



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze

Matematiche

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**PROGETTAZIONE DI UN END-EFFECTOR
ROBOT PER LA MANIPOLAZIONE DI
DISCHI IN GRAFITE**

Design of a end-effector robot for handling graphite discs

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Laureando:

Giacomo Orsetti

Anno accademico 2021/2022

INDICE

<i>Introduzione</i>	5
1.1 <i>Lozioni</i>	6
<i>Catena di montaggio</i>	7
2.1 <i>Elementi costitutivi l'assemblato</i>	9
2.1.1 <i>Heater Bottom</i>	9
2.1.2 <i>Container e Container Lid</i>	9
2.1.3 <i>Screen pin</i>	10
2.1.4 <i>Heater holder</i>	10
2.1.5 <i>Screen disc</i>	10
2.1.6 <i>Holder inner</i>	10
2.1.7 <i>Holder outer</i>	11
2.2 <i>Elementi costitutivi robot manipolatore</i>	11
2.2.1 <i>Robot KR10 R1100-2</i>	11
2.2.2 <i>END- EFFECTOR</i>	12
2.2.3 <i>Cambio SWS</i>	14
2.2.4 <i>Sensori di posizionamento analogico</i>	16
2.2.5 <i>Sensori induttivi di prossimità</i>	17
2.2.6 <i>Interruttori magnetici programmabili</i>	19
2.2.7 <i>Pinza parallela PGN</i>	20
2.2.8 <i>Pinza autocentrante PZN</i>	22
<i>Progettazione delle pinze</i>	24
<i>Studio del cinematismo</i>	30
4.1 <i>Analisi di posizione</i>	31
4.2 <i>Analisi di velocità</i> :.....	33
4.3 <i>Analisi di accelerazione</i>	34
<i>Studio del cinematismo 2</i>	36
5.1 <i>Posizione</i>	36
5.2 <i>Velocità e accelerazione</i>	39
<i>Analisi statica</i>	43
6.1 <i>Equazioni cardinale della statica</i>	43
6.2 <i>Principio dei lavori virtuali</i>	44

<i>6.3 Analisi grafica</i>	45
<i>6.4 Statica dei sistemi in presenza di attrito</i>	46
<i>6.5 Statica del cinematismo</i>	47
<i>Ansys</i>	50
<i>Conclusioni</i>	52
<i>Sitografia</i>	53
<i>Bibliografia</i>	54
<i>Ringraziamenti</i>	55

Capitolo 1

Introduzione

Questo lavoro di tesi è incentrato sulla progettazione di un end-effector robot per la manipolazione di dischi in grafite; lo sviluppo è stato effettuato attraverso l'utilizzo delle conoscenze acquisite nel percorso di studi e di due programmi, il primo programma utilizzato è stato Solid Edge, si tratta di un software di progettazione ibrida 2D/3D sviluppato da Siemens PLM Software mentre il secondo è stato Ansys un software di simulazione ingegneristica e progettazione. Lo sviluppo del progetto si è articolato in quattro fasi che hanno permesso di raggiungere lo scopo finale.

Nella prima parte del lavoro abbiamo eseguito uno studio del progetto analizzando tutte le componenti che sarebbero andate a comporre il robot, confrontando le nostre esigenze con le componenti già presenti in commercio e scegliendo le più adatte al nostro scopo. Nella seconda fase del lavoro abbiamo deciso di sviluppare una pinza che potesse soddisfare le nostre esigenze dal momento che, le pinze in commercio, non erano in grado di adeguarsi ai vincoli imposti dal progetto. Nella terza fase del progetto abbiamo effettuato uno studio analitico del cinematismo attraverso un'analisi sulla posizione, sulla velocità e sull'accelerazione di ogni elemento; dopo questa prima parte, puramente analitica, abbiamo trasferito tutti i risultati ottenuti su un foglio Excel in modo da trovare i valori che vanno ad assumere le varie grandezze. In seguito verranno riportate le formule utilizzate e i vari risultati ottenuti. Nella quarta ed ultima fase abbiamo effettuato l'analisi statica del cinematismo in modo da valutare se fosse in grado di sorreggere i carichi imposti. In primo luogo si è scelto un approccio analitico poi si è passati all'utilizzo del software Ansys per effettuare un confronto dei risultati ottenuti.

1.1 Loccioni

Ho svolto l'attività di tirocinio, su cui si basa questa tesi, presso l'impresa Loccioni. La sede è ad Angeli di Rosora (AN), dove sono stato seguito attivamente e con spirito collaborativo dagli ingegneri del reparto di Progettazione meccanica. La Loccioni è un'impresa familiare, fondata nel 1968 dalla volontà di Enrico Loccioni di creare sul territorio, e diffondere nel mondo, un modello imprenditoriale che sviluppasse lavoro e conoscenza, integrando idee, persone e tecnologie, nella misura e miglioramento della qualità di prodotti e processi dell'industria manifatturiera e dei servizi. Si tratta di una sartoria tecnologica, in cui ogni sistema di misura, controllo e automazione, per il miglioramento della qualità e dell'efficienza di prodotti e processi, viene progettato e realizzato su misura per il cliente, integrando le migliori competenze e tecnologie interne ed esterne e costruendo con clienti e fornitori relazioni di lungo periodo per lo sviluppo reciproco. La Loccioni è anche un Open Company, aperta ai giovani e a chi ha tanta esperienza, a clienti, a fornitori, a concorrenti, alla comunità scientifica e a quella istituzionale. L'apertura alimenta il desiderio continuo di approfondimento, di nuovo sapere, la voglia di cambiamento, l'innovazione. L'apertura permette la creazione di nuovi business, lo sviluppo di nuove tecnologie, facilita le relazioni e la creazione di reti internazionali di altissimo livello, con le quali sviluppare mercati e innovazioni tecnologiche. Un'impresa della conoscenza, in cui non ci sono dipendenti, ma collaboratori intraprenditori, azionisti del lavoro, che investono i loro saperi nell'impresa, condividendone i risultati. L'impresa della conoscenza sviluppa progetti piuttosto che prodotti e favorisce l'assunzione di responsabilità, l'autonomia, l'intraprendenza, il lavoro in squadra. Diffonde conoscenza internamente e verso l'esterno ed investe in formazione, perché le persone sono il suo patrimonio più importante. Le aree di specializzazione dell'impresa sono:

- Energy Technologies: soluzioni integrate di efficienza e autosufficienza energetica, information and communication technology;
- Environment: soluzioni integrate per il monitoraggio ambientale;
- Industry: sistemi per il test di componenti industriali;
- Humancare: soluzioni di automazione e controllo qualità per health care;
- Mobility: soluzioni di assemblaggio, collaudo e controllo qualità per componenti auto.

Ho avuta la fortuna di svolgere il mio periodo di permanenza in Loccioni durante il mese di marzo. Si tratta di un periodo particolare per l'impresa in quanto viene celebrato per tutto il mese il compleanno della Signora Graziella, moglie di Enrico Loccioni, attraverso degli incontri con personalità di alto calibro in grado di incarnare i valori che lei era in grado di trasmettere, in particolare ho avuto modo di assistere all'incontro con Piero Angela che è stato veramente stimolante per le tematiche affrontate e per l'interpretazione che lui dava alla vita.

Capitolo 2

Catena di montaggio

Il primo passo è stato quello di capire come era strutturata la catena di montaggio e quali passaggi dovevano eseguire i vari componenti. La catena di montaggio è costituita da due macchine che svolgono la funzione di assemblatori e da due aree in cui viene svolto il lavoro manuale da parte di operatori specializzati.

La macchina è composta da un magazzino nel quale sono presenti i crogioli di grafite da assemblare, ma anche i crogioli già assemblati e che verranno poi inviati ai forni. Il crogiolo in grafite da lavorare viene afferrato da un manipolatore pneumatico che lo posiziona su un nastro trasportatore che a sua volta porterà il crogiolo nella zona di lavoro.

Una volta arrivato nella zona di lavoro il crogiolo viene afferrato di nuovo da un manipolatore pneumatico il quale lo porta in una linea di lavoro costituita da 7 assi e che consentirà in prima battuta l'inserimento di una boccola sulla superficie interna del crogiolo e di un contenitore di piccole dimensioni, nel quale al suo interno è presente, sul fondo del crogiolo, un catalizzatore.

Nella superficie laterale del contenitore sono presenti dei fori disposti a 120 gradi l'uno dall'altro che consentono l'uscita del catalizzatore in forma gassosa una volta inviato l'assemblato in forno.

Una volta aggiunto il catalizzatore il crogiolo viene restituito al manipolatore pneumatico che porta il semi-assemblato in un dosatore, il quale inserisce della polvere che successivamente genera una reazione chimica.

A questo punto il crogiolo viene restituito alla linea di montaggio dove vengono inserite le varie componenti che costituiscono l'assemblato cioè, un coperchio interno, del feltro ed infine il coperchio esterno del crogiolo.

Terminato il processo l'assemblato viene riportato attraverso il manipolatore pneumatico e il nastro trasportatore in magazzino dove attenderà che l'operatore sia disponibile. Il compito dell'operatore è poi quello di controllare che non siano presenti dei difetti nell'assemblato prima che questo venga inviato al forno.

Una volta completato il processo in forno l'assemblato viene portato nella Dirty Room. Qui l'operatore asporta le componenti che non vengono utilizzate nella seconda macchina e pulisce l'assemblato dalle scorie del processo avvenuto nel forno. In seguito l'operatore posiziona l'assemblato in un nastro trasportatore che porta l'assemblato all'interno del magazzino della seconda macchina.

Attraverso gli stessi dispositivi utilizzati nella prima macchina il sintetizzato viene portato nella zona di lavoro nella quale, attraverso un'altra linea di lavoro si inseriscono al suo interno le ultime componenti mancanti, tra cui, il disco in grafite, obiettivo del nostro lavoro.

A questo punto l'assemblato finale viene spedito nuovamente in magazzino. In seguito un operatore esegue un nuovo controllo per vedere che non siano presenti dei difetti, prima di spedire il tutto nuovamente in un forno e ottenere il prodotto finale.

2.1 Elementi costitutivi l'assemblato

Di seguito verrà elencata una lista di tutti i componenti costituenti l'assemblato con le loro principali caratteristiche.

2.1.1 Heater Bottom

Il crogiolo di partenza è un cilindro scavato al suo interno con due fori concentrici il primo di diametro maggiore e di altezza pari ai tre quinti di quella del crogiolo e il secondo di dimensioni minori di altezza pari ad un quinto di quella del crogiolo e che parte da dove termina il primo foro. Sono presenti altri due fori, entrambi di piccole dimensioni, uno sulla faccia opposta del crogiolo, l'altro sul fondo della superficie appena scavata e che consente l'inserimento del contenitore del catalizzatore. Nel diametro interno del foro maggiore è presente uno smusso per facilitare l'inserimento di un coperchio. Il crogiolo ha lo scopo di contenere il contenitore con il catalizzatore e la polvere. Dopo che le due sostanze avranno eseguito una reazione il crogiolo verrà inviato nel forno.

2.1.2 Container e Container Lid

Il contenitore del catalizzatore è di piccole dimensioni e, come detto in precedenza, presenta dei fori passanti sulla superficie laterale a 120 gradi l'uno dall'altro per consentire la fuoriuscita a livello gassoso del catalizzatore. I fori sono situati ad un'altezza tale da non provocare la fuoriuscita del catalizzatore prima dell'inserimento in forno. Il coperchio del contenitore è realizzato in modo tale da

presentare un piccolo gioco con il contenitore nella zona di contatto del diametro interno.

2.1.3 Screen pin

Cilindro di piccole dimensioni posizionato all'interno delle polveri in modo da essere concentrico con il crogiolo. Il compito dello screen pin è quello di sorreggere lo Screen disc.

2.1.4 Heater holder

Coperchio interno che verrà posizionato sopra la boccola, ha una forma complessa con una parte della superficie in diagonale ma rimane assialsimmetrico. Il suo diametro esterno è di poco minore del diametro interno del crogiolo. Presenta degli smussi che facilitano l'inserimento di questo coperchio all'interno del crogiolo.

2.1.5 Screen disc

Disco di diametro pari circa ai due terzi del crogiolo. Sulla superficie inferiore è presente una sporgenza che consente il fissaggio del disco nel pin attraverso un foro. Il compito dello Screen disc è quello di direzionare i fumi delle polveri all'interno del crogiolo.

2.1.6 Holder inner

Contenitore che viene appoggiato sulla superficie interna del primo assemblato ed ha una forma assialsimmetrica.

2.1.7 Holder outer

Coperchio esterno composto da due parti, una che copre l'holder inner, l'altra che sorregge la parte più interna.

2.2 Elementi costitutivi robot manipolatore

Dopo aver analizzato tutte le componenti costituenti l'assemblato, si è passati alla scelta delle varie componenti che andranno a costituire il robot manipolatore, sia il robot di partenza sia, tutte le componenti del braccio meccanico che sono utilizzate per il sollevamento e lo spostamento del disco, tra cui le pinze. Di seguito, verranno riportate tutte le scelte fatte per le varie componenti trovate in commercio.

2.2.1 Robot KR10 R1100-2

Il KR10 R1100-2 (Figura 2.1) è un robot a 6 assi, molto veloce, leggero e versatile. Copre uno spazio di lavoro piccolo perché le dimensioni complessive sono di circa 1m. Nella nostra catena di montaggio eseguirà diverse funzioni dalla movimentazione del crogiolo al posizionamento del disco. Questo è possibile facendo variare il terminale del braccio meccanico che si adatterà alle varie funzioni. Nel nostro caso verrà montato a soffitto.

Il suo braccio è di 1100 mm e il suo carico sul polso è di 10 kg. Ha una ripetibilità di $\pm 0,02$ mm. Ha un breve ciclo di lavoro e una maggiore precisione del percorso rispetto alle sue controparti. Questo robot Agilus è equipaggiato con il moderno sistema di controllo robot KR C4 il quale ha caratteristiche di sicurezza e flessibilità.

Caratteristiche KR C4:

Questa tecnologia incorpora controllo di sicurezza, controllo robot, controllo del movimento, controllo logico e controllo di processo in un database comune per migliorare la condivisione dell'intelligence.

Scheda Tecnica:

- Braccio massimo: 1101 mm
- Massimo carico utile: 11,1 kg
- Ripetibilità: ± 0.02 mm
- Numero di assi: 6
- Peso ≈ 55 kg
- Condizione operativa: da 0°C a 45°C
- Tempo di ciclo: 140 cicli al minuto
- Ingombro Robot: 208 mm x 208 mm



Figura 2.1. Robot KR10 R1100-2

2.2.2 END- EFFECTOR

Di seguito verrà mostrata un immagine dell'end-effector (Figura 2.2) utilizzato per la manipolazione del disco in grafite con tutte le sue componenti.

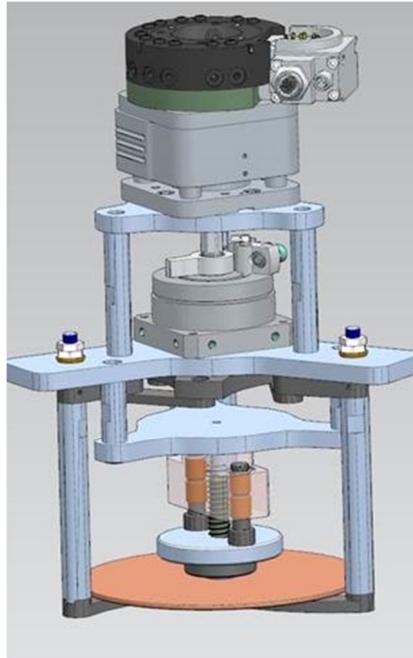


Figura 2.2. End-effector robot per la manipolazione di dischi in grafite.

Nella parte superiore troviamo il cambio SWS che permette una rapida sincronizzazione tra il robot e l'end effector. Al di sotto del cambio troviamo un attuatore pneumatico. Si è scelto di utilizzare un attuatore pneumatico al posto di un attuatore elettrico per due motivi, il primo riguarda una questione puramente economica in quanto l'attuatore pneumatico ha un costo molto minore rispetto a quelli elettrici; il secondo, per una facilità di connessione del end-effector al manipolatore attraverso il cambio in quanto, si mettono in collegamento delle valvole d'aria ed è una connessione più rapida rispetto ad un collegamento tra cavi elettrici. Scendendo ancora al di sotto troviamo la palmola, dove verranno posizionati vari sensori di posizione per un corretto sollevamento del disco. L'ultimo componente che troviamo in basso sono le pinze progettate durante questo lavoro, di seguito si riportano le pinze trovate in commercio, che non verranno però utilizzate in quanto, non soddisfano i vincoli imposti dal nostro progetto.

2.2.3 Cambio SWS

Il cambio SWS (Figura 2.3) è un sistema pneumatico di cambio utensili con bloccaggio brevettato. L'impiego di appositi sistemi di cambio collegati alle interfacce terminali dei robot aumenta la flessibilità, l'efficienza, la frequenza di sincronizzazione e la sicurezza di processo. Grazie a sistemi automatici e manuali, il cambio di pinze, utensili ed altri attuatori avviene in modo rapido. Anche per quanto riguarda il cambio di pinze, utensili e di altri attuatori, utilizzando gli accessori per la robotica più adatti è possibile ridurre notevolmente le attività manuali, o addirittura eliminarle completamente.



Figura 2.3. Cambio SWS

Vantaggi

- Serie completa con 14 dimensioni per una selezione ottimale della dimensione e un'ampia gamma di applicazioni
- Sistema di bloccaggio irreversibile brevettato per un collegamento sicuro tra il master di cambio rapido e l'adattatore
- Sblocco di emergenza manuale possibile, assenza di forze antagoniste della molla
- Tutti i componenti funzionali sono in acciaio temperato per elevata resistenza meccanica del sistema di cambio

- Ampia gamma di moduli elettrici, pneumatici e moduli idraulici per possibilità svariate di trasmissione dell'energia
- Passante integrato per linee pneumatiche per l'alimentazione sicura di energia dei moduli di manipolazione e degli utensili
- Possibilità di trasmissione dei fluidi possibilità di impiego di giunti auto sigillanti
- Schema di montaggio ISO per il facile montaggio su quasi tutti i tipi di robot senza piastre adattatrici supplementari

Funzionamento del cambio

Il cambio automatico dell'attuatore finale (ad es. pinze, pallet, pick up a depressione, utensili ad azionamento pneumatico o elettrico, pinze per saldatura, ecc.) aumenta la flessibilità del robot. Il sistema di cambio rapido (SWS) è costituito da un master di cambio rapido (SWK) e da un adattatore di cambio rapido (SWA). La SWK è montata sul robot e consente di abbinare l'SWA montato sul rispettivo utensile. Un pistone di bloccaggio ad azionamento pneumatico garantisce un collegamento sicuro in virtù del suo design brevettato. Passanti pneumatici ed elettrici alimentano automaticamente, dopo l'accoppiamento, l'utensile del vostro robot.

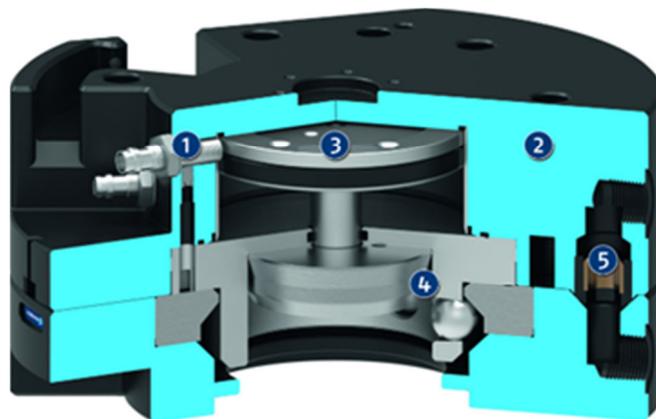


Figura 2.4 Funzionamento del cambio.

Scheda tecnica del SWK-001-000-000

- Peso consigliato di movimentazione: 1.4 kg

- Momento Mx max: 2.8 Nm
- Momento My max: 2.8 Nm
- Momento Mz max: 3.45Nm
- Min/Max pressione di lavoro: 4.5/6.9 bar
- Blocco/sblocco collegamento principale: M3
- Min e Max Temperature di lavoro: 5/60 °C
- Ripetibilità: 0.01 mm
- Disassamento massimo consentito XY: ± 0.3 mm

2.2.4 Sensori di posizionamento analogico

Il sensore magnetico MMS 22-A (Figura 2.5) analogico è utilizzato per monitorare lo stato delle pinze. Rileva, senza contatto, l'avvicinamento di un magnete e invia un segnale di uscita continuo. L'interruttore magnetico rileva senza contatto e senza usura i magneti ed è resistente alle vibrazioni, alla polvere e all'umidità. L'interruttore magnetico è installato in una scanalatura a C e pertanto non produce nessun profilo di ingombro aggiuntivo.



Figura 2.5. Sensore di posizionamento analogico

- Sensore con scanalatura a C per l'inserimento nella pinza, quindi senza profilo d'ingombro.

- Programmazione in pochi secondi grazie all'utensile magnetico di teach privo di contatto
- Range di misurazione corsa, regolabile per il controllo analogico della posizione anche in caso di corse lunghe
- Elettronica integrata consente un assemblaggio cavi flessibile nonostante il profilo esterno poco ingombrante

Scheda tecnica

- Tensione di uscita min: 0V
- Tensione di uscita max: 5V
- Linearità: 15%
- Precisione di ripetibilità R del valore finale massimo: <3%
- Temperatura ambiente min e max: 5/55 °C
- Tempo di risposta / Tempo di commutazione: 50 ms
- Tensione d'esercizio min e max: 5/5.5 V

2.2.5 Sensori induttivi di prossimità

I sensori induttivi di prossimità (Figura 2.6), vengono utilizzati per verificare la condizione dei componenti di automazione. La versione IN è collegabile direttamente o attraverso un cavo stampato con connettore. La versione INK è idonea per il cablaggio diretto, ha un cavo stampato con un'estremità aperta. I sensori sono utilizzati per la verifica di moduli di presa e moduli rotanti oppure, di moduli lineari e accessori per la robotica. I sensori induttivi rilevano senza contatto i metalli e sono resistenti alle vibrazioni, alla polvere e all'acqua. I sensori sono adatti per il collegamento a un modulo di ingressi digitali.



Figura 2.6. Sensore induttivo di prossimità

- Montaggio con supporti per un montaggio semplice e veloce
- Versione con display a LED per il controllo dello stato di commutazione direttamente sul sensore
- Versione con collegamento a connettore standard per cambio semplice e veloce del cavo di prolunga
- Cavo molto flessibile in versione PUR per una lunga durata
- Sensori di prossimità per montaggio a incasso per ingombri ridotti al minimo nell'applicazione

I sensori induttivi di prossimità con la rispettiva bobina dell'oscillatore generano un campo magnetico alternato ad alta frequenza. Questo campo scaturisce dalla superficie attiva del sensore. Se nel campo entra un oggetto metallico, questo sottrae energia al campo magnetico facendo ridurre l'ampiezza delle vibrazioni. Il cambiamento viene rilevato e il sensore interviene.

Scheda tecnica

- Isteresi di commutazione della distanza di commutazione nominale: <15%
- Frequenza max di commutazione: 3000 Hz
- Tensione nominale: 24V
- Temperatura ambiente min e max: -25/70 °C
- Tensione d'esercizio min e max: 10/30 V
- Caduta di tensione: 1.5 V

2.2.6 Interruttori magnetici programmabili

Per monitorare lo stato dei componenti automatizzati è utilizzato un interruttore elettromagnetico (Figura 2.7). I magneti fissati all'interno dei componenti vengono rilevati senza contatto. Oltre ad elaborare i dati di processo, il sensore processa il campo magnetico tramite l'interfaccia IO-Link. L'interruttore magnetico con interfaccia IO-Link rileva senza contatto e senza usura i magneti ed è resistente alle vibrazioni, alla polvere e all'umidità. L'interruttore magnetico è installato in una scanalatura a C e pertanto non produce nessun profilo di ingombro aggiuntivo.



Figura 2.7. Interruttore magnetico programmabile

- Controllo attraverso l'IO-Link per valutare dati quali la temperatura, la qualità o l'identificazione del sensore.
- Elettronica integrata, il sensore è dotato di un design compatto e di collegamenti a spina standard per l'utilizzo dei cavi più comuni.
- Adatto per spazi di installazione ridotti grazie all'interfaccia IO-Link.
- Sensore con scanalatura a C per un montaggio semplice, veloce e poco ingombrante sul prodotto

È possibile che campi magnetici estranei, situati nelle immediate vicinanze, influiscano sul funzionamento dei sensori.

Scheda tecnica

- Numero di punti di commutazione: 2
- Tempo di risposta / Tempo di commutazione: 0.001 s
- Frequenza max di commutazione: 1000 Hz
- Tensione nominale: 24V
- Temperatura ambiente min e max: -10/70 °C
- Tensione d'esercizio min e max: 10/30 V
- Caduta di tensione: 2 V

2.2.7 Pinza parallela PGN

La pinza PGN (Figura 2.8) è una pinza universale parallela a 2 griffe con lubrificazione permanente, elevata forza di presa e massimi momenti grazie alla guida di scorrimento dentata. Si tratta di una pinza pneumatica universale per la movimentazione di pezzi in applicazioni universali. Impiego universale in ambienti puliti o poco sporchi.



Figura 2.8. Pinza parallela PGN

Vantaggi

- Guida di scorrimento dentata per una manipolazione precisa

- Momenti massimi possibili adatto per l'impiego di griffe della pinza lunghe
- Tasche di lubrificazione nella guida di scorrimento dentata garantisce affidabilità di processo e intervalli prolungati di manutenzione
- Area massima della superficie del pistone per una forza di presa massima
- Montaggio su 2 lati della pinza in 3 direzioni di fissaggio per un assemblaggio della pinza universale e flessibile
- Alimentazione aria attraverso fori integrati per connessione diretta o tramite raccordi filettati per un assemblaggio della pinza universale e flessibile

Funzionamento della pinza

Il pistone viene spinto in basso e verso l'alto dall'aria compressa. Le superfici dei piani inclinati producono un movimento della griffa sincrono e parallelo. È presente una guida di scorrimento dentata che garantisce una durata d'uso elevata grazie alle tasche di lubrificazione e assorbimento delle forze e, delle coppie elevate grazie all'ampio supporto della guida. Questa tipologia di pinza dà la possibilità di centraggio e montaggio per un utilizzo universale della pinza. Esiste una versione 'Antipolvere' che aumenta il grado di protezione contro sostanze penetranti. Il dispositivo di mantenimento meccanico della forza di presa garantisce una forza minima di presa anche in caso di perdita di pressione. Nella variante AS questa agisce come forza di chiusura, e nella variante IS come forza di apertura. L'immagine seguente mostra la variante AS. Il mantenimento della forza di presa si può usare anche per aumentare la forza stessa di presa o semplicemente per una presa a effetto semplice.

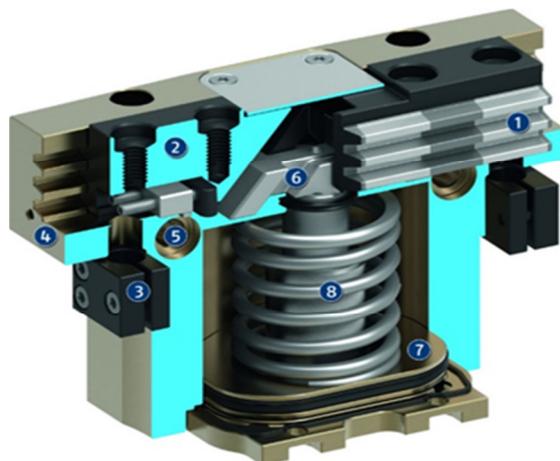


Figura 2.9. Funzionamento della pinza

Scheda tecnica della PGN-plus-P 40-AS

- Corsa per griffa: 2.5 mm
- Forze in e chiusura: 235N
- Forza minima prodotta dalla molla: 55 N
- Peso del pezzo raccomandato: 0.9 kg
- Min/Nominale/Max pressione di lavoro: 4/6/6.5 bar
- Tempo di apertura e di chiusura: 0.015/0.03 s
- Lunghezza griffe massima consentita: 60 mm
- Min e Max Temperature di lavoro: 5/90 °C
- Ripetibilità: 0.01 mm
- Forza assiale max. Fz max: 650 N

2.2.8 Pinza autocentrante PZN

La pinza PZN (Figura 2.10) è una pinza autocentrante universale a 3 griffe con forza di presa elevata e coppie massime grazie alla guida di scorrimento dentata. Impiego universale grazie alle molteplici varianti di accessori anche in campi con particolari requisiti della pinza.



Figura 2.10. Pinza autocentrante PZN

Vantaggi

- Guida di scorrimento dentata per una manipolazione precisa
- Momenti massimi possibili adatto per l'impiego di griffe della pinza lunghe
- Sistema a piani inclinati per una considerevole trasmissione della potenza e una presa sincronizzata
- Alimentazione aria attraverso fori integrati per connessione diretta o tramite raccordi filettati per un collegamento pneumatico flessibile dell'aria compressa in tutti i sistemi di automazione

Funzionamento della pinza

Il pistone viene spinto verso il basso e verso l'altro dall'aria compressa. Le superfici efficaci oblique della chiavetta generano un movimento della ganaschia sincrono e centrico. Il corpo ha un peso ridotto grazie all'impiego di lega di alluminio anodizzata e ad alta resistenza. Il sistema a piani inclinati garantisce una elevata trasmissione delle forze e serraggio simmetrico.

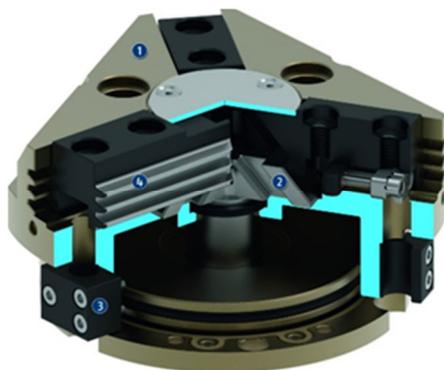


Figura 2.11. Funzionamento della pinza autocentrante

Utensile d'inserimento per montaggio di assi piccoli e di medie dimensioni. A causa del distributore rotante, gli assi possono essere ruotati più volte all'infinito ($> 360^\circ$)

durante la procedura di assemblaggio. I contatti rotanti e le alimentazioni dell'aria integrati nel distributore rotante forniscono energia alla pinza in modo da garantire la sicurezza del processo.

Scheda tecnica della PZN-plus- 40-AS

- Corsa per griffa: 2.5 mm
- Forze in e chiusura: 355 N
- Forza minima prodotta dalla molla: 100 N
- Peso del pezzo raccomandato: 1.3 kg
- Consumo d'aria corsa doppia: 9 cm³
- Min/Nominale/Max pressione di lavoro: 4/6/6.5 bar
- Tempo di apertura e di chiusura: 0.02/0.04 s
- Lunghezza griffe massima consentita: 54 mm
- Min e Max Temperature di lavoro: 5/90 °C
- Ripetibilità: 0.01 mm
- Forza assiale max. Fz max: 250 N

Capitolo 3

Progettazione delle pinze

Dopo aver analizzato le tipologie di pinze disponibili in commercio, ci si è subito resi conto che nessuna delle tante poteva soddisfare i vincoli imposti dal nostro progetto. Il disco che dovevamo sollevare non poteva essere afferrato per il suo bordo esterno, in quanto, era ricoperto da una lamina metallica molto sottile che non poteva essere danneggiata. Inoltre la lamina rivestiva anche una parte della faccia inferiore del disco, l'unica soluzione era quella di sollevare il disco

afferrandolo sulla sporgenza presente nella superficie inferiore la quale, consente il fissaggio del disco nel pin attraverso un foro. Quindi il movimento di chiusura della pinza doveva essere radiale. Allo stesso tempo avevamo un vincolo sulla circonferenza di apertura in quanto il disco andava inserito all'interno del crogiolo che aveva un proprio diametro. L'ultimo vincolo che dovevamo rispettare era l'altezza della griffa dato che, una volta inserito all'interno del crogiolo, il disco andava posizionato nel pin e poi, dovevamo far uscire la pinza senza né toccare la sabbia né danneggiare la patina che ricopriva il disco. Quindi l'obiettivo era quello di progettare un meccanismo autocentrante che rispettasse tutti i vincoli imposti.

Il primo passo è stato quello di disegnare alcuni schizzi per le varie soluzioni che avevamo in mente.

La prima idea è stata quella di usare quattro griffe che però non si adattavano ai vincoli costruttivi del meccanismo quindi, sono passato ad una configurazione a due griffe disegnandole su Solid Edge.

Una soluzione a due griffe avrebbe potuto garantire una forza maggiore ma:

- Se progettata a 4 punti di contatto, ad esempio con una V che va ad afferrare la sporgenza inferiore, la risultante delle forze va valutata con gli angoli di scambio delle forze.
- Se progettata con due semicirconferenze e quindi, con risultanti di forza maggiore, si avrebbe un problema di stabilità in quanto i punti risultanti si troverebbero su una linea e sarebbe difficile garantirne il centraggio.

Proprio a causa di questo problema legato alla stabilità si è puntato ad una soluzione a tre griffe.

Oltre alle griffe sono state progettate su Solid Edge tutte le componenti che andranno a far parte del cinematismo tra cui, la palmola superiore di appoggio per il braccio robotico ed il piatto su cui viene appoggiato il disco, così da garantire che non ci sia alcun impedimento quando si andrà ad afferrare il disco.

Riporto ora tutti i disegni dei componenti progettati su Solid Edge:

- **Cinematismo**

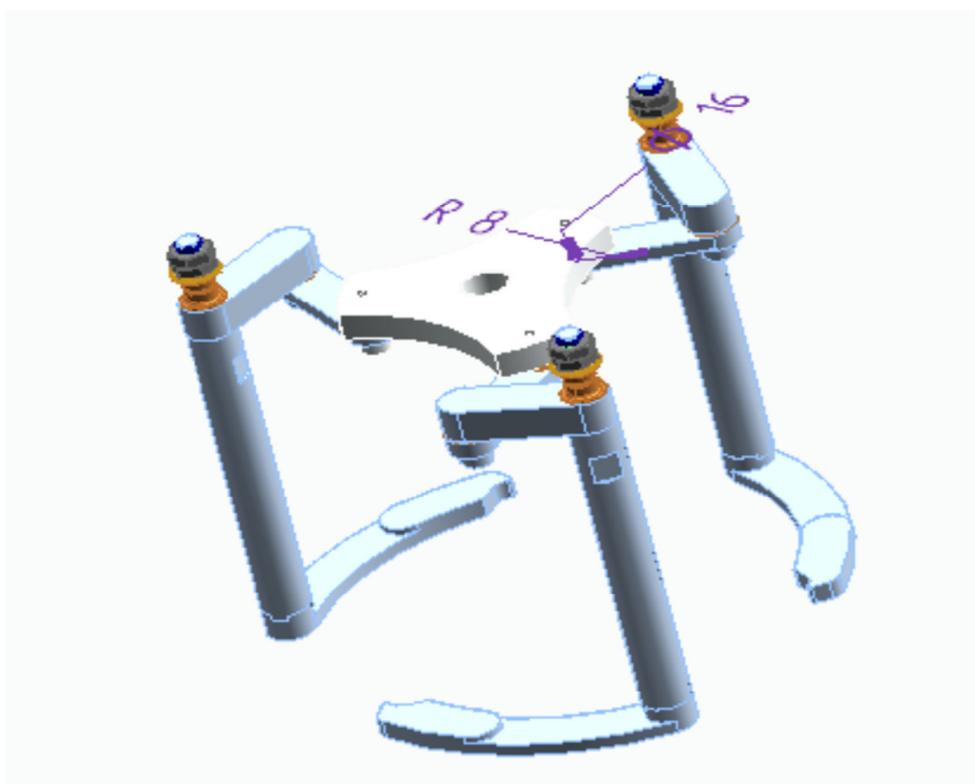


Figura 3.1.. Cinematismo sviluppato su Solid Edge

- **Griffa**

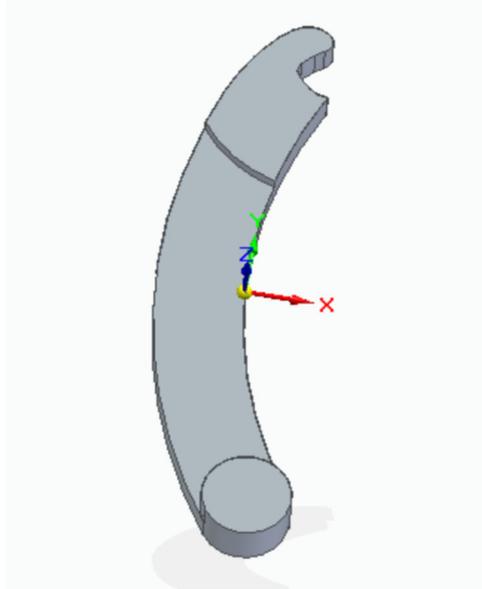


Figura 12.2. Griffa sviluppata su Solid Edge

- **Leva 1**

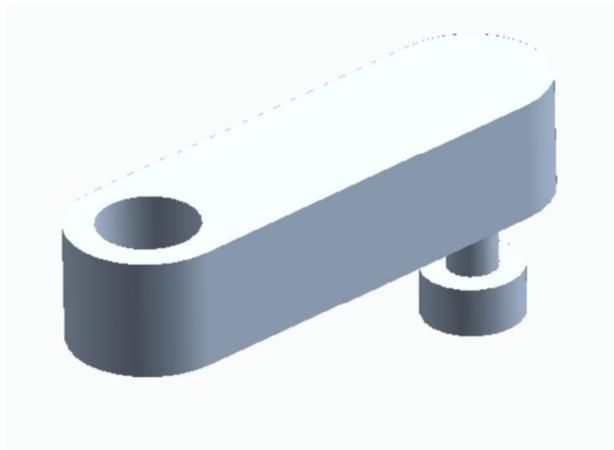


Figura 3.3. Leva 1 sviluppata su Solid Edge

- **Leva 2**

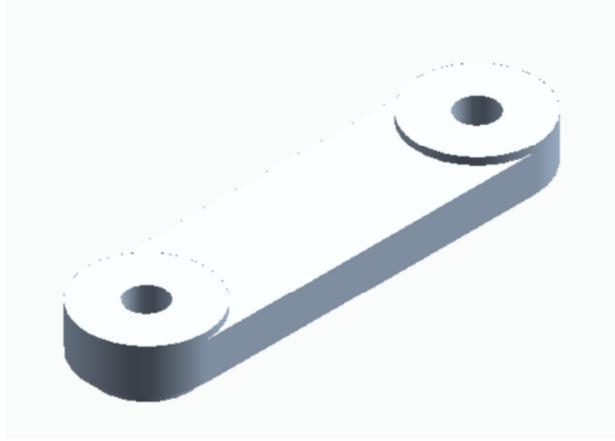


Figura 13. Leva 2 sviluppata su Solid Edge

- **Albero**



Figura 14. Albero sviluppato su Solid Edge

- **Palmola**

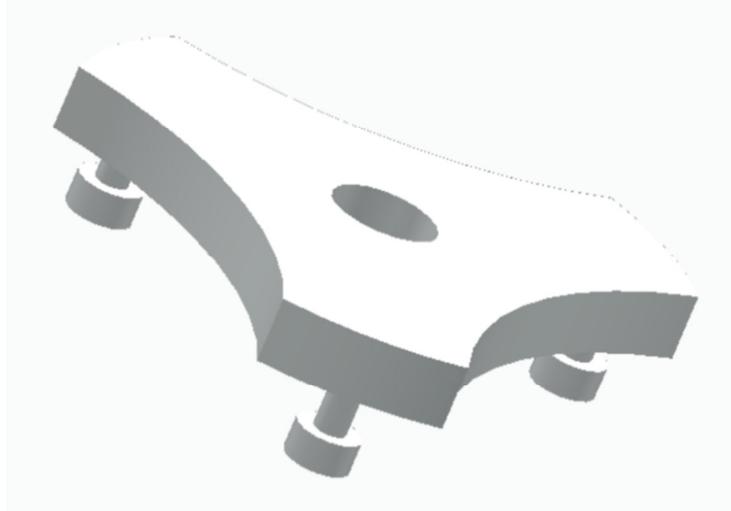


Figura 15. Palmola sviluppata su Solid Edge

- **Piatto di appoggio**

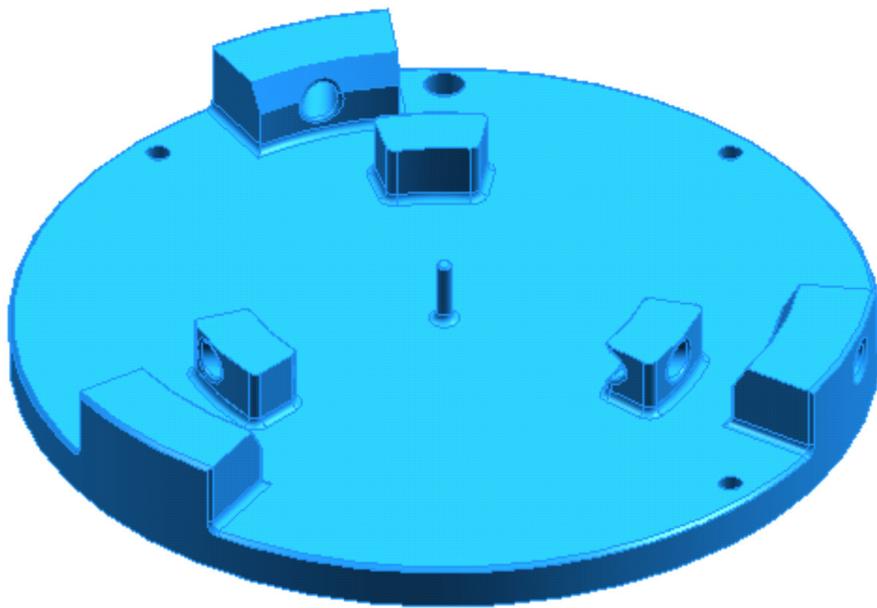


Figura 16. Piatto di appoggio sviluppato su Solid Edge

Capitolo 4

Studio del cinematismo

La cinematica studia il movimento dei punti, dei corpi e dei sistemi di corpi connessi da coppie, ovvero dei meccanismi. Essa non prende in considerazione le forze che agiscono su di essi ma, solo le relazioni geometriche che garantiscono che il moto dei corpi sia congruente con i vincoli presenti nel sistema. Lo studio del movimento dei corpi soggetti a insiemi di vincoli può riguardare le posizioni, ovvero le velocità e le accelerazioni. La formulazione del modello cinematico di un meccanismo richiede che venga estratta dalla forma fisica dei corpi, l'informazione geometrica effettivamente rilevante ai fini dello studio del movimento. Per costruire i modelli del movimento, è necessario utilizzare la sola informazione che rappresenti la posizione degli elementi delle coppie cinematiche sui corpi presenti nel sistema, in generale:

- Una coppia rotoidale è modellata imponendo che i due (o più) corpi afferenti sulla coppia abbiano in comune il punto centrale della coppia;
- Una coppia prismatica è modellata imponendo che i corpi da essa connessi condividano una retta, che individua l'asse del loro movimento relativo; come conseguenza essi non possono avere rotazioni relative, né spostamenti in direzione ortogonale alla retta comune;
- Una coppia superiore è modellata imponendo i due profili coniugati dalla coppia rimangono sempre a contatto, con condizioni di tangenza, in un punto, che potrà variare nel tempo, durante il moto relativo;

Data una catena cinematica, cioè un insieme di corpi connessi da coppie, se il sistema ha mobilità positiva, si ottiene un meccanismo fissando un telaio, bloccando, cioè, rispetto a un riferimento fisso, il movimento di uno dei corpi.

L'azione di cambiare la scelta del telaio in una catena cinematica per passare da un meccanismo a uno diverso, è denominata inversione cinematica. Dopo aver progettato le griffe e tutte le componenti del cinematismo si è passati allo studio dello stesso attraverso un'analisi di posizione, delle velocità e delle accelerazioni. Esistono molte possibili notazioni e metodi per formulare modelli che rappresentino le condizioni geometriche del cinematismo. L'approccio qui adottato è basato sull'uso di poligoni di vettori e che viene illustrato di seguito (Figura 4.1):

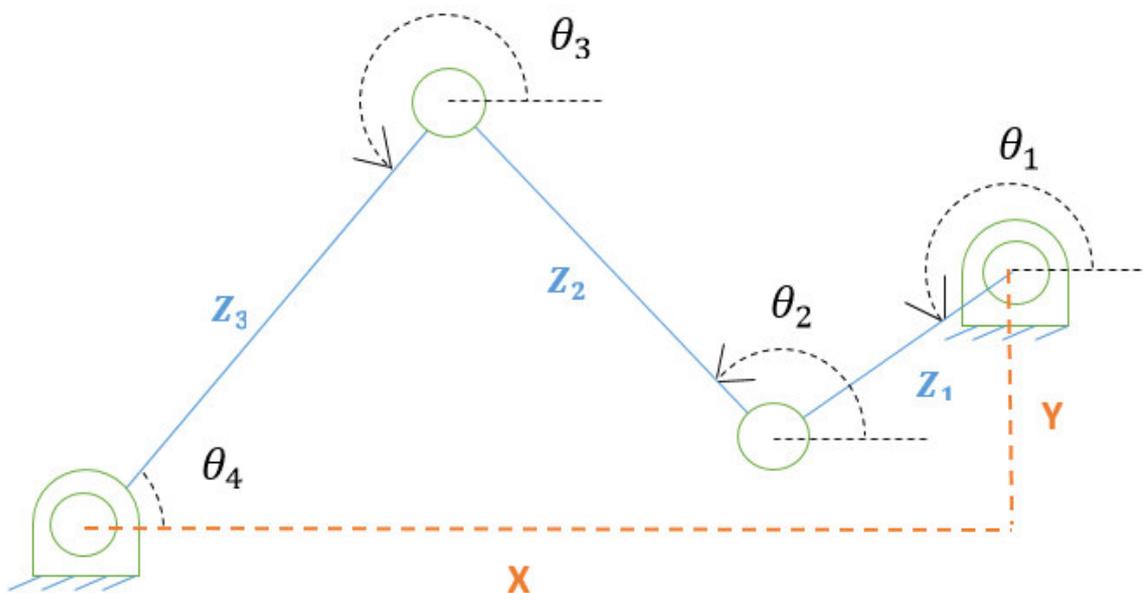


Figura 4.1. Geometria del cinematismo

Il meccanismo ha $n_{gl}=3*3-2*4=1$ gradi di libertà. Questo vuol dire che il suo movimento può essere espresso come funzione di un singolo parametro e delle sue derivate prime e seconde rispetto al tempo. La figura mostra l'informazione essenziale allo studio della cinematica del meccanismo: ciascuno dei vettori Z_i e dell'angolo θ_i che esso forma con l'asse x del riferimento assoluto.

4.1 Analisi di posizione

Lo scopo di questo tipo di analisi è determinare le posizione che i corpi di un meccanismo o i loro punti assumono durante il movimento. Queste grandezze sono

in funzione di un insieme di parametri indipendenti, detti coordinate libere del sistema, che sono in un numero pari al numero di gradi di libertà del sistema.

$$Z_1 = A \qquad Z_2 = B \qquad Z_3 = C$$

$$\begin{cases} X + A \cos\theta_1 + B \cos\theta_2 + C \cos\theta_3 = 0 \\ Y + A \sin\theta_1 + B \sin\theta_2 + C \sin\theta_3 = 0 \end{cases}$$

(4.1)

In queste equazioni, i moduli dei vettori sono costanti. Il sistema fornisce due relazioni in tre variabili: due di esse potranno essere espresse in funzione della terza, scelta come coordinata libera del meccanismo (θ_1). Per semplificare le formule risolutive, riscriviamo il sistema evidenziando le parti note e separando i due angoli incogniti θ_2 e θ_3 .

$$C_X = A \cos\theta_1 + X \qquad C_Y = B \sin\theta_1 + Y$$

(4.2)

$$\begin{cases} C_X + B \cos\theta_2 = -C \cos\theta_3 \\ C_Y + B \sin\theta_2 = -C \sin\theta_3 \end{cases}$$

(4.3)

Quadrando e sommando, si elimina l'angolo θ_3 , ottenendo un'equazione nel solo θ_2

$$\begin{cases} C_X^2 + B^2 \cos^2\theta_2 + 2C_X B \cos\theta_2 = C^2 \cos^2\theta_3 \\ C_Y^2 + B^2 \sin^2\theta_2 + 2C_Y B \sin\theta_2 = C^2 \sin^2\theta_3 \end{cases}$$

(4.4)

$$C_X^2 + C_Y^2 + B^2 + 2C_X B \cos\theta_2 + 2C_Y B \sin\theta_2 = C^2$$

(4.5)

Questa equazione ha una struttura ben nota, che si ripresenta molto frequentemente nello studio dei meccanismi; mettendo in evidenza la sua forma rispetto all'incognita si ottiene:

$$A_1 \cos\theta_2 + B_1 \sin\theta_2 + C_1 = 0$$

(4.6)

$$A_1 = 2C_X B \qquad B_1 = 2C_Y B \qquad C_1 = C_X^2 + C_Y^2 + B^2 - C^2$$

$$\theta_{2 \ 1,2} = 2\arctan\left(-\frac{B_1 \pm \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}{C_1 - A_1}\right) \qquad \text{se } A_1 \neq C_1$$

(4. 7)

$$\theta_{2 \ 1,2} = \left\{ \pi; -2\arctan\left(\frac{A_1}{B_1}\right) \right\} \qquad \text{se } A_1 = C_1$$

(4. 8)

$$\theta_{2 \ 1,2} = \left\{ -\frac{\pi}{2}; 2\arctan\left(\frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1}\right) \right\} \qquad \text{se } B_1 = C_1$$

(4. 9)

$$\theta_3 = \arctan2(\sin \theta_4, \cos \theta_4)$$

(4. 10)

$$\sin \theta_4 = -\frac{C_Y + B_1 \sin \theta_2}{C_1} \qquad \cos \theta_4 = -\frac{C_X + B_1 \cos \theta_2}{C_1}$$

(4. 11)

Le posizioni di tutti i corpi del meccanismo e la traiettoria dei punti notevoli verranno disegnate in seguito, al variare del valore della coordinata libera, attraverso l'utilizzo del software Excel.

4.2 Analisi di velocità:

Una volta stabilito il modo in cui si spostano i corpi di un meccanismo abbiamo determinato le velocità e le accelerazioni dei corpi e dei punti notevoli. Come si vedrà, i tre livelli di analisi (posizione, velocità e accelerazione) sono rigorosamente sequenziali, nel senso che non è possibile determinare la velocità di un sistema se

non ne è nota la posizione, mentre le accelerazioni dipendono, oltre che dalla posizione, anche dalle velocità. La formulazione e soluzione matematica dell'analisi di velocità può essere svolta derivando rispetto al tempo, le equazioni di posizione, per poi risolvere le relazioni risultanti rispetto alle velocità incognite.

$$\begin{cases} -A \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 - B \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 - C \sin(\theta_3) \dot{\theta}_3 = 0 \\ -A \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 - B \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 - C \cos(\theta_3) \dot{\theta}_3 = 0 \end{cases}$$

(4.12)

$$\begin{bmatrix} B \sin \theta_2 & C \sin \theta_3 \\ B \cos \theta_2 & C \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = -A \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = -A \begin{bmatrix} B \sin \theta_2 & C \sin \theta_3 \\ B \cos \theta_2 & C \cos \theta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = -A \frac{1}{B C \sin(\theta_2 - \theta_3)} \begin{bmatrix} C \cos \theta_3 & -C \sin \theta_3 \\ -B \cos \theta_2 & B \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1$$

(4.13)

Conoscendo l'attuatore pneumatico che sto usando posso definire posizione, velocità e accelerazione di θ_1 e quindi, ricavarmi tutte le altre variabili. La velocità di rotazione di θ_4 è la stessa di θ_3 per cui, una volta che definisco la seconda, ho anche la prima che è anche la velocità di rotazione dell'albero collegato alle griffe

4.3 Analisi di accelerazione

Per l'analisi di accelerazione si procede in maniera analoga a quanto effettuato per le velocità, derivando le equazioni di velocità:

$$\begin{aligned} -A \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1^2 - A \sin(\theta_1) \ddot{\theta}_1 - B \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 - B \sin(\theta_2) \ddot{\theta}_2 \\ - C \cos(\theta_3) \dot{\theta}_3^2 - C \sin(\theta_3) \ddot{\theta}_3 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -A \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1^2 + A \cos(\theta_1) \ddot{\theta}_1 - B \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + B \cos(\theta_2) \ddot{\theta}_2 \\
& - C \sin(\theta_3) \dot{\theta}_3^2 + C \cos(\theta_3) \ddot{\theta}_3 = 0
\end{aligned}$$

(4. 14)

$$\begin{aligned}
B \sin(\theta_2) \ddot{\theta}_2 + C \sin(\theta_3) \ddot{\theta}_3 &= -A \sin(\theta_1) \ddot{\theta}_1 - A \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1^2 - B \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\
& - C \cos(\theta_3) \dot{\theta}_3^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B \cos(\theta_2) \ddot{\theta}_2 + C \cos(\theta_3) \ddot{\theta}_3 &= -A \cos(\theta_1) \ddot{\theta}_1 + A \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1^2 + B \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\
& + C \sin(\theta_3) \dot{\theta}_3^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} B \sin \theta_2 & C \sin \theta_3 \\ B \cos \theta_2 & C \cos \theta_3 \end{bmatrix} &= -A \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_1 + A \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 + B \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2^2 + \\
C \begin{bmatrix} -\cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{bmatrix} \dot{\theta}_3^2
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{BC \sin(\theta_2 - \theta_3)} \begin{bmatrix} C \cos \theta_3 & -C \sin \theta_3 \\ -B \cos \theta_2 & B \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

(4. 15)

CON

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = -A \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_1 + A \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 + B \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2^2 + C \begin{bmatrix} -\cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{bmatrix} \dot{\theta}_3^2$$

(4. 16)

Capitolo 5

Studio del cinematismo 2

Dopo questa prima fase puramente analitica, ho trasferito tutti i risultati ottenuti su un foglio Excel, in modo da trovare i valori che vanno ad assumere le varie grandezze. Per prima cosa ho creato una tabella in cui inserire tutti i dati in ingresso del cinematismo quali, lunghezza delle leve, velocità in ingresso e passo della leva. Lasciando la possibilità di modificare in dati anche in un secondo momento così da rendere il progetto più flessibile.

	DATI	
Z1	40 mm	0,04 m
Z2	45 mm	0,045 m
Z3	40 mm	0,04 m
X	91 mm	0,091 m
Y	0 mm	0 m

Figura 5.1. Dati di ingresso del cinematismo

PASSO
0,031416

Figura 5.2. Passo del cinematismo

Velocità in ingresso			θ1 P
			3,14 rad/s
			30 rpm

Figura 5.3. Velocità in ingresso del cinematismo

5.1 Posizione

Dopo aver inserito i dati in ingresso abbiamo inserito le formule riguardanti le posizioni degli elementi del cinematismo trovate in precedenza creando una tabella di valori che raffiguravano l'evoluzione del cinematismo al variare della posizione della prima leva (Figura 5.4).

	01(rad)	01(deg)	Cx	Cy	A	B	C	03,1(rad)	03,1(deg)	03,2(rad)	03,2(deg)	sen02,1	cos02,1	02,1(rad)	02,1(deg)	sen02,2	cos02,2	02,2(rad)	
0	0	0	0,131	0	0,01048	0	0,016736	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
1	0,031416	1,8	0,13098	0,0012564	0,010478	0,000101	0,016732	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
2	0,062832	3,6	0,130921	0,0025116	0,010474	0,000201	0,016722	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
3	0,094248	5,4	0,130822	0,0037643	0,010466	0,000301	0,016710	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
4	0,125664	7,2	0,130685	0,0050133	0,010455	0,000401	0,016679	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
5	0,15708	9	0,130508	0,0062574	0,010441	0,000501	0,016646	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
6	0,188496	10,8	0,130291	0,0074953	0,010423	0,0006	0,016607	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
7	0,219911	12,6	0,130037	0,0087257	0,010403	0,000698	0,016561	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
8	0,251327	14,4	0,129743	0,0099476	0,010379	0,000796	0,016507	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
9	0,282743	16,2	0,129412	0,0111596	0,010353	0,000893	0,016447	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
10	0,314159	18	0,129042	0,0123607	0,010323	0,000989	0,016383	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
11	0,345575	19,8	0,128635	0,0135495	0,010291	0,001084	0,016306	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
12	0,376991	21,6	0,128191	0,014725	0,010255	0,001178	0,016225	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
13	0,408407	23,4	0,12771	0,0158859	0,010217	0,001271	0,016137	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
14	0,439823	25,2	0,127194	0,0170312	0,010175	0,001362	0,016043	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
15	0,471239	27	0,12663	0,0181596	0,010131	0,001453	0,015943	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
16	0,502655	28,8	0,126052	0,0192701	0,010084	0,001542	0,015836	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
17	0,534071	30,6	0,12543	0,0203617	0,010034	0,001629	0,015722	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
18	0,565487	32,4	0,124773	0,0214331	0,009982	0,001715	0,015603	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
19	0,596903	34,2	0,124083	0,0224833	0,009927	0,001799	0,015477	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
20	0,628319	36	0,123361	0,0235114	0,009869	0,001881	0,015346	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
21	0,659734	37,8	0,122606	0,0245163	0,009808	0,001961	0,015208	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
22	0,69115	39,6	0,121821	0,025497	0,009746	0,00204	0,015065	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
23	0,722566	41,4	0,121004	0,0264525	0,00968	0,002116	0,014917	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
24	0,753982	43,2	0,120159	0,0273819	0,009613	0,002191	0,014763	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
25	0,785398	45	0,119284	0,0282843	0,009543	0,002263	0,014604	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
26	0,816814	46,8	0,118382	0,0291587	0,009471	0,002333	0,01444	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
27	0,84823	48,6	0,117452	0,030004	0,009396	0,0024	0,01427	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
28	0,879646	50,4	0,116497	0,0308205	0,00932	0,002466	0,014096	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
29	0,911062	52,2	0,115516	0,0316062	0,009241	0,002528	0,013918	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
30	0,942478	54	0,114511	0,0323607	0,009161	0,002589	0,013735	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
31	0,973894	55,8	0,113483	0,0330832	0,009079	0,002647	0,013548	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
32	1,00531	57,6	0,112433	0,0337731	0,008995	0,002702	0,013357	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
33	1,036726	59,4	0,111362	0,0344297	0,008909	0,002754	0,013162	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
34	1,068142	61,2	0,11027	0,0350523	0,008822	0,002804	0,012963	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
35	1,099557	63	0,10916	0,0356403	0,008733	0,002851	0,012761	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
36	1,130973	64,8	0,108031	0,0361931	0,008642	0,002895	0,012556	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
37	1,162389	66,6	0,106886	0,0367102	0,008551	0,002937	0,012347	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
38	1,193805	68,4	0,105725	0,0371911	0,008458	0,002975	0,012136	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
39	1,225221	70,2	0,10455	0,0376352	0,008364	0,003011	0,011922	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
40	1,256637	72	0,103361	0,0380423	0,008269	0,003043	0,011706	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
41	1,288053	73,8	0,10216	0,0384117	0,008173	0,003073	0,011487	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
42	1,319469	75,6	0,100948	0,0387433	0,008076	0,003099	0,011266	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
43	1,350885	77,4	0,099726	0,0390367	0,007978	0,003123	0,011044	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
44	1,382301	79,2	0,098495	0,0392915	0,00788	0,003143	0,01082	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
45	1,413717	81	0,097257	0,0395075	0,007781	0,003161	0,010595	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
46	1,445133	82,8	0,096013	0,0396846	0,007681	0,003175	0,010368	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
47	1,476549	84,6	0,094764	0,0398225	0,007581	0,003186	0,010141	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
48	1,507964	86,4	0,093512	0,0399211	0,007481	0,003194	0,009913	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
49	1,53938	88,2	0,092256	0,0399803	0,007381	0,003198	0,009685	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
50	1,570796	90	0,091	0,04	0,00728	0,0032	0,009456	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
51	1,602212	91,8	0,089744	0,0399803	0,007179	0,003198	0,009227	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
52	1,633628	93,6	0,088488	0,0399211	0,007079	0,003194	0,008999	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
53	1,665044	95,4	0,087236	0,0398225	0,006979	0,003186	0,008771	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
54	1,69646	97,2	0,085987	0,0396846	0,006879	0,003175	0,008544	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
55	1,727876	99	0,084743	0,0395075	0,006779	0,003161	0,008317	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
56	1,759292	100,8	0,083505	0,0392915	0,00668	0,003143	0,008092	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
57	1,790708	102,6	0,082274	0,0390367	0,006582	0,003123	0,007868	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
58	1,822124	104,4	0,081052	0,0387433	0,006484	0,003099	0,007646	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
59	1,85354	106,2	0,07984	0,0384117	0,006387	0,003073	0,007425	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
60	1,884956	108	0,078639	0,0380423	0,006291	0,003043	0,007206	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
61	1,916372	109,8	0,07745	0,0376352	0,006196	0,003011	0,006989	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!
62	1,947788	111,6	0,076275	0,0371911	0,006102	0,002975	0,006776	-2,749022	-157,5074	-2,62682	-150,5057	-0,48641	-0,87373	-2,63362	-150,89508	-0,38884	-0,92131	-2,74223	
63	1,979203	113,4	0,075114	0,0367102	0,006009	0,002937	0,006565	-2,879568	-164,9871	-2,49444	-142,921	-0,58553	-0,81065	-2,61606	-144,15979	-0,27986	-0,96004	-2,82796	
64	2,010619	115,2	0,073969	0,0361931	0,005918	0,002895	0,006356	-2,952472	-169,1642	-2,42061	-138,6906	-0,63718	-0,77071	-2,45075	-140,41785	-0,17151	-0,97606	-2,92233	
65	2,042035	117	0,072881	0,0356403	0,005827	0,002851	0,006151	-3,010009	-172,4608	-2,36309	-135,3949	-0,76738	-0,73747	-2,40011	-137,51638	-0,16781	-0,98582	-2,97298	
66	2,073451	118,8	0,07173	0,0350523	0,005738	0,002804	0,005949	-3,059575	-175,3007	-2,31452	-132,6125	-0,70612	-0,7081	-2,35759	-135,0802	-0,12476	-0,99219	-3,0165	
67	2,104867	120,6	0,070638	0,0344297	0,005651	0,002754	0,00575	-3,104164	-177,8555	-2,27198	-130,1746	-0,73184	-0,68147	-2,32057	-132,95898	-0,08592	-0,9963	-3,05557	
68	2,136283	122,4	0,069567	0,0337731	0,005565	0,002702	0,005555	-3,137842	-179,78509	-2,23392	-127,9941	-0,75385	-0,65705	-2					

Valutando e raffigurando i punti di criticità che si presentano a 111,6 gradi e 248,4 gradi, si evidenziano i punti in cui le leve si vanno ad allineare e il cinematismo va a rottura.

- **111,6 gradi**

Configurazione a 111,6 gradi	
0	0
-0,01472	0,0371911
-0,05618	0,0196935
-0,091	0

Figura 5.5

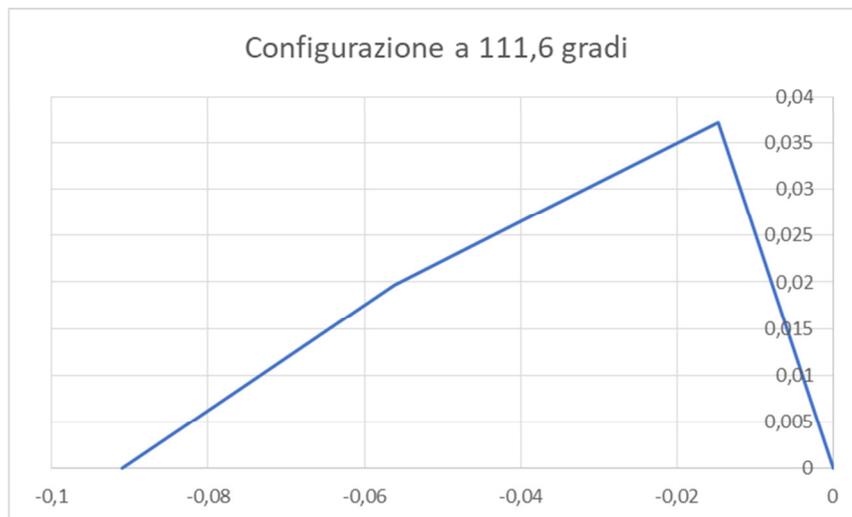


Figura 18.6. Configurazione assunta dal cinematismo a 111,6 gradi

- **248,4 gradi**

Configurazione a 248,4 gradi	
0	0
-0,01472	-0,037191
-0,05404	-0,015303
-0,091	0

Figura 5.719

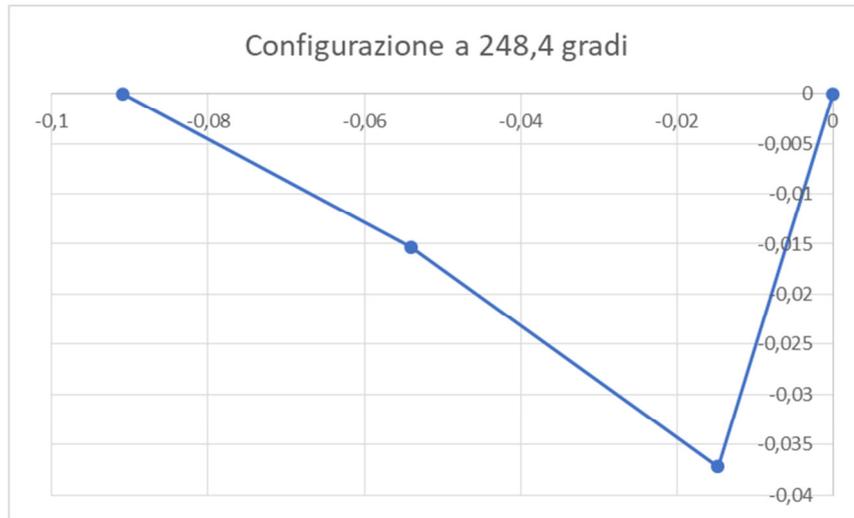


Figura 5.8. Configurazione assunta dal cinematismo a 248,4 gradi

5.2 Velocità e accelerazione

Allo stesso modo, sono state riscritte su Excel le formule per trovare le velocità e le accelerazioni, imponendo una velocità in ingresso prefissata per il braccio della palmola, la quale è data dalla coppia fornita dal motore, con particolare attenzione alle velocità delle due leve, e la velocità angolare dell'albero. Mentre per le accelerazioni si è data particolare attenzione a quella dell'albero che è la stessa accelerazione delle griffe sottostanti. Questa accelerazione si rivelerà particolarmente importante in seguito per l'analisi statica del cinematismo. Riporto nelle tabelle sottostanti i valori trovati per i vari parametri nell'intervallo di funzionamento del cinematismo cioè tra 111,6 gradi e 248,4 gradi.

$\theta_{2,1} P$ (rad/s) $\theta_{3,1} P$ (rad/s)

24,23599528	-27,03521011
7,766123304	-8,623989394
5,622108117	-6,324363689
4,594516701	-5,283060651
3,945615604	-4,671518763
3,476638727	-4,266774626
3,108508911	-3,980272496
2,802686312	-3,768948023
2,537825909	-3,609012842
2,301007345	-3,486105008
2,083880045	-3,390957351
1,880769728	-3,317266449
1,68766797	-3,2605515
1,501657489	-3,217500933
1,320568582	-3,185577208
1,142765659	-3,16276644
0,967010678	-3,147413303
0,792373964	-3,138108273
0,618175249	-3,133608238
0,443944497	-3,132779203
0,269395905	-3,134554199
0,094410676	-3,137902172
-0,080974509	-3,141805284
-0,256575637	-3,145243047
-0,432067908	-3,147182459
-0,606992221	-3,146573667
-0,780762867	-3,142350994
-0,952677553	-3,133439228
-1,121930653	-3,118765061
-1,287630359	-3,097273451
-1,448820084	-3,067948427
-1,604504118	-3,029837555
-1,75367708	-2,982078931
-1,895356292	-2,923929233
-2,02861575	-2,85479103
-2,152619998	-2,774237414
-2,266656013	-2,682031953
-2,37016111	-2,578142165
-2,462745098	-2,462745098
-2,544205202	-2,336224148

-2,614532867	-2,199156927
-2,673912154	-2,052294738
-2,72271014	-1,89653486
-2,761460338	-1,732887397
-2,790840625	-1,562438774
-2,811647502	-1,386314066
-2,824768585	-1,205640242
-2,831155173	-1,021512081
-2,831796486	-0,834962078
-2,827696872	-0,646935196
-2,819856878	-0,458268751
-2,809258766	-0,26967732
-2,796856697	-0,081742146
-2,78357164	0,105095771
-2,770290855	0,290539919
-2,757871824	0,474441025
-2,747150503	0,6567996
-2,738953996	0,837769704
-2,734117972	1,017665515
-2,733509615	1,196972622
-2,738057521	1,37636646
-2,748790896	1,556741202
-2,766891904	1,739253885
-2,793767352	1,92539107
-2,83114986	2,117069611
-2,8812455	2,316790677
-2,946957312	2,527880084
-3,032237853	2,7548745
-3,142671855	3,004166896
-3,286493598	3,285140737
-3,476486384	3,612295022
-3,733842553	4,0095708
-4,096937979	4,520196388
-4,644678225	5,232899127
-5,575653194	6,370818613
-7,627418045	8,762694653
-24,00922745	27,26197794

Figura 20. Tabella delle velocità assunte dagli angoli θ_3 e θ_4

$\theta_{2,P}$ (rad/s)	$\theta_{3,P}$ (rad/s)
------------------------	------------------------

-24,00922745	27,26197794
-7,627418045	8,762694653
-5,575653194	6,370818613
-4,644678225	5,232899127
-4,096937979	4,520196388
-3,733842553	4,0095708
-3,476486384	3,612295022
-3,286493598	3,285140737
-3,142671855	3,004166896
-3,032237853	2,7548745
-2,946957312	2,527880084
-2,8812455	2,316790677
-2,83114986	2,117069611
-2,793767352	1,92539107
-2,766891904	1,739253885
-2,748790896	1,556741202
-2,738057521	1,37636646
-2,733509615	1,196972622
-2,734117972	1,017665515
-2,738953996	0,837769704
-2,747150503	0,6567996
-2,757871824	0,474441025
-2,770290855	0,290539919
-2,78357164	0,105095771
-2,796856697	-0,081742146
-2,809258766	-0,26967732
-2,819856878	-0,458268751
-2,827696872	-0,646935196
-2,831796486	-0,834962078
-2,831155173	-1,021512081
-2,824768585	-1,205640242
-2,811647502	-1,386314066
-2,790840625	-1,562438774
-2,761460338	-1,732887397
-2,72271014	-1,89653486
-2,673912154	-2,052294738
-2,614532867	-2,199156927
-2,544205202	-2,336224148
-2,462745098	-2,462745098
-2,37016111	-2,578142165

-2,266656013	-2,682031953
-2,152619998	-2,774237414
-2,02861575	-2,85479103
-1,895356292	-2,923929233
-1,75367708	-2,982078931
-1,604504118	-3,029837555
-1,448820084	-3,067948427
-1,287630359	-3,097273451
-1,121930653	-3,118765061
-0,952677553	-3,133439228
-0,780762867	-3,142350994
-0,606992221	-3,146573667
-0,432067908	-3,147182459
-0,256575637	-3,145243047
-0,080974509	-3,141805284
0,094410676	-3,137902172
0,269395905	-3,134554199
0,443944497	-3,132779203
0,618175249	-3,133608238
0,792373964	-3,138108273
0,967010678	-3,147413303
1,142765659	-3,16276644
1,320568582	-3,185577208
1,501657489	-3,217500933
1,68766797	-3,2605515
1,880769728	-3,317266449
2,083880045	-3,390957351
2,301007345	-3,486105008
2,537825909	-3,609012842
2,802686312	-3,768948023
3,108508911	-3,980272496
3,476638727	-4,266774626
3,945615604	-4,671518763
4,594516701	-5,283060651
5,622108117	-6,324363689
7,766123304	-8,623989394
24,23599528	-27,03521011

Figura 5.10. Tabella delle accelerazioni assunte dagli angoli ϑ_3 e ϑ_4 .

Capitolo 6

Analisi statica

L'analisi statica può essere condotta su un meccanismo, ad uno o più gradi di libertà, oppure su una struttura isostatica o anche iperstatica. I meccanismi sono caratterizzati dalla presenza di vincoli sui quali agiscono le forze (o coppie), dette motrici, che compiono lavoro positivo sul sistema. Molto spesso l'analisi statica ha l'obiettivo di trovare il valore della forza motrice che equilibra gli altri carichi applicati al sistema. Altre volte può essere richiesto di determinare gli spostamenti che corrispondono alla configurazione di equilibrio quando tutte le forze esterne sono assegnate. Le strutture, invece, non hanno la possibilità di movimento; esse sono dette isostatiche (o staticamente determinate) se tutti i vincoli sono tra loro indipendenti e, in questo caso, l'applicazione delle equazioni cardinali della statica consente la determinazione di tutte le forze che entrano in gioco. Nel caso in cui siano presenti più vincoli di quelli strettamente necessari ad impedire il movimento (sistema sovravincolato), alcuni vincoli risultano tra loro dipendenti e le strutture sono dette iperstatiche. Prima di esaminare i metodi a disposizione per l'esecuzione dell'analisi statica, occorre considerare i vari tipi di reazioni vincolari che, si sviluppano nei giunti a seguito del contatto tra le superfici coniugate e, alle applicazioni dei carichi esterni. Come regola generale, nel caso di vincoli perfetti, se un vincolo impedisce la traslazione in una certa direzione, allora sull'elemento vincolato agisce una forza in quella stessa direzione; analogamente, se viene impedita una rotazione, nasce una coppia di reazione. In presenza di attrito nascono reazioni tangenziali che, si oppongono al movimento anche nelle direzioni in cui il moto non è vincolato. Nel caso in cui avvenga effettivamente uno strisciamento tra le superfici in contatto, tali forze (o coppie) di attrito non vanno comunque annoverate tra le incognite del problema in quanto, possono essere espresse in funzione delle altre componenti della reazione vincolare.

6.1 Equazioni cardinali della statica

Condizione necessaria e sufficiente perché un corpo rigido sia in equilibrio è che siano nulli la risultante R e il momento M_O risultante di tutte le forze F_i che agiscono sul corpo stesso (equazioni cardinali della statica):

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sum_i F_i = 0 \\ M_O = \sum_i M_{O_i} = \sum_i (P_i - O) \times F_i = 0 \end{array} \right.$$

(6.1)

Le equazioni cardinali della statica, appena riportate per un singolo membro, valgono anche per sistemi multi-corpo: in questo caso, tuttavia, il soddisfacimento di tali equazioni per l'intero sistema risulta condizione necessaria per l'equilibrio ma solitamente non sufficiente a determinare le condizioni, per cui occorre applicare le equazioni di equilibrio ad ogni singolo membro del meccanismo. In altri casi, tuttavia, quando anche sia possibile ricavare immediatamente le reazioni vincolari con il telaio, è comunque necessario effettuare l'analisi sui singoli membri del meccanismo in quanto risulta di interesse la conoscenza di una o più forze interne. Per determinare le forze che agiscono nei giunti e sui supporti di una struttura o di un meccanismo, questo deve essere disassemblato e occorre tracciare il diagramma di corpo libero per ognuno degli n membri: in questo modo si possono scrivere $3n$ equazioni di equilibrio che, se il problema è ben posto, consentono di determinare le $3n$ forze (o coppie) incognite.

6.2 Principio dei lavori virtuali

Il principio dei lavori virtuali (PLV) è il più antico tra i principi energetici della meccanica; esso stabilisce che “in condizioni ideali il lavoro virtuale fatto dalle forze e coppie esterne agenti sul meccanismo è nullo”. Il lavoro virtuale è un lavoro fittizio sviluppato in corrispondenza di uno spostamento virtuale, cioè di un arbitrario spostamento infinitesimo dei punti del sistema compatibile con i vincoli

supposti fissi. Il lavoro virtuale di un sistema di forze F_i è quello compiuto dalle stesse in corrispondenza di spostamenti virtuali $d\mathbf{r}_i$ dei loro punti di applicazione:

$$\delta L = \sum F_i \cdot \delta \mathbf{r}_i$$

(6. 2)

Il principio dei lavori virtuali può essere efficacemente utilizzato anche per lo studio della statica dei sistemi meccanici: il principale vantaggio del metodo risiede nel fatto che esso fornisce direttamente un numero di equazioni pari al numero di gradi di libertà del meccanismo in cui non compaiono le reazioni vincolari, per cui le forze incognite sono facilmente determinabili; tuttavia il metodo non risulta vantaggioso nel caso in cui siano presenti forze interne di attrito. Si osserva che l'applicazione di questo metodo richiede di imporre esplicitamente la compatibilità degli spostamenti virtuali con i vincoli cinematici; in definitiva occorre seguire i seguenti passaggi:

- Esprimere le coordinate dei punti di applicazione delle forze in funzione di coordinate indipendenti.
- Ottenere le relazioni tra le variazioni di tali coordinate tramite differenziazione.
- Imporre l'annullarsi della somma dei lavori virtuali di tutte le forze e coppie che agiscono.

6.3 Analisi grafica

L'analisi grafica è stata nei decenni passati un importante strumento nelle mani dell'ingegnere per condurre lo studio dei meccanismi in condizioni statiche, ma ormai essa viene utilizzata esclusivamente per visualizzare più agevolmente lo stato di equilibrio oppure per acquisire una migliore comprensione fisica del funzionamento del sistema. Dal momento che le forze sono vettori applicati, l'analisi viene sempre svolta tracciando le relative costruzioni grafiche sul disegno stesso, salvo poi rappresentare a lato il poligono di chiusura delle forze una volta determinate tutte le loro direzioni; ovviamente per la realizzazione di tale poligono è

necessario scegliere preventivamente una scala in modo che, una volta determinata graficamente la sua chiusura, la lettura della lunghezza di un vettore consenta di risalire alla sua intensità. Lo svolgimento dell'analisi inizia normalmente imponendo l'equilibrio del membro al quale è applicato il carico noto, l'applicazione del principio di azione e reazione consente poi di rivolgere lo studio ai membri successivi, fino al completamento dell'analisi. Nel caso di assenza di moto relativo tra i membri, la presenza di attrito nei vincoli non introduce informazioni aggiuntive, ma al termine dell'analisi è necessario verificare che tutte le relazioni vincolari si trovino all'interno dei rispettivi coni di attrito. Se, invece, si verifica uno strisciamento tra due superfici accoppiate, è possibile determinare immediatamente la direzione della reazione vincolare, dal momento che essa risulta inclinata dell'angolo di attrito.

6.4 Statica dei sistemi in presenza di attrito

L'analisi dell'equilibrio dei sistemi meccanici può essere complicata dalla presenza di attrito secco tra le superfici coniugate; in questo caso, infatti, il fenomeno è fortemente non-lineare e inoltre, se non si è in presenza di moto relativo, la legge di Coulomb è una disequazione che deve essere soddisfatta ma non specifica il valore della forza di attrito, ma solo il suo limite superiore. In generale le forze di attrito hanno sempre verso tale da opporsi al moto relativo tra i membri in contatto: talvolta tuttavia, a determinazione del verso del moto relativo tra le superfici in contatto può non essere ovvia; le difficoltà maggiori si incontrano nei casi in cui ci sono diversi punti di contatto e non è noto a priori ove avvenga lo scorrimento relativo. Vista la varietà di situazioni che si possono presentare, i problemi con attrito sono divisi in 4 diverse tipologie e il relativo approccio risolutivo viene mostrato per ogni caso:

- Verifica dell'equilibrio: il problema non impone una condizione di moto incipiente per cui occorre verificare se, con le forze in gioco, il sistema resta in quiete oppure innesca il movimento.

- Strisciamento globale: il problema è caratterizzato dallo strisciamento su tutte le superfici di contatto.
- Strisciamento locale: sotto le condizioni di carico assegnate, lo strisciamento avviene in uno o più punti ma in altri punti di contatto il sistema resta in aderenza: in questo caso sono teoricamente possibili varie modalità in cui si può innescare il moto, per cui bisogna procedere per ipotesi.
- Strisciamento o ribaltamento: anche in questo caso, come nel precedente, sono possibili varie modalità di innesco del moto, tra cui lo strisciamento in uno o più punti di contatto oppure il ribaltamento di un corpo.

6.5 Statica del cinematismo

Per effettuare l'analisi statica delle griffe utilizziamo le equazioni cardinali della statica, trascurando l'attrito. Riportiamo in seguito uno schema della griffa e delle forze che entrano in gioco (Figura 6.1).

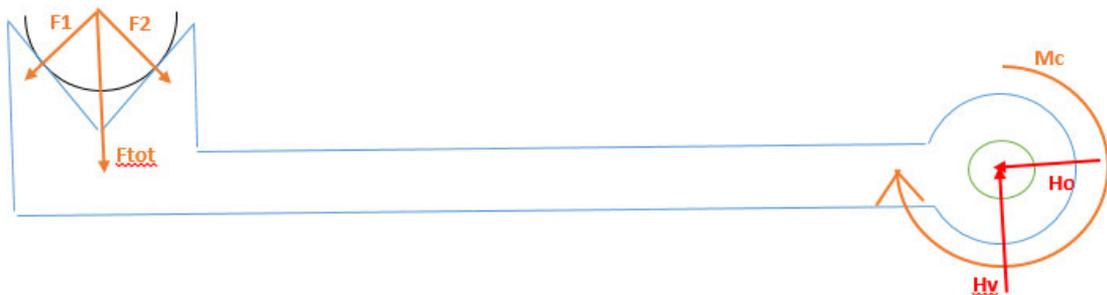


Figura 21. Schema delle forze scambiate sulla griffa

Nella griffa agisce un momento M_c , le reazioni vincolari date dall'albero e due forze nei punti di contatto che si vanno ad annullare orizzontalmente quindi le equazioni cardinali della statica diventano:

$$\begin{cases} H_o = 0 \\ H_v = F_{tot} \\ M_c = F_{tot} * b \end{cases}$$

(6.3)

Dove b rappresenta il braccio della forza dal centro di applicazione del momento. Quindi la forza che subirà il collarino del disco sarà pari a $F_{tot} = \frac{M_c}{b}$. Una volta trovata la formula con cui ricavare la forza agente sulla griffa l'abbiamo inserite all'interno di Excel per trovare i valori che andava ad assumere. Di seguito si riportano i valori assunti dalla forza nell'intervallo di funzionamento del cinematismo.

Forza sul collarino configurazione 1		
111,6	-2,22825	N
113,4	-3,98999	N
115,2	-5,05572	N
117	-5,86868	N
118,8	-6,52377	N
120,6	-7,06308	N
122,4	-7,51359	N
124,2	-7,88899	N
126	-8,20162	N
127,8	-8,46034	N
129,6	-8,67227	N
131,4	-8,84343	N
133,2	-8,97901	N
135	-9,08365	N
136,8	-9,16156	N
138,6	-9,21661	N
140,4	-9,25245	N
142,2	-9,27253	N
144	-9,28015	N
145,8	-9,27849	N
147,6	-9,27066	N
149,4	-9,2597	N
151,2	-9,24864	N
153	-9,24048	N
154,8	-9,23827	N
156,6	-9,2451	N
158,4	-9,26418	N
160,2	-9,29886	N
162	-9,3527	N
163,8	-9,42952	N
165,6	-9,53354	N
167,4	-9,66946	N
169,2	-9,84261	N
171	-10,0592	N
172,8	-10,3265	N
174,6	-10,6533	N

176,4	-11,0503	N
178,2	-11,531	N
180	-12,1122	N
181,8	-12,8162	N
183,6	-13,6722	N
185,4	-14,7202	N
187,2	-16,0159	N
189	-17,6401	N
190,8	-19,7139	N
192,6	-22,4283	N
194,4	-26,103	N
196,2	-31,3164	N
198	-39,2344	N
199,8	-52,611	N
201,6	-79,8869	N
203,4	-165,537	N
205,2	2467,494	N
207	146,8814	N
208,8	75,98654	N
210,6	51,39079	N
212,4	38,90082	N
214,2	31,33692	N
216	26,25571	N
217,8	22,5971	N
219,6	19,82645	N
221,4	17,64457	N
223,2	15,87058	N
225	14,3883	N
226,8	13,11926	N
228,6	12,00802	N
230,4	11,01366	N
232,2	10,10454	N
234	9,254806	N
235,8	8,441789	N
237,6	7,643627	N
239,4	6,836493	N
241,2	5,99002	N
243	5,057022	N
244,8	3,939737	N
246,6	2,197417	N

Figura 22. Valori della forza sviluppata sul collarino

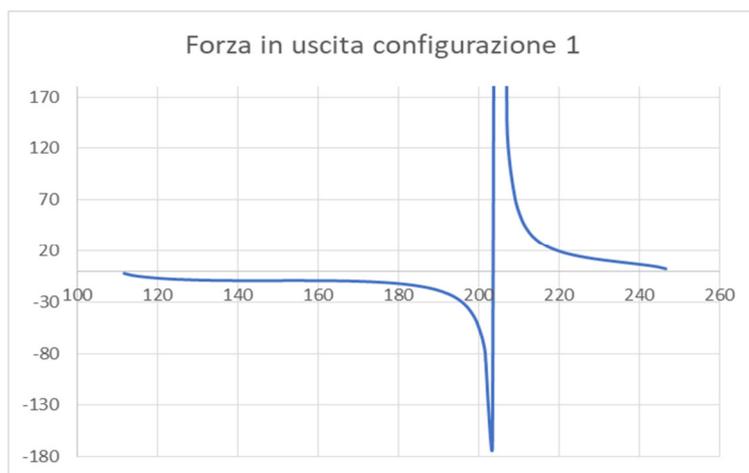


Figura 23. Andamento della forza sviluppata sul collarino

Capitolo 7

Ansys

Dopo aver trovato i valori della forza su Excel abbiamo deciso di effettuare una verifica di tali valori attraverso il software Ansys, il quale offre analisi strutturali che permettono agli ingegneri di risolvere e analizzare strutture complesse. Il primo passo è stato quello di impostare i vincoli del nostro cinematismo. Questo passaggio ha richiesto diverso tempo in quanto la struttura presentava diversi problemi e il programma non era in grado di risolverli, quindi abbiamo deciso di semplificare la struttura e togliere gli attriti interni. Successivamente abbiamo applicato i carichi e lanciato il programma, il quale ha confermato i valori trovati precedentemente su Excel. Di seguito si riportano le immagini raffiguranti i vincoli, le forze sulla struttura e dei giunti del cinematismo.

- Vincoli

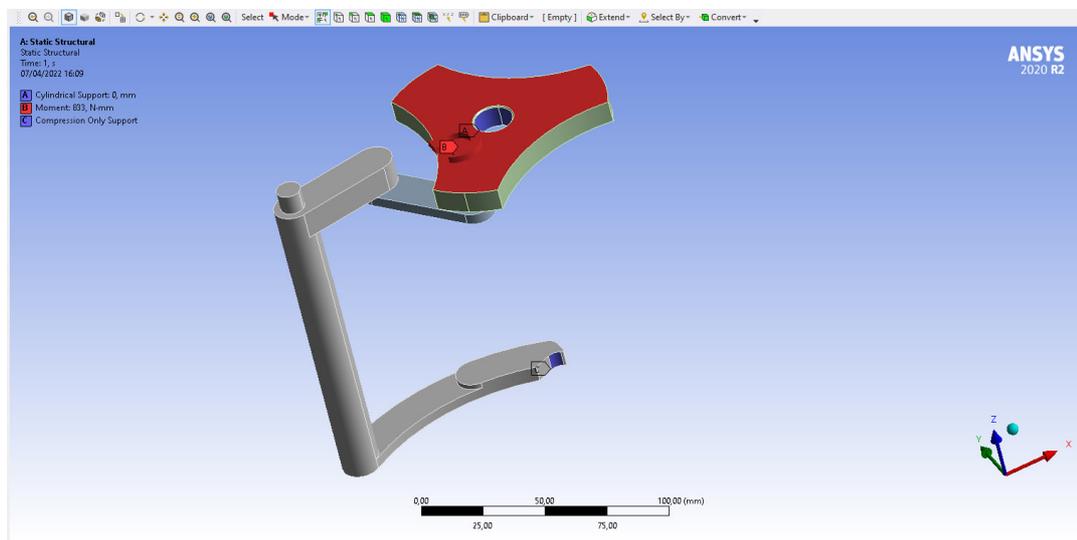


Figura 24. Vincoli inseriti su Ansys

- Forza

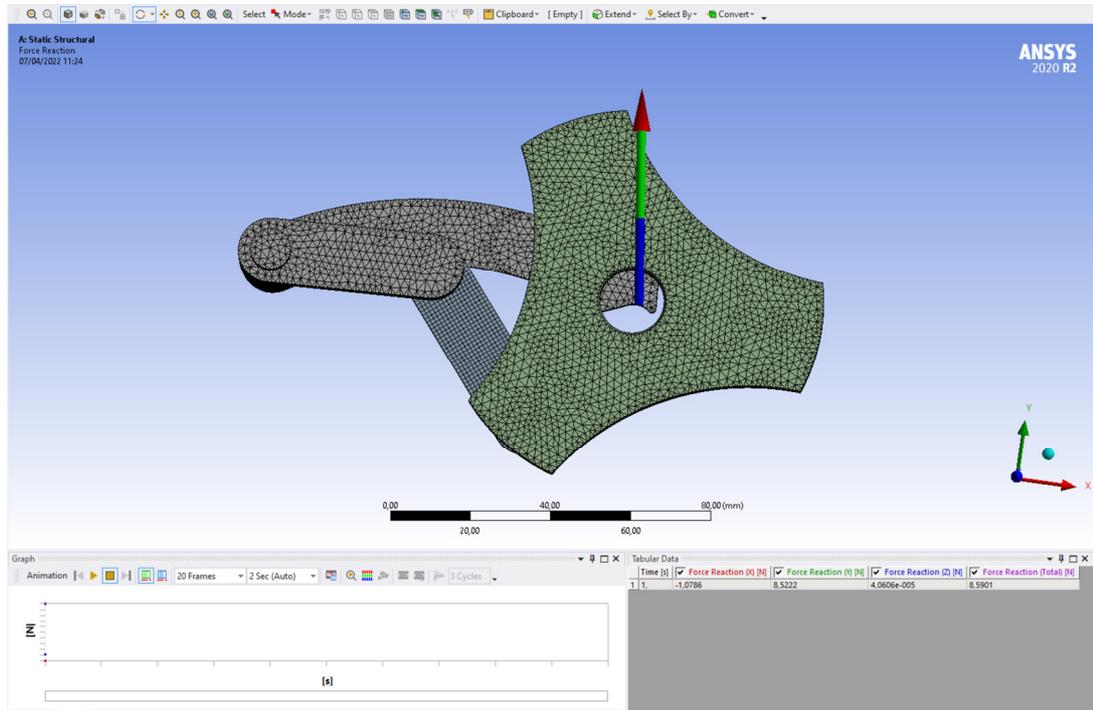


Figura 25. Forza sviluppata sul collarino valutata tramite Ansys

- Giunti

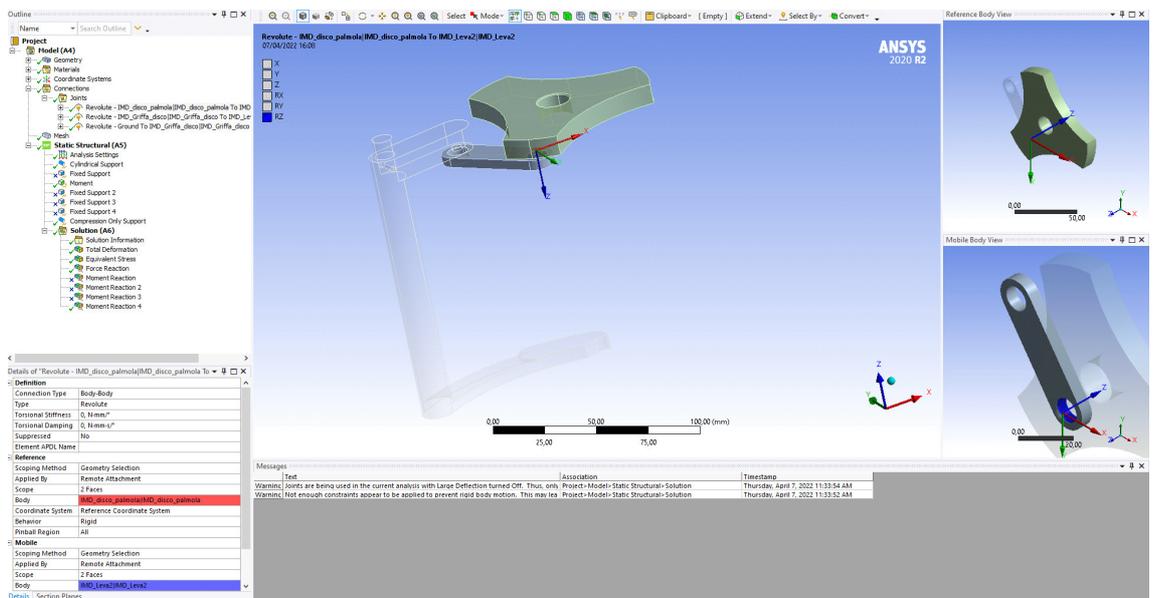


Figura 7.3. Giunti inseriti su Ansys

Capitolo 8

Conclusioni

L'analisi statica delle forze si è rivelata molto importante per il nostro lavoro, ha messo in luce un problema importante in quanto raggiunta la posizione di chiusura il cinematismo forniva delle piccole forze di poco superiori a quelle necessarie per il sollevamento del disco. Per ovviare a questo problema e aumentare l'intensità delle forze in gioco verrà usata una palmola tandem (DSM(-T)) che è in grado di raddoppiare la coppia in ingresso, in quanto è in grado di applicare un doppio momento torcente e verrà eseguita una godronatura sulle griffe per aumentare il coefficiente di attrito. Questo studio è stato utilizzato anche per un altro manipolatore il quale presentava lo stesso cinematismo ma le pinze andavano a lavorare sulla faccia esterna della griffa e quindi era necessaria una forza di molto superiore rispetto a quella che era stata trovata inizialmente. Per concludere riporto alcuni dettagli di progettazione, si è scelto utilizzare un acciaio inossidabile in quanto

si sta lavorando con la grafite che rilascia delle polveri le quali possono causare reazione di ossidazione e quindi peggiorare la vita e le proprietà meccaniche degli acciai, dagli studi fatti tramite Ansys si è evidenziato che le tensioni in gioco non recano alcun pericolo per la vita dell'acciaio. Mentre si è scelto di utilizzare un attuatore pneumatico al posto di un attuatore elettrico per due motivi principali il primo riguarda una questione puramente economica in quanto l'attuatore pneumatico ha un costo molto minore rispetto a quelli elettrici, in secondo luogo in per una facilità di connessione del end-effector al manipolatore attraverso il cambio in quanto si mettono in collegamento delle valvole d'aria ed è una connessione più rapida rispetto ad un collegamento tra cavi elettrici.

Sitografia

[1]<https://www.marche-manufacturing.it/it/content/aea-srl-gruppo-loccioni>

[2]https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000290003_en.pdf?rev=2c8f0f334dfc4f478d227ad264e6d149&hash=7023299F0DC2485D1DDBDA975F84E42D

[3]https://schunk.com/it/it/tecnologia-di-automazione/sistemi-di-cambio/sws/c/PGR_1135

[4]<https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presenza/sensori/mms-22-a/mms-22-a-05v-m08/p/000000000000315805>

[5]https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presenza/sensori/in-ex/c/PGR_4251

[6]<https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presenza/pinza-parallela/pgn-plus/pgn-plus-40/p/000000000000371080>

[7]<https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presenza/pinze-autocentranti/pzn-plus/pzn-plus-40/p/000000000000303308>

Bibliografia

[1] Massimo Callegari, Pietro Fanghella, Francesco Pellicano, Meccanica applicata alle macchine, seconda edizione, CittàStudi edizioni

Ringraziamenti

Eccomi giunto alla fine di questa tesi e di questi tre splendidi anni di Università, nei quali credo di essere maturato molto come persona. Sono tante le conoscenze che ho fatto durante questo percorso, le amicizie che ho coltivato, i rapporti che ho stretto. Vorrei dedicare queste ultime pagine per ringraziare tutte le persone con cui ho collaborato e tutte le persone che mi hanno sostenuto in questo percorso.

Innanzitutto, ringrazio il mio relatore Marco Sasso, sempre pronto a darmi le giuste indicazioni in ogni fase della realizzazione dell'elaborato. Grazie a lei ho accresciuto le mie conoscenze e le mie competenze.

Ringrazio tutto lo staff dell'impresa Loccioni, in cui ho svolto un tirocinio formativo della durata di un mese e complementare alla redazione della tesi, per l'ospitalità e per le abilità acquisite sul campo.

Vorrei ringraziare la mia famiglia, perché mi è sempre stata accanto e non mi ha fatto mai mancare il suo sostegno e il suo aiuto durante questi anni, sembra scontato ma senza di voi non sarei mai riuscito a raggiungere questo traguardo. Grazie papà Moreno, per tutte le volte che mi hai dato un consiglio e per tutte le volte che mi hai spronato con una semplice canzone prima di un esame. Grazie mamma Morena, per avermi coccolato in questi anni chiedendomi tutti i giorni come era andata la mia giornata e per esserci sempre per ogni problema. Grazie Gaia, mia sorella, il mio punto di riferimento, hai creduto in me fin dall'inizio e non hai mai dubitato, proverò a darti altre soddisfazioni. Grazie alle mie nonne, Luciana e Nella, alle mie zie, Maria e Serenella, a mio zio Lorenzo e alle mie cugine, Alessia, Chiara e Irene, per tutti i pranzi insieme e per tutti i sorrisi che non mi fate mai mancare. Grazie a Mattia, per essere ormai una parte importante della mia famiglia e per essere sempre disponibile ad aiutarmi per ogni mio progetto.

Un ringraziamento dal cuore va ai miei colleghi e compagni di corso Tocca e Ripa, avete reso questi anni molto più facili e divertenti, siete insostituibili.

Un grande ringraziamento lo devo anche alla mia seconda famiglia, Brino, Care, Giammi, Giu, Ja, Nord, Pacca, Pergo, Pie, Pizzi, Sabba e Tommi. Compagni di vita ormai da anni e persone a cui non potrò mai rinunciare. Spero di avervi resi un po' fieri di me, vi voglio bene.

Un ringraziamento sincero voglio rivolgerlo a tutta la famiglia Carnevali, Gianni, Noemi, Alice, Silvia, Lucky e Nala, mi avete sostenuto nel mio momento di massima difficoltà e avete sempre creduto in me, c'è anche tanto di voi in questo traguardo.

Un ringraziamento doppio va alle due donne che mi supportano e sopportano ormai da anni, Ludovica e Nicole, psicologhe e sempre pronte a darmi un consiglio in ogni mio momento di difficoltà.

Ringrazio poi tutte le persone che non ho nominato esplicitamente in queste pagine, ma che hanno avuto un ruolo importante nella mia vita, perché i ricordi di tutti voi sono impressi in maniera indelebile nel mio cuore.

Un ultimo ringraziamento vorrei rivolgerlo a mio nonno Vito, mi avevi dato il consiglio più importante e solo seguendolo sono riuscito a togliermi tante soddisfazioni. Ti avevo promesso di laurearmi nel minor tempo possibile, non sono riuscito a farti vedere questo mio traguardo ma spero di averti reso fiero di me.