



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

MORPHEUS: ideazione e progettazione del rover di Ateneo

Relatore: Prof. Stefano Debei

Studente: Davide Paganini

(Matricola 1081900)

Anno Accademico 2016/2017

Sommario

L'elaborato propone una nuova versione della progettazione meccanica del Rover di Ateneo attualmente sviluppato all'Università degli Studi di Padova. Questo complesso sistema robotico è pensato per replicare alcune delle attività tipiche dell'esplorazione planetaria extraterrestre: navigazione autonoma, possibilità di raccogliere campioni e trivellare il terreno. Al fine di permettere queste attività sono stati progettati due nuovi sistemi: un braccio robotico a 4 gradi di libertà e una trivella. Viene inoltre rivisto anche il sistema di locomozione a sei ruote. La progettazione di questi sistemi, spiegata in dettaglio nei capitoli della tesi, parte dall'esperienza maturata sulle loro versioni precedenti, puntando a superare le criticità riscontrate quando queste sono state costruite e testate nel corso del biennio 2016-2017. Per ogni sottosistema sono presentate le considerazioni progettuali insieme a dettagliati disegni CAD 3D. Nelle conclusioni viene riassunto il lavoro svolto, discutendo poi l'impatto che un'esperienza come questa possa avere sul percorso formativo di un giovane ingegnere.

Indice

| | |
|---|----|
| Introduzione..... | 6 |
| Capitolo 1 | |
| MORPHEUS: il progetto e il rover | |
| 1.1 Rovers: generalità e storia delle missioni | 8 |
| 1.2 Missioni Lanciate..... | 8 |
| 1.2.1 Lunokhod 0 | 8 |
| 1.2.2 Lunokhod 1 | 9 |
| 1.2.3 Apollo Lunar Roving Vehicle (Apollo 15, Apollo 16, Apollo 17)..... | 10 |
| 1.2.4 Lunokhod 2 | 11 |
| 1.2.5 Prop-M Rover (Mars 2, Mars 3) | 11 |
| 1.2.6 Sojourner..... | 12 |
| 1.2.7 Mars Exploration Rover A (Spirit) | 12 |
| 1.2.8 Mars Exploration Rover B (Opportunity)..... | 13 |
| 1.2.9 Chang'e3..... | 13 |
| 1.2.10 Mars Science Laboratory Rover (Curiosity) | 14 |
| 1.3 MORPHEUS: il progetto | 14 |
| 1.3.1 STORIA..... | 14 |
| 1.3.2 TEAMs | 15 |
| 1.3.3 Rover Challenge Studenteschi | 16 |
| 1.4 MORPHEUS 1.0..... | 18 |
| 1.4.1 BRACCIO 1.0..... | 20 |
| 1.4.2 TRIVELLA 1.0 | 22 |
| 1.5 MORPHEUS 2.0..... | 25 |
| Capitolo 2 | 28 |
| Il braccio robotico di MORPHEUS | |
| 2.1 Requisiti e Scelta del tipo di manipolatore | 29 |
| 2.1.1 Requisiti Funzionali | 29 |
| 2.1.2 Requisiti Prestazionali..... | 29 |
| 2.1.3 Requisiti di Design | 30 |
| 2.1.4 Requisiti Operazionali | 30 |
| 2.2 Geometria dei manipolatori: convenzione di Denavit-Hartenberg... .. | 33 |
| 2.3 Cinematica di Posizione..... | 34 |
| 2.3.1 Cinematica Diretta..... | 34 |
| 2.3.2 Matrici di Trasformazione..... | 35 |
| 2.3.3 Spazio di Lavoro e Scelta della Lunghezza dei Links | 36 |
| 2.3.4 Cinematica Inversa..... | 38 |
| 2.4 Generazione delle Traiettorie..... | 40 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 2.5 | Cinematica di Velocità e Accelerazione | 42 |
| 2.6 | Analisi Dinamica Inversa | 44 |
| 2.6.1 | Geometria delle Masse | 44 |
| 2.6.2 | Equazioni di Newton – Eulero | 46 |
| 2.6.3 | Modello Simulink del Manipolatore | 47 |
| 2.7 | Scelta dei Motori | 50 |
| 2.7.1 | Motori EC..... | 50 |
| 2.7.2 | Riduttori Armonici | 51 |
| 2.8 | Componenti selezionati..... | 53 |
| 2.9 | Design Meccanico | 55 |
| 2.9.1 | Primo giunto e l’interfaccia con il telaio | 56 |
| 2.9.2 | Secondo giunto e primo link | 59 |
| 2.9.3 | Terzo giunto e secondo link | 62 |
| 2.9.4 | Quarto giunto e l’interfaccia per l’end effector | 65 |
| 2.10 | Appendice con grafici delle traiettorie, coppie e potenza | 68 |
| Capitolo 3..... | | 74 |
| | Il Sistema di trivellazione di MORPHEUS | |
| 3.1 | Design Meccanico | 75 |
| 3.1.1 | Sistema di Traslazione della Punta..... | 75 |
| 3.1.2 | Sistema di Rotazione della Punta | 79 |
| 3.2 | Motori Utilizzati..... | 80 |
| Capitolo 4..... | | 82 |
| | Il Sistema di locomozione di MORPHEUS | |
| 4.1 | Scelta della Configurazione e interfaccia con il telaio | 83 |
| 4.2 | Bilancieri Laterali e Posteriore | 84 |
| 4.3 | Motori Utilizzati..... | 86 |
| Capitolo 5..... | | 88 |
| | Conclusioni e sviluppi futuri | |
| Bibliografia..... | | 91 |
| Appendice A..... | | 93 |
| | Codice delle simulazioni | |

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Design della prima iterazione di MORPHEUS..... | 19 |
| Figura 2 - Dimensioni di MORPHEUS 1.0 | 19 |
| Figura 3 - Dimensioni di MORPHEUS 1.0 | 20 |
| Figura 4 - Braccio 1.0 versione 4 g.d.l..... | 21 |
| Figura 5 - Braccio 1.0 versione 6 g.d.l..... | 21 |
| Figura 6 - Costruzione braccio e trivella 1.0 | 22 |
| Figura 7 - Test di scavo con trivella | 24 |
| Figura 8 - Trivella 1.0..... | 24 |
| Figura 9 - Vista del nuovo braccio di MORPHEUS 2.0..... | 28 |
| Figura 10 - Schemi degli g.d.l. del manipolatore | 31 |
| Figura 11 - Schematizzazione del braccio..... | 32 |
| Figura 12 - Convenzione di Denavit-Hartenberg..... | 33 |
| Figura 13 - Spazio di lavoro del manipolatore | 37 |
| Figura 14 - Cinematica Inversa del manipolatore | 42 |
| Figura 15 - Convenzioni geometriche sui links | 44 |
| Figura 16 - Interfaccia video di Simulink..... | 48 |
| Figura 17 - Logica Simulink per la din.inversa | 48 |
| Figura 18 - Modello Sinmechanics del manipolatore | 49 |
| Figura 19 - Schema di principio motore brushless DC | 51 |
| Figura 20 - Riduttore armonico | 52 |
| Figura 21 - Motore dei giunti 1 e 4 | 54 |
| Figura 22 - Motore dei giunti 2 e 3..... | 55 |
| Figura 23 - Viste del giunto 1 (A) | 57 |
| Figura 24 - Vista del giunto 1 (B), cuscinetto e giunto elastico | 58 |
| Figura 25 - Viste del giunto 2 (A) | 60 |
| Figura 26 - Viste del giunto 2 (B)..... | 61 |
| Figura 27 - Viste del giunto 3 (A) | 63 |
| Figura 28 - Viste del giunto 3 (B)..... | 64 |
| Figura 29 - Viste del giunto 4 (A) | 66 |
| Figura 30 - Viste del giunto 4 (B)..... | 67 |
| Figura 31 - Trivella 1.0 durante un test..... | 75 |
| Figura 32 - Assieme Trivella 2.0 | 76 |
| Figura 33 - Sistema di traslazione della punta..... | 77 |
| Figura 34 - Sistema di cinghie e pulegge della trivella | 78 |
| Figura 35 - Sistema di rotazione della punta | 79 |
| Figura 36 - Sistema di locomozione dall'alto..... | 82 |
| Figura 37 - Dettaglio del bilanciere laterale | 85 |
| Figura 38 - Dettaglio del bilanciere posteriore | 85 |

Introduzione

MORPHEUS è un progetto sviluppato dall'Università di Padova, ed in particolare dal Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) e da Centro di Ateneo di Studi e Attività Spaziali (CISAS), con lo scopo di fornire un laboratorio didattico di robotica spaziale agli studenti della Facoltà di Ingegneria. Il coordinatore del progetto, nonché relatore di questa tesi, è il Prof. Stefano Debei, Direttore del CISAS e Docente di Robotica Spaziale e di Misure Meccaniche e Termiche presso il DII. L'obiettivo per gli studenti del gruppo MORPHEUS è quello di progettare e costruire un prototipo di Rover marziano per poter partecipare ad una futura edizione dell'European Rover Challenge, una competizione di robotica che si svolge ogni anno in Polonia.

Questo progetto di tesi ha come obiettivo principale la progettazione di due nuovi sottosistemi del Rover, un nuovo braccio robotico e una nuova trivella. L'elaborato è strutturato in vari capitoli, che ora si vanno brevemente a descrivere, riassumendo il lavoro che è stato svolto.

Nel primo capitolo, dopo una breve introduzione sull'importanza che i sistemi robotici semoventi abbiano nell'ambito dell'esplorazione spaziale, vengono innanzitutto descritte tutte le missioni lanciate in passato che abbiano trasportato qualche sistema robotico in grado di muoversi sulla superficie di un altro corpo celeste. Viene poi descritta la competizione ERC, elencando prove e requisiti di ammissione, in quanto agli esordi del progetto MORPHEUS questi sono stati la base per la progettazione del rover. Dopo aver descritto il design del rover MORPHEUS 1.0, la prima iterazione di progettazione del sistema, viene brevemente introdotto MORPHEUS 2.0, l'attuale iterazione di progettazione del sistema, che comprende il nuovo braccio e la nuova trivella.

Il secondo capitolo inizia con la descrizione della configurazione scelta per i giunti del nuovo braccio. Segue un'analisi matematica della cinematica di posizione, velocità e accelerazione di un manipolatore, descrivendo equazioni e convenzioni utilizzate (Denavit-Hartenberg). Viene poi mostrato come possono essere generate delle traiettorie del braccio e a seguire viene spiegato come si calcolano le coppie richieste ai motori per permettere al braccio di eseguire proprio quelle traiettorie. Questi calcoli sono alla base della scelta dei motori, descritti a seguire. Viene poi spiegata la meccanica del braccio nel suo complesso.

Nel terzo capitolo viene descritto il sistema della trivella, analizzando i problemi della configurazione precedente. Vengono descritti nel dettaglio il sistema di traslazione della punta e il sistema di rotazione della punta. Si spiega inoltre come

la trivella si interfacci con il telaio. Il capitolo si conclude con una descrizione della scelta dei motori e dei cenni sulla loro logica di controllo.

Nel quarto capitolo viene descritto il sistema di locomozione del rover, descrivendo le ragioni che hanno portato alla scelta di quella particolare configurazione. Si segue con il descrivere i sistemi dei bilancieri che sostengono le sei ruote del sistema. Viene brevemente descritta anche la procedura di scelta dei motori.

Nelle conclusioni viene riassunto il lavoro svolto, rivolgendo l'attenzione ai futuri sviluppi del progetto MORPHEUS e all'importanza che le esperienze pratiche abbiano nella formazione del laureando in ingegneria.

In appendice viene riportato il codice MATLAB sviluppato per risolvere i problemi di cinematica inversa e dinamica inversa del nuovo manipolatore.

Capitolo 1

MORPHEUS: il progetto e il rover

1.1 Rovers: generalità e storia delle missioni

Con il termine rover, che può essere tradotto nell'italiano "vagabondo", si intende una particolare categoria di sonde spaziali, utilizzata per l'esplorazione planetaria. Ciò che caratterizza questo tipo di sonda, distinguendola da orbiters e landers, è la sua capacità di muoversi sulla superficie del corpo celeste in esplorazione. Storicamente, i rovers sono stati utilizzati sia per aumentare le capacità di movimento e trasporto campioni da parte di equipaggi umani, sia per compiere operazioni di esplorazione completamente automatizzate. Nell'attuale scenario dell'esplorazione planetaria, quest'ultima è la categoria che vanta il maggior numero di sonde: ciò è dovuto alla possibilità di integrare nel robot strumentazione scientifica sempre più sofisticata, creando dei veri e propri laboratori mobili che non richiedono operatori, con conseguente abbattimento di rischi e costi. Inoltre, non avendo una base fissa sulla superficie a cui ritornare, il raggio d'azione della sonda viene notevolmente incrementato.

La prima missione ad utilizzare un rover con successo è stata Luna 17 (rover Lunokhod 1), sviluppata dal Programma Spaziale Sovietico e lanciata il 10 Novembre 1970. Tale pionieristica missione è stata seguita da molte altre, fino ai giorni nostri con la missione Mars Science Laboratory sviluppata da parte di NASA, con il rover Curiosity. Di seguito è proposta una cronistoria delle missioni di esplorazione planetaria che hanno impiegato dei rover, di cui è presente un breve riassunto. Si noti che le diciture successo/fallimento che seguono sono riferite specificatamente agli obiettivi di missione relativi ai soli rover e non alle missioni nel loro complesso.

1.2 Missioni Lanciate

1.2.1 Lunokhod 0

Agenzia: Programma Spaziale Sovietico

Corpo Celeste: Luna

Status: Terminata

Esito: Fallimento

Data di Lancio: 19 Febbraio 1969

Data di fine missione: 19 Febbraio 1969

Il programma Lunokhod fu iniziato segretamente a metà 1968 dal Programma Spaziale Sovietico con l'obiettivo di fornire supporto ai propri cosmonauti durante le missioni L3, in vista dell'esplorazione umana della superficie lunare. Per ragioni di sicurezza, e alcune settimane prima del lancio dell'equipaggio, era stato previsto di inviare sulla Luna due rover Lunokhod e un Lander di riserva. Ciò avrebbe permesso di uno studio preliminare della superficie intorno ai siti di allunaggio, oltre a fornire una capsula di emergenza in caso di malfunzionamento del lander principale: in tale circostanza i due rover sarebbero stati utilizzati come mezzo di trasporto verso il secondo lander, essendo equipaggiati con bombole di ossigeno e comandi manuali. Sfortunatamente, alcuni secondi dopo il lancio del primo Lunokhod, il razzo N1 esplose disintegrando il prototipo. I continui fallimenti del razzo N1, insieme ai successi americani delle missioni Apollo 8 (prima orbita lunare con equipaggio) e Apollo 11 (primo allunaggio con equipaggio), portarono alla fine dei programmi sovietici di esplorazione lunare con equipaggio, e conseguentemente del ruolo di supporto dei Lunokhods.

1.2.2 Lunokhod 1

Agenzia: Programma Spaziale Sovietico

Corpo Celeste: Luna

Status: Terminata

Esito: Successo

Data di Lancio: 10 Novembre 1970

Data di fine missione: 14 Settembre 1971

Subito dopo il fallimento del Lunokhod 0, gli ingegneri del Programma Spaziale Sovietico iniziarono a lavorare ad un rover che potesse esplorare autonomamente la superficie lunare, senza la presenza di astronauti. Il risultato di tale impegno portò al rover Lunokhod 1 che, trasportato dallo spacecraft Luna 17, allunò con successo il 17 Novembre 1970, diventando il primo oggetto pilotato da remoto a muoversi su un altro corpo celeste.

Il rover era lungo 2.3 metri e aveva una forma cilindrica vagamente rassomigliante una vasca, sovrastata da un grande coperchio convesso che, una volta aperto,

esponeva i pannelli solari per ricaricare le batterie; durante la notte lunare il coperchio veniva chiuso e la temperatura interna veniva controllata tramite heater a radioisotopi. Il moto era permesso da 8 ruote, tutte motorizzate e con freno. Le comunicazioni venivano garantite da due antenne, una conica e una direzionale elicoidale. La strumentazione scientifica era composta da uno spettrometro a raggi X, un telescopio a raggi X e un rilevatore di raggi cosmici. Inoltre erano presenti 4 telecamere televisive e uno strumento telescopico per l'analisi meccanica del suolo lunare.

Benché Lunokhod 1 fosse progettato per operare per 90 giorni terrestri (circa tre giorni lunari), il rover continuò a funzionare per 322 giorni terrestri (circa 11 giorni lunari), inviando più di 20000 immagini e percorrendo 10540 metri sulla superficie lunare.

1.2.3 Apollo Lunar Roving Vehicle (Apollo 15, Apollo 16, Apollo 17)

Agenzia: NASA

Corpo Celeste: Luna

Status: Terminate

Esito: Successi

Date di Lancio: 26 Luglio 1971, 16 Aprile 1972, 7 Dicembre 1972

Date di fine missione: 7 Agosto 1971, 27 Aprile 1972, 19 Dicembre 1972

Sviluppato da Boeing tra il 1969 e il 1971, il Lunar Roving Vehicle (LRV) venne utilizzato per aumentare la mobilità degli astronauti nelle ultime 3 missioni Apollo, rispettivamente Apollo 15,16 e 17. LRV era un veicolo elettrico a 4 ruote, con treno anteriore e posteriore sterzanti, che poteva trasportare due astronauti.

Ogni ruota era collegata ad un freno, era motorizzata tramite un motore DC accoppiato con un riduttore harmonic drive (80:1) e poteva diventare una ruota libera in caso di malfunzionamento. Con un'impronta del telaio di 3 metri per 2.3 metri, due antenne, due telecamere televisive e una massa a vuoto di 210 kg, LRV poteva trasportare un payload di 490 kg.

LRV è stato utilizzato per un totale di 9 viaggi, permettendo una mobilità senza precedenti e abilitando i grandi risultati scientifici del programma Apollo. La distanza totale percorsa dai tre rover nel corso delle rispettive missioni è: 27.76

km per Apollo 15 (LRV-001), 26.55 km per Apollo 16 (LRV-002) e 35.89 km per Apollo 17 (LRV-003).

1.2.4 Lunokhod 2

Agenzia: Programma Spaziale Sovietico

Corpo Celeste: Luna

Status: Terminata

Esito: Successo

Data di Lancio: 11 Gennaio 1973

Data di fine missione: 11 Maggio 1973

Trasportato dalla sonda Luna 21, Lunokhod 2 fu il secondo rover sviluppato dal Programma Spaziale Sovietico che riuscì ad allunare con successo sulla superficie lunare. Caratterizzato da un design molto simile a quello del suo predecessore Lunokhod 1, Lunokhod 2 possedeva tre telecamere per catturare immagini (necessarie alla navigazione da remoto), un fotorivelatore per eseguire misure di distanza tramite laser, dei magnetometri misurare il campo magnetico locale e ulteriori strumenti per esaminare i livelli di luce della superficie lunare e osservare raggi cosmici.

Lunokhod 2 operò circa per 4 mesi prima del fallimento dovuto ad un surriscaldamento, percorrendo una distanza, record al tempo, di 37 km tra pianure e zone collinari, inviando più di 80000 immagini e svolgendo con successo la maggior parte dei test previsti.

1.2.5 Prop-M Rover (Mars 2, Mars 3)

Agenzia: Programma Spaziale Sovietico

Corpo Celeste: Marte

Status: Terminate

Esito: Fallimenti

Date di Lancio: 19 Maggio 1971, 28 Maggio 1971

Date di fine missione: 27 Novembre 1971, 2 Dicembre 1971

Montato in due modelli identici sui lander Mars 2 e Mars 3 sviluppati dal Programma Spaziale Sovietico, Prop-M era un piccolo rover di 4.5 kg che avrebbe dovuto muoversi con due pattini attorno ai suddetti lander, sfruttando un cavo di alimentazione lungo 15 metri; a causa del lungo intervallo di tempo che avrebbe richiesto una guida da remoto, il rover venne equipaggiato con un basilare sistema automatico di collision avoidance. Il rover era equipaggiato con strumenti per misurare i livelli di radiazioni e le proprietà meccaniche della superficie. Questo piccolo dispositivo avrebbe dovuto dispiegato sulla superficie tramite l'utilizzo di un braccio robotico attuato da molle precaricate, tuttavia i fallimenti dei due lander ne impedirono le operazioni.

1.2.6 Sojourner

Agenzia: NASA

Corpo Celeste: Marte

Status: Terminata

Esito: Successo

Data di Lancio: 4 Dicembre 1996

Data di fine missione: 5 Luglio 1997

Trasportato a bordo del lander Pathfinder sviluppato dalla NASA, questo piccolo rover di 11.5 kg fu il primo sistema semovente utilizzato nell'esplorazione di Marte. Aveva la disposizione uno spettrometro a raggi X (APXS), ed alcune telecamere. Riuscì a percorrere solamente una distanza di 104 m prima che le comunicazioni fossero interrotte.

1.2.7 Mars Exploration Rover A (Spirit)

Agenzia: NASA

Corpo Celeste: Marte

Status: Terminata

Esito: Successo

Data di Lancio: 10 Giugno 2003

Data di fine missione: 22 Marzo 2010

Comunemente noto con il nome di Spirit, assieme al rover gemello Opportunity, è stato uno dei due rover lanciati nel corso della missione Mars Exploration Rover. Progettato per un tempo di missione di 90 sol, equivalenti a circa 92 giorni terrestri, grazie a folate di vento che hanno permesso di pulire pannelli solari, il rover è stato in grado di operare per ben 2269 giorni prima che si perdesse il contatto. A sua disposizione aveva delle telecamere, degli spettrometri, e degli strumenti per l'abrasione della rocce.

1.2.8 Mars Exploration Rover B (Opportunity)

Agenzia: NASA

Corpo Celeste: Marte

Status: Ongoing

Esito: Successo

Data di Lancio: 7 Luglio 2003

Data di fine missione: T.B.D

Il MER-B, comunemente noto con il nome di Opportunity, a differenza del sopra citato Spirit, è tuttora operativo. Il 28 luglio del 2014 la NASA ha annunciato che il rover ha percorso una distanza di oltre 40 km sul pianeta di Marte, divenendo pertanto il rover ad aver percorso più chilometri su un corpo extra terrestre. La strumentazione a sua disposizione è in tutto e per tutto uguale a quella di Spirit.

1.2.9 Chang'e3

Agenzia: CNSA

Corpo Celeste: Luna

Status: Terminata

Esito: Successo

Data di Lancio: 1 Dicembre 2013

Data di fine missione: 1 Marzo 2015

Questa missione fa parte della seconda fase del Chinese Lunar Exploration Program, ed è la prima ad avere un rover (cinese). Yutu, questo è il nome del rover, ha una massa di circa 140 kg e, come strumentazione, presenta un georadar, spettrometri a raggi X e ad infrarossi per analizzare il suolo lunare, e una stereocamera che permette la Visual Odometry. A causa di un qualche non meglio specificato problema, il rover è al momento operativo ma non in grado di muoversi.

1.2.10 Mars Science Laboratory Rover (Curiosity)

Agenzia: NASA

Corpo Celeste: Marte

Status: Ongoing

Esito: Successo

Data di Lancio: 26 Novembre 2011

Data di fine missione: T.B.D.

Sulla scia delle due missioni precedenti nel 2011 la NASA ha lanciato da Cape Canaveral la missione Mars Science Laboratory. L'obiettivo di questa missione è investigare il clima e la geologia marziana, e verificare se siano mai esistite delle condizioni favorevoli alla vita. Il rover, Curiosity, è pertanto fornito di strumenti per la spettroscopia, telecamere, cromatografia dei gas, detector per le radiazioni e un braccio robotico. Le dimensioni per accogliere tutta questa strumentazione sono quelle di una macchina, per un peso complessivo di circa 900 chili. La missione è tuttora operativa.

1.3 MORPHEUS: il progetto

1.3.1 STORIA

Il progetto MORPHEUS, acronimo di Mars Operative Rover of Padova Engineering Students, nasce a fine 2014 presso l'Università degli Studi di Padova, per volontà del Prof. Stefano Debei, direttore del Centro di Ateneo di Studi e Attività Spaziali "G.Colombo" (CISAS) e docente di Robotica Spaziale e di Misure Meccaniche e Termiche presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII). Con l'aiuto del Prof. Marco Pertile, dell'Ing. Sebastiano Chiodini e di alcuni dottorandi viene quindi fondato un team studentesco che abbia come obbiettivo la progettazione, la costruzione e il test di un rover in grado di eseguire operazioni tradizionalmente legate all'esplorazione planetaria: guida autonoma su terreni accidentati, collezione di campioni di suolo, trivellazioni del terreno e semplici

incarichi di assistenza. Il team si pone quindi vari obiettivi, con orizzonti temporali differenti: innanzitutto costruire un rover funzionante, per poterlo testare e raccogliere informazioni ed esperienza su come questo si comporti in condizioni operative; una volta superata questa fase, l'obiettivo è partecipare ad una competizione studentesca di rover, nella fattispecie l'European Rover Challenge (ERC) o l'University Rover Challenge (URC), al fine di confrontarsi costruttivamente con altre realtà universitarie che abbiano percorsi simili a quello di MORPHEUS; infine si pone come obiettivo a lungo termine quello di creare un laboratorio didattico di robotica spaziale che permetta a giovani ingegneri di mettere alla prova quanto imparato durante le lezioni, scontrandosi con problematiche pratiche.

Riassumendo brevemente quanto sarà spiegato nel dettaglio nelle successive sezioni, lo svolgimento della progettazione del rover MORPHEUS è stata: nel 2015 viene fatta la prima iterazione del design dei vari sottosistemi del rover MORPHEUS 1.0, vengono comprati i componenti identificati e prodotta la meccanica, i cui pezzi arrivano verso la fine dell'anno; nel 2016, gravi problemi di design sul braccio meccanico e trivella, insieme a problemi produzione delle schede elettroniche, rallentano la costruzione e il test del rover, viene tuttavia sfruttata la situazione per costruire separatamente i vari sottosistemi e individuare le ragioni di questi problemi; nel 2017, facendo tesoro dell'esperienza dei due anni precedenti, viene ultimato il design del rover MORPHEUS 2.0, che supera i problemi della prima versione e dovrebbe essere costruito entro la fine del 2017.

1.3.2 *TEAMS*

I team che si sono succeduti nei tre anni di MORPHEUS sono stati formati da ragazzi e ragazze provenienti dalle diverse branche dell'ingegneria che sono richieste in un progetto complesso e multidisciplinare come quello di un rover. Con qualche eccezione, il team ha avuto al suo interno principalmente studenti di Ingegneria Aerospaziale, Ingegneria Elettronica, Ingegneria Informatica e dell'Informazione.

Il team del 2015 comprendeva i seguenti studenti, alfabeticamente: Erik Bertolutti, Andrea Bilato, Andrea Boscardin, Giorgio Corrà, Andrea Correnti, Nicola Dal Lago, Riccardo Dalla Vecchia, Michele Fadone, Stefano Fogarollo, Hady Ghassabian, Matteo Lisotto, Enrico Mion, Dennj Osele, Davide Paganini (il sottoscritto), Maria Palmia, Fabio Quadrelli, Giulia Soldà, Angelo Todescan, Elena Toffanin, Andrea Veronese.

Il team del 2016 comprendeva i seguenti studenti, alfabeticamente: Cristian Ambrosini, Andrea Bilato, Stefano Campese, Daniele Carlotto, Adriano Carpinelli, Giorgio Corrà, Nicola Dal Lago, Michele Gazzea, Davide Giurisato, Marco Magli, Riccardo Manconi, Enrico Mion, Davide Paganini (il sottoscritto), Mattia Panozzo, Fabio Quadrelli, Marco Reschiglian, Nicola Ristè, Davide Savà, Nicolò Savino, Paolo Scaramuzza, Giorgio Tesser.

Il team del 2017 comprende i seguenti studenti, alfabeticamente: Antonio Bevilaqua, Carlotta Burcovich, Andrea Bilato, Davide Cazzaro, Stefano Cosma, Riccardo Dal Borgo, Federico Dino, Davide Paganini (il sottoscritto), Mattia Panozzo, Davide Peron, Marco Reschiglian, Paolo Scaramuzza, Eleonora Seu, Alessandro Torrisi, Martino Turrina, Fabio Zorzetto.

1.3.3 Rover Challenge Studenteschi

Per permettere lo sviluppo di rover studenteschi e formare giovani ingegneri in un ambiente stimolante e internazionale, nel mondo sono state indette varie competizioni che puntano a testare in situazioni realistiche questo particolare tipo di robot. Tra queste, le più rinomate sono: NASA Human Exploration Rover Challenge, University Rover Challenge (URC) e European Rover Challenge (ERC). La prima sfida ha come obiettivo lo sviluppo e il test di un veicolo lunare sull'ispirazione degli Apollo Roving Vehicles impiegate nelle missioni Apollo 15, 16 e 17. URC e ERC prevedono invece la progettazione un robot radiocomandato semi-autonomo, che deve poter superare diverse prove in cui vengano replicate delle operazioni pratiche in un contesto simulato di esplorazione extraterrestre. La sostanziale differenza tra le due competizioni, a parte il numero maggiore di edizioni di URC, è la localizzazione geografica: URC si svolge nelle zone desertiche dello Utah (U.S.A.) mentre ERC si svolge vicino a Varsavia in Polonia. Per ovvie ragioni di comodità logistica, il team MORPHEUS del 2015 ha scelto di partecipare prima ad ERC e quindi di basare la progettazione della prima iterazione di design del sistema sui requisiti e sulle prove di questa competizione. Le prove ed i requisiti per la partecipazione ad ERC sono elencati di seguito. Da notare che le prove sono considerate indipendenti l'una dall'altra: durante le pause tra queste il rover può essere modificato, riparato, e eventualmente ottimizzato.

TASK 1 - SCIENCE

La prima prova è quella a carattere scientifico: l'obiettivo è quello di raccogliere tre campioni di "suolo marziano" da luoghi diversi e riportarli alla linea di

partenza. Nel dettaglio questi campioni devono essere: una roccia del peso di 100g, del terreno sfuso superficiale dal peso di 200g e 25g di terreno compatto da una profondità di almeno 10 cm. Inoltre devono essere condotte misure riguardanti il peso dei campioni e deve essere prodotta della documentazione fotografica dei siti da cui si prelevano i campioni.

TASK 2 - NAVIGAZIONE

La seconda prova ha come obiettivo quello di dimostrare la capacità del rover di muoversi tra posizioni diverse senza alcuna assistenza, ovvero senza che un operatore abbia la possibilità di dare istruzioni al sistema né sul posto né da remoto.

TASK 3 - MANTAINANCE

La terza prova ha come obiettivo quello di dimostrare l'abilità del rover nel manipolare due rack elettrici sotto tensione: bisogna spostare interruttori e poter misurare livelli di tensione per controllare di aver svolto le giuste operazioni. I rack si trovano in posizioni e orientazioni diverse, obbligando ad avere capacità di posizionamento dei tools molto sviluppate.

TASK 4 – ASSISTANCE

La quarta prova ha come obiettivo quello di dimostrare l'abilità del rover nel poter trasportare un eventuale pezzo di ricambio ad un operatore. A causa della delicatezza del pezzo stesso, ciò deve essere fatto senza grossi scossoni e seguendo la metodologia indicata, raccogliendo il pezzo da una posizione prestabilita e rilasciandolo in un'altra con la corretta orientazione.

REQUISITI

- Il rover può costare al massimo 15.000 €, considerando il costo di tutte parti del rover (più eventuali pezzi di ricambio portati alla competizione), equipaggiamento degli operatori e lavorazioni meccaniche.
- Il rover non può pesare più di 50 kg; pezzi di ricambio possono contare per ulteriori 20 kg.
- Durante le operazioni il rover non deve essere collegato a fili o cavi.
- Il rover deve essere radiocomandato in real-time.
- Il rover deve essere fornito di un pulsante di emergenza, in modo da poter eventualmente isolare le batterie dal resto sistema.

1.4 MORPHEUS 1.0

Con MORPHEUS 1.0 si intende la prima iterazione di design del rover dell'Università degli Studi di Padova, progettato nel corso di tutto il 2015 e visibile in figura 1. MORPHEUS 1.0 è stato pensato da un gruppo di studenti della Facoltà di Ingegneria, afferenti principalmente ai Dipartimenti di Ingegneria Industriale e di Ingegneria dell'Informazione. Il rover è stato progettato per essere un robot semi-autonomo in grado di partecipare all'European Rover Challenge e di svolgere con successo tutte le prove. Al fine di riuscire in questo intento, il rover è stato equipaggiato di vari sottosistemi: un sistema di locomozione a sei ruote, un braccio robotico con due differenti tipi di end effector (a 4 gradi di libertà o 6 gradi di libertà), una trivella, un sistema di stereovisione e un'antenna omnidirezionale. Il rover è alimentato da un sistema di 4 batterie ricaricabili al piombo da 12 Volt (6-HCNFJ-7.2), disposte in modo da creare un parallelo di due serie, in modo da ottenere un sistema di alimentazione a 24 Volt con la capacità di operare in condizioni di piena potenza (circa 400 Watt) per almeno 45 minuti.

In questa sezione verrà spiegato brevemente il design meccanico del rover, concentrandosi su alcuni sottosistemi (Braccio e Trivella), evidenziandone il funzionamento e i problemi che sono stati riscontrati una volta che questi sono stati testati. Non verrà trattato in questa sezione il sottosistema di locomozione, essendosi dimostrato quasi perfettamente funzionante e a cui è dedicato un capitolo di questa tesi; tutte le informazioni possono essere infatti trovate nel Capitolo 3.

Come si può notare in figura 2, le dimensioni di MORPHEUS 1.0 sono circa 820x1320x1000 [mm], con un peso stimato di 46 kg nella sua configurazione a pieno carico. Il telaio del rover, composto da profilati 20x20x2 [mm] saldati tra di loro, è visibile in figura 3. Sottili piastrine di alluminio avvitabili formano la copertura, tuttavia per facilitare le operazioni montaggio e smontaggio di tutti gli altri componenti raramente vengono utilizzate.



Figura 1 - Design della prima iterazione di MORPHEUS

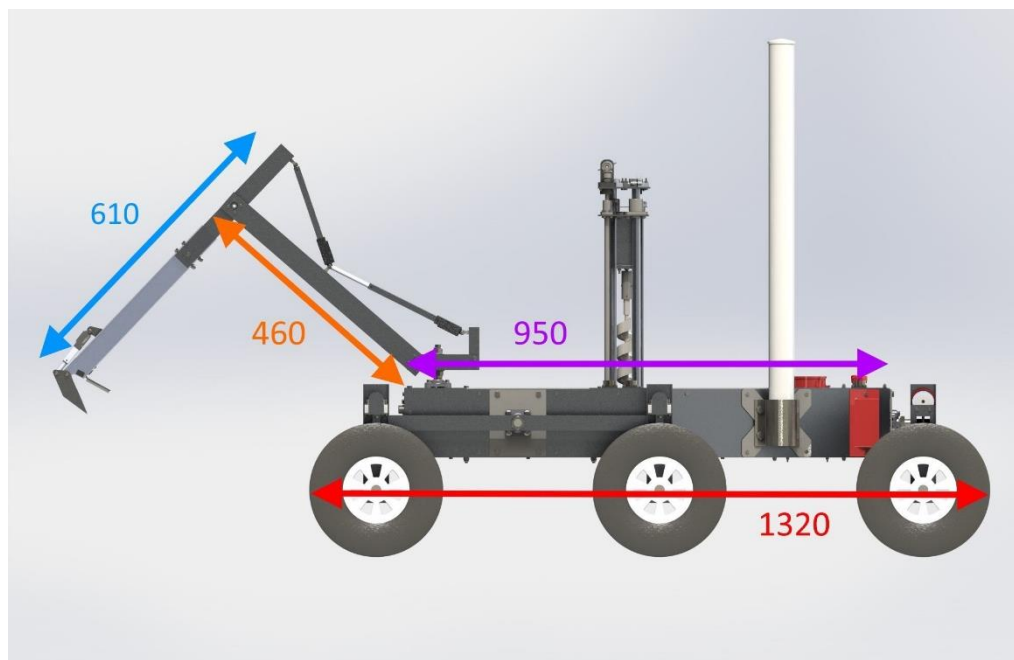


Figura 2 - Dimensioni di MORPHEUS 1.0

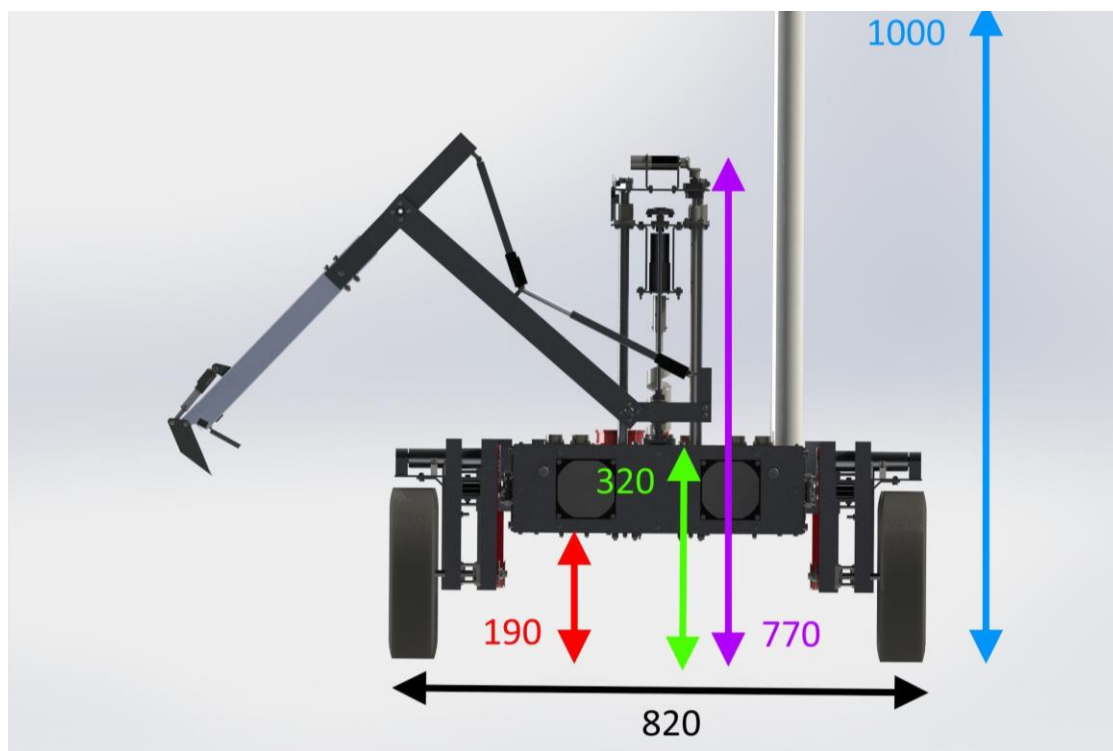


Figura 3 - Dimensioni di MORPHEUS 1.0

1.4.1 BRACCIO 1.0

Come già anticipato la prima versione del sottoistema braccio è stata progettata per avere due configurazioni, con end-effector differenti. La prima, visibile in figura 4 è caratterizzata da una serie di cinematismi che sfruttano un'attuazione lineare, è stata pensata per eseguire operazioni di scavo e di presa di oggetti. La seconda, visibile in figura 5, è caratterizzata da dei gradi di libertà aggiuntivi (a creare un polso) e da lunghezze dei giunti maggiori in modo da ampliare lo spazio di lavoro. Quest'ultima configurazione non è stata mai realizzata nella pratica a causa di errori di progettazione meccanica molto importanti, come spessori estremamente sottodimensionati e accoppiamenti tra organi in movimento che non erano assolutamente in grado di assolvere alla loro funzione. La prima configurazione, per quanto viziata dalla necessità di renderla smontabile (per poter cambiare configurazione del braccio), è stata invece costruita (vedi figura 6). Tuttavia, pur essendo stato possibile montare l'assieme, la scelta dei motori lineari per azionare i tre giunti rotoidali finali (tramite due quadrilateri articolati e una diade RRP), si è rivelata anch'essa sottodimensionata: il braccio riusciva a lavorare a vuoto, ma già in presenza di carichi modesti faceva molta fatica a muoversi. I test svolti su questa configurazione ne hanno evidenziato un'altra criticità molto importante: il terreno su cui il braccio avrebbe dovuto scavare è al

limitare dello proprio spazio di lavoro, obbligando questo a lavorare completamente a sbalzo e sforzando inutilmente i motori, che dopo pochi minuti si surriscaldano molto. Per queste ragioni è stato deciso di progettare nuovamente il braccio robotico, facendo tesoro dell'esperienza sviluppata con il Braccio 1.0.



Figura 4 - Braccio 1.0 versione 4 g.d.l.



Figura 5 - Braccio 1.0 versione 6 g.d.l.

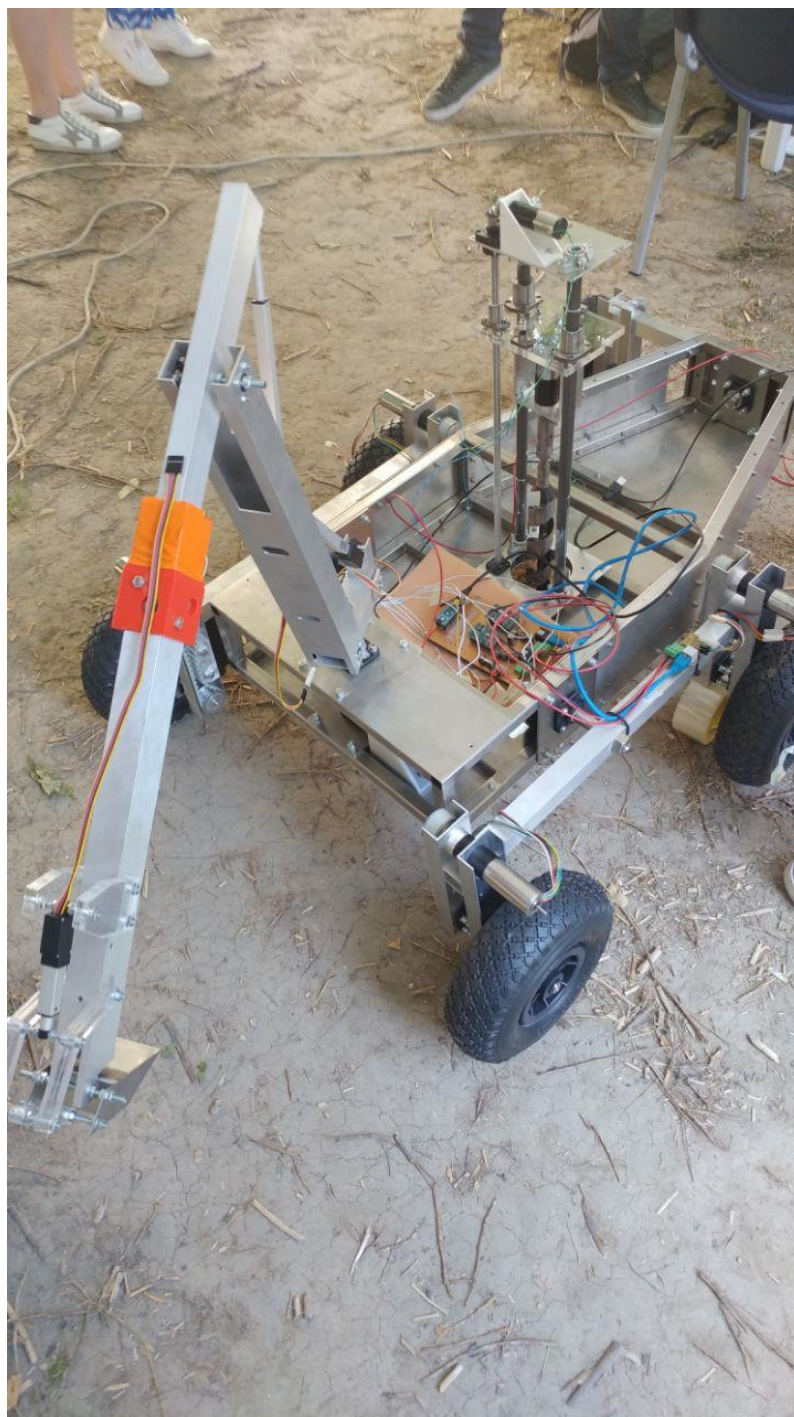


Figura 6 - Costruzione braccio e trivella 1.0

1.4.2 TRIVELLA 1.0

Il sottosistema Trivella 1.0, visibile in figura 7 è caratterizzato da un sistema di guide lineari e una vite senza fine che permette la traslazione verticale di una piastra su cui è montata una punta da trapano; questa punta può essere messa in rotazione da un motore anch'esso montato su tale piastra. Originariamente

posizionato al centro del rover, il sottosistema Trivella 1.0, non ha presentato particolari errori nel dimensionamento dei motori, tuttavia ne ha presentati di grossolani per quanto riguarda la progettazione degli accoppiamenti meccanici. I problemi principali riguardano due aspetti, entrambi caratterizzati da rischio di rottura distruttiva del sottosistema: l'accoppiamento punta/motore e l'accoppiamento piano traslante/vite senza fine. Il primo, e più critico dei due problemi, risiedeva nel fatto che la punta fosse appesa direttamente sull'albero del motore che la azionava, sfruttando una sorta di inserto fatto produrre appositamente e senza alcuna presenza di cuscinetti a protezione del motore. Considerando i carichi assiali dovuti alla trivellazione, si capisce subito quanto fosse critica la situazione; inoltre la punta con testa esagonale doveva entrare in questo supporto con foro circolare, all'interno del quale questa veniva fissata con tre grani, rendendo estremamente difficile l'allineamento tra punta e albero del motore e introducendo così anche dei pericolosi carichi radiali sul motore ogni qual volta si provasse a scavare. Il secondo problema risiedeva sul fatto che la vite senza fine, unico vincolo verticale della piastra traslante, non potesse essere al centro geometrico di quest'ultima dato che tale posizione era occupata dalla punta. Ciò avrebbe creato un momento flettente sulla piastra traslante non appena la punta avesse trasmesso alla struttura la reazione vincolare del terreno. Anche se è stato possibile alla fine eseguire con successo un test di scavo (vedi figura 8) per sicurezza rispetto alle problematiche presentate è stato deciso di progettare nuovamente la trivella, facendo tesoro dell'esperienza sviluppata con la Trivella 1.0.

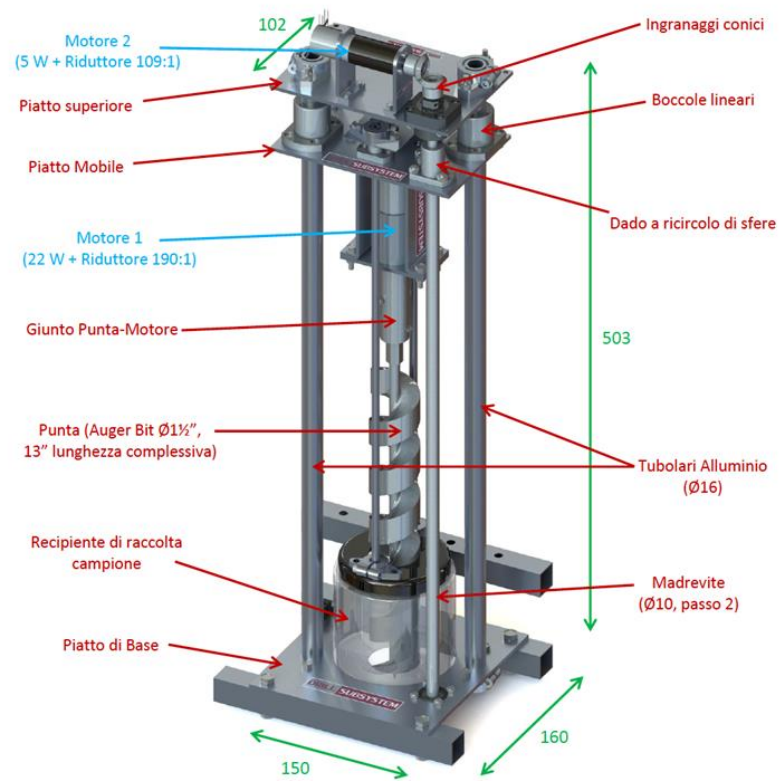


Figura 8 - Trivella 1.0



Figura 7 - Test di scavo con trivella

1.5 MORPHEUS 2.0

A causa dei notevoli problemi incontrati nella costruzione del rover MORPHEUS 1.0, è stato deciso di progettare nuovamente il sistema del braccio robotico e il sistema di trivellazione. Anche se entrambi vengono trattati in dettaglio nel corso dei prossimi capitoli, qui è proposto un breve riassunto delle novità di questi sistemi. In figura è possibile trovarne una rappresentazione.

Per quanto riguarda il braccio robotico è stato deciso di renderlo in grado di spostare un payload di almeno 3 kg; ciò ha richiesto nuovi motori più potenti, links flessionalmente e torsionalmente più rigidi. Viene inoltre cambiata la configurazione dei giunti, da attuatori lineari (collegati con cinematismi per ottenere delle rotazioni) si passa a motori rotativi. Si è deciso di utilizzare un braccio che abbia tutti e tre gli ultimi giunti su un piano, sfruttando un serie di gomiti.

Per quanto riguarda la trivella è stato deciso di renderla più resistente rispetto ad eventuali carichi eccessivi provenienti dalla reazione vincolare del terreno. Pur mantenendo il principio di funzionamento ed i motori, vengono aggiunti: un giunto asso-radiale e tre viti a più principi accoppiate con madreviti a recupero di giochi. Viene inoltre deciso di spostare la trivella, dal centro del rover a vicino al bilanciere posteriore.



Figura: MORPHEUS 2.0

Capitolo 2

Il braccio robotico di MORPHEUS

Come è stato accennato in precedenza, il braccio robotico di MORPHEUS 1.0 ha presentato notevoli criticità, riguardanti sia il montaggio che l'effettiva capacità di operare rispettando i requisiti stabiliti in sede di progetto. Per risolvere di questi problemi è stato necessario realizzare nuovi componenti meccanici, oltre a modificarne alcuni di quelli già in possesso del team; queste lavorazioni sono avvenute presso le officine meccaniche del DII, eseguite in parte dai tecnici e in parte dal team. Ciò ha permesso di montare e azionare il braccio nella sua configurazione a 4 gradi di libertà, ottenendo importanti informazioni su come il sistema rispondesse in condizioni operative: per quanto in condizioni di moto libero il braccio funzionasse, in presenza di modesti carichi esterni i motori e la struttura rischiavano di essere compromessi. Alla luce di ciò, è stato deciso di progettare un nuovo braccio robotico, mostrato in figura 9 con una metodica più strutturata e tenendo conto degli errori della passata esperienza. Il capitolo descrive questo procedimento.

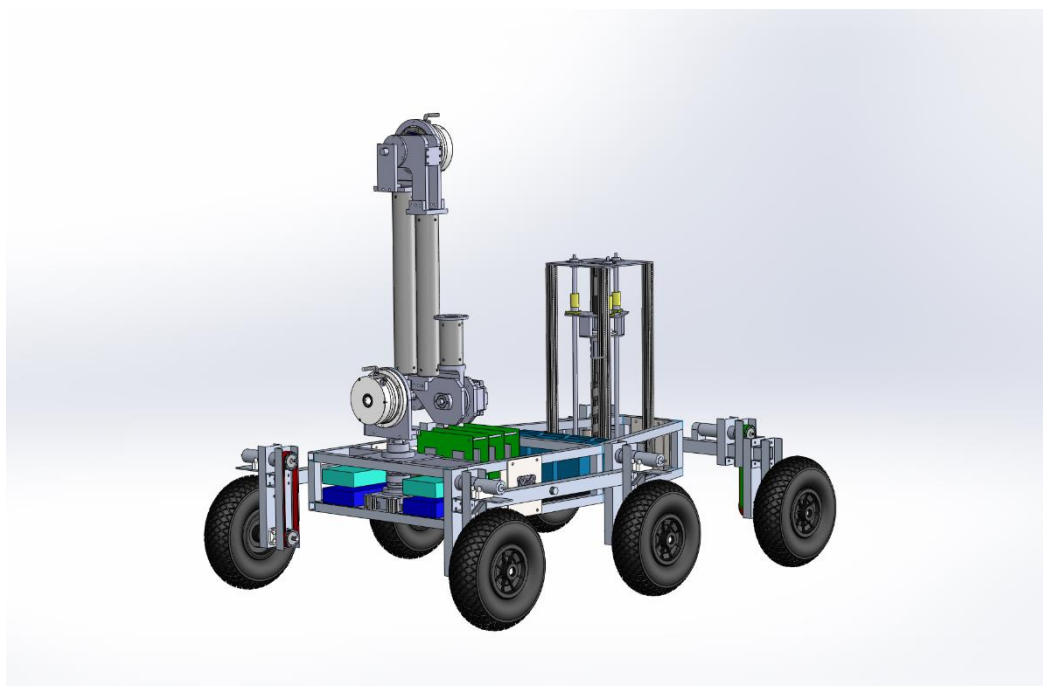


Figura 9 - Vista del nuovo braccio di MORPHEUS 2.0

2.1 Requisiti e Scelta del tipo di manipolatore

Il braccio robotico di MORPHEUS 2.0 è stato progettato considerando che esso debba posizionare nella zona antistante al rover una pinza o un piccolo trapano. I principali requisiti del nuovo braccio robotico sono stati identificati nei seguenti:

2.1.1 Requisiti Funzionali

- F.1 Il sottosistema braccio robotico deve essere in grado di spostare e posizionare il proprio payload
- F.2 Il sottosistema braccio robotico deve poter misurare la propria configurazione reale nello spazio
- F.3 Il sottosistema braccio robotico deve poter bloccare i propri giunti

2.1.2 Requisiti Prestazionali

- Rel. F.1 P.1.1 Lo spazio di lavoro in direzione orizzontale deve descrivere una circonferenza di diametro minimo 80 cm, con centro sulla base del braccio
- Rel. F.1 P.1.2 Lo spazio di lavoro in direzione verticale deve descrivere una circonferenza di diametro minimo 50 cm, con centro sulla base del braccio
- Rel. F.1 P.1.3 Il sottosistema braccio robotico deve poter spostare un payload di almeno 3 kg
- Rel. F.1 P.1.4 Il sottosistema braccio robotico deve poter spostare il proprio payload dovunque all'interno dello spazio di lavoro entro un intervallo di 30 s
- Rel. F.2 P.2.1 Il sottosistema braccio robotico deve essere in grado di misurare la posizione del proprio end effector con un errore complessivo massimo di 1 mm
- Rel. F.2 P.2.2 Il sottosistema braccio robotico deve essere in grado di fornire la posizione misurata del proprio end effector con un ritardo massimo di 0.1s
- Rel. F.3 P.3.1 Quando i motori dei giunti non sono alimentati, il sistema frenante del braccio deve essere in grado di mantenere la posizione del proprio end effector con un errore complessivo massimo di 1 mm

2.1.3 *Requisiti di Design*

- D.1 Il sottosistema braccio robotico deve poter operare in ambienti esterni, con potenziale presenza di polvere e forte umidità
- D.2 Il sottosistema braccio robotico deve poter operare nel profilo di sollecitazioni meccaniche caratteristico delle operazioni del rover
- D.3 Il sottosistema braccio robotico non deve essere pericoloso per un eventuale operatore nelle vicinanze (movimenti rapidi e/o contatti scoperti)
- D.4 Il sottosistema braccio robotico non deve danneggiare il rover o sé stesso durante le proprie operazioni
- D.5 Quando in configurazione disattivata, il sottosistema braccio deve essere contenuto all'interno dell'impronta del telaio del rover
- D.6 Quando in configurazione disattivata, il sottosistema braccio deve essere contenuto in un volume massimo di 0,05 m³
- D.7 I links del braccio devono possedere una rigidità sufficiente a sostenere i motori e il payload senza esibire deformazioni elastiche di entità non trascurabile
- D.8 I giunti del braccio devono possedere appositi sistemi per non trasmettere carichi troppo elevati direttamente sugli albero/flange dei motori

2.1.4 *Requisiti Operazionali*

- O.1 Il sottosistema braccio robotico deve poter essere arrestato in qualsiasi momento, sia via software che via hardware
- O.2 Prima di eseguire una nuova sequenza di movimento, il sottosistema deve tornare alla configurazione raccolta iniziale fino i propri finecorsa, annullando eventuali errori sugli encoder accumulati nel tempo
- O.3 In caso di perdita di connessione con la ground station, il sottosistema braccio robotico deve tornare alla configurazione iniziale

La stesura di questi requisiti ha fornito una linea guida su cui sono state basate le scelte di design per il nuovo braccio.

Per quanto riguarda la scelta del tipo di configurazione per il manipolatore, è stato deciso di utilizzare quella che abbia il minor numero possibile di gradi di libertà e che al contempo riesca a garantire correttamente le operazioni dei due

tipi di end-effector individuati: un trapano o una pinza raccogliitrice. Tale configurazione è stata individuata in un modello a 4 gradi di libertà, tutti forniti da coppie rotoidali: una come spalla e tre, parallele tra di loro ma perpendicolari alla prima, che fornisca il movimento su un piano (vedi figura 10). Fissato un piano, i tre giunti allineati permettono di raggiungere ogni punto con molteplici orientazioni, purchè all'interno dello spazio di lavoro; il giunto spalla permette di ruotare il suddetto piano attorno ad un asse parallelo ad esso. Un'ulteriore motivazione alla scelta è l'esperienza sulle problematiche di questa configurazione, dato che era quella del braccio di MORPHEUS 1.0.

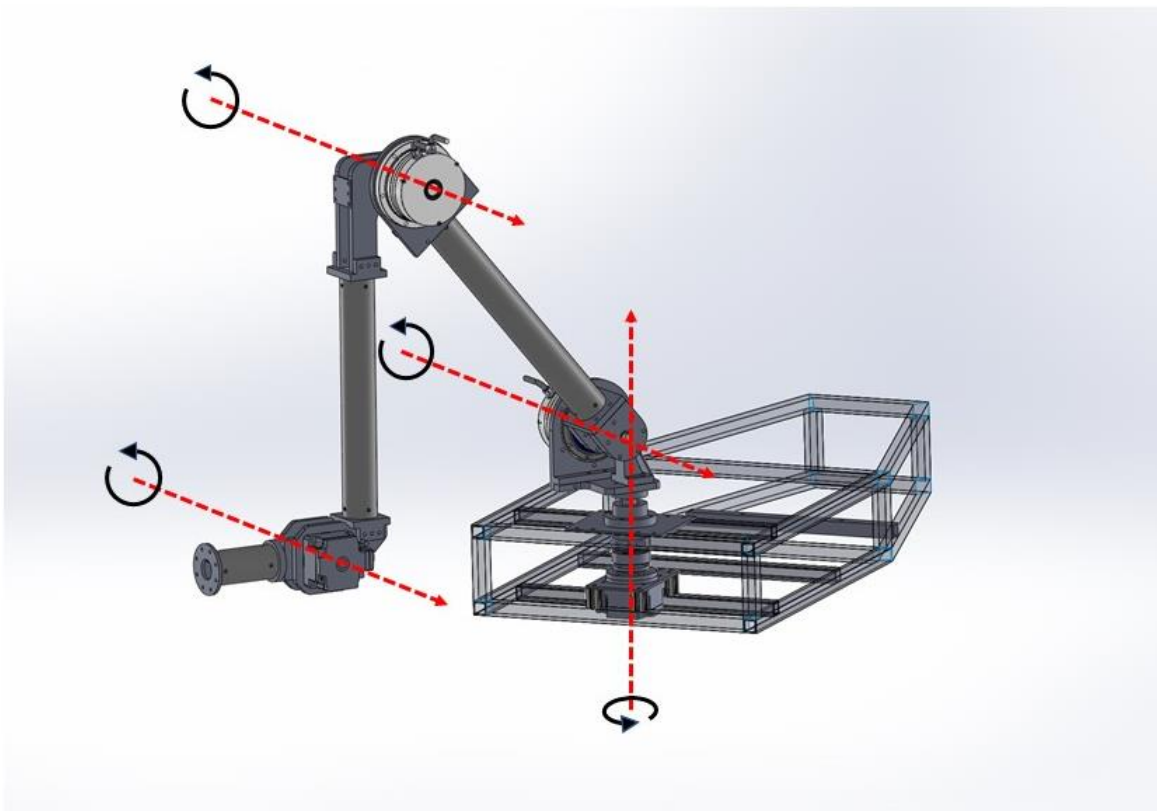


Figura 10 - Schemi degli g.d.l. del manipolatore

Per poter rispettare i requisiti rispetto al volume massimo occupabile in configurazione chiusa, è stato deciso che i 3 links del braccio debbano stare sullo stesso piano e non su piani sfalsati; questa configurazione obbliga ad utilizzare delle strutture a gomito per evitare la compenetrazione durante il movimento e ad utilizzare traiettorie nelle quali i links non si intersecano mai. Fatte queste considerazioni, i vantaggi superano di molto le complicazioni introdotte: oltre

all'estrema compattezza dell'assieme, le coppie richieste al giunto spalla sono inferiori e non si hanno links a sbalzo.

Con riferimento agli ultimi 3 giunti allineati, questa particolare configurazione dal punto di vista cinematico può essere schematizzata come segue (vedi figura 11):

- Un manipolatore con 5 giunti rotoidali allineati, con il 3° e 4° caratterizzati da angoli fissi (rispettivamente $\theta_3 = 270^\circ$ e $\theta_4 = 90^\circ$), velocità e accelerazione nulle.
- Un manipolatore con 3 giunti rotoidali allineati e con 3 links rettilinei, con l'accortezza di utilizzare un secondo link fittizio, tracciato come retta tra il secondo e terzo link reali

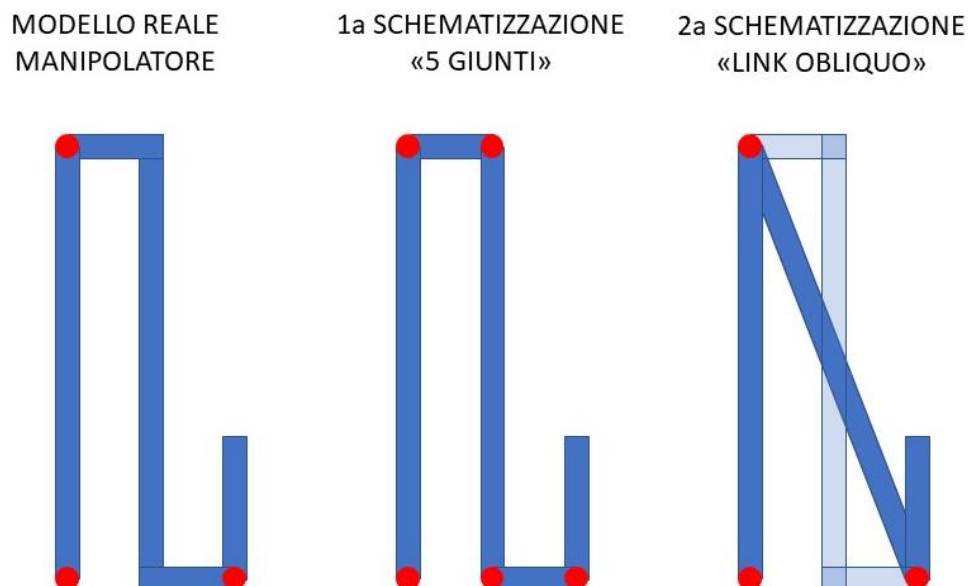


Figura 11 - Schematizzazione del braccio

Sono entrambe strategie valide, è da considerare che la prima mantiene corretti i valori delle variabili di giunto ma ne aggiunge due alle 3 reali, mentre la seconda mantiene il numero reale di variabili di giunto ma ne cambia il valore (degli ultimi due giunti), che deve poi essere aggiornato. Durante lo svolgimento della tesi è stato utilizzato il primo approccio per i calcoli di dinamica mentre è stato utilizzato il secondo per i calcoli di cinematica.

2.2 Geometria dei manipolatori: convenzione di Denavit-Hartenberg
 Per poter descrivere in modo semplice la cinematica di un manipolatore nello spazio cartesiano, è comodo utilizzare una convenzione univoca per descrivere i vari tipi di giunti (che siano rotoidali, prismatici, etc), i loro sistemi di riferimento e le loro posizioni reciproche. Per fare tutto ciò è spesso utilizzato un metodo introdotto da Jacques Denavit e Richard S. Hartenberg, detta appunto Convenzione di Denavit-Hartenberg: essa fa sì che una trasformazione geometrica possa essere rappresentata nello spazio euclideo tridimensionale con il numero minimo di parametri, ovvero quattro.

Considerando due giunti consecutivi come in figura 12, i sistemi di riferimento vengono scelti nel seguente modo:

- Origine, intersezione tra l'asse a_i e l'asse i
- Asse z_i , lungo l'asse i
- Asse x_i , lungo a_i con direzione da i a $i + 1$
-
- Asse y_i , a completare la terna levogira

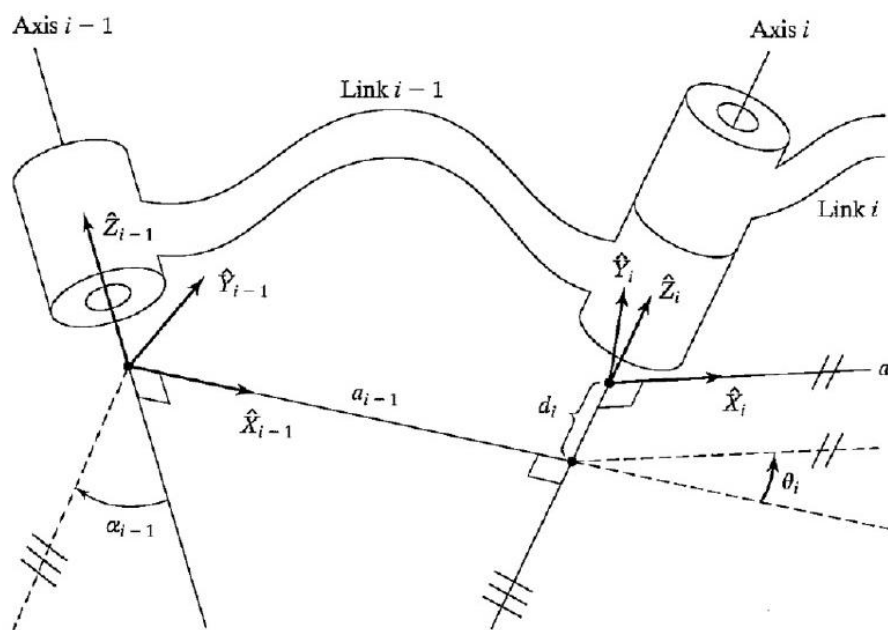


Figura 12 - Convenzione di Denavit-Hartenberg

Sempre facendo riferimento alla figura 12, i quattro parametri in grado di descrivere la trasformazione sono definiti come segue:

- d , distanza dell'origine del S.R. i -esimo dalla normale comune, misurata lungo l'asse z_i . Nel caso i due assi z_{i-1} e z_i siano paralleli, si può scegliere un valore a piacere.
- θ , angolo del quale bisogna ruotare attorno a z_{i-1} per poter allineare gli assi x_{i-1} con x_i
- α , angolo del quale bisogna ruotare la normale comune per allineare gli assi z_{i-1} con z_i
- a , distanza minima tra gli assi z_{i-1} e z_i

Con dei semplici passaggi algebrici è possibile dimostrare che la matrice di trasformazione dal generico giunto i al generico giunto $i + 1$, definita come ${}^{i-1}T_i$ è:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i) \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -d_i \sin(\alpha_{i-1}) \\ \sin(\theta_i) \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & d_i \cos(\alpha_{i-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Il vantaggio di queste matrici sta nel fatto che per ottenere l'orientazione della terna $\{n\}$ rispetto alla terna $\{k\}$ è sufficiente calcolare il seguente prodotto:

$${}^k_n T = {}^k_{k+1} T {}^{k-1}_k T \dots \dots \dots {}^{n-1}_n T \quad (2.2)$$

2.3 Cinematica di Posizione

2.3.1 Cinematica Diretta

Con cinematica diretta si intende quell'insieme di procedimenti che permettono di ricavare le coordinate del manipolatore nello spazio cartesiano, a partire dalle coordinate nello spazio dei giunti.

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)_{GIUNTI} \rightarrow (x_{EE}, y_{EE}, z_{EE})_{CARTES.}$$

Siamo particolarmente interessati a conoscere l'orientazione dell'end effector rispetto alla base fissa del braccio, cioè a determinare la matrice ${}^0_E T$, che risulta essere:

$${}^0_E T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_E T \quad (2.3)$$

Per calcolare le suddette matrici sfruttiamo la Convenzione di D.-H., i cui parametri per il manipolatore a 4 gradi di libertà sono:

Tabella 2.1: Parametri di Denavit-Hartenberg

| GIUNTO | a_{i-1} | α_{i-1} | d_i | θ_i |
|--------|-----------|----------------|-------|------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | θ_1 |
| 2 | 0 | $-\pi/2$ | 0 | θ_2 |
| 3 | L1 | 0 | 0 | θ_3 |
| 4 | L2 | 0 | 0 | θ_4 |
| E | L3 | 0 | 0 | 0 |

Bisogna tenere conto che si è supposto che non vi sia distanza tra il giunto spalla e il primo giunto rotoidale allineato, ovvero che la base del braccio sia situata più in alto di circa 20 centimetri: ciò semplifica i conti ed è lecito dato che tale distanza non può cambiare nel tempo. Si è utilizzato il secondo approccio mostrato in figura 11, che deve essere poi corretto utilizzando le seguenti relazioni:

$$L2_{DH} = \sqrt{L2_{REALE}^2 + L_{GOMITO}^2} \quad (2.3)$$

$$\beta_{CORREZIONE} = \arctg\left(\frac{L2_{REALE}}{2L_{GOMITO}}\right) \quad (2.4)$$

$$\theta_{2DH} = \theta_{2REALE} - \beta \quad (2.5)$$

$$\theta_{3DH} = \theta_{3REALE} + \beta \quad (2.6)$$

2.3.2 Matrici di Trasformazione

Se inseriamo i valori della tabella 2.1 all'interno dell' eq.(2.1) otteniamo le seguenti matrici di trasformazione:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 c\alpha_{(2)-1} & c\theta_2 c\alpha_{(2)-1} & -s\alpha_{(2)-1} & 0 \\ s\theta_2 s\alpha_{(2)-1} & c\theta_2 s\alpha_{(2)-1} & c\alpha_{(2)-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & L_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$${}^4_E T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.3.3 Spazio di Lavoro e Scelta della Lunghezza dei Links

Nella sezione precedente sono stati descritti gli strumenti che permettono poter individuare la posizione cartesiana di un punto nel sistema di riferimento dell'end effector, al variare delle variabili di giunto. Considerando di inserire nel suddetto sistema di riferimento la posizione $\{0;0;0\}$, si individuano le coordinate riferite alla posizione dell'end effector rispetto alla base del braccio. In questo modo, facendo variare le variabili di giunto all'interno di tutte possibili configurazioni, si riesce a determinare l'effettivo spazio di lavoro del manipolatore.

Considerando ora il primo approccio in figura 11 valutiamo, per ogni giunto, quale sia il campo di valori possibili:

-
- Giunto 1, questo giunto può potenzialmente eseguire una rotazione completa. Si ha $0 \leq \theta_1 \leq 360^\circ$.
- Giunto 2, questo giunto è limitato nella rotazione che può eseguire dalla presenza del telaio del rover. Si ha $-50^\circ \leq \theta_2 \leq 180^\circ$.
- Giunto 3, questo giunto è limitato nella rotazione che può eseguire dalla presenza del link 1. Si ha $-90^\circ \leq \theta_3 \leq 215^\circ$.
- Giunto 4, questo giunto è limitato nella rotazione che può eseguire dalla presenza del gomito dopo il link 2. Si ha $-160^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ$.

In figura 13 si può trovare una rappresentazione dello spazio di lavoro del braccio che, come si nota, rispetta i requisiti progettuali.

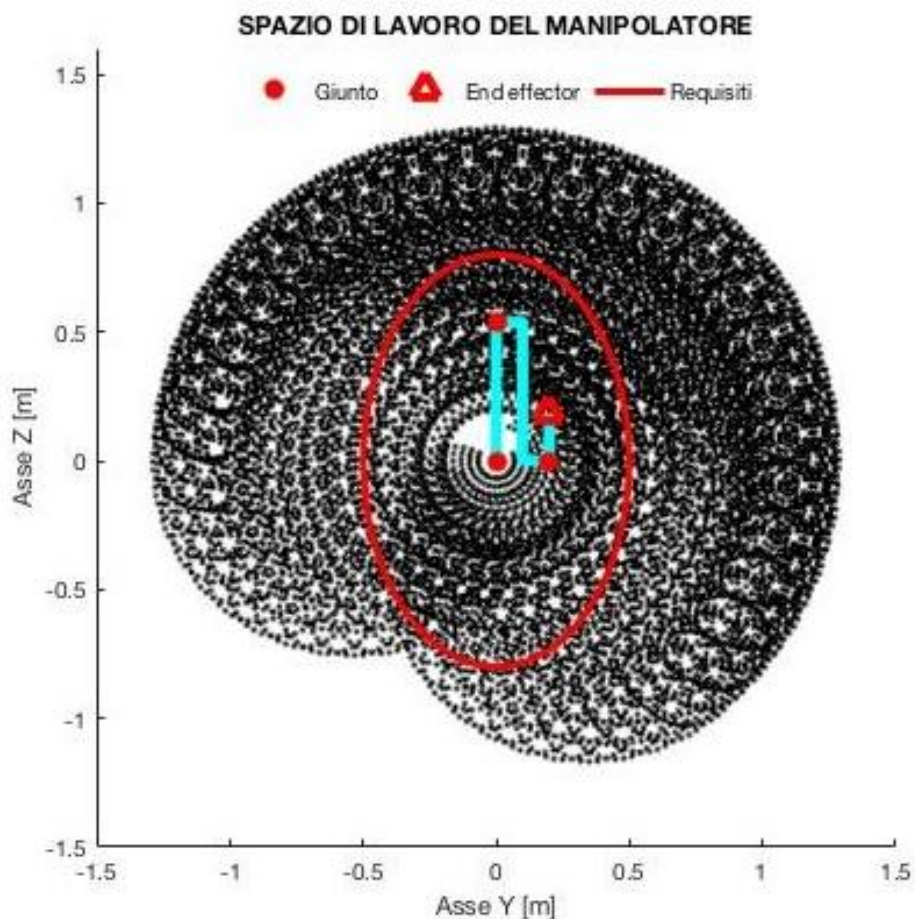


Figura 13 - Spazio di lavoro del manipolatore

Ciò dipende, come il calcolo di questi angoli in tabella 2.2, dalla lunghezza dei vari links. La particolare configurazione di links considerata e scelta per la configurazione finale del braccio è dunque:

Tabella 2.2: Lunghezza dei links

| Componente | Lunghezza [mm] |
|------------|----------------|
| Link 1 | 537 |
| Link 2 | 537 |
| Link 3 | 183 |
| Gomito 1 | 70 |
| Gomito 2 | 70 |

2.3.4 Cinematica Inversa

Con cinematica inversa si intende quell'insieme di procedimenti che permettono di ricavare le coordinate del manipolatore nello spazio dei giunti, a partire dalle coordinate nello spazio cartesiano.

$$(x_{EE}, y_{EE}, z_{EE}, \phi_{EE})_{CARTES.} \rightarrow (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)_{GIUNTI}$$

È un procedimento particolarmente importante in quanto fornisce le basi per poter generare traiettorie e quindi posizionare l'end effector. Poiché le equazioni che descrivono queste relazioni non sono lineari, e quindi di soluzione particolarmente complicata, si ricorre ad un metodo geometrico. Inoltre è particolarmente conveniente scomporre il problema generale in due problemi distinti:

- Prima determinare la rotazione della spalla:

$$(x_{EE}, y_{EE}, z_{EE})_{CARTES.} \rightarrow \theta_1$$

- Poi, risolvendo nel piano, determinare le rotazioni dei giunti successivi:

$$(x_{EE}^*(\theta_1), y_{EE}^*(\theta_1), \phi_{EE})_{CARTES.} \rightarrow (\theta_2, \theta_3, \theta_4)$$

In questo caso, come per la cinematica diretta, ci rifacciamo al secondo approccio in figura 11. Si parte considerando la distanza del punto obiettivo dalla base del braccio:

$$R = \sqrt{(x_{EE} - x_{BASE})^2 + (y_{EE} - y_{BASE})^2 + (z_{EE} - z_{BASE})^2} \quad (2.12)$$

Per comodità d'ora in avanti si suppone che le coordinate della base siano $\{0;0;0\}$. Dato che una si sta cercando una rotazione attorno all'asse cartesiano z , la coordinata z non viene influenzata da questo tipo di trasformazione. Si cerca quindi la proiezione del vettore distanza sul piano cartesiano xy :

$$R_{PROIETT} = \sqrt{R - (z_{EE})^2} \quad (2.13)$$

Si può quindi procedere al calcolo della prima variabile di giunto, θ_1 :

$$\theta_1 = \text{acos}\left(\frac{y_{EE}}{R_{PROIETT}}\right) \quad (2.14)$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_1, & x_{EE} \geq 0 \\ -\theta_1, & x_{EE} < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Ora che è stata individuata la rotazione della spalla, possiamo riportare il problema ad un problema sul piano. Tuttavia bisogna proiettare una seconda volta il vettore posizione per poter determinare le coordinate da utilizzare:

$$\theta^* = \text{asin}\left(\frac{z_{EE}}{R}\right) \quad (2.16)$$

$$x_{EE}^* = R \cos(\theta^*) \quad (2.17)$$

$$y_{EE}^* = z_{EE} \quad (2.18)$$

Chiamiamo:

$$x_3 = x_{EE} - L_3 \cos(\phi_{EE}) \quad (2.19)$$

$$y_3 = y_{EE} - L_3 \sin(\phi_{EE}) \quad (2.20)$$

Calcoliamo dunque:

$$\beta = \text{atg}\left(\frac{y_3}{x_3}\right) \quad (2.21)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{x_3^2 + y_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (2.22)$$

$$\sin(\theta_2) = \sqrt{1 - \cos(\theta_2)^2} \quad (2.23)$$

$$\theta_2 = \operatorname{atg}\left(\frac{\sin(\theta_2)}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (2.24)$$

$$\cos(\psi) = \frac{x_3^2 + y_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \quad (2.25)$$

$$\psi = \operatorname{acos}(\cos(\psi)) \quad (2.26)$$

Come si può notare in n base al tipo di configurazione scelta, a gomito alto o a gomito basso, si possono avere le due soluzioni:

$$\theta_1 = \begin{cases} \beta - \psi, & \theta_2 > 0 \\ \psi + \beta, & \theta_2 \leq 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

E infine:

$$\theta_3 = \phi_{EE} - \theta_2 - \theta_1 \quad (2.28)$$

Sono quindi determinate le relazioni cercate. Si nota inoltre che la condizione di esistenza per la quale un punto appartenga allo spazio di lavoro è:

$$|\cos(\theta_2)| < 1 \quad (2.29)$$

Da ricordare che per un braccio a gomiti come quello proposto bisogna correggere i valori degli angoli e del secondo link con le relazioni (2.3)→(2.6).

2.4 Generazione delle Traiettorie

Nella sezione precedente si è descritto come identificare le rotazioni dei giunti che identificano una particolare posizione e orientazione dell'end effector nello spazio. Generalmente il braccio si muove da un punto iniziale ad un punto finale: una volta determinate le variabili di giunto in entrambi, bisogna decidere che profili di velocità e accelerazione impiegare in questo tipo di moto. La generazione delle traiettorie ci permette di compiere esattamente questo, ovvero trovare una funzione del tempo che, noto l'intervallo di tempo, rispetti le seguenti condizioni al contorno: velocità e accelerazione nulla sia in partenza che in arrivo.

$$\begin{cases} \theta_{INIZIO} = \theta_i \\ \dot{\theta}_{INIZIO} = 0 \\ \ddot{\theta}_{INIZIO} = 0 \end{cases} \& \begin{cases} \theta_{FINE} = \theta_f \\ \dot{\theta}_{FINE} = 0 \\ \ddot{\theta}_{FINE} = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Ipotizziamo per $\theta(t)$ un profilo polinomiale di quinto grado, con le rispettive derivate:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (2.31)$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \quad (2.31)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \quad (2.31)$$

Si nota che esiste la soluzione che rispetta le condizioni al contorno, ed è unica:

$$\{a_0 = a_1 = a_2 = 0\} \& \begin{cases} a_3 = \frac{10(\theta_f - \theta_i)}{\Delta t^3} \\ a_4 = \frac{-15(\theta_f - \theta_i)}{\Delta t^4} \\ a_5 = \frac{6(\theta_f - \theta_i)}{\Delta t^5} \end{cases} \quad (2.32)$$

L'unicità della soluzione proviene dalla teoria delle equazioni differenziali ordinarie (lineari e a coefficienti costanti) per la quale risulta che per soddisfare sei condizioni al contorno sia necessario un polinomio di almeno quinto grado. Se eseguiamo questa procedura per tutti i giunti, otteniamo quattro funzioni del tempo che possiamo combinare per ottenere una legge oraria della posizione dell'end effector. Continuando a utilizzare le dimensioni reali del braccio come dati iniziali, consideriamo ora questo esempio:

- Posizione iniziale: $\{0.2, 0, 0.2, 90\}$
- Posizione finale : $\{0.3, 0.4, 0.6, 0\}$
- Intervallo di tempo: 5 secondi

Questa traiettoria potrebbe rappresentare il caso dell'utilizzo del braccio nella trivellazione di un grosso masso: con partenza dalla posizione ripiegata e l'ultimo giunto in alto, parallelo al terreno e leggermente ruotato a sx, visibile in figura 14. In appendice a questo Capitolo possiamo trovare le quattro funzioni del tempo, giunto per giunto e con le rispettive derivate, che permetterebbero ad un braccio come quello di MORPHEUS di spostarsi tra questi punti, supponendo che tutti i giunti si muovano separatamente con l'ordine 1-3-2-4; sono state spostate in fondo per questioni puramente editoriali.

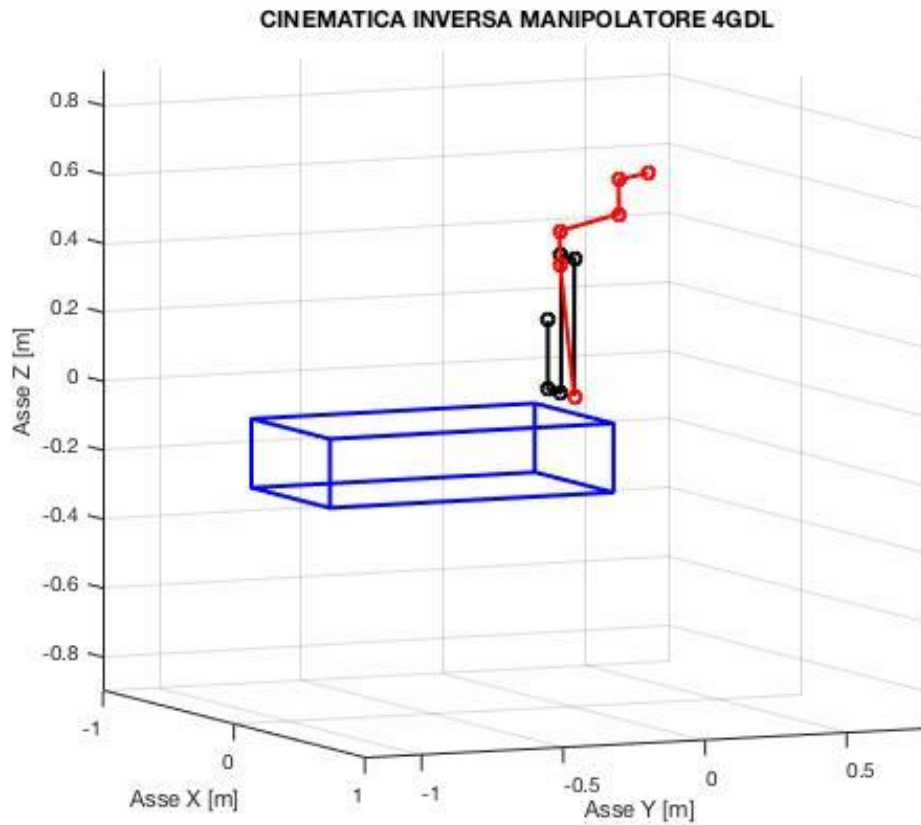


Figura 14 - Cinematica Inversa del manipolatore

2.5 Cinematica di Velocità e Accelerazione

Con riferimento alla figura 15, sono note la geometria del braccio, le condizioni iniziali e le variabili di giunto $\theta(t)$ con le rispettive derivate. Definiamo la seguente geometria:

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^0p_1 = \{0; 0; 0\}^T \\ {}^1p_2 = \{0; 0; 0\}^T \\ {}^2p_3 = \{L1; 0; 0\}^T \\ {}^3p_4 = \{L2; 0; 0\}^T \\ {}^4p_5 = \{L3; 0; 0\}^T \end{array} \right. \& \left\{ \begin{array}{l} {}^1p_1 = \{0; 0; 0\}^T \\ {}^2p_2 = \{0.5L1; 0; 0\}^T \\ {}^3p_3 = \{0.5L2; 0; 0\}^T \\ {}^4p_4 = \{0.5L3; 0; 0\}^T \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Definiamo le condizioni al contorno relative alla rotazione della base:

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^0\omega_0 = \{0; 0; 0\}^T \\ {}^0\dot{\omega}_0 = \{0; 0; 0\}^T \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Definiamo inoltre le condizioni al contorno relative al moto della base, inserendo una accelerazione verso l'alto uguale a $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$, in modo da simulare l'utilizzo del braccio in un campo gravitazionale.

$$\begin{cases} {}^0v_0 = \{0; 0; 0\}^T \\ {}^0\dot{v}_0 = \{0; 0; 0\}^T \end{cases} \quad (2.35)$$

Ora, partendo dal primo giunto e iterando in avanti, si vanno a calcolare le velocità (angolari e lineari) e le accelerazioni (angolari e lineari) dei giunti e dei baricentri dei links rispetto al sistema di riferimento $\{0\}$.

- CINEMATICA DI VELOCITA'

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{z}_{i+1} \quad (2.36)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R [{}^iv_i + {}^i\omega_i \times {}^ip_{i+1}] \quad (2.37)$$

- CINEMATICA DI ACCELERAZIONE

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}R {}^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{z}_{i+1} \quad (2.38)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R [{}^i\dot{v}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^ip_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^ip_{i+1})] \quad (2.39)$$

$${}^i\dot{v}_{C,i} = {}^i\dot{v}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^ip_{C,i} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^ip_{C,i}) \quad (2.40)$$

Si vede che inizializzando i valori di $\omega, v, \dot{\omega}, \dot{v}$ alla base del braccio si possono calcolare, iterando in avanti, i valori delle stesse grandezze in tutti i giunti del braccio.

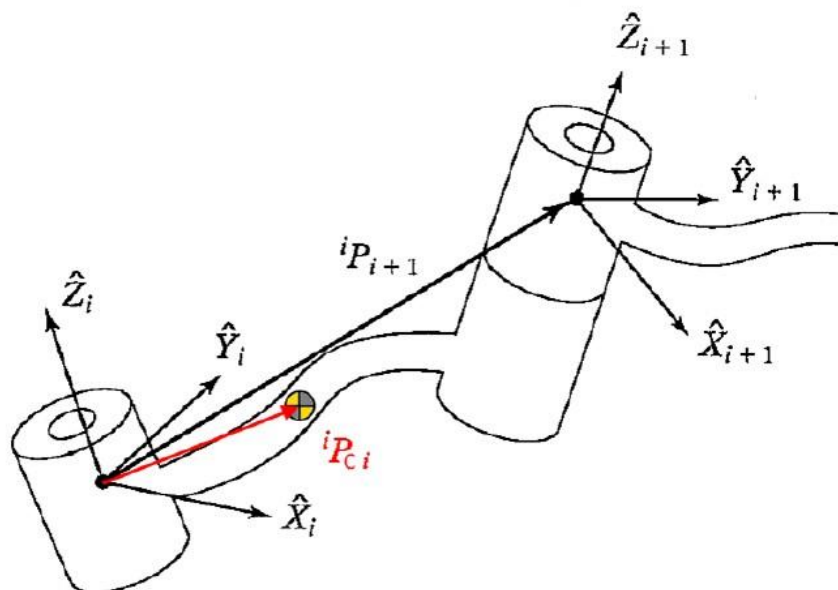


Figura 15 - Convenzioni geometriche sui links

2.6 Analisi Dinamica Inversa

Dopo l'analisi cinematica è necessario effettuare un'analisi dinamica inversa: ossia valutare l'entità delle forze e delle coppie agenti sull'intero braccio durante il movimento di questo. I risultati finali saranno i profili delle forze e delle coppie ai giunti, che rappresentano i valori che degli attuatori devono esprimere per muovere il braccio con la traiettoria imposta.

2.6.1 Geometria delle Masse

Per il calcolo delle coppie agente su un corpo, è necessario conoscere il suo tensore di inerzia, che dipende dal sistema di riferimento scelto. Se si conosce il tensore d'inerzia ${}^B I$ rispetto ad un sistema di riferimento $\{B\}$ e lo si vuole esprimere in un nuovo sistema di riferimento $\{A\}$, possiamo avere i due casi:

Rotazione il sistema di riferimento

E' noto sia ${}^B I$ che ${}^A R$. Sfruttiamo l'invarianza dell'energia cinetica rispetto sistemi di riferimento diversi:

$${}^A I = {}^A R {}^B I {}^B R \quad (2.41)$$

Traslazione il sistema di riferimento

Detta ${}^A p_{OB}$ la traslazione del centro di {A} rispetto al centro di {B} si ottiene:

$${}^A I = {}^B I + m({}^A p_{OB} {}^A p_{OB}^T [I_3] - {}^A p_{OB}^T {}^A p_{OB}) \quad (2.42)$$

Oltre a calcolare il tensore d'inerzia dei singoli profili, dobbiamo anche considerare la massa, in prima approssimazione concentrata, dei motori e di altri componenti accoppiati ai giunti. Dal momento che il motore della spalla non partecipa inerzialmente al moto, sono stati considerati solamente i seguenti accoppiamenti:

- Link 1 + Due masse concentrate di 2.5 kg l'una, alle sue estremità (motore 2 e motore 3)
- Gomito 1 + Massa concentrata di 0.75 kg alla sua estremità
- Link 2 + Massa concentrata di 0.75 kg alla sua estremità
- Gomito 1 + Massa concentrata di 1.5 kg alla sua estremità (motore 4)
- Link 3 + Massa concentrata di 3 kg alla sua estremità (End Effector)

Sono stati dunque calcolati i nuovi baricentri di ogni link e, tramite il procedimento in eq.(2.42) vi è stato calcolato il nuovo tensore d'inerzia. Oltre al calcolo analitico, questi nuovi tensori d'inerzia sono stati calcolati anche utilizzando SolidWorks, ottenendo i medesimi risultati. I links sono stati considerati come profilati cilindrici di diametro 50 mm e spessore 3 mm, con lunghezze da tabella 2.2. I tensori ottenuti nei nuovi baricentri sono:

- LINK 1

$${}^{c,1} I_1 = \begin{bmatrix} 0.00031416 & 0 & 0 \\ 0 & 0.37145492 & 0 \\ 0 & 0 & 0.37145492 \end{bmatrix} [kg \cdot m^2] \quad (2.43)$$

- GOMITO 1

$${}^{c,2} I_2 = \begin{bmatrix} 0.00004218 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00012038 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00012038 \end{bmatrix} [kg \cdot m^2] \quad (2.44)$$

- LINK 2

$${}^{c,3} I_3 = \begin{bmatrix} 0.00026104 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03402826 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03402826 \end{bmatrix} [kg \cdot m^2] \quad (2.45)$$

- GOMITO 2

$${}^{c,4}I_4 = \begin{bmatrix} 0.00051561 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00012818 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00012818 \end{bmatrix} [kg \cdot m^2] \quad (2.46)$$

- LINK 3

$${}^{c,5}I_5 = \begin{bmatrix} 0.00012326 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00189601 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00189601 \end{bmatrix} [kg \cdot m^2] \quad (2.47)$$

2.6.2 Equazioni di Newton – Eulero

Consideriamo ora un metodo iterativo per risolvere il problema della dinamica inversa. Chiamiamo:

- $f_{i,j}$, la forza dal corpo i al corpo j
- $n_{i,j}$, la coppia dal corpo i al corpo j
- $f_{e,i}$, la risultante delle forze esterne sul corpo i
- $n_{e,i}$, la risultante delle coppie esterne sul corpo i

La prima equazione cardinale, o seconda legge di Newton, dice che le forze di inerzia del corpo i-esimo eguagliano la risultante delle forze esterne agenti su di esso:

$${}^i f_{e,i} = {}^i F_i = m_i {}^i \dot{v}_{C,i} \quad (2.48)$$

La seconda equazione cardinale, o legge di Eulero, dice che le coppie d'inerzia del corpo i-esimo eguagliano la risultante delle coppie esterne agenti su di esso:

$${}^i n_{e,i} = {}^i N_i = {}^{c,i}I_i {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times ({}^{c,i}I_i {}^i \omega_i) \quad (2.49)$$

Partendo dalle forze e coppie esterne agenti sull'ultimo giunto e tornando indietro iterando possiamo calcolare le coppie e le reazioni vincolari ad ogni giunto, eseguendo il seguente algoritmo fino alla base:

$${}^i f_{i-1,i} = {}^i F_i + {}_{i+1}R^{i+1} f_{i,i+1} \quad (2.50)$$

$${}^i n_{i-1,i} = {}^i N_i + {}_{i+1} R^{i+1} n_{i,i+1} + {}^i p_{C,i} \times {}^i F_i + {}^i p_{i+1} \times {}_{i+1} R^{i+1} f_{i,i+1} \quad (2.51)$$

Nelle figure in appendice al Capitolo sono riportati i valori delle coppie necessarie alla rotazione dei giunti stabilita dalla traiettoria presa in esame; come per i grafici della traiettoria, anche questi sono stati sposati per questioni puramente editoriali. Questi valori di coppia sono stati alla base della scelta dei motori del braccio.

2.6.3 Modello Simulink del Manipolatore

Per controllare che risultati dell'analisi dinamiche inverse fossero corretti, è stato sviluppato un modello MATLAB del manipolatore, sfruttando il pacchetto Simscape Multibody di Simulink. Questo pacchetto fornisce un ambiente di simulazione per sistemi meccanici tridimensionali come robot o veicoli, che vengono costruiti sfruttando i vari blocchi funzionali come giunti, vincoli, forze e sensori. Simscape Multibody poi formula e risolve le equazioni del moto per il sistema complessivo. Il modello creato prende in ingresso delle grandezze cinematiche derivanti dalla traiettoria $(\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i)$ e restituisce le coppie richieste (τ_i) . Il braccio è stato schematizzato allo stesso modo del braccio reale in termini di geometria e di masse, portando risultati a molto simili tra algoritmo di Newton-Eulero e il solutore di Simulink. Nelle figure 16, 17, 18 viene riportato il modello e l'interfaccia video che permette di visualizzare il moto completo del braccio.

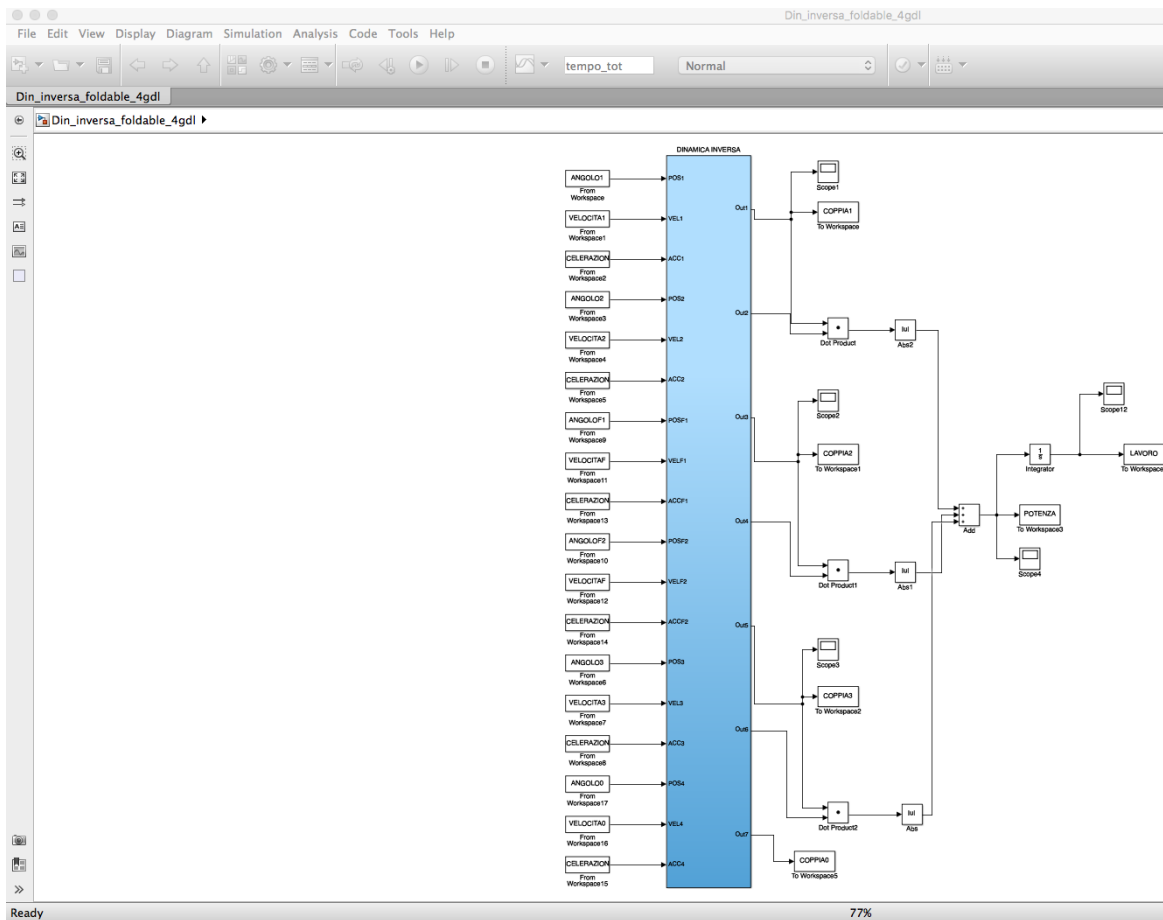


Figura 17 - Logica Simulink per la din.inversa

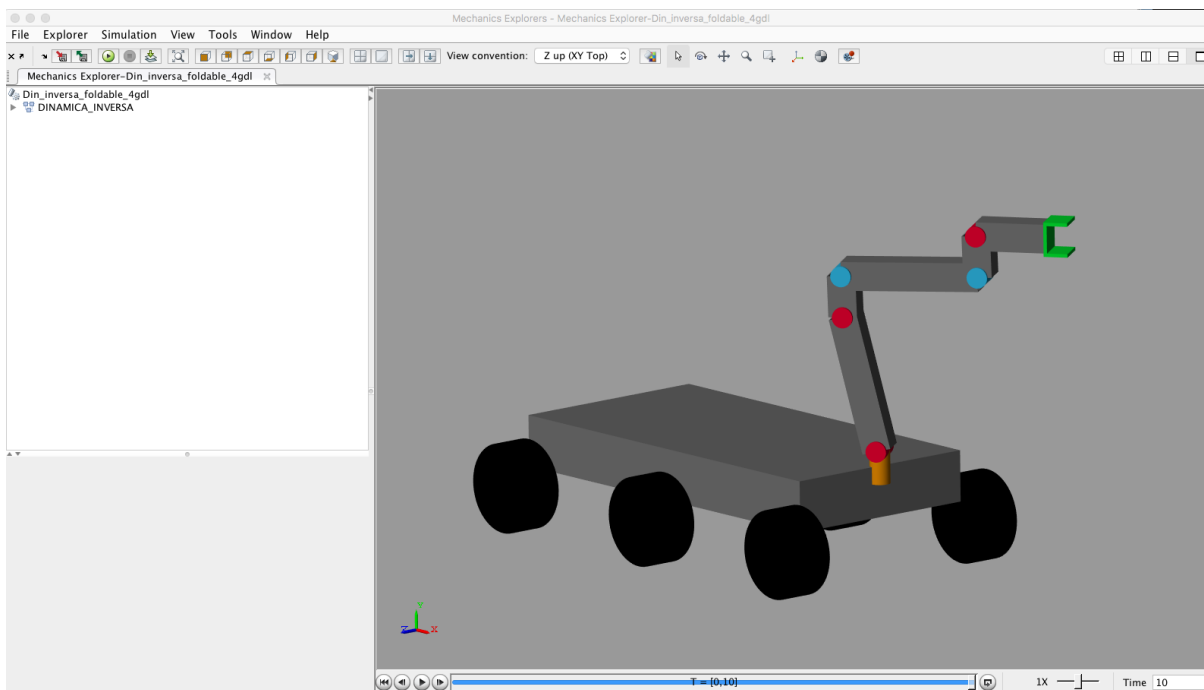


Figura 16 - Interfaccia video di Simulink

2.7 Scelta dei Motori

Il punto di partenza per la scelta di motori è stato sicuramente il calcolo delle coppie tramite la dinamica inversa; tuttavia non è l'unico requisito che è stato considerato. La scelta di motori infatti non è determinata dal solo sottosistema del manipolatore, ma in parte anche da tutto il sistema rover, per citare alcune problematiche: bisogna trovare dei motori che siano compatibili con l'alimentazione a batterie e che siano forniti di un controllore pilotabile dal pc di bordo. In generale le caratteristiche richieste ai motori del braccio sono:

- Coppia elevata, con coppia massima erogabile quanto meno superiore del 10% alla coppia statica massima necessaria ad un giunto
- Compattezza, in quanto ingombri minori riducono i momenti d'inerzia del sistema
- Leggerezza, in quanto il peso aumenta i momenti d'inerzia del sistema
- Alimentazione a 24 Volt, forniti dalle batterie
- Possibilità di montare un encoder, se assoluto meglio
- Possibilità di montare un freno, se d'emergenza meglio (agisce solo quando viene a mancare l'alimentazione)
- Possibilità di essere controllato in posizione, dipende dal controllore scelto
- Possibilità di avere il rotore con uscita flangiata e non con albero rotante, in quanto questo aumenta la compattezza del sistema e permette un montaggio più semplice
- La potenza totale richiesta a tutti i motori dovrebbe stare al di sotto dei 150 W, che è il valore massimo erogabile dalle batterie per avere delle operazioni continue per due ore. Quest'ultimo è collegato al requisito sul peso massimo oltre alle caratteristiche dei motori

Stati considerati vari tipi di motori: DC a spazzole, Passo Passo, DC senza spazzole (anche detti EC, Electronically Controlled). Tra i modelli di motori questi ultimi si sono rivelati i migliori sia in termini di efficienza, che riduce la potenza richiesta e il calore dissipato, sia in termini range operativi e peso.

2.7.1 Motori EC

I motori EC (Electronically Controlled o Commutated) sono motori in corrente continua (DC) senza spazzole (brushless). Il principio di funzionamento è lo stesso dei motori DC tradizionali, dove il campo statorico è generato da magneti permanenti (o da avvolgimenti controllati da un opportuno azionamento di campo o eccitatrice) e il campo rotorico è controllato da un altro azionamento che

alimenta gli avvolgimenti del rotore tramite spazzole che permettono di collegare il rotore con l'esterno (collettore).

I tradizionali vantaggi dei motori DC sono l'elevata coppia disponibile in un range di velocità ampia, la capacità di sovraccarico e la velocità di reazione alle variazioni di carico. Da non trascurare la relativa semplicità del motore e gli algoritmi di controllo da implementare sull'azionamento di controllo.

Queste caratteristiche rendono il motore DC preferibile su altri tipi di motore elettrico per l'applicazione del braccio robotico.

I motori DC di tipo brushless si distinguono da quelli tradizionali perché il rotore è dotato di magneti permanenti non controllati, mentre lo statore è controllato elettronicamente (da cui il termine EC). La funzione di commutazione è gestita da un controllore elettronico in grado di commutare la corrente dello rotore, eliminando la necessità di avere le spazzole/collettore, soggette ad usura e causa di scintille.

La potenza richiesta dall'applicazione (frazioni di Watt) rende il motore EC la scelta ideale per il braccio; inoltre, ai vantaggi tradizionali del motore DC si aggiungono la scarsa richiesta di manutenzione e le ridotte perdite termiche dato che la parte alimentata è il rotore esterno e quindi più facilmente raffreddabile, caratteristica fondamentale in una applicazione in cui il risparmio energetico e l'efficienza sono cruciali.

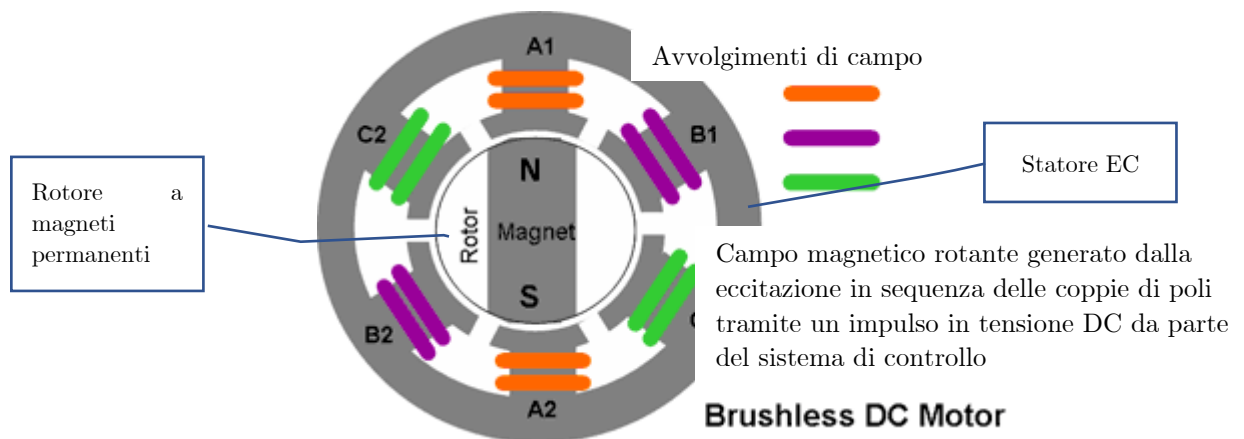


Figura 19 - Schema di principio motore brushless DC

2.7.2 Riduttori Armonici

La scelta successiva è stata quella del riduttore da accoppiare con il motore per ottenere le giuste caratteristiche di coppia: sono stati considerati riduttori a vite

senza fine, ad assi paralleli, epicicloidali ed armonici. I primi due tipi sono stati scartati per la bassa precisione fornita dalla presenza di giochi, mentre gli ultimi due sono stati confrontati più approfonditamente. Pur costando di più ed essendo meno efficienti, i riduttori armonici si sono dimostrati nettamente superiori per le applicazioni robotiche, grazie a svariate caratteristiche spiegate qui di seguito.

I riduttori armonici sono stati sviluppati per impieghi aerospaziali e sono costruiti sulla base di un principio innovativo, basato sulla deformazione di un elemento elastico, come si vede in figura 20. È costituito da tre elementi:

- generatore d'onda, di forma ellittica;
- flexspline, anello flessibile in acciaio con speciale dentatura esterna;
- circular spline, corona rigida con dentatura interna a z denti, due in più del flexspline.

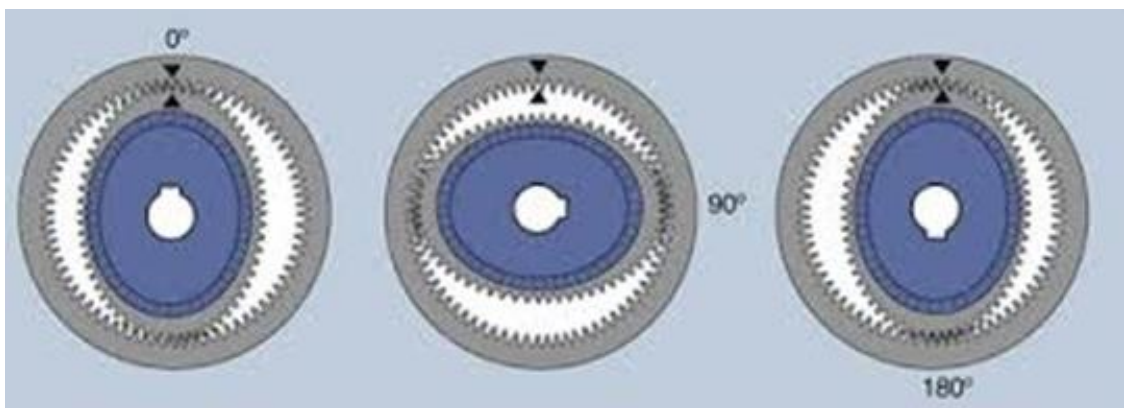


Figura 20 - Riduttore armonico

Pur essendo presente una dentatura, il contatto avviene senza strisciamento e il gioco è nullo. Il rapporto di trasmissione è pari a $z/2$. I principali vantaggi possono essere riassunti in:

- Dal momento che la potenza è trasmessa per mezzo di un ingranamento multi-dente, i riduttori armonici offrono una capacità di coppia uguale a dispositivi che sono il doppio di taglia e che pesano tre volte tanto
- I riduttori armonici lavorano con gioco zero tra i denti in presa grazie al precarico naturale della dentatura
- Il rapporto di riduzione in un singolo stadio va da 50:1 a 320:1 con tre soli componenti

- Nelle dentature dei riduttori armonici, i denti vengono in contatto con un movimento puramente radiale ed hanno velocità di scorrimento pari a zero, anche alle alte velocità. Le perdite dovute all'attrito tra i denti e l'usura sono praticamente trascurabili.
- I riduttori armonici mostrano un'altissima rigidità torsionale lungo tutta la gamma di velocità di lavoro. La curva caratteristica di rigidità, praticamente lineare, garantisce un ottimo comportamento operativo.

2.8 Componenti selezionati

Dopo molte simulazioni, provando traiettorie differenti tra punti differenti, si sono determinanti i range di coppia a cui sono sottoposti i vari giunti del braccio. Tali valori sono riportate in tabella 2.3, da notare che sono stati moltiplicati per un fattore correttivo pari a 1.5 e che sono stati approssimati alla decina per eccesso.

Tabella 2.3 Coppie massime ai giunti

| | Coppia MAX [Nm] |
|----------|------------------|
| Giunto 1 | 10 |
| Giunto 2 | 60 |
| Giunto 3 | 50 |
| Giunto 4 | 20 |

I motori selezionati sono due modelli differenti di motori EC, della stessa tipologia e prodotti nella stessa azienda: Harmonic Drive. Entrambi i modelli soddisfano le caratteristiche richieste, presentando inoltre un foro passante al centro che permette facilmente il passaggio di cavi.

Il primo tipo di motore sarà per il Giunto 1 e il Giunto 4, che richiedono coppie minori, ed è il modello FHA-14C-100 (mini). Il modello è presentato in figura 21 e le caratteristiche sono elencate in tabella 2.4.

Tabella 2.4 - Caratteristiche motore giunti 1 e 4

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Coppia Massima Erogabile | 28 [Nm] |
| Rapporto riduzione | 1:100 |
| Velocità Massima | 60 [rpm] |
| Encoder | Assoluto |
| Costante di Coppia | 2.9 [Nm/A], (rms) |
| Tensione di Alimentazione | 24 [V], DC |
| Corrente Massima | 2.4 [A] |
| Peso | 1.4 [kg] |
| Dimensioni | 78x75x75 [mm] |
| Uscita del Rotore | Flangiata con foro passante |

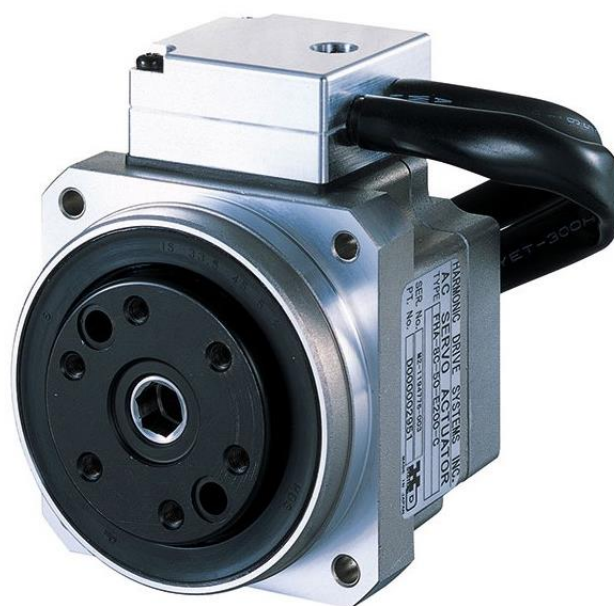


Figura 21 - Motore dei giunti 1 e 4

Il secondo tipo di motore sarà per il Giunto 2 e il Giunto 3, che richiedono coppie elevate, ed è il modello FHA-17C-160. Il modello è presentato in figura 22 e le caratteristiche sono elencate in tabella 2-5.

Tabella 2.5 - Caratteristiche motore giunti 2 e 3

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Coppia Massima Erogabile | 64 [Nm] |
| Rapporto riduzione | 1:160 |
| Velocità Massima | 27 [rpm] |
| Encoder | Quad Encoder |
| Freno | Si |
| Tensione di Alimentazione | 24 [V], DC |
| Corrente Massima | 16 [A] |
| Peso | 2.5 [kg] |
| Dimensioni | 78x128x128 [mm] |
| Uscita del Rotore | Flangiata con foro passante |
| Carico assiale permesso | 9.8 [kN] |
| Carico radiale permesso | 2.9 [kN] |



Figura 22 - Motore dei giunti 2 e 3

2.9 Design Meccanico

Come descritto nelle sezioni precedenti, per il braccio robotico di MORPHEUS è stato scelto un design a gomiti, in modo da permettere una maggiore compattezza totale e di non avere carichi a sbalzo sui motori.

2.9.1 Primo giunto e l'interfaccia con il telaio

Il primo giunto è la spalla del braccio. Si può trovare una rappresentazione dettagliata della meccanica di questo giunto **in figura XX**, a cui si farà riferimento per tutta questa sezione.

In questo giunto, tutte le componenti fisse, come lo statore/cassa del motore, il supporto flangiato del cuscinetto e le piastre di fissaggio, sono solidali a telaio di MORPHEUS e non hanno moti relativi rispetto a questo. La cassa del motore è vincolata a una piastra di alluminio da 3 mm, a cui è avvitata tramite quattro fori M5; questa piastra a sua volta è sostenuta da quattro profilati estrusi in alluminio (di sezione 20 × 20 mm), i quali sono avvitati direttamente sopra delle barre inferiori del telaio, sfruttando fori preesistenti. Anche il supporto flangiato del cuscinetto è avvitato ad una piastra di alluminio da 3 mm; a sua volta questa piastra è avvitata sopra delle barre superiori del telaio, sfruttando anch'essa fori preesistenti.

In questo giunto, tutte le componenti mobili, come i due alberi flangiati, il doppio cuscinetto a contatto angolare ed il giunto elastico sono invece solidali al rotore del motore. Il primo albero flangiato viene avvitato direttamente sul rotore del motore sfruttando i fori filettati M5 presenti su questo; questo albero trasmetterà poi la coppia dal motore al lato inferiore del giunto elastico, tramite un collegamento con grano filettato. Il giunto elastico, **visibile in figura xx**, viene utilizzato per proteggere il motore da eventuali carichi causati da disallineamenti tra i vari componenti; al lato superiore del giunto elastico viene collegato, sempre tramite un grano filettato, il secondo albero flangiato. Quest'ultimo albero passa poi attraverso un doppio cuscinetto a contatto angolare montato con interferenza nel supporto flangiato; il cuscinetto, **anch'esso visibile in figura xx**, è caratterizzato da un montaggio ad O, il quale permette il moto rotativo assorbendo eventuali carichi assiali e radiali provenienti dai successivi link del braccio, proteggendo quindi il motore. L'albero flangiato è vincolato verticalmente al cuscinetto tramite uno spallamento nella parte superiore e da una ghiera sostenuta da un anello elastico nella parte inferiore (**in figura xx** è visibile la cava di alloggiamento dell'anello nel dettaglio dell'albero flangiato). La parte superiore di questo albero finisce con una flangia (52 mm di diametro) sulla quale sono presenti sei fori M5 a 60° l'uno dall'altro: questi fori permetteranno di fissare il supporto per il motore del giunto successivo.

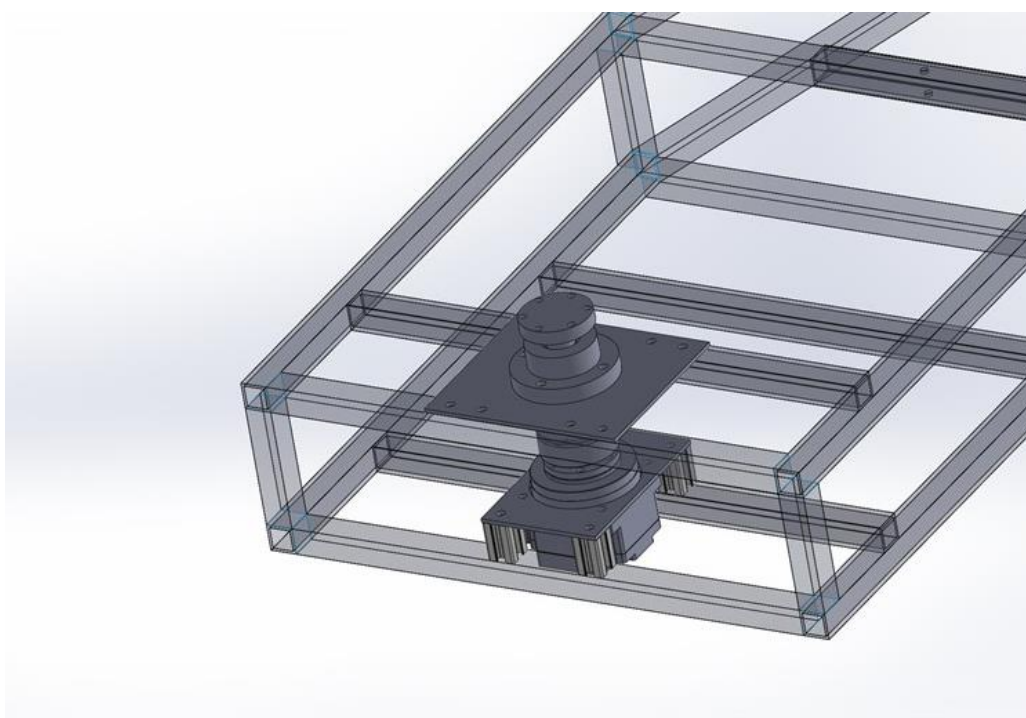
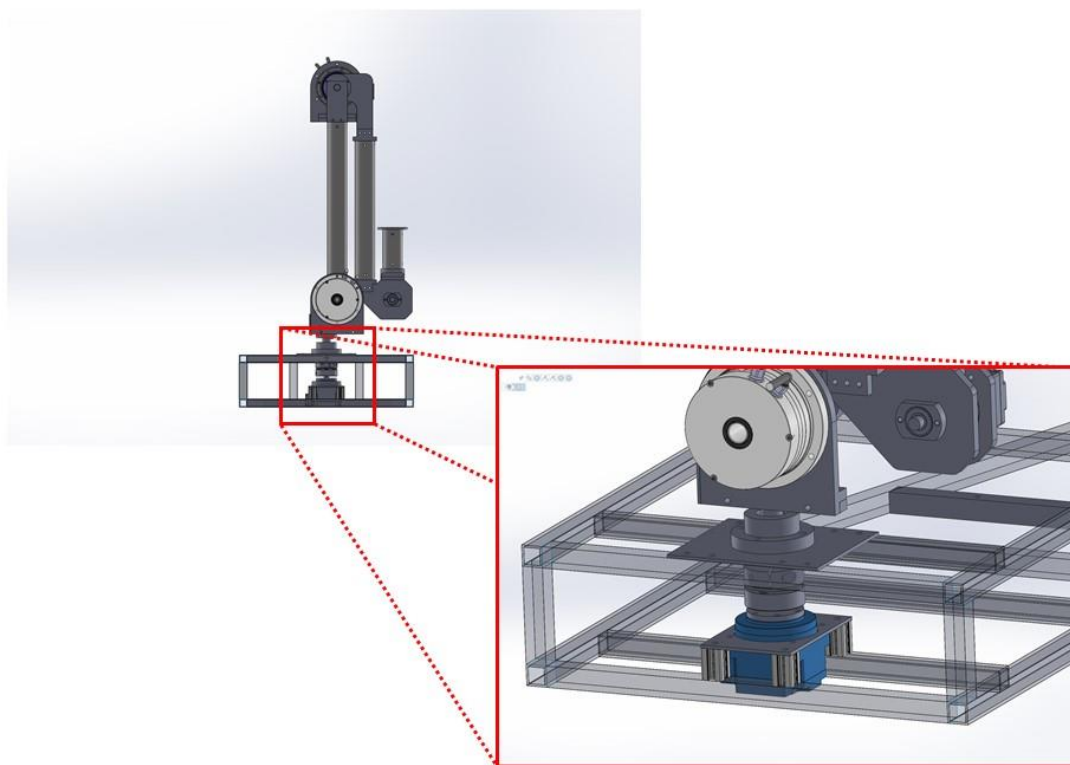


Figura 23 - Viste del giunto 1 (A)

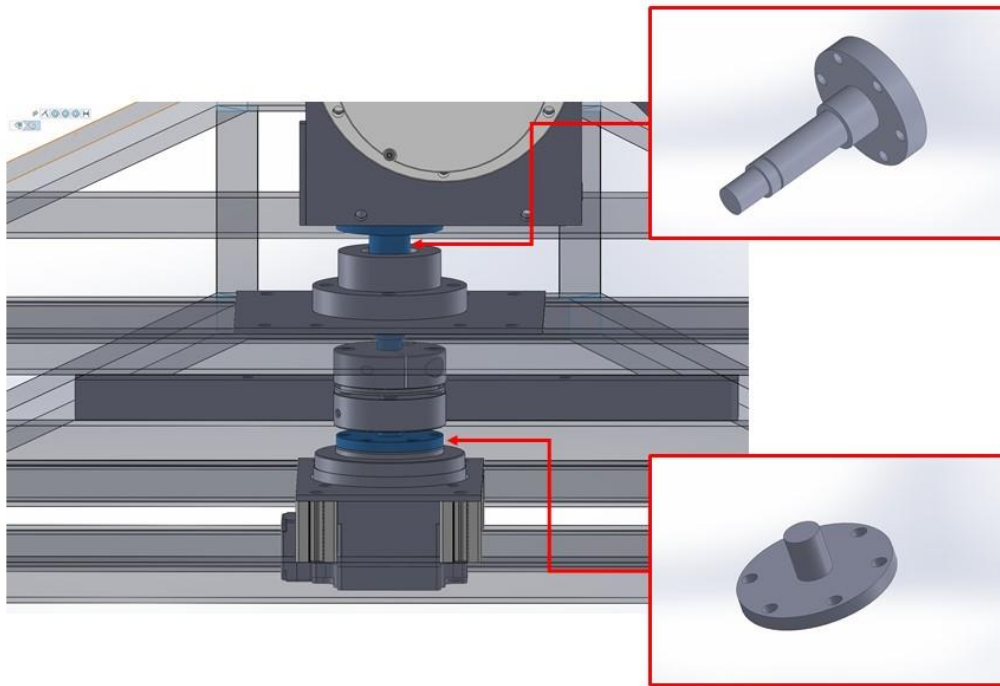


Figura 24 - Vista del giunto 1 (B), cuscinetto e giunto elastico

2.9.2 Secondo giunto e primo link

Il secondo giunto è il primo dei tre giunti consecutivi e paralleli del braccio. Si può trovare una rappresentazione dettagliata della meccanica di questo giunto in [figura XX](#), a cui si farà riferimento per tutta questa sezione.

In questo giunto, tutte le componenti fisse, come lo statore/cassa del motore, il supporto a T con i suoi due alberi e le piastre di fissaggio, sono solidali alla flangia finale della spalla e non hanno moti relativi rispetto a questa. Proprio sulla flangia della spalla viene avvitata una prima piastra di alluminio che fungerà da base per il supporto del motore del giunto; anche questo sostegno è in alluminio. Il supporto del motore e la piastra base sono caratterizzati da una serie di fori passanti o filettati che ne permettono il fissaggio reciproco, aiutato inoltre sul lato dalla presenza di una piastrina triangolare opportunamente forata. Sempre sulla piastra base viene avvitato un supporto a cui vengono fissati due alberi d'acciaio per formare un giunto a T; questi due alberi opportunamente sagomati forniranno l'asse per la rotazione del primo link. Sul giunto a T così creato viene montata una struttura a C; per comodità faremo riferimento ai 3 componenti che compongono questa struttura chiamandoli architrave e piedritti (colonne), data la somiglianza con l'assieme di elementi architettonici. Entrambi i piedritti sono poi montati sui due alberi del giunto a T tramite doppi cuscinetto a contatto angolare (montaggio ad O, mostrato in [figura xx](#)), inseriti in delle cave opportunamente ricavate nel pezzo; dei fori passanti sui piedritti permettono il precarico dei cuscinetti avvitando dei dadi sulle estremità filettate degli alberi; questi due cuscinetti precaricati permettono di proteggere il motore dai carichi provenienti dai link successivi del braccio. La flangia di uscita del rotore è fissata tramite fori filettati al piedritto più vicino ad essa, a cui viene quindi trasmessa direttamente tutta la coppia del motore. Sopra i piedritti viene quindi avvitata l'architrave, che permette di collegarli e che possiede, oltre ad un grosso foro passante per il passaggio dei cavi, un supporto cilindrico nella sua parte superiore. Su tale supporto cilindrico, che possiede un diametro esterno pari al diametro interno del primo link, viene fissato quest'ultimo tramite quattro fori filettati.

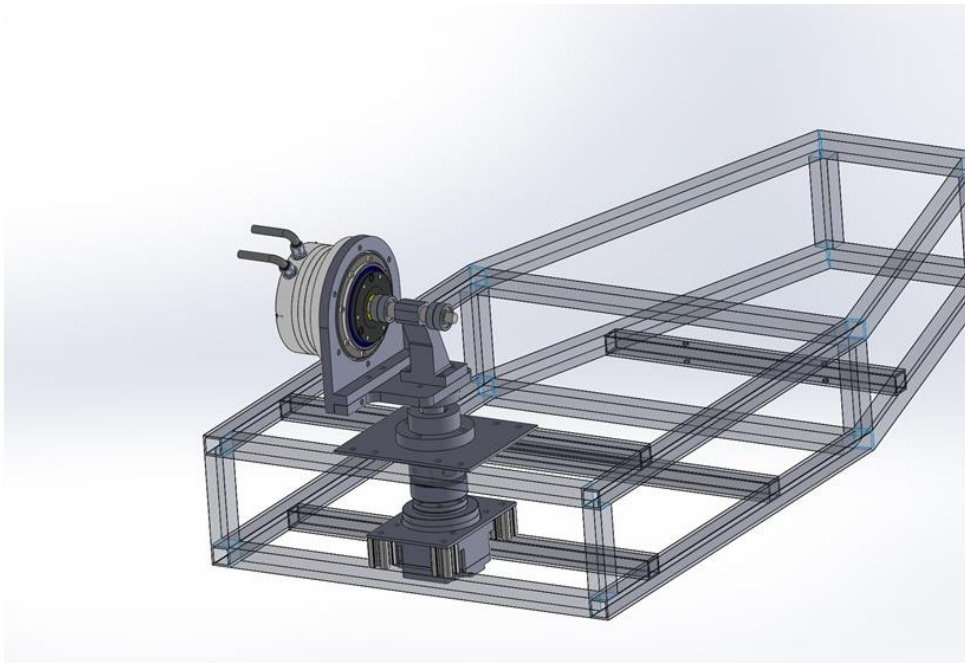
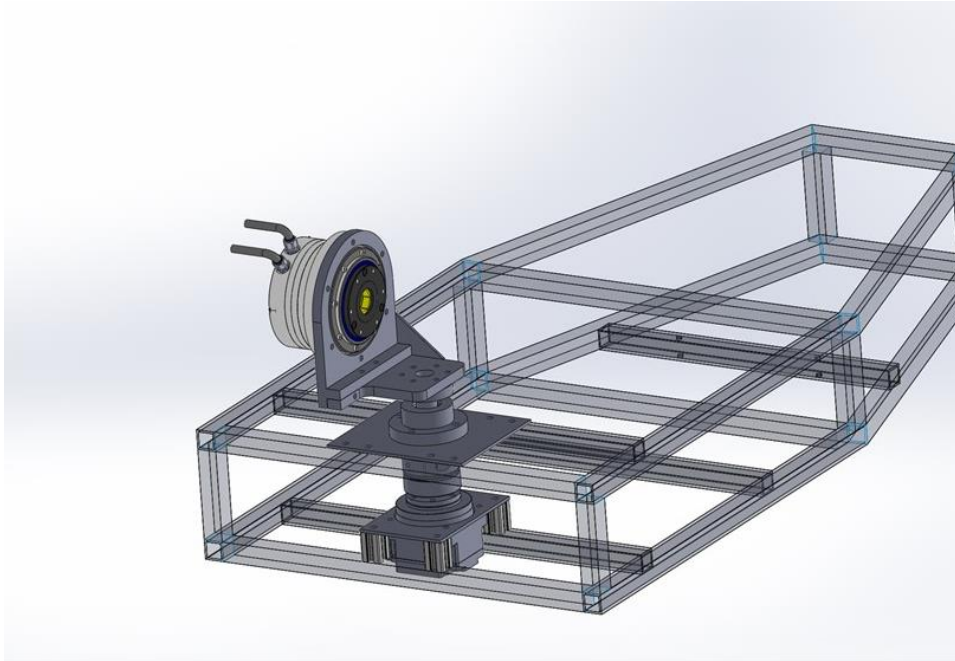


Figura 25 - Viste del giunto 2 (A)

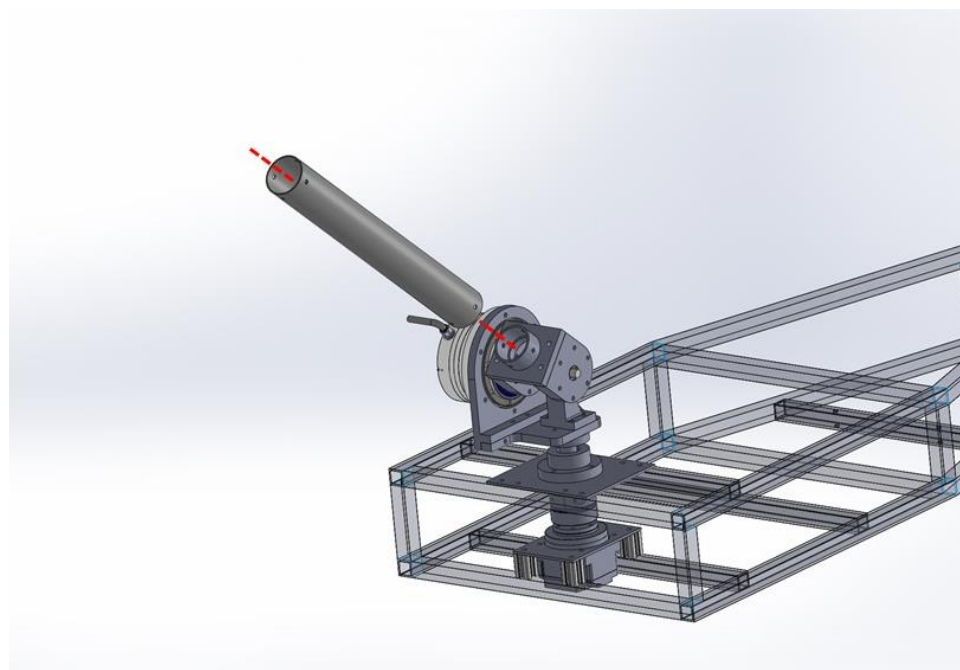
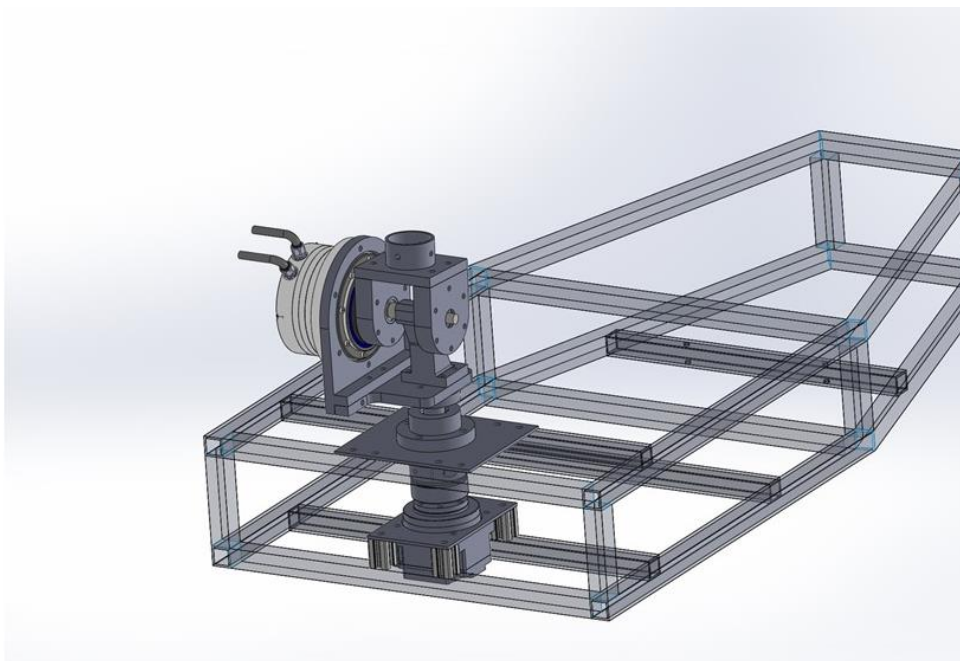


Figura 26 - Viste del giunto 2 (B)

2.9.3 Terzo giunto e secondo link

Il terzo giunto è il secondo dei tre giunti consecutivi e paralleli del braccio. Si può trovare una rappresentazione dettagliata della meccanica di questo giunto in figura XX, a cui si farà riferimento per tutta questa sezione.

In questo giunto, tutte le componenti fisse, come lo statore/cassa del motore, il supporto del cuscinetto e le piastre di fissaggio, sono solidali al link 1 e non hanno moti relativi rispetto a questo. L'estremità libera del primo link opportunamente forata per permettere l'accoppiamento con la piastra d'alluminio che funge da base per il terzo giunto, sfruttando un principio simile all'architrave del secondo giunto, ovvero un supporto cilindrico con diametro esterno pari al diametro interno del link. Su tale piastra base viene fissato il supporto per il motore, anche questo in alluminio. Analogamente al giunto precedente, supporto del motore e la piastra base sono caratterizzati da una serie di fori passanti o filettati che ne permettono il fissaggio reciproco; su tale piastra base viene fissato anche il supporto per un doppio cuscinetto a contatto angolare (montato ad O), che avrà lo stesso asse di rotazione del motore. Il cuscinetto fungerà da supporto per un albero flangiato, che presenta lo stesso pattern di fori della flangia del rotore e che verrà montata davanti ad essa. La struttura che formerà il gomito del secondo link viene montata proprio tra la flangia del rotore e l'albero sostenuto dal cuscinetto. Tale struttura a gomito formata da due piastre uguali e parallele, a forma di L, delle quali una è avvitata alla flangia del rotore, da cui riceve la coppia del motore, mentre l'altra è avvitata all'albero sostenuto del cuscinetto. Queste due piastre sono collegate nella mezzeria da una piastrina opportunamente forata e nella parte inferiore da una struttura a cui si collegherà il link vero e proprio, sfruttando una soluzione analoga a quella del precedente.

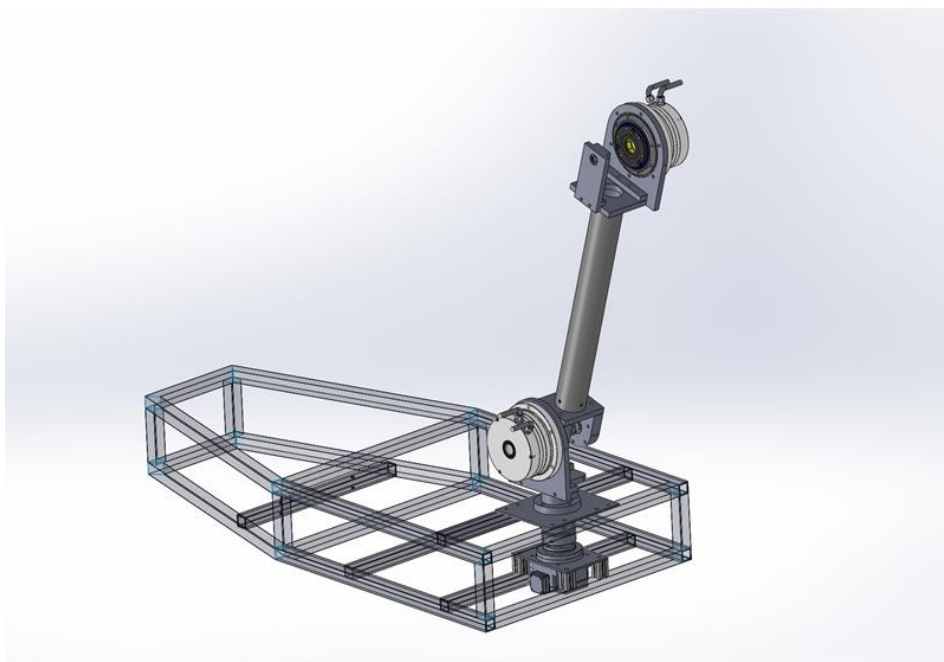
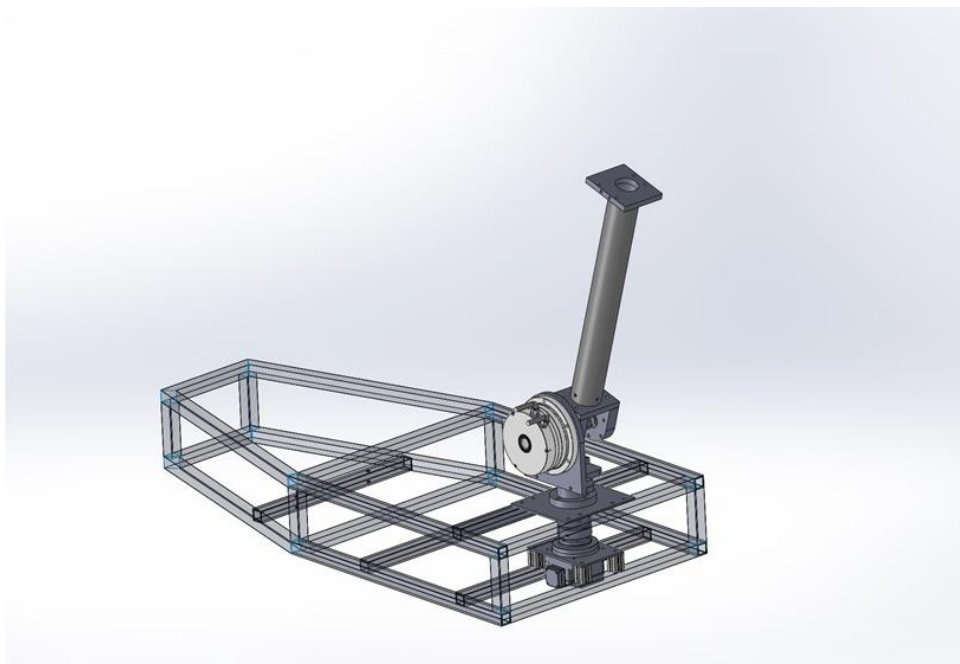


Figura 27 - Viste del giunto 3 (A)

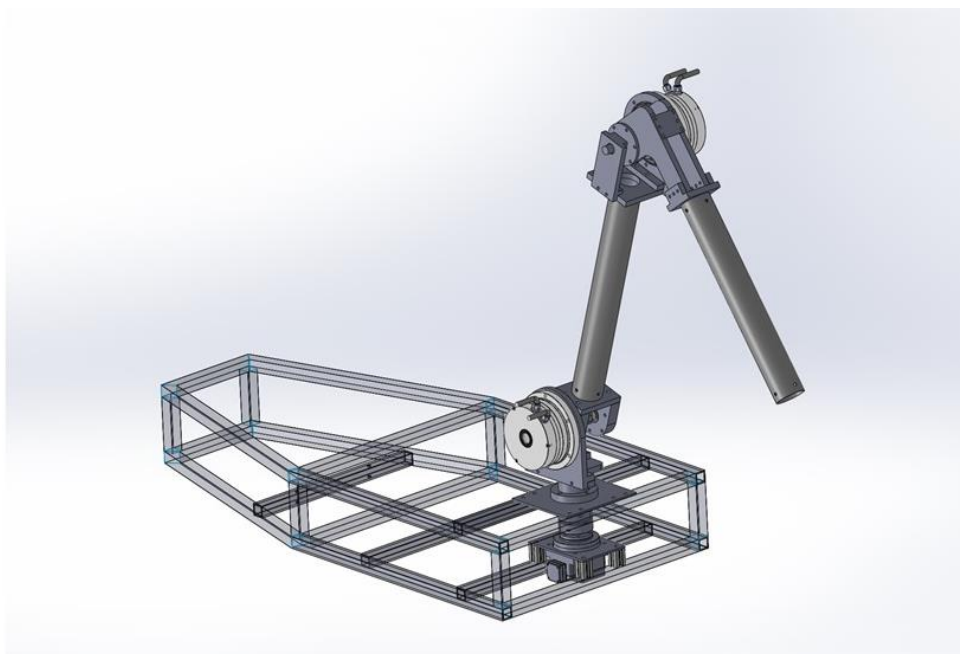
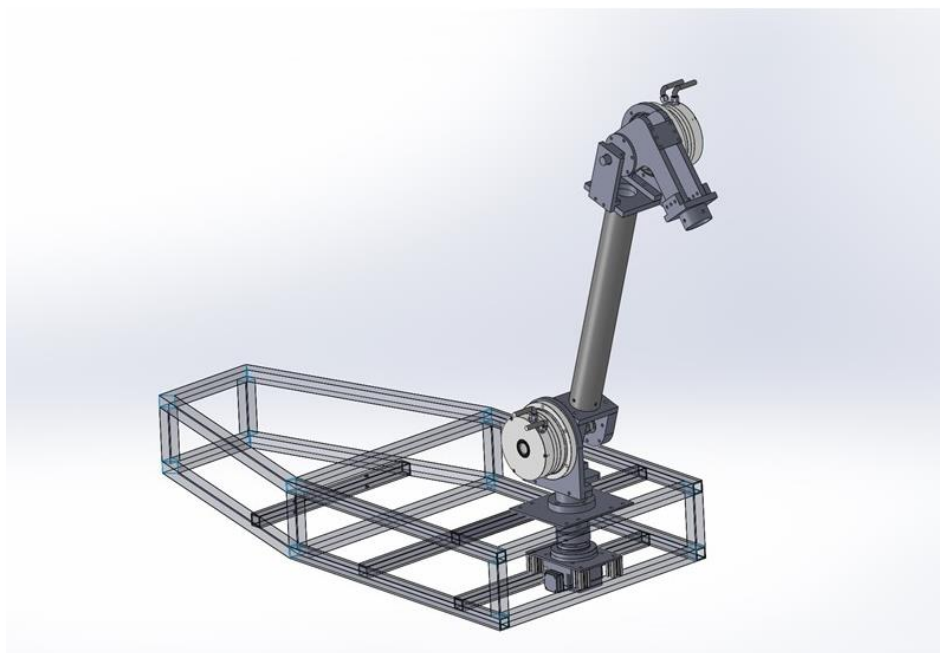


Figura 28 - Viste del giunto 3 (B)

2.9.4 Quarto giunto e l'interfaccia per l'end effector

Il quarto giunto è l'ultimo dei tre giunti consecutivi e paralleli del braccio. Si può trovare una rappresentazione dettagliata della meccanica di questo giunto in figura XX, a cui si farà riferimento per tutta questa sezione.

In questo giunto, tutte le componenti fisse, come lo statore/cassa del motore, il supporto del cuscinetto e le piastre di fissaggio, sono solidali al link 2 e non hanno moti relativi rispetto a questo. L'estremità libera del secondo link è opportunamente forata per permettere l'accoppiamento con il pezzo in alluminio che funge da base per il terzo giunto, sfruttando un principio simile alla piastra base in cima al secondo giunto, ovvero un supporto cilindrico con diametro esterno pari al diametro interno del link; tuttavia questo componente presenta una peculiarità rispetto al precedente: due sporgenze perpendicolari alla base che, tramite fori, permettono l'accoppiamento con il secondo gomito fisso del manipolatore. Il secondo gomito è composto da due piastre parallele, con uguale impronta ma forate diversamente: una deve sostenere il motore del quarto giunto, l'altra un cuscinetto flangiato. Il cuscinetto, di tipo radiale, fungerà da supporto per un albero flangiato, che presenta lo stesso pattern di fori della flangia del rotore e che verrà montata davanti ad essa. In modo simile a quanto presentato per giunto precedente, tra la flangia del motore e l'albero flangiato viene inserito il supporto per il terzo giunto. Questo supporto verrà avvitato ad entrambi sfruttando i fori filettati della flangia del rotore; analogamente agli altri supporti per i links, anche questo viene collegato al terzo link tramite una struttura cilindrica con fori filettati. Anche l'estremità libera del terzo link è opportunamente forata per permettere l'accoppiamento con l'interfaccia per l'end effector, che si presenta come un tappo flangiato caratterizzato da un grande foro centrale per permettere il passaggio dei cavi e con un set di 8 fori distanziati di 45 gradi l'uno dall'altro.

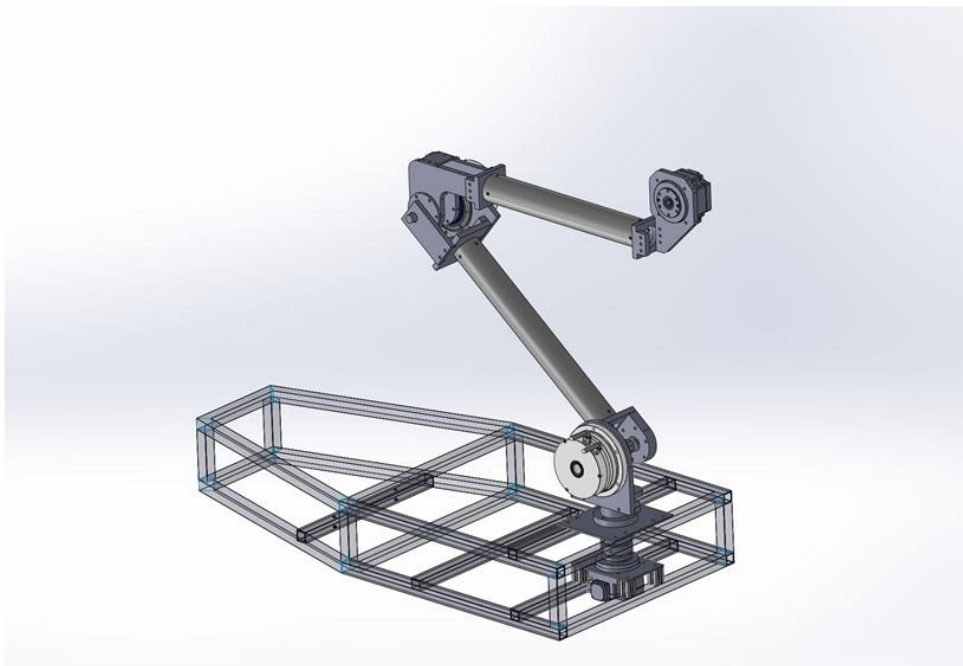
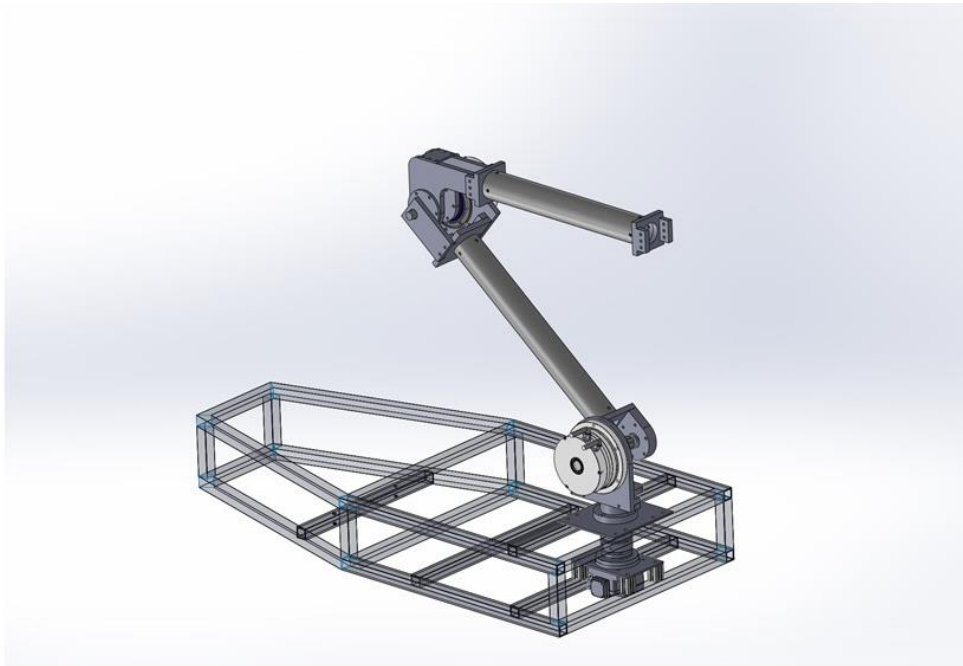


Figura 29 - Viste del giunto 4 (A)

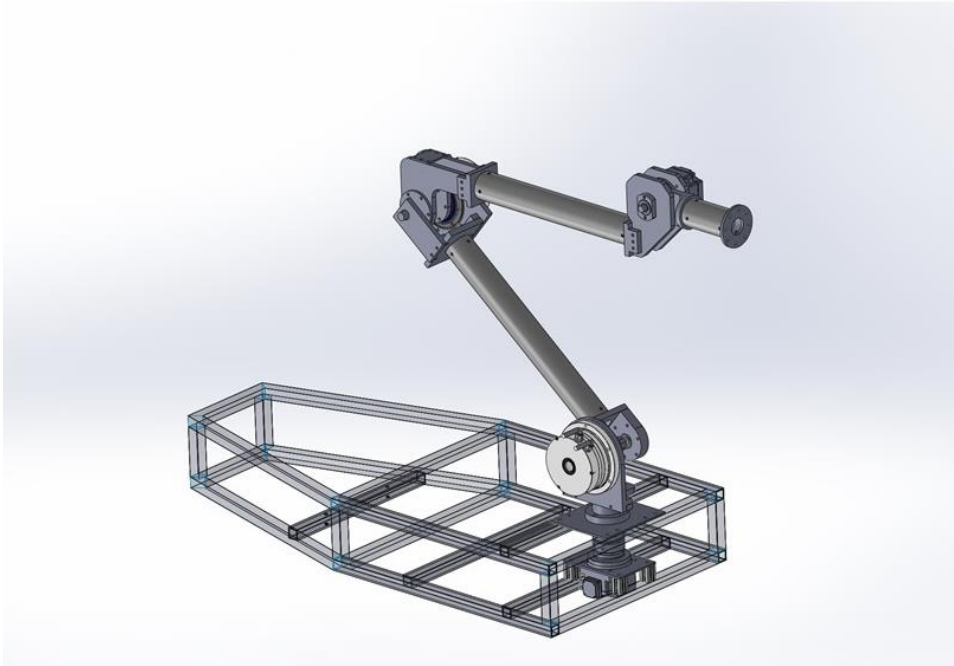
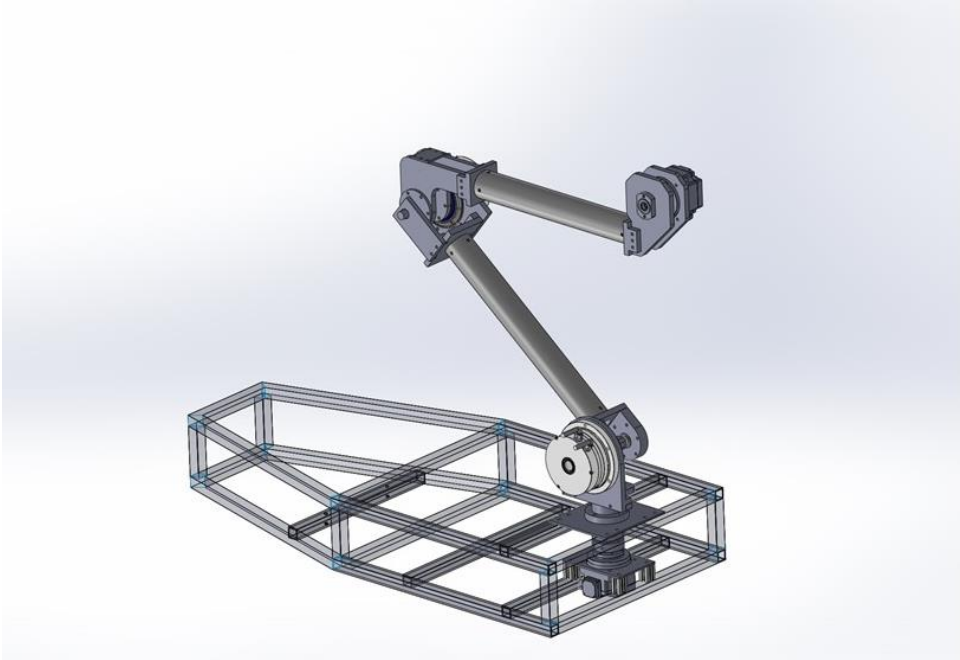
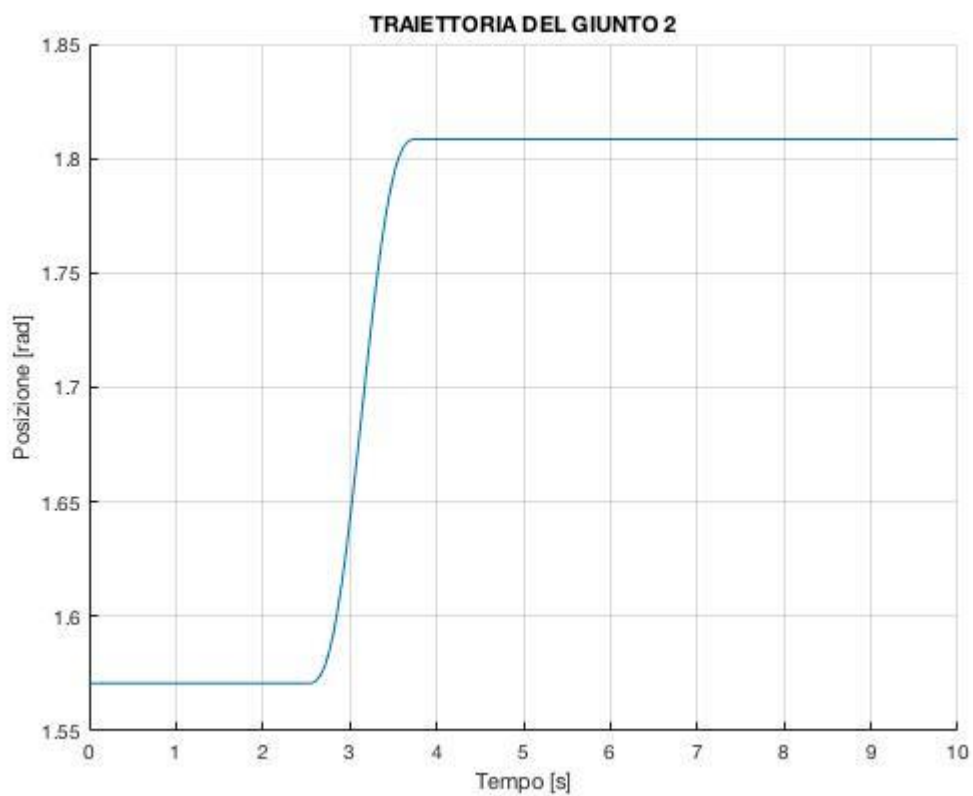
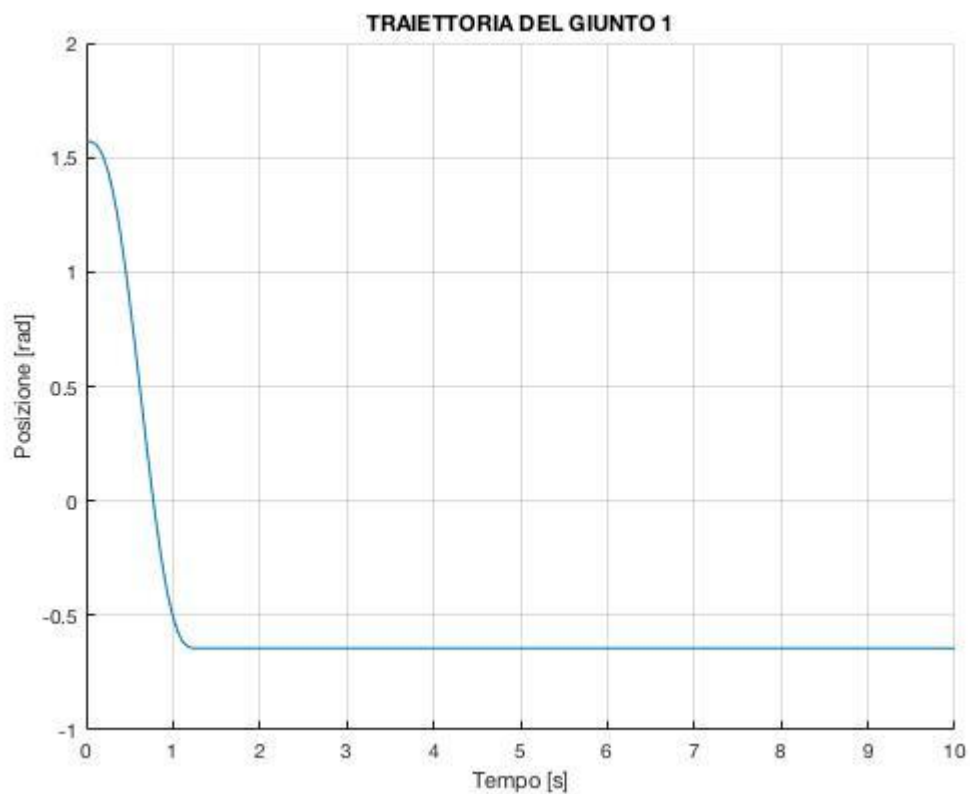
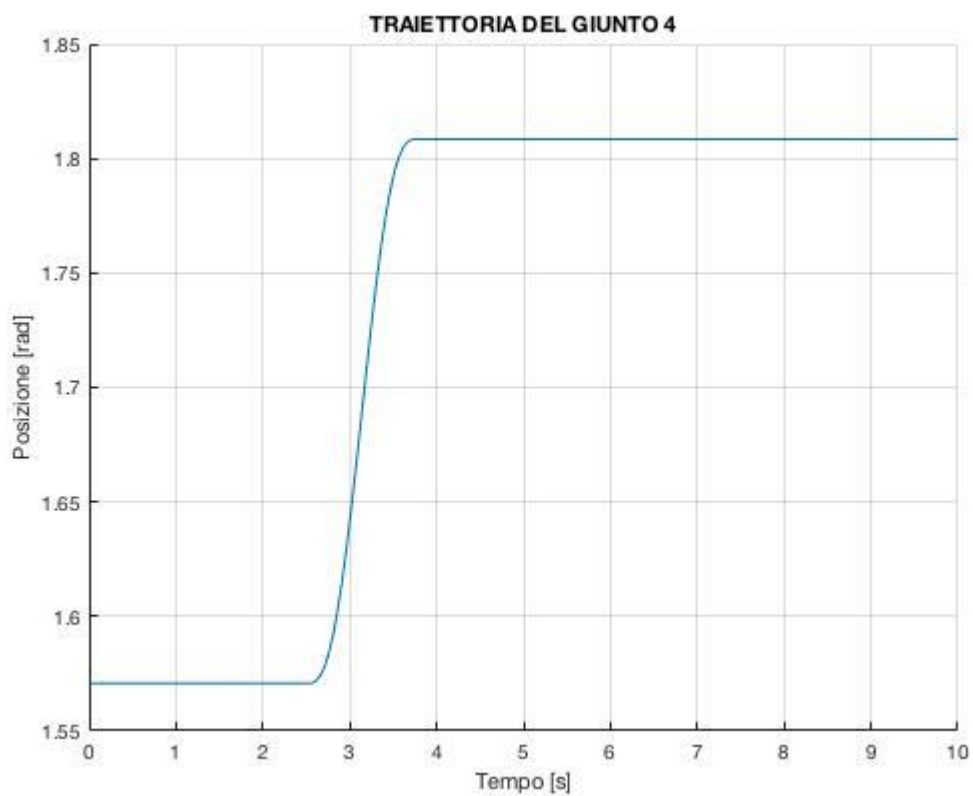
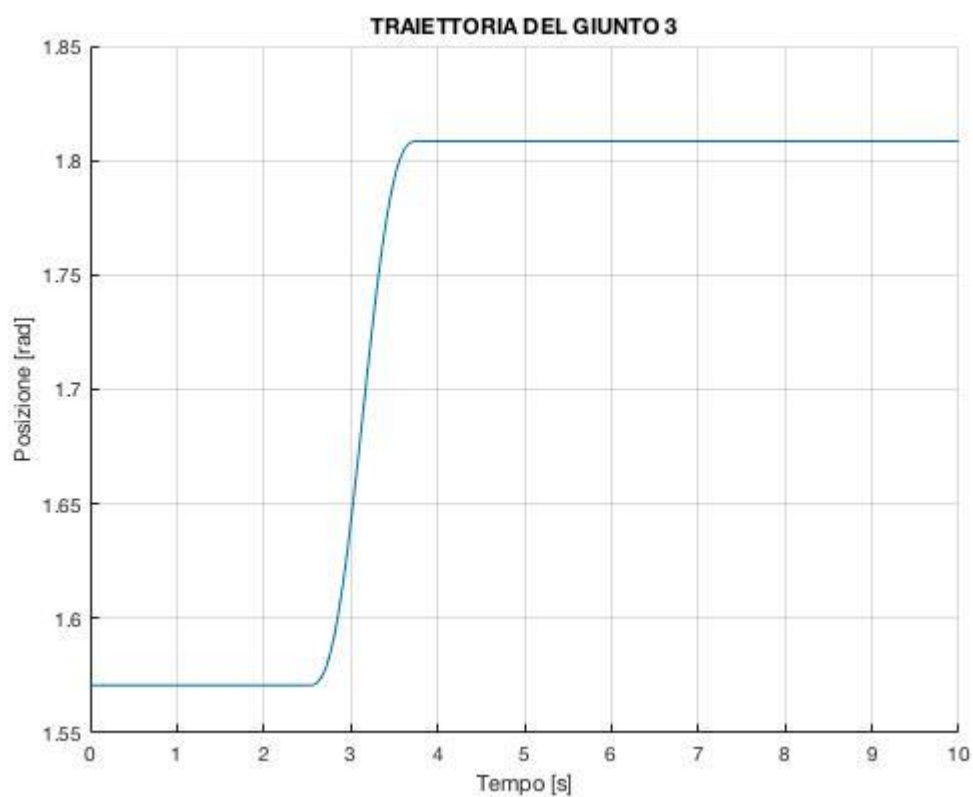
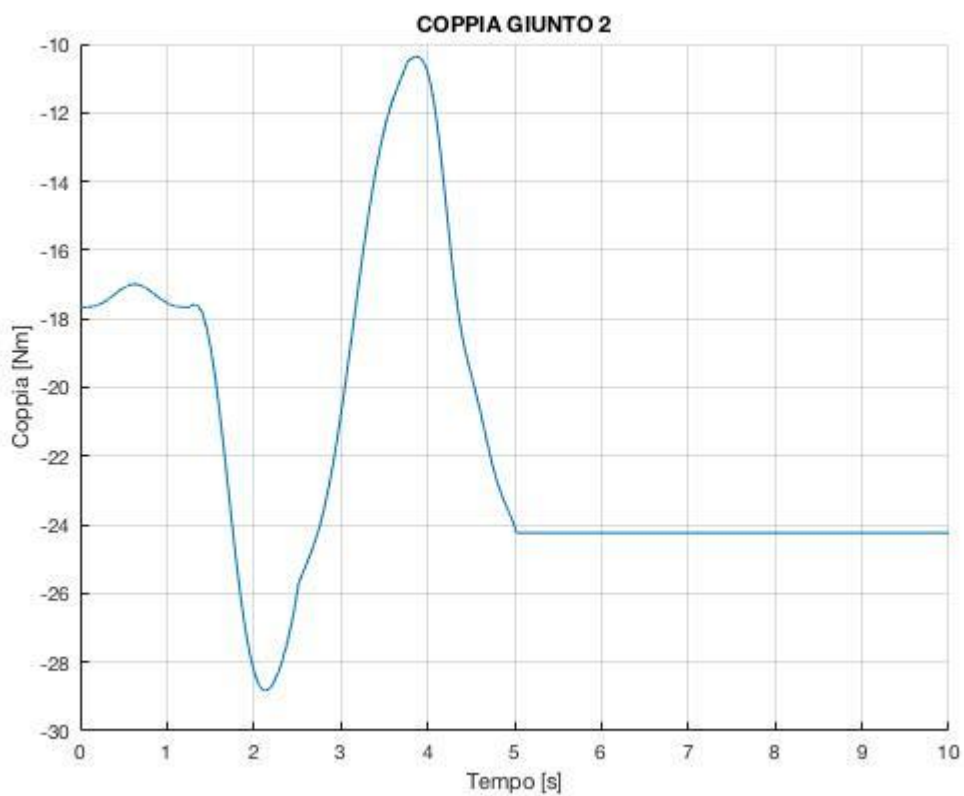
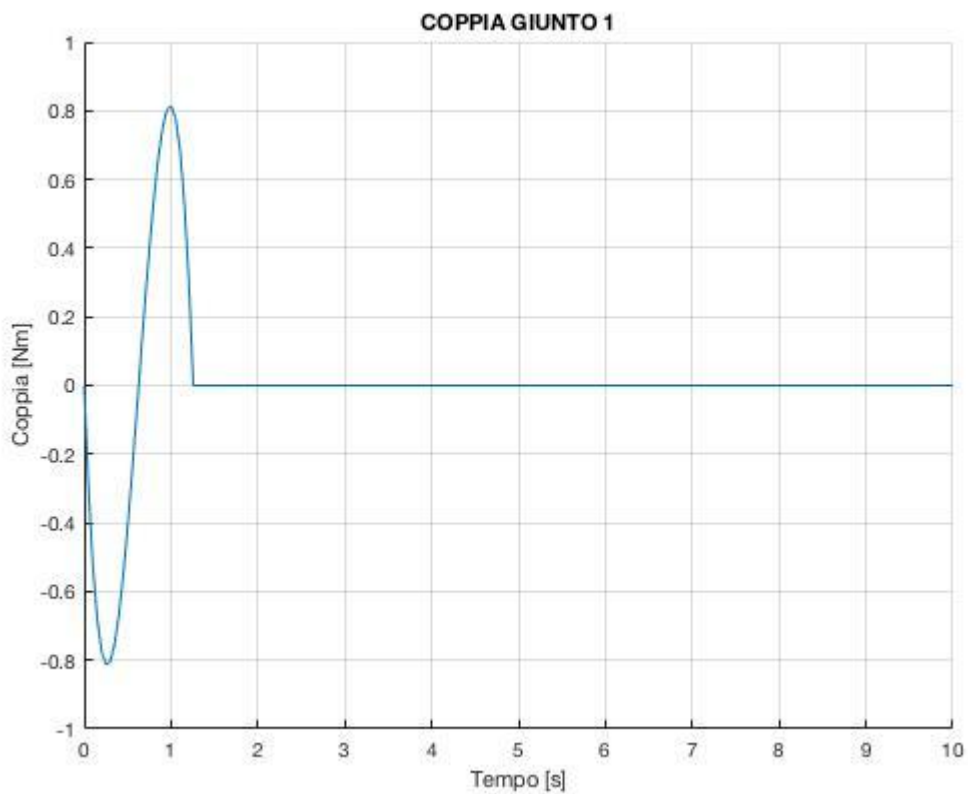


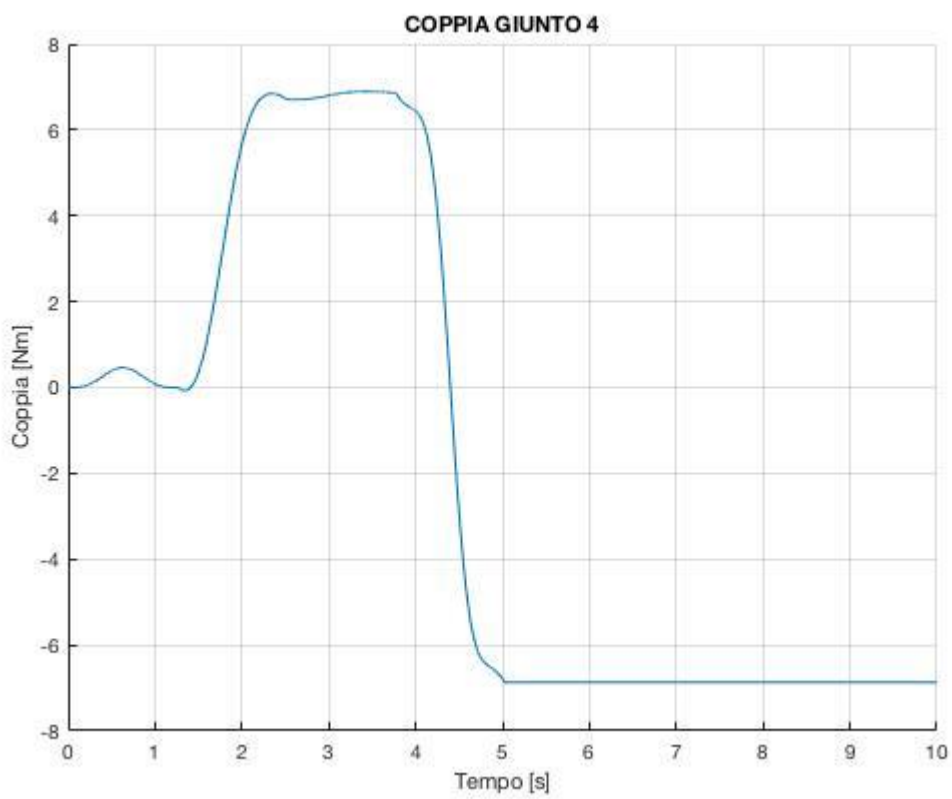
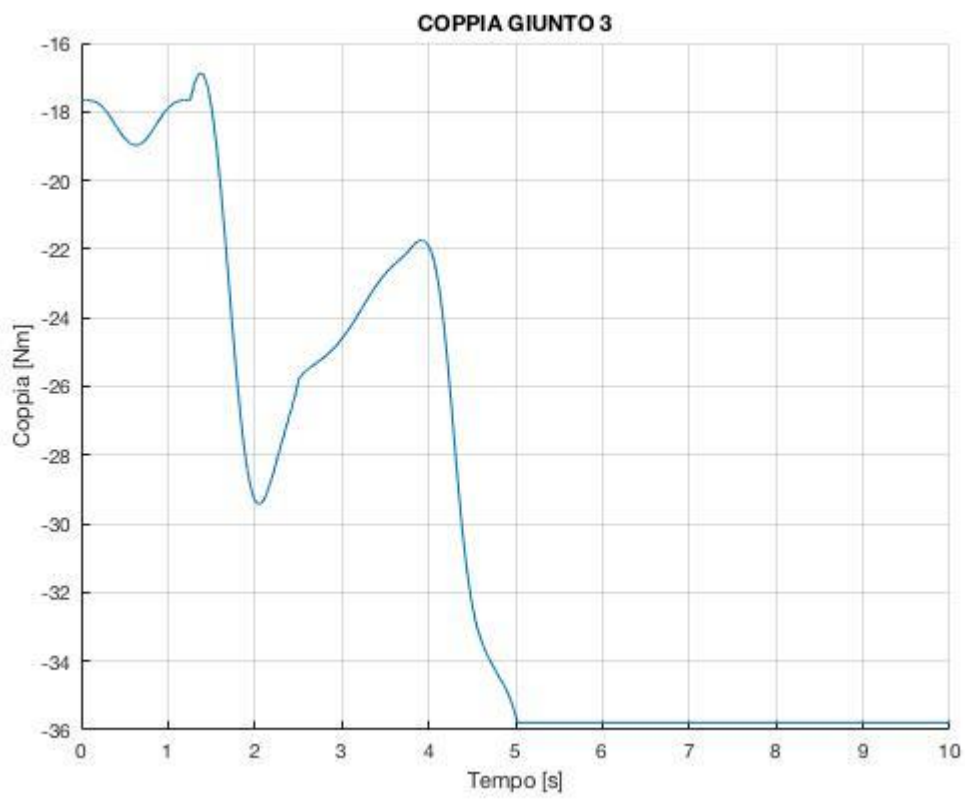
Figura 30 - Viste del giunto 4 (B)

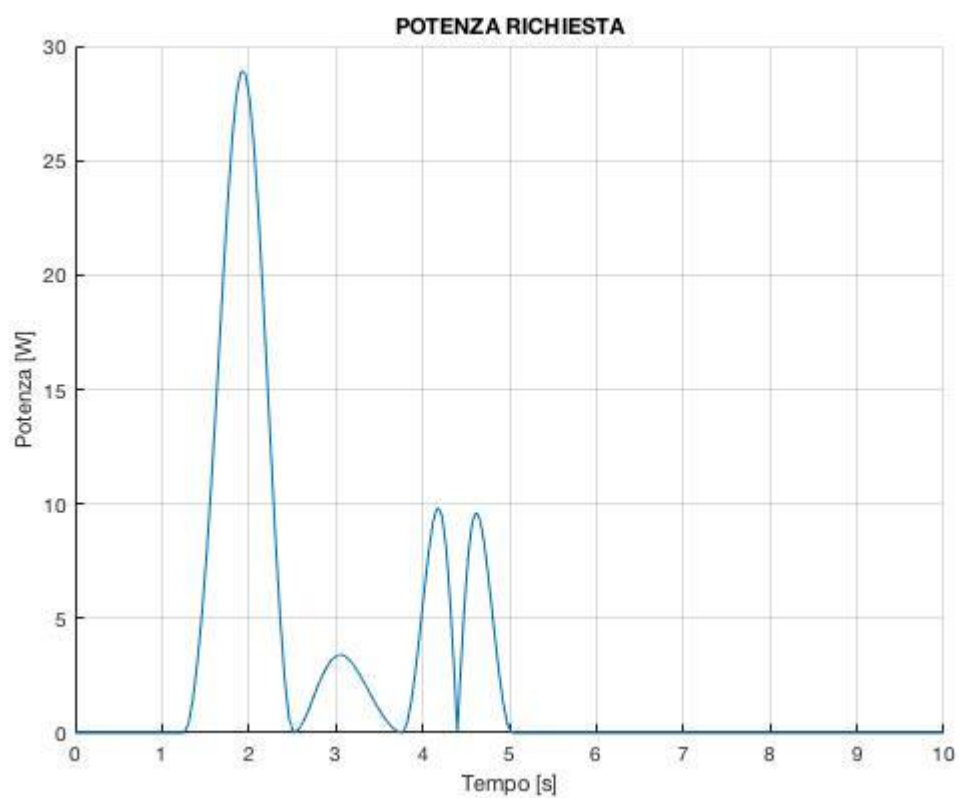
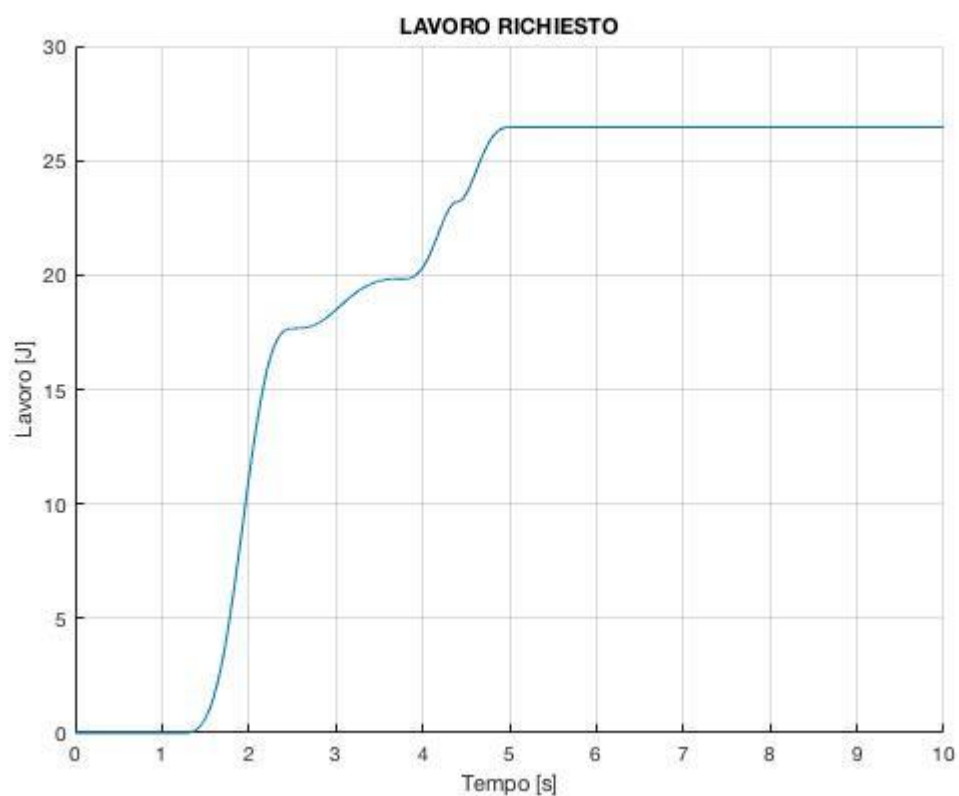
2.10 Appendice con grafici delle traiettorie, coppie e potenza











Capitolo 3

Il Sistema di trivellazione di MORPHEUS

Come è stato accennato in precedenza, la trivella di MORPHEUS 1.0 ha presentato notevoli criticità, riguardanti la notevole possibilità di fallimento del sottosistema a causa di carichi eccessivi sui motori. Per risolvere di questi problemi è stato necessario realizzare nuovi componenti meccanici, oltre a modificarne alcuni di quelli già in possesso del team; queste lavorazioni sono avvenute presso le officine meccaniche del DII, eseguite in parte dai tecnici e in parte dal team. Ciò ha permesso di montare e azionare la trivella (vedi Figura 31), ottenendo importanti informazioni su come il sistema rispondesse in condizioni operative: è stato possibile scavare per più di 5 centimetri in un terreno compatto, ma poi è stato preferito fermare il test per paura di rovinare i componenti. Alla luce di ciò, è stato deciso di progettare una nuova trivella più robusta, e progettata con una metodica più strutturata e tenendo in considerazione gli errori del passato; questo nuovo sistema è mostrato in figura 32. Il capitolo descrive questo procedimento e le motivazioni delle scelte eseguite. È da notare che, contrariamente a quanto accaduto nel caso del braccio, non è stato stravolto completamente il tipo di sistema: questo è stato migliorato, mantenendo al contempo il principio di funzionamento, i motori e la punta.



Figura 31 - Trivella 1.0 durante un test

3.1 Design Meccanico

Il principio di funzionamento della trivella è molto semplice, esso si basa su due elementi: una piastra che funge da pattino e una punta di trapano. Analogamente alla prima versione del sistema la piastra può traslare verticalmente, mentre un motore che è montato su di essa permette la rotazione della punta. La traslazione del pattino è invece assicurata da un sistema a vite senza fine. I principali obiettivi di questa nuova versione della trivella erano quelli di riuscire a garantire una protezione dai carichi al motore della punta, garantendo al contempo che rispetto a quest'ultima i carichi fossero simmetrici; chiaramente si intendono i carichi operativi nominali, relativi alle sole operazioni di trivellazione.

3.1.1 Sistema di Traslazione della Punta

Il sistema di traslazione della punta si basa su una serie di componenti ben precisi, visibili in figura 33: un telaio, a forma di parallelepipedo, tre piastre d'alluminio,

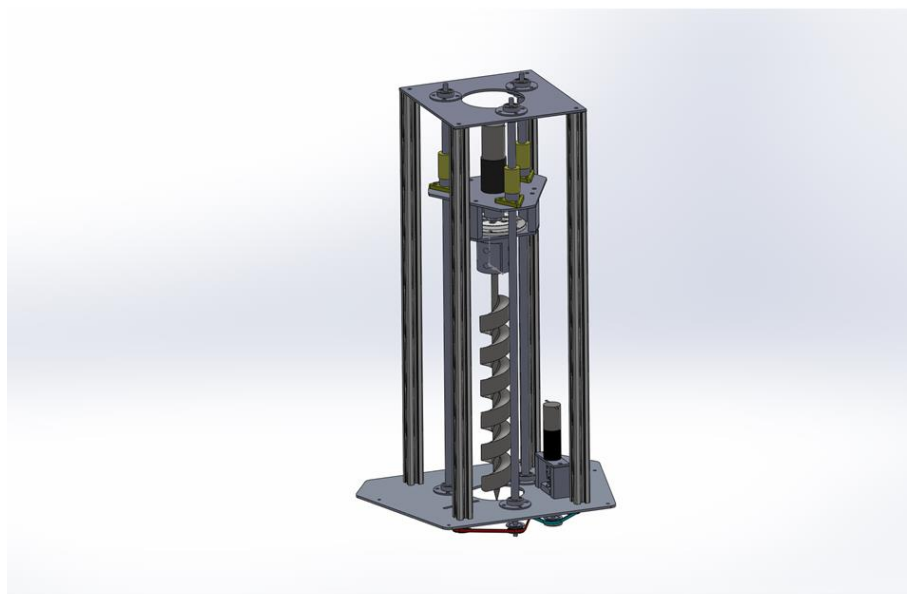


Figura 32 - Assieme Trivella 2.0

un sistema di tre viti senza fine accoppiate con le rispettive madreviti e un sistema di trasmissione a cinghia dentata con relativo motore e tendicinghia.

Il telaio è composto da quattro profili Bosch Rexroth®), di sezione 20x20 mm e lunghi circa 500 mm, i quali sono avvitati in testa alle due piastre fisse, inferiore e superiore. Oltre ai vincoli dovuti alle piastre, il sistema è ulteriormente irrigidito sfruttando 4 pannelli in alluminio a forma di X, di spessore 2 mm; questi pannelli sono avvitati con sui vertici di ogni faccia del parallelepipedo, sfruttando dei T-nuts con foro da 4 mm inseriti nelle scanalature dei profili.

Sulla piastra superiore sono presenti tre coppie di cuscinetti a contatto angolare, visibili, opportunamente montati con configurazione ad O. Questi cuscinetti servono a sostenere la parte finale delle viti senza fine, che deve poter ruotare ma che al contempo è sottoposta a carichi sia radiali che assiali. Il precarico dei cuscinetti è assicurato dal fatto che la vite, le cui estremità devono essere lavorate, da un lato possiede uno spallamento, mentre dall'altro un filetto (di diametro inferiore all'originale) che permette di stringere un dado. La piastra possiede un ulteriore grande foro centrale, per permettere sia l'eventuale passaggio del motore nel caso si volesse ritrarre molto la punta, sia il passaggio di cavi calati dall'altro, in modo che questi non abbiano la possibilità di attorcigliarsi attorno alla punta.

La piastra inferiore possiede grande foro centrale, che permette il completo passaggio della punta durante la discesa verso il terreno. Anche sulla piastra

inferiore sono presenti tre coppie di cuscinetti a contatto angolare, opportunamente montati con configurazione ad O. Questi cuscinetti servono a sostenere la parte finale delle viti senza fine, che deve poter ruotare ma che al contempo è sottoposta a carichi sia radiali che assiali. Il precarico di questi cuscinetti è assicurato dal fatto che la vite, le cui estremità devono essere lavorate, da un lato possiede uno spallamento, mentre dall'altro viene messa in trazione tramite l'utilizzo di una ghiera, che viene caricata dalla presenza della puleggia (che viene stretta tramite dado). La piastra possiede inoltre dei fori che permettono il montaggio verticale del motore che fa traslare il sistema: esso è montato con l'albero verso il basso, il quale entra in un giunto elastico a cui viene accoppiato tramite un grano filettato. Dall'altro lato di questo giunto elastico, utilizzato per proteggere il motore da eventuali disallineamenti, è presente un albero opportunamente spallato, il quale entra dentro un cuscinetto radiale e va poi a trasmettere la coppia ad un sistema di pulegge. Questo sistema sfrutta 7 pulegge per movimentare le tre viti senza fine, utilizzando un solo motore, come è visibile in figura 34: quattro pulegge sono montate sulle tre viti senza fine, infatti una vite ne possiede due montate una sull'altra, una è montata sul motore e due sono utilizzate come tendicinghia. I tendicinghia sono delle pulegge folli, con cuscinetto integrato all'interno, che sfruttano la possibilità di essere spostate su delle asole opportunamente ricavate sulla piastra inferiore, per garantire una sufficiente trazione al sistema di trasmissione.

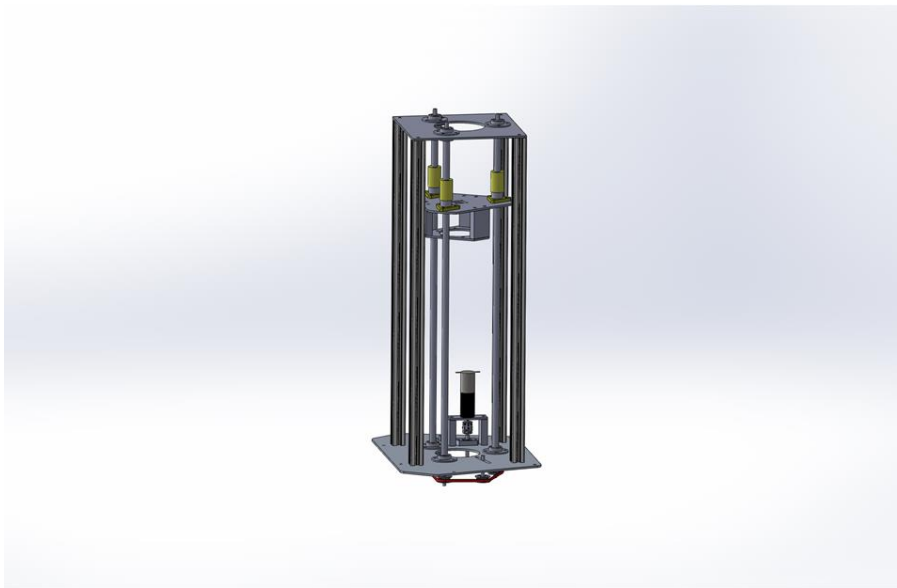


Figura 33 - Sistema di traslazione della punta

Per concludere, il moto verticale viene garantito dal fatto che la piastra traslante sia solidale alle tre madreviti del sistema, che sono montate parallele e che quindi se messe in rotazione (nello stesso verso ovviamente), forzano su questo un moto lineare. Il tipo di accoppiamento vite-madrevite scelto, visibile in figura xx, è particolarmente interessante poiché possiede la caratteristica di essere a zero backlash: ciò è permesso da una molla di precarico che spinge sui due componenti della madrevite, recuperando i giochi. Inoltre anche la vite è particolare, in quanto è a più principi: il passo maggiore dei filetti e la maggiore area di contatto permettono una miglior precisione e la possibilità di sostenere dei carichi maggiori.

Il sistema si interfaccia con il telaio tramite la piastra inferiore, che viene avvitata sotto le barre del telaio, così da essere più vicini al terreno.

Contrariamente alla versione precedente, che era montata al centro del rover, questa versione della trivella è pensata per essere montata sul retro, in modo da bilanciare i pesi e lasciare uno spazio maggiore a elettronica e batterie.

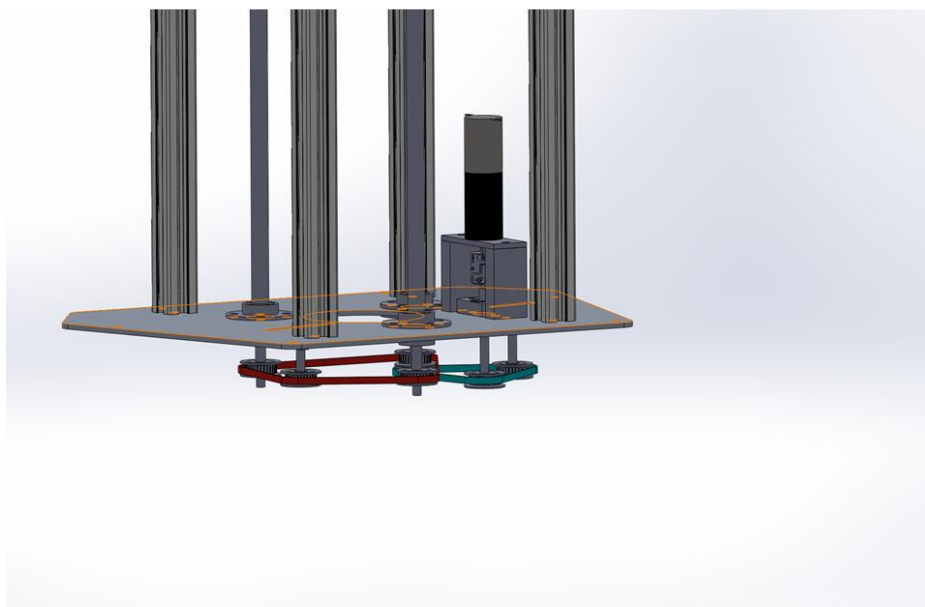


Figura 34 - Sistema di cinghie e pulegge della trivella

3.1.2 Sistema di Rotazione della Punta

Il sistema di rotazione della punta si basa su una serie di componenti ben precisi, visibili in figura 35: una piastra che funge da telaio, la punta con il suo sostegno, un giunto elastico accoppiato ad un motore ed un giunto asso-radiale per proteggere quest'ultimo dai carichi diretti della punta.

La piastra traslante ha degli opportuni fori su cui sono montati tre sostegni rettangolari, a formare una sorta di triangolo. Questi scendono dalla piastra traslante per sostenerne un'altra, a cui è fissata la parte fissa del giunto asso radiale, in modo che possa trasferirvi i carichi. Alla parte mobile del giunto asso radiale è invece vincolata la punta tramite una struttura "a panino", visibile in figura xx. Tale struttura è collegata all'albero del motore tramite un giunto elastico, che permette di trasferire la coppia.

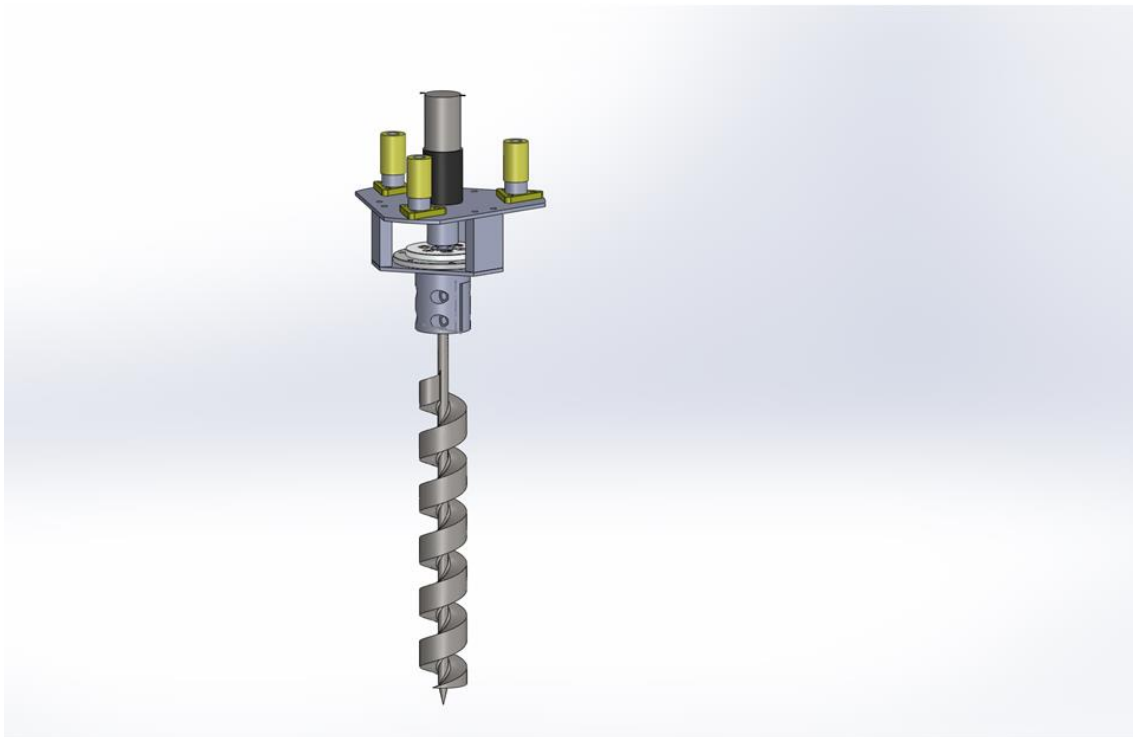


Figura 35 - Sistema di rotazione della punta

3.2 Motori Utilizzati

La scelta dei motori non è stata oggetto di questa tesi, bensì lo è stata della tesi di uno studente di Ingegneria Aerospaziale che ha partecipato al progetto nel 2015. Durante le prove pratiche si è notato come il dimensionamento fosse tutto sommato buono, ed è stato quindi deciso di tenere nella configurazione 2.0 i motori della versione precedente, permettendo di risparmiare fondi.

Il motore che è stato scelto per azionare la punta del trapano è il MAXON Maxon RE-max 29 (Ø29 mm 22 Watt), un motore in corrente continua accoppiato con il riduttore Maxon GP 32 C (Ø32 mm). Questa configurazione, visibile in figura xx, permette di esprimere una coppia all'albero della punta di 3,5 Nm. Il dimensionamento del motore ha tenuto in considerazione i tipi di terreno, la coppia dovuta all'attrito laterale sulla punta, la coppia dovuta all'attrito sulla base della punta, la coppia dovuta al taglio del terreno e la coppia dovuta all'inerzia della punta.

Il motore che è stato scelto per azionare la traslazione della punta è il Maxon A-max 22 (Ø22 mm 5 Watt) accoppiato con il riduttore Maxon GP 22 C (Ø22 mm). Questa configurazione permette di esprimere all'uscita del riduttore una coppia di 0,4 Nm ad una velocità di circa 75 rpm. Il dimensionamento del motore ha tenuto in considerazione i valori delle masse in gioco, il tipo di accoppiamento vite-madrevite, la corsa del sistema e il tempo in cui essa doveva essere percorsa.

Entrambi i motori sono DC, da alimentare a 24 V. Purtroppo, non si sa bene come mai, entrambi sono stati comprati senza encoders, limitando così di molto le possibilità di controllo. Quest'ultimo infatti è caratterizzato dalla scelta obbligata di una logica open-loop, nella quale si può provare a controllare la velocità dei motori (in pwm) con un doppio ponte ad H, tuttavia non conoscendo i carichi dinamici e non misurando la corrente assorbita, questo può risultare inefficace.

Capitolo 4

Il Sistema di locomozione di MORPHEUS

Come accennato precedentemente, il sistema di locomozione del rover è l'unico dei sottosistemi di MORPHEUS 1.0 ad essere attualmente montato e funzionante. Ciò non significa che non ci siano piccoli difetti di progettazione, tuttavia si è trattato di ingenuità dovute all'inesperienza che è stato possibile correggere tramite piccoli interventi. Il capitolo tratta principalmente della parte meccanica del sottosistema.

Per spostarsi MORPHEUS fa uso di sei ruote non sono sterzanti. Queste ruote, che possiedono un diametro di 26 centimetri, sono tutte motorizzate tramite sei sistemi indipendenti di cinghie e pulegge. Le ruote, i cui assi di rotazione sono tutti paralleli (quanto meno su una superficie liscia), sono divise tra tre bilancieri indipendenti, come visibile in figura 36.

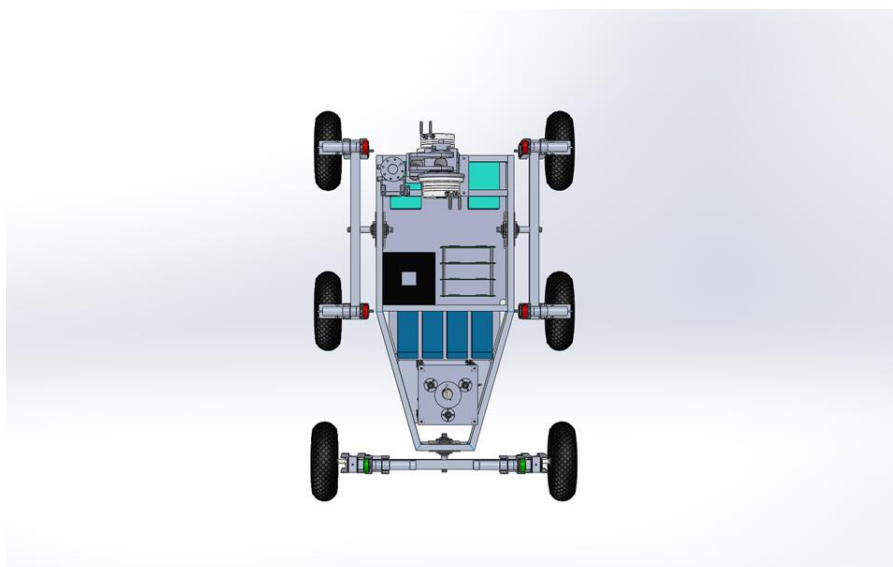


Figura 36 - Sistema di locomozione dall'alto

I due bilancieri laterali basculano attorno allo stesso asse e quindi rimangono sempre paralleli, mentre il bilanciante posteriore bascula attorno ad un asse

perpendicolare a quello dei precedenti due; nelle prossime sezioni verrà spiegato il motivo dietro a questa scelta.

4.1 Scelta della Configurazione e interfaccia con il telaio

Dato che questa configurazione per il sistema di locomozione fu pensata ad inizio 2015, essa va probabilmente contestualizzata con l'allora poca esperienza che il team possedeva in materia di rover: nel senso che è stata fatta una scelta molto conservativa, puntando alla semplicità piuttosto che sulle prestazioni o su soluzioni all'avanguardia. Si potrebbe dire che fu presa la strada giusta, dato che il sottosistema ha raramente dato problemi, almeno per la parte meccanica.

La semplicità è appunto la ragione alla base della scelta di non utilizzare degli sterzi sulle quattro ruote ai vertici del rover, affidandosi ad un guida skid steering per curvare. Questo tipo di controllo si basa sul controllo differenziale delle velocità dei gruppi di ruote destre e sinistre.

Robot semoventi che utilizzano la configurazione skid-steering sono ampiamente utilizzati, per la loro semplicità a livello di meccanismi e robustezza. E' un tipo di configurazione particolarmente apprezzata per l'elevata manovrabilità che permette di ottenere in diversi tipi di terreno; al contempo utilizza una struttura meccanica semplice e robusta, che permette un'ottima organizzazione della strumentazione all'interno del rover.

Tuttavia, a causa dei vincoli cinematici e delle complesse interazioni tra terreno e ruote, risulta complicato ricavare modelli cinematico e dinamico che permettano di descrivere con accuratezza il moto del rover in skid steering; questo accade anche perché nello skid steering è fondamentale il fenomeno dello slittamento. Inoltre bisogna considerare che i bilancieri oscillano e ciò fa variare la distanza tra le ruote e il centro geometrico del rover. Come si può immaginare, sarà necessario implementare un tipo di controllo closed loop per il controllo della locomozione; tuttavia questo non è oggetto dell'elaborato.

I requisiti di prestazione su cui è stata basata la progettazione prevedevano pensati per un rover di 60 kg, in grado di raggiungere la velocità massima di 1 m/s su pendii pendenti fino a 15 gradi.

Dato che la velocità massima è molto bassa e si voleva puntare su un sistema molto semplice, è stato deciso di non prevedere un sistema di sospensioni. Tuttavia, bisognava trovare un sistema per evitare che il rover si muovesse rigidamente con le asperità del terreno. In un primo momento è stato pensato di utilizzare la configurazione detta "rocker bogie", utilizzata da tutti gli ultimi rover

della NASA (Sojourner, Spirit, Opportunity e Curiosity), ma la presenza di una barra differenziale che attraversasse il longitudinalmente il rover non sembrava sposarsi bene con gli altri sottosistemi (particolarmente con la trivella posta al centro). E' stata quindi pensata la configurazione attuale, che vi è simile ma con la differenza di avere le due ruote posteriori indipendenti dalle altre ma vincolate tra di loro.

Questi tre bilancieri si interfacciano con il telaio tramite avvitandosi a tre perni d'acciaio, i quali sono liberi di ruotare attraverso una serie di cuscinetti flangiati, a loro volta avvitati a delle robuste piastre d'acciaio solidali con il telaio; si può trovare una rappresentazione dei perni con relativi supporti in figura xx.

4.2 Bilancieri Laterali e Posteriore

I bilancieri laterali permettono il movimento delle due ruote anteriori e delle due ruote centrali del rover. Essi sono formati principalmente da due profilati quadrati di alluminio (sezione 30x30x2) avvitati a 4 profili a C ognuno, due per lato, come si può vedere in figura 37. Questi profili a C svolgono una doppia funzione: sostengono la cassa dei motori e sostengono i cuscinetti flangiati all'interno dei quali ruotano i perni delle ruote. A tali perni viene trasmessa la coppia motrice del motore tramite un sistema a cinghia dentata, che sfrutta due pulegge uguali. Questa soluzione, oltre a proteggere il motore da eventuali problemi di disallineamento, lo isola dai pesanti carichi meccanici provenienti dalla ruota.

Il bilanciere posteriore, mostrato in figura 38, è sostanzialmente analogo, con la differenza però della direzione dei perni rispetto al bilanciere: in questo caso infatti sono paralleli. Ciò è dettato dal fatto che le ruote hanno assi paralleli ma i bilancieri no; comunque la differenza si risolve in termini di come sono accoppiati i profili a C al bilanciere, dato che il principio di funzionamento è analogo ai bilancieri laterali.

Le ruote, commercialmente disponibili presso qualsiasi rivenditore di articoli per il fai da te, hanno un mozzo di plastica con foro passante. L'accoppiamento di

tali ruote con i perni è stato eseguito tramite incollaggio con resina epossidica, avendo cura di preparare la superficie interna della ruota e di zigrinare i perni.

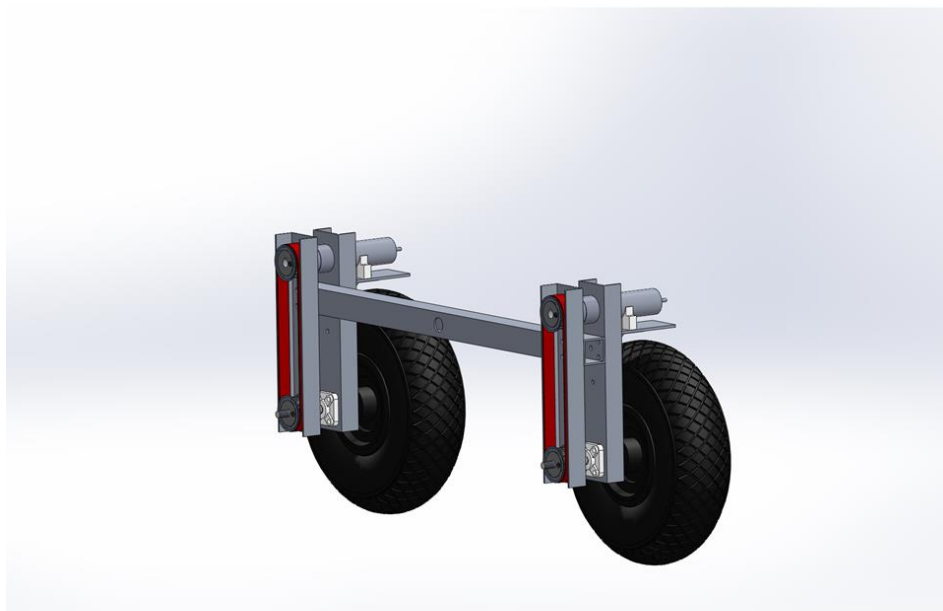


Figura 37 - Dettaglio del bilanciante laterale

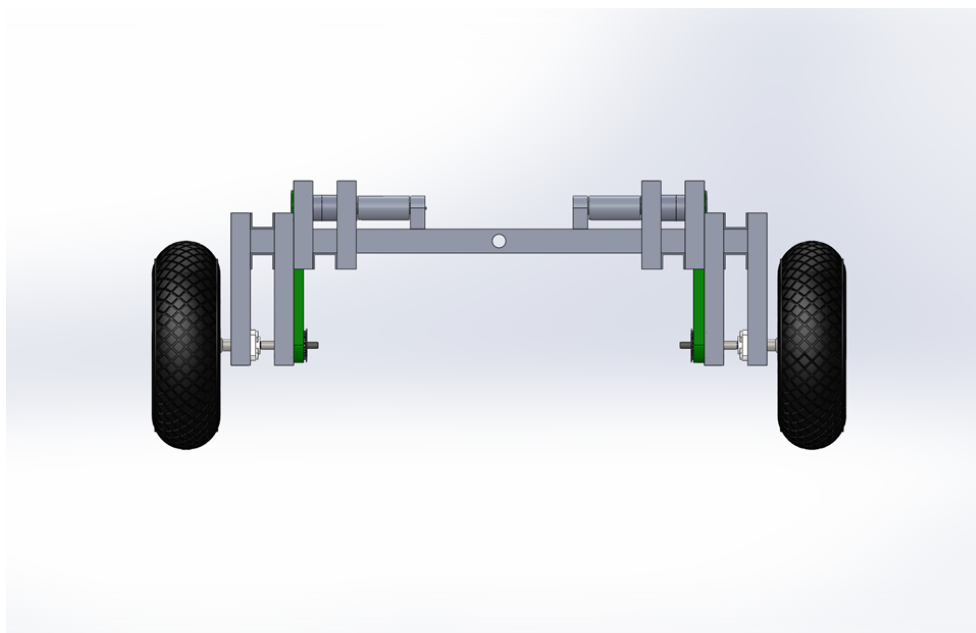


Figura 38 - Dettaglio del bilanciante posteriore

4.3 Motori Utilizzati

La logica che ha portato alla scelta dei motori, qui solamente accennata, ha come punto di partenza la scelta dei seguenti dati:

- Peso netto del rover, sovradimensionato a 60 kg
- Peso netto su ogni ruota, 12 kg con 6 ruote
- Raggio delle ruote, scelto di 13 centimetri
- Velocità massima desiderata, scelta a 1 m/s
- Tempo di accelerazione, scelta a 5 secondi
- Tipo di terreno su cui si opera (per determinare dei coefficienti correttivi)

Una volta scelti questi, si calcola la forza propulsiva massima come somma della forza per vincere la resistenza al rotolamento, della componente della forza di gravità da vincere per risalire il pendio e della forza richiesta per accelerare fino alla velocità finale. Noto il raggio delle ruote, si determinano subito velocità e coppia richieste al motore, nel nostro caso circa 5 Nm e circa 75 rpm (alla ruota).

Il tipo di motore che si è scelto di utilizzare è un EC, vedi figura xx, prodotto da Maxon Motors. Il modello specifico è EC-max 30 (diametro 30 mm da 60W) caratterizzato da coppia e velocità nominali pari a 60 mNm a 8040 rpm. Si è deciso di accoppiare tale motore con il riduttore planetario modello GP 32 HP (diametro 32 mm) con 3 stadi e un rapporto di riduzione 1:86. Questo accoppiamento ci permette di avere un motoriduttore con le caratteristiche cercate.

Come spiegato in precedenza, a differenza dei motori a spazzole, il controllo di questi motori viene effettuato elettronicamente da un controller collegato ai sensori ad effetto Hall presenti a statore.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto in preparazione alla stesura di questo elaborato ha permesso di sviluppare due nuovi sottosistemi per il rover MORPHEUS, un sistema robotico semovente sviluppato presso l'Università degli Studi di Padova. Tali sottosistemi sono: un nuovo braccio robotico a 4 gradi di libertà e una nuova trivella per prelevare terreno in profondità.

Questo lavoro va contestualizzato in un'esperienza pluriennale: il progetto del MORPHEUS è infatti iniziato nel 2015 e vi hanno fatto parte svariate decine di studenti afferenti ai diversi dipartimenti della Facoltà di Ingegneria; il sottoscritto è un partecipante sin dai primi momenti del progetto. Quanto esposto in questa tesi è ovviamente solo una piccola parte di quanto discusso, teorizzato e progettato con i suddetti colleghi nel corso degli anni. Tuttavia i risultati qui presentati tengono conto dell'esperienza passata, valorizzando il tempo investito e superando le criticità incontrate.

Dopo una breve introduzione sull'utilizzo della robotica nell'ambito dell'esplorazione spaziale, è stato descritto il contesto operativo sul quale è stata basata la progettazione iniziale del rover MORPHEUS: la partecipazione alla competizione European Rover Challenge. Dopo aver descritto tale prima iterazione di design, sono state brevemente introdotte le principali modifiche previste dall'attuale iterazione di progettazione del sistema, chiamata MORPHEUS 2.0.

È stata poi descritta la configurazione scelta per il nuovo braccio. Dopo un'analisi matematica della cinematica e della dinamica di un generico manipolatore, sono stati specificati i risultati per lo specifico caso in esame. È stato poi spiegato come implementazioni numeriche di queste analisi siano state la base delle scelte progettuali per questo sottosistema, sia in termini di dimensioni che di motori scelti. A seguire, con l'aiuto di immagini sviluppate con il software Solidworks®[®], è stata descritta la meccanica del braccio nel suo complesso.

È stata poi descritta la configurazione scelta per la nuova trivella. Dopo averne spiegato il principio di funzionamento, ne è stata descritta la meccanica nel suo complesso, evidenziando i vantaggi della nuova configurazione rispetto alla

precedente. Anche in questa sezione ci si è avvalsi di immagini sviluppate con software di modellazione 3D, per permettere una più immediata comprensione delle descrizioni.

È stata poi descritta la configurazione attualmente utilizzata per la locomozione, la quale è stata progettata e montata nel corso del biennio 2016-2017 dal sottoscritto. Dopo aver spiegato le motivazioni dietro alla scelta della particolare configurazione, ne è stata descritta la meccanica nel suo complesso, evidenziando poi la procedura usate per la scelta dei motori. Analogamente alle sezioni precedenti, anche qui ci si è avvalsi di immagini sviluppate con software di modellazione 3D.

Viene infine presentato in Appendice A il codice MATLAB/Simulink© sviluppato per risolvere i problemi di cinematica inversa e dinamica inversa del manipolatore.

Un primo sviluppo necessario allo sviluppo del progetto MORPHEUS è sicuramente la costruzione dei due nuovi sottosistemi: tavole tecniche e liste di componenti, non incluse in questo lavoro per questioni di brevità, sono state lasciate ai colleghi per permettergli di riuscire in questo obiettivo. Il successivo passo consiste sicuramente nell'integrazione dei due nuovi sottosistemi con il resto del rover (non solo meccanica ma anche elettronica e software) e nel test di questi in condizioni operative.

Il bagaglio personale ottenuto da un'esperienza pratica come questa ha, a mio parere, un valore impareggiabile. Partecipare a MORPHEUS mi ha permesso di sviluppare una serie di competenze ingegneristiche che non si possono ottenere facilmente solo tramite lo studio, ma che anzi valorizzano quest'ultimo e il percorso svolto al Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Si coglie l'occasione per ringraziare il Professor Stefano Debei, sia per l'aiuto nello svolgimento della progettazione di MORPHEUS 2.0, oggetto di questo elaborato, sia per la possibilità di partecipare a un progetto così intrigante; inoltre si ringraziamo il Professor Marco Pertile, l'Ingegnere Sebastiano Chiodini e tutto il Team MORPHEUS.

Un pensiero va alla mia famiglia, che mi ha sostenuto durante questi anni di studi, incitandomi a dare sempre il massimo, e a tutti gli amici.

Bibliografia

1. *Appunti dal corso di Robotica Spaziale*, 2016.
2. S. Chiodini, M. Pertile, E. Bertolutti, R. Dalla Vecchia, D. Paganini, S. Debei, *Morpheus: a field robotic testbed for soil sampling and autonomous navigation*, Università degli studi di Padova, 2015.
3. A. Lindemann, C. Voorhees, *Mars Exploration Rover Mobility Assembly Design, Test and Performance*, Jet Propulsion Laboratory/CALTECH, Pasadena.
4. J.J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 2004.
5. B. Siciliano , O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2008.
6. G. Marro, *Controlli Automatici*, Zanichelli, 2004.
7. W. Yu, E. Collins, O. Chuy, *Dynamic modeling and power modeling of robotic skid-steered wheeled vehicles*, Florida State University.
8. A. Doria, V. Cossalter, *Dinamica del veicolo*, 2013.
9. A. Mandow, J.L. Martinez, J. Morales, J.L. Blanco, and Javier Gonzalez, *Experimental Kinematics for wheeled skid-steer mobile robots*.
10. E. Bertolutti, *Studio, analisi e progettazione di un braccio robotico ridondante per l'esplorazione planetaria*, Tesi magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Università degli studi di Padova, 2015.
11. E. Morellato, *Algoritmi e software di controllo per la trazione del rover "Morpheus"*, Tesi magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Università degli studi di Padova, 2016.
12. A. Todescan, *Progettazione di un sistema di campionamento del sottosuolo per un prototipo di rover planetario*, Tesi triennale in Ingegneria Aerospaziale, Università degli studi di Padova, 2015.

Appendice A

Codice delle simulazioni

CODICE MATLAB PER LA SOLUZIONE DEL PROBLEMA
DELLA CINEMATICA INVERSA DI UN MANIPOLATORE A 4
G.D.L

```

clear
clc
clf
hold on
% Inserisco POSiniziale e POSfinale, vettori cosi definiti (x, y, z,
fi)

START = [0.2,      0,      0.2,      90];
END =   [0.3,      0.4,      0.6,      0];

R_start = sqrt((START(1)^2)+(START(2)^2)+(START(3)^2));
R_end = sqrt((END(1)^2)+(END(2)^2)+(END(3)^2));

R_start_proiettato = sqrt((R_start^2)-(START(3)^2));
R_end_proiettato = sqrt((R_end^2)-(END(3)^2));

Th0in = acosd(START(2)/R_start_proiettato);
if START(1)<0
    Th0in = -Th0in;
end

Th0fin = acosd(END(2)/R_end_proiettato);
if END(1)<0
    Th0fin = -Th0fin;
end

Th_start_fittizio = asind(START(3)/R_start);
Th_end_fittizio = asind(END(3)/R_end);

START_FITIZIO = [R_start*cosd(Th_start_fittizio), START(3),
START(4)];
END_FITIZIO = [R_end*cosd(Th_end_fittizio), END(3), END(4)];

% Inserisco la lunghezza dei vari link

L1 = 0.40;
L2 = 0.40;
L3 = 0.2;
LCORTO = 0.1;
LFITIZIO = 2*sqrt(((L2/2)^2)+(LCORTO^2));

cbd = 90 - atand(LCORTO/(L2/2));

% Trovo il vettore nello spazio dei giunti che rappresenta la
POSiniziale

x2in = START_FITIZIO(1) - (L3*cosd(START_FITIZIO(3)));
y2in = START_FITIZIO(2) - (L3*sind(START_FITIZIO(3)));
R = sqrt((x2in^2)+(y2in^2));
betai = atan2d(y2in,x2in);
psii = acosd(((R^2)+(L1^2)-(LFITIZIO^2))/(2*L1*R));
c2i = ((R^2)-(L1^2)-(LFITIZIO^2))/(2*L1*LFITIZIO);

```

```

if c2i <= 1
    s2i = -sqrt(1-(c2i^2));
    Th2in = atan2d(s2i,c2i);
    Th2in = wrapTo180(Th2in);
    if Th2in <= 0
        Th1in = psii + betai;
    else
        Th1in = psii - betai;
    end
    Th3in = START_FITTIZIO(3) - (Th1in+Th2in);
    Th3in = wrapTo360(Th3in);
    Th2in = wrapTo360(Th2in);

    GIUNTO_START = [Th1in,Th2in,Th3in,Th0in];
else
    disp('Punto fuori dallo spazio di lavoro');
end

% Trovo il vettore nello spazio dei giunti che rappresenta la
POSfinale

x2fin = END_FITTIZIO(1) - (L3*cosd(END_FITTIZIO(3)));
y2fin = END_FITTIZIO(2) - (L3*sind(END_FITTIZIO(3)));
R = sqrt((x2fin^2)+(y2fin^2));
betaf = atan2d(y2fin,x2fin);
psif = acosd(((R^2)+(L1^2)-(LFITTIZIO^2))/(2*L1*R));
c2f = ((R^2)-(L1^2)-(LFITTIZIO^2))/(2*L1*LFITTIZIO);
if c2f <= 1
    s2f = -sqrt(1-(c2f^2));
    Th2fin = atan2d(s2f,c2f);
    Th2fin = wrapTo180(Th2fin);
    if Th2fin <= 0
        Th1fin = psif + betaf;
    else
        Th1fin = psif - betaf;
    end
    Th3fin = END_FITTIZIO(3) - (Th1fin+Th2fin);
    Th3fin = wrapTo360(Th3fin);
    Th2fin = wrapTo360(Th2fin);

    GIUNTO_END = [Th1fin,Th2fin,Th3fin,-Th0fin];

else
    disp('Punto fuori dallo spazio di lavoro');
end

Ain = [0,0,0];
Bin = [0,Ain(2)+ L1*cosd(GIUNTO_START(1)),...
       Ain(3)+L1*sind(GIUNTO_START(1))];
Cin = [0,Bin(2)+ LCORTO*cosd(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd),...
       Bin(3)+LCORTO*sind(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd)];
Ein = [0,Cin(2)+ L2*cosd(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd+270),...
       Cin(3)+L2*sind(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd+270)];
Fin = [0,Ein(2)+ LCORTO*cosd(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd),...
       Ein(3)+LCORTO*sind(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+cbd)];
Gin = [0,Fin(2)+
       L3*cosd(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+GIUNTO_START(3)),...

```



```

Fin(3)+L3*sind(GIUNTO_START(1)+GIUNTO_START(2)+GIUNTO_START(3))];

Afin = [0,0,0];
Bfin = [0,Afin(2)+ L1*cosd(GIUNTO_END(1)),...
        Afin(3)+L1*sind(GIUNTO_END(1))];
Cfin = [0,Bfin(2)+ LCORTO*cosd(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd),...
        Bfin(3)+LCORTO*sind(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd)];
Efin = [0,Cfin(2)+ L2*cosd(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd+270),...
        Cfin(3)+L2*sind(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd+270)];
Ffin = [0,Efin(2)+ LCORTO*cosd(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd),...
        Efin(3)+LCORTO*sind(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+cbd)];
Gfin = [0,Ffin(2)+ L3*cosd(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+GIUNTO_END(3)),
        ...
        Ffin(3)+L3*sind(GIUNTO_END(1)+GIUNTO_END(2)+GIUNTO_END(3))];

Rin = [cosd(Th0in),-sind(Th0in),0;sind(Th0in),cosd(Th0in),0;0,0,1];
Rfin = [cosd(Th0fin),-
        sind(Th0fin),0;sind(Th0fin),cosd(Th0fin),0;0,0,1];

Ain = Rin*Ain';
Bin = Rin*Bin';
Cin = Rin*Cin';
Ein = Rin*Ein';
Fin = Rin*Fin';
Gin = Rin*Gin';

Afin = Rfin*Afin';
Bfin = Rfin*Bfin';
Cfin = Rfin*Cfin';
Efin = Rfin*Efin';
Ffin = Rfin*Ffin';
Gfin = Rfin*Gfin';

Ain = Ain';
Bin = Bin';
Cin = Cin';
Ein = Ein';
Fin = Fin';
Gin = Gin';

Afin = Afin';
Bfin = Bfin';
Cfin = Cfin';
Efin = Efin';
Ffin = Ffin';
Gfin = Gfin';

disegnoin = [Ain;Bin;Cin;Ein;Fin;Gin];
disegnofin = [Afin;Bfin;Cfin;Efin;Ffin;Gfin];
axis([-1 1 -1.2 0.8 -0.9 0.9])
xlabel('Asse X [m]')
ylabel('Asse Y [m]')
zlabel('Asse Z [m]')
title('CINEMATICA INVERSA MANIPOLATORE 4GDL')
pbaspect([1 1 1])
grid on

```

```
plot3(disegnoin(:,1),disegnoin(:,2),disegnoin(:,3),'k-  
o','LineWidth',2)  
plot3(disegnofin(:,1),disegnofin(:,2),disegnofin(:,3),'r-  
o','LineWidth',2)  
  
v1 = [-0.3,0,-0.05];  
v2 = [0.3,0,-0.05];  
v3 = [0.3,0,-0.25];  
v4 = [-0.3,0,-0.25];  
v5 = [-0.3,-1,-0.05];  
v6 = [0.3,-1,-0.05];  
v7 = [0.3,-1,-0.25];  
v8 = [-0.3,-1,-0.25];  
  
lato1 = [v1;v2;v3;v4;v1];  
lato2 = [v5;v6;v7;v8;v5];  
lato3 = [v1;v5;v8;v4;v1];  
lato4 = [v2;v6;v7;v3;v2];  
  
plot3(lato1(:,1),lato1(:,2),lato1(:,3),'b-','LineWidth',2)  
plot3(lato2(:,1),lato2(:,2),lato2(:,3),'b-','LineWidth',2)  
plot3(lato3(:,1),lato3(:,2),lato3(:,3),'b-','LineWidth',2)  
plot3(lato4(:,1),lato4(:,2),lato4(:,3),'b-','LineWidth',2)
```

CODICE MATLAB/SIMULINK PER LA SOLUZIONE DEL PROBLEMA DELLA DINAMICA INVERSA DI UN MANIPOLATORE A 4 G.D.L

Da notare che all'interno del codice si fa riferimento al modello simulink del braccio, chiamato 'Din_inversa_foldable_4gdl', che è stato spiegato nell'apposita sezione del capitolo sul braccio.

```
% Richiamo la cinematica inversa
run Cinematica_inversa_2_0

numpunti = 100;
tempo_tot = 10;
dtempo = tempo_tot/4;
tempofake = linspace(0,dtempo,1+numpunti/4);
time = linspace(0,tempo_tot,2*numpunti);

% Inserisco il vettore gravit? in Simulink
gx = 0;
gy = 9.81;
gz = 0;

% Passo da gradi a radianti
GIUNTO_START(2) = GIUNTO_START(2) + cbd;
GIUNTO_END(2) = GIUNTO_END(2) + cbd;
GIUNTO_START(3) = GIUNTO_START(3) - cbd;
GIUNTO_END(3) = GIUNTO_END(3) - cbd;

% Modifico la traiettoria affinché vada nel senso prestabilito
Differenza_Traiettoria = GIUNTO_END - GIUNTO_START;

if GIUNTO_END(3) > 90
    GIUNTO_END(3) = - (360 - GIUNTO_END(3));
end

GIUNTO_START = GIUNTO_START*2*pi/360;
GIUNTO_END = GIUNTO_END*2*pi/360;

% Trovo coefficienti del polinomio di 5o grado che interpola la
traiettoria
% giunto per giunto
a0_0 = GIUNTO_START(4);
a0_1 = GIUNTO_START(1);
a0_2 = GIUNTO_START(2);
a0_3 = GIUNTO_START(3);

a1_0 = 0;
a1_1 = 0;
a1_2 = 0;
a1_3 = 0;

a2_0 = 0;
a2_1 = 0;
```

```

a2_2 = 0;
a2_3 = 0;

a3_0 = 10*(GIUNTO_END(4)-GIUNTO_START(4))/(dtempo^3);
a3_1 = 10*(GIUNTO_END(1)-GIUNTO_START(1))/(dtempo^3);
a3_2 = 10*(GIUNTO_END(2)-GIUNTO_START(2))/(dtempo^3);
a3_3 = 10*(GIUNTO_END(3)-GIUNTO_START(3))/(dtempo^3);

a4_0 = -15*(GIUNTO_END(4)-GIUNTO_START(4))/(dtempo^4);
a4_1 = -15*(GIUNTO_END(1)-GIUNTO_START(1))/(dtempo^4);
a4_2 = -15*(GIUNTO_END(2)-GIUNTO_START(2))/(dtempo^4);
a4_3 = -15*(GIUNTO_END(3)-GIUNTO_START(3))/(dtempo^4);

a5_0 = 6*(GIUNTO_END(4)-GIUNTO_START(4))/(dtempo^5);
a5_1 = 6*(GIUNTO_END(1)-GIUNTO_START(1))/(dtempo^5);
a5_2 = 6*(GIUNTO_END(2)-GIUNTO_START(2))/(dtempo^5);
a5_3 = 6*(GIUNTO_END(3)-GIUNTO_START(3))/(dtempo^5);

% Raggruppo i coefficienti dei polinomi, giunto per giunto
a0 = [a5_0 a4_0 a3_0 a2_0 a1_0 a0_0];
a1 = [a5_1 a4_1 a3_1 a2_1 a1_1 a0_1];
a2 = [a5_2 a4_2 a3_2 a2_2 a1_2 a0_2];
a3 = [a5_3 a4_3 a3_3 a2_3 a1_3 a0_3];

% Scelgo la sequenza con cui si devono muovere i giunti, in questo
caso la
% sequenza ? giunto 1 - giunto 3 - giunto 2 - giunto 4
Ordine = 3;

count0=1;
count1=1;
count2=1;
count3=1;

switch Ordine
  case 1
    ext_low_0 = 1;
    ext_hig_0 = (numpunti/4);

    ext_low_1 = 1 + (numpunti/4);
    ext_hig_1 = 2*(numpunti/4);

    ext_low_2 = 2*(numpunti/4)+1;
    ext_hig_2 = 3*numpunti/4;

    ext_low_3 = 3*numpunti/4+1;
    ext_hig_3 = numpunti;

  case 2
    ext_low_0 = 1;
    ext_hig_0 = (numpunti/4);

    ext_low_1 = 1+(numpunti/4);
    ext_hig_1 = 2*(numpunti/3);

    ext_low_3 = (numpunti/3)+1;

```

0

```
ext_hig_3 = 3*numpunti/4;
```

```
ext_low_2 = 1+3*numpunti/4;  
ext_hig_2 = numpunti;
```

```
case 3
```

```
ext_low_0 = 1;  
ext_hig_0 = (numpunti/4);
```

```
ext_low_2 = 1+(numpunti/4);  
ext_hig_2 = 2*(numpunti/4);
```

```
ext_low_1 = 1+2*(numpunti/4);  
ext_hig_1 = 3*numpunti/4;
```

```
ext_low_3 = 1+3*numpunti/4;  
ext_hig_3 = numpunti;
```

```
case 4
```

```
ext_low_0 = 1;  
ext_hig_0 = (numpunti/4);
```

```
ext_low_2 = 1+(numpunti/4);  
ext_hig_2 = 2*(numpunti/4);
```

```
ext_low_3 = 1+2*(numpunti/4);  
ext_hig_3 = 3*numpunti/4;
```

```
ext_low_1 = 1+3*numpunti/4;  
ext_hig_1 = numpunti;
```

```
case 5
```

```
ext_low_0 = 1;  
ext_hig_0 = (numpunti/4);
```

```
ext_low_3 = 1+(numpunti/4);  
ext_hig_3 = 2*(numpunti/4);
```

```
ext_low_2 = 1+2*(numpunti/4);  
ext_hig_2 = 3*numpunti/4;
```

```
ext_low_1 = 1+3*numpunti/4;  
ext_hig_1 = numpunti;
```

```
case 6
```

```
ext_low_0 = 1;  
ext_hig_0 = (numpunti/4);
```

```
ext_low_3 = 1+(numpunti/4);  
ext_hig_3 = 2*(numpunti/4);
```

```
ext_low_1 = 1+2*(numpunti/4);  
ext_hig_1 = 3*numpunti/4;
```

```

    ext_low_2 = 1+3*numpunti/4;
    ext_hig_2 = numpunti;

end

for j = ext_low_0:ext_hig_0

    t = tempofake(count0);
    count0 = count0+1;

    Th0 =
(a0(1)*t^5)+(a0(2)*t^4)+(a0(3)*t^3)+(a0(4)*t^2)+(a0(5)*t)+a0(6);
    Th1 = GIUNTO_START(1);
    Th2 = GIUNTO_START(2);
    Th3 = GIUNTO_START(3);

    Th0d =
(5*a0(1)*t^4)+(4*a0(2)*t^3)+(3*a0(3)*t^2)+(2*a0(4)*t)+(a0(5));
    Th1d = 0;
    Th2d = 0;
    Th3d = 0;

    Th0dd = (5*4*a0(1)*t^3)+(4*3*a0(2)*t^2)+(3*2*a0(3)*t)+(2*a0(4));
    Th1dd = 0;
    Th2dd = 0;
    Th3dd = 0;

    angolo0(j) = Th0;
    angolo1(j) = Th1;
    angolo2(j) = Th2;
    angolo3(j) = Th3;

    velocita0(j) = Th0d;
    velocita1(j) = Th1d;
    velocita2(j) = Th2d;
    velocita3(j) = Th3d;

    accelerazione0(j) = Th0dd;
    accelerazione1(j) = Th1dd;
    accelerazione2(j) = Th2dd;
    accelerazione3(j) = Th3dd;

    angolofinto1(j)      = 270*2*pi/360;
    angolofinto2(j)      = 90*2*pi/360;
    velocitafinta(j)     = 0;
    accelerazionefinta(j) = 0;

end

for j = ext_low_1:ext_hig_1

    switch Ordine
        case 1
            pos2 = GIUNTO_START(2);
            pos3 = GIUNTO_START(3);

```

```

    case 2
        pos2 = GIUNTO_START(2);
        pos3 = GIUNTO_START(3);

    case 3
        pos2 = GIUNTO_END(2);
        pos3 = GIUNTO_START(3);

    case 4
        pos2 = GIUNTO_END(2);
        pos3 = GIUNTO_END(3);

    case 5
        pos2 = GIUNTO_END(2);
        pos3 = GIUNTO_END(3);
    case 6
        pos2 = GIUNTO_START(2);
        pos3 = GIUNTO_END(3);
end

t = tempofake(count1);
count1 = count1+1;

Th1 =
(a1(1)*t^5)+(a1(2)*t^4)+(a1(3)*t^3)+(a1(4)*t^2)+(a1(5)*t)+a1(6);
Th2 = pos2;
Th3 = pos3;

Th1d =
(5*a1(1)*t^4)+(4*a1(2)*t^3)+(3*a1(3)*t^2)+(2*a1(4)*t)+(a1(5));
Th2d = 0;
Th3d = 0;

Th1dd = (5*4*a1(1)*t^3)+(4*3*a1(2)*t^2)+(3*2*a1(3)*t)+(2*a1(4));
Th2dd = 0;
Th3dd = 0;

Th0 = GIUNTO_END(4);
Th0d = 0;
Th0dd = 0;

angolo0(j) = Th0;
angolo1(j) = Th1;
angolo2(j) = Th2;
angolo3(j) = Th3;

velocita0(j) = Th0d;
velocita1(j) = Th1d;
velocita2(j) = Th2d;
velocita3(j) = Th3d;

accelerazione0(j) = Th0dd;
accelerazione1(j) = Th1dd;
accelerazione2(j) = Th2dd;
accelerazione3(j) = Th3dd;

```

```

angolofinto1(j)      = 270*2*pi/360;
angolofinto2(j)      = 90*2*pi/360;
velocitafinta(j)     = 0;
accelerazionefinta(j) = 0;

end

for j = ext_low_2:ext_hig_2

    switch Ordine
        case 1
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos3 = GIUNTO_START(3);

        case 2
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos3 = GIUNTO_END(3);

        case 3
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos3 = GIUNTO_START(3);

        case 4
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos3 = GIUNTO_START(3);

        case 5
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos3 = GIUNTO_END(3);

        case 6
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos3 = GIUNTO_END(3);

    end

    t = tempofake(count2);
    count2 = count2+1;

    Th1 = pos1;
    Th2 =
(a2(1)*t^5)+(a2(2)*t^4)+(a2(3)*t^3)+(a2(4)*t^2)+(a2(5)*t)+a2(6);
    Th3 = pos3;

    Th1d = 0;
    Th2d =
(5*a2(1)*t^4)+(4*a2(2)*t^3)+(3*a2(3)*t^2)+(2*a2(4)*t)+(a2(5));
    Th3d = 0;

    Th1dd = 0;
    Th2dd = (5*4*a2(1)*t^3)+(4*3*a2(2)*t^2)+(3*2*a2(3)*t)+(2*a2(4));
    Th3dd = 0;

    Th0 = GIUNTO_END(4);
    Th0d = 0;
    Th0dd = 0;

    angolo0(j) = Th0;

```


4

```
angolo1(j) = Th1;
angolo2(j) = Th2;
angolo3(j) = Th3;

velocita0(j) = Th0d;
velocita1(j) = Th1d;
velocita2(j) = Th2d;
velocita3(j) = Th3d;

accelerazione0(j) = Th0dd;
accelerazione1(j) = Th1dd;
accelerazione2(j) = Th2dd;
accelerazione3(j) = Th3dd;

angolofinto1(j)      = 270*2*pi/360;
angolofinto2(j)      = 90*2*pi/360;
velocitafinta(j)     = 0;
accelerazionefinta(j) = 0;
end

for j = ext_low_3:ext_hig_3

    switch Ordine
        case 1
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos2 = GIUNTO_END(2);

        case 2
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos2 = GIUNTO_START(2);

        case 3
            pos1 = GIUNTO_END(1);
            pos2 = GIUNTO_END(2);

        case 4
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos2 = GIUNTO_END(2);

        case 5
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos2 = GIUNTO_START(2);
        case 6
            pos1 = GIUNTO_START(1);
            pos2 = GIUNTO_START(2);
    end

    t = tempofake(count3);
    count3 = count3+1;

    Th1 = pos1;
    Th2 = pos2;
    Th3 =
(a3(1)*t^5)+(a3(2)*t^4)+(a3(3)*t^3)+(a3(4)*t^2)+(a3(5)*t)+a3(6);

    Th1d = 0;
```

```

    Th2d = 0;
    Th3d =
(5*a3(1)*t^4)+(4*a3(2)*t^3)+(3*a3(3)*t^2)+(2*a3(4)*t)+(a3(5));

    Th1dd = 0;
    Th2dd = 0;
    Th3dd = (5*4*a3(1)*t^3)+(4*3*a3(2)*t^2)+(3*2*a3(3)*t)+(2*a3(4));

    Th0 = GIUNTO_END(4);
    Th0d = 0;
    Th0dd = 0;

    angolo0(j) = Th0;
    angolo1(j) = Th1;
    angolo2(j) = Th2;
    angolo3(j) = Th3;

    velocita0(j) = Th0d;
    velocita1(j) = Th1d;
    velocita2(j) = Th2d;
    velocita3(j) = Th3d;

    accelerazione0(j) = Th0dd;
    accelerazione1(j) = Th1dd;
    accelerazione2(j) = Th2dd;
    accelerazione3(j) = Th3dd;

    angolofinto1(j)      = 270*2*pi/360;
    angolofinto2(j)      = 90*2*pi/360;
    velocitafinta(j)     = 0;
    accelerazionefinta(j) = 0;

end

for i = numpunti+1:2*numpunti
    angolo0(i) = angolo0(numpunti);
    angolo1(i) = angolo1(numpunti);
    angolo2(i) = angolo2(numpunti);
    angolo3(i) = angolo3(numpunti);
    velocita0(i) = 0;
    velocita1(i) = 0;
    velocita2(i) = 0;
    velocita3(i) = 0;
    accelerazione0(i) = 0;
    accelerazione1(i) = 0;
    accelerazione2(i) = 0;
    accelerazione3(i) = 0;
    angolofinto1(i)      = 270*2*pi/360;
    angolofinto2(i)      = 90*2*pi/360;
    velocitafinta(i)     = 0;
    accelerazionefinta(i) = 0;
end
ANGOLO0 = timeseries(angolo0,time);
ANGOLO1 = timeseries(angolo1,time);
ANGOLO2 = timeseries(angolo2,time);
ANGOLO3 = timeseries(angolo3,time);
ANGOLOF1 = timeseries(angolofinto1,time);

```

6

```

ANGOLOF2 = timeseries(angolofinto2,time);

VELOCITA0 = timeseries(velocita0,time);
VELOCITA1 = timeseries(velocita1,time);
VELOCITA2 = timeseries(velocita2,time);
VELOCITA3 = timeseries(velocita3,time);
VELOCITAF = timeseries(velocitafinta,time);

ACCELERAZIONE0 = timeseries(accelerazione0,time);
ACCELERAZIONE1 = timeseries(accelerazione1,time);
ACCELERAZIONE2 = timeseries(accelerazione2,time);
ACCELERAZIONE3 = timeseries(accelerazione3,time);
ACCELERAZIONEF = timeseries(accelerazionefinta,time);

simOut = sim('Din_inversa_foldable_4gdl','SaveOutput','on');

cgiunto0 = simOut.get('COPPIA0');
cgiunto1 = simOut.get('COPPIA1');
cgiunto2 = simOut.get('COPPIA2');
cgiunto3 = simOut.get('COPPIA3');
potenza = simOut.get('POTENZA');
lavoro = simOut.get('LAVORO');

Torque_joint0(1,:) = cgiunto0.time;
Torque_joint0(2,:) = cgiunto0.signals.values;

Torque_joint1(1,:) = cgiunto1.time;
Torque_joint1(2,:) = cgiunto1.signals.values;

Torque_joint2(1,:) = cgiunto2.time;
Torque_joint2(2,:) = cgiunto2.signals.values;

Torque_joint3(1,:) = cgiunto3.time;
Torque_joint3(2,:) = cgiunto3.signals.values;

Power(1,:) = potenza.time;
Power(2,:) = potenza.signals.values;

Work(1,:) = lavoro.time;
Work(2,:) = lavoro.signals.values;

figure
hold on
title('COPPIA GIUNTO 0')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coppia [Nm]')
plot(Torque_joint0(1,:),Torque_joint0(2,:))

figure
hold on
title('COPPIA GIUNTO 1')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coppia [Nm]')
plot(Torque_joint1(1,:),Torque_joint1(2,:))

```

```
figure
hold on
title('COPPIA GIUNTO 2')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coppia [Nm]')
plot(Torque_joint2(1,:),Torque_joint2(2,:))
```

```
figure
hold on
title('COPPIA GIUNTO 3')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coppia [Nm]')
plot(Torque_joint3(1,:),Torque_joint3(2,:))
```

```
figure
hold on
title('POTENZA RICHIESTA')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potenza [W]')
grid on
plot(Power(1,:),Power(2,:))
```

```
figure
hold on
title('LAVORO RICHIESTO')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Lavoro [J]')
grid on
plot(Work(1,:),Work(2,:))
```