

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un dispositivo per la guida di carrozze motorizzate da parte di un operatore assistenziale

Relatore

Prof. Giuseppe Quaglia

Correlatore

Dr. Luigi Tagliavini

Candidato

Jamal Musse Farah

A.A 2024/ 2025

*Desidero esprimere la mia gratitudine al Professor Quaglia
per avermi permesso di svolgere la tesi su un argomento interessante
e per la sua cortesia e disponibilità dimostrate durante tutto il percorso.
Un ringraziamento speciale va al Dottor Tagliavini per le sue preziose indicazioni
ed il costante sostegno ricevuto durante la stesura di questa tesi.
In particolare, desidero ringraziare la mia famiglia
per il supporto durante gli anni di studio.*

SOMMARIO

L'obiettivo della tesi è la progettazione e lo sviluppo di un dispositivo che permetta ad un operatore assistenziale di controllare il moto della carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q. La carrozzina è frutto del lavoro del gruppo di ricerca del Politecnico di Torino coordinato dal Professore Quaglia che ha come obiettivo la progettazione di una carrozzina elettrica innovativa che possa muoversi più agevolmente negli spazi ristretti tipici degli ambienti indoor. Il dispositivo, posto sullo schienale della carrozzina, deve essere in grado di generare dei riferimenti in velocità per i motori della carrozzina risultato degli input in forza dell'operatore. L'interfaccia di guida deve garantire una guida sicura ed intuitiva mantenendo allo stesso tempo costi contenuti.

La tesi procede con una prima analisi delle tecnologie in grado di comprendere e trasmettere l'intenzione dell'utente.

Successivamente si prosegue con l'analisi dei requisiti dell'interfaccia di guida e delle possibili soluzioni funzionali ed esecutive.

In seguito, si è proceduto nella realizzazione di un banco prova al fine di valutare l'efficacia del dispositivo nella misurazione delle forze al fine di garantire attraverso il sistema di elettronico di controllo l'ottenimento dei riferimenti in velocità utili per comandare i motori della carrozzina omnidirezionale MoviWE.Q. Infine, sono state realizzate delle prove con la maniglia montata sullo schienale della carrozzina al fine di valutare il funzionamento del sistema.

Indice (Table of Contents)

Indice delle Figure (List of Figures).....	vii
Indice delle Tabelle (List of Tables).....	xi
1 Introduzione.....	12
2 Stato dell'arte	13
2.1 Interazione uomo – macchina	14
2.2 Manipolatori industriali	17
2.3 Controllo forza – posizione	19
2.4 Caso studio: Confronto maniglia - joystick.....	20
3 Requisiti.....	23
4 Concept	26
5 Progettazione funzionale.....	28
5.1 Progettazione funzionale con sensore a sei assi.....	28
5.2 Progettazione funzionale con guide prismatiche	29
5.3 Progettazione funzionale con coppie rotoidali	33
6 Progettazione esecutiva.....	37
6.1 Progettazione esecutiva con sensore a sei assi.....	37
6.2 Progettazione esecutiva con guide prismatiche.....	40
6.3 Progettazione esecutiva con coppie rotoidali	46
7 Confronto progetti esecutivi.....	51
8 Ottimizzazione del design esecutivo e prototipo.....	52
9 Analisi statica	57
10 Sperimentazione	67
10.1 Banco prova.....	67
10.1.1 Maniglia a due mani	71
10.1.2 Maniglia ad una mano	73
10.2 Sensori capacitivi.....	77

11	Sistema elettronico di controllo.....	79
11.1	Mappatura forza - velocità.....	81
11.2	Prove sperimentali.....	85
12	Conclusioni.....	93
13	Bibliografia.....	95

Indice delle Figure (List of Figures)

Figura 2.1 - Schema interazione uomo – macchina	13
Figura 2.2 - Scambio di informazioni tra l’uomo, robot ed ambiente	14
Figura 2.3 - Interazione uomo – robot	15
Figura 2.4 - Controllo del sistema	16
Figura 2.5 - Manipolatore industriale.....	18
Figura 2.6 - Diagramma a blocchi del controllo forza basato sul controllo PI	20
Figura 2.7 - Carrozzina motorizzata.....	21
Figura 2.8 - Schema di funzionamento.....	22
Figura 3.1 - Carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q	23
Figura 3.2 - Rappresentazione delle velocità nel piano.....	24
Figura 4.1 - Schema funzionamento dell'interfaccia di guida	26
Figura 4.2 - Concept dell'interfaccia di guida	27
Figura 5.1 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con cella di carico a sei assi.....	29
Figura 5.2 - Maniglia sensorizzata con solo guide prismatiche: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con solo guide prismatiche	30
Figura 5.3 - Maniglia sensorizzata con guide prismatiche e cerniere: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con guide prismatiche e cerniere.....	32
Figura 5.4 - Maniglia sensorizzata esalatero con coppie rotoidali: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con coppie rotoidali	34
Figura 5.5 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Nuovo schema funzionale della maniglia con coppie rotoidali.....	36
Figura 6.1 - Schema funzionale maniglia con cella di carico a sei assi.....	37
Figura 6.2 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi	38
Figura 6.3 - Geometria della Cella di carico SRI-X M3923	38

Figura 6.4 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: Vista con sezione	39
Figura 6.5 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: Sezione parziale maniglia ergonomica	40
Figura 6.6 -Schema funzionale con guide prismatiche e cerniere	41
Figura 6.7 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata guide prismatiche.....	41
Figura 6.8 - Sezione maniglia sensorizzata guide prismatiche.....	42
Figura 6.9 - Cella di carico ForsentekFCL 200 N	42
Figura 6.10 - Geometria della Cella di carico FCL.....	43
Figura 6.11 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: (a) Sezione laterale; (b) Vista sezionata	44
Figura 6.12 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: Sezione manubri ergonomici	45
Figura 6.13 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: Sezione vista frontale	46
Figura 6.14 - Schema funzionale con cerniere.....	46
Figura 6.15 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata con coppie rotoidali.....	47
Figura 6.16 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione maniglia sensorizzata con coppie rotoidali	47
Figura 6.17 - Cella di carico FLAE 100 N	48
Figura 6.18 - Dimensione della Cella di carico FLAE.....	48
Figura 6.19 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Vista frontale con sezione parziale	49
Figura 6.20 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione rami maniglia.....	50
Figura 6.21 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione vista frontale	50
Figura 8.1 - Dimensione maniglia sensorizzata.....	52
Figura 8.2 - Dimensione nuova maniglia sensorizzata	53
Figura 8.3 - Vista frontale con sezione parziale	53
Figura 8.4 - Vista superiore	54
Figura 8.5 - Sezione vista frontale maniglia sensorizzata	55
Figura 8.6 - Esplosione Maniglia Sensorizzata	55
Figura 8.7 - Distinta base Maniglia sensorizzata	56
Figura 8.8 - Versione maniglia sensorizzata versione ad una mano.....	56

Figura 9.1 -Maniglia sensorizzata: (a) Schema funzionale maniglia sensorizzata e (b) Diagramma corpo libero.....	57
Figura 9.2 - Diagramma corpo libero link 3.....	58
Figura 9.3 - Diagramma corpo libero link 2.....	59
Figura 9.4 - Diagramma corpo libero link 4.....	59
Figura 9.5 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 1.....	60
Figura 9.6 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 2.....	61
Figura 9.7 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 3.....	61
Figura 9.8 - Diagramma corpo libero link 1.....	62
Figura 9.9 - Diagramma corpo libero link 5.....	63
Figura 9.10 - Analisi statica Maniglia.....	64
Figura 9.11 - Nuovo diagramma corpo libero link 3.....	65
Figura 9.12 - Diagramma corpo libero link 3 versione maniglia una mano.....	66
Figura 10.1 - Banco Prova.....	68
Figura 10.2 - Banco Prova: (a) maniglia sensorizzata versione due mani e (b) maniglia sensorizzata versione una mano.....	68
Figura 10.3 - Schema banco prova.....	69
Figura 10.4 - Schema a blocchi della sperimentazione.....	70
Figura 10.5 - Sistema di riferimento maniglia sensorizzata versione due mani e cella di carico a sei assi.....	71
Figura 10.6 - Maniglia versione due mani: Prova 1.....	72
Figura 10.7 - Maniglia versione due mani: Prova 2.....	72
Figura 10.8 - Maniglia versione due mani: Prova 3.....	73
Figura 10.9 - Sistema di riferimento maniglia sensorizzata versione una mano e cella di carico a sei assi.....	74
Figura 10.10 - Maniglia versione una mano: Prova 1.....	75
Figura 10.11 - Maniglia versione una mano: Prova 2.....	75
Figura 10.12 - Maniglia versione una mano: Prova 3.....	76
Figura 10.13 - Sensore Touch capacitivo CAP 1188.....	78
Figura 11.1 - Trasformazione da forza a velocità.....	79
Figura 11.2 - Schema di funzionamento della maniglia sensorizzata.....	81

Figura 11.3 - Procedimento per la valutazione delle forze e coppie	81
Figura 11.4 - Sistema di riferimento posto al centro della carrozzina.....	82
Figura 11.5 - Trasformazione forza/coppia in velocità.....	82
Figura 11.6 - Funzione di mappatura	83
Figura 11.7 - Rappresentazione della velocità della carrozzina	84
Figura 11.8 - Area di sperimentazione	85
Figura 11.9 - Schema area di lavoro.....	86
Figura 11.10 - Esecuzione prova	86
Figura 11.11 - Traiettoria del centro di riferimento	88
Figura 11.12 - Acquisizioni: (a) andamento nel tempo delle forze e momento e (b) andamento nel tempo delle velocità.....	89
Figura 11.13 - Rampa: (a) esecuzione prova e (b) schema rampa	89
Figura 11.14 - Traiettoria centro di riferimento lungo rampa.....	90
Figura 11.15 - Acquisizioni: (a) andamento nel tempo delle forze e momento e (b) andamento nel tempo delle velocità.....	91

Indice delle Tabelle (List of Tables)

Tabella 6.1 – Dimensioni Cella di carico FCL 200N.....	43
---	----

1 Introduzione

L'obiettivo della tesi proposta è la progettazione e lo sviluppo di un dispositivo che permetta ad un operatore assistenziale di controllare il moto della carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q.

L'interfaccia di guida garantisce all'operatore esterno di governare la carrozzina richiedendo il minimo sforzo.

La carrozzina MoviWE.Q è stata progettata per essere utilizzata in tre distinte modalità di guida:

- Nella prima modalità di guida, la carrozzina viene comandata attraverso un joystick od una differente interfaccia più adatta all'utente;
- La seconda modalità di guida consiste nell'utilizzo di una maniglia sensorizzata da parte di un caregiver;
- La terza modalità consiste nella guida automatica della carrozzina.

La tesi si pone come attività all'interno di un progetto del gruppo di ricerca sviluppando il sottosistema riguardante la guida assistita.

Il capitolo 2 si concentra sullo studio dello stato dell'arte dell'interazione uomo-macchina. Il capitolo 3 analizza i requisiti dell'interfaccia di guida mentre il capitolo 4 definisce il concept dell'interfaccia di guida. Il capitolo 5 esamina le possibili soluzioni funzionali dei meccanismi articolati della maniglia sensorizzata. Il capitolo 6 si concentra sulla progettazione esecutiva delle diverse soluzioni invece il capitolo 7 confronta le diverse soluzioni esecutivi. Nel capitolo 8 si procede nell'ottimizzazione della soluzione esecutiva scelta. Nel capitolo 9 si analizza il diagramma di corpo libero del sistema. Il capitolo 10 analizza l'efficacia della maniglia sensorizzata nell'acquisizione delle forze. Il capitolo 11 riassume il funzionamento del sistema elettronico di controllo che trasforma gli input in forza in riferimenti in velocità e conclude con l'esecuzione di prove sperimentali con l'interfaccia montata sullo schienale della sedia.

2 Stato dell'arte

L'interazione uomo – macchina [1] è un argomento molto importante in quanto comprende tutti gli aspetti dell'interazione e comunicazione tra uomo e macchina attraverso l'uso di diversi tipi di interfacce. Trova utilizzo in diversi ambiti industriali ed altri sistemi dinamici al fine di garantire sicurezza, efficienza e qualità.

A partire dal 1960 [2], il tempo di elaborazione dei computer si è ridotto drasticamente permettendo agli utenti di interagire meglio con le diverse macchine, mentre precedentemente i dati venivano inseriti manualmente.

A seguito dell'aumento dell'automazione si è reso necessario migliorare la comunicazione uomo-macchina dove l'operatore interagisce con il processo produttivo attraverso l'uso di una interfaccia al fine di svolgere le diverse attività richieste.

I robot [3] permettono all'operatore di aumentare la capacità in termini di forza, velocità e precisione durante l'attività desiderata ed al contempo ridurre la fatica e stress sul corpo umano. Attraverso l'interazione fisica si stabilisce le informazioni cognitive dell'ambiente circostante durante la lavorazione mentre gli aspetti cognitivi migliorano i parametri di interazione.

Questo tema deve essere affrontato considerando la macchina, sensori ed attuatori al fine di controllare l'interazione con l'uomo. Nella Figura 2.1 viene riportato uno schema generale dell'interazione uomo-macchina.

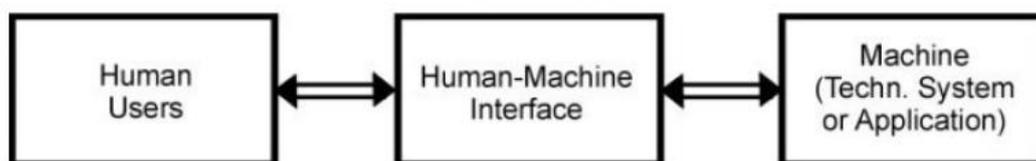


Figura 2.1 - Schema interazione uomo – macchina [4]

Nonostante l'interazione uomo – macchina si concentra principalmente sulle applicazioni che si basano sul contatto diretto [5], vi è la possibilità di considerarla come una attività di manipolazione cooperativa. Come osserviamo nella Figura 2.2, l'operatore ed il robot operano congiuntamente al fine di raggiungere un obiettivo comune. Al fine di svolgere l'attività correttamente il robot deve avere una certa conoscenza dell'obiettivo e dell'intenzione dell'operatore.

Successivamente si analizza come l'interazione tra uomo e macchina influisce sull'ambiente circostante. Infine, è necessario che l'operatore riceva le informazioni sulla lavorazione attraverso l'uso di un feedback. Questa attività viene svolta mediante diversi sensori in modo tale da poter controllare istante per istante le diverse attività ed eseguire le correzioni necessarie.

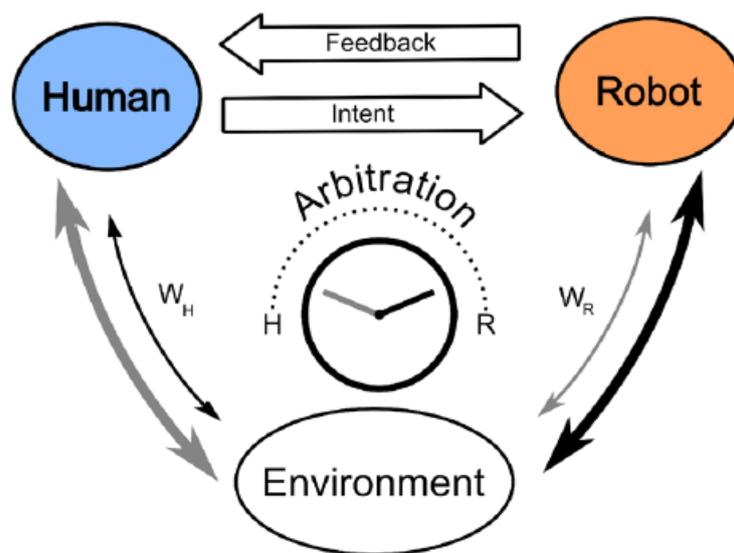


Figura 2.2 - Scambio di informazioni tra l'uomo, robot ed ambiente [6]

2.1 Interazione uomo – macchina

Al fine di rendere più efficace l'interazione uomo – macchina è necessario che il robot sia in grado di anticipare l'intenzione dell'operatore ed agire di conseguenza [7]. L'operatore si aspetta che il robot possa generare un certo tipo

di resistenza nel momento si decida di modificare la propria intenzione in base alla variazione dei requisiti dell'attività che si sta svolgendo.

La manipolazione di un oggetto in ambito collaborativo coinvolge generalmente tre fasi che comporta un diverso comportamento del robot:

- fase iniziale in cui l'uomo inizializza il movimento;
- fase di guida in cui l'uomo muove il robot al fine di posizionare l'oggetto nella posizione desiderata;
- fase di arresto in cui l'oggetto raggiunge la posizione finale.

La forza fisica esercitata dall'operatore risulta limitata nel momento in cui manipola oggetti pesanti. Pertanto l'uomo, Figura 2.3, esercita una certa forza per guidare l'oggetto ed il robot esercita una potenza supplementare per facilitare l'esecuzione dell'attività.

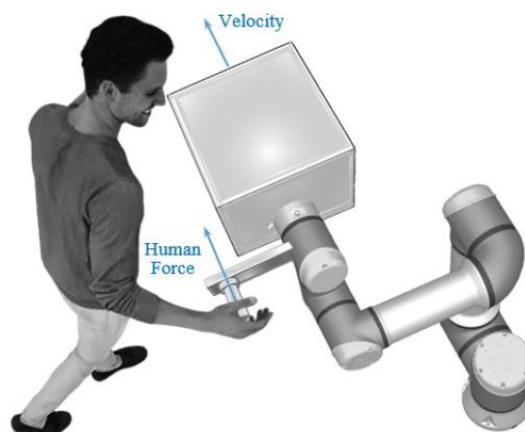


Figura 2.3 - Interazione uomo – robot [8]

Diverse soluzioni sono state sviluppate al fine manipolare un oggetto attraverso l'interazione tra uomo e robot.

Una soluzione consiste nello stimare l'intenzione dell'operatore attraverso la velocità dell'oggetto soggetto alla manipolazione al fine di applicare

un'accelerazione o decelerazione. Nel momento in cui la forza applicata supera un fissato valore di soglia lo smorzamento dell'ammortenza diminuisce all'aumentare della velocità dell'oggetto oppure aumenta al diminuire della velocità dell'oggetto.

Una diversa soluzione, come osserviamo in Figura 2.4, utilizza la forza applicata dall'operatore per comprendere l'intenzione e regolare di conseguenza i diversi parametri del controllore. L'intenzione dell'operatore [9] è tipicamente compresa attraverso la direzione e la grandezza della forza misurata tramite il sensore di forza e coppia. Valutando la variazione della forza si ha la possibilità di prevedere le future intenzioni dell'operatore. Un improvviso aumento della forza nella stessa direzione della velocità viene interpretata come l'intenzione di applicare un'accelerazione. Al contrario se un'improvvisa riduzione della forza nella stessa direzione della velocità viene interpretata come l'intenzione di applicare una decelerazione, invertire la direzione del moto oppure arrestare il sistema. Osserviamo che lo smorzamento di ammettenza aumenta nel caso della decelerazione al fine di ridurre l'inerzia del sistema mentre si riduce nel caso di un'accelerazione in quanto inficerebbe sulla velocità ed accelerazione.



Figura 2.4 - Controllo del sistema [10]

2.2 Manipolatori industriali

I manipolatori industriali [11] sono strumenti sviluppati al fine di ridurre il carico sottoposto ai lavoratori durante le operazioni di movimentazione di attrezzature pesanti al di fuori del centro di massa. Sono macchine efficaci e versatili [12] costituite da un braccio manipolatore rigido in grado di eseguire attività di presa, sollevamento e rotazione di carichi pesanti di diversa forma in modo veloce, comodo e sicuro garantendo un aumento della produttività.

I manipolatori industriali, Figura 2.5, sono progettati in modo tale da adeguarsi alle esigenze degli operatori e riducono gli infortuni sul posto di lavoro. Inoltre, permettono di ridurre i disturbi muscoloscheletrici dei operatori durante le attività ripetitive.

I manipolatori industriali presentano diverse caratteristiche [13] che ne favoriscono l'utilizzo rispetto ad altri macchinari:

- **Maggiore precisione ed accuratezza:**

I manipolatori industriali possono essere programmati al fine di eseguire mansioni specifiche con alti livelli di precisione ed accuratezza riducendo la possibilità di danneggiare il prodotto.

- **Aumento dell'efficienza e della produttività:**

I manipolatori industriali sono in grado di lavorare ininterrottamente, senza necessità di pause, permettendo di ottenere un aumento dell'efficienza e della produttività complessiva.

- **Aumento della sicurezza:**

I bracci robotici industriali sono in grado di lavorare in ambienti pericolosi o maneggiare carichi pesanti senza sforzi o rischi fisici eccessivi permettendo agli operatori di rimanere al sicuro.

- **Aumento della flessibilità:**

I manipolatori industriali possono essere programmati per eseguire una diversa varietà di compiti in modo tale da essere adatti in differenti ambiti industriali.

- **Efficienza dei costi:**

I manipolatori industriali risultano essere una soluzione conveniente per le aziende in quanto riducono i costi del lavoro e migliorano la produttività generale.



Figura 2.5 - Manipolatore industriale [14]

I robot differiscono dai manipolatori industriali in quanto richiedono un'area di lavoro ben definita e diversi sensori per definire il suo funzionamento. Nel momento in cui il robot viene installato in una stazione di lavoro preesistente, a differenza dei manipolatori industriali, vi è la necessità di riprogettare l'intera postazione, il che può comportare un notevole investimento.

Il robot viene principalmente utilizzato nel momento in cui vi è una richiesta elevata di pezzi lungo la linea di produzione. Questo dispositivo viene suggerito

quando vi è la necessità di un tempo ciclo molto basso. Le prestazioni dei manipolatori invece non sarebbero in grado di operare in queste condizioni.

I robot [15] si differiscono dai robot in quanto sono completamente programmati per operare ripetutamente senza la necessità di interagire con l'operatore. I movimenti eseguiti durante le varie operazioni sono prevedibili in quanto sono programmati, pertanto, sono giustificati gli elevati costi di acquisto e manutenzione. Al contrario i manipolatori industriali sono dispositivi utilizzati per assistere gli operatori durante le operazioni di sollevamento riducendo lo sforzo fisico richiesto.

I paranchi e gru hanno la capacità di muovere i carichi in direzione verticale in spazi in cui non sono presenti ostacoli. Al contrario i manipolatori industriali presentano bracci articolati rigidi, pertanto, sono in grado di muoversi in qualsiasi direzione anche in presenza di ostacoli o spazi chiusi.

2.3 Controllo forza – posizione

Uno dei sistemi utilizzati per controllare i manipolatori industriali durante l'interazione uomo-macchina consiste è il controllo forza-posizione. Neranon e Bicker [16] hanno implementato un sistema di controllo forza-posizione per le interazioni uomo-macchina. Per questa analisi hanno utilizzato un manipolatore industriale Stäubli TX60 a sei assi con una capacità massima di 9 kg ed una ripetibilità di ± 0.02 mm. Tramite una cella di carico a sei assi e sono stati in grado di valutare l'interazione dell'operatore con il braccio del manipolatore. Il sistema implementato utilizza un controllo proporzionale - integrativo (PI) che garantisce una migliore accuratezza e stabilità rispetto all'utilizzo del controllo proporzionale - integrale - derivativo (PID) in quanto la parte derivativa risultava troppo sensibile al rumore e di conseguenza influire sulle misurazioni. L'operatore manipola il gripper ed attraverso la cella di carico viene acquisito la forza radiale e tangenziale. Attraverso i guadagni proporzionali ed integrativi, Figura 2.6, permettono un efficace algoritmo di controllo della posizione che viene successivamente trasferito al manipolatore per modificare la traiettoria.

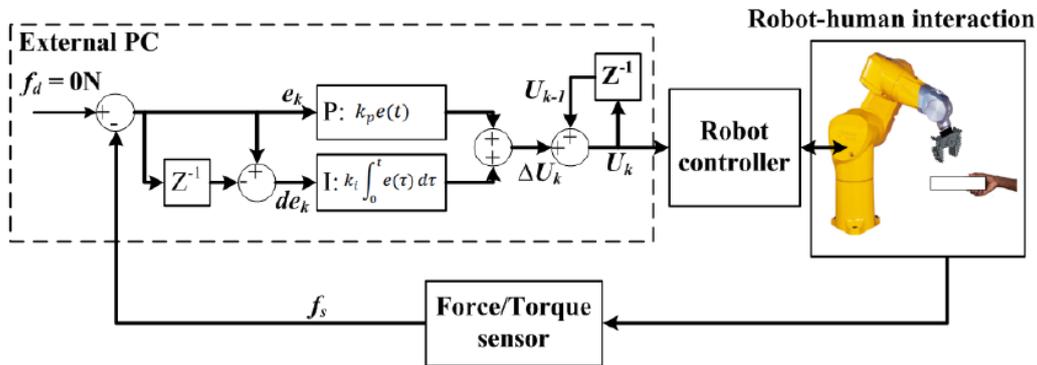


Figura 2.6 - Diagramma a blocchi del controllo forza basato sul controllo PI [17]

2.4 Caso studio: Confronto maniglia - joystick

Come osservato precedentemente l'implementazione di una maniglia nel controllo di un sistema motorizzato risulta semplice ed intuitivo. Pertanto, Trujillo-León, Castellanos-Ramos e Vidal-Verdú [18] hanno analizzato l'efficacia di un dispositivo di sterzo assistito che adopera una maniglia in cui viene integrato delle celle di carico. L'articolo procede nel confrontare le prestazioni della maniglia e del joystick nel seguire un percorso definito a priori. La prova viene eseguita posizionando sullo schienale della carrozzina una maniglia con all'interno delle celle di carico ed un joystick in modo tale il sistema possa essere guidato in entrambi i modi, come mostrato nella Figura 2.7. Inoltre, al fine di valutare lo scostamento dalla traiettoria desiderata viene utilizzata una telecamera ed un puntatore laser montata sulla parte anteriore della carrozzina.

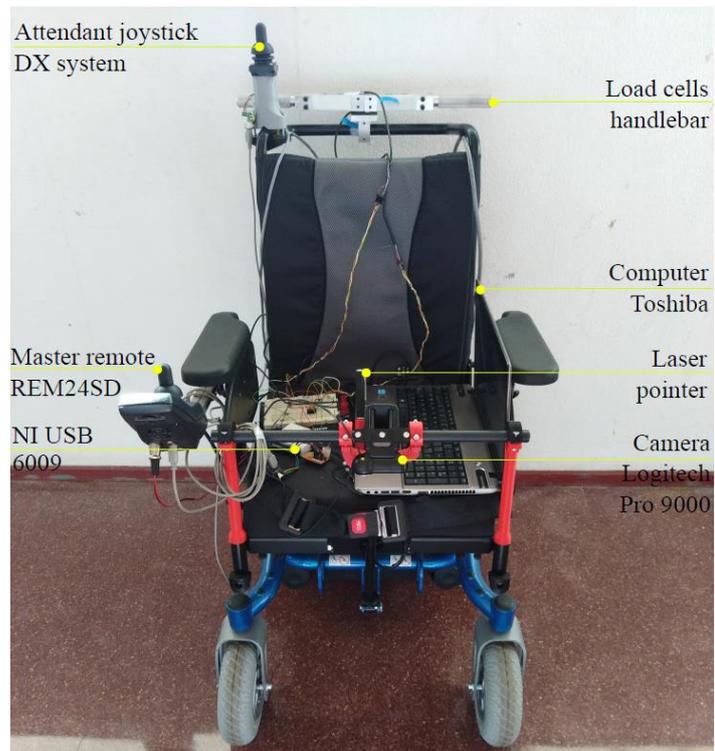


Figura 2.7 - Carrozzina motorizzata [19]

Nella Figura 2.8 osserviamo lo schema di funzionamento della prova sperimentale. Le celle di carico acquisiscono le forze applicate alla maniglia. La differenza di tensione in uscita dalle due celle di carico viene amplificata in modo tale da ottenere una tensione compresa tra 0 Volt e 5 Volt. Successivamente queste tensioni vengono digitalizzate attraverso un convertitore analogico – digitale ed attraverso la scheda di acquisizione viene inviato al computer. Il joystick proporzionale presenta un funzionamento simile alla maniglia.

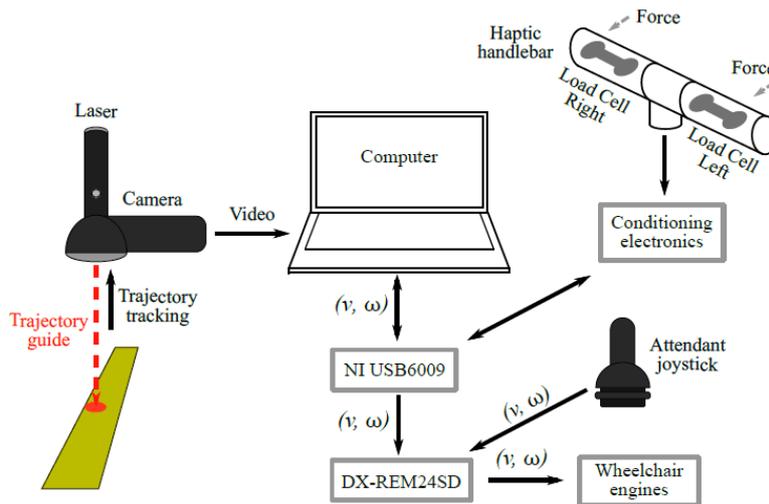


Figura 2.8 - Schema di funzionamento [20]

Ai diversi utenti è stato chiesto di guidare la carrozzina sia con la maniglia sia con il joystick proporzionale mantenendo il puntatore laser all'interno del nastro giallo che definisce il percorso desiderato. Analizzando i risultati si è osservato che la maniglia presenta uno scostamento minore dalla traiettoria desiderata rispetto ad un joystick commerciale. Inoltre, si è osservato che guidare la carrozzina con la maniglia risulta essere più intuitivo rispetto al joystick, pertanto, il tempo necessario per correggere la traiettoria risulta essere minore.

3 Requisiti

L'obiettivo della tesi è la progettazione e lo sviluppo di un dispositivo che permetta ad un operatore assistenziale di controllare il moto della carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q, rappresentata nella Figura 3.1. Questo capitolo si concentra nell'analisi dei requisiti che l'interfaccia di guida deve possedere affinché sia in grado di svolgere le attività richieste.



Figura 3.1 - Carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q

L'interfaccia di guida per comandare la carrozzina deve possedere i seguenti requisiti:

1) Economica

Un primo requisito è realizzare un'interfaccia di guida che risulti economica, in quanto risulta importante tenere sotto controllo il costo di questa tecnologia per garantirne una loro futura diffusione.

2) Generare un movimento omnidirezionale nel piano

Con il termine omnidirezionale, rappresentata nella Figura 3.2, si intende un veicolo in grado di muoversi in qualsiasi direzione nel piano. Pertanto,

l'interfaccia di guida deve essere in grado di generare almeno tre riferimenti per comandare un generale veicolo omnidirezionale. Questi riferimenti consistono in due velocità lineari lungo l'asse X e l'asse Y ed una velocità angolare lungo l'asse Z. Pertanto, l'interfaccia di guida deve possedere tre gradi di libertà, due traslazioni ed una rotazione, per soddisfare questa richiesta.

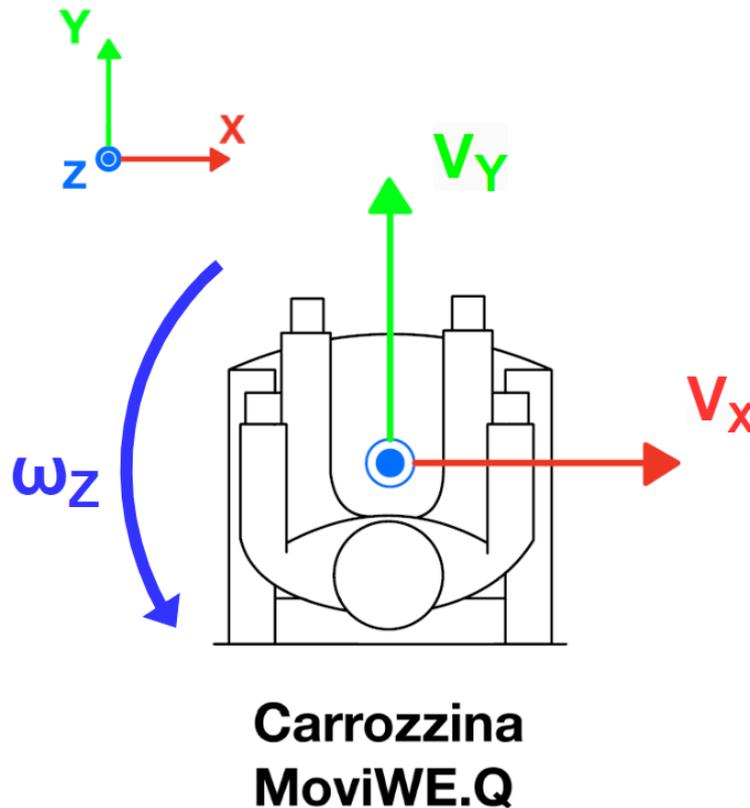


Figura 3.2 - Rappresentazione delle velocità nel piano

3) Semplicità di guida

Il terzo requisito che deve possedere l'interfaccia di guida consiste nel fatto che sia semplice da guidare. Questo requisito risulta importante in quanto si desidera che l'utente non si sforzi durante la guida del sistema.

Questo viene eseguito attraverso l'utilizzo di input in forza e coppia cosicché l'interfaccia sia in grado di acquisire la volontà dell'utente.

In generale per muovere un elemento nello spazio applichiamo delle forze in una determinata direzione e di conseguenza ci aspettiamo che l'oggetto percorra la traiettoria desiderata.

In questo modo a seconda delle forze che l'utente esercita in talune direzioni si ha la possibilità di imporre un determinato comando.

4) Riconoscere e distinguere gli input di forza

Il quarto requisito che deve possedere l'interfaccia di guida consiste nel fatto che è in grado di riconoscere e distinguere se i segnali che leggiamo in forza e coppia derivano dall'intenzione dell'utente o siano conseguenza di un evento accidentale od indesiderato. Pertanto, è necessario comprendere se l'input che abbiamo misurato lo dobbiamo utilizzare per guidare la carrozzina oppure è necessario ignorare.

Questo requisito è fondamentale in quanto garantisce la salvaguardia del paziente. Un urto accidentale od un controllo improprio può mettere in moto la carrozzina e di conseguenza mettere in pericolo il paziente. Pertanto, è fondamentale realizzare un sistema che permetta di comprendere se l'operatore stia impugnando correttamente la maniglia.

4 Concept

In questo capitolo ci concentriamo nella realizzazione di un concept dell'interfaccia di guida. Lo scopo è quello di individuare gli elementi necessari al fine di soddisfare i requisiti valutati nel capitolo precedente.

L'interfaccia di guida è un sistema che si frappone tra la carrozzina e l'operatore. Al fine di realizzare un sistema intuitivo si procede nella realizzazione di una interfaccia di guida che opera come filtro delle forze richieste all'operatore, rappresentata nella Figura 4.1. L'utilizzo di un semplice joystick non risulta essere intuitivo, pertanto, si è deciso di implementare un'interfaccia che le persone utilizzano quotidianamente come le maniglie.

Interfaccia di guida

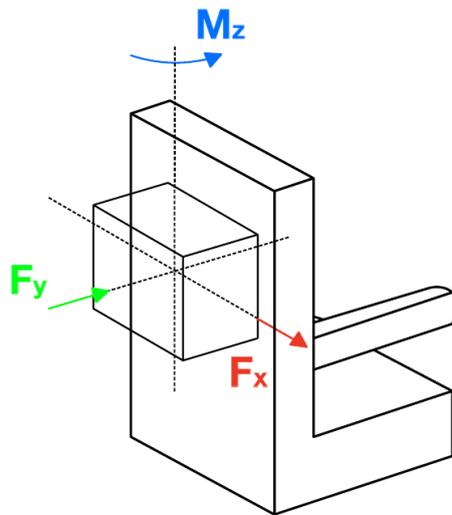


Figura 4.1 - Schema funzionamento dell'interfaccia di guida

In questo modo otteniamo un elemento che va ad interporsi tra il movimento della carrozzina e le forze applicate dall'operatore in modo che per l'utente sia più facile guidare il sistema.

Al fine di permettere ad un operatore esterno di controllare il movimento della carrozzina motorizzata è necessario che il sistema sia in grado di percepire l'intenzione dell'utente. Tra tutte le forze e coppie possibili si è scelto di utilizzare principalmente le forze longitudinali, le forze trasversali ed il momento intorno

all'asse perpendicolare al piano del moto. Questa scelta è dettata dal fatto che si traducono uno ad uno al movimento che vogliamo generare e di conseguenza non si richiede all'operatore di fare uno sforzo mnemonico.

Il metodo scelto per questo studio consiste nell'utilizzo di celle di carico poste sull'interfaccia di guida al fine di valutare la forza applicata dall'operatore esterno.

L'interfaccia di guida deve essere in grado di percepire la presenza dell'utente in modo tale da garantire il salvaguardare il paziente.

I sensori capacitivi [21] permettono di distinguere tra la mano dell'operatore od un oggetto semplicemente appoggiato. Questi elementi [22] risultano più affidabili rispetto all'utilizzo di sistemi meccanici in quanto non presentano elementi mobili che potrebbero essere soggetti a guasti. A differenza dei sensori tattili sono di semplice utilizzo ed implementazione.

Nella Figura 4.2 viene rappresentata il concept del sistema di guida

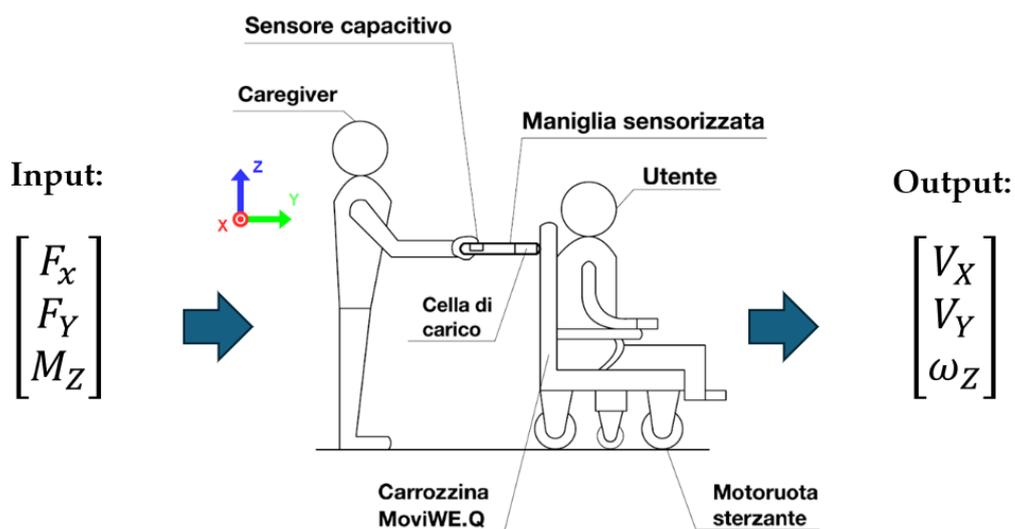


Figura 4.2 - Concept dell'interfaccia di guida

5 Progettazione funzionale

In questo capitolo analizziamo diverse soluzioni costruttive di maniglie sensorizzate che si differenziano in base alle disposizioni dei link e delle celle di carico. Lo scopo, come osservato nel capitolo precedente, è quello di leggere le forze lungo gli assi X e Y e la risultante dei momenti lungo l'asse Z. Pertanto, è necessario ottenere un meccanismo con tre gradi di libertà.

Nello sviluppo delle diverse soluzioni, le celle di carico sono inserite all'interno della struttura e devono leggere la differenza di forza tra i due lati della maniglia. Pertanto, vi è la possibilità di realizzare un meccanismo attraverso l'utilizzo delle guide prismatiche e rotoidali.

Il disegno funzionale risulta molto importante in quanto permette di avere una prima idea di disposizione della struttura. Al termine di questa attività si procede alla progettazione esecutiva.

Sono due problemi che vengono generalmente affrontati in un ciclo iterativo che parte dalla progettazione funzionale, che non tiene conto di alcuni aspetti, e poi dopo si passa alla progettazione esecutiva in modo tale da comprendere le diverse problematiche riguardanti il montaggio e l'ingombro. Poi si procede nel ritornare alla progettazione funzionale al fine di correggere le problematiche riscontrate.

5.1 Progettazione funzionale con sensore a sei assi

La prima soluzione consiste nell'avere un sensore a sei assi interposto tra la seduta e la maniglia. La cella di carico viene posta sul link 0 costituito dal profilato in alluminio che a sua volta viene collocato sullo schienale della carrozzina.

Manipolando semplicemente la maniglia, il sensore è in grado di registrare le forze nelle due direzioni ed il momento intorno al terzo asse.

Il vantaggio di questa soluzione è che non vi è la necessità di utilizzare delle guide rendendo il sistema più compatto ed affidabile. Nella Figura 5.1

osserviamo lo schema funzionale della maniglia sensorizzata dove riportiamo i link ed il sensore a sei assi.

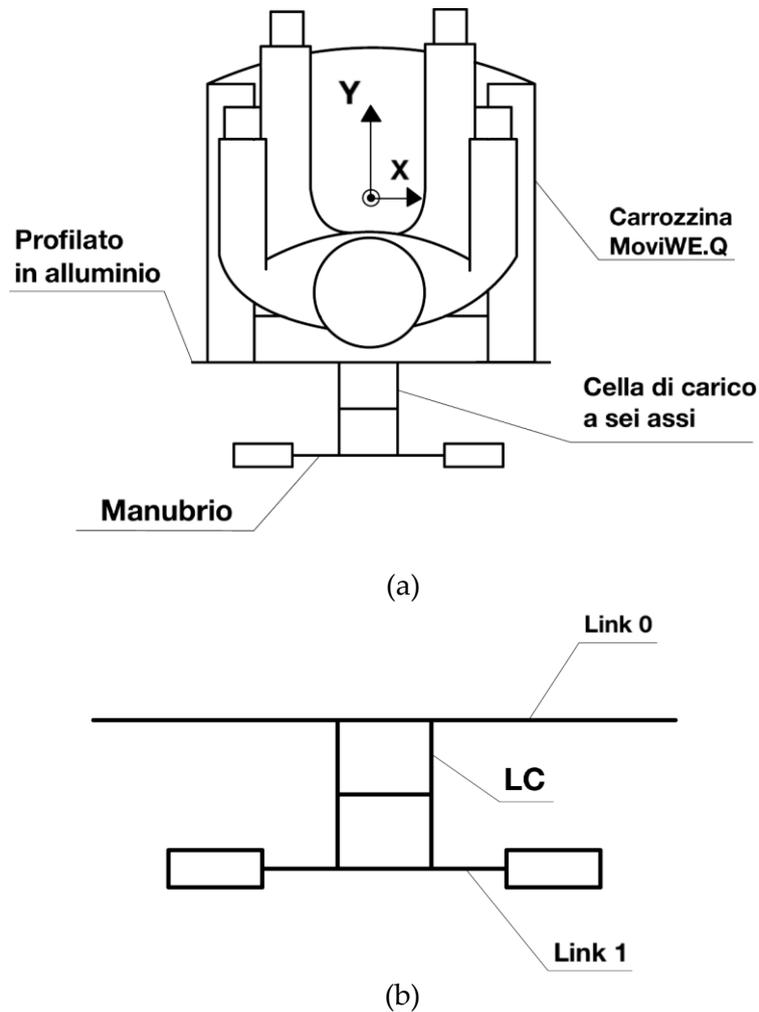


Figura 5.1 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con cella di carico a sei assi

5.2 Progettazione funzionale con guide prismatiche

La seconda soluzione, rappresentata in Figura 5.2, può semplificare la parte costruttiva realizzando due maniglie disgiunte. All'interno di ognuna sono presenti due celle di carico ad un asse posti lungo l'asse X e lungo l'asse Y.

I sensori sono installati su dei carrelli che si muovono grazie alla presenza delle guide prismatiche. In questo modo sulle celle di carico non si scaricano forze e momenti al di fuori dell'asse.

La forza risultante lungo l'asse X è data somma delle forze registrate individualmente dalle celle di carico LC 2 e LC 3.

Le celle di carico LC 1 e LC 4 leggono invece le forze applicate lungo l'asse Y attraverso l'utilizzo di guide prismatiche in modo indipendente. Pertanto, la forza risultante è ottenuta dalla somma dei valori misurati dalle celle.

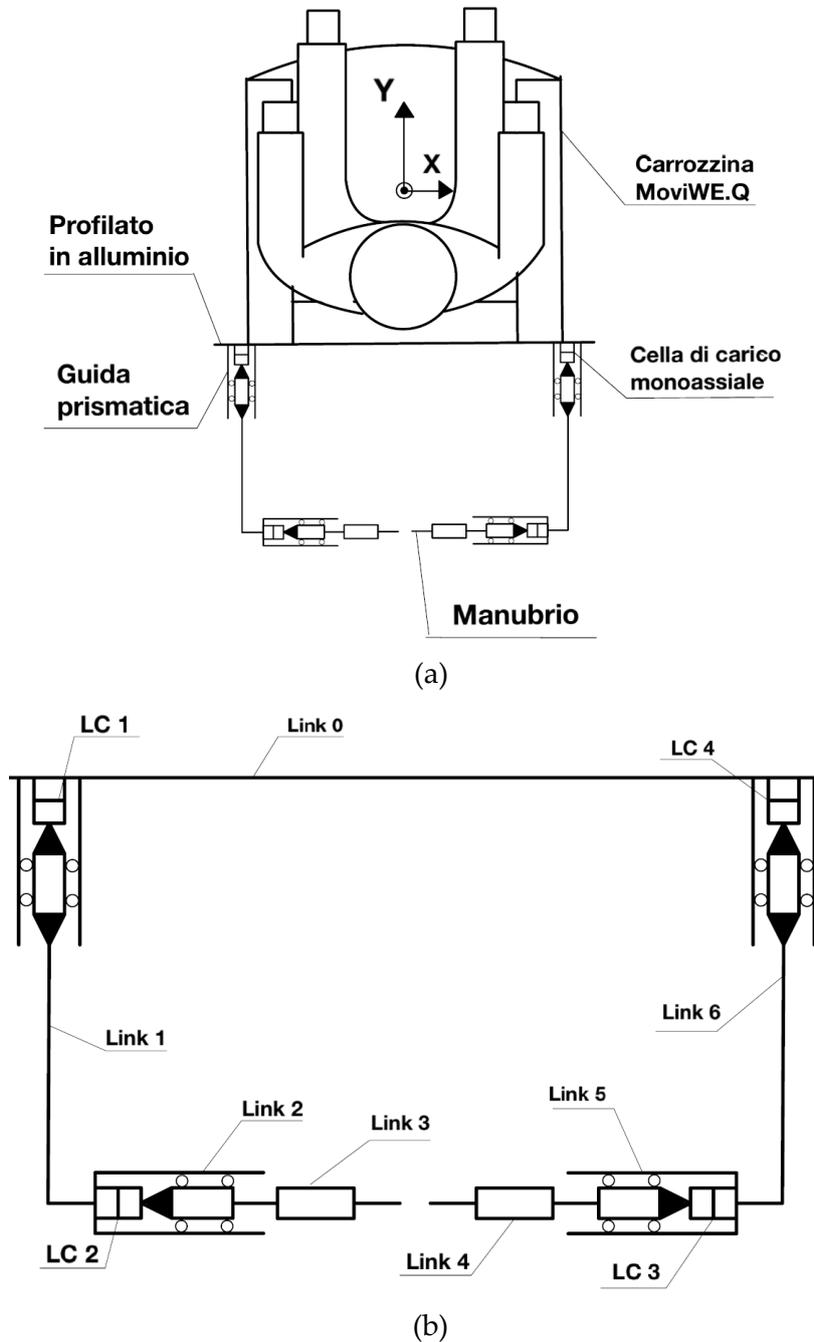


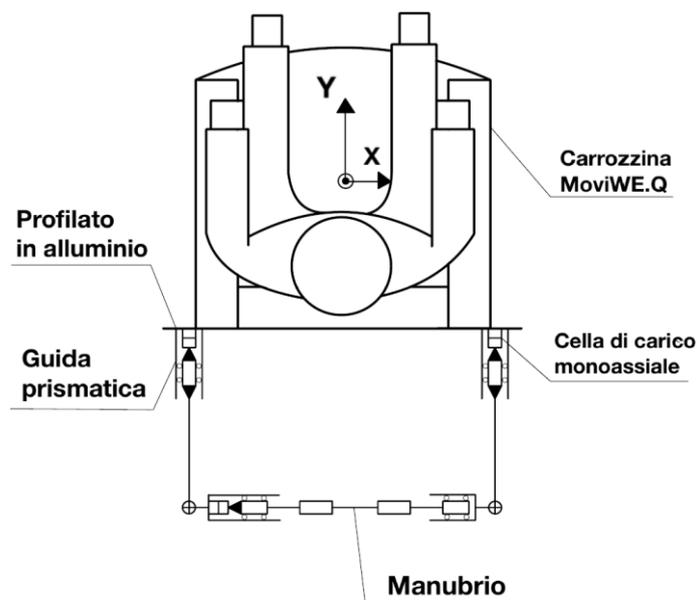
Figura 5.2 - Maniglia sensorizzata con solo guide prismatiche: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con solo guide prismatiche

Questa soluzione richiede l'utilizzo di quattro celle di carico che può risultare dispendioso. Un'ulteriore difficoltà consiste nel fatto che le celle di carico LC 1 e LC 4 registrano la forza dell'operatore attraverso la flessione degli elementi della maniglia. Inoltre, avendo due maniglie disgiunte otteniamo una pluralità di spinte che rende complicato l'analisi del comando dell'intenzione dell'operatore. Pertanto, si è deciso di procedere verso una diversa soluzione.

Questa nuova soluzione, rappresentata in Figura 5.3, consiste nel realizzare un'unica maniglia che utilizza al suo interno tre celle di carico ad un asse installate su dei carrelli che si muovono attraverso l'utilizzo di guide prismatiche. Per evitare di affidarsi alla flessione degli elementi della maniglia per caricare le celle LC 1 e LC 3, utilizziamo due coppie rotoidali in modo tale da caricarli indipendentemente l'una dall'altra.

Idealmente se fossero corpi infinitamente rigidi spingendo in qualsiasi punto del manubrio avremmo la possibilità di scaricare ugualmente sulle due celle di carico. Infine, l'ultima cella di carico LC 2 viene inserita anch'essa su queste guide lineari all'interno della barra. Queste guide non hanno praticamente corsa in quanto la loro lunghezza è bloccata dalla cella di carico stessa.

Questa soluzione risulta molto compatta e vi è la possibilità di annegare le diverse celle di carico e le coppie prismatiche tutto all'interno della maniglia stessa.



(a)

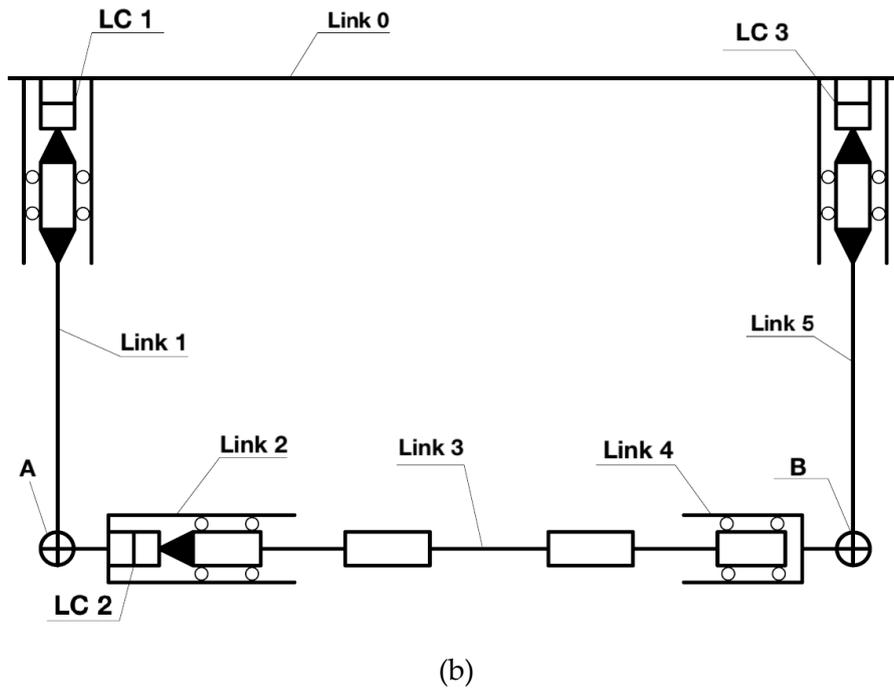


Figura 5.3 - Maniglia sensorizzata con guide prismatiche e cerniere: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con guide prismatiche e cerniere

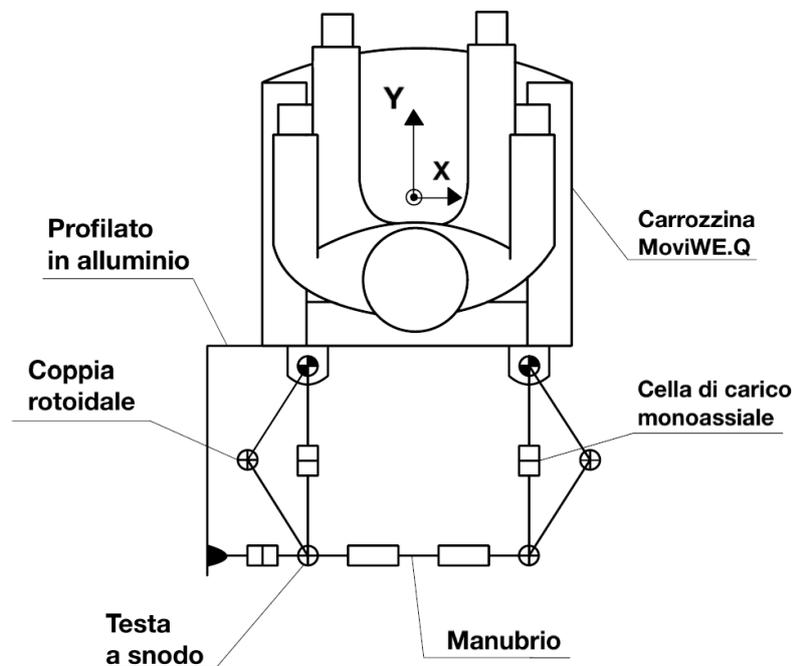
Valutiamo il numero di gradi di libertà del meccanismo attraverso la formula di Grübler

$$F = 3 * (l - 1) - \sum_{i=1}^j (3 - f_i) = 3 * (6 - 1) - 6 * (3 - 1) = 3$$

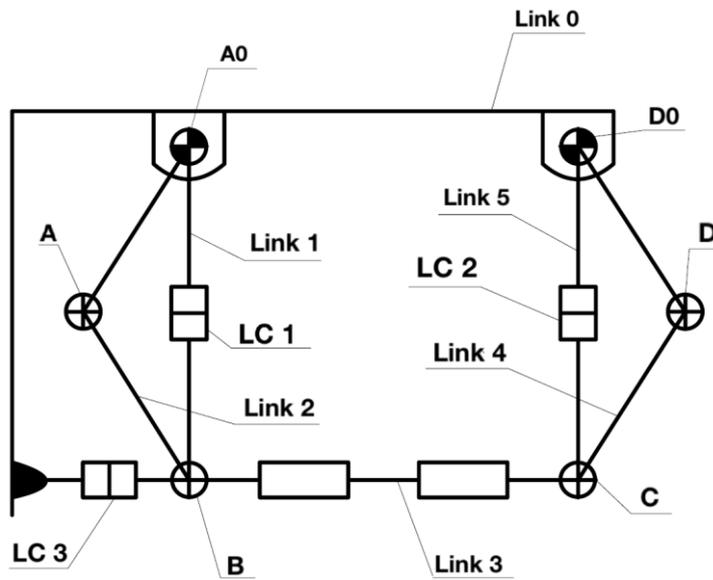
Dove l indica il numero di membri del cinematismo, j indica il numero di coppie cinematiche e f_i indica i gradi di libertà della coppia i -esima. Pertanto, il meccanismo possiede tre i gradi di libertà richiesti ma inserendo le celle di carico otteniamo una struttura isostatica.

5.3 Progettazione funzionale con coppie rotoidali

La terza soluzione, rappresentata nella Figura 5.4, consiste nel realizzare un esalatero formato da sei coppie rotoidali a tre gradi di libertà. Questo elemento ha la capacità di traslare e ruotare nel piano che sono esattamente i movimenti che vogliamo avere dalla nostra maniglia. Se andiamo a vincolare il movimento dell'esalatero con tre celle di carico siamo in grado di leggere le forze di cui vogliamo sapere l'entità. La seduta possiede una sporgenza esterna che permette alla cella di carico LC 3 di leggere forze poste lungo la direzione laterale. Questa soluzione ha l'inconveniente di essere leggermente ingombrante e difficile da nascondere.



(a)



(b)

Figura 5.4 - Maniglia sensorizzata esalatero con coppie rotoidali: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Schema funzionale della maniglia con coppie rotoidali

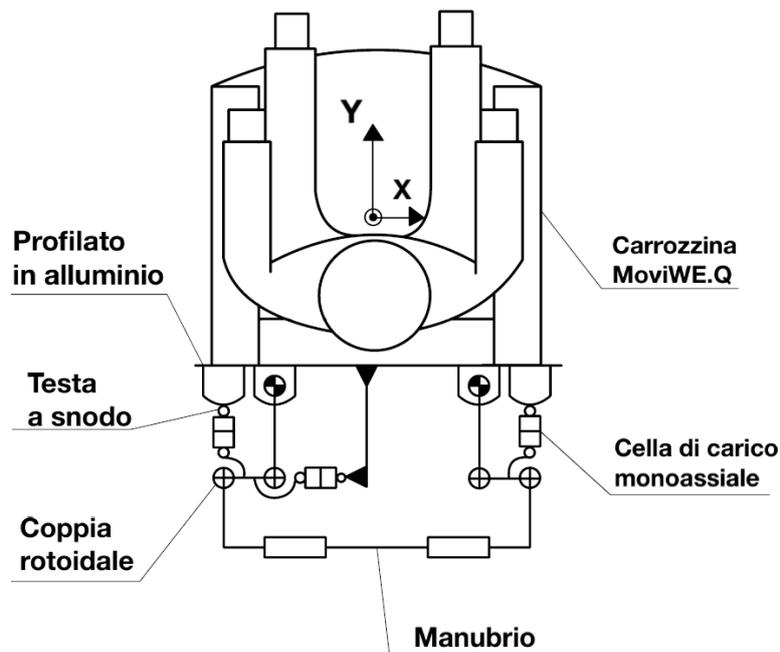
Questa soluzione presenta due difficoltà da tenere in considerazione. Una prima problematica consiste nel fatto che viene utilizzato un appoggio esterno che produce un ingombro laterale pronunciato rispetto alla dimensione della maniglia. La seconda problematica consiste nel fatto che se si ammette la presenza di giochi all'interno delle coppie cinematiche si osserva che il meccanismo non è esattamente nella configurazione disegnata ma bensì all'intorno di questa configurazione. Pertanto, se immaginiamo di applicare una forza sulla maniglia lungo l'asse X si va a caricare principalmente la cella di carico LC 3 con conseguente spostamento orizzontale dei punti di attacco della maniglia. Quindi le celle di carico LC 1 e LC 2, per come è disposto l'esalatero, hanno uno spostamento che non è infinitesimo ma bensì finito.

La nuova soluzione, rappresentata nella Figura 5.5, che viene proposta consiste nel montare le celle di carico, che utilizzano due snodi sferici, in maniera disaccoppiata. La configurazione scelta permette di spostare l'appoggio e di conseguenza la cella di carico LC 3 da una posizione esterna ad una collocazione più interna. Pertanto, questa soluzione garantisce una riduzione dell'ingombro laterale.

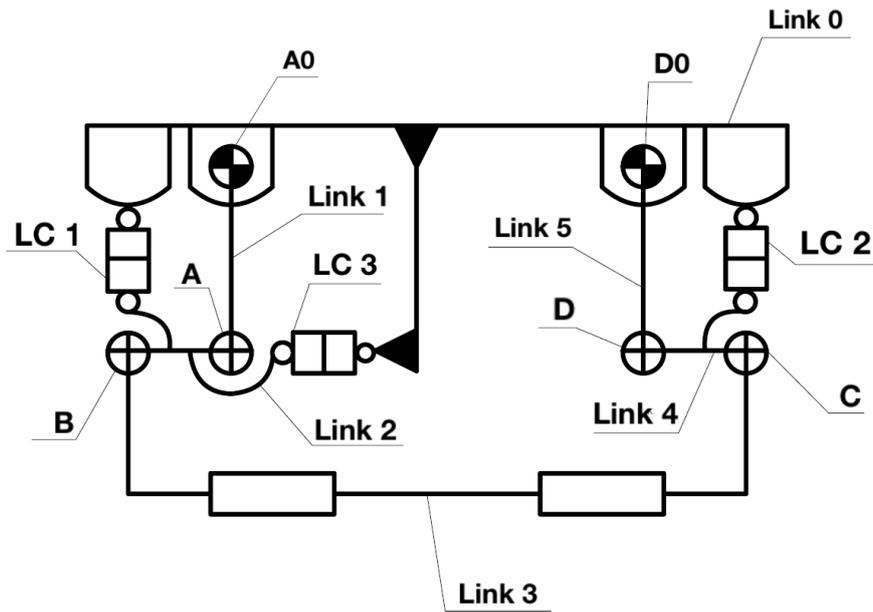
Un problema tecnologico precedentemente osservato consisteva nel posizionare le diverse coppie cinematiche in un solo punto. Idealmente le celle di carico LC 1 e LC 3 dovrebbero avere un perno del giunto sferico coincidente con la coppia rotoidale B ma per evitare di avere diversi piani uno sull'altro si è deciso di spostare le cerniere. In questo modo si ha l'opportunità di semplificare il progetto.

Attraverso la Figura 5.5b osserviamo che rimuovendo la cella di carico LC 1 ed applicando una forza lungo l'asse Y la cerniera B si sposterebbe in avanti. In realtà sarebbe più corretto dire che il grado di libertà sarebbe la rotazione della cerniera B attorno alla cerniera A ma per piccoli spostamenti possiamo considerare il grado di libertà come traslazione in quella direzione. Pertanto, tutte le forze che vengono applicate lungo questo asse hanno come reazione vincolare la forza $F_{lc,1}$, che è la reazione vincolare della cella di carico LC 1. Lo stesso ragionamento lo possiamo applicare a tutte le forze applicate alla cerniera C che sono bilanciate da reazioni vincolari della cella di carico LC 2.

Se rimuoviamo la cella di carico LC 3 ed applichiamo una forza lungo l'asse X osserviamo che in questa direzione l'unica reazione vincolare viene trasmessa da $F_{lc,3}$.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: (a) Maniglia sensorizzata montata sulla carrozzina e (b) Nuovo schema funzionale della maniglia con coppie rotoidali

Valutiamo il numero di gradi di libertà del meccanismo attraverso la formula di Grübler

$$F = 3 * (l - 1) - \sum_{i=1}^j (3 - f_i) = 3 * (6 - 1) - 6 * (3 - 1) = 3$$

Dove l indica il numero di membri del cinematismo, j indica il numero di coppie cinematiche e f_i indica i gradi di libertà della coppia i -esima. Pertanto, il meccanismo possiede tre i gradi di libertà richiesti ma inserendo le celle di carico otteniamo una struttura isostatica.

6 Progettazione esecutiva

La progettazione esecutiva consiste nel trasformare i disegni funzionali realizzati in modelli Solidworks in modo da determinare le dimensioni ed ingombri.

I vincoli considerati sono la dimensione dello schienale della carrozzina e dalla dimensione della cella di carico.

Questa progettazione consiste nell'analisi delle problematiche riguardanti il montaggio e gli ingombri affinché, successivamente, correggere il disegno funzionale.

6.1 Progettazione esecutiva con sensore a sei assi

Questa soluzione sfrutta un sensore a sei assi interposto tra la seduta della carrozzina e la maniglia. L'operatore esterno, Figura 6.1, muovendo la maniglia genera delle forze che la cella di carico è in grado di valutare. Il sistema risulta molto compatto in quanto non presenta degli elementi mobili.

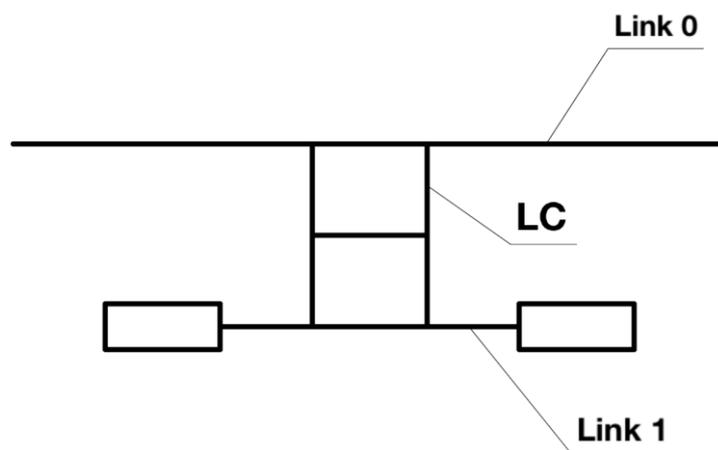


Figura 6.1 - Schema funzionale maniglia con cella di carico a sei assi

Nella Figura 6.2 rappresentiamo attraverso il software Solidworks la soluzione di maniglia sensorizzata che utilizza la cella di carico a sei assi.

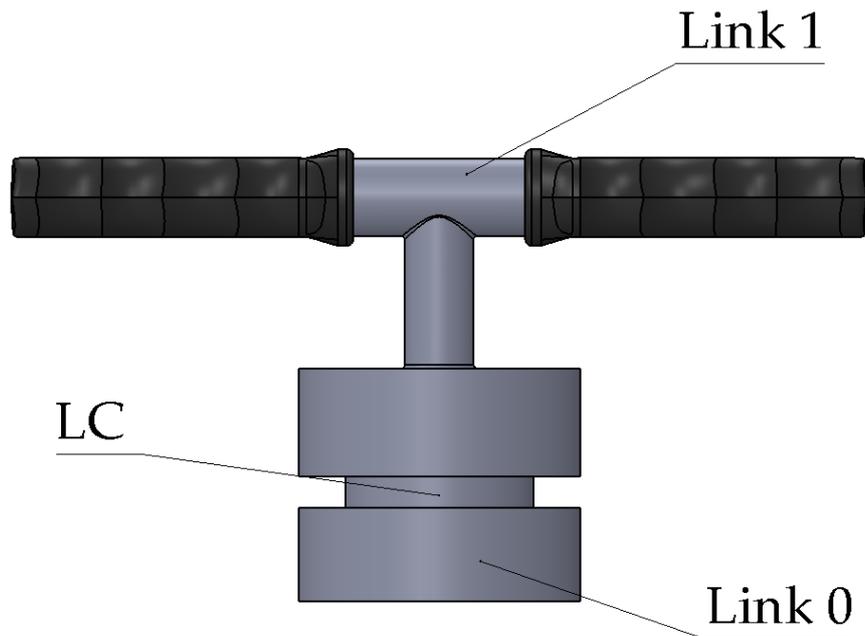


Figura 6.2 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi

Questa soluzione utilizza come cella di carico il sensore a sei assi M3923 della SRI-X Sunrise Instruments, Figura 6.3, al fine di registrare attraverso l'utilizzo di un unico dispositivo le forze lungo gli assi X e Y ed il momento lungo l'asse Z. Il trasduttore di forza è un sensore a sei assi realizzato in acciaio inossidabile di forma cilindrica. La cella di carico presenta quattro fori M6 su entrambe le facce in modo tale da collegare a due elementi distinti.

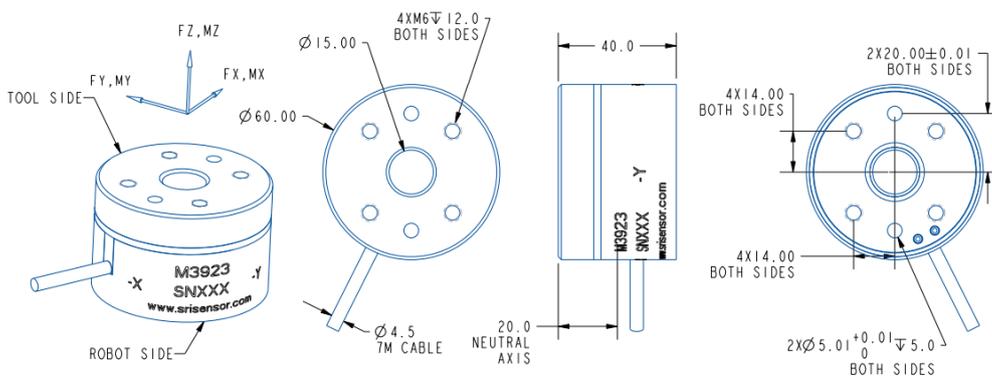


Figura 6.3 - Geometria della Cella di carico SRI-X M3923 [23]

Come osserviamo nella Figura 6.4, il sensore viene pertanto collocato all'interno della struttura che successivamente viene fissato sullo schienale della carrozzina. L'elemento fisso, ovvero il link 0, presenta quattro fori passanti in modo tale da garantire l'accoppiamento con il sensore dotato di fori filettati di dimensione pari a M6 e profondità pari a 12 mm cosicché risulti fisso. Inoltre, sono presenti dei alloggiamenti per le spine di centraggio di diametro pari a 5 mm e profondità pari a 5 mm allo scopo di garantire il corretto posizionamento.

L'elemento superiore, ovvero il link 1, viene posto sul sensore al fine di garantire all'operatore la capacità di trasmettere le proprie intenzioni attraverso la applicazione di forze e momento. Questo componente presenta due fori che permettono il collocamento delle spine per il centraggio. In aggiunta sono presenti quattro fori passanti in modo tale da accoppiarsi al sensore dotato di fori filettati di dimensione pari a M6 e profondità pari a 12 mm.

Il sensore risulta essere strutturalmente disaccoppiato [24] pertanto la parte superiore è in grado di muoversi rispetto all'elemento fisso. In questo modo attraverso il movimento della maniglia il sensore registra le forze ed il momento esercitato.

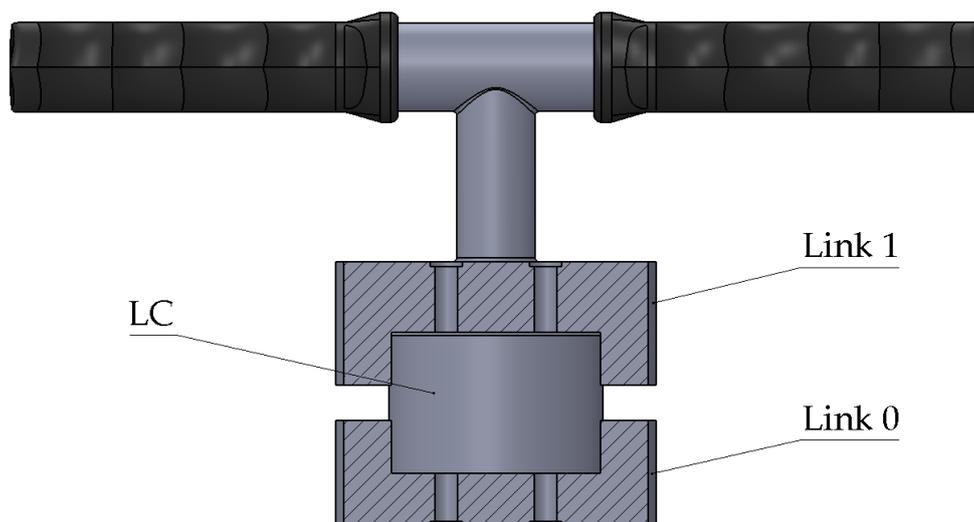


Figura 6.4 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: Vista con sezione

L'operatore poggia le mani sulle maniglie ergonomiche, Figura 6.5, nella quale si ha la presenza degli intagli che facilitano la presa. La maniglia presenta un foro di diametro pari a 25 mm e di profondità pari a 5 mm in modo tale da accoppiarsi all'elemento superiore. Pertanto, si garantisce la facoltà di manipolare il sistema. Inoltre, presenta un foro passante di diametro pari a 12 mm

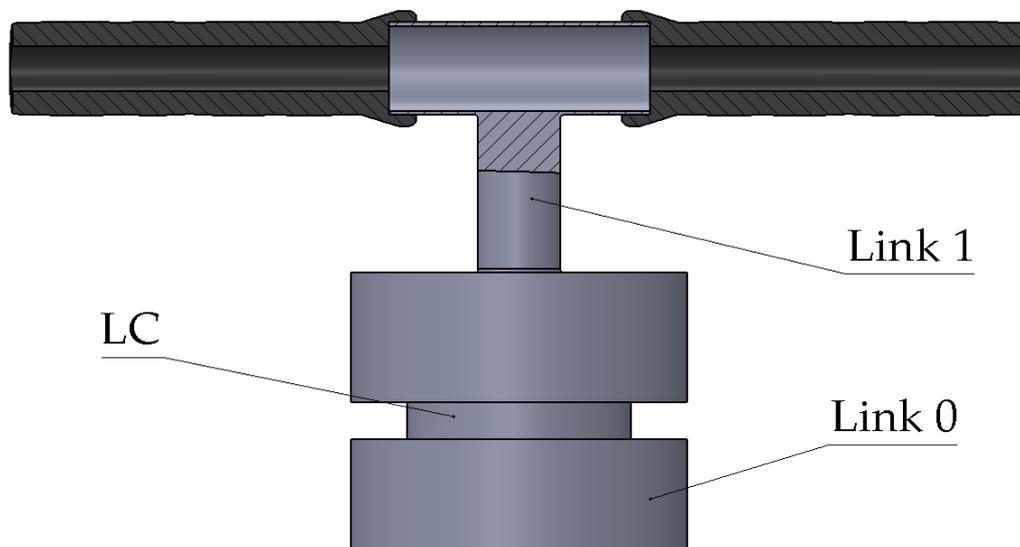


Figura 6.5 - Maniglia sensorizzata con cella di carico a sei assi: Sezione parziale

6.2 Progettazione esecutiva con guide prismatiche

Questa soluzione di maniglia sensorizzata, come osserviamo nella Figura 6.6, utilizza tre celle ad un asse posizionate su dei carrelli che si muovono attraverso l'utilizzo di guide prismatiche in modo tale che non si scaricano sulle celle di carico forze e momenti che stanno fuori dell'asse.

Per evitare di affidarsi alla flessione degli elementi della maniglia per caricare le celle utilizziamo due coppie rotoidali in modo tale da caricarli indipendente l'una dall'altra.

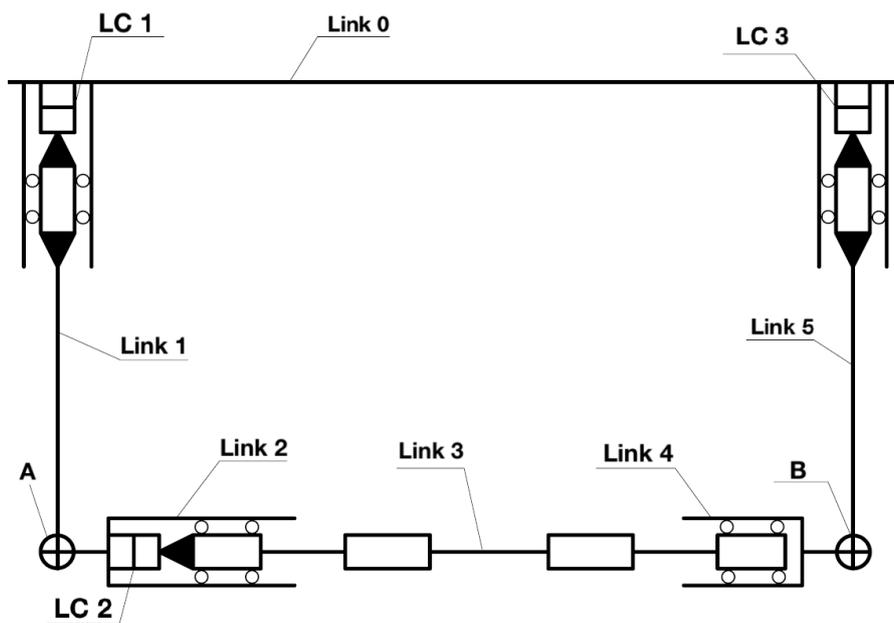


Figura 6.6 -Schema funzionale con guide prismatiche e cerniere

La Figura 6.7 rappresenta la realizzazione esecutiva della maniglia sensorizzata realizzata attraverso l'unione di diversi componenti in modo tale da svolgere i movimenti desiderati.

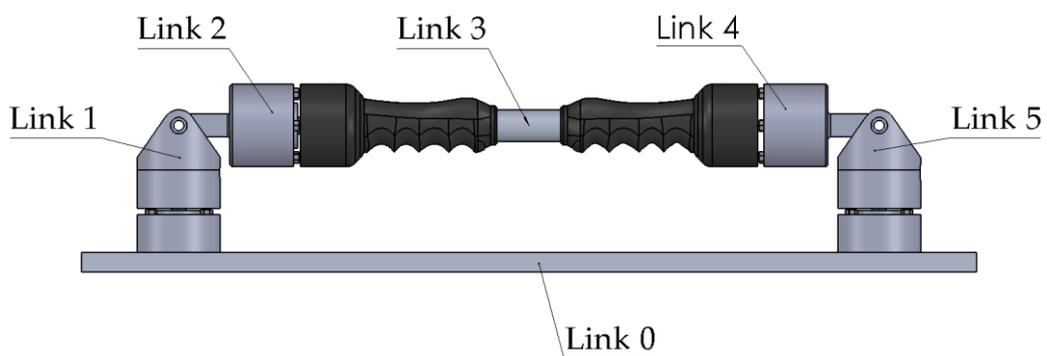


Figura 6.7 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata guide prismatiche

La Figura 6.8 riporta la sezione della maniglia sensorizzata

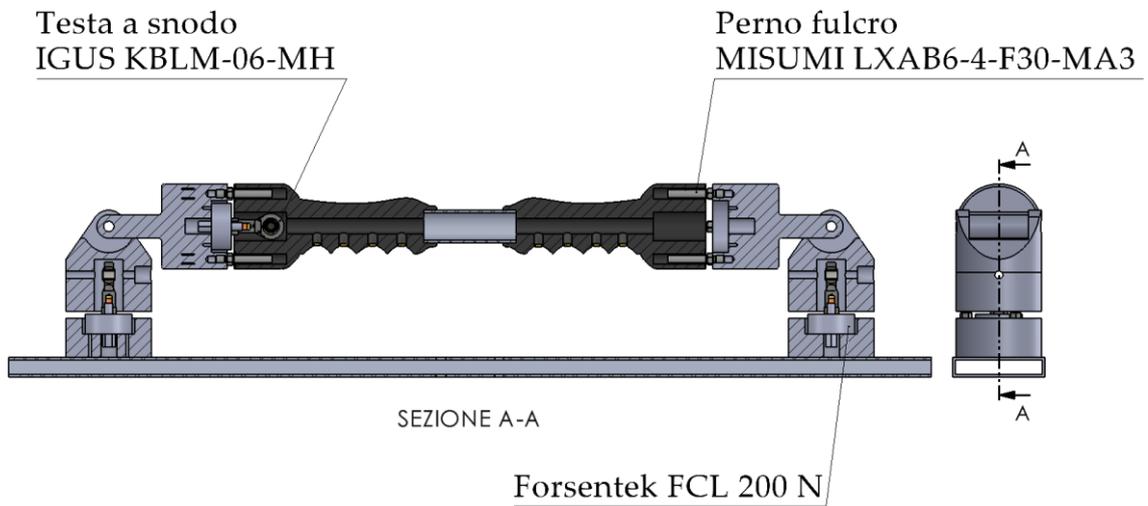


Figura 6.8 - Sezione maniglia sensorizzata guide prismatiche

Questa soluzione utilizza come cella di carico uniassiali il sensore Forsentek FCL 200 N, Figura 6.9, al fine di registrare il carico lungo l'asse. Il sensore viene posto tra la parte fissa e mobile della maniglia sensorizzata. Il trasduttore di forza è realizzato in acciaio inossidabile basato sull'utilizzo degli estensimetri al fine di misurare le forze trazione e compressione.



Figura 6.9 - Cella di carico ForsentekFCL 200 N [25]

La geometria del trasduttore di forza FLC, come osserviamo nella Figura 6.10, varia in base alla forza massima che desideriamo misurare.

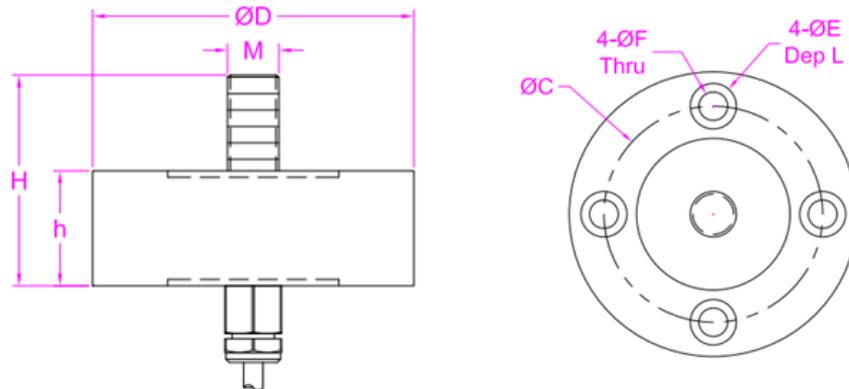


Figura 6.10 - Geometria della Cella di carico FCL [26]

Per le nostre applicazioni la cella di carico presenta le seguenti dimensioni, riassunte in Tabella 6.1.

Tabella 6.1 – Dimensioni Cella di carico FCL 200N

Capacità (N)	h (mm)	H (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	L (mm)	M (mm)
200	15	23.5	28	35.7	5	3	5	6

Lungo ogni ramo della maniglia è presente una cella di carico al fine di valutare la forza impressa dall'operatore lungo l'asse Y. Il sensore viene collocato all'interno di un componente che successivamente viene fissato sul link 0 che a sua volta viene collocato sullo schienale della carrozzina. Questo elemento fisso presenta quattro fori filettati di dimensione pari a M2.5 cosicché il sensore risulti fisso. Inoltre, presenta tre fori filettati di dimensione pari a M6 allo scopo di accoppiarlo con dei perni fulcro MISUMI LXAB6 F30 MA3 con filettatura esterna pari a M6.

Il movimento lungo l'asse X viene eseguito attraverso l'utilizzo di tre perni che realizzano la guida prismatica. Questi elementi sono posti all'interno del link 2 e del link 6 che realizzano il giunto rotoidale a forcella.

Vengono impiegati delle boccole flangiate IGUS JFM 0608 [27] che risulta applicato al componente che garantiscono coefficienti di attrito molto bassi nel funzionamento a secco ed una buona riduzione delle vibrazioni. Inoltre, vengono impiegate delle boccole cilindriche IGUS P210SM 0608 [28] vengono accoppiate ai perni in modo da garantire buoni coefficienti d'attrito e usura.

All'interno dei link 2 e del link 6, Figura 6.11, sono stati realizzati dei fori pari di diametro pari a 22 mm in cui viene posizionato uno snodo sferico IGUS KBLM 06 MH. Questo componente [29] presenta una resistenza elevata alle sollecitazioni con carichi variabili ed inoltre garantisce una elevata riduzione alle vibrazioni.

Gli snodi sferici presentano una filettatura interna che permette l'accoppiamento con le celle di carico LC 1 ed LC 3. Pertanto, il sensore è in grado di registrare le forze applicate lungo l'asse Y attraverso il movimento di questi elementi.

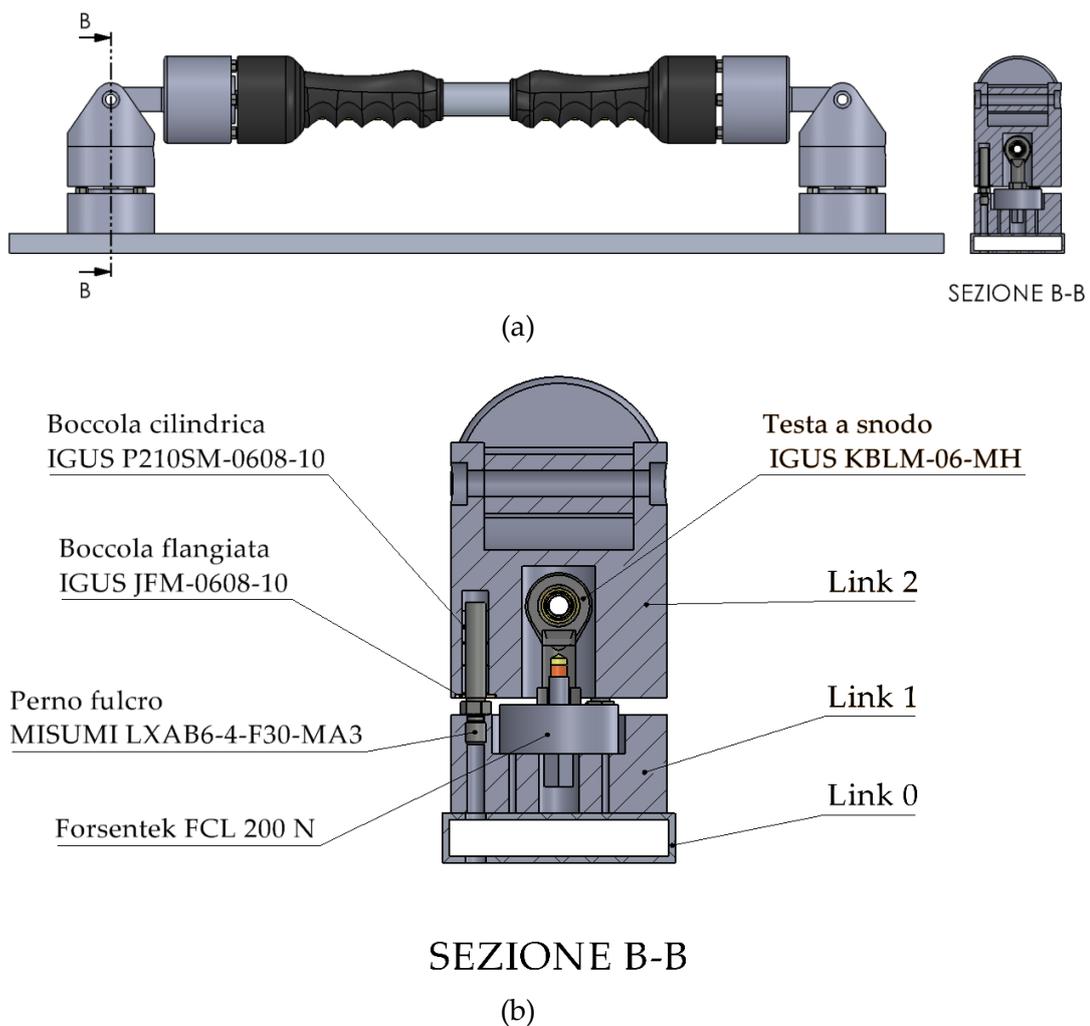


Figura 6.11 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: (a) Sezione laterale; (b) Vista sezionata

Le due coppie rotoidali *A* e *B* sono realizzate attraverso l'utilizzo di un perno che collega due corpi rigidi di collegamento. Il link 2 ed il link 3 realizzano la coppia cinematica *A* invece il link 5 ed il link 6 realizzano la coppia cinematica *B*. In questo modo si è in grado di caricare indipendentemente le celle di carico LC 1 ed LC 3 evitando di affidarsi alla flessione degli elementi della maniglia.

Il link 3, Figura 6.12, è realizzato in modo tale da contenere al suo interno la cella di carico Forsentek FCL 200 N garantendo la lettura della forza lungo l'asse X. Questo elemento presenta quattro fori M2.5 cosicché il sensore rimanga in posizione. Inoltre, sono presenti quattro fori filettati M6 che contengono i perni fulcro MISUMI LXAB6 F30 MA3 che realizzano la guida prismatica. L'operatore poggia le mani su una maniglia ergonomica nella quale si ha la presenza degli intagli che facilitano la presa. Inoltre, vi è un foro di diametro pari a 22 mm e di lunghezza pari a 40 mm in cui trova alloggiamento la testa a snodo IGUS KBLM 06 MH.

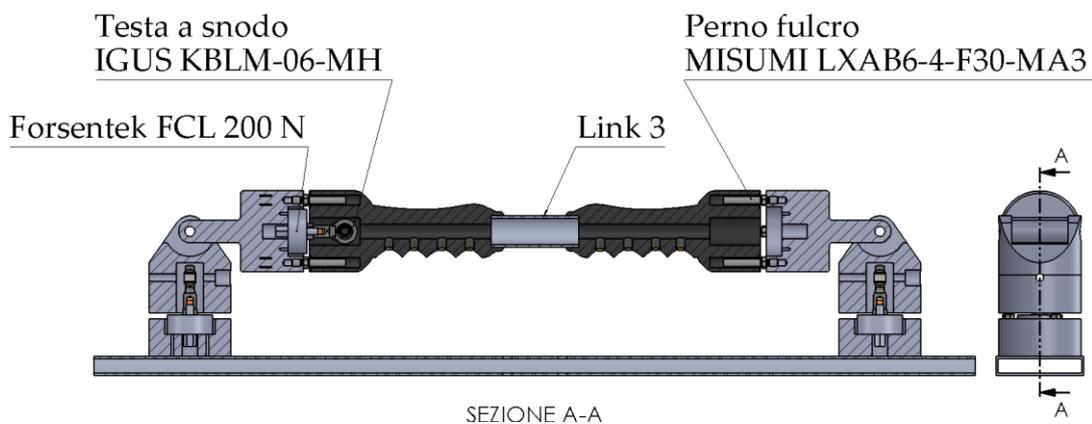


Figura 6.12 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: Sezione manubri ergonomici

Il manubrio, Figura 6.13, presenta quattro fori di diametro 7 mm allo scopo di inserire i sensori capacitivi ed inoltre ad una estremità viene realizzata un foro di diametro pari ad 10 mm al fine di facilitare il passaggio dei cavi.

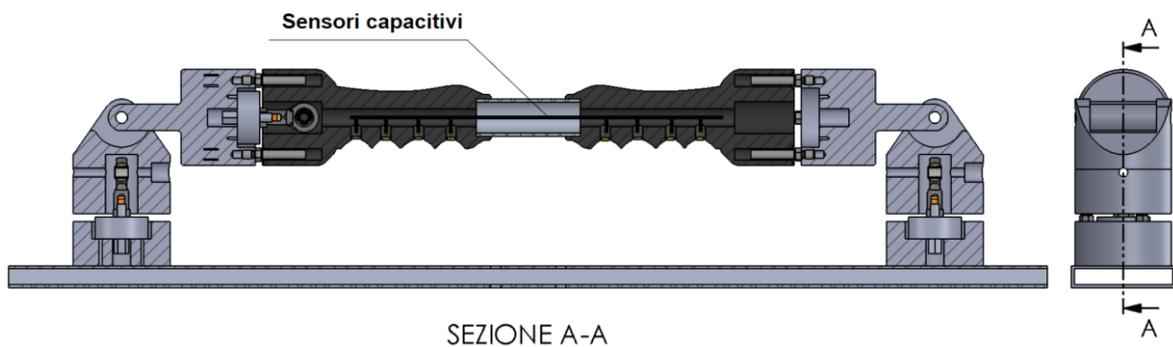


Figura 6.13 - Maniglia sensorizzata guide prismatiche: Sezione vista frontale

6.3 Progettazione esecutiva con coppie rotoidali

Questa soluzione di maniglia sensorizzata, rappresentata nella Figura 6.14, è stata ideata al fine di utilizzare unicamente coppie rotoidali. Il sistema è stato realizzato in modo tale che le celle di carico siano posizionati affinché i movimenti siano indipendenti l'uno rispetto all'altro cosicché non si influenzano a vicenda.

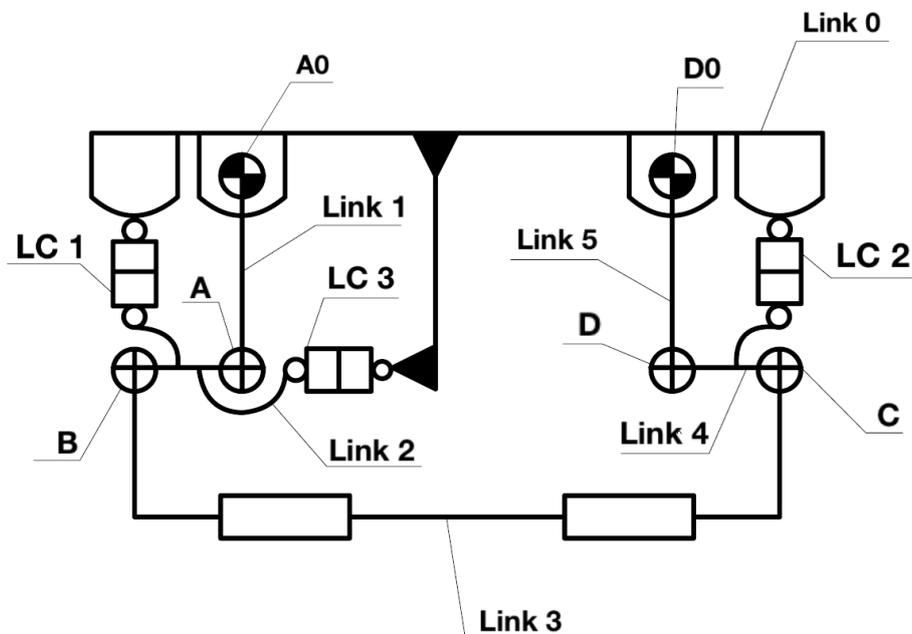


Figura 6.14 - Schema funzionale con cerniere

La Figura 6.15 rappresenta la realizzazione esecutiva della maniglia sensorizzata realizzata attraverso l'unione di diversi componenti in modo tale da svolgere i movimenti desiderati.

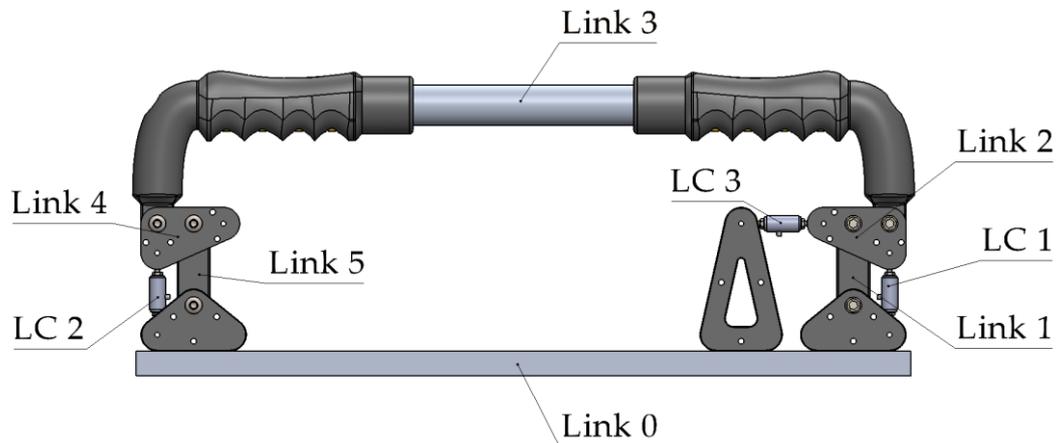


Figura 6.15 - Rappresentazione esecutiva maniglia sensorizzata con coppie rotoidali

La Figura 6.16 riporta la sezione della maniglia sensorizzata

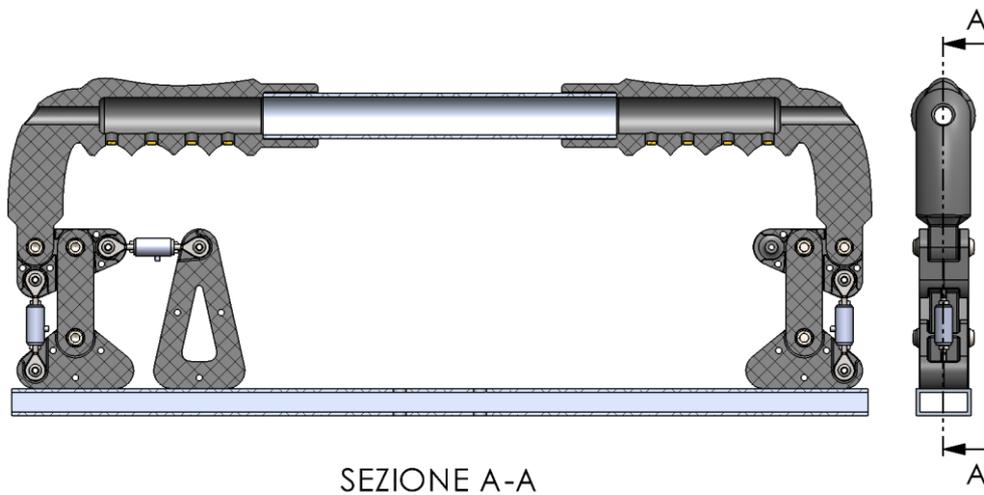


Figura 6.16 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione maniglia

La maniglia viene posizionato sul link 0, realizzato come profilato in alluminio di dimensione 60x20 mm, collocato sullo schienale della sedia. Su entrambe le facce del profilato sono stati realizzati tre serie di quattro fori di diametro pari ad 5 mm posti su un rettangolo di dimensione 17x24 mm. Questi fori sono utilizzati

per posizionare i rami della maniglia. Inoltre, sono presenti due fori di diametro pari ad 7 mm utilizzati per fissarlo sullo schienale della sedia.

In questa soluzione utilizziamo le celle di carico uniassiali FLAE 100 N [30] che sono realizzati in acciaio inossidabile a forma cilindrica basato sull'utilizzo di estensimetri. Il sensore viene posto tra la parte fissa e mobile della maniglia sensorizzata. Come osserviamo nella Figura 6.17, il trasduttore di forza è in grado di effettuare misurazioni di forza di compressione e trazione. Il trasduttore presenta su due lati dei fori filettati M3 che ci permette di utilizzano snodi sferici.

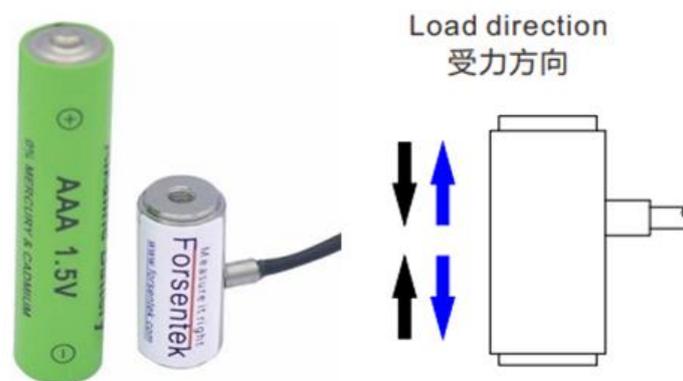


Figura 6.17 - Cella di carico FLAE 100 N [31]

Questi trasduttori, Figura 6.18, presentano una dimensione compatta e le dimensioni del non variano in base alla forza massima misurabile.

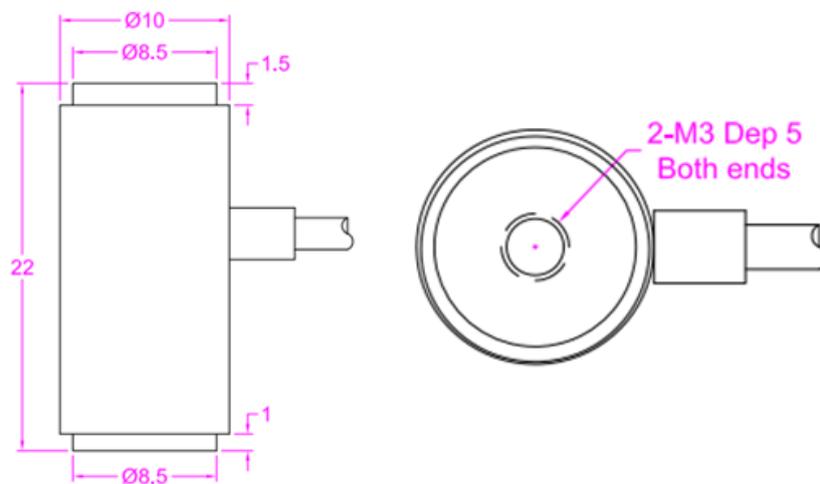


Figura 6.18 - Dimensione della Cella di carico FLAE [32]

Attraverso l'utilizzo di perni è possibile realizzare la coppia cinematica A e D , Figura 6.19, in modo tale da accoppiare i link 2 ed i link 4 alla base fissa. I link 1 ed i link 5 di dimensione 50x16 mm sono utilizzati per unire il manubrio alle cerniere $A0$ e $D0$ al link solidale al profilato in alluminio che a sua volta è collegato allo schienale della carrozzina. Questi link presentano dei fori di diametro pari ad 10.3 mm in cui vengono inseriti delle boccole flangiate IGUS JFM - 0810 - 05.

Allo stesso modo vengono realizzate le coppie cinematiche B e C che permettono l'accoppiamento del link 2 e del link 4 con il link 3.

Questi perni presentano dei fori filettati M6 che, unendosi alle viti, vanno in battitura sul link bloccandone il movimento assiale. Inoltre, vengono impiegati delle boccole flangiate IGUS JFM - 0810 - 05 che permettono di ridurre l'attrito.

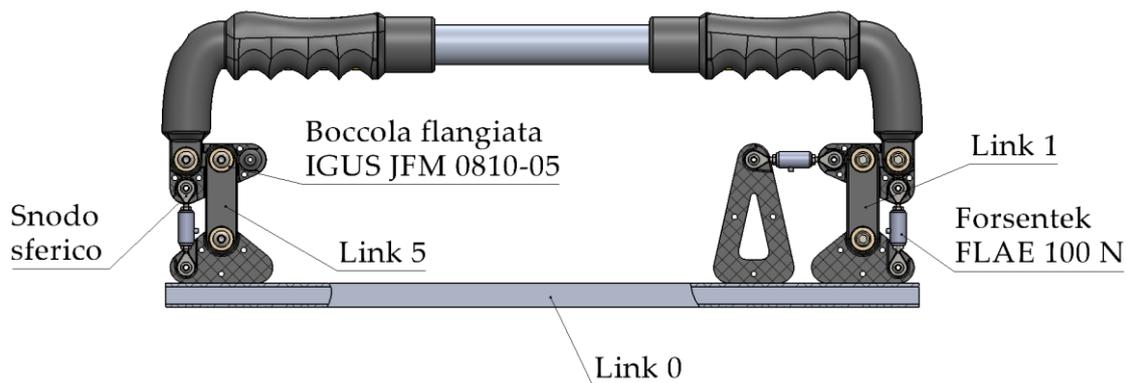


Figura 6.19 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Vista frontale con sezione parziale

Inoltre, sui link 2 ed i link 4 sono presenti dei fori di diametro pari ad 3 mm in cui sono collocati le celle di carico Forsentek FLAE-100 N. I sensori presentano dei fori filettati M6 affinché si accoppi ad entrambe le estremità con gli snodi sferici di diametro pari a 3 mm. In aggiunta viene inserito un dado allo scopo di eliminare il gioco che nasce con la filettatura.

I link 2 ed i link 4 sono realizzati attraverso due corpi separati affinché risulti più semplice lo stampaggio e che successivamente vengono uniti attraverso delle viti. La lettura della forza lungo l'asse X avviene attraverso la cella di carico Forsentek FLAE-100 N posta tra il link 2 e link 0. Questo corpo, Figura 6.20, rappresenta l'appoggio esterno necessario per collocare il sensore ed è formato da due link

presentano un foro di diametro pari a 3 mm dove viene posto il sensore. Inoltre, per ogni link sono presenti due fori di diametro pari ad 5.8 mm e profondo 8 mm utilizzati per fissarli sul profilato in alluminio.

Il link 3, Figura 6.20, realizza il manubrio in cui l'operatore appoggia la mano. Questo corpo presenta alla base un foro di diametro pari ad 10 mm che viene utilizzato per accoppiarsi con il perno e la boccia flangiata IGUS JFM - 0810 - 05 realizzando la coppia rotoidale *B* e *C*.

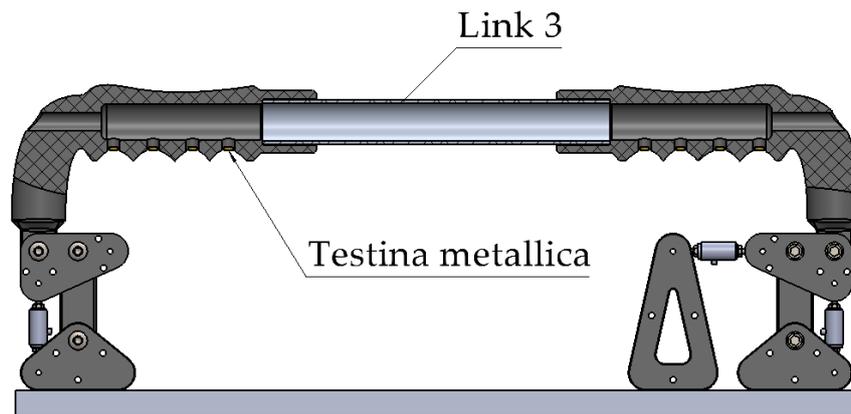


Figura 6.20 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione rami

Il manubrio, Figura 6.21, presenta quattro fori di diametro 7 mm allo scopo di inserire i sensori capacitivi ed inoltre ad una estremità viene realizzata un foro di diametro pari ad 10 mm al fine di facilitare il passaggio dei cavi. Inoltre, viene realizzato un foro di diametro pari a 26 mm e profondità 30 mm che permette l'accoppiamento con il link 12 formato da cilindro cavo in alluminio di diametro pari a 26 mm e lungo 190 mm.

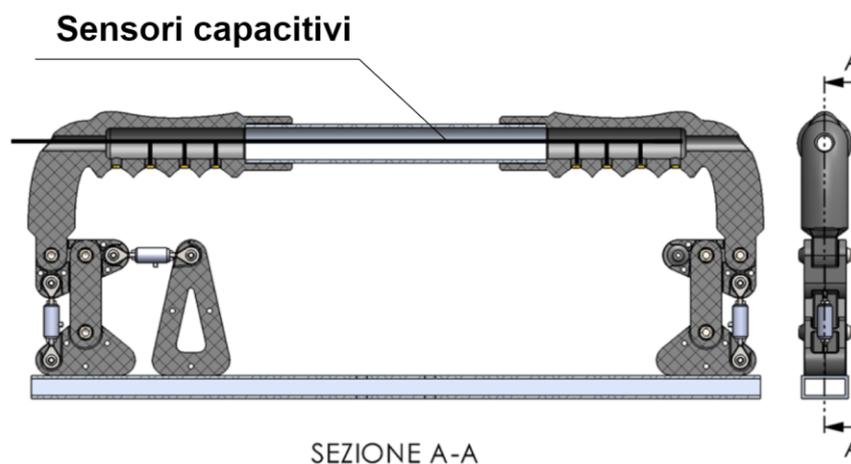


Figura 6.21 - Maniglia sensorizzata con coppie rotoidali: Sezione vista

7 Confronto progetti esecutivi

In questo capitolo confrontiamo le diverse soluzioni esecutivi presentate nei paragrafi precedenti.

L'utilizzo della sola cella di carico forza/coppia a sei assi permette di leggere con chiarezza le forze e momenti desiderati ma risulta dispendioso, pertanto, al fine di rispettare il requisito di economicità abbiamo deciso di procedere con l'utilizzo delle sole celle di carico monoassiali.

Le proposte funzionali che utilizzano le guide lineari, purché semplici, presentano delle difficoltà. I perni a fulcro, nonostante la presenza delle boccole, scorrendo all'interno della maniglia producono un elevato attrito. Pertanto, la maggior parte della forza applicata sulla maniglia viene persa per attrito e ne consegue che dopo un certo istante di tempo la cella di carico procede con la lettura. Inoltre, vi è la presenza di gioco tra le diverse parti che possono portare ad una incertezza nel movimento. Quindi si è deciso di abbandonare questo tipo di soluzione.

La soluzione che utilizza solamente coppie rotoidali ci permette di ottenere una configurazione in cui le celle di carico sono montate in maniera disaccoppiata. Questa condizione è garantita dal fatto che utilizziamo degli snodi sferici che presentano dei piccoli movimenti.

Questo vantaggio è molto importante in quanto desideriamo che le forze vengono lette con precisione nella sola direzione desiderata evitando che si influenzano a vicenda. Pertanto, questa soluzione garantisce una migliore misurazione delle forze applicate alla maniglia in quanto i giochi e la precisione di assemblaggio pesano meno sull'accuratezza delle misure.

Inoltre, utilizzando solo coppie rotoidali non abbiamo elementi che scorrono uno rispetto all'altro e di conseguenza non si genera un attrito che possa deteriorare la lettura della forza applicata.

In conclusione, si è deciso di procedere nello sviluppo di soluzioni che sfruttano il disaccoppiamento degli assi che ci garantiscono una lettura migliore delle forze garantendo un disaccoppiamento degli assi.

8 Ottimizzazione del design esecutivo e prototipo

La soluzione della maniglia sensorizzata proposta, pur rispettando i requisiti, può essere ottimizzata dal punto di vista del design esecutivo attraverso diversi accorgimenti.

Un miglioramento potrebbe essere ottenuto attraverso una riduzione della dimensione della maniglia sensorizzata al fine di ottenere una soluzione più compatta. Mantenendo fissa la dimensione del manubrio pari ad 425.4 mm procediamo nel ridurre l'ingombro lungo l'asse X e lungo l'asse Y.

Si rileva che lungo l'asse Y, Figura 8.1, tra il profilato in alluminio posto sullo schienale della carrozzina e l'asse del manubrio della maniglia vi è una distanza pari ad 150.5 mm.

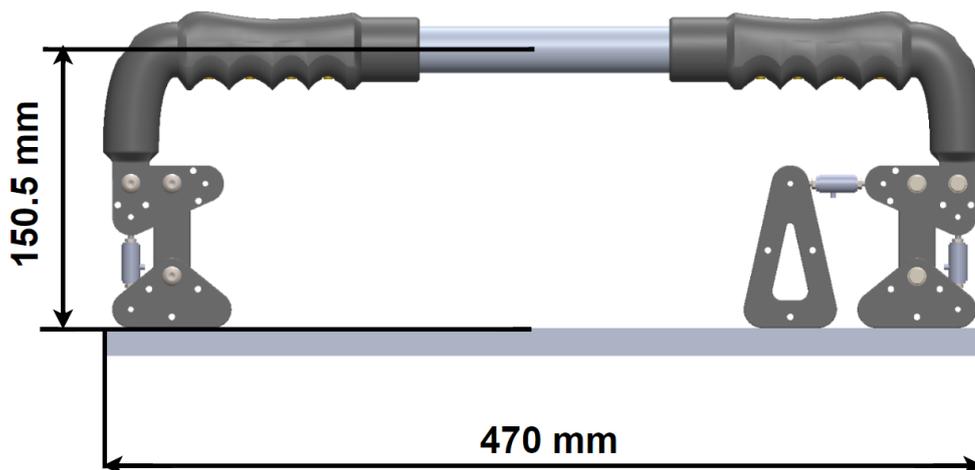


Figura 8.1 - Dimensione maniglia sensorizzata

Il limite principale della maniglia è dato dalla dimensione delle celle di carico con i nodi sferici di 50 mm. Questi elementi sono montati all'interno link 2 e link 4 in modo tale fra le cerniere vi è una distanza di 18 mm. Pertanto, la riduzione di questa dimensione ci permette di guadagnare questa distanza.

Porre questa distanza a zero non è possibile senza influire sull'acquisizione della forza applicata. Possiamo in alternativa avvicinare il manubrio allo schienale della carrozzina, Figura 8.2, spostando la testa sferica insieme alla cella di carico lungo l'asse del profilato. In questo modo riusciamo a ridurre la distanza a 136 mm ottenendo un guadagno di 14.5 mm.

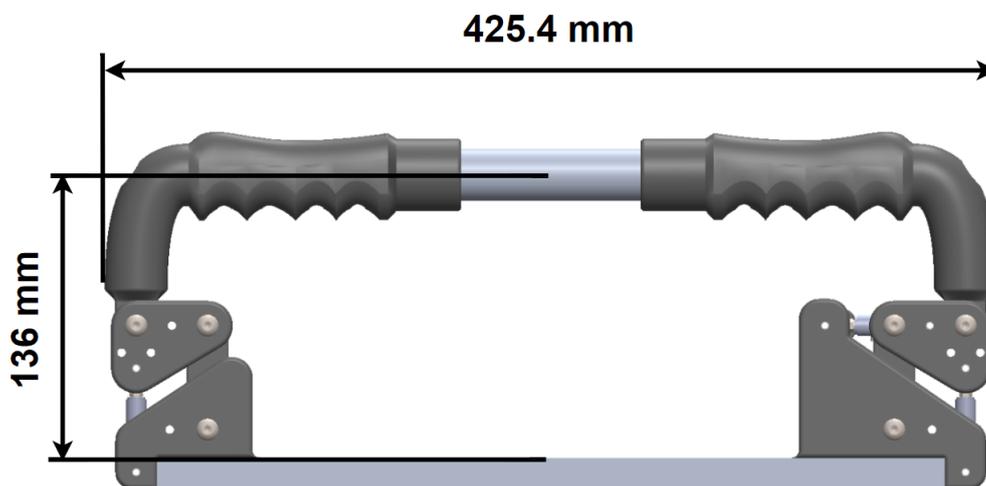


Figura 8.2 - Dimensione nuova maniglia sensorizzata

Inoltre, abbiamo realizzato all'interno dei link, Figura 8.3, una apertura di 20 gradi in modo tale da garantire spazio di movimento. Questa soluzione, inoltre, ci permette inoltre di ridurre l'ingombro lungo l'asse X della maniglia sensorizzata. In questo modo passiamo da un profilato in alluminio di dimensioni pari a 470 mm ad un valore pari a 375.4 mm.

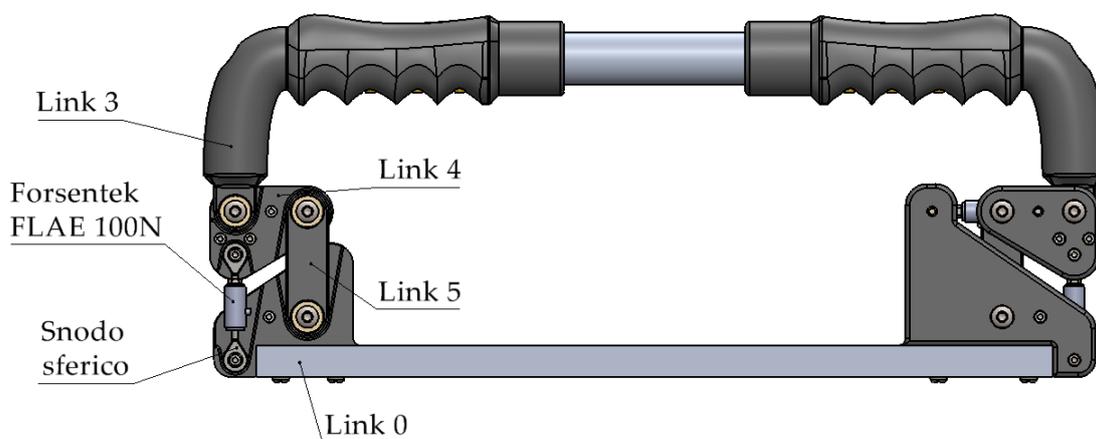


Figura 8.3 - Vista frontale con sezione parziale

Possiamo osservare che nella parte centrale della maniglia sensorizzata vi è la presenza di un elemento solidale al link 0, pertanto, produce un ingombro che può essere non desiderato.

Una soluzione per risolvere questa problematica può essere ottenuta spostando la cella di carico, Figura 8.4, su un piano secondario in modo tale che risulti solidale al link 2. Pertanto, l'elemento solidale al link 0 viene modificato in modo tale che possa essere appoggiato la cella di carico. Questa soluzione ci permette di garantire la misurazione della forza lungo l'asse X in quanto il link è fisso al telaio, ovvero il link 0.

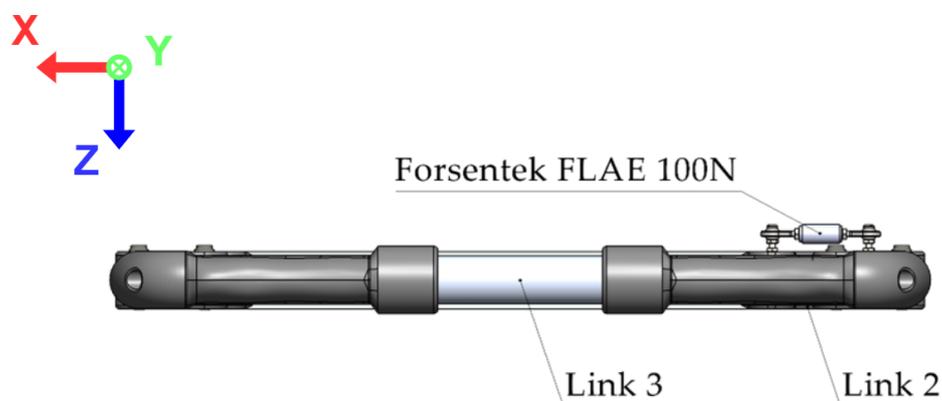


Figura 8.4 - Vista superiore

Il trasduttore deve essere posizionato parallelo all'asse delle coppie rotoidali A e B al fine di garantire una misurazione corretta della forza. In caso contrario se l'operatore esercitasse una forza lungo l'asse X si verrebbe a generare una forza di trazione e compressione sulla cella di carico LC 1 non desiderata.

Pertanto, attraverso questa modifica non riduciamo soltanto l'ingombro nella parte centrale ma evitiamo di realizzare un ulteriore elemento.

Questi accorgimenti ci permettono di realizzare la versione definitiva della maniglia sensorizzata. Nella Figura 8.5 osserviamo la sezione della maniglia sensorizzata

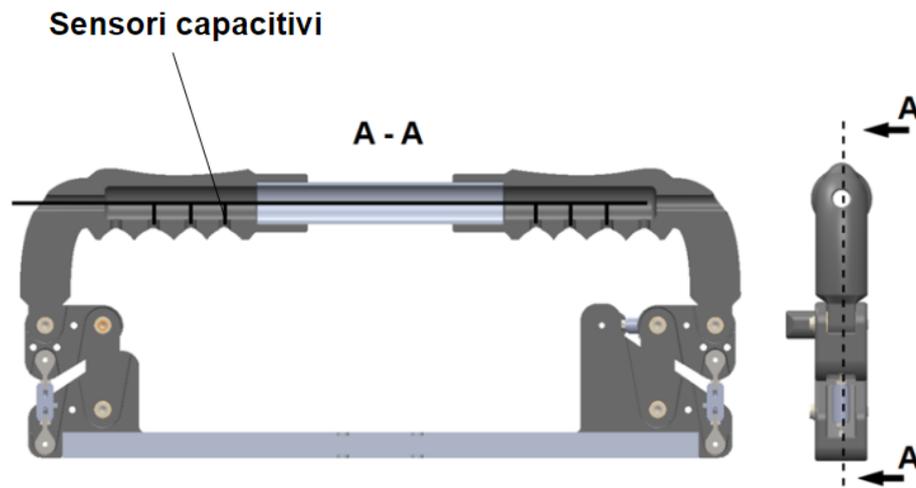


Figura 8.5 - Sezione vista frontale maniglia sensorizzata

Nella Figura 8.6 viene riportato l'esplosione dell'assieme maniglia. I link sono stati realizzati attraverso l'utilizzo di una stampante 3D impiegando un filamento di tipo Black Tough PLA

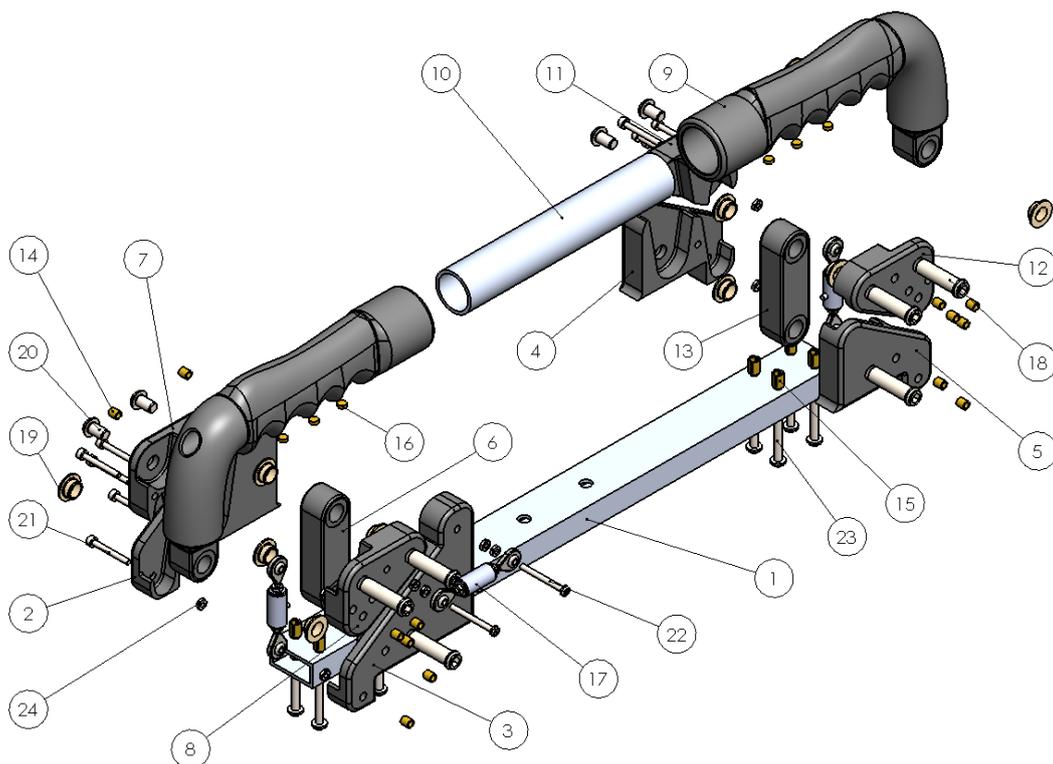


Figura 8.6 - Esplosione Maniglia Sensorizzata

Num. articolo	Num. parte	Descrizione	Quantità
1	Link0	Profilato in Alluminio 30x15mm	1
2	Link0A		1
3	Link0B		1
4	Link0C		1
5	Link0D		1
6	Link1		1
7	Link2A		1
8	Link2B		2
9	Link3		2
10	Link3 Al Tube	145.4x25mm	1
11	Link4A		1
12	Link4B		1
13	Link5		1
14	Insert	M3X4.8X5	13
15	Flush Insert	M4X5.84X8	8
16	Split Pin		6
17	FORSENTEK FLAE 100N	Cella di Carico con Giunti Sferici	3
18	Perno D8 M6	Revolute pin	6
19	IGUS JFM-0810-05	Boccola Flangiata	12
20	ISO 7380 - M6 x 10 - 10N	Vite Testa Bombata Spianata con Esagono Incassato	6
21	ISO 4762 M3 x 25 - 18C	Vite Testa Cilindrica con Esagono Incassato	11
23	ISO 1580 - M4 x 30 - 30C	Vite a testa Bombata con Intaglio	8
22	ISO 1580 - M3 x 30 - 30C	Vite a testa Bombata con Intaglio	2
24	ISO - 4035 - M3 - N	Dado Esagonale Basso	12

Figura 8.7 - Distinta base Maniglia sensorizzata

Possiamo realizzare una diversa soluzione di manubrio al fine di osservare se è possibile comandare la maniglia con una sola mano, Figura 8.8. Risulta comodo per l'operatore esterno essere in grado di controllare il moto della carrozzina con una sola mano in modo tale da permettere di svolgere delle attività secondarie.

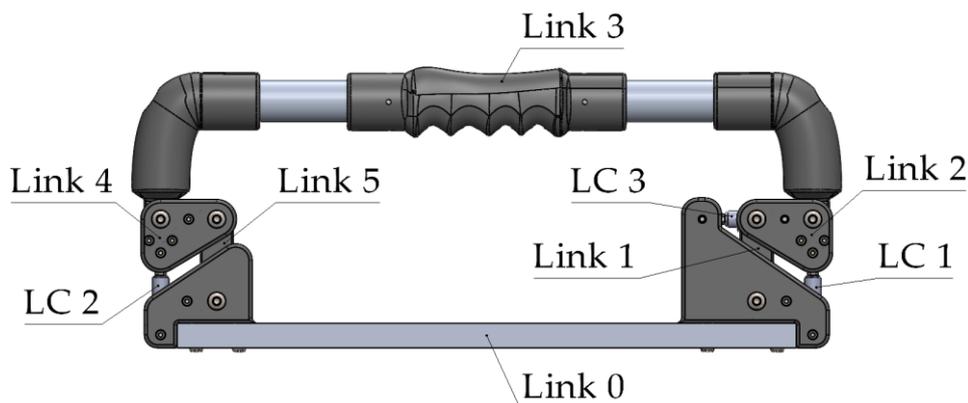


Figura 8.8 - Versione maniglia sensorizzata versione ad una mano

Durante la fase di sperimentazione si procederà attraverso diverse prove nel valutare se questa versione sia in grado di realizzare i riferimenti in modo corretto, soprattutto se si ha la possibilità di generare il momento lungo l'asse Z.

9 Analisi statica

Al fine di comprendere le forze che agiscono sulle celle di carico è necessario esaminare il funzionamento del meccanismo. In questa analisi consideriamo assente la presenza di attrito nei giunti. Nella Figura 9.1a si osserva che il sistema utilizza unicamente delle cerniere che hanno come unico grado di libertà la rotazione lungo il proprio asse. Nella Figura 9.1b viene riportata il diagramma di corpo libero del meccanismo.

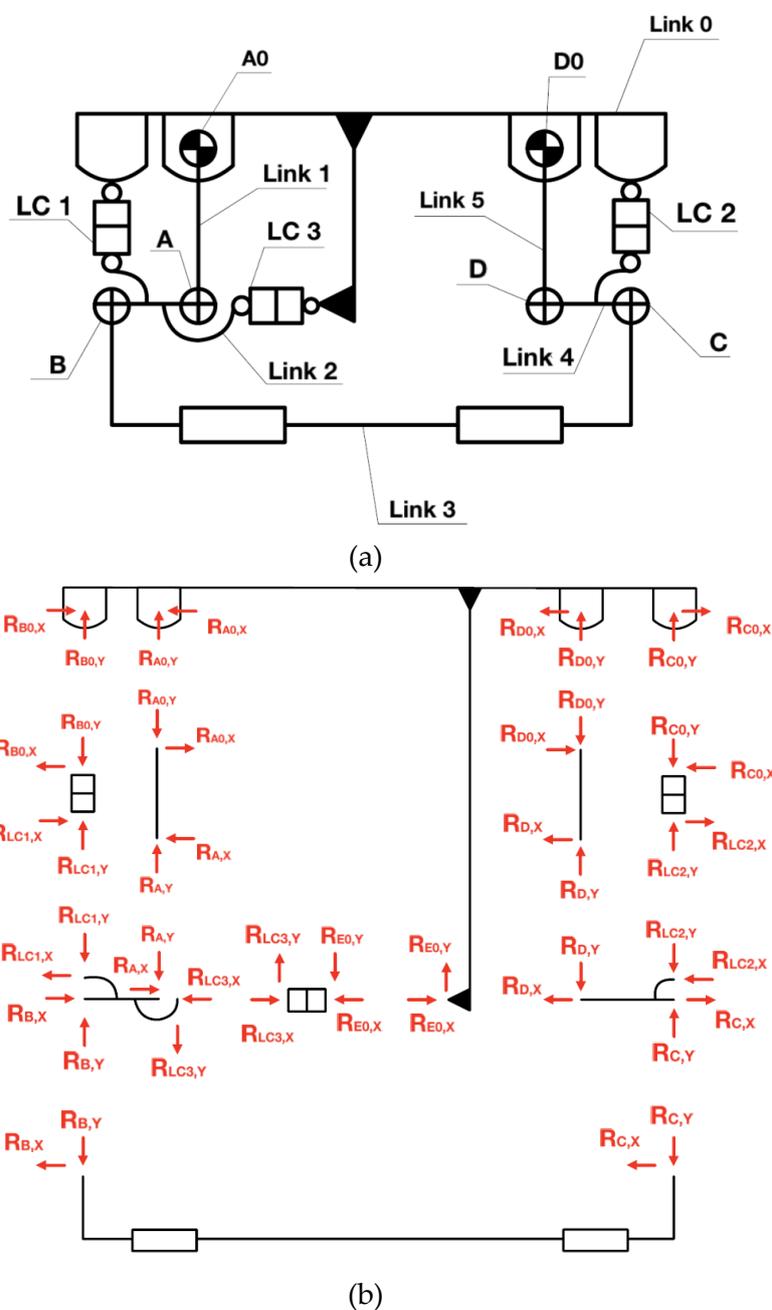


Figura 9.1 -Maniglia sensorizzata: (a) Schema funzionale maniglia sensorizzata e (b) Diagramma corpo libero

Nella Figura 9.2 osserviamo il diagramma di corpo libero del link 3 in cui agiscono le reazioni vincolari della cerniera B e C ed inoltre partecipano anche le forze applicate dall'operatore esterno.

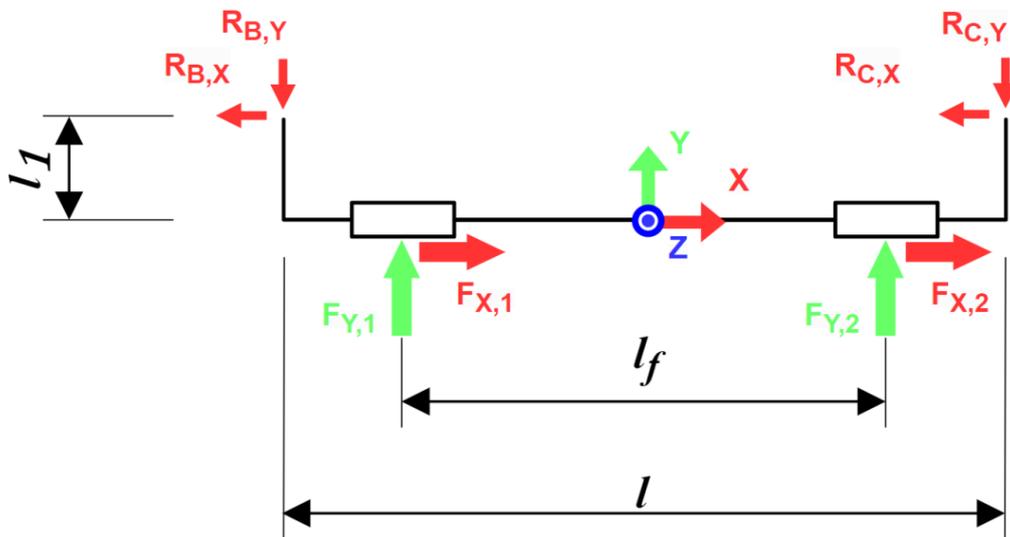


Figura 9.2 - Diagramma corpo libero link 3

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_{X,1} + F_{X,2} - R_{B,X} - R_{C,X} = 0 \\ F_{Y,1} + F_{Y,2} - R_{B,Y} - R_{C,Y} = 0 \\ (F_{Y,2} - F_{Y,1}) * \frac{l_f}{2} + (R_{B,Y} - R_{C,Y}) * \frac{l}{2} + R_{B,X} * l_1 = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.3 osserviamo il diagramma di corpo libero del link 2 in cui agiscono le reazioni vincolari della cerniera B e le reazioni delle celle di carico LC 1 e LC 3.

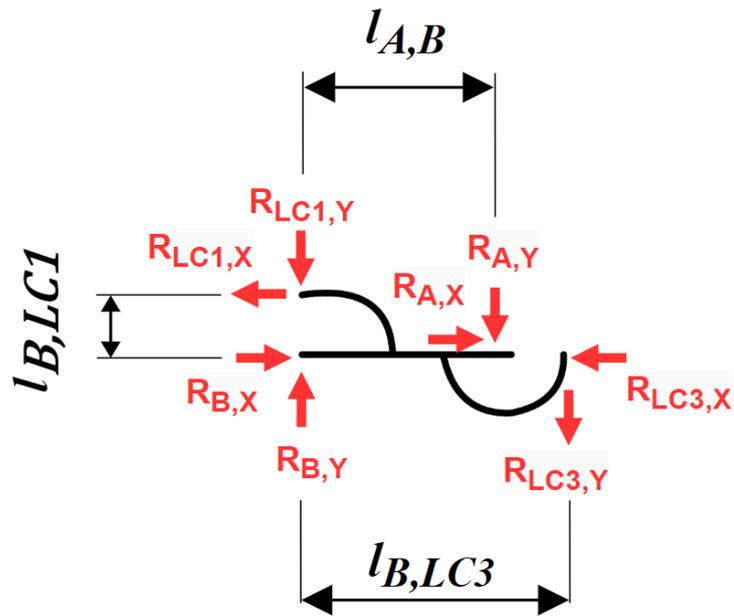


Figura 9.3 - Diagramma corpo libero link 2

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{B,X} - R_{LC1,X} + R_{A,X} - R_{LC3,X} = 0 \\ R_{B,Y} - R_{LC1,Y} - R_{A,Y} - R_{LC3,Y} = 0 \\ R_{LC1,X} * l_{B,LC1} - R_{A,Y} * l_{A,B} - R_{LC3,Y} * l_{B,LC3} = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.4 osserviamo il diagramma di corpo libero del link 4 in cui agiscono le reazioni vincolari della cerniera C , della cerniera D e le reazioni vincolari della cella di carico LC 2.

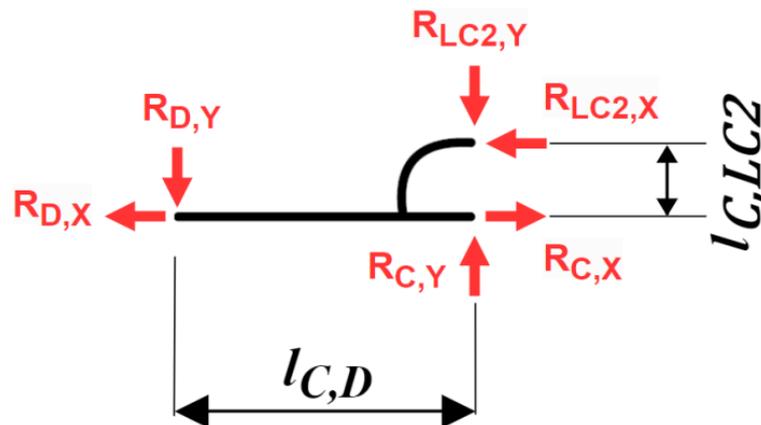


Figura 9.4 - Diagramma corpo libero link 4

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{C,X} - R_{LC2,X} - R_{D,X} = 0 \\ R_{C,Y} - R_{LC2,Y} - R_{D,Y} = 0 \\ R_{D,Y} * l_{C,D} + R_{LC2,X} * l_{C,LC2} = 0 \end{cases}$$

In Figura 9.5 osserviamo il diagramma della cella di carico LC 1 in cui agiscono le reazioni vincolari. Le celle di carico sono montate con giunti sferici, pertanto, le uniche forze trasmesse sono quelle lungo l'asse della cella di carico.

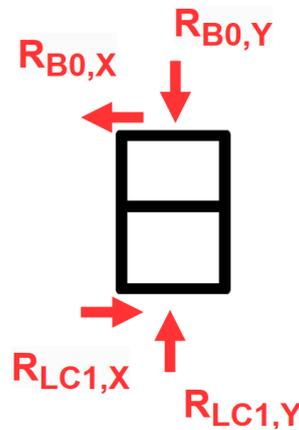


Figura 9.5 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 1

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{LC1,X} - R_{B0,X} = 0 \\ R_{LC1,Y} - R_{B0,Y} = 0 \\ R_{B0,X} = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.6 osserviamo il diagramma della cella di carico LC 2 in cui agiscono le reazioni vincolari.

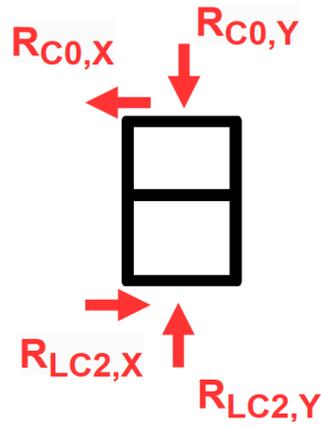


Figura 9.6 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 2

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{LC2,X} - R_{C0,X} = 0 \\ R_{LC2,Y} - R_{C0,Y} = 0 \\ R_{C0,X} = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.7 osserviamo il diagramma della cella di carico LC 3 in cui agiscono le reazioni vincolari.

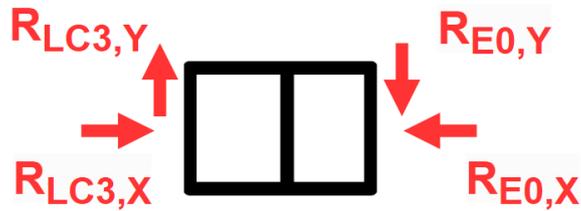


Figura 9.7 - Diagramma corpo libero cella di carico LC 3

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{LC3,X} - R_{E0,X} = 0 \\ R_{LC3,Y} - R_{E0,Y} = 0 \\ R_{E0,Y} = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.8 osserviamo il diagramma della cella di carico link 1 in cui agiscono le reazioni vincolari.



Figura 9.8 - Diagramma corpo libero link 1

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{A,X} - R_{A0,X} = 0 \\ R_{A,Y} - R_{A0,Y} = 0 \\ R_{A0,X} = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.9 osserviamo il diagramma della cella di carico link 5 in cui agiscono le reazioni vincolari.

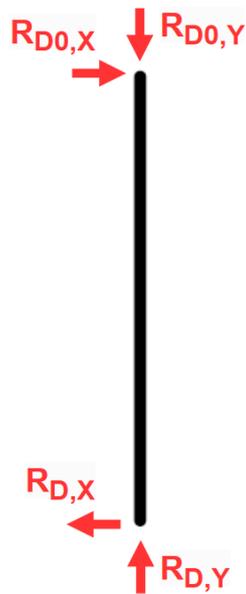


Figura 9.9 - Diagramma corpo libero link 5

Otteniamo quindi le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{D,X} - R_{D0,X} = 0 \\ R_{D,Y} - R_{D0,Y} = 0 \\ R_{D0,X} = 0 \end{cases}$$

Risolvendo le diverse equazioni osserviamo che alcune reazioni vincolari sono bilanciate dalle reazioni di supporto della struttura del meccanismo.

Dunque, nel link 4 le equazioni si semplificano nel seguente modo:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{C,X} = 0 \\ R_{C,Y} = R_{LC2,Y} \\ R_{D,Y} = 0 \end{cases}$$

Applichiamo lo stesso ragionamento al link 2

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{B,X} = R_{LC3,X} \\ R_{B,Y} = R_{LC1,Y} \\ R_{A,Y} = 0 \end{cases}$$

Infine, al link 3 compaiono le reazioni vincolari delle sole celle di carico.

$$\begin{cases} F_{X,1} + F_{X,2} = R_{LC3,X} \\ F_{Y,1} + F_{Y,2} = R_{LC1,Y} + R_{LC2,Y} \\ (F_{Y,2} - F_{Y,1}) * \frac{l_f}{2} = (R_{LC2,Y} - R_{LC1,Y}) * \frac{l}{2} - R_{LC3,X} * l_1 = 0 \end{cases}$$

Nella Figura 9.10 viene rappresentato le uniche reazioni vincolari che entrano in gioco nel sistema

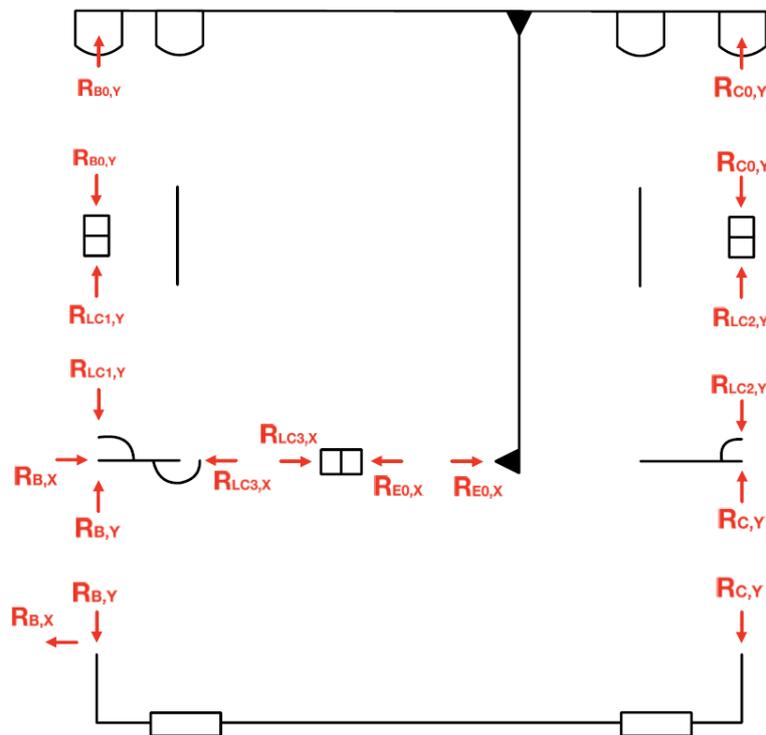


Figura 9.10 - Analisi statica Maniglia

Per semplicità di scrittura sostituiamo $R_{LC1,Y}$, $R_{LC2,Y}$ e $R_{LC3,X}$ con $F_{lc,1}$, $F_{lc,2}$ e $F_{lc,3}$ che rappresentano le forze di reazioni vincolari che otteniamo dalle celle di carico, come rappresentato dalla Figura 9.11.

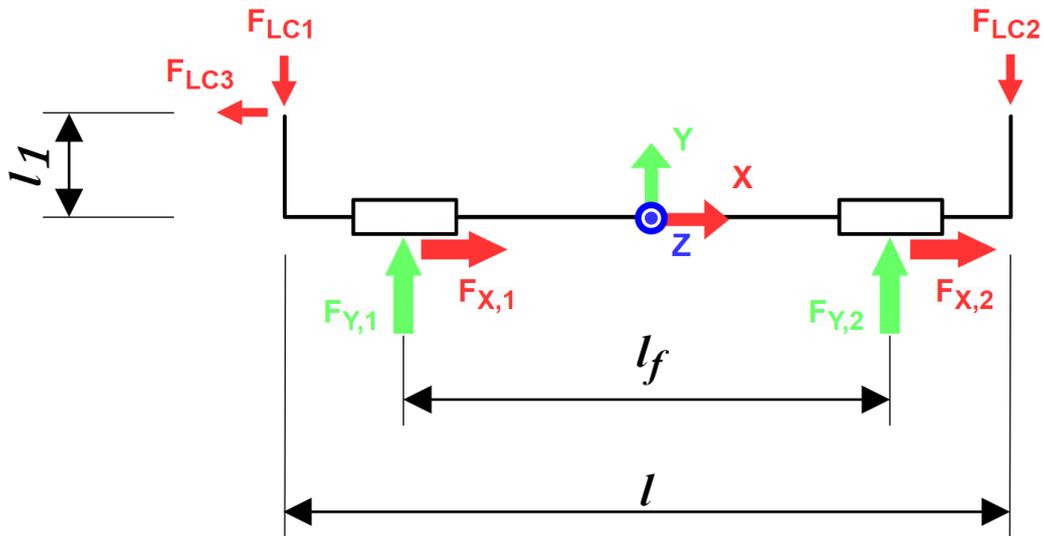


Figura 9.11 - Nuovo diagramma corpo libero link 3

Pertanto, le equazioni che determinano l'interazione dell'utente con la maniglia sensorizzata sono le seguenti:

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_{X,1} + F_{X,2} = F_{LC,3} \\ F_{Y,1} + F_{Y,2} = F_{LC,1} + F_{LC,2} \\ (F_{Y,1} - F_{Y,2}) * \frac{l_f}{2} = (F_{LC,2} - F_{LC,1}) * \frac{l}{2} - F_{LC,3} * l_1 \end{cases}$$

Queste equazioni descrivono il comportamento del meccanismo che abbiamo realizzato.

Questo comportamento trova spiegazione nel fatto che se rimuoviamo la cella di carico LC 1 ed applichiamo una forza lungo l'asse Y, osserviamo che la cerniera B si sposta in avanti. Pertanto, la traslazione in quella direzione nei limiti di piccoli spostamenti è un grado di libertà. In realtà sarebbe più corretto dire che il grado di libertà sarebbe la rotazione della cerniera B attorno alla cerniera A, ma

per piccoli spostamenti possiamo considerare il grado di libertà come traslazione in quella direzione. Quindi tutte le forze che vengono applicate lungo questo asse hanno come reazione vincolare la forza $F_{LC,1}$, che è la reazione vincolare della cella di carico 1. Lo stesso ragionamento lo possiamo applicare a tutte le forze applicate alla cerniera C che sono bilanciate dalla reazione vincolare della cella di carico LC 2.

Se rimuoviamo la cella di carico LC 3 ed applichiamo una forza lungo l'asse X osserviamo che in questa direzione l'unica reazione vincolare viene trasmessa da $F_{LC,3}$.

In Figura 9.12 osserviamo la rappresentazione del diagramma di corpo libero nel caso la maniglia sensorizzata venisse utilizzata da una sola mano da parte dell'operatore.

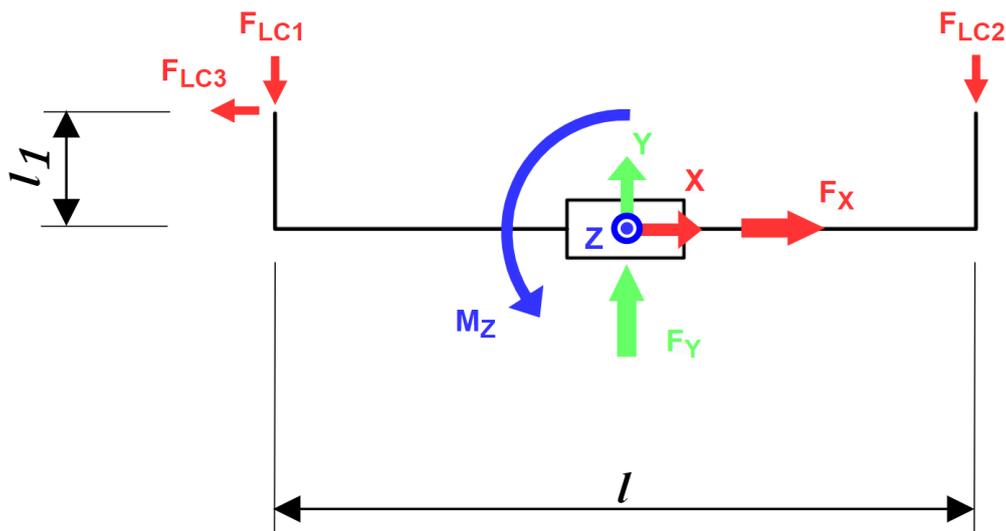


Figura 9.12 - Diagramma corpo libero link 3 versione maniglia una mano

In questo caso non vi è una variazione dello studio delle reazioni vincolari ma si semplificano le equazioni utilizzate per descrivere il link 3 nel momento in cui interagisce con l'utente.

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 \\ \sum F_Y = 0 \\ \sum M_Z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_X = F_{LC,3} \\ F_Y = F_{LC,1} + F_{LC,2} \\ M_Z = (F_{LC,2} - F_{LC,1}) * \frac{l}{2} - F_{LC,3} * l_1 \end{cases}$$

10 Sperimentazione

In questo capitolo ci concentriamo nell'analizzare il comportamento del meccanismo al fine di valutare come il sistema risponde nel momento in cui interagisce con un'utente esterno.

10.1 Banco prova

Realizzato il prototipo procediamo nell'effettuare delle prove sperimentali che hanno lo scopo di dimostrare che effettivamente il meccanismo sia in grado di misurare con efficacia le forze e momenti applicate dall'operatore esterno. Queste prove vengono eseguite confrontando i risultati ottenuti con quelli che ricaviamo da una cella di carico a sei assi che ci fidiamo a priori.

Nella Figura 10.1 osserviamo come sono predisposti i vari elementi del banco al fine di svolgere le diverse prove sperimentali, al fine di valutare l'efficacia del dispositivo nella misurazione di forze e momenti applicate dall'utente.

Le prove sperimentali vengono eseguite confrontando i valori di forza e momenti letti dalla cella di carico a sei assi SensONE della BOTA SYSTEM con i valori acquisiti dal meccanismo che impiega tre celle di carico monoassiali Forsentek FLAE 100 N.

La lettura dei valori della cella di carico forza/coppia a sei assi SensONE avviene attraverso un protocollo di comunicazione seriale per interfacciarsi direttamente con il computer. Questo collegamento permette di acquisire i dati direttamente sul software Matlab.

All'ingresso dell'amplificatore LC3A vengono collegate le celle di carico uniassiali Forsentek FLAE 100 N della maniglia sensorizzata. Successivamente il segnale viene elaborato dall'Arduino UNO R4 Minima e viene inviato, attraverso la porta USB, al computer al fine di procedere con il confronto dei due segnali. L'amplificatore e l'Arduino vengono alimentati con una tensione di 26 Volt in modo tale da garantire il salto di tensione necessario per svolgere le misurazioni.

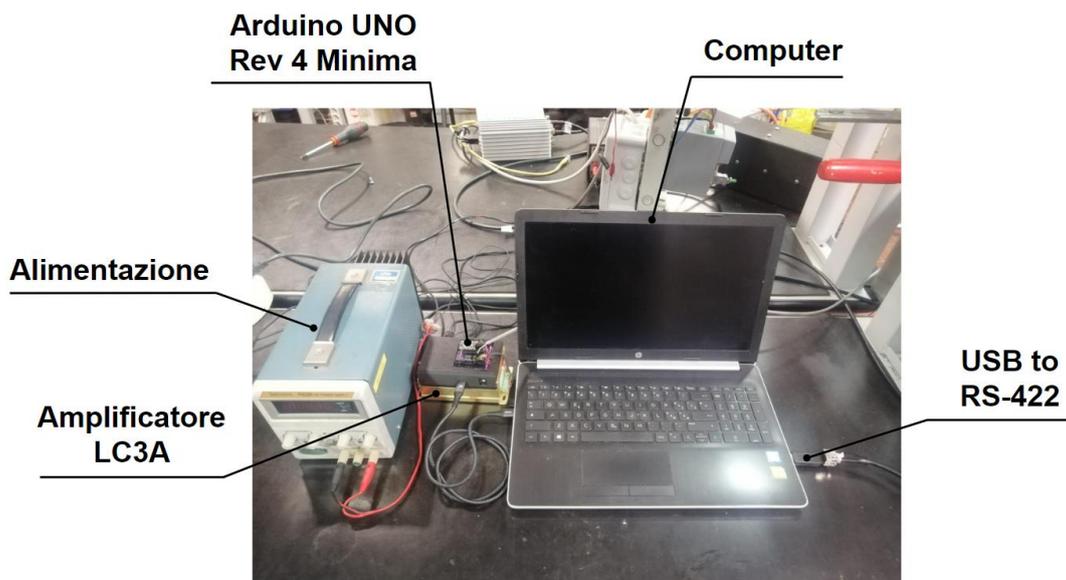


Figura 10.1 - Banco Prova

Nella Figura 10.2 osserviamo le due versioni della maniglia sensorizzata che permettono la guida della carrozzina con due mani od una mano sola.

La maniglia viene posta sulla cella di carico a sei assi SensONE, che a sua volta viene fissata su una lastra in acciaio.

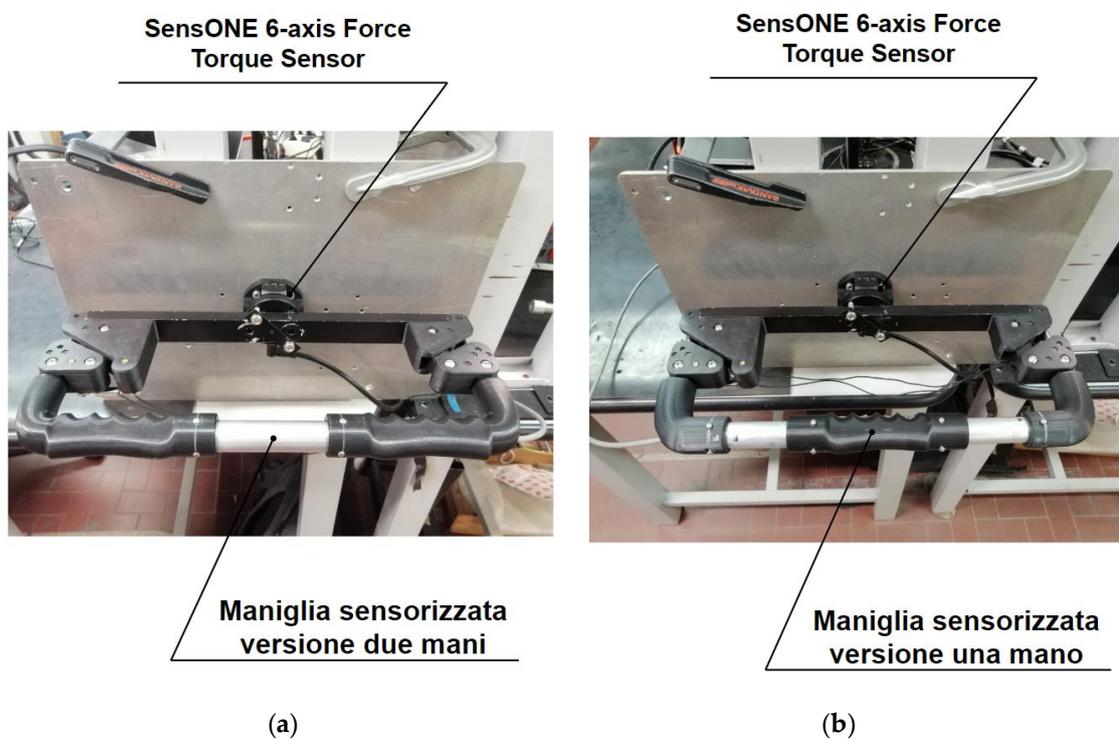


Figura 10.2 - Banco Prova: (a) maniglia sensorizzata versione due mani e (b) maniglia sensorizzata versione una mano

Nella Figura 10.3 osserviamo lo schema del banco di prova in cui definiamo come sistema di riferimento $\{h\}$ il sistema di riferimento posto al centro della maniglia e $\{LC_{6A}\}$ il sistema di riferimento posta sulla cella di carico a sei assi. Pertanto, al fine di eseguire un corretto confronto delle forze lette dalle celle di carico monoassiali e dalla cella di carico a sei assi, risulta necessario riportare tutte le forze nel sistema di riferimento $\{LC_{6A}\}$.

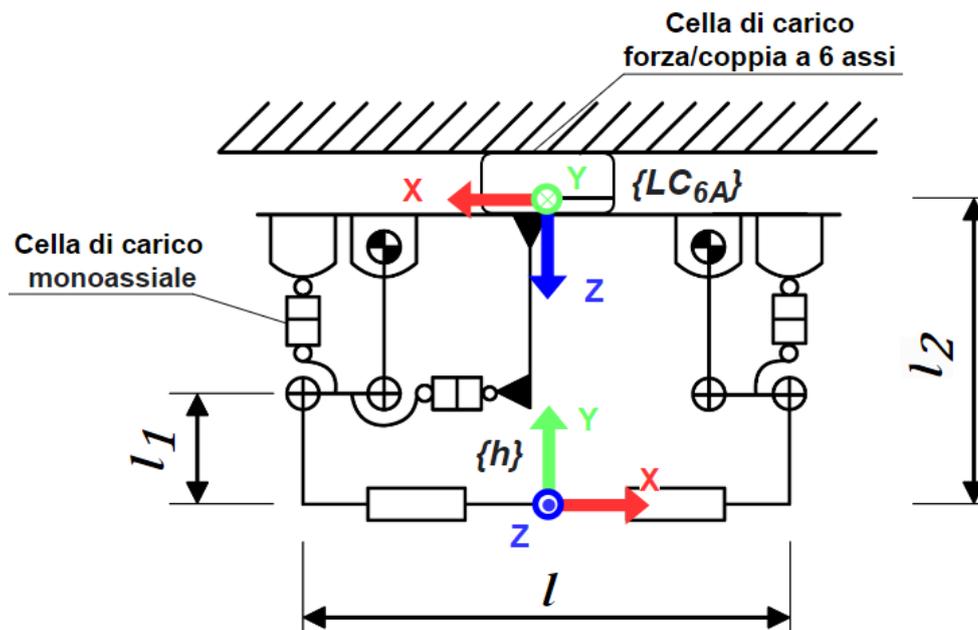


Figura 10.3 - Schema banco prova

Possiamo definire le forze applicate all'operatore alla maniglia, rispetto al sistema di riferimento $\{h\}$, come:

$${}^h W_{user} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

Le componenti che consideriamo sono F_x , F_y e M_z in quanto misurati dalle celle di carico monoassiali, mentre le restanti si scaricano attraverso la struttura del meccanismo.

$${}^h \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{LC,3} \\ F_{lc,1} + F_{lc,2} \\ (F_{lc,2} - F_{lc,1}) * \frac{l}{2} - F_{lc,3} * l_1 \end{bmatrix}$$

Pertanto, possiamo definire una relazione di trasporto al fine di riportare le forze al sistema di riferimento $\{LC_{6A}\}$ attraverso un sistema di equazioni:

$${}^{LC_{6A}}W_{user} = {}^{LC_{6A}} \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - {}^h F_x \\ - {}^h F_y \\ - {}^h M_z - l_2 * {}^h F_x \end{bmatrix}$$

Nella Figura 10.4 viene raffigurato lo schema di funzionamento della sperimentazione. In uscita dalla cella di carico abbiamo un segnale analogico che viene amplificato dall'amplificatore al fine di ottenere un segnale da ± 5 Volt. Successivamente viene saturato tra 0 Volt e 5 Volt e viene letto dal microcontrollore della maniglia sensorizzata Arduino UNO Rev4 che comunica con il computer. La cella di carico forza/coppia a sei assi, invece, comunica direttamente con il computer.

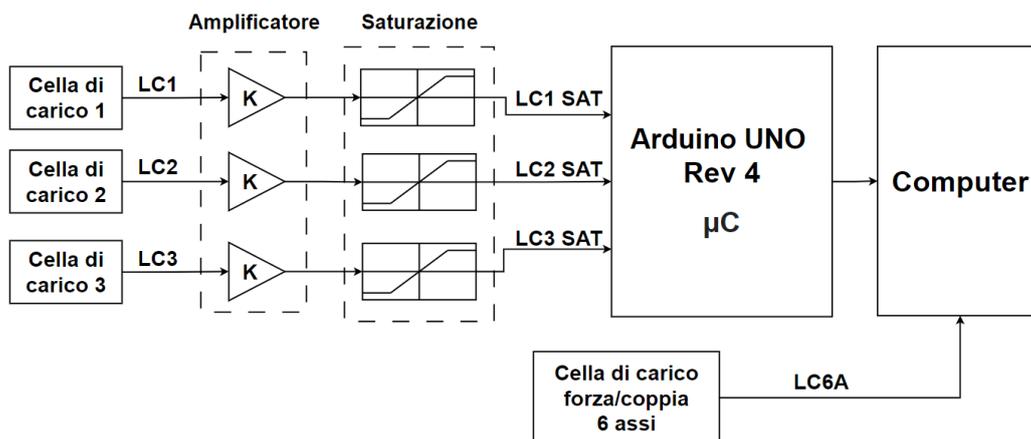


Figura 10.4 - Schema a blocchi della sperimentazione

10.1.1 Maniglia a due mani

Nello svolgimento delle prove sperimentali, l'operatore spinge con entrambe le mani la maniglia sensorizzata in tutte le direzioni al fine di acquisire, in un intervallo di venti secondi, l'andamento delle forze e di momento nel tempo.

Le prove hanno lo scopo di confrontare i valori ottenuti dalla maniglia sensorizzata con quelli che otterremo utilizzando semplicemente una cella di carico multiassiale.

Nella Figura 10.5 osserviamo come è disposto il sistema di riferimento della maniglia sensorizzata ed il sistema di riferimento della cella di carico a sei assi SensONE.

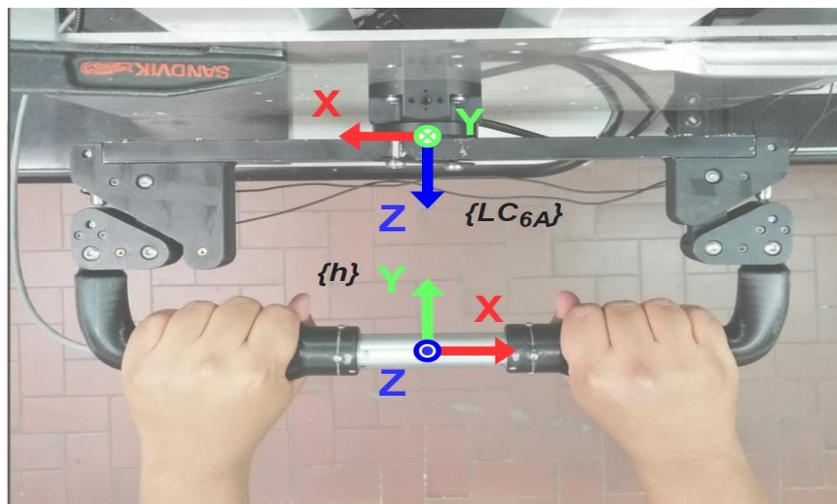


Figura 10.5 - Sistema di riferimento maniglia sensorizzata versione due mani e cella di carico a sei assi

Questi risultati vengono elaborati in tre grafici che contengono l'andamento nel tempo delle forze e del momento riportati sul sistema di riferimento $\{LC_{6A}\}$, posto sulla cella di carico a sei (Figura 10.6, Figura 10.7 e Figura 10.8). Le curve rosse rappresentano l'andamento nel tempo delle forze e di momento delle sole celle di carico monoassiali Forsentek FLAE 100 N del meccanismo. Invece, le curve blu rappresentano l'andamento nel tempo delle forze e di momento ottenuti dalla cella di carico forza/coppia a sei assi SensONE della BOTA SYSTEM. Nessun tipo di filtro viene applicato sulle celle di carico.

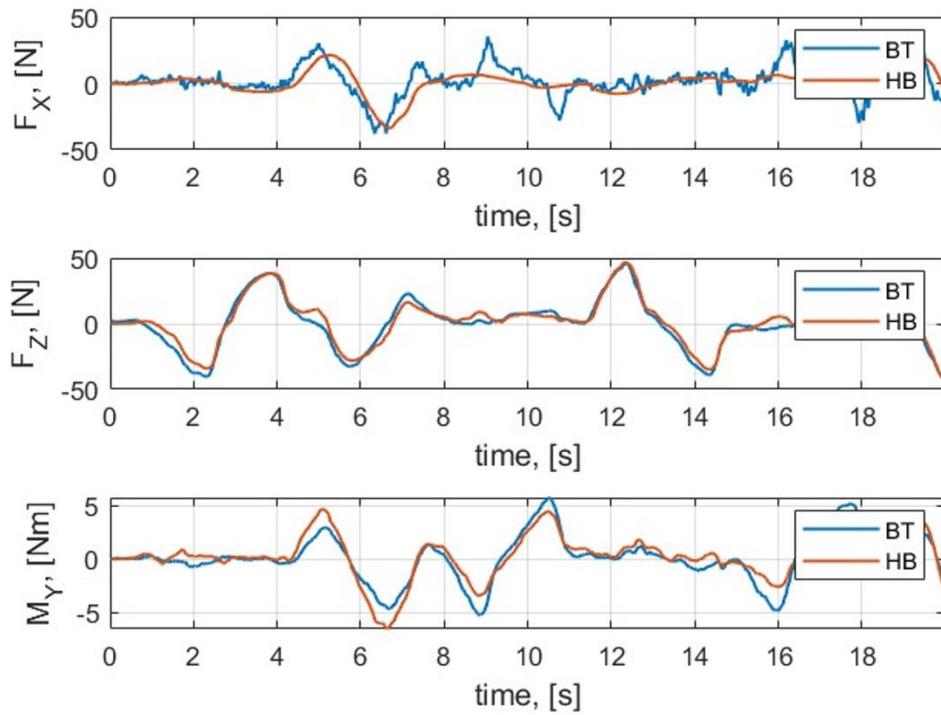


Figura 10.6 - Maniglia versione due mani: Prova 1

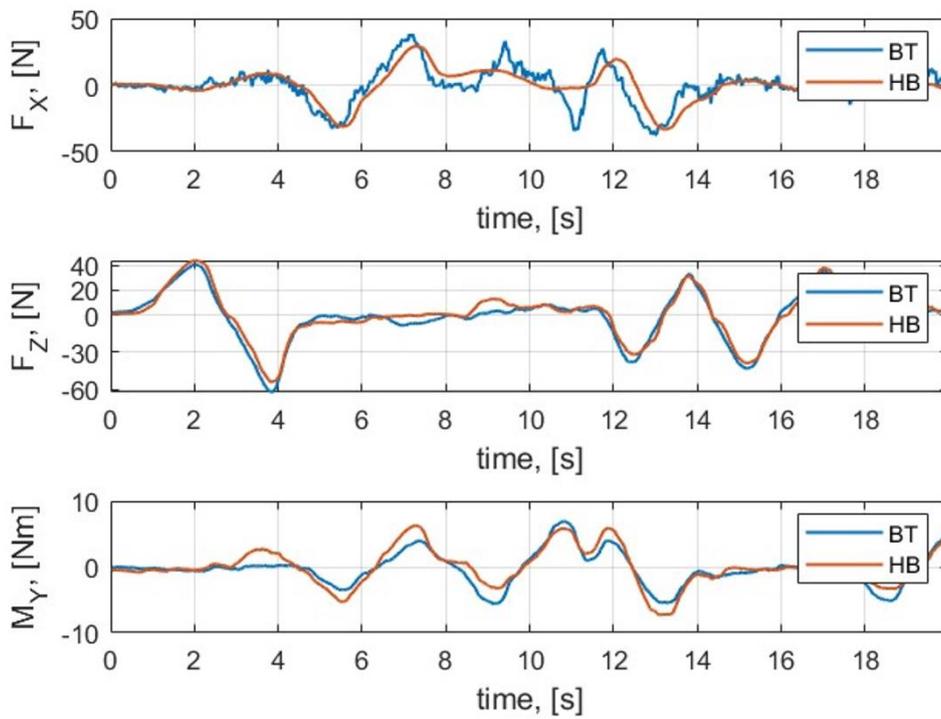


Figura 10.7 - Maniglia versione due mani: Prova 2

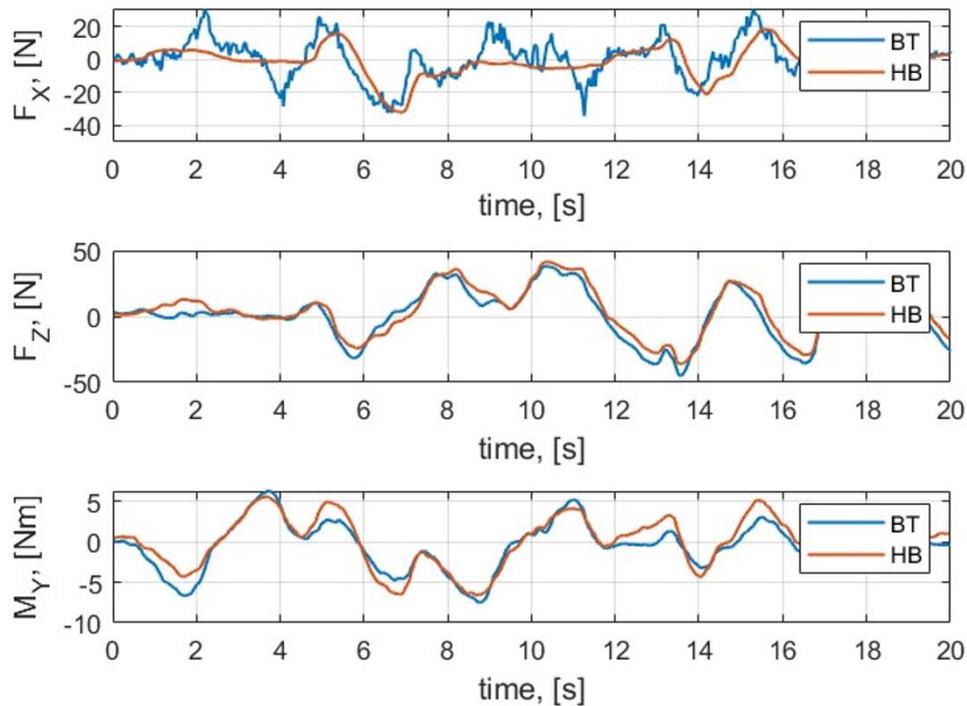


Figura 10.8 - Maniglia versione due mani: Prova 3

Dalle prove sperimentali eseguite osserviamo che le letture eseguite dalle celle di carico monossiali ricalcano i valori ottenuti dalla cella di carico forza/coppia a sei assi. Pertanto, la maniglia sensorizzata realizzata è in grado di misurare le forze lungo i due assi ed il momento lungo l'asse Z.

I valori ottenuti lungo l'asse X della cella di carico a sei risulta essere non molto preciso ed è possibile attribuirlo alla presenza rumore.

10.1.2 Maniglia ad una mano

Nello svolgimento delle prove sperimentali, l'operatore spinge con una sola mano la maniglia sensorizzata in tutte le direzioni al fine di acquisire, in un intervallo di venti secondi, l'andamento delle forze e di momento nel tempo.

Le prove hanno lo scopo di confrontare i valori ottenuti dalla maniglia sensorizzata con quelli che otterremo utilizzando semplicemente una cella di carico multiassiale.

Nella Figura 10.9 osserviamo come è disposto il sistema di riferimento della maniglia sensorizzata ed il sistema di riferimento della cella di carico a sei assi SensONE.

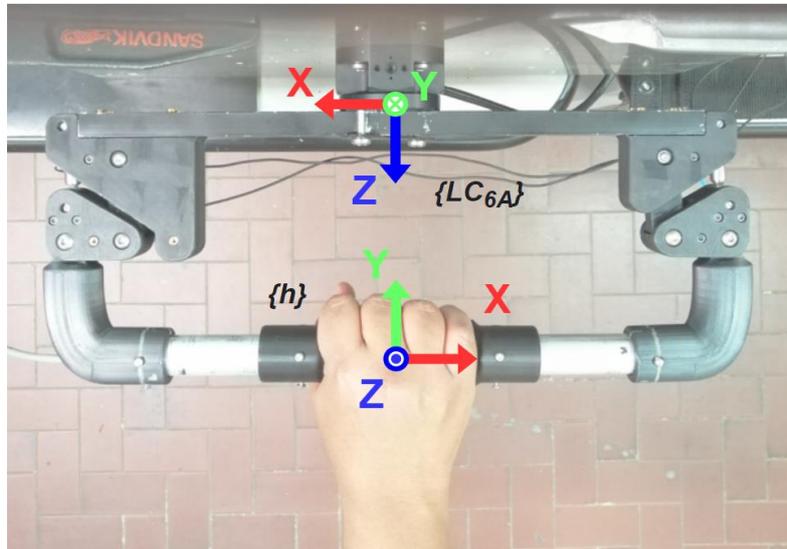


Figura 10.9 - Sistema di riferimento maniglia sensorizzata versione una mano e cella di carico a sei assi

Questi risultati vengono elaborati in tre grafici contengono l'andamento del tempo delle forze e del momento riportati sul sistema di riferimento $\{LC_{6A}\}$, posto sulla cella di carico a sei (Figura 10.10, Figura 10.11 e Figura 10.12). Le curve rosse rappresentano l'andamento nel tempo delle forze e di momento dalle sole celle di carico monoassiali Forsentek FLAE 100 N del meccanismo. Invece le curve blu rappresentano l'andamento nel tempo delle forze e di momento ottenuti dalla cella di carico forza/coppia a sei assi SensONE della BOTA SYSTEM. Nessun tipo di filtro viene applicato sulle celle di carico.

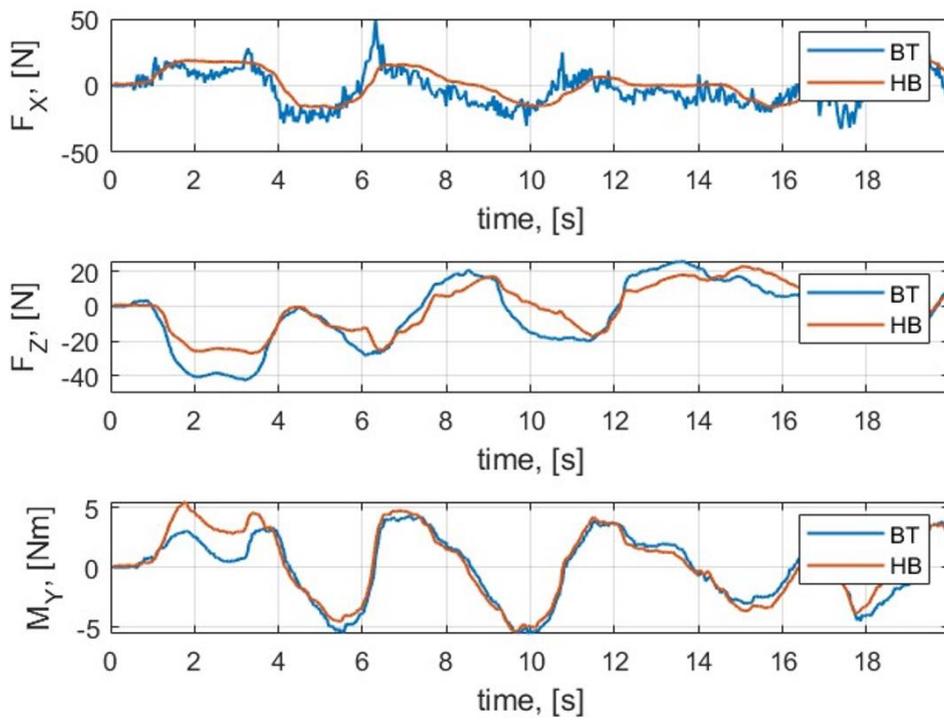


Figura 10.10 - Maniglia versione una mano: Prova 1

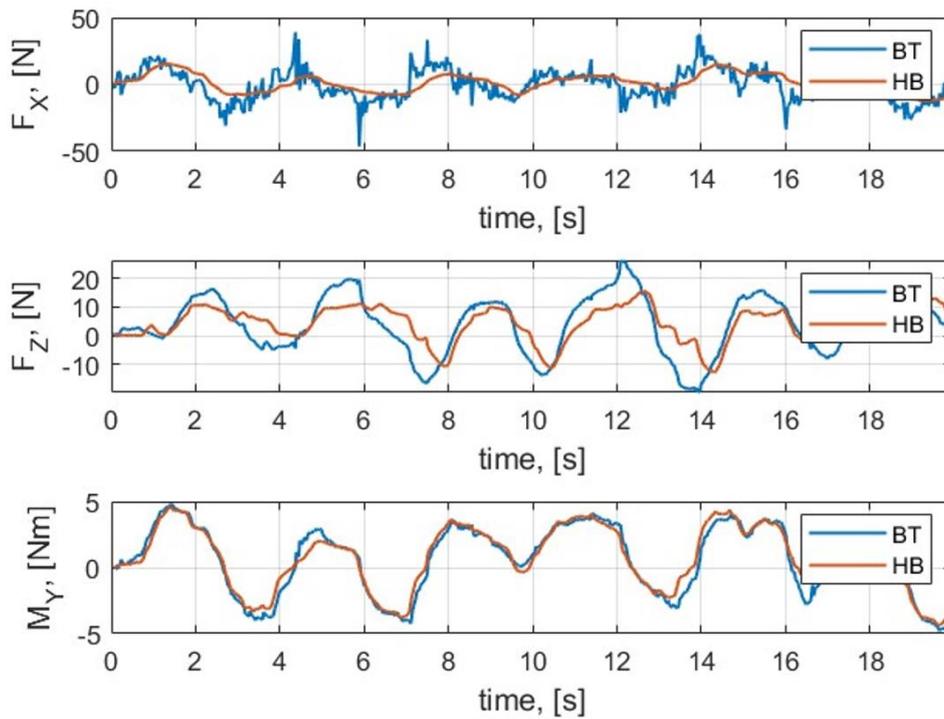


Figura 10.11 - Maniglia versione una mano: Prova 2

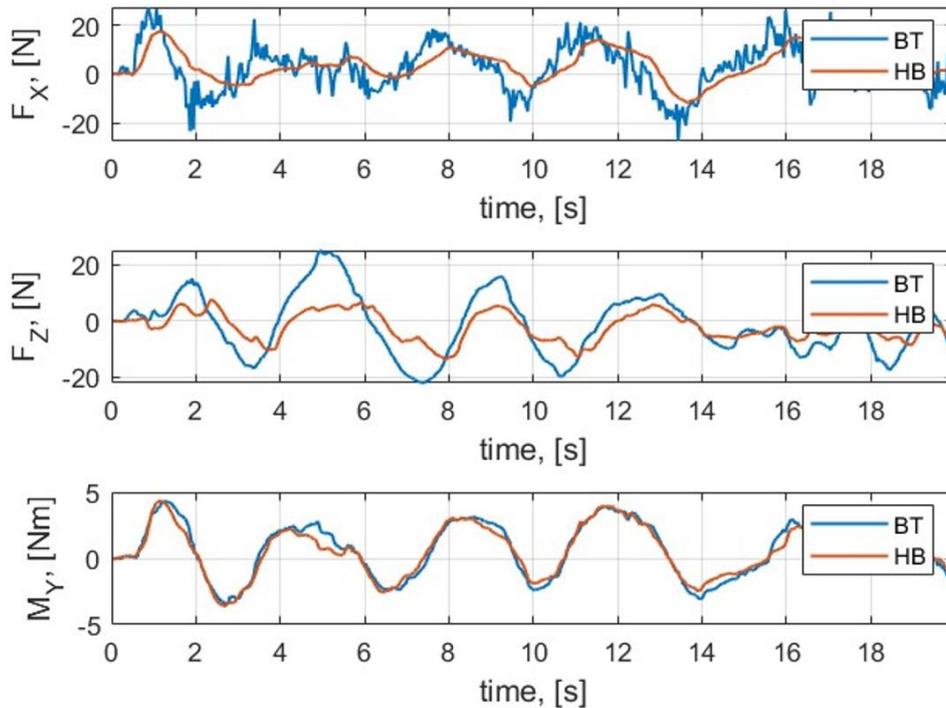


Figura 10.12 - Maniglia versione una mano: Prova 3

Dalle prove sperimentali eseguite osserviamo che le letture eseguite dalle celle di carico monoassiali ricalcano i valori ottenuti dalla cella di carico forza/coppia a sei assi.

L'andamento della forza F_z , che nel sistema di riferimento $\{h\}$ risulta essere F_y , ottenuta dalle celle di carico monoassiali si discosta dal valore letto dalla cella di carico a sei assi. Un possibile motivo può risiedere nel fatto gli elementi di giunzione tendono a flettersi durante l'applicazione della forza da parte dell'utente. Pertanto, la rigidità che l'operatore percepisce è la resistenza alla flessione dell'elemento di giunzione che porta in rotazione la struttura, quindi la cella di carico non viene caricata completamente. Se fosse infinitamente rigido nel momento in cui viene applicato una forza il manubrio si sposterebbe completamente nella direzione Y.

I valori ottenuti lungo l'asse X della cella di carico a sei risulta essere non molto preciso ed è possibile attribuirlo alla presenza del rumore.

10.2 Sensori capacitivi

In questa soluzione il sensore capacitivo è realizzato attraverso delle testine metalliche arrotondate che vengono annegate all'interno della maniglia sensorizzata. Questi elementi metallici sono ottenuti attraverso le teste dei fermacampioni a cui togliamo le linguette e sono fissate sulla maniglia attraverso l'utilizzo della colla. Ad ogni testina metallica è collegato un cavo che è connesso al microcontrollore della maniglia sensorizzata. Pertanto, il microcontrollore procede nel misurare la capacità collegata al conduttore. In questo modo siamo in grado di valutare la variazione della capacità nel momento in cui l'utente tocca i sensori.

In una prima fase si è deciso di utilizzare semplicemente un Arduino UNO R4 Minima che aveva lo scopo di valutare la capacità dei sensori. Tuttavia, questa soluzione presentava delle difficoltà nel suo utilizzo in quanto nel momento in cui veniva acceso dava sempre dei valori diversi della capacità. Inoltre, risultava difficile settare i valori di soglia ed in aggiunta richiedeva capacità computazionale a livello del controllore che doveva misurare sia la capacità che i tempi di scarica.

Pertanto, si è deciso di affiancare al microcontrollore un sensore Touch capacitivo CAP 1188 [33]. Questo microchip, Figura 10.13, presenta otto canali per analisi dei capacitivi. Questo elemento [34] permette di aggiungere un'ulteriore funzionalità all'Arduino in modo tale da percepire quando le dita sono a contatto con la superficie del sensore.

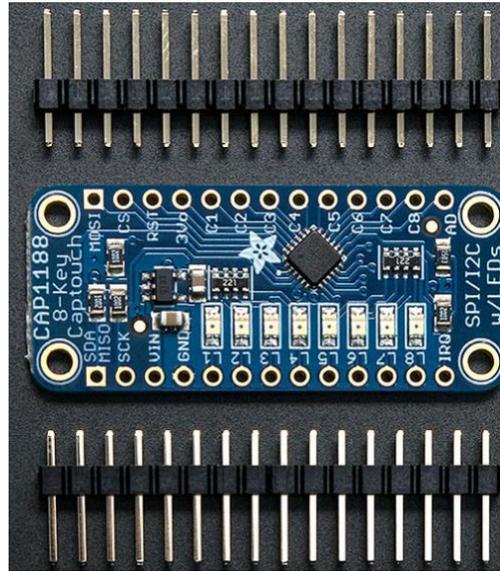


Figura 10.13 - Sensore Touch capacitivo CAP 1188 [35]

Pertanto, attraverso il microchip esegue da solo la lettura dei valori capacitivi dove colleghiamo ogni switch sui diversi canali ed esegue la stima del sensore capacitivo. Successivamente comunica al microcontrollore, attraverso il protocollo di comunicazione I^2C , se l'utente ha toccato il sensore. Ad ogni ciclo del microcontrollore si effettua una lettura dello stato dei sensori.

Questa una soluzione, rispetto a sensori capacitivi in uso commerciale, risulta di semplice realizzazione in quanto utilizziamo delle teste metalliche di facile reperibilità e basso incidenza di costo.

I sensori commerciali presentano dimensioni che ci obbligherebbero a modificare le dimensioni della maniglia ed inoltre il costo risulterebbe alto.

11 Sistema elettronico di controllo

Come discusso nei capitoli precedenti, l'obiettivo della tesi consiste nella progettazione e sviluppo di un dispositivo che permetta ad un operatore esterno di controllare il moto della carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q. La maniglia sensorizzata funzionalmente è un dispositivo in grado di trasformare input in forza generati dall'operatore in riferimenti di velocità.

In questo capitolo ci concentriamo solamente sull'analisi della logica della maniglia sensorizzata in modo tale da comprendere come gli input in forza vengono trasformati in riferimenti di velocità. In questo modo abbiamo che l'output della maniglia sensorizzata non è altro che l'input per il controllore della carrozzina.

La logica di controllo del sistema ed il suo funzionamento è stato definito dal gruppo di ricerca. Pertanto, viene riportato nella tesi per ragione di completezza.

Come osservato precedente, l'operatore applica delle forze ed un momento nelle tre direzioni ed attraverso la funzione di mappatura siamo in grado di trasformare questi di input in riferimenti di velocità utilizzati per comandare i motori e pertanto muovere la carrozzina. Questa trasformazione, come osservabile in Figura 11.1, viene eseguita all'interno del microcontrollore della maniglia sensorizzata.

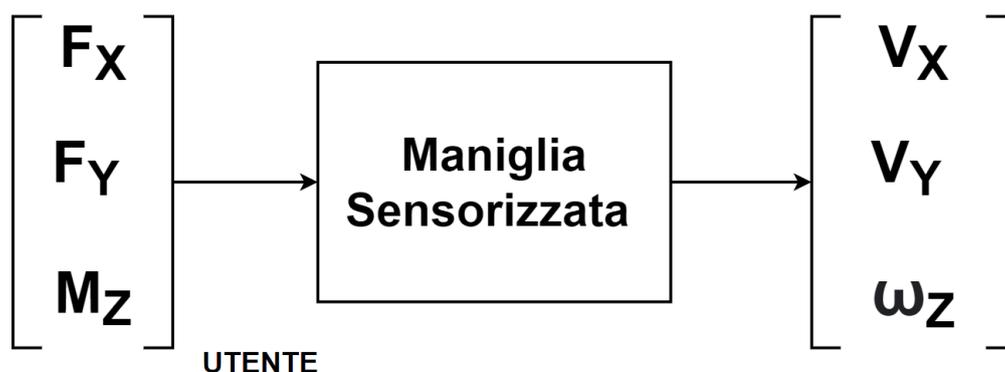


Figura 11.1 - Trasformazione da forza a velocità

Ricordiamo che questo progetto è stato pensato in modo tale da risultare indipendente dalla carrozzina cosicché possiamo generare dei comandi di riferimento per un qualsiasi sistema che possiede due o al massimo tre gradi di libertà.

L' Arduino UNO Rev 4 è il microcontrollore della maniglia sensorizzata e ciò ci permette di ottenere un output analogo ad un generico joystick con tre segnali di riferimento. Il microcontrollore legge i valori in uscita dalle celle di carico e dei sensori capacitivi in questo modo si viene a generare dei riferimenti utilizzati per comandare la carrozzina.

La logica del sistema consiste nel fatto che il microcontrollore riceve come input i valori in uscita dalle celle di carico. Questi segnali vengono amplificati e successivamente saturati.

Il microcontrollore viene collegato ad un microchip Touch Capacitivo CAP1188 che ha come unico scopo la lettura e stima dei valori capacitivi, dove si collega ogni switch in uno di questi canali. Questo elemento comunica con il microcontrollore attraverso il protocollo di comunicazione I^2C . Pertanto, nel momento in cui vengono toccati il sensore effettuano la lettura e lo comunicano al controllore. Ad ogni loop di iterazione del microcontrollore viene eseguita una richiesta al microchip Touch Capacitivo CAP1188 sullo stato dei sensori capacitivi che risponde attraverso un protocollo di comunicazione. Questa logica viene rappresentata nella Figura 11.2.

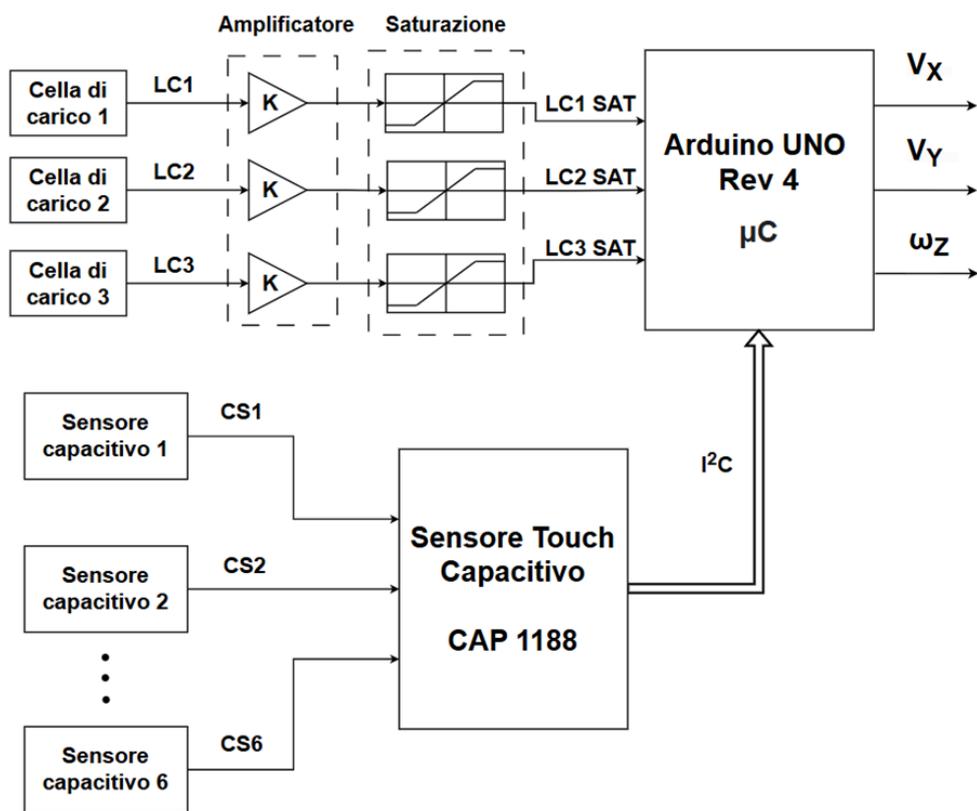


Figura 11.2 - Schema di funzionamento della maniglia sensorizzata

11.1 Mappatura forza - velocità

Nel momento in cui l'utente esercita delle forze sulla maniglia, Figura 11.3, leggiamo dalle celle di carico $F_{lc,1}$, $F_{lc,2}$ e $F_{lc,3}$ misurate in Volt. Successivamente attraverso la funzione di calibrazione otteniamo la lettura in Newton su ogni cella di carico. Mediante l'equilibrio delle forze e momenti, analizzate nel capitolo precedente, otteniamo le forze F_x , F_y misurate in Newton ed il momento M_z misurate in Newton-metri rispetto al sistema di riferimento $\{h\}$ della maniglia sensorizzata.

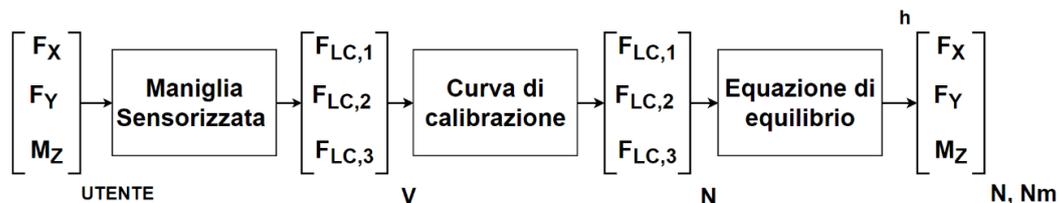


Figura 11.3 - Procedimento per la valutazione delle forze e coppie

Avendo definito queste forze sul sistema di riferimento procediamo nel riportare le forze sul sistema di riferimento $\{b\}$ posto al centro della carrozzina, come riportato nella Figura 11.4.

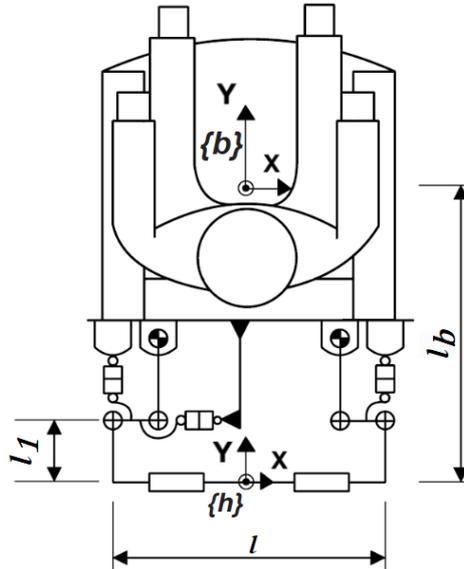


Figura 11.4 - Sistema di riferimento posto al centro della carrozzina

Pertanto, otteniamo il seguente sistema di equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_z = 0 \end{array} \right\} \begin{cases} F_{X,1} + F_{X,2} = F_{LC,3} \\ F_{Y,1} + F_{Y,2} = F_{LC,1} + F_{LC,2} \\ (F_{Y,1} - F_{Y,2}) * \frac{l_f}{2} + (F_{X,1} + F_{X,2}) * l_b = (F_{LC,2} - F_{LC,1}) * \frac{l}{2} - F_{LC,3} * l_1 \end{cases}$$

Dove l_b è la distanza tra il centro della carrozzina ed il centro della maniglia.

Queste forze vengono successivamente utilizzate per ottenere, attraverso la funzione di mappatura, i riferimenti in velocità, Figura 11.5.

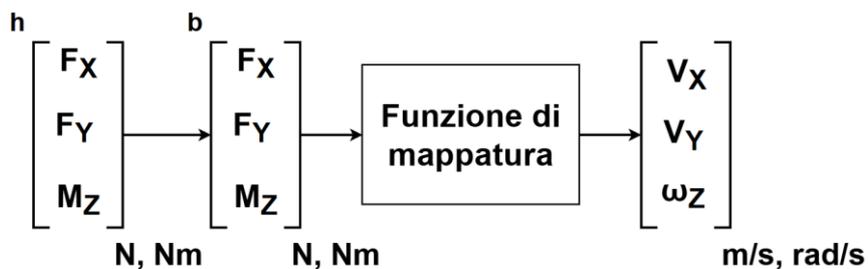


Figura 11.5 - Trasformazione forza/coppia in velocità

La funzione di mappatura, Figura 11.6, è la funzione con la quale mappiamo le misurazioni delle celle di carico. La funzione è composta da tre tratti distinti:

- Il primo tratto consiste di una banda morta compresa tra l'intervallo $[-IN_0; IN_0]$ affinché non si abbiano velocità indesiderate;
- Vi sono due tratti con delle leggi polinomiali del quinto ordine compresa tra l'intervallo $[-IN_{lim}; -IN_0]$ e tra l'intervallo $[IN_0; IN_{lim}]$. Questa scelta permette di ottenere valori di velocità nulli all'inizio ed alla fine allo scopo di garantire continuità della funzione.
- Vi sono due tratti con delle leggi polinomiali del primo ordine compresa tra l'intervallo $[-IN_{max}; -IN_{lim}]$ e tra l'intervallo $[IN_{lim}; IN_{max}]$. Questa scelta permette all'utente di migliorare la risoluzione dei comandi imposti dall'utente e pertanto la guidabilità del sistema.

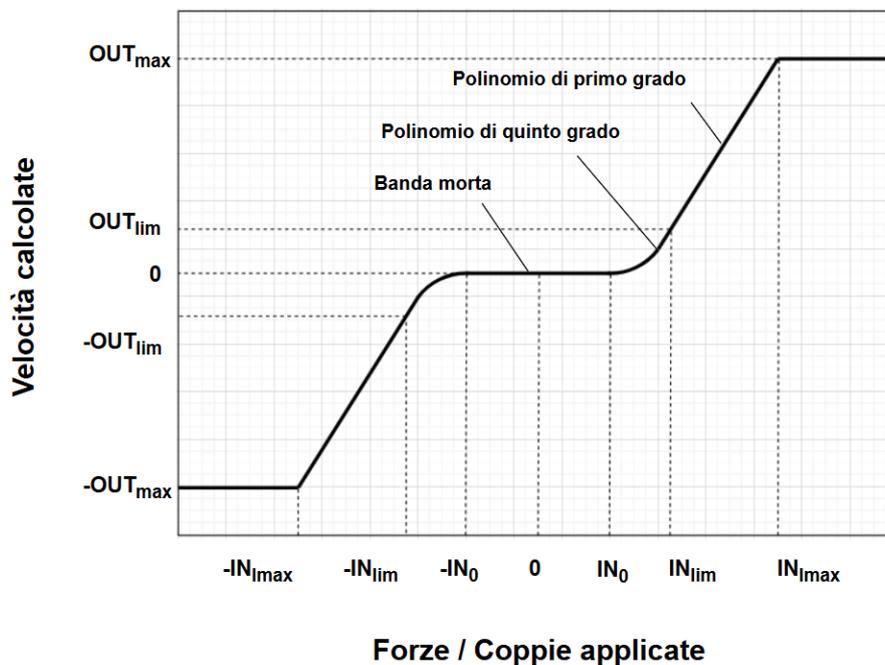


Figura 11.6 - Funzione di mappatura

La strategia utilizzata per controllare il moto della carrozzina consiste nell'adoperare delle funzioni che permettono di trasformare le forze acquisite in ingresso in riferimenti di velocità per la carrozzina.

Il moto della carrozzina, come rappresentato in Figura 11.7, è descritto attraverso una componente di velocità lineare sul piano $X - Y$ ed una componente di

velocità angolare sull'asse Z. Il modulo della velocità lineare risulta essere la funzione di mappatura con in ingresso la radice quadrata della somma dei quadrati delle forze. Invece la velocità angolare ω è la funzione di mappatura di M_Z . Al fine di imporre la direzione di moto della carrozzina applichiamo l'arcotangente di F_Y su F_X in modo tale da ottenere un angolo compreso tra 0° e 360° .

In questo modo abbiamo definito la velocità lineare invece M_Z lo trasformiamo in una velocità di imbardata della carrozzina.

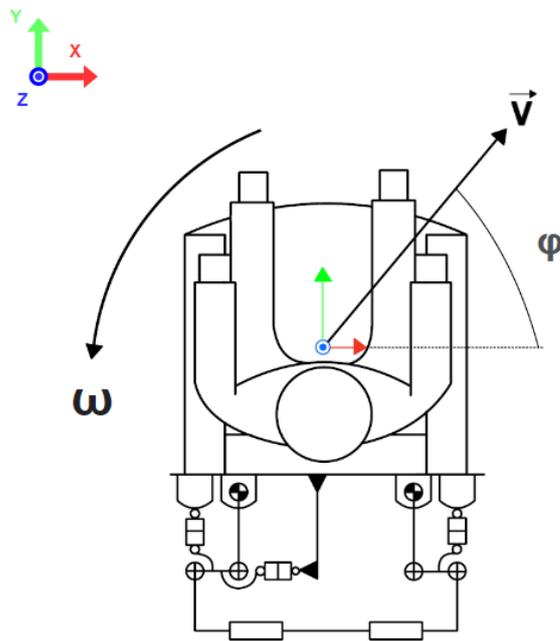


Figura 11.7 - Rappresentazione della velocità della carrozzina

Otteniamo le seguenti grandezze per le velocità

$$|\vec{v}| = \text{map} \left(\sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \right)$$

$$\omega = \text{map}(M_Z)$$

invece per la direzione otteniamo

$$\varphi = \text{atan2}(F_Y, F_X)$$

11.2 Prove sperimentali

Sono state svolte due diverse tipologie di prove allo scopo di valutare l'efficacia della strategia scelta.

Una prima prova consiste nel guidare la carrozzina MoviWE.Q all'interno di una superficie di 20 m^2 , come osserviamo in Figura 11.8. All'interno di questa area sono presenti due ostacoli:

- Un primo ostacolo rappresentato da panca che di lunghezza 165 cm in questo modo all'utente è richiesto di muoversi lungo una diagonale esercitando contemporaneamente una forza lungo Y ed una forza lungo X .
- Il secondo ostacolo è rappresentato dalla colonna di diametro 50 cm situata al centro dell'area. L'utente è, pertanto, è richiesto di applicare contemporaneamente una forza F_Y ed un momento M_Z al fine superare la colonna.



Figura 11.8 - Area di sperimentazione

Nella Figura 11.9 sono riportate le dimensioni dell'area di lavoro.

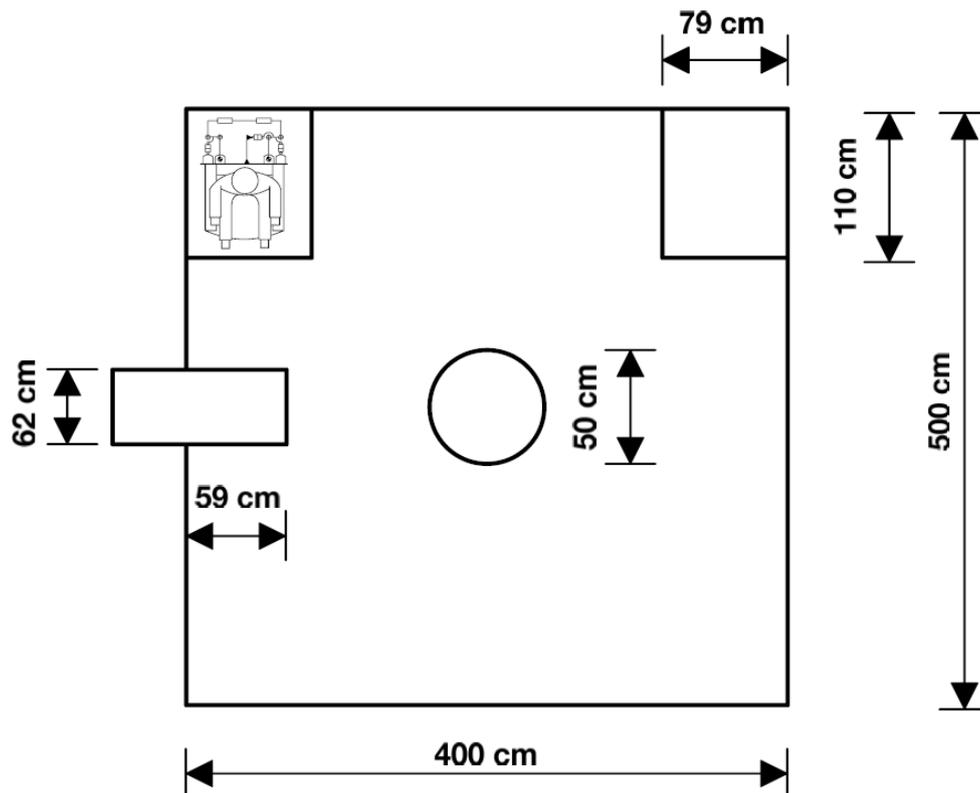


Figura 11.9 - Schema area di lavoro

Durante lo svolgimento delle prove, come osserviamo nella Figura 11.10, applichiamo forze e coppie in base al movimento che vogliamo ottenere. Contemporaneamente, attraverso il computer, procediamo nell'acquisizione delle forze applicate dall'operatore ed i riferimenti in velocità inviate ai motori della carrozzina.



Figura 11.10 - Esecuzione prova

Nella Figura 11.11 viene riportato la traiettoria desiderata del centro di riferimento della carrozzina durante la sperimentazione. Pertanto, possiamo definire quattro posizioni che il sistema assume durante la prova:

- **Tratto A-B:**

All'inizio della sperimentazione, la carrozzina è posta nella posizione iniziale A. Nel raggiungere la posizione B, viene applicato contemporaneamente sulla maniglia una forza lungo l'asse Y ed una forza lungo l'asse X. Questi riferimenti in forza si traducono in una velocità lungo l'asse Y e lungo l'asse X, generando una pura traslazione lungo il piano.

- **Tratto B-C:**

Raggiunta la posizione B viene applicato contemporaneamente alla maniglia una forza lungo l'asse Y ed un momento lungo l'asse Z. Questi riferimenti in forza ed in coppia si traducono in una velocità lungo l'asse Y ed una velocità angolare lungo l'asse Z, generando un moto rotatorio. Pertanto, la carrozzina raggiunge la posizione C.

- **Tratto C-D:**

Nel raggiungere la posizione finale D viene applicato sulla maniglia una forza lungo l'asse Y. Questo riferimento in forza si traduce in una velocità lungo l'asse Y, generando una pura traslazione lungo il piano.

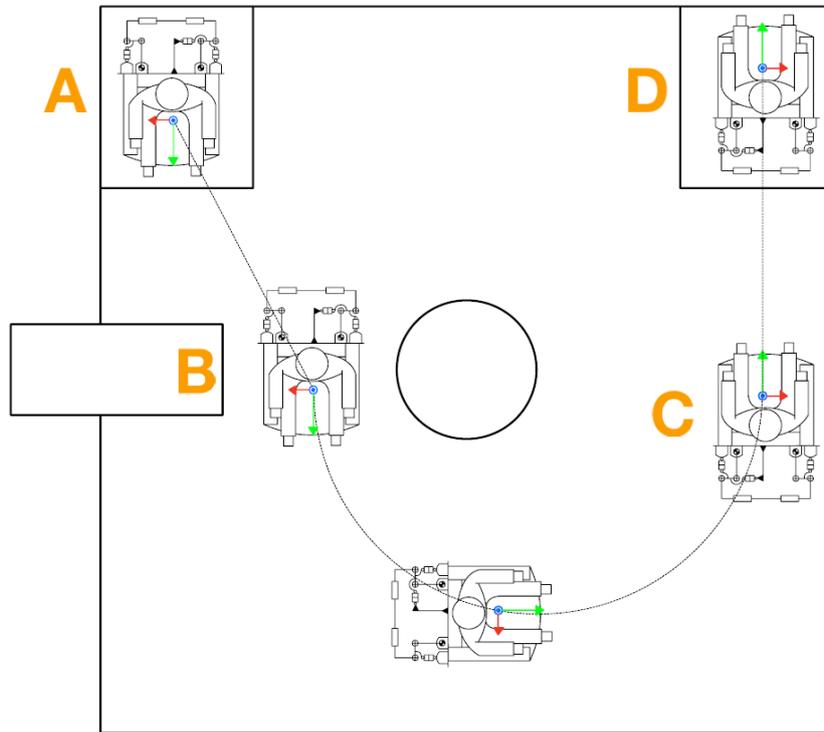
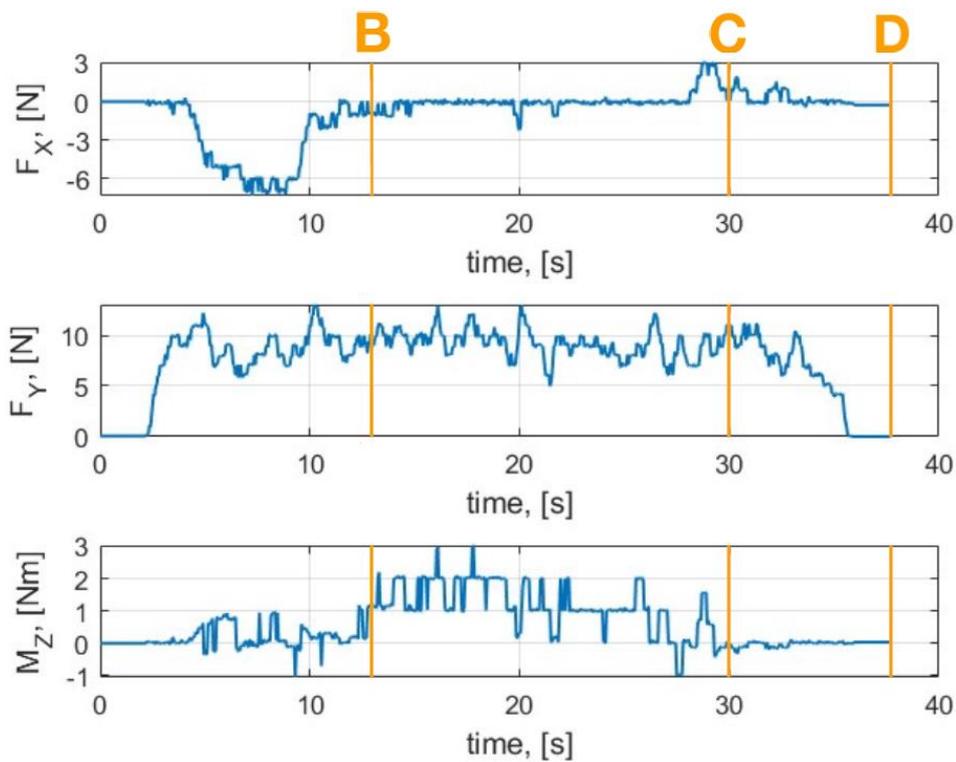
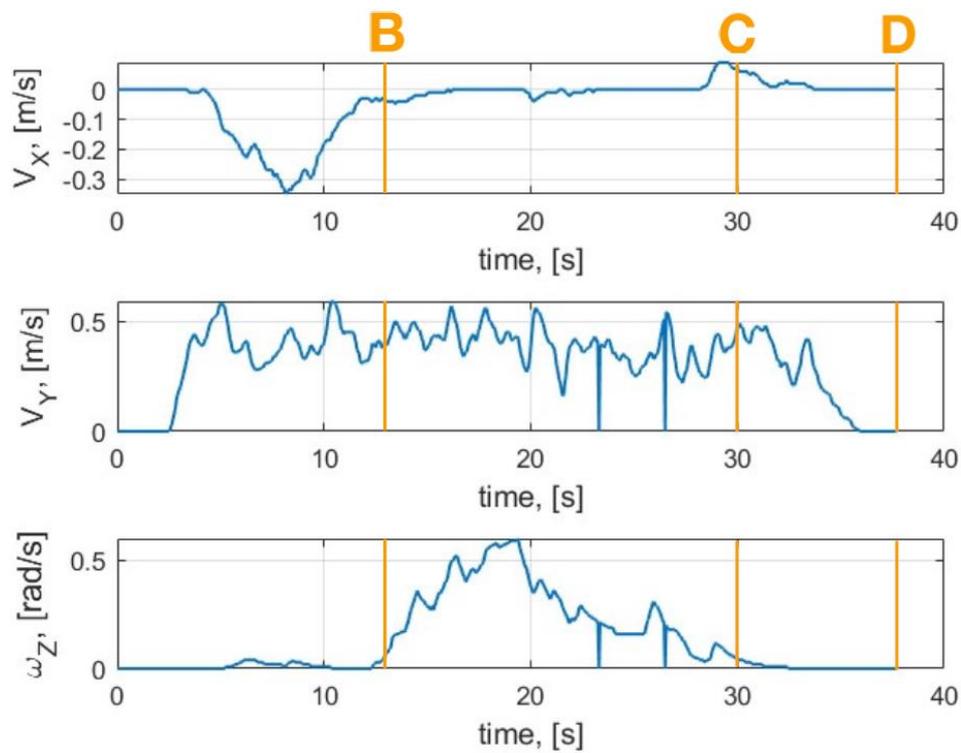


Figura 11.11 - Traiettoria del centro di riferimento

Nella Figura 11.12 viene riportato i risultati di una singola prova. Osserviamo come le velocità rispecchiano le forze ed il momento applicate dall'operatore, pertanto, il sistema interpreta correttamente l'intenzione dell'operatore. Nonostante non si è in grado di generare delle forze costanti si è osservato che l'utente non percepisce discontinuità durante la guida della carrozzina.



(a)



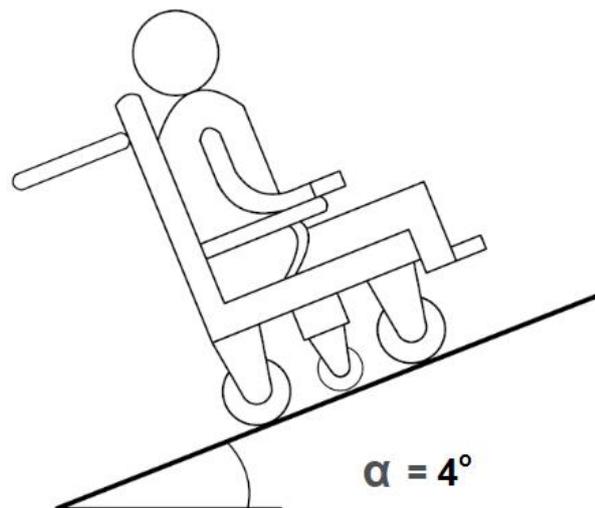
(b)

Figura 11.12 - Acquisizioni: (a) andamento nel tempo delle forze e momento e (b) andamento nel tempo delle velocità

La seconda prova, Figura 11.13, consiste nel percorrere una rampa con una inclinazione di circa 4° . Questa tipologia di test ha lo scopo di valutare se l'utente è in grado di esercitare la stessa intensità di forza anche in presenza di un piano inclinato.



(a)



(b)

Figura 11.13 - Rampa: (a) esecuzione prova e (b) schema rampa

La Figura 11.14 rappresenta la traiettoria ideale del centro della carrozzina durante la sperimentazione. La prova consiste nel percorrere un tratto rettilineo partendo dalla posizione A raggiungendo la posizione B attraverso un moto di pura traslazione.

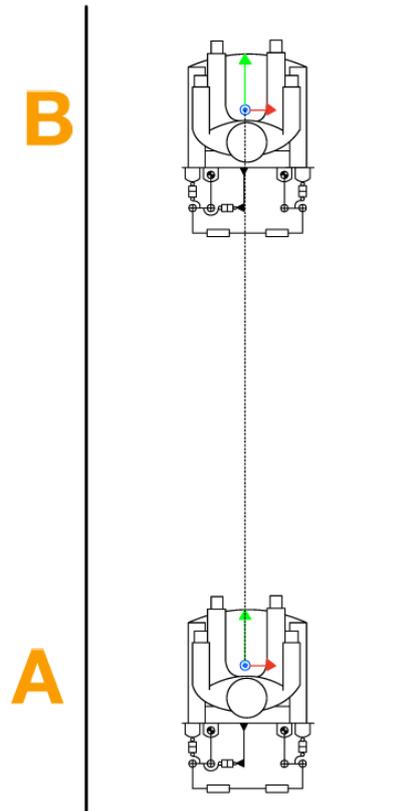


Figura 11.14 - Traiettoria centro di riferimento lungo rampa

Attraverso la Figura 11.15 osserviamo che l'operatore esercita la stessa intensità di F_Y come valutato nella prova precedente. Il sistema percepisce, inoltre, delle forze lungo l'asse X ed un momento lungo l'asse Z dovuto ad un controllo non corretto dell'operatore durante la prova. Questa incertezza, comunque, risulta di bassa intensità, pertanto, non incide sulla precisione della sperimentazione. Di conseguenza, l'utente non ha difficoltà di controllare il moto della carrozzina indipendente dall'inclinazione del piano.

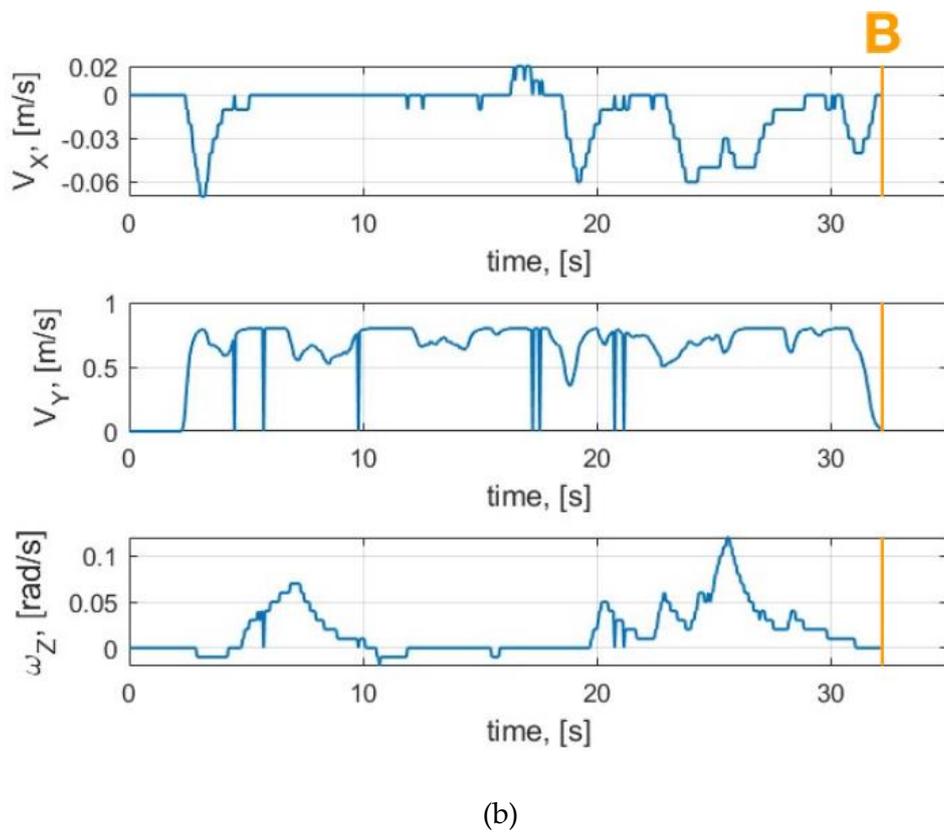
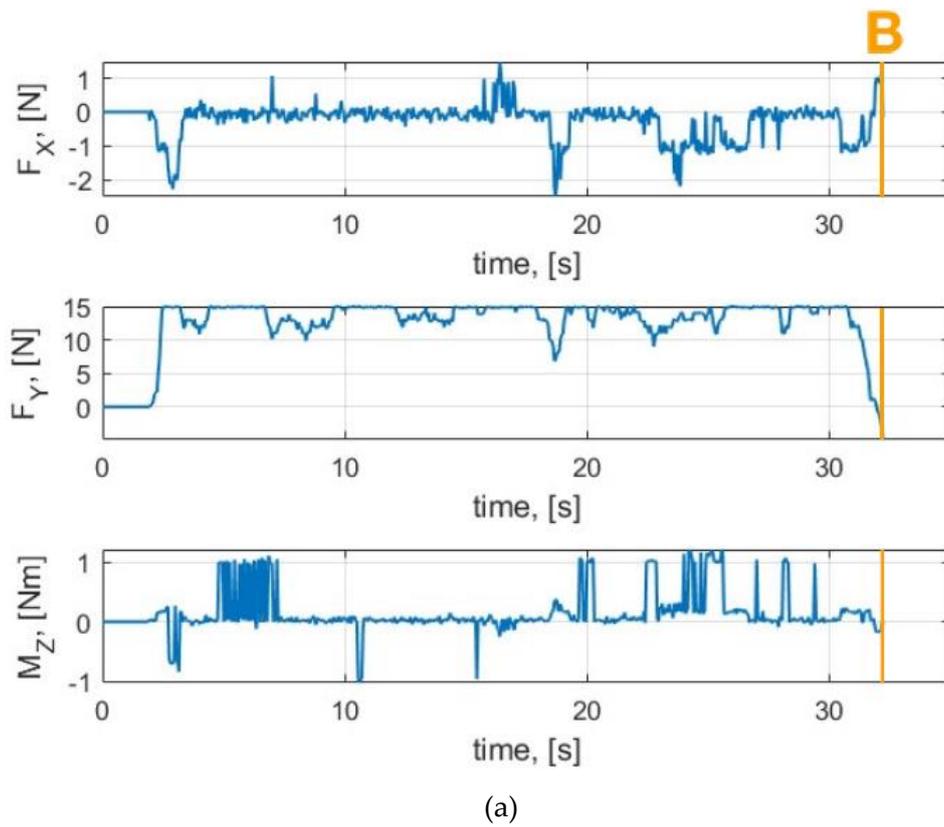


Figura 11.15 - Acquisizioni: (a) andamento nel tempo delle forze e momento e (b) andamento nel tempo delle velocità

Nei grafici realizzati, Figura 11.12b e Figura 11.15b, vi sono degli istanti in cui i riferimenti in velocità tendono a zero. Questa problematica nasce nel momento in cui l'operatore non impugna correttamente la maniglia, pertanto, in quella frazione di tempo non viene eseguita l'acquisizione. Questa situazione è da tenere presente nelle versioni successive della maniglia.

In conclusione, attraverso queste prove abbiamo dimostrato che attraverso la maniglia sensorizzata siamo in grado di controllare il moto della carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q applicando forze e coppie in base al movimento che vogliamo ottenere.

12 Conclusioni

Con l'obiettivo di realizzare un'interfaccia di guida per la carrozzina motorizzata omnidirezionale MoviWE.Q è stata realizzata una maniglia in grado di interpretare la volontà dell'utente attraverso l'utilizzo delle celle di carico che misurano le forze.

I requisiti della maniglia sensorizzata sono stati definiti analizzando la capacità di movimento della carrozzina omnidirezionale e garantendo la semplicità di guida da parte dell'operatore.

Attraverso la progettazione funzionale ed esecutiva si è deciso di realizzare una struttura isostatica basata su un esalatero articolato a tre gradi di libertà dove installiamo le celle di carico in modo da vincolarla. Inoltre, attraverso l'utilizzo di testine metalliche annegate all'interno della maniglia siamo riusciti a realizzare dei sensori capacitivi di semplice realizzazione, reperibilità e basso incidenza di costo.

Come osservato durante le prove sperimentali il meccanismo, utilizzando le sole celle di carico monoassiali, riesce a ricalcare il comportamento della cella di carico forza/coppia a sei assi. Tuttavia, nella versione ad una mano della maniglia vi è una leggera discrepanza ma questo potrebbe essere risolto utilizzando elementi con rigidità maggiore oppure riducendo la dimensione del meccanismo. Trasformando le forze in velocità attraverso la funzione di mappatura abbiamo osservato che la carrozzina risulta essere semplice da controllare. Inoltre, il sistema è realizzato in modo tale che all'operatore non è richiesta di applicare delle forze elevate che potrebbero affaticare l'utente durante la guida.

Come prospettiva futura è possibile ipotizzare di sostituire tutte le cerniere attualmente presenti con delle cerniere virtuali realizzati attraverso l'utilizzo della fabbricazione additiva. Questa nuova soluzione presenta una superficie alleggerita in grado di inflettersi. In questo modo otteniamo, dal punto di vista funzionale, un unico corpo particolarmente cedevole in alcune direzioni. Pertanto, inserendo all'interno le celle di carico al fin di bloccarne la mobilità otteniamo un elemento che si comporta allo stesso modo del meccanismo

esalatero. Inoltre, risulterebbe interessante osservare il funzionamento della maniglia su diversi sistemi motorizzati a due od al massimo tre gradi di libertà.

13 Bibliografia

H. D. Unbehauen, «CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION –
1] Volume XXI: Elements of Automation,» EOLSS Publications, 2009, p. 132.

A. Ballav e M. Ghosh, «Human Factors Of Human Machine Interaction: Analyzing
2] Future Trends Through The Past And The Present,» *International Journal of Research*, vol. 4,
n. 7, p. 138, 2017.

A. D. Santis, B. Siciliano, A. D. Luca e A. Bicchi, «An atlas of physical human-robot
3] interaction,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, n. 3, p. 254, 2008.

H. D. Unbehauen, «CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS AND AUTOMATION –
4] Volume XXI: Elements of Automation,» EOLSS Publications, 2009, p. 132.

D. P. Losey, C. G. McDonald, E. Battaglia e M. K. O'Malley, « A Review of Intent
5] Detection, Arbitration, and Communication Aspects of Shared Control for Physical
Human–Robot Interaction,» *ASME. Appl. Mech. Rev.*, vol. 70, n. 1, pp. 1-2, 2018.

D. P. Losey, C. G. McDonald, E. Battaglia e M. K. O'Malley, «A Review of Intent
6] Detection, Arbitration, and Communication Aspects of Shared Control for Physical
Human–Robot Interaction,» vol. 70, n. 1, p. 2, 2018.

Y. M. Hamad, Y. Aydin e C. Basdogan, «Adaptive Human Force Scaling via
7] Admittance Control for Physical Human-Robot Interaction,» *IEEE Transactions on Haptics*,
vol. 14, n. 4, pp. 750-761, Oct.-Dec. 2021.

Y. A. Yahya M. Hamad, «Adaptive Human Force Scaling via Admittance Control for
8] Physical Human-Robot Interaction,» *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 20, n. 20, p. 2, April
2021.

V. Duchaine, B. M. St-Onge, D. Gao, Gosselin e Clément, «Stable and Intuitive Control
9] of an Intelligent Assist Device,» *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, vol. 5, n. 2, pp.
149-150, 2012.

V. Duchaine, B. M. St-Onge, D. Gao e C. Gosselin, «Stable and Intuitive Control of an
10] Intelligent Assist Device,» *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, vol. 5, n. 2, pp. 149-150,
] 2012.

«What is an Industrial Manipulator?,» HANDLING CONCEPTS, 28 June 2021.
11 [Online]. Available: <https://www.handlingconcepts.co.uk/what-is-an-industrial->
] [manipulator/](https://www.handlingconcepts.co.uk/what-is-an-industrial-manipulator/).

«Choosing the Right Industrial Manipulator,» Direct INDUSTRY, [Online]. Available:
12 <https://guide.directindustry.com/choosing-the-right-industrial-manipulator/>.
]

«Industrial Manipulators,» Prolift Handling LTD, 2 May 2023. [Online]. Available:
13 [https://www.prolift.ie/resources/knowledge-hub/material-handling-equipment-](https://www.prolift.ie/resources/knowledge-hub/material-handling-equipment-industry/different-type-of-industrial-manupulators-their-uses-and-advantages.html)
] [industry/different-type-of-industrial-manupulators-their-uses-and-advantages.html](https://www.prolift.ie/resources/knowledge-hub/material-handling-equipment-industry/different-type-of-industrial-manupulators-their-uses-and-advantages.html).

«Choosing the Right Industrial Manipulator,» Direct INDUSTRY, [Online]. Available:
14 <https://guide.directindustry.com/choosing-the-right-industrial-manipulator/>.
]

«What is an Industrial Manipulator,» Posilift Global, [Online]. Available:
15 [https://www.posilift.com/industrial-](https://www.posilift.com/industrial-manipulators#:~:text=Industrial%20Manipulators%20have%20Rigid%20Articulating,to%20that%20of%20the%20operator)
] [manipulators#:~:text=Industrial%20Manipulators%20have%20Rigid%20Articulating,to%20that%20of%20the%20operator](https://www.posilift.com/industrial-manipulators#:~:text=Industrial%20Manipulators%20have%20Rigid%20Articulating,to%20that%20of%20the%20operator).

P. NERANON e R. BICKER, «FORCE/POSITION CONTROL OF A ROBOT
16 MANIPULATOR FOR HUMAN-ROBOT INTERACTION,» pp. 3-8.
]

P. NERANON e R. BICKER, «FORCE/POSITION CONTROL OF A ROBOT
17 MANIPULATOR FOR HUMAN-ROBOT INTERACTION,» p. 4.
]

A. Trujillo-León, C. Sánchez-Sánchez, J. Castellanos-Ramos e F. Vidal-Verdú,
18 «Assistive Handlebar Based on Load Cells as Attendant Steering Device,» 2018 *IEEE*
] *SENSORS*, pp. 1-4, 2018.

A. Trujillo-León, C. Sánchez-Sánchez, J. Castellanos-Ramos e F. Vidal-Verdú, «Device,
19 Assistive Handlebar Based on Load Cells as Attendant Steering Device,» 2018 *IEEE*
] *SENSORS*, p. 2, 2018.

A. Trujillo-León, C. Sánchez-Sánchez, J. Castellanos-Ramos e F. Vidal-Verdú, «Device,
20 Assistive Handlebar Based on Load Cells as Attendant Steering Device,» 2018 *IEEE*

] *SENSORS*, p. 2, 2018.

T. Grosse-Puppendahl, C. Holz, G. Cohn, R. Wimmer, O. Bechtold, S. Hodges, M. S. Reynolds e J. R. Smith, «Finding Common Ground: A Survey of Capacitive Sensing in Human-Computer Interaction,» p. 2.

S. Pratt. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/capacitance-sensors-for-human-interfaces-to-electronics.html>.

]

[Online]. Available: <https://www.srisensor.com/uploads/M3923.pdf>.

23

]

[Online]. Available: <https://www.srisensor.com/m39xx-series-6-axis-load-cell-large-capacity-product/>.

]

[Online]. Available: http://www.forsentek.com/download/force_transducer_FCL.pdf.

25

]

[Online]. Available: http://www.forsentek.com/download/force_transducer_FCL.pdf.

26

]

[Online]. Available: <https://www.igus.it/product/66?artNr=JFM-0608-08>.

27

]

[Online]. Available: <https://www.igus.it/product/13?artNr=P210SM-0608-08>.

28

]

[Online]. Available: https://www.igus.it/product/igubal_KBRM_KBLM?artnr=KBLM-06-MH.

29

[Online]. Available: <https://www.forsensor.com/sale-27661951-miniature-force-sensor->

30 10n-20n-50n-100n-200n-micro-load-cell-tension-compression.html.

]

[Online]. Available: http://www.forsentek.com/down/micro_force_sensor_FLAE.pdf.

31

]

[Online]. Available: http://www.forsentek.com/down/micro_force_sensor_FLAE.pdf.

32

]

[Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1602#technical-details>.

33

]

[Online]. Available: <https://www.plexishop.it/en/robotics-and-automation/sensors/touch/8-channels-capacitive-touch-sensor-cap1188.html>.

]

[Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1602#technical-details>.

35

]