base per questo sistema di controllo è quella che, partendo da una qualsiasi configurazione di avvicinamento al gradino, si possa far salire la carrozzina lungo una traiettoria rettilinea inclinata di un unico angolo α_s^n .

Con riferimento alla Figura 4-29, la traiettoria che il punto C dovrebbe percorrere è quella evidenziata in nero e che inizia in C_0 . Anche in questo caso, la traiettoria che la carrozzina

seguirebbe con il sistema di controllo fino a prima d'ora in uso è evidenziata in arancione e presenterebbe due archi di circonferenza.

Anche questo caso prevede la separazione in due fasi (Prima e Seconda) necessarie per il calcolo di h_P e conseguentemente di h_{PC} , ma diversamente dall'altro sistema di controllo prevede che la quota h_{CW} sia la stessa per le due fasi ($h_{CW1} = h_{CW2}$).

 h_{CW} può essere calcolata a partire dalle condizioni iniziali della sedia quando approccia il gradino, oppure può essere settata in base ad altri parametri (stabilità e altezza del gradino da superare ad esempio). Non è stato approfondito questo aspetto in quanto questo sistema di controllo è stato abbandonato.

Una volta definito h_{CW} è possibile scrivere per la Prima fase le seguenti relazioni:

$$h_{CW1} = h_{PC} + h_P = cost$$

costante definibile secondo quanto scritto prima.

Inoltre, h_P è scrivibile come:

$$h_P = h_P(\Delta \theta'_P) = l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0 + \alpha_s^n + \Delta \theta'_P)$$

Da qui si può ricavare h_{PC} che è definibile in due modi:

$$h_{PC} = h_{CW1} - h_P = l_{PC} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_s^n)$$

Dalla seconda definizione si ha che:

$$\theta_{PC} = sen^{-1} \left(\frac{h_{PC}}{l_{PC}} \right) - \alpha_s^n$$

E l'altezza del punto D è definibile nei seguenti due modi:

$$\begin{cases} h_D^{verticale} = r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \alpha_0 + \Delta\theta'_P) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) \\ h_D^{verticale} = r_U + l_{DU} \cdot sen(\theta_{DU} - (\theta_{PC} + \alpha_{PD})) \end{cases}$$

Dalla seconda definizione si ottiene:

$$\theta_{DU} = \theta_{DU}^{SET} = sen^{-1} \left(\frac{h_D^{verticale} - r_U}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD}$$

Anche in questo caso l'inclinazione $\beta = \beta^{SET}$ è definita dalla variazione di inclinazione del telaio PC ($\theta_{PC} - \theta_{PC}^0$, con θ_{PC}^0 che è l'angolo di θ_{PC} quando la sedia inizia il moto attorno al gradino, cioè del momento in cui inizia la fase di controllo traiettoria e assetto sedile).

Infine, per la Seconda fase le equazioni rimangono le stesse a parte le seguenti.

La definizione di h_P che diventa:

$$h_P = h_P(\Delta \theta_P^{\prime\prime}) = l_{PW} \cdot sen(30^\circ + \Delta \theta_P^{\prime\prime})$$

in cui $\Delta \theta_P^{\prime\prime}$ riparte da zero al passaggio alla seconda fase.

E la prima definizione di $h_D^{verticale}$ che diventa:



Figura 4-29 Schema sistema di controllo alternativo salita gradino

Il risultato che si ottiene simulando questo sistema di controllo tramite uno script Matlab è riportato in Figura 4-30, Figura 4-31 e Figura 4-32. Le condizioni in cui la carrozzina si trova ad affrontare il gradino nelle immagini della simulazione sono: posizione di approccio al gradino in configurazione di marcia in piano; altezza del gradino ($h_{gradino}$) di 110*mm*.

Come si può vedere, effettivamente il punto C si muove lungo la retta inclinata di α_s^n , ma non sono ben definiti a priori i limiti di movimento della sua traiettoria. Infatti, nella Prima fase il punto C viene portato "molto" in alto e nella Seconda fase viene riportato più in basso. Già per questo motivo è un controllo che non è applicabile: non trasmetterebbe una sensazione di sicurezza all'utente che si sentirebbe arretrare.

Un altro svantaggio di questo controllo deriva dal fatto che se la carrozzina parte dalla configurazione di marcia in piano e da questa configurazione viene calcolata la h_{CW} , si ottiene che la carrozzina non riesce a salire gradini più alti di 117*mm*. Questo limite non è

accettabile, in quanto la carrozzina è stata progettata per superare gradini più alti (fino a 213*mm* con il prototipo Wheelchair.q).

Un aumento dell'altezza del gradino superabile con questo sistema di controllo è possibile diminuendo la quota h_{CW} direttamente all'inizio della fase di controllo della traiettoria. Ciò significa, in pratica, abbassare la sedia diminuendo l'angolo di inclinazione del sotto-telaio PC (θ_{PC}) lavorando cioè su θ_{DU} e θ_P . Si guadagnano alcuni millimetri di altezza del gradino superabile, ma non si arriva a poter superare gradini alti 213*mm*.

Il problema risiede nel valore che h_{PC} assume al passaggio dalla Prima alla Seconda fase. In quella configurazione, infatti, h_P scende ad un valore molto basso e h_{PC} deve compensare quello che manca per arrivare, come somma $h_P + h_{PC}$, ad h_{CW} . Questa compensazione deve essere fatta sfruttando il telaio PC. Il telaio PC ha lunghezza limitata e il massimo che può arrivare a fare è posizionarsi in direzione perpendicolare alla retta inclinata di α_s^n . La massima dimensione che h_{PC} può assumere nelle Fasi è proprio la lunghezza del telaio PC (l_{PC}) . È questo che limita l'altezza massima del gradino superabile.



Configurazioni salita controllata scalino PRIMA FASE

Figura 4-30 Configurazioni salita controllata scalino Prima Fase – lungo α_s^n



Configurazioni salita controllata scalino SECONDA FASE

Figura 4-31 Configurazioni salita controllata scalino Seconda Fase – lungo α_s^n



Figura 4-32 Configurazioni salita controllata scalino Prima e Seconda Fase – lungo α_s^n

Per questi motivi tale sistema di controllo è stato abbandonato in favore di quello presentato nei paragrafi precedenti.

4.2 Discesa singolo gradino

In questo capitolo si descrive il sistema di controllo ideato per controllare la traiettoria e l'assetto della sedia della carrozzina nella discesa di un singolo gradino. La logica è simile a quella descritta per la salita del singolo gradino. Si lavora ragionando sul sistema di controllo implementato in [18] e, in particolare, sulla fase D4 della discesa. Si riporta in Figura 4-33 tale fase.



Figura 4-33 Fase D4 – discesa tripode da gradino – Fonte immagine [18]

Con l'attuale sistema di controllo non viene controllata né la traiettoria del punto C, né l'assetto del sedile (il suo beccheggio) e neanche l'angolazione del telaio PC a cui è vincolato. Gli arti di Wheelchair.q si muovono autonomamente nella fase D4 da un angolo iniziale ad un altro di set.

Teoricamente, anche in questo caso, la traiettoria che segue il punto C è un arco di circonferenza attorno alla ruota che rimane in appoggio sul gradino. Uno schema è riportato nella Figura 4-34. La traiettoria ad arco è riportata in arancione, mentre quella rettilinea e controllata va da C a C' ed è rappresentata in verde scuro.

Quello che si vuole fare, anche in questo caso, è rendere la traiettoria del punto C rettilinea e di imporre un angolo assoluto di assetto del sedile costante controllando con continuità rispettivamente gli angoli di set θ_{DU}^{SET} e β^{SET} .

Un altro beneficio nell'adottare questa traiettoria risiede nel fatto che aiuta a mantenere il baricentro totale della sedia e dell'utente più arretrato rispetto alla traiettoria ad arco di circonferenza. Similmente a quanto spiegato per la salita del singolo gradino, tale caratteristica è importante perché il margine di stabilità riferito alla ruota W_1 si assottiglia durante questa "rotazione del tripode attorno al gradino". La ruota W_1 , infatti, rimane ferma dov'è durante la rotazione del tripode, mentre il baricentro totale avanza in direzione del piano sottostante lo scalino. Con questo sistema di controllo, però, l'avanzamento è minore

che con la traiettoria ad arco di circonferenza. Questo permette di mantenere tale margine di stabilità maggiore per più tempo e fino a quando la ruota W_2 non si trova a contatto con il piano sottostante. Nell'istante in cui la ruota W_2 tocca il piano inferiore, di fatto, il margine di stabilità aumenta immediatamente in quanto il margine di stabilità "anteriore" può essere riferito alla ruota con centro W'_2 .

Una volta finita questa fase con il nuovo sistema di controllo, la carrozzina si troverà già nelle condizioni che il sistema di controllo descritto in [18] si aspetta e non ci saranno ritardi nell'esecuzione del resto del controllo a causa di riposizionamenti degli arti della sedia per riportarsi nelle condizioni volute dal controllore per continuare.



Figura 4-34 Controllo discesa gradino - traiettoria e assetto

C'è un'ultima osservazione da fare prima di procedere con l'esplicitazione delle relazioni matematiche/geometriche che permettono di ottenere questa traiettoria. La distanza dal bordo del gradino alla quale si deve trovare la carrozzina è funzione dell'altezza del gradino stesso. In particolare, è utile definire la massima distanza alla quale si può posizionare la ruota W_1 dal bordo del gradino (*T*). Facendo riferimento alla Figura 4-35 questa distanza non può essere maggiore di:

$$\overline{TW_1}_{max} = \sqrt{3} \cdot l_{PW} \cdot \cos(\alpha_s^n) - r_W$$

Come si può vedere, tale distanza è funzione dell'altezza del gradino da superare ($h_{gradino}$ si trova all'interno di α_s^n). Se la tale distanza fosse maggiore di questo valore la rotazione del tripode non potrebbe essere completa a meno di far avanzare le solari durante la fase.



Figura 4-35 Massima distanza del tripode dal bordo del gradino per la discesa

Per quanto riguarda le seguenti relazioni che permettono di ottenere questa traiettoria del punto C si faccia riferimento alla Figura 4-36.

L'angolo di discesa α_1 si può calcolare nel seguente modo:

$$\alpha_{1} = tg^{-1} \left(\frac{sen(30^{\circ} + \alpha_{0} - \alpha_{s}^{n}) - sen(30^{\circ} + \alpha_{0})}{cos(30^{\circ} + \alpha_{0} - \alpha_{s}^{n}) - cos(30^{\circ} + \alpha_{0})} \right)$$

Anche in questo caso è necessario imporre che una quota rimanga costante. Per la discesa gradino è la quota h_{CW_1} .

Si può pertanto scrivere:

$$h_{CW_1} = h_{CP^*} - h_{P^*} = costante$$

Questa costante viene calcolata a partire dalla configurazione di inizio rotazione del tripode attorno al gradino (inizio della fase D4):

$$h_{CW_1} = l_{PC} \cdot sen(\alpha_1 - \theta_{PC}^0) - l_{PC} \cdot (150^\circ - \alpha_1 - \alpha_0) = cost$$

dove θ_{PC}^0 è l'angolo di inclinazione del telaio PC all'inizio della fase controllata D4. Per il calcolo di θ_{PC}^0 e di α_0 si rimanda al paragrafo 4.1.3. Il metodo da utilizzare è identico.

La rotazione del tripode che serve per completare la fase vale:

$$\Delta \theta_P' = \alpha_s^n + \alpha_0$$

considerando α_0 definito come in Figura 4-36.

Si può scrivere h_{P^*} in funzione di $\Delta \theta_P$ come:

$$h_{P^*} = h_{P^*}(\Delta \theta_P) = l_{PW} \cdot sen(150^\circ - \alpha_1 - \alpha_0 + \Delta \theta_P)$$

In questo modo è possibile calcolare h_{CP^*} per qualsiasi angolo $\Delta \theta_P$:

$$h_{CP^*} = h_{CW_1} + h_{P^*}$$

 h_{CP^*} è anche calcolabile come:

$$h_{CP^*} = l_{PC} \cdot sen(\alpha_1 - \theta_{PC})$$

in cui θ_{PC} è l'inclinazione del telaio PC in una generica configurazione della sedia nella Fase. Da quest'ultima relazione si può ricavare θ_{PC} come:

$$\theta_{PC} = \alpha_1 - sen^{-1} \left(\frac{h_{CP^*}}{l_{PC}} \right)$$

Anche in questo caso si sceglie di scrivere l'altezza verticale assoluta del punto D in una generica configurazione della carrozzina come:

$$\begin{cases} h_D^{verticale} = r_W + l_{PW} \cdot \cos(30^\circ + \alpha_0 - \Delta\theta_P) + l_{PD} \cdot \cos(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) \\ h_D^{verticale} = r_U + l_{DU} \cdot sen(\theta_{DU} - (\theta_{PC} + \alpha_{PD})) \end{cases}$$

Dalla seconda definizione di $h_D^{verticale}$ si ricava θ_{DU}^{SET} come:

$$\theta_{DU}^{SET} = sen^{-1} \left(\frac{h_D^{verticale} - r_U}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD}$$

Anche qui l'assetto del sedile, ovvero il β^{SET} è dato dalla variazione dell'angolo θ_{PC} rispetto al valore di inizio fase θ_{PC}^0 , per cui:

$$\beta^{SET} = \beta^{SET}(\Delta \theta_P) = \beta_{InizioDiscesa} + (\theta_{PC} - \theta_{PC}^0)$$

 $\beta_{InizioDiscesa}$ è l'angolo di β con cui si vuole iniziare la discesa e determina l'arretramento del baricentro dell'utente. Se in futuro si vorrà implementare questo sistema di controllo, sarà necessario fare degli studi sul baricentro, sul campo di mobilità e sulla velocità di movimento di β (e anche di θ_{DU}) al pari di quanto fatto per la Salita gradino. Logica di controllo sequenze automatiche



Figura 4-36 Lunghezze ausiliarie utilizzate per relazioni angoli di SET – Discesa gradino

5 Studio sul baricentro e celle di carico

In questo Capitolo si discute dell'utilità di sensorizzare la sedia di Wheelchair.q con delle celle di carico per poter impostare degli angoli di set da far raggiungere agli arti della carrozzina nelle fasi A6 e D7 rispettivamente nella salita gradino e nella discesa gradino.

Queste due sottofasi prevedono che il baricentro totale del sistema "Wheelchair.q + utente" cada nell'area di stabilità creata dalle 4 ruote del tripode in appoggio sul pavimento. Infatti, in queste fasi e in particolare nelle fasi successive, le ruote pivotanti non offrono un punto di appoggio che permetta di avere un ampio margine di stabilità. Il problema è rappresentato in Figura 5-1: come si può vedere la distanza orizzontale tra W_1 e G_{tot} (margine di stabilità) è molto minore di quella tra U e G_{tot} prima che le pivotanti vengano sollevate ($\epsilon'_s < \epsilon_s$).



Figura 5-1 Margine di stabilità fasi delicate

La posizione del baricentro dell'utente e la sua massa influiscono molto sulla posizione di G_{tot} : il peso della carrozzina e dell'utente sono dello stesso ordine di grandezza e il baricentro dell'utente è generalmente più avanzato rispetto a quello della carrozzina.

Il baricentro dell'utente sposta in avanti quello totale e quindi aiuta a mantenere l'equilibrio sui tripodi.

Attualmente si lavora con la carrozzina scarica: questo comporta che per avere l'equilibrio della carrozzina sulle sole ruote del tripode è necessario inclinare molto il telaio PC aumentando molto l'angolo θ_{PC} . Per lo stesso motivo è anche necessario mantenere un'inclinazione assoluta della sedia negativa ($\beta < \theta_{PC}$).

Se si conoscesse la posizione del baricentro dell'utente si potrebbe rendere automatico il calcolo degli angoli di set da dare agli arti di Wheelchair.q nelle fasi A6 e D7.

Per quanto riguarda la posizione del baricentro della carrozzina, si è già affrontato parzialmente il discorso nel Paragrafo 734.1.6. La posizione del baricentro della carrozzina era stata ricavata attingendo a delle informazioni sulla posizione del baricentro di Wheelchair.q in [18] e [19] che avevano condotto due studi diversi: [19] aveva ottenuto una posizione sperimentale del baricentro totale della carrozzina posizionando quattro celle di carico sotto il prototipo reale di Wheelchair.q, mentre [18] aveva trovato la posizione del baricentro delle "masse sospese" e delle "masse non sospese" della carrozzina tramite l'utilizzo del software Solidworks e del modello di Wheelchair.q.

Per il seguente studio si fa riferimento ai risultati ottenuti in [19], ipotizzando che il baricentro totale della carrozzina sia concentrato in un unico punto e che questo si muova in funzione dell'angolo θ_{PC} . Questa semplificazione ci mette dalla parte della sicurezza rispetto ad usare i risultati di [18]: infatti, con riferimento alla Figura 4-26 del Paragrafo 4.1.6 riguardo i margini di stabilità, è possibile fare una considerazione riguardo la " ϵ_W della Seconda fase". Questo margine di stabilità è stato calcolato sia con i risultati di Seccareccia che con i risultati di Perez. Tale margine di stabilità è maggiore nel caso di Perez rispetto al caso di Seccareccia e questo vuol dire che il margine di stabilità riferito alla ruota W_1 (complementare a quello riferito alla ruota W_2) è minore nel caso di Perez rispetto al caso di Seccareccia. Se si riuscisse, quindi, a rendere sicura la posizione assunta dalla carrozzina con la semplificazione di Perez, si può essere sicuri che anche con Seccareccia riusciremmo a soddisfare un buon margine di stabilità.

Fatta questa scelta, si può passare allo studio della posizione del baricentro dell'utente.

5.1 Baricentro di un utente su carrozzina da Normativa ISO-7176-11

Come prima cosa si è condotta una ricerca sui manichini e le normative che regolano i test sulle sedie a rotelle. Esiste una normativa che tratta questo argomento: la normativa ISO-7176. In particolare, la sezione 11^a determina il tipo di manichino da utilizzare per testare la stabilità della carrozzina. Viene definita quindi la posizione del baricentro del manichino in funzione del suo peso. Per un manichino di 100kg la posizione del baricentro del torso, della testa e delle cosce (esclusi i polpacci e i piedi) ha coordinate:

Tabella 5-1 Posizione baricentro manichino 100kg -> torso + upper leg -> Normativa ISO-7176-11

x _{baric} [mm]	y _{baric} [mm]
204,0	271,6

Per quanto riguarda la posizione del baricentro totale del manichino si possono considerare i seguenti valori per manichini da 50kg a 125kg:

Massa [kg]	x ^{tot} _{baric} [mm]	y ^{tot} _{baric} [mm]
50	204	198
75	220	217
100	235	236
125	251	229

Tabella 5-2 Posizione baricentro totale manichini ISO-7176-11 - [21]

Le coordinate del baricentro sono definite come in Figura 5-2 e quindi sono riferibili al punto M di Wheelchair.q.



Figura 5-2 Coordinate baricentro utente/manichino

Si è pensato alla realizzazione di un manichino che soddisfi tali requisiti di posizione del baricentro. Per il suo disegno si è utilizzato il software Solidworks. Il risultato viene riportato nella Figura 5-3.

Questo manichino rispetta la normativa in quanto a posizione del baricentro e peso della parte di "upper body" (ovvero di torso + cosce) di un manichino da 100kg. È anche possibile, rimuovendo i blocchi 1 e 2, ottenere un manichino da 80kg che rispetti la normativa. È possibile aggiungere anche dei blocchi sulla pedana per i piedi di Wheelchair.q se si intende simulare l'intero manichino. La posizione del baricentro ed il peso del manchino nelle due configurazioni è ricavata da Solidworks.

Le zavorre rimovibili sono in acciaio, mentre la struttura (in colore più scuro) è in alluminio. Da normativa viene indicato di mettere dei pannelli di legno dietro lo schienale e sotto le "upper legs" (in figura sono rappresentati in marrone). Infine, i pannelli in legno devono essere ricoperti con una schiuma in poliuretano. In questo modo non si rovina la sedia e la distribuzione dei pesi sulla sedia è più realistica.



Figura 5-3 Manichino 80/100kg

La realizzazione di questo manichino non è stata portata avanti in quanto una ricerca sul possibile costo di realizzazione ha portato ad un prezzo dell'ordine delle miglia di euro. L'utilità del manichino, almeno per il momento, non giustificherebbe una tale spesa.

È stato comunque utile fare queste ricerche per avere un'idea di quali celle di carico scegliere per una eventuale sensorizzazione della sedia di Wheelchair.q: come si vedrà nel Paragrafo 5.3, saranno sufficienti celle di carico a compressione. L'utilità della ricerca risiede anche nel fatto che si sono potute fare alcune considerazioni in fase di realizzazione di questo lavoro di tesi: dal calcolo dei margini di stabilità durante il sistema di controllo proposto nel capitolo precedente, al controllo sui risultati ottenuti dell'equazione che permette di trovare l'angolo di inclinazione del telaio PC che permette di avere un margine di sicurezza nella fase delicata di appoggio sulle sole ruote del tripode (Paragrafo 5.3.5).

5.2 Posizione del baricentro utente da corrente assorbita da attuatore sedile

Per trovare la posizione del baricentro dell'utente, almeno lungo la direzione x_{RC} , una possibilità è quella di sfruttare la conoscenza della corrente assorbita dal motore dell'azionamento dell'assetto del sedile (dell'angolo β).

L'azionamento di β è demandato ad un motore elettrico rotativo vincolato al telaio RC. La variazione di β è possibile grazie ad un cavo che con una serie di leveraggi e pulegge permette il moto di beccheggio di RC. Il sistema è stato studiato in [19] e [20] per cui si rimanda a loro per maggiori informazioni sulla sua realizzazione.

Un'informazione importante da avere presente è che la coppia in uscita dal motoriduttore è proporzionale alla corrente assorbita dallo stesso. La caratteristica "coppia – corrente assorbita del motore" è riportata in Figura 5-4. La coppia in uscita dal motoriduttore è maggiore di quella diagrammata per via del rapporto di trasmissione del riduttore e si ottiene moltiplicando quei valori di coppia per una costante frutto del rapporto di trasmissione del riduttore stesso. Questo rapporto vale circa 95,45.

Più precisamente, la caratteristica "coppia – corrente" del motore della sedia ($C_{M,C}$) ha forma:

$$i_{M,C} = i(C = 0[Nm]) + C_{M,C} \cdot K_{M,C}$$

Dove:

- $i_{M,C}$ è la corrente assorbita dal motore;
- *i*(*C* = 0[*Nm*]) è la corrente assorbita dal motore con coppia esterna pari a 0 [*Nm*],
 ovvero la corrente a vuoto e vale 0,3*A*;
- $K_{M,C}$ è il "Costante di coppia" e vale circa 15,71 $\left|\frac{A}{N,m}\right|$.

Da questa equazione si può ricavare $C_{M,C}$ come:

$$C_{M,C} = \frac{\left(i_{M,C} - 0,3\right)}{K_{M,C}}$$

Dalla coppia erogata dal motore $C_{M,C}$ si può trovare quella in uscita dal motoriduttore $C_{MR,C}$:

$$C_{MR,C} = C_{M,C} \cdot 95,45$$

In Figura 5-5 la $C_{MR,C}$ è indicata in arancione e agisce sul punto M.



Figura 5-4 Caratteristica Coppia - corrente motore β , Fonte: [20]

Conoscere la coppia $C_{MR,C}$ (funzione di $i_{M,C}$ che è nota se si sensorizza tale motore), permette di conoscere la tensione F_2 a cui è sottoposto il cavo di azionamento. F_2 , a meno di perdite per attrito, è proporzionale a $C_{MR,C}$ secondo la relazione:

$$C_{MR,C} = F_2 \cdot \frac{d_M}{2}$$

dove d_M è il diametro della puleggia in M calettata sull'asse del motoriduttore stesso.

Uno schema del sistema è riportato nella Figura 5-5. Si riportano anche alcune quote con componente lungo x_{RC} . Con riferimento a tale figura si introducono:

- *G_{ut}* è il baricentro dell'utente;
- *G_{MS,C}* è il baricentro delle masse sospese della sedia (e di tutto l'hardware collegato al telaio RC);
- *G_{MS}* è il baricentro di tutte le masse sospese, ovvero dell'utente + della sedia;
- $x_{G,u}$ è la coordinata del baricentro dell'utente;
- $x_{G,MS,C}$ è la coordinata del baricentro delle masse sospese della sedia;
- $x_{G,MS}$ è la coordinata del baricentro delle masse sospese totali (utente + sedia);
- α_D grandezza geometrica fissa che vale 29,2°;
- α_F angolo funzione dell'inclinazione di RC rispetto a PC.

È possibile ottenere la posizione o l'entità del baricentro delle masse sospese di Wheelchair.q tramite una prova sperimentale a vuoto, ovvero senza utente, utilizzando il metodo di seguito proposto: in quel caso, infatti, il baricentro totale coinciderebbe con quello delle sole masse sospese di Wheelchair.q. La massa delle masse sospese della sedia si conosce grazie al software Solidworks e, come indicato in [18], vale 30,7*kg*.

Quello che si può calcolare è la posizione o l'entità (massa) del baricentro totale G_{MS} . Di seguito si esplicita il sistema di equazioni da risolvere per ottenere la coordinata di G_{MS} . Se si vuole poi ottenere la posizione del baricentro dell'utente basta utilizzare questa informazione e quella ottenuta dalla "prova a vuoto".

Si osservi che con questo sistema è possibile ottenere solo o la posizione del baricentro totale o il suo peso e non entrambi i valori: esistono infinite combinazioni di distanza e forza peso delle masse sospese che permetterebbero di ottenere quel momento sul punto C. Risulta più agevole conoscere da misurazioni esterne la massa dell'utente e ricavare di conseguenza la posizione di $G_{MS}(x_{G,MS})$.



Figura 5-5 Schema azionamento assetto sedile carrozzina e baricentri masse sospese

Per esplicitare le relazioni utili a trovare la posizione del baricentro dell'utente è necessario scomporre il gruppo di Figura 5-5 in tre sottosistemi. Da ora si userà il baricentro totale G_{MS} al fine di trovarne la sua posizione. Si effettuano delle semplificazioni sul raggio delle pulegge: si considerano aventi raggio nullo.

Le forze e i momenti agenti sui vari sottosistemi sono riportati in giallo.

Sottosistema RC:

Lo schema di corpo libero del sottosistema legato al telaio RC contenente tutte le masse sospese, inclusa quella dell'utente, è riportato in Figura 5-6.

Sul sottosistema RC si possono scrivere gli equilibri delle forze lungo le direzioni di traslazione orizzontale e verticale:

$$\rightarrow) R_{xC} - F_2 \cdot sen(\theta_1) = 0$$

$$\uparrow) R_{yC} + F_1 - F_2 \cdot \cos(\theta_1) - m_{MS} \cdot g = 0$$

È, inoltre, possibile scrivere l'equilibrio alla rotazione, ad esempio attorno al punto C:

 $C \mathrel{\triangleleft} F_1 \cdot l_{CF} \cdot \cos(\alpha_F) - F_2 \cdot \cos(\theta_1) \cdot l_{CM} - m_{MS} \cdot g \cdot \boldsymbol{x_{G,MS}} = 0$



Figura 5-6 Schema di corpo libero del "sottosistema RC"

In questo modo tutte le equazioni riferibili al sottosistema PC che servono per ottenere la posizione $x_{G,MS}$ sono definite.

Sottosistema PC:

Lo schema di corpo libero del sottosistema legato al sotto-telaio PC contenente tutte le "masse non sospese" (quelle della carrozzina) è riportato in Figura 5-7. Si introduce il "baricentro delle masse non sospese della sedia" $G_{MNS,C}$. Anche le caratteristiche di massa e di posizione di questo sistema sono ricavabili da Solidworks, come fatto in [18].

La coppia C_P applicata nel punto P in Figura 5-7 è la "reazione vincolare rotativa" che viene garantita sia dal freno del portatreno che dalle forze scambiate tra il telaio PC e le ruote pivotanti: infatti, le forze scambiate con le pivotanti possono essere riportate al punto P sommandole alle reazioni vincolari realmente scambiate nel punto P, più una componente di coppia di trasporto inserita, in questo caso, come componente in C_P .

Anche in questo caso è possibile scrivere le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale che risultano essere:

L'equilibrio alla rotazione attorno al punto $G_{MNS,C}$ è:

 $G_{MNS,C} \lor R_{yP} \cdot l_{P-MNS} - F_3 \cdot sen(\theta_2) \cdot l_{D-MNS} + R_{yC} \cdot x_{G,MNS,C} - C_P = 0$





Figura 5-7 Schema di corpo libero del "sottosistema PC"

Sottosistema corda:

Lo schema di corpo libero del sottosistema della corda è riportato in Figura 5-8.

Il legame tra le tre componenti di forza agenti sulla corda è:

$$F_1 = F_2 \cdot \cos(\theta_1) + F_3 \cdot sen(\theta_2)$$

 F_2 si conosce a partire dalla conoscenza della corrente assorbita dal motore di β secondo quanto descritto all'inizio di questo studio.

Gli angoli $\theta_1 \in \theta_2$ sono funzione dell'angolo β .



Figura 5-8 Schema di corpo libero del "sottosistema corda"

In questo modo si ottiene un sistema di 7 equazioni in 7 incognite $(F_1, F_2, R_{xC}, R_{yC}, R_{xP}, C_P, x_{G,MS})$.

Una volta trovata la coordinata del baricentro delle masse sospese totali, $x_{G,MS}$, si può risalire alla posizione del baricentro dell'utente.

Questo metodo di ricerca della posizione del baricentro dell'utente di Wheelchair.q, però presenta diverse limitazioni. È necessario conoscere a priori il peso dell'utente che non deve variare durante l'utilizzo della sedia, cioè, l'utente non può avere oggetti che ne modifichino il peso durante l'utilizzo. Non è un metodo molto preciso anche per via delle semplificazioni introdotte per le pulegge e per il calcolo dei baricentri di Wheelchair.q: sono stati ricavati da un modello Solidworks affetto da errore (soprattutto considerando la complessità del sistema). La corrente del motore che regola β è presente solo quando è richiesta una variazione di β stesso. Durante il normale utilizzo della sedia, ovvero quando β è fisso, il motore non è attivo e il mantenimento del valore di β è garantito dal freno del sedile. Quindi a meno di sbloccare i freni e fornire corrente per mantenere l'angolo della sedia costante, non è possibile ottenere una misurazione della corrente assorbita dal motore (in quanto sarebbe nulla).

Infine, questo metodo permette solo una stima della posizione orizzontale del baricentro dell'utente (lungo la direzione x_{RC}) e solo quando la sedia della carrozzina è in posizione orizzontale. Questo metodo non permette in alcun modo di conoscere le altre componenti spaziali della posizione di G_{ut} .

Per questi motivi non è stato portato avanti questo progetto di sensorizzazione e implementazione delle leggi per il calcolo della posizione del baricentro dell'utente.

5.3 Posizione del baricentro utente da celle di carico e inclinometro sedile

Un metodo più valido per conoscere le caratteristiche (peso e posizione tridimensionale) del baricentro dell'utente di Wheelchair.q è presentato di seguito.

Si è pensato di sensorizzare la sedia della carrozzina tramite l'utilizzo di celle di carico. Con l'aiuto delle informazioni in arrivo dall'inclinometro del sedile già installato a bordo della carrozzina è possibile ottenere tutte le informazioni sul baricentro dell'utente G_{ut} . Dato il poco spazio presente a bordo della carrozzina, si è pensato di utilizzare delle celle di carico a "donut" o a "foro passante" (through hole) da posizionare nei quattro punti di contatto tra la sedia e il sotto-telaio RC. Un altro motivo per cui è bene utilizzare le celle di carico a donut è che questo tipo di celle è molto sottile se paragonato ad altre tipologie: è una caratteristica apprezzabile visto che la seduta di Wheelchair.q è già abbastanza alta. Infine, queste celle di carico risentono meno degli effetti di sforzo di taglio che si genera quando la sedia della carrozzina è inclinata all'indietro.

La Figura 5-9 mostra lo schema adottato per collegare la sedia di Wheelchair.q al sottotelaio RC. A sinistra è presente lo schema utilizzato nei disegni fino ad ora, a destra è presente uno schema più realistico del sistema.

In blu è rappresentato il sotto-telaio RC, in verde il sistema che collega RC con la sedia: si tratta di un sistema simile ad una doppia balestra con due longheroni che corrono *longitudinalmente* lungo RC. Tra questi longheroni e la sedia sono presenti due piastre *trasversali* rappresentate lateralmente in rosso che sono poi quelle che realmente toccano la sedia.

L'idea è quella di montare le celle di carico tra i longheroni longitudinali (verdi) e le piastre trasversali (rosse). Attraverso quei quattro punti si scarica tutto il peso dell'utente e della sedia. Le celle di carico sono numerate da 1 a 4.

Come si può vedere nella Figura 5-9 attorno al punto R è rappresentata una freccia circolare che indica la possibilità della sedia di ruotare attorno a quel punto. È importante capire questo in quanto la Figura 5-10 riporta la situazione reale in cui la sedia viene fatta ruotare attorno alla cerniera in R per avere accesso ai quattro punti di contatto tra i longheroni e le piastre trasversali.



Figura 5-9 Schema di attacco della sedia di Wheelchair.q al sotto-telaio RC

La Figura 5-10 riporta una foto della zona di posizionamento delle celle di carico. Sono evidenziati: in blu in basso a sinistra il sotto-telaio RC, in verde i longheroni longitudinali, in azzurro le piastre trasversali realmente a contatto con la sedia, in rosso sono circolettate le viti che passerebbero attraverso le celle di carico. Le celle di carico rimarrebbero quindi schiacciate tra i longheroni longitudinali verdi e le piastre trasversali azzurre e sarebbero impacchettate grazie alle viti circolettate in rosso.



Figura 5-10 Dettaglio dei punti di attacco delle celle di carico

Le viti circolettate in rosso sono delle viti M6 che passerebbero attraverso le celle di carico a donut. Un esempio di cella di carico a donut è rappresentato in Figura 5-11. Si tratta di una cella della marca Vetek, modello 247W da 50kg ([22]). In questa applicazione si sceglie di usare una cella di carico con fondo scala di 50kg per essere sicuri di non uscire da questo limite su nessuna cella in nessuna configurazione di inclinazione del sedile e per avere una lettura quanto più possibile accurata della forza che schiaccia la cella. Generalmente, infatti, la più piccola variazione di forza misurabile da una cella di carico è proporzionale al carico massimo misurabile: perciò se scegliessimo una cella da 100kg, avremmo un salto discreto di forza misurabile pari al doppio di quello ottenuto con una cella da 50kg.

Il foro passante al centro di questa cella di carico è adatto a viti da 8mm, ma sarebbe possibile posizionare una boccola di adattamento con diametro interno da 6mm e diametro esterno da 8mm (Figura 5-12) in modo da poter usare le viti da 6mm attualmente montate sul prototipo. Sarebbe possibile realizzare questa boccola tramite una stampante 3D anche in materiale plastico, in quanto sarebbe sottoposta solo a piccoli sforzi. Un'alternativa potrebbe essere, invece, quella di allargare i fori passanti dei longheroni e delle piastre trasversali e farli passare da 6mm a 8mm utilizzando quindi direttamente delle viti da 8mm adatte per il tipo di cella di carico scelta.



Figura 5-11 Cella di carico a Donut, Vetek 247W, [22]



Figura 5-12 CAD della boccola per adattamento foro cella di carico

La zona di trasmissione del peso dell'utente e della sedia al sotto-telaio RC tramite le piastre trasversali e i longheroni è rappresentata prima della sensorizzazione in Figura 5-13.

Dall'alto su ogni cella grava mediamente un quarto del peso dell'utente e della sedia $(F_P/4)$. Da sotto, arriva la reazione vincolare R_V trasmessa dai longheroni longitudinali alle aste/piastre trasversali. Si è pensato di inserire esattamente lì in mezzo le celle di carico.



Figura 5-13 Zona di trasmissione del peso dell'utente prima della sensorizzazione

La Figura 5-14 mostra come verrebbe modificata la zona di trasmissione della forza peso dell'utente inserendo una cella di carico a donut (Vetek in questo caso).

La vite M6 continua a tenere insieme il sistema grazie a un dado. Tra la piastra/asta trasversale e la cella di carico si inserisce una rondella indurita (hardened washer 1 nella Figura 5-14). Tra la cella di carico e il longherone/asta longitudinale si inserisce un'altra rondella indurita. Le caratteristiche delle rondelle da utilizzare sono specificate dal venditore della cella di carico: servono per fare lavorare le superfici sensorizzate con ponti di wheatstone, in modo da fare scaricare tutto il peso sulle superfici che fanno flettere le zone delle celle di carico che ospitano i ponti.

Infine, in giallo è rappresentata la boccola cilindrica di adattamento del diametro del foro della cella di carico.

Questa configurazione alza l'altezza della seduta dell'utente di 10mm per la cella di carico, più alcuni millimetri per le rondelle: si arriva ad alzare l'altezza della seduta di circa 15/18mm.







La Figura 5-15 riporta un ingrandimento della disposizione di una cella di carico.



Figura 5-15 Zona di trasmissione del peso dell'utente dopo la sensorizzazione - ingrandimento

Si sceglie la configurazione con quattro celle di carico in quanto è più robusta della configurazione a tre celle: se il peso dell'utente si sposta molto a sinistra o a destra c'è il rischio di rompere la sedia visto il singolo punto di appoggio sull'anteriore o sul posteriore. Inoltre, la disposizione attuale di aggancio della sedia al telaio RC rende più semplice il montaggio di quattro celle di carico nei quattro punti di contatto: non è necessario apportare modifiche alla sedia. Le modifiche apportate alla sedia, inoltre, potrebbero essere non fattibili o non sicure per l'integrità della stessa e, conseguentemente, dell'utente. Infine, sensorizzando con tre celle di carico c'è il rischio di avere almeno una cella che lavora in

trazione. Questo tipo di celle (a donut), però, non è adatto a registrare sforzi di trazione. Sarebbe necessario usare altri tipi di celle meno compatte che alzerebbero maggiormente la posizione della sedia e sarebbero più costose per via della doppia funzione di trazione e compressione.

Con le quattro celle di carico scelte si possono ottenere letture più accurate.

Si passa ora ad analizzare come verrebbero utilizzati i dati provenienti dalle quattro celle di carico e dall'inclinometro del sedile per ottenere le caratteristiche del baricentro dell'utente e della sedia.

5.3.1 Lettura della posizione del baricentro dell'utente con sedia orizzontale: $\Delta \gamma = \Theta_M = 0$

Quando la sedia si trova in posizione orizzontale, ovvero quando l'angolo di inclinazione assoluta della sedia $\Delta \gamma = \Theta_M$ è pari a zero, si ha una situazione come quella riportata in Figura 5-16.

In blu sono riportate le dimensioni geometriche della sedia. Sono distanze utili per trovare la posizione del baricentro rispetto al sistema di riferimento $[X_{RC}, Y_{RC}, Z_{RC}]$ riportato in rosso.

In giallo sono riportate le forze che tengono in equilibrio il sistema sedia + utente. Si ripota anche lo schema dei telai PC e RC.

In questa condizione la somma dei valori riportati dalle quattro celle di carico è pari al peso dell'utente e della sedia. Da ora in avanti si considera il peso della sedia come facente parte del peso dell'utente. Si può pertanto scrivere l'equilibrio alla traslazione verticale:

 $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - F_p = 0$

 R_1 , R_2 , R_3 *ed* R_4 sono le forze misurate dalle celle di carico.
Studio sul baricentro e celle di carico



Figura 5-16 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale

Le proiezioni dello schema di Figura 5-16 sui piani $[X_{RC}, Z_{RC}]$, $[X_{RC}, Y_{RC}]$ e $[Y_{RC}, Z_{RC}]$ sono riportate in Figura 5-17, Figura 5-18 e Figura 5-19.

Da queste proiezioni è possibile scrivere i seguenti equilibri alla rotazione:

Piano
$$[X_{RC}, Y_{RC}]$$
:
3,4): $(R_1 + R_2) \cdot L_1 - F_p \cdot (X_G - L_4) = 0$
1,2): $(R_3 + R_4) \cdot L_1 - F_p \cdot (L_1 + L_4 - X_G) = 0$

Piano
$$[Y_{RC}, Z_{RC}]$$
:
1,4): $(R_2 + R_3) \cdot L_2 - F_p \cdot Z_G = 0$
2,3): $(R_1 + R_4) \cdot L_2 - F_p \cdot (L_2 + L_5 - Z_G) = 0$

Da queste equazioni si ricavano le coordinate X_G e Z_G del baricentro. Solo una equazione per ogni piano è necessaria a trovare le coordinate del baricentro, ma per avere una misura più precisa possono essere usate entrambe e si può fare una media tra i valori ottenuti.

Queste sono le coordinate sul piano della sedia: non è, infatti, possibile ottenere la coordinata Y_G con queste informazioni e in questa configurazione.



Figura 5-17 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su $[X_{RC},Z_{RC}]$



Figura 5-18 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su $[X_{RC}, Y_{RC}]$



Figura 5-19 Celle di carico, situazione con sedia orizzontale, proiezione su $[Y_{RC}, Z_{RC}]$

Una volta che conosciamo le coordinate del baricentro dell'utente ricavate con la sedia posta in orizzontale rispetto al sistema di riferimento assoluto ($\Theta_M = 0$), possiamo utilizzare le informazioni ottenute dall'inclinometro e dalle celle di carico con la sedia inclinata di un angolo $\Theta_M \neq 0$.

5.3.2 Proiezione sull'orizzontale della distanza tra le celle di carico posteriori e il baricentro dell'utente con $\Delta \gamma = \Theta_M \neq 0$

Si passa ora allo studio del caso con sedia inclinata di un angolo assoluto diverso da zero $(\Theta_M = \Delta \gamma \neq 0).$

La Figura 5-20, rappresenta Wheelchair.q con particolare riferimento alla sedia in configurazione a seduta orizzontale e in configurazione inclinata. Gli apici "primi" sono riferiti alla configurazione inclinata della sedia.

La distanza orizzontale tra la coppia di celle posteriori (3 e 4) e il baricentro dell'utente G_{ut} viene chiamata $\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)$ e, per brevità, viene indicata nel seguito solo come $\Delta x_{1/ut}$ se non diversamente specificato. La stessa notazione vale anche per la distanza orizzontale tra le celle anteriori e posteriori che viene chiamata $\Delta x_{1/2}$.

 γ è l'angolo che la sedia ha rispetto al piano orizzontale assoluto ed è fornito dall'inclinometro già presente a bordo della carrozzina.

Con riferimento alla Figura 5-20 è possibile scrivere:

$$\begin{cases} R_{1}^{\perp} = R_{1}^{'} \cdot \cos\left(\Delta\gamma\right) \\ R_{2}^{\perp} = R_{2}^{'} \cdot \cos\left(\Delta\gamma\right) \\ R_{1}^{'} + R_{2}^{'} = m_{ut} \cdot g \end{cases}$$

Nello schema di corpo libero della sedia, le forze $R'_1 e R'_2$ nascono per opporsi alla forza peso dell'utente e della sedia. Esse agiscono in direzione verticale. Queste due forze sono scomponibili ciascuna in una due forze perpendicolari al piano della sedia $(R_1^{\perp}, R_2^{\perp})$ che vengono misurate dalle celle di carico e da due componenti parallele al piano della sedia $(R_1^{//}, R_2^{//})$ che sono trasversali alla misurazione. Queste ultime sono fonte di disturbo, ma essendo piccole (perché $\Delta \gamma$ sarà piccolo) non dovrebbero dare luogo a sensibili errori nelle letture.

Si ricordi, quindi che:

$$R_1^{\perp} = R_3 + R_4$$
$$R_2^{\perp} = R_1 + R_2$$

in cui si vuole evidenziare che R_1 , R_2 , R_3 , R_4 sono le forze misurate dalle celle di carico.

Ancora con riferimento allo schema di corpo libero della sedia in Figura 5-20 si scrive l'equilibrio alla rotazione attorno alle celle posteriori (su cui agisce la forza R'_1):

1)
$$\equiv$$
 3,4): $m_{ut} \cdot g \cdot \Delta x_{1/ut} - R'_2 \cdot \Delta x_{1/2} = 0$

In questa equazione:

- *m_{ut}* è la massa dell'utente e si conosce dalla misurazione del peso del sistema "utente + sedia" con sedia posta in orizzontale;
- R'_2 viene calcolata dalle equazioni sopra riportate, partendo dalle misurazioni fatte con le celle di carico anteriori ($R'_2 = R_1 + R_2$);
- $\Delta x_{1/2}$ è la proiezione sull'orizzontale della lunghezza geometrica $l_{1/2} = L_1$ e si calcola come $\Delta x_{1/2} = l_{1/2} \cdot \cos(\Delta \gamma)$.

Di quest'ultimo equilibrio alla rotazione conosciamo tutto e possiamo quindi calcolare la distanza $\Delta x_{1/ut}$ come:

$$\Delta x_{1/ut} = \frac{R'_2 \cdot \Delta x_{1/2}}{m_{ut} \cdot g} = \frac{\frac{R_2^{\perp}}{\cos(\Delta \gamma)} \cdot l_{1/2} \cdot \cos(\Delta \gamma)}{m_{ut} \cdot g} = \frac{R_2^{\perp} \cdot l_{1/2}}{m_{ut} \cdot g} = \Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)$$

Come si può vedere l'angolo $\Delta \gamma$ non compare direttamente nell'ultima forma dell'equazione, ma è nascosta dentro R_2^{\perp} : più $\Delta \gamma$ è grande, più R_2^{\perp} è piccolo, mentre la componente tangenziale $R_2^{\prime\prime}$ è grande.



Figura 5-20 Distanza orizzontale tra celle di carico posteriori e baricentro utente - sedia inclinata

La distanza $\Delta x_{1/ut} = \Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)$, come viene mostrato di seguito, è utile a calcolare l'altezza del baricentro dell'utente.

5.3.3 Calcolo dell'altezza del baricentro con peso spostato sulle sole celle posteriori

In questo paragrafo si studia come è possibile ottenere l'altezza del baricentro dell'utente h_{ut} quando la sedia è molto inclinata all'indietro, tanto da scaricare completamente le celle anteriori dal peso dell'utente. Analiticamente questo coincide con l'azzeramento della distanza $\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)$. Con riferimento alla Figura 5-21, la distanza che si vuole azzerare è la $\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)$ in verde in alto.



Figura 5-21 Inclinazione sedia per calcolo dell'altezza del baricentro dell'utente

La Figura 5-22 riporta uno schema della situazione limite che si vuole raggiungere per trovare l'altezza dell'utente (h_{ut}). In particolare, tale figura riporta la zona delimitata dal baricentro dell'utente, dalle celle posteriori (punto in basso a sinistra cu cui agisce la forza R'_1) e dal punto appartenente alla sedia proiezione ortogonale al piano della sedia del baricentro dell'utente (in basso a destra). Il tratto inclinato in basso e lungo $\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma = 0)$, si mantiene costante in lunghezza durante la rotazione: è come se fosse un corpo rigido. Per questo motivo lo conosciamo. L'inclinazione della sedia $\Delta \gamma$ la conosciamo dall'inclinometro sedile (su Speedgoat è un segnale denominato θ_M) e non è un valore casuale, ma la riconosciamo quando le celle di carico anteriori vengono scaricate completamente ($\Delta \gamma_{limite}$).

Per questi motivi possiamo scrivere l, lunghezza ausiliaria in rosso, come:

$$l = \Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma = 0) \cdot sen(90^{\circ} - \Delta \gamma_{limite})$$

Da *l* possiamo calcolare h_{ut} come:

$$h_{ut} = \frac{l}{\cos(90^\circ - \Delta\gamma_{limite})} = \Delta x_{1/ut} (\Delta\gamma = 0) \cdot tg(90^\circ - \Delta\gamma_{limite})$$



Figura 5-22 Inclinazione sedia, caso limite con peso dell'utente completamente sulle celle posteriori

Questo metodo permette quindi di calcolare l'altezza del baricentro dell'utente. Siccome, però, probabilmente non è possibile raggiungere una tale inclinazione della sedia vista la limitata mobilità di β , e comunque sarebbe una configurazione non confortevole per l'utente, è possibile utilizzare un altro metodo per calcolare h_{ut} .

5.3.4 Calcolo dell'altezza del baricentro dell'utente con inclinazione qualsiasi della sedia

Si faccia riferimento alla Figura 5-23. Vogliamo trovare h_{ut} con un qualsiasi angolo di inclinazione $\Delta \gamma \neq 0$. In verde sono rappresentate le due distanze $\Delta x_{1/ut}(\Delta \gamma = 0)$ e $\Delta x_{1/ut}(\Delta \gamma \neq 0)$ che conosciamo utilizzando i metodi prima descritti. $\Delta \gamma$ lo conosciamo dall'inclinometro del sedile. La distanza ΔX , invece, non la conosciamo, ma può essere utilizzata per trovare h_{ut} . ΔX è la distanza tra due punti sul sedile: il primo punto è individuato dalla proiezione di G_{ut} lungo la direzione ortogonale al piano della sedia inclinata; il secondo punto è definito dalla proiezione verticale di G_{ut} sulla sedia. il suo valore varia in funzione dell'angolo $\Delta \gamma$.

Pertanto, possiamo scrivere:

$$\Delta X = \Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma = 0) - \frac{\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma \neq 0)}{\cos (\Delta \gamma)}$$

Da cui, con riferimento al triangolo sotto G'_{ut} , si trova h_{ut} :

$$h_{ut} = \frac{\Delta X}{sen(\Delta \gamma)} \cdot \cos(\Delta \gamma) = \frac{\Delta X}{tg(\Delta \gamma)}$$



Questa è l'altezza del baricentro dell'utente perpendicolare al piano della sedia.

Figura 5-23 Schema per calcolare l'altezza del baricentro dell'utente

Nelle sequenze automatiche di salita gradino e di discesa gradino, si considererà il valore h_{ut} come costante in quanto, effettivamente, l'utente può avanzare o arretrare sulla sedia modificando quindi la coordinata x del baricentro di una quantità sensibile, mentre l'altezza h_{ut} del baricentro rimarrà pressoché costante.

5.3.5 Sfruttare la conoscenza del baricentro dell'utente nelle fasi automatiche di salita e discesa gradino – inclinazione di sicurezza del telaio PC

Come anticipato, conoscere a posizione del baricentro dell'utente è particolarmente importante per le fasi naturalmente poco stabili della carrozzina. In particolare, nelle fasi in cui il baricentro totale della carrozzina e dell'utente deve cadere tra i punti di appoggio delle ruote del tripode.

Per la salita gradino, per arrivare ad una posizione quanto più possibile stabile, si parte dalla configurazione in cui termina la Seconda fase del sistema di controllo proposto nel paragrafo 4.1. La carrozzina si trova in una configurazione come quella riportata in Figura 5-24. La posizione del baricentro della carrozzina si trova conoscendo la posizione del suo baricentro in configurazione di marcia in piano (conosciuta sperimentalmente grazie a [19]) e legando il suo spostamento alla variazione di θ_{PC} , come se G_{carr} fosse un punto del telaio PC. Abbiamo visto che questa semplificazione ci pone dalla parte della sicurezza rispetto ad usare le informazioni sul baricentro della sedia ottenute da [18]. La posizione di G_{carr} è rappresentata in viola in coordinate polari rispetto al centro del portatreno P. Per le sue coordinate si faccia riferimento alla Tabella 4-4.

La posizione del baricentro dell'utente, invece, è ottenibile secondo quanto definito nei paragrafi precedenti.

Quello che si vuole fare, quindi, è spostare il la posizione della somma dei due baricentri tra le ruote del tripode e a una certa distanza di sicurezza (chiamato margine di sicurezza) dalla ruota posteriore (W_1 in Figura 5-24).



Figura 5-24 Configurazione di inizio per spostare il baricentro tra le ruote del tripode

La realizzazione di quanto detto è rappresentata in Figura 5-25. Il baricentro totale nella posizione finale di sicurezza è rappresentato in giallo. Il suo margine di sicurezza dalla ruota posteriore viene indicato con ϵ_s , in giallo.



Figura 5-25 Spostamento baricentro totale a margine di sicurezza

Avere una legge che permette, dato un qualsiasi utente, con massa qualsiasi e posizione del baricentro qualsiasi, di trovare una configurazione finale che rispetti un certo margine di sicurezza, permette di rendere generale il controllo e automatico il calcolo degli angoli di set che gli arti devono raggiungere in quella fase.

La configurazione finale è definita da un θ_{PC}^{finale} o di sicurezza (θ_{PC_s}) da raggiungere che si ottiene: attivando le pivotanti per raggiungere un θ_{DU} "di sicurezza"; dando una variazione di angolo al portatreno ($\Delta \theta_P$) al fine di mantenere il contatto di entrambe le ruote di ciascun tripode con il pavimento; un β da raggiungere per avere la sedia posizionata in orizzontale.

In realtà, vedremo che si potrebbe fare un controllo in continuo su questi tre azionamenti legandoli a θ_{PC} o a θ_{DU} in questa sottofase di riconfigurazione della carrozzina.

Prima, però, si definisce l'angolo di sicurezza che il telaio PC deve raggiungere (θ_{PC_s}).

Per definire tale angolo consideriamo lo schema di Figura 5-26. In questo schema è presente un ingrandimento del braccio del tripode PW_1 di Figura 5-25. Sono presenti anche i

baricentri dell'utente, della carrozzina e totale (somma dei due). Posta sotto il baricentro totale è presente la reazione vincolare totale data dai tripodi. Sono presenti anche le tre "distanze orizzontali" tra il punto P e i baricentri. Infine, si riporta anche il margine di sicurezza rispetto alla ruota W_1 .

Posso scrivere le seguenti relazioni, in cui tutte le componenti sono distanze orizzontali (per questo chiamate con il prefisso "x", o comunque proiezioni sull'orizzontale di lunghezze):

$$\begin{cases} x. P_{-}G_{tot} = l_{PW} \cdot \cos(30^{\circ}) - \epsilon_{s} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot l_{PW} - \epsilon_{s} \\ x. P_{-}ut = l_{PC} \cdot \cos(\theta_{PC}) - x. CM - x_{\overline{MG_{ut}}} \\ x. P_{-}carr = l_{PG_{tot}} \cdot \cos(\theta_{PC} + \alpha_{PG_{tot}}) \end{cases}$$

Con:

$$x_{\overline{MG_{ut}}} = l_{\overline{M1}} + x_{1G_{ut}}$$

Il margine di stabilità è imposto a piacere, ad esempio può valere: $\epsilon_s = 35 mm$. Abbiamo che:

- *x*. *CM* è la distanza orizzontale tra il punto C e il punto M (si veda la Figura 5-24);
- *l*_{M1} è la distanza orizzontale tra il punto M e le celle di carico posteriori sotto la sedia ("1");
- $x_{1G_{ut}}$ è la distanza sul piano della sedia tra la proiezione ortogonale al piano della sedia del baricentro. In pratica è quello che nei paragrafi precedenti abbiamo chiamato $\Delta x_{1/ut} (\Delta \gamma = 0)$. Viene però calcolato in modo diverso, a partire dalla conoscenza di h_{ut} , infatti si utilizza la formula inversa della definizione di h_{ut} del paragrafo 5.3.4.

x. *CM* e l_{M1} sono conosciute perché sono dimensioni reali della carrozzina. $x_{1G_{ut}}$ deriva dalle misurazioni fatte con le celle di carico elaborate secondo quanto sopra riportato. In particolare:

$$x_{1G_{ut}} = \frac{\Delta x_{1ut}(\Delta \gamma \neq 0)}{\cos{(\Delta \gamma)}} + h_{ut} \cdot tg(\Delta \gamma)$$

Un approfondimento riguardo quest'ultima equazione è riportato nel paragrafo 5.3.6.

Si può, quindi, scrivere l'equilibrio alla rotazione attorno a G_{tot} facendo riferimento alla Figura 5-26:

$$G_{tot}$$
: $m_{ut} \cdot (x.P_{dtot} - x.P_{ut}) - m_{carr} \cdot (x.P_{carr} - x.P_{dtot}) = 0$

Tale equazione è risolvibile numericamente in funzione di θ_{PC} in un intorno di $\theta_{PC_0} = 38^{\circ}$. È stato scritto uno script Matlab che risolve l'equazione utilizzando la funzione "*vpasolve*". Si ottengono valori raggiungibili dell'angolo θ_{PC_s} e degli arti di Wheelchair.q.



Figura 5-26 Schema per trovare angolo telaio PC di sicurezza

Come accennato sopra, è possibile calcolare l'angolo θ_{DU} che permette di raggiungere il θ_{PCs} . Imponendo che l'altezza assoluta del punto D sia "uguale" guardando la carrozzina da destra e da sinistra, per la salita gradino, si ha che:

$$\theta_{DU}^{SET} = sen^{-1} \left(\frac{h_{scalino} + r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) - r_U}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD}$$

Questo θ_{DU} può essere usato come angolo di arrivo della sottofase della macchina a stati se si mette $\theta_{PC} = \theta_{PC_{S'}}$ oppure un angolo di set "in continuo" se θ_{PC} varia con continuità, un po' come fatto con l'angolo $\Delta \theta_P$ nelle fasi prima e seconda discusse nel capitolo 4. θ_{PC} in ogni momento può essere calcolato in modo estremamente simile a quanto spiegato nel capitolo 4.

Un discorso simile è valido anche per $\Delta \theta_P$ e per β .

Per quanto riguarda β , questo deve essere pari a θ_{PC} in ogni momento se si vuole mantenere la sedia orizzontale (metodo consigliabile in questa fase).

Per quanto riguarda $\Delta \theta_P$, volendo mantenere le quattro ruote dei tripodi a contatto con il suolo, ad una rotazione del telaio PC attorno a P è necessario contrapporre una rotazione in senso contrario (antioraria se il telaio PC ruota in senso orario, cosa probabile) del tripode, pari allo stesso angolo.

Un discorso analogo è fattibile per la discesa gradino. L'angolo di sicurezza del telaio PC θ_{PC_S} si trova nello stesso esatto modo risolvendo numericamente la stessa equazione. Quello che cambia leggermente è l'ultimo calcolo di θ_{DU} che, partendo sempre dal calcolo dell'altezza assoluta del punto D sia da destra che da sinistra, diventa:

$$\theta_{DU}^{SET} = sen^{-1} \left(\frac{r_W + l_{PW} \cdot sen(30^\circ) + l_{PD} \cdot sen(\theta_{PC} + \alpha_{PD}) - r_U - h_{scalino}}{l_{DU}} \right) + \theta_{PC} + \alpha_{PD}$$

Per il calcolo di β e $\Delta \theta_P$ valgono gli stessi identici ragionamenti.

5.3.6 Approfondimento $su x_{1G_{ut}}$

Concentriamoci sul calcolo della distanza $x_{1G_{ut}}$: questa quota è rappresentata in verde nella Figura 5-27 in due configurazioni diverse di inclinazione della sedia. Sostanzialmente coincide con il Δx_{1ut} ($\Delta \gamma = 0$) definito nel paragrafo 5.3.1.



Figura 5-27 Definizione di $x_{1G_{ut}}$

Per conoscere la distanza $x_{1G_{ut}}$ appena prima di procedere con il calcolo del θ_{PCs} dovremmo, usciti dalla "Seconda fase" di rotazione del tripode attorno al gradino, portare la sedia della carrozzina in posizione orizzontale, fare la misurazione di $x_{1G_{ut}}$ e procedere con la fase di posizionamento della carrozzina in configurazione di sicurezza con le sole ruote del tripode come punti appoggio. L'azionamento di β , però, è abbastanza lento e, comunque, questa operazione richiede del tempo aggiuntivo per superare lo scalino.

Per evitare quindi questa sottofase di riconfigurazione per la misurazione, si può sfruttare la conoscenza del parametro h_{ut} . Ricordo che l'equazione che abbiamo scritto nel paragrafo precedente per trovare $x_{1G_{ut}}$ è la seguente:

$$x_{1G_{ut}} = \frac{\Delta x_{1ut}(\Delta \gamma \neq 0)}{\cos{(\Delta \gamma)}} + h_{ut} \cdot tg(\Delta \gamma)$$

In particolare, $\Delta x_{1ut} (\Delta \gamma \neq 0)$ si può calcolare nel momento in cui si esce dalla Seconda fase di rotazione del tripode attorno al gradino, come spiegato nel paragrafo 5.3.4.

 h_{ut} , invece, si può ritenere conosciuta dalle misurazioni fatte prima di iniziare la rotazione del tripode attorno al gradino (prima della Prima fase). Per il calcolo di h_{ut} serve: una misurazione con sedia orizzontale, ottenibile quando il lidar fa la misurazione (generalmente posizione di marcia in piano); una misurazione con sedia inclinata, ottenibile quando incliniamo la sedia per iniziare la fase di salita controllata di rotazione del tripode attorno al gradino. Entrambe le misurazioni sono spiegate nei paragrafi precedenti.

L'idea di prendere come già nota l'altezza h_{ut} del baricentro dell'utente quando usciamo dalle due fasi di rotazione del tripode attorno al gradino grazie a misurazioni fatte in precedenza, è realistica in quanto è possibile che l'utente si muova durante la fase di rotazione del tripode attorno al gradino, ma l'effetto che si potrebbe avere è uno spostamento in avanti o all'indietro del baricentro, mentre la sua altezza rimarrebbe circa costante. La distribuzione "verticale" del peso è circa quella e rimane realisticamente quella anche con piccoli movimenti dell'utente.

Siccome la sedia non parte da un'inclinazione orizzontale per raggiungere la posizione di sicurezza sui tripodi, per β è consigliabile un controllo non continuo, riferito all'angolo θ_{PC} (come suggerito nel paragrafo 5.3.5, e che invece si può fare per θ_{DU} e per $\Delta \theta_P$), ma solo di set da raggiungere entro la fine della sottofase.

5.3.7 Possibili migliorie da fare in futuro

Nonostante questo sistema di calcolo dell'angolo di θ_{PC_S} sia ritenibile come sicuro, si potrebbe migliorare la sicurezza della fase mappando come si sposta il baricentro totale della sedia in funzione degli angoli di movimentazione degli arti di Wheelchair.q. Sarebbe necessario posizionare delle celle di carico sotto i punti di appoggio di Wheelchair.q e far variare i suoi angoli acquisendo contemporaneamente i dati sul baricentro totale della carrozzina. Quello che si vorrebbe ottenere è un grafico a tre assi (quattro in realtà se si considera la coordinata del baricentro della sedia come un asse) con θ_{DU} , $\beta \in \Delta \theta_P$ come variabili. Ad ogni combinazione di queste tre variabili corrisponderebbe una coordinata orizzontale del baricentro della sedia (è questa che influisce sulla stabilità della sedia). Tale informazione, combinata con l'informazione ottenuta dalle celle di carico sul baricentro dell'utente, permetterebbe di conoscere in modo preciso la posizione orizzontale (lungo quello che abbiamo chiamato asse x fino ad ora) del baricentro totale.

Questa operazione, comunque, complicherebbe la trattazione e porterebbe non portare a grandi benefici.

6 Lavoro sul lidar e interfacciamento via seriale

In questo capitolo viene descritta la nuova configurazione di montaggio e di funzionamento del lidar. Diverse modifiche sono state apportate per migliorare la ricezione dei dati dal punto di vista della qualità dei punti ricevuti, della loro quantità (ridotta) e della loro elaborazione che ora avviene direttamente all'interno della scheda Teensy che sostituisce la scheda Arduino presente nella configurazione originale. Nei paragrafi seguenti si discute dei motivi che hanno spinto ad adottare questa nuova configurazione.

6.1 Funzionamento Lidar

Il lidar, riportato in Figura 6-2, è un sensore azionato da un motore in corrente continua che ruota su sé stesso a velocità costante. È dotato di un emettitore a luce infrarossa, quindi utilizzabile anche in assenza di luce, che girando scansiona il piano ortogonale all'asse di rotazione: in pratica scansiona un piano bidimensionale. Il raggio emesso dal lidar viene riflesso dalle superfici che incontra e re-inviato al lidar su cui è presente un fotosensore. Il tempo impiegato dal raggio riflesso per andare e tornare dall'oggetto riflettente è proporzionale alla distanza tra il lidar e la superficie riflettente.

Quello che viene fornito in uscita dal lidar è la distanza che c'è tra l'oggetto riflettente e la fonte emettitrice (il lidar stesso) ad un certo angolo di rotazione. L'angolo di rotazione del lidar è compreso tra 0° e 360° ed è proprio del sistema di riferimento interno al lidar. Il modello di lidar utilizzato in questo prototipo trasmette anche un valore relativo alla qualità del segnale. La qualità è massima per valori vicini a 10 e diminuisce allontanandosi da questo valore. Uno schema di funzionamento del lidar è riportato in Figura 6-1.



Figura 6-1 Funzionamento Lidar

Il modello di lidar utilizzato per Wheelchair.q è l'RPLIDAR A1 prodotto dalla SLAMTEC (Figura 6-2). È il modello da 12m di distanza misurabile.



Figura 6-2 RPLIDAR A1 – SLAMTEC

La frequenza di rotazione nominale del lidar è di 5.5Hz, aumentabile fino a 10Hz. Nella configurazione attuale il lidar ruota alla frequenza nominale. Il lidar, alla frequenza di rotazione nominale, è in grado di mandare in uscita alla scheda di ricezione (Arduino o Teensy) 1456 punti per ogni giro: infatti, la frequenza di acquisizione è di 8010 acquisizioni al secondo, ovvero, ad ogni acquisizione è dato un sample time di 0,125millisecondi. I dati riguardanti le performance del lidar sono riportati nella Figura 6-3.

Item	Unit	Min	Typical	Max	Comments
Distance Range	Meter(m)	TBD	A1M8-R4 and the belowing models A1M8-R5 0.15-12	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 6-3 Performance acquisizione RPLIDAR A1

I dati relativi all'alimentazione sono riportati in Figura 6-4. In particolare, si vede che il lidar (motore + emettitore) deve essere alimentato a 5V, con una corrente totale che va da 200mA circa a 1A circa. Questo consumo non tiene conto della richiesta di corrente del convertitore TTL/RS232 e della scheda Arduino (o Teensy).

Item	Unit	Min	Typical	Мах	Comments
Scanner system voltage	Volt (V)	4.9	5	5.5	If the voltage exceeds the max value, it may damage the core.
Scanner system voltage ripple	Millivolt(mV)		20	50	High ripple may cause the core working failure.
Scanner system start current	Milliampere (mA)	TBD	500	600	Underpower may cause the startup failure.
Scanner system	Milliampere (mA)	TBD	80	100	Sleep mode, 5V input
current		TBD	300	350	Work mode, 5V input
Motor system voltage	Volt (V)	5	5	10	Adjust voltage according to speed
Motor system current	Milliampere (mA)	TBD	100	TBD	5V input

Figura 6-4 Specifiche sull'alimentazione del Sistema Lidar

Due strumenti molto utili per vedere quello che viene estratto dalle acquisizioni del lidar sono:

- il modello Simulink "*Ricevitore_dati*" che permette di ricevere i punti inviati dalla scheda di acquisizione e di plottarli tramite la funzione Matlab "*Disegno_i_punti_dal_lidar*";
- il monitor seriale dell'IDE di Arduino.

6.1.1 Modello Simulink – Ricevitore dati

Il modello Simulink "*Ricevitore_dati*" è riportato in Figura 6-5 ed è descritto in modo esaustivo in [17]. Permette di ricevere sequenze di bit provenienti dalla scheda di acquisizione (Arduino o Teensy nel caso specifico) e di interpretarli come numeri. I numeri vengono salvati nella matrice "yout" inviata al Workspace di Matlab. La matrice "yout", con la configurazione attuale del modello "Ricevitore_dati", è composta da tre colonne e da un numero di righe variabile in base al tempo di simulazione del modello. Tale modello è stato utilizzato per vedere tutti i punti inviati dal lidar e per vedere i punti parzialmente elaborati dalla Teensy nelle fasi di sviluppo dello sketch di elaborazione dei dati direttamente sulla scheda Teensy. È possibile modificare leggermente i parametri dei blocchi per ricevere più o meno di tre dati a seconda della necessità.



Figura 6-5 Modello Simulink "Ricevitore_dati", Fonte [17]

6.2 Problemi della vecchia disposizione

La vecchia configurazione è mostrata in Figura 6-6. Il lidar era fissato ad una staffa bianca sottile tramite due viti M2.5. Veniva, e viene tutt'ora, attivato tramite l'apposito cavo a sette fili terminanti sulla scheda di alimentazione e gestione dei segnali. In particolare, nella vecchia disposizione veniva utilizzata una scheda Arduino Mega connessa tramite un cavo USB alla USB-1 di Speedgoat. Questo cavo forniva, attraverso Arduino Mega, alimentazione non solo alla scheda, ma anche al motore del lidar, all'emettitore del lidar e alla scheda di trasformazione TTL/RS232.



Figura 6-6 Vecchia disposizione lidar, Fonte [18]

Per la comunicazione, Arduino Mega era collegata a Speedgoat tramite una porta seriale RS232. Per il collegamento veniva, e viene tutt'ora, utilizzato un convertitore TTL/RS232 necessario per operare il passaggio di tensione tra i cavi provenienti da Arduino e la porta seriale di Speedgoat. La Figura 6-7 mostra in blu sulla destra il convertitore e sulla sinistra le porte USB di Speedgoat. Il cavo USB nero presente sulla sinistra dell'immagine è il cavo che era diretto ad Arduino, mentre ora, tramite un cavo simile, viene alimentata una scheda Teensy 3.2. È importante notare che le porte USB di Speedgoat non possono essere utilizzate per il passaggio di dati, ma solo per l'alimentazione.



Figura 6-7 Convertitore TTL/RS232 e porte USB Speedgoat

Generalmente una porta USB di un PC può erogare una corrente massima di 500mA ad una tensione di 5V. Con la vecchia configurazione il cavo USB di collegamento Arduino – Speedgoat doveva fornire alimentazione alla scheda Arduino, al motore del Lidar, all'emettitore del lidar e alla scheda di conversione TTL/RS232. Anche se dal punto di vista della tensione l'alimentazione poteva essere adatta, dal punto di vista della corrente erogata era sottodimensionata. Nonostante il sistema funzionasse, sicuramente veniva sottoalimentato.

Un altro aspetto migliorabile della configurazione originale riguarda l'impossibilità di accendere il lidar solo quando necessario. Questo portava ad avere il lidar sempre acceso e in rotazione, con consumi maggiori che se fosse in modalità di riposo.

Un problema che riguardava la staffa originale era la poca rigidità flessionale. Questo portava il lidar a scansionare un piano non perfettamente ortogonale al pavimento. In particolare, il risultato che si otteneva era che il lidar riprendeva le ruote del tripode, invece del pavimento sotto di sé. Un approfondimento riguardo questo problema è riportato nel paragrafo 6.4.

Un limite della scheda Arduino Mega riguarda la bassa capacità di calcolo e la bassa velocità di acquisizione dei dati rispetto alla richiesta di acquisizione dei dati inviati dal lidar. Per questo motivo i dati acquisiti risultavano molto numerosi e sporchi: come si vedrà nei prossimi capitoli, venivano registrati punti in aria e sottoterra e angoli maggiori di 360°. Per questo motivo, era necessario trasmettere e lavorare con una grande mole di dati (si lavorava con le coordinate polari di 5000 punti ottenuti dal lidar in circa 5 secondi di acquisizione).

Il poco spazio di archiviazione disponibile nella scheda Arduino Mega, inoltre, non permetteva il salvataggio e l'elaborazione dei dati provenienti dal lidar direttamente in loco (su Arduino), ma l'elaborazione dei dati era necessariamente fatta in una Matlab function del sistema di controllo di Speedgoat a valle del trasferimento via seriale dei dati relativi ai 5000 punti. Questa funzione Matlab è accuratamente descritta in [17].

6.3 Nuova disposizione lidar

La nuova disposizione del lidar è visibile in Figura 6-8. Il lidar è montato su una staffa nera molto più rigida di quella originale per evitare che fletta e oscilli per via del peso e della rotazione del lidar stesso. Riguardo le dimensioni esterne è molto simile a quella originale, ma le pareti sono spesse il doppio e sono presenti delle nervature e degli smussi a 45° per irrigidire ulteriormente la struttura. Il lidar è ancorato alla staffa grazie a viti M2.5 che sono più lunghe di quelle originarie. È presente, oltre al foro di aggancio della staffa al telaio PC tramite occhiello filettato, anche un secondo foro. Questo foro serve come riferimento per posizionare la staffa sempre nella stessa posizione e con la stessa angolazione. Se non fosse presente questo foro di riferimento il lidar si potrebbe trovare a lavorare male perché ruotato di qualche grado rispetto alla posizione con asse x orizzontale. Sarebbe necessario, ogni volta che viene smontato e rimontato, fare una taratura per correggere l'angolo letto dal lidar in posizione di marcia in piano della carrozzina: l'asse x del sistema di riferimento del lidar deve avere direzione orizzontale quando la carrozzina si trova in configurazione di marcia in piano. Il foro di riferimento è stato allargato per un errore di misurazione della distanza dal foro di fissaggio principale: perciò, per posizionare correttamente la staffa è necessario farla ruotare imperniata nel primo foro in senso orario fino ad arrivare in battuta con la testa della vite che fa da perno di riferimento. Inoltre, una delle due viti che fissano il lidar alla staffa è

un foro definito e fisso: quel punto non può avere errori di montaggio. L'altra vite, invece, va a mordere attraverso un'asola a forma di arco di circonferenza con centro la prima vite. Per posizionare correttamente la seconda vite, sono presenti dei segni nel punto di fissaggio corretto: la seconda vite dovrà mordere in quel punto. In realtà, le viti presenti sulla staffa non mordono mai sulla staffa stessa, ma sono fissate attraverso dadi o altri pezzi in plastica filettati: infatti, la staffa, stampata con stampante 3D non è piena internamente, ma presenta solo una trama di irrobustimento.



Figura 6-8 Nuova disposizione lidar

La Figura 6-9 propone il dettaglio della nuova disposizione del sistema di acquisizione relativo al lidar. È possibile osservare:

- il lidar di colore nero;
- il cavo a sette fili in uscita dal lidar utile per gestire il motore a magneti permanenti e l'emettitore vero e proprio del lidar;
- la scheda millefori con la Teensy al centro e i terminali saldati per smaltire i segnali attraverso i vari cavi jumper;

- un'aletta per dissipare il calore generato dal regolatore di tensione necessario per alimentare il sistema con una tensione di 5V.



Tutti questi elementi vengono dettagliati meglio nei prossimi paragrafi.

Figura 6-9 Nuova disposizione lidar - vista dall'alto (sx) e vista frontale (dx)

6.3.1 Scheda millefori e collegamenti

Lo schema di collegamento tra il lidar, la scheda Teensy e Speedgoat o Pc è rimasto sostanzialmente lo stesso presentato in [17]. Cambia la scheda di acquisizione: la scheda Arduino Mega viene sostituita con una Teensy 3.2. Di conseguenza cambiano i pin di collegamento, ma i compiti rimangono gli stessi.

La Figura 6-10 riassume i collegamenti del "sistema lidar". Con "V_in(5V)" e "GND" si indicano i due capi dell'alimentazione già trasformata presa dalla linea a 24V (come descritto di seguito). In alto nella figura è presente l'adattatore TTL/RS232 per la comunicazione tra Speedgoat e Teensy. A destra dell'immagine sono presenti i sette cavi per la comunicazione tra la Teensy e il lidar, sia per la parte motore che per la parte emettitore. Nella parte bassa si possono notare dei cavi che partono dai pin della Teensy. Questi cavi sono quelli utilizzati per:

la comunicazione seriale tra Teensy e Speedgoat (RX1 e TX1 rispettivamente dei pin 1 e 0);

- La comunicazione con il lidar stesso per la funzione di emettitore (RX2 e TX2 rispettivamente dei pin 9 e 10);
- Il pin 6 per il comando di tipo PWM del motore rotativo del lidar.

Infine, sulla sinistra si vedono il computer e Speedgoat che si possono collegare alla Teensy tramite la USB. La connessione può avvenire solo con uno alla volta. In entrambi i casi il cavo USB fornisce corrente alla scheda, mentre solo nel caso del computer viene utilizzato anche per la comunicazione seriale.



Figura 6-10 Schema collegamenti Lidar, Teensy, Speedgoat, Pc

La Teensy presenta dei pin di tipo maschio, mentre i cavi jumper utilizzati per il collegamento richiedono dei pin di tipo femmina. Per questo motivo e per motivi di montaggio della Teensy sulla staffa che regge il lidar, è stata assemblata una scheda millefori. Al centro della scheda millefori sono stati saldati dei pin di tipo femmina per infilare i pin di tipo maschio della Teensy. Tramite saldatura a stagno e cavi in alluminio posti nella parte sottostante della scheda millefori, i segnali utili della Teensy sono stati portati a dei pin di tipo femmina più esterni (Figura 6-11 e Figura 6-12). In questo modo i pin (maschio) della Teensy utilizzati per l'applicazione specifica vengono riportati a pin più esterni (femmina).

Sulla scheda millefori è stata saldata anche una morsettiera a due poli (GND e V+) per portare l'alimentazione. L'alimentazione è stata presa dalla linea a 24V in uscita dallo Speedgoat e portata alla millefori grazie alla morsettiera. La corrente è stata derivata da un punto in cui il cavo della linea era già stato aperto ed è stato sufficiente svitare la morsettiera di giunzione della linea a 24V e aggiungere i cavi di derivazione della corrente alla millefori. La tensione di alimentazione del lidar e della scheda di conversione TTL/RS232 è di 5V, come si è visto nella tabella di Figura 6-4. Per abbassare la tensione da 24V a 5V è stato utilizzato un regolatore di tensione della Texas Instruments (T.I.). Questo dispositivo permette di avere in ingresso una qualsiasi tensione tra 5V e 25V e di ottenere in uscita sempre 5V. La corrente che può essere fornita è dell'ordine dei 5A, quindi ampiamente sufficiente per i dispositivi che deve alimentare. Siccome la potenza dissipata da questo trasformatore è proporzionale al salto di tensione che garantisce e alla corrente che fornisce, il calore che si genera è molto, soprattutto se paragonato alla superficie di scambio termico del trasformatore con l'aria. Per questo motivo viene installata un'aletta di dissipazione del calore. Una miglioria da fare in futuro è quella di utilizzare un trasformatore non lineare, leggermente più ingombrante, ma in grado di fornire lo stesso salto di tensione con maggiore efficienza.

Il GND è comune a tutto il sistema ed è derivato dal secondo cavo della linea a 24V.



Figura 6-11 Scheda millefori con Teensy - Fronte

Lavoro sul lidar e interfacciamento via seriale



Figura 6-12 Scheda millefori con Teensy - Retro

La Teensy, invece, è l'unico componente che viene alimentato sempre a 5V, ma dal cavo USB. L'alimentazione viene garantita o dal computer se serve comunicare con questo, oppure da Speedgoat se non è necessario comunicare con il computer. Tale cavo USB è utilizzato anche per la comunicazione seriale tra la Teensy e il Computer. La comunicazione seriale non può essere, invece, fatta tramite tale cavo se si vuole comunicare con Speedgoat poiché le sue porte USB forniscono solo l'alimentazione. Se si vuole comunicare con Speedgoat è necessario utilizzare le seriali secondarie offerte dalla Teensy passando per il convertitore TTL/RS232.

In futuro si può pensare di alimentare la Teensy dalla stessa linea 24V/5V collegandola tramite il suo pin "Vin" in modo da rimuovere il cavo USB. In tale circostanza, se si vorrà comunicare con la Teensy tramite il computer via USB sarà necessario tagliare la traccia che collega i pin Vin e Vusb della Teensy. Quest'ultima modifica serve per evitare correnti di ritorno dirette al computer che potrebbero danneggiare irreparabilmente la porta USB del Pc.

6.4 Migliorie nuova disposizione

Come anticipato, con la nuova configurazione sono state apportate diverse migliorie. Nel paragrafo 6.3.1 si è accennato alla migliore alimentazione del "sistema lidar" grazie alla derivazione di una linea dedicata a questo compito.

Inoltre, un esempio di quello che si otteneva con la vecchia configurazione raccogliendo i punti ottenuti da una scansione della durata di 5 secondi è riportato in Figura 6-13. Tale figura riporta il risultato di una scansione fatta dalla carrozzina in posizione di marcia in piano e posta di fronte ad un gradino alto 90mm. Nell'origine del sistema di riferimento (0,0) si trova il lidar.

Come si può vedere, l'immagine è molto "rumorosa": si distinguono le pareti e il pavimento con lo scalino, ma ci sono anche molti punti in aria e oltre le pareti della stanza.



Figura 6-13 Scansione lidar - vecchia configurazione

Se si ingrandisce nella zona vicino al gradino e al lidar, si ottiene quanto riportato in Figura 6-14. Oltre al rumore, si nota anche che il pavimento sotto il lidar non viene ripreso. Non viene ripreso perché c'è qualcosa in quella "finestra angolare" che ostruisce la vista al lidar. Si tratta di tre strutture a lob e, in pratica, si tratta delle gomme del tripode. Quello che succede è che la staffa flette e forma una campanatura che porta il lidar a riprendere le gomme invece che il pavimento sotto di sé. Se si tiene la staffa per dare una campanatura leggermente verso l'esterno questo problema non c'è e il lidar riprende il pavimento sotto di sé. Inoltre, con la vecchia staffa è evidente l'oscillazione del lidar a causa del fatto che il



sistema manca di rigidità: questo può influire negativamente sulla qualità dei dati acquisiti. Per questo motivo è stato necessario ristampare una staffa più rigida.

Figura 6-14 Scansione lidar - vecchia configurazione - particolare

Un altro effetto della rumorosità dell'acquisizione dei dati è evidente se si osserva la Figura 6-15. In particolare, in questo grafico vengono diagrammati gli angoli misurati dalla scheda Arduino ed inviati al pc tramite il modello Simulink riportato al fondo del paragrafo 6.1.1. Quello che si vede è che al computer arrivano degli angoli non solo compresi tra 0° e 360°, ma tra 0° e 510° circa. Il sistema di riferimento del lidar non prevede quegli angoli; è, quindi, evidente che c'è del rumore, o comunque che c'è qualche problema nella ricezione o nel passaggio dei dati tra lidar e Teensy o tra Teensy e Speedgoat/Pc.



Figura 6-15 Angoli misurati da Arduino - vecchia configurazione

Dopo le modifiche al sistema lidar quello che si ottiene con una scansione della stanza nelle stesse condizioni è riportato in Figura 6-16. Come si può vedere non c'è più il rumore dei punti in aria e oltre le pareti. Questo risultato è stato ottenuti abbastando il "sample time" della scheda di acquisizione Teensy. Il suo abbassamento è stato possibile in quanto la Teensy 3.2 è più potente e veloce della scheda Arduino. In particolare, è stato possibile abbassare il sample time da $1200 \ \mu s$ (= $1200 \cdot 10^{-6} s$) a 400 μs . Si è notato che la rumorosità sparisce da un sample time di 500 μs in giù. L'abbassamento del sample time probabilmente rende la scheda più pronta a ricevere nuovi dati e ad inviarli subito svuotando il buffer della scheda prima che si accumulino troppi dati. La scheda Teensy, per passare i dati di distanza, angolo e qualità al computer o allo Speedgoat, utilizza una velocità di trasmissione seriale di 115200baud (bit per secondo inviati). Questo vuol dire che ogni bit inviato occupa un tempo di (1/115200) secondi. I messaggi che Teensy invia al pc o a Speedgoat sono lunghi (8x8)bit e quindi il tempo richiesto per inviare ogni singolo messaggio composto come [header, distanza, angolo, qualità, "a capo"] è di $(1/115200)/(8*8) = 555,5 \ \mu s$. Imporre un sample time inferiore a questo valore vuol dire leggere ed inviare sempre nuovi valori e corretti. Stare sopra questo valore di sample time, vuol dire ricevere e leggere valori combinati, frutto

di scambi tra coordinate di punti diversi che risultano apparire come punti in aria o oltre le pareti.



Figura 6-16 Scansione lidar - nuova configurazione

Non solo la rumorosità è sparita, ma anche le ruote non vengono più riprese dal lidar che così può catturare un'immagine pulita anche del pavimento sotto di sé (Figura 6-17).



Figura 6-17 Scansione lidar - nuova configurazione – particolare

La conoscenza delle coordinate del pavimento sotto il lidar è fondamentale per conoscere l'altezza del lidar e l'inclinazione del pavimento.

Infine, la pulizia dei dati raccolti è riscontrabile anche nel grafico degli angoli misurati durante la scansione, come si può vedere dalla Figura 6-18. Gli angoli misurati e inviati sono continui e non presentano salti casuali di angolo. Inoltre, come dovrebbe essere, gli angoli misurati sono compresi solo tra 0° e 360°: il sistema di riferimento del lidar non prevede angoli maggiori. Il fatto che con la vecchia configurazione uscissero angoli maggiori era frutto di un inquinamento dei dati letti dal lidar probabilmente nella fase di invio a Speedgoat o al Pc.



Figura 6-18 Angoli misurati da Teensy - nuova configurazione

Ottenere un'immagine così pulita permette di avere bisogno di passare meno punti via seriale tra Teensy e il computer o Speedgoat e quindi di velocizzare la fase di scansione che per 5000 punti richiede 5s: ad esempio possono bastare la metà dei punti e, quindi, del tempo di scansione.

6.4.1 Programmazione scheda Teensy

La scheda Teensy è stata programmata per calcolare al suo interno le dimensioni dello scalino quali: distanza, altezza, spazio dopo il gradino e condizione di salita. Inoltre, a partire dalle misurazioni fornite dal lidar lo sketch è in grado di calcolare anche l'altezza del lidar.

Prima delle modifiche la scheda Arduino leggeva le coordinate dei punti in uscita dal lidar e le impacchettava in un formato leggibile da Speedgoat da inviare via seriale. Nella scheda Arduino, oltre alla lettura e all'impacchettamento dei dati in arrivo dal lidar, veniva fatta solo una piccola rielaborazione per passarli a Speedgoat come interi. I dati venivano poi raccolti in una matrice (5000x3) salvata all'interno di Speedgoat e rielaborati in una Matlab function alla fine della quale si ottenevano le dimensioni relative al gradino. Per informazioni più specifiche sulla funzione di elaborazione dei dati si faccia riferimento a [17].

Con il nuovo sketch caricato sulla Teensy, la scheda legge i dati in uscita dal lidar, verifica che siano all'interno di un certo range angolare (270° - 355°) e in quel caso salva le coordinate del punto come interi in due array uno per la distanza e uno per l'angolo.

Il range angolare è relativo alla finestra angolare che va dalla retta ortogonale al pavimento e passante per il centro del lidar a una retta in grado di riprendere quello che c'è oltre il gradino. Dalle informazioni racchiuse in questa finestra è possibile ricavare tutti i dati che definiscono il gradino.

Gli array sono definiti e riempiti da interi. Un intero sulla scheda Teensy occupa 4 byte di memoria dinamica (ovvero quella adibita alla memorizzazione delle variabili). Per le lavorazioni successive si prendono singolarmente i dati degli array e si elaborano uno per volta (o comunque pochi alla volta) salvandoli momentaneamente in variabili float per non perdere precisione di calcolo. Una volta rielaborati i singoli componenti degli array, i nuovi valori vengono sovrascritti al posto dei vecchi dati ancora presenti negli array. Vengono salvati nuovamente come interi moltiplicando per dieci i float ottenuti dai calcoli.

Inoltre, siccome il numero delle operazioni logico/matematiche che la Teensy deve processare è proporzionale al numero di elementi degli array da lavorare, viene continuamente fatto un controllo delle componenti necessarie e le operazioni di calcolo vengono limitate solo a quelle componenti degli array. Questo vuol dire compattare gli array dopo ogni lavorazione.

139

La scelta di allocare memoria per array di interi e di trasformare di volta in volta i valori in float per i calcoli e poi nuovamente in interi per il salvataggio, aggiungendo quindi operazioni logico/matematiche è stata dettata dalle caratteristiche tecniche della Teensy. In particolare, la Teensy 3.2 ha una capacità di immagazzinare dati nella memoria dinamica SRAM pari a 64k-byte. L'Arduino Mega aveva una SRAM di soli 8k-byte. La memoria della Teensy, quindi, è sì molto più grande di quella della precedente scheda, ma ha ancora dimensioni limitate.

Lo sketch, oltre ad allocare memoria SRAM per gli array di angolo e distanza forniti dal lidar, alloca anche spazio per un terzo array, sempre di interi, utilizzato per salvare degli indici degli altri due array. Considerando che ogni array viene inizializzato per ospitare un massimo di 2500 valori interi, si ha una un riempimento di 30k-byte della memoria SRAM solo per questi tre array. Aggiungendo le altre variabili si giunge ad un riempimento di circa 34/35k-byte, pari al 52% della memoria SRAM. Questo non permetterebbe di lavorare con un secondo lidar, anche se per poco.

Ora, facendo delle prove sperimentali, si è visto che su 2500 punti analizzati, quelli che realmente devono essere salvati nella scheda Teensy perché si trovano tra 270° e 355°, sono circa 600/700. Per questo, benché ad ora si allochi memoria per array lunghi 2500 punti, in futuro sarà sufficiente abbassare tale valore per permettere l'analisi anche dei dati di un secondo lidar. Basterebbe abbassare questo valore a 2000 punti e si avrebbe un'ottima lettura e spazio sufficiente per i dati di entrambi i lidar.

Per quanto riguarda la memoria flash, che nel caso della Teensy 3.2 è pari a 256k-byte, l'attuale script ne occupa solo il 13%: quindi non ci sono problemi di questo tipo.

Infine, è vero che aumentano le operazioni logico/matematiche facendo tutte queste elaborazioni e questi cicli di scorrimento degli array, ma la scheda Teensy 3.2 è molto veloce nel processamento dei dati: ha una velocità di processamento di 72MHz. Dalle prove pratiche risulta che per accendere il lidar, leggere e processare 2500 punti ricevuti dal lidar, sono sufficienti circa 3 secondi. Inoltre, i dati che a quel punto devono essere trasferiti via seriale allo Speedgoat sono pochi e quindi questa fase di trasferimento richiederebbe poco tempo.

Infine, per come è strutturato lo sketch caricato sulla Teensy, il lidar viene fatto girare solo per il tempo necessario ad una misurazione completa. Al termine della misurazione vengono mandati in uscita via seriale le dimensioni del gradino e il lidar viene spento così da consumare meno energia. Per riaccenderlo, è sufficiente mandare dal serial monitor dell'IDE la lettera 'a' premendo successivamente "invio" e il lidar fa una nuova misurazione mandando i risultati sul monitor seriale. La stessa cosa deve essere fatta con Speedgoat.

Nel caso di comunicazione seriale con il Pc si utilizza la seriale relativa all'ingresso USB che sulla Teensy viene chiamato con "Serial". Per la comunicazione con Speedgoat si utilizza la seriale numero uno (pin 0 e 1) chiamandola con "Serial1". È importante notare che, diversamente dalla scheda Arduino, la seriale che fa capo all'ingresso USB non è collegata ad altri pin della scheda. Infine, la seriale due (pin 9 e 10) viene chiamata "Serial2" ed è utilizzata per comandare il motore del lidar.

Una volta che la scheda Teensy ha salvato i dati dei punti che interessano il gradino, lo sketch li elabora come indicato in [17]. In questo lavoro di tesi si è lavorato sulla trasformazione dello script Matlab in un linguaggio comprensibile dalla Teensy. Si tratta dello stesso linguaggio di Arduino, ovvero di un linguaggio molto simile al C++.

6.4.2 Sketch utilizzabili e modalità di interfacciamento

In questo paragrafo vengono descritti gli sketch utilizzabili per lavorare con il lidar e continuare il lavoro su questo argomento. Vengono descritti anche gli strumenti di interfacciamento con la Teensy (principalmente Simulink e IDE).

Gli sketch utilizzabili per la Teensy sono sostanzialmente tre:

- Sketch per il passaggio di tutti i punti provenienti dal lidar al Pc o a Speedgoat;
- Sketch per il passaggio di dati già elaborati dalla Teensy al Pc e viceversa;
- Sketch per il passaggio di dati già elaborati dalla Teensy a Speedgoat e viceversa.

Per tutti gli sketch vale la seguente regola: se si lavora tra il Pc e la Teensy si utilizza la seriale che fa riferimento al cavo USB utilizzando il comando "Serial"; se si lavora tra lo Speedgoat e la Teensy si utilizza la seriale che fa riferimento ai pin 0 e 1 utilizzando il comando "Serial1". Per avere una lettura pulita dei dati è necessario inizializzare una sola comunicazione seriale tramite Serial.begin(115200) o Serial1.begin(115200). Se si inizializzano entrambe il rumore nell'acquisizione si ripresenta. Tale rumore deve avere a che fare con la velocità della scheda e nel numero di operazioni da svolgere tra una lettura e l'altra.

I seguenti sketch e il seguente materiale si trova tutto nella cartella "Lidar_WheelchairQ", all'interno della cartella standard "03_MODELLI" \rightarrow "Modelli IDE-Arduino Frison". Leggere anche i file di testo delle cartelle perché aiutano ad indirizzarsi.

6.4.2.1 Sketch per il passaggio di tutti i punti provenienti dal lidar al Pc o a Speedgoat

Utilizzando questo sketch è possibile ottenere in uscita dalla Teensy tutti i punti letti dal lidar, come veniva fatto in [17]. Lo sketch da caricare sulla Teensy, in questo caso, è chiamato "Lidar_WheelchairQ_BASE_funzionante_con_Teensy3_2_MODIFICA_PINs". Si tratta dello sketch già utilizzato in [17], ma sono stati modificati i richiami ai pin per adattarli alla nuova scheda. È stato, inoltre, abbassato il sample time come descritto nei paragrafi precedenti.

Se si vogliono leggere i dati con il Pc e salvarli in una matrice in Matlab, è necessario utilizzare il modello Simulink "*Ricevitore_dati_non_originale*" simulandolo per 5 secondi (se si vogliono ottenere 5000 punti). Il funzionamento di tale modello è descritto in [17] e il suo aspetto è riportato nel paragrafo 6.1.1. Inoltre, in questo caso, nello sketch è necessario inizializzare la seriale "Serial" e lavorare con quella. Se si lavora con il Pc, la matrice può essere elaborata grazie a delle funzioni Matlab, ad esempio, per vedere cosa il lidar vede: in quel caso si consiglia l'utilizzo della funzione Matlab "*Disegno_i_punti_dal_lidar*".

Se si vogliono leggere i dati con lo Speedgoat, lo sketch da utilizzare è lo stesso, ma bisogna inizializzare la seriale "Serial1" e lavorare con quella.

6.4.2.2 Sketch per il passaggio di dati già elaborati dalla Teensy al Pc e viceversa

Lo sketch da caricare sulla Teensy che permette di ottenere in uscita dalla seriale "Serial" del USB le dimensioni del si cavo gradino, chiama "Lidar_WheelchairQ_funzionante_con_Teensy3_2_MODIFICA_PINs". Questo sketch permette di vedere le dimensioni del gradino sul monitor seriale dell'IDE del Pc. Per come è impostato adesso, sul monitor seriale si ottengono anche i punti che si trovano tra i limiti della finestra angolare citata in precedenza (270° - 355°).

Il lidar, appena acceso e alimentato, compie una scansione della durata di 3 secondi e si ferma. In questo lasso di tempo ha già scansionato il gradino e calcolato le sue dimensioni inviandole via seriale "Serial".

Per far ripartire la scansione è sufficiente aprire il monitor seriale dell'IDE (se ancora non lo si è fatto) e digitare la lettera 'a' minuscola più "invio". Il lidar si accende e ruota
nuovamente per 3 secondi circa e sul monitor seriale vengono stampate le dimensioni del gradino oltre ai punti appartenenti alla finestra angolare di interesse. Il risultato è riportato in Figura 6-19.

L'altezza alla quale si trova il lidar risulta negativa nell'immagine. Lo sketch è stato modificato e ora l'altezza del lidar che viene stampata ha valore positivo, come dovrebbe. Tale altezza viene calcolata a partire da un'altezza teorica del lidar che deve essere messa come input all'inizio dello sketch. Si è visto che il calcolo dell'altezza del lidar è preciso anche se l'altezza inizialmente inserita come input non è precisa.

COM8 (Te	ensy) Serial		
Indice -	570		
Numero pu	Inti tra sy o di		
mml Calcol Tempo = 3	3287174	x = 5/2	
and Carcorals			
Angola -			
Dist-	3548		
UISCANZA	= 26262		
// come per lindice =	571		
Tempo =	unti tra sx e dx 3287265	s = 572	
h_scalin	$n_0 = 93 c_1$		
d_scali	no = 779.18		
e_scali	no = 1834.52		
Condizi	one = 1		
at 1. array pos_p.n_lidar	_rilevata = -661	94	
Scorrig	Dento automoti		
	anto outomatico		
avere dei rigel		The state of the s	
sso metterlo a 3000 per s	oat quando lo uso stare ancora più to	con i valori deg	1:
	Fill Ci	anquillo ma an	iche solo 1750 dovreb
di memoria di			and the second design of the s
Allamica, lasci			and the second second
and the second			

Figura 6-19 Dimensioni gradino sul monitor seriale dell'IDE

Nello sketch commentato in questo paragrafo sono presenti anche diverse sezioni commentate utilizzate per fare operazioni di debug. Non vengono cancellate perché potrebbero essere nuovamente utili in futuro.

6.4.2.3 Lavoro interfacciamento Teensy-Speedgoat

Per l'interfacciamento tra Teensy e Speedgoat si è partiti dallo sketch presentato nel paragrafo precedente (6.4.2.2). Per comunicare con Speedgoat attraverso la posta RS232 è stata inizializzata la seriale "Serial1". Lo sketch a cui fare riferimento si chiama "Lidar_WheelchairQ_funzionante_con_Teensy3_2_MODIFICA_PINs_SG".

Quello che si vorrebbe mandare da Speedgoat a Teensy è:

- L'angolo θ_P del portatreno all'inizio della misurazione del gradino;
- L'angolo θ_{DU} delle pivotanti all'inizio della misurazione del gradino;
- L'angolo assoluto del telaio PC θ_{PC} all'inizio della misurazione del gradino;
- Il "comando" che definisce il segnale di avvio della scansione del lidar.

Il comando può essere, ad esempio, un intero o una lettera. Nel caso dello sketch funzionante con il monitor seriale dell'IDE veniva inviata la lettera 'a', ma non è necessario che sia così anche per la comunicazione con Speedgoat. Per quanto riguarda gli altri tre valori, invece, si sono fatte delle prove di invio trasformandoli prima in interi di tipo "uint16_t" e provando a inviarli da Speedgoat a Teensy come treni di 2 byte da 8 bit ciascuno in successione per ciascun valore. Si è anche provato a inviarli come stringhe da Speedgoat e a leggerli da Teensy utilizzando le funzioni di ricezione stringhe di Agri.q, ma senza successo.

Per quanto riguarda, invece, l'invio dei dati già elaborati del gradino da Teensy a Speedgoat, quello che si vorrebbe fare è inviare come "interi" le dimensioni, in millimetri (moltiplicate per 10 o 100), di:

- Altezza del gradino (h), moltiplicata per 100;
- Distanza orizzontale tra lidar e gradino (d), moltiplicata per 10;
- Spazio per la carrozzina dopo il gradino (e), moltiplicata per 10;
- Condizione di superabilità del gradino (0/1).

Volendo si possono inviare altri valori: ad esempio, come si vedrà nel capitolo 8.3, è utile la quota d_MAX, ovvero la distanza tra le ruote anteriori dei tripodi e il bordo del gradino, così da non doverla calcolare in Speedgoat.

Il metodo utilizzato per l'invio di dati da Teensy a Speedgoat è lo stesso presentato in [17]: si invia un segnale di inizio messaggio (la lettera 'S' nello specifico) che occupa un byte; a seguire vengono inviati i valori strutturati come coppie di due byte in successione, per un totale di 16 bit per ogni valore da inviare; si conclude il messaggio andando a capo (inviando via seriale '\n', un byte).

Dal lato ricevitore (Speedgoat), è presente la funzione Simulink "scan_lidar" nella macchina a stati della "salita automatica del gradino" che dovrebbe, con le poche modifiche

già apportate, essere in grado di ricevere ed interpretare i quattro dati riguardanti le dimensioni del gradino nell'ultimo elenco puntato presentato qualche riga qui sopra.

Sono state fatte molte prove e tentativi di interfacciamento Teensy-Speedgoat, ma non si è riusciti finora a risolvere il problema. Probabilmente c'è un problema nella parte di invio dati da Speedgoat a Teensy.

All'interno del controllore di Speedgoat salvato nel Pc del laboratorio è presente il controllore chiamato "Ricezione – Invio dati Speedgoat_Lidar". Si tratta di un controllore commentato. Se scommentato, mostra all'interno della sua macchina a stati il modello Simulink più promettente. In questo modello si cerca di inviare da Speedgoat a Teensy il numero 327 come un valore di tipo "uint16_t" spezzato in 2 byte, seguito dalla lettera 'a' e dal termine '\n', cioè l'a-capo. Caricando lo sketch nominato in questo paragrafo e caricando su Speedgoat questo modello e utilizzando un cavo che collega la porta RS232 di Speedgoat alla porta USB del Pc, sul monitor seriale dell'IDE si vedono effettivamente in uscita da Speedgoat i byte giusti quando viene schiacciato il tasto a fungo grigio del pannello di comando della carrozzina. La Teensy, però, non riesce a ricevere correttamente. Infatti, solo schiacciando a lungo e ripetutamente il tasto a fungo grigio in modo anche caotico, si è riusciti ad accendere il lidar e compiere la misurazione. È successo tre o quattro volte.

Per i prossimi lavori sarà, quindi, necessario verificare nuovamente cosa esce dalla porta di Speedgoat con un cavo collegato al Pc e sulla base di quello cercare di capire come ricevere i dati. Si consiglia, come prima cosa, la lettura del pdf presente nella cartella "SLRT_SerialCommunication - istruzioni per comunicazione seriale con Speedgoat" all'interno della cartella "Lidar_WheelchairQ", all'interno della cartella standard "03_MODELLI" \rightarrow "Modelli IDE-Arduino Frison". È molto importante questo pdf in quanto spiega come creare messaggi da inviare in uscita da Speedgoat attraverso la seriale RS232 e come ricevere attraverso la stessa porta.

Prima di procedere a descrivere come è stato implementato il sistema di controllo descritto nel paragrafo 4.1, è necessario parlare di alcune operazioni preliminari. In particolare, durante questo lavoro di tesi si è inizialmente lavorato su:

- Calibrazione dell'angolo di feedback del portatreno in seguito alla sostituzione della cinghia di azionamento del tripode;
- Prove a gradino di velocità per ricavare i valori di partenza del controllo in velocità del portatreno del tripode nelle fasi Prima e Seconda.

7.1 Calibrazione angolo di feedback del portatreno

Si è resa necessaria un'operazione di calibrazione dell'angolo di feedback misurato dalla ruota fonica solidale al portatreno. È stata fatta una modifica al software del controllore Speedgoat nella sezione "Segnali Monitoraggio", nella sotto-funzione Simulink di elaborazione dei segnali che forniscono in uscita θ_P^{FB} (dalla *V_EP* misurata si ottiene θ_P). Le due sezioni sono mostrate in Figura 7-1 e Figura 7-2.





Figura 7-2 Sotto-funzione Simulink calcolo feedback angolo portatreno

La necessità della calibrazione è dovuta al fatto che, precedentemente a questo lavoro di tesi, è stata sostituita la cinghia di azionamento dei tripodi. Quella precedentemente montata si è rotta perché sottodimensionata ed è stato necessario sostituirla con una più robusta. La scelta è ricaduta su una cinghia di distribuzione da moto che risulta molto più resistente. Per questa operazione di sostituzione della cinghia è stato necessario smontare il tripode sinistro e la ruota fonica ad esso solidale. Questa ruota fonica è quella che permette di leggere l'angolo a cui si trova il tripode. La lettura di un angolo giro è divisa in 3 parti da 120° ciascuna in quanto la configurazione del tripode si ripete uguale a sé stessa ogni terzo di giro, come spiegato in [20]. La ruota fonica non è stata montata esattamente come prima dell'intervento. Di conseguenza, gli angoli di feedback di θ_P non corrispondevano più all'angolo a cui avrebbero dovuto corrispondere. In particolare, dai lavori precedenti a questa tesi ([17], [20]), risulta che con angolo delle pivotanti θ_{DU} pari a 98,1° e quattro gomme del tripode poggiate a terra, l'angolo di feedback di θ_p letto dal controllore dovrebbe valere 82°. In realtà, quello che veniva letto prima dell'operazione di calibrazione erano 32°. Questo vuole dire che la ruota fonica è stata montata ruotata rispetto al vecchio montaggio con un angolo di sfasamento pari a 50° (più 120° o 240°, ma poco importanti per via della simmetria del tripode). Se non si intervenisse con la modifica presentata in questo capitolo, i vecchi sistemi di controllo (salita gradino da Bellincioni, discesa gradino da Seccareccia e configurazione di marcia in piano) non potrebbero funzionare.

Per riportarsi alle vecchie condizioni e convenzioni utilizzate in diverse sezioni del controllore, si sono sommati 50° all'angolo di feedback in uscita dalla sotto-funzione Simulink. In questo modo è stato possibile riportare i 32° agli 82° teorici. È stato, inoltre, necessario utilizzare una Matlab function per spalmare gli angoli ottenuti dopo questa somma su un angolo compreso tra 0° e 120°. Infatti, se non si intervenisse in questo modo, si avrebbero angoli compresi tra 50° e 170° e i sistemi di controllo non potrebbero lavorare nuovamente. La Matlab function, allora, lavora con la seguente logica:

$$\begin{cases} se \ \theta_P^{FB} \le 120^\circ \to \ \theta_P^{FB}(reale) = \theta_P^{FB} \\ se \ \theta_P^{FB} > 120^\circ \to \ \theta_P^{FB}(reale) = \theta_P^{FB} - 120^\circ \end{cases}$$

Dove:

- θ_P^{FB} è il feedback dopo aver sommato i 50° e, quindi, compreso tra 50° e 170°;

- $\theta_P^{FB}(reale)$ è il feedback spalmato nell'arco 0° - 120°.

In uscita dalla Simulink function e in direzione al resto del controllore, si avrà proprio questo $\theta_P^{FB}(reale)$ che verrà chiamato in vari modi (θ_P^{FB} , θ_P , TetaP o tP_FB).

La realizzazione software caricata su Speedgoat adibita a questa operazione di calibrazione è riportata in Figura 7-3 all'interno dell'area chiamata "Calibrazione".



Figura 7-3 Calibrazione controllore

Con questa modifica tutto è tornato a funzionare.

7.2 Prove a gradino di velocità del portatreno del tripode

Poiché, come spiegato e descritto nel paragrafo 4.1.7, il portatreno del tripode viene controllato in velocità nelle fasi Prima e Seconda di rotazione del tripode attorno al gradino, è stato necessario fare delle prove semplificate per iniziare a definire i parametri Proporzionale e, eventualmente, Integrativo per un controllo di questo tipo.

Si è pensato, quindi, ad una prova a gradino di velocità del portatreno effettuata con carrozzina scarica e angolo delle pivotanti θ_{DU} pari a 98,1°. Si è imposto il passaggio a gradino da velocità nulla di rotazione del tripode a una velocità pari a 0,3 rad/s. Si è scelta questa velocità perché è molto simile a quella che viene utilizzata nel controllore della salita gradino. Queste prove sono state utili anche per capire qual è il vero limite di velocità di rotazione del tripode controllabile e mantenibile nell'intero arco di circonferenza (0° - 360°). Si è visto che il tripode riesce a raggiungere una velocità di 0,4 rad/s, ma solo nelle fasi in cui la coppia fornita dal tripode è minore: la velocità realmente mantenibile sull'intero angolo giro è pari a circa 0,35 rad/s.

Per le informazioni riguardo il funzionamento del controllore Speedgoat si rimanda a [17]. In generale, Speedgoat viene programmato con un linguaggio simile a Simulink utilizzando le "macchine a stati" che definiscono le sequenze di azioni e movimenti che devono fare gli azionamenti di Wheelchair.q. È quindi presente una parte di gestione dei segnali in arrivo dai sensori a bordo della carrozzina, una loro interpretazione e una risposta da parte della macchina a stati del controllore. Il movimento che gli arti di Wheelchair.q devono compiere in ogni momento sono il frutto di elaborazioni di informazioni di feedback, di segnali provenienti dalla macchina a stati e di segnali provenienti dagli altri azionamenti. Il processo si conclude producendo in ogni momento i segnali di set che Speedgoat invia agli azionamenti tramite le sue porte di interfacciamento con i driver dei motori. I driver hanno il compito di gestire direttamente i motori di Wheelchair.q. Per maggiori informazioni riguardo la parte fisica-elettrica di Speedgoat si faccia riferimento a [20].

Per la prova a gradino di velocità del tripode, nel controllore Speedgoat si è implementato un sistema di controllo chiamato *"Prova a gradino di velocità tripode per PID"* (Figura 7-4).



Figura 7-4 Prova a gradino di velocità del tripode, maschera esterna

Al suo interno (Figura 7-5) è presente: sulla sinistra, in verde, la sezione "Comandi e Feedback" per lo smistamento dei segnali in arrivo dal telecomando dell'utente e dai segnali dei sensori di Wheelchair.q; al centro, in arancione, è presente la "macchina a stati" che governa le fasi della sequenza; a destra sono presenti i "controllori degli azionamenti" adibiti alla costruzione dei segnali di set da inviare agli azionamenti di Wheelchair.q.



Figura 7-5 Prova a gradino di velocità del tripode, struttura esterna

La Figura 7-6 mostra un ingrandimento dell'esterno della macchina a stati. Sulla sinistra sono presenti i segnali in ingresso alla macchina a stati provenienti o dalla sezione "comandi e feedback" o dai controllori degli azionamenti; a destra sono presenti le uscite indirizzate ai controllori degli azionamenti di Wheelchair.q.



Figura 7-6 Esterno macchina a stati prova a gradino di velocità

Come mostrato in Figura 7-7, la macchina a stati internamente è molto semplice ed è composta da due fasi.

La prima fase si chiama "ATTESA" ed è quella in cui si entra quando con il selettore della modalità di funzionamento della carrozzina si seleziona questo sistema di controllo. In questa fase tutto è bloccato (blocco=1), all'azionamento del tripode viene imposta una velocità nulla e alle solari vengono imposti degli avanzamenti di set nulli (D_xL e D_xR pari a zero).

Per passare alla seconda fase, chiamata "RICONFIGURAZIONE", è necessario schiacciare il tasto relativo al segnale chiamato "avvio_riconfigurazione". Se si preme quel tasto, al controllore arriva un segnale maggiore di 0,5 e si può accedere alla seconda fase. Il tasto di avvio è quello a fungo grigio. Per maggiori informazioni riguardo il telecomando utilizzato per l'interfacciamento dell'utente al controllore si rimanda a [17]. Nella seconda fase si sbloccano i freni (blocco=0), alle solari viene imposta una distanza di avanzamento nulla (D_xL e D_xR pari a zero) e al portatreno del tripode viene imposta una rotazione a velocità $\dot{\theta_P}$ costante e pari a 0,3 [rad/s]. Per uscire da questa fase è necessario selezionare con il selettore un'altra funzione del controllore di Wheelchair.q (mod_funz > 5 || mod_funz < 5), oppure, spostare brevemente in avanti il joystick del telecomando dell'utente (V_lambda1 > 5).



Figura 7-7 Interno macchina a stati, gradino di velocità del portatreno

Gli output della macchina a stati vanno in input alla sezione di "Controllo degli azionamenti". Un ingrandimento di tale sezione è riportato in Figura 7-8. In particolare, per questo controllore è previsto un controllo solo delle solari e del portatreno del tripode. I segnali da inviare agli altri azionamenti, invece, sono posti pari a zero prima di essere inviati in uscita dal controllore "*Prova a gradino di velocità tripode per PID*" nel vettore "Prova_gradino_out". Questo vuol dire che i relativi freni saranno azionati.

È importante notare che, oltre al portatreno, vengono azionate anche le solari. Questo è necessario, in quanto senza azionamento delle solari, si avrebbe un movimento di traslazione di tutta la sedia all'indietro o in avanti per via del non bloccaggio o della non compensazione da parte delle solari appunto. Per questo motivo, al fine di tenere ferme sul posto le ruote della carrozzina è stato necessario aggiungere una compensazione da parte delle solari. Tale

operazione è anche propedeutica per il controllore della salita del gradino, dove, come si è già accennato nel paragrafo 4.1, non è accettabile che ad una rotazione del portatreno del tripode, corrisponda un arretramento delle solari: le due gomme a contatto con il pavimento devono rimanere ferme e ruotare sul posto. Sarebbe pericoloso un arretramento delle gomme nelle fasi automatiche di salita gradino.



Figura 7-8 Sezione "Controllo degli azionamenti", prova a gradino di velocità

La Figura 7-9 riporta il sistema di controllo dell'azionamento del portatreno. A sinistra è presente la velocità di set imposta al tripode (Teta_P_punto_set) in arrivo dalla macchina a stati. Questo valore viene confrontato con il feedback di velocità del portatreno (n_P) in arrivo dalla sezione "Comandi e Feedback". La n_P non è fornita in [rad/s], ma in [rpm]. Per rendere set e feedback confrontabili la n_P viene moltiplicata per 2 * pi/60 e portata in [rad/s].

Siccome il feedback di velocità è molto rumoroso, nel senso che oscilla molto e questa oscillazione crea un errore tra set e feedback oscillante con conseguente oscillazione della coppia fornita dal motore e azionamento e sbloccaggio veloce dei freni del portatreno, viene inserito un filtro a valle della trasformazione del feedback. Questo permette di avere un feedback filtrato, cioè meno caotico e variabile, da confrontare con il set. In questo modo la tensione di set in uscita da Speedgoat è più costante. Viene eliminato anche il fastidioso effetto di bloccaggio e sbloccaggio dei freni che si avrebbe senza filtro.

Dal confronto tra set e feedback di velocità si ottiene un errore di velocità che passa attraverso un blocco PID all'interno del quale si possono scegliere i valori Proporzionale e Integrativo che moltiplicano tale errore per creare un segnale di set da inviare ai driver dei motori di solari e portatreno. Infine, dopo il blocco PID è inserito un blocco di saturazione con estremi ±10V. Il valore è stato scelto in funzione del valore massimo di tensione fornibile ai motori di solari e portatreno. Il valore così ottenuto viene inviato in uscita da Speedgoat inserito all'interno del vettore "Prova_gradino_out" contenente tutte le tensioni di set da inviare ai driver dei inviare ai driver dei motori.

Scopo di questa prova a gradino è proprio l'isolamento dei parametri di frequenza del filtro e dei parametri proporzionale e integrativo del blocco PID per la gestione di un controllo in velocità.



Figura 7-9 Controllo portatreno per set di velocità

Per controllare le solari viene adottato un sistema di controllo relativo ai meccanismi epicicloidali. Il funzionamento di base del controllore delle solari è completamente descritto in [17]. In questo caso, agisce soltanto la parte di compensazione della rotazione del tripode (angolo θ_P): infatti, come già anticipato, in questa prova l'avanzamento imposto alle gomme del tripode dalla macchina a stati è nullo. Quello che cambia rispetto al modello base proposto in [17], è il calcolo dell'angolo di rotazione $\Delta \theta_P^{SET}$. Originariamente, $\Delta \theta_P^{SET}$ era fornito dalla macchina a stati e, quindi, era un valore fisso. Con riferimento alla Figura 7-10, in questo sistema di controllo delle solari, invece, il $\Delta \theta_P^{SET}$ viene calcolato a partire dalla velocità di set del portatreno (Teta_P_punto_set). Siccome tale velocità nella macchina a stati è espressa in [rad/s], mentre il controllore delle solari si aspetta un angolo in [°], viene fatta la trasformazione in [°/s]. Questa velocità di set del portatreno passa attraverso un blocco di

integrazione "tempo-discreto" che restituisce un angolo di rotazione del tripode paragonabile all'angolo di cui ha ruotato il portatreno fino a quel momento dall'inizio della sequenza automatica di rotazione del tripode. L'angolo così calcolato viene successivamente elaborato secondo il metodo classico.



Figura 7-10 Modifica controllo solari per il gradino di velocità del portatreno

Se la simulazione non dura più di una decina di secondi, effettivamente le solari riescono a mantenere ferme le gomme a contatto con il terreno senza arretrare o avanzare. Questo tempo è sufficiente a compiere la rotazione del tripode attorno al gradino nella fase automatica di salita gradino descritta nel prossimo capitolo.

Dopo molte prove, si è scelto come parametro del filtro del feedback di velocità del portatreno una frequenza di 1*Hz* e per il blocco del PID, sempre del portatreno, i valori P = -20 e I= -2. Con questi parametri si riesce ad avere una buona velocità di raggiungimento del set di velocità, una buona riduzione delle oscillazioni del feedback senza eccessivi vuoti di controllo del controllore e un basso errore statico di velocità. Il risultato della prova a gradino di velocità fatta con questi tre parametri è riportato nello scope di Figura 7-11. La curva importante è quella relativa al feedback di velocità del tripode (di colore azzurro).



Figura 7-11 Risultato prova a gradino di velocità, parametri ottimizzati: asse x in [s]

Questi tre parametri sono stati utilizzati come parametri di partenza per le fasi a controllo di velocità del portatreno del tripode nelle prove di salita del singolo gradino.

8 Implementazione del sistema di controllo in salita gradino

8.1 Schema generale del controllore della salita gradino

Il "Sistema di controllo della salita gradino" presentato in questa sezione è un'evoluzione di quello presentato in [17]. In esso vengono applicate le relazioni riportate nel paragrafo 4.1 e nei suoi sottoparagrafi per il controllo della traiettoria e dell'asseto del sedile. Vengono apportate, inoltre, delle modifiche alle sottofasi della macchina a stati per velocizzare il superamento del gradino.

Tale sistema di controllo si trova all'interno del sottosistema "Modalità Salita gradino" mostrato in Figura 8-1. Questo sottosistema ha in ingresso i due vettori "Interf_sign" e "Monitor_val". Il primo raccoglie i valori provenienti dai sensori a bordo carrozzina; il secondo i segnali provenienti dal pannello di controllo dell'utente. In uscita fornisce un vettore chiamato "SalGrad_out" contenente i segnali da inviare in uscita da Speedgoat, verso i driver dei motori di Wheelchair.q.



Figura 8-1 Modalità salita gradino, esterno

Internamente, come visibile in Figura 8-2, il sottosistema per la gestione della salita gradino è diviso in tre parti.

La prima parte, evidenziata in verde a sinistra, si chiama "COMANDI_E_FEEDBACK" ed è adibita allo spacchettamento dei dati dei due vettori in ingresso sopra descritti. Per maggiori informazioni riguardo i segnali in ingresso si faccia riferimento a [17].

La seconda parte, in centro, evidenziata in azzurro, è la "macchina a stati" chiamata "SEQUENZA_AUTOMATICA_DI_SALITA_GRADINO" che gestisce il controllo delle fasi di salita gradino. In ingresso, a sinistra, arrivano dei segnali provenienti dai vettori spacchettati nella prima sezione e alcune variabili calcolate nella terza sezione. In uscita presenta dei valori che sono indirizzati alla terza sezione e che riguardano variabili per la gestione e il funzionamento dei controllori per il calcolo dei segnali di set da inviare agli azionamenti. La terza parte è chiamata "CONTROLLO_ATTUATORI_E_SETTAGGI_VERSO_SG" ed è evidenziata in viola, sulla destra. In questa parte del controllore sono presenti i sottosistemi utilizzati per il calcolo dei valori di set di posizione o velocità da inviare ai driver dei motori.



Figura 8-2 Modalità salita gradino, interno - sezioni

Le modifiche apportate ai controllori degli azionamenti e quelle apportate alla macchina a stati vengono descritte nei prossimi paragrafi.

8.2 Sezione "Controllo attuatori"

Nella sezione "Controllo attuatori" sono presenti i sottosistemi che gestiscono la logica di azionamento dei motori degli arti di Wheelchair.q. Al suo interno sono presenti quattro macro-blocchi, ognuno dedicato alla gestione di un tipo di motore di Wheelchair.q. Sono presenti i blocchi di: controllo solari (angoli γ_{S_L} e γ_{S_R}); controllo portatreno del tripode (angolo $\Delta \theta_P$ e velocità $\dot{\theta_P}$); controllo pivotanti (angolo θ_{DU}); controllo assetto sedile (angolo β). Ogni macro-blocco si occupa di gestire i dati provenienti dai feedback dei sensori della carrozzina, dalla macchina a stati e, eventualmente, dai controllori di altri azionamenti. In uscita mandano i valori di riferimento per i driver dei motori. I segnali vengono accorpati in ogni istante tramite un blocco "mux" in un vettore chiamato "SalGrad_out" che viene inviato fuori dal blocco più esterno "Modalita Salita gradino" e inviato al blocco di invio segnali

fuori da Speedgoat e verso i driver (blocco "Output" passando prima per il blocco "Switch modalità funzionamento"). I quattro macro-blocchi vengono descritti nei prossimi paragrafi.

Al blocco mux utilizzato per la creazione del vettore delle tensioni di riferimento da inviare ai driver arrivano anche altri segnali che sono:

- Due segnali di riferimento per l'attivazione del cingolo (D_STARTM,TA^SG e D_STARTM,TB^SG). Sono impostati a zero in quanto il cingolo non viene utilizzato per il superamento del singolo gradino;
- Segnali di riferimento di velocità delle ruote pivotanti (D_RIFM,W^SG), del telaio RC rispetto al telaio PC (assetto sedile, V_RIFM,C^SG). Sono i segnali di velocità imposti a questi due azionamenti: infatti, questi due sono azionamenti che si muovono a velocità costante quando viene generato un segnale di avvio movimento. Non sono controllabili in velocità, ma solo in posizione;
- Tipo di controllo delle solari (coppia/velocità, D_RIFM,SR,SL^SG). Nel controllore delle solari si utilizza sempre in feedback di velocità per fare un controllo delle solari in posizione. La coppia richiesta alle solari, invece, viene utilizzata nella macchina a stati per capire quando Wheelchair.q è arrivata a contatto con il gradino con entrambe le gomme;
- Segnale di sblocco freni e abilitazione degli azionamenti di Wheelchair.q (D_STARTM^SG). Viene azionato quando il tasto a fungo grigio viene premuto dall'utente.

La Tabella 8-1 riporta l'elenco dei segnali in ingresso al blocco mux e ne specifica il significato e le caratteristiche.

Denominazione	Descrizione e valore
$V_{RIFM,C}^{SG}$	Riferimento di velocità azionamento sedile da controllore SG ($0 \div 10 V$)
$V_{RIFM,SL}^{SG}$	Riferimento azionamento ruota solare sinistra da controllore SG $(0 \div 10 V)$
$V_{RIFM,SR}^{SG}$	Riferimento azionamento ruota solare destra da controllore SG ($0 \div 10 V$)
$V_{RIFM,P}^{SG}$	Riferimento di velocità azionamento tripodi da controllore SG ($\pm 10 V$)
$D_{RIFM,SR,SL}^{SG}$	Segnale commutazione controllo coppia/velocità ruote solari da controllore
	SG (0/5 V)

Tabella 8-1 Segnali di riferimento in uscita da "Modalità Salita gradino", fonte [17]

Implementazione del sistema di controllo in salita gradino

$D_{RIFM,WA}^{SG}$	Segnale avvio abbassamento ruote pivotanti da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,WB}^{SG}$	Segnale avvio sollevamento ruote pivotanti da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,CA}^{SG}$	Segnale avvio abbassamento sedile da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,CB}^{SG}$	Segnale avvio sollevamento sedile da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,TA}^{SG}$	Segnale avvio estensione attuatore cingolo da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,TB}^{SG}$	Segnale avvio accorciamento attuatore cingolo da controllore SG $(0/5 V)$
$D_{RIFM,W}^{SG}$	Riferimento di velocità azionamento ruote pivotanti da controllore SG (0 \div
	10 V)
D ^{SG} _{STARTM}	Segnale abilitazione azionamenti unità di locomozione e sblocco freni da
	controllore SG $(0/1 V)$

Si procede ora alla descrizione dei controllori degli azionamenti di Wheelchair.q. In particolare, vengono sottolineate le differenze rispetto ai controlli originali descritti in [17]. Le modifiche sono principalmente volte al funzionamento del controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile della Prima e della Seconda fase descritte dettagliatamente nel capitolo 4 di questo lavoro di tesi.

8.2.1 Controllo solari

Il blocco di controllo delle solari è mostrato in Figura 8-3. Gli input e gli output del sistema sono rimasti gli stessi del modello originale presentato in [17], ma è stato aggiunto l'input "Numero_fase". Si tratta di una variabile in arrivo dalla macchina a stati che serve per scegliere il tipo di controllo e di attuazione da dare alle solari.



Figura 8-3 Controllo solari

In particolare, internamente il controllo delle solari è lo stesso del modello originale, ma, come mostrato in Figura 8-4, appena prima dell'output delle tensioni di riferimento da inviare alle solari sono presenti due blocchi "switch" (uno per la solare sinistra, uno per la destra). Entrambi i blocchi switch sono azionati dalla variabile "Numero fase". Tale variabile serve per scegliere se utilizzare come output dal blocco quello che arriva dal controllore originale delle solari, oppure se utilizzare un valore costante di tensione di set pari a 0,5. Il controllore originale è utilizzato in tutte le fasi della salita gradino e della macchina a stati in cui non è prevista la rotazione del tripode "attorno al gradino", ovvero quando non viene applicato il controllo sulla traiettoria e sull'assetto del sedile. In questi casi "Numero fase" vale 0. Quando, invece, serve il controllo sulla traiettoria e sull'assetto del sedile, il valore calcolato dal controllore originale non è più sufficiente a tenere ferme le solari, ma serve inviare un segnale di riferimento maggiore: per questo si invia 0,5 come tensione di riferimento sia alla solare sinistra che alla destra. Il valore di 0,5 è stato scelto dopo molte prove: permette di tenere ferme le gomme a contatto con il suolo, senza avanzare nelle fasi di controllo traiettoria (in particolare nella Seconda). In questi casi "Numero_fase" vale: 1 se il controllore si trova nella Prima fase; 2 se il controllore si trova nella Seconda fase. La scelta, fatta nel paragrafo 4.1.4, di mantenere le gomme solamente ferme nella Seconda fase viene implementata proprio in questo punto del controllore.





Figura 8-4 Modifica al Controllore delle solari

Per maggiori informazioni riguardanti il resto del controllore delle solari si rimanda a [17].

8.2.2 Controllo portatreno del tripode

Il controllore del portatreno del tripode presenta gli stessi input e output del controllore originale con l'aggiunta di alcuni nuovi input e output. Nella Figura 8-5 che presenta il controllore del portatreno del tripode visto dall'esterno, i nuovi input sono evidenziati in azzurro e i nuovi output in arancione.

I nuovi input sono:

- "n_P", ovvero il feedback della velocità di rotazione del portatreno del tripode. È utilizzato nelle fasi Prima e Seconda, infatti in quelle fasi, come spiegato nel paragrafo 4.1.7, viene fatto un controllo in velocità dei tripodi in funzione dell'angolo di rotazione generico del tripode della singola fase (Δθ[']_P e Δθ^{''}_P).
- "Numero_fase", già descritto nel paragrafo 8.2.1. È il numero della fase di controllo dell'assetto della traiettoria e può valere: 1 se la macchina a stati è nella Prima fase; 2 se si trova nella Seconda fase; 0 se si trova in qualsiasi altra fase.

- I vettori delle costanti "a0", "a1", "a2", "a3" delle tre cubiche di raccordo dei tratti a velocità costante del portatreno del tripode, sempre nelle fasi Prima e Seconda.

In generale, tutte le modifiche e le aggiunte ai sistemi di controllo degli azionamenti sono state fatte per gestire le fasi di controllo traiettoria e assetto della sedia di Wheelchair.q.



Figura 8-5 Controllore portatreno tripode, esterno

I due termini di output aggiunti al controllore del portatreno del tripode sono "Delta_teta_P_1" e "Delta_teta_P_2", ovvero proprio gli angoli in funzione dei quali vengono calcolati gli angoli di set delle ruote pivotanti e dell'angolo di assetto del sedile in ogni istante delle fasi a controllo traiettoria e assetto.

Per capire l'utilità di questi due angoli di rotazione del tripode si faccia riferimento allo schema di Figura 8-6. Le fasi Prima e Seconda, per funzionare, hanno bisogno che al portatreno del tripode venga dato un angolo di rotazione da raggiungere in ciascuna delle due fasi. Sul tripode viene quindi fatto un controllo sulla sua velocità di rotazione, come già descritto. Gli angoli β^{SET} e θ_{DU}^{SET} in quelle fasi, invece, ricavano i loro angoli di set in ogni istante delle fasi a partire dall'angolo di rotazione generico del portatreno in quella fase ($\Delta \theta_P$ generico). Quindi, nei controllori delle pivotanti e dell'inclinazione del sedile vengono fatte delle lavorazioni geometriche partendo dal $\Delta \theta_P$ generico e si ottengono gli angoli di set. Per questo motivo è importante estrarre queste informazioni ("Delta_teta_P_1" e "Delta_teta_P_2") dal controllore del portatreno del tripode. Come si vedrà nel seguito, in realtà non sarebbe necessario dividere in due output l'angolo di rotazione del tripode, ma in questo modo la trattazione risulta più chiara.



Figura 8-6 Logica di gestione angoli

Internamente il controllore del tripode lavora partendo dallo schema originale riportato in [17]. Per le fasi che non sono né la Prima, né la Seconda viene svolto un controllo in posizione della variazione dell'angolo del portatreno: in quei casi la macchina a stati impone, in ogni sottofase un angolo di rotazione che il tripode deve percorrere per poter uscire da tale sottofase.

Per quanto riguarda, invece, le fasi Prima e Seconda di controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile, è stata aggiunta una parte di controllore adibita esattamente alla gestione di queste fasi. In queste due fasi il controllo viene fatto sulla velocità di rotazione del portatreno del tripode in funzione dell'angolo di cui ha ruotato fino a quel momento.

Lo schema completo del controllore del tripode è visibile in Figura 8-7 e la parte aggiunta per il controllo in velocità è riconoscibile perché evidenziata dall'area di colore viola.



Figura 8-7 Controllore portatreno tripode, interno

La Figura 8-8 presenta un ingrandimento della parte del controllo in velocità del controllore del portatreno. Per apprezzare meglio le componenti di questa aggiunta al controllore del tripode si consiglia comunque di utilizzare il modello Simulink.

In alto a destra è presente lo switch di selezione del segnale da inviare al driver del motore del portatreno del tripode. Sono presenti tre ingressi più uno per la selezione della porta da far passare. Il selettore dell'ingresso è la variabile "Numero_fase": se è pari a zero passa la tensione calcolata con il metodo classico del resto del controllore; se è pari a 1 o a 2 la macchina a stati si trova nella Prima o nella Seconda fase e passa la tensione calcolata con il controllo in velocità.

In basso a sinistra è presente una Matlab function che calcola il set di velocità da dare al portatreno del tripode in ogni istante. Il set ("y" o "TetaP_punto_set") in uscita dalla funzione è calcolato a partire: dalle costanti "a0", "a1", "a2", "a3" delle cubiche di velocità calcolate in una Matlab function della macchina a stati; dal numero della fase in cui si trova la macchina a stati; dall'angolo totale di cui deve ruotare il tripode per uscire dalla fase ("D_TetaP_SET") inviato dalla macchina a stati e calcolato in una Matlab function in funzione dell'altezza del gradino e dell'angolo α_0 ; dall'angolo generico di cui il tripode ha ruotato fino a quel momento nella fase ("Delta_tetaP_fase").

Come detto, "a0", "a1", "a2", "a3", "D_TetaP_SET" e "Numero_fase" arrivano dalla macchina a stati. Invece, "Delta_tetaP_fase" viene calcolato internamente al controllore del tripode. In particolare, con riferimento alla zona in altro a sinistra della Figura 8-8 adibita proprio a questa operazione, "Delta_tetaP_fase" è calcolato come differenza tra due angoli: "TetaP_fb_fase_generico" e "TetaP_fb_iniziale_fase". "TetaP_fb_iniziale_fase" è l'angolo di feedback che la ruota fonica del portatreno segna quando inizia la Prima o la Seconda fase. Il suo valore viene salvato per l'intera fase (Prima e poi Seconda) grazie al blocco "Triggered Subsystem1" che viene resettato quando c'è il passaggio dalla Prima alla Seconda fase grazie al comando "Trip_RESET" inviato dalla macchina a stati. "TetaP_fb_fase_generico" è l'angolo generico segnato dalla ruota fonica del portatreno nella sottofase e varia ruotando il "TetaP_fb_fase_generico" portatreno durante le fasi. Sottraendo da il "TetaP_fb_iniziale_fase" si ottiene di quanto ha girato il portatreno in quel generico istante di quella fase (Prima o Seconda). Tale differenza viene chiamata "Delta_tetaP_fase" appunto.

Questo "Delta_tetaP_fase" è lo stesso angolo, a meno di una costante di trasformazione da [°] a [rad], che viene inviato ai controllori delle pivotanti e dell'assetto del sedile e che viene utilizzato per le loro lavorazioni geometriche.

Ottenuto, quindi, il set di velocità calcolato dalla funzione Matlab, è possibile fare un confronto con il feedback di velocità del tripode, come già veniva fatto nella prova a gradino di velocità del tripode del paragrafo 7.2. In questo caso, però, l'errore che nasce dal confronto tra set e feedback non viene inviato direttamente al blocco PID. A questo errore viene sommato un valore costante e pari a: 0,3 se "Numero_fase" è pari a 1, ovvero se è in atto il controllo della prima cubica, del tratto a velocità ω_1 del portatreno costante o della seconda cubica; 0,25 se "Numero_fase" è pari a 2, ovvero se è in atto il controllo a velocità ω_2 costante o della terza cubica. Si è reso necessario aggiungere questa costante perché all'inizio della Prima fase tutto è fermo e pari a zero: sia il feedback dell'angolo di rotazione del tripode della fase ("Delta_tetaP_fase"), sia l'errore di velocità e, quindi, anche il set di tensione di riferimento: il tripode non partirebbe. In questo modo, invece, il sistema riesce a mettersi in moto e a seguire un buon andamento di velocità, come si vedrà nel paragrafo 8.4.

Il risultato viene inviato al blocco PID, poi ad un blocco di saturazione e successivamente allo switch inizialmente descritto. Nel blocco PID è stato scelto un fattore proporzionale pari a P = -20, mentre è stato eliminato il contributo integrativo. Al filtro è stata assegnata una frequenza di taglio di 1*Hz*, come nel caso della prova a gradino di velocità.



Figura 8-8 Controllore portatreno tripode, aggiunta per controllo velocità

8.2.3 Controllo pivotanti

Il controllore delle ruote pivotanti presenta ancora gli ingressi e le uscite originali, ma sono state aggiunte molte altre variabili in ingresso. La Figura 8-9 riporta l'esterno di tale controllore. I nuovi input sono evidenziati in azzurro. Anche in questo caso le variabili aggiunte sono utilizzate per il controllo delle pivotanti nelle fasi Prima e Seconda. In particolare: "Delta_teta_P_1" e "Delta_teta_P_2" arrivano dal controllore del portatreno del tripode; "Numero_fase" dalla macchina a stati; le altre variabili in azzurro sempre dalla macchina a stati, ma vengono calcolate in alcune Matlab function in funzione della posizione della carrozzina nel momento di inizio salita del gradino e dell'altezza del gradino. Per il significato di queste ultime variabili in input al controllore delle pivotanti si faccia riferimento al paragrafo 4.1.



Figura 8-9 Controllore ruote pivotanti, esterno

La Figura 8-10 riporta lo schema complessivo del controllore delle pivotanti. La parte evidenziata dall'area verde a destra è rimasta invariata da [17], pertanto si rimanda a quel lavoro per la descrizione accurata. In generale, comunque, questo controllore, come anche quello dell'assetto del sedile, lavora confrontando l'angolo di set con quello di feedback: se si produce un errore positivo o negativo, il motore viene azionato in una delle due direzioni di rotazione. L'errore viene fatto passare attraverso un blocco di "dead zone" con limiti variabili. Per le fasi a controllo continuo dell'angolo delle pivotanti e del motore per l'assetto

del sedile (fasi Prima e Seconda), è stata aggiunta una "dead zone" nulla per ridurre al minimo il ritardo di azionamento di questi motori in quanto il controllo deve essere il più possibile continuo in quei momenti. Viene scelta l'una o l'altra "dead zone" grazie alla variabile "Numero_fase" che seleziona quale dei due segnali far passare attraverso lo switch a valle delle due "dead zone".



Figura 8-10 Controllore ruote pivotanti, interno

L'errore tra set e feedback di θ_{DU} viene calcolato tra il feedback in [°] e il set. Il set viene scelto nuovamente tramite la variabile "Numero_fase" che sceglie se far passare attraverso un blocco switch il set frutto dei calcoli dell'angolo di set della Prima fase, della Seconda o di una delle altre fasi generiche. La lavorazione geometrica dell'angolo "Delta_teta_P_1" per avere il set di θ_{DU} nella Prima fase è evidenziata dall'area viola in alto in Figura 8-11. Si tratta esattamente dei calcoli del paragrafo 4.1, rigirati per ottenere in uscita l'angolo θ_{DU}^{SET} istante per istante. Lo stesso identico discorso vale per la Seconda fase, la cui lavorazione geometrica è evidenziata in azzurro. Infine, in basso, è presente il blocco di input che definisce, grazie all'informazione inviata dalla macchina a stati, il θ_{DU}^{SET} da raggiungere in tutte le altre fasi.



Figura 8-11 Controllore ruote pivotanti, ingrandimento su modifiche

8.2.4 Controllo assetto sedile

Anche il controllore del sedile (angolo β) effettua un controllo in posizione. Esternamente il controllore è mostrato in Figura 8-12. Per gli ingressi e le uscite valgono gli stessi discorsi fatti per le pivotanti. In questo caso è presente un altro input: "TetaPC_0", ovvero l'inclinazione del telaio PC appena inizia la salita automatica del gradino. Questa variabile viene calcolata in una Matlab function della macchina a stati ed inviata al controllore dell'assetto del sedile per il calcolo del β^{SET} nelle fasi Prima e Seconda.



Figura 8-12 Controllore assetto sedile, esterno

La sua logica di funzionamento è esattamente la stessa delle pivotanti e lo schema complessivo è visibile in Figura 8-13.



Figura 8-13 Controllore assetto sedile, interno

8.3 Macchina a stati – Salita automatica gradino

All'interno della macchina a stati della salita automatica del gradino si è lavorato, oltre che per la diversa gestione di alcune delle fasi, in particolare per il controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile, anche per velocizzare il superamento del gradino. Per fare ciò si è agito su vari aspetti: velocità delle pivotanti e dell'assetto del sedile variabile tra i vari stati; riduzione o eliminazione dei tempi morti tra le fasi; riduzione del tempo impiegato per ottenere dal lidar i dati relativi al gradino. Infine, lo stesso controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile sono fonte di notevole risparmio di tempo rispetto alle analoghe fasi del precedente controllore.

La macchina a stati presenta gli input e gli output descritti nella Tabella 8-2.

Tabella 8-2 Elenco Input e Output Macchina a stati

Variabile	Input/	Descrizione
	Output	
tP_FB	Ι	Angolo di feedback del portatreno (0° – 120°).
tP_ERR	Ι	Errore tra set e feedback sull'angolo del portatreno.
tDU_FB	Ι	Angolo di feedback delle ruote pivotanti.
ang_sol_L_ERR	Ι	Errore tra set e feedback dell'angolo di rotazione della solare
		sinistra.
ang_sol_R_ERR	Ι	Errore tra set e feedback dell'angolo di rotazione della solare
		destra.
CSL_FB	Ι	Coppia di feedback della solare sinistra.

CSR_FB	Ι	Coppia di feedback della solare destra.	
CP_FB	Ι	Coppia di feedback del portatreno.	
avvio_ricerca	Ι	Segnale di avvio sequenza automatica (tasto a fungo grigio).	
ritorno_in_attesa	Ι	Segnale di arresto sequenza automatica (spostamento in avanti	
		della levetta del joystick del telecomando utente).	
beta	Ι	Angolo di feedback dell'inclinazione relativa tra i sotto-telai	
		PC e RC.	
Delta_teta_P_FB	Ι	Angolo di rotazione nella fase Prima o Seconda del controllo	
		traiettoria e assetto sedile.	
Teta_M	Ι	Angolo di inclinazione assoluto del telaio RC, da inclinometro.	
d_xL_SET	0	Avanzamento di set delle ruote del tripode sinistro.	
d_xR_SET	0	Avanzamento di set delle ruote del tripode destro.	
ang_sol_RESET	0	Segnale di reset per gli "integratori tempo-discreti" del	
		controllore delle solari.	
d_tP_SET	0	Angolo di rotazione di set del portatreno del tripode nella	
		sottofase.	
tP_RESET	0	Segnale di reset per gli "integratori tempo-discreti" del	
		controllore del tripode.	
tDU_SET	0	Angolo di set delle ruote pivotanti nella sottofase.	
start	0	Segnale di sblocco dei freni.	
SCW	0	Segnale di commutazione del controllo coppia/velocità dele	
		solari (0/5V). Impostato a 0, ovvero, controllo in velocità.	
pwc	0	Velocità di azionamento del sedile da controllore SG (0 – 10V).	
pww	0	Velocità di azionamento delle pivotanti da controllore SG (0 –	
		10V).	
filtri	0	Segnale di azionamento dei filtri dei controllori delle solari	
		(0/1).	
Trip_Prop	0	Valore componente proporzionale per controllo del portatreno	
		nelle fasi non a controllo della traiettoria.	
Trip_Int	0	Valore componente integrativa per controllo del portatreno	

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
		nelle fasi non a controllo della traiettoria.	
set_angoli	Ο	Vettore contenente gli angoli di set delle fasi del controllore	
		originale. Vedere [17] per maggiori informazioni.	
blocco	0	Segnale di blocco di tutti gli azionamenti se uguale a 1. Sblocco	
		di tutti gli azionamenti se uguale a 0.	
fase	0	Variabile per capire in quale fase si trova il controllore. Utile	
		per il debug.	
cond	0	Condizione salita (0/1). Se pari a 1, il gradino è considerato	
		superabile. Se è pari a 0, il gradino è considerato non	
		superabile.	
d_e	0	Distanza orizzontale del lidar dal gradino misurata dal lidar.	
h_e	0	Altezza gradino misurata dal lidar.	
e_e	0	Spazio oltre il gradino misurato dal lidar.	
d_MAX	0	Distanza di traslazione massima della carrozzina per il	
		contatto delle gomme del tripode con il gradino.	
TetaPC_0	0	Inclinazione del telaio PC all'inizio della sequenza automatica	
		di salita gradino.	
hLidar	0	Altezza del lidar calcolata dalla configurazione di misurazione	
		della carrozzina ovvero tramite gli angoli di feedback.	
Numero_fase	0	Variabile che definisce se la macchina a stati si trova nella	
		Prima fase (1), nella Seconda (2) o genericamente in un'altra	
		fase (0).	
beta_set	0	Angolo di set di inclinazione relativa tra i telai PC e RC nella	
		fase generica.	
h_cw1, h_cw2,	0	Le variabili che servono per il controllo della traiettoria e	
alpha_uno,		dell'assetto del sedile nella Prima e nella Seconda fase. Vedere	
alpha_due,		paragrafo 4.1.	
alpha_piano_0,			
alpha_scala_nom,			
a0, a1, a2, a3,			
delta_tetaP_1_tot,			

delta_tetaP_2_tot	

È possibile, quindi, passare a descrivere la macchina a stati concentrando l'attenzione sulle modifiche apportate alla versione originale presentata in [17].

Internamente la nuova macchina a stati ha una forma molto simile a quella originale. Sono state aggiunte, in alcune fasi di tale macchina, delle funzioni che servono per poter controllare la traiettoria e l'assetto del sedile nelle fasi Prima e Seconda. Inoltre, come descritto nel paragrafo 3.1, alcune fasi sono state accorpate diversamente dal modello originale.

La logica di funzionamento della macchina a stati originale viene riportata in Figura 8-14. La nuova logica di funzionamento rimane molto simile. Quello che cambia è il "luogo" in cui vengono calcolate le dimensioni del gradino (altezza, distanza e spazio dopo il gradino). Nel modello originale queste dimensioni erano calcolate in una funzione Matlab interna alla macchina a stati a valle del trasferimento delle coordinate di 5000 punti inviati dal lidar. Nel nuovo modello, invece, queste dimensioni vengono calcolate dalla scheda Teensy e passate via seriale a Speedgoat nella sottofase "MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA". Purtroppo, la comunicazione seriale tra Teensy e Speedgoat non è ancora funzionante. Per questo motivo, nel modello attualmente utilizzato, le quote del gradino vengono già inserite in quella fase della macchina a stati. Rimane anche la funzione Simulink di ricezione dei punti dal lidar ("lidar_out = scan_lidar") che però non svolge alcun compito, se non quello di permettere il funzionamento della macchina a stati. Di conseguenza rimane anche il vettore "misure" di dimensione (5000x2) adibito, nel modello originale, al salvataggio delle coordinate polari dei 5000 punti ottenuti dal lidar per la scansione.

Implementazione del sistema di controllo in salita gradino



Figura 8-14 Logica funzionamento macchina a stati, fonte [17]

Si passa ora alla descrizione delle fasi della macchina a stati.

8.3.1 Fase ATTESA

Quando si seleziona dal pannello di controllo dell'utente la modalità di controllo per la salita automatica del gradino, la macchina a stati del controllore entra nella fase di "ATTESA" (Figura 8-15).

Entrando in questa fase, tutti gli arti della carrozzina vengono bloccati (blocco = 1). I blocchi di integrazione tempo-discreti dei controllori delle solari e del tripode vengono resettati, come spiegato nei relativi paragrafi di descrizione dei controllori. La variabile "fase" viene posta pari a 1. Agli azionamenti viene inviato un set nullo in quanto non devono muoversi. La variabile "start" viene posta pari a 1, preparando, di fatto, il controllore e gli azionamenti a ricevere dei set. La variabile "scw" viene posta pari a 0, cioè per le solari viene scelto un controllo in velocità: rimane questo tipo di controllo durante tutta la fase di salita automatica. Vengono imposti dei valori iniziali di riferimento di velocità sia per le ruote pivotanti, che per l'assetto del sedile (pwc e pww): quando attivate, le pivotanti e l'assetto del sedile si muoveranno di velocità costante riconducibile a questi due valori.

All'uscita dalla fase "ATTESA", la variabile "fase" viene posta pari a 2, solari e portatreno vengono nuovamente resettati e viene richiamata la funzione Matlab "Calcolo_tetaPC0_alpha_piano0". Tale funzione implementa il calcolo dell'inclinazione del telaio PC e il calcolo dell'angolo α_0 del portatreno in quel momento di inizio sequenza automatica seguendo la logica descritta nel paragrafo 4.1.3. In input tale funzione richiede l'angolo di inclinazione assoluta della sedia (θ_M), l'angolo di inclinazione delle pivotanti (θ_{DU}), l'angolo β di feedback e l'angolo di feedback del portatreno (θ_P).

Il controllore può uscire da questo stato solo se l'utente preme il tasto a fungo grigio di "inizio_ricerca" del gradino.

ATTESA
en:
i = 1;
blocap = 1;
Numero_fase = 0;
fase = 1;
tP_RESET=1;
ang_sol_RESET = 0;
d_xL_SET = 0;
d_xR_SET= 0;
d_tP_SET = 0;
start = 1;
s cw = 0;
pwc= 4, % Velocita sedia, 0-10 V, 0-8[*/s]
pww = 3.5; % 0-10V, 0-10[%]
ex:
Tase = 2
TP_RESET=0;
ang sol_RESET= 1;
[letaPC_0, alpha_plano_0] = Calcolo_tetaPC0_alpha_plano0(leta_M, t0 0_PB, beta, tP_PB); %[rad],[rad]
MATLAB Function
[TetaPC_0_m, alpha_piano_0_m] = Calcolo_tetaPC0_alpha_piano0 (TetaM_m, tetaDU_FB, Beta_FB, tetaP_FB)

Figura 8-15 Fase ATTESA

[avvio_ricerca > 0.5]

All'uscita dalla fase di attesa si entra nella fase "CREAZIONE_MATRICE_LIDAR" (Figura 8-16). Questa fase è rimasta dal controllore originale, ma serve solo per far funzionare la macchina a stati evitando di creare errori nel funzionamento della salita automatica del gradino. Quello che produce questa fase, in pratica, è un ritardo di 5s per via della creazione della matrice "misure". Nella versione definitiva della macchina a stati, quando, cioè, si riuscirà a comunicare con la scheda Teensy, questa fase sarà da eliminare e si passerà direttamente alla fase successiva.



Figura 8-16 Fase fittizia all'uscita dall'ATTESA

8.3.2 Fase MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA

Nella fase "MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA" (Figura 8-17), vengono "misurate" le dimensioni del gradino. Al suo interno è rimasto l'indice "i", ma solo per non avere problemi di funzionalità della macchina a stati. Sono rimaste, inoltre, una riga commentata che richiama la funzione "ricerca_gradino_salita" e la relativa funzione Matlab. Essendo commentate non hanno effetti sul controllore. Rimangono in quanto possono essere utili per lavori futuri se, per qualche motivo, si vorrà lavorare nuovamente con l'invio di tutti i punti da parte del lidar a Speedgoat.

Sono, inoltre, presenti: una funzione Simulink, anch'essa commentata che avrà il compito di effettuare la comunicazione seriale tra Teensy e Speedgoat; una riga che fornisce le variabili riguardanti le dimensioni del gradino che, nella versione definitiva, dovranno arrivare dalla Teensy e quindi dalla funzione Simulink commentata di questa fase. La comunicazione seriale ancora non funziona. Ciononostante, come descritto nel paragrafo 6.4.2, la Teensy è già stata programmata per elaborare i punti letti dal lidar e calcolare al suo interno le dimensioni riguardanti il gradino. La macchina a stati può uscire da questa fase e proseguire con la fase successiva solo se la distanza dal gradino è inferiore a 800mm e se il gradino è considerato superabile.



Figura 8-17 Fase MISURAZIONE_GRADINO_IN_SALITA

La gestione delle informazioni riguardanti il gradino viene fatta nello stesso modo della macchina a stati originale presentata in [17]. Pertanto, a seconda dei valori di "cond" e "d_e", la macchina a stati viene indirizzata verso una delle fasi in uscita da questa. Per maggiori informazioni riguardo la gestione dei casi con "d_e > 800 e/o cond = 0", si rimanda a [17] in quanto tali fasi non sono cambiate.

8.3.3 Fase CALCOLO_DEGLI_ANGOLI

Se il gradino viene ritenuto superabile, la macchina a stati entra nella fase "CALCOLO_DEGLI_ANGOLI" (Figura 8-18). Entrata in questa fase, la macchina a stati pone la variabile "fase" pari a 5. Vengono, inoltre, richiamate tre funzioni Matlab per il calcolo di alcune variabili utili al funzionamento del resto della macchina. In particolare:

- La funzione Matlab "cinematica" calcola gli angoli di set che gli arti di Wheelchai.q devono raggiungere in alcune delle fasi della macchina a stati. I valori degli angoli da raggiungere nelle varie fasi calcolati nella funzione vengono salvati nel vettore "set_angoli" che viene più volte richiamato nella macchina a stati. La funzione rimane invariata rispetto al modello originale, quindi si rimanda a [17] per i dettagli.
- La funzione Matlab "costanti_fase_prima_e_seconda", calcola in funzione dell'altezza del gradino e degli angoli iniziali di inclinazione del sotto-telaio PC e del tripode, le variabili (che da questo momento diventano costanti) per la gestione del controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile. Si rimanda al paragrafo 4.1 per i significati delle variabili calcolate in questa funzione e per la logica di calcolo.
- La funzione Matlab "Costanti_cubiche_TetaP_punto" calcola i parametri delle tre cubiche di raccordo di velocità del tripode nelle fasi Prima e Seconda di rotazione del

tripode attorno al gradino. Per le informazioni riguardo la logica della funzione si rimanda al paragrafo 4.1.7. Questa funzione non è dipendente dall'altezza del gradino e dalla configurazione iniziale della carrozzina, pertanto, potrebbe essere inserita nello script Matlab iniziale "Loader". Viene inserita qui perché è il contesto in cui viene utilizzata questa specifica funzione e per evitare, in futuro, di avere contrasti con cubiche di raccordo da usare, ad esempio, per la discesa del gradino o per il superamento della gradinata.

Una volta che le funzioni Matlab hanno calcolato le variabili, la macchina a stati procede allo stato successivo abbassando la velocità del sedile (pwc) a 2,5.

	[d_e <= 800 && cond == 1]
CALCOLO_DEGLI_ANGOLI en: fase = 5; set_angoli = cinematica(h_e, tP_FB); [alpha_uno, alpha_due, alpha_scala_nom.delta_tetaP_1_tot, delta_tetaP_2_tot, h_cw1, h_cw2] = costanti_fase_prima_e_seconda(h_e, alpha_piano_0, TetaPC_0 [a0, a1, a2, a3] = Costanti_cubiche_TetaP_punto; MATLAB Function Vettore_angoli = cinematica(hh, tetaP_FB_2));
MATLAB Function [alpha_uno_m, alpha_due_m, alpha_scala_nom_m, delta_tetaP_1_tot_m, delta_tetaP_2_tot_m, h_cw1_m, h_cw2_m] = costanti_fase_prima_e_seconda(h_e_n	n, alpha_piano_0_m, TetaPC_0_m)
MATLAB Function [a0_m, a1_m, a2_m, a3_m] = Costanti_cubiche_TetaP_punto	
	{pwc = 2.5;}

Figura 8-18 Fase CALCOLO_DEGLI_ANGOLI

8.3.4 Fase A0_A1

La fase "A0_A1" della macchina a stati è riportata in Figura 8-19. Entrando in questa fase:

- i freni vengono sbloccati (blocco=0);
- la variabile "fase" viene posta pari a 8;
- i controllori di solari e tripode vengono resettati portando a zero la variabile se prima era posta pari a uno e viceversa;
- si impone una distanza di traslazione orizzontale alle solari pari alla distanza d_MAX più una quota di traslazione aggiuntiva (175 [mm]) per essere sicuri di raggiungere il gradino (vista l'incertezza della lettura del lidar);
- al tripode non viene richiesta nessuna rotazione;
- alle pivotanti viene chiesto di rimanere con lo stesso angolo di inclinazione;

 all'angolo β viene chiesto di raggiungere un angolo di inclinazione che deve essere mantenuto costante (a livello di inclinazione assoluta) durante le successive fasi A2_A3 e A4 (Prima e Seconda).

Per uscire da questa fase, a partire da mezzo secondo dopo l'ingresso nella fase A0_A1, viene fatto un controllo sulla coppia a cui sono sottoposte le solari e se viene superato un certo livello significa che entrambe le gomme sono arrivate a contatto con il gradino. Inoltre, si controlla che l'angolo β e l'angolo delle pivotanti abbiano raggiunto, entro certi limiti di tolleranza, gli angoli di set. Nel caso delle pivotanti viene controllato che non sia cambiato l'angolo per qualche motivo. Infine, nella transizione viene cambiata la velocità della sedia per adattarla alla richiesta di velocità della fase successiva.



Figura 8-19 Fase A0_A1

8.3.5 Fase A2_A3_Prima_Fase

La fase "A2_A3_Prima_Fase" della macchina a stati è riportata in Figura 8-20. Questa è la prima delle due fasi del controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile. Inizialmente vengono azionati i freni e resettati i blocchi di integrazione tempo-discreti delle solari e del tripode. Dopo due decimi di secondo dall'ingresso nella fase, i freni vengono sbloccati e la fase controllata ha inizio. La variabile "Numero_fase" viene posta pari a 1, così da attivare gli switch dei controllori dei 4 arti utilizzati da Wheelchair.q per la salita gradino. Alle solari non viene chiesto alcun avanzamento, ma sono tenute ferme da un segnale che è stato sbloccato dalla variabile "Numero_fase" all'interno del controllore delle solari. Al tripode viene chiesto di compiere un angolo di rotazione pari a "delta_tetaP_1_tot" calcolato nella Matlab function "costanti_fase_prima_e_seconda" della fase "CALCOLO_DEGLI_ANGOLI" (paragrafo 8.3.3). Ciononostante, come già descritto più volte, per il tripode in questa fase
verrà utilizzato un controllo in velocità. I filtri delle solari sono disattivati, anche se non è un'operazione fondamentale. Al tripode vengono mandati i valori Proporzionale e Integrativo da inserire nel blocco PID del controllore originale. Questi ultimi due parametri sono inseriti solo per evitare che la macchina a stati dia problemi.

La macchina a stati esce da questa Prima fase quando il tripode ha spazzato l'angolo di set. Viene fatto un controllo solo su questo angolo perché la sequenza deve continuare velocemente verso la fase successiva. Inoltre, grazie alle analisi del paragrafo 4.1.5, si sa che gli azionamenti della sedia e delle pivotanti, se ben tarati come segnali di velocità (pwc e pww), sono in grado di stare dietro al loro set di posizione.

All'uscita, il controllore delle solari viene resettato. Contemporaneamente la velocità di riferimento delle pivotanti viene aumentata a 8 perché nella fase seguente è necessario che sia maggiore.



Figura 8-20 Fase A2_A3_Prima_Fase

Tra questa e la fase successiva non ci devono essere interruzioni dovute a bloccaggi dei freni degli azionamenti, ma deve avvenire un passaggio fluido.

8.3.6 Fase A4_Seconda_Fase

La fase "A4_Seconda_Fase" della macchina a stati è riportata in Figura 8-21. All'ingresso nella fase viene ripetuto il comando di sblocco dei freni. Viene resettato l'angolo di rotazione del tripode. Anche le solari sono nuovamente resettate. Alle solari viene imposto un avanzamento nullo. "Numero_fase" viene portato a 2 per fare in modo che i controllori degli azionamenti si comportino di conseguenza al fatto che la macchina a stati si trova nella Seconda fase. L'angolo di cui deve ruotare il portatreno per uscire dalla fase è, in questo caso,

"delta_tetaP_2_tot". Ciononostante, anche in questa fase il controllo fatto sul tripode è un controllo in velocità. Le pivotanti seguono un angolo di set continuo e frutto della lavorazione geometrica del generico angolo di rotazione del tripode di questa fase. L'angolo di set imposto alle pivotanti salvato nella sesta posizione del vettore "set_angoli" non viene realmente utilizzato. Rimane solo per avere, all'uscita da questa fase, un set dell'angolo θ_{DU} pari a quello conclusivo della Seconda fase controllata. In questo modo, se le pivotanti finiscono in ritardo la fase, hanno tempo di portarsi all'ultimo angolo di set appena dopo che sono uscite da questa Seconda fase. Le variabili "filtri" e "Trip_Prop" sono rimaste per evitare problemi di funzionamento della macchina a stati.

Per uscire dalla fase viene fatto un controllo sull'angolo di rotazione del tripode. In uscita viene resettato il controllore delle solari; vengono variate le velocità di attuazione del sedile e delle pivotanti; la variabile "Numero_fase" viene portata a zero.



Figura 8-21 Fase A4_Seconda_Fase

Conclusa questa fase, le fasi di controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile sono completate.

8.3.7 Fase A5

La fase "A5" della macchina a stati è riportata in Figura 8-22. All'ingresso in questa fase la carrozzina si trova con il tripode a livello del gradino superiore e in appoggio sulle ruote pivotanti e sulle gomme anteriori del tripode. Pertanto, la carrozzina viene fatta avanzare attivando le solari ($d_xL_SET = 320[mm]$ e $d_xR_SET = 320[mm]$) in modo da portare in appoggio anche le gomme posteriori del tripode sul gradino superiore. Gli altri azionamenti non vengono attivati.

Per uscire dalla fase viene fatto un controllo sulla distanza orizzontale che le solari ancora devono percorrere per raggiungere il set. Vengono utilizzati i segnali "ang_sol_L_ERR" e "ang_sol_R_ERR" in arrivo dal controllore delle solari. Contemporaneamente la velocità delle pivotanti viene nuovamente cambiata per avere ancora una buona velocità di movimento delle pivotanti, ma evitando oscillazioni eccessive attorno al valore di set della fase successiva.



Figura 8-22 Fase A5

8.3.8 Fase A6

La fase "A6" della macchina a stati è riportata in Figura 8-23. Nella fase A6 il baricentro totale della carrozzina viene spostato in avanti tra le sole ruote del tripode. Per fare questo, dopo 2 decimi di secondo che la macchina a stati è entrata in questa fase, si impone un angolo di set alle ruote pivotanti. Solo dopo 2,5 secondi dall'ingresso nella fase viene attivato il portatreno del tripode affinché compia una rotazione in senso antiorario per accompagnare lo spostamento del baricentro totale iniziato con il movimento delle pivotanti. Il ritardo nella generazione del set per il portatreno è dovuto al fatto che per evitare oscillazioni delle ruote pivotanti attorno al valore di set da raggiungere, la velocità è stata abbassata di molto rispetto al valore massimo. Questo comporta che la rotazione del tripode di questa fase risulterebbe troppo veloce rispetto al movimento delle pivotanti se il moto dei due azionamenti iniziasse contemporaneamente. Come risultato si avrebbe prima uno spostamento della carrozzina tra le ruote posteriori del tripode e le ruote delle pivotanti, seguito, ad un certo punto, da un'oscillazione in avanti della carrozzina fino a poggiarsi sulle ruote del tripode. Questo spostamento di punti di appoggio, però non è un movimento

stabile e sicuro per la carrozzina e per l'occupante: si rischierebbe di far saltare fuori dalla sedia l'occupante o di ribaltare la sedia in avanti. Per questo motivo si è reso necessario agire con un ritardo nell'inizio dell'azionamento del tripode del portatreno.

Dopo 2,6 secondi dall'ingresso nella fase, la macchina a stati controlla se il tripode e le pivotanti hanno raggiunto i valori di set per continuare con la fase successiva. Contemporaneamente alla transizione alla fase successiva la velocità delle pivotanti viene nuovamente alzata.



Figura 8-23 Fase A6

8.3.9 Fasi A7, A8, A9, FINE_SEQUENZA

Le fasi "A7", "A8", "A9" e "FINE_SEQUENZA", sono molto simili a quelle del modello originale. Sono stati solamente ridotti i tempi morti tra le fasi e al loro interno per velocizzare il processo.

8.4 Risultati sistema di controllo salita gradino

In questo paragrafo vengono presentati i risultati sperimentali del nuovo sistema di controllo. Inizialmente vengono mostrati i risultati di interesse ottenuti dagli scope di Simulink; successivamente viene mostrato il risultato reale sulla traiettoria di alcuni punti di Wheelchair.q mostrando un confronto tra le traiettorie ottenute con il vecchio sistema di controllo e con il nuovo.

La Figura 8-24 mostra l'andamento nel tempo delle variabili "fase" e "Numero_fase" della macchina a stati della sequenza automatica di salita gradino. Dai risultati sperimentali si è visto che il tempo per completare l'intera fase di superamento gradino è scesa da circa 1 minuto e 35 secondi a 57 secondi. Questo tempo, quando sarà implementato il passaggio di dati tra Teensy e Speedgoat, potrebbe essere ridotto ulteriormente di 2 secondi circa.



Figura 8-24 fase e Numero_fase sperimentali

La Figura 8-25 riporta l'andamento del set e del feedback dell'angolo di rotazione del tripode nelle due fasi di controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile in funzione del tempo (fasi Prima e Seconda). Come si può osservare, i due angoli di rotazione del tripode vengono raggiunti e in quei punti il feedback si azzera per passare alla fase successiva, come dovrebbe. Il feedback è frastagliato per via della poca precisione di realizzazione della ruota fonica del tripode; rimane comunque un segnale gestibile.



Figura 8-25 Angolo di rotazione del tripode nelle fasi Prima e Seconda sperimentale

La Figura 8-26 riporta, invece, l'andamento della velocità di rotazione del tripode nel tempo nelle fasi Prima e Seconda. Sono visibili le due zone a velocità di rotazione costante e anche le tre fasi di raccordo delle velocità. A causa del feedback frastagliato della posizione del portatreno, anche il set di velocità non è molto liscio. Ciononostante, il tripode si muove in maniera pulita e seguendo abbastanza bene l'andamento della velocità di set. Solamente l'ultima cubica che porta all'arresto del portatreno non è completamente soddisfacente: infatti, finita la Seconda fase la velocità del tripode non è nulla. Tale velocità però si annulla poco dopo la conclusione della Seconda fase. Non si è intervenuto per risolvere questa imprecisione in quanto dalle prove sperimentali non risulta dare problemi al superamento del gradino.



Figura 8-26 Velocità di rotazione del tripode nelle fasi Prima e Seconda

La Figura 8-27 riporta l'andamento dell'angolo β dell'assetto del sedile nelle due fasi Prima e Seconda. È presente anche la variabile "Numero_fase" per distinguerle. Il β di set è quello di colore ciano e in una prima parte segue l'andamento del controllore che si occupa della Prima fase (linea blu), mentre in un secondo momento (al cambio di fase) segue l'andamento della seconda parte del controllore della traiettoria e dell'assetto (Seconda fase, linea rossa). Il set si raccorda bene con gli angoli di set delle altre fasi sia all'inizio della Prima fase che alla fine della Seconda fase. Anche tra di loro sono ben raccordate le curve, come dovrebbe essere. In viola, invece, è riportato il feedback dell'angolo β .



Figura 8-27 Angolo Beta in Prima e Seconda Fase

L'ingrandimento delle informazioni che riguardano l'angolo β è riportato in Figura 8-28. È interessante confrontare il set e il feedback di β delle linee ciano e viola. Il feedback risulta sempre in ritardo rispetto al set. In particolare, da quando si crea l'errore tra set e feedback passa circa mezzo secondo prima che β inizi a variare. Questo ritardo è proprio dei driver dei motori dell'assetto sedile e delle pivotanti. Questo problema era già stato segnalato in [20]. Il problema consiste nel fatto che questi driver hanno un meccanismo che blocca le rampe di azionamento dovute ad un segnale di set: quando i driver ricevono un segnale lasciano trascorrere mezzo secondo prima di azionare realmente il motore a cui sono collegati. Questo limite non è eliminabile, a meno di ricevere assistenza da Transtecno (produttore dei driver di questi motori). Questo tipo di driver, perciò, al momento, non è in grado di compiere un preciso controllo in continuo.

Per quanto riguarda, invece, le velocità scelte per β nelle due fasi, si può ritenere siano delle buone scelte, in quanto, soprattutto nella Prima fase, si vede come β di feedback scenda con inclinazione simile a quello di set. Nella Seconda fase questa caratteristica è meno apprezzabile per via del tratto di lunghezza limitata.



Figura 8-28 Angolo Beta in Prima e Seconda Fase, ingrandimento

La Figura 8-29 mostra l'andamento del β^{SET} calcolato dalla funzione Matlab utilizzata per studiare questo sistema di controllo (alcuni dei suoi risultati sono già stati mostrati nel capitolo 4. Le condizioni in input allo script Matlab sono le stesse della prova sperimentale. È possibile notare la perfetta corrispondenza tra quello che produce tale funzione e quello che calcola il controllore di Speedgoat (linea di colore ciano della Figura 8-28). Bisogna considerare che l'inclinazione iniziale del telaio PC (θ_{PC}) e del tripode (α_0) sono stati calcolati nel controllore tramite l'apposita funzione presente nella fase "ATTESA" della macchina a stati descritta al paragrafo 8.3.1. Questo solo a conferma del fatto che tale funzione si integra bene con il controllore. Inoltre, facendo riferimento a questa immagine e alla Figura 8-25, si vede che il cambio di fase avviene al giusto angolo di rotazione del portatreno (circa 95°).



Figura 8-29 Risultato atteso dal modello Matlab, Beta

La Figura 8-30 riporta l'andamento dell'angolo θ_{DU} delle pivotanti nelle due fasi Prima e Seconda. È presente anche la variabile "Numero_fase" per distinguerle. Il θ_{DU} di set è quello di colore ciano e in una prima parte segue l'andamento del controllore che si occupa della Prima fase (linea blu), mentre in un secondo momento (al cambio di fase) segue l'andamento della seconda parte del controllore della traiettoria e dell'assetto (Seconda fase, linea rossa). Il set si raccorda bene con gli angoli di set delle altre fasi sia all'inizio della Prima fase che alla fine della Seconda fase. Anche tra di loro sono ben raccordate le curve, come dovrebbe essere. In viola, invece, è riportato il feedback dell'angolo θ_{DU} .

188



Figura 8-30 Angolo pivotanti in Prima e Seconda Fase

La Figura 8-31 mostra un ingrandimento degli angoli di set e di feedback di θ_{DU} . Anche in questo caso sono presenti dei ritardi dovuti al tipo di driver del motore, ma le differenze tra set e feedback, percentualmente, sono meno marcate per via dei più grandi angoli di variazione di θ_{DU} . Anche per il driver di questo azionamento vale lo stesso discorso fatto per il driver dell'angolo β visto che i driver sono identici. Anche per questo motore potrebbe essere utile prevedere di cambiare il tipo di driver o di chiedere l'intervento della casa produttrice Transtecno. Per quanto riguarda la scelta delle velocità delle due fasi, si può ritenere siano state fatte delle buone scelte e che gli studi fatti con il modello Matlab siano stati utili per scegliere le giuste velocità da dare al portatreno del tripode per riuscire a seguire il suo moto con questi due azionamenti ($\beta \in \theta_{DU}$).



Figura 8-31 Angolo pivotanti in Prima e Seconda Fase, ingrandimento

Anche in questo caso, si riporta la Figura 8-32 che mostra l'andamento del θ_{DU}^{SET} calcolato dalla funzione Matlab utilizzata per studiare questo sistema di controllo. Anche in questo caso vale il discorso fatto per l'angolo β e il risultato risulta soddisfacente.



Figura 8-32 Risultato atteso dal modello Matlab, Pivotanti

8.4.1 Traiettorie reali

La Figura 8-33 e la Figura 8-34 riportano le traiettorie di alcuni punti della carrozzina durante una prova di superamento del singolo gradino in salita. La prova è stata effettuata in entrambi i casi partendo con la carrozzina in posizione di marcia in piano e posta a circa 35cm dal bordo del gradino. Nella prima figura la carrozzina utilizza il controllore originale presentato in [17]. Nella seconda figura la carrozzina utilizza il nuovo controllore presentato in questo lavoro di tesi.

La traiettoria del punto C è evidenziata in verde, la traiettoria del punto P in magenta e la traiettoria del centro della ruota che non lavora nel superamento del gradino (punto W) è evidenziata in giallo.

Analizzando le figure è evidente come la traiettoria del punto C sia più controllata e sicura utilizzando il nuovo sistema di controllo. Addirittura, con il vecchio sistema di controllo nella fase di rotazione del tripode attorno alla ruota superiore (seconda rotazione) non c'è il bloccaggio completo della posizione della gomma superiore. Infatti, si nota un arretramento delle traiettorie dei punti P (magenta) e W (giallo) che si ripercuote sul punto C (verde). Viceversa, il nuovo controllore non solo riesce a mantenere la gomma ferma nella

Seconda fase, ma addirittura porta a traslare un po' in avanti la carrozzina. Il controllore originale porta il punto C a percorrere una traiettoria che prima sale, poi scende e arretra e poi risale. Se non ci fosse l'arretramento delle solari nella seconda rotazione sarebbe presente un punto di cuspide. Proprio per eliminare questi effetti è stato studiato il nuovo sistema di controllo.



Figura 8-33 Risultato traiettorie vecchio sistema di controllo

Per quanto riguarda il nuovo sistema di controllo, come si può vedere, la traiettoria verde inizia orizzontale per la traslazione della carrozzina dalla posizione di partenza fino al contatto con il gradino. Inizia quindi la rotazione del tripode attorno al gradino e la pendenza della traiettoria verde diventa leggermente positiva: tende a muoversi lungo una retta di inclinazione α_1 . Questa è la Prima fase. Nonostante i driver dei motori di $\beta \in \theta_{DU}$ non siano adatti al controllo in continuo, il risultato è buono. Per quanto riguarda la traiettoria verde, è presente solo un piccolo bozzo nella traiettoria appena iniziata la Prima fase: in quel piccolo lasso di tempo (0,5 secondi circa) il drive non aziona il motore delle pivotanti e la traiettoria che ne risulta è leggermente sporca, ma in modo trascurabile.

Per quanto riguarda l'assetto del sedile, invece, il risultato che si ottiene sull'inclinazione della sedia (e quindi sul punto blu) è meno soddisfacente in quanto gli errori che il ritardo del driver porta su β sono percentualmente maggiori di quelli relativi all'angolo θ_{DU} . Ciononostante, la sedia durante il controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile (fasi Prima e Seconda) non diventa mai negativo, ovvero la seduta della sedia non si inclina mai in avanti. Al massimo diventa orizzontale.

La Seconda fase, invece, è riconoscibile perché presenta un ulteriore cambio di pendenza rispetto alla Prima fase. La "rettilineità" è meno evidente, anche per via del piccolo avanzamento delle solari che si ottiene nella Seconda fase (si noti la traiettoria gialla che in quella fase non risulta essere esattamente un arco di circonferenza). La traiettoria che ne risulta, comunque, è buona e si raccorda anche bene con la traiettoria della Prima fase e con la traiettoria rettilinea successiva al gradino. Il nuovo sistema di controllo è riuscito a "spianare" le irregolarità imposte dal tripode.



Figura 8-34 Risultato traiettorie nuovo sistema di controllo

Come confronto alla Figura 8-34, la Figura 8-35 riporta la traiettoria ottenuta dal modello Matlab di Prima e Seconda fase.



Configurazioni salita controllata scalino PRIMA e SECONDA FASE

Figura 8-35 Traiettoria completa da modello Matlab

Infine, la Figura 8-36 e la Figura 8-37 riportano gli ingrandimenti specifici delle due fasi per un confronto tra modello Matlab e realtà.



Figura 8-36 Prima fase - Modello Matlab vs Realtà



Figura 8-37 Seconda fase - Modello Matlab vs Realtà

In conclusione, il risultato ottenuto è soddisfacente sia dal punto di vista del controllo della sedia, sia dal punto di vista della riduzione del tempo di superamento del gradino.

9 Conclusioni

In conclusione, in questo lavoro di tesi si è lavorato su più aspetti riguardanti Wheelchair.q. Di seguito vengono ripresi i punti principali:

- È stato studiato e applicato un tipo di controllo della traiettoria e dell'assetto del sedile che permette di ottenere un moto controllato della sedia dell'utente nelle fasi di "rotazione del tripode attorno al gradino" per il superamento in salita del singolo gradino. Aspetto importante è che gli arti si muovono in riferimento ad un unico angolo di rotazione (detto Master).
- Sono state fatte modifiche al controllore originale per implementare il nuovo sistema di controllo e per velocizzare il superamento della salita del gradino.
- È stato fatto uno studio simile per la discesa del singolo gradino, non implementato.
- È stato condotto uno studio riguardo i metodi implementabili per trovare la posizione e l'entità (massa) del baricentro dell'utente. Questa informazione sarebbe utile per conoscere la stabilità della carrozzina in ogni momento e per progettare un controllore che sia generale riguardo il calcolo degli angoli di set da dare alla carrozzina nella fase delicata di appoggio sulle sole ruote del tripode.
- È stata fatta una calibrazione dell'angolo di feedback del portatreno, resa necessaria per via dei lavori di sostituzione della cinghia di trasmissione del moto ai tripodi.
- Si è lavorato sul sistema lidar sostituendo la staffa di supporto per renderla più rigida.
 È stata sostituita la precedente scheda di acquisizione dei dati con una più potente e capiente (una Teensy 3.2). La scheda è stata, inoltre, programmata per ricavare al suo interno i parametri del gradino e per inviarli via seriale ad un ricevitore esterno. Grazie alla maggiore velocità di acquisizione della Teensy è stato possibile eliminare il rumore dei punti acquisiti. Questo permette di salvare meno dati per estrarre le dimensioni del gradino. Infine, è stata implementata la funzione di accensione del lidar solo quando serve che venga fatta una misurazione.

In futuro sarà possibile lavorare per raggiungere i seguenti obbiettivi:

 Sarà necessario completare il lavoro iniziato sulla comunicazione seriale tra Teensy e Speedgoat.

- Si potrà aggiungere un secondo lidar per il controllo della posizione di imbardata della carrozzina rispetto al gradino. La Teensy dovrebbe essere sufficientemente potente e capiente per gestire anche il secondo lidar.
- Si potrà implementare il controllo della traiettoria e dell'assetto della carrozzina nella discesa del singolo gradino.
- Potrebbe essere necessario mappare la posizione del baricentro di Wheelchair.q al variare dei valori degli angoli degli arti della carrozzina. Se verrà implementata anche la misurazione del baricentro dell'utente, sarà possibile ottenere un controllo continuo della posizione del baricentro totale del sistema "utente + Wheelchiar.q".
- Infine, se si vorrà ottenere un preciso controllo degli angoli dell'assetto del sedile e delle ruote pivotanti, sarà necessario sostituire i rispettivi driver dei motori.

10 Bibliografia

- [1] W. H. Organization, «THE WORLD BANK,» [Online].
- [2] «https://www.stannah.it/,» [Online].
- [3] «https://www.contactsrl.it/,» [Online].
- [4] «https://www.vimec.biz/t09-roby/,» [Online].
- [5] «https://www.kspitalia.com/categorieprodotti/yack/,» [Online].
- [6] «https://tgr.it/it/prodotti/scoiattolo-elettronico/,» [Online].
- [7] «https://mobiusmobility.com/,» [Online].
- [8] «https://www.bfreetech.com/,» [Online].
- [9] «https://www.scaleperdisabili.com/sedia-rotelle-elettrica-montascale-cingolitopchair-s/,» [Online].
- [10] «https://www.scewo.com/,» [Online].
- [11] O. A. H. K. S. H. K. M. T. C. L. H. T. A. Sugahara Y., Walking up and down stairs carrying a human by a biped locomotor with parallel mechanism, 2005.
- [12] T. W. Y. W. D. Z. C. Y. X. L. Z. W. Y. L. e. Z. W. S. Yu, A Tip-Over and Slippage Stability Criterion for StairClimbing of a Wheelchair Robot with Variable Geometry Single Tracked Mechanism, 2012.
- [13] A. G. V. F. e. P. P. R. Morales, *Environment adaptation of a new staircase-climbing* wheelchair, 2007.
- [14] N. S. e. F. T., Proposal for personal mobility vehicle supported by mobility support system, 2012.
- [15] F. L., L. T., H. W. e Y. K., *Dynamic and tip-over stability analysis of a planetary stairclimbing wheelchair*, 2012.
- [16] T. F. e. I. R. Yamamoto T., Development of Stair Locomotive Wheelchair with Adjustable Wheelbase, 2012.
- [17] R. Bellincioni, «Controllo di carrozzina per il superamento di barriere architettoniche,» 2020.

Bibliografia

- [18] G. Seccareccia, «Realizzazione di algoritmo di controllo per una sedia a rotelle in grado di superare le barriere architettoniche,» 2021.
- [19] B. Perez, «Progettazione esecutiva di una carrozzina elettrica per il superamento delle bariere architettoniche,» 2017.
- [20] F. Martini, «Sistema di controllo di una carrozzina elettrica per il superamento delle barriere architettoniche,» 2017.
- [21] «http://www.bangtest-china.net/compdetail.php?aid=971,» [Online].
- [22] «https://www.vetek.com/ring-cell-to-be-mounted-under-a-bolt-50kg/article,»[Online].