



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione di una procedura di validazione di un modello di
rendimento meccanico per un robot parallelo riconfigurabile**

Design of a validation procedure of a mechanical efficiency model
for a reconfigurable parallel robot

Relatore:
Prof. Ing. Matteo Claudio Palpacelli

TESI DI LAUREA DI:
Diego Giacchetta

Correlatore:
Ing. Daniele Costa

Anno Accademico 2019/2020

RINGRAZIAMENTI

Questo elaborato è il compimento di un percorso che ho intrapreso tre anni fa che è stato ricco di sforzi che però mi hanno permesso di acquisire conoscenze nuove, interessanti e soprattutto molto importanti per il proseguo della mia carriera e della mia vita, mi hanno permesso di conoscere meglio me stesso, di compiere nuove esperienze e di togliermi anche numerose soddisfazioni, per queste ragioni manterrò sempre un ricordo molto piacevole di questo periodo.

Desidero ringraziare il gruppo di “Meccanica applicata alle macchine” del dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche per la continua collaborazione e attenzione che hanno avuto nei miei riguardi durante lo svolgimento dell’attività di tirocinio e nella stesura di questa tesi, in particolare desidero ringraziare il prof. Ing. Matteo Claudio Palpacelli e l’Ing. Daniele Costa, sempre riferendomi a queste attività desidero ringraziare il mio collega di tirocinio Andrea con il quale ci sono sempre state collaborazione e aiuto reciproco.

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori ed in generale a tutta la mia famiglia che mi hanno supportato in questo periodo sotto tutti gli aspetti permettendo di focalizzarmi appieno sui miei obiettivi e non facendomi mai mancare nulla.

Vorrei ringraziare inoltre i miei compagni di corso e tra questi in particolare i miei compagni di tressette che hanno reso questi tre anni ricchi di momenti molto belli e che hanno reso la mia esperienza universitaria sicuramente molto più completa ed emozionante.

Per ultimi, ma non per importanza, desidero ringraziare tutti i miei amici che in questo periodo mi sono stati molto vicini e che non mi hanno mai fatto mancare la loro presenza in particolare con i loro consigli e con la loro ironia sempre utile per sdrammatizzare i momenti più difficili.

Diego Giacchetta

SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1. IL ROBOT 3-URU E IL GIUNTO RICONFIGURABILE	3
1.1 MANIPOLATORI RICONFIGURABILI	3
1.2 DESCRIZIONE DEL ROBOT 3-URU	5
1.3 DESIGN CONCETTUALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE	7
1.4 DESIGN FUNZIONALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE	9
1.4.1 Principio di funzionamento	10
1.4.2 Meccanismo di bloccaggio.....	11
CAPITOLO 2. MANIFATTURA ADDITIVA	13
2.1 PROTOTIPAZIONE RAPIDA.....	13
2.2 PROCESSO DI STAMPA DEL GIUNTO	17
CAPITOLO 3. ANALISI TEORICA E STRUMENTI NECESSARI PER I TEST	26
3.1 INTRODUZIONE AI TEST.....	26
3.2 RAPPORTO DI TRASMISSIONE	27
3.3 RENDIMENTI DEL GIUNTO RICONFIGURABILE E DEL ROBOT.....	27
3.4 STRUMENTI NECESSARI.....	29
3.4.1 Campioni di massa nota, siringa e recipiente.....	29
3.4.2 Filo, rocchetto, albero e linguetta/chiavetta.....	30
3.4.3 Carta millimetrata.....	31
3.4.4 Encoder angolare assoluto	32
3.4.5 Arduino	33
3.4.6 Motore elettrico	36
3.4.7 Batteria	40

3.4.8 Freno a tamburo	41
CAPITOLO 4. DESCRIZIONE DEI TEST	42
4.1 INTRODUZIONE	42
4.2 TEST SUL RAPPORTO DI TRASMISSIONE	42
4.3 TEST SUL RENDIMENTO COMPLESSIVO	47
4.4 ANALISI FINALE	56
CAPITOLO 5. POSSIBILI MIGLIORIE PER IL GIUNTO	57
5.1 RENDIMENTO DEL GIUNTO RICONFIGURABILE	57
5.2 RENDIMENTO DEL MECCANISMO DI BLOCCAGGIO	60
CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI	63
BIBLIOGRAFIA	64
SITOGRAFIA	67

INTRODUZIONE

Questa tesi di laurea intende fornire una panoramica generale sulle macchine a cinematica parallela e sul robot 3-URU messo a punto dal gruppo di ricercatori del Laboratorio di Robotica dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona. A seguire si enuncerà il funzionamento del giunto riconfigurabile e del meccanismo di bloccaggio che sono il fulcro del robot e che permettono la possibilità di variare il suo movimento.

È sul giunto riconfigurabile che si è fatto un importante approfondimento in queste pagine e nella tesi del collega Andrea D'Ambrosio, in particolare quest'ultimo si è occupato di studiare il giunto da un punto di vista teorico andando a scomporre il pezzo in tutti i suoi accoppiamenti funzionali e andando a stimare un rendimento teorico complessivo per entrambe le configurazioni che esso può assumere.

Nei capitoli seguenti verrà anche descritta passo per passo tutta la procedura di realizzazione dei pezzi del giunto che avviene mediante manifattura additiva tramite la stampante Form 3 prodotta dalla Formlabs presente in laboratorio, questa tecnica rappresenta sicuramente una delle novità principali nel settore manifatturiero e presenta un elevato potenziale innovativo.

Successivamente verranno proposti dei test da effettuare sul giunto nelle diverse configurazioni in modo da valutare le prestazioni di questo e di confrontarle con i risultati teorici presenti nella tesi di Andrea D'Ambrosio e che sono stati ripresi brevemente anche in questo elaborato, prima di andare a descrivere le prove da eseguire, è stato fatto un preambolo dove si presentano tutti gli strumenti necessari, il loro funzionamento in generale e all'interno dei test. Si è pensato di realizzare delle prove non molto complesse e soprattutto poco costose ma che comunque riescano a fornirci degli importanti dati relativi al giunto riconfigurabile.

Per ogni singola prova verranno delineati:

- lo scopo di questa e quindi la grandezza che si andrà a misurare o a calcolare;
- gli strumenti necessari per un corretto svolgimento;
- l'allestimento del banco di prova;
- lo svolgimento del test e la sua durata trattando anche eventuali accorgimenti necessari da compiere durante il test;

- i dati ottenuti ed eventuali calcoli da compiere per giungere alle grandezze che si volevano misurare con la prova;
- una conclusione dove si descrivono brevemente i costi e l'accuratezza della prova.

Nell'ultimo capitolo verranno proposte alcune migliorie, frutto di studi teorici, da poter attuare sul giunto riconfigurabile per migliorarne il rendimento, verranno spiegati il ragionamento seguito, le formule applicate ed in alcuni casi anche i motivi per cui tali migliorie possono in realtà creare degli svantaggi.

Questo elaborato si basa principalmente sull'attività di tirocinio svolta insieme al collega Andrea D'Ambrosio sotto la guida del professor Matteo Claudio Palpacelli, purtroppo questo è avvenuto principalmente in maniera telematica a causa dell'emergenza Coronavirus e quindi molte delle considerazioni scritte in questa tesi sono frutto di analisi prettamente teoriche e si propongono di svolgere una funzione di guida per i futuri tirocinanti che avranno la possibilità di effettuare di persona dei test sul giunto riconfigurabile.

CAPITOLO 1. IL ROBOT 3-URU E IL GIUNTO RICONFIGURABILE

1.1 MANIPOLATORI RICONFIGURABILI

Un manipolatore riconfigurabile è un robot in grado di modificare la mobilità del proprio end-effector in seguito ad un cambiamento locale della cinematica. Questa tipologia di macchine che garantisce una buona flessibilità rappresenta una soluzione sempre più apprezzata ed utilizzata nell'industria manifatturiera. Esistono diversi metodi per andare ad intervenire sulla struttura cinematica di un manipolatore ed il più comune è l'uso di un giunto bloccabile, cioè un giunto con un certo numero di gradi di libertà (GDL) uno dei quali può essere bloccato selettivamente con il fine di cambiare la mobilità risultante del robot.



Figura 1.1 Schema cinematico del 3-SRU.

La famiglia delle macchine cinematiche parallele (PKMs= Parallel Kinematics Machines) può trarre importanti vantaggi dall'uso di giunti riconfigurabili poiché attraverso una piccola modifica della cinematica delle gambe si possono ottenere modifiche sostanziali della mobilità globale. Lo svantaggio principale delle PKMs è costituito dalla disponibilità limitata di uno spazio di lavoro abile e proprio per questo motivo la possibilità di variare la mobilità dell'end-effector è un ambito di elevato interesse tecnologico.

Come è ben noto molte topologie ad anello chiuso, tipiche delle PKMs, possono presentare diversi modi di lavoro che corrispondono alle diverse soluzioni della cinematica del robot [1-3]. Risulta quindi che lo sfruttamento di più modalità di assemblaggio della macchina può aumentare la flessibilità e l'usabilità

della stessa nelle applicazioni industriali. Sono state anche eseguite numerose analisi sulla possibilità di cambiare la mobilità del robot modificando solo la modalità di assemblaggio senza andare a smontare il manipolatore [4-8]. Altri studi sono stati fatti sulla modifica temporanea della catena cinematica: in questi casi un giunto bloccabile azionato durante il movimento può rendere migliore la capacità di eseguire operazioni di posizionamento [9-11].

Focalizzandoci di più sul nostro caso si ha che le coppie cinematiche a più gradi di libertà sono ottenute con la composizione di più coppie cinematiche elementari che vengono bloccate alternativamente, spesso però il cambio di configurazione avviene manualmente senza tenere conto del comportamento del manipolatore durante la transizione. Può quindi succedere che il robot passi attraverso una configurazione sotto-vincolata e che quindi sia necessario un intervento esterno al fine di mantenere in posizione il robot.

I ricercatori del Laboratorio di Robotica dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona hanno effettuato recentemente diversi studi sui robot riconfigurabili andando a focalizzarsi soprattutto sul concetto di giunto bloccabile. Per iniziare si sono concentrati sull'architettura a tre gambe cilindrico-prismatico-universale (3-CPU) che è in grado di eseguire movimenti di pura traslazione o pura rotazione in base all'orientamento degli assi dei giunti universali [20,21]. Il passaggio tra le due diverse modalità con l'ausilio di un giunto bloccabile è stato approfondito in [22].

Il giunto universale presenta due gradi di libertà ed è formato da un giunto sferico (tre gdl) al quale è stata bloccata una rotazione attorno ad uno dei tre assi concorrenti di cui era composto, i due gradi di libertà del giunto universale sono quindi dati dalle rotazioni attorno a due assi concorrenti, il giunto universale diventa riconfigurabile quando si può bloccare selettivamente una delle tre rotazioni consentite dal giunto sferico.

L'architettura 3-CPU presenta però alcuni svantaggi intrinseci ad essa, la maggiore problematica riguarda la necessità di riconfigurare i giunti passivi che collegano la struttura all'end-effector, questo sottintende che il meccanismo bloccabile deve far parte della struttura delle gambe rendendo di conseguenza più complessa la progettazione meccanica (a causa delle limitazioni costituite dal peso e dalle dimensioni del giunto passivo) che conduce inoltre ad una diminuzione del carico utile.

Di conseguenza i medesimi ricercatori hanno studiato altre topologie che abbiano comunque in comune con il robot 3-CPU gli stessi tipi di mobilità [23], tra queste la soluzione più adatta per progettare un

nuovo manipolatore riconfigurabile è stata ritenuta l'architettura 3-URU (universale-rotoidale-universale) [24,25]. Il manipolatore 3-URU deriva dalla topologia 3-SRU (sferico-rotoidale-universale): il giunto sferico che collega la gamba alla piattaforma fissa può essere considerato come la composizione di tre giunti rotoidali con assi concorrenti e andando a bloccare selettivamente uno di questi il giunto diventa un giunto universale con differenti sequenze di rotazione. Due delle configurazioni possibili forniscono alla piattaforma mobile la capacità di eseguire movimenti di traslazione e rotazione pura e sono quindi le configurazioni più importanti dal punto di vista ingegneristico.



Figura 1.2 Prototipo manipolatore riconfigurabile 3-URU.

1.2 DESCRIZIONE DEL ROBOT 3-URU

L'architettura cinematica di ogni gamba del robot 3-URU è composta da una catena di tre coppie: sferica, rotoidale e universale. La coppia sferica è quella che connette la piattaforma con il primo corpo di ciascuna gamba e viene ridotta ad una coppia universale in modo da garantire la funzionalità del robot. L'accoppiamento del primo al secondo corpo di ogni gamba avviene tramite il giunto rotoidale mentre la gamba è connessa all'end-effector attraverso un giunto universale.

Tutto questo può essere visualizzato nella Figura 1.3. Le tre coppie sferiche sono posizionate in modo tale che il loro centro rimanga sull'asse del sistema di riferimento fisso $\{0\}$ alla stessa distanza, denominata a , dall'origine. Le tre rotazioni che caratterizzano ogni coppia sono realizzate tramite tre giunti rotoidali fra loro perpendicolari i cui assi sono concorrenti in un punto che va a coincidere con il centro della coppia sferica.

In questo modo i tre sistemi di riferimento, che per la gamba i -esima possiamo denominare $\{1,i\}$, $\{2,i\}$ e $\{3,i\}$, hanno l'origine in comune. Nel dettaglio nella configurazione di base (rappresentata nella Figura 1.3), dove il sistema della piattaforma mobile $\{1\}$ coincide con il sistema fisso $\{0\}$, si ha che $\{1,i\}$, $\{2,i\}$ e $\{3,i\}$ vanno a coincidere. Stabiliti questi sistemi i tre assi sono impostati nel modo seguente:

- la prima rotazione è coassiale con il rispettivo asse del sistema di riferimento $\{0\}$. Nel sistema dell' i -esima gamba $\{1,i\}$ il vettore unitario che descrive questo asse è ${}^{\{1,i\}}r_{1,i} = [1 \ 0 \ 0]^T$;
- la seconda rotazione è perpendicolare alla prima ed è diretta lungo la gamba nella configurazione di base. Nel sistema $\{2,i\}$ si avrà quindi ${}^{\{2,i\}}r_{2,i} = [0 \ 0 \ 1]^T$;
- la terza ed ultima rotazione ha l'asse perpendicolare agli assi della prima e della seconda rotazione nella configurazione iniziale. Rispetto al sistema di riferimento $\{3,i\}$ avremo ${}^{\{3,i\}}r_{3,i} = [0 \ 1 \ 0]^T$.

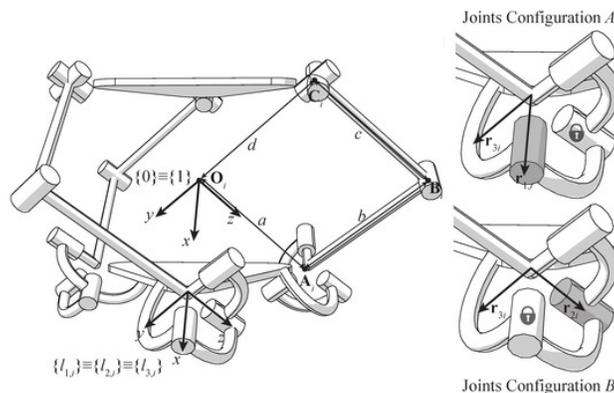


Figura 1.3 Schema cinematico del 3-URU riconfigurabile.

In questo manipolatore il meccanismo di bloccaggio viene utilizzato per avere due configurazioni differenti che in questa trattazione d'ora in poi verranno indicate come "Configurazione Giunto A" e "Configurazione Giunto B" (Figura 1.3). Nella configurazione A è consentita la prima rotazione della coppia sferica e va a rappresentare il grado di libertà della gamba i -esima, mentre la seconda rotazione è bloccata e la terza è libera. Nella configurazione B invece la prima rotazione risulta bloccata, la seconda è attuata mentre la terza è libera come nel caso precedente. Come verrà approfondito in seguito il giunto

nella configurazione A permette di ottenere nell'end-effector movimenti di rotazione pura mentre nella configurazione B permette la traslazione pura, questo avviene senza la necessità di andare ad intervenire nei giunti passivi come invece doveva essere fatto nella configurazione 3-CRU che proprio per questo non è stata utilizzata.

Il resto della catena cinematica di ogni gamba è composto da un giunto rotoidale che è parallelo all'ultima rotoidale del giunto sferico disposto alla distanza \mathbf{b} , e da un giunto universale che connette la seconda gamba all'end effector.

Come è stato dimostrato da Palpacelli et al. in [23], la disposizione dell'ultimo giunto della catena è anch'essa fondamentale per la mobilità dell'end-effector. In particolare, per il robot parallelo riconfigurabile 3-URU, l'ultimo giunto universale è disposto in modo tale che la prima rotazione sia parallela alla precedente rotoidale a distanza \mathbf{c} , così facendo l'asse di rotazione è perpendicolare al piano delle gambe π_i (identificato dai punti A_i , B_i e C_i). La seconda rotazione invece giace sul piano π_i ed è di conseguenza perpendicolare alla precedente, nell'end-effector sono rispettivamente perpendicolari e concorrenti all'origine del sistema di riferimento mobile $\{1\}$. Rispetto a questo sistema di riferimento i tre punti di attacco alla piattaforma mobile \mathbf{C}_i sono identificati dai tre vettori costanti ${}^1\mathbf{C}_1 = [0 \ 0 \ -d]^T$, ${}^1\mathbf{C}_2 = [-d \ 0 \ 0]^T$ e ${}^1\mathbf{C}_3 = [0 \ -d \ 0]^T$.

1.3 DESIGN CONCETTUALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE

Il design concettuale è stato proposto da Palpacelli et al. in [26] ed è basato sull'accoppiamento di ingranaggi conici come mostrato in Figura 1.4. Il meccanismo di bloccaggio è stato progettato al fine di consentire l'attuazione dell'ingranaggio conico D il quale è poi connesso al motore. Il movimento del cursore scorrevole C riconfigura il giunto sferico andando a bloccare una delle rotazioni come verrà approfondito nel prossimo paragrafo.

Il cursore C è guidato da un attuatore in due diverse posizioni le quali poi determinano i due differenti modi di funzionamento del giunto, il cursore ha una forma cilindrica con un albero scanalato esterno ed un mozzo interno anche questo scanalato nella parte inferiore.

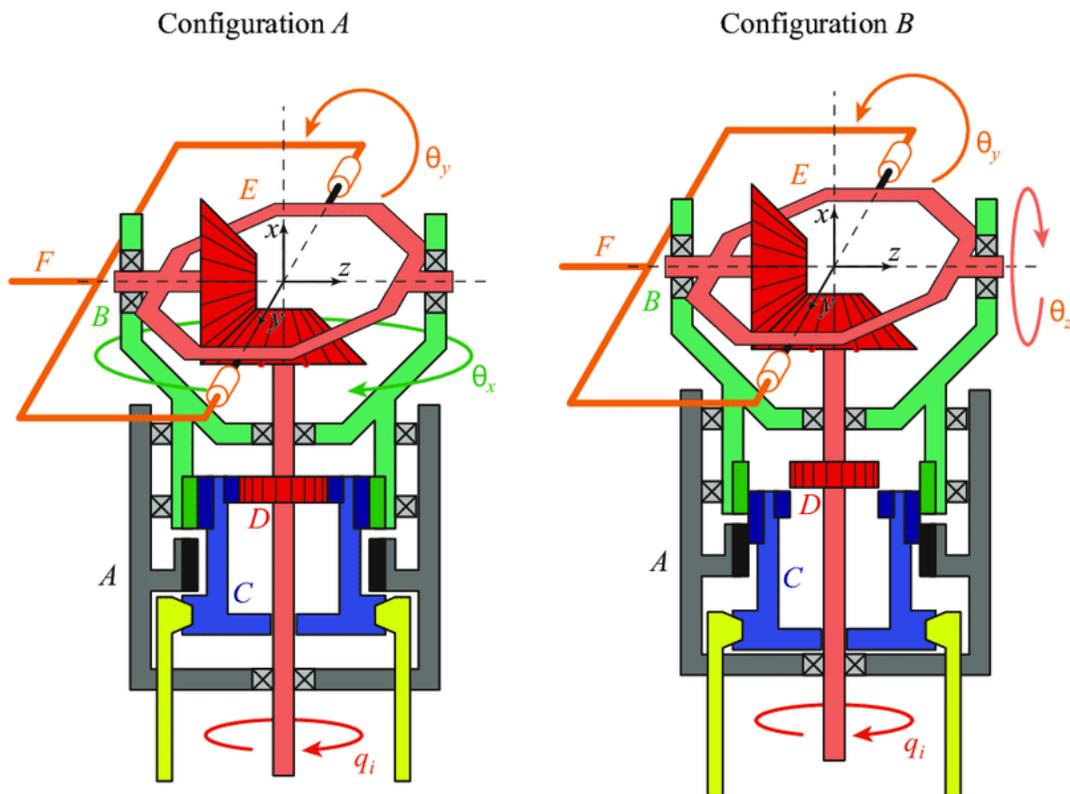


Figura 1.4 Schema concettuale del giunto riconfigurabile per ottenere movimenti della piattaforma di rotazione pura (A) e traslazione pura (B).

Nella Configurazione A, come si può vedere dalla Figura 1.4, il cursore C ingrana con il mozzo scanalato della forcella B, in questo modo B, C e D si comportano come un corpo rigido. Di conseguenza la seconda forcella E non ruota rispetto a B e il corpo F rimane libero di ruotare in quanto non è vincolato in nessun modo. Questa configurazione permette quindi le rotazioni attorno agli assi X e Y e quindi porta ad avere movimenti di rotazione pura nella piattaforma finale.

Se invece il cursore viene spostato verso il basso come avviene nella Configurazione B allora l'albero scanalato ingrana sia con il corpo A che con il corpo B. A causa di ciò la rotazione di B rimane bloccata in quanto A rappresenta il telaio. La rotazione dell'ingranaggio conico azionato (D) trasmette il moto alla seconda forcella E che ora costituisce il grado di libertà attuato dalla gamba. Si può giungere alla conclusione che la Configurazione B permette una rotazione azionata attorno all'asse Z e una rotazione libera attorno all'asse Y, esattamente come richiesto per ottenere un moto di traslazione pura nell'end-effector.

1.4 DESIGN FUNZIONALE DEL GIUNTO RICONFIGURABILE

Partendo dal design concettuale descritto in precedenza [19] si può andare ad analizzare il design funzionale del giunto stesso, l'aspetto esteriore di questo è illustrato in Figura 1.5. Sia il motore relativo alla gamba che l'attuatore del cursore si trovano esternamente fissati a terra e questa è una miglioria che è stata apportata rispetto all'iniziale dispositivo riconfigurabile 3-URU descritto in [22], infatti prima l'attuatore aveva lo scopo di riconfigurare un giunto passivo all'interno della catena cinematica. Questo accorgimento ha permesso di superare alcune problematiche dovute al fatto che in precedenza l'attuatore si trovava all'interno dello spazio di lavoro del robot e in particolare era solidale all'ultimo giunto della gamba e quindi all'end-effector.

Queste considerazioni portano ad un design migliorato del giunto sferico, visibile nella Figura 1.5 che è ora basato su una serie di corpi sferici collegati da un sistema di ingranaggi. Rifacendoci sempre alla medesima figura si può vedere come i movimenti permessi a tale giunto sono:

- rotazione della gamba intorno a $r_{3,i}$ che è libera in entrambe le configurazioni;
- rotazione il cui asse può essere selezionato tra $r_{1,i}$ e $r_{2,i}$ a seconda di come si agisce sull'attuatore.

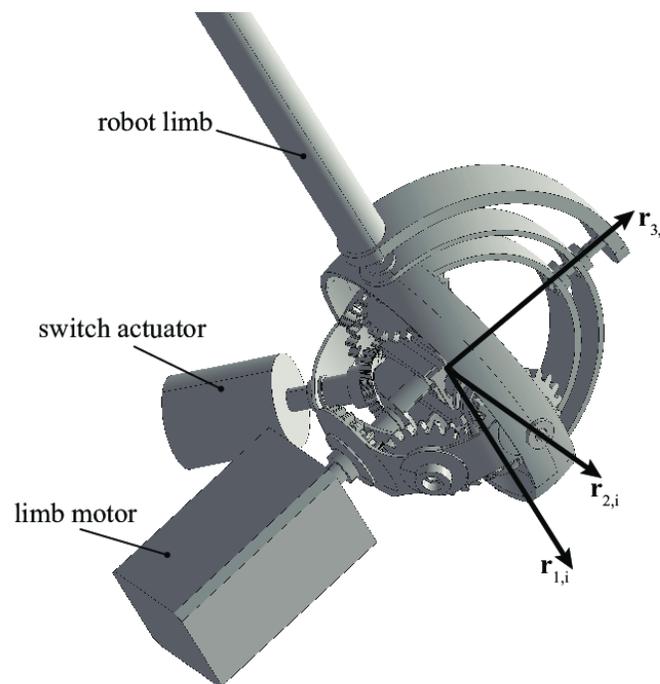


Figura 1.5 Bozza del giunto riconfigurabile.

1.4.1 Principio di funzionamento

Il giunto, come visibile nella Figura 1.4, si basa su degli ingranaggi conici che sono molto vincolanti in termini di dimensione e assemblaggio, in particolare tutto il design del giunto è stato accuratamente studiato per ridurre al minimo il volume occupato da questo e la scelta e il dimensionamento degli ingranaggi conici vanno proprio in questa direzione, infatti si sono progettate ruote che si ottengono da giunti sferici per avere il minor ingombro possibile lasciando lo spazio necessario per alloggiare l'attuatore. La manifattura additiva risponde perfettamente a queste esigenze (realizzare componenti molto piccoli ma con molti dettagli e con buone finiture superficiali) e si è quindi pensato di realizzare gli ingranaggi conici con questa tecnica.

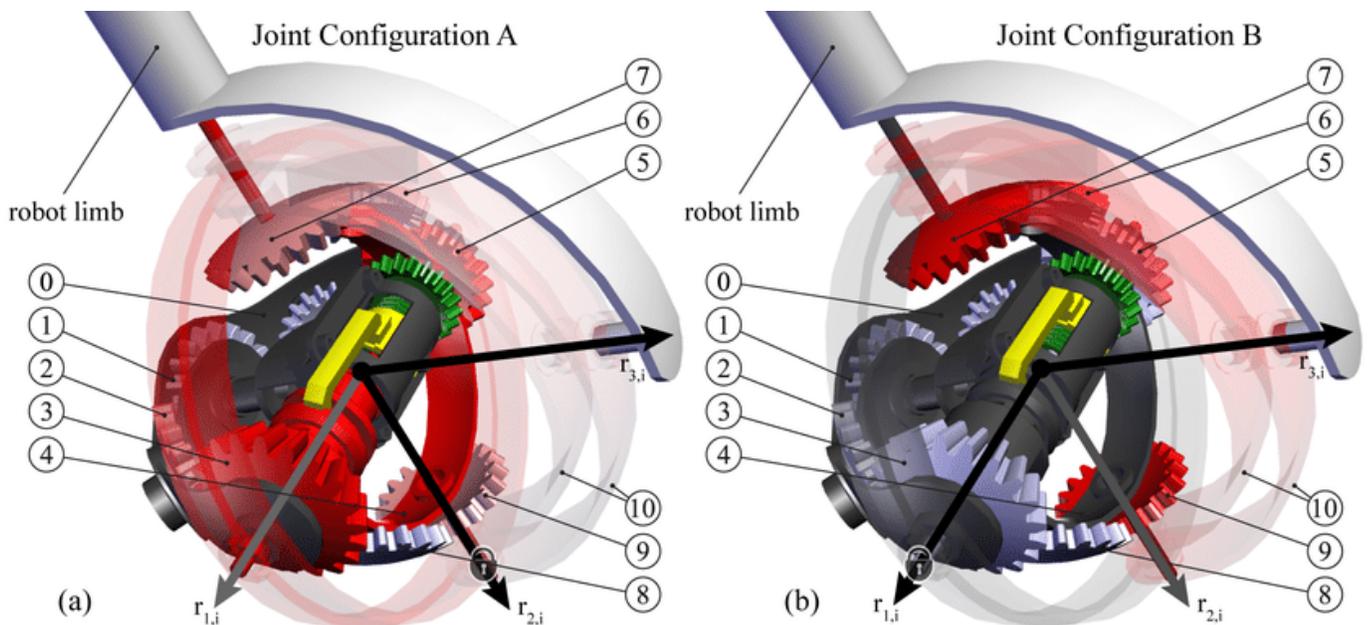


Figura 1.6 Disegno dettagliato del giunto riconfigurabile nella Configurazione A (a) e nella Configurazione B (b).

Di seguito viene descritto il funzionamento del giunto riconfigurabile:

- Configurazione A (Figura 1.6a): l'attuatore del ramo è fissato al telaio 0 (grigio scuro in figura) ed è connesso con l'ingranaggio conico 1 il quale ingrana con l'ingranaggio 2 e quindi anche con 3. In questa configurazione il meccanismo di bloccaggio collega l'ingranaggio 3 al corpo 4 (rosso in figura). Quindi la rotazione dell'ingranaggio 3 fa ruotare la gamba del robot attorno all'asse $r_{1,i}$ come richiesto dalla Configurazione A. L'ingranaggio 5, che ruota solidalmente alla ruota 3, non influenza la mobilità poiché non è collegato al corpo 4, così come anche gli ingranaggi 6, 7, 8 e 9. La rotazione attorno all'asse $r_{2,i}$ è bloccata visto che gli ingranaggi 7 e 9 sono sempre solidali alla forcella 10. Queste ruote ruotano attorno

a $r_{1,i}$ evitando loro di ruotare intorno ai propri assi. Per quanto riguarda la rotazione $r_{3,i}$ non ci sono vincoli particolari e questa è quindi consentita senza nessun impedimento come richiesto dalla cinematica del robot 3-URU.

- Configurazione B (Figura 1.6b): il meccanismo di bloccaggio ora collega il corpo 4 al telaio 0 bloccando così la rotazione attorno all'asse $r_{1,i}$, a differenza di quanto accade nella precedente configurazione. Il moto parte sempre dalla ruota 1 e viene trasmesso a 2, 3 e successivamente 8 e 9. La rotazione dell'ingranaggio 9 mette in rotazione la forcella 10 attorno all'asse $r_{2,i}$, come è richiesto dalla Configurazione B. Gli ingranaggi 5, 6 e 7 lavorano nello stesso modo per realizzare un'attuazione simmetrica sulla forcella 10. Anche in questo caso la rotazione attorno all'asse $r_{3,i}$ non è ostacolata in nessun modo.

1.4.2 Meccanismo di bloccaggio

L'intero funzionamento del giunto riconfigurabile dipende dal meccanismo di bloccaggio che è in grado di bloccare alternativamente il corpo 4 con l'ingranaggio conico 3 (Configurazione A) oppure al telaio 0 (Configurazione B). Questo meccanismo, come mostrato nella Figura 1.7, opera nel seguente modo:

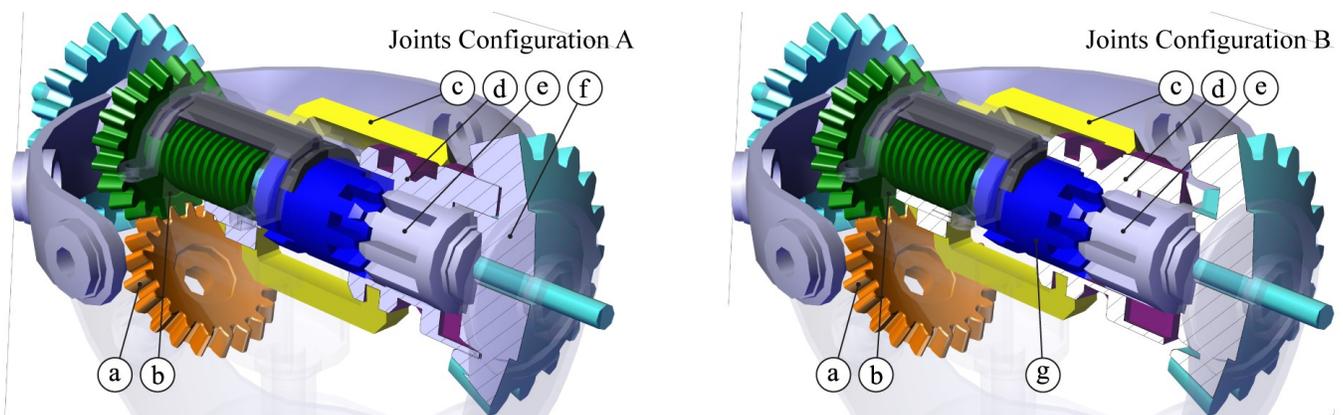


Figura 1.7 Meccanismo di switch vite-madrevite per selezionare la Configurazione A (a) o la Configurazione B (b).

- Configurazione A (Figura 1.7a): l'azionamento parte dalla ruota a , la quale muove l'ingranaggio b che è solidale ad una vite. Questa vite fa traslare un dado che è collegato alla forcella c che va muovere il cursore d . La funzione di questo corpo è quello di vincolare l'albero scanalato e con la ruota dentata conica f che corrisponde all'ingranaggio 3 della Figura 2.3 il cui scopo è stato già descritto. Si può inoltre far caso che l'albero scanalato e fa parte del corpo indicato con 4 nella stessa Figura 1.6.

- Configurazione B (Figura 1.7b): in questa configurazione il cursore d vincola l'albero e insieme a g il quale è a sua volta solidale con il telaio. Così facendo il corpo 4 (che comprende anche l'albero e) è connesso con il telaio come richiesto dalla cinematica del robot.

Va tenuto conto del fatto che il meccanismo di bloccaggio si muove da una configurazione all'altra grazie ad un attuatore dedicato che deve essere il meno complesso possibile visto che il compito che deve andare ad eseguire è quello di ruotare l'ingranaggio a in due posizioni note (che corrispondono alle due configurazioni). L'attuatore non deve quindi assumere posizioni intermedie che abbiano funzione di regolazione. Si può pensare di utilizzare un semplice attuatore rotazionale idraulico, pneumatico o elettromagnetico che va ad impattare in maniera molto ridotta sul costo totale della macchina.

CAPITOLO 2. MANIFATTURA ADDITIVA



2.1 PROTOTIPAZIONE RAPIDA

I processi di lavorazione tradizionali, una volta realizzato il modello del pezzo da produrre in formato digitale, prevedono processi di sottrazione di materiale da un solido di partenza fino ad arrivare al pezzo con la forma desiderata, questi processi causano la generazione di una certa quantità di truciolo e spesso, per raggiungere le finiture desiderate, possono essere molto lunghi e costosi.

Negli ultimi anni si sta lavorando ad un ribaltamento del processo produttivo basato sull'addizione progressiva di strati di materiale detti layer, questa tecnica, che prende il nome di Additive Manufacturing, sta prendendo sempre più campo nel settore dei prototipi in base al processo detto di rapid prototyping che comprende un insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo in tempi relativamente brevi a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (modello CAD).

Questa nuova tecnica presenta rispetto alle lavorazioni tradizionali degli importanti vantaggi:

- riduzione dei costi e dei tempi di lavorazione vista la possibilità di produrre il pezzo tramite un solo processo senza invece ricorrere a lavorazioni successive;
- riduzione del materiale di scarto vista l'assenza di sfrido che è una conseguenza inevitabile delle lavorazioni sottrattive;
- maggiore leggerezza del componente grazie alla possibilità di mettere materiale solo dove necessario;
- massima libertà in fase di progettazione senza dover sottostare a delle esigenze di lavorazione, ne deriva quindi una maggiore possibilità di personalizzazione dell'oggetto.

Le tecniche di additive manufacturing sono molteplici e possono essere suddivise in tre macroaree basate sulla consistenza delle materie prime: solidi, liquidi e polveri, i materiali maggiormente adatti a queste lavorazioni sono i metalli e i polimeri, nonostante queste differenze esiste una sequenza comune per tutte queste lavorazioni:

- si parte dalla realizzazione del modello tridimensionale dell'oggetto tramite programmi di progettazione CAD;
- si converte questo file in un formato STL e attraverso software di modellazione si prevede la scomposizione del modello in layer stampabili dalle stampanti 3D;
- si invia il processo di stampa dopo aver programmato opportunamente la stampante 3D;
- si applicano se necessarie delle lavorazioni di post-produzione per ottenere livelli adeguati di finitura nel pezzo stampato.

Un'altra caratteristica in comune a tutti i processi di additive manufacturing è la necessità di prevedere degli elementi di supporto allo scopo di sostenere il pezzo durante la stampa, questi sostegni vanno poi eliminati dal pezzo alla fine della lavorazione e per questo non devono essere né troppo spessi (altrimenti potrebbero esserci problemi nella loro separazione dal pezzo) né troppo sottili (potrebbe venir meno la loro funzione se si dovessero rompere durante la stampa).

I manufatti ottenibili hanno una finitura superficiale variabile a seconda della precisione con la quale si è scelto di realizzarli in fase di progetto, le dimensioni di questi sono legati a quelle della stampante ma di solito quelle massime non superano i 50[cm] lungo i tre assi.

Le principali tecniche di additive manufacturing sono sette e si differenziano per il tipo di materiale utilizzato e per il tipo di processo di stampa:

1. Stereolithography (SLA): si basa sulla solidificazione di strati successivi di polimero allo stato liquido. Il piano di lavoro e il polimero liquido (fotopolimero) sono contenuti in una vasca con una piattaforma orizzontale che supporta la parte e si muove verticalmente tramite un dispositivo di sollevamento. La polimerizzazione del liquido avviene tramite un raggio laser all'elio-cadmio che funge da sorgente luminosa e che viene direzionato da uno specchio in rapido movimento in modo da fotopolimerizzare punto per punto tutta la sezione, dopodiché si passa al layer successivo con le medesime operazioni, lo schema è rappresentato nella Figura 2.1;

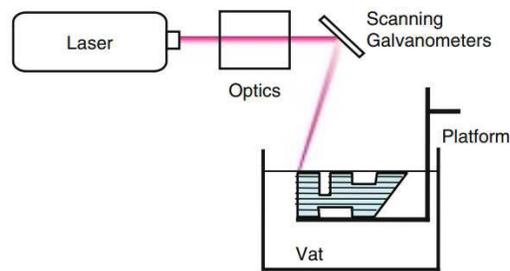


Figura 2.1 Schema della Stereolithography.

2. Fused Deposition Modelling (FDM): prevede il deposito di strati successivi di una resina termoplastica allo stato semisolido tramite una testina riscaldata, si possono usare materiali particolati come l'Ultem, si sfrutta del materiale di supporto per non far cedere la struttura, grazie alla deposizione e all'indurimento successivo degli strati è consentita la fabbricazione dal basso verso l'alto, tuttavia si ottiene una finitura superficiale abbastanza grezza e per questo spesso sono necessari dei procedimenti di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura, lo schema della FDM è rappresentato in Figura 2.2;

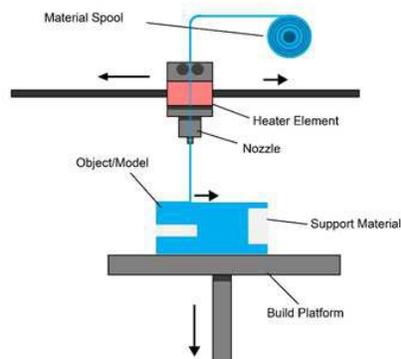


Figura 2.2 Schema della Fused Deposition Modelling.

3. Material Jetting Modeling (MJM): si basa su testine di stampa molto simili alle comuni stampanti inkjet, il materiale allo stato liquido (di solito cera o resine acriliche) viene depositato con l'ausilio di un ugello, per realizzare degli elementi di supporto a perdere si può usare un secondo materiale solubile e che quindi può essere facilmente rimosso alla fine della stampa, in generale questa tecnica ci consente di ottenere manufatti con elevati livelli estetici e medio-alte proprietà meccaniche;

4. Binder Jetting (BJ): è una tecnica più economica delle altre e si basa sul rilascio di un legante chimico in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere, la polvere non trattata dal legante viene rimossa per essere riutilizzata successivamente, si possono ottenere prodotti plastici, metallici o compositi molto buoni a livello estetico ma molto porosi e fragili, è

quindi consigliata per la realizzazione di prototipi dimostrativi, lo schema della Binder Jetting è rappresentato in Figura 2.3;

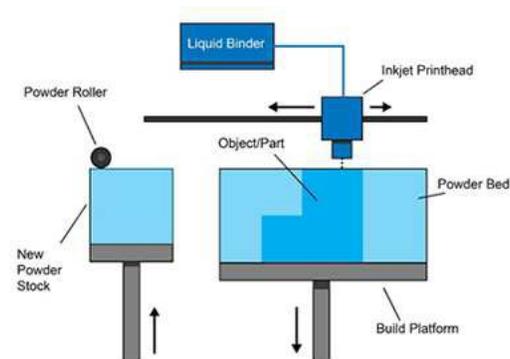


Figura 2.3 Schema della Binder Jetting.

5. Selective Laser Sintering (SLS): sfrutta energia termica per fondere e poi solidificare una regione di un letto di polvere posizionata su un piano mobile in direzione verticale in modo da garantire la successione dei diversi strati. L'energia termica è fornita da un raggio laser al CO₂ direzionato opportunamente da uno specchio mobile. La polvere che circonda l'oggetto funge anche da supporto e quindi non sono necessari elementi di sostegno, lo schema della SLS è rappresentato in Figura 2.4;

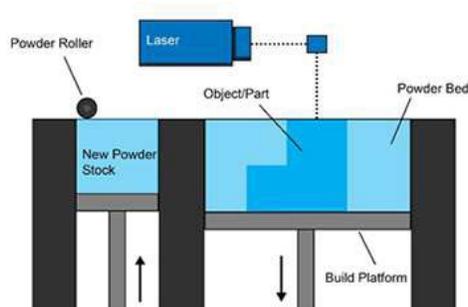


Figura 2.4 Schema della Selective Laser Sintering.

6. Laser Metal Deposition (LMD): della polvere metallica, un gas di protezione inerte e un fascio laser sono erogati simultaneamente da un ugello, l'energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo che poi completano la loro fusione quando giungono a contatto con il bagno di fusione creando un legame metallico tra la polvere e il substrato, spostando il laser il bagno di fusione si può solidificare e va a formare una traccia rialzata. Il gas inerte permette al materiale metallico di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo, lo schema è mostrato nella Figura 2.5;

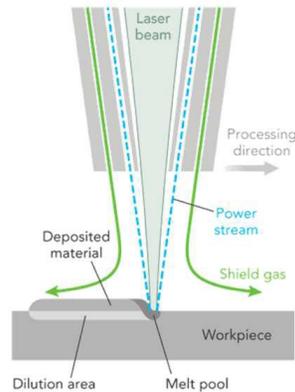


Figura 2.5 Schema della Laser Metal Deposition.

7. Laminare Object Manufacturing (LOM): si basa sulla sovrapposizione di strati di materiale che si trovano già allo stato solido come carta, plastica o materiali compositi. Il foglio solido viene srotolato da un rullo di alimentazione per poi essere tagliato da un laser ed aggregato agli strati sottostanti. Poiché l'oggetto viene sostenuto dal materiale in eccesso che lo circonda non sono necessari elementi di supporto.

Nella maggior parte dei casi le tecniche di additive manufacturing sopra elencate non sono in grado però di produrre pezzi esenti da difetti estetici o che comunque non possano poi essere migliorati con ulteriori lavorazioni di finitura.

2.2 PROCESSO DI STAMPA DEL GIUNTO

La stampante utilizzata per realizzare il prototipo del giunto universale riconfigurabile è la stampante della Formlabs denominata Form 3 mostrata nella Figura 2.6. Questo macchinario si basa sulla tecnologia SLA e quindi utilizza un laser per polimerizzare parti solide isotropiche a partire da una resina fotopolimerica liquida, in particolare la Form 3 utilizza una nuova variante della SLA denominata Low Force Stereolithography (LFS) che permette una calibrazione intelligente della potenza del laser in base alla struttura del modello al fine di bilanciare accuratezza dei dettagli e velocità di stampa.

Rispetto ai modelli precedenti della stessa azienda la Form 3 è in grado di assicurare superfici con finiture più lisce e maggiori dettagli. Il volume di stampa e lo spessore del singolo layer sono rispettivamente:

-145[mm] x 145[mm] x 185[mm];

- 25[μm] ÷ 300[μm].



Figura 2.4 Stampante Form 3 della Formlabs.

L'altezza del singolo layer può essere scelta dal progettista in base alle esigenze: uno spessore minore garantisce un livello di finitura più accurato ma aumentano sensibilmente i tempi di stampa, viceversa per uno spessore maggiore.

La resina fotopolimerica utilizzata nella realizzazione del giunto è la Grey V4, molto versatile, in grado di fornire elevata precisione con deformazioni limitate e attrito relativamente basso e consigliata dalla stessa Formlabs, non è molto adatta per applicazioni che necessitano di assorbire urti ed impatti ma non è questo il caso del giunto quindi può essere tranquillamente utilizzata, il suo modulo elastico è $E=2,2[\text{GPa}]$ e la sua tensione di rottura è $\sigma_R=65,0 [\text{Mpa}]$ che sono buoni valori per una resina polimerica.



Figura 2.5 Esempio di oggetto realizzato con la resina Grey V4.

Di seguito verranno mostrate più nello specifico tutte le operazioni di stampa necessarie per ottenere il prototipo finale.

Il primo step per la realizzazione del prototipo fisico è la creazione del modello CAD dei singoli componenti che costituiscono il giunto, il software che è utilizzato per la modellazione tridimensionale è CATIA dell'azienda Dassault. I file delle singole parti sono poi stati importati all'interno del programma associato alla stampante e fornito dalla stessa Formlabs denominato PreForm per essere adattati alle operazioni di stampa.

Si possono dare in stampa più pezzi contemporaneamente sempre però restando nei limiti definiti dalle dimensioni della stampante, visto il volume considerevole di pezzi da produrre sono stati necessari più cicli di stampa. Una precisazione importante da fare è che la stampante utilizzata ha la tendenza ad aggiungere materiale nel prodotto finito ed è quindi necessario modificare alcune misure dei singoli componenti all'interno dei rispettivi modelli CAD in modo da non precludere il loro funzionamento.

I modelli del software CAD sono quindi stati esportati in un formato adatto alle operazioni di stampa ovvero STL. Un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli, questo consiste in delle coordinate ortogonali X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ogni triangolo e in un vettore per descrivere di volta in volta l'orientamento della normale alla superficie. L'importazione del modello CAD in Preform è rappresentata nella Figura 2.8. Tra i vantaggi del formato STL c'è sicuramente la semplicità in quanto risulta molto facile ed intuitivo da generare e da processare mentre uno svantaggio è la geometria eccessivamente approssimata e la sua struttura dati che in alcune occasioni può presentare la ripetizione dello stesso vertice più volte.

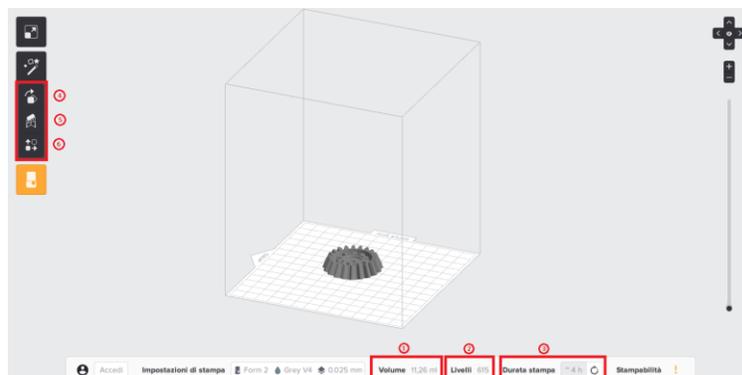


Figura 2.6 Importazione modello CAD.

Dopo aver inserito il componente all'interno di PreForm quest'ultimo ci fornisce tre importanti indicazioni sui parametri del processo di stampa:

- layer necessari per la realizzazione del componente;

- durata del processo di stampa;
- volume di resina fotopolimerico.

Nel dettaglio i primi due parametri sono fortemente legati al livello di finitura richiesto e per una tolleranza superficiale molto stretta aumentano considerevolmente il loro valore.

Dopo avere controllato questi parametri si può preparare il modello per la stampa, questo processo di preparazione può essere diviso in tre step:

- orientamento del modello;
- generazione dei supporti;
- creazione layout di stampa.

L'orientamento del modello è a discrezione dell'operatore e può essere eseguito sia automaticamente dal programma che manualmente, PreForm orienta il pezzo in posizione obliqua che è a livello generale una buona soluzione ma che spesso può essere migliorata.

L'orientamento è un elemento fondamentale per la corretta riuscita della stampa poiché in ogni layer aggiuntivo la sezione deve essere decrescente per evitare il distacco dell'intero pezzo dalla piattaforma a causa della forza di gravità. Questo problema è dovuto al fatto che in seguito alla creazione di ogni layer la piattaforma trasla dal basso (dove si trova il bagno di resina fotopolimerica) verso l'alto con un conseguente pericolo di rilascio del pezzo e quindi un inevitabile scarto dello stesso.

La scelta dell'orientamento deve essere quindi fatta in modo tale che i supporti che vengono generati successivamente non ricadano nelle superfici funzionali e nei dettagli importanti del pezzo.

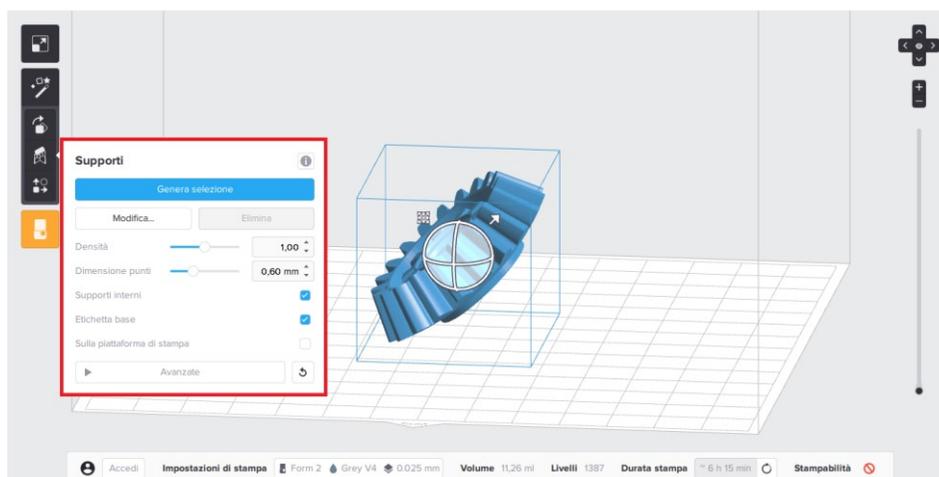


Figura 2.7 Orientazione del modello.

Cambiando l'orientamento variano anche il numero di layer e la durata della stampa in quanto se il pezzo ha le tre dimensioni diverse a seconda dell'orientamento assume un'altezza diversa. Si può quindi cercare di minimizzare questi due parametri dovendo però sempre di sottostare ai requisiti precedentemente richiesti.

Si possono ora generare i supporti necessari al sostegno del pezzo durante la fase di stampa, il software genera automaticamente i supporti nei punti in cui li ritiene più opportuni insieme ad una base di appoggio che è il primo organo ad essere stampato e sulla quale vengono creati tutti i supporti.

Il software ci consente comunque di modificare alcuni parametri per generare i supporti nella configurazione migliore e ci guida durante questa operazione facendoci notare se si stanno commettendo delle operazioni che precludono la corretta realizzazione della stampa, i parametri che possiamo modificare sono i seguenti:

1. Densità: ci permette di regolare quanto i sostegni possano essere vicini tra loro, di conseguenza influenza il numero di punti di contatto tra la base di appoggio e il componente;
2. Dimensione punti: il software ci dà la possibilità di variare la dimensione dei punti di contatto che sono le posizioni in cui ciascun supporto si collega al pezzo e per impostazione predefinita hanno un raggio minore rispetto alla struttura del supporto in modo da facilitarne la rimozione dopo la stampa e da evitare che vi possano essere dei residui di questi sulla superficie del pezzo. Nel dettaglio punti di contatto più piccoli facilitano la rimozione delle strutture di supporto e lasciano meno residui sulla parte stampata ma può esserci una maggiore possibilità che i supporti non riescano a sostenere la parte durante l'operazione di stampa, i punti di contatto più grandi invece favoriscono le condizioni opposte ed è quindi importante scegliere un giusto compromesso a seconda delle esigenze;
3. Supporti interni: selezionando l'opportuna casella c'è la possibilità di generare dei sostegni anche all'interno del pezzo (nel caso in cui si lavori con componenti cavi) per migliorare la tenuta dello stesso. Durante la fase di generazione dei supporti è di fondamentale importanza che non siano presenti elementi di supporto nelle superfici funzionali del componente (filettature, dentatura, superfici di contatto) in quanto potrebbero compromettere il funzionamento dello stesso.

Se a causa di queste restrizioni il software non riuscisse a stampare il pezzo si possono fare delle modifiche all'orientamento di quest'ultimo oppure per far sì che le superfici funzionali non ricadano in

zone dove sono necessari i supporti oppure possiamo variare le dimensioni dei punti di contatto solo localmente dove c'è la necessità in modo da non indebolire eccessivamente l'intera struttura.

Una volta finita questa fase e risultando il componente stampabile si passa alle operazioni di layout nel caso in cui si stiano stampando più pezzi contemporaneamente. Il software posiziona i vari modelli da stampare all'interno del volume disponibile nella maniera da questo ritenuta più opportuna ma anche durante questa fase si possono applicare dei cambiamenti in base ai seguenti parametri:

- il distanziamento dei singoli modelli;
- la sovrapposizione o meno delle basi della struttura dei supporti dei diversi modelli.

Con una giusta regolazione di questi fattori si può minimizzare il numero di layer necessari e quindi anche la durata dell'operazione di stampa.

Il modello è ora pronto per l'upload all'interno della Form 3 la quale prima di avviare la stampa vera e propria deve essere riscaldata fino alla temperatura di 35[°C] al fine di aumentare la fluidità la resina fotopolimerica ed avere quindi le condizioni ottimali per il processo.

Una volta terminata la stampa si sgancia la piattaforma alla quale sono agganciati i pezzi e le relative strutture di base dei supporti come è mostrato nella Figura 2.10.



Figura 2.8 Distacco dei pezzi dalla piattaforma.

Dopo aver rimosso i modelli dalla piattaforma, un'operazione fondamentale da compiere per un corretto trattamento di questi consiste nel lavarli in alcol isopropilico (IPA) al fine di rimuovere eventuale resina in eccesso. Vengono utilizzate due vasche contenenti tale alcol con una concentrazione al 90% in cui i prodotti vanno immersi per 15 minuti per vasca agitandole di tanto in tanto per perfezionare il lavaggio (le vaschette sono mostrate in Figura 2.11). È importante che sia sempre rispettata la sequenza dei

contenitori in cui si immergono i pezzi in modo che l'IPA contenuto nella seconda sia sempre il più pulito dei due. Le vaschette devono essere chiuse ermeticamente per evitare che l'alcol evapori.

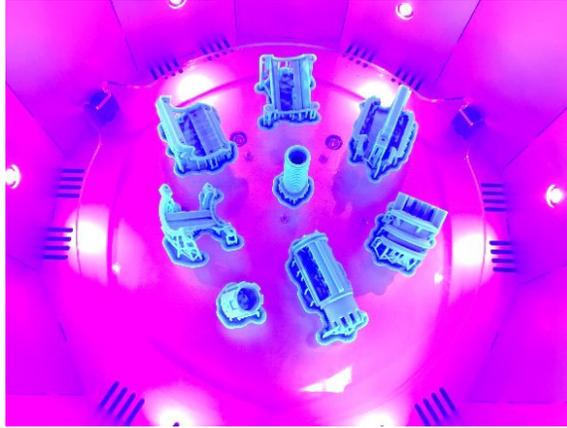


Figura 2.9 Vaschette di alcol isopropilico.

Una volta estratte dal bagno di alcol i modelli vanno lasciati asciugare per il giusto tempo in modo da far evaporare l'alcol in eccesso e successivamente si può procedere all'operazione di indurimento, questa viene eseguita all'interno di un forno BB Cure (mostrato in Figura 2.12) che opera con raggi UV ($1.25[\text{mW}/\text{cm}^2]$ e $405[\text{nm}]$ di luce LED) per un tempo di $60[\text{min}]$ alla temperatura di $60 [^\circ\text{C}]$, lo scopo è quello di migliorare le proprietà meccaniche delle parti stampate e di completare il processo di polimerizzazione della resina.



Figura 2.10 Forno BB Cure all'esterno (sopra) e all'interno durante l'indurimento (pagina successiva).



In seguito all'indurimento si possono rimuovere i supporti con delle apposite tronchesi cercando di non danneggiare il pezzo e si passa alla fase di rifinitura in cui si eliminano i residui dei sostegni dalle superfici del pezzo con l'utilizzo di carta abrasiva di diverse grane fino ad ottenere la finitura superficiale necessaria.

In questo modo vengono quindi stampate tutte le parti che costituiscono il prototipo del giunto universale riconfigurabile e si può quindi passare all'assemblaggio di quest'ultimo.



Figura 2.11 Componenti stampati per due giunti.

Può capitare, soprattutto nel caso di accoppiamento vite-madrevite, che i due pezzi non si incastrino nella maniera adeguata e che la funzionalità del giunto non sia garantita appieno, si devono allora ristampare i pezzi con delle tolleranze superficiali più stringenti oppure si devono modificare i disegni CAD di questi.

Per l'assemblaggio sono inoltre necessari altri componenti per i quali la stampa 3D non è conveniente, in particolare essi sono i cuscinetti a sfere acquistati dalla Mazzarini Srl di Jesi, gli alberi, i bulloni viti e dadi e gli anelli seeger.

Se l'assemblaggio avviene correttamente e senza intoppi si può verificare l'effettivo funzionamento del giunto universale riconfigurabile, ruotando infatti l'ingranaggio relativo all'attuatore si fa traslare il cursore che, innestandosi o meno nel profilo scanalato interno alla ruota 3 permette di passare da una configurazione all'altra.

CAPITOLO 3. ANALISI TEORICA E STRUMENTI NECESSARI PER I TEST

3.1 INTRODUZIONE AI TEST

Lo scopo principale di questa tesi è quello di proporre e descrivere una campagna di test che si possano eseguire in futuro sul giunto riconfigurabile nel laboratorio dell'università in modo da valutarne le prestazioni e confrontarle con i risultati che ci si aspetta di ottenere derivanti dall'analisi teorica.

Si sono scelti dei test che siano molto semplici sia da preparare che da attuare e che non richiedano una strumentazione complessa e soprattutto costosa. Si è pensato di realizzare delle prove che vadano a coinvolgere sia il giunto in tutto il suo complesso che solo alcune parti di questo in modo da andare ad analizzare se tutti gli azionamenti funzionino correttamente senza intoppi e se vi siano dei problemi concentrati solo in alcune zone di questo.

Il sottoinsieme del giunto più rilevante e sul quale verranno eseguiti dei test è il treno di ingranaggi formato da tre ruote coniche con assi incidenti inclinati di 45° (un accoppiamento fra due ruote coniche è mostrato nella Figura 3.1) visto che questo è presente in più di un caso in entrambe le configurazioni ed in particolare la Configurazione A, vista la sua cinematica, può essere considerata uguale a questo sottoinsieme. Per questo raggruppamento di ruote si ottiene che l'albero in ingresso risulta essere ortogonale all'albero in uscita.



Figura 3.1 Accoppiamento fra ruote dentate coniche con assi incidenti.

Le principali grandezze che si possono andare a misurare sono:

- il rapporto di trasmissione tra ingresso e uscita del giunto oppure di un sottoinsieme di questo;
- il rendimento della trasmissione di potenza del giunto riconfigurabile nel suo complesso oppure quello del sottoinsieme indicato in precedenza.

3.2 RAPPORTO DI TRASMISSIONE

Dal punto di vista teorico il rapporto di trasmissione dell'intero giunto è pari a $\tau_{\text{GLOB}}=1$ in quanto, in tutti gli accoppiamenti dentati presenti, gli ingranaggi hanno sempre lo stesso numero di denti e per definizione $\tau = \frac{z_1}{z_2} = \frac{R_1}{R_2}$. A livello pratico però, potrebbero esserci delle imperfezioni dovute alla stampa 3D delle ruote che comunque lascia un margine di incertezza nelle dimensioni dei denti e dei raggi delle stesse che potrebbe portare ad una variazione più o meno ampia del rapporto di trasmissione globale. Per il sottoinsieme proposto in precedenza, cioè il treno formato da tre ingranaggi conici, resta valida l'equazione $\tau=1$ in quanto, anche in questo caso, tutte le ruote dentate coinvolte hanno lo stesso raggio e anche lo stesso numero di denti. Va tenuto conto del fatto che il valore del rapporto di trasmissione di un sottoinsieme va chiaramente ad influenzare il rapporto di tutto il giunto e in questo modo se il valore di quest'ultimo dovesse essere diverso da quello preventivato a livello teorico possiamo essere in grado di risalire alle cause di questa discrepanza andando a scomporre il giunto in più sottoinsiemi e andando a testare il rapporto di trasmissione di ognuno di questi.

In ingresso, cioè nella ruota 1, la velocità angolare dell'ingranaggio è pari a $n=10[\text{rpm}]$, quindi $\omega=1,05[\text{rad/s}]$ e visto che a livello teorico $\tau_{\text{GLOB}}=1$, si può ragionevolmente stimare che le velocità siano le stesse anche in uscita.

Per quanto riguarda invece i momenti angolari, basandoci sulla tesi di laurea magistrale di Gianmarco Olivieri [31], si è visto che la coppia in entrata nel giunto in condizioni di regime è pari a $M=1,04[\text{Nm}]$, la potenza in entrata è quindi $P=M\omega=1,09[\text{W}]$ che è anche la potenza che deve fornire il motore elettrico a regime ed è quindi un dato molto importante per la scelta dello stesso.

3.3 RENDIMENTI DEL GIUNTO RICONFIGURABILE E DEL ROBOT

Il giunto, nel suo complesso, presenta rendimenti diversi nelle due configurazioni (A e B) dovuti alla differente cinematica di queste. Per un'analisi più dettagliata del calcolo dei rendimenti si rimanda alla tesi del collega Andrea D'Ambrosio [33] mentre in seguito verranno descritti brevemente solo i punti che sono più salienti per i test che verranno in seguito presentati.

Per il rendimento di un accoppiamento dentato a ruote coniche con assi incidenti è valida l'equazione:

$$\eta = 1 - f\pi \sqrt{\left[\left(\frac{1}{z_1^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{z_2^2}\right)^2 + \frac{2\cos\alpha}{z_1 z_2}\right]}$$

in cui si è considerato:

- f =coefficiente di attrito dinamico che per la resina fotopolimerica Grey V4 è pari a 0,3 ed è stato calcolato in precedenza da un altro laureando;
- z_1 e z_2 =numero di denti delle ruote dentate che formano l'accoppiamento, le ruote utilizzate hanno tutte $z=20$ denti;
- α =angolo tra gli assi delle ruote che per come è stato progettato il giunto è pari a 45° per tutti gli accoppiamenti.

Sostituendo questi valori all'interno dell'equazione si ottiene un rendimento di $\eta_{RD}=0,91$.

Nella Configurazione A abbiamo due accoppiamenti dentati che trasmettono potenza in serie: 1-2, 2-3, il rendimento globale è quindi: $\eta_A = \eta_{RD}^2 = 0,91^2 = 0,83$. Andando a considerare anche i rendimenti dei cuscinetti si è notato, utilizzando l'algoritmo della SKF, che questi sono molto elevati ed in particolare per tutti questi si è visto, nonostante i carichi diversi per ognuno, che $\eta_{cusc}=0,9998$. Per la Configurazione A c'è un solo cuscinetto situato sulla ruota 2 e si è quindi ottenuto: $\eta_A = \eta_{RD}^2 \eta_{cusc} = 0,91^2 \times 0,9998 = 0,83$. Come si può notare la differenza è irrilevante.

Invece nella Configurazione B la trasmissione di potenza avviene in serie per i seguenti accoppiamenti dentati: 1-2, 2-3, 3-8, 8-9, dall'ingranaggio 9 una porzione della potenza va a vincere i carichi resistenti nella forcella 10 e quindi a muovere il giunto, l'altra porzione finisce negli accoppiamenti dentati in serie 7-6 e 6-5 che hanno le funzioni di ripartire le forze assiali e permettere una rotazione simmetrica della forcella. In questi ultimi accoppiamenti non c'è trasmissione di potenza ma anzi questa serve solo a vincere gli attriti sui cuscinetti. Poiché i rendimenti di questi ultimi sono molto elevati per semplicità si sono andate a considerare nulle le perdite sui cuscinetti dove non viene trasmessa potenza.

Il calcolo del rendimento nella Configurazione B è $\eta_B = \eta_{RD}^4 = 0,91^4 = 0,69$, andando, come fatto anche precedentemente, a considerare anche le perdite dei cuscinetti che in questo caso sono situati sulle ruote 2, 3, 8 e 7 si ottiene $\eta_B = \eta_{RD}^4 \eta_{cusc}^4 = 0,91^4 \times 0,9998^4 = 0,69$. Anche per questa configurazione la differenza è praticamente irrilevante.

Il rendimento complessivo del robot dipende fortemente da quello delle configurazioni assunte dal giunto in quanto gli altri giunti presenti nelle gambe di questo, cioè uno rotoidale in serie con uno

cardanico, comportano delle perdite quasi nulle ed in particolare $\eta_{\text{ROTOIDALE}} \approx 0,98$ e $\eta_{\text{CARDANO}} \approx 0,994$. Considerando anche che il rendimento complessivo è andato dal rendimento in parallelo delle tre gambe si ottiene per le due configurazioni: $\eta_{\text{TOT,A}} = 0,81$ e $\eta_{\text{TOT,B}} = 0,69$. Poiché i rendimenti globali sono maggiori di 0,5 si può assumere che il robot 3-URU sia reversibile per entrambe le configurazioni per il quale è stato progettato.

3.4 STRUMENTI NECESSARI

Prima di andare a spiegare come realizzare le varie prove sul giunto bisogna elencare tutti gli strumenti necessari per il completo e corretto svolgimento di queste, alcuni oggetti naturalmente verranno usati soltanto in alcuni test. A seguire si trovano l'elencazione ed in seguito la descrizione di tutti gli strumenti necessari. Nel dettaglio essi sono:

- campioni di massa nota, recipiente e siringa;
- filo, rocchetto, albero e chiavetta/linguetta;
- carta millimetrata;
- encoder rotazionale assoluto;
- scheda elettronica Arduino;
- motore elettrico (in particolare il servomotore brushless);
- batteria al piombo-acido;
- freno a tamburo.

3.4.1 Campioni di massa nota, siringa e recipiente

I campioni di massa nota servono nei vari test poiché se le appendiamo tramite un rocchetto all'albero in ingresso o in uscita conoscendo la loro massa possiamo risalire rispettivamente alla coppia motrice o a quella resistente essendo $C = mgR$ con C=coppia motrice o resistente, R=raggio del rocchetto, m=massa nota e g=accelerazione di gravità=9,8[m/s²]. Il giunto non dovrebbe essere in grado di sopportare carichi elevati e quindi non si devono utilizzare masse troppo pesanti, in aiuto ci viene il fatto che, quantomeno a livello teorico, il rendimento del giunto è indipendente dai carichi a cui è sottoposto

e dipende solo dai fattori geometrici degli accoppiamenti dentati, possiamo quindi usare masse non troppo elevate senza che il test perda di veridicità. Si ritiene necessario l'acquisto di un range di campioni con masse che vadano dai 50[g] fino ai 500[g] in modo da poter eseguire più test in condizioni diverse, si consiglia di prestare attenzione quando si usano le masse da 500[g] poiché potrebbero iniziare a verificarsi dei segnali di cedimento o rottura nel giunto.



Figura 3.2 Set di campioni di massa nota.

Per lo svolgimento di una prova in particolare c'è la necessità di andare a variare la massa in ingresso con una tolleranza molto ristretta e quindi si è pensato di utilizzare un piccolo recipiente di massa nota (M) che possa contenere del liquido con densità conosciuta (l'acqua è un'ottima opzione) la cui erogazione è modulata da una siringa, che ci consente di sapere in ogni istante il volume di liquido di cui si fa uso, in modo da andare a variare la massa con grande sensibilità.

I costi delle masse, del recipiente e della siringa sono molto contenuti e questi oggetti possono essere acquistati online oppure da alcuni cataloghi appositi.

3.4.2 Filo, rocchetto, albero e linguetta/chiavetta

Accoppiati con le masse note ci sono sempre un rocchetto un filo e un albero che vanno a collegare queste all'uscita del sistema, il filo deve avere una lunghezza superiore ai 50[cm] in modo da poter aumentare la durata dei test per avere risultati più precisi, il filo deve anche essere di un materiale sufficientemente rigido per non andare ad interferire con lo svolgimento della prova. Il rocchetto è un supporto cavo di forma cilindrica su cui si avvolge il filo che permette di svolgerlo nella maniera più ordinata possibile. Il rocchetto è reso solidale all'albero in ingresso o a quello in uscita, a seconda di dove

viene usata la massa nota, attraverso una chiavetta o una linguetta, questo accoppiamento può causare delle perdite aggiuntive di strisciamento che però non vanno ad influire sui test come verrà descritto più tardi.

Usando una chiavetta il montaggio e lo smontaggio sono più semplici da eseguire ma con la linguetta gli organi sono meno sollecitati e il centraggio è migliore, si consiglia quindi di utilizzare quest'ultima. Il rocchetto non deve avere un raggio (R) né troppo piccolo, perché poi occorrerebbe usare una massa nota più grande per fornire la stessa coppia (in base alle considerazioni fatte in precedenza) e non potrebbe accoppiarsi correttamente con l'albero, né troppo grande per motivi di ingombro e di appesantimento della struttura. Si consiglia quindi un rocchetto con $2[\text{cm}] < R < 20[\text{cm}]$.



Figura 3.3 Esempio di rocchetto.

L'albero con cui il rocchetto è reso solidale deve essere a sua volta accoppiato con l'ingranaggio dentato del quale vogliamo andare a misurare lo spostamento e la velocità angolare, questo deve avere un incavo in grado di alloggiare la linguetta o la chiavetta, deve avere un raggio pari a quello della ruota dentata ($R=20[\text{mm}]$) e deve essere sufficientemente lungo in grado da permettere la perfetta allocazione del rocchetto.

È necessario l'acquisto di almeno due componenti per ogni oggetto (filo, rocchetto, albero e linguetta-chiavetta) poiché in un test è necessario metterli sia in ingresso che in uscita.

3.4.3 Carta millimetrata

La carta millimetrata, per l'uso che ne faremo, è uno strumento di misurazione dello spostamento assoluto che il campione di massa nota in ingresso o in uscita ha subito durante il test a causa del moto di rotazione dell'albero al quale è collegato tramite rocchetto e filo. La carta millimetrata ha un costo

bassissimo e in alcuni test va ad assumere la funzione svolta dagli encoder garantendo più semplicità ma anche molto più errore di misura.

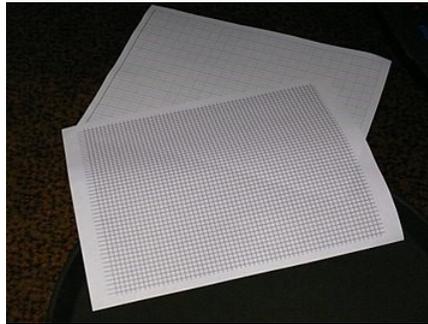


Figura 3.4 Fogli di carta millimetrata.

3.4.4 Encoder angolare assoluto

L'encoder è un trasduttore di spostamento e di velocità lineare o angolare, può misurare un moto incrementale o assoluto, il segnale che si ha in uscita è digitale.



Figura 3.5 Encoder angolare assoluto.

Per i nostri test l'uso che se ne fa è quello di andare a misurare lo spostamento angolare degli alberi in ingresso e soprattutto in uscita con il quale questo strumento viene accoppiato, l'encoder angolare è costituito da un disco di plastica solidale all'albero in rotazione da una sorgente di luce e da un osservatore, cioè un fotodiado, posto nella parte opposta del disco rispetto alla sorgente luminosa sia la sorgente che l'osservatore sono fissi.

Il disco presenta al suo interno più canali (come mostrato in Figura 3.6), il primo di questi è per metà opaco mentre l'altra è trasparente (questo effetto è stato ricavato per fotoincisione), per gli altri canali la risoluzione raddoppia di volta in volta (un quarto scuro e un quarto trasparente e così via), più canali sono presenti più la risoluzione dello strumento aumenta poiché quest'ultima corrisponde a 2^n bit luce-buio con n =numero di canali. Il segnale che ottengo è molto robusto e non necessita di ulteriori accorgimenti. L'uscita è in codice binario, o in codice Gray, in quanto ogni canale fornisce due risultati: luce o buio e la somma di questi va a formare una sequenza che identifica univocamente una posizione angolare. Un encoder così fatto ha un costo molto contenuto ed è di facile reperibilità e se ne consiglia l'acquisto di almeno due unità poiché per alcuni test la loro presenza è richiesta sia nell'albero in ingresso che in quello in uscita.

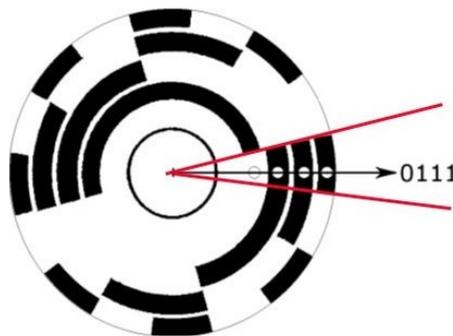


Figura 3.6 Schema funzionamento canali.

Si ritiene opportuno avere una sensibilità adeguata a misurare se gli alberi ruotino a velocità angolari costanti o se ci siano delle accelerazioni, si è pensato di proporre quindi una sensibilità pari ad un centesimo di giro che richiede la presenza di almeno sette canali in base alla formula precedentemente enunciata.

3.4.5 Arduino

Arduino è una scheda elettronica che integra un microcontrollore con dei pin connessi alle porte input/output (I/O), comprende un regolatore di tensione e, quando necessaria, un'interfaccia USB che permette la comunicazione con il computer utilizzato per programmare. A questo hardware viene affiancato un ambiente di sviluppo integrato (IDE) multiplatforma disponibile per Linux, Microsoft e Macintosh. La scheda va alimentata quando non è collegata ad un computer.

Nei nostri test lo scopo di Arduino è quella di andare a regolare e a stabilizzare la velocità di rotazione del motore elettrico in modo semplice e rapido andando ad agire sulla tensione a cui lavora il motore. Tramite le funzionalità di input la scheda riceve i segnali raccolti da sensori esterni, nel nostro caso gli encoder, con i quali è collegato. Il microcontrollore gestisce il comportamento della scheda in base ai dati in ingresso e alle operazioni determinate dal programma in esecuzione in quel momento sulla scheda. L'interazione con l'esterno avviene attraverso degli attuatori pilotati dal programma che forniscono le istruzioni grazie ai canali di output in dotazione.

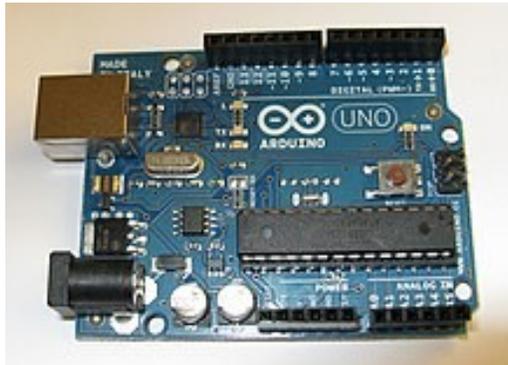


Figura 3.7 Arduino Uno.

L'Arduino Uno, che è la scheda che si consiglia di utilizzare ed è mostrata nella Figura 3.7, offre quattordici porte numerate (da 0 a 13) per le funzionalità di I/O digitale (in modo da ricevere il segnale digitale dell'encoder) in più ci sono anche sei porte analogiche in ingresso e oltre a queste ci sono anche i canali di alimentazione. La direzione di funzionamento delle porte viene stabilita nello sketch programmato sull'IDE, il microprocessore è un ATmega328P prodotto dalla Atmel, sei dei quattordici canali digitali sono in grado di generare segnali PWM (Pulse With Modulation) che consentono di variare la larghezza dell'impulso permettendoci di ottenere risultati analogici con mezzi digitali, nel nostro caso ci consente quindi di andare ad agire sulla velocità di rotazione del motore elettrico.

L'encoder è collegato ad Arduino attraverso due canali digitali e uno di alimentazione nel modo illustrato nella Figura 3.8.

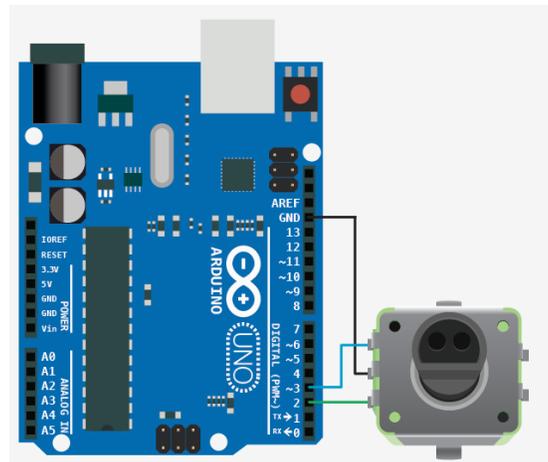


Figura 3.8 Collegamento tra l'encoder e Arduino.

Il collegamento tra Arduino ed il servomotore avviene mediante due canali per l'alimentazione (5V e GND) mentre il terzo è per il controllo e deve essere PWM in modo da poter andare ad agire sulla velocità angolare del motore, il collegamento avviene come si può vedere nella Figura 3.9.

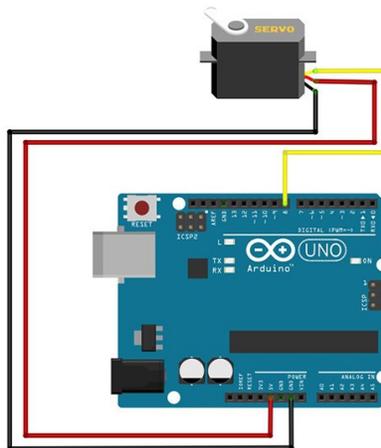


Figura 3.9 Collegamento fra Arduino ed il servomotore.

In base alle misurazioni e ai dati che arrivano ad Arduino dall'encoder in uscita, dove la velocità di rotazione deve essere uniforme in modo che il sistema motore-utilizzatore lavori a regime, la scheda va a regolare la velocità angolare del motore elettrico grazie al controllo che Arduino ha sulla tensione a cui il motore lavora, in particolare nei nostri test il sistema dovrà essere a regime e il motore dovrà fornire una velocità angolare in ingresso pari a $\omega=1,05[\text{rad/s}]$.

I principali vantaggi della scheda Arduino Uno sono sicuramente il basso costo (la scheda da sola ha un prezzo che si aggira intorno ai 15€ ai quali vanno sommati i costi per i pezzi accessori che formano lo

starter kit), l'estrema facilità di installazione e di programmazione ed infine l'ottima e rapida regolazione che si ha del motore che fornisce la coppia motrice al sistema.

3.4.6 Motore elettrico

Un motore elettrico è una macchina elettrica rotante che trasforma energia (potenza) elettrica in ingresso in energia (potenza) meccanica in uscita resa disponibile sull'asse del motore, questo è costituito da un rotore (dove sono alloggiati i magneti permanenti) e da uno statore (dove viene generato un campo magnetico permanente). I motori elettrici possono essere suddivisi in motori a corrente continua (DC) o a corrente alternata (AC) in base a come la corrente elettrica viene trasferita attraverso e dal motore.

Questo tipo di macchine sono soggette a perdite di carico che possono essere di natura:

- meccanica: attribuibili all'attrito tra gli organi meccanici (P_m);
- elettrica: causate dalla corrente che dissipa potenza per effetto Joule trasformandola in energia termica o in altre forme che non possono essere ritrasformate (P_j), se si lavora a temperature più alte a causa della dilatazione termica le perdite di questo tipo aumentano;
- magnetica: attribuibili alle perdite del ferro, sono di lieve entità e per questo possono essere trascurate.

Alla luce di queste considerazioni si può scrivere il seguente bilancio di potenze:

$$P_{el} = P_m + P_j$$

Sviluppando i vari termini per un motore a corrente continua (DC) si ottiene:

$$UI = \frac{\pi}{30000} n + RI^2$$

con M espressa in [mNm], I in [A] e n in [rpm].

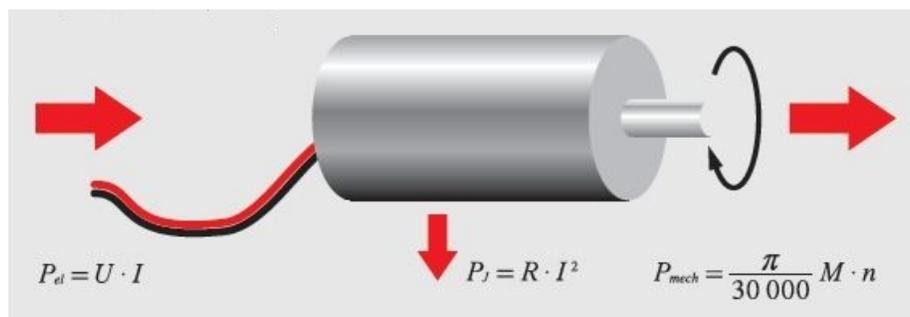


Figura 3.10 Schema funzionamento motore elettrico.

Come già detto il motore opera una trasformazione di energia da elettrica in ingresso a meccanica in uscita, sono quindi importanti due parametri di conversione che sono la costante di velocità (k_n) e la costante di coppia (k_M). La costante di coppia lega tra loro la coppia appunto e la corrente elettrica: $M=k_M I$, dalla costante di velocità, senza entrare troppo nello specifico, si può notare che la coppia e la velocità angolare hanno una relazione lineare e all'aumentare dell'una l'altra diminuisce.

La curva caratteristica di un motore è la rappresentazione grafica della dipendenza del momento motore alla velocità angolare, questa viene tracciata in condizioni di regime e per un motore DC è una retta con pendenza negativa (come visibile in Figura 3.11). Quanto più la retta è inclinata tanto più la coppia erogata è sensibile alle variazioni di velocità angolare, a causa delle perdite di vario tipo indicate in precedenza nella realtà la curva caratteristica non è propriamente una retta ma mantiene comunque la pendenza negativa. La curva caratteristica viene tracciata con tensione U costante quindi se quest'ultima varia allora la curva subisce una traslazione, come è illustrato nella Figura 5.10, e a parità di coppia il motore può lavorare a velocità angolari diverse.

La velocità di un motore a corrente continua viene controllata variando la corrente dell'avvolgimento dell'armatura e quindi variando la tensione.

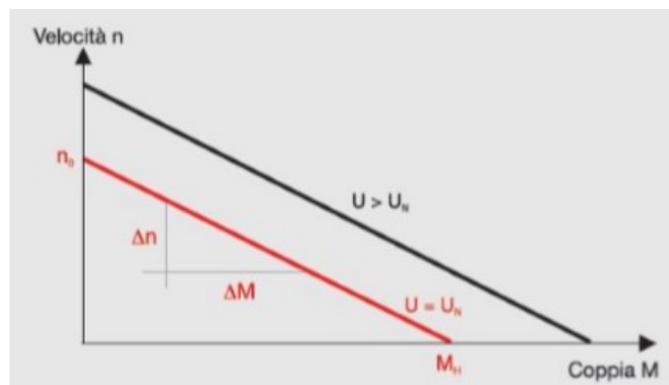


Figura 3.11 Curva caratteristica motore DC.

Per la scelta del motore elettrico è necessario essere a conoscenza della velocità e della coppia di cui l'utilizzatore necessita, nel nostro caso in base alle analisi precedenti si era visto che $\omega=1,05[\text{m/s}]$, $M=1,04[\text{Nm}]$ e quindi la potenza che il motore deve essere in grado di fornire è $P=M\omega=1,09[\text{W}]$.

Per i nostri test la velocità angolare viene controllata dalla scheda Arduino che va a regolare la tensione U che il motore assorbe in modo che il sistema motore-utilizzatore lavori a regime, in queste condizioni

dobbiamo conoscere la coppia erogata dal motore in modo da andarla a confrontare con la coppia resistente.

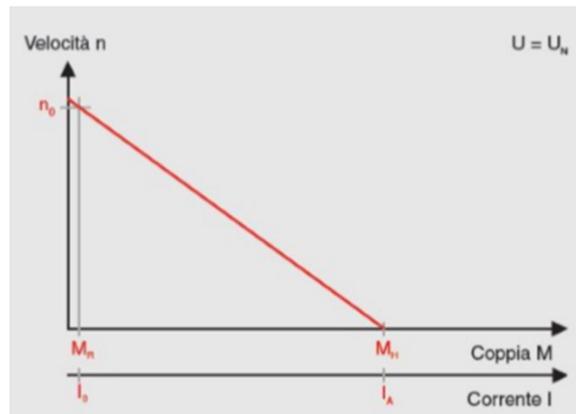


Figura 3.12 Relazione fra coppia, corrente e velocità angolare.

La coppia motrice può essere ricavata a partire dalla corrente che però non siamo in grado di misurare ma deve essere indicata, durante l'utilizzo, dal motore stesso. Intensità di corrente e coppia motrice sono, come abbiamo visto prima, legate dalla costante di coppia (k_M) e sono direttamente proporzionali tanto che la curva caratteristica del motore può essere rappresentata anche nel modo indicato nella Figura 3.12.

Visto che le potenze in gioco non sono molto elevate si consiglia l'acquisto di un servomotore brushless a corrente continua, questo è in grado di adattarsi con grande linearità e precisione a delle variazioni, anche minime, di coppia e velocità ed è quindi particolarmente adatto per andare ad effettuare delle misurazioni come quelle dei test proposti, altre importanti caratteristiche sono la facilità di regolazione, la compatibilità con Arduino, le dimensioni molto ridotte e il costo non molto elevato rispetto agli altri tipi. È importante, tuttavia, che questo sia in grado di fornirci un'indicazione riguardante la corrente alla quale sta lavorando durante l'utilizzo in modo da conoscere la coppia motrice.

Il motore DC da solo è in grado di fornire coppie molto modeste a velocità angolari elevate, per questo il servomotore possiede al suo interno riduttore formato da più accoppiamenti dentati in serie con la funzione di abbassare la velocità di rotazione ad aumentare il momento angolare in modo da venire incontro alle esigenze dell'utilizzatore, il complesso formato dal motore elettrico e dal riduttore viene detto motoriduttore.

Il servomotore brushless è dotato anche di un encoder o di un potenziometro in modo da misurare la propria posizione angolare in ogni istante durante il suo utilizzo e da andare a regolare la coppia del

motore in modo da raggiungere la condizione di regime, grazie a questo elemento nei test in cui verrà usato il motore elettrico non avremo bisogno di dotarci di un encoder per l'albero in ingresso.

In un motore con le spazzole il cambio del verso della corrente nelle spire degli avvolgimenti del rotore avviene tramite il contatto meccanico delle spazzole con il collettore rotante, in un motore brushless invece il rotore è privo di avvolgimenti ed è formato da magneti permanenti mentre il campo magnetico generato dagli avvolgimenti dello statore viene pilotato da un sistema di controllo in base ai dati forniti dall'encoder incorporato sulla posizione angolare.

Un motore brushless rispetto ad uno con le spazzole ha una vita utile maggiore, è meno rumoroso, ha efficienze maggiori visto che lavora sempre in condizioni di rendimento ottimali ed è molto più preciso in quanto a potenza erogata, uno svantaggio però è sicuramente il costo più elevato dovuto al sistema di controllo.

Per essere più specifici si consiglia l'acquisto del motore elettrico SVTM A 01 prodotto dalla Servotecnica, mostrato insieme ad altri servomotori nella Figura 3.13, che è in grado di fornire tutte le specifiche necessarie al funzionamento, garantendo al contempo un ingombro modesto (per i dati completi del motore e per la sua caratteristica statica andare su <https://www.servotecnica.com/it/prodotti/servomotori/serie-svtma-servomotori-brushless/>).



Figura 3.13 Range di servomotori brushless della Servotecnica.

Nonostante i servomotori siano abbastanza economici rispetto agli altri tipi di motori elettrici i costi per l'acquisto di uno di questi sono comunque molto importanti se rapportati a quelli per la realizzazione del giunto, tuttavia un motore del genere può essere utilizzato anche per altri impieghi e quindi il suo acquisto non esaurisce in questi test la sua funzione all'interno del laboratorio.

3.4.7 Batteria

La batteria è un dispositivo che converte energia chimica in energia elettrica attraverso una reazione di ossidoriduzione (è infatti formata da più celle galvaniche collegate in serie), la funzione svolta nei nostri test è quella di fornire energia elettrica al motore per garantire il suo funzionamento con continuità. Una batteria può essere caratterizzata dalla tensione, dall'intensità di corrente e dalla sua capacità elettrica (ovvero la quantità di carica elettrica che può immagazzinare).



Figura 3.14 Batteria da 100Ah.

Si consiglia, in particolare, l'acquisto di una batteria al piombo-acido con una capacità di 100[Ah] (come quella nella Figura 3.14), le celle hanno come anodo il piombo spugnoso (Pb) e come catodo il diossido di piombo (PbO_2) immerso in una soluzione acquosa contenente acido solforico (H_2SO_4) con concentrazione 4,50M. In queste condizioni la differenza di potenziale è $\Delta E=2,05[V]$, essendo la batteria di solito composta da sei celle in serie si ottiene che $\Delta E_{batteria}=12,30[V]$. Di solito al piombo vengono aggiunti altri elementi come antimonio e calcio in modo da diminuire alcuni fenomeni negativi. Una capacità elettrica di 100[Ah] significa che la batteria è in grado di erogare una corrente di 10[A] per un lasso di tempo di 10 ore, di solito la scarica avviene in un lasso di tempo compreso tra le otto e le dieci ore e naturalmente dipende dalla richiesta di corrente del motore. In un test che andremo a fare il diverso tempo di scarica della batteria sarà un dato fondamentale per andare a calcolare il rendimento del giunto riconfigurabile.

Il costo è abbastanza elevato per l'uso che se ne fa nei test (si aggira intorno agli 80€), però una batteria così fatta può essere usata in molte altre applicazioni future, vale lo stesso ragionamento fatto per il motore elettrico.

3.4.8 Freno a tamburo

Il freno a tamburo è un organo che va a dissipare potenza e fornisce quindi un momento frenante noto, è costituito da un cilindro rotante (detto tamburo) solidale con il sistema da frenare e da uno o più ceppi realizzati che supportano inserti realizzati in materiale di attrito che esercitano una forza sul cilindro, i ceppi possono essere posti esternamente (come in Figura 3.15) o internamente al rullo.

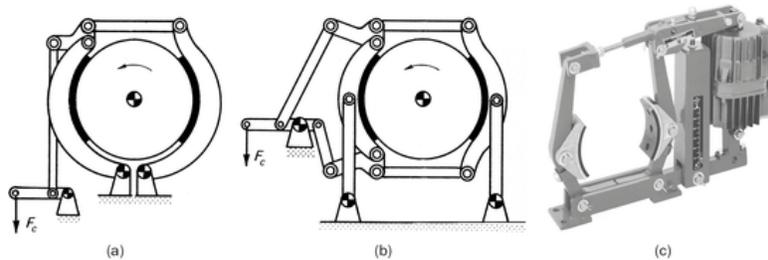


Figura 3.15 Schema di un freno a tamburo a ceppi esterni.

Il freno a tamburo verrà da noi utilizzato come coppia frenante nota in sostituzione dei campioni di massa nota quando dovremmo fare dei test che hanno una durata abbastanza elevata e potrebbe verificarsi che il filo si avvolga tutto intorno al rocchetto andando a rendere nulla la coppia frenante fornita dalla massa nota. Il freno a tamburo invece fornisce una coppia che può essere considerata, a meno di effetti di attrito che non sono comunque rilevanti, costante nel tempo.

Il momento resistente del freno a tamburo (M_r) viene espresso tramite l'equazione:

$$M_r = (fhrS)/(b + fa)$$

dove: f =coefficiente di attrito tra ceppo e cilindro rotante, h =distanza fra il ceppo di rotazione del ceppo e la sua estremità, S = forza di serraggio applicata all'estremità del ceppo, b =distanza fra il centro di rotazione del ceppo ed il punto di applicazione della forza, a = distanza fra il punto di rotazione del ceppo e il punto di applicazione della forza proiettata sul piano perpendicolare a "b" e r =raggio del cilindro rotante. Come si può notare dall'equazione precedente, la coppia resistente può essere regolata andando a modificare la forza di serraggio applicata all'estremità del ceppo (S) e tra queste vi è una proporzionalità diretta.

CAPITOLO 4. DESCRIZIONE DEI TEST

4.1 INTRODUZIONE

Di seguito verranno elencati e descritti tutti i test che si consiglia di svolgere, per ogni prova verranno enunciate le grandezze che andremo misurare, tutti gli strumenti necessari, l'allestimento del banco di prova e lo svolgimento della stessa. I test verranno eseguiti o sul giunto riconfigurabile nel suo complesso oppure sul sottoinsieme costituito da tre ruote coniche poste in serie già descritto nei paragrafi precedenti.

Si ricorda che si sono scelte delle prove semplici che possano essere svolte senza problemi in laboratorio e che lo scopo principale è quello di andare a studiare nella pratica il comportamento del giunto e di andarlo a confrontare con i risultati ottenuti a livello teorico. Le grandezze che si andranno a misurare saranno i rapporti di trasmissione (in quattro test) e i rendimenti (in sei test).

4.2 TEST SUL RAPPORTO DI TRASMISSIONE

Test N.1: misura del rapporto di trasmissione del sottoinsieme di tre ruote dentate in serie e quindi della Configurazione A del giunto.

Strumenti necessari: 2 sistemi formati da: albero, linguetta, rocchetto, filo, massa nota; 2 fogli di carta millimetrata.

Allestimento: 1) calettare la ruota dentata in ingresso ad un albero, 2) rendere solidale l'albero al rocchetto utilizzando la linguetta (come mostrato in Figura 4.1), 3) appendere al filo un campione di massa nota (è importante che la massa posta in ingresso sia superiore di quella in uscita in modo che ci possa essere una coppia motrice sufficiente a mettere in moto il sistema mentre non conta il peso effettivo dei campioni utilizzati), 4) avvolgere il filo intorno al rocchetto lasciando almeno 50[cm] di filo non avvolto in modo da permettere la discesa e la risalita delle masse note. Queste operazioni vanno realizzate in maniera analoga anche per la ruota dentata in uscita.

Bisogna fare in modo che l'esperimento avvenga vicino a due pareti fra loro ortogonali in modo da poter incollare su di queste i fogli di carta millimetrata, al posto delle pareti possiamo usare dei supporti

verticali che però devono essere abbastanza alti in modo che lo spostamento delle masse non vada al di fuori di queste.

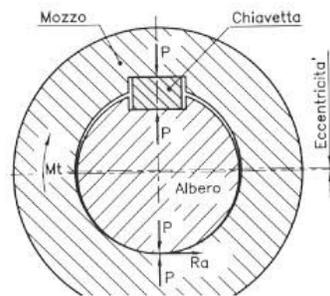


Figura 4.1 Accoppiamento albero-rocchetto con l'uso di una linguetta.

Svolgimento: prima di tutto bisogna riportare sulla carta millimetrata le posizioni di partenza dei campioni di massa nota, il campione che si trova in entrata (di massa m), essendo più pesante, va ad operare, mentre scende, una coppia motrice sul sistema dovuta al suo peso: $C=mgR$ con R =raggio del rocchetto, il moto viene trasmesso prima all'ingranaggio intermedio e poi alla ruota in uscita che in base al verso delle rotazioni degli accoppiamenti dentati fa sì che la massa in uscita subisca una risalita.

La massa in ingresso ha quindi uno spostamento verso il basso mentre quella in uscita verso l'alto, colui che effettua il test sceglie la durata che quest'ultimo deve avere, si consiglia di imporre come durata della prova un tempo nel quale ad esempio l'albero in entrata effettua due o tre giri completi intorno al proprio asse.

La carta millimetrata misura lo spostamento assoluto delle due masse e, conoscendo i raggi dei rocchetti, si riescono a stabilire gli angoli di cui i due alberi sono ruotati (α_{ing} , α_{usc}) durante l'esperimento, infatti si ha $L=R\alpha$ con L =spostamento assoluto e R =raggio del rocchetto. Dallo spostamento angolare si può risalire al rapporto di trasmissione (τ) infatti lo spostamento angolare dell'albero corrisponde anche a quello della ruota dentata con cui è solidale, questo corrisponde, considerando un moto circolare uniforme, al prodotto tra la velocità di rotazione (ω) e il tempo di durata dell'esperimento: $\alpha=\omega t$, questi calcoli vanno fatti sia per l'albero in ingresso che per quello in uscita.

Il rapporto di trasmissione è definito dalla legge $\tau = \frac{\omega_{usc}}{\omega_{ing}}$ ed è questo lo scopo del test.

Questa prova è molto semplice da effettuare ma può essere soggetta a molte imprecisioni visto che la misurazione dello spostamento assoluto avviene per indicazione visuale, inoltre potrebbero sorgere

problemi di attrito statico all'inizio del test e si consiglia quindi, nel caso servisse, di fornire una piccola spinta alla massa in ingresso per vincere gli attriti.

Test N.2: misura del rapporto di trasmissione del sottoinsieme di tre ruote dentate in serie e quindi della Configurazione A del giunto.

Strumenti necessari: 2 sistemi formati da: albero, linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 2 encoder angolari assoluti.

Allestimento: 1) sia in entrata che in uscita allestire i due sistemi come si è fatto nel test precedente usando sempre una massa più grande in ingresso in modo da fornire una coppia motrice tale da vincere gli attriti e da mettere in moto il sistema, 2) installare i due encoder sui due alberi (ingresso e uscita) in modo che siano solidali a questi ultimi, in questo caso non c'è bisogno di essere vicino a delle pareti perché non è previsto l'uso della carta millimetrata.



Figura 4.2 Encoder angolare con strumentazione per il suo collegamento all'albero.

Svolgimento: i procedimenti da fare sono gli stessi del test precedente senza però considerare gli step che riguardano la carta millimetrata, gli encoder infatti forniscono in maniera autonoma e digitale tutti i dati sulle velocità angolari assolute degli alberi in ingresso e in uscita (ω_{ing} , ω_{usc}), da queste utilizzando la formula già vista precedentemente ($\tau = \frac{\omega_{usc}}{\omega_{ing}}$) si può ricavare il rapporto di trasmissione del treno di ingranaggi studiato. La durata di questa prova è a discrezione dei chi effettua il test e si consiglia, anche in questo caso, di far percorrere all'albero in entrata due o tre giri completi intorno al proprio asse. Questa prova, come la precedente, è molto semplice da realizzare ed è sicuramente molto più precisa grazie alla sensibilità degli encoder che è molto maggiore di quella visuale della prova precedente.

Test N.3: misura del rapporto di trasmissione del giunto riconfigurabile nella Configurazione B.

Strumenti necessari: 1 albero; 2 sistemi formati da linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 2 fogli di carta millimetrata.

Allestimento: la preparazione è uguale a quella del test n.1 tranne che per alcuni accorgimenti: la ruota sulla quale viene calettato l'albero in uscita è la ruota 5 mostrata nella Figura 4.3b, per l'ingresso il rocchetto va reso solidale all'albero motore usando la linguetta e infine la massa nota in ingresso deve essere di molto superiore a quella in uscita per riuscire a mettere in movimento il giunto che rispetto al caso del sottoinsieme degli ingranaggi dentati genererà più perdite per attrito. Anche in questo caso non è importante il peso dei campioni ma basta che la condizione precedente venga verificata. Vanno sempre considerate le pareti o i supporti dove incollare i fogli di carta millimetrata

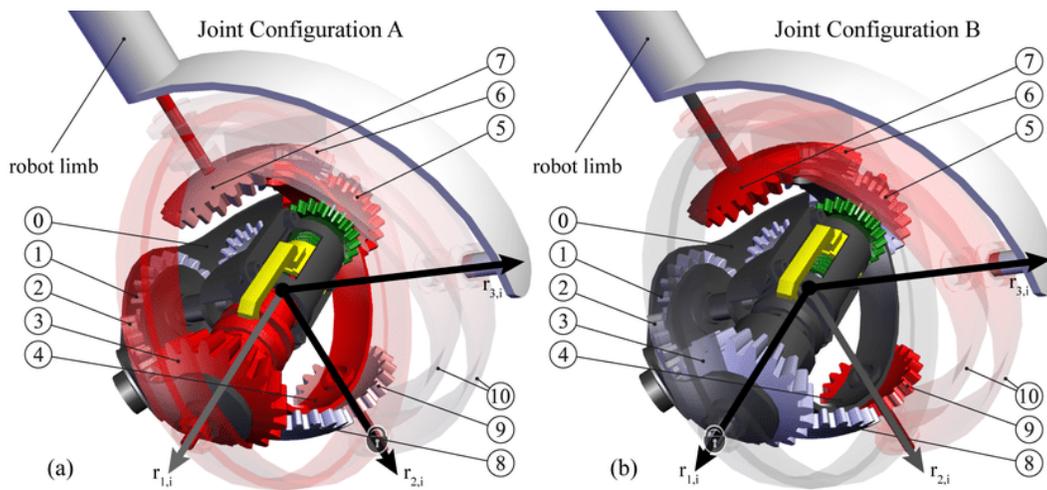


Figura 4.3 Schema del funzionamento del giunto nelle due configurazioni.

Svolgimento: la prova si svolge in modo del tutto analogo al test n.1 con la massa in entrata che scende e fornisce la coppia motrice mentre quella in uscita è in risalita e funge da coppia resistente. Anche in questo caso lo spostamento assoluto viene misurato con l'ausilio della carta millimetrata annotando le posizioni delle masse all'inizio e alla fine dell'esame e poi, usando le medesime formule del primo test, andarsi a ricavare il rapporto di trasmissione ($\tau = \frac{\omega_{usc}}{\omega_{ing}}$) del giunto riconfigurabile nel suo complesso.

Questa prova, per l'uso della carta millimetrata, può risultare abbastanza imprecisa. Il giunto inoltre deve essere nella Configurazione B poiché se fosse in quell'altra il test perderebbe di significato.

Test N.4: misura del rapporto di trasmissione del giunto riconfigurabile nella Configurazione B.

Strumenti necessari: 1 albero; 2 sistemi formati da linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 2 encoder angolari assoluti.

Allestimento: 1) calettare l'albero alla ruota 5 della Figura 4.3b, 2) rendere solidali a questo albero e all'albero motore i due rocchetti attraverso le linguette, 3) appendere le masse, che vanno scelte con i criteri del test precedente, ai fili avvolti attorno ai rocchetti lasciando però in questo caso 1[m] di filo svolto in modo da poter far durare il test per un tempo più lungo. Per quest'ultimo accorgimento naturalmente il giunto si deve trovare rialzato da terra di almeno 1[m], 4) rendere solidali gli encoder angolari all'albero motore e a quello in uscita allo stesso modo in cui si è fatto nel test n.2. Il giunto deve essere nella Configurazione B.

Svolgimento: questo test è insieme al test n.2 è sicuramente il più preciso e il più indicativo fra quelli che misurano il rapporto di trasmissione, questo è dovuto all'utilizzo degli encoder che consentono misurazioni più accurate della carta millimetrata e al fatto che il rapporto di trasmissione del giunto nella Configurazione B è quello che può essere soggetto a risultati più lontani dal valore teorico che dovrebbe assumere τ vista la presenza di un maggior numero di accoppiamenti dentati.

Come negli altri esami la massa in ingresso fornisce una coppia motore dovuta al suo peso ($C_{mot}=m_{ing}R_{ing}g$) che mette in movimento il giunto riconfigurabile, la massa in uscita funge invece da coppia resistente ($C_{res}=m_{usc}R_{usc}g$). Gli encoder vanno a misurare le velocità di rotazione dei due alberi durante il test che in questo caso può essere ripetuto più volte con delle durate più lunghe, vista l'importanza dello stesso, in modo da ottenere ancora più precisione nel risultato che si ottiene.

Dagli encoder, utilizzando sempre la medesima formula ($\tau = \frac{\omega_{usc}}{\omega_{ing}}$), si ricava il rapporto di trasmissione dell'intero giunto, ω_{usc} corrisponde alla velocità angolare della ruota 5 mentre ω_{ing} alla ruota 1 e cioè ai due ingranaggi solidali con i due alberi accoppiati con gli encoder.

Questo test, come il n.3, può essere effettuato con il giunto soltanto nella Configurazione B.

I test sul rapporto di trasmissione non dipendono dai carichi che il giunto o il sottoinsieme deve sopportare.

4.3 TEST SUL RENDIMENTO COMPLESSIVO

Test N.5: calcolo del rendimento del sottoinsieme di tre ruote dentate in serie e quindi della Configurazione A del giunto.

Strumenti necessari: 2 sistemi formati da albero, linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 2 encoder angolari assoluti; 1 recipiente di massa nota; 1 siringa; acqua.

Allestimento: 1) calettare l'albero in entrata alla prima ruota dentata, 2) rendere solidale questo al rocchetto utilizzando una linguetta, 3) sul rocchetto avvolgere il filo che è collegato alla massa nota. Per l'uscita va seguito lo stesso procedimento utilizzando però, come negli altri casi, una massa più leggera in modo che il sottoinsieme possa mettersi in movimento (è bene sceglierla molto più leggera poiché poi possiamo essere in grado di aumentare la coppia resistente aggiungendo dell'acqua), 4) dobbiamo fare in modo che il filo svolto in entrambi i rocchetti abbia una lunghezza di almeno 1[m] per garantire una durata maggiore del test, 5) al filo in uscita dobbiamo collegare un recipiente di massa nota in grado di contenere modeste quantità di acqua che viene fornita, in caso di necessità, da una siringa che ne contiene in partenza un volume noto (si può pensare ad un contenuto massimo di circa 50[ml]), 6) dobbiamo rendere solidali ai due alberi, in ingresso e in uscita, i due encoder angolari che vanno poi collegati ad una scheda di acquisizione.



Figura 4.4 Siringa tarata per il volume.

Svolgimento: la condizione necessaria per cui il test riesca a fornirci un'informazione veritiera è che il sistema lavori a regime e cioè che gli alberi in ingresso e in uscita ruotino a velocità costante nel tempo senza subire accelerazioni. Bisogna quindi assicurarsi che il sistema sia a regime e per farlo dobbiamo andare controllare i dati forniti dagli encoder e nel caso si verificano accelerazioni nel moto possiamo mettere dell'acqua nel recipiente fino a che le velocità angolari non diventano uniformi. Ogni volta che si aggiunge dell'acqua dobbiamo bloccare il test e farlo ripartire da capo poiché fino a quel momento non è stato in grado di fornirci informazioni veritiere. Bisogna inoltre sapere il volume preciso di acqua

che è stato versato nel recipiente che corrisponde a quello erogato dalla siringa. Il test avviene nelle stesse modalità dei precedenti con la massa in ingresso che scendendo fornisce coppia motrice al sistema facendo risalire la massa in uscita che funge da coppia resistente.

Si consiglia di far durare il test per un tempo abbastanza lungo da verificare che nello svolgimento di questo il sistema continui ad essere a regime senza però far avvolgere completamente il filo del rocchetto in uscita che andrebbe ad azzerare la coppia resistente. Naturalmente vanno considerati soltanto i dati che si ottengono in condizioni di regime.

Se la prova viene effettuata correttamente le velocità angolari in ingresso e in uscita (ω_{ing} , ω_{usc}) misurate dagli encoder restano costanti nel tempo, il rendimento complessivo del sistema può essere calcolato attraverso un bilancio di potenze infatti si ha che: $P_{mot} = P_{res} + P_p$ dove P_{mot} =potenza erogata, P_{res} =potenza che arriva all'utente, P_p =potenza persa per attriti e altri fenomeni, il rendimento complessivo è definito come $\eta = \frac{P_{res}}{P_{mot}}$.

Per sapere il valore delle due potenze bisogna conoscere la coppia motrice e la coppia resistente, la coppia motrice è data da $C_{mot} = m_{ing} R_{ing} g$ con m_{ing} =massa del campione in ingresso e R_{ing} =raggio del rocchetto in ingresso, la coppia resistente è data da $C_{res} = [m_{usc} + M + (\rho_a V_a)] R_{usc} g$ con m_{usc} =massa del campione in uscita, M =massa del recipiente, ρ_a =densità dell'acqua=1000[Kg/m³], V_a =volume dell'acqua contenuta dal recipiente calcolabile per differenza in quello contenuto nella siringa e R_{usc} =raggio del rocchetto in uscita. La potenza motrice è definita come: $P_{mot} = C_{mot} \omega_{ing}$ mentre quella in uscita è data da: $P_{res} = C_{res} \omega_{usc}$.

La prova può essere ripetuta più volte variando la massa in ingresso (naturalmente per arrivare a regime dovremo cambiare anche quella in uscita) in modo da verificare che all'aumentare dei carichi il sottoinsieme si comporta diversamente, a livello teorico questo non dovrebbe accadere perché il rendimento degli accoppiamenti dentati dipende solo da fattori geometrici.

Questo test non è molto preciso visto che, a differenza dei successivi, la regolazione della coppia resistente per raggiungere le condizioni di regime avviene manualmente versando dell'acqua e non utilizzando sistemi di regolazione più sofisticati e autonomi come avviene nelle altre prove.

Test N.6: calcolo del rendimento del sottoinsieme di tre ruote dentate in serie e quindi della Configurazione A del giunto.

Strumenti necessari: 1 sistema formato da albero, linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 1 albero; 1 motore elettrico; 1 scheda Arduino; 1 encoder angolare assoluto.

Allestimento: 1) dobbiamo calettare l'albero alla ruota in ingresso e collegare lo stesso al motore elettrico che andrà a fornire potenza a questo, 2) il motore elettrico deve essere collegato ad Arduino come mostrato nei capitoli precedenti, 3) alla ruota in uscita va calettato il sistema formato da albero, linguetta, rocchetto, filo e massa nota come già descritto nell'allestimento dei test precedenti lasciando sempre almeno 1[m] di filo non avvolto, 4) l'encoder deve essere reso solidale all'albero in uscita e collegato ad Arduino in modo da fornirgli i dati ottenuti sulla velocità angolare. Il giunto deve essere nella Configurazione B.

Svolgimento: il motore elettrico eroga la potenza motrice che va a mettere in rotazione il sistema formato dalle tre ruote dentate e permette la risalita della massa in uscita che funge da coppia resistente, l'esperimento assume veridicità soltanto quando il sistema si muove a regime e per raggiungere questa condizione è necessaria la regolazione della coppia motrice, questa funzione viene svolta dall'encoder già contenuto nel motore elettrico. La scheda Arduino, dopo aver ricevuto i dati dall'encoder in uscita, va ad operare un controllo PWM che è in grado di regolare la velocità di rotazione del motore andando a variare la tensione U , nel dettaglio possiamo far sì che il sistema lavori a regime con la velocità richiesta e quindi, in base alle specifiche del giunto, pari a $\omega_{ing}=1,05[\text{rad/s}]$. In condizioni di regime la coppia motrice è pressoché costante nel tempo e con la regolazione in PWM non varia al variare della velocità poiché agendo sulla tensione U la curva caratteristica del motore trasla come è mostrato nella Figura 4.5.

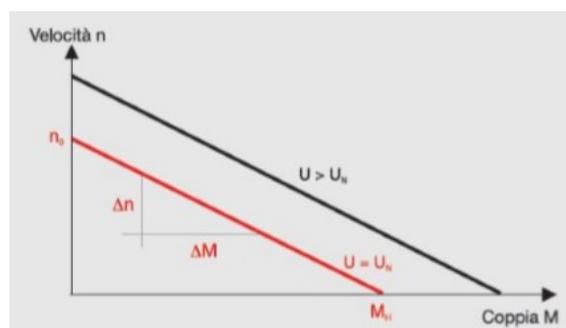


Figura 4.5 Curve caratteristiche del motore al variare della tensione U .

Il test deve avere una durata sufficiente affinché il sistema raggiunga la condizione desiderata e ci resti per un certo periodo di tempo in modo da avere misurazioni più accurate, la prova può essere ripetuta

più volte variando la massa in uscita e quindi la coppia resistente, come già proposto nel caso precedente, in modo da stabilire un'eventuale dipendenza tra il rendimento ed i carichi applicati al treno di ruote dentate (naturalmente anche la potenza motrice sarà diversa).

Il rendimento viene calcolato come nel test n.5 e cioè con il bilancio di potenze ($P_{mot} = P_{res} + P_p$) e con la medesima equazione usata nella prova precedente: $\eta = \frac{P_{res}}{P_{mot}}$. La potenza resistente è data da

$P_{res} = C_{res} \omega_{usc}$ con C_{res} =coppia resistente= $m_{res} R_{usc} g$ e ω_{usc} =velocità angolare in uscita misurata dall'encoder, la potenza motrice è invece data da: $P_{mot} = C_{mot} \omega_{ing}$ con ω_{ing} =velocità angolare in ingresso (misurata dall'encoder incorporato nel motore) e C_{mot} =coppia erogata dal motore elettrico. Quest'ultima non è un dato che può essere misurato ma può essere calcolato conoscendo la costante di coppia del motore (k_M) che è presente nelle specifiche del motore e dalla corrente I a cui lo stesso sta lavorando, la formula che le lega è quella scritta nella trattazione del motore elettrico $C_{mot} = k_M I$.

Questo test è sicuramente più accurato e preciso del precedente vista la regolazione della potenza motrice che avviene da parte dello stesso motore elettrico attraverso l'encoder incorporato e considerato anche che attraverso l'uso di Arduino possiamo regolare la velocità di rotazione, uno svantaggio invece è sicuramente la complessità dell'allestimento oltre al costo degli strumenti. Il risultato del test va confrontato con le analisi teoriche effettuate riguardo il rendimento della Configurazione A per notare possibili differenze.

Test N.7: calcolo del rendimento complessivo del giunto riconfigurabile nella Configurazione B

Strumenti necessari: 2 sistemi formati da linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 2 encoder angolari assoluti; 1 albero; 1 recipiente di massa nota; 1 siringa; acqua.

Allestimento: 1) calettare l'albero alla ruota 5 del giunto riconfigurabile mostrata in Figura 4.6b, come già fatto per i test n.3 e n.4, 2) a questo albero e all'albero motore collegare i sistemi formati da linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota lasciando almeno 1[m] di filo non avvolto per il rocchetto in uscita. A quest'ultimo va collegato tramite il filo anche il recipiente di massa nota vuoto e bisogna anche preparare la siringa con l'acqua. Visto che le perdite possono essere molteplici dobbiamo premurarci che la coppia motrice sia effettivamente in grado di muovere il sistema, quindi la massa posta in ingresso deve essere sufficientemente maggiore di quella in uscita, 3) rendere solidali i due encoder angolari ai due alberi per misurarne le velocità di rotazione e collegarli ad una scheda di acquisizione dati.

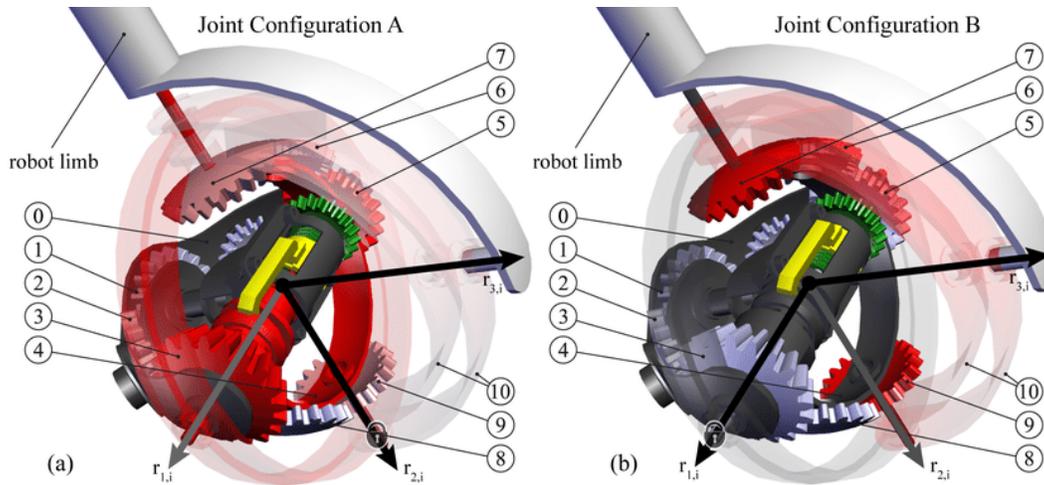


Figura 4.6 Schema del funzionamento del giunto nelle due configurazioni.

Svolgimento: come nel test n.5 dobbiamo andare a regolare la massa in uscita aggiungendo, se necessario, dell'acqua nel recipiente in modo da aumentare la coppia resistente e far arrivare il sistema a regime, il feedback sulle condizioni in cui sta lavorando il giunto ci giunge dai dati degli encoder relativi alle velocità angolari degli alberi che devono essere costanti nel tempo. Anche in questo caso si consiglia, ogni volta che si aggiunge dell'acqua, di ricominciare la prova in modo da ottenere un risultato più veritiero possibile, gli unici dati che sono indicativi sono quelli ottenuti a regime. La massa in ingresso fornisce la coppia motrice e inizia la sua discesa mentre la coppia resistente è fornita dalla massa collegata all'albero calettato alla ruota 5 che invece sale verso l'alto. Il test deve avere una durata sufficientemente lunga sempre però cercando di non far avvolgere tutto il filo in uscita.

Il bilancio delle potenze è lo stesso del test n.5: $P_{mot} = P_{res} + P_p$, dove $P_{mot} = C_{mot}\omega_{ing} = m_{ing}R_{ing}g\omega_{ing}$, mentre $P_{res} = C_{res}\omega_{usc} = m_{usc} + M + (\rho_a V_a) R_{usc}g\omega_{usc}$, queste grandezze sono le stesse enunciate nel test n.5 e vengono misurate allo stesso modo.

Il rendimento complessivo del giunto è quindi: $\eta_B = \frac{P_{res}}{P_{mot}}$ e va confrontato con quello ottenuto a livello teorico per la Configurazione B. Il test può essere ripetuto più volte variando i campioni di massa in modo da studiare un'eventuale dipendenza del rendimento dai carichi applicati sul giunto.

Test N.8: calcolo del rendimento complessivo del giunto riconfigurabile nella Configurazione B.

Strumenti necessari: 1 sistema formato da albero, linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota; 1 motore elettrico; 1 scheda Arduino; 1 encoder angolare assoluto.

All'estimento: 1) calettare l'albero alla ruota 5 del giunto e collegare a questo il resto del sistema, costituito da linguetta, rocchetto, filo e campione di massa nota, come si è fatto nei test precedenti, lasciando sempre almeno 1[m] di filo non avvolto, 2) rendere solidale allo stesso albero l'encoder angolare, 3) collegare il motore elettrico all'albero in entrata per fornire ad esso la potenza motrice, 4) allo stesso modo del test n.6 mettere in collegamento Arduino sia al servomotore che all'encoder angolare per permettere ad Arduino di svolgere la sua funzione di regolazione. Il giunto deve essere nella Configurazione B.



Figura 4.7 Giunto riconfigurabile.

Svolgimento: il motore elettrico fornisce la coppia motrice in grado di innescare il moto nel giunto e di far salire la massa in uscita che rappresenta la coppia resistente, naturalmente anche in questo caso è fondamentale che il sistema sia in condizioni di regime (velocità angolari costanti) e questo risultato viene raggiunto grazie all'encoder incorporato nel motore che va a fornire la coppia motrice necessaria mentre il sistema formato da Arduino e dall'encoder in uscita grazie al controllo in PWM va a regolare la velocità angolare al fine di avere il valore desiderato: $\omega_{ing}=1,05[\text{rad/s}]$, questa procedura è la stessa della prova n.6.

Il test deve avere una durata sufficiente affinché il sistema arrivi alla condizione di regime e ci resti per un periodo di tempo per il quale si ottengono misurazioni veritiere. La prova può essere ripetuta più volte variando la massa in uscita con la potenza motrice che si regolerà autonomamente grazie agli accorgimenti precedentemente descritti.

Le procedure di calcolo sono le stesse del test n.6, in particolare si ha: $P_{mot} = P_{res} + P_p$, $P_{res}=C_{res}\omega_{usc}=m_{res}R_{usc}g\omega_{usc}$ e $P_{mot}=C_{mot}\omega_{ing}$, le grandezze sono le stesse del medesimo test così come anche le modalità

di calcolo. Di conseguenza dobbiamo sempre ricorrere alla costante di coppia del motore (presente fra le specifiche del motore) e all'intensità di corrente, con cui questo sta lavorando, per risalire alla coppia motrice erogata dal motore elettrico ($C_{mot}=k_M I$) che non riusciremo altresì a calcolare. Il rendimento del giunto è sempre descritto dall'equazione: $\eta_B = \frac{P_{res}}{P_{mot}}$ e va confrontato con il risultato teorico presente nel capitolo riguardante gli aspetti teorici.

Come già affermato nel test n.6 questa prova è sicuramente più accurata rispetto a quelle che hanno una modalità di regolazione manuale ma ha un allestimento più lungo e un costo delle attrezzature superiore. Il risultato ottenuto va confrontato con quello trovato a livello teorico per la Configurazione B. Ci si aspetta che il rendimento di quest'ultima sia inferiore a quello ricavato dal test n.6 eseguito per la Configurazione A.

Test N.9= calcolo del rendimento complessivo del giunto riconfigurabile nella Configurazione B.

Strumenti necessari: 1 batteria; 1 motore elettrico; 1 scheda Arduino; 1 encoder rotazionale assoluto; 1 albero; 1 linguetta; 1 freno a tamburo.

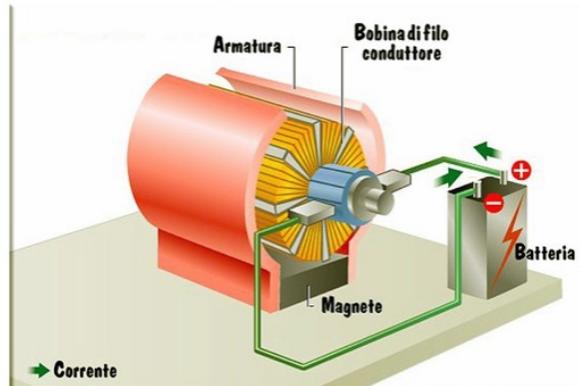


Figura 4.8 Schema collegamento batteria-motore elettrico.

Allestimento: 1) collegare il motore elettrico all'albero in entrata del giunto e usare come fonte di alimentazione per il motore la batteria con la massima carica (come mostrato in Figura 4.8), 2) collegare Arduino al motore elettrico come già fatto nei test precedenti, 3) calettare l'albero in uscita alla ruota 5 del giunto riconfigurabile, 4) tramite la linguetta rendere solidale all'albero il cilindro rotante del freno a tamburo che andrà a generare la coppia frenante grazie all'azione dei ceppi, sostituendosi al campione di massa nota, 5) per finire rendere solidale l'encoder angolare all'albero in uscita e collegarlo ad Arduino

come descritto nel capitolo precedente in modo da inviargli i dati misurati. Il giunto deve essere nella Configurazione B.

Svolgimento: il motore elettrico alimentato dalla batteria fornisce coppia motrice al giunto in modo da iniziare il movimento, il freno a tamburo funge da coppia resistente costante nel tempo e regolabile da colui che esegue il test (andando a variare la forza di serraggio dei ceppi). Anche in questo caso per avere risultati veritieri dobbiamo essere in condizioni di regime andando a regolare la potenza motrice fornita dal motore attraverso l'encoder incorporato e la velocità angolare in ingresso attraverso Arduino e l'encoder in uscita come già fatto nei test n.6 e n.8. Il test finisce quando la batteria si scarica completamente a causa dell'alimentazione fornita al motore, la quantità di energia fornita a questo dipende dalla potenza motrice erogata da quest'ultimo e quindi dalla potenza dissipata dal freno a tamburo e dal giunto con i suoi accoppiamenti.

Proprio la durata della batteria è il dato che ci interessa per andare a calcolare il rendimento del giunto nella Configurazione B, infatti questo è definito come: $\eta_B = \frac{t_{giu}}{t_{tam}}$ con t_{giu} =tempo di scarica della batteria quando il motore lavora in condizioni di regime accoppiato con il giunto e con il freno a tamburo e t_{tam} =tempo di scarica della batteria quando motore lavora in condizioni di regime ed è collegato al solo freno a tamburo. Con questo accorgimento la differenza fra i tempi di scarica della batteria è dovuta alle perdite insite nel giunto che costringono il motore ad erogare più potenza e quindi la batteria ha una durata minore ($t_{giu} < t_{tam}$). Prima che il sistema raggiunga le condizioni di regime trascorre un certo tempo che è però, secondo il nostro parere, assolutamente trascurabile rispetto al tempo in cui il sistema è a regime e quindi non va ad interferire con il tempo di scarica della batteria.

Come si può notare dall'equazione del rendimento bisogna fare anche un altro test accoppiando il motore elettrico all'albero che a sua volta va reso solidale, tramite una linguetta, al cilindro sul quale i ceppi del freno a tamburo andranno a svolgere un'azione frenante. In questo test la coppia resistente è fornita dal freno a tamburo e dall'accoppiamento albero-linguetta-cilindro, è fondamentale che la forza di serraggio sul freno sia la stessa che viene applicata nel test sul giunto altrimenti la prova perde di veridicità, inoltre il sistema deve essere in condizioni di regime e la velocità angolare in ingresso deve essere sempre la stessa ($\omega_{ing}=1,05[\text{rad/s}]$), per questi accorgimenti sono necessari l'encoder in uscita e Arduino. La prova si ferma quando la batteria si scarica e si determina t_{tam} .

In questo test per applicare una coppia resistente si è scelto il freno a tamburo invece che una massa nota appesa ad un filo poiché l'esame potrebbe avere una durata molto elevata e sarebbe stato necessario un filo molto lungo in modo che la massa potesse continuare la propria risalita per tutta la durata della prova. Il freno a tamburo invece fornisce una coppia resistente costante nel tempo.

Questa prova è sicuramente più costosa dei precedenti e richiede anche un tempo per l'allestimento e per lo svolgimento molto più elevato rispetto agli altri test (basti pensare che vanno eseguite due prove diverse: con e senza giunto), esso ha però una elevata precisione che in parte giustifica gli svantaggi di costi e tempi.

Test N.10: calcolo del rendimento del sottoinsieme di tre ruote dentate in serie e quindi della Configurazione A del giunto.

Strumenti necessari: 1 batteria; 1 motore elettrico; 1 scheda Arduino; 1 encoder angolare assoluto; 1 albero in ingresso; 1 albero in uscita; 1 linguetta; 1 freno a tamburo.

Allestimento: 1) calettare l'albero in entrata alla prima ruota del treno di ingranaggi; 2) accoppiare all'albero il motore elettrico in modo che quest'ultimo sia in grado di fornirgli potenza motrice, 3) calettare l'albero in uscita all'ultima ruota del treno e renderlo solidale al cilindro del freno a tamburo attraverso la linguetta, 4) rendere solidale l'encoder assoluto all'albero in uscita, 5) collegare Arduino sia all'encoder assoluto che al motore elettrico, 6) collegare il motore elettrico alla batteria (come mostrato in Figura 6.8).

Svolgimento: come per la prova n.9 anche qui il rendimento del sottoinsieme e quindi della Configurazione A dipende dal tempo di scarica della batteria: $\eta_A = \frac{t_{sot}}{t_{tam}}$, dove t_{sot} =tempo di scarica della batteria quando il motore elettrico è collegato al treno di ingranaggi e al freno a tamburo.

Anche per questo test il motore elettrico fornisce la potenza motrice che provoca il movimento del sistema, la potenza resistente è fornita dalla forza di serraggio applicata sul freno a tamburo mentre il sottoinsieme dissipa potenza sottoforma di attrito causando delle ulteriori perdite. Il calcolo del rendimento si occupa proprio di andare a calcolare queste perdite.

Il sistema deve essere naturalmente in condizioni di regime con velocità angolare in ingresso $\omega_{ing}=1,05[\text{rad/s}]$ e ciò è possibile grazie all'azione del sistema Arduino-encoder e del motore elettrico stesso. Anche in questo caso bisogna fare anche l'esperimento accoppiando il motore elettrico al solo

freno a tamburo, nello stesso identico modo del test n.9, in modo da calcolare t_{tam} . Le due prove naturalmente durano fino alla completa scarica della batteria che nel caso dell'accoppiamento con sottoinsieme e freno avviene più velocemente visto che il motore, per far sì che il sistema sia a regime, deve fornire una potenza motrice maggiore.

Questo test, come il precedente, è molto preciso ed accurato ma ha anche un costo per la strumentazione più elevato e tempi di allestimento e svolgimento più lunghi.

4.4 ANALISI FINALE

I test che abbiamo visto misurano grossomodo le stesse grandezze e si possono quindi operare dei confronti tra i risultati che si ottengono: in particolare i test n.5, n.6 e n.10 misurano il rendimento della Configurazione A e andando ad applicare la medesima coppia frenante ci si può aspettare di ottenere dei risultati quantomeno abbastanza simili fra loro. Lo stesso ragionamento può essere fatto con il rendimento della Configurazione B e le prove n.7, n.8 e n.10, ma anche per i rapporti di trasmissione: in particolare per il sottoinsieme si possono confrontare i test n.1 e n.2 mentre per il giunto complessivo i test n.3 e n.4.

Andando ad effettuare i test con carichi differenti si può realmente andare a stabilire se ci sia una dipendenza del rendimento del giunto riconfigurabile dai carichi a cui esso è sottoposto.

Si possono inoltre andare ad effettuare dei confronti tra le due configurazioni andando a raffrontare i risultati che si ottengono dai test che hanno un procedimento simile come il test n.1 con il n.3 e il n.2 con il n.4 per quanto riguarda i rapporti di trasmissione e il test n.5 con il n.7, il n.6 con il n.8 ed il n.9 con il n.10 per i rendimenti complessivi. Per quanto visto anche a livello teorico ci si può aspettare che a parità di carichi applicati e di procedimento effettuato la Configurazione B fornisca un rendimento minore della Configurazione A (a causa del numero maggiore di accoppiamenti dentati) e questo può anche essere dedotto dalla misurazione di una potenza motrice fornita superiore o di una durata della batteria minore (per i test n.9 e n.10) a parità di coppia frenante.

CAPITOLO 5. POSSIBILI MIGLIORIE PER IL GIUNTO



Figura 5.1 Rendering del giunto riconfigurabile.

5.1 RENDIMENTO DEL GIUNTO RICONFIGURABILE

In base ai risultati ottenuti dal collega Andrea D'Ambrosio in [33] riguardo la stima teorica dei rendimenti del giunto riconfigurabile per entrambe le configurazioni, e ripresa brevemente nei capitoli precedenti, si può notare che i contributi più rilevanti in questi rendimenti sono forniti dall'accoppiamento delle ruote dentate con assi incidenti che è regolato dalla seguente equazione che come si può vedere dipende soltanto dai parametri geometrici dell'accoppiamento dentato e non dalla potenza che questo deve trasmettere:

$$\eta = 1 - f\pi \sqrt{\left[\left(\frac{1}{z_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{z_2}\right)^2 + \frac{2\cos\alpha}{z_1 z_2}\right]}$$

Come si può evincere dalla formula i parametri geometrici sui quali si può intervenire per migliorare il rendimento degli accoppiamenti dentati e di conseguenza anche su quello del giunto e dell'intero robot sono: il coefficiente di attrito dinamico ($f_d=0,3$), il numero di denti ($z_1=z_2=z=20$) e l'angolo tra gli assi delle ruote ($\alpha=45^\circ$). Sostituendo questi valori all'interno della formula precedente si ottiene un rendimento di $\eta_{RD}=0,91$.

Nel dettaglio dall'equazione si osserva che il rendimento η aumenta se il coefficiente di attrito dinamico diminuisce, se il numero di denti delle ruote dentate aumenta e se l'angolo α tra gli assi delle ruote aumenta.

Per quanto riguarda il coefficiente di attrito dinamico f_d si sono fatte delle ricerche per trovare un materiale polimerico che possa essere lavorato tramite manifattura additiva e che presenti un valore di $f_d < 0,3$ in quanto $f_d(\text{Grey V4}) = 0,3$, un materiale che risponde a queste specifiche e che garantisce una buona resistenza meccanica è il Nylon 6/6 che ha $f_d(\text{nylon}) \approx 0,1$. Con questo valore si ottiene un rendimento dell'accoppiamento dentato $\eta(\text{nylon}) = 0,97$ che è quindi molto maggiore rispetto al rendimento ottenuto utilizzando la resina Grey V4.

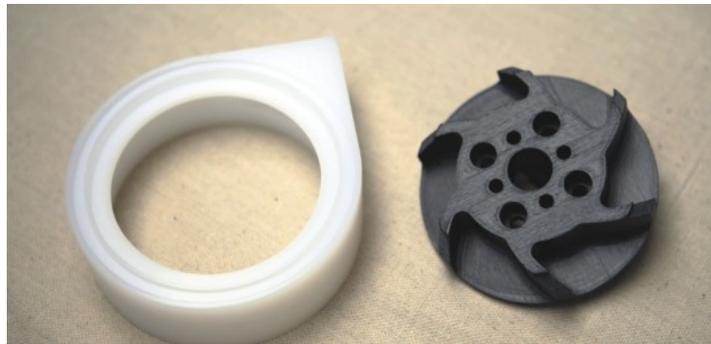


Figura 5.2 Oggetti realizzati in Nylon 6/6 tramite manifattura additiva.

Per la Configurazione A si otterrebbe un rendimento di $\eta_A = \eta^2 = 0,94$ mentre per la configurazione B: $\eta_B = \eta^4 = 0,88$, si può subito vedere il vantaggio che si ottiene utilizzando questo polimero.

Un problema del Nylon 6/6 è che il processo di stampa di quest'ultimo deve avvenire a temperature superiori ai 250 °C in modo da permettere la completa polimerizzazione della resina e la stampante Form 3 non è in grado di raggiungerle. Per il futuro si consiglia quindi l'acquisto di una nuova stampante, in particolare la stessa Formlabs produce la stampante Fuse 1 che è in grado di lavorare questo tipo di nylon e si basa sempre sulla tecnica SLS ma ha un costo un po' più elevato ed è più conveniente nel caso di produzioni di più robot e giunti.

Un altro materiale polimerico che presenta un coefficiente f_d molto basso è il Teflon ma questo richiede temperature ancora più elevate e quindi richiede stampanti molto più costose, visto che $f_d(\text{teflon}) \approx f_d(\text{nylon})$ non è conveniente realizzare le ruote in teflon in alternativa al nylon.

Per gli altri due parametri sorgono degli evidenti limiti di progettazione infatti tutti i pezzi del giunto sono stati studiati per limitare il più possibile l'ingombro del giunto una volta assemblato, nel caso del numero

dei denti non possiamo andare a far variare il raggio delle ruote dentate che è $R=20[\text{mm}]$ poiché altrimenti non sarebbe garantito l'ingranamento di tutti gli accoppiamenti dentati essendo gli assi delle ruote vincolati alle forcelle, si può però intervenire nel modulo delle ruote dentate che è definito come il rapporto tra il diametro della ruota e il numero di denti e che nel nostro caso è pari a $m = \frac{d}{z} = \frac{40}{20} = 2[\text{mm}]$, andando a ridurre il modulo possiamo aumentare il numero di denti senza andare ad influire sulla geometria del giunto.

Considerando un modulo $m=1,25[\text{mm}]$, che è uno dei moduli che viene più utilizzato di solito, si ricava che $z=32$ e facendo rimanere alterati gli altri parametri si ottiene che $\eta=0,945$ che risulta quindi essere maggiore del rendimento con il modulo attuale con cui sono state realizzate le ruote dentate.

In questo modo il rendimento della Configurazione A diventerebbe: $\eta_A=\eta^2=0,89$, mentre per la Configurazione B: $\eta_B=\eta^4=0,79$, anche in questo caso si può notare l'aumento dei rendimenti complessivi. Un problema può essere costituito dal fatto che con questo nuovo modulo la stampa dovrebbe essere più accurata visto che a parità di diametro il numero di denti è aumentato e può quindi non essere garantita l'effettiva realizzazione di ruote con $m=1,25[\text{mm}]$.

Andando ad estremizzare ancora di più questo concetto si può pensare di usare un modulo $m=1[\text{mm}]$ dal quale si ottiene $z=40$ e un rendimento $\eta=0,956$. Utilizzando questa soluzione per la Configurazione A si otterrebbe: $\eta_A=\eta^2=0,91$, per la Configurazione B invece: $\eta_B=\eta^4=0,83$, si ottengono valori di rendimento ancora maggiori.

Riguardo all'angolo α come vincolo si ha il fatto che gli assi delle ruote sono a tre a tre ortogonali in modo da soddisfare le specifiche costruttive, in numeri considerando due accoppiamenti dentati deve quindi essere $\alpha_1+\alpha_2=90^\circ$, nella situazione attuale le ruote sono posizionate in modo tale che $\alpha_1=\alpha_2=\alpha=45^\circ$, il rendimento totale di due accoppiamenti successivi è quindi $\eta_{\text{tot}}=\eta^2=0,833$.

Ipotizzando invece di variare l'asse della ruota intermedia in modo da avere $\alpha_1=30^\circ$ e $\alpha_2=60^\circ$ si ottiene $\eta_{\text{tot}}=\eta_{30}\eta_{60}=0,835$, il rendimento quindi resta grossomodo lo stesso e questi cambiamenti possono non essere effettivamente realizzabili nel giunto o possono richiedere la modifica di alcuni componenti di questo in modo da garantire il corretto ingranamento, si sconsiglia quindi in futuro di ragionare in quest'ottica poiché i vantaggi che si possono ottenere sono pressoché nulli.

Si può anche notare come il numero di accoppiamenti dentati presenti nel giunto che vanno ad influire nei rendimenti complessivi delle due configurazioni siano già stati ridotti al minimo da una attenta e

studiata progettazione e che quindi non sia possibile cercare di aumentare i rendimenti agendo in questa direzione. Per di più se si aggiungono ulteriori accoppiamenti dentati oltre a dover riprogettare in parte il giunto si ottiene che il rendimento complessivo diminuisce (a causa dell'aumento del numero degli accoppiamenti dentati che sono in serie tra loro) e quindi anche questa è una possibilità da scartare.

Da questa analisi si deduce che per aumentare i rendimenti complessivi del giunto e del robot si consiglia di:

- cambiare il materiale polimerico con cui realizzare il giunto passando al Nylon 6/6 che tuttavia richiede l'acquisto di una nuova stampante e che quindi viene rimandato alla realizzazione di altri progetti;
- intervenire sul modulo delle ruote dentate andando ad optare per $m=1,25[\text{mm}]$ o $m=1[\text{mm}]$ che sono anche tra i moduli più utilizzati nel settore meccanico.

Per quanto riguarda le altre ipotesi considerate si è arrivati alla conclusione che queste non siano in grado di garantire benefici apprezzabili ai rendimenti e che necessitino anche di una parziale riprogettazione del giunto. Chiaramente tutti i rendimenti calcolati in questo capitolo provengono soltanto da analisi teoriche e dal punto di vista pratico potrebbero andare ad influire anche altri fattori che in questa trattazione non sono stati considerati, questi dati assumono quindi un valore indicativo ma non assoluto.

5.2 RENDIMENTO DEL MECCANISMO DI BLOCCAGGIO

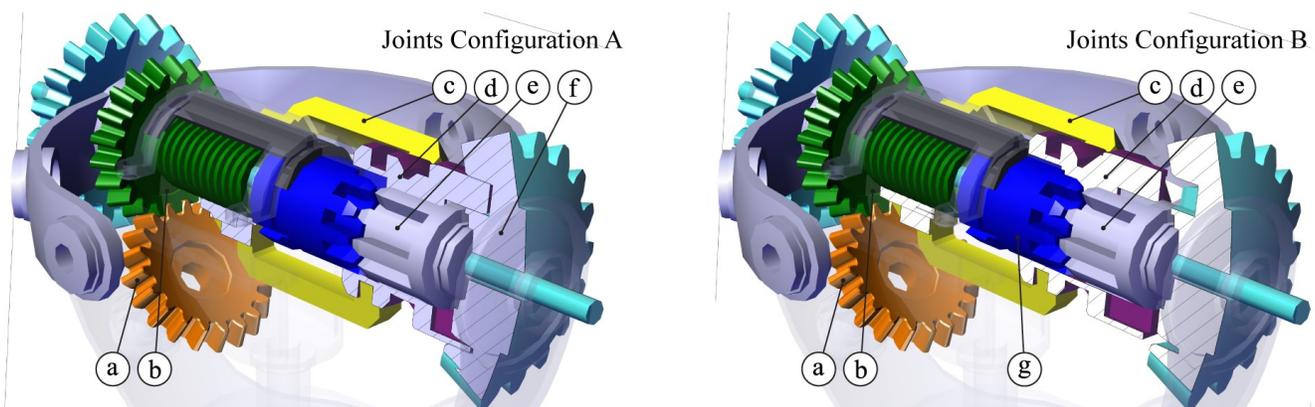


Figura 5.3 Schema meccanismo di bloccaggio.

A proposito del meccanismo di bloccaggio (mostrato in Figura 5.3), come descritto nella tesi del collega tirocinante Andrea D'Ambrosio [33], si ha che il rendimento totale è molto basso ma per l'utilizzo che se

ne fa nel giunto è sufficiente che questo sia maggiore di 0 in modo da riuscire a cambiare posizione senza impedimenti.

In questo caso quindi un miglioramento del rendimento complessivo è utile per ridurre gli sprechi di energia mentre il funzionamento è garantito senza intoppi anche nell'attuale layout.

Nel dettaglio il rendimento complessivo del meccanismo, per come è stato progettato, è dato da $\eta_{TOT} = \eta_{RD} \times \eta_{ELI}$ dove η_{RD} =rendimento accoppiamento dentato=0,91 in quanto l'accoppiamento è del tutto identico agli altri ingranamenti presenti nel giunto, e η_{ELI} =rendimento coppia elicoidale=0,136.

Il rendimento di quest'ultima è molto basso ed è dovuto al fatto che la coppia elicoidale lavora per attrito ed è dato dall'equazione $\eta_{ELI} = \frac{\tan(\gamma_m)}{\tan(\gamma_m + \Phi_1)}$ dove $\gamma_m = \frac{p}{2\pi r_m}$ =angolo di inclinazione del filetto rispetto alla normale, p=passo dell'elica, r_m =raggio medio dell'elica, mentre Φ_1 =angolo di attrito virtuale.

Si può notare che per aumentare il rendimento complessivo si può andare ad aumentare quello relativo all'accoppiamento dentato (η_{RD}) e quello relativo alla coppia elicoidale (η_{ELI}). Per l'accoppiamento dentato valgono le stesse considerazioni fatte per le miglorie relative al giunto.

Per la coppia elicoidale dalla formula precedente si nota che per aumentare il rendimento deve aumentare l'angolo di inclinazione del filetto (γ_m), questo aumenta quando si sceglie un passo maggiore e quindi la maggiorazione del passo dell'elica è una migloria che può essere apportata anche alla luce del fatto che al meccanismo di bloccaggio non è richiesto di assumere posizioni intermedie e quindi non ci sono particolari impedimenti nell'aumentare il valore del passo che nella configurazione attuale ha un valore di 2[mm]. Più precisamente visto che la lunghezza completa della parte filettata è di 24[mm] è molto consigliato scegliere per il passo un sottomultiplo di questo valore in modo da avere un numero intero di ricorrenze, si è pensato di conseguenza di proporre $p=4$ [mm].

Un altro modo per aumentare γ_m sarebbe quello di diminuire il raggio medio dell'elica (r_m), in questo caso però si dovrebbe andare a riprogettare l'intero meccanismo e visto che comunque questo funziona lo stesso senza troppi problemi non è un'operazione che si consiglia di compiere.

Il rendimento della coppia elicoidale dipende anche dall'angolo di attrito virtuale (Φ_1), i passaggi matematici e i calcoli da compiere per trovare il valore di Φ_1 e le grandezze dalle quali questo dipende sono un po' complessi e si rimanda alla consultazione della tesi del collega Andrea D'Ambrosio, per aumentare il rendimento questo angolo deve essere il minore possibile, per ottenere ciò occorre che il materiale abbia un coefficiente di attrito dinamico che sia il più basso possibile e quindi si propone di

realizzare anche il meccanismo di bloccaggio in Nylon 6/6 ($f_d \approx 0,1$), sempre attraverso la manifattura additiva. Un ulteriore modo per andare a diminuire l'angolo di attrito virtuale è quello di abbassare l'angolo di inclinazione del filetto (θ) che nella configurazione attuale corrisponde a 10° .

Si può riassumere che al fine di migliorare il rendimento complessivo del meccanismo di bloccaggio, con lo scopo di limitare gli sprechi di energia, si consiglia di:

- aumentare il passo (p) dell'elica in modo da aumentare l'angolo di inclinazione del filetto (γ_m);
- realizzare il meccanismo in Nylon 6/6 poiché possiede un coefficiente di attrito dinamico (f_d) minore;
- diminuire l'angolo di inclinazione del filetto (θ) in modo che sia $\theta < 10^\circ$.

CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI

Purtroppo, a causa dell'emergenza Coronavirus, non si è stati in grado di recarci di persona in laboratorio e completare le ultime fasi di stampa del terzo giunto riconfigurabile del robot mentre le operazioni di stampa precedenti erano state eseguite dai tirocinanti precedenti.

Gli sviluppi futuri che possono essere realizzati sul robot 3-URU riguardano quindi il completamento della stampa dell'ultimo giunto ed il corretto assemblaggio di questo assicurandoci che tutti i pezzi siano realizzati nel modo giusto ed in caso contrario andare a correggere eventuali imperfezioni. Successivamente si possono andare ad eseguire alcuni dei test proposti, non è necessario eseguirli tutti, in questo elaborato per andare a confrontare i risultati teorici con le analisi sperimentali ed in caso andare mostrare ed evidenziare eventuali differenze. Da questi test magari si potranno trarre delle importanti indicazioni sulla scelta del motore elettrico più adatto da accoppiare con il giunto.

La parte dello scritto sulle possibili migliorie da applicare sul giunto è più il frutto di un'analisi teorica svolta su alcuni parametri che si pensa possano essere migliorati per la realizzazione di componenti e progetti futuri, si ritiene quindi necessario quantomeno un approfondimento sulle soluzioni proposte per verificarne l'effettiva fattibilità e per quantificare in maniera concreta, e non solo teorica, i miglioramenti che esse possono apportare. Alcune ipotesi sollevate sono state quasi subito scartate perché si sono trovati degli evidenti limiti e a mio parere non è necessario andare ad effettuare un'analisi più dettagliata su queste in quanto, anche a livello puramente teorico, sono risultate difficilmente realizzabili o poco influenti sul miglioramento di alcune proprietà se non addirittura dannose.

Sempre riguardo al robot 3-URU si possono fare anche degli studi più approfonditi sugli altri giunti in esso presenti come quello rotoidale e quello universale che collega la gamba all'end-effector.

Per quanto riguarda invece la manifattura additiva questa è una tecnica produttiva che sta avendo una crescita esponenziale ed è quindi un settore che in un'ottica futura merita sicuramente grandi attenzioni perché presenta un potenziale elevatissimo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chablat, D.; Wenger, P. Working modes and aspects in fully parallel manipulators. In Proceedings of the IEEE 1998 International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 20–20 May 1998; Volume 3, pp. 1964–1969.
- [2] Chablat, D.; Kong, X.; Zhang, C. Kinematics, workspace and singularity analysis of a multi-mode parallel robot. In Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Cleveland, OH, USA, 6–9 August 2017; Volume 5A.
- [3] Au, W.; Chung, H.; Chen, C. Path planning and assembly mode-changes of 6-DOF Stewart-Gough-type parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory* 2016, 106, 30–49.
- [4] Tian, C.; Fang, Y.; Guo, S.; Qu, H. A class of reconfigurable parallel mechanisms with five-bar metamorphic linkage. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C* 2017, 231, 2089–2099.
- [5] Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. Reconfigurability and unified kinematics modeling of a 3Rtps metamorphic parallel mechanism with perpendicular constraint screws. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2013, 29, 121–128.
- [6] Khalid, A.; Mekid, S. Design synthesis of a three legged SPS parallel manipulator. In Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, Manchester, UK, 14–16 July 2010; pp. 169–173.
- [7] Ye, W.; Fang, Y.; Guo, S. Structural synthesis of a class of metamorphic parallel mechanisms with variable mobility. In *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*; Springer: London, UK, 2012; pp. 119–126.
- [8] Finistauri, A.; Xi, F. Reconfiguration analysis of a fully reconfigurable parallel robot. *J. Mech. Robot.* 2013, 5, 041002.
- [9] Grosch, P.; Di Gregorio, R.; López, J.; Thomas, F. Motion planning for a novel reconfigurable parallel manipulator with lockable revolute joints. In Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, AK, USA, 3–7 May 2010; pp. 4697–4702.
- [10] Taherifar, A.; Alasty, A.; Salarieh, H.; Boroushaki, M. Path planning for a hyper-redundant manipulator with lockable joints using PSO. In Proceedings of the First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, Iran, 13–15 February 2013; pp. 224–229.
- [11] Aukes, D.; Heyneman, B.; Ulmen, J.; Stuart, H.; Cutkosky, M.; Kim, S.; Garcia, P.; Edsinger, A. Design and testing of a selectively compliant underactuated hand. *Int. J. Robot. Res.* 2014, 33, 721–735.
- [12] Xi, F.; Li, Y.; Wang, H. A module-based method for design and analysis of reconfigurable parallel robots. In Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Xi'an, China, 4–7 August 2010; pp. 627–632.

- [13] Zhang, T.; Zhang, W.; Gupta, M. An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution. *Mech. Mach. Theory* 2018, 124, 248–258.
- [14] Yang, H.; Baradat, C.; Krut, S.; Pierrot, F. An agile manufacturing system for large workspace applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 85, 25–35.
- [15] Zhang, W.J. A new class of linkage with synthesis method for exact dwell motion at 1 and/or 2 limit positions of output link. In *Proceedings of the 24th ASME Mechanisms Conference*, Irvine, CA, USA, 18–22 August 1996; pp. 1–5.
- [16] Chen, W.; Zhang, J.; Quan, J.; Lv, T. A novel spherical joint designed for metamorphic mechanism. In *Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, China, 21–24 September 2008; pp. 976–981.
- [17] Gan, D.; Dai, J.; Dias, J.; Seneviratne, L. Reconfiguration and static joint force variation of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with 3R and 1T2R motion. *Mech. Mach. Sci.* 2016, 36, 213–222.
- [18] Zhang, T.; Zhang, W.J.; Gupta, M.M. A Novel Docking System for Modular Self-Reconfigurable Robots. *Robotics* 2017, 6, 25.
- [19] Yuan, C.W.; Yin, R.X.; Zhang W.J.; Chen, G. A new under-actuated resilient robot. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Banff, AB, Canada, 5–8 October 2017; pp. 1202–1207.
- [20] Carbonari, L.; Callegari, M. The kinematotropic 3-CPU parallel robot: Analysis of mobility and reconfigurability aspects. In *Latest Advances in Robot Kinematics*; Springer: Berlin, Germany, 2012; pp. 373–380.
- [21] Carbonari, L.; Callegari, M.; Palmieri, G.; Palpacelli, M.C. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines. *Mech. Mach. Theory* 2014, 79, 173–183.
- [22] Palpacelli, M.C.; Carbonari, L.; Palmieri, G. Details on the design of a lockable spherical joint for robotic applications. *J. Intell. Robot. Syst.* 2016, 81, 169–179.
- [23] Palpacelli, M.; Carbonari, L.; Palmieri, G.; Callegari, M. Mobility analysis of non-overconstrained reconfigurable parallel manipulators with 3-CPU/3-CRU kinematics. In *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*; Springer: Berlin, Germany, 2016; pp. 189–200.
- [24] Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.C.; Palmieri, G.; Callegari, M. Functional Design and Optimization of a Novel 3-URU Multimodal Reconfigurable Robot. In *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Cleveland, OH, USA, 6–9 August 2017; p. V009T07A050.
- [25] Carbonari, L.; Corinaldi, D.; Palpacelli, M.; Palmieri, G.; Callegari, M. A novel reconfigurable 3-URU parallel platform. In *Proceedings of the International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*, Torino, Italy, 21–23 June 2017; pp. 63–73.

- [26] Palpacelli, M.; Carbonari, L.; Palmieri, G.; Callegari, M. Design of a Lockable Spherical Joint for a Reconfigurable 3-URU Parallel Platform. In Robotics, MDPI; Ancona, Italy, Department of Industrial Engineering and Mathematical Sciences, Polytechnic University of Marche; 2 August 2018.
- [27] Slides sull'additive manufacturing del prof. Forcellese, A.;
- [28] "Meccanica applicata alle Macchine", seconda edizione, di Callegari, M.; Fanghella, P.; Pellicano, F.;
- [29] "Progetto e costruzione di macchine", editore Shigley, McGraw-Hill Education.
- [30] "Misure meccaniche e termiche", di Rossi, G.; editore Carocci.
- [31] "Progettazione e prototipazione di un giunto universale riconfigurabile per applicazioni robotiche", Olivieri, G.; tesi magistrale anno 2018.
- [32] "Prototipazione rapida di un giunto sferico riconfigurabile per applicazioni robotiche", Popazzi, M.; tesi triennale anno 2020.
- [33] "Analisi delle prestazioni di un giunto sferico riconfigurabile", D'Ambrosio, A.; tesi triennale anno 2020.

SITOGRAFIA

- <https://manufat.com/formlabs-italia-stampanti-3d-sla-sls/fuse-1/0>
- <https://manufat.com/formlabs-italia-stampanti-3d-sla-sls/form-3-form-3l/>
- <https://formlabs.com/store/grey-resin/>
- <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/>
- https://www.elexico.com/users/external/hpcol20/Tabelle/TC14-3_3.html
- <https://www.skfbearingselect.com/#/bearing-selection-start>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Freno_a_tamburo
- <https://www.faulhaber.com/it/prodotti/motori-brushless>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Motore_brushless
- https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_di_carica_elettrica
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Arduino_\(hardware\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Arduino_(hardware))
- <https://www.arduino.cc/>
- <https://www.logicaprogrammabile.it/caratteristiche-arduino-uno/>
- <https://www.maffucci.it/2011/11/29/arduino-lezione-06-modulazione-di-larghezza-di-impulso-pwm/>
- <https://devacademy.it/arduino-la-guida-completa/>
- <http://www.giuseppecaccavale.it/arduino/rotary-encoder-arduino/>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Trasduttore_di_posizione_angolare
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Servomotore>
- https://win.adrirobot.it/servotester/il_servomotore.htm
- <https://www.kollmorgen.com/it-it/products/motors/servo/akm-series>
- <https://www.servotecnica.com/it/prodotti/servomotori/servomotori-brushless/>