



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria,

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi delle prestazioni di un giunto sferico
ricongfigurabile**

**Analysis of the performance of a spherical
reconfigurable joint**

Relatore:

Prof. Ing. **Matteo Claudio Palpacelli**

Tesi di laurea di:

Andrea D'Ambrosio

Correlatore:

Ing. **Daniele Costa**

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 <i>Manipolatore riconfigurabile</i>	2
1.2 <i>Manipolatore 3-URU</i>	3
1.2.1 <i>Evoluzione del progetto</i>	3
1.2.2 <i>Caratteristiche robot</i>	5
2. ADDITIVE MANUFACTURING	7
2.1 <i>Introduzione alla manifattura additiva</i>	7
2.2 <i>Scelta dell'additive per la realizzazione dei prototipi</i>	10
2.2.1 <i>Importazione CAD, impostazione del modello e stampa</i>	11
2.2.2 <i>Operazioni post stampa</i>	14
3. GIUNTO UNIVERSALE RICONFIGURABILE	16
3.1 <i>Principio di funzionamento e configurazioni A e B</i>	16
3.2 <i>Meccanismo di bloccaggio</i>	21
3.2.1 <i>Rendimento meccanismo di bloccaggio</i>	22
3.2.2 <i>Suggerimenti per migliorare il rendimento</i>	25
4. CUSCINETTI	27
4.1 <i>Introduzione generale sui cuscinetti volventi</i>	27
4.2 <i>Attrito nei cuscinetti</i>	30
4.2.1 <i>Modello SKF per il calcolo del momento d'attrito</i>	33
4.2.2 <i>Utilizzo dell'algoritmo</i>	35
4.2.3 <i>Esempio di calcolo</i>	39

5. RUOTE DENTATE.....	42
5.1 <i>Rendimento RD</i>	42
5.1.1 <i>Calcolo del coefficiente di attrito dinamico</i>	44
5.2 <i>Calcolo del rendimento di un accoppiamento dentato</i>	46
6. RENDIMENTI DEL GIUNTO.....	47
6.1 <i>Rendimenti delle configurazioni A e B.....</i>	47
6.1.1 <i>Rendimento della configurazione A senza tener conto dei cuscinetti</i>	48
6.1.2 <i>Rendimento della configurazione B senza tener conto dei cuscinetti.....</i>	49
6.2 <i>Rendimento configurazioni A e B tenendo in considerazione l'influenza dei cuscinetti</i>	50
6.2.1 <i>Rendimento configurazione A tenendo conto dei cuscinetti</i>	51
6.2.2 <i>Rendimento configurazione B tenendo conto dei cuscinetti</i>	51
7. RENDIMENTI COMPLESSIVI DEL ROBOT	52
7.1 <i>Studio dei giunti</i>	52
7.2 <i>Calcolo del rendimento delle gambe del robot</i>	54
7.3 <i>Rendimento equivalente in parallelo</i>	56
7.3.1 <i>Rendimento robot configurazione A.....</i>	58
7.3.2 <i>Rendimento robot configurazione B.....</i>	58
8. CONCLUSIONI	59
8.1 <i>Conclusioni</i>	59
8.2 <i>Reversibilità.....</i>	61
8.3 <i>Possibili miglioramenti.....</i>	62
8.3.1 <i>Diminuzione modulo RD</i>	63
8.3.2 <i>Utilizzo materiale Nylon.....</i>	64
8.3.3 <i>Combinazione delle soluzioni.....</i>	65
8.4 <i>Sviluppi futuri</i>	66
8.5 <i>Problemi riscontrati.....</i>	67
9. BIBLIOGRAFIA.....	68

10. SITOGRAFIA.....	70
11. RINGRAZIAMENTI	73

1. INTRODUZIONE

L'analisi delle prestazioni di un cinematismo è di fondamentale importanza per garantirne un funzionamento corretto e soprattutto preciso. Inoltre, è importante dal punto di vista energetico poiché analizzare le prestazioni di un cinematismo vuol dire anche studiare possibili soluzioni che garantirebbero un aumento dell'efficienza del robot in questione, con un conseguente ottenimento di rendimenti maggiori e quindi minori sprechi di energia.

Lo scopo di questa tesi è infatti, oltre l'analisi prestazionale del giunto e quindi fornire dei valori di rendimento per lo stesso, anche quello di offrire possibili soluzioni che porterebbero ad un miglioramento qualitativo dell'efficienza del giunto universale riconfigurabile in questione.

Prima di partire con l'analisi prestazionale del giunto però, è utile introdurre quest'ultimo, definire il suo sviluppo nel corso degli anni e i criteri per la scelta della tecnologia con cui realizzarlo.

1.1 Manipolatore riconfigurabile

Un manipolatore riconfigurabile è un robot in grado di cambiare la mobilità del proprio end-effector in base a un cambiamento locale della cinematica.

La sua utilità è dovuta alla crescente domanda di flessibilità nella produzione industriale di tali manipolatori. La ricerca nel campo della robotica sta concentrando il suo interesse su macchine versatili, in grado di adattarsi facilmente a nuove funzioni da svolgere.

Inoltre, le macchine ad architettura cinematica parallela, dopo aver suscitato per oltre mezzo secolo un interesse crescente da parte della ricerca, stanno assumendo, in questi ultimi anni, una decisa importanza industriale ed economica in numerosi e differenti campi applicativi, ponendosi in competizione con le tecnologie tradizionali e con i robot seriali. La maggiore complessità dell'architettura parallela comporta nuovi problemi, ad oggi non completamente risolti, che tuttavia possono essere efficacemente affrontati utilizzando gli strumenti cinematici ed informatici attualmente disponibili ai ricercatori.

Si possono utilizzare diversi metodi per modificare la struttura cinematica di un manipolatore: il più comune è l'uso di giunti bloccabili, cioè giunti con alcuni gradi di libertà (GDL) uno dei quali può essere bloccato selettivamente per modificare la mobilità risultante.

La famiglia di macchine cinematiche parallele (PKMs = Parallel Kinematics Machines), in particolare, può trarre profitto in maniera significativa dallo sviluppo di giunti riconfigurabili, in quanto una piccola modifica della cinematica delle gambe può portare a modifiche sostanziali della mobilità globale. La disponibilità limitata di uno spazio di lavoro abile, inoltre, è uno dei principali svantaggi delle PKMs, di conseguenza la possibilità di modificare localmente (o temporaneamente) le capacità di movimento dell'end-effector può portare ad un significativo interesse.

Come è ben noto, molte topologie di giunto ad anello chiuso tipiche delle PKMs, possono avere diversi modi di lavoro corrispondenti alle differenti soluzioni della cinematica del robot, le quali portano ad avere molteplici capacità di movimento dell'end-effector: risulta che lo sfruttamento di due, tre o anche più modalità di assemblaggio di una macchina cinematica parallela possono aumentare la sua usabilità in un'applicazione industriale.

1.2 Manipolatore 3-URU



Figura 1. Manipolatore 3-URU

1.2.1 Evoluzione del progetto

I ricercatori del laboratorio di Robotica dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona hanno effettuato negli ultimi anni diversi studi sui robot riconfigurabili sfruttando il concetto di giunti bloccabili.

In primo luogo, si sono concentrati sull'architettura a tre gambe cilindrico-prismatico-universale (3-CPU), ma l'architettura a 3-CPU possiede alcuni svantaggi intrinseci. In particolare, la problematica principale che interessa tale architettura è la necessità di riconfigurare i giunti passivi che collegano l'end-effector alla struttura: ciò implica che il meccanismo bloccabile deve far parte della struttura delle gambe rendendo così più complessa la progettazione meccanica (per la limitazione del peso e delle dimensioni del giunto passivo) che conduce ad una riduzione del carico utile.

Di conseguenza i medesimi autori hanno studiato diverse topologie che hanno in comune con il manipolatore 3-CPU gli stessi tipi di mobilità: si è così passati all'architettura denominata 3-URU (universale-rotoidale-universale) per progettare un nuovo manipolatore riconfigurabile. Il manipolatore 3-URU può essere derivato dalla topologia 3-SRU (sferico-rotoidale-universale): il giunto sferico che collega la gamba alla piattaforma fissa può essere pensato

come la composizione di tre giunti rotoidali con assi simultanei e, bloccando uno di essi selettivamente, il giunto si trasforma in un giunto universale con diverse sequenze di rotazione.

1.2.2 Caratteristiche robot

Naturalmente ogni apparecchio robotico basa il suo funzionamento su una serie di vincoli (coppie cinematiche) che insieme formano una catena cinematica:

- Coppia cinematica: relazione di vincolo nel moto relativo tra due corpi;
- Catena cinematica: insieme di corpi connessi tra loro con delle coppie cinematiche.

Nel nostro caso il manipolatore ha un piatto superiore, il telaio, al quale sono collegate 3 gambe. Ogni gamba, a sua volta, ha una catena cinematica identica ed è composta da tre coppie cinematiche:

1. sferica (universale); lascia 3gdl corrispondenti alle 3 rotazioni lungo i 3 assi;
2. rotoidale; lascia 1gdl corrispondente alla rotazione attorno all'asse della coppia;
3. universale.

Il giunto sferico (Cardanico), che deve essere ridotto ad un giunto universale per garantire la funzionalità del robot, connette il primo corpo di ogni gamba al telaio.

Il secondo corpo è collegato al primo da un giunto rotoidale; per ultimo, il giunto universale chiude la catena cinematica connettendo l'end-effector alla gamba.

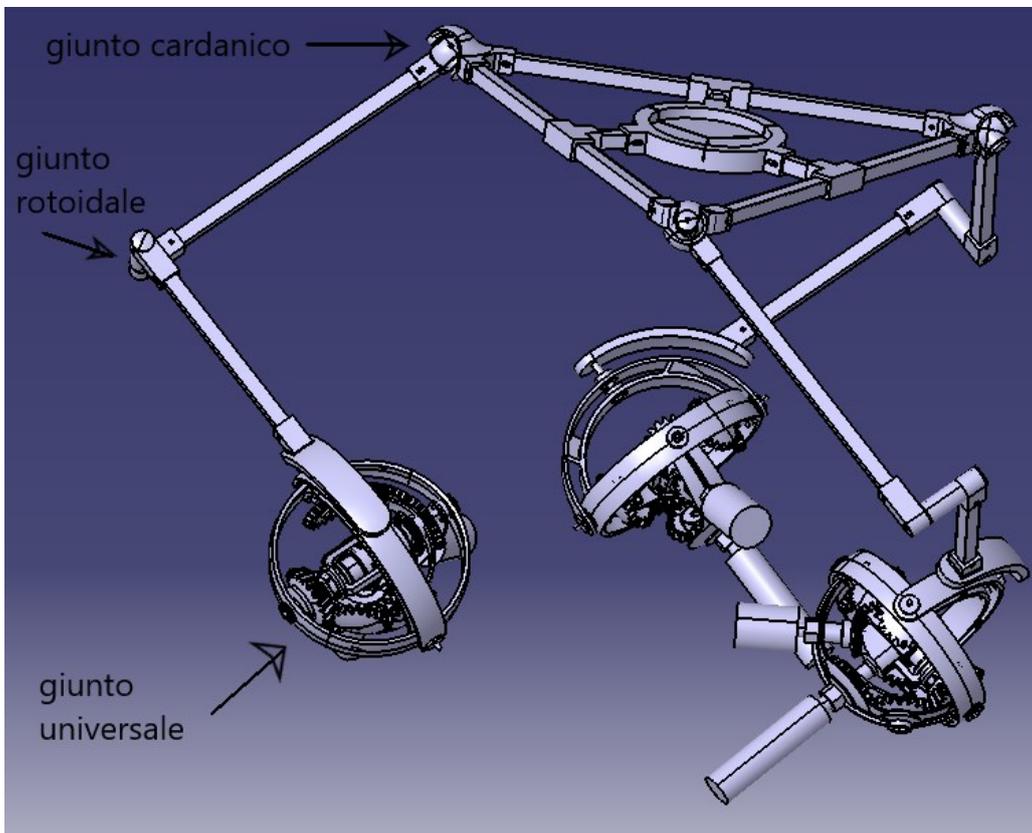


Figura 2. File Catia del robot URU completo, con riportati i tipi di giunto presenti in esso.

La disposizione dei vari giunti è di fondamentale importanza per la mobilità della piattaforma finale.

Le tre coppie sferiche sono situate in modo tale che i loro centri si trovino sugli assi del sistema di riferimento fisso $\{0\}$ alla stessa distanza dall'origine. Le tre rotazioni che compongono ogni coppia sono realizzate da tre giunti rotoidali perpendicolari in cui gli assi si incontrano in un punto (che coincide con il centro della coppia sferica).

Il giunto di Cardano(fig.3), quello che connette la prima gamba al telaio, è considerato come giunto sferoidale o anche 3 volte rotoidale con assi simultanei. Di conseguenza per ottenere il giunto universale richiesto, è necessario bloccare selettivamente uno degli assi. Il giunto è composto essenzialmente da una crociera che si collega ai 2 componenti attraverso due coppie rotoidali ortogonali tra loro.

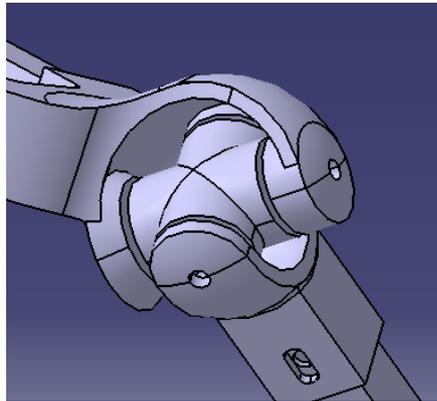


Figura 3. Giunto di cardano presente sul manipolatore URU

2. ADDITIVE MANUFACTURING

2.1 Introduzione alla manifattura additiva

L'additive manufacturing, o manifattura additiva, è un processo di lavorazione additiva, nel quale si giunge al proprio prodotto finito (o quasi) tramite la stratificazione progressiva di materiale, mediante diversi metodi, su livelli sovrapposti lungo l'asse Z, cioè verso l'alto.

E' un tipo di lavorazione che sta prendendo atto sempre di più in ambito industriale poiché permette di avere vantaggi non raggiungibili tramite le lavorazioni tradizionali (es: asportazione di truciolo).

Essa racchiude i concetti di:

- *Rapid prototyping*, insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD);
- *Rapid tooling*, tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico;
- *Rapid manufacturing*, si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente.

Tuttavia, ad oggi questa tecnica non è del tutto utilizzata in quanto ancora in fase di sviluppo dati alcuni aspetti negativi da tenere in considerazione:

- Elevato costo dei macchinari, se parliamo della produzione di componenti di modeste dimensioni, allora le stampanti saranno molto costose e le piccole/medie imprese potrebbero non permettersi un investimento tale;
- Bassa produttività, ad oggi è il suo svantaggio più influente poiché la realizzazione di componenti tramite tecniche di manifattura additiva è un processo relativamente lungo, se si tiene in considerazione la produttività a cui devono far fronte le imprese.

Ed è per questo ancora soggetta a studi volti a migliorare la produttività delle stampanti e volti a cercare di renderle più economicamente convenienti.

Nonostante ciò si pensa che l'AM sia destinato ad affiancare e/o sostituire le più comuni tecniche di fabbricazione industriale e si prevede un utilizzo sempre più pervasivo e conveniente, con tempi di processo sempre più bassi. Ciò è dovuto ai notevoli vantaggi che questa tecnologia può apportare alla fabbricazione industriale.

Quando si parla di affiancare le più comuni tecniche di fabbricazione industriale si parla di *"hybrid manufacturing"* ovvero manifattura ibrida.

Questo poiché non è detto che l'additive debba sostituire totalmente le tecniche di lavorazione più tradizionali, si può pensare infatti a un'unione tra le due tecniche, sottrattive ed additive, in modo da cercare di ottenere un compromesso tra quelli che sono gli svantaggi di un tipo di lavorazione e dell'altra, cercando quindi di unire quelli che sono i punti di forza delle due.

Quindi si crea una combinazione tra i due processi manifatturieri al fine di creare un singolo flusso produttivo che utilizzi efficacemente entrambe le tecniche.

I vantaggi dell'additive sono:

- Il minor spreco di materiale(fig.4), l'approccio classico di tipo sottrattivo si basa su processi dove il materiale viene rimosso a partire da un grezzo di partenza per ottenere l'oggetto finale, mentre nel caso dell'Additive, si utilizza solo il materiale strettamente necessario alla creazione del pezzo. Questo, unito al fatto che il materiale in eccesso può essere riciclato, riduce di molto lo spreco di materia prima con conseguente risparmio sui costi e minor impatto ambientale.
E' inoltre possibile creare strutture molto più leggere inserendo il materiale solo dove è necessario che sia.

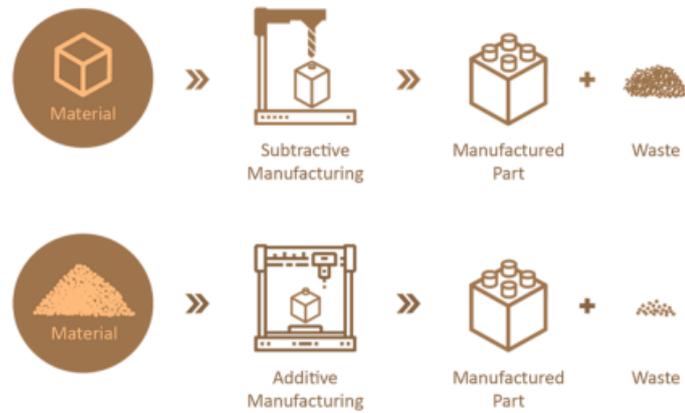
ADDITIVE vs. SUBTRACTIVE MANUFACTURING

Figura 4. dalla figura si può notare come la generazione di sfridi (residui di lavorazione del materiale) è notevolmente maggiore nel caso delle tecniche sottrattive rispetto l'additive in cui c'è una generazione di sfridi quasi nulla.

- Libertà di progettazione, l'altro evidente vantaggio dell'Additive rispetto all'approccio classico è la libertà di progettazione che offre. In linea di principio qualunque oggetto che sia progettabile con CAD può essere poi facilmente realizzato, anche strutture molto complesse. Il che comporta anche una maggior flessibilità e la possibilità di personalizzazione, di offrire cioè soluzioni specifiche per ogni applicazione. Ciò è molto utile per quanto riguarda la fase di realizzazione di prototipi in quanto è veloce ed è economicamente più conveniente rispetto alle altre tecniche sottrattive.

2.2 Scelta dell'additive per la realizzazione dei prototipi

Alla luce dei motivi sopraelencati, per la realizzazione dei componenti del giunto, invece che utilizzare le tecniche sottrattive (es: asportazione di truciolo), si è scelta la manifattura additiva.

Esistono diverse tecnologie additive di prototipazione rapida le quali presentano diversi punti in comune:

- Sono tutte guidate da un computer;
- Il primo passo consiste nella realizzazione di un modello CAD tridimensionale con il quale il software gestisce la costruzione del manufatto. Tale modello deve essere salvato in uno dei formati richiesti dalla macchina;
- Per alcune tecnologie è necessario prevedere degli elementi di supporto allo scopo di sostenere il pezzo durante il processo: tali sostegni devono essere rotti a pezzo ultimato e per questo non devono essere né troppo spessi (altrimenti non si rompono ma diventano parte dell'oggetto stesso, oppure rompendosi potrebbero portare via con sé un pezzo dell'oggetto desiderato rendendolo non conforme alle specifiche) né troppo sottili (altrimenti verrebbe meno la loro funzione, ovvero non sarebbero in grado di fungere da supporto);
- Le dimensioni dei manufatti che si possono ottenere variano in base alla macchina ma tipicamente quelle massime non superano i 50 [cm] lungo i tre assi;
- Sono processi lenti che però consentono di ottenere forme anche molto complicate, difficilmente ottenibili con quelli tradizionali. La precisione dipende ovviamente dallo spessore che si adotta per ciascun layer ma purtroppo non è comunque elevata e perciò le superfici funzionali che necessitano di tolleranze più strette devono essere successivamente rifinite alle macchine utensili: il vantaggio sta nel fatto che, dato che la forma è molto prossima a quella finale, è necessaria la sottrazione di pochissimo materiale con conseguente generazione di un'esigua quantità di truciolo, quindi si ha un notevole risparmio di materiale.

Le tecniche si differenziano per il tipo di materiale utilizzato e per il tipo di processo a cui è sottoposto quest'ultimo per realizzare l'oggetto.

2.2.1 Importazione CAD, impostazione del modello e stampa

Per realizzare i prototipi fisici dei vari componenti si parte dal modello CAD delle singole parti che sono state importate all'interno del programma associato alla stampante, denominato "Preform" nel nostro caso, per essere preparati; chiaramente dato il volume di stampa a disposizione sono stati necessari più cicli di stampa per riuscire ad ottenere la totalità delle parti.

Si sono così esportati i modelli dal software CAD con un formato adatto alla stampa, l'STL, dove un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli.

Una volta inserito il componente all'interno del programma, quest'ultimo mostra alcuni parametri fondamentali relativi al processo di stampa:

- volume di resina fotopolimerica necessario per la realizzazione del componente;
- layer necessari per la realizzazione del componente;
- durata del processo.

Si è ora pronti a preparare il modello per la stampa, operazione che richiede lo svolgimento di 3 fasi principali:

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

L'orientamento del modello è fondamentale per la riuscita della stampa in quanto in ogni layer aggiuntivo la sezione deve essere decrescente, per evitare il distacco dell'intero pezzo dalla piattaforma a causa della forza di gravità.

Tale orientamento può essere eseguito sia automaticamente dal programma che manualmente o anche un'unione dei due, ovvero si effettua un primo orientamento automatico e infine si effettuano cambiamenti manuali. Ad ogni modo la scelta deve essere fatta in modo tale che i supporti che successivamente si generano non ricadano nelle superfici funzionali del componente. Questo poiché se i supporti ricadessero nelle superfici funzionali dell'oggetto, nel tentativo di portarle via potremmo rovinare la superficie rendendo il pezzo non più conforme alle specifiche.

Si può ora passare alla fase di generazione dei supporti necessari a sostenere il pezzo durante la stampa i quali sono di fondamentale importanza per la riuscita del processo. Vengono generati automaticamente dal software nei punti dove esso ritiene più opportuno insieme ad una base di appoggio che è la prima ad essere stampata, sulla quale poi vengono creati i sostegni che reggono il componente. Come già riportato precedentemente, questi supporti non devono essere presenti nelle superfici funzionali del componente, quindi una volta che il software li ha generati automaticamente bisogna interferire manualmente per spostare il punto di contatto dei supporti qualora essi siano a ridosso o adiacenti a superfici funzionali.

Il software lascia comunque la possibilità di decidere alcuni parametri per riuscire a generare supporti che più si adattino al componente da stampare, di seguito vengono spiegati i principali:

- **Densità:** ci permette di regolare quanto i sostegni siano "attaccati" tra loro e influenza anche il numero dei punti di contatto tra la struttura di supporto e il modello.
- **Dimensione punti:** i punti in questione sono le posizioni in cui ciascun supporto si collega alla parte e per impostazione predefinita hanno un raggio più piccolo rispetto al resto della struttura di supporto, quindi sono la parte di supporto ad avere minor resistenza meccanica, il che consente una rimozione più semplice e un minor numero di segni dopo la stampa. Il software ci dà la possibilità di variare la dimensione dei punti di contatto:
 - I punti di contatto più piccoli facilitano la rimozione delle strutture di supporto dalla parte stampata e lasciano meno segni su quest'ultima. Tuttavia, esiste una maggiore possibilità che i supporti non riescano a sostenere la parte durante la stampa, con conseguente errore di stampa.
 - I punti di contatto più grandi rendono più sicuri i supporti durante la stampa, ma sono più difficili da rimuovere dalla parte finita e lasciano più segni su quest'ultima.
- **Supporti interni:** selezionando questa casella si dà la possibilità al software di generare supporti anche all'interno del modello (nel caso in cui si lavori ad esempio su componenti cavi) per migliorare la tenuta dello stesso.

Di fondamentale importanza durante tale fase è che non siano presenti elementi di supporto nelle superfici funzionali del componente (quali filettature, superfici di contatto o come nel componente in esempio la dentatura dell'ingranaggio), come già precedentemente accennato in quanto potrebbero compromettere il funzionamento dello stesso.

Per sopperire a tale problematica il software ci permette di modificare la locazione e la dimensione di ogni singolo supporto da esso inserito. Chiaramente facendo delle modifiche in quest'ottica è possibile arrivare ad avere un modello che il software definisce come "non stampabile" in quanto il numero di supporti in alcune zone (coincidenti magari con quelle funzionali su cui sono stati rimossi) potrebbero divenire insufficienti.

Potrebbe però capitare che in base all'orientamento dato il programma per definire l'oggetto stampabile richieda dei supporti obbligatori in alcune zone, le quali potrebbero interessare anche superfici funzionali.

Le soluzioni, se il programma non permette di rimuovere i supporti da tali zone, possono essere due:

- si utilizzano dei punti di contatto con dimensioni minori solo localmente in modo da non indebolire l'intera struttura;
- si cambia l'orientamento della parte per far sì che le superfici funzionali non ricadano dove vengono generati i supporti.

Detto ciò, una volta che il modello risulta stampabile si può passare alla fase di layout. Il software qui "organizza" i vari modelli da stampare all'interno del volume di stampa nella maniera più opportuna, ma anche in tale fase permette di scegliere alcuni parametri quali:

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

Naturalmente uno dei principali obiettivi della scelta del layout di stampa è quella di minimizzare il tempo di produzione dei componenti e quindi di aumentare la produttività della stampante. Massimizzazioni che possono essere ottenute disponendo i pezzi il più possibile vicini tra di loro rispettando però sempre i vincoli di stampabilità.

Una volta quindi scelti i componenti da stampare, passati i disegni degli stessi da file CAD a file .stl, caricati sul software "Perform", scelti gli orientamenti, dimensionato i supporti e massimizzato il layout di stampa, se il software non rivela errori si procede a caricare il tutto sulla stampante.

Dalla stampante manualmente si avvia la lavorazione additiva e si attende affinché la macchina non avrà finito di stampare.



Figura 5. Form 3 di FormLabs con cui sono stati eseguiti i modelli per la realizzazione del giunto.

2.2.2 Operazioni post stampa

Terminata la stampa si sgancia la piattaforma alla quale sono attaccati i prototipi e le relative strutture di base dei supporti. Una volta rimossi da tale piattaforma la prima operazione da compiere, per un corretto trattamento dei pezzi, consiste nel lavaggio degli stessi in alcool isopropilico (IPA). Si utilizzano due vaschette(fig.6) contenenti tale alcool con una concentrazione al 90% in cui si immergono i prototipi per 10 minuti in ognuna di essa, agitandole di volta in volta per ottimizzare il lavaggio. E' da notare che deve essere sempre rispettata la sequenza delle vaschette in modo che l'IPA contenuto nella seconda sia sempre più pulito.



Figura 6. Vaschette contenenti IPA per il lavaggio dei modelli

Una volta estratte dal bagno, le stampe vengono lasciate asciugare e successivamente si procede alla fase di indurimento. Tale operazione viene eseguita all'interno di un forno ad UV(fig.7).



Figura 7. Forno ad UV utilizzato per asciugare ed indurire i modelli.

Si possono così rimuovere i supporti con delle tenaglie e successivamente si passa alla fase di rifinitura del prototipo in cui si eliminano i residui dei sostegni tramite della carta abrasiva di diverse grane fino ad arrivare alla finitura superficiale desiderata.

3. GIUNTO UNIVERSALE RICONFIGURABILE



Figura 8. copia fisica giunto universale riconfigurabile

3.1 Principio di funzionamento e configurazioni A e B

E' possibile utilizzare diversi metodi per modificare la struttura cinematica di un manipolatore: il più comune è l'uso di giunti bloccabili, cioè giunti con alcuni gradi di libertà (GDL) uno dei quali può essere bloccato selettivamente per modificare la mobilità risultante.

In tale manipolatore il meccanismo di bloccaggio viene utilizzato per avere due configurazioni differenti, che in questa trattazione sono chiamate:

- Configurazione A;
- Configurazione B.

Nella configurazione A è permessa la prima rotazione($r_{1,i}$) della coppia sferica e rappresenta il grado di libertà attuato relativo alla gamba i -esima. La seconda rotazione($r_{2,i}$) è bloccata, mentre la terza($r_{3,i}$) è libera.

Nella configurazione B la prima rotazione($r_{1,i}$) è bloccata, la seconda($r_{2,i}$) è attuata, mentre la terza anche in questo caso risulta libera($r_{3,i}$).

Come verrà riportato in seguito, il giunto in configurazione A permette di ottenere movimenti dell'end-effector di traslazione pura, mentre la configurazione B permette di ottenere movimenti di rotazione pura, entrambi senza ulteriori modifiche alla disposizione dei giunti passivi come nel caso del 3-CRU.

Tale configurazione permette quindi le rotazioni attorno agli assi $r_{2,i}$; $r_{3,i}$ che portano ad avere nella piattaforma finale movimenti di rotazione pura.

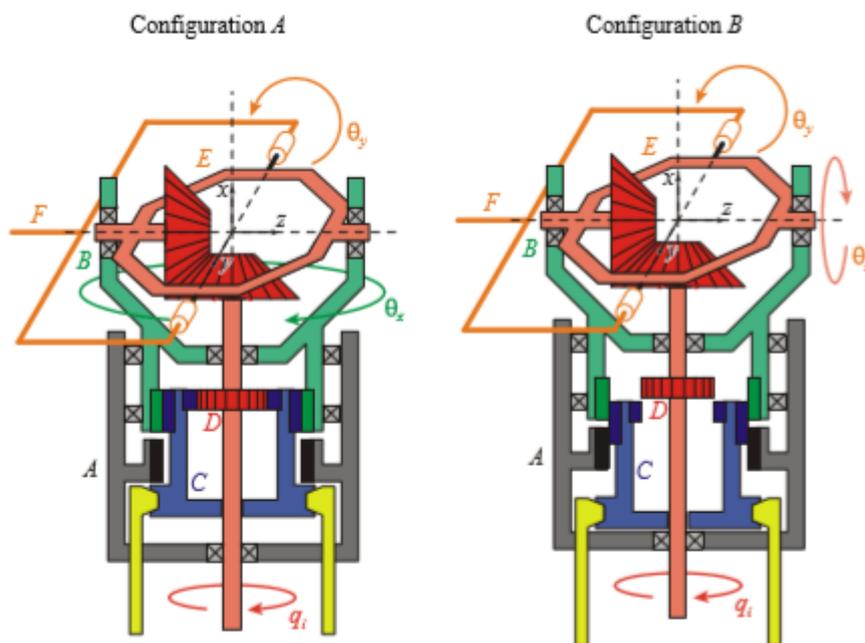


Figura 9. Concept design del giunto

Come visibile dal concept mostrato in figura 9, il giunto sfrutta degli ingranaggi conici i quali sono molto vincolanti in termini di dimensione e assemblaggio: si è perciò scelto, grazie alla nascita di nuove tecnologie di produzione additiva per la prototipazione di piccole parti, di adottare forme diverse per la progettazione di tali ingranaggi. Più precisamente si sono adottati degli ingranaggi ottenuti da gusci sferici al fine di massimizzare lo spazio disponibile all'interno del giunto: in tal modo è stato così possibile prevedere l'alloggiamento per il meccanismo del cursore.

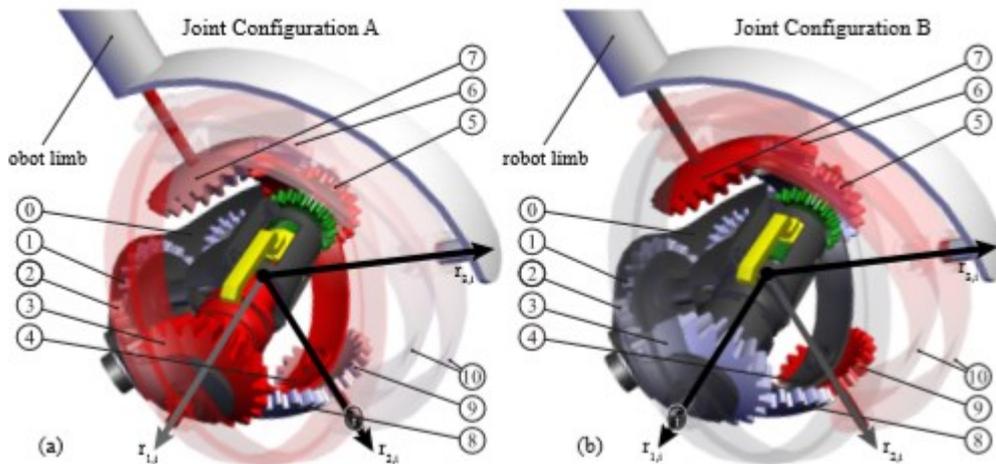


Figura 10. Giunto nelle due configurazioni A e B.

- Configurazione A: il motore della gamba è fissato al telaio 0 (grigio scuro in fig.10) ed è collegato all'ingranaggio conico 1 il quale a sua volta fa ruotare gli ingranaggi 2 e 3. In tale configurazione, il meccanismo di bloccaggio, che viene descritto nel paragrafo successivo, collega l'ingranaggio 3 al corpo 4 (colorato in rosso nella figura10). A questo punto, la rotazione dell'ingranaggio 3 fa ruotare la gamba del robot attorno l'asse $r_{1,i}$, come richiesto dalla configurazione A. L'ingranaggio 5, che ruota solidalmente a 3, non influisce sulla mobilità poiché non è collegato al corpo 4, così come gli ingranaggi 6, 7, 8 e 9. La rotazione attorno l'asse $r_{2,i}$ è impedita dato che gli ingranaggi 7 e 9 sono collegati alla forcella 10. Tali ingranaggi, infatti, ruotano attorno $r_{1,i}$ per mezzo del movimento del corpo 4 e in questo modo viene evitata la rotazione intorno ai propri assi. Infine, riguardo alla rotazione intorno $r_{3,i}$, essa non risulta in alcun modo controllata, proprio come richiesto dalla cinematica del robot.
 - Configurazione B: il meccanismo di bloccaggio ora collega il corpo 4 al telaio 0 evitando così la rotazione attorno $r_{1,i}$. Il movimento, come prima, parte dall'ingranaggio 1 e viene trasmesso a 2,3 e successivamente a 8 e 9. In tal caso, la rotazione dell'ingranaggio 9 mette in rotazione la forcella 10 attorno l'asse $r_{2,i}$, esattamente come richiesto dalla cinematica in configurazione B. Gli ingranaggi 5,6 e 7 lavorano esattamente allo stesso modo fornendo un movimento simmetrico alla forcella 10. Anche qui, la rotazione attorno l'asse $r_{3,i}$ risulta libera.
- Ricapitolando, nel giunto la rotazione sempre consentita è quella rispetto l'asse della prima coppia rotoidale ($r_{3,i}$) del giunto che collega la gamba al giunto universale stesso.

Le libertà delle rotazioni attorno agli altri 2 assi ($r_{1,i}$, $r_{2,i}$), perpendicolari a quest'ultimo, è decisa dalla configurazione A o B in cui si trova il giunto:

- Configurazione A: oltre la rotazione attorno alla prima coppia rotoidale ($r_{3,i}$) è consentita anche la rotazione attorno all'asse del meccanismo di bloccaggio($r_{1,i}$). La rotazione non consentita è quindi quella rispetto l'asse perpendicolare a quello del meccanismo di bloccaggio($r_{2,i}$). Si ottiene così un movimento di pura rotazione dell'end-effector.
- Configurazione B: oltre la rotazione attorno all'asse della prima rotoidale ($r_{3,i}$) è consentita anche la rotazione attorno all'asse perpendicolare a quello del meccanismo di bloccaggio ($r_{2,i}$). La rotazione impedita è quindi quella rispetto l'asse del meccanismo di bloccaggio($r_{1,i}$). Otteniamo così un movimento di pura traslazione dell'end-effector.

La scelta di una delle due configurazioni avviene tramite un particolare meccanismo di bloccaggio il quale ha due settaggi, ogni settaggio corrisponde ad una configurazione.

Questo meccanismo di bloccaggio permette il passaggio da una configurazione all'altra tramite uno switch actuator a cui è collegato. Quest'ultimo è una sorta di motore (elettrico) che serve a mettere in moto un ingranaggio conico il quale a sua volta cambia la disposizione del meccanismo di bloccaggio permettendo il passaggio da una configurazione all'altra, esso è controllato elettronicamente.

Per quanto riguarda la movimentazione del giunto, essa è garantita da un limb motor (motore degli arti) il quale è un motore elettrico che serve quindi a mettere in moto il giunto e a garantire le rotazioni dello stesso.

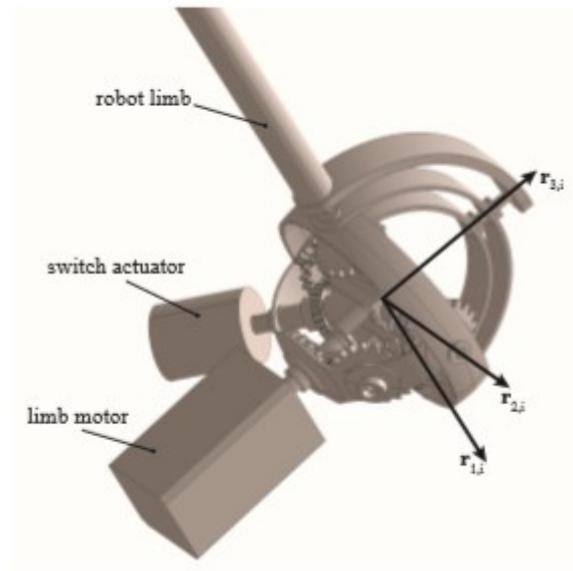


Figura 11. Disegno del giunto in cui sono evidenziati i motori elettrici che servono al suo funzionamento: limb motor e switch actuator.

3.2 Meccanismo di bloccaggio

Come già definito in precedenza il meccanismo di bloccaggio oggetto della tesi è progettato in modo da consentire alternativamente il movimento del primo e del secondo giunto rotoidale al fine di fornire alla piattaforma mobile rispettivamente un moto di rotazione pura o di traslazione pura come già precedentemente spiegato.

L'intero funzionamento del giunto riconfigurabile si basa quindi su un meccanismo di bloccaggio che è in grado di bloccare alternativamente il corpo 4 all'ingranaggio conico 3 (corrispondente alla configurazione A) oppure al telaio 0 (configurazione B). Tale meccanismo, che è mostrato in dettaglio nella figura 12, per entrambe le configurazioni A e B, funziona nel seguente modo:

- Configurazione A: l'azionamento parte dall'ingranaggio *a*, che muove l'ingranaggio *b* il quale è saldamente collegato ad una vite. Tale vite fa traslare un dado che è collegato alla forcella *c* che a sua volta spinge il cursore *d*. Lo scopo è quello di vincolare l'albero scanalato insieme all'ingranaggio conico *f* che corrisponde all'ingranaggio 3 in figura 10 la cui funzione è stata precedentemente spiegata. Si può inoltre notare, che l'albero scanalato è una parte del corpo indicato con il numero 4
- Configurazione B: in questo caso, il cursore *d* vincola l'albero e insieme a *g* il quale è vincolato al telaio. In tal modo il corpo 4 (che comprende l'albero *e*) di figura 10 risulta collegato al telaio come richiesto dalla cinematica del robot.

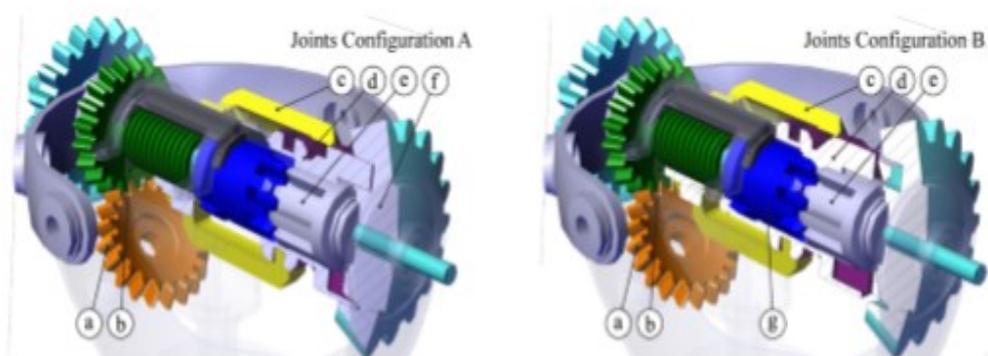


Figura 12. Meccanismo di bloccaggio in entrambe le configurazioni

Si precisa che, come già detto, il meccanismo di bloccaggio si sposta da una configurazione all'altra grazie ad un attuatore dedicato (switch actuator) che deve essere il più semplice possibile. Il compito che deve soddisfare, infatti, è semplicemente quello di ruotare l'ingranaggio a in due posizioni note (corrispondenti alle due configurazioni), dato che non è necessario assumere posizioni intermedie.

3.2.1 Rendimento meccanismo di bloccaggio

Essendo la funzione del meccanismo di bloccaggio puramente quella di switchare da una configurazione all'altra, senza quindi dover assumere posizioni intermedie, il calcolo del suo rendimento è necessario solo per verificare che esso sia maggiore di zero.

In quanto se fosse pari a zero il meccanismo non potrebbe essere messo in moto dallo switch actuator e di conseguenza non avremmo la possibilità di switchare tra le due configurazioni.

Il meccanismo di bloccaggio è formato da una ruota dentata conica (a), la quale è mossa dallo switch actuator il quale abbiamo visto essere un motore elettrico. La ruota (a) mette in rotazione la ruota (b) la quale è solidale ad una vite con filetto a sezione trapezoidale. Questa vite ha lo scopo di muovere i cursori (c) tramite una coppia elicoidale (vite-cursore). Ed è il movimento del cursore che permette lo switch da una configurazione all'altra, poichè nel caso della configurazione A rende la ruota (f) solidale al meccanismo di bloccaggio e quindi a tutto il telaio, nel caso della configurazione B avremo che il cursore svincola il meccanismo dal vincolo di rigidità con la ruota f e si va a collegare con l'elemento (c) in modo da collegare il telaio alla base del robot.

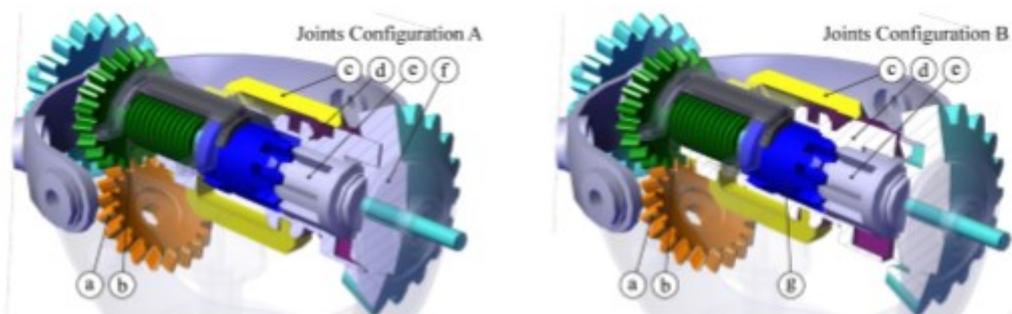


Figura 13. meccanismo di bloccaggio

Innanzitutto, procediamo con il calcolo del rendimento della coppia elicoidale che permette quindi la traslazione del cursore(c).

Si faccia riferimento, ad una vite caratterizzata da un filetto di tipo generico (fig.14); si noti che i 3 angoli mostrati, cioè l'angolo ζ che la normale al filetto forma con l'asse z, l'angolo d'inclinazione dell'elica media γ_m e quello d'inclinazione del filetto θ rispetto al piano trasversale, non sono indipendenti ma sono legati dalla relazione:

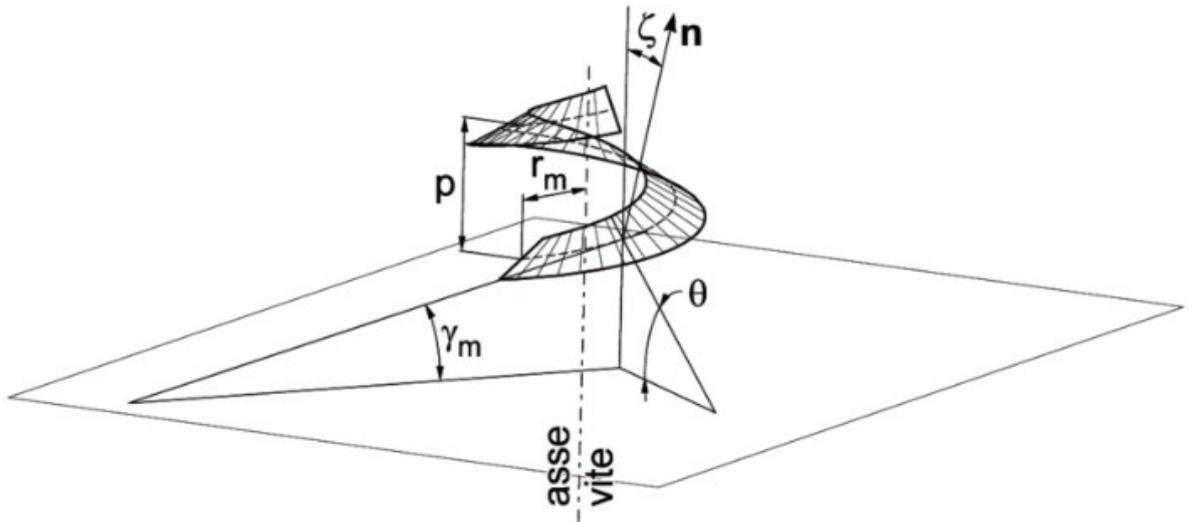


Figura 14. Vite con filetto di tipo generico

$$\tan^2(\xi) = \tan^2(\gamma_m) + \tan^2(\theta)$$

L'espressione del momento di serraggio può ancora essere posta in una forma simile al caso di filetto rettangolare:

$$M = Q \cdot r_m \cdot \tan(\gamma_m + \phi_1), \text{ (dove } Q \text{ è la spinta assiale)}$$

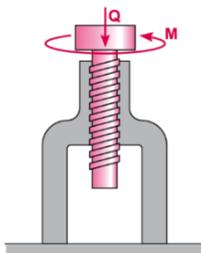


Figura 15.
collegamento
vite madre-vite

Introducendo un coefficiente (e un angolo) di attrito virtuale:

$$f_1 = \tan(\phi_1) = \cos(\gamma_m) \cdot \cos(\xi) \cdot \tan(\phi)$$

Si noti che per angoli d'elica piccoli $\cos(\gamma_m) \approx 1$ e $\cos(\xi) \approx \cos(\theta)$, per cui si può assumere:

$$f_1 \approx \frac{f}{\cos \theta} \mapsto \phi_1 \approx \arctan\left(\frac{\tan \phi}{\cos \theta}\right)$$

Il rendimento della coppia può essere dunque calcolato come:

$$\eta_{ELI} = \frac{M_0}{M} = \frac{\tan(\gamma_m)}{\tan(\gamma_m + \phi_1)}$$

Sapendo che:

- r_m = raggio medio elica = 6,5mm
- γ_m = angolo di inclinazione del filetto rispetto alla normale
- p = passo dell'elica = 2mm
- ϕ = angolo di attrito dinamico
- ϕ_1 = angolo di attrito virtuale
- θ = angolo di inclinazione filetto = 10°
- f_1 = coefficiente di attrito virtuale
- ξ = l'angolo che la normale al filetto forma con l'asse z (asse della vite)

Di seguito sono riportati i calcoli:

$$\gamma_m = \arctan\left(\frac{p}{2\pi r_m}\right) = \arctan\left(\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 6,5}\right) = 2,8^\circ$$

$$\phi = \arctan(f_d) = \arctan(0,3) = 16,7^\circ$$

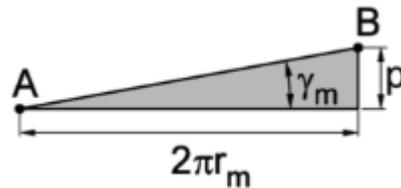
$$\tan^2(\xi) = \tan^2(\gamma_m) + \tan^2(\theta) = \tan^2(2,8) + \tan^2(10) = 0,183$$

$$\xi = \arctan(0,272) = 10,37^\circ$$

$$f_1 = \tan(\phi_1) = \frac{\cos(\gamma_m) \cdot \tan(\phi)}{\cos(\xi)} = \frac{\cos(2,8) \cdot \tan(16,7)}{\cos(10,37)} = 0,305$$

$$\phi_1 = \arctan(f_1) = \arctan(0,305) = 16,96^\circ$$

$$\eta_{ELI} = \frac{M_0}{M} = \frac{\tan(\gamma_m)}{\tan(\gamma_m + \phi_1)} = \frac{\tan(2,8)}{\tan(2,8 + 16,96)} = 0,136$$



Abbiamo trovato quindi il rendimento della coppia elicoidale che dobbiamo moltiplicare per il rendimento dell'accoppiamento dentato che c'è tra le ruote (a) e (b) al fine di ottenere il rendimento complessivo del meccanismo di bloccaggio.

Per quanto riguarda l'accoppiamento dentato vedremo successivamente che:

$$\eta_{RD} = 0,91$$

considerando che le due coppie cinematiche sono in serie il rendimento complessivo sarà dato da:

$$\eta_{MB} = \eta_{ELI} \cdot \eta_{RD} = 0,136 \cdot 0,91 = 0,123 \rightarrow 12,3\%$$

3.2.2 Suggestimenti per migliorare il rendimento

Il valore di rendimento del meccanismo di bloccaggio è basso, ma accettabile, questo poiché la coppia elicoidale lavora per attrito e di conseguenza le perdite per lo stesso sono elevate.

Il nostro scopo era solo di verificare che fosse maggiore di zero in modo tale da permetterne il moto, però, al fine di ridurre gli sprechi di energia abbiamo pensato ad alcune soluzioni per migliorare il rendimento del meccanismo di bloccaggio.

Dato che l'influenza più negativa la dà la coppia elicoidale ci siamo soffermati su di essa, trovando tre possibili soluzioni,

1. Abbiamo notato che essendo il rendimento dipendente da γ_m , dobbiamo fare in modo che sia il più grande possibile, quindi essendo proporzionale al passo bisognerebbe scegliere un valore di passo maggiore per alzare il rendimento. Tenendo in considerazione che il meccanismo di bloccaggio non deve assumere posizioni intermedie, allora la scelta del passo a nostro parere rimane arbitraria, cioè variandolo non varierebbe nulla in termini di funzionamento dello stesso. Di conseguenza aumentandolo ne trarremmo solamente benefici in termini di aumento di rendimento.
2. Inoltre, sarebbe una buona soluzione quella di scegliere un materiale con un coefficiente di attrito dinamico minore, in modo tale da diminuire l'attrito che si

genera tra le superfici in contatto e dunque aumentare il rendimento. Uno su tutti si è pensato al Nylon, materiale utilizzabile per la manifattura additiva e con coefficiente di attrito dinamico 3 volte inferiore rispetto alla resina fotopolimerica (Grey V4) utilizzata per la realizzazione delle parti del giunto.

$$f_d(\text{GreyV4}) = 0,3$$

$$f_d(\text{Nylon}) = 0,1$$

L'utilizzo di tale materiale porterebbe a:

$$\eta_{RD} = 0,97 (> 0,91)$$

$$\phi_1 = \arctan(f_1) = \arctan(0,1) = 5,71^\circ$$

$$\eta_{ELI} = \frac{M_0}{M} = \frac{\tan(\gamma_m)}{\tan(\gamma_m + \phi_1)} = 0,33 (> 0,136)$$

$$\eta_{MB} = \eta_{ELI} \cdot \eta_{RD} = 0,33 \cdot 0,91 = 0,32 \rightarrow 32\% (> 12,3\%)$$

Quindi utilizzando il Nylon come materiale per la realizzazione delle RD e del meccanismo di bloccaggio, avremmo più di un raddoppiamento del rendimento, il quale porterebbe ad avere minori sprechi di energia e dunque maggior risparmio.

3. Sarebbe infine utile anche diminuire ancor più l'angolo di inclinazione dei filetti al fine di aumentare il rendimento della coppia elicoidale.

4. CUSCINETTI

4.1 Introduzione generale sui cuscinetti volventi

Le coppie cinematiche sono componenti fondamentali per la realizzazione delle macchine, per cui non meraviglia che ne vengano realizzate in un'ampia gamma di tipologie e con differenti prestazioni e che il loro studio costituisca un argomento importante per la meccanica delle macchine.

Quando è necessario supportare un albero o perno (coppia rotoidale portante o radiale) è possibile utilizzare *boccole* (dette anche bronzine o bussole) in bronzo, metalli bianchi o materiali autolubrificanti; esse sono costituite da un cilindro cavo dalla parete molto sottile, che aderisce ad uno dei due membri della coppia mentre ruota, con attrito relativamente basso, rispetto al secondo; il contatto è sempre radente in assenza di lubrificazione o, più spesso, in condizioni di lubrificazione limite.

Nelle applicazioni più importanti è possibile ricorrere a cuscinetti a lubrificazione idrostatica o idrodinamica, in cui la presenza di un meato riempito di olio in pressione impedisce il contatto diretto tra le superfici della coppia e determina minori perdite per attrito. Tuttavia, i cuscinetti attualmente più diffusi sono quelli volventi, che presentano un attrito inferiore alle bronzine e una maggiore durata pur mantenendo una elevata capacità di carico: essi sono commercialmente disponibili in una grandissima varietà di tipologie e dimensioni.

Questo poiché l'attrito che si genera nell'utilizzo di cuscinetti è di tipo volvente, mentre quello che si genera nell'utilizzo di boccole è di tipo radente, ove il coefficiente d'attrito volvente è più piccolo di diversi ordini di grandezza rispetto l'altro.

La ricerca di soluzioni costruttive mirate all'abbassamento dell'attrito nelle coppie cinematiche ha portato allo sviluppo di una vasta famiglia di componenti meccanici, detti cuscinetti volventi, in cui l'attrito radente dovuto allo scorrimento relativo tra superfici viene sostituito dall'attrito volvente di elementi che rotolano. Il principio generale consiste nell'utilizzo di elementi volventi, quali sfere, rulli, rulli conici, rulli a botte o rullini, interposti

tra due anelli concentrici. Il rotolamento degli elementi volventi permette una rotazione relativa tra i membri solidali rispettivamente all'anello interno e a quello esterno (es. albero e telaio).

In figura 16 vengono mostrati i componenti fondamentali, dove la gabbia distanziatrice impedisce il contatto tra gli elementi volventi e garantisce una adeguata equispaziatura per una corretta distribuzione del carico. Oltre ad un attrito molto basso, i cuscinetti volventi presentano il vantaggio di una elevata regolarità: infatti il coefficiente di attrito volvente può essere considerato indipendente da fattori quali il carico e la velocità, al contrario di quanto accade nei cuscinetti radenti.

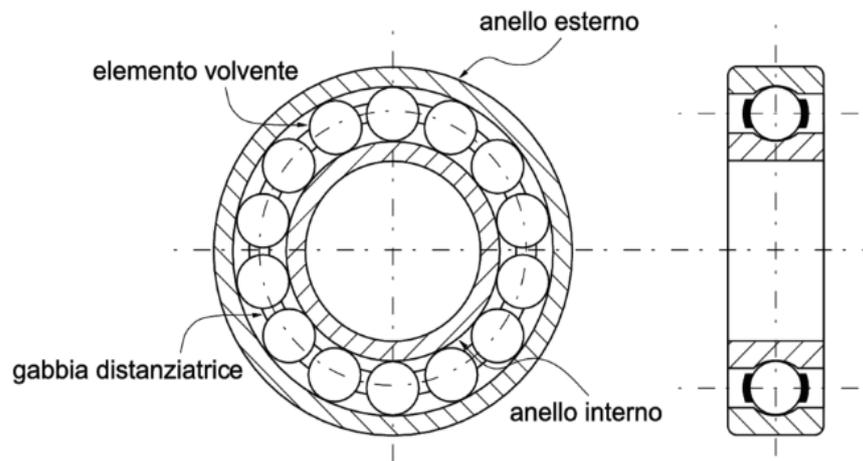


Figura 16 esempio di cuscinetto volvente radiale a sfere in cui si notano tutti gli elementi facenti parte del dispositivo.

I cuscinetti volventi si suddividono in base alla direzione preferenziale di carico in:

- radiali (o portanti);
- assiali (o spingenti);
- obliqui (o portanti-spingenti).

I cuscinetti radiali (fig.17.a, fig.18.a) supportano carichi prevalentemente perpendicolari all'asse di rotazione del cuscinetto mentre quelli assiali (fig.17.b) supportano carichi diretti lungo l'asse di rotazione; i cuscinetti obliqui (fig.17.c, fig.18.b) si utilizzano in presenza di carichi con entrambe le componenti. Generalmente i cuscinetti assiali e obliqui riescono a contrastare i carichi assiali in un unico verso e sono quindi montati in coppia (con orientazione opposta) per garantire un'azione simmetrica. Ognuna delle precedenti tipologie di cuscinetti può essere a sfere o a rulli. Inoltre, esistono soluzioni costruttive più

complicate, come ad esempio i cuscinetti con due corone di sfere (o rulli), i cuscinetti orientabili in cui la particolare forma degli elementi volventi e delle piste permette limitati disallineamenti angolari tra gli anelli (fig.17.d, fig.18.c) e i cuscinetti a rullini (fig.18.d) in cui gli elementi volventi rotolano direttamente sulla superficie dell'albero garantendo un basso ingombro.

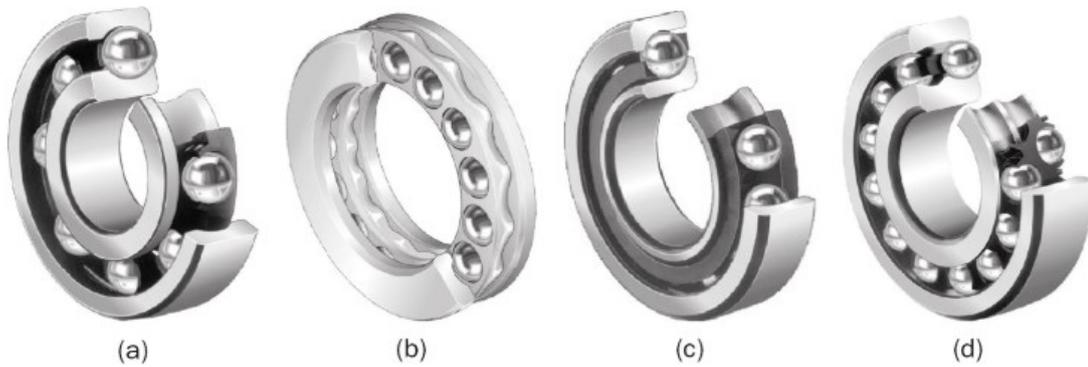


Figura 17. esempi di cuscinetti a sfere; (a) radiale; (b) assiale; (c) obliquo; (d) radiale orientabile a due corone.

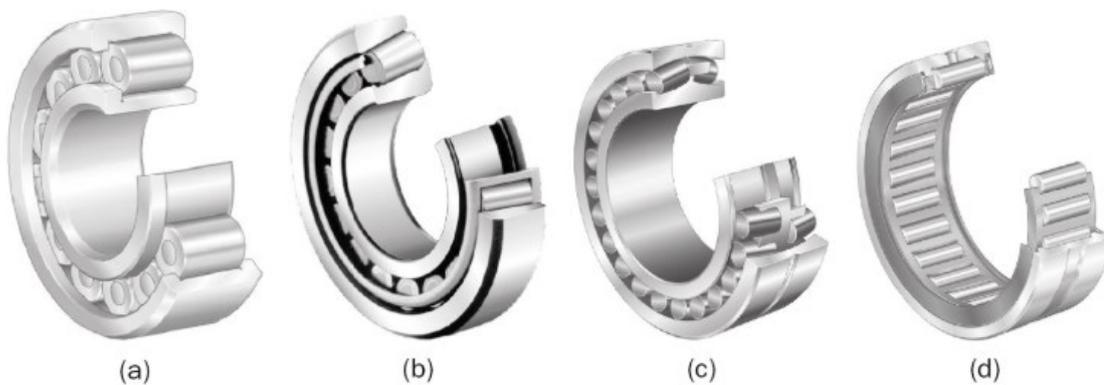


Figura 18. esempi di cuscinetti a rulli; (a) radiale; (b) obliquo a rulli; (c) radiale orientabile a due corone; (d) gabbia a rullini radiale.

4.2 Attrito nei cuscinetti

Abbiamo visto come i cuscinetti sono dei dispositivi meccanici che nascono per limitare l'attrito tra due elementi in moto relativo rotatorio tra di loro, ma essendo l'attrito sempre presente in natura, anche i cuscinetti non ne sono esenti, di seguito vedremo la teoria che sta dietro il calcolo dei rendimenti di queste coppie cinematiche.

Si consideri un caso tipico in cui il cuscinetto ha l'anello esterno solidale al telaio ($\omega_e = 0$). Assegnato quindi il verso di rotazione dell'anello interno, rimane definito univocamente il verso di rotazione dell'elemento volvente.

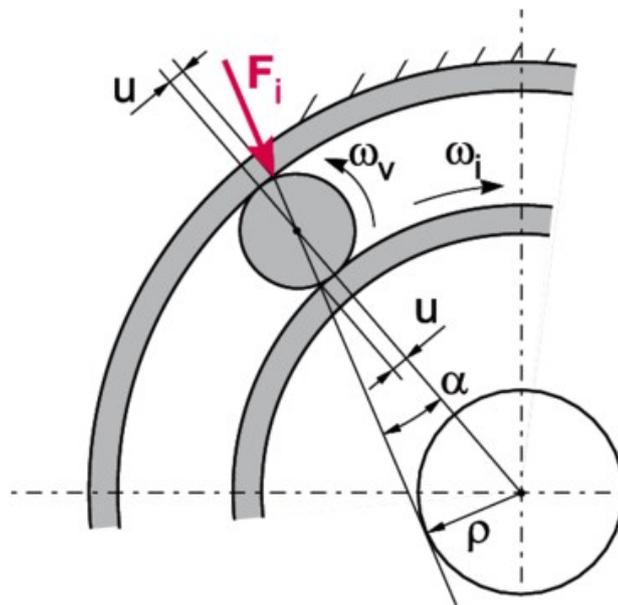


Figura 19. si nota come il carico applicato ai singoli elementi sia inclinato di un angolo α rispetto la direzione radiale.

A seguito della deformazione elastica dei membri, il carico applicato ai singoli elementi si inclina di un angolo α rispetto alla direzione radiale e il punto di applicazione si sposta di una quantità u nella direzione di avanzamento (figura 19). Dalla geometria del problema si determina facilmente il coefficiente di attrito volvente:

$$r \operatorname{sen} \alpha \approx u \quad \operatorname{sen} \alpha = \frac{u}{r} = f_v$$

Se si estende l'analisi a tutti gli elementi volventi si può notare che l'insieme delle rette di azione lungo le quali gli anelli si trasmettono le forze involuppano una circonferenza il cui raggio vale:

$$\rho = R_g \operatorname{sen} \alpha = R_g f_v$$

e che possiamo definire come circonferenza di attrito volvente. È interessante a questo punto valutare quali sono i momenti resistenti generati da un cuscinetto volvente. Il momento resistente generato dall'attrito volvente vale:

$$M_v = \sum_i F_i \rho = \sum_i \frac{P_i}{\cos \alpha} R_g f_v$$

In condizioni di equivalenza del carico Q si nota che, poiché il coefficiente di attrito volvente è da uno a due ordini di grandezza inferiore al coefficiente di attrito radente, anche la resistenza alla rotazione del cuscinetto volvente è molto minore rispetto a quella del cuscinetto radente:

$$f_v \ll f_d \rightarrow R_g f_v \ll R_g f_d \rightarrow M_v \ll M_p$$

Tutto ciò è dal punto di vista analitico esatto, però a noi serviva qualcosa di più immediato per il calcolo delle perdite di attrito nei cuscinetti, quindi si è optato per il metodo presente sul catalogo online della SKF, azienda svedese che si occupa della realizzazione di cuscinetti volventi, tenute, mecatronica, servizi e sistemi di lubrificazione, uno dei maggiori fornitori a livello mondiale di prodotti, soluzioni e servizi nel proprio settore.

Innanzitutto, per il nostro giunto si è optato per dei cuscinetti radiali a sfere, dato che le forze in gioco sono basse e di conseguenza non avevamo bisogno di cuscinetti a rulli che ci conferissero rigidità.

L'attrito nel cuscinetto non è costante e dipende da alcuni fenomeni tribologici (la tribologia è la scienza che studia l'attrito, la lubrificazione e l'usura, ovvero tutti i problemi che possono presentarsi nel moto relativo tra superfici interagenti sottoposte a carico) che si verificano nel film di lubrificante tra elementi volventi, piste e gabbie.

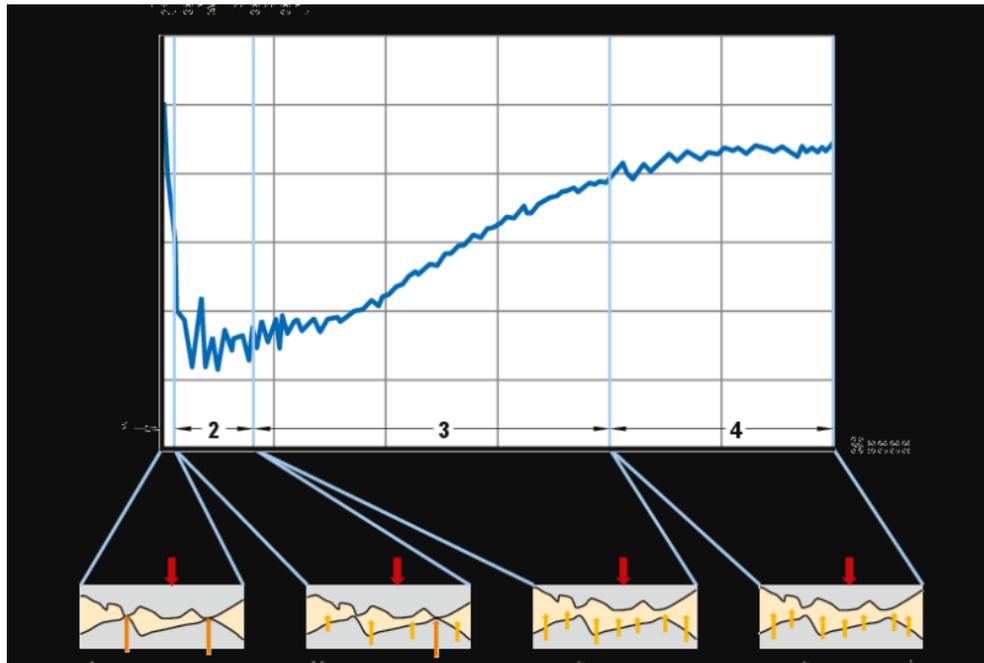


Figura 20. diagramma che mostra le variazioni dell'attrito in relazione alle velocità, di un cuscinetto con un determinato lubrificante.

Il diagramma in fig.20 mostra le variazioni dell'attrito in relazione alle velocità, in un cuscinetto con un determinato lubrificante. Si distinguono quattro zone:

- Zona 1 – Condizioni di lubrificazione dello strato limite, in cui solo le asperità sopportano il carico, quindi l'attrito tra superfici in movimento è di notevole entità.
- Zona 2 – Condizioni di lubrificazione mista, in cui un film di olio di separazione sopporta una parte del carico, con meno asperità in contatto, quindi l'attrito diminuisce.
- Zona 3 – Condizioni di lubrificazione a film completo, in cui il film di lubrificante sopporta il carico, ma con maggiori perdite nel lubrificante, quindi l'attrito aumenta.
- Zona 4 – Lubrificazione a film completo con effetti termici e di carenza di lubrificante ad alte velocità, in cui i fattori di surriscaldamento per i fenomeni da taglio nel film di lubrificante e la riduzione dell'apporto cinematico del lubrificante compensano parzialmente l'aumento dell'attrito per l'aumento del film di lubrificante, quindi l'attrito si uniforma.

4.2.1 Modello SKF per il calcolo del momento d'attrito

Nel modello SKF per il calcolo dell'attrito nel cuscinetto, il momento di attrito totale M si ottiene da quattro fonti:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{tenuta} + M_{drag}$$

dove:

M_{rr} il momento di attrito da rotolamento e comprende gli effetti di carenza di lubrificante e di surriscaldamento per fenomeni da taglio [Nmm]

M_{sl} il momento di attrito da strisciamento e comprende gli effetti sulla qualità delle condizioni di lubrificazione [Nmm]

M_{tenuta} il momento di attrito delle tenute integrate [Nmm]

Quando i cuscinetti sono muniti di tenute striscianti, le perdite per attrito derivanti dalle tenute possono superare quelle generate dal cuscinetto.

M_{drag} il momento di attrito da perdite da trascinamento, sbattimento, spruzzi ecc. in una lubrificazione a bagno d'olio [Nmm]

Calcolare i valori per queste quattro fonti di attrito è molto complesso e richiede conoscenze superiori a quelle di un laureando triennale in ingegneria meccanica, motivo per cui, per l'esecuzione di questo calcolo ci si è serviti di un apposito algoritmo presente sul sito ufficiale della SKF e reso gratuito al pubblico, il quale tramite l'immissione dei dati tecnici del cuscinetto in questione e delle condizioni in cui opera ci permette di calcolare, tramite il calcolo delle quattro fonti di attrito sopracitate (M_{rr} , M_{sl} , M_{tenuta} , M_{drag}), il momento di attrito totale M .

Una volta noto il momento di attrito totale, M , si può calcolare la perdita di potenza da attrito nel cuscinetto con la formula:

$$P_{loss} = 1,05 \times 10^{-4} M n$$

Dove:

P_{loss} perdita di potenza da attrito nel cuscinetto [W]

M momento di attrito totale [Nmm]

n velocità di rotazione [giri/min]

4.2.2 Utilizzo dell'algoritmo

Innanzitutto, l'algoritmo presente sul sito della SKF ci fa scegliere il tipo di cuscinetto, singolo o doppio (figura 21):

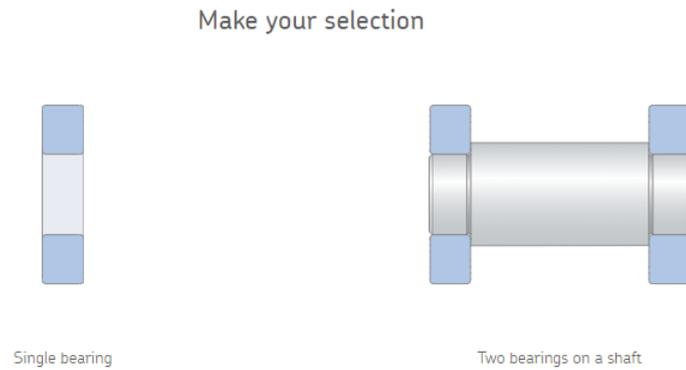
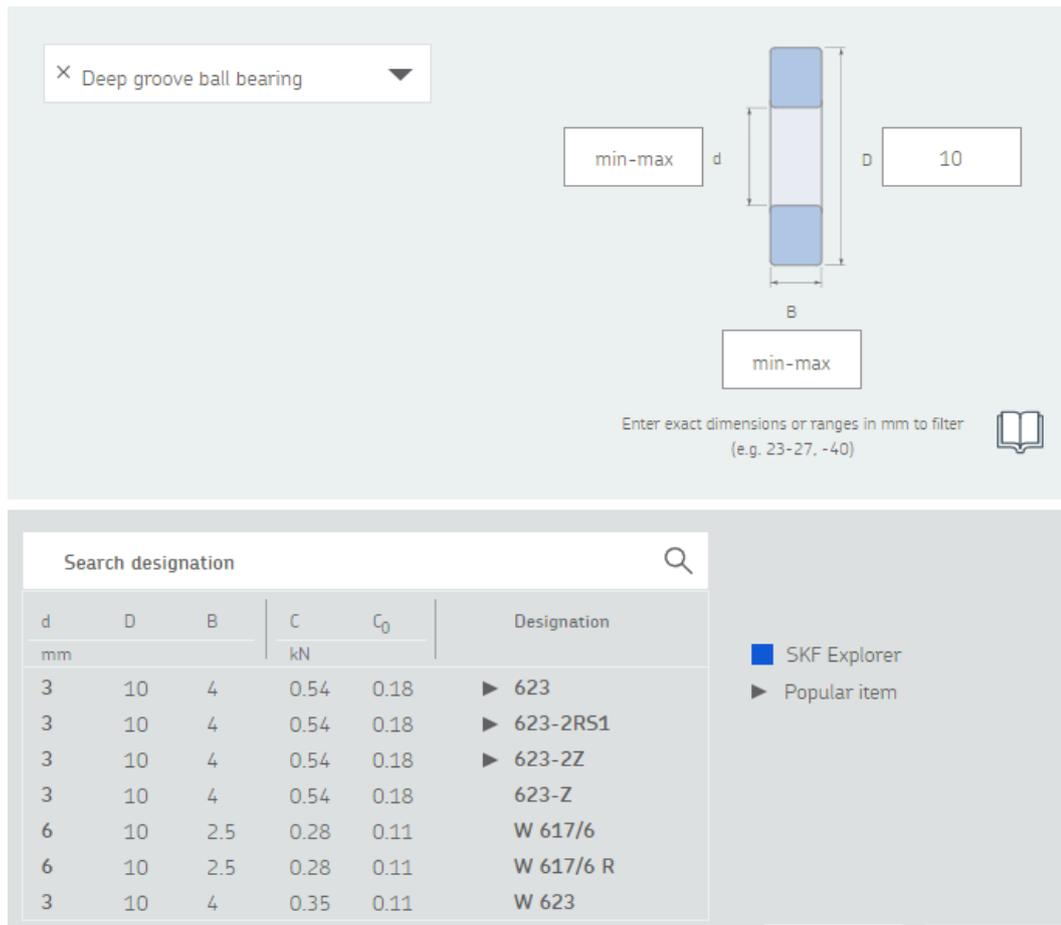


Figura 21. scelta del tipo di cuscinetto: singolo o doppio

Successivamente viene chiesto di inserire quelle che sono le dimensioni dei cuscinetti tra cui D_{ext} , D_{int} , B (spessore).

Una volta inseriti i dati tecnici, l'algoritmo ci propone di scegliere un cuscinetto dal loro catalogo (figura 22), naturalmente si è optato per la scelta del cuscinetto più simile al nostro. In realtà però essendo obbligato ad eseguire il tirocinio a distanza in via telematica, l'unica grandezza a cui si è riusciti a risalire è stata il $D_{ext}= 10\text{mm}$, per cui si è poi scelto dal catalogo l'623 il quale ha dei valori di D_{int} e B meglio approssimabili a quelli reali del nostro cuscinetto.



Search designation

d	D	B	C	C ₀	Designation
mm			kN		
3	10	4	0.54	0.18	▶ 623
3	10	4	0.54	0.18	▶ 623-2RS1
3	10	4	0.54	0.18	▶ 623-2Z
3	10	4	0.54	0.18	623-Z
6	10	2.5	0.28	0.11	W 617/6
6	10	2.5	0.28	0.11	W 617/6 R
3	10	4	0.35	0.11	W 623

SKF Explorer
▶ Popular item

Figura 22. Scelta del cuscinetto dal catalogo

Completato questo passaggio nella schermata successiva l'algoritmo ci propone di inserire innanzitutto i fattori da tenere in considerazione in funzione del calcolo del momento d'attrito, poi chiede i valori delle forze assiali e radiali agenti sui cuscinetti, il numero di giri a cui l'elemento solidale ruota ed infine la temperatura sia dell'anello interno che esterno del cuscinetto.

Per quanto riguarda la scelta dei fattori da tenere in considerazione si è optato per quelli suggeriti dall'algoritmo, per le temperature si è scelta la temperatura $T=20^{\circ}\text{C}$, infine per il numero di giri si è preso $n=10$ rpm, come fornito dalla tesi magistrale di Gianmarco Olivieri che ha lavorato prima di noi sul giunto.

I fattori sopra indicati sono in comune per tutti i tipi di cuscinetti presenti all'interno del nostro giunto, quello che varia tra le varie coppie cinematiche invece sono le forze assiali e radiali, in quanto esse dipendono dalla potenza che la ruota trasmette e di conseguenza essendo $w[\text{rad/s}]$ dato dalla relazione di proporzionalità con $n=10\text{rpm}$, dipendono dalla coppia che è applicata su ogni singola ruota.

Per il calcolo di queste due forze, assiali e radiali, si è partiti da un momento in uscita al motore elettrico pari alla media quadratica dei momenti in uscita dal motore:

$$M=1,04 \text{ Nm}$$

Il quale è un valore di coppia relativamente basso.

Poi tramite questo valore di coppia e tramite i rendimenti delle trasmissioni dati dagli attriti tra le RD si sono calcolati i vari valori di forze assiali e radiali per ogni cuscinetto.

I valori di forza ottenuti si sono dimostrati pressochè uguali per ogni cuscinetto presente all'interno del giunto.

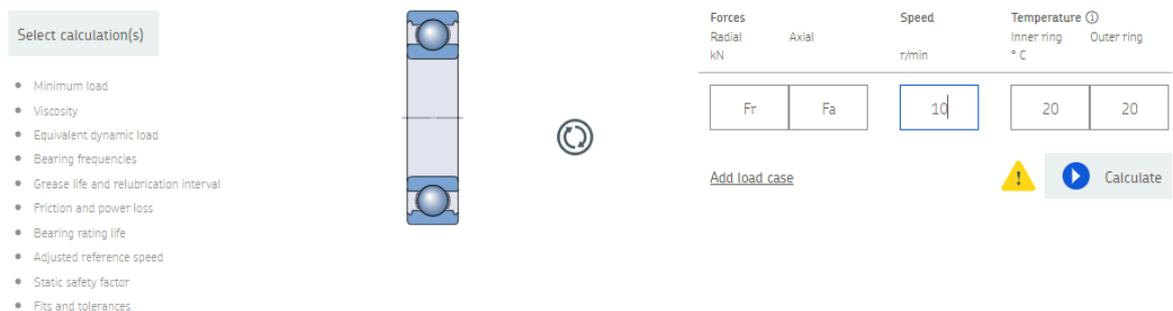


Figura 23. scelta condizioni di lavoro cuscinetti

Una volta inseriti anche i valori delle forze l'algoritmo calcola i valori dei vari momenti che contribuiscono al momento d'attrito totale generato dai cuscinetti. Calcola inoltre la potenza dissipata da ogni singolo cuscinetto.

FRICTION							
Designation	Frictional Moment		Friction sources				Power loss
	Total	At start 20-30°C and zero speed	Rolling	Sliding	Seals	Drag loss	
	M	M _{start}	M _{rr}	M _{sl}	M _{seal}	M _{drag}	P _{loss}
	Nmm						W
► 623	0.15	0.15	0.02	0.12	0	0	0

Figura 24. risultati algoritmo

4.2.3 Esempio di calcolo

Riportiamo di seguito un esempio di calcolo del rendimento per il cuscinetto su cui ruota la ruota 2:

$$D_{\text{ext}}=10\text{mm}$$

Scegliamo dunque dal catalogo: Cuscinetto 623 SKF

$$T_{\text{anello int}}=T_{\text{anello ext}}= 20^{\circ}\text{C}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{60} = 1,05 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Calcoliamo innanzitutto la coppia in entrata alla ruota 2 ($C_{\text{in ruota 2}}$) considerando le dissipazioni che avvengono a causa dell'accoppiamento dentato:

$$C_{\text{out ruota 1}}= M_{\text{media quadratica}} = 1,04 \text{ Nm}$$

$$P_{\text{in ruota 2}}= P_{\text{out ruota 1}} \eta_{\text{RD}} = C_{\text{out ruota 1}} \cdot \omega \cdot \eta_{\text{RD}} = 1,04 \cdot 1,05 \cdot 0,91 = 0,99 \text{ W}$$

$$C_{\text{in ruota 2}} = P_{\text{in ruota 2}} / \omega = 0,94 \text{ Nm}$$

Trovato il valore di coppia in entrata alla ruota 2 si procede con il calcolo delle forze agenti sulla ruota e dunque sul cuscinetto:

$$C = F_{c1} \cdot r \rightarrow F_c = C/r = 47 \text{ N}$$

$$\text{Raggio medio RD} = r = 20\text{mm}$$

$$F = F_c / \cos\theta = 50,02 \text{ N}$$

$$\theta = 20^{\circ}$$

$$F_n = F \sin\theta = 17,10 \text{ N}$$

$$F_a = F_n \cos\gamma = 15,80 \text{ N}$$

$$F_r = F_n \sin\gamma = 6,54 \text{ N}$$

Dove $\gamma = \text{met\grave{a} dell'angolo di incidenza tra le due RD in presa} = 45^{\circ}/2 = 22,5^{\circ}$

Immettendo questi valori all'interno dell'algoritmo otteniamo:

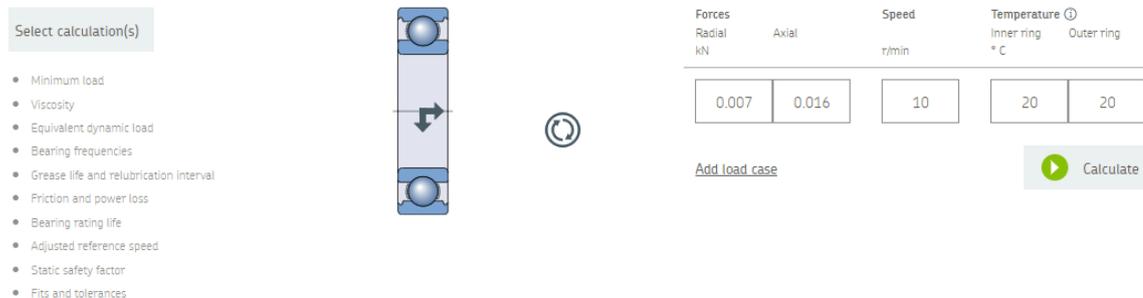


Figura 25. Esempio di calcolo

Designation	Frictional Moment		Friction sources				Power loss
	Total	At start 20-30°C and zero speed	Rolling	Sliding	Seals	Drag loss	$\frac{P_{loss}}{W}$
	M	M _{start}	M _{rr}	M _{sl}	M _{seal}	M _{drag}	
▶ 623	0.19	0.2	0.02	0.16	0	0	0

Figura 26. Risultati cuscinetto sulla ruota 2

Otteniamo dunque:

Momento d'attrito dovuto al cuscinetto = $M_a = 0,19\text{Nmm}$

Potenza dissipata per attrito: $P_{diss} = 0\%$

$M_{out\ 2} = M_{in\ 2} - M_a = 0,93981\ \text{Nm}$

$P_{out2} = P_{in2} \eta_{cuscinetto} \rightarrow \eta_{cuscinetto} = P_{out\ 2} / P_{in\ 2} = 0,93981/0,94 = 0,9998 \rightarrow 99,98\%$

Valore accettabile date le basse forze in gioco e considerando che i cuscinetti volventi sono elementi che nascono proprio per limitare l'attrito, dunque per essere funzionali devono avere rendimenti elevati poiché ciò sta a significare che le perdite per attrito che avvengono all'interno di essi sono minime.

Procedendo coi calcoli anche per gli altri cuscinetti abbiamo notato che i rendimenti di ognuno di essi è lo stesso ed è dunque pari a:

$$\eta_c = 99,98\%$$

L'unico problema riscontrato è stato sui cuscinetti delle ruote 3 e 5, appartenenti allo stesso asse, in cui si presenta un sistema iperstatico e quindi si potevano considerare le forze dovute ai momenti applicate su un unico cuscinetto o su entrambi i cuscinetti presenti sull'asse delle 2 ruote. In entrambi i casi si è constatato però che il valore di rendimento era uguale a quello sopra riportato, per cui abbiamo deciso di scegliere $\eta_c = 99,98\%$ come valore unitario di rendimento per tutti i cuscinetti presenti all'interno del giunto.

5. RUOTE DENTATE

5.1 Rendimento RD

Un ingranaggio è un meccanismo utilizzato per trasmettere un momento meccanico da un oggetto a un altro. Generalmente è costituito da due o più ruote dentate, che possono essere di uguale o diversa dimensione. Nel nostro caso tutte le ruote in presa che servono alla determinazione del rendimento delle varie configurazioni del giunto sono identiche e dunque hanno le stesse grandezze caratteristiche, lo stesso modulo, per permettere l'ingranamento, e di conseguenza un rapporto di trasmissione unitario ($\tau=1$).

La trasmissione tra ruote non dentate avviene grazie all'attrito che si sviluppa nell'accoppiamento: si parla quindi di ruote di frizione. Perché essa avvenga è perciò necessario che la forza periferica imposta dal momento meccanico che si vuole trasmettere non superi l'attrito dell'accoppiamento. Per la trasmissione di potenze più elevate si ricorre allora a ruote dentate, che si suddividono in più famiglie a seconda della base della sezione (circolari e no), dell'andamento di tale sezione con la dimensione perpendicolare al piano di sezione (cilindriche, coniche, toroidali), del profilo dei denti (evolvente, spirale, profili corretti).

Quindi essendo il loro principio di funzionamento per ostacolo e non per attrito, anche se in realtà l'attrito c'è ed è lui la causa delle dissipazioni che si hanno negli accoppiamenti dentati, il loro rendimento dipende solo da considerazioni geometriche e non dipende dai carichi e dunque le forze in gioco. Questa considerazione assume un'estrema importanza poiché permetterà di calcolare il rendimento degli accoppiamenti dentati indipendentemente da quelle che sono le forze e i momenti applicati sul giunto.

Per il nostro giunto si è optato per delle ruote dentate coniche a denti dritti con una forma sferoidale a guscio (figura 27), tutto ciò per limitare le specifiche d'ingombro del giunto e di conseguenza dell'intero robot, come già avevamo visto precedentemente.

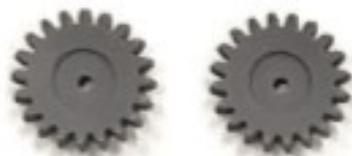


Figura 27. RD realizzate per la modellazione del giunto.

Per questo particolare tipo di ruote il rendimento è funzione del coefficiente di attrito dinamico del materiale utilizzato per realizzare le ruote, del numero di denti che abbiamo detto essere uguale per ogni ruota, e dell'angolo d'inclinazione tra le ruote facenti parte dell'accoppiamento dentato.

L'espressione della formula del rendimento è data da:

$$\eta_{RD} = 1 - f_d \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + \frac{2 \cos \alpha}{z_1 \cdot z_2}}$$

Dove:

- f_d coefficiente di attrito dinamico
- $z_1=z_2=20$
- $\alpha=45^\circ$

L'unica variabile resta il coefficiente di attrito dinamico del materiale utilizzato nella manifattura additiva per realizzare le ruote, la resina fotopolimerica Grey V4, il quale non era presente nei dati relativi alla resina fotopolimerica utilizzata.

5.1.1 Calcolo del coefficiente di attrito dinamico

Per quanto riguarda la determinazione del coefficiente d'attrito dinamico, Gianmarco Olivieri, ragazzo che ha lavorato sulla progettazione e prototipazione del giunto, per la sua tesi magistrale, ha progettato e realizzato un test per la valutazione del coefficiente stesso.

Ha pensato di progettare e prototipare con la stampa 3D un piano inclinato regolabile, che è stato realizzato tramite l'ausilio di un software CAD, con cui è stato possibile cambiare di volta in volta l'inclinazione, al fine di ottenere l'angolo α critico.

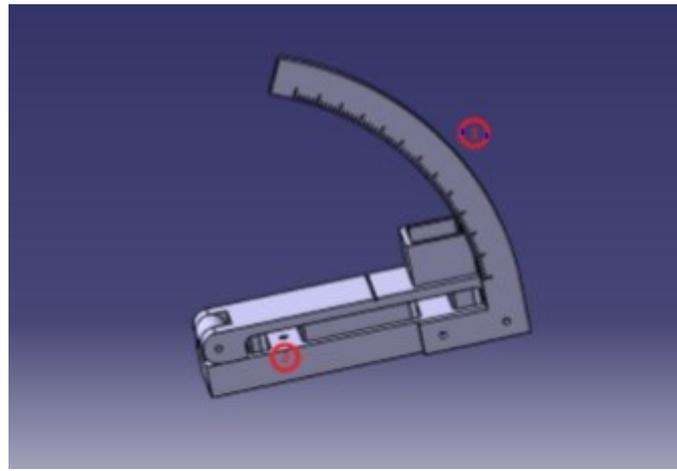


Figura 28. file Catia del piano inclinato regolabile realizzato tramite la manifattura additiva.

Una volta progettato il piano, con l'ausilio di banali equazioni di fisica si è trovato la formula per il calcolo del coefficiente d'attrito statico tramite l'angolo di moto incipiente, ovvero l'angolo da dare al piano inclinato per essere nella situazione critica per il blocchetto di resina. Dove con situazione critica si intende una condizione instabile in cui anche una minima forza applicata al corpo servirebbe a far vincere l'attrito statico tra il piano ed esso e quindi generare il moto dello stesso.

La formula per la determinazione del coefficiente d'attrito statico è:

$$\mu = \tan \alpha$$

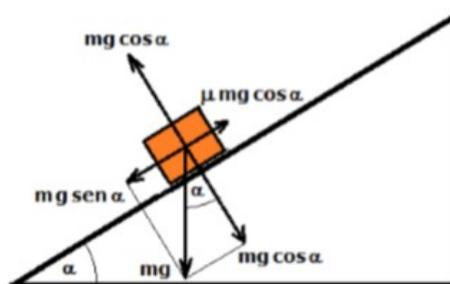


Figura 29. schema delle forze in un piano inclinato

Una volta stampati tutti i componenti del piano e assemblati assieme, e realizzato un blocchetto dello stesso materiale di massa nota, si è trovato per tentativi l'angolo α critico.

Tale angolo è risultato essere di circa 30gradi e di conseguenza si è ricavato il coefficiente di attrito statico resina-resina:

$$\mu_s = \tan(30) = 0,6$$

Però come riportato precedentemente a noi interessa il coefficiente di attrito dinamico, non quello statico, ha così cercato in letteratura il rapporto che intercorre tra tali coefficienti per diversi materiali polimerici al fine di riuscire a calcolare il rendimento tra due diverse ruote dentate. Dai dati analizzati è emerso che il coefficiente di attrito dinamico risulta essere all'incirca il 50% del coefficiente di attrito statico:

$$\frac{\mu_d}{\mu_s} = 0,5 \rightarrow \mu_d = 0,5 \mu_s = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3$$

5.2 Calcolo del rendimento di un accoppiamento dentato

Preso per buono il valore ottenuto da Gianmarco nel suo lavoro presso il dipartimento di macchine, è quindi nota l'ultima incognita nella nostra equazione per il calcolo del rendimento di un accoppiamento dentato di ruote coniche a denti dritti, si è quindi proceduto con il calcolo:

$$\eta_{RD} = 1 - f_d \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + \frac{2 \cos \alpha}{z_1 \cdot z_2}}$$

$$\eta_{RD} = 1 - 0,3\pi \sqrt{\left(\frac{1}{20^2}\right) + \left(\frac{1}{20^2}\right) + \frac{2 \cos 45}{20 \cdot 20}} = 0,91$$

Abbiamo così determinato il rendimento di ogni singolo accoppiamento dentato, che è lo stesso per ogni accoppiamento che si ha, in entrambe le configurazioni A e B, essendo tutte le ruote in presa identiche.

6. RENDIMENTI DEL GIUNTO

6.1 Rendimenti delle configurazioni A e B

Naturalmente avendo il giunto due configurazioni differenti, avremo anche due valori di rendimento diversi tra loro, uno per ogni configurazione.

In quanto, in base alla configurazione ci sarà un diverso numero di coppie dentate in presa tra di loro e un diverso numero di cuscinetti in azione.

Questo poiché il rendimento del giunto dipende dalle coppie cinematiche al suo interno che sono solamente di due tipi:

1. Coppie dentate
2. Coppie rotoidali (cuscinetti)

Nel nostro studio procederemo dapprima nel calcolo del rendimento di entrambe le configurazioni non tenendo in considerazione i cuscinetti e poi andremo ad implementare il calcolo considerando l'influenza che i cuscinetti hanno sul rendimento complessivo del giunto.

6.1.1 Rendimento della configurazione A senza tener conto dei cuscinetti

Nella configurazione A (fig.30) il motore è fissato al corpo di base 0 (grigio scuro in fig.30) ed è connesso alla ruota conica 1 la quale muove la ruota 2 che a sua volta muove la ruota 3.

In questa configurazione, il meccanismo di bloccaggio, connette solidalmente la ruota 3 con il telaio che è il corpo 4 (colorato in rosso in fig.30). Quindi, la rotazione della ruota dentata 3 muove l'arto del robot attorno all'asse $r_{1,i}$, come richiesto dalla Configurazione A.

Quindi in questa configurazione, le ruote che trasmettono potenza sono solamente il treno 1,2,3 con i rispettivi accoppiamenti 1-2, 2-3, per cui il calcolo del rendimento di tale configurazione, non tenendo in considerazione l'influenza dei cuscinetti, può essere calcolato come il prodotto tra i rendimenti tra i due accoppiamenti dentati, che abbiamo detto essere identico.

Per cui il rendimento della configurazione A senza tener conto dei cuscinetti è:

$$\eta_A = \eta_{RD} \cdot \eta_{RD} = 0,91 \cdot 0,91 = 0,83$$

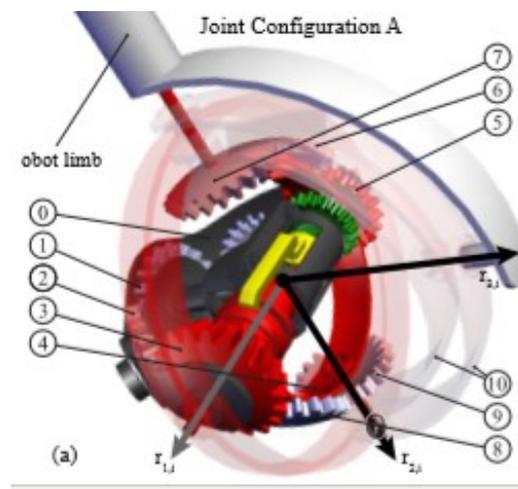


Figura 30. Configurazione A del giunto

6.1.2 Rendimento della configurazione B senza tener conto dei cuscinetti

In questa configurazione, il meccanismo di bloccaggio connette il corpo 4 con la base 0, evitando la rotazione attorno a $r_{1,i}$.

L'attuazione inizia sempre dalla ruota 1 ed è trasmessa a 2, 3 e successivamente alla ruota 8 e 9. In questo caso, la rotazione della ruota dentata 9 mette in rotazione la forcella 10 attorno a $r_{2,i}$, come prescritto della cinematica richiesta dalla Configurazione B. Le ruote 5, 6 e 7 lavorano esattamente allo stesso modo realizzando un'attuazione simmetrica sulla forcella 10 e aiutando a ripartire le forze sul telaio 4 del giunto.

In questo caso quindi, la situazione è più complessa, in quanto la trasmissione di potenza che è in serie dagli accoppiamenti 1-2, 2-3, 3-8, 8-9, si dirama in 9 dove una porzione della potenza va a vincere i carichi resistenti alla forcella 10 e quindi a muovere il giunto, l'altra porzione va invece sul treno 7-6-5 le quali non trasmettono potenza e servono solamente ad attuare una rotazione simmetrica e a ripartire le forze sul telaio, per cui la porzione di potenza che entra sul treno serve solamente per vincere gli attriti sui cuscinetti.

La situazione così vista presenta un'equazione a 2 incognite, poiché la porzione di potenza che va al treno 7-6-5 dipende dal carico resistente applicato alla forcella 10.

L'unico modo per risolvere l'equazione è andare a considerare le perdite che avvengono nel treno 7-6-5 nulle, il che è un'ipotesi valida in quanto non trasmettendo potenza si hanno perdite per attrito solo sui cuscinetti i quali abbiamo visto però avere rendimenti molto elevati a causa dei carichi infinitesimali in gioco.

Allora abbiamo calcolato il rendimento della configurazione B come il prodotto tra i rendimenti delle coppie dentate 1-2, 2-3, 3-8, 8-9 in serie

$$\eta_B = \eta_{RD}^4 = 0,91^4 = 0,69$$

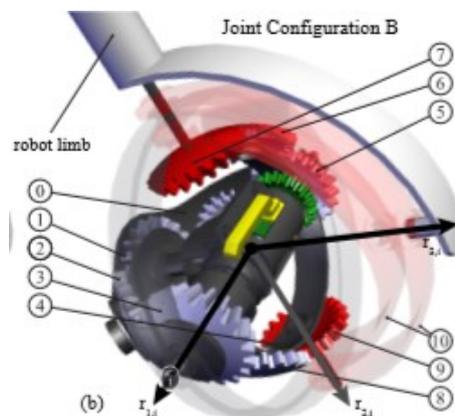


Figura 31. Configurazione B del giunto

6.2 Rendimento configurazioni A e B tenendo in considerazione

l'influenza dei cuscinetti

Negli studi precedenti si è notato come il calcolo dei rendimenti dei vari cuscinetti dipenda da diversi fattori, ed è funzione dei carichi che sono ad essi applicati. Ma date le basse forze in gioco si era visto che i rendimenti degli stessi, calcolati tramite l'algoritmo presente sul sito della SKF, fossero tutti pressoché uguali e pari a:

$$\eta_c = 0,9998 \rightarrow 99,98\%$$

Per considerare l'influenza dei cuscinetti sul rendimento della trasmissione, al fine di calcolare i due rendimenti complessivi del giunto, bisogna considerarli come in serie. Dunque i rendimenti complessivi saranno dati dai rendimenti delle due configurazioni senza tener conto dei cuscinetti (già calcolati) moltiplicati per il rendimento del singolo cuscinetto elevato ad un numero n pari al numero di cuscinetti interessati alla trasmissione.

6.2.1 Rendimento configurazione A tenendo conto dei cuscinetti

Il rendimento della configurazione A senza tener conto dei cuscinetti era:

$$\eta_A = 0,83$$

considerando che in tale disposizione sono interessati al moto solo i cuscinetti presenti sulla ruota 2 e 3 allora il rendimento complessivo sarà dato dal prodotto tra η_A e η_C elevato al quadrato:

$$\eta_{TOT,A} = \eta_A \cdot \eta_C^2 = 0,83 \cdot 99,98^2 = 0,829 \approx 0,83 = \eta_A$$

6.2.2 Rendimento configurazione B tenendo conto dei cuscinetti

Il rendimento della configurazione B senza tener conto dei cuscinetti era:

$$\eta_B = 0,69$$

Considerando che in tale disposizione sono interessati al moto i cuscinetti presenti sulla ruota 2,3,8 e 9 allora il rendimento complessivo sarà dato dal prodotto tra η_B e η_C elevato alla quarta:

$$\eta_{TOT,B} = \eta_B \cdot \eta_C^4 = 0,69 \cdot 0,9998^4 \approx 0,69 = \eta_B$$

7. RENDIMENTI COMPLESSIVI DEL ROBOT

7.1 Studio dei giunti

Una volta calcolati i rendimenti del giunto universale, è utile calcolare i rendimenti complessivi dell'intero robot, al fine di determinare anche quella che è la reversibilità o irreversibilità dello stesso.

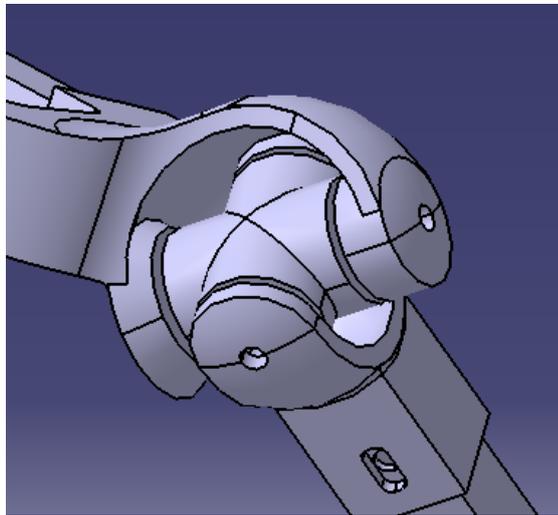


Figura 32. Giunto di cardano che collega la piattaforma del robot con la gamba.

Il robot si compone di una piattaforma alla quale tramite tre giunti di cardano (fig.23) vengono collegate 3 gambe che a loro volta vengono collegate tramite una rotoidale al secondo membro di ogni gamba.

Questo secondo membro poi viene accoppiato all'end-effector del robot tramite il giunto universale.

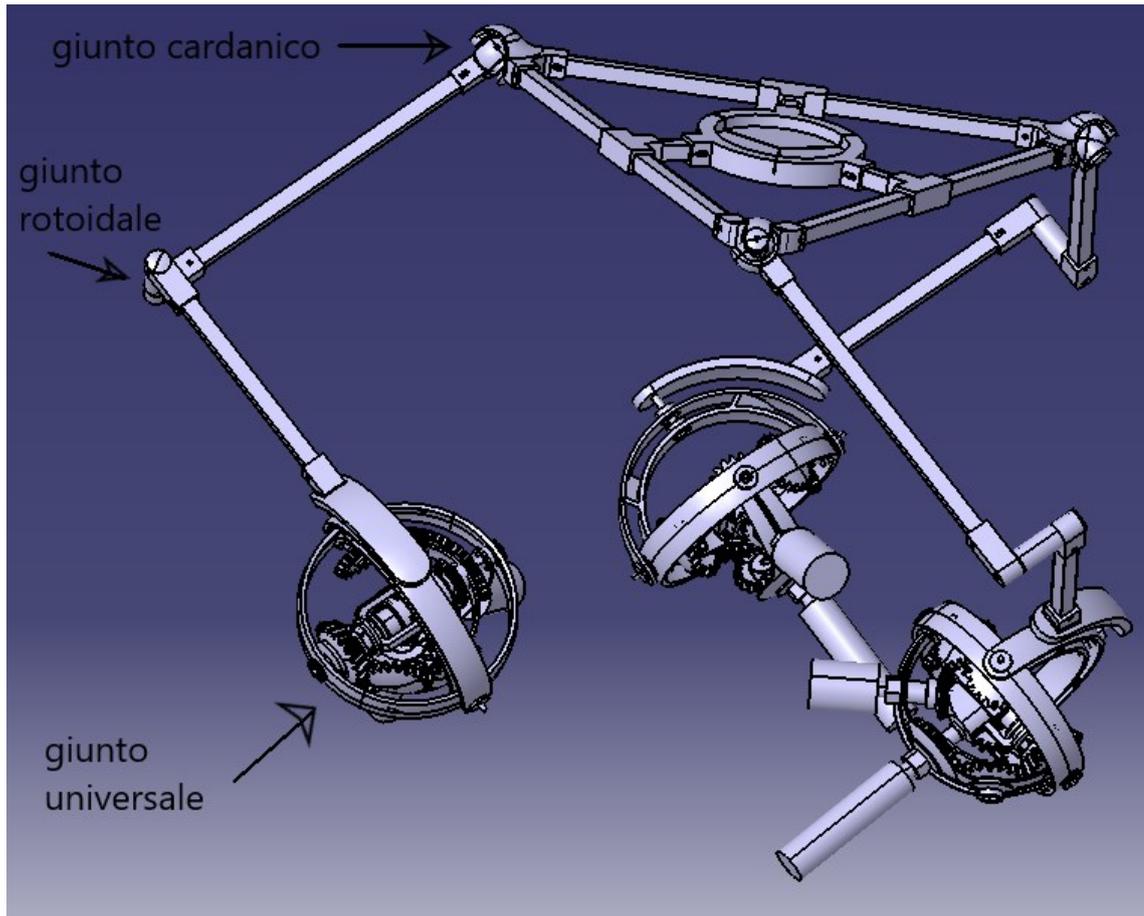


Figura 33. Robot 3-URU completo

Naturalmente anche il rendimento complessivo del robot varierà in funzione della configurazione in cui il giunto opera, a tal motivo anche in questo caso avremo due valori di rendimento, uno per ogni configurazione del giunto.

Le 3 gambe però, operando in parallelo, ci forniranno una definizione di rendimento non più in serie, come quelle viste prima, ma bensì in parallelo, dove ogni singolo rendimento che contribuisce a quello complessivo va pesato.

7.2 Calcolo del rendimento delle gambe del robot

Innanzitutto, dobbiamo calcolarci il rendimento di ogni singola gamba che siccome abbiamo detto essere uguale, basta calcolarlo una sola volta e farlo valere per tutte e tre le restanti.

Le 3 coppie presenti sulla gamba sono in serie dunque il rendimento di una gamba sarà definito come visto precedentemente, ovvero come il prodotto tra i rendimenti delle coppie cinematiche facentene parte.

$$\eta_{GAMBA} = \eta_{CARDANO} \cdot \eta_{ROTOIDALE} \cdot \eta_{GIUNTO}$$

Resta quindi da identificare $\eta_{CARDANO}$ e $\eta_{ROTOIDALE}$ al fine di determinare η_{GAMBA}

Per quanto riguarda $\eta_{CARDANO}$ si è visto che in letteratura il suo valore si aggira tra:

$$0,991 < \eta_{CARDANO} < 0,996$$

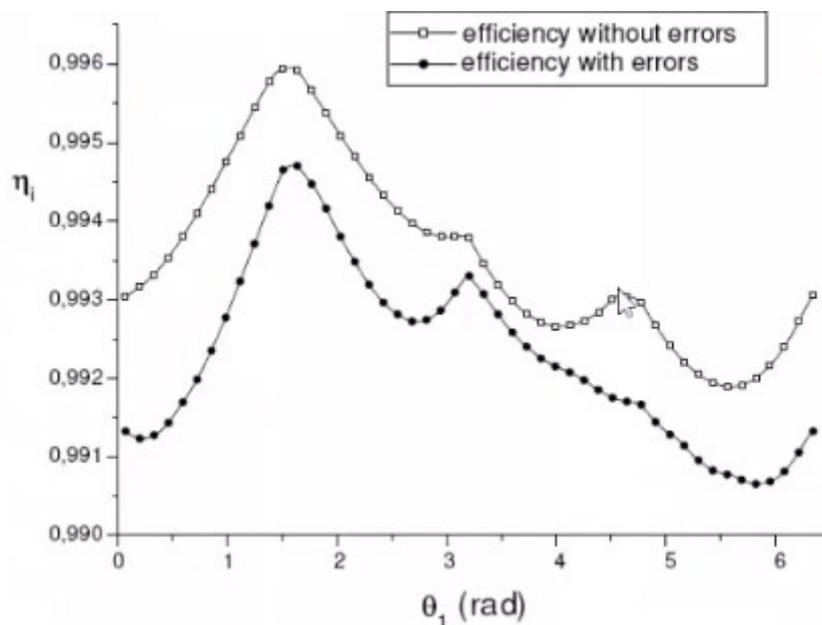


Figura34. Rendimenti giunto di cardano con e senza errori.

Si è quindi optato per il valore medio dell'intervallo all'interno del quale il rendimento varia:

$$\eta_{CARDANO} = 0,994 \rightarrow 99,4\%$$

Per quanto riguarda poi la rotoidale abbiamo stimato un rendimento di:

$$\eta_{ROTOIDALE} = 0,98 \rightarrow 98\%$$

Con questi dati siamo in grado di calcolare il valore effettivo di rendimento per ogni singola gamba del robot che sarà diverso in base alla configurazione in cui esso opera.

7.3 Rendimento equivalente in parallelo

Passiamo ora al calcolo del rendimento complessivo del robot, o meglio del suo rendimento equivalente, poiché trattiamo una trasmissione di potenza in parallelo, come mostrato in figura 35. Tale valore sarà calcolato considerando una ripartizione equa di potenza in tutte e 3 le gambe, unico modo per tirar fuori un valore di rendimento:

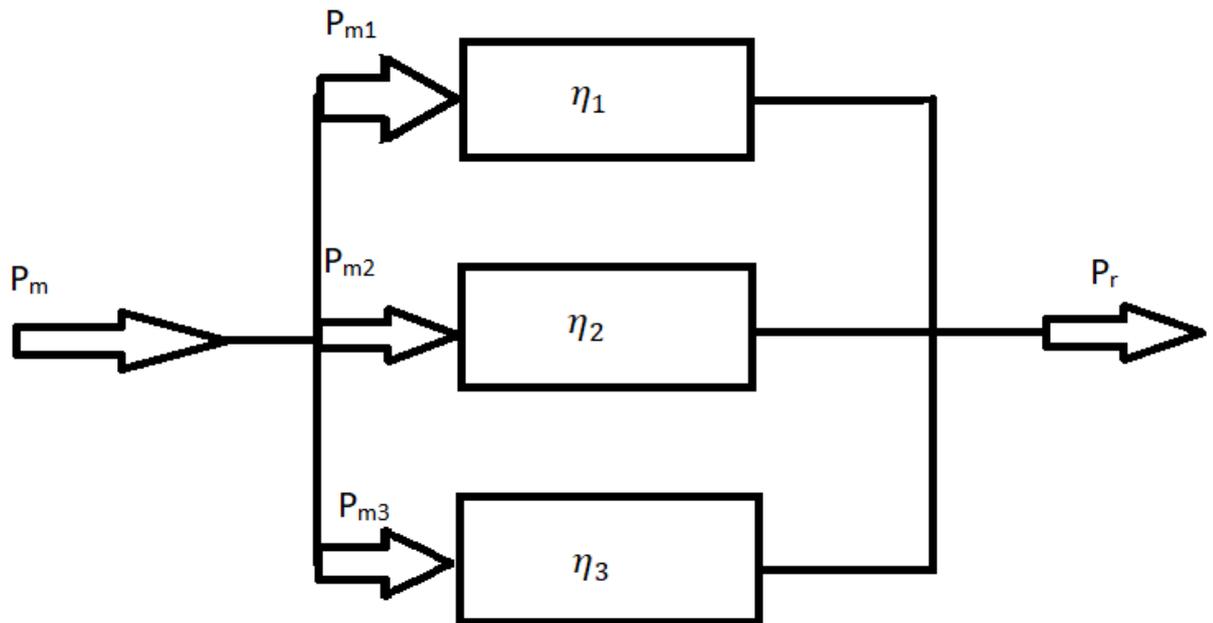


Figura 35. Schema grafico della ripartizione di potenza che avviene nelle gambe del robot.

Dove $P_{m1}=P_{m2}=P_{m3}=\frac{1}{3}P_m$ in quanto abbiamo detto di considerare una ripartizione equa di potenza per le tre gambe.

Sapendo che le 3 gambe sono uguali, allora avrò:

$$\eta_{GAMBA1} = \eta_{GAMBA2} = \eta_{GAMBA3}$$

Il che porta ad avere:

$$\eta_{eq} = \frac{P_r}{P_m} = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{m_i}}{P_m} \eta_{GAMBAi}$$

dove $\frac{P_{m_i}}{P_m} = \frac{1}{3}$; in quanto abbiamo considerato la ripartizione di potenza equa tra le tre gambe.

Allora il tutto si traduce in:

$$\eta_{eq} = \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^3 \eta_{GAMBA_i} \right) = \frac{3}{3} \eta_{GAMBA} = \eta_{GAMBA}$$

Dunque:

$$\eta_{GAMBA} = \eta_{ROBOT}$$

Per cui il rendimento complessivo del robot in realtà sarà pari al rendimento di una delle sue gambe.

7.3.1 Rendimento robot configurazione A

Per quanto riguarda la configurazione A avevamo:

$$\eta_{TOT,A} = \eta_A \cdot \eta_C^2 = 0,83 \cdot 99,98^2 = 0,8296 \approx 0,83$$

Con i valori di rendimento del giunto di cardano e della rotoidale è ora possibile calcolarsi

η_{GAMBA} :

$$\eta_{GAMBA,A} = \eta_{CARDANO} \cdot \eta_{ROTOIDALE} \cdot \eta_{GIUNTO} = 0,994 \cdot 0,98 \cdot 0,83 = 0,81$$

Possiamo ora calcolarci il rendimento complessivo del robot quand'esso si trova nella configurazione A:

$$\eta_{ROBOT,A} = \eta_{GAMBA,A} = 0,81$$

7.3.2 Rendimento robot configurazione B

Per quanto riguarda la configurazione B avevamo:

$$\eta_{TOT,B} = \eta_B \cdot n_C^4 = 0,69 \cdot 0,9998^4 \approx 0,69 = \eta_B$$

Con i valori di rendimento del giunto di cardano e della rotoidale è ora possibile calcolarsi

η_{GAMBA} :

$$\eta_{GAMBA,B} = \eta_{CARDANO} \cdot \eta_{ROTOIDALE} \cdot \eta_{GIUNTO,B} = 0,994 \cdot 0,98 \cdot 0,69 = 0,67$$

Possiamo ora calcolarci il rendimento complessivo del robot quand'esso si trova nella configurazione B:

$$\eta_{ROBOT,B} = \eta_{GAMBA,B} = 0,67$$

8. CONCLUSIONI

8.1 Conclusioni

In merito alla scelta del motore elettrico da utilizzare è di fondamentale importanza stimare e verificare sperimentalmente i rendimenti delle varie coppie cinematiche.

Tale considerazione è utile poiché in ogni coppia cinematica avviene un moto relativo tra due corpi, il che implica il verificarsi del fenomeno dell'attrito, il quale porta alla dissipazione dell'energia cinetica in energia termica.

L'attrito è un fenomeno fisico macroscopico sempre presente nel mondo reale che può presentare vantaggi e svantaggi a seconda del contesto di analisi. Questo fenomeno ha origine quando due superfici, in contatto tra loro, si muovono di moto relativo l'una rispetto all'altra. Le forze di attrito che si generano, la cui origine fisica è fatta risalire alle forze adesione e coesione tra materiali in interazione tra loro, hanno verso opposto al movimento per cui causano un lavoro delle forze di attrito negativo, il quale si traduce in una dissipazione di energia cinetica in energia termica.

Tali perdite devono essere considerate per andare a sovrastimare le coppie necessarie a mettere in moto l'end effector con le specifiche desiderate.

Tutto questo poiché se non tenessi conto delle perdite che si hanno a causa dell'attrito all'interno del mio robot, anche se il mio motore fornisse 1 Nm di coppia, all'utilizzatore (end-effector) ne arriverebbe un valore inferiore ai 1 Nm appunto a causa delle perdite. Per cui per un corretto funzionamento dovrò aggiungere alla coppia teorica quella coppia che sarà dissipata per attrito in modo che all'utilizzatore arrivi il valore di coppia desiderato.

Innanzitutto, partiamo col dire che per i nostri calcoli abbiamo scelto il momento quadratico medio a cui il giunto lavora ($M=1,04\text{Nm}$), ovvero una media quadratica dei momenti con cui il giunto è chiamato ad operare. Di conseguenza il momento che il giunto richiede potrebbe anche essere maggiore di tale valore, in particolare:

$$M_{MAX}=M_{START}= 2,3 \text{ Nm}$$

come riportato nella tesi magistrale di Gianmarco Olivieri.

Ad ogni modo si è notato nel corso delle nostre analisi che il rendimento non dipende strettamente dalle forze e dai momenti in gioco quindi la nostra ipotesi resta valida e di conseguenza i valori ottenuti di rendimento sono accettabili in ogni fase di funzionamento del robot.

I due valori di rendimento ottenuti per il robot nelle sue due configurazioni si discostano in quanto le due configurazioni hanno diversa complessità.

Naturalmente nella configurazione B essendoci una trasmissione di potenza più complessa ed essendoci più accoppiamenti dentati in trasmissione il rendimento sia del giunto sia complessivo, del robot è minore rispetto la configurazione A che è una trasmissione più semplice e con minori coppie dentate in presa.

8.2 Reversibilità

I due valori ottenuti (entrambi $>0,5$) portano a pensare che il robot sia reversibile in entrambe le sue due configurazioni. Ovvero, il robot non è in grado di gestire il peso della piattaforma senza dover applicare un freno motore ai giunti che elida i momenti generati dal peso del robot, in quanto le forze di attrito sono di entità minore rispetto la forza peso del robot stesso.

Per questo il robot avrà bisogno di una coppia frenante applicata dai motori elettrici per rimanere in posizione quando non è in funzionamento, altrimenti il peso della piattaforma lo farebbe cedere su se stesso a causa della reversibilità del sistema. Naturalmente però la reversibilità andrebbe testata facendo test di laboratorio, e dovrebbe essere studiata al fine di definire un valore di coppia frenante da dare al robot per permettergli di rimanere in piedi anche nelle fasi di non funzionamento.

8.3 Possibili miglioramenti

L'obiettivo era capire cosa influenzasse più negativamente il rendimento del nostro robot ed individuare soluzioni concrete e fattibili da poter mettere in atto per migliorare l'efficienza dello stesso, il tutto però senza intaccare troppo le geometrie al fine di mantenere inalterata la cinematica del robot.

Si è notato che ad influenzare fortemente il rendimento del robot è il rendimento del giunto il quale in realtà può essere considerato quasi indipendente dai carichi applicati. Considerato che i cuscinetti con le basse forze in gioco hanno un rendimento quasi ideale, di conseguenza l'unico contributo significativo è dato dagli accoppiamenti dentati, dove il loro rendimento è definito in base alle proprietà del materiale, del suo numero di denti e dell'angolo di incidenza tra le ruote in presa, quindi indipendente dai carichi.

$$\eta_{RD} = 1 - f_d \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + \frac{2 \cos \alpha}{z_1 \cdot z_2}}$$

Tenendo in considerazione la formula per il calcolo del rendimento di una coppia dentata conica a denti dritti soprariportata, le ipotesi per migliorare il rendimento dell'accoppiamento dentato, e di conseguenza dell'intero robot sono tre:

1. diminuire il modulo delle RD da $m = 2\text{mm}$ a $m = 1,25\text{mm}$ (valore consigliato di modulo) porterebbe ad un miglioramento del rendimento tra le varie coppie di RD in quanto ciò porterebbe, mantenendo gli stessi valori di diametro per le ruote, ad un aumento del numero di denti z e quindi ad un miglioramento del rendimento. Il tutto lasciando la cinematica del robot invariata.
2. cambiare angolo di incidenza tra le RD da 45° a una a coppie di 30° e 60° , ma si è visto analiticamente che si avrebbe un aumento di rendimento infinitesimale quindi non conviene cambiare le geometrie del robot.
3. Cambiare il materiale con cui si fanno le RD dalla resina fotopolimerica utilizzata (GreyV4) al Nylon il quale può essere utilizzato per la manifattura additiva, un vantaggio data la complessità dei pezzi da eseguire. In realtà però questo materiale non è utilizzabile dalla stampante con cui sono stati realizzati i pezzi (Preform 3), quindi bisognerebbe utilizzare un'altra stampante oppure delegare la realizzazione a qualche

privato. Il nylon ha $f_d = 0,1$ (coefficiente di attrito dinamico) che è tre volte meno della resina fotopolimerica utilizzata ($f_d = 0,3$) il che lo rende un ottimo sostituto.

8.3.1 Diminuzione modulo RD

Scegliendo quindi un valore di $m = 1,25\text{mm}$, mantenendo i diametri delle ruote costanti avremo:

$$m = \frac{D}{z} \rightarrow z = \frac{D}{m} = \frac{40}{1,25} = 32\text{mm}$$

Con tale valore di z avremo:

$$\eta_{RD} = 0,94$$

- *Configurazione A*

$$\eta_{RD} = 0,94$$

$$\eta_A = \eta_{TOT,A} = 0,88 (>0,83)$$

$$\eta_{GAMBA,A} = 0,88 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,86 (>0,81)$$

$$\eta_{ROBOT,A} = 0,86 (>0,81)$$

- *Configurazione B*

$$\eta_{RD} = 0,94$$

$$\eta_B = \eta_{TOT,B} = 0,78 (>0,69)$$

$$\eta_{GAMBA,B} = 0,78 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,76 (>0,67)$$

$$\eta_{ROBOT,B} = 0,76 (>0,67)$$

Otterremo dunque valori di rendimento maggiori rispetto il caso precedente, per cui potrebbe essere una buona soluzione quella di ridurre il modulo delle ruote dentate presenti nel giunto.

Abbiamo ottenuto inoltre un avvicinamento dei valori di rendimento, per cui abbiamo diminuito la differenza di efficienza che c'è tra l'una e l'altra configurazione.

8.3.2 Utilizzo materiale Nylon

La soluzione di cambiare il materiale con cui sono fatte le RD rimane la più efficace delle tre proposte per aumentare l'efficienza del robot in quanto facilmente realizzabile e lascia inalterata la cinematica della macchina.

Utilizzando un valore tale di coefficiente avremo:

$$\eta_{RD}(f_d=0,1) = 0,97 (> 0,91 = \eta_{RD}(f_d=0,3))$$

Di conseguenza a cascata avremmo un miglioramento di tutti i rendimenti che porterebbero ad avere:

- *Configurazione a*
 - $\eta_{RD} = 0,97$
 - $\eta_A = \eta_{TOT,A} = 0,94 (>0,83)$
 - $\eta_{GAMBA,A} = 0,94 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,91 (>0,81)$
 - $\eta_{ROBOT,A} = 0,91 (>0,81)$

- *Configurazione b*
 - $\eta_{RD} = 0,97$
 - $\eta_B = \eta_{TOT,B} = 0,88 (>0,69)$
 - $\eta_{GAMBA,B} = 0,88 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,86 (>0,67)$
 - $\eta_{ROBOT,B} = 0,86 (>0,67)$

Quindi anche l'utilizzo di Nylon come materiale per la realizzazione delle RD porterebbe ad un miglioramento dell'efficienza del robot, in termini di aumento di rendimento.

Il vantaggio inoltre si ha, ancora una volta, nella similitudine che si ottiene nei rendimenti delle due configurazioni, in questo modo infatti è diminuita la differenza di efficienza del robot in base alla configurazione, rendendo il rendimento quasi indipendente rispetto la configurazione in cui ci troviamo.

8.3.3 Combinazione delle soluzioni

Constatato come applicando una soluzione alla volta il giunto subisce migliorie in termini di aumento dei rendimenti, ha senso quindi provare ad effettuare una combinazione delle due soluzioni al fine di ottenere la massimizzazione ottimale dell'efficienza del giunto e quindi dell'intero robot.

La combinazione ci fornisce dunque due nuovi valori di numero di denti e coefficiente di attrito dinamico:

$$m = 1,25 \rightarrow Z = 32 (>20)$$

$$f_d = 0,1 (<0,3)$$

La combinazione dei due fattori fornisce un valore di rendimento per gli accoppiamenti dentati pari a:

$$\eta_{RD} = 0,98$$

- *Configurazione A*

$$\eta_{RD} = 0,98$$

$$\eta_A = \eta_{TOT,A} = 0,96 (>0,83)$$

$$\eta_{GAMBA,A} = 0,96 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,94 (>0,81)$$

$$\eta_{ROBOT,A} = 0,94 (>0,81)$$

- *Configurazione B*

$$\eta_{RD} = 0,98$$

$$\eta_B = \eta_{TOT,B} = 0,92 (>0,69)$$

$$\eta_{GAMBA,B} = 0,92 \cdot 0,994 \cdot 0,98 = 0,90 (>0,67)$$

$$\eta_{ROBOT,B} = 0,90 (>0,67)$$

Si è quindi ancor di più aumentata l'efficienza del robot adottando due soluzioni concretamente fattibili. Inoltre, si nota come c'è una maggiore uniformità nei due valori di rendimento per le due configurazioni.

8.4 Sviluppi futuri

Naturalmente i valori ottenuti e riportati all'interno di questa tesi, sono valori ottenuti tramite calcoli analitici che potrebbero discostarsi in maniera più o meno ampia da quelli reali. Questo poiché vi sono innumerevoli fattori in gioco che possono influenzare il funzionamento del robot e portare ad un discostamento rispetto i valori teorici riportati. Ad ogni modo i risultati ottenuti andrebbero verificati tramite test di laboratorio volti a:

1. Verificare che il rapporto di trasmissione sia unitario ($\tau = 1$), in quanto le irreversibilità dovute alla manifattura additiva (finitura superficiale etc...) potrebbero portare ad un lieve discostamento che porterebbe problemi alla cinematica risultante del robot;
2. Verificare i rendimenti sia complessivi sia locali del giunto, in modo da avere una misura delle irreversibilità che si hanno localmente in un treno di 3 RD, ma anche complessivamente sul giunto.
3. Verificare la reversibilità in entrambe le configurazioni e definire il valore di coppia frenante da fornire ai motori del giunto per permettergli di rimanere in piedi, e quindi non collassare su sé stesso, anche nelle fasi di non funzionamento.

Ad ogni modo, la tipologia, il modo e tutta la sensoristica con cui eseguire i test sopraelencati verrà trattata con maggior dettaglio nella tesi di un altro ragazzo, nonché mio collega di studi e di tirocinio, Diego Giacchetta, che si è occupato insieme al sottoscritto dello studio del robot.

8.5 Problemi riscontrati

I problemi riscontrati sono stati principalmente dovuti al fatto che non potendo eseguire il tirocinio in presenza, presso il dipartimento di macchine nel quale è presente la copia fisica originale del giunto, è stato difficile capire il funzionamento dello stesso, in quanto non è stato possibile, oltre che visionarlo, sperimentare e poter effettuare misure sul campo delle varie grandezze per le quali si è dovuto invece ricorrere ai file del robot ottenuti grazie all'ausilio di Catia.

Unico problema sull'analisi prestazionale del giunto si è avuto nel calcolo del rendimento della configurazione B, ove veniva fuori un sistema a due incognite, quindi non risolvibile. La potenza che veniva dissipata sul treno di ruote 7-6-5 dipendeva dalla coppia resistente applicata alla forcella 10. Ma essendo la coppia resistente già incognita allora l'unico modo per la risoluzione del problema è stata considerare le perdite nel treno 7-6-5 nulle, considerazione accettabile dato che non trasmettono potenza e i cuscinetti su cui le ruote girano all'interno del nostro giunto hanno un rendimento quasi ideale.

9. BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Carbonari, L.; Callegari, M.; Palmieri, G.; Palpacelli, M.C. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines. Mech. Mach. Theory 2014, 79, 173– 183.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Slides sull'additive manufacturing del prof. Forcellese, A.
- “Meccanica applicata alle Macchine”, seconda edizione, di Callegari, M.; Fanghella, P.; Pellicano, F.;
- “Progetto e costruzione di macchine”, editore Shigley, McGraw-Hill Education;

- Olivieri, G. "progettazione e prototipazione di un giunto universale riconfigurabile per applicazioni robotiche", tesi di laurea magistrale, anno 2018;
- Popazzi, M. "Prototipazione rapida di un giunto sferico riconfigurabile per applicazioni robotiche", tesi di laurea triennale, anno 2020;
- Giacchetta, D. "Progettazione di una procedura di validazione di un modello di rendimento meccanico per un robot parallelo riconfigurabile", tesi di laurea triennale, anno 2020.

10. SITOGRAFIA

[-https://www.skf.com/binaries/pub44/Images/0901d196809bc23b-17-0707-IT---17000-w-Apendix-1---SKF-friction-model_tcm_44-299767.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub44/Images/0901d196809bc23b-17-0707-IT---17000-w-Apendix-1---SKF-friction-model_tcm_44-299767.pdf)

[-https://www.pandoracampus.it/doi/10.978.8825/175073/page/285](https://www.pandoracampus.it/doi/10.978.8825/175073/page/285)

[-https://www.skf.com/it/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/bearing-friction-power-loss-and-starting-torque](https://www.skf.com/it/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/bearing-friction-power-loss-and-starting-torque)

[-http://redirects.skf.com/it/products/product-tables/index.html](http://redirects.skf.com/it/products/product-tables/index.html)

[-https://www.skfbearingsselect.com/#/size-lubrication/single-bearing](https://www.skfbearingsselect.com/#/size-lubrication/single-bearing)

[-https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_additiva](https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_additiva)

[-https://it.wikipedia.org/wiki/Nylon](https://it.wikipedia.org/wiki/Nylon)

11. RINGRAZIAMENTI

Questa tesi è il frutto di tre anni di lavoro, sacrifici e impegno costante nello studio e nella ricerca di una formazione il più possibile completa. E' d'obbligo ringraziare coloro i quali senza non sarei mai arrivato al computo di questa laurea triennale:

ringrazio in primis la mia famiglia, papà Gianfranco, mamma Dora e mio fratello Gianmarco, i quali mi hanno supportato e sostenuto economicamente durante questi anni di studio, senza di loro tutto ciò non sarebbe stato possibile e dunque ci tengo a ringraziarli per primi per tutti i sacrifici fatti per permettermi di raggiungere questo traguardo.

Un ringraziamento speciale va anche alla mia fidanzata Alice e a tutti i miei compagni universitari e non, che nel corso di questi tre anni mi hanno oltre che supportato, anche sopportato, e mi hanno aiutato a staccare dal ritmo di vita universitario quando ce n'era bisogno. Un particolare ringraziamento va anche ai miei coinquilini Eros e Paolo che più di tutti hanno dovuto sopportarmi e con i quali ho condiviso emozioni ed esperienze uniche.

Infine, ringrazio coloro senza i quali lo sviluppo di questa tesi non sarebbe stata possibile, ringrazio Marco Popazzi che avendo lavorato prima di noi sull'argomento in tesi ha saputo aiutarci e darci dei consigli, ringrazio Diego Giacchetta per aver lavorato con me nello studio del robot. Per ultimo, ma sicuramente non per importanza, ci tengo a ringraziare l'Università Politecnica delle Marche" e il gruppo di "Meccanica applicata alle macchine" di cui in particolare il prof. Ing Matteo Claudio Palpacelli e l'Ing. Daniele Costa che mi hanno permesso di eseguire il tirocinio cui sunti sono rappresentati in questa tesi, li ringrazio soprattutto per la loro disponibilità, professionalità e passione nel trasmettere allo studente conoscenze e know-how necessari al suo sviluppo formativo.

Andrea D'Ambrosio