

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Meccanica

Tesi di Dottorato di Ricerca in
Meccanica Applicata
XVI Ciclo – Anni 2001/2003

**STUDIO E PROGETTAZIONE DI
MASTER PER TELEOPERAZIONE
AZIONATI A CORDINI**

Relatore: Ch.mo Prof. Carlo Ferraresi

Dottorando: Francesco Pescarmona

*A Manuela
e al pupo,
comunque decidiamo di chiamarlo...*

“Robots of the world, you are ordered
to exterminate the human race...
Work must not cease!”

Karel Capek, “Rossum's Universal Robots”

“I don't know how robots work in any but the vaguest way. For that matter, I don't know how a computer works in any but the vaguest way, either. I have never worked with either robots or computers, and I don't know any details about how robots or computers are currently being used in industry.”

Isaac Asimov, “The word I invented”

Hospital Administrator: “And what are you doing this morning?”
Obstetrician: “It's a birth.”
Hospital Administrator: “Ah! And what sort of thing is that?”
Dr. Spenser: “Well, that's where we take a new baby out of a lady's tummy.”
Hospital Administrator: “Wonderful what we can do nowadays!”

Monty Python, “The Meaning of Life”

Indice

Sommario.....	1
1. Introduzione	3
1.a. Teleoperazione	3
1.b. Le strutture parallele a cordini	10
2. Ricerca di una struttura a sei gradi di libertà.....	15
2.a. Presentazione	15
2.b. Spazi di lavoro	21
2.c. Cinematica	25
2.d. Statica.....	30
3. Componenti funzionali	33
3.a. Sensorizzazione.....	33
3.b. I cordini.....	34
3.c. Metodologia di rinvio dei cordini	43
3.d. Motori e azionamenti	46
4. Banco prova ad un grado di libertà	49
4.a. Presentazione	49
4.b. Oggetti virtuali.....	51
4.c. Il controllo.....	54
4.d. Compensazione del disturbo di coppia del motore.....	56
5. Master a due gradi di libertà	63
5.a. Presentazione	63
5.b. La struttura	65
5.c. Oggetti virtuali	68
5.d. Algoritmo di controllo	69
6. Master a sei gradi di libertà: WiRo-6.3	83
6.a. Progettazione meccanica.....	83
6.b. Il controllo.....	94
7. Conclusioni	99
Bibliografia	103

Sommario

Lo scopo della presente tesi di dottorato è lo studio di una particolare tipologia di master per teleoperazione, ossia le strutture parallele azionate mediante cordini. L'obiettivo finale è la progettazione di un master per teleoperazione a sei gradi di libertà, che sarà azionato da un operatore per movimentare una struttura slave remota o virtuale, ricevendo da essa informazioni di forza e momento che saranno a loro volta inviate al master, permettendo all'operatore di sentire una riflessione di forza proporzionale al compito svolto istante per istante.

Al fine di raggiungere tale obiettivo, si procederà per passi successivi. Innanzitutto sarà presentato il percorso logico che ha portato alla concezione della struttura nelle sue linee più essenziali, antecedenti al progetto meccanico, dopodichè di tale struttura saranno presentate le caratteristiche geometriche, cinematiche e statiche. Procedendo quindi verso la realizzazione pratica del master, sarà presentata in particolare la validazione dei particolari costruttivi e dei componenti commerciali su banchi di prova appositi; inoltre le soluzioni più avanzate e alcune parti del controllo confluiranno su strutture semplificate ad uno e due gradi di libertà, che permetteranno di verificare il corretto comportamento dei particolari prima di progettare e realizzare il master a sei gradi di libertà.

Infine, grazie alle prove ed alle considerazioni svolte durante il programma di ricerca, la struttura a sei gradi di libertà sarà presentata come progetto meccanico finale; inoltre saranno mostrati gli algoritmi di controllo real-time della stessa.

1. Introduzione

1.a. Teleoperazione

Teleoperazione significa letteralmente “compiere un lavoro a distanza” [1], dove il termine distanza è inteso in senso lato: può essere una distanza fisica che separa l’operatore dal mezzo di attuazione, ma può anche riferirsi ad un cambiamento di scala, per esempio in chirurgia si può utilizzare la tecnologia dei micromanipolatori per compiere una operazione a livello microscopico.

È una tecnologia che si sta sviluppando di recente e trova applicazione nei settori scientifici più svariati, a seconda dei quali assume caratteristiche differenti nella realizzazione costruttiva e nell’interfaccia con l’operatore umano.

Ci si propone qui di fornire una panoramica sull’argomento rilevandone gli elementi principali e la relativa filosofia di progettazione; per far ciò è importante focalizzare l’attenzione sui termini più significativi utilizzati in letteratura per identificare la teleoperazione e le sue possibilità di utilizzazione.

Teleoperazione: è un sistema integrato di interazione tra un operatore e un ambiente di lavoro che non è meccanicamente collegato alle azioni dell’utente umano. L’operatore, manipolando un dispositivo posto nelle sue vicinanze, *master*, può controllare l’azione di un dispositivo posto a distanza o irraggiungibile, *slave*, dal quale riceve una sensazione delle forze di contatto ad esso applicate. La comunicazione avviene per

mezzo di sistemi elettronici e informatici, pertanto il sistema di teleoperazione deve condensare la grande quantità di dati che si riversa dall'ambiente sul manipolatore in una forma favorevole alla percezione ed all'interpretazione umana. Contemporaneamente, le azioni di output prodotte dall'operatore devono contenere informazioni sufficienti per una interpretazione univoca da parte del sistema di controllo.

L'interfaccia uomo-macchina o dispositivo di controllo di ingresso deve essere effettivamente trasparente all'informazione che fluisce attraverso di esso. Lo scopo della teleoperazione è ottenere la trasparenza tra l'azione motrice umana e le funzioni di sensorizzazione: tale obiettivo si può considerare realizzato se l'operatore non è in grado di distinguere se sta manovrando il dispositivo master o l'oggetto effettivo.

Telerobotica: rappresenta un concetto strettamente collegato con la teleoperazione, significa letteralmente “robotica a distanza”: un sistema di telerobotica consente all'operatore di imprimere il moto, manovrando direttamente un robot di input detto master, ad un manipolatore posto a distanza, detto slave, e provare una retroazione del movimento del manipolatore remoto e delle forze che agiscono su di esso (figura 1-1).

Un sistema di teleoperazione tipico è composto di cinque sottosistemi: operatore umano, robot master, struttura di comunicazione, robot slave, ambiente di lavoro [10].

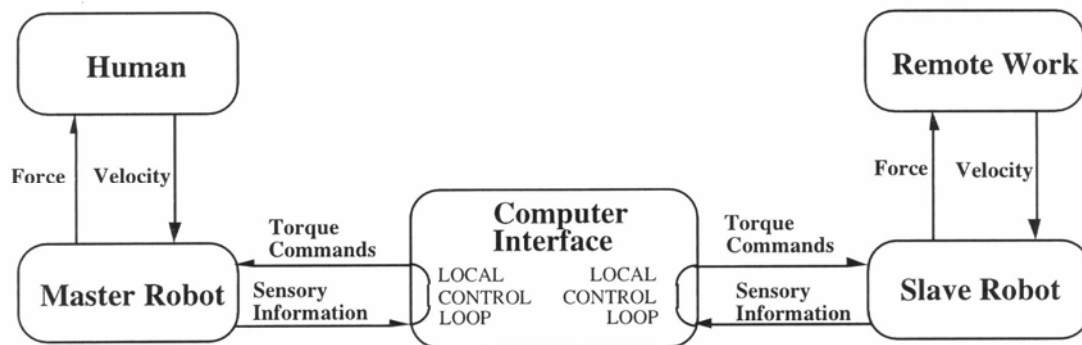


Figura 1-1 Diagramma a blocchi di un sistema master-slave

E' possibile in questo modo amplificare la forza dell'operatore nel caso in cui il manipolatore slave sia più grande e più potente di quello master. Questa capacità di ridurre i movimenti e le forze del robot master all'interno del naturale campo di lavoro dell'uomo può anche esaltare la sua sensibilità, consentendogli un più fine controllo delle posizioni e delle forze dell'estremità remota [6].

Quando il manipolatore slave ha una ridondanza cinematica, se cioè il numero di gradi di libertà nello spazio dei giunti è maggiore di quello nello spazio di lavoro cartesiano in cui sta operando, il sistema complessivo di teleoperazione potrebbe trarre beneficio dalle ulteriori capacità nello schivare ostacoli, nell'evitare singolarità, nell'ottimizzare la destrezza di movimento.

La più comune applicazione di questa tecnica è nella costruzione di apparecchiature come gli scavatori in cui l'operatore controlla la velocità dei giunti del robot per svolgere determinate funzioni [9]. Quando l'operatore è localizzato lontano dal robot remoto, si devono ricercare raffinate soluzioni ingegneristiche per riprodurre l'informazione di retroazione dai sensori in modo tale che sia realizzabile un controllo accurato ed efficiente.

Haptics (aptica): il termine *haptic* significa “riferito al o basato sul senso di contatto” (dal greco *haptein*). Ivan Sutherland, un padre fondatore di un settore particolare della tecnologia aptica denominato *realtà virtuale*, ha suggerito che “il senso umano del tatto è un ulteriore indipendente canale di informazione verso il cervello, un canale la cui informazione è assimilata in modo del tutto subconscio” [3]. Aggiungendo un canale di input di informazioni all'utente indipendente dalla vista, si accresce la quantità di dati elaborata dal cervello. L'aumento di informazione riduce l'errore ed il tempo richiesto per svolgere un lavoro; riduce anche il consumo di energia e l'entità delle forze di contatto richieste in una operazione compiuta a distanza.

L'aptica è lo studio del modo di collegare il senso umano del tatto con un mondo generato al computer: alcuni dispositivi aptici, ad esempio, consentono all'operatore di toccare con le mani oggetti che compaiono sullo schermo del computer come se fossero fisicamente presenti (figura 1-2).



a) *CyberTouch*



b) *Nintendo/Mattel PowerGlove*

Figura 1-2 *Esempi di dispositivi aptici*

Il dispositivo CyberTouch (figura 1-2a) prevede piccoli stimolatori vibro-tattili posti su ciascun dito e sul palmo della mano sensorizzata CyberGlove; ciascuno stimolatore può essere programmato singolarmente per variare l'intensità della sensazione di tatto. Il dispositivo di figura 1-2b misura la flessione delle dita attraverso la misura della resistenza elettrica di un inchiostro conduttivo spalmato sopra la struttura plastica che ricopre ciascun dito; rileva anche la posizione del polso tramite impulsi ad ultrasuoni.

L'aptica è una tecnologia che sta emergendo dal suo stato iniziale di campo di ricerca di laboratorio in scienza con applicazioni commerciali per i notevoli vantaggi che i dispositivi aptici presentano rispetto ai dispositivi di input già esistenti: sensibile riduzione del lavoro fisico, aumento di produttività e di comfort, considerevole diminuzione di errori nella manipolazione.

I dispositivi aptici possono essere di due tipi, a retroazione di forza o a retroazione di contatto:

- a retroazione di forza: sono dispositivi che interagiscono con i muscoli ed i tendini umani per dare la sensazione di una forza che viene applicata; questi congegni sono rappresentati principalmente dai manipolatori robotizzati che riflettono sull'operatore le resistenze fisiche incontrate da un mezzo virtuale di esecuzione nel suo ambiente di lavoro
- a retroazione di contatto: sono dispositivi che interagiscono con le estremità nervose della pelle, aventi la funzione di far provare all'utente sensazioni di temperatura, pressione e densità; questi congegni sono utilizzati per indicare se l'operatore è in contatto o meno con un oggetto virtuale o per simularne la consistenza.

Lo schema a blocchi di un dispositivo integrato contenente un'interfaccia aptica è rappresentato in figura 1-3.

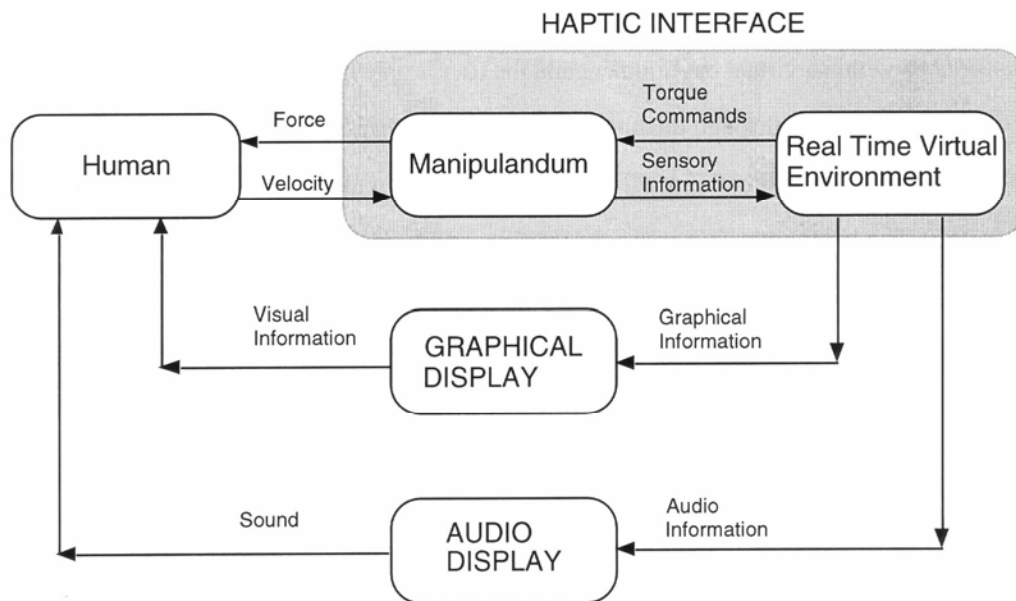


Figura 1-3 Sistema di interfaccia aptica

Realtà Virtuale (VR): è il processo di creazione di ambienti virtuali (VE: *Virtual Environments*) con i quali l'uomo interagisce attraverso i sensi dell'udito, della vista e del tatto, ricevendo l'illusione di eventi reali. Mentre i sistemi convenzionali di realtà virtuale consentono agli operatori di vedere ed ascoltare gli ambienti virtuali con mezzi grafici o sonori, la realtà virtuale aptica dà loro la possibilità di "sentire" i VE attraverso una interfaccia grafica e sonora in grado di stabilire una comunicazione il più possibile trasparente all'interno del sistema. In figura 1-4 è presentato un esempio di VR: sono strumenti che ricostruiscono attorno all'operatore l'ambiente remoto sul quale sta intervenendo, dandogli la possibilità di scambiare con esso informazioni sensoriali.

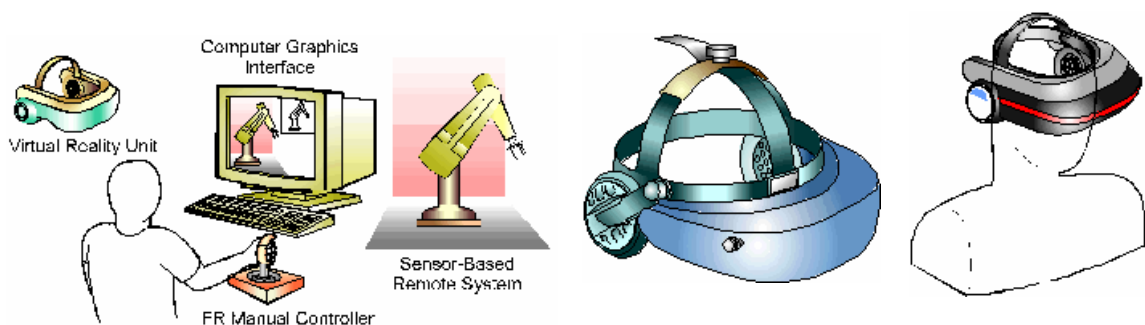


Figura 1-4 Sistema di realtà virtuale

Un'unità di VR è un dispositivo di visione indossabile che consente ad una persona di percepire ed interagire con un ambiente virtuale, come se esso fosse reale [4]. Mentre le interfacce grafiche consentono agli operatori di ricevere informazioni tramite un metodo iconografico, un mondo virtuale consente all'operatore di accedere alle informazioni tramite l'imitazione dello spazio tridimensionale presente nel mondo reale [6].

Controllore manuale a retroazione di forza (FRHC): Un controllore manuale o joystick a retroazione di forza (FRMC o FRHC) è un dispositivo che può essere utilizzato nella teleoperazione per eseguire compiti in ambienti remoti.

In letteratura sono presenti varie tipologie costruttive di FRHC, caratterizzate da diversi principi fisici di funzionamento. Un dispositivo particolare è rappresentato in figura 1-5: è l'elemento di input di una interfaccia aptica basata su una tecnologia di levitazione magnetica che sfrutta le forze di Lorentz per sollevare in modo stabile e controllare un corpo rigido (che include la maniglia attraverso la quale l'operatore interagisce) nei sei gradi di libertà, fornendo una nuova ed inesplorata base fisica per l'interazione aptica. E' un sistema a riflessione di forza, dotato di elevata precisione, ma piccolo spazio di lavoro.

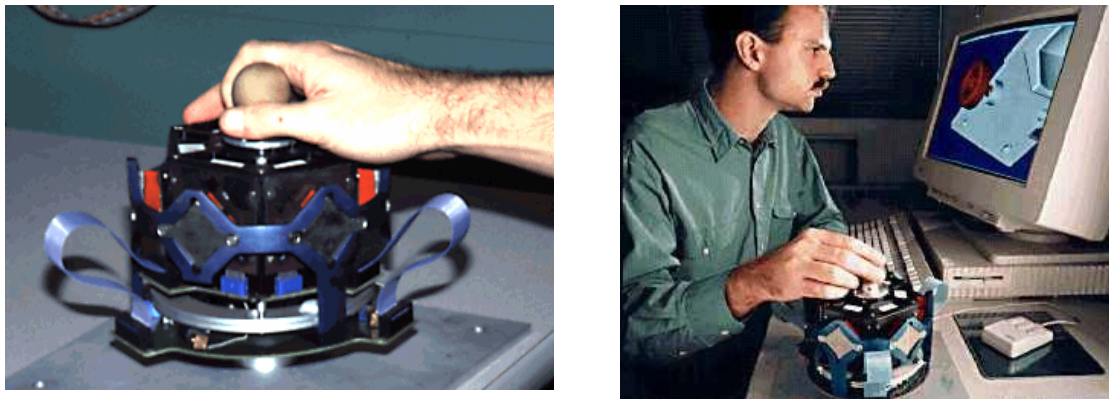


Figura 1-5 *Interfaccia aptica a riflessione di forza*

Nella tecnologia di controllo del tipo posizione-posizione la posizione del master è trasferita come comando al controllore di posizione dello slave, e la posizione dello slave è trasferita come comando al master [12]. Master e slave sono collegati da un anello di retroazione; si deve, pertanto, considerare anche la dinamica del sistema

chiuso in anello, che lo rende lento nello spazio di movimento. I ritardi tra i movimenti dei due sistemi fanno sì che l'operatore debba compensare elevate forze di reazione.

Nella tecnologia del tipo posizione-forza l'idea è ancora quella di trasferire le posizioni del master come comandi allo slave. La forza di interazione tra lo slave e l'ambiente, però, è rimandata direttamente al master, cosicché, se lo slave riproduce fedelmente i movimenti del master ed il master sente esattamente le forze agenti sullo slave, l'operatore avverte una interazione con l'ambiente di lavoro identica a quella dello slave.

In figura 1-6 è rappresentato un sistema di teleoperazione in cui il dispositivo di input è costituito da un joystick.

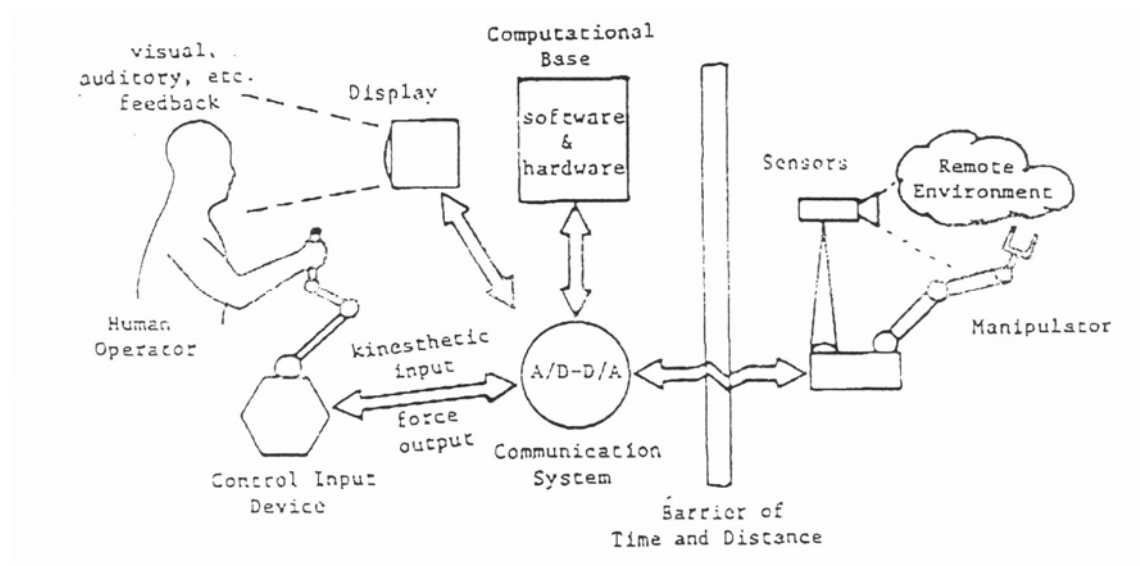


Figura 1-6 Funzionalità del FRHC all'interno di un sistema di teleoperazione

Mentre il movimento di input sul joystick genera il movimento del sistema remoto, le forze esercitate su quest'ultimo dall'esterno sono riflesse al controllore manuale in modo tale che l'operatore senta la loro azione.

Il tipo di software di controllo del joystick consente all'operatore di introdurre i fattori di riduzione dei segnali di posizione e di forza scambiati tra il joystick ed il manipolatore. Nel controllo di posizione, quando l'operatore sposta il joystick di una certa distanza, il manipolatore si muove in base al valore di scala impostato. Nel controllo con retroazione di forza, l'operatore può inserire il fattore di riduzione della forza riflessa al controllore manuale.

Le equazioni del moto di ingresso e di uscita, nonché le equazioni delle forze riflesse, devono essere derivate e sviluppate mediante un opportuno software in grado di fornire l'analisi cinematica diretta e inversa del controllore manuale e del manipolatore remoto. Tuttavia queste equazioni devono essere scritte nel modo più efficiente possibile in modo tale che possano essere usate nel controllo computerizzato in tempo reale.

1.b. Le strutture parallele a cordini

Le strutture parallele sono una classe relativamente nuova nel campo dei robot. Fino alla loro concezione, con la parola “robot” si intendeva comunemente un apparato seriale, caratterizzato cioè da attuatori disposti in serie tra loro: ogni attuatore è collegato alle sue estremità ad un altro attuatore, o al limite, nel caso rispettivamente del primo e dell'ultimo attuatore, alla base o all'*end effector*. Questo significa che ogni attuatore, lineare o rotativo, impone un movimento che dipende da quello degli attuatori che lo precedono nella catena cinematica. Per chiarezza, si può pensare ad un braccio umano, per il quale la posizione finale delle dita nello spazio è determinata dai movimenti relativi delle varie articolazioni, dalla spalla in giù, e potrebbe essere calcolata con grande semplicità una volta note le rotazioni relative di ciascuna giuntura. I robot paralleli sono invece caratterizzati da attuatori disposti in parallelo tra loro, e quindi tutti collegati da una parte ad un giunto fisso, dall'altra ad un giunto solidale con una piattaforma mobile, che costituisce o porta con sé l'*end effector*.

La posizione dell'estremità mobile non è più una combinazione semplice dei movimenti degli attuatori, ma dipende da essi secondo equazioni più complesse.

Un robot seriale è caratterizzato da uno spazio di lavoro molto ampio (luogo dei punti e degli orientamenti raggiungibili dalla struttura), ma presenta per contro una precisione non eccezionale per via del peso proprio, delle forze d'inerzia e della distribuzione del carico, nonché per la sua rigidità relativamente bassa.

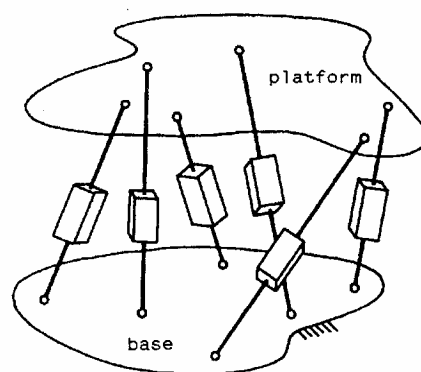


Figura 1-7 Generalizzazione della piattaforma di Stewart

Al contrario un robot parallelo si dimostra molto preciso, poiché le masse in movimento si riducono notevolmente e così pure le forze inerziali; inoltre la rigidità è molto maggiore, in quanto gli attuatori, agendo in parallelo, compensano gli errori l'uno dell'altro (mentre per la struttura seriale l'errore finale era in un certo modo la "somma" degli errori). Per contro lo spazio di lavoro di un robot parallelo è piuttosto ridotto.

Il più classico dei robot paralleli è la cosiddetta "piattaforma di Stewart" (figura 1-7), dal nome del suo ideatore [57].

L'impiego dei cordini al posto delle tradizionali trasmissioni meccaniche impiegate nei dispositivi paralleli (pantografi, martinetti a vite, attuatori lineari a fluido) permette di conseguire i vantaggi tipici di queste strutture meccaniche nei confronti delle strutture seriali (minore richiesta di potenza, miglior rapporto tra carico utile e peso totale, maggiore accuratezza di posizionamento), senza particolari vincoli sulla collocazione dei motori con i freni, i sensori e gli altri loro accessori, consentendo così la possibilità di ottimizzare il rapporto tra il volume d'ingombro totale del dispositivo e il suo spazio di lavoro.

Per contro questo tipo di attuazione risulta totalmente irreversibile (i cordini possono essere solo posti in trazione dai motori e non possono spingere su di essi) e quindi, per ottenere un dispositivo a sei gradi di libertà, è necessario avere almeno sette cordini con i corrispondenti motori.

La trascurabile inerzia dei cordini, che ne consiglia l'adozione per la realizzazione di sistemi robotici caratterizzati da alte velocità di posizionamento (necessari ad esempio nelle moderne operazioni di assemblaggio), li rende soggetti a vibrazioni indesiderate che, nell'impiego come master per teleoperazione, sovrapponendosi alla forza da esercitare come retroazione, potrebbero disturbare l'operatore; la necessaria ridondanza degli attuatori dovrà quindi essere usata anche per generare forze interne che aumentino la rigidità del dispositivo.

La ridondanza del numero dei cordini è infine utile anche per superare un altro svantaggio tipico dei meccanismi paralleli: la determinazione della posizione e dell'orientamento della piattaforma mobile a partire dalla posizione degli attuatori (cinematica diretta) non è semplice e, a differenza di quanto accade per i dispositivi seriali, non esiste un algoritmo generale di soluzione; per quei particolari dispositivi per cui il problema è stato risolto, in generale si ottengono più soluzioni per una assegnata

configurazione degli attuatori, tra le quali non è sempre possibile distinguere quella effettivamente conseguita dalla piattaforma; in questo caso la ridondanza aiuterà nell'esclusione di alcune delle soluzioni possibili.

Infine, la ridondanza consente di aumentare le prestazioni in termini di ampiezza dello spazio di lavoro e destrezza del dispositivo.

Si comprenderà quindi come il controllo di un dispositivo a cordini richieda anche algoritmi complessi che dovranno essere eseguiti sotto stringenti richieste di esecuzione in tempo reale.

In figura 1-8 è rappresentato un esempio di struttura parallela a cordini (che per esigenze dimensionali sono in questo caso veri e propri cavi), il “Robocrane” [24]-[29], ideato come gru per costruzioni. Esso è costituito da una piattaforma mobile, che costituisce l'organo di sollevamento, sospesa ad un telaio fisso mediante sei cavi.

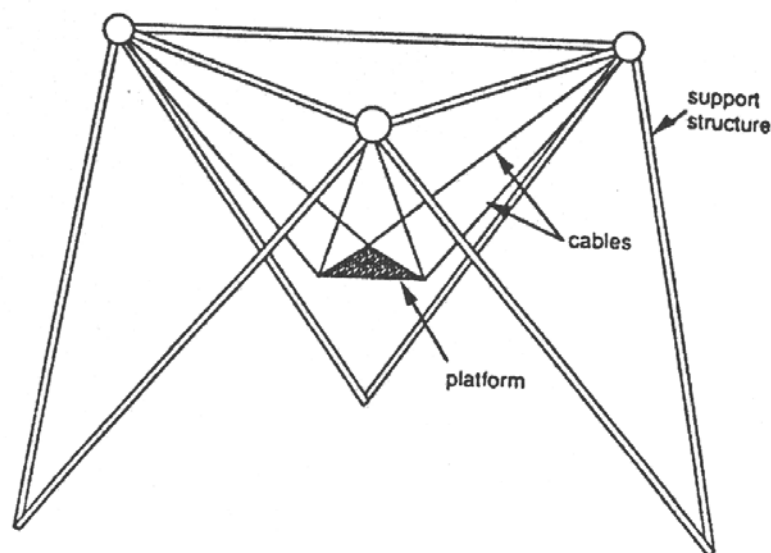


Figura 1-8 *NIST Robocrane*

Quando sono in tensione tutti e sei i cavi, la piattaforma mobile è cinematicamente condizionata ed esiste, pertanto, una relazione matematica nota tra la lunghezza dei sei cavi e la posizione e l'orientamento della piattaforma.

Le lunghezze dei sei cavi sono controllate da sei argani, che a loro volta sono controllati e coordinati da un computer. Ciascun vertice del triangolo superiore è connesso a due cavi; i sei cavi insieme sorreggono la piattaforma di lavoro inferiore, che è soggetta all'azione della gravità e pertanto può essere movimentata nei sei gradi di libertà utilizzando solo sei cavi anziché sette. Preme sottolineare che tale semplificazione è

possibile soltanto quando non vi sia la necessità di esercitare forze risultanti equiverse con la gravità. Nel caso più generale, in cui si voglia la massima libertà possibile in direzione e verso di applicazione delle forze e dei momenti risultanti sulla piattaforma, sono necessari – come si è già detto – un minimo di sette cavi o cordini.

2. Ricerca di una struttura a sei gradi di libertà

2.a. Presentazione

Scopo dell'attività di ricerca è lo studio e la realizzazione di una struttura master per teleoperazione a sei gradi di libertà, azionata da cordini. Come si è detto nel capitolo 1, si desidera che la struttura sia in grado di fornire una reazione di forza sulla mano dell'operatore che aziona il master stesso. Le possibilità di applicazione di tale struttura sono molteplici, in particolare si può controllare un qualunque robot slave, sia esso a struttura seriale o parallela, posto a distanza o in ambiente ostile. I sei gradi di libertà del master permettono di controllare qualunque spostamento e orientazione, e per contro di fornire una reazione di forza e momento in qualunque direzione e verso.

L'ideazione della struttura master deve potersi adattare a svariate applicazioni, caratterizzate da diverse esigenze di spazio di lavoro e di entità delle forze e dei momenti che devono essere riflessi sulla maniglia impugnata dall'operatore. Pertanto le strutture ideate, in una prima fase, sono state schematizzate utilizzando unità adimensionali, che solo successivamente saranno modificate mediante opportuni rapporti di scala per ottenere le geometrie da utilizzarsi per le fasi di progetto costruttivo.

Il numero minimo di cordini per realizzare sei gradi di libertà nello spazio cartesiano è sette, pertanto inizialmente si sono considerate strutture con questa caratteristica. In

2. Ricerca di una struttura a sei gradi di libertà

figura 2-1 sono rappresentate due delle strutture a sette cordini analizzate nella fase preliminare del progetto.

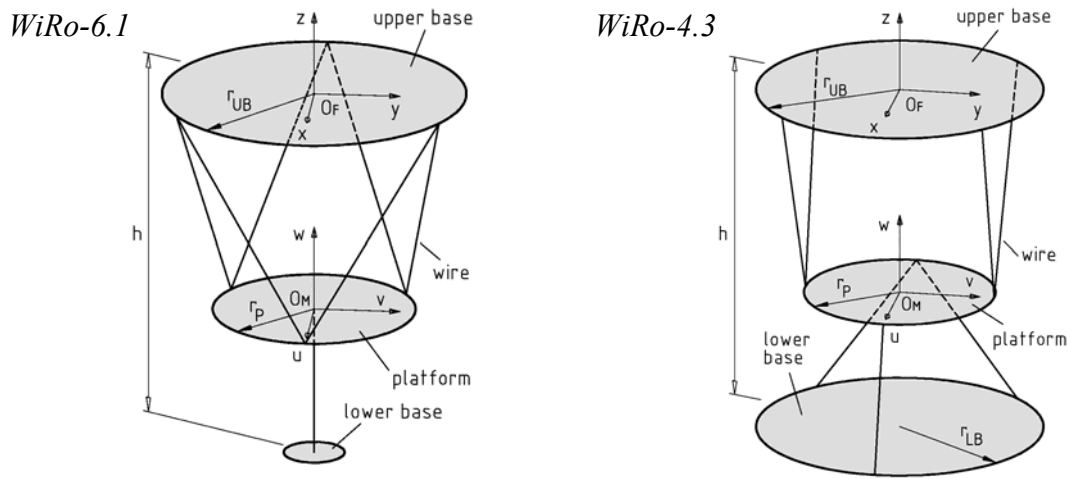


Figura 2-1 Strutture a sette cordini

Si nota la presenza di un telaio fisso, costituito da due basi, di seguito indicate come base superiore ed inferiore, e di una piattaforma mobile, sulla quale s'ipotizza di realizzare un'impugnatura per la mano dell'operatore. Alla piattaforma mobile sono collegati sette cordini che entrano in altrettanti passanti fissi sul telaio per andare poi ad avvolgersi sui motori.

Per la disposizione dei passanti tra le due basi si è scelto di adottare meccanismi con tre passanti collocati su una base e quattro sull'altra (denominati WiRo-4.3) e meccanismi con sei rinvii su una base e uno solo sull'altra (denominati WiRo-6.1). In generale, si è adottata la denominazione di "WiRo" come abbreviazione di *wire robot*, seguita da due numeri che rappresentano il numero di passanti su una base e sull'altra.

In figura 2-1 si riconoscono inoltre alcune notazioni significative; in particolare, oltre alle dimensioni geometriche che sono univocamente identificabili in figura, si definiscono due sistemi di riferimento: uno solidale al telaio fisso, avente assi x - y - z e origine O_F , ed uno solidale alla piattaforma mobile, avente assi u - v - w e origine O_M . Le immagini di figura 2-1 schematizzano i robot in una configurazione in cui i due sistemi di riferimento sono posizionati con assi paralleli e l'origine O_M si trova lungo l'asse z .

Per le due famiglie di dispositivi sono state studiate le caratteristiche cinematiche e determinati gli spazi di lavoro; a differenza dei comuni dispositivi meccanici, per i quali

lo spazio di lavoro è costituito dall'insieme delle posizioni e degli orientamenti raggiungibili compatibilmente con i vincoli imposti ai movimenti degli attuatori, per i dispositivi a cordini occorre anche imporre la condizione che nelle configurazioni raggiunte sia possibile comporre le trazioni dei cordini (dirette unicamente dalla piattaforma ai motori) in modo da ottenere come risultanti le forze e le coppie che si vogliono esercitare.

L'analisi degli spazi di lavoro è consistita innanzitutto nella determinazione del *positional workspace*, ottenibile traslando la piattaforma mobile rigidamente, mantenendola così parallela alle due basi fisse. Sono stati anche determinati gli *orientation workspace*, per i quali la piattaforma è stata ruotata di un angolo $\pm\alpha$ attorno a ciascuno dei suoi assi, prima di essere traslata rigidamente. In questo caso, una posizione raggiunta dalla piattaforma è considerata appartenente allo spazio di lavoro solo se ogni combinazione di $\pm\alpha$ per ciascuna delle rotazioni attorno agli assi coordinati della piattaforma fornisce risultati accettabili.

Nella figura 2-2 sono rappresentati il *positional workspace* e lo *orientation workspace* per $\alpha=10^\circ$, con le relative proiezioni sui piani coordinati, per una struttura WiRo-4.3 caratterizzata da $r_{UB}=r_{LB}=60$, $r_p=30$ e $h=120$ (si ricorda che, essendo la geometria del dispositivo scalabile, le dimensioni sono in unità arbitrarie).

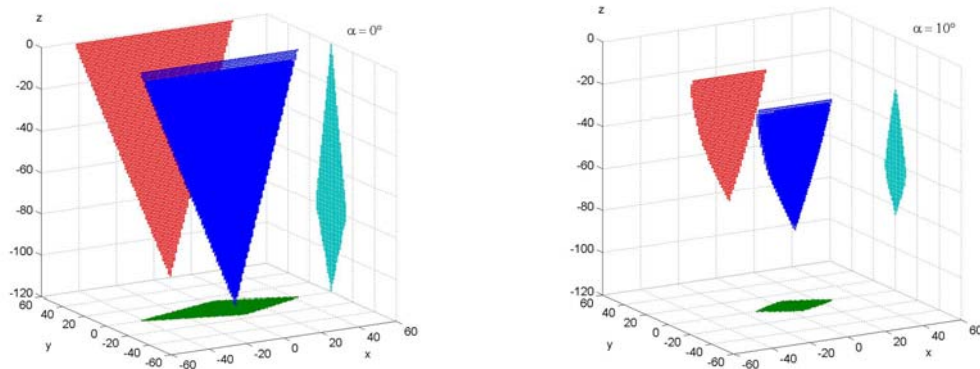


Figura 2-2 WiRo-4.3: positional e orientation workspace ($\alpha=10^\circ$).

2. Ricerca di una struttura a sei gradi di libertà

Nella successiva figura 2-3 sono invece riportati gli spazi di lavoro di una struttura WiRo-6.1 di identiche dimensioni.

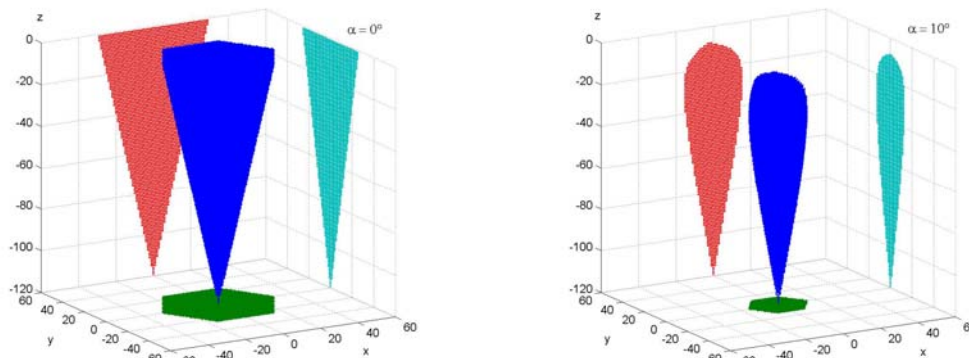


Figura 2-3 *WiRo-6.1*: positional e orientation workspace ($\alpha=10^\circ$).

Come si può notare da questo primo confronto, la struttura denominata WiRo-6.1 presenta rispetto all'altra evidenti vantaggi in termini di isotropia dei piani orizzontali del *positional workspace* e di estensione dell'*orientation workspace*, che può raggiungere anche angoli maggiori, come si può vedere in figura 2-4, dove è riportato l'*orientation workspace* per $\alpha=20^\circ$.

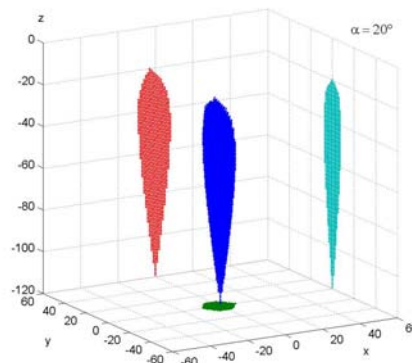


Figura 2-4 *WiRo-6.1*: orientation workspace ($\alpha=20^\circ$).

Ripetute analisi, relative ad altre scelte di dimensioni ed anche ad altre disposizioni dei cordini, hanno alla fine portato alla conclusione che la struttura WiRo-6.1 presenta le caratteristiche più interessanti fra tutte le strutture a sette cordini considerate. La disposizione del gruppo dei sei cordini di questa struttura rimanda alla piattaforma di Stewart (vedere capitolo 1).

Dalle analisi svolte sulla struttura WiRo-6.1, è stato possibile trarre alcune importanti conclusioni. Il suo *positional workspace* è abbastanza ampio nella parte superiore, ma si

riduce notevolmente verso la base inferiore con un andamento a piramide. A differenza delle altre strutture a sette cordini, le sue sezioni lungo i piani orizzontali si avvicinano a cerchi, dimostrando una discreta isotropia per gli spostamenti radiali. Inoltre, anche facendo variare l'angolo di inclinazione della piattaforma, lo spazio di lavoro non si riduce eccessivamente, bensì conserva una discreta ampiezza nella zona centrale. Si vorrebbe però che lo spazio di lavoro potesse mantenersi ampio anche verso il basso, in modo da migliorarne l'uniformità anche lungo l'asse verticale.

Si può intuitivamente notare che l'attuazione della reazione di forza non sarà ripartita omogeneamente sui sette cordini, perché le tensioni del gruppo dei sei cordini dovranno essere contrastate lungo l'asse z da un solo cordino; questo limita notevolmente il campo d'impiego, o costringe ad usare un cordino di sezione maggiore degli altri, affinché possa sopportare una tensione maggiore.

Come per le altre strutture a sette cordini, non è stato possibile ottenere una soluzione della cinematica diretta esprimibile in forma chiusa con algoritmi adatti al controllo in tempo reale.

Nella fase seguente del programma di ricerca, si è cercato quindi di studiare un nuovo tipo di struttura, attuata da nove cordini, che permettesse di risolvere i problemi rimasti aperti.

La prima delle considerazioni che hanno condotto alla nuova struttura è stata maturata attraverso lo studio delle caratteristiche che un robot parallelo, derivato dalla piattaforma di Stewart, deve presentare per avere una soluzione della cinematica diretta in forma chiusa. Si sono dapprima considerati i robot paralleli tradizionali non ridondanti (ovvero con sei attuatori lineari bi-direzionali non a cordini) per estendere poi le conclusioni ai robot paralleli a cordini con qualunque grado di ridondanza.

Per questi robot, in alcuni casi particolari, quale ad esempio quello di una struttura in cui cinque dei sei giunti mobili siano allineati e il sesto abbia da solo la responsabilità di un grado di libertà di rotazione, esiste una soluzione della cinematica diretta in forma chiusa. Questo è evidentemente un caso limite, perché una struttura di questo genere presenterebbe elevata anisotropia, ma evidenzia l'importanza del disaccoppiamento dei gradi di libertà per la risolubilità in forma chiusa della cinematica diretta.

Per dispositivi con sei attuatori non ci sono ulteriori soluzioni costruttive che portino ad una soluzione in forma chiusa della cinematica diretta di strutture a sei gradi di libertà;

si può però trovare una soluzione aggiungendo invece dei sensori (in numero di uno, due o tre) opportunamente disposti, collegati alla piattaforma mobile in maniera analoga agli attuatori lineari, che, partecipando passivamente al moto imposto da questi, svolgano il solo compito di misurare la propria estensione.

Quando tre elementi (attuatori e/o sensori) sono disposti in modo da condividere lo stesso giunto sulla piattaforma mobile, è possibile determinare immediatamente, con poche elaborazioni geometriche, la posizione di tale punto per poi ottenere, nella maggior parte dei dispositivi, anche l'orientamento della piattaforma.

Con l'adozione dei sensori ridondanti si generalizza quindi il disaccoppiamento dei gradi di libertà, separando quelli di traslazione da quelli di rotazione. Le stesse considerazioni possono essere applicate ad un sistema robotico a cordini, proponendo quindi, per la risoluzione della cinematica diretta, l'adozione di tre cordini convergenti in un unico punto della piattaforma.

La seconda considerazione riguarda la forma dello spazio di lavoro della struttura WiRo-6.1; la ridotta dimensione della sua parte inferiore è causata dal fatto che, una volta fissata la posizione della piattaforma mobile, la direzione e il verso della forza applicata dall'unico cordino della base inferiore risultano fissati univocamente; l'equilibrio delle tensioni degli altri sei cordini, richiesto per ottenere come risultante la reazione di forza desiderata, deve quindi essere raggiunto utilizzando solamente il valore della trazione esercitata dal settimo cordino.

Potendo invece ricollocare, per ciascuna posizione della piattaforma mobile, il passaggio del cordino in un opportuno punto della base inferiore, si amplierebbe la parte inferiore dello spazio di lavoro; l'adozione di tre cordini convergenti in un unico giunto mobile sulla piattaforma e passanti per la base inferiore, al posto di un cordino singolo, realizza questa opportunità combinando le tensioni dei cordini convergenti: la risultante delle loro trazioni sarà una forza applicata alla piattaforma mobile nel giunto comune e con direzione e verso che individuano univocamente un punto di passaggio compreso nel triangolo avente per vertici i tre punti dove sono collocati i rinvii dei cordini.

Occorre infine considerare anche che la sostituzione del settimo cordino con un gruppo di tre, facendo sì che non sia un unico cordino ad agire contro il gruppo di sei, porta la struttura ad un maggior equilibrio anche per quanto riguarda l'entità delle trazioni che devono essere applicate dai singoli motori.

Dalle considerazioni esposte si può quindi concludere che adottando al posto della struttura WiRo-6.1 una struttura con sei cordini che agiscono da una parte e tre dall'altra, convergenti in un unico attacco sulla piattaforma mobile, si ottengono i seguenti risultati:

1. si può trovare una soluzione in forma chiusa della cinematica diretta;
2. si ottiene uno spazio di lavoro più ampio verso il basso, e più uniforme;
3. la struttura risulta più equilibrata.

La nuova struttura, denominata WiRo-6.3, è rappresentata nella figura 2-5.

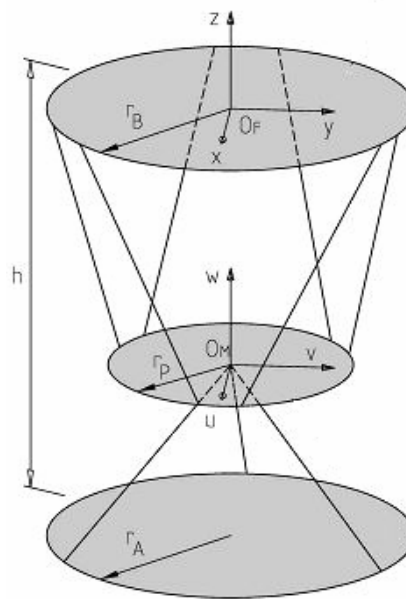


Figura 2-5 La struttura WiRo-6.3

2.b. Spazi di lavoro

Per studiare lo spazio di lavoro ottenibile con la struttura WiRo-6.3, è stata sviluppata una procedura analitica per determinare gli spazi di lavoro di una generica struttura a nove cordini.

Indicando con $\underline{f} \in R^6$ il vettore di forze generalizzate esterne esercitate sulla piattaforma mobile e con $\underline{T} \in R^6$ il vettore risultante di forze generalizzate applicate su di essa dai cordini, l'equilibrio statico della maniglia si esprime con la condizione:

$$\underline{T} + \underline{f} = 0 \quad (2.1)$$

Il problema della determinazione dello spazio di lavoro si riconduce quindi a trovare l'insieme delle posizioni e degli orientamenti della piattaforma per i quali un qualunque vettore risultante $\underline{T} = -\underline{f}$ può essere ottenuto con tensioni tutte positive dei cordini.

Introducendo la relazione tra le forze risultanti e le tensioni dei cordini, mediante lo Jacobiano della struttura (che sarà funzione della posizione e dell'orientamento della base), espressa da:

$$\underline{T} = \mathcal{J} \underline{\tau} \quad (2.2)$$

con $\mathcal{J} \in R^{6 \times 9}$ matrice jacobiana riferita al sistema mobile e $\underline{\tau} \in R^9$ vettore avente per componenti le tensioni dei nove cordini, il requisito essenziale sarà dunque:

$$\underline{\tau} > 0.$$

Le infinite soluzioni dell'equazione (2.2), potranno essere espresse nella forma:

$$\underline{\tau} = \underline{\tau}_{\min} + c \cdot \underline{\tau}^* \quad (2.3)$$

dove $\underline{\tau}_{\min}$ (la soluzione a norma euclidea minima) può essere valutata per mezzo della matrice $\mathcal{J}^\#$, pseudoinversa di $\mathcal{J}$, tramite la relazione $\underline{\tau}_{\min} = \mathcal{J}^\# \cdot \underline{T}$, $\underline{\tau}^*$ è un generico vettore appartenente al nucleo di $\mathcal{J}$ e c un numero arbitrario positivo.

L'appartenenza allo spazio di lavoro di una certa configurazione di posizione ed orientamento del robot dipenderà quindi dall'esistenza di un vettore $\underline{\tau}^*$ con componenti tutte strettamente positive, tale che, scegliendo per c un opportuno valore, sia possibile ottenere $\underline{\tau}_{\min} + c \cdot \underline{\tau}^* > 0$.

Il nucleo di $\mathcal{J}$ è un sottospazio che ha per base tre vettori a nove componenti; il vettore $\underline{\tau}^*$ desiderato, se esiste, sarà generato da una combinazione lineare di questi tre vettori.

Indicando con k_{ij} la i -esima componente del j -esimo vettore della base del nucleo esaminato e con α, β, γ i tre coefficienti incogniti della combinazione lineare, si avrà quindi:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{11}\alpha + k_{12}\beta + k_{13}\gamma > 0 \\ \quad \quad \quad \text{M} \\ k_{i1}\alpha + k_{i2}\beta + k_{i3}\gamma > 0 \\ \quad \quad \quad \text{M} \\ k_{91}\alpha + k_{92}\beta + k_{93}\gamma > 0 \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Ogni riga del sistema (2.4) determina, nello spazio tridimensionale definito dalle coordinate α, β, γ , un piano che delimita un semispazio. Il sistema nel suo complesso determina l'intersezione di tutti i nove semispazi e quindi o uno spazio nullo o un poliedro. Nel primo caso, ovviamente, non ci sono soluzioni e la configurazione di posizione e orientamento non appartiene allo spazio di lavoro. Nel secondo caso la configurazione appartiene allo spazio di lavoro, perché, esistendo almeno un $\underline{\tau}^*$ strettamente positivo, può essere reso positivo anche $\underline{\tau}$.

Per lo studio dello spazio di lavoro del WiRo-6.3 si è discretizzato finemente uno spazio tridimensionale sicuramente contenente il *positional workspace* e per ciascuna posizione ottenuta si è applicata, in ambiente Matlab, la procedura per la determinazione del diedro; l'operazione è stata poi ripetuta anche per la determinazione degli *orientation workspace*.

In figura 2-6 sono rappresentati il *positional workspace* e lo *orientation workspace* per $\alpha=10^\circ$ ottenute per un dispositivo WiRo-6.3 con le stesse dimensioni caratteristiche del WiRo-6.1 relativo alla figura 2-4 e con $r_A=60$.

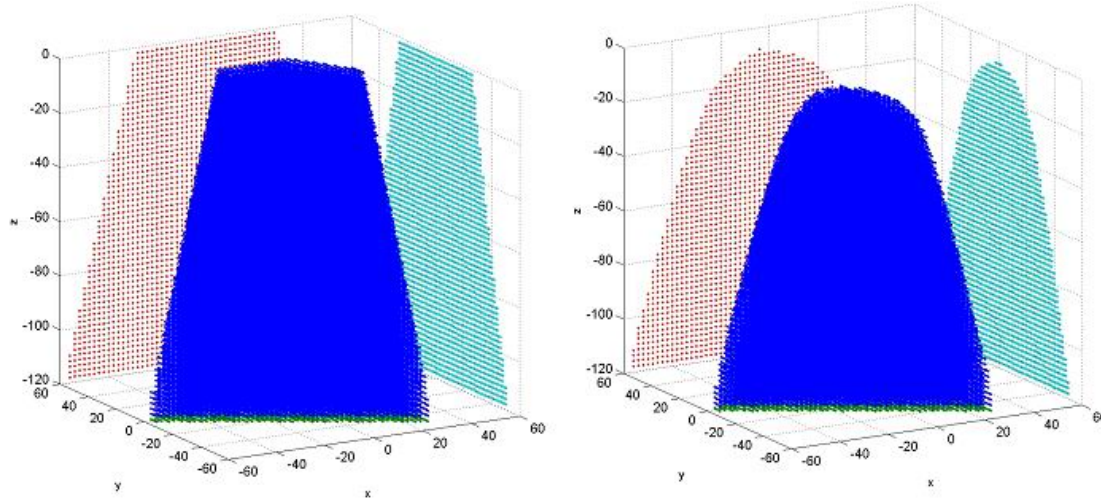


Figura 2-6 WiRo-6.3: positional e orientation workspace ($\alpha=10^\circ$).

Confrontando la figura 2-6 con la 2-4 è facile apprezzare l'evidente miglioramento delle prestazioni; la struttura inoltre presenta la possibilità di imprimere alla base mobile rotazioni più apprezzabili, come si può vedere nella figura 2-7, dove sono riportati gli *orientation workspace* per $\alpha=20^\circ$ e $\alpha=30^\circ$.

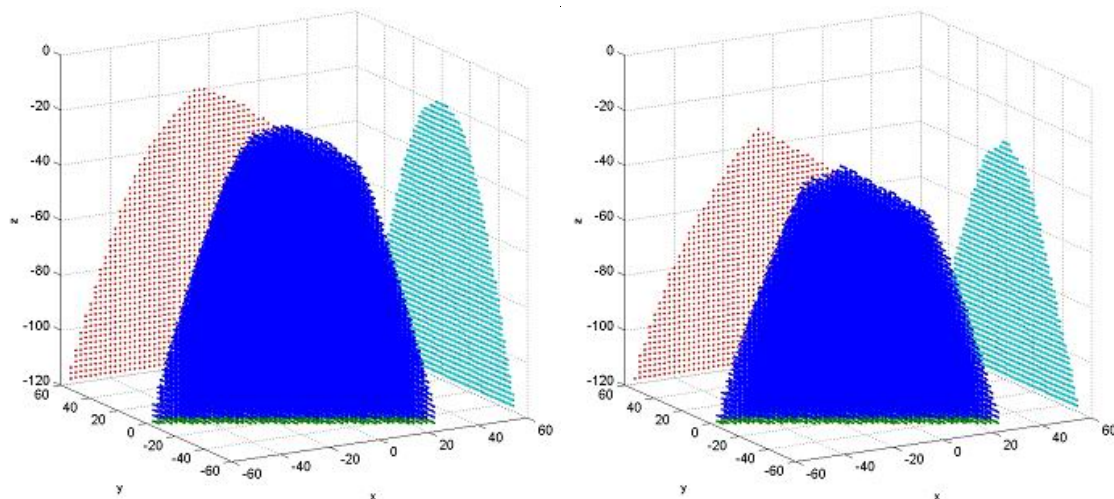


Figura 2-7 WiRo-6.3: orientation workspace ($\alpha=20^\circ$ e $\alpha=30^\circ$).

Si sottolinea che, durante lo svolgimento dei calcoli per la determinazione degli spazi di lavoro, sono state svolte anche le verifiche sul rango di $\mathcal{J}$ atte a identificare le

singularità della struttura. Il risultato è stato che all'interno degli spazi di lavoro presentati non vi sono singolarità. Questo fatto può essere spiegabile sia considerando le restrizioni imposte dall'attuazione a cordini, che impongono un vincolo ulteriore nella definizione stessa di spazio di lavoro, sia grazie all'elevata ridondanza della struttura.

2.c. Cinematica

Cinematica inversa

La cinematica inversa consiste nell'individuazione delle lunghezze e degli orientamenti dei fili, a partire dalla posizione e dall'orientamento della piattaforma mobile. Il problema, come avviene anche per i dispositivi seriali, è impostato definendo due sistemi di riferimento, uno solidale con la base fissa superiore e uno solidale con la piattaforma mobile e introducendo un vettore $\mathbf{s}$ che descrive, nel primo sistema di riferimento, la posizione dell'origine del sistema mobile e una matrice $\mathbf{A}$ che descrive la rotazione necessaria per allineare i due sistemi di riferimento.

In questo modo, indicando con $\mathbf{r}_i$ il vettore che descrive il punto d'attacco dell' i -esimo cordino sulla piattaforma nel sistema di riferimento ad esso solidale, il medesimo punto sarà descritto nel sistema di riferimento fisso dal vettore $\mathbf{s} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_i$; indicando quindi con $\mathbf{R}_i$ il vettore che descrive il punto di passaggio del cordino in una delle due basi fisse nel sistema di riferimento ad esse solidali, il vettore rappresentante il cordino i -esimo sarà espresso da:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{ix} & L_{iy} & L_{iz} \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_i - \mathbf{s} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_i \quad (2.5)$$

La lunghezza del tratto di cordino compreso tra attacco e passaggio sarà di conseguenza:

$$L_i = \sqrt{(\mathbf{R}_i - \mathbf{s} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_i)^2} \quad (2.6)$$

Cinematica diretta

La cinematica diretta consiste nell'individuazione della matrice $\mathbf{A}$, che rappresenta la posizione e l'orientamento della piattaforma mobile, a partire dalle lunghezze dei fili.

Sviluppando le relazioni (2.6) relative a tutti i nove cordini, si ottiene un sistema di nove equazioni nelle incognite $\mathbf{s}$ e $\mathbf{A}$, espresse da:

$$\begin{cases} \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_1 \cdot (\mathbf{s} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_1) + 2\mathbf{s} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_1) + \mathbf{R}_1^2 + \mathbf{r}_1^2 = L_1^2 \\ \quad \quad \quad \text{M} \\ \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_i \cdot (\mathbf{s} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_i) + 2\mathbf{s} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_i) + \mathbf{R}_i^2 + \mathbf{r}_i^2 = L_i^2 \\ \quad \quad \quad \text{M} \\ \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_9 \cdot (\mathbf{s} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_9) + 2\mathbf{s} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{r}_9) + \mathbf{R}_9^2 + \mathbf{r}_9^2 = L_9^2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Un possibile algoritmo di soluzione di questo sistema potrebbe consistere nell'usare solo le prime sei equazioni, quelle relative ai cordini disposti come gli attuatori di una piattaforma di Stewart, e ricorrere ad uno dei molti algoritmi presenti in letteratura per cercare le soluzioni di questo sistema ridotto. Alle soluzioni ottenute andrebbero poi imposte come vincoli le ultime tre equazioni, per selezionare solo le soluzioni accettabili.

In generale però in questo modo si ottengono troppe soluzioni da esaminare per poter applicare questo algoritmo al controllo in tempo reale.

L'algoritmo qui sviluppato invece si avvale della scelta progettuale di adottare tre cordini convergenti nell'origine del sistema di riferimento della base mobile, per separare la soluzione del sistema (2.7) in due parti relative rispettivamente al vettore $\mathbf{s}$ e alla matrice $\mathbf{A}$.

Nella prima parte è risolto il sottosistema delle ultime tre equazioni, relative ai cordini passanti per la base inferiore; essendo i vettori $\mathbf{r}_7, \mathbf{r}_8$ e $\mathbf{r}_9$ nulli, queste equazioni non conterranno la matrice $\mathbf{A}$, ma solo le tre componenti del vettore $\mathbf{s}$. Tale sistema sarà espresso da

$$\begin{cases} \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_7 \cdot \mathbf{s} + \mathbf{R}_7^2 = L_7^2 \\ \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_8 \cdot \mathbf{s} + \mathbf{R}_8^2 = L_8^2 \\ \mathbf{s}^2 - 2\mathbf{R}_9 \cdot \mathbf{s} + \mathbf{R}_9^2 = L_9^2 \end{cases} \quad (2.8)$$

In questo modo, esprimendo i vettori $\mathbf{R}_7$, $\mathbf{R}_8$ e $\mathbf{R}_9$ tramite i parametri r_A e h in accordo alla figura 2-5 e con semplici passaggi algebrici, sarà possibile ottenere direttamente le componenti del vettore $\mathbf{s}$, tramite le seguenti relazioni:

$$s_x = \frac{2L_7^2 - L_8^2 - L_9^2}{6r_A} \quad s_y = \frac{L_8^2 - L_9^2}{2\sqrt{3}r_A} \quad s_z = \frac{\sqrt{H}}{3r_A} - h \quad (2.9)$$

dopo aver introdotto l'espressione:

$$H = 3r_A^2 (L_7^2 + L_8^2 + L_9^2) + L_7^2 L_8^2 + L_8^2 L_9^2 + L_9^2 L_7^2 - L_7^4 - L_8^4 - L_9^4 - 9r_A^4$$

Nel trattamento del sistema per ottenere le soluzioni (2.9) sarà necessario risolvere il segno da attribuire alla radice che compare nell'espressione di s_z , ma sarà facile convincersi della scelta effettuata tenendo conto che, durante il funzionamento del dispositivo, l'operatore manterrà sempre la piattaforma mobile al di sopra della base fissa inferiore.

Nella seconda parte dell'algoritmo, si ritorna a considerare le equazioni appartenenti ai primi sei cordini, sostituendo al vettore $\mathbf{s}$ le espressioni appena ricavate per determinare gli elementi della matrice $\mathbf{A}$.

La scelta progettuale di disporre tutti i punti d'attacco dei cordini sullo stesso piano comporterà che tutti i vettori $\mathbf{r}_i$ abbiano la terza componente nulla nel sistema di riferimento mobile; si può dimostrare quindi che le equazioni del sistema da risolvere contengono solo gli elementi relativi alle prime due colonne della matrice $\mathbf{A}$, che compaiono al primo grado: quindi resterà da risolvere un sistema lineare di sei equazioni in sei incognite. Tale sistema è ridondante essendo in realtà la matrice $\mathbf{A}$ una matrice di rotazione, esprimibile con sole tre variabili indipendenti (e non essendo anche le lunghezze dei cordini completamente indipendenti); tuttavia l'introduzione di nuove variabili alternative (per esempio gli angoli di Eulero) porterebbe ad abbandonare la linearità della formulazione del problema che permette di individuare direttamente un'unica soluzione e riproporrebbe quindi la necessità di esaminare le eventuali

soluzioni ambigue.

Dato il numero delle incognite, per contenere il tempo di esecuzione dell'algoritmo, al posto dell'uso di un generico algoritmo per la soluzione di sistemi di equazioni lineari, si è proceduto alla ricerca di una soluzione in forma chiusa, sfruttando le proprietà di simmetria delle posizioni dei punti di attacco e di passaggio dei cordini. La soluzione, sebbene richieda molti passaggi per essere dimostrata, si può riassumere in poche semplici espressioni.

In particolare l'algoritmo valuta prima le seguenti espressioni dalle lunghezze dei cordini

$$\begin{aligned}
 E_1 &= (L_1^2 + L_6^2) + (L_2^2 + L_5^2) + (L_3^2 + L_4^2) \\
 E_2 &= (L_1^2 - L_6^2) - (L_2^2 - L_5^2) + (L_3^2 - L_4^2) \\
 E_3 &= (L_1^2 + L_6^2) - (L_3^2 + L_4^2) \\
 E_4 &= (L_1^2 - L_6^2) - (L_3^2 - L_4^2) \\
 E_5 &= (L_1^2 + L_6^2) - (L_2^2 + L_5^2) \\
 E_6 &= (L_1^2 - L_6^2) + (L_2^2 - L_5^2)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

e quindi le quantità

$$\begin{aligned}
 B_1 &= K_2 \left[6(s^2 + K_1) - E_1 \right] & B_2 &= K_3 E_2 \\
 C_1 &= -K_4 s_x - K_5 E_3 + K_7 E_5 & C_2 &= -K_4 s_y - K_6 E_4 + K_8 E_6,
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

funzioni delle precedenti espressioni, del vettore $\mathbf{s}$ e di un insieme di parametri K_i (che restano costanti durante il moto della base mobile) determinati dai parametri geometrici che descrivono la forma del dispositivo e che pertanto non devono essere ricalcolati istante per istante:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= r_P^2 + r_B^2 \\
 K_2 &= \left[6r_B r_P \cos\left(\frac{\pi}{3} - \alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
 K_3 &= \left[6r_B r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_4 &= 2 \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha_P - \alpha_B\right) \left[r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_5 &= \sin \alpha_P \left[3r_B r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_6 &= \cos \alpha_P \left[3r_B r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_7 &= \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_P\right) \left[3r_B r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_8 &= \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_P\right) \left[3r_B r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_9 &= r_B \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_B - \alpha_P\right) \left[r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_{10} &= \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_P - \alpha_B\right) \left[6r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_{11} &= \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_P - \alpha_B\right) \left[6r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_{12} &= \sin(\alpha_P - \alpha_B) \left[6r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1} \\
 K_{13} &= \cos(\alpha_P - \alpha_B) \left[6r_P \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha_P - \alpha_B\right) \right]^{-1}.
 \end{aligned}$$

I parametri K_i dipendono unicamente dal raggio della base superiore, r_B , da quello della base inferiore r_P , e dagli angoli α_B e α_P , che sono identificabili in figura 2-8.

Gli elementi della matrice $\mathbf{A}$ sono infine calcolati tramite le relazioni:

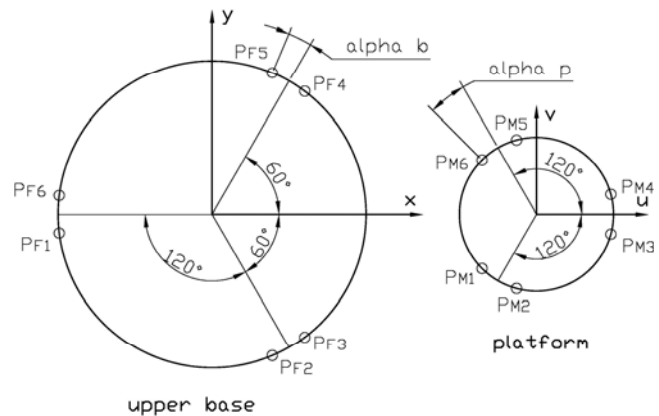


Figura 2-8 WiRo-6.3: Disposizione geometrica degli attacchi e dei rinvii sulla piattaforma e sulla base fissa.

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \frac{B_1 - C_1}{2}; & A_{12} &= \frac{C_2 - B_2}{2}; & A_{13} &= A_{21}A_{32} - A_{31}A_{22} \\
 A_{21} &= \frac{B_2 + C_2}{2}; & A_{22} &= \frac{B_1 + C_1}{2}; & A_{23} &= A_{31}A_{12} - A_{11}A_{32} \\
 A_{31} &= \frac{[K_9 - A_{11}]s_x - A_{21}s_y - K_{10}E_3 + K_{12}E_5}{s_z}; & A_{32} &= \frac{[K_9 - A_{22}]s_y - A_{12}s_x + K_{11}E_4 - K_{13}E_6}{s_z}; & A_{33} &= A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Anche per questa seconda parte, le soluzioni ottenute sono sempre definite, perché l'operatore manterrà la base mobile sempre all'interno dello spazio di lavoro del dispositivo (e quindi al di sotto della base fissa inferiore) con s_z strettamente negativo e mai nullo.

A titolo dimostrativo l'algoritmo è stato provato sulle schede Janz VMOD 60 (dotate di processore Motorola 68060) con sistema operativo in tempo reale VxWorks 5.3.1, registrando tempi di esecuzione dell'ordine di 40 microsecondi.

2.d. Statica

Le equazioni della statica pongono in relazione le tensioni nei cordini con il vettore di forza generalizzata sulla piattaforma mobile, secondo la relazione (2.2) e con le notazioni del paragrafo 2.b.:

$$\underline{T} = \underline{\mathcal{Y}} \underline{\tau} \tag{2.2), (2.14)}$$

Tale relazione va interpretata come segue: stabilito un vettore $\underline{T} \in R^6$ che si desidera ottenere sulla piattaforma mobile, come riflessione di forza sulla mano dell'operatore, è necessario individuare un vettore $\underline{\tau} \in R^9$ contenente le nove tensioni dei cordini che soddisfi l'equazione (2.14). Data la ridondanza della struttura, se $\underline{\mathcal{Y}} \in R^{6 \times 9}$ ha rango pieno pari a 6, l'insieme dei vettori $\underline{\tau}$ che soddisfano la (2.14) è un'iper-superficie a tre dimensioni in uno spazio a nove dimensioni, ossia le soluzioni possibili sono dell'ordine di ∞^3 . Tra tutte le soluzioni possibili, si può scegliere quella che si ritiene ottimale secondo una serie di ragionamenti che sono esposti nel seguito.

Stabilito un valore minimo ammissibile per la tensione di ciascuno dei cordini, τ_{amm} , si vorrà che ogni elemento di $\underline{\tau}$ sia maggiore o uguale di tale valore, e nel contempo si vorranno mantenere più basse possibile le tensioni nei cordini, fermo restando che la (2.14) dovrà essere comunque verificata.

Pertanto si potrà scrivere il seguente obiettivo:

$$\text{minimizzare } f_{ob} = \sum_{i=1}^9 \tau_i \quad (2.15)$$

sotto le condizioni :

$$\begin{cases} \mathcal{Y}\underline{\tau} = \underline{T} \\ \tau_i \geq \tau_{amm} \quad i = 1 \dots 9 \end{cases} \quad (2.16)$$

Tale obiettivo è un problema di Programmazione Lineare, che può essere risolto ad esempio utilizzando il metodo del simplesso.

Non entreremo qui nel merito delle procedure del metodo del simplesso, che portano ad ottimizzare la funzione obiettivo f_{ob} , definita secondo la (2.15), in quanto esistono numerose librerie di Matlab, C e altri linguaggi di programmazione che portano alla soluzione desiderata secondo algoritmi ottimizzati. Per un riferimento descrittivo delle procedure del metodo del simplesso per la risoluzione di problemi di Programmazione Lineare, si veda ad esempio [60].

La soluzione del problema (2.15) e (2.16) porta ad una $\underline{\tau}$ ottimizzata ed internamente connessa, ossia si può dimostrare che se $\underline{T}$ e $\mathcal{Y}$ variano con continuità nel tempo, allora anche la soluzione $\underline{\tau}$ ottenuta istante per istante presenta un andamento continuo nel tempo.

3. Componenti funzionali

3.a. Sensorizzazione

Ogni cordino, che rappresenta un attuatore della struttura, passa per un punto fisso sulla base come specificato nel capitolo 2, dopodichè deve essere rinvio mediante pulegge ad un rocchetto solidale ad un motore elettrico, sul quale il cordino si avvolge o si svolge a seconda del senso del moto.

Allo scopo di semplificare la struttura si è deciso di controllare la forza generalizzata sulla piattaforma mobile secondo uno schema in catena aperta. Nel dettaglio, si sfrutta la bassa impedenza meccanica della singola catena cinematica – non si prevede infatti l'uso di riduttore, e come già detto si pensa di utilizzare un singolo cordino per ogni giunto del robot – e pertanto si effettua il controllo della tensione di ciascun cordino agendo sulla coppia di ogni motore, senza sensorizzare direttamente la tensione dei cordini in corrispondenza della piattaforma, né misurare direttamente la forza percepita dall'operatore. Tutto il calcolo relativo alla riflessione di forza viene effettuato secondo le equazioni della statica del paragrafo 2.d.

Tale schema di controllo, come si è detto, in catena aperta, permette di semplificare al massimo la sensorizzazione della struttura, utilizzando unicamente informazioni dirette ed indirette derivanti dai motori e dagli encoder ottici ad essi solidali.

Infatti, le informazioni necessarie al controllo sono la posizione e l'orientamento della piattaforma mobile (e le relative velocità), che vengono ricavate analiticamente secondo

le equazioni cinematiche viste nel paragrafo 2.c. a partire dalle informazioni di allungamento ed accorciamento dei singoli cordini ricavate mediante gli encoder.

Viceversa, la forza generalizzata, come detto, viene realizzata facendo sì che ogni motore imponga una coppia appropriata, generando così una tensione opportuna nei cordini.

3.b. I cordini

Sono state effettuate svariate prove di laboratorio su cordini di diversi materiali allo scopo di valutarne le caratteristiche meccaniche e l'applicabilità al progetto. In particolare sono stati effettuati test su cordini in acciaio a fili intrecciati, e su cordini in fibre sintetiche, mediante una macchina di trazione, schematizzata in figura 3-1. Essa è composta da una base inferiore fissa e da una traversa mobile; fissati i capi di un cordino campione tra tali estremi, la macchina pone la traversa in movimento a velocità costante, registrando contemporaneamente, mediante una cella di carico, la forza ai capi del cordino. In questo modo si possono ottenere le curve allungamento-tensione dei cordini.

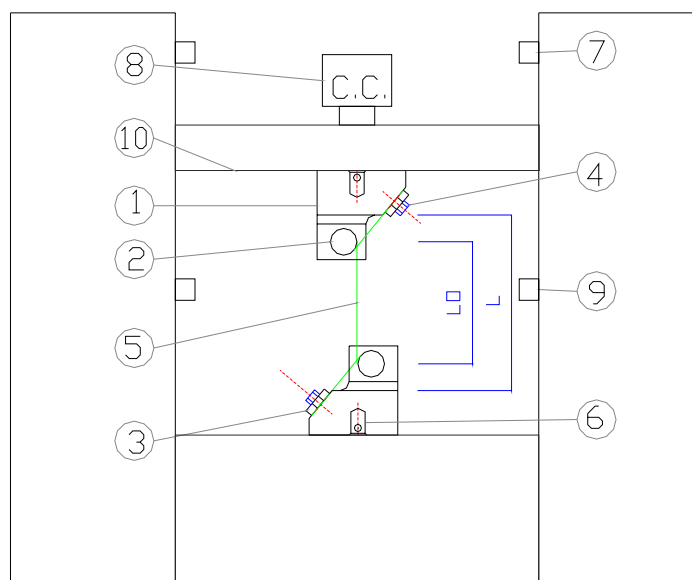


Figura 3-1 Rappresentazione schematica della macchina di trazione

Per fissare i capi dei cordini alla macchina di prova evitando sovratensioni dovute al pizzicamento, sono stati progettati due attrezzaggi, rappresentati in figura 3-2, dotati di tamburi filettati.

La presenza degli attrezzaggi ha consentito lo scaricamento progressivo delle tensioni di trazione mediante attrito sul tamburo, in modo che il fissaggio meccanico del cordino non creasse punte di tensione che avrebbero influenzato l'esito della prova.

In figura 3-1 sono indicati alcuni componenti fondamentali della macchina di prova di trazione:

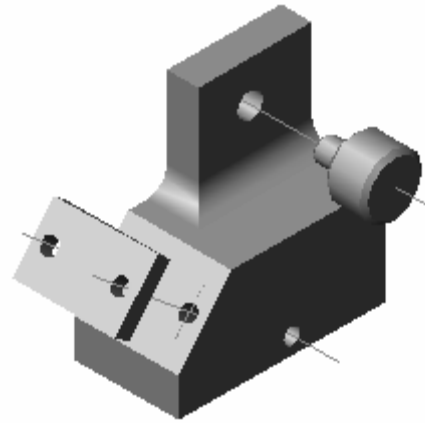


Figura 3-2 Attrezzaggio di aggancio del cordino

- 1 = Attrezzaggi (v. figura 3-2)
- 2 = Tamburo di avvolgimento del cordino
- 3 = Piastrina bloccaggio cordino
- 4 = Vite per serrare la piastrina 3
- 5 = Cordino in prova
- 6 = Sede spine di collegamento attrezzaggi-macchina
- 7 = Finecorsa meccanici superiori
- 8 = Cella di carico (range di misura : 0 ÷ 5000 N)
- 9 = Finecorsa inferiori
- 10 = Traversa mobile

Come detto, sono state provate due distinte tipologie di cordini, di materiale metallico (acciaio) e di materiale plastico (dyneema™).

I cordini metallici sono stati acquistati dalla ditta belga Bekaert e sono di tre tipologie diverse:

- Cordino 7*3*0.15
- Cordino 7*3*0.10
- Cordino 3*3*0.15

La sigla 7*3*0.15, ad esempio, indica che il cordino è costituito da 7 trecce formate ciascuna da tre fili metallici di diametro 0.15mm.

I risultati delle prove di trazione dei cordini metallici sono riportati nelle figure 3-3, 3-4 e 3-5.

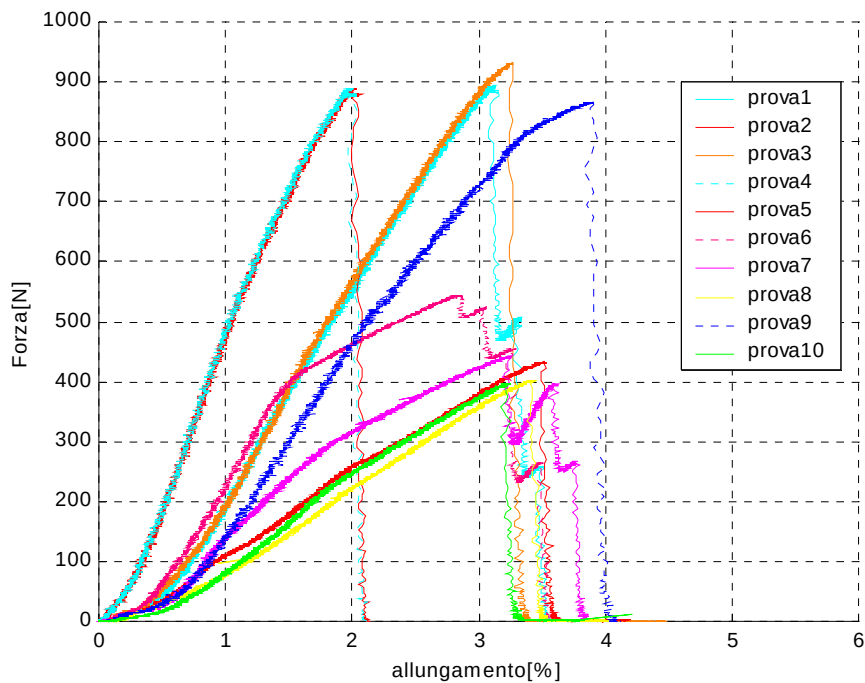


Figura 3-3 Caratteristica di trazione cordino metallico 7*3*0.15

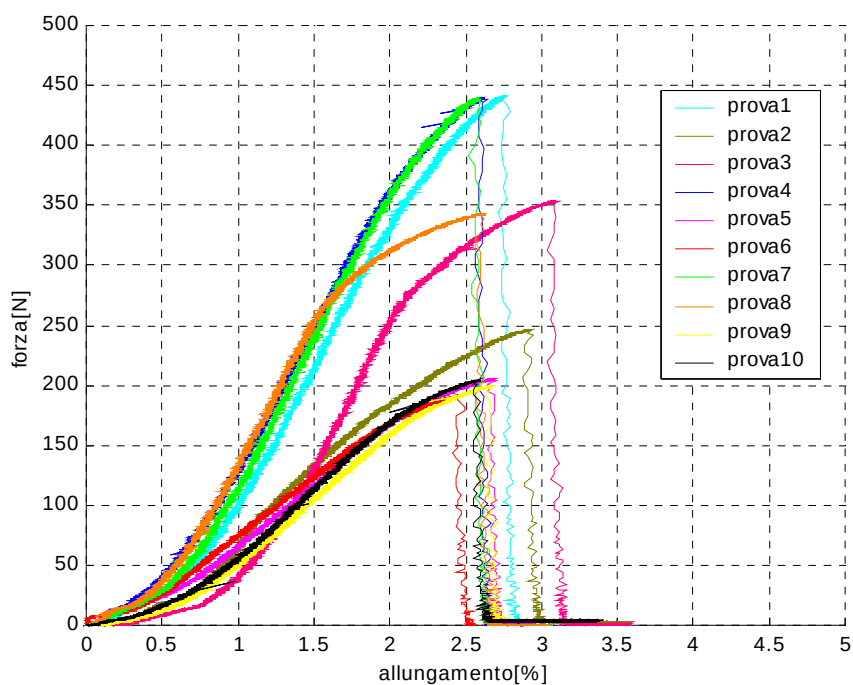


Figura 3-4 Caratteristica di trazione cordino metallico 7*3*0.10

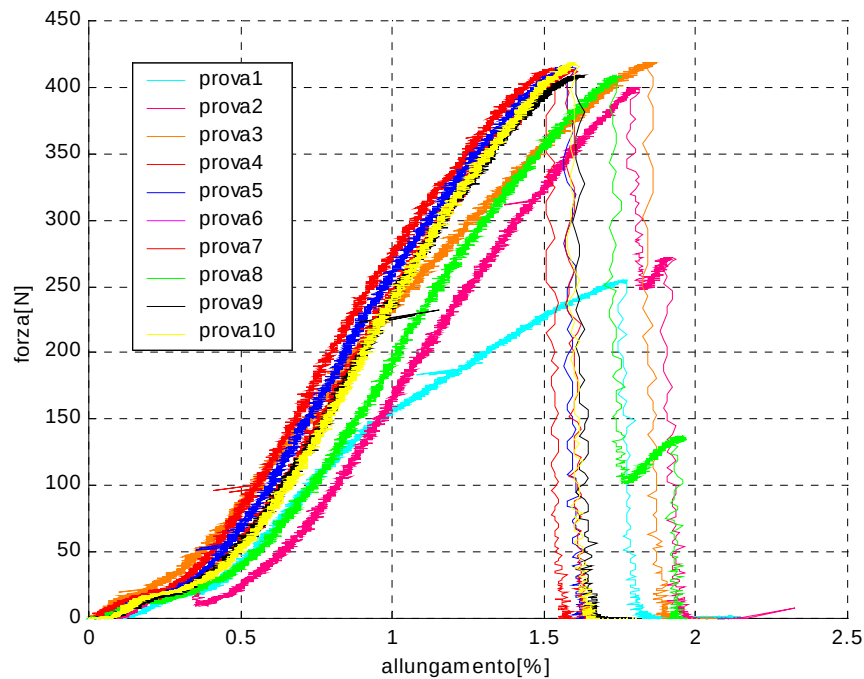


Figura 3-5 *Caratteristica di trazione cordino metallico 3*3*0.15*

Osservando i grafici si rilevano:

- la pessima ripetibilità delle prove;
- carichi di rottura inferiori a quelli dichiarati dalla ditta costruttrice per circa il 50% delle prove effettuate.

Sono state pertanto ricercate soluzioni alternative rappresentate da cordini in materiale sintetico.

In particolare, sono state studiate le caratteristiche del Dyneema. Esso è una fibra sintetica a base di polietilene dotata di modulo di elasticità e di carico di resistenza a rottura estremamente elevati, ottenuti grazie ad una tecnologia di filatura avanzata, chiamata “Gel Spinning Technology method” (figura 3-6).

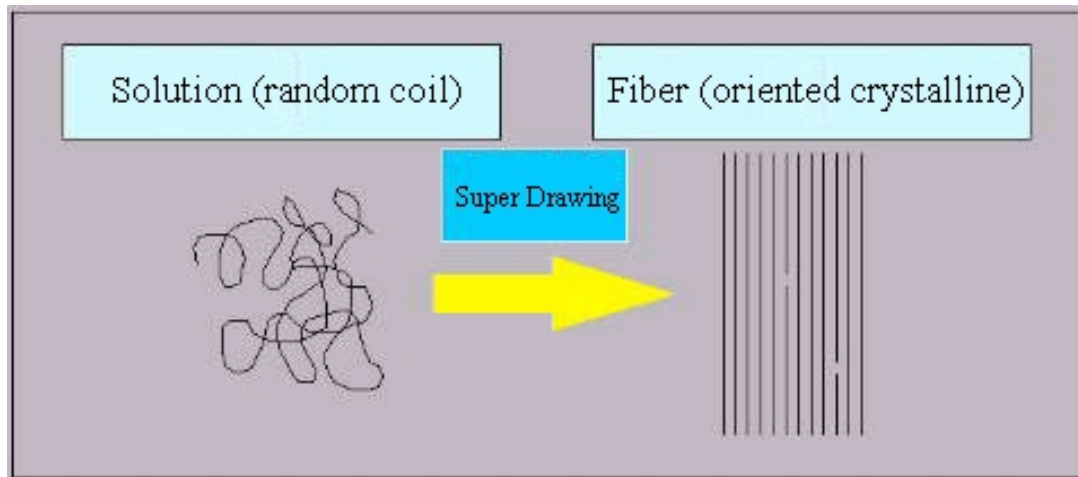


Figura 3-6 Schematizzazione della disposizione delle molecole nel Dyneema

Per realizzare la suddetta fibra si utilizza come materiale di base del polietilene dotato di un elevato peso molecolare in modo da favorire una disposizione parallela delle molecole.

Successivamente nel “gel spinning process” le molecole vengono disciolte in un solvente e vengono filate attraverso dei piccoli orifizi.

Poi, la soluzione filata viene lasciata raffreddare sino a quando si solidifica, ottenendo una struttura cristallina nella quale le molecole di polietilene presentano orientamento parallelo tra loro per circa il 99%; in questo modo il materiale presenta caratteristiche meccaniche superiori nella direzione longitudinale.

I cordini di dyneema sono trecce composte da fili singoli ottenuti secondo il suddetto procedimento.

I risultati delle prove di trazione di un cordino Dyneema140 sono riportati in figura 3-7.

Tale cordino ha un diametro di circa 0.6mm; la sigla “140” rappresenta il carico di rottura nominale in daN.

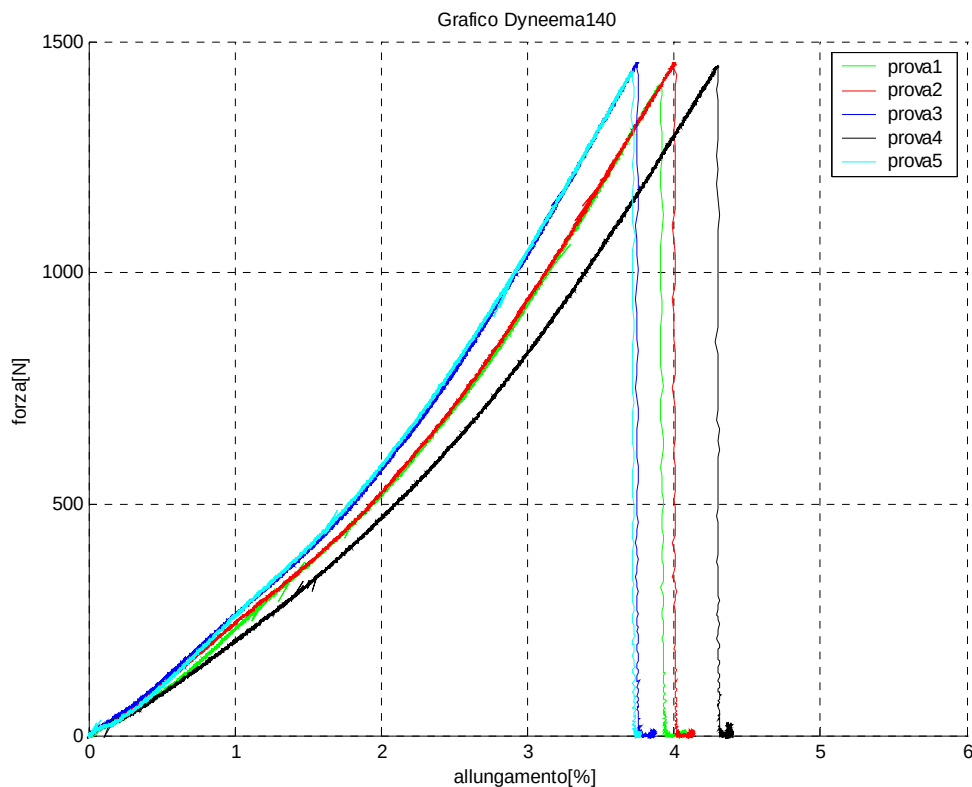


Figura 3-7 Caratteristica di trazione cordino Dyneema140

Osservando la figura 3-7 si può affermare che:

- le prove con cordini in dyneema mostrano un'ottima ripetibilità;
- la fibra presenta carico di rottura pressoché costante (1400N) e pari a quanto dichiarato dal costruttore;
- il cordino in dyneema ha un basso allungamento percentuale a rottura (3.75%).

In conclusione, si può affermare che il cordino Dyneema140 presenta caratteristiche meccaniche paragonabili a quelle dei cordini d'acciaio, a parità di diametro della treccia; pur presentando un allungamento superiore, esso non è sensibilmente differente da quello dei cordini metallici. Inoltre esso ha mostrato maggiore affidabilità e ripetibilità nelle prove. Considerando, infine, che il dyneema può essere curvato ed annodato come una normale fibra tessile, diviene anche di più semplice utilizzo rispetto ai cordini metallici che invece non possono essere curvati al di sotto di un raggio minimo di 15mm circa e non possono essere fissati con semplici nodi. Pertanto, per il prosieguo del progetto, si è deciso di adottare i cordini sintetici in dyneema.

3. Componenti funzionali

Grazie ai dati raccolti nella campagna di prove, è stato possibile definire una relazione analitica approssimante il rapporto tra la tensione applicata e l'allungamento del cordino. Si riporta di seguito un grafico contenente in azzurro la “nuvola” di punti corrispondenti a tutte le prove di trazione effettuate sui cordini. L'andamento della tensione dei cordini in funzione dell'allungamento percentuale, può essere interpolato da una funzione di secondo grado rappresentata in figura 3-8.

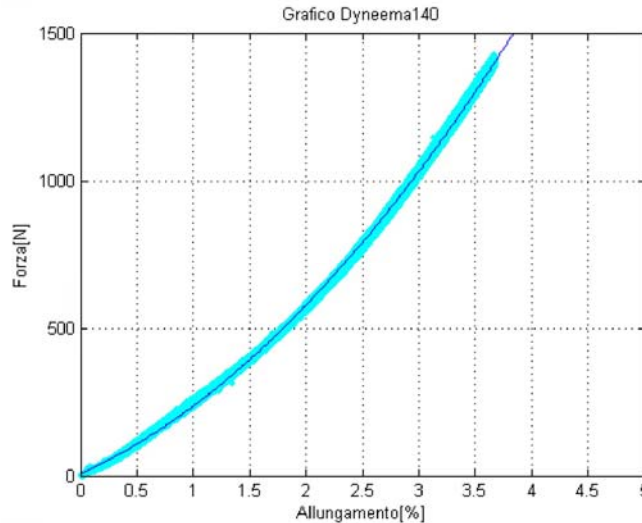


Figura 3-8 Funzione interpolante della caratteristica di trazione Dyneema140

La funzione interpolante è:

$$F = 56.3626 \cdot a^2 + 172.7795 \cdot a + 7.3516 \quad (3.1)$$

dove F è la tensione del filo ed a l'allungamento percentuale.

Ne consegue che:

$$a = -1.5328 + \sqrt{2.2189 + 0.0177 \cdot F} \quad (3.2)$$

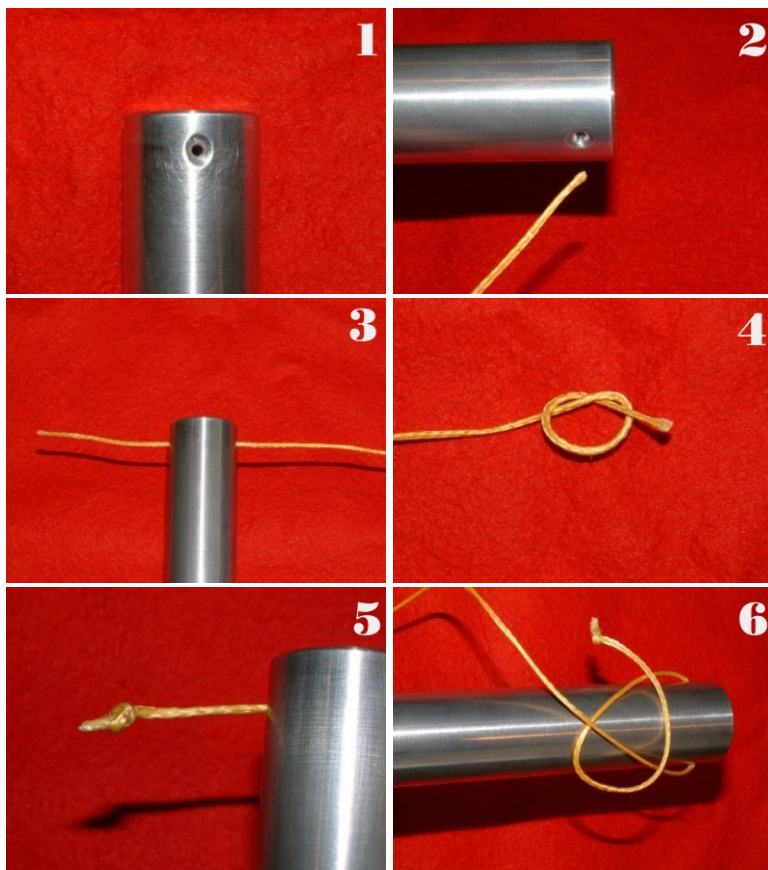
Sfruttando le caratteristiche di flessibilità del dyneema, si è pensato di non utilizzare un complesso sistema meccanico di ancoraggio del filo sul tamburo di avvolgimento, bensì un semplice nodo.

Si riporta di seguito la procedura di fissaggio del filo al tamburo di avvolgimento calettato sul motore.

Per agevolare la comprensione della procedura di fissaggio si riporta una breve spiegazione dei termini utilizzati:

- *corrente*: l'estremità del filo libera che durante l'esecuzione di un nodo viene movimentata.
- *dormiente*: l'estremità del filo che durante l'esecuzione di un nodo viene tenuta ferma o il tratto di filo non libero.
- *collo*: giro completo del filo.
- *serrare*: stringere un nodo o una legatura.
- *occhio*: la parte interna di un collo.

Le figure seguenti chiariranno la procedura di fissaggio dei cordini.



1 Sull'estremità libera del tamburo di avvolgimento è stato praticato un foro radiale passante, avente diametro di 1.5mm, raccordato con la superficie esterna del tamburo mediante un raggio di raccordo di 5mm eseguito con un utensile di forma appositamente realizzato.

2,3 Il corrente deve essere inserito all'interno del foro radiale praticato nel tamburo di avvolgimento.

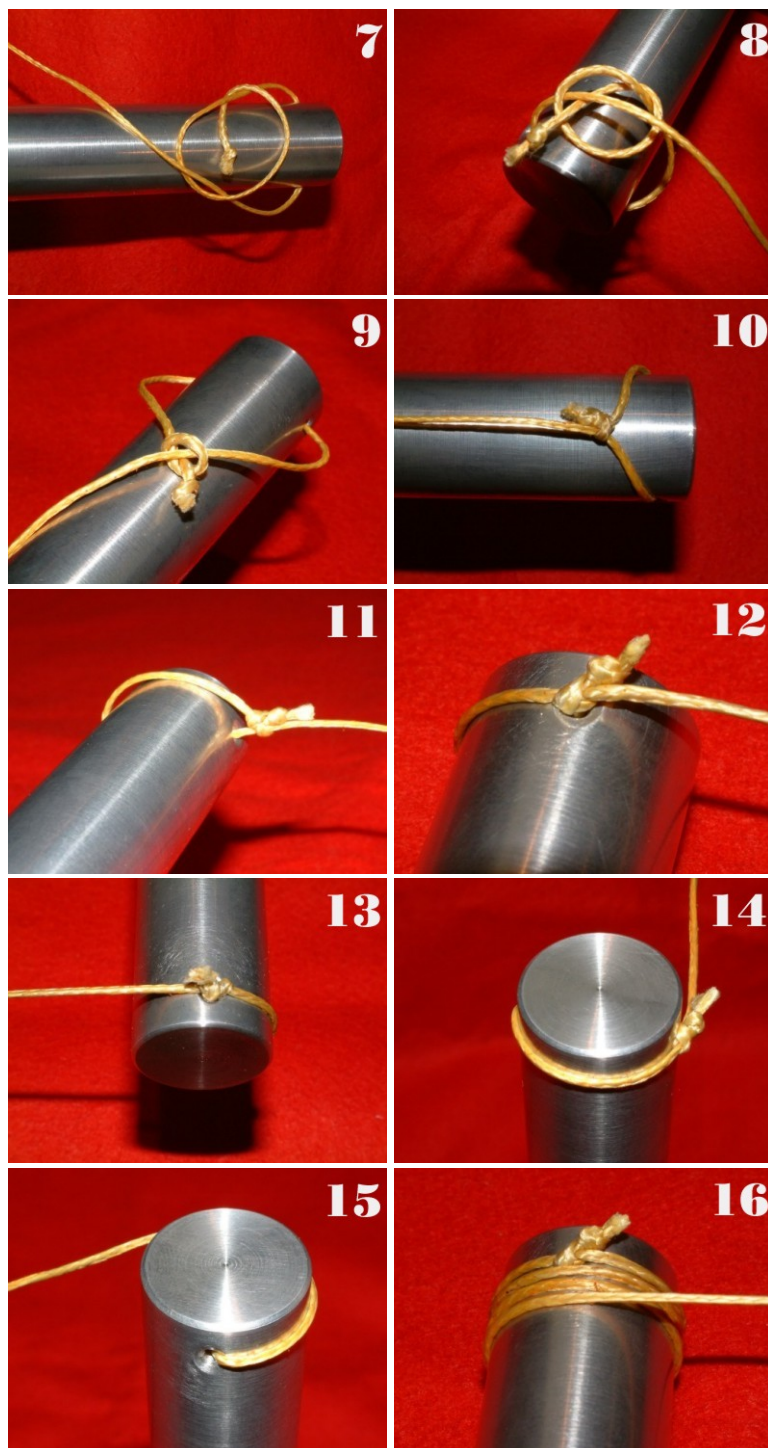


Figura 3-9 *Fissaggio del cordino su tamburo*

4,5 Si pratica un nodo semplice sull'estremità del filo per evitare che questo si sfilacci. Si pratica un collo, si infila il corrente nell'occhio e si serra; è conveniente che lo spezzone di filo, dal lato dell'estremo libero, oltre il nodo, sia il più corto possibile.

6,7,8,9 Si pratica un collo attorno al dormiente, si infila il corrente nell'occhio e si serra. Si genera in questo modo un nodo scorsoio semplice.

10,11,12,13 In fase di serraggio del filo si deve fare in modo che il nodo scorsoio venga a posizionarsi nel raccordo praticato sul foro radiale.

14,15,16 Si dovrà procedere ora all'avvolgimento del filo sul tamburo. In particolare saranno

necessarie alcune spire di avvolgimento del filo sul tamburo per garantire che la tensione generata nel filo sia scaricata per attrito tra filo e tamburo e non solamente sul nodo di fissaggio.

3.c. Metodologia di rinvio dei cordini

Ogni cordino dovrà essere necessariamente rinvio al relativo tamburo di avvolgimento mediante un sistema che permetta di identificare univocamente il punto fisso di passaggio sulla base, che è necessario per la soluzione delle equazioni cinematiche e statiche. I sistemi di rinvio, inoltre, devono permettere al filo di assumere, nella congiungente che va dal punto fisso al relativo punto mobile, diverse orientazioni rispetto al sistema di riferimento fisso, corrispondenti alle diverse posizioni che la maniglia, mossa dall'operatore, può occupare all'interno dello spazio di lavoro.

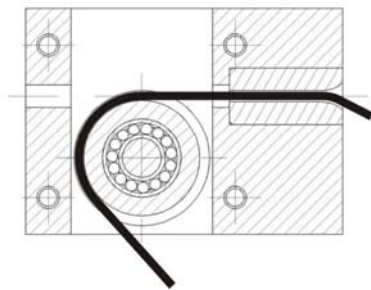


Figura 3-10 Schema del rinvio

Un altro requisito fondamentale è un basso attrito, che si traduce in limitata perdita di tensione del filo tra il tratto di filo che è collegato al tamburo di avvolgimento filo (lato motore) e il tratto di filo che va da punto fisso a punto mobile.

Lo schema di funzionamento del sistema di rinvio, visto in una sezione dello stesso, è rappresentato in figura 3-10.

Il sistema di rinvio progettato e realizzato è rappresentato “esploso” in figura 3-11.

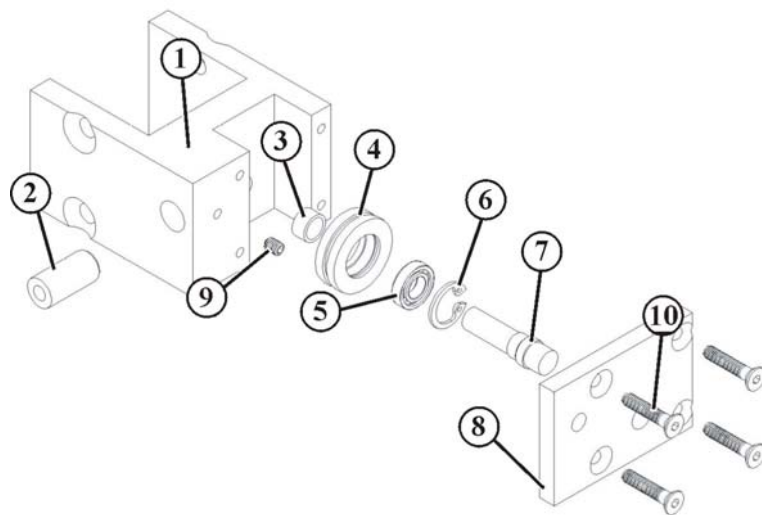


Figura 3-11 Il sistema di rinvio del cordino

1. Corpo del sistema di rinvio
2. Inserto
3. Distanziale per anello interno cuscinetto
4. Puleggia
5. Cuscinetto SKF 618/7
6. Anello elastico per foro puleggia
7. Perno per cuscinetto
8. Piastrina per bloccaggio cuscinetto
9. Grano filettato per bloccaggio inserto
10. Viti a brugola per fissaggio piastrina

Il corpo del sistema di rinvio presenta sulla parte posteriore la sede per l'accoppiamento meccanico con la struttura; tale elemento sarà diverso a seconda del punto di fissaggio del rinvio stesso.



Figura 3-12 *Inserto e punto fisso*

L'inserto, visibile anche in figura 3-12, è uno dei componenti fondamentali del sistema di rinvio. La sua funzione è quella di guidare il filo nel tratto che va dall'uscita dalla puleggia (dal lato della puleggia opposto al motore) fino al punto mobile sulla maniglia. L'inserto ha forma

cilindrica e presenta un foro assiale all'interno del quale scorre il filo. Poiché si ha contatto tra il filo e l'inserto, si ha la necessità che quest'ultimo presenti coefficiente di attrito minimo. Per questa ragione è stata effettuata una ricerca al fine di trovare un materiale che potesse avere, tra le sue caratteristiche, un basso coefficiente di attrito e una bassa usura. I materiali che sono risultati adatti per l'impiego che se ne deve fare all'interno del sistema di rinvio sono: il Murflor Material "S" Antistatic e il Teflon.

La scelta del materiale più adatto è avvenuta considerando i risultati ottenuti in seguito all'esecuzione di prove effettuate sui due materiali. Le prove condotte hanno portato alla definizione di un coefficiente di attrito medio tra filo in dyneema e materiale testato. È stata condotta una seconda prova per valutare l'usura per strisciamento dell'inserto e del filo in dyneema. Le due prove sono state condotte per entrambi i

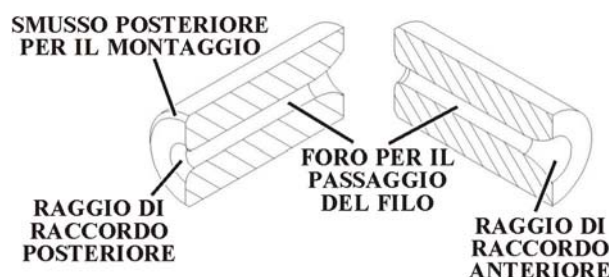


Figura 3-13 *Sezione dell'inserto*

materiali. I risultati ottenuti hanno evidenziato un coefficiente di attrito paragonabile tra i due materiali; tuttavia è risultato che il Murflor è molto maggiormente soggetto ad usura, pertanto è stato scelto il Teflon come materiale più adatto per la realizzazione dell'inserto.

In fase di lavorazione (figura 3-13), sull'estremità libera del foro praticato sull'asse dell'inserto (lato anteriore dell'inserto), si esegue un raggio di raccordo. Tale raggio consente al filo di appoggiarsi quando questo presenta direzione diversa da quella dell'asse del foro in seguito ad un posizionamento della maniglia nella zona di lavoro. Si evita così, con la presenza del raggio di raccordo, che il filo si possa intagliare nello strisciare contro il bordo del foro dell'inserto, cosa che avverrebbe in assenza del raccordo. Si esegue anche un raggio di raccordo sullo spigolo posteriore del foro, di

raggio più piccolo, per la stessa ragione. Si osserva infine uno smusso sullo spigolo esterno dell'inserto dal lato posteriore che facilita introduzione dell'inserto nella sede sul corpo del sistema di rinvio.

Si è verificata l'entità dell'errore che si commette nell'ipotizzare l'andamento del filo come una linea spezzata che coincide con l'asse del foro fino al punto fisso e poi coincide con il segmento congiungente punto fisso e punto mobile, piuttosto che considerare l'andamento reale del filo che si appoggia al raggio di raccordo. Si è calcolato che l'errore commesso nel calcolo della lunghezza del singolo cordino, quando esso si inclina dell'angolo massimo ammesso nel master (18°), è pari a circa 0.05%, che è considerato accettabile.

Per rinviare il filo dall'inserto verso il motore si utilizza una puleggia, appositamente realizzata, presentante sul diametro esterno, sul piano mediano rispetto allo spessore, una gola a fondo raggato contro cui il filo si appoggia nel momento in cui viene pretensionato. La profondità della gola è tale per cui il filo, in uscita dall'inserto, risulti tangente alla puleggia. La puleggia viene montata su un cuscinetto radiale a sfere il cui anello esterno viene bloccato assialmente all'interno del foro nella puleggia mediante uno spallamento praticato sulla puleggia stessa e mediante un anello elastico. Il cuscinetto è supportato da un perno opportunamente sagomato affinché fornisca una battuta per l'anello interno del cuscinetto, ma vi sia gioco tra il perno e l'anello elastico. Per fare questo la battuta contro cui si appoggia l'anello interno del cuscinetto presenta un doppio diametro: il più piccolo funge da spallamento per il cuscinetto e lascia libero l'anello elastico, il diametro più grande ha la funzione di fornire uno spallamento alla piastrina per il bloccaggio.

L'anello interno del cuscinetto è bloccato assialmente utilizzando la piastrina di bloccaggio che, mediante quattro viti di fissaggio, viene premuta contro il risalto praticato sul perno, il quale spinge cuscinetto e distanziale contro il corpo del supporto. Si utilizza un distanziale montato sul perno di fissaggio dopo il cuscinetto per consentire il corretto allineamento del piano mediano della cava della puleggia rispetto all'asse del foro dell'inserto e per permettere il bloccaggio assiale del cuscinetto, come detto in precedenza.

3.d. Motori e azionamenti

I motori scelti sono servomotori brushless prodotti dalla ditta Wittenstein identificati dal codice MSSI-070H-020R-320S-06S0 (figura 3-14).

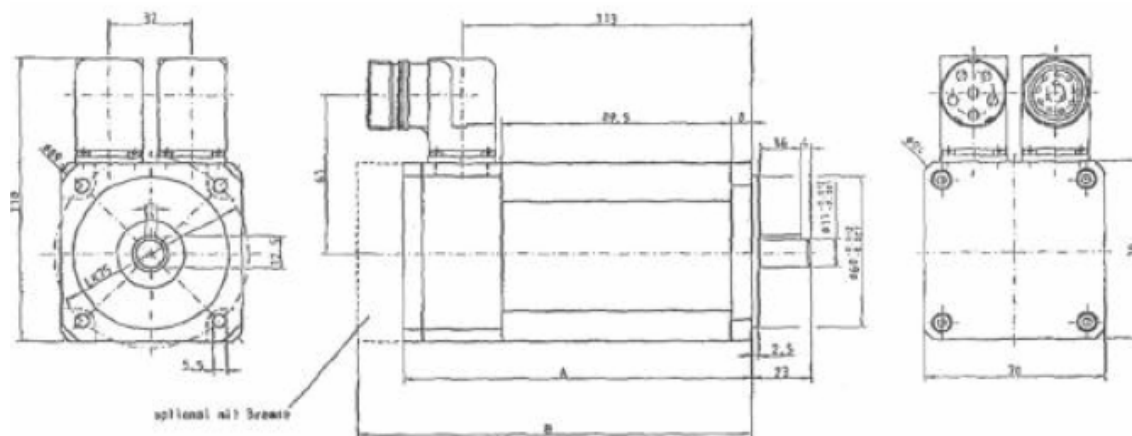


Figura 3-14 Disegno del motore Wittenstein MSSI-070H-020R-320S-06S0

In tabella 3.1 si riportano i dati principali relativi ai motori utilizzati.

Grandezza	Parametro	Unità	Valore
Tensione ai morsetti	U_{k1}	V	320
Costante di coppia	K_t	Nm/A	0.53 (picco)
Temperatura ambiente	$\dot{e}_u$	$^{\circ}\text{C}$	40
Massima temperatura sull'avvolgimento	$\dot{e}_{\max}$	$^{\circ}\text{C}$	140
Resistenza termica	R_{th}	K/W	1.38
Massima coppia	$M_{\max}$	Nm	3.8
Massima corrente	$I_{\max}$	A_{eff}	8.0
Coppia continua allo stallo	M_0	Nm	1.1
Corrente continua allo stallo	I_0	A_{eff}	1.7
Velocità a vuoto	n_0	min^{-1}	5800
Velocità nominale	n_n	min^{-1}	4875
Coppia nominale	M_n	Ncm	93.9
Corrente nominale	I_n	A_{eff}	1.5
Resistenza	R_{tt}	$\dot{U}$	$11.3 \pm 7\%$
Induttanza	L_{tt}	mH	$12.2 \pm 20\%$
Costante di tempo elettrica	τ_e	ms	$1.1 \pm 27\%$

Tabella 3.1 Dati motore Wittenstein MSSI-070H-020R-320S-06S0

Gli azionamenti che verranno utilizzati sono di marca S.B.C. Elettronica S.p.A., identificati dal codice sLVD2 [7] (*Small Low Voltage Drive*).

Le caratteristiche dell'azionamento sLVD2 sono riportate in tabella 3.2:

Specifica	U.M.	Valore
Tensione di alimentazione potenza	V~	230 ± 10%
Tensione di alimentazione controllo	V=	24 ± 10% - 1 A
Modello	sLVD1	
Corrente di uscita nominale	A	2,5
Corrente di uscita di picco (4s)	A	5
Potenza resa all'albero	kW	0,7
Dissipazione elettronica di controllo	W	18
Dissipazione stadio di potenza	W	28
Temperatura ambiente	°C	45
Dissipazione resistenza di frenatura interna	W	60
Retroazione	resolver (speed 1)	
Frequenza di switching stadio di potenza	kHz	8
Frequenza fondamentale in uscita massima	Hz	450
Grado di protezione	IP20	
Ingressi digitali 24V=	n°	2+2
Uscite digitali 24V= / 100mA / PNP	n°	2
Simulazione encoder RS-422	steps/rev	4...2500
Ingresso frequenza / segno o encoder	kHz	800 / 200
Riferimento analogico	V	±10 differenziale
Ingresso analogico ausiliario	V	±10 differenziale
Uscita analogica ausiliaria	V	± 4,5
Linea seriale	RS-422 / RS-485	
Bus di campo	CanBus ISO/DIS11898	

Tabella 3.2 – Specifiche del convertitore sLVD2

Le funzioni realizzabili con questo tipo di convertitore sono:

- controllo di velocità.
- posizionamento con profilo di velocità trapezoidale.
- funzione di camma elettronica.
- simulazione motore passo-passo.
- funzioni di albero elettrico con rapporto variabile e correzione di fase.
- controllo in coppia con sovrapposizione del controllo in velocità.

Tra le funzioni implementate nell'azionamento sLVD2, quella utilizzata per il controllo dei motori è il controllo di coppia sovrapposto al controllo in velocità. Poiché il convertitore lavora secondo una logica PWM (*Pulse Width Modulation*), a causa delle veloci variazioni di tensione è possibile che correnti non volute di considerevole entità

possano circolare attraverso accoppiamenti capacitivi e sistemi di terra. La presenza di queste correnti è causa di energia non voluta che viene radiata nello spazio circostante e può provocare interferenze con altri sistemi presenti.

Le contromisure da adottare per contrastare questi effetti sono il disaccoppiamento tra convertitore di frequenza ed il suo ambiente mediante un efficace sistema di messa a terra e l'utilizzo di schermature. L'alta frequenza interferisce sotto forma di radiazione nello spazio circostante in larga misura attraverso il cavo motore che per questo dovrà essere schermato.

4. Banco prova ad un grado di libertà

4.a. Presentazione

Allo scopo di verificare il funzionamento dei servomotori e degli azionamenti, di studiare le modalità di funzionamento del controllo in coppia di tale motore e di creare un modello semplificato di “realtà virtuale” con la quale interagire, si è realizzato un banco prova ad un singolo grado di libertà.

Il banco, rappresentato in figura 4-1, è composto da una maniglia mobile, montata su una guida lineare a ricircolo di sfere Hiwin, vincolata da un lato ad una molla e dall'altro ad un filo in dyneema¹⁴⁰ (paragrafo 3.b.), avvolto e fissato su un tamburo calettato sull'albero del motore. Si può inoltre notare la presenza di due fine-corsa che limitano la corsa del carrello della guida lineare e di un elemento che permette il fissaggio della molla al banco.

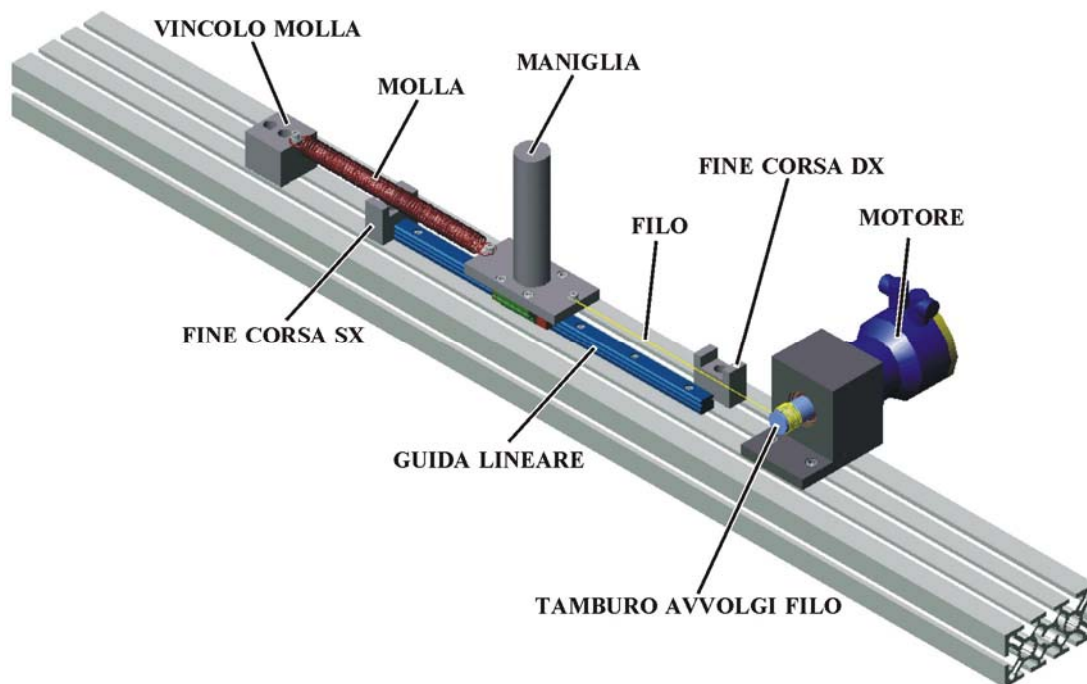


Figura 4-1 Schema del banco prova

Per poter verificare la bontà del funzionamento del motore e dell'azionamento, si è creata una legge di controllo del motore in modo tale che l'operatore, nel movimentare la maniglia all'interno della corsa di lavoro, debba applicare una forza minima sufficiente a vincere i soli attriti, senza avvertire la presenza della forza elastica di richiamo della molla.

Inoltre, l'operatore deve poter creare, su una finestra grafica collegata al controllo, degli "oggetti virtuali" entro lo spazio di lavoro, tali che nel momento in cui si cerchi di penetrarli virtualmente si avverta una sensazione di repulsione elastica sulla maniglia. Per far ciò è stato utilizzato un Personal Computer collegato a un gruppo di schede DSP della dSpace, interfacciato con l'azionamento del motore.

Dopo aver definito mediante linguaggio Simulink gli algoritmi che relazionano il riferimento di coppia da fornire al motore in funzione della posizione angolare assunta dal tamburo, ed averli introdotti nella CPU delle schede di controllo dSpace, si è passati ad una verifica dell'equilibrio sulla maniglia.

Una prima fase della verifica è consistita nel puro e semplice equilibrio della forza di richiamo elastico della molla da parte del motore; la seconda fase della verifica invece ha previsto l'introduzione degli oggetti virtuali.

In figura 4-2 si riporta un'immagine del banco prova allestito. Si possono individuare il banco descritto in precedenza, l'azionamento del motore, il PC utilizzato per il controllo del banco e l'alimentatore dell'azionamento.



Figura 4-2 Foto del banco prova allestito

4.b. Oggetti virtuali

Per “oggetto virtuale” si intende un oggetto non reale avente geometria e rigidità ben definite, da introdurre entro lo spazio di lavoro e la cui presenza non può essere constatata attraverso la vista ed il tatto bensì, nel caso del banco prova ad un grado di libertà, solamente attraverso la sensazione avvertibile sulla maniglia allorché si tenti di penetrarlo. In questo modo si simula una interazione dell'operatore con una rudimentale versione di realtà virtuale.

Nel caso specifico del banco prova ad un grado di libertà, l'operatore deve avere la possibilità di creare un *oggetto virtuale sinistro*, ancorato all'origine dell'asse x (che definisce le traslazioni della maniglia) e che si estenda verso destra fino all'ascissa $x_{m,1}$, e/o un *oggetto virtuale destro* posizionato presso $x_{m,max}$ e che si estenda verso sinistra fino all'ascissa $x_{m,2}$. Dopo averli creati su PC, l'operatore potrà quindi interagire con tali oggetti virtuali azionando la maniglia.

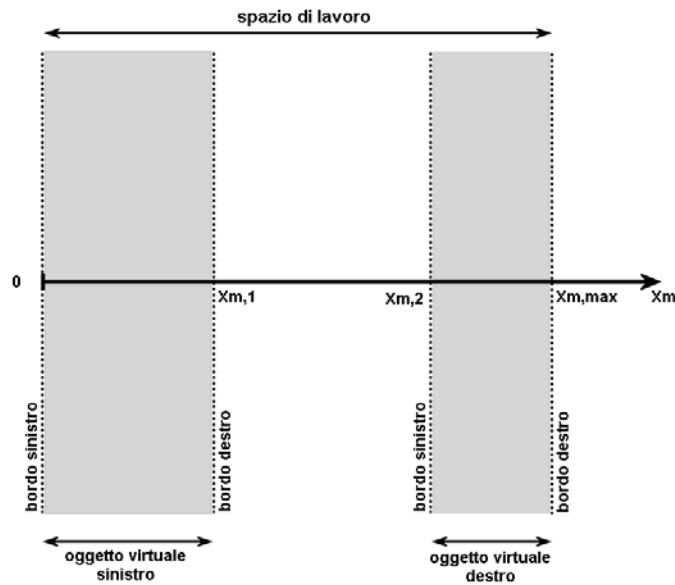


Figura 4-3 Oggetti virtuali nello spazio di lavoro

Siccome lo spazio di lavoro è monodimensionale, tali oggetti si configurano semplicemente come suoi sottointervalli, quindi non hanno una vera e propria forma, piuttosto un'estensione. È possibile definirli imponendo valori arbitrari di $x_{m,1}$ ed $x_{m,2}$ ed assegnando una determinata rigidità (N/mm), da intendere come quella del materiale di cui essi sono virtualmente composti.

La sensazione che la maniglia deve fornire all'operatore quando egli tenta di penetrare un oggetto virtuale è una reazione elastica repulsiva; a tale scopo, un'apposita legge di controllo dovrà modulare la tensione del cordino in modo da generare una risultante sulla maniglia avente verso opposto a quello di penetrazione e modulo pari a :

$$\left| \vec{R}_{elastica} \right| = k_{oggetto\ virtuale} \cdot p_{penetrazione} \quad (4.1)$$

dove $k_{oggetto\ virtuale}$ è la rigidità dell'oggetto virtuale e $p_{penetrazione}$ la profondità di penetrazione.

Se si vuole penetrare l'oggetto virtuale sinistro, occorre portare la maniglia sulla soglia $x_{m,1}$ e spingerla verso sinistra, per cui la reazione elastica deve essere rivolta verso destra. L'espressione analitica di tale forza è:

$$\dot{K}_{elastica,OV\,sx}^p = k_{OV\,sx} \cdot p_{penetrazione} \cdot \dot{l}^p = k_{OV\,sx} \cdot (x_{m,1} - x_m) \cdot \dot{l}^p \quad (4.2)$$

Per penetrare invece l'oggetto virtuale destro, occorre portare la maniglia sulla soglia $x_{m,2}$ e spingerla verso destra, quindi la reazione elastica deve essere rivolta verso sinistra. L'espressione è la seguente:

$$\dot{K}_{elastica,OV\,dx}^p = -k_{OV\,dx} \cdot p_{penetrazione} \cdot \dot{l}^p = -k_{OV\,dx} \cdot (x_m - x_{m,2}) \cdot \dot{l}^p \quad (4.3)$$

Se invece si permane entro l'intervallo centrale $[x_{m,1}, x_{m,2}]$, la risultante della forza della molla e della tensione del cordino deve essere nulla per ottenere l'equilibrio statico della maniglia.

Visto che la forza della molla è funzione di x_m e che la tensione del cordino è funzione di V_{rif} , si tratta di trovare l'espressione $V_{rif} = f(x_m)$ che generi, se usata come legge di controllo, la tensione necessaria per avere la risultante desiderata sulla maniglia. Per far ciò è sufficiente scrivere l'equilibrio della maniglia in ciascuno dei tre intervalli dello spazio di lavoro. I risultati di tale analisi sono esposti in forma grafica in figura 4-4.

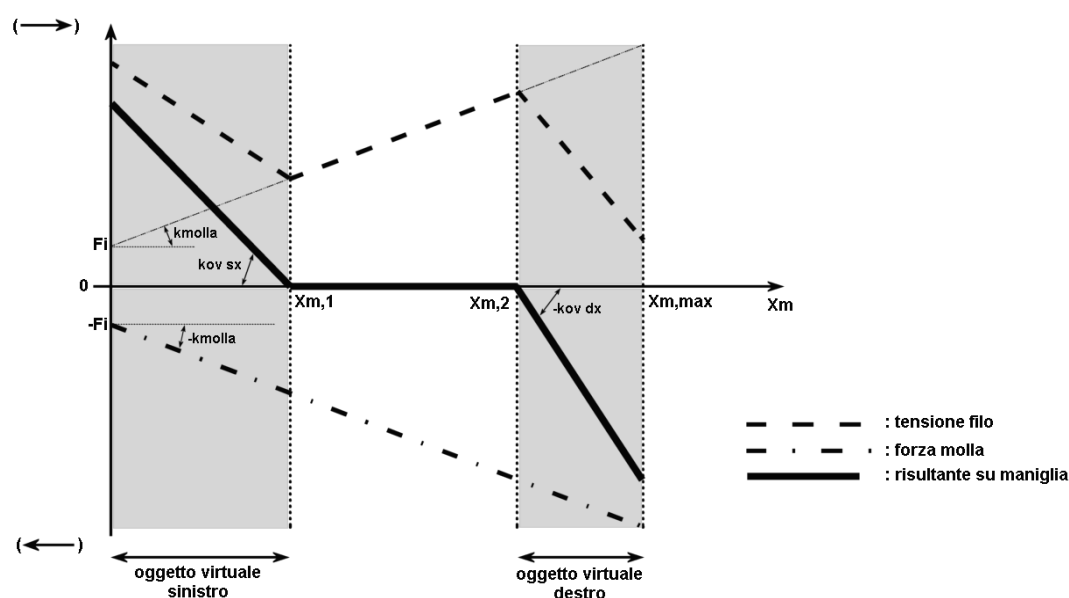


Figura 4-4 Reazioni elastiche degli oggetti virtuali

4.c. Il controllo

In figura 4-5 è presentato il modello completo del controllo per il banco prova ad un grado di libertà:

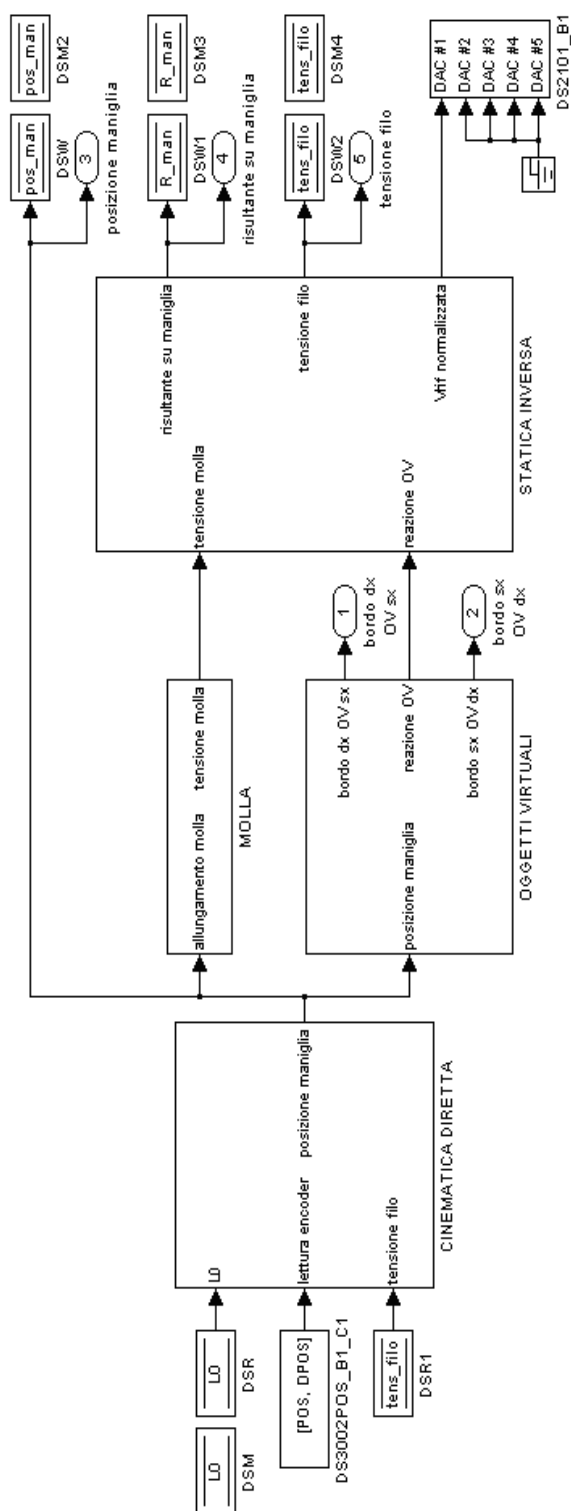


Figura 4-5 Modello Simulink per il controllo real-time del banco ad un grado di libertà

In figura 4-5 si riconoscono i blocchi per l'interfacciamento con il software delle schede DSP dSpace, quelli per l'interfacciamento diretto con le schede nonché i principali blocchi di calcolo dell'algoritmo di controllo, sul quale non ci dilungheremo in questa sede. In figura 4-6 è presentata una schermata della “strumentazione virtuale” creata mediante il software delle schede dSpace, strumento che consentirà all'operatore di gestire e visualizzare in tempo reale i parametri del controllo.

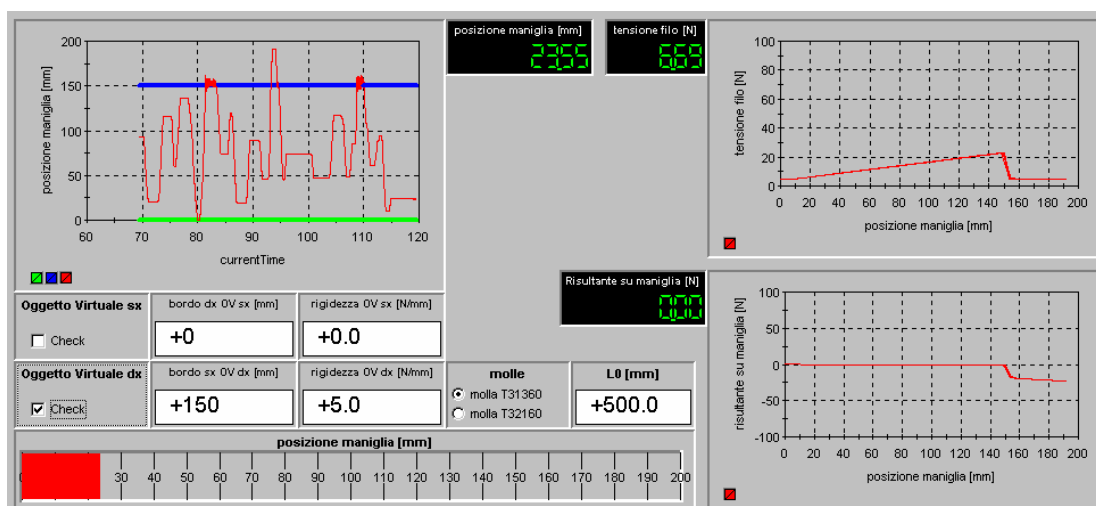


Figura 4-6 Strumento virtuale di controllo per il banco prova ad un grado di libertà

Una volta completata la progettazione del controllo e la sua realizzazione in Simulink, le sue variabili, gli input e gli output vengono collegati alla strumentazione virtuale di figura 4-6, appositamente creata, mentre il corpo centrale del controllo viene compilato e inviato direttamente al microprocessore delle schede.

La strumentazione virtuale, in questo caso, si compone di:

- attivazione e disattivazione oggetti virtuali
- selezione della posizione e della rigidezza degli oggetti virtuali
- selezione della molla di contrapposizione (che deve corrispondere a quella effettivamente montata)
- introduzione della lunghezza libera a riposo del cordino (per la compensazione dell'allungamento)

In più si dispone di strumenti grafici di visualizzazione delle varie grandezze, come la posizione della maniglia e la risultante sul filo, rappresentate in più modi in contemporanea per facilitare il compito dell'operatore: come diagrammi cartesiani, sia in funzione del tempo sia l'una in funzione dell'altra; come display, con la

visualizzazione del valore istantaneo; come barra (simile ad un istogramma), la posizione della maniglia.

4.d. Compensazione del disturbo di coppia del motore

Le prove effettuate sul banco prova ad un grado di libertà hanno evidenziato un ottimo comportamento del sistema dal punto di vista della risultante sulla maniglia. Essa è in effetti mediamente nulla nella porzione di spazio di lavoro non occupato dagli oggetti virtuali, e restituisce la sensazione di repulsione elastica quando si tenta di penetrare un oggetto virtuale.

Tuttavia, soprattutto spostando la maniglia lentamente, è risultata evidente una certa irregolarità del movimento, percepita dall'operatore come una certa variabilità periodica della forza risultante. Essa è legata alla sovrapposizione di due fenomeni: il *ripple di coppia* e la *cogging torque* del motore. Il ripple di coppia è un fenomeno legato alla non

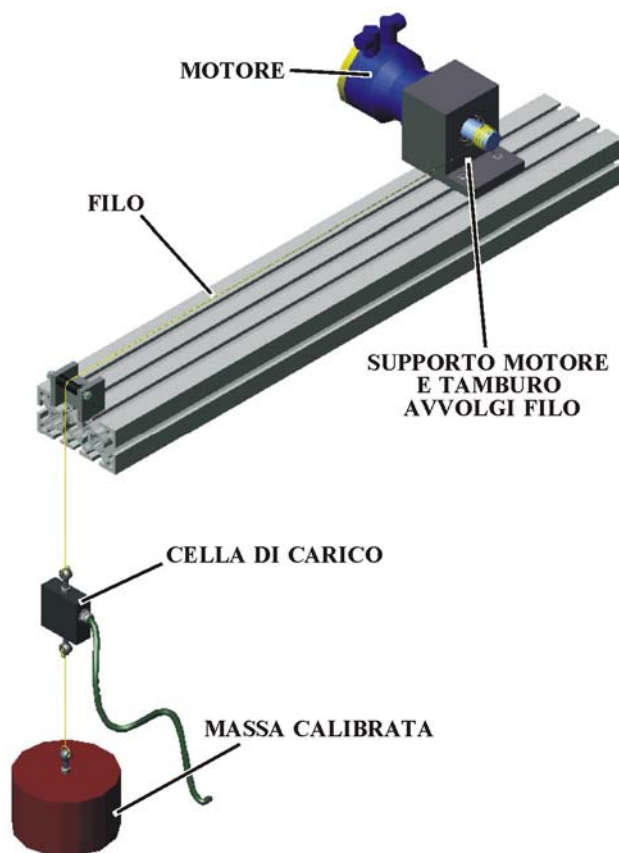


Figura 4-7 Banco prova per acquisizione dinamica

perfetta sinusoidalità delle correnti e delle tensioni presenti nel motore. La cogging torque invece, tipico fenomeno dei motori brushless a magneti permanenti, è prodotta dalla componente circonferenziale della forza di attrazione magnetica che si sviluppa tra i magneti permanenti montati sul rotore e i denti dello statore. Visto e considerato che in realtà tali effetti si sovrappongono e non sono distinguibili in un motore commerciale, nel seguito l'effetto complessivo verrà chiamato genericamente ripple di coppia (oscillazione di coppia).

Allo scopo di studiare, caratterizzare ed eventualmente compensare tale disturbo, sono state effettuate diverse prove. È importante ricordare che lo scopo del banco prova ad un grado di libertà era proprio quello di studiare le diverse problematiche che sarebbero potute emergere.

Il banco prova schematizzato in figura 4-7 è composto dal motore con relativo azionamento, un cordino in dyneema, una cella di carico, una massa appesa, le schede di acquisizione dSpace ed il PC cui queste sono collegate.

Il cordino è avvolto e fissato su un rocchetto solidale all'albero motore, pertanto su esso si avvolge/svolge secondo il movimento del rotore, trascinando con sé la cella di carico e la massa.

Lo scopo della prova è di misurare il ripple di coppia in condizioni dinamiche a velocità costante. Per far ciò si è fornito al motore un riferimento di coppia sufficiente a vincere gli attriti e la forza di gravità che agisce sul peso e sulla cella di carico, acquisendo con continuità mediante le schede dSpace la posizione angolare dell'albero motore generata dall'encoder virtuale simulato dall'azionamento e la forza sulla cella di carico, che corrisponde alla coppia effettivamente erogata dal motore. Scartata la prima fase di accelerazione, la velocità si mantiene costante per un certo tempo. In questa fase pertanto possono essere confrontate la coppia teorica di riferimento e la coppia effettivamente erogata al fine di identificare il ripple di coppia.

In pratica, si sono diagrammate la coppia reale (calcolata grazie alla cella di carico) e la coppia teorica erogata dal motore, in funzione della posizione angolare assoluta dell'albero motore (fra 0° e 360°, dove per 0° si intende lo zero assoluto del resolver).

Sono state eseguite diverse prove al variare della massa del carico sospeso, e di conseguenza della coppia del motore.

Si è calcolata, per ciascuna prova, la coppia reale media erogata dal motore e la coppia adimensionalizzata:

$$\text{Coppia Adim.} = \frac{\text{Coppia Reale}}{\text{Coppia Reale Media}}$$

Si è quindi diagrammata la coppia adimensionalizzata in funzione della posizione angolare dell'albero motore fra 0° e 90° assoluti: sovrapponendo tutti i grafici relativi

alla coppia adimensionalizzata si ottiene un'indicazione generale su come si sviluppa il ripple di coppia sul periodo da 0° a 90° ; tale risultato è visibile in figura 4-8.

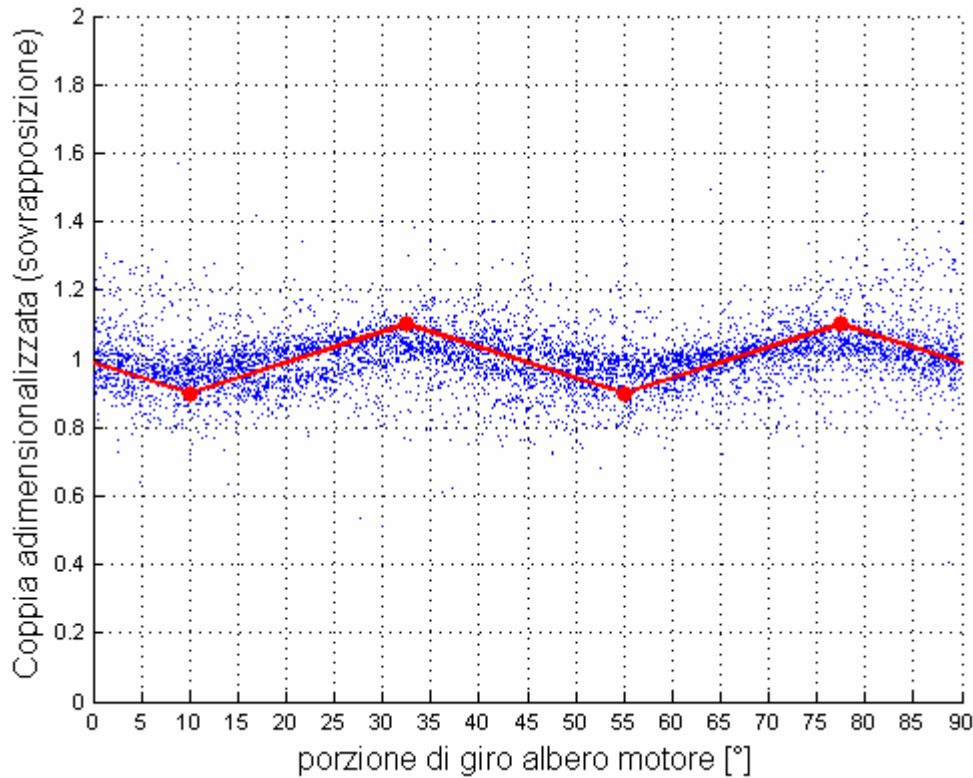


Figura 4-8 *Ripple di coppia da prove dinamiche*

In figura, oltre alla “nuvola” complessiva dei punti acquisiti, è rappresentata una funzione interpolante lineare a tratti.

La campagna di prove ha fornito risultati validi dal punto di vista qualitativo, ma non affidabili dal punto di vista quantitativo, in quanto la cella di carico è disturbata dalla dinamica del campo magnetico del motore.

Sono state comunque tratte le seguenti conclusioni:

1. è necessaria una caratterizzazione statica del ripple, con il motore allo stallo
2. l'offset della coppia reale rispetto a quella teorica potrebbe essere dovuto all'attrito nei supporti, e ciò andrà verificato anche grazie alle prove statiche.
3. il ripple ha un andamento non del tutto regolare, con periodicità 90° , e presenta due massimi e due minimi (a valori diversi) all'interno di ciascun periodo.

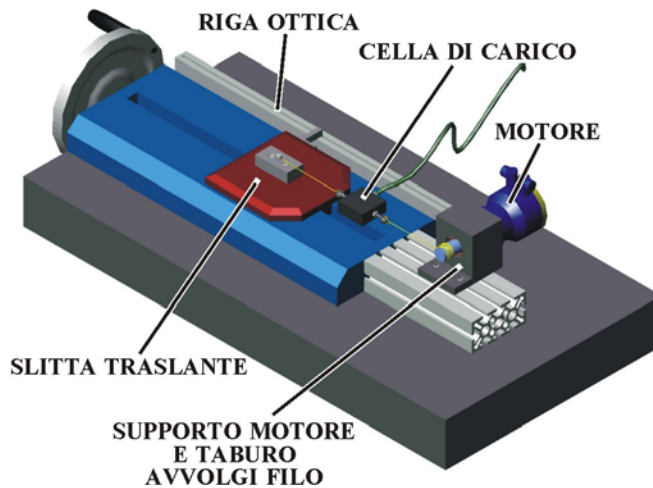


Figura 4-9 Banco prova per acquisizione statica

Successivamente, è stato utilizzato un differente banco prova allo scopo di studiare il ripple di coppia in condizioni statiche. Tale banco prova è rappresentato in figura 4-9.

È stata utilizzata una slitta supportata da una guida lineare a ricircolo di sfere, azionata da un sistema vite-madrevite mediante un volantino. Il cordino è avvolto

e fissato su un tamburo solidale all'albero motore, cosicché si avvolge e si svolge da esso. L'altra estremità del cordino è fissata alla cella di carico, che a sua volta è solidale alla slitta.

Fornendo al motore una tensione di riferimento costante, esso fornisce una coppia di valor medio costante, ed andamento funzione dell'angolo meccanico del rotore. Pertanto, spostando il volantino, si muove la slitta e di conseguenza ruota il rotore, portandosi in differenti posizioni. Le prove sono state effettuate acquisendo la forza sulla cella di carico (proporzionale alla coppia reale erogata) ogni 5° meccanici di angolo del rotore.

Uno dei risultati della serie di prove statiche, a titolo di esempio, è riportato in figura 4-10. Sono rappresentati separatamente i valori misurati in andata e in ritorno, che come si nota sono traslati verticalmente di un valore circa costante, a testimoniare l'azione dell'attrito meccanico.

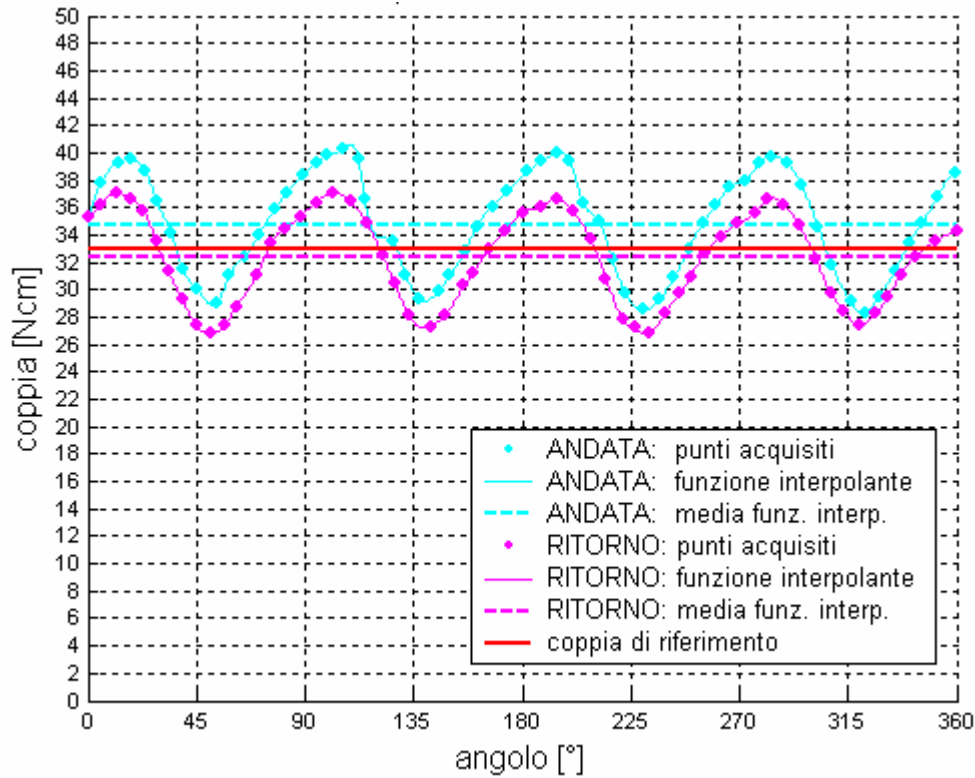


Figura 4-10 Prova con $V_{rif} = 4V$, $C_{rif} = 0.4 \cdot 82.5 = 33 \text{ Ncm}$

La funzione interpolante della coppia effettivamente erogata rispetto alla tensione di riferimento è nella forma:

$$C = C_{rif} + A(V_{rif}) \cdot \cos(4\vartheta - \varphi) = V_{rif} \cdot \frac{82.5}{10} + A(V_{rif}) \cdot \cos(4\vartheta - 36^\circ) \quad (4.4)$$

L'espressione (4.4) consente di calcolare approssimativamente la coppia C erogata dal motore quando la tensione di alimentazione è pari a V_{rif} e l'albero si trova nella posizione angolare ϑ .

Pertanto, caratterizzando l'andamento dell'ampiezza del ripple in funzione della V_{rif} , si può scrivere un'espressione nella forma:

$$V_{rif} = V_{rif}(\vartheta, C) \quad (4.5)$$

Tale espressione consente di calcolare la tensione V_{rif} di alimentazione del motore affinché questo possa erogare la coppia desiderata C mentre l'albero si trova nella posizione angolare θ , compensando così le oscillazioni di coppia.

Nella realtà dei fatti, il comportamento del ripple di coppia dei motori è risultato variabile nel tempo e di conseguenza poco ripetibile, rendendo impossibile un'adeguata compensazione. Individuato un primo algoritmo nella forma (4.5), infatti, esso ha dato risultati confortanti in un primo momento, peggiorando poi rapidamente fino a portarsi apparentemente in fase con il fenomeno fisico, finendo per amplificare il ripple anziché ridurlo. Una successiva campagna di caratterizzazione del fenomeno, condotta con un numero di prove molto maggiore, ha fornito una tale dispersione di punti nel grafico coppia - angolo meccanico da far desistere, per il momento, dal cercare di compensare il fenomeno. Per il futuro, certamente dovrà essere approfondito il funzionamento del motore accoppiato con l'azionamento, allo scopo di risalire alla fonte fisica del fenomeno e soprattutto comprendere come e perché vari di caso in caso in forma, ampiezza e fase.

5. Master a due gradi di libertà

5.a. Presentazione

Il master a cordini a due gradi di libertà è una struttura parallela costituita da un elemento mobile, la maniglia, che può spostarsi di moto unicamente traslatorio su un piano. Essa è collegata mediante tre cordini ad altrettanti motori aventi la funzione di generare sulla maniglia una forza risultante variabile a seconda della condizione in cui ci si trova ad operare.

La realizzazione del master a cordini a due gradi di libertà ha tra i suoi scopi quello di estendere lo studio effettuato sul banco ad un grado di libertà (capitolo 4) al controllo in coppia contemporaneo di tre motori. In particolare, in questo caso si dovrà cercare, controllando simultaneamente i tre motori, di ottenere un equilibrio delle forze agenti sulla maniglia in condizioni normali di funzionamento, garantendo però che sui cordini utilizzati per la trasmissione della forza dai motori alla maniglia sia esercitata una forza minima che li mantenga sempre in tensione. Si dovranno inoltre poter collocare nello spazio di lavoro degli oggetti virtuali, di rigidità nota ed arbitrariamente fissata, tali che, nel penetrarli virtualmente, nasca sulla maniglia una forza risultante secondo una data direzione e con modulo proporzionale alla penetrazione nell'oggetto virtuale .

I risultati ottenuti dall'implementazione del master a due gradi di libertà permetteranno di convalidare le soluzioni costruttive di alcuni particolari che si ritroveranno sul master aptico a cordini a sei gradi di libertà. In particolare esse sono:

- modalità di fissaggio dei cordini in tre punti distinti sulla maniglia.
- modalità di fissaggio dei cordini in un unico punto sulla maniglia.
- sistema di rinvio del filo dalla maniglia al motore, nella configurazione con cordini disposti su un piano nel tratto che va dal rinvio agli ancoraggi sulla maniglia.
- sistema di rinvio del filo dalla maniglia al motore, nella configurazione con cordini obliqui e discendenti dal rinvio verso l'ancoraggio sulla maniglia.
- sistema per l'esecuzione dello “zero-assi” del master.
- sistema di sicurezza che interviene quando si ricerca un funzionamento al di fuori dello spazio di lavoro.

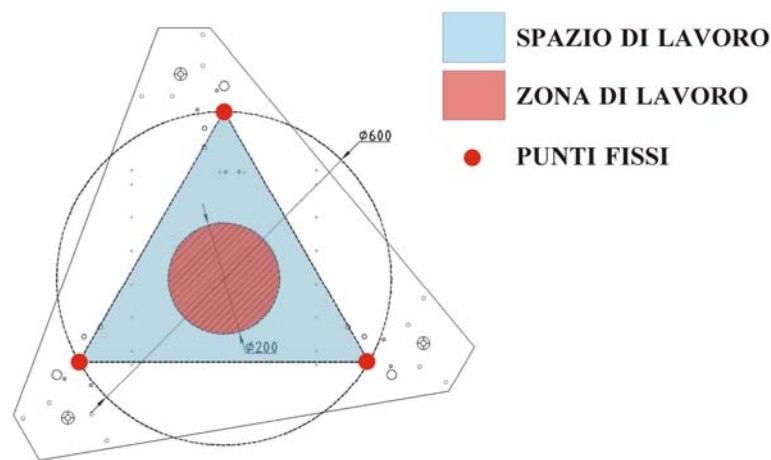


Figura 5-1 Schema della localizzazione dei punti fondamentali del master sulla piastra di base

Nel descrivere le caratteristiche generali della struttura, è necessario innanzitutto definire cosa si intende per spazio di lavoro e zona di lavoro. Per “spazio di lavoro” si intende lo spazio (in questo caso un'area) all'interno del quale la maniglia può muoversi liberamente secondo le caratteristiche geometriche della struttura, mentre per “zona di lavoro” si intende una porzione dello spazio di lavoro, definita arbitrariamente in fase di progetto, all'interno della quale la maniglia viene effettivamente mossa, come si può vedere in figura 5-1. In tale immagine sono anche evidenziati i punti fissi del master, definiti come segue. Per “punti fissi” si intendono i punti appartenenti ai sistemi di rinvio, aventi posizione definita dalla geometria costruttiva dei componenti della struttura e dalla modalità di montaggio di questi, e fissa rispetto ad un sistema di riferimento assoluto esterno. Quando si parla invece di “punti mobili” si identificano i punti appartenenti ai sistemi di ancoraggio dei cordini montati sulla maniglia e che si spostano solidalmente con questa all'interno dello spazio di lavoro.

Poiché la struttura presenta due soli gradi di libertà di tipo traslazionale, alla maniglia è concesso solamente un movimento di tipo piano. In particolare, la porzione di piano all'interno della quale si vuole far muovere la maniglia, ovvero la zona di lavoro, è stata limitata ad un'area di forma circolare avente diametro di 200mm. Il cerchio identificante la zona di lavoro ha il centro posizionato sul baricentro di un triangolo equilatero inscritto in una circonferenza di diametro 600mm i cui vertici coincidono con la proiezione dei punti fissi sul piano contenente il piano di lavoro (figura 5-1). Il suddetto triangolo equilatero corrisponde allo spazio di lavoro in quanto se la maniglia fuoriuscisse da questo non sarebbe più possibile garantire su di essa una risultante di forza generica, poiché tutti e tre i cordini contribuirebbero a generare solamente una forza nella direzione della zona di lavoro.

5.b. La struttura

Si riporta in figura 5-2 un'immagine del prototipo a due gradi di libertà. Le componenti del banco sono state montate su di una piastra realizzata in alluminio, sorretta mediante l'utilizzo di tre profilati strutturali disposti sui vertici di un triangolo e fissati alla piastra. La piastra è stata opportunamente lavorata per garantire la collocazione esatta dei vari elementi del prototipo ed è stata sagomata con forma triangolare in modo tale da ridurne il peso.

Per consentire i due gradi di libertà traslazionali alla maniglia, sono state utilizzate tre guide lineari a ricircolo di sfere, due delle quali poste in parallelo con la terza collocata trasversalmente a collegare le prime due. Su quest'ultima è stata collocata la maniglia che riporta, sull'estremità superiore, i diversi sistemi di fissaggio del filo da testare. Il filo utilizzato per collegare la maniglia ai diversi motori è lo stesso utilizzato nel banco prova ad un grado di libertà, ovvero il Dyneema140.

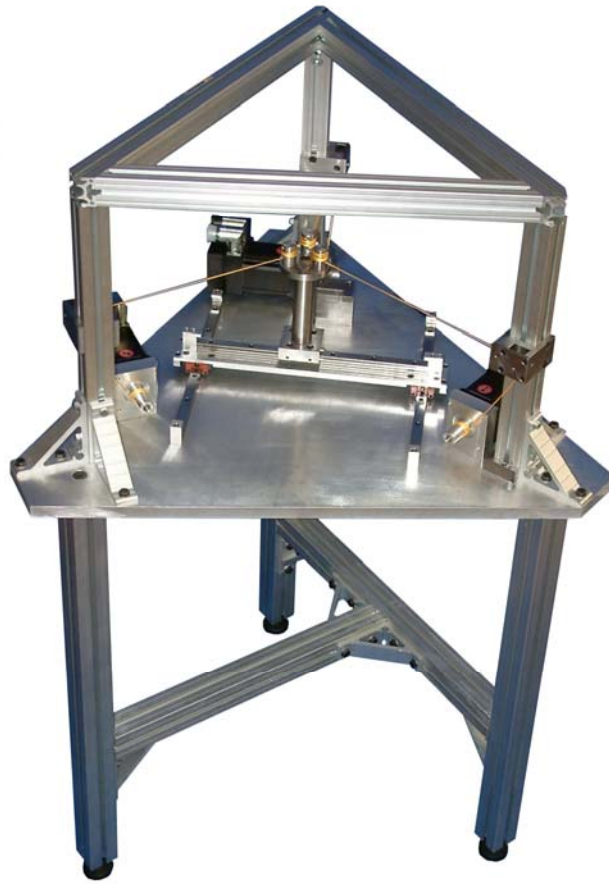


Figura 5-2 *Master a due gradi di libertà*

Per sfruttare al meglio le possibili analogie con il master a sei gradi di libertà, sono stati adottati due schemi alternativi per il fissaggio dei cordini sulla maniglia, ossia, con riferimento alla figura 5-3, con i punti mobili distinti e posti sui vertici di un triangolo equilatero (schema 1) oppure con i punti mobili coincidenti (schema 2), nel qual caso sono anche stati traslati i punti fissi verso l'alto per far sì che i cordini fossero convergenti verso il basso.

In questo modo possono essere provate separatamente le modalità di attacco singolo, analoghe a quelle del master a sei gradi di libertà, e l'attacco multiplo, che collega contemporaneamente tre cordini alla maniglia, permettendo – come detto nel capitolo 2 – la risoluzione della cinematica diretta della soluzione a nove cordini.

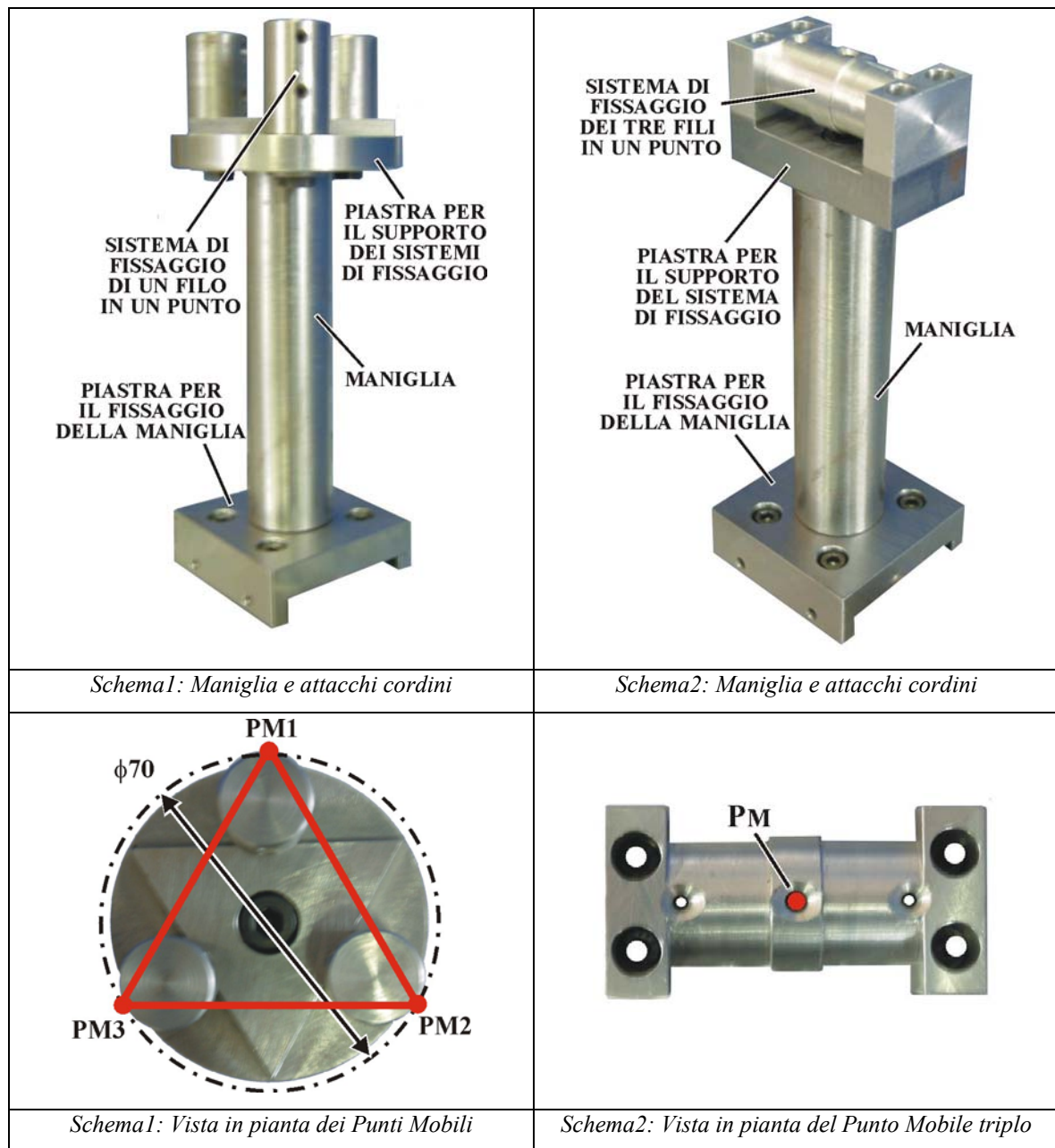


Figura 5-3 I due schemi di attacco dei cordini alla maniglia

Nella struttura a due gradi di libertà sono stati introdotti anche altri elementi che verranno utilizzati, identici, nel sistema a sei gradi di libertà, in particolare:

- i cordini;
- i sistemi di rinvio dei cordini, che sono stati testati sia con il filo uscente lungo l'asse del passante (schema 1), sia con il filo inclinato (schema 2);
- i motori e la relativa sensorizzazione (encoder ottici);

- il sistema di avvolgimento sul motore.

5.c. Oggetti virtuali

Allo scopo di provare operativamente il funzionamento del master a due gradi di libertà, si è deciso di creare, nella zona di lavoro, una realtà virtuale fatta di oggetti che consentissero di simulare il fenomeno della retroazione di forza.

Analogamente a quanto detto nel paragrafo 4.b., per “oggetto virtuale” si intende un oggetto avente geometria e rigidità ben definite pur non essendo reale, da introdurre entro lo spazio di lavoro e la cui presenza non può essere constatata attraverso la vista ed il tatto bensì solamente attraverso la sensazione avvertibile sulla maniglia allorché si tenti di penetrarlo.

Nel caso del master a due gradi di libertà, gli oggetti sono figure geometriche piane (data la bidimensionalità dello spazio di lavoro) che l'operatore deve dapprima poter creare a proprio piacimento, dopodiché interagirvi. Per consentire la simulazione di differenti condizioni operative, senza però rendere complicata la gestione della realtà virtuale, si è pensato di limitare le tipologie di oggetti a due soli modelli: cerchio e triangolo equilatero.

Per ciascuno di essi deve essere sviluppato un algoritmo di calcolo preposto alla determinazione della reazione elastica repulsiva prodotta dall'oggetto in caso di penetrazione: questo deve essere in grado di creare una forza avente direzione coincidente con la normale al tratto di contorno dell'oggetto più vicino al punto rappresentante la posizione della maniglia, modulo proporzionale alla profondità di penetrazione secondo la rigidità del materiale di cui è virtualmente composto l'oggetto e verso rivolto all'esterno.

Un oggetto virtuale concavo deve essere creato anche intorno alla zona di lavoro affinché una reazione elastica radiale centripeta possa insorgere sulla maniglia qualora l'operatore cercasse di oltrepassarne la soglia; si crea così un confine virtuale rigido tra zona di lavoro e spazio di lavoro circostante, che impedisce all'operatore di portare la maniglia verso le zone periferiche dello spazio di lavoro nelle quali il buon funzionamento della struttura non è garantibile. Si parla quindi di “barriera virtuale” attorno alla zona di lavoro.

Per gli oggetti virtuali è stato creato un file in ambiente Matlab, che ne permette la creazione mediante l'inserimento di opportuni parametri (dimensioni e rigidezza). L'ambiente virtuale così creato può dunque essere trasferito al modello Simulink (nel quale sono stati creati appositi blocchi) e di conseguenza alle schede dSpace. La schermata di interfaccia con le schede, riportante un esempio di oggetti virtuali, è rappresentata in figura 5-4. Sono visibili la circonferenza esterna, che rappresenta la barriera virtuale, e due oggetti virtuali, un cerchio ed un triangolo.

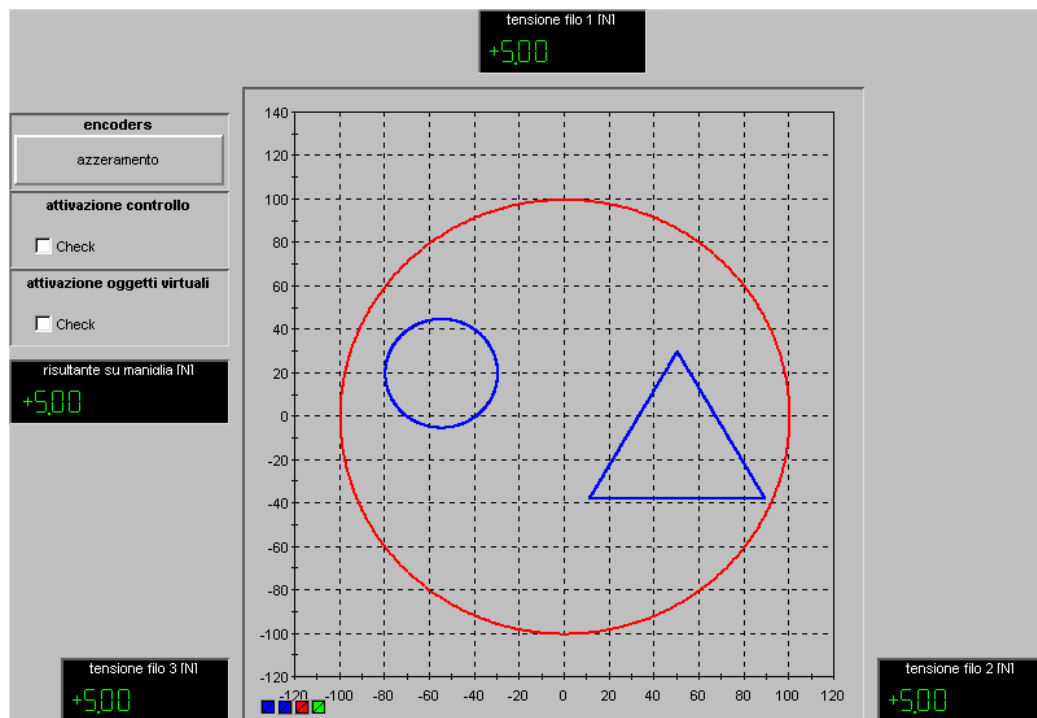


Figura 5-4 Strumento virtuale di controllo per il master a due gradi di libertà

Tale strumento grafico si integra con il controllo, come descritto nel paragrafo successivo.

5.d. Algoritmo di controllo

Il controllo è stato sviluppato in due versioni differenti, che corrispondono ai due schemi della struttura: con i cordini fissati alla maniglia in posizioni distinte (schema 1) e con i cordini convergenti (schema 2).

I due modelli Simulink differiscono unicamente per la parte di cinematica e per la composizione delle forze; nel seguito verrà descritto solo il controllo dello schema 1 per brevità, visto che per analogia lo schema 2 può essere ottenuto in modo molto semplice a partire da esso.

La disposizione in pianta delle colonne verticali del telaio fisso e la geometria della piastra montata sulla sommità della maniglia sono state studiate in modo tale che il triangolo avente per vertici i punti fissi e quello avente per vertici i punti mobili risultino equilateri ed inscritti in circonferenze di diametro rispettivamente pari a $D_{pf} = 600\text{mm}$ e $d_{pm} = 70\text{mm}$ (Figura 5).

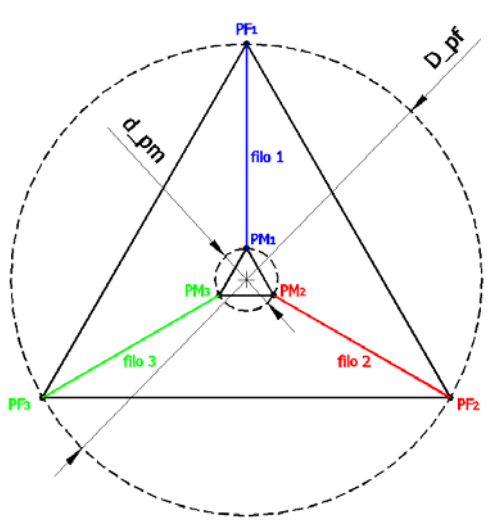


Figura 5-5 Schema della disposizione in pianta dei punti fissi e dei punti mobili

I cordini (ed i rispettivi punti) vengono numerati in senso orario a partire da quello che congiunge i vertici superiori dei due triangoli.

Nota la disposizione spaziale dei punti fissi e mobili, le dimensioni caratteristiche sono l (lunghezza lati triangolo punti mobili), L (lunghezza lati triangolo punti fissi) ed h (quota del piano dei punti fissi e mobili rispetto alla piastra fissa).

$$L = D_{pf} \cdot \cos 30^\circ \quad (5.1)$$

$$l = d_{pm} \cdot \cos 30^\circ \quad (5.2)$$

$$h = 207 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Per lo studio geometrico, cinematico e dell'equilibrio statico, si definiscono due sistemi di riferimento: uno solidale al telaio fisso, avente assi xyz e origine O_F , ed uno solidale all'elemento mobile, avente assi uvw e origine O_M . Il sistema di riferimento fisso viene assunto con origine O_F coincidente con il centro della zona di lavoro, piano xy coincidente con il piano della piastra fissa, asse y orientato positivamente in modo da intercettare la proiezione del punto PF_1 sul piano della piastra fissa, asse z orientato

positivamente verso l'alto ed asse x conseguente; il sistema di riferimento mobile viene invece assunto con origine O_M coincidente con il centro del triangolo dei punti mobili (quindi sul piano dei punti fissi e mobili) ed assi uvw orientati come gli assi xyz del sistema fisso.

Cinematica

Dal momento che i due gradi di libertà del sistema sono traslazionali, l'orientazione degli assi uvw del riferimento mobile non varia al variare della posizione della maniglia, per cui risulteranno sempre paralleli agli omologhi assi xyz del riferimento fisso. Ciò che varia, quindi, è esclusivamente la posizione dell'origine O_M nel riferimento fisso. I due gradi di libertà del sistema corrispondono quindi alle coordinate di O_M nel piano fisso xy .

Considerando l' i -esima catena cinematica, è possibile definire il set di vettori riportato di seguito:

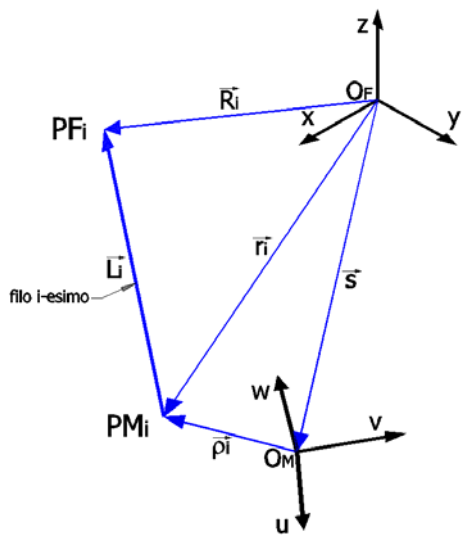


Figura 5-6 Vettori associati all' i -esima catena cinematica (i -esimo filo)

${}^F \mathbf{R}_i$: vettore posizione del punto fisso PF_i nel sistema di riferimento fisso.

$${}^F \mathbf{R}_i = [X_i \quad Y_i \quad Z_i]^T \quad (5.4)$$

${}^F \mathbf{r}_i$: vettore posizione del punto mobile PM_i nel sistema di riferimento fisso.

$${}^F \mathbf{r}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad (5.5)$$

${}^M \mathbf{r}_i$: vettore posizione del punto mobile PM_i nel sistema di riferimento mobile.

$${}^M \mathbf{r}_i = [u_i \quad v_i \quad w_i]^T \quad (5.6)$$

${}^F \mathbf{L}_i$: vettore identificativo del filo i -esimo,

avente come direzione l'asse del filo ed orientamento che va dal punto mobile verso il punto fisso.

$${}^F \mathbf{L}_i = [L_{ix} \quad L_{iy} \quad L_{iz}]^T \quad (5.7)$$

${}^F \mathbf{s}$: vettore posizione dell'origine O_M del sistema di riferimento mobile nel sistema di riferimento fisso.

$${}^F \mathbf{p} = [s_x \quad s_y \quad s_z]^T \quad (5.8)$$

La matrice di posizionamento del sistema di riferimento mobile rispetto a quello fisso è:

$${}^F \hat{\mathbf{A}}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Esprimendo i vettori ${}^F \mathbf{r}_i$ e ${}^M \mathbf{r}_i$ in forma omogenea, è possibile affermare che:

$${}^F \mathbf{p}_i = {}^F \hat{\mathbf{A}}_M \cdot {}^M \mathbf{p}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i \quad 1]^T \quad (5.10)$$

Nel caso specifico, la (5.10) diventa:

$${}^F \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [(u_i + s_x) \quad (v_i + s_y) \quad h \quad 1]^T \quad (5.11)$$

Grazie alla (5.11) si può esprimere la posizione dei punti mobili nel sistema di riferimento fisso in funzione della posizione dei medesimi nel sistema di riferimento mobile e dei due gradi di libertà della struttura:

$$\begin{cases} x_i = u_i + s_x \\ y_i = v_i + s_y \\ z_i = h \end{cases} \quad (5.12)$$

Per il calcolo della cinematica inversa, il vettore ${}^F \mathbf{L}_i$ identificativo del filo i -esimo nel sistema di riferimento fisso può essere calcolato per differenza vettoriale:

$${}^F\mathcal{L}_i = {}^F\mathcal{R}_i - {}^F\mathcal{P}_i = [L_{ix} \quad L_{iy} \quad L_{iz}]^T \quad (5.13)$$

Sviluppando la (5.13) per lo schema 1, si ottiene:

$${}^F\mathcal{L}_i = [X_i \quad Y_i \quad h]^T - [x_i \quad y_i \quad h]^T = [(X_i - x_i) \quad (Y_i - y_i) \quad 0]^T \quad (5.14)$$

ovvero:

$$\begin{cases} L_{ix} = X_i - x_i = X_i - (u_i + s_x) \\ L_{iy} = Y_i - y_i = Y_i - (v_i + s_y) \\ L_{iz} = 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

Così facendo, si legano le componenti del vettore ${}^F\mathcal{L}_i$ alla posizione dei punti fissi espressa nel sistema di riferimento fisso (piano xy), alla posizione dei punti mobili espressa nel sistema di riferimento mobile e, infine, ai due gradi di libertà del master.

In base a quanto affermato nel paragrafo precedente, le componenti u_i e v_i del vettore ${}^M\mathcal{P}_i$, nonché le componenti X_i ed Y_i del vettore ${}^F\mathcal{R}_i$, sono parametri geometrici costanti del sistema, per cui nelle (5.12) e nelle (5.15) le uniche variabili sono rappresentate dai gradi di libertà s_x ed s_y .

La cinematica diretta, invece, è rappresentata dalle seguenti equazioni:

$$s_x = \frac{L_3^2 - L_2^2 + (L-l)^2}{2 \cdot (L-l)} + \frac{l-L}{2} \quad (5.16)$$

$$s_y = \sqrt{L_3^2 - \left[\frac{L_3^2 - L_2^2 + (L-l)^2}{2 \cdot (L-l)} \right]^2} + \frac{l-L}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (5.17)$$

$$s_z = h \quad (5.18)$$

Statica

L'algoritmo di statica inversa per le strutture parallele a cordini ha lo scopo di determinare le tensioni che occorre generare nei cordini affinché sull'elemento mobile possa insorgere una data risultante di forze e momenti.

Dati fondamentali sono i coseni direttori dei cordini espressi nel sistema di riferimento solidale all'elemento mobile, oltre naturalmente alla risultante desiderata di forze e momenti.

Si indica con ${}^M \mathbf{f}^P \in R^2$ il vettore delle forze generalizzate esterne agenti sulla maniglia, espresso nel sistema di riferimento mobile; le componenti che vengono prese in considerazione sono solamente due perché tale è il numero di gradi di libertà del sistema, ossia, in particolare:

$${}^M \mathbf{f}^P = [F_u \quad F_v]^T \quad (5.19)$$

Con F_u si indica la forza applicata dall'esterno sulla maniglia nella direzione dell'asse u , mentre con F_v la forza applicata nella direzione dell'asse v . Non compaiono le componenti F_w (forza esercitata nella direzione dell'asse w), M_u (coppia attorno all'asse u), M_v (coppia attorno all'asse v) ed M_w (coppia attorno all'asse w), perché tali forze generalizzate non si scaricano sui cordini bensì sulla struttura (in particolare, sulle guide lineari).

Si indica invece con ${}^M \mathbf{f}^P \in R^2$ il vettore risultante delle forze generalizzate esercitate dai cordini sulla maniglia, espresso anch'esso nel sistema di riferimento mobile. Le forze ${}^M \mathbf{F}_1^P$, ${}^M \mathbf{F}_2^P$ ed ${}^M \mathbf{F}_3^P$ e i momenti ${}^M \mathbf{M}_1^P$, ${}^M \mathbf{M}_2^P$ ed ${}^M \mathbf{M}_3^P$ (quest'ultimi calcolati rispetto all'origine del sistema di riferimento mobile) esercitati dai tre cordini sono:

$${}^M \mathbf{F}_1^P = {}^M \mathbf{l}_1^P \cdot \tau_1 \quad (5.20)$$

$${}^M \mathbf{F}_2^P = {}^M \mathbf{l}_2^P \cdot \tau_2 \quad (5.21)$$

$${}^M \mathbf{F}_3^P = {}^M \mathbf{l}_3^P \cdot \tau_3 \quad (5.22)$$

$${}^M \mathbf{M}_1^P = ({}^M \mathbf{p}_1 \wedge {}^M \mathbf{l}_1^P) \cdot \tau_1 \quad (5.23)$$

$${}^M M_2^P = ({}^M \rho_2 \wedge {}^M l_2^P) \cdot \tau_2 \quad (5.24)$$

$${}^M M_3^P = ({}^M \rho_3 \wedge {}^M l_3^P) \cdot \tau_3 \quad (5.25)$$

dove ${}^M l_1^P$, ${}^M l_2^P$ ed ${}^M l_3^P$ sono i versori dei cordini espressi nel sistema di riferimento mobile, ${}^M \rho_1$, ${}^M \rho_2$ e ${}^M \rho_3$ i vettori posizione dei punti mobili nel sistema di riferimento mobile e τ_1 , τ_2 e τ_3 le tensioni dei cordini.

Complessivamente, il vettore risultante ${}^M F^P$ delle forze generalizzate applicate dai cordini sulla maniglia può essere espresso in forma matriciale:

$${}^M F^P = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 {}^M F_i^P \\ \sum_{i=1}^3 {}^M M_i^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^M l_1^P & {}^M l_2^P & {}^M l_3^P \\ {}^M \rho_1 \wedge {}^M l_1^P & {}^M \rho_2 \wedge {}^M l_2^P & {}^M \rho_3 \wedge {}^M l_3^P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

ovvero, in forma compatta:

$${}^M F^P = \tilde{J} \cdot \ell^P \quad (5.27)$$

dove la matrice $\tilde{J}$ è lo jacobiano del sistema riferito al riferimento mobile e ℓ^P il vettore delle tensioni nei cordini.

Dovendo studiare l'equilibrio statico della maniglia lungo le direzioni u e v (direzioni dei gradi di libertà), si estrae il minore 2×3 costituito dalle prime due righe:

$$\tilde{J} = \begin{bmatrix} l_{1u} & l_{2u} & l_{3u} \\ l_{1v} & l_{2v} & l_{3v} \end{bmatrix}^{2 \times 3} \quad (5.28)$$

Si noti che le colonne di $\tilde{J}$ rappresentano i versori dei cordini nel piano uv .

L'equilibrio statico della maniglia viene imposto mediante la seguente equazione:

$${}^M F^P + {}^M f^W = 0 \quad (5.29)$$

Sostituendo si ottiene:

$$-{}^M\mathbf{f}^w = \tilde{\mathbf{J}} \cdot \mathbf{p} \quad (5.30)$$

nella quale l'unica incognita è il vettore $\mathbf{p}$ delle tensioni nei cordini. Essendo il numero di cordini maggiore del numero di gradi di libertà, la (5.30) ammette infinite soluzioni, per ogni ${}^M\mathbf{f}^w$ assegnato; tra di esse, quella a norma euclidea minima può essere valutata per mezzo della seguente espressione:

$$\mathbf{p}_{\min} = \tilde{\mathbf{J}}^+ \cdot {}^M\mathbf{f}^w = \tilde{\mathbf{J}}^+ \cdot (-{}^M\mathbf{f}^w) = [\tau_{\min 1} \quad \tau_{\min 2} \quad \tau_{\min 3}]^T \quad (5.31)$$

dove con $\tilde{\mathbf{J}}^+$ si indica la pseudoinversa della matrice jacobiana e con $\tau_{\min 1}$, $\tau_{\min 2}$ e $\tau_{\min 3}$ le minime tensioni che occorre generare nei cordini al fine di garantire l'equilibrio statico della maniglia.

La soluzione generale della (5.30) è la seguente:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\min} + \mathbf{p}^* \quad (5.32)$$

dove con $\mathbf{p}^*$ si indica un vettore appartenente al nucleo di $\tilde{\mathbf{J}}$, ossia tale per cui:

$$\mathcal{N}_{\tilde{\mathbf{J}}} \mathbf{p}^* = 0 \quad (5.33)$$

È importante ricordare che se $\mathbf{p}^*$ appartiene al nucleo di $\tilde{\mathbf{J}}$, allora vi appartiene anche $c \cdot \mathbf{p}^*$, per qualunque valore reale della costante c .

Questo significa che le infinite soluzioni della (5.30) si ottengono facendo variare il coefficiente c nella seguente equazione:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\min} + c \cdot \mathbf{p}^* \quad (5.34)$$

Nonostante si sommi $c \cdot \mathcal{P}^*$ alla $\mathcal{P}_{\min}$, la risultante ${}^M\mathcal{P}$ che si ottiene sostituendo la (5.34) nella (5.27) è sempre la stessa.

Avendo a che fare con dei cordini (attuatori unidirezionali), le tensioni calcolate con la (5.34) (componenti del vettore $\mathcal{P}$) devono essere tutte positive; inoltre, come nel caso del banco prova ad un grado di libertà, si pretende che ciascuna di esse risulti maggiore o uguale ad una soglia minima $\tau_{\inf}$ (per esempio 5N):

$$\mathcal{P} \geq \tau_{\inf} \quad (5.35)$$

Collocata la maniglia in una certa posizione ed imposta una certa risultante di forze esterne, i vettori $\mathcal{P}_{\min}$ e $\mathcal{P}^*$ risultano univocamente determinati, per cui l'unico parametro sul quale si possa agire per soddisfare in tali condizioni la (5.35) è rappresentato dal coefficiente c . È però assolutamente necessario che tutte le componenti del vettore $\mathcal{P}^*$ risultino strettamente positive affinché si possa disporre di un $c \cdot \mathcal{P}^*$ strettamente positivo da sommare a $\mathcal{P}_{\min}$. Sostituendo il segno di disuguaglianza della (5.35) con il segno di uguaglianza, si giunge alla determinazione di tre coefficienti (c_1 , c_2 e c_3):

$$\begin{cases} \tau_{\min 1} + c_1 \cdot \tau_1^* = \tau_{\inf} \\ \tau_{\min 2} + c_2 \cdot \tau_2^* = \tau_{\inf} \\ \tau_{\min 3} + c_3 \cdot \tau_3^* = \tau_{\inf} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} c_1 = \frac{\tau_{\inf} - \tau_{\min 1}}{\tau_1^*} \\ c_2 = \frac{\tau_{\inf} - \tau_{\min 2}}{\tau_2^*} \\ c_3 = \frac{\tau_{\inf} - \tau_{\min 3}}{\tau_3^*} \end{cases} \quad (5.36)$$

Il coefficiente c sarà il massimo tra c_1 , c_2 e c_3 . A questo punto si può calcolare il vettore $\mathcal{P}$ ed il problema di statica inversa è quindi risolto.

Schema Simulink

Gli algoritmi di controllo presentati in precedenza, insieme ai blocchi riguardanti gli oggetti virtuali, a quelli recanti la geometria del sistema ed a quelli di interfaccia con le schede ed il software dSpace, sono stati tutti implementati in ambiente Simulink ed

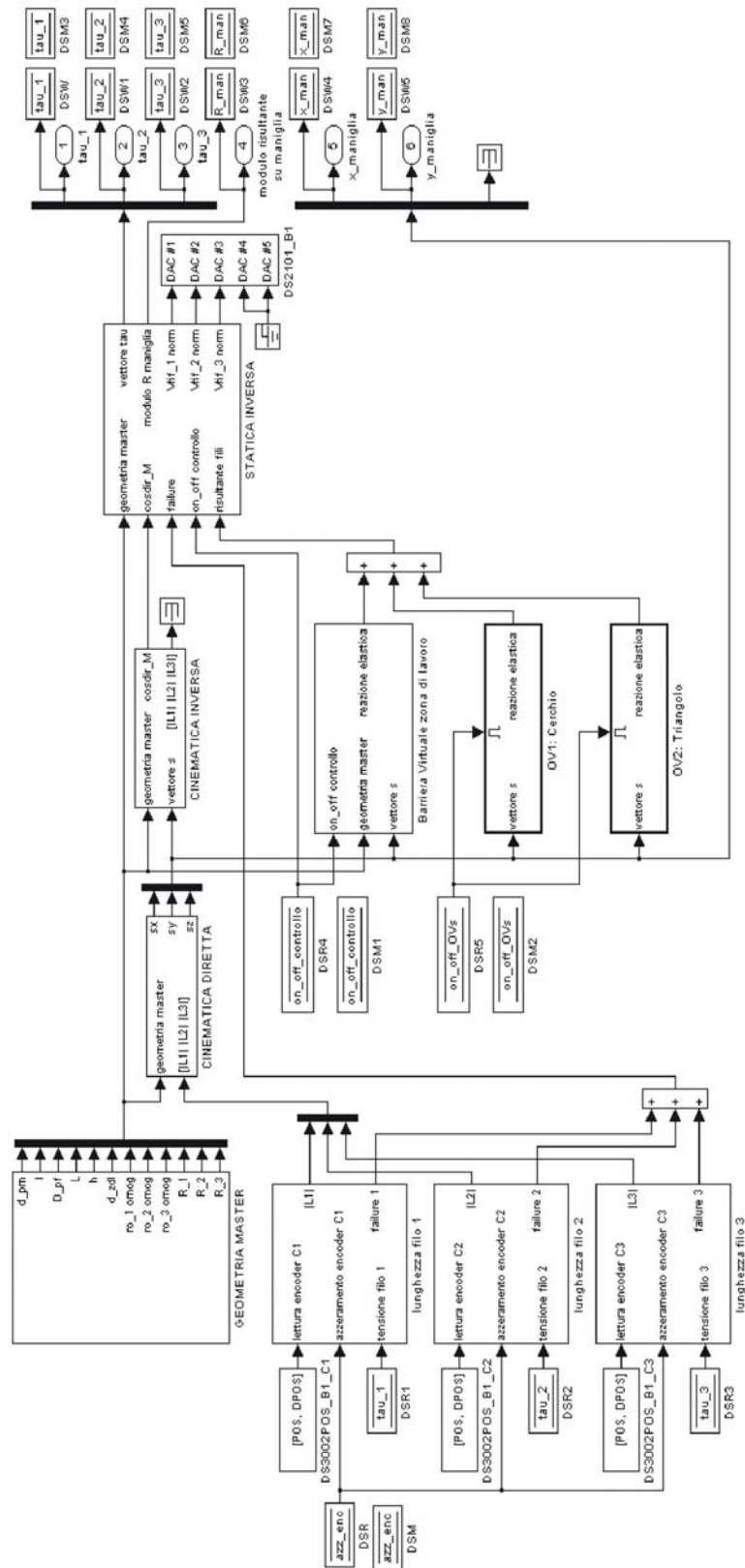


Figura 5-7 Modello Simulink per il controllo real-time del master a due gradi di libertà schema 1

Prove su banco

Le prove eseguite sul prototipo del master a due gradi di libertà hanno avuto lo scopo di verificare il funzionamento della struttura meccanica del master, valutando la bontà delle scelte progettuali effettuate, provando la correttezza degli algoritmi di controllo tramite i quali viene gestito il comportamento del master.

Le prove effettuate sono state di tipo qualitativo, cioè è stato verificato che l'operatore sentisse sulla mano ciò che era previsto dall'algoritmo di controllo, in particolare: forza risultante nulla laddove non ci sono oggetti virtuali, e forze proporzionali alla rigidità del corpo virtuale, con direzione opportuna, in caso penetrazione di uno di essi.

Nella campagna di prove è stata effettivamente verificata l'assenza di problemi di funzionamento dovuti ad errori nella struttura del master.

Il movimento della maniglia secondo i due gradi di libertà previsti avviene infatti agevolmente, inoltre i cordini vengono guidati dai sistemi di rinvio e sono in grado di trasmettere alla maniglia la tensione impressa loro dai motori tramite i tamburi di avvolgimento.

Le osservazioni qualitative riportate permettono di affermare che le soluzioni costruttive adottate per il prototipo a due gradi di libertà sono corrette ed è perciò possibile trarne spunto nella progettazione del master a cordini a sei gradi di libertà.

Analizzando il comportamento del prototipo durante il funzionamento si osserva che prima dell'operazione di azzeramento i cordini sono tenuti in tensione dai motori durante il movimento della maniglia da parte dell'operatore ma esercitando su di essa una forza risultante a priori sconosciuta, ma comunque bassa.

In seguito all'operazione di zero assi viene visualizzato sullo schermo del PC un punto verde in posizione corrispondente al riscontro fisso.

Portando la maniglia all'interno dello spazio di lavoro appare sullo schermo una linea verde data dall'insieme dei punti occupati dalla maniglia stessa durante il suo moto.

Attivando quindi il controllo, tramite il *checkbox* presente sulla schermata del programma di interfaccia delle schede dSpace relativo alla simulazione in corso, viene attivata la barriera virtuale posta al confine dello spazio di lavoro. Portando la maniglia in un punto del confine dello spazio di lavoro l'operatore avverte una forza repulsiva

che impedisce alla maniglia di uscire dallo spazio di lavoro stesso, il cui modulo è visualizzato nel riquadro della schermata denominato “forza barriera” (figura 5-8).

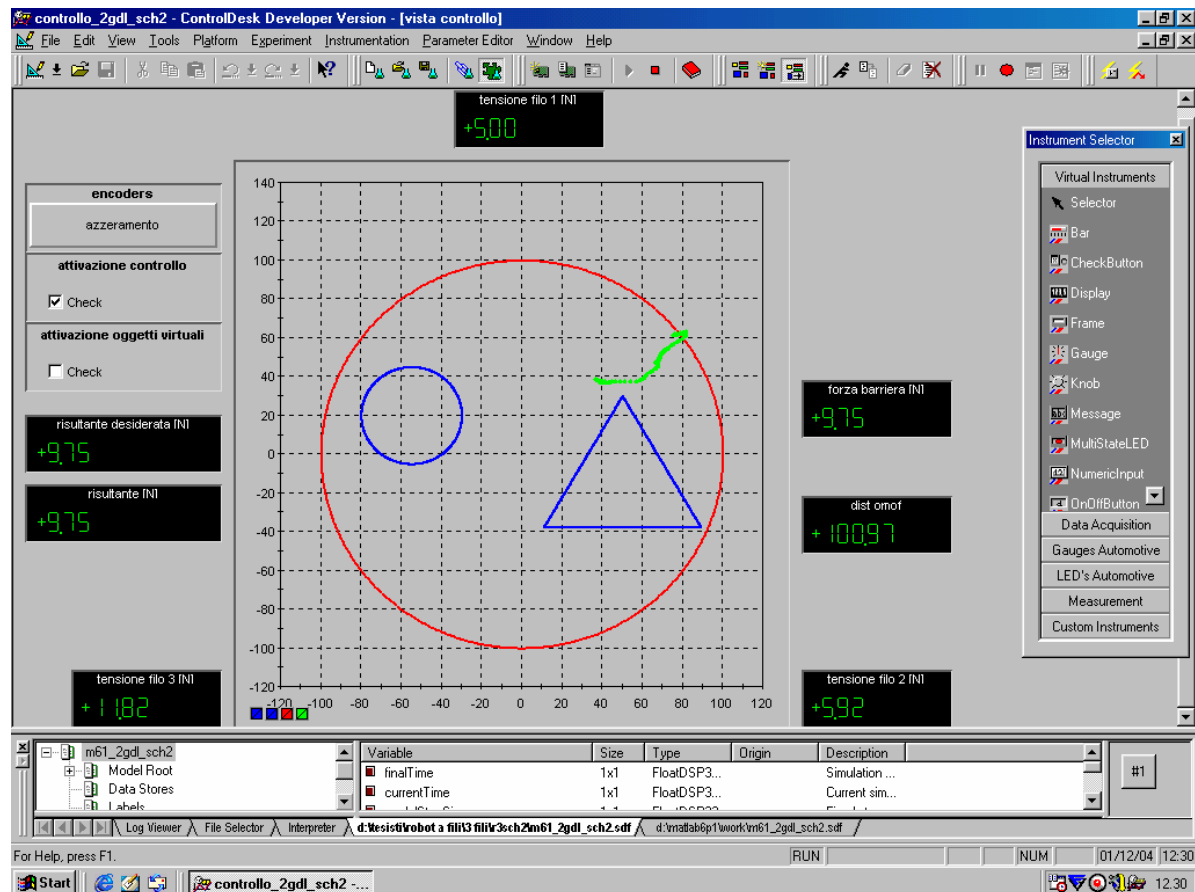


Figura 5-8 Schermata del software di controllo con il percorso effettuato dalla maniglia

È inoltre possibile far percorrere alla maniglia l'intero perimetro della barriera virtuale e verificare perciò il suo funzionamento in ogni punto (figura 5-9).

Infine attivando gli oggetti virtuali, tramite l'apposito *checkbox*, si verifica la presenza di una forza risultante diretta verso l'esterno dell'oggetto virtuale qualora la maniglia sia portata a contatto dello stesso.

Anche in questo caso è possibile verificare il funzionamento dell'oggetto virtuale in esame in ciascuno dei punti costituenti il suo perimetro muovendo la maniglia lungo quest'ultimo, come si può notare dalle figure 5-9 e 5-10, nelle quali l'operatore ha cercato di seguire il profilo dell'oggetto come percepito al tatto, senza ausili visuali, riuscendovi in modo più che adeguato.

Si può perciò affermare che gli algoritmi di controllo del prototipo a due gradi di libertà sono corretti e consentono un buon funzionamento del master stesso, a meno dell'effetto del ripple di coppia dei motori, che comunque è sempre avvertibile, come detto anche nel capitolo 4.

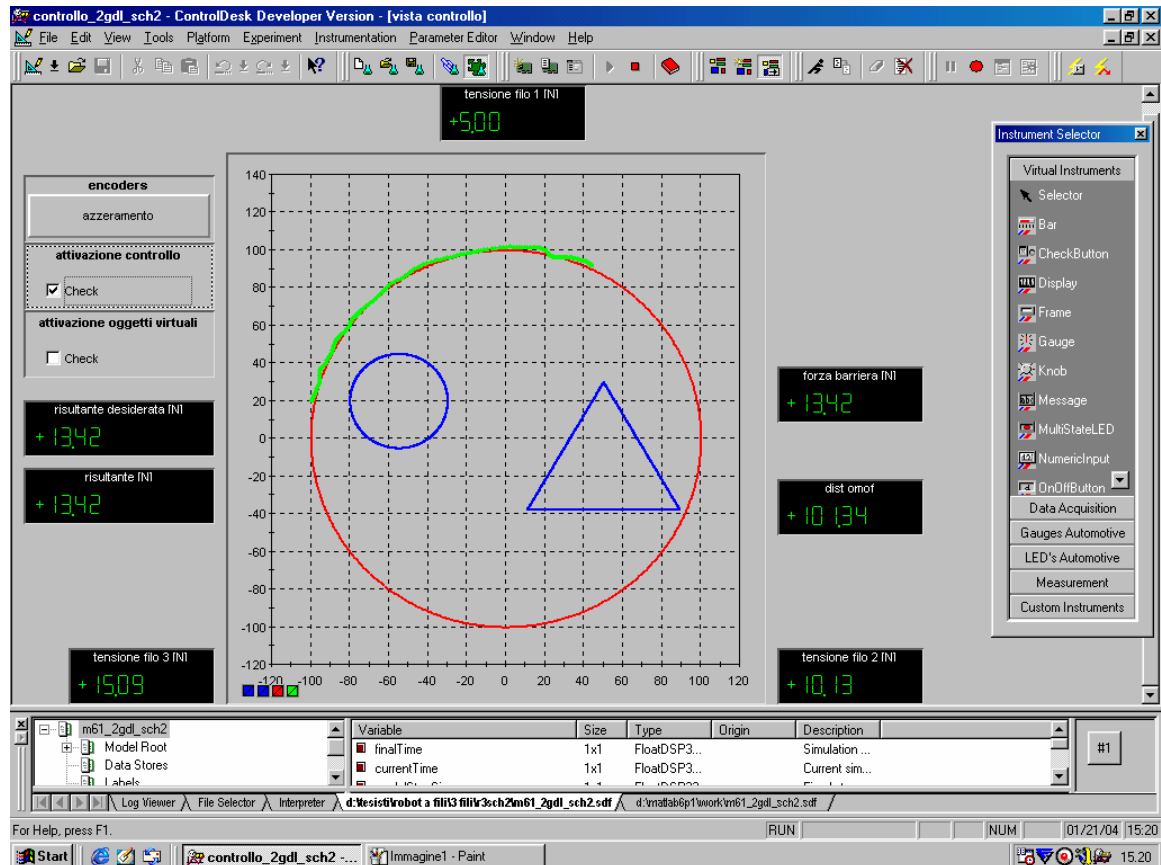


Figura 5-9 Schermata del software di controllo con il percorso effettuato dalla maniglia

5. Master a due gradi di libertà

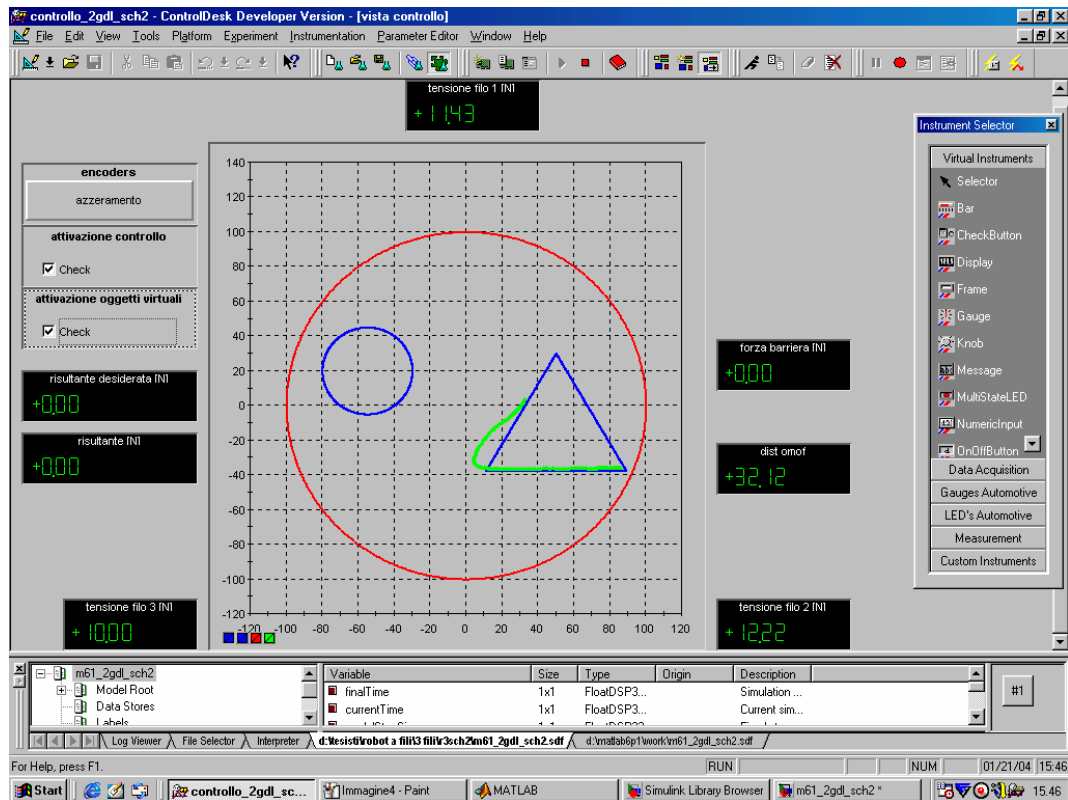


Figura 5-10 Schermata del software di controllo con il percorso effettuato dalla maniglia

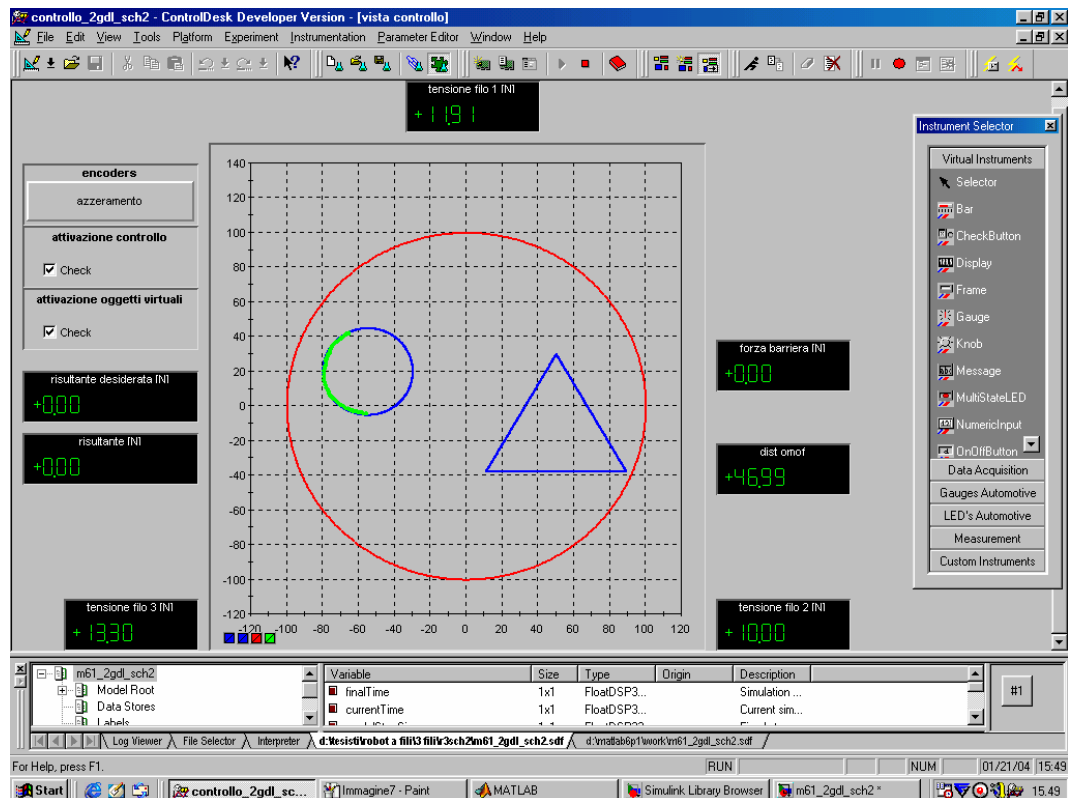


Figura 5-11 Schermata del software di controllo con il percorso effettuato dalla maniglia

6. Master a sei gradi di libertà: WiRo-6.3

6.a. Progettazione meccanica

Secondo quanto descritto nel capitolo 2 e grazie alle informazioni raccolte sulle strutture ad uno e due gradi di libertà, sono stati scelti i criteri ed i componenti funzionali per la struttura a sei gradi di libertà, denominata come detto WiRo-6.3. Le figure 6-1, 6-2, 6-3 e 6-4 mostrano il progetto rispettivamente in una vista generica, in una vista laterale, in una frontale ed in una posteriore. Con riferimento in particolare alla figura 6-1, si evidenziano alcuni componenti meccanici, in dettaglio:

- la piattaforma mobile con la maniglia e gli attacchi dei cordini;
- i passanti dei cordini montati sulle basi fisse;
- gli ulteriori rinvii dei cordini;
- il basamento con i motori ed i rocchetti sui quali si avvolgono i cordini.

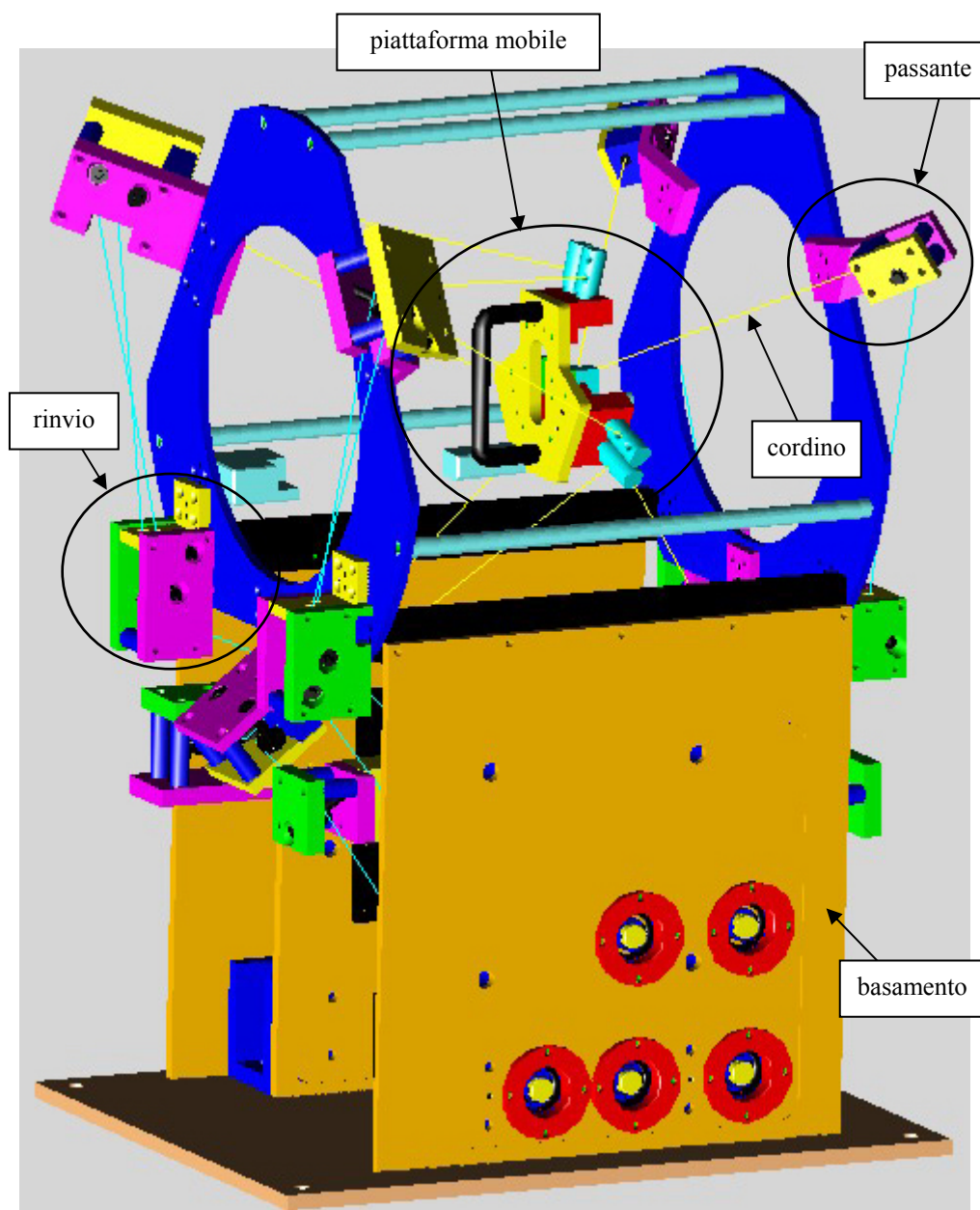


Figura 6-1 *Vista tridimensionale del progetto del master WiRo-6.3*

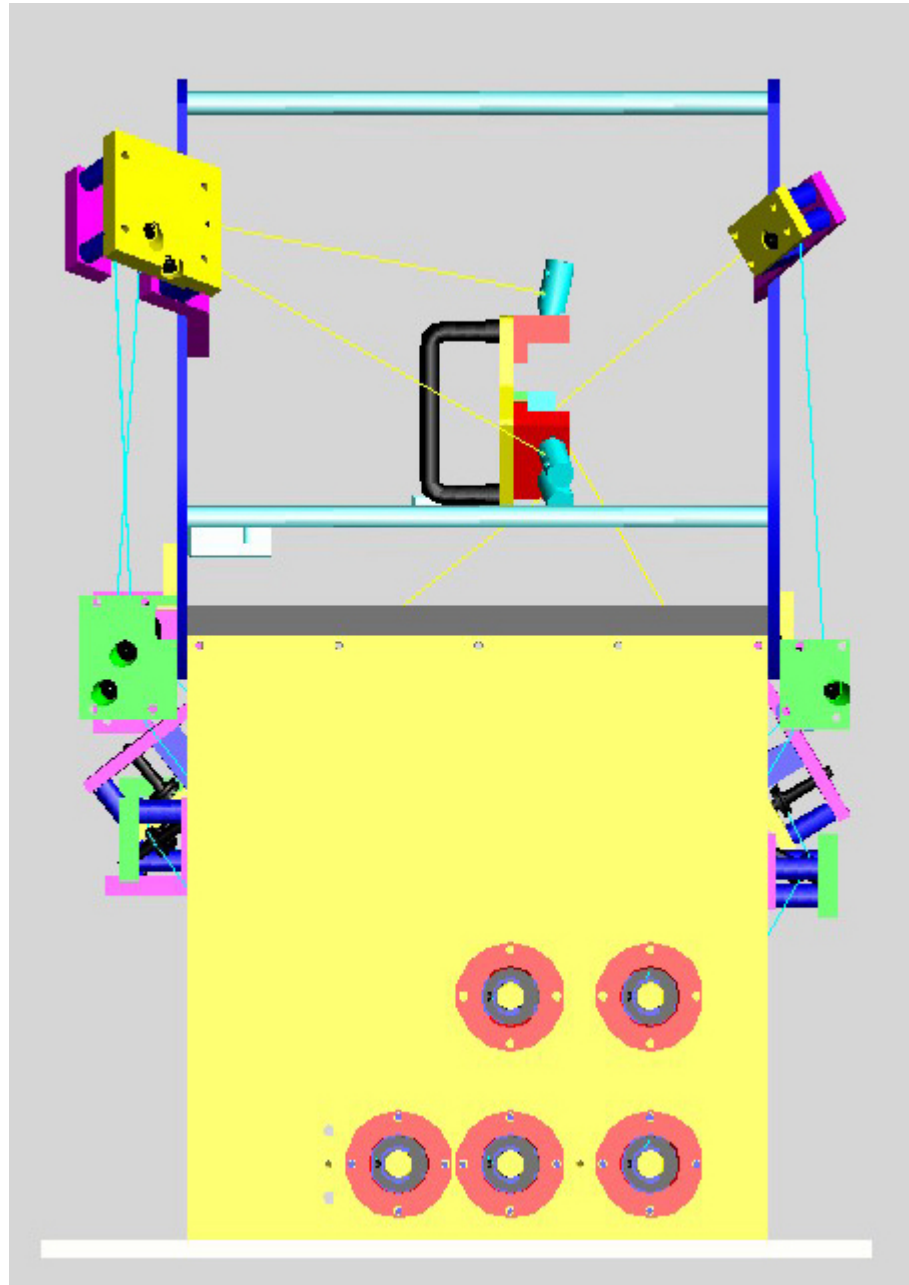


Figura 6-2 *Vista laterale del progetto del master WiRo-6.3*

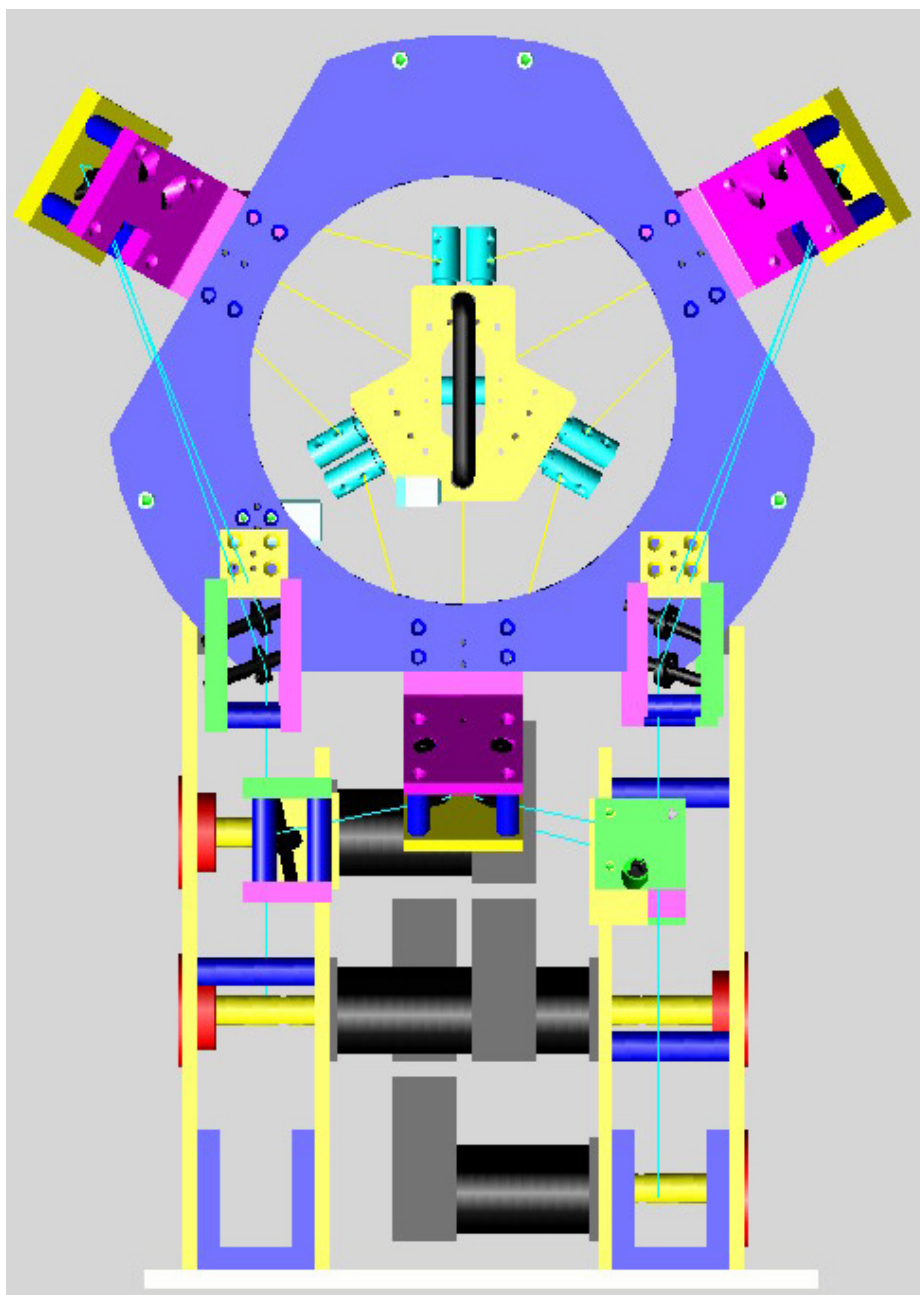


Figura 6-3 Vista frontale del progetto del master WiRo-6.3

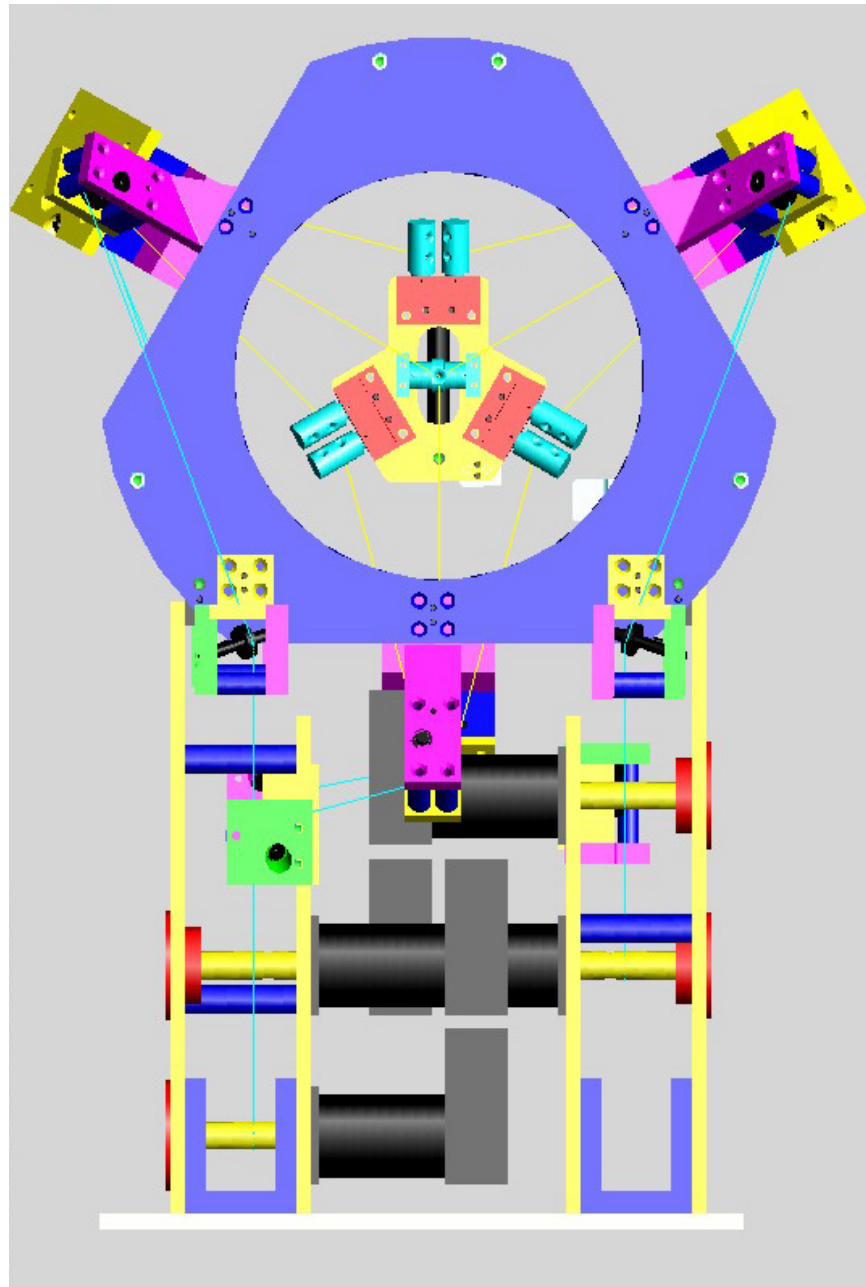


Figura 6-4 Vista posteriore del progetto del master WiRo-6.3

In figura 6-5 è rappresentata una vista parzialmente “esplosa” del master per meglio identificare i singoli gruppi funzionali che lo compongono.

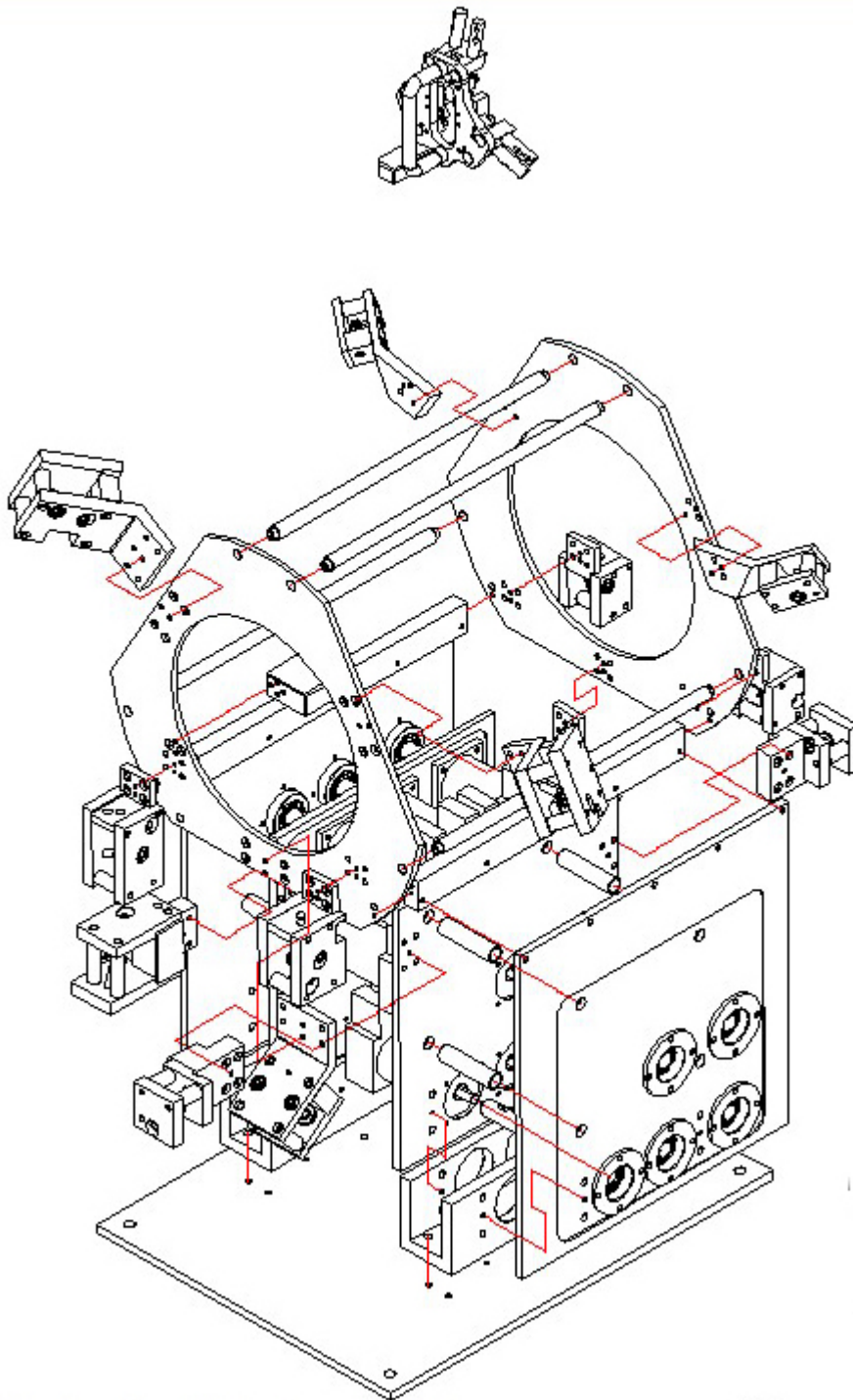


Figura 6-5 Vista esplosa del progetto del master WiRo-6.3

Nel seguito saranno presentate e descritte le soluzioni meccaniche adottate per la realizzazione del master aptico a cordini a sei gradi di libertà WiRo-6.3.

I percorsi dei cordini

Grazie agli studi teorici esposti nel capitolo 2, è stata stabilita una zona di lavoro che è un sottoinsieme dello spazio di lavoro calcolato, analogamente al caso del master a due gradi di libertà. Nello spazio tridimensionale, la zona di lavoro è una sfera di diametro 180mm, della quale è stato stabilito il centro in modo opportuno; le rotazioni ammesse per la piattaforma mobile sono di $\pm 30^\circ$ intorno ad un asse qualunque. La posizione centrata della maniglia è quella rappresentata nelle figure precedenti.

La posizione di centro è stata utilizzata anche come riferimento per il percorso dei cordini, che si discostano da tale condizione di un angolo massimo di 18° : sono state così determinate le direzioni degli assi dei passanti.

Il percorso dai passanti ai motori, invece, è stato stabilito tenendo debito conto di una serie di vincoli:

- ciascun cordini deve giungere tangente al rocchetto sull'albero motore all'interno di un dato piano perpendicolare all'asse del motore stesso (per evitare cattivi posizionamenti del cordini);
- ogni percorso deve essere di lunghezza fissa poiché il tratto di cordini dal passante agli attacchi viene calcolato in base alla lettura dell'encoder motore;
- i cordini devono essere rinviati il minor numero di volte possibile, per semplificare la struttura;
- i percorsi non devono interferire tra loro né con le zone nelle quali deve manovrare l'operatore;
- i metodi di rinvio dei cordini devono presentare attrito il più basso possibile per non inficiare la trasmissione delle forze dal motore alla piattaforma mobile.

Ciascun rinvio è stato effettuato mediante pulegge, montate su cuscinetti a sfera per minimizzare l'attrito. Ogni puleggia è in grado di far variare la direzione di un cordini all'interno del piano perpendicolare all'asse della puleggia stessa; pertanto, considerando che il cordini esce dal rocchetto motore all'interno di un dato piano, dovendo infine giungere all'inserto del passante con una data direzione, ne risulta che sono necessarie due pulegge per ciascun cordini per fargli compiere il percorso desiderato. La prima puleggia fa parte della struttura del passante, come già detto nel paragrafo 3.c., mentre la seconda di ciascun percorso verrà installata in un gruppo detto rinvio.

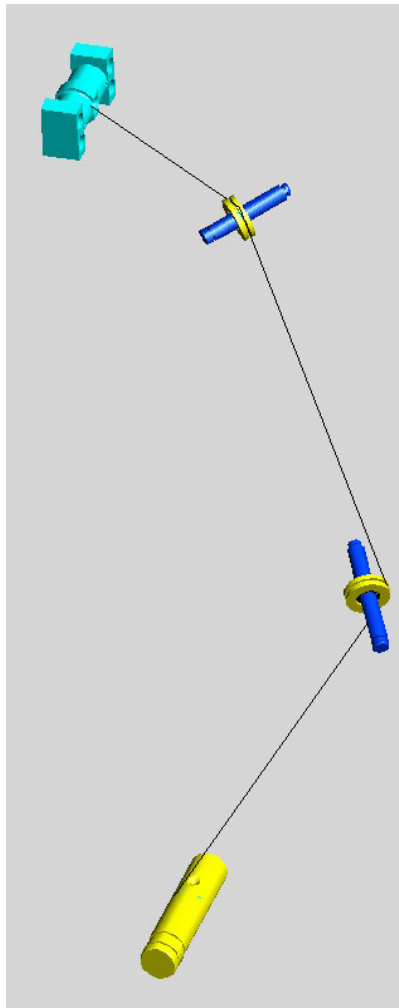


Figura 6-6 Percorso di un cordino

Da un punto di vista operativo, quindi, ciascun percorso è stato progettato disegnando tre segmenti: il primo tangente al rocchetto ed appartenente al piano stabilito, l'ultimo uscente dall'inserto del passante secondo la direzione assiale, ed il secondo congiungente gli altri due in modo da collocarsi in una zona poco fastidiosa per l'operatore e vicina al resto della struttura.

In questo modo è stato determinato, conseguentemente, il posizionamento delle pulegge, ciascuna presso il punto di giunzione tra due segmenti. In particolare, l'asse della puleggia è perpendicolare al piano contenente entrambi i segmenti, e la puleggia è tangente sia all'uno che all'altro.

In figura 6-6 è visibile in prospettiva il percorso di uno dei cordini dall'attacco fisso sulla piattaforma mobile, in alto, fino al rocchetto sull'albero motore, in basso. Seppur con le difficoltà imposte dalla rappresentazione, si possono vedere i tre segmenti che rappresentano il percorso e le pulegge. Si noti che queste ultime sono

orientate in modo diverso l'una dall'altra per permettere gli opportuni cambiamenti di direzione del cordino.

Si sottolinea infine che nelle viste della struttura complessiva, frontale (figura 6-3) e posteriore (figura 6-4), a testimoniare quanto detto in precedenza, i cordini che si dipartono dai rocchetti sono tutti appartenenti a due piani, uno sul lato destro ed uno sul lato sinistro, in corrispondenza dei motori che si affacciano verso ciascun lato.

La piattaforma mobile

La piattaforma mobile è rappresentata in figura 6-7. I suoi elementi principali sono:

- la maniglia che viene afferrata dall'operatore;
- sei attacchi singoli per altrettanti cordini;
- un attacco per i tre cordini convergenti, dall'altro lato della piattaforma;

- un blocchetto con tre superfici di riferimento per l'esecuzione dello zero-assi.

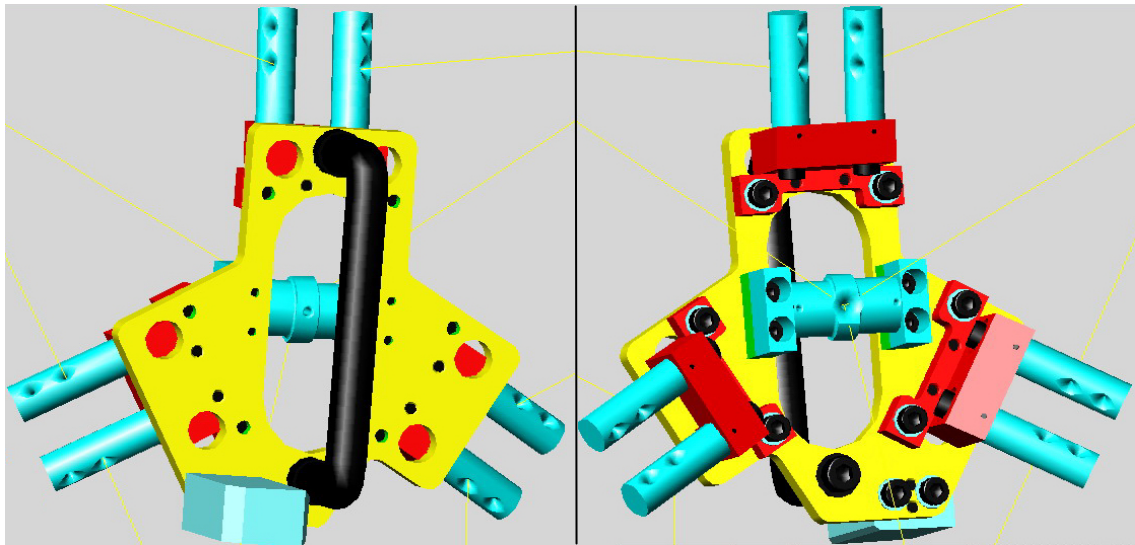


Figura 6-7 Due viste della piattaforma mobile

La piattaforma mobile è stata progettata cercando di far sì che fosse leggera per quanto possibile, ferma restando l'esigenza resistere alle forze massime esercitate da ciascuno dei cordini. Pertanto è stata scaricata ovunque non vi fosse necessità di collegamenti meccanici con altri particolari, ed inoltre è stata pensata costituita interamente di alluminio.

Gli attacchi singoli sono orientati in modo da assecondare la direzione che il cordino assume nelle condizioni di piattaforma centrata nella zona di lavoro. Essi sono dotati di due fori radiali, uno per l'entrata del cordino, che viene poi avvolto intorno alla parte cilindrica scaricando la forza per attrito, per poi entrare nell'altro foro ed essere annodato.

L'attacco triplo presenta invece un foro, più ampio dei precedenti, nel quale entrano tre cordini, i quali si avvolgono poi sulla parte cilindrica dell'attacco, rientrano in due diversi fori radiali e vengono infine fissati mediante nodi.

Il blocchetto per lo zero-assi è un parallelepipedo opportunamente sagomato, che deve accoppiarsi con un blocchetto complementare montato su una base fissa (figura 6-8), allo scopo di determinare univocamente la posizione e l'orientamento della piattaforma e quindi azzerare le letture dei nove encoder, in modo che da quel momento in poi possa essere precisamente nota la posizione della piattaforma mobile.

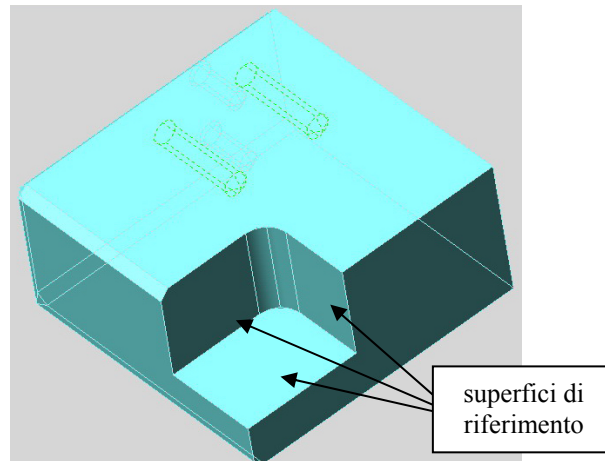


Figura 6-8 Blocchetto fisso di riscontro per l'esecuzione dello zero-assi

Passanti e rinvii

I passanti sono stati costruiti come indicato nel paragrafo 3.c., sia per quanto riguarda gli inserti sia per le pulegge, con la differenza che le orientazioni degli assi dipendono dal percorso che si vuole imporre al cordino.

I rinvii sono strutturati in modo del tutto analogo, anche se non sono dotati degli inserti ma solo delle pulegge, pertanto sono stati qui accomunati nella trattazione.

In fase di progetto si è incontrata una problematica dovuta alla vicinanza a due a due dei punti fissi dei cordini dal lato dell'operatore, pertanto sono state studiate e progettate soluzioni specifiche che permettessero di avere due passanti in un unico blocco meccanico. Analogamente è stato fatto per i rinvii.

Due esempi di tale soluzione sono rappresentati nel seguito: in figura 6-9, un passante doppio con relativi inserti; in figura 6-10, un rinvio doppio. In entrambe le soluzioni le due pulegge ruotano intorno ad assi sghembi per direzionare il cordino come desiderato. Si noti la similitudine concettuale e strutturale tra i due diversi componenti.

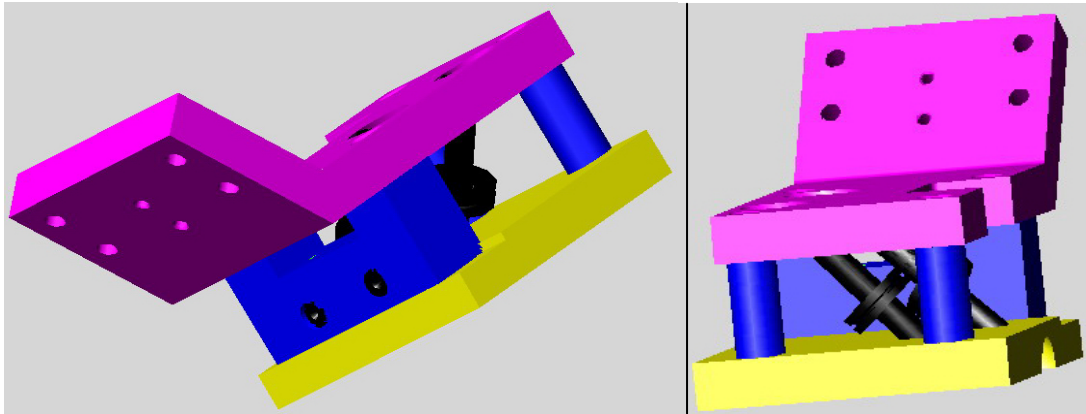


Figura 6-9 *Viste di un passante doppio*

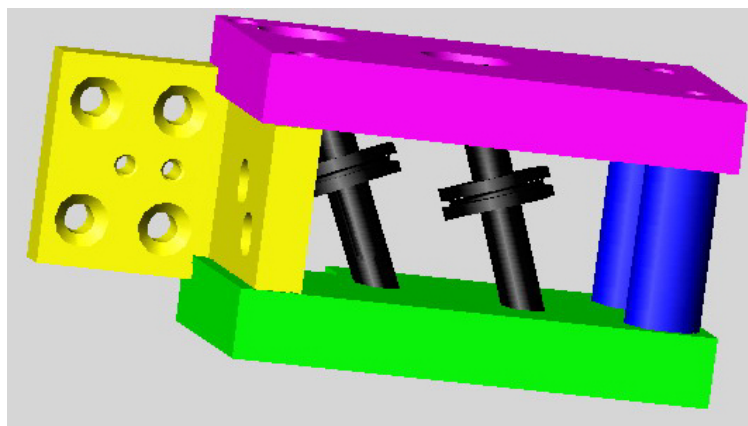


Figura 6-10 *Vista di un rinvio doppio*

Gruppo motore

Come si può notare nelle figure da 6-1 a 6-4, i nove motori sono stati disposti in modo che si affacciassero cinque da un lato e quattro dall'altro, sia per semplificare la progettazione dei percorsi dei cordini sia per ottenere una maggiore simmetria. Il singolo gruppo motore è rappresentato in figura 6-11. Si possono notare:

- il motore;
- il rocchetto, calettato sull'albero motore;
- una flangia di fissaggio che contiene un cuscinetto di supporto del rocchetto.

Il motore viene fissato al basamento mediante la propria flangia; l'ulteriore flangia, sulla quale è montato un ulteriore supporto per il rocchetto, è a sua volta fissata sulla seconda ala del basamento.

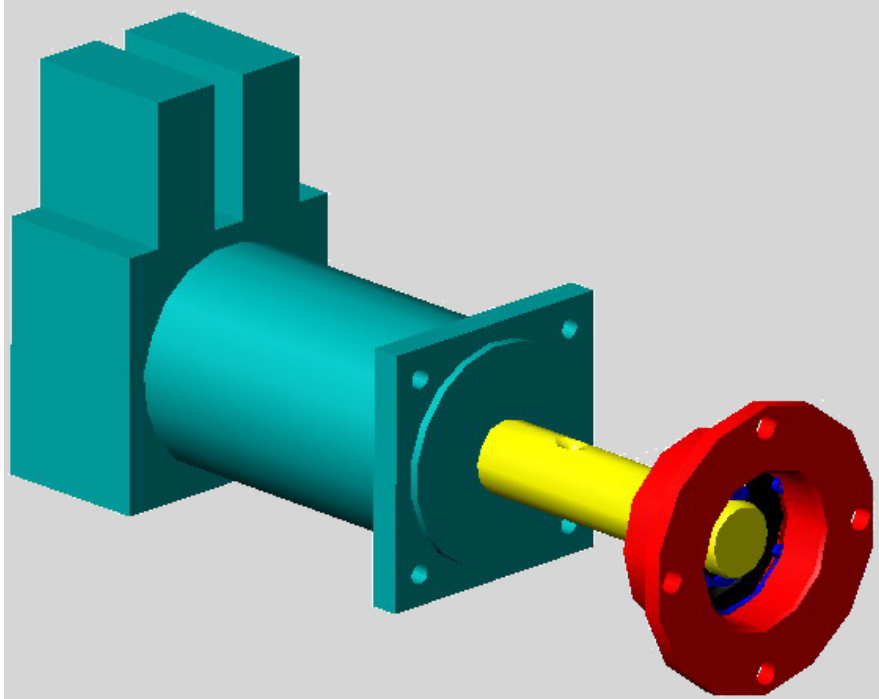


Figura 6-11 Vista del gruppo motore

6.b. Il controllo

Il controllo del master a cordini WiRo-6.3 è stato concepito sfruttando gli algoritmi presentati nel capitolo 2, in particolare per quanto riguarda la cinematica e la statica.

È stato realizzato un modello Simulink contenente tutti i blocchetti necessari all'esecuzione dei compiti del master, prevedendo inoltre le fasi di avvio del sistema, zero-assi ed eventuale emergenza. Per far ciò sono stati stabiliti quattro stati distinti in cui il sistema master si può trovare:

- *failure*, o emergenza;
- azzeramento assi;
- *warm-up*, ossia una fase transitoria prima del funzionamento normale;
- funzionamento normale.

A ciascuno di questi stati corrisponde un funzionamento diverso del sistema, cioè una serie di parametri che agiscono in modo differente sulla tensione dei cordini e sugli altri parametri del sistema.

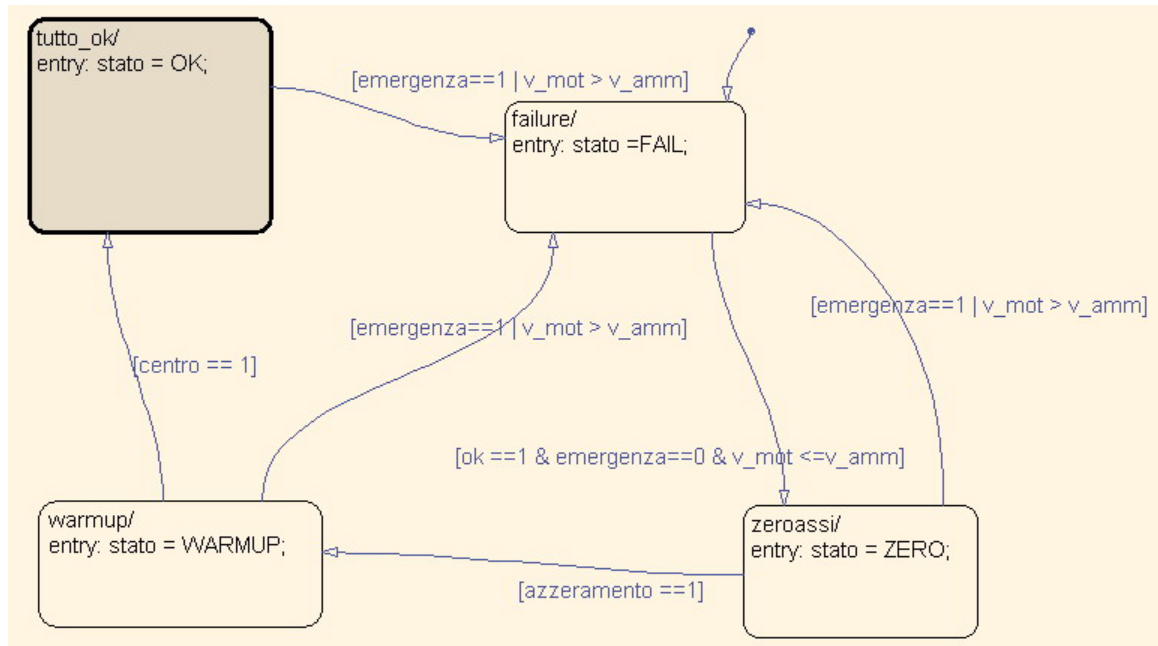


Figura 6-12 Modello degli stati del sistema

In figura 6-12 è rappresentato il modello degli stati del sistema. Si possono notare i quattro stati sopra descritti, denominati rispettivamente *failure*, *zeroassi*, *warmup* e *tutto_ok*. Le frecce tra gli stati rappresentano le transizioni dall'uno all'altro e le corrispondenti regole.

All'avvio del sistema, lo stato iniziale è di *failure* per evitare che qualunque possibile problema pregresso si possa manifestare. In tale stato tutti i motori sono spenti e i relativi freni attivati. Dallo stato di *failure* si può passare all'azzeramento degli encoder (*zeroassi*), procedura necessaria per poter controllare efficacemente il master. Tale passaggio viene effettuato dall'operatore che deve fornire un consenso esplicito premendo su un apposito pulsante (che apparirà a video).

Durante tale procedura, il sistema non conosce ancora la posizione della maniglia, pertanto impone un piccolo pretensionamento di 5N a ciascun cordino, per far sì che rimangano tutti tesi. L'operatore porta il blocchetto di zero-assi della maniglia a combaciare con il blocchetto complementare montato sulla base fissa. Completata tale operazione, dà il consenso all'azzeramento degli encoder, facendo sì che il sistema possa conoscere la posizione e l'orientamento della maniglia. In questo modo si passa alla fase successiva di *warm-up*.

Essa permette di passare gradualmente al funzionamento normale, considerato che la posizione di zero-assi è esterna alla zona di lavoro, pur appartenendo allo spazio di lavoro. L'operatore deve portare la maniglia in una zona più centrale, dare un ulteriore consenso, dopodiché il sistema attiva il controllo vero e proprio e la riflessione di forza, passando alla fase "tutto_ok" che rappresenta il funzionamento normale.

Si noti che durante ogni fase vengono verificati continuamente i valori di velocità angolare dei motori; se si supera la velocità ammissibile può significare che c'è un problema, ad esempio può essersi rotto un cordino ed il motore, cercando di inseguire il riferimento di coppia, sta andando in fuga. In questo caso il sistema va automaticamente in failure, frenando immediatamente tutti i motori ed arrestando il sistema. La stessa operazione viene effettuata se in qualunque momento l'operatore o chi per lui preme il pulsante di emergenza.

Il modello del sistema si integra quindi con il controllore dei suoi stati, secondo quanto visibile in figura 6-13, che rappresenta il modello Simulink nella sua interezza.

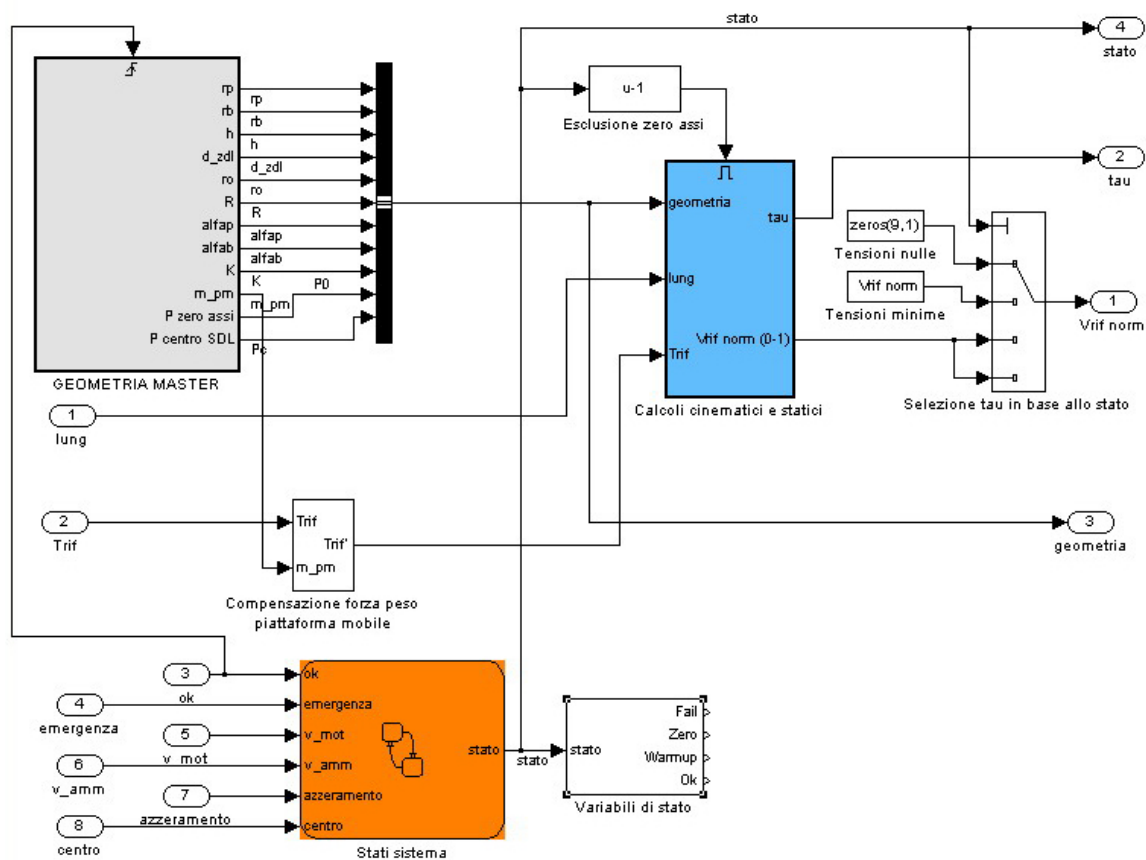


Figura 6-13 Modello Simulink complessivo

Tale modello dovrà essere successivamente integrato con una opportuna interfaccia grafica realizzata sul software delle schede dSpace, analogamente a quanto fatto per il master a due gradi di libertà (paragrafo 5.d.). In figura 6-13, si può riconoscere il blocco delle variabili geometriche del sistema, che sono modificabili e quindi adattabili a strutture diverse.

Vi è poi il blocco che tiene conto della forza peso della piattaforma mobile, e la compensa sommandola cambiata di segno alla forza di riferimento. Inoltre si vede il blocco che seleziona e controlla gli stati del sistema.

Infine si vede il blocco relativo ai calcoli cinematici e statici, che permette di calcolare i segnali in tensione elettrica che devono essere inviati istante per istante agli azionamenti per ottenere le forze generalizzate desiderate sulla maniglia. Quest'ultimo blocco è rappresentato con maggiore dettaglio in figura 6-14.

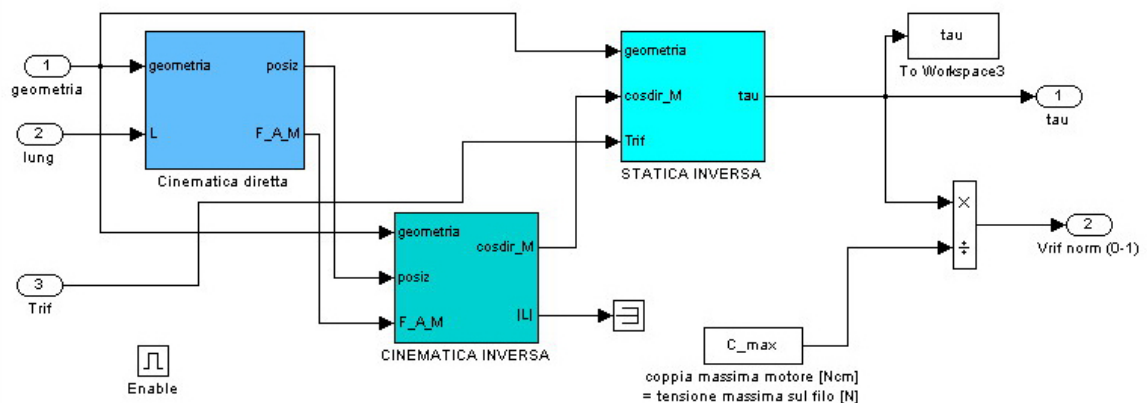


Figura 6-14 *Cinematica e statica*

Si riconoscono i blocchi di cinematica diretta, inversa e di statica inversa, scritti come indicato nel capitolo 2.

7. Conclusioni

Nella presente tesi di dottorato è stata presentata una particolare tipologia di master per teleoperazione, ossia le strutture parallele azionate mediante cordini. In particolare si è proceduto per gradi assemblando i tasselli concettuali della ricerca, avanzando in un ordine di crescente complessità.

Innanzitutto, si è fornita una panoramica sulla teleoperazione in generale e sulle strutture parallele a cordini, evidenziando come queste ultime fossero adatte per tali compiti grazie alle loro caratteristiche intrinseche.

È stato quindi presentato l'obiettivo finale della ricerca oggetto della presente tesi, cioè la ricerca di un master per teleoperazione a sei gradi di libertà, con struttura parallela, azionato a cordini, in grado di fornire una riflessione di forza sulla mano dell'operatore. In una prima fase di studio la struttura è stata analizzata nelle sue linee più essenziali mediante la schematizzazione di geometrie ideali, in modo da discernere quale fosse la scelta migliore della quantità di cordini da adottare, della loro collocazione rispetto alla piattaforma mobile e rispetto alle basi fisse e così via. Individuate le caratteristiche chiave del progetto, è stata schematizzata una struttura a nove cordini, con una disposizione opportuna, grazie alla quale sono stati ottenuti importanti risultati preliminari, tra i quali si ricordano l'ampio spazio di lavoro, sia di posizione sia di orientamento, l'assenza di punti singolari all'interno dello stesso, la risolvibilità in forma chiusa del problema cinematico diretto ed inverso, il buon equilibrio statico della struttura. Tale struttura è stata denominata WiRo-6.3.

Nella fase successiva della ricerca si è dunque cercato di identificare il modo più opportuno di trasporre gli schemi ideali in un progetto realizzabile, pertanto è stata scelta la sensorizzazione più adatta per realizzare la strategia di controllo prescelta. Inoltre sono state effettuate ricerche sui componenti commerciali da utilizzare, in dettaglio i motori ed i cordini, estendendo quindi il cuore del progetto ai suoi componenti funzionali. Particolare attenzione è stata posta alla problematica del rinvio dei cordini dai loro attacchi ai rocchetti sui motori, in quanto la metodologia scelta doveva essere il meno influente possibile sulle variabili statiche e cinematiche del sistema.

Allo scopo di provare separatamente e per gradi ciascuna delle soluzioni adottate, eventualmente attuando migliorie al progetto nelle fasi preliminari, è stato realizzato un banco prova ad un singolo grado di libertà, con un motore elettrico cui è collegato un cordino agente in contrapposizione con una molla lineare. Grazie a tale banco è stata provata la versione più semplificata dell'algoritmo di controllo e l'interazione con gli "oggetti virtuali", con il risultato non secondario di impratichirsi con le schede di acquisizione ed il relativo software. Inoltre è stato così possibile accertarsi del funzionamento del motore, e riscontrare il grave fenomeno indesiderato delle oscillazioni periodiche della coppia. Si è dunque cercato di controllare e compensare tale aspetto negativo, ma allo stato attuale non sono stati ottenuti risultati soddisfacenti.

Successivamente è stato progettato e costruito un master a due gradi di libertà azionato da tre cordini, che implementa molte delle caratteristiche pensate per il master WiRo-6.3. In particolare, sono stati realizzati conformemente al progetto finale tutti i particolari relativi al percorso dei cordini, cioè gli attacchi sulla piattaforma mobile (realizzati in due versioni alternative), i passanti (con relativi inserti e pulegge) e i rocchetti fissati sugli alberi dei motori. Sono stati studiati e realizzati tutti gli algoritmi di controllo per tale struttura, nonché un programma per la creazione di oggetti virtuali bidimensionali con i quali un operatore può interagire muovendo la maniglia nel piano. Infine, grazie a tale struttura, si sono approfonditi gli aspetti di sicurezza legati alla rottura di un cordino o altre problematiche, acquisendo preziose informazioni per il progetto del master a sei gradi di libertà.

Al termine del percorso di ricerca, si è infine giunti a progettare interamente il sistema master WiRo-6.3, del quale sono state presentate nei dettagli le scelte e le soluzioni

adottate. Inoltre, di tale struttura è stato completamente realizzato il controllo, del quale sono qui stati presentati gli aspetti più essenziali.

Gli aspetti futuri del progetto saranno la realizzazione costruttiva del master a sei gradi di libertà, il collegamento con il relativo controllo, debitamente implementato sulle schede DSP e l'esecuzione di una campagna di prove volta a verificare l'appropriato funzionamento del sistema, utilizzando un robot slave oppure creando un ambiente di manipolazione virtuale, analogo a quanto già realizzato per le strutture a uno e due gradi di libertà.

Bibliografia

- [1] Hollebeek, B., "Robotics and Digital Teleoperation", http://dept.physics.upenn.edu/home/www/public_html/hollebeek/prop/subsection3_8_8.html.
- [2] "Some Technological Background, What Haptic Means, ...", <http://www.haptic.ca/comp/info.html>.
- [3] Smith, C. M., "Human Factors in Haptic Interfaces", <http://www.acm.org/crossroads/xrds3-3/haptic.html>.
- [4] Batsomboon, P., Tosunoglu, S., Repperger, D. W., "A Survey of Telesensation and Teleoperation Technology with Virtual Reality and Force Reflection Capabilities", Florida International University, Department of Mechanical Engineering, Miami, Florida, USA, <http://www1.eng.fiu.edu/me/robotics/elib1/ppr1.html>.
- [5] Arcy, M., "Design of a Single Degree of Freedom 'Mechanical Breadboard' Haptic Display", Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, July 1996, <http://haptic.mech.nwu.edu/library/arcym/master/>
- [6] Mimura, N., Funahashi, Y., "A New Analytical System Applying 6 DOF Parallel Link Manipulator for Evaluating Motion Sensation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.227-233, 1995.
- [7] "Some Background on Teleoperation and Haptic Interfaces", http://www.ee.ubc.ca/~tims/bg_tel.html.
- [8] Hannaford, B., "Introduction to Haptic Display: Teleoperation", <http://www.haptic.ca/comp/info.html>.
- [9] Hwang, D., Y., Hannaford, B., "Teleoperation Performance with a Kinematically Redundant Slave Robot", University of Washington, Electrical Engineering Department, *Submitted to International Journal of Robotics Research*, Jan 97, <http://haptic.mech.nwu.edu/library/hwangdy/IJRR96/>
- [10] "Haptic Interfaces", <http://www2.cs.utah.edu/classes/cs6360/Nahvi/haptic.html>.
- [11] Lawrence, D. A., "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp.624-637, Vol. 9, No. 5, October 1993.

- [12] Hayward, V., Nemri, C., Chen, X., Duplat, B., "Kinematic Decoupling in Mechanisms and Application to a Passive Hand Controller", *Journal of Robotic Systems*, 5(7), pp. 767-790, 1993.
- [13] Kim, W. S., Hannaford, B., Bejczy, A. K., "Force-Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telemanipulators with Time Delay", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp.176-184, Vol. 8, No. 2, April 1992.
- [14] Bryfogle, M. D., Nguyen, C. C., Antrazi, S. S., Chiou, P., "Kinematics and Control of a fully Parallel Force-Reflecting Hand Controller for Manipulator Teleoperation", *Journal of Robotic Systems*, 10(5), pp.745-766, 1993.
- [15] Lee, H., Chung, M. J., "Adaptive Controller of a Master-Slave System for Transparent Teleoperation", *Journal of Robotic Systems*, 15 (8), pp. 465-475, 1998.
- [16] Lee, S., Lee, H. S., "Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control Systems with Short Time Delay", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, October 1993.
- [17] Flemmer, H., Eriksson, B., Wikander, J., "Control Methods for Force Reflective Master Slave Systems", *Mechatronics* 98, pp. 843-848, 1998.
- [18] Adams, R., Hannaford, B., "A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces", *Proc. of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1254-9, Victoria, B.C., 1998, <http://haptic.mech.nwu.edu/library/adamsr/iros98/>.
- [19] Goertz, R. C., "Fundamentals of General-Purpose Remote Manipulators", *Nucleonics*, 10(11) , pp. 36-42, 1952.
- [20] Goertz, R. C., Bevilacqua, F., "A Force-Reflecting Positional Servomechanism", *Nucleonics*, November, 1952.
- [21] Howe, R. D., "A Force-Reflecting Teleoperated Hand System for the Study of Tactile Sensing in Precision Manipulation", *Proc. of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1321-1326, Nice, France, May 1992.
- [22] Fisher, P., Daniel, R., Siva, K. V., "Specification and Design of Input Device for Teleoperation", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.540-545, 1990.
- [23] Haptics Community Web Page, <http://haptic.mech.nwu.edu/library/>
- [24] Goodwin, K., "RoboCrane Construction of Bridges", <http://isd.cme.nist.gov/documents/goodwin/Robocraneconstruction.pdf>.
- [25] Albus, J. S., Bostelman, R. V., Dagalakakis, N. G., "The NIST ROBOCRANE", *Journal of Robotic System*, pp. 709-724, Juillet 1993.
- [26] Bostelman, R., Albus, J., Dagalakakis, N., Jacoff, A., Gross, J., "Applications of the NIST RoboCrane", *Proc. of the 5th International Symposium on Robotics and Manufacturing*, pp. 403-410, Maui, HI, August 14-18, 1994.
- [27] Bostelman, R. V., Jacoff, A., Dagalakakis, N., Albus, J., "RCS-Based RoboCrane Integration", *Proc. Intelligent Systems: A Semiotic Perspective*, Gaithersburg, MD, Oct. 20-23, 1996.

- [28] Bostelman, R. V., Albus, J. S., "Robocrane and Emma Applied to Waste Storage Tank Remediation", *presented at the American Nuclear Society Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Augusta, Georgia, April 27 to May 1, 1997.
- [29] Dagalakakis, N., "Remote Graphic Programming and Monitoring Tools of the NIST RoboCrane Controller", *Proc. of the 1997 Deneb International Simulation Conference & Technology Showcase*, pp. 1-10, Auburn Hills, MI, September 29-October 3, 1997.
- [30] Bostelman, R., Albus, J., Dagalakakis, N., Jacoff, A., "RoboCrane Project: An Advanced Concept for Large Scale Manufacturing", *Association for Unmanned Vehicles Systems International Proceedings.*, Orlando, FL, July 15-19, 1996.
- [31] Kawamura, S., Choe, W., Tanaka, S., Pandian, S. R., "Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON using Wire Drive System", In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 215-220, Nagoya, May 25-27, 1995.
- [32] Merlet, "Les robots à mouvements spatiaux/Spatial robots", <http://www.inria.fr/saga/personnel/merlet/Archi/node2.html>
- [33] Kawamura, S., Ito, K., "A New type of Master Robot for Teleoperation using a Radial Wire Mechanism", *Proc. of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.55-60, Yokohama, Japan, July 26-30, 1993.
- [34] Lindermann, R., Tosunoglu, S., Tesar, D., "Costruction and Demonstration of a Nine-String , Six –Degrees-of-Freedom Force-Reflecting Joystick for Telemanipulation", *Final Report to NASA Johnson Space Center*, Grant No. NAG9-188, Department of Mechanical Engineering, University of Texas, Austin, Texas, October 1987.
- [35] Conklin, W., Tosunoglu, S., "Conceptual Design of A Universal Bilateral Manual Controller", Department of Mechanical Engineering, Florida International University, Miami, Florida, USA, <http://www1.eng.fiu.edu/me/robotics/elib3/ppr3.html>.
- [36] Iwata Lab, "Haptic Master Page", <http://intron.kz.tsukuba.ac.jpg/HM/txt.html>.
- [37] Hayward, V., "Toward a Seven Axis Haptic Device", *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, 133-138.
- [38] Burns, D. T., "Design of a Six Degree of Freedom Haptic Interface", Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwester University, August, 1996, <http://haptic.mech.edu/library/burnsd/master.pdf>.
- [39] Haptics People, Places, and Things, <http://marg.www.media.mit.edu/people/marg/haptics-pages.html>.
- [40] Collins, C. L., "UCI Force-Reflecting Hand Controller", <http://design.caltech.edu/~curtis/design.html>.
- [41] Collins, C. L., "UCI Telerobotics System", <http://design.caltech.edu/~curtis/system.html>.
- [42] Collins, C. L., Long, G. L., "The Singularity Analysis of an In-Parallel Hand Controller for Force-Reflected Teleoperation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 5, , pp. 661-669, October, 1995.
- [43] Collins, C. L., "Hand Controller Design for Singularity Avoidance", <http://design.caltech.edu/~curtis/avoidance.html>.
- [44] Baron, T., "Kinematics, Dynamics and Design of Parallel Manipulators", <http://www-old.cim.mcgill.ca/CimInfo/94-95AnnualReport/node132.html>

- [45] "Parallel robots: Robot a cables", Bibliography, http://www-sop.inria.fr/saga/personnel/merlet/Cables/biblio_espace.html.
- [46] <http://www.cs.indiana.edu/robotics/world.html>.
- [47] Nguyen, V. D., "Constructing Force-Closure Grasps in 3D", *Proc. of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.240-245, Raleigh.
- [48] Dispense del corso di meccanica dei robot, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Politecnico, Torino.
- [49] Legnani, G., "Appunti di Meccanica dei Robot", Edizione CittàStudi, Milano, 1992, Appendice C.
- [50] Kuhnert Frieder, "Pseudoinverse matrizen und die methode der Regularisierung", Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1976
- [51] "Conception of parallel robot", <http://www-sop.inria.fr/saga/logiciels/RP/Design/notice-html.html>
- [52] "Parallel robot (Stewart platform) workspace", <http://www-sop.inria.fr/saga/logiciels/RP/Espace/Gough/notice-html.html>
- [53] Roberts, R. G., Graham, T., Lippit, T., "On the Inverse Kinematics, Statics, and Fault Tolerance of Cable-Suspended Robots", *Journal of Robotic Systems*, 15 (10), pp.581-597, 1998.
- [54] Stoughton, R. S., Arai, T., "A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 2, April 1993.
- [55] Huang, T., Wang, J., Gosselin, C. M., Whitehouse, D. J., "Determination of Closed Form Solution to the Orientation Workspace of Gough-Stewart Parallel Manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Oct. 11, 1998.
- [56] Gosselin, C., "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators", *Transaction of the ASME Journal of Mechanical Design*, pp.331-336, September 1990, Vol. 112.
- [57] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom", *UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings* 1965-66, Vol 180, Pt 1, No 15.
- [58] Franco Bisceglia, "Analisi di strutture robotiche parallele a fili per teleoperazione" – tesi di laurea – Luglio 1999
- [59] M. Paoloni, "Alcune considerazioni per il progetto di un dispositivo di controllo a reazione di forza azionato da cordini" – relazione – 1999
- [60] S. Reveliotis, "An Introduction to Linear Programming and the Simplex Algorithm", <http://www.isye.gatech.edu/~spyros/LP/LP.html>