

**POLITECNICO DI TORINO**

**SCUOLA DI DOTTORATO**

**Dottorato di Ricerca in Meccanica in esercizio di apprendistato  
XXVII Ciclo**

**Tesi di Dottorato**

**QuBu Gripper**  
**Sviluppo di un gripper industriale**  
**per processi ad elevata automazione**



**Luca Girolamo Butera**

**Tutore accademico**  
Prof. Giuseppe Quaglia

**Coordinatore del corso di dottorato**  
Prof. Luigi Garibaldi

Aprile 2016

# Indice

Sommario.....	3
Capitolo 1    Introduzione .....	5
1.1    Contesto e obiettivi .....	9
1.1.1    Analisi dell'elemento da manipolare .....	10
1.1.2    Analisi della cella robotizzata e delle fasi del processo produttivo.....	13
1.1.3    Definizione delle specifiche di progetto .....	22
1.1.4    Project plan .....	25
Capitolo 2    Stato dell'arte dei gripper.....	26
2.1    Classificazione dei gripper .....	28
2.1.1    Impactive Gripper.....	30
2.1.2    Ingressive Gripper.....	34
2.1.3    Astrictive Gripper .....	34
2.1.4    Contigutive Gripper .....	36
2.2    Sensoristica e controllo .....	37
2.3    Nuovi sviluppi e trend di ricerca.....	38
2.4    Presentazione dei gripper utilizzati attualmente nel processo di produzione.....	40
Capitolo 3    Progettazione e prototipazione del gripper.....	43
3.1    Fasi del processo di progettazione e di prototipazione .....	43
3.1.1    Definizione del concetto di modularità .....	43
3.2    Processo di definizione dell'architettura .....	45
3.2.1    Definizione della tipologia di presa.....	45
3.2.2    Definizione del movimento delle griffe .....	46
3.2.3    Analisi e definizione dei parametri geometrici dell'architettura .....	52
3.3    Processo di definizione del sistema di trasmissione e di attuazione .....	66
3.3.1    Analisi delle forze coinvolte durante la fase di centraggio e di presa .....	66
3.3.2    Definizione del sistema di trasmissione e di attuazione .....	74
3.3.3    Sensorizzazione e controllo .....	87
3.4    Progettazione esecutiva e prototipazione.....	89
3.4.1    Progettazione esecutiva del gripper .....	89
3.4.2    Prototipo del QuBu gripper .....	92
Capitolo 4    Sistema di controllo e prove sperimentali .....	94
4.1    Sistema di controllo.....	94

4.1.1	Descrizione del sistema di controllo del gripper.....	98
4.1.2	Descrizione del ciclo di funzionamento del gripper.....	99
4.2	Prove sperimentali .....	102
4.2.1	Prove di “Tipo A”: Prove di Autocentraggio.....	102
4.2.2	Esecuzione delle prove e analisi dei risultati .....	103
4.2.3	Prove di “Tipo B”: Caratterizzazione della pinza di manipolazione.....	115
4.2.4	Esecuzione delle prove e analisi dei risultati .....	118
Capitolo 5	Sviluppi futuri del gripper e conclusioni .....	136
5.1.1	Sviluppi futuri .....	136
5.1.2	Conclusioni .....	140
Capitolo 6	Bibliografia .....	142
Capitolo 7	Elenco figure.....	145
Capitolo 8	Elenco tabelle .....	149
	Ringraziamenti .....	150

## Sommario

In questa tesi di dottorato è presentato il processo di progettazione di un gripper industriale innovativo, chiamato “QuBu Gripper”.

La funzione principale di questo gripper innovativo, installato al polso di un robot antropomorfo a sei assi, è la manipolazione di prodotti appartenenti alla famiglia “Anelli di tenuta olio” all’interno di una cella di stampaggio robotizzata ad elevata automazione.

I criteri che hanno guidato l’intero processo di progettazione, che inizia dall’elaborazione dell’idea di una soluzione innovativa di gripper, fino alla realizzazione e industrializzazione del primo prototipo, sono stati la flessibilità, la versatilità, l’affidabilità e l’ottimizzazione delle prestazioni.

La prima fase del processo di progettazione del QuBu Gripper, presentata nel Capitolo 1, ha interessato l’analisi degli aspetti principali che influenzano il processo produttivo della cella di stampaggio. Nello specifico, il primo aspetto analizzato è quello che riguarda le caratteristiche fisiche e geometriche dell’oggetto da manipolare, successivamente è stato studiato l’intero ciclo di produzione degli anelli ed infine è stato esaminato l’ambiente di lavoro in cui deve operare il gripper.

L’analisi delle caratteristiche fisiche e geometriche degli oggetti da manipolare ha interessato gli intervalli dimensionali e fisici dei principali parametri che caratterizzano gli anelli di tenuta olio. È stata esaminata anche come si presenta la superficie di presa ed il tipo di materiale che la caratterizza. Lo studio del processo di manipolazione, che interessa il ciclo di lavoro della cella di produzione robotizzata, ha invece riguardato l’analisi di tutte le possibili configurazioni di presa che si presentano durante l’esecuzione del ciclo di lavoro. Infine, l’osservazione dell’ambiente di lavoro ha permesso di evidenziare i limiti geometrici che interessano il gripper per una completa integrazione con la cella robotizzata. L’obiettivo di questa prima fase del processo di progettazione è stato la definizione dei requisiti di progetto specifici del gripper.

La fase successiva del processo di progettazione, presentata nel Capitolo 2, ha invece interessato lo studio dello stato dell’arte dei gripper utilizzati maggiormente nei processi industriali. In particolare, nella prima parte del capitolo, sono presentate le principali categorie dei gripper e per ognuna di esse sono stati presentati gli aspetti caratterizzanti. La seconda parte del capitolo è invece dedicata alle principali categorie di sensori utilizzati nei gripper. Poiché il gripper è un dispositivo che interagisce con l’ambiente di lavoro, per poter gestire in maniera completa le fasi che costituiscono un generico processo di manipolazione, è necessario monitorare e controllare le informazioni derivanti da queste interazioni tramite un sistema di sensorizzazione. L’ultima parte del capitolo riporta lo studio dei diversi sistemi di manipolazione utilizzati attualmente nel processo di produzione degli anelli.

Il Capitolo 3 invece riporta la fase del processo di progettazione che ha portato alla realizzazione del primo prototipo. Un aspetto analizzato in questa fase ha interessato la sintesi dei meccanismi costituenti l’architettura del gripper, sia dal punto di vista della sintesi del tipo, sia per la definizione dei parametri funzionali. Sono state sviluppate e comparate diverse architetture, giungendo quindi alla scelta ritenuta ottimale per lo specifico contesto applicativo. La scelta dell’architettura ha poi permesso di definire il sistema di trasmissione con conseguente definizione del sistema di attuazione e dei sensori da implementare. Questi ultimi sono dipendenti dalla definizione delle tecniche di controllo di presa e di movimentazione degli anelli, durante l’esecuzione dell’intero ciclo di produzione. Infine è presentata la progettazione esecutiva e la realizzazione del primo prototipo del QuBu gripper.

Nello specifico, la prima parte di questo capitolo vede l’introduzione e la definizione del concetto di modularità. Questo perché, analizzando il processo di presa di un anello, sono stati individuati e distinti tre diversi stati che permettono di realizzare il processo di presa.

A questa prima parte segue quella in cui è presentato il processo di definizione dell'architettura della pinza di manipolazione. Il primo passo di questo processo ha visto la definizione della tipologia di presa da adottare. Successivamente sono state presentate e confrontate diverse possibili tipologie di architetture, dipendenti dai movimenti che possono interessare le griffe durante la presa di un oggetto. Infine, dopo aver definito quale tipologia di architettura adottare, si è eseguita un'analisi dei parametri geometrici della stessa, per ottenere la configurazione reputata la migliore per l'applicazione oggetto di questa tesi. Il processo di definizione dei parametri geometrici dell'architettura scelta ha visto l'ideazione e l'applicazione di un metodo grafico sviluppato proprio in questa tesi.

Dopo aver definito l'architettura, è presentato il processo che ha portato alla definizione del sistema di trasmissione e di conseguenza l'analisi che ha permesso di definire sia il sistema di attuazione che i sensori e le tecniche di controllo da implementare per eseguire la presa ed il rilascio degli anelli. La prima parte di tale processo ha interessato la valutazione delle forze coinvolte durante l'esecuzione della fase di centraggio e durante la fase di presa dell'oggetto. La parte successiva, dopo aver comparato diverse possibili soluzioni ha visto la scelta del sistema di trasmissione reputato il più idoneo per l'applicazione. L'ipotesi di partenza principale, che caratterizza il gripper, è che si è scelto di utilizzare un sistema di trasmissione ad un grado di libertà. Questo perché un unico grado di libertà permette di ottenere il moto sincronizzato delle griffe e quindi di realizzare la coassialità del gripper con l'oggetto afferrato. Infine, un ulteriore vincolo è quello dettato dal fatto di avere un limitato spazio in altezza. Questo ha imposto l'utilizzo di un meccanismo piano per il sistema di trasmissione. La definizione del sistema di trasmissione ha poi permesso di determinare il gruppo di attuazione e quello di controllo. Quest'ultimo strettamente dipendente dalle ipotesi del ciclo di funzionamento del gripper. L'ultima parte del capitolo riporta gli aspetti che hanno riguardato la progettazione esecutiva e l'industrializzazione del primo prototipo del "QuBu Gripper".

Il Capitolo 4 riporta la descrizione di tutte le attività che hanno permesso di definire il sistema di controllo del gripper e, dopo l'esecuzione di una campagna sperimentale, di caratterizzarne il comportamento durante il funzionamento. In particolare la prima parte di questo capitolo riporta la descrizione del sistema di controllo implementato, partendo dallo schema generale della cella di produzione. Questo perché, un requisito fondamentale del gripper, è la completa integrazione di questo nuovo dispositivo all'interno della sistema cella. Questa parte riporta anche la descrizione del ciclo di funzionamento derivante dalle scelte del sistema di controllo. La seconda parte del capitolo invece riporta la campagna sperimentale svolta per la caratterizzazione del dispositivo. Una prima tipologia di prove ha interessato la valutazione della capacità di autocentraggio della pinza di manipolazione. In particolare è stata valutata la ripetibilità della presa autocentrante ed è stato valutato il campo di lavoro ammissibile del gripper. La seconda tipologia di prove ha riguardato l'analisi dei parametri di funzionamento del controllore implementato e la caratterizzazione delle principali grandezze fisiche che interessano il gripper durante il ciclo di manipolazione.

L'ultimo capitolo della tesi, il Capitolo 5, riporta alcuni aspetti che potrebbero interessare lo sviluppo futuro del QuBu gripper. In particolare, sono presentate delle possibili aree di intervento per rendere il gripper un dispositivo utilizzabile per manipolare oggetti diversi da quelli considerati e indipendente dalle condizioni esterne legate all'ambiente di lavoro.

## Capitolo 1 Introduzione

Il lavoro presentato in questa tesi di dottorato riporta tutte le fasi che hanno interessato il processo di progettazione, di prototipazione e di industrializzazione di un gripper industriale innovativo, chiamato “QuBu Gripper”. La funzione principale di questo nuovo gripper, da installare al polso di un robot antropomorfo a sei assi, è la manipolazione di prodotti appartenenti alla famiglia “Anelli di tenuta olio” all’interno di una cella di stampaggio robotizzata ad elevata automazione.

I criteri che hanno guidato l’intero processo di progettazione, che inizia dall’elaborazione dell’idea di una soluzione innovativa di gripper, fino alla realizzazione e industrializzazione del primo prototipo, sono quelli di flessibilità, versatilità, razionalizzazione dei costi e ottimizzazione delle prestazioni.

Il processo di progettazione del “QuBu Gripper” ha visto, come fasi preliminari, l’analisi degli aspetti principali che influenzano il processo produttivo. Nello specifico, tali aspetti riguardano sia l’analisi delle caratteristiche fisiche e geometriche dell’oggetto da manipolare che lo studio del ciclo di produzione della cella di stampaggio e dell’ambiente di lavoro. Lo scopo di questa fase è stato quello di definire i requisiti di progetto e di evidenziare eventuali punti critici da tenere in considerazione durante il processo di progettazione del nuovo gripper.

A questa prima fase è poi seguito lo studio dello stato dell’arte dei gripper utilizzati maggiormente nei processi industriali e l’analisi dei sistemi di manipolazione utilizzati attualmente nel processo di produzione oggetto di studio.

La definizione dei requisiti di progetto, unita allo studio dello stato dell’arte ha poi consentito di passare alla fase successiva e cioè a quella che ha interessato la sintesi dei meccanismi costituenti l’architettura del gripper, sia dal punto di vista della sintesi del tipo, sia per la definizione dei parametri funzionali. In questa fase sono state sviluppate e comparate diverse architetture, giungendo quindi alla scelta ritenuta ottimale per lo specifico contesto applicativo. La scelta dell’architettura ha poi permesso di definire il sistema di trasmissione con conseguente definizione del sistema di attuazione e dei sensori da implementare. Questi ultimi sono dipendenti dalla definizione delle tecniche di controllo di presa e di movimentazione degli anelli, durante l’esecuzione del ciclo di produzione.

Le fasi successive hanno riguardato prima la progettazione meccanica dei componenti costituenti il gripper e dopo l’industrializzazione del primo prototipo del “QuBu Gripper”. A queste fasi è poi seguita quella che ha visto l’esecuzione di una campagna sperimentale, con l’analisi e la caratterizzazione delle principali grandezze fisiche che interessano il gripper durante le fasi costituenti il ciclo di presa.

Generalmente, il processo di manipolazione di oggetti, se considerato all’interno di un processo produttivo più o meno complesso, può essere sottovalutato e considerato come una semplice operazione da eseguire senza nessun valore aggiunto apportato al prodotto. In realtà, la manipolazione, se eseguita in maniera corretta ed efficace, permette di avere un processo altamente automatizzato e performante.

Se si considerano i fattori principali che influenzano gli attuali processi industriali e cioè la competizione all’interno di un mercato globale, il soddisfare le richieste sempre più customizzate dei clienti e che, grazie alle nuove tecnologie di comunicazione, il cliente considera l’idea del “*next day delivery*” un servizio “normale”, l’unico modo per essere competitivi nel mercato è quello di avere processi più flessibili ed efficienti e quindi sempre più automatizzati.

Un aspetto che negli ultimi anni è diventato centrale per l’industria manifatturiera moderna e che è strettamente legato all’evoluzione dei processi produttivi è quello che vede l’ingresso dell’industria nella nuova era definita “*Industry 4.0*” [1].

La definizione del concetto di “*Industry 4.0*” e la relativa declinazione nelle realtà produttive, di beni o servizi, prospettano un cambiamento radicale e innovativo tale che viene definito come quarta rivoluzione industriale.

L’aspetto principale che caratterizza la concezione di questa nuova era è l’applicazione dell’Internet of Things (IoT) nelle attività industriali, [2]. Si ipotizza infatti che l’utilizzo delle nuove tecnologie digitali permetterà di ottenere un cambiamento profondo secondo diverse direzioni, Fig. 1-1.

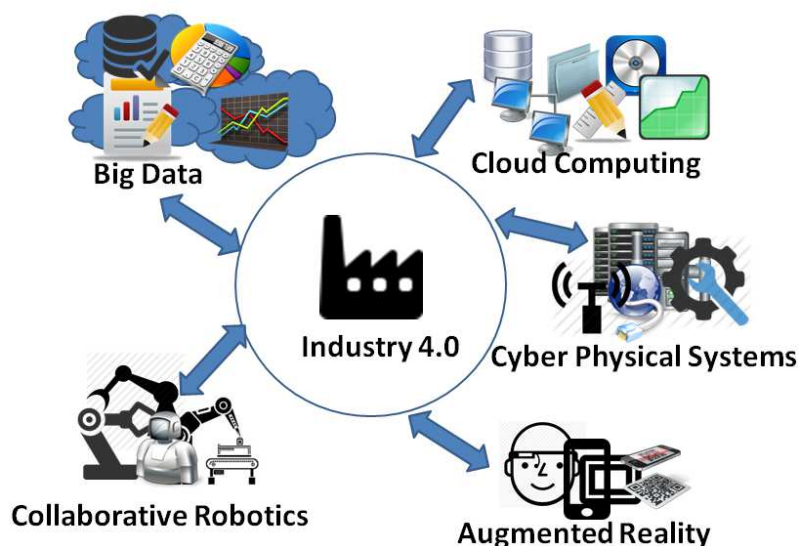


Fig. 1-1: Industry 4.0, [3].

Le prime direzioni riguardano la raccolta e l’utilizzo dei dati, la crescente potenza di calcolo e una connettività sempre più capillare. Queste si declinano in big data, open data, machine-to-machine e cloud computing per la centralizzazione delle informazioni, l’analisi e la loro conservazione. Tali dati, pur avendo un valore intrinseco, ad oggi vengo poco utilizzati. La prospettiva invece è quella di utilizzare tutti questi dati per ottenere vantaggi, a partire per esempio dal “machine learning”, in maniera da ottimizzare l’intero ciclo coinvolto “imparando” in maniera automatica dai dati via via raccolti e analizzati.

Un’altra direzione di sviluppo è quella che vede la realizzazione dei Cyber-Physical Systems [4]. Con questo termine s’intende la possibilità di far interagire parti del mondo fisico tra loro attraverso la rete. Infatti, attraverso l’utilizzo di microprocessori e di sensori sempre più “intelligenti”, installati sui macchinari che costituiscono le linee produttive, si realizza un’interazione e una connessione continua tra le macchine in modo da ottenere sistema produttivo in grado di gestirsi autonomamente.

La terza direzione di sviluppo è quella che invece interessa l’interazione tra uomo e macchina, che coinvolge le interfacce “touch”, sempre più diffuse, e la realtà aumentata. Un esempio che vede l’applicazione di questa tecnologia può essere l’utilizzo di strumenti innovativi, come i “Google Glass”, per migliorare le prestazioni sul lavoro degli operatori.

Infine c’è tutta quell’area che si occupa di interfacciare il digitale con il “reale”, e che comprende la manifattura additiva, la stampa 3D, la robotica, le comunicazioni, le interazioni machine-to-machine e le nuove tecnologie per immagazzinare e utilizzare l’energia in modo mirato, razionalizzando i costi e ottimizzando le prestazioni.

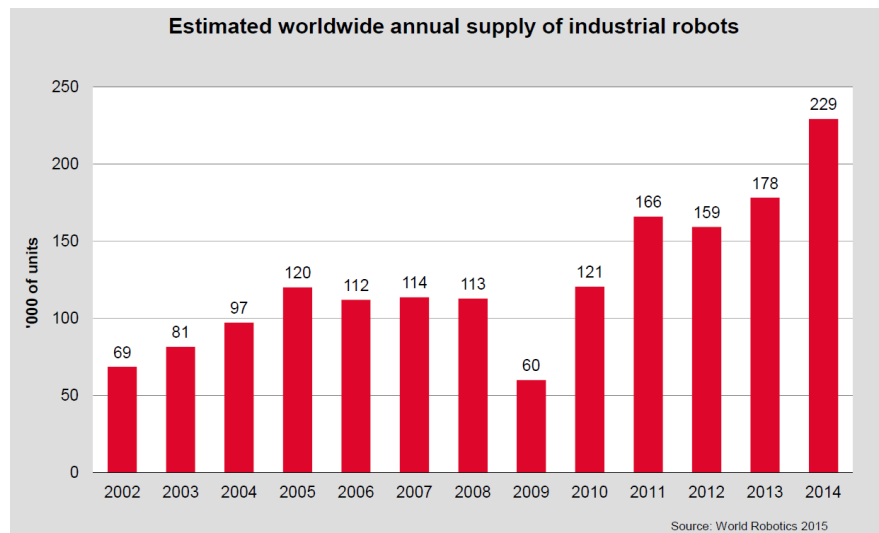
In Italia, un esempio che cerca di introdurre e guidare il settore manifatturiero nella nuova rivoluzione industriale è il Cluster Fabbrica Intelligente. “L’attività di roadmapping svolta dal Cluster Fabbrica Intelligente si basa sulla definizione di visioni e strategie per il futuro del settore Manifatturiero italiano. L’attività ha portato all’elaborazione di una roadmap

nazionale strategica pluriennale, che verrà periodicamente aggiornata e che costituirà un documento di posizionamento forte e ufficiale sul futuro del manufacturing, all'interno del quale i Membri del Cluster si possano riconoscere" [5].

Riguardo a quell'area di sviluppo dell'Industry 4.0 che interessa il "reale", un ruolo fondamentale è per l'appunto svolto dai robot industriali e da come questi ultimi stanno diventando sempre più "intelligenti", veloci, meno costosi ed alcuni anche "collaborativi".

*"Nel 2014, le vendite dei robot sono aumentate del 29% fino a raggiungere le 229.261 unità, il livello più alto mai raggiunto in un anno. La vendita di robot industriali, se riferita a tutte le tipologie di industrie, se comparata con il 2013 è aumentata. L'industria automotive e quella elettrica/elettronica guidano la crescita. La Cina ha notevolmente accresciuto la propria posizione leader, diventando il mercato più grande al mondo di robot, con un valore del 25% del totale dei robot venduti nel 2014"* [6].

La crescente domanda di robot industriali è legata alla crescita del livello di automazione delle industrie e ai miglioramenti ed alle innovazioni tecniche proprie di questa tecnologia, Fig. 1-2.



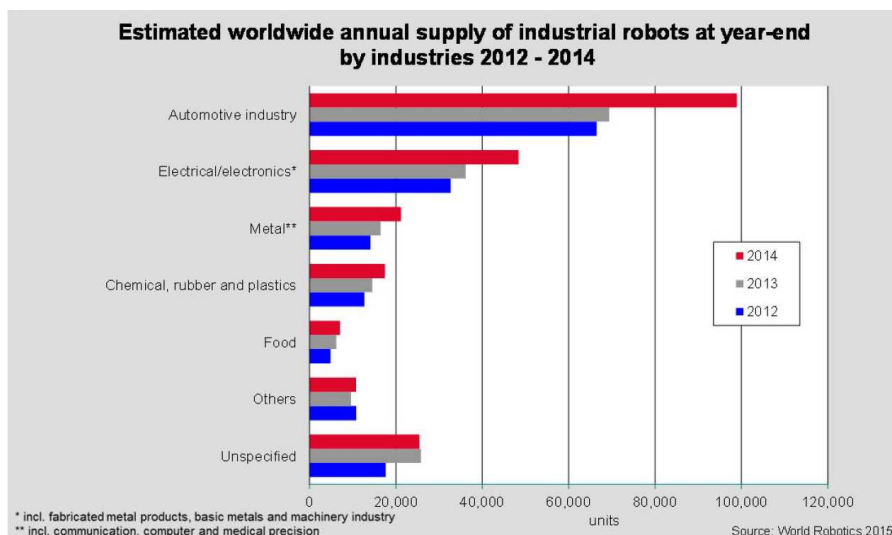
**Fig. 1-2: Andamento vendite robot industriali, [6].**

I settori che guidano questa crescita sono il settore automotive e quello elettrico/elettronico. Il primo, che è il più importate, sin dal 2010 ha costantemente investito nell'uso di questa tecnologia, creando nuove capacità produttive nei mercati emergenti e modernizzando le linee già presenti.

Anche il mercato elettrico/elettronico ha visto una crescita considerevole dell'utilizzo dei robot. Questo grazie alla crescente domanda di dispositivi elettronici che quindi si ripercuote sull'aumento di automazione delle aziende produttrici.

I robot incominciano ad essere utilizzati sempre di più anche in altri settori, indicando che se coinvolti nella produzione di generi diversi, permettono di ottenere dei vantaggi, Fig. 1-3.

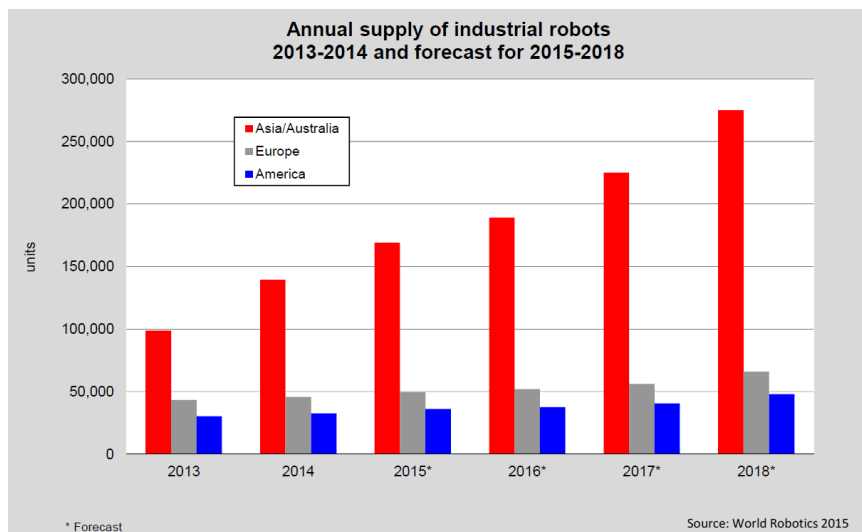




**Fig. 1-3: Vendite robot industriali per settore, [6].**

I primi cinque mercati, che rappresentano il 70% dei robot venduti nel 2014 sono la Cina, il Giappone, gli Stati Uniti, la Korea del Sud e la Germania. Per quanto riguarda il mercato cinese, se unito a quello di altre realtà asiatiche, come quello taiwanese, è quello più in espansione; infatti dai dati registrati negli ultimi anni, sarà il mercato che guiderà la crescita dell'utilizzo dei robot a livello globale, Fig. 1-4,.

Per quanto riguarda il mercato italiano, è il secondo più grande in Europa dopo appunto quello tedesco. Se si considera come riferimento l'anno 2014, questo ha visto una crescita annuale del 32%, con un totale 6200 unità. Tale dato rappresenta il secondo valore più alto registrato in un anno dal 2001, [6].



**Fig. 1-4: Andamento vendite robot per area di mercato, [6].**

Dai dati e dalle considerazioni riportate in precedenza, risulta evidente lo stretto legame tra la nuova visione dell'industria manifatturiera e l'utilizzo di robot e dispositivi più intelligenti e flessibili. Questo perché, il risultato di una maggiore automazione è quello di ottenere una maggiore competitività delle aziende coinvolte, un processo più efficace, efficiente ed anche più sostenibile.

## 1.1 Contesto e obiettivi

Il lavoro presentato in questa tesi riguarda la progettazione, la prototipazione e l'industrializzazione di un gripper industriale innovativo, chiamato QuBu Gripper, da installare all'interno di una cella di stampaggio robotizzata ad elevata automazione.

La funzione principale del gripper è la manipolazione di prodotti appartenenti alla famiglia "Anelli di tenuta olio" durante tutte le fasi che interessano il proprio ciclo di produzione.

Questo nuovo gripper potrà essere installato al polso del robot presente all'interno della cella di produzione robotizzata e sostituire il sistema di manipolazione attualmente impiegato.

I principali requisiti cui risponde il nuovo gripper sono:

- adattabilità alle caratteristiche geometriche del range di anelli da movimentare;
- efficacia e affidabilità della manipolazione e gestione delle forze di manipolazione;
- compatibilità con l'ambiente di lavoro;
- limitazione di pesi ed ingombri;
- approccio modulare.

Sotto sono riportate le immagini della cella di produzione robotizzata e del sistema di manipolazione attualmente utilizzato che vede l'utilizzo di un robot antropomorfo a sei assi, Fig. 1-5.



a)



b)

**Fig. 1-5: a) Cella di stampaggio robotizzata; b) Robot+gripper attuale.**

### 1.1.1 Analisi dell'elemento da manipolare

Il flusso del processo di progettazione di un gripper vede diverse fasi e per ognuna di esse, per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, è necessario analizzarne gli aspetti principali, [7].

La prima fase del processo di progettazione del QuBu Gripper, ha interessato l'analisi degli aspetti principali che influenzano il processo produttivo. Nello specifico, tali aspetti riguardano sia l'analisi delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'oggetto da manipolare che l'analisi del ciclo di produzione unita all'analisi dell'ambiente di lavoro. Lo scopo di quest'analisi è quella di definire specifici requisiti di progetto e di evidenziare eventuali punti critici da tenere in considerazione durante il processo di progettazione del nuovo gripper.

Procedendo con l'analisi delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'oggetto da manipolare, questi fanno parte di una specifica tipologia di prodotto che è quella degli anelli di tenuta olio. Se consideriamo il prodotto finito, generalmente è caratterizzato da un corpo metallico (chiamato anche lamiera), da una parte in gomma, realizzata tramite la fase di stampaggio e dalla presenza o meno di una molla. Il prodotto che viene realizzato dalla cella prevede la fase di stampaggio e la rimozione dello sfrido. Il montaggio della molla viene eseguito in una fase successiva. Esistono numerose tipologie di anelli di tenuta, dipendenti ovviamente dal tipo di applicazione prevista.

La tipologia di anelli presa in considerazione è quella che presenta la forma assial-simmetrica con presa sul diametro esterno. Questa tipologia di prodotto è quella che rappresenta in maniera rilevante la famiglia degli anelli prodotti dalle celle robotizzate. In Fig. 1-6 viene riportata l'immagine di un anello stampato e del corrispondente corpo metallico.



**Fig. 1-6: Anello di tenuta olio assial-simmetrico: anello stampato e rispettiva lamiera.**

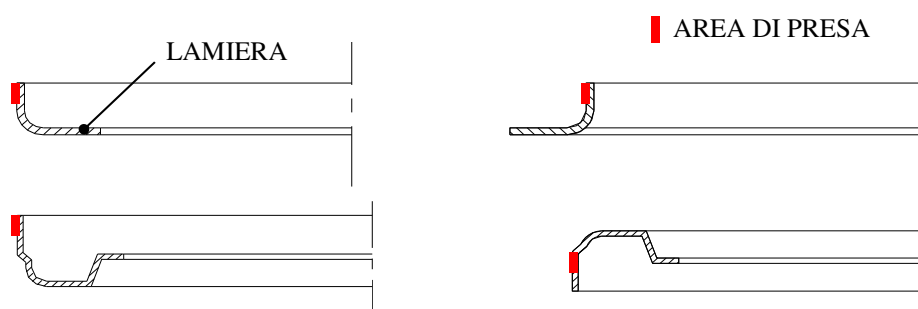
La Tab. 1-1 riporta i range dimensionali di diversi anelli assial-simmetrici. La prima colonna riguarda i dati dell'anello più grande, la seconda quelli di un anello di dimensioni intermedie e la terza invece i dati dell'anello più piccolo attualmente prodotto dalla cella robotizzata.

**Tab. 1-1: Dati tecnici principali di alcuni anelli di tenuta.**

GEOMETRIA	Assial-simmetrico	Assial-simmetrico	Assial-simmetrico
<b>LAMIERA</b>			
Ø esterno, mm	278	180	88
Ø interno, mm	248	160	66
Altezza, mm	12	14,5	7,5
Peso, g	240	103	33
<b>ANELLO STAMPATO</b>			
Ø esterno, mm	280,5	180	90
Ø interno (senza cappuccio), mm	234	152,5	58
Altezza, mm	19	16,5	14,5
Peso (con cappuccio), g	430	143	63

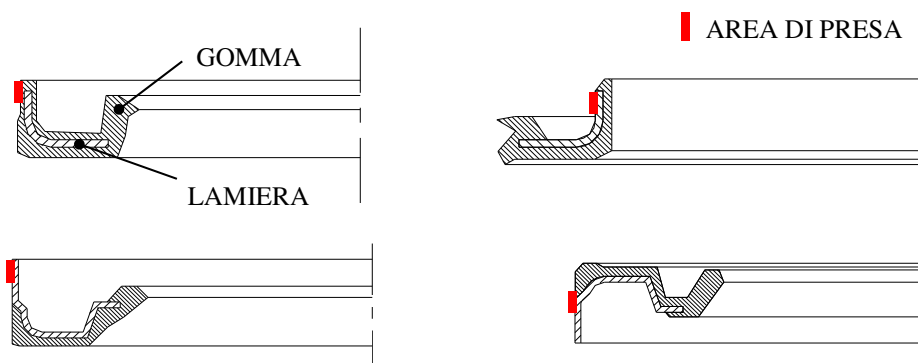
Per quanto riguarda l'esame delle caratteristiche geometriche e fisiche degli anelli da manipolare, particolare attenzione è stata posta a come si presenta la superficie di presa e quali materiali la caratterizzano.

Gli oggetti da manipolare durante il ciclo di stampaggio sono per l'appunto la lamiera e l'anello stampato. Esistono diverse tipologie di lamiera e la Fig. 1-7 riporta degli esempi visualizzando anche l'area di presa.



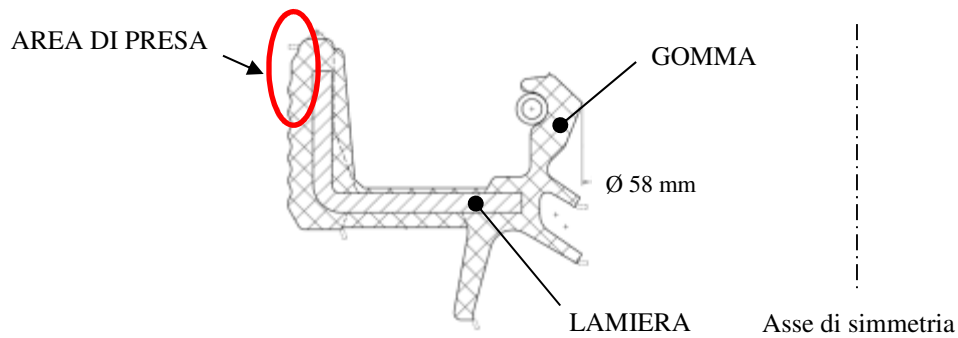
**Fig. 1-7: Esempi di lamiere da manipolare con relative aree di presa.**

Anche gli anelli da manipolare dopo il processo di stampaggio presentano diverse configurazioni di presa. Infatti, la presa può avvenire o sulla parte di lamiera o direttamente su un'area dell'anello che è in gomma, Fig. 1-8.



**Fig. 1-8: Esempi di anelli da manipolare con relative aree di presa.**

Per il caso di presa su lamiera, la superficie è piana e non deformabile. Per il caso di presa su area in gomma questa può presentare una superficie non piana e deformabile, Fig. 1-9.



**Fig. 1-9: Esempio di un anello che presenta un'area di presa non piana e deformabile.**

Un altro aspetto che riguarda l'anello, subito dopo la fase di stampaggio, è la presenza di una parte in gomma che è chiamata sfrido o cappuccio. Questa può presentare diverse forme, ed in particolare, può presentare uno o più pin in gomma che derivano dalla configurazione del canale d'iniezione, Fig. 1-10.



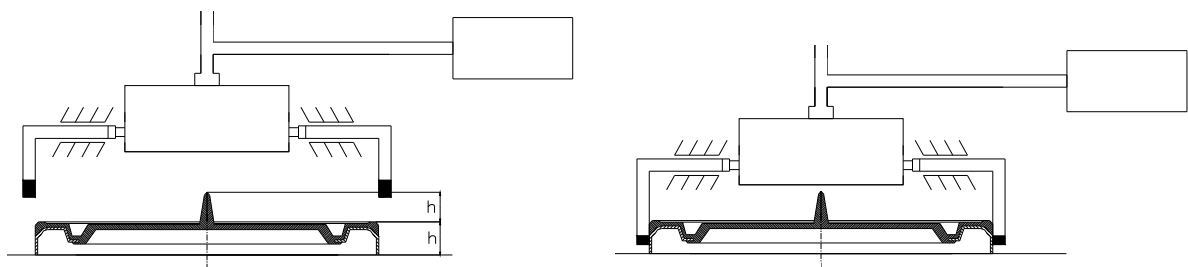
a)



b)

**Fig. 1-10: a) Anello con sfrido ad un canale; b) anello con sfrido a quattro canali.**

L'altezza di questi pin è paragonabile all'altezza dell'anello e questo fattore deve essere preso in considerazione durante le operazioni di manipolazione che precedono la rimozione dello sfrido, Fig. 1-11.



**Fig. 1-11: Esempio di presa di un anello con sfrido.**

### 1.1.2 Analisi della cella robotizzata e delle fasi del processo produttivo

Lo studio del processo di movimentazione che interessa il ciclo della cella di produzione robotizzata ha riguardato, come primo passo, l'analisi del ciclo di produzione, con la visualizzazione di tutte le possibili configurazioni di presa che si presentano e come queste vengono eseguite dal gripper installato attualmente.

Il ciclo di produzione degli anelli prevede l'esecuzione di una serie di operazioni che vengono compiute dai dispositivi che compongono la cella di produzione, il cui layout è presentato in Fig. 1-12.

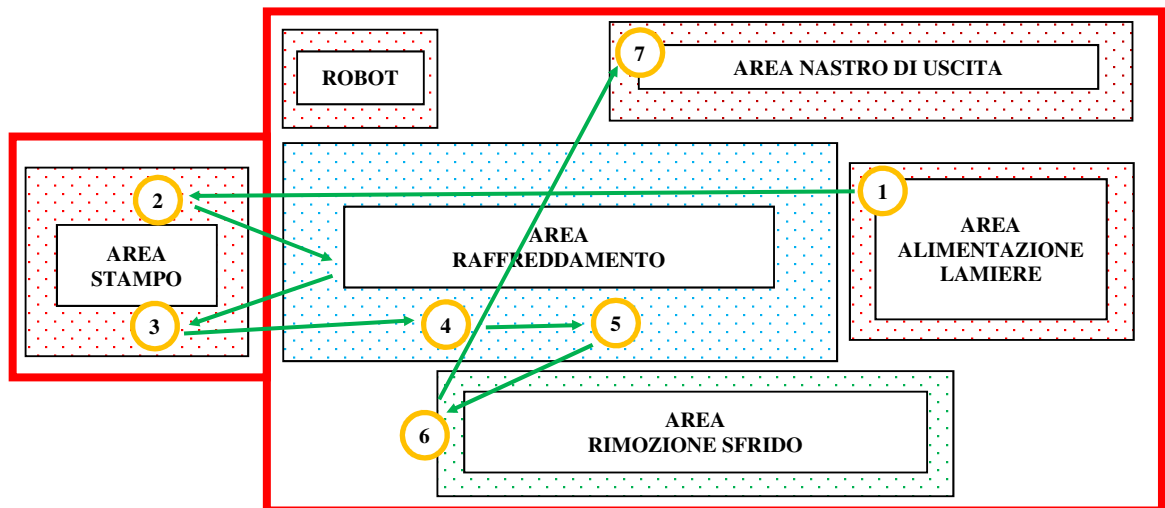


Fig. 1-12: Layout della cella di produzione robotizzata.

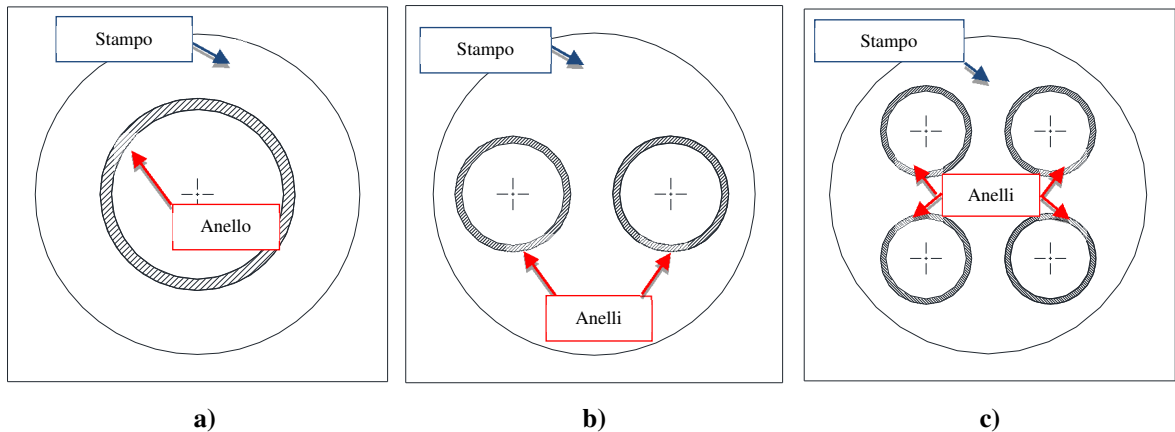
In Fig. 1-13 viene riportata la sequenza delle fasi che interessano un ciclo di produzione di un anello.



Fig. 1-13: Sequenza delle fasi di un ciclo di produzione.

L'operazione di stampaggio viene eseguita nella cella di produzione robotizzata mediante l'utilizzo di una pressa che utilizza la tecnologia ad iniezione. La tipologia di pressa utilizzata

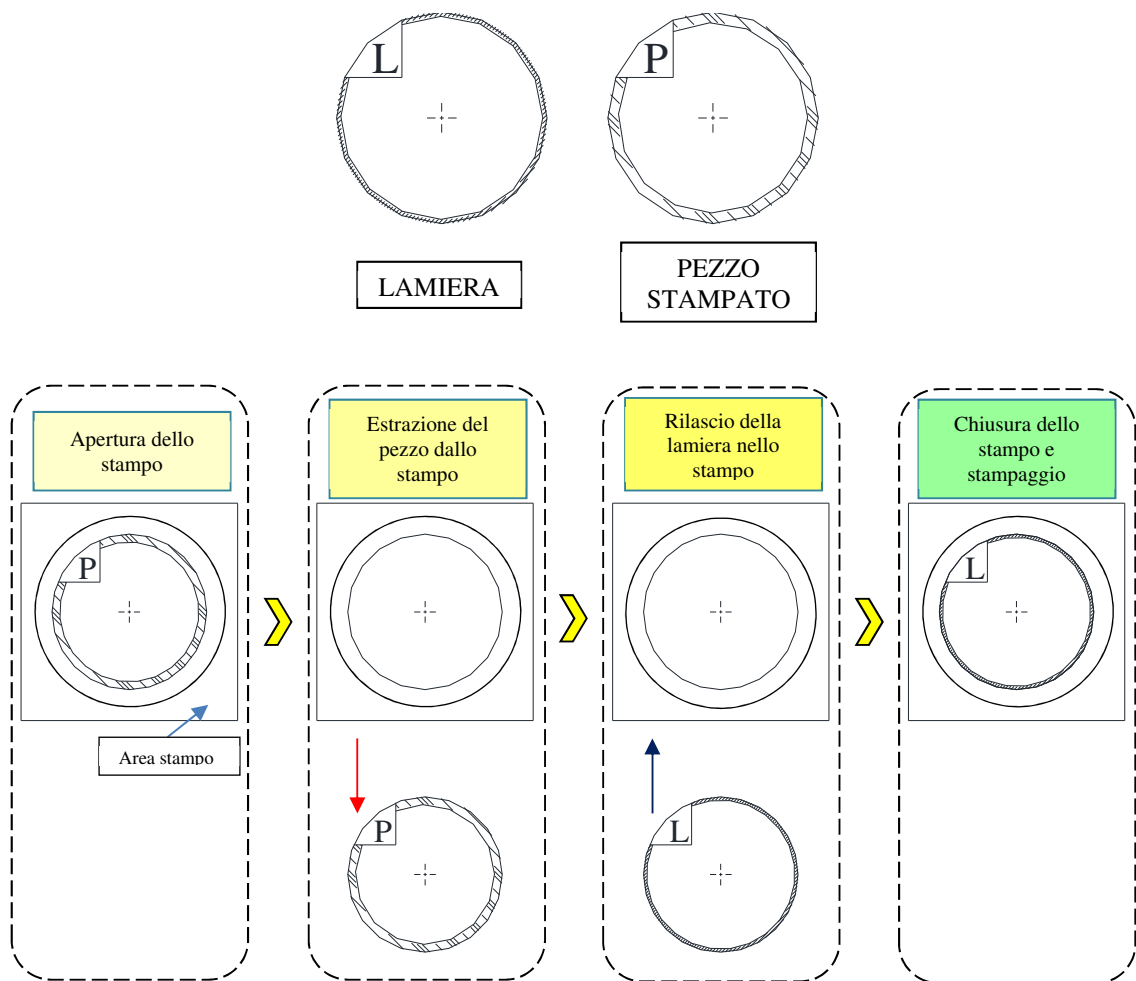
è la “Arburg 100 T”. La cella di produzione permette di avere tre differenti soluzioni di stampaggio Fig. 1-14.



**Fig. 1-14: Schemi soluzioni di stampaggio: a) Schema 1x1; Schema 1x2; Schema 1x4.**

Lo schema di stampaggio che è stato preso in considerazione, per la progettazione del gripper, è quello definito 1x1 e cioè quello che prevede per ogni ciclo di stampaggio la produzione di un singolo anello.

Per quanto riguarda le fasi del ciclo che interessano l’area stampo, questa prevede la sequenza di specifiche operazioni che sono schematizzate in Fig. 1-15.



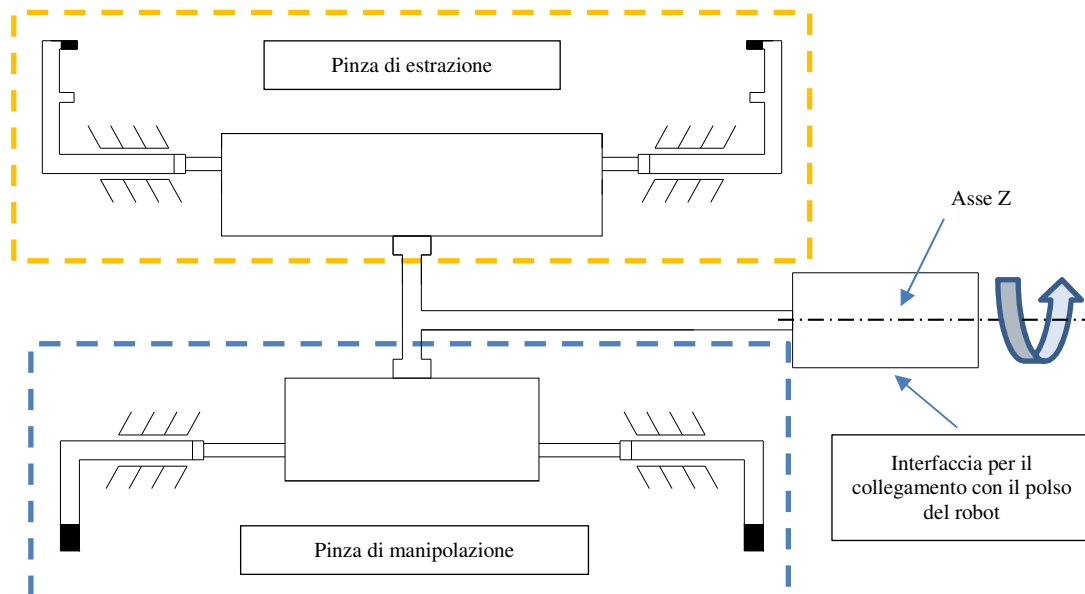
**Fig. 1-15: Flusso delle operazioni eseguite durante la fase di stampaggio.**

La Tab. 1-2 riporta i dati principali che interessano l'area di stampaggio.

**Tab. 1-2: Dati principali che interessano l'area di stampaggio.**

Tonnellaggio pressa	100 ton
Soluzione di stampaggio → Range dimensione diametro esterno	1x1 → Ø100mm÷ Ø280mm
Spazi disponibili	340 mm X 190 mm
Temperatura stampo	180 °C
Temperatura aria zona stampo	70 °C
Tempo ciclo di stampaggio	40 s

Il gripper utilizzato attualmente è costituito dai due sottosistemi o pinze. Uno dedicato alla fase di estrazione dallo stampo dell'anello, l'altro invece dedicato a tutte le altre fasi che interessano la manipolazione della lamiera o dell'anello durante il ciclo di produzione, Fig. 1-16.



**Fig. 1-16: Schema del gripper utilizzato attualmente.**

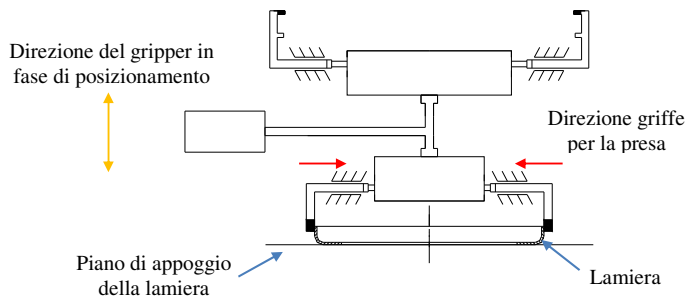
Sotto vengono riportate nel dettaglio le fasi di lavoro che interessano il gripper con la presentazione dei movimenti eseguiti e del posizionamento relativo tra gripper e oggetto afferrato.



### Fase di lavoro 1 - Prelievo Lamiera:

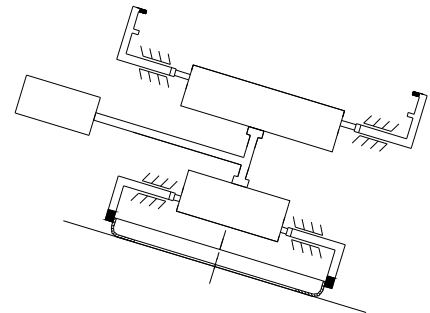
In questa fase la lamiera è appoggiata su un piano, che può essere orizzontale o inclinato, Fig. 1-17. La lamiera non è fissa ma è soltanto posta nella posizione di prelievo grazie a dei riscontri meccanici. Questa operazione viene eseguita dalla pinza di manipolazione.

#### CONFIGURAZIONE PIANA



a)

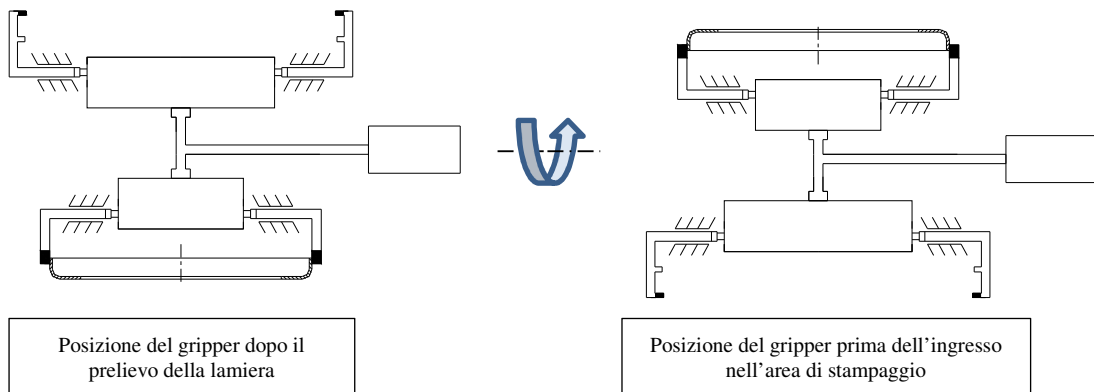
#### CONFIGURAZIONE INCLINATA



b)

**Fig. 1-17: Fase di lavoro – Prelievo lamiera nelle due possibili configurazioni.**

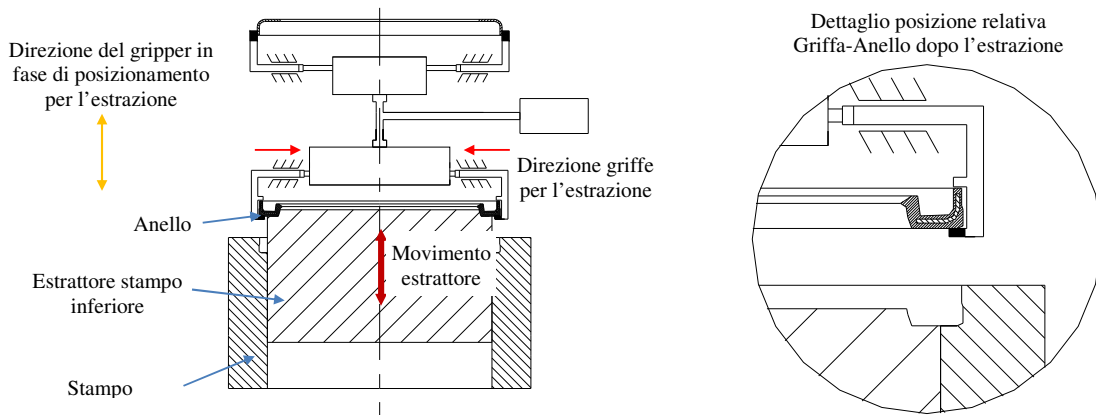
Il gripper, dopo aver prelevato la lamiera, esegue una rotazione di  $180^\circ$  attorno al proprio asse Z, che corrisponde all'asse 6 del robot. Questo fa sì che, prima di passare alla fase successiva, la lamiera si trovi capovolta rispetto alla posizione di partenza, con conseguente cambio di direzione delle forze scambiate tra griffe e oggetto, Fig. 1-18.



**Fig. 1-18: Posizioni del gripper dopo il prelievo della lamiera.**

## **Fase di lavoro 2 – Estrazione anello dallo stampo:**

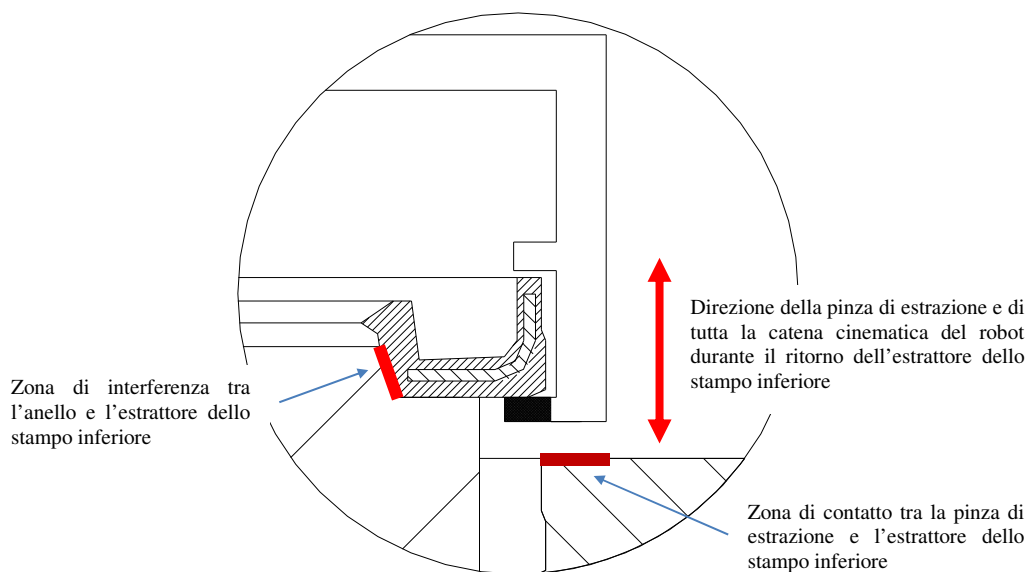
Questa fase di lavoro, che viene eseguita dopo l'apertura dello stampo e l'ingresso del gripper nell'area di stampaggio, viene eseguita dalla pinza di estrazione. In questa fase, dopo il posizionamento del gripper e dopo la chiusura delle griffe, l'unico elemento che si muove è l'estrattore dello stampo inferiore, Fig. 1-19.



**Fig. 1-19: Fase di lavoro – Estrazione anello dallo stampo.**

Un aspetto da tenere in considerazione è quello che si verifica durante la fase di estrazione ed in particolare quali movimenti scaturiscono dall'esecuzione di questa fase.

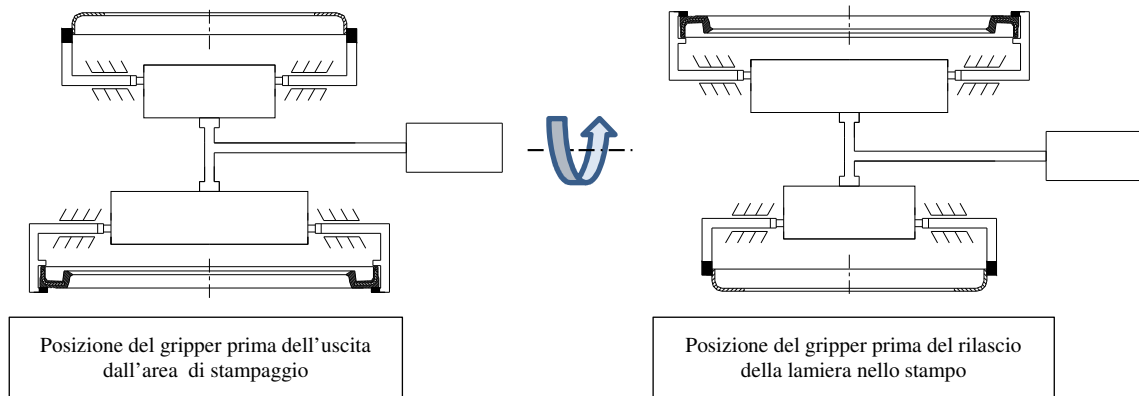
Dopo la fase di stampaggio, gli anelli presentano un'interferenza con l'estrattore dello stampo inferiore. L'estrazione avviene grazie al movimento relativo tra gripper, fermo, ed estrattore, in movimento verso il basso. Proprio questo movimento verso il basso dell'estrattore, a causa dell'interferenza tra anello ed estrattore, causa lo spostamento del gripper verso il basso, fino all'urto di quest'ultimo con lo stampo. Questo movimento verso il basso del gripper, a causa del collegamento rigido che si ha tra gripper e polso del robot, causa che anche il robot esegua questo movimento. Lo schema riportato in Fig. 1-20 visualizza quello che succede proprio durante la fase di estrazione dell'anello dallo stampo.



**Fig. 1-20: Particolare della fase di estrazione anello dallo stampo.**

### **Fase di lavoro 3 – Rilascio lamiera nello stampo:**

Questa fase di lavoro, che viene eseguita dopo l'estrazione dell'anello dalla stampo presenta la seguente sequenza di operazioni. Si ha come primo step l'uscita del gripper dall'area di stampaggio, successivamente si ha la rotazione del gripper di 180° attorno al proprio asse Z ed infine si verifica l'ingresso nell'area di stampaggio e quindi il rilascio della lamiera nello stampo, Fig. 1-21.

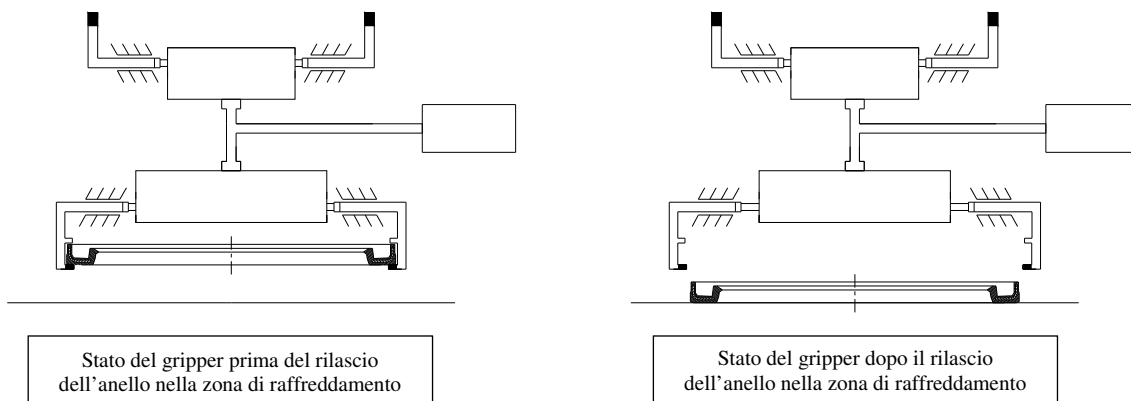


**Fig. 1-21: Fase di lavoro – Rilascio della lamiera nello stampo.**

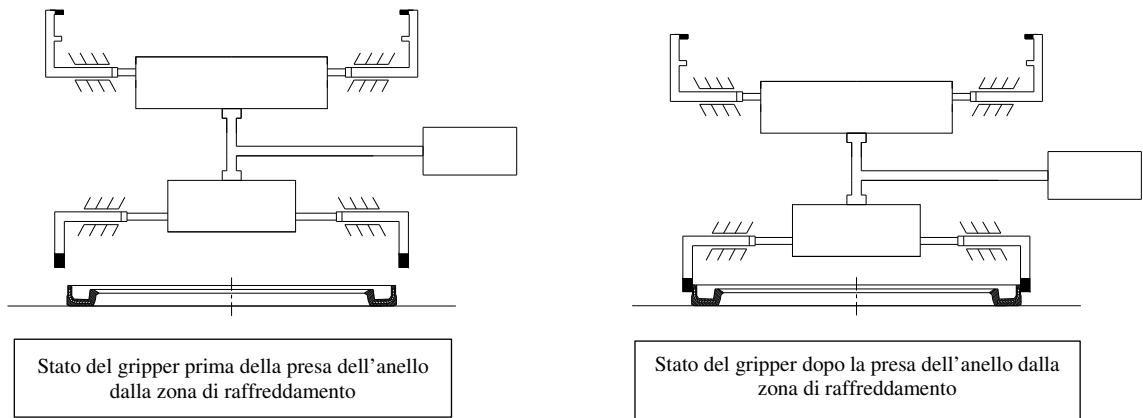
### **Fasi di lavoro 4 - 5 – Rilascio e presa dell'anello nella zona di raffreddamento:**

Questa fase di lavoro, dopo aver rilasciato la lamiera nello stampo, prevede il rilascio dell'anello appena estratto e la presa di un altro anello che ha subito il processo di raffreddamento. Queste due operazioni vengono eseguite in maniera sequenziale ed in particolare la prima fase viene eseguita dalla pinza di estrazione mentre la seconda fase dalla pinza di manipolazione, Fig. 1-22 e Fig. 1-23.

Gli anelli vengono rilasciati e presi su un piano orizzontale ad otto posizioni che non presenta nessun riferimento meccanico. Le coordinate della posizione di rilascio e di presa sono determinate tramite l'utilizzo di un sistema di visione. Quest'ultimo individua le zone libere per l'esecuzione della fase di rilascio e determina quali anelli hanno subito il trattamento di raffreddamento per essere afferrati e quindi portati alla stazione che eseguirà la successiva fase di lavoro.



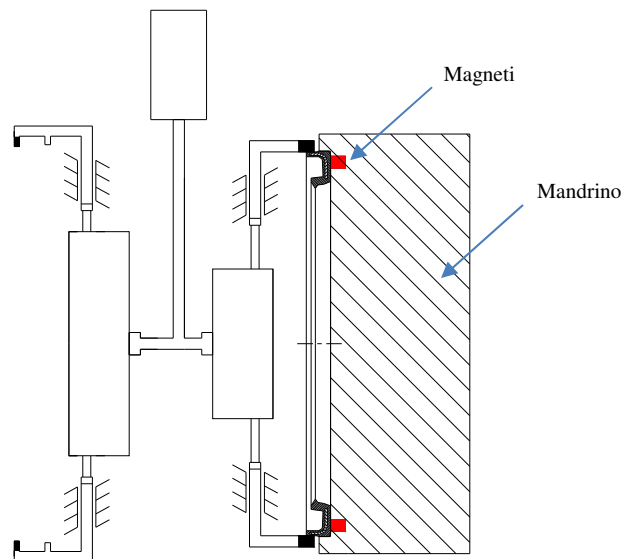
**Fig. 1-22: Fase di lavoro – Rilascio dell'anello nella zona di raffreddamento.**



**Fig. 1-23: Fase di lavoro – Presa dell’anello dalla zona di raffreddamento.**

**Fase di lavoro 6 – Rimozione sfrido:**

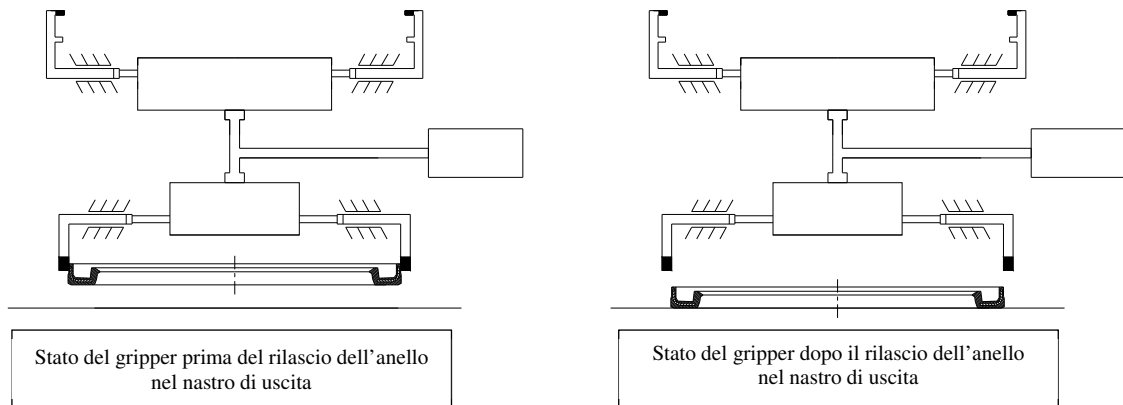
Questa fase di lavoro, prevede il rilascio dell’anello appena afferrato dalla zona di raffreddamento e con ancora lo sfrido, nel mandrino che si trova dentro la cella di produzione. Eseguita l’operazione di taglio, l’anello viene afferrato nuovamente. Le operazioni vengono svolte dal sottosistema di manipolazione, Fig. 1-24.



**Fig. 1-24: Fase di lavoro – Rimozione dello sfrido con posizionamento dell’anello nel mandrino.**

### **Fase di lavoro 7 – Rilascio anello nel nastro di uscita:**

Quest'ultima fase del ciclo di produzione prevede il rilascio dell'anello sul nastro di uscita in maniera orizzontale. In questo caso non è previsto nessun riferimento meccanico nel nastro, Fig. 1-25.



**Fig. 1-25: Fase di lavoro – Rilascio dell'anello sul nastro di uscita.**

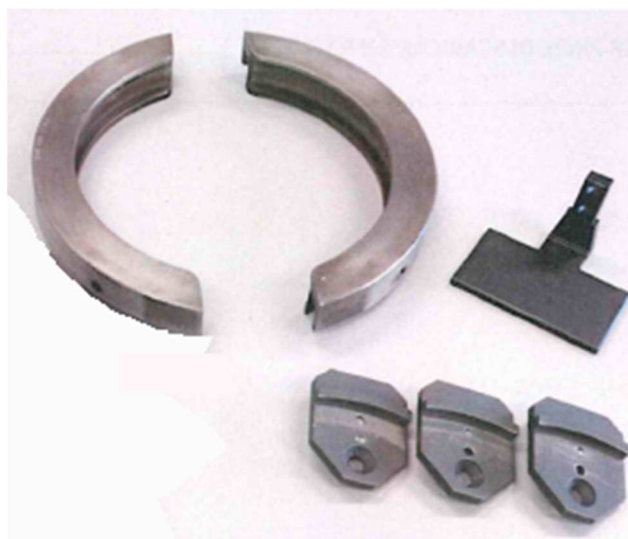
Tutte le fasi del ciclo di lavoro descritte prevedono che il gripper abbia montate delle attrezzature specifiche, che dipendono dal tipo di anello da produrre.

In particolare, quelle che interessano la pinza di manipolazione sono specifiche per ogni tipo di anello da manipolare. Quelle che interessano la pinza di estrazione invece non sono strettamente dipendenti dal diametro del prodotto da produrre, in quanto permettono di abbracciare specifici range dimensionali.

La presenza di attrezzature specifiche, oltre a richiedere la costruzione delle stesse, ad ogni cambio tipo comporta:

- la fermata la cella di produzione;
- lo smontaggio delle "vecchie attrezzature"
- il montaggio delle "nuove attrezzature"

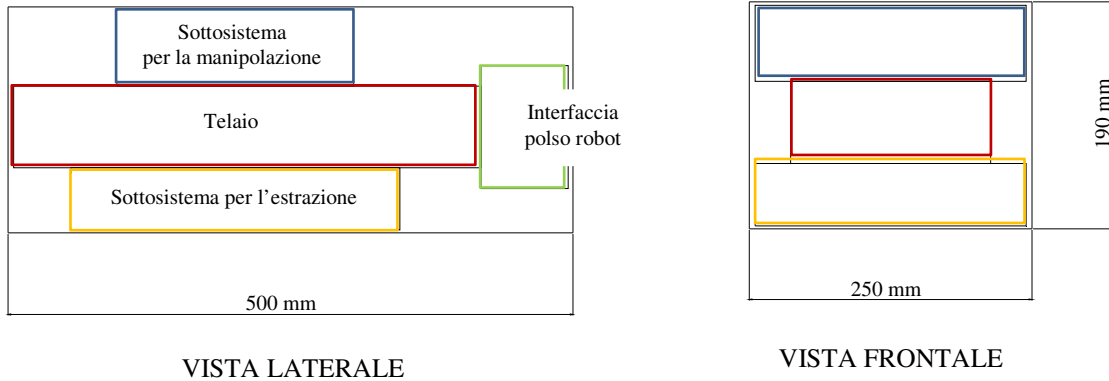
Tutte operazioni che richiedono l'intervento di un operatore e che non forniscono nessun valore aggiunto al prodotto.



**Fig. 1-26: Esempio di attrezzature specifiche utilizzate dal gripper sia per la pinza di estrazione che per quella di manipolazione.**

L'analisi dell'ambiente di lavoro ha invece permesso di fare una valutazione sugli spazi disponibili nelle diverse stazioni di lavoro.

Il gripper attuale, che presenta gli ingombri riportati in Fig. 1-27, esegue tutte le operazioni nelle diverse stazioni di lavoro senza problemi.



**Fig. 1-27: Ingombri del gripper attualmente utilizzato nelle celle di produzione robotizzate.**

L'unica area di lavoro che ha spazi disponibili ridotti è l'area di stampaggio. Infatti, come riportato nell'analisi del ciclo di lavoro, si ha l'ingresso del gripper all'interno dell'area di stampaggio per l'esecuzione dell'estrazione anello; successivamente il gripper esce dall'area, ruota di 180° attorno al proprio asse Z e quindi si ha nuovamente l'ingresso del gripper all'interno dell'area di stampaggio per l'esecuzione della fase di rilascio della lamiera. Dalle considerazioni riportate in precedenza, si evince che i limiti geometrici ammissibili sono quelli evidenziati in Fig. 1-27.

### 1.1.3 Definizione delle specifiche di progetto

Come riportato nel paragrafo 1.1, lo scopo del presente lavoro è la progettazione, la prototipazione e l'industrializzazione di un gripper industriale per la manipolazione dei prodotti appartenenti alla famiglia "Anelli di tenuta olio".

Il gripper potrà essere installato al polso del robot presente all'interno della cella di stampaggio robotizzata ad elevata automazione.

L'analisi delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'oggetto da manipolare e del ciclo di produzione, unite all'analisi dell'ambiente di lavoro ha permesso di definire i requisiti di progetto.

In particolare, lo sviluppo del gripper ha interessato principalmente il sottosistema dedicato alla manipolazione, in quanto è quello che svolge tutte, tranne una, le movimentazioni durante il ciclo di produzione.

#### Adattabilità alle caratteristiche geometriche del range di anelli da movimentare

Come schema di stampaggio di riferimento è stato preso in considerazione tipo 1x1 e come range dimensionale del diametro esterno per gli anelli assial-simmetrici è stato scelto:

- $d_e = \text{Ø}100 \text{ mm} \div \text{Ø}250 \text{ mm}$

Per quanto riguarda l'altezza (escluso lo sfrido), se si considera come limite inferiore quello della lamiera e come limite superiore quello dell'anello, il range dimensionale è:

- $h = 7 \text{ mm} \div 20 \text{ mm}$

Per eliminare il vincolo di attrezzatura specifica per ogni tipologia di anello, un requisito fondamentale è quello di avere un gripper che non necessita nessuna attrezzatura specifica e quindi in grado di poter manipolare qualsiasi oggetto all'interno del range dimensionale considerato, adattandosi alle diverse geometrie in maniera automatica e indipendente dall'operatore. Questo permette di ottenere l'eliminazione delle attrezzature specifiche, la riduzione dei tempi necessari per l'esecuzione del cambio tipo e l'assenza di operazioni manuali.

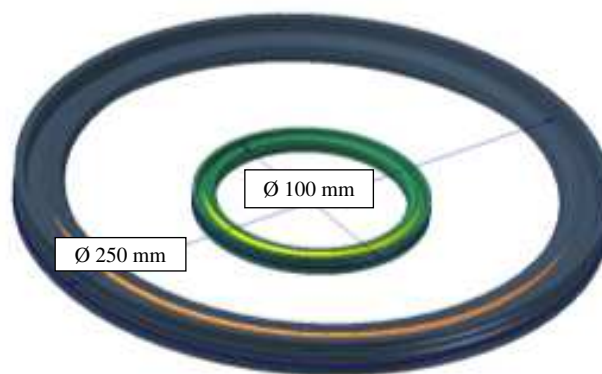


Fig. 1-28: Range dimensionale anelli assial-simmetrici.

## Efficacia della manipolazione e gestione delle forze di manipolazione

Il numero di cicli effettuati da un gripper inserito in un ambito produttivo è tale che un fattore principale da prendere in considerazione è l'aver la massima affidabilità e robustezza, sia in termini di sistema generale che in termini di ogni singolo componente che lo costituisce.

Il prodotto deve essere manipolato in maniera stabile durante tutte le fasi del ciclo. Non sono ammessi danneggiamenti locali o estesi al prodotto afferrato. Questo implica il garantire una specifica forza di presa in funzione del tipo di prodotto da manipolare.

Lo sviluppo del gripper dovrà quindi interessare anche l'implementazione di tecniche di controllo per ottenere le informazioni che riguardano sia la configurazione interna che quelle che derivano dall'interazione del gripper con l'ambiente esterno.

Per quanto riguarda il tipo di informazioni che interessano lo stato interno del gripper, queste dovranno in primo luogo interessare le seguenti grandezze fisiche:

- Posizione / Velocità di movimentazione griffe
- Forza applicata all'oggetto

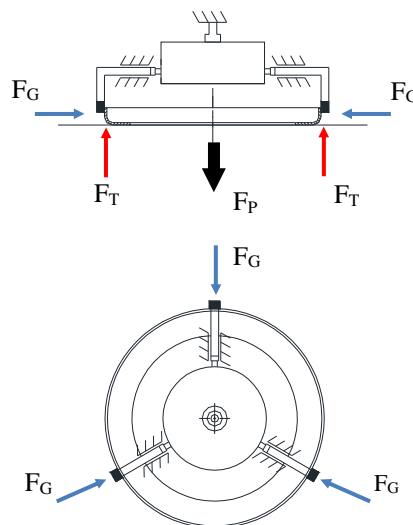
Dai dati presentati nella Tab. 1-1, l'anello più pesante da manipolare ha una massa di circa 500 g. La forza massima da esercitare è funzione della massa dell'anello e del numero di griffe.

La formula generale, Eq. 1-1, permette di calcolare la forza di presa  $F_G$  scambiata tra le griffe di un gripper ed il pezzo afferrato, considerando le forze inerziali e che la forza peso agisca in direzione ortogonale alla direzione di presa.

$$F_G = k \cdot \frac{m \cdot (g+a)}{\mu \cdot n} \quad (\text{Eq. 1-1})$$

dove:

- $k$  = coefficiente di sicurezza
- $m$  = massa oggetto, kg
- $g$  = accelerazione di gravità,  $m/s^2$
- $a$  = accelerazione in direzione ortogonale al piano di presa del polso del robot,  $m/s^2$
- $\mu$  = coefficiente di attrito statico tra le griffe e l'oggetto afferrato
- $n$  = numero di griffe



**Fig. 1-29:** Schema delle forze scambiate tra un gripper a 3 griffe e l'oggetto afferrato.



Se si considerano i seguenti valori:

- Coefficiente di sicurezza =  $k = 2$
- Massa anello =  $m_a = 0,05 \div 0,50$  kg
- Massa lamiera =  $m_l = 0,03 \div 0,25$  kg
- Accelerazione del robot =  $a = 2g$  m/s<sup>2</sup>
- Coefficiente di attrito gomma / metallo =  $\mu_{gm} = 0,5$
- Coefficiente di attrito metallo / metallo =  $\mu_{mm} = 0,25$
- Numero griffe =  $n = 3$

la forza di presa  $F_G$ , funzione della massa dell'oggetto e del tipo di superfici a contatto ha il seguente andamento:

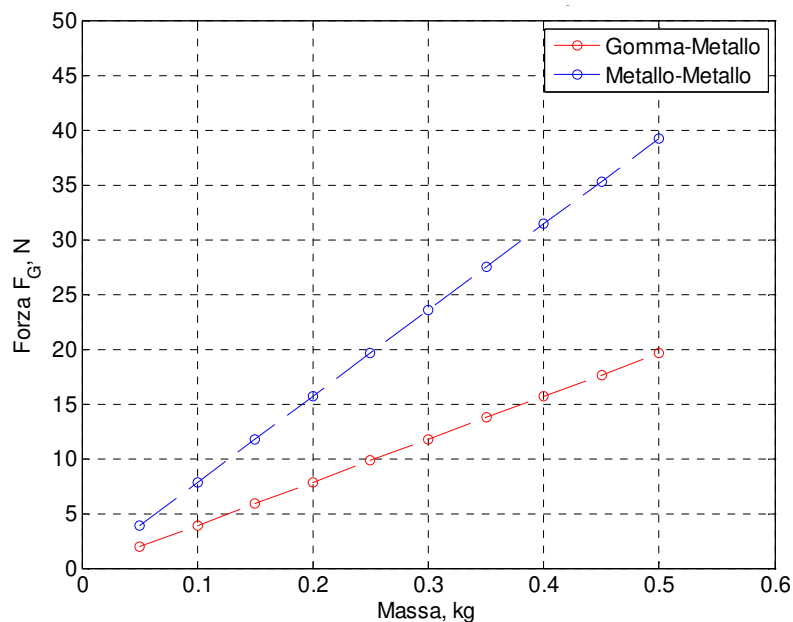


Fig. 1-30: Andamento forza di presa.

### Compatibilità con l'ambiente di lavoro

Il materiali considerati per la realizzazione del gripper, oltre a garantire una resistenza alle sollecitazioni statiche e dinamiche, devono essere compatibili con la zona di pressatura e con le caratteristiche fisiche e meccaniche dell'anello. Come riportato nell'analisi che riguarda le caratteristiche fisiche e geometriche dell'oggetto da manipolare, le superfici di presa, che vengono a contatto con le griffe, possono essere o superfici metalliche o in gomma.

### Limitazione di pesi ed ingombri

Gli ingombri ed il peso del gripper devono soddisfare i limiti imposti dal sistema cella. In particolare il volume massimo disponibile è quello visualizzato in Fig. 1-27, mentre il peso è determinato dal massimo carico ammissibile dal polso del robot a sei assi che è di 15 kg.

### Approccio modulare

La progettazione del gripper deve seguire il criterio di modularità dei sistemi. Questo perché deve essere possibile configurare il sistema a seconda di ulteriori requisiti connessi al tipo di prodotto da manipolare. In questo modo è garantita una flessibilità al sistema gripper e al sistema cella. L'applicazione di tale approccio deve precedere quindi l'utilizzo di interfacce tra i moduli costitutivi.

### 1.1.4 Project plan

Il processo di progettazione del QuBu gripper, ha interessato l'esecuzione di specifiche attività che ha anche visto il coinvolgimento di diverse risorse. Lo schema riportato in Fig. 1-31 riassume le principali attività e riporta come queste sono state distribuite nel tempo per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

In particolare, per ogni attività sono stati definiti gli obiettivi specifici, i tempi necessari, le risorse coinvolte e quando fare una revisione intermedia per evidenziare eventuali problemi o necessità non considerate in precedenza.

In particolare, per quanto riguarda la prima attività e cioè lo studio dello stato dell'arte, l'obiettivo era quello avere una visione generale dei gripper utilizzati attualmente nei processi industriali e dei gripper che sono presentati in letteratura e che potenzialmente potevano fornire delle linee guida per lo sviluppo del nuovo gripper.

L'attività che ha interessato la definizione dell'architettura, ha visto appunto la scelta del tipo di architettura, la definizione dei principali parametri geometrici che la caratterizzano ed infine, la definizione del sistema di trasmissione.

La progettazione esecutiva ha poi interessato le decisioni "make or buy" di tutti i componenti che costituiscono il gripper. La linea guida è stata quella di utilizzare principalmente componenti commerciali.

L'attività di costruzione e di assemblaggio ha invece interessato la verifica che tutti i componenti rispettassero i vincoli imposti nei disegni costruttivi e che la fase di assemblaggio si realizzasse senza presentare problemi specifici.

Per quanto riguarda l'attività "Elettronica e software", questa ha visto prima la definizione del sistema di attuazione e dopo la definizione del sistema di controllo con i sensori da utilizzare per la realizzazione delle tecniche di presa scelte. Da non sottovalutare è stata l'attività che ha interessato l'integrazione del nuovo sistema con quello esistente.

Infine, le attività di test e di industrializzazione hanno riguardato l'esecuzione di una campagna sperimentale per ottenere una mappatura completa di tutti i parametri che influenzano il funzionamento del gripper. Successivamente, il sistema è stato testato all'interno della cella di produzione per verificarne la completa funzionalità ed integrazione.

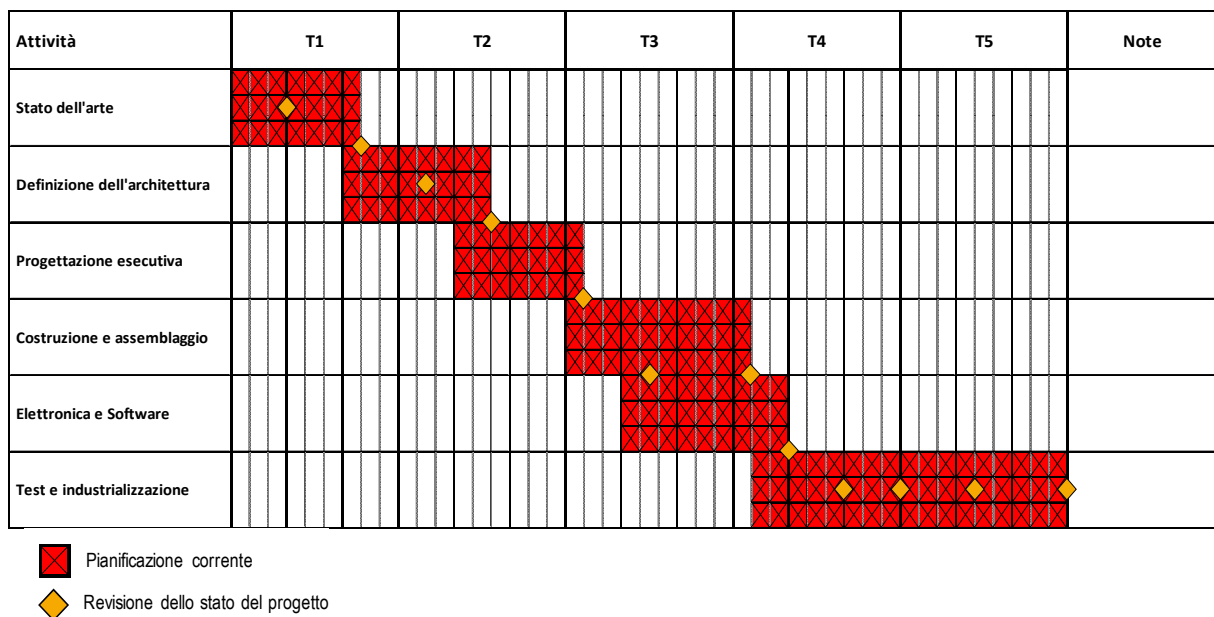


Fig. 1-31: Project plan del QuBu Gripper

## Capitolo 2 Stato dell'arte dei gripper

Il crescente utilizzo dei robot nelle linee di produzione ha fatto sì che anche i gripper, gli elementi terminali collegati al polso dei robot, abbiano visto un'evoluzione tecnologica per permettere l'esecuzione di operazioni sempre più complesse.

La definizione generale di gripper:

*“I gripper sono sottosistemi dei meccanismi di presa che forniscono un contatto temporaneo con l'oggetto da afferrare, assicurandone posizione e orientamento durante la movimentazione. La presa è ottenuta per mezzo di forze prodotte da appositi elementi. Il termine gripper viene anche usato nel caso non ci sia un effettivo serraggio, ma solo un contenimento o sostegno dell'oggetto”* [8].

I gripper non solo vengono utilizzati dai robot industriali ma questi vedono il loro utilizzo in diversi altri campi come quello medicale o aerospaziale.

Le diverse attività che interessano un gripper, durante il ciclo di lavoro, dipendono principalmente dal tipo di applicazione. Comunque, in generale, le principali funzioni possono essere così riassunte, [9]:

- Garantire una determinata posizione e allo stesso tempo un prefissato orientamento dell'oggetto afferrato, relativamente a un sistema di riferimento.
- Assicurare, sia in condizioni statiche che dinamiche, specifiche forze e momenti.
- Permettere di modificare la posizione e l'orientamento dell'oggetto sempre in relazione a un sistema di riferimento.
- Consentire l'esecuzione di operazioni specifiche dipendenti dalla particolare applicazione.

Il concetto di gripper, inteso come dispositivo più o meno complesso a se stante, ha visto un interesse specifico crescente solo recentemente. Questo perché, nel passato, i dispositivi in grado di fornire un aiuto all'uomo nel manipolare oggetti sono stati sempre più legati ai concetti di “attrezzi” o “protesi”.

Tali dispositivi sono stati sviluppati fin dall'antichità e cioè da quando l'uomo ha iniziato a sviluppare ed usare le proprie competenze tecniche. Ci sono diversi studi storici sullo sviluppo delle macchine che riportano come i gripper fossero considerati parti proprie delle macchine e non come dispositivi separati [10].

I dispositivi per la presa di oggetti sono stati sviluppati dall'uomo sin dall'antichità. Le testimonianze archeologiche, legate per esempio agli egizi e ai romani, mostrano come questi venissero sviluppati con una specifica conoscenza del problema della presa di un oggetto, adottando, per esempio, soluzioni non presenti in natura, [11].

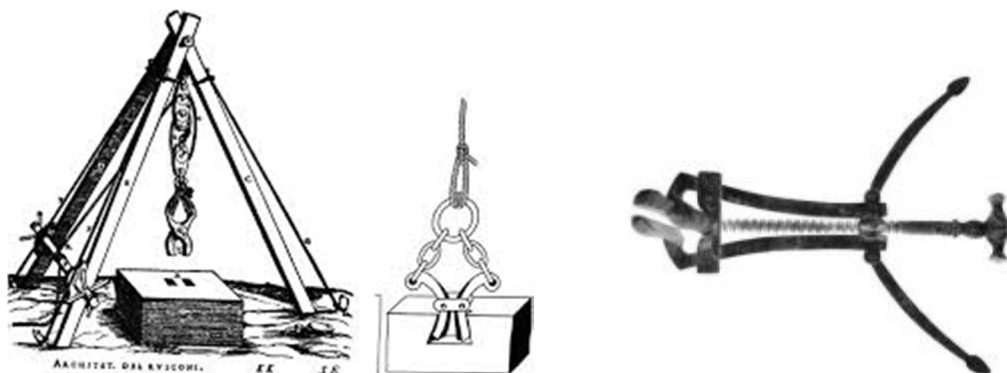
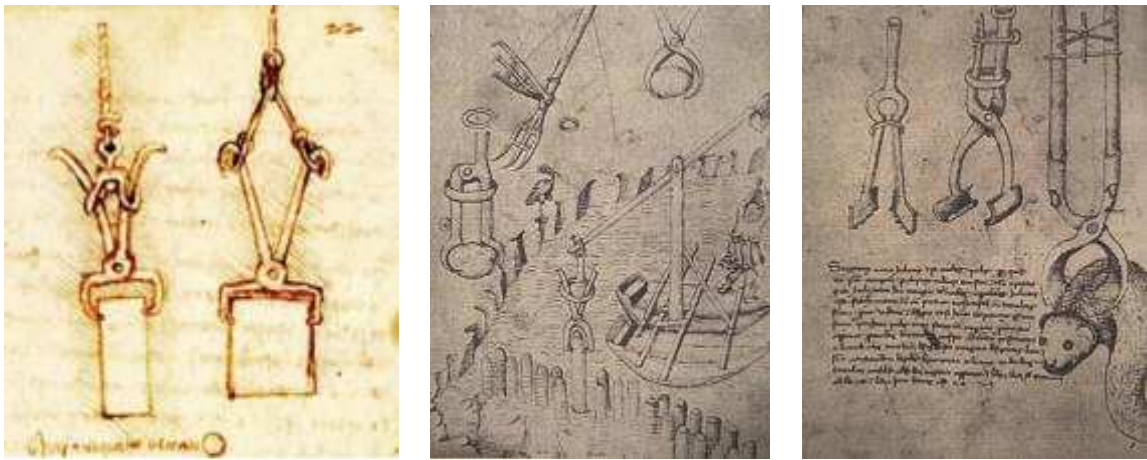


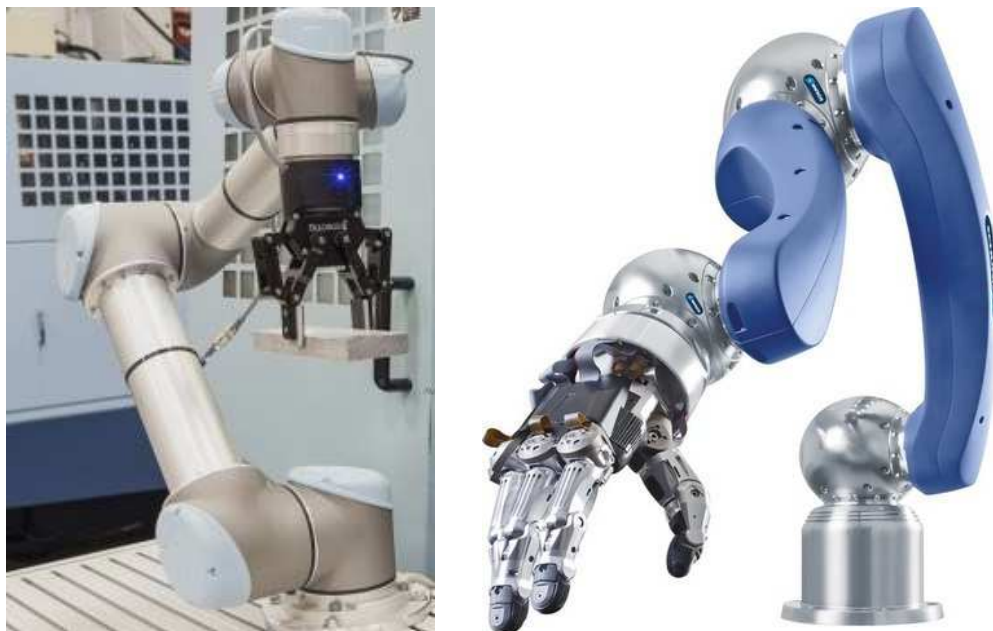
Fig. 2-1: Esempi di dispositivi presa di epoca romana, [11].

L'evoluzione delle scienze ha poi portato ad approfondire il problema della presa considerando gli aspetti principali, tipo la forma dell'oggetto, il peso, il materiale. Esempi di questa evoluzione, con particolare riferimento all'età rinascimentale sono riportati in [12].



**Fig. 2-2: Esempi di dispositivi di presa di epoca rinascimentale, [11].**

Passando invece dall'epoca moderna fino ai giorni nostri, l'evoluzione dei gripper ha visto, oltre all'utilizzo di meccanismi in grado di utilizzare al meglio l'energia fornitagli, l'utilizzo combinato di attuatori e sensori per costituire un sistema mecatronico "intelligente". Gli ultimi studi e applicazioni accademiche ed industriali dimostrano come il fattore flessibilità guidi la ricerca. Infatti esistono numerosi esempi di gripper dalla presa "universale" e uno che vede un intenso sviluppo è quello delle mani robotiche. Questo perché la mano umana è forse lo strumento di presa più flessibile in natura, che unito al livello di percezione e a quello di elaborazione delle informazioni, rappresenta l'esempio di un dispositivo in grado di fornire la massima flessibilità ed efficacia di presa possibile.



**Fig. 2-3: Esempi di gripper attuali e di mano robotica, [13], [14], [15].**

## 2.1 Classificazione dei gripper

Gli elementi che possono comporre un gripper sono diversi ma generalmente, lo schema che mostra quelli principali è riportato in Fig. 2-4. In particolare viene riportato lo schema degli elementi che costituiscono un gripper di tipo “Impactive”. Un gripper di tipo “Impactive” è un gripper meccanico dove la presa è garantita grazie allo scambio di forze tra le superfici delle dita di presa e quelle del pezzo.

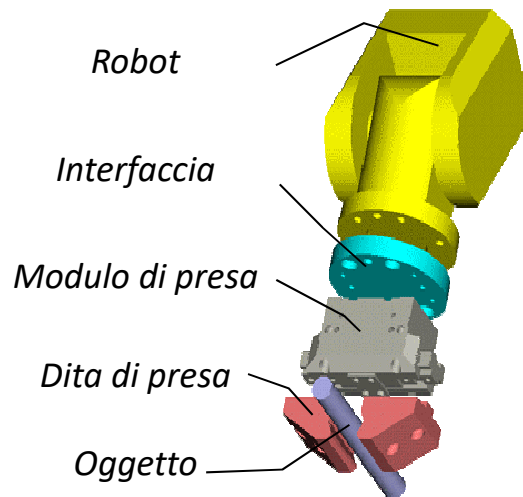


Fig. 2-4: Schema generale degli elementi che compongono un gripper di tipo “Impactive”, [16].

I gripper sono generalmente classificati in quattro categorie principali, Tab. 2-1. Queste classificano il metodo di presa e sono, [8]:

- **Impactive**: una forza meccanica è direttamente impressa sull’oggetto da due o più direzioni;
- **Ingressive**: la presa avviene tramite l’inserimento dell’organo di presa nell’oggetto, attraverso una o più superfici;
- **Astrictive**: una forza o un campo attrattivo vincola l’oggetto consentendone la presa;
- **Contigutive**: il sostegno dell’oggetto avviene attraverso una forza unidirezionale sviluppata dopo il contatto diretto non impattivo.

Tab. 2-1: Classificazione generale dei gripper, [8]

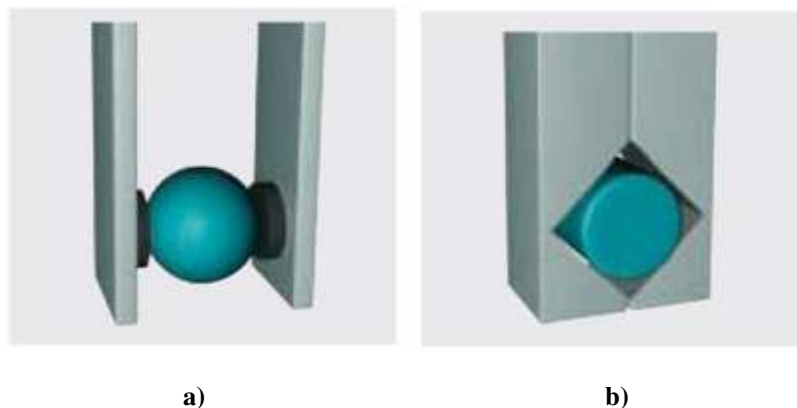
METODO DI PRESA	TIPO DI GRIPPER	ESEMPI
<b>Impactive</b>		Pinza, mano, morsa
<b>Ingressive</b>	Intrusivo	Aghi, perni, chiodi
	Non-intrusivo	Ganci, velcro
<b>Astrictive</b>	Ad aspirazione	Aspiratori
	Magneto-adesione	A campo magnetico
	Elettro-adesione	A campo elettrico
<b>Contigutive</b>	Termico	Congelamento, fusione
	Chimico	Adesivi Permatack
	A fluido	Azione capillare, tensione superficiale

Una caratteristica fondamentale che i gripper devono soddisfare è quella di realizzare una presa stabile durante le operazioni di movimentazione dell'oggetto afferrato. Poiché un corpo rigido libero nello spazio ha sei gradi di libertà, una presa efficace è conseguita limitando appunto i gradi di libertà del corpo afferrato.

La limitazione dei gradi di libertà può essere realizzata dimensionando correttamente il numero di punti di contatto, ad esempio adattando la geometria delle dita di presa, oppure variandone il numero. Per quanto riguarda tali punti di contatto, che nella realtà sono delle superfici definite attive, più ampie sono, più è grande la stabilità e quindi minori possono essere le forze di presa.

Esistono due tecniche di presa, Fig. 2-5, e che sono classificate come, [8]:

- Force-lock
- Form-lock



**Fig. 2-5: Schema delle due tecniche di presa: a) Force-lock; b) Form-lock, [16].**

Nella presa Force-lock il sostegno dell'oggetto avviene unicamente per effetto delle forze di attrito tra superficie dell'oggetto e dita di presa. Per questo è necessario che le griffe siano costruite con materiali ad alto coefficiente di attrito in relazione al materiale dell'oggetto da afferrare.

La presa Form-lock invece si ottiene con griffe adattate alla forma dell'oggetto grazie alle quali la forza si distribuisce lungo tutta la superficie di contatto. Il sostegno è generato quasi esclusivamente dal contenimento dell'oggetto, quindi la forza da esercitare per la presa risulta minore rispetto una corrispondente presa Force-lock.

La combinazione dei due casi precedenti dà luogo ad una presa mista. Una presa Force-lock può diventare Form-lock semplicemente cambiando orientamento al gripper.

Oltre al metodo e alla tecnica di presa è importante classificare anche il tipo di contatto che si viene ad avere tra il gripper e l'oggetto da manipolare. Esistono diversi tipi di contatto e questi sono fortemente dipendenti dalla morfologia di entrambi e dal numero di punti di contatto.

Le superfici attive possono essere diverse a seconda del tipo di metodo utilizzato, [8]:

- a) contatto in un punto;
- b) contatto lungo una linea;
- c) contatto su due linee;
- d) contatto su una superficie.

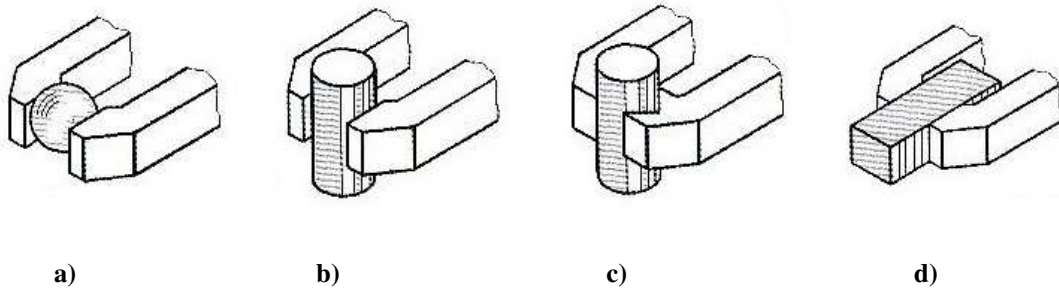


Fig. 2-6: Schema delle diverse tipologie di contatto.

Combinando le tipologie di contatto è possibile realizzare prese con un numero “ $n$ ” generico di contatti.

### 2.1.1 Impactive Gripper

Tra le diverse tipologie di gripper, gli “Impactive gripper”, sono la tipologia più diffusa a livello industriale grazie alla loro versatilità e ai vantaggi dal punto di vista economico.

Il principio di funzionamento è completamente basato sulle leggi della meccanica classica e consiste nel convertire un movimento primario generato da un attuatore (lineare o rotativo) in un movimento delle griffe attraverso una catena cinematica.

Generalmente gli “Impactive gripper” sono composti da due o più griffe, che si muovono simmetricamente e simultaneamente rispetto ad un asse centrale.



Fig. 2-7: Esempi di “Impactive gripper”, [13], [15].

Esistono diverse classificazioni dei gripper di tipo Impactive. Un esempio che riguarda i gripper a due griffe ed in particolare la classificazione dei gripper in funzione del meccanismo utilizzato per trasmettere il moto fornito dall’attuatore alle griffe è quella riportata in [17]. Le categorie principali riguardano:

- *Sistemi articolati a leve*: le aste rigide sono collegate tra loro mediante coppie rotoidali o prismatiche, Fig. 2-8;
- *Ingranaggi a vite e madrevite*: il movimento delle griffe è dato dal movimento relativo tra vite e madrevite, Fig. 2-9;
- *Sistemi a camme*: i meccanismi utilizzano una camma a doppia punteria a rotella per comandare il movimento delle griffe, Fig. 2-10;
- *Meccanismi a rocchetto e cremagliera*: generalmente il rocchetto è connesso alle griffe mentre la cremagliera viene movimentata dall’attuatore, Fig. 2-11;
- *Sistemi a cinghia e puleggia*: il movimento di apertura e chiusura delle griffe è eseguito mediante una trasmissione a cinghia, Fig. 2-12.

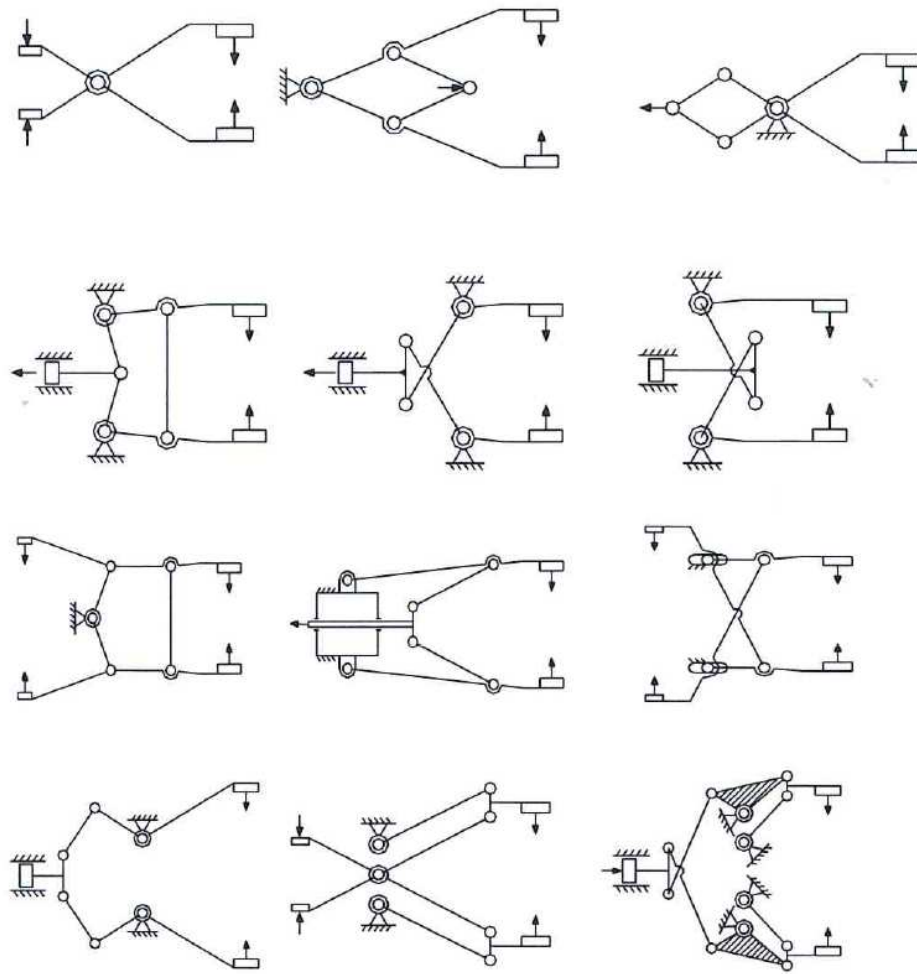


Fig. 2-8: Esempio di sistemi articolati a leve, [17].

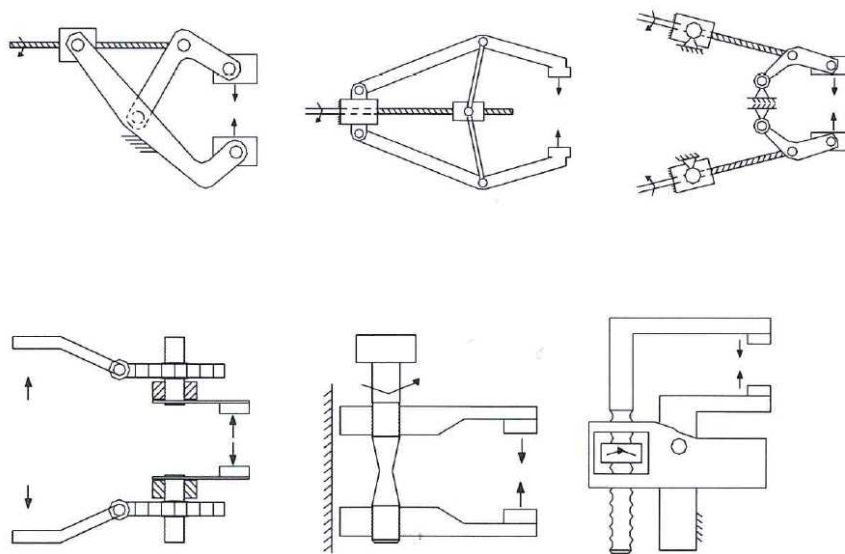
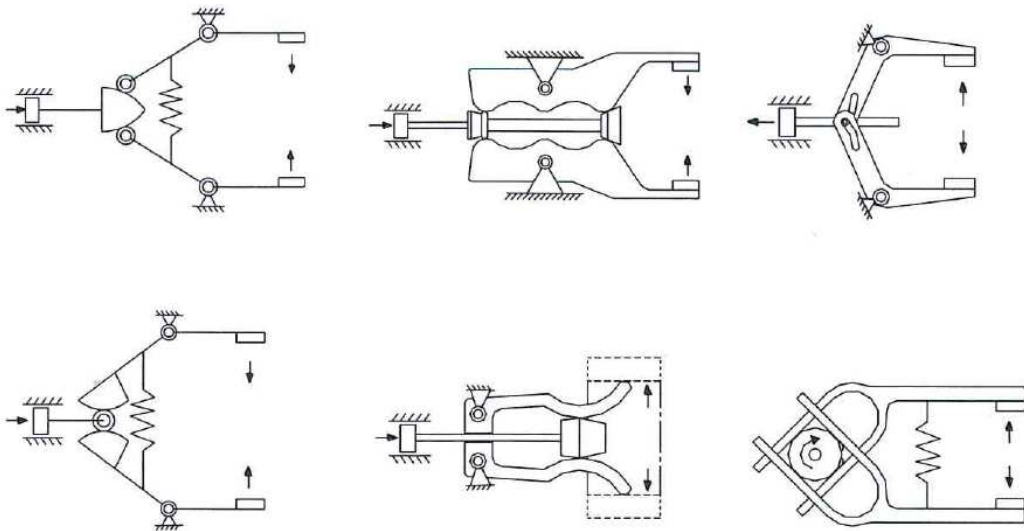
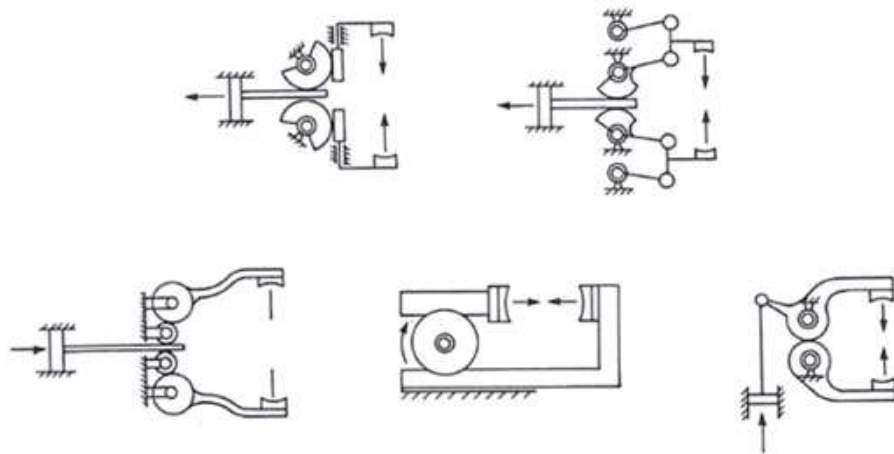


Fig. 2-9: Esempio di sistemi con ingranaggi a vite e madrevite, [17].

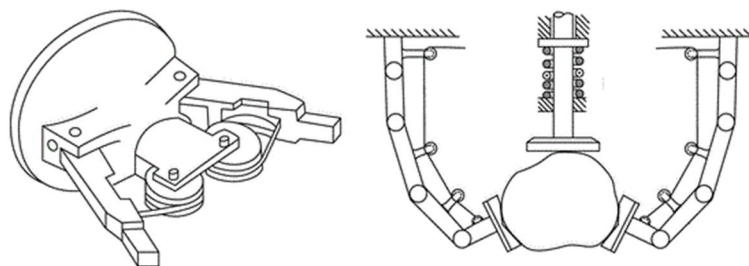




**Fig. 2-10: Esempi di sistemi con meccanismi a camme, [17].**

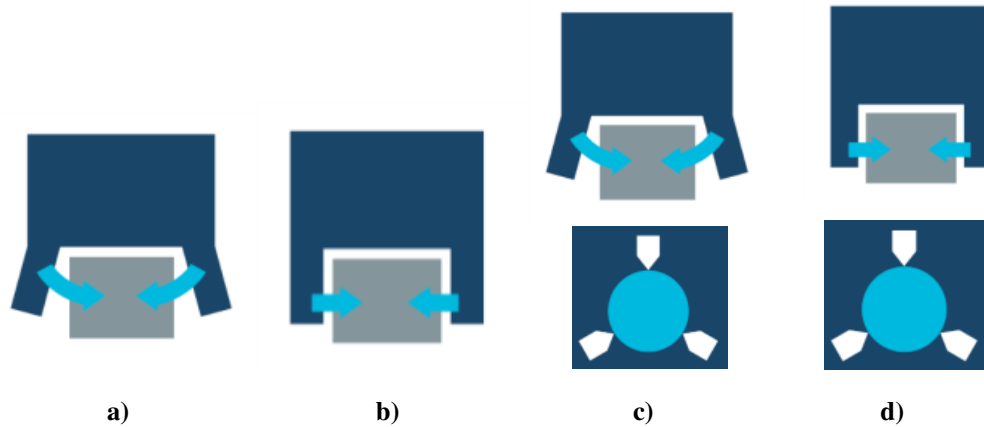


**Fig. 2-11: Esempi di sistemi con meccanismi a rocchetto e cremagliera, [17].**



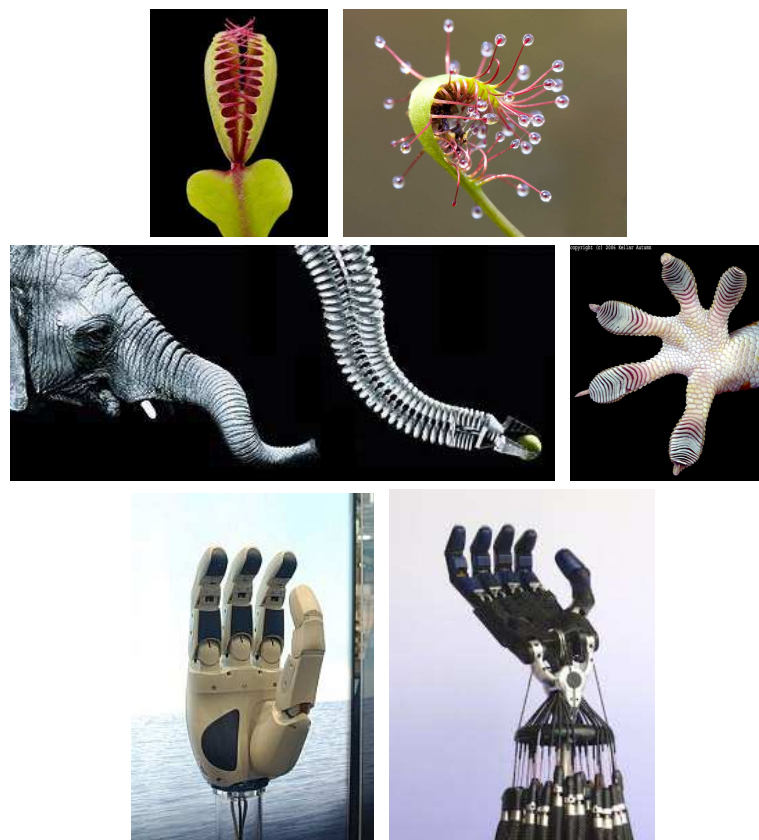
**Fig. 2-12: Esempio di sistema con meccanismo a cinghia e puleggia, [17], [18].**

Questa tipologia di gripper è anche quella più utilizzata in ambito industriale ed ogni produttore di questa tipologia di gripper, presenta a catalogo un'ampia gamma di gripper, [15], [19], [20], [21], [22]. In generale però, i principali schemi funzionali dei gripper di tipo possono essere classificati secondo il tipo di accostamento delle griffe all'oggetto e il numero di griffe movimentate. In particolare, sia per quanto riguarda i gripper a due griffe, che per i gripper a tre griffe, il tipo di accostamento può essere angolare o lineare, Fig. 2-13.



**Fig. 2-13: Principali metodi di accostamento per i gripper industriali: a) due griffe ad accostamento angolare; b) due griffe ad accostamento lineare; c) tre griffe ad accostamento angolare; d) tre griffe ad accostamento lineare, [15].**

Anche se questa tipologia di gripper può essere considerata “standard”, perché è quella che maggiormente viene utilizzata nelle applicazioni di manipolazione, ed in particolare nelle operazioni di manipolazione industriale, esiste un notevole numero di soluzioni innovative e “non standard” che continuano ad essere oggetto di studio e di sviluppo. Un esempio significativo è quello che riguarda i gripper sviluppati grazie alla biomimetica, [23], [24]. Infatti questi possono riguardare soluzioni ispirate dal mondo naturale, Fig. 2-14.



**Fig. 2-14: Esempi di soluzioni biomimetiche, [19], [25], [26].**

### 2.1.2 Ingressive Gripper

Un aspetto fondamentale che caratterizza gli “*Ingressive gripper*” è il tipo di presa che viene realizzata introducendo fisicamente uno o più componenti nell’oggetto da afferrare. Il termine “*ingressive*” è usato per tutte quelle tecniche di presa invasive che utilizzano aghi, perni o chiodi che attraversano il materiale senza danneggiarlo. Esistono anche mezzi non-intrusivi che non penetrano l’oggetto e che sono ganci o velcro. Questa tipologia di gripper viene utilizzata per le operazioni che riguardano i materiali flessibili morbidi, fibrosi o porosi come tessuti o pannelli di fibra di vetro o carbonio, [9]. I più diffusi e interessanti sono i gripper che presentano i mezzi intrusivi, Fig. 2-15.

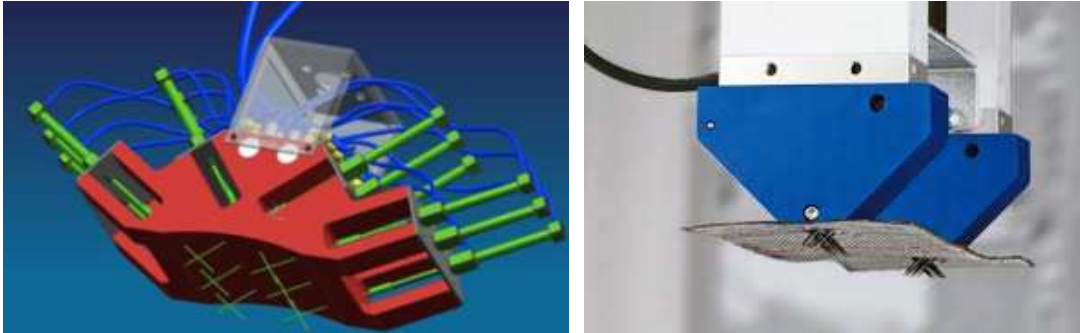


Fig. 2-15: Esempi di “Ingressive gripper”, [27].

Le tecniche di presa principali sono due. La prima vede la penetrazione degli aghi con conseguente allontanamento degli stessi. In questo modo il materiale afferrato viene messo in tensione. La seconda tecnica è quella che vede lo scorrimento degli aghi in direzione opposta. La forza di presa dipende da diversi fattori come il numero di aghi, dalla distanza relativa e dall’inclinazione degli stessi. Generalmente la profondità di penetrazione varia tra 0 e 5 mm.

### 2.1.3 Astrictive Gripper

Gli “Astrictive gripper” hanno la caratteristica principale di fornire la forza di presa in maniera continua senza che l’oggetto sia sottoposto a nessuna forza di compressione. I gripper appartenenti a questa tipologia sono i gripper ad aspirazione, i magneto-adesivi e quelli elettro-adesivi.

Il metodo di aspirazione più utilizzato negli impianti produttivi è quello della tecnica del vuoto. I gripper che si servono di questa tecnologia sono detti “*suction gripper*” e si differenziano in base alle due tecniche di presa: la prima è quella che utilizza i generatori del vuoto (*vacuum suckers*), la seconda invece utilizza le ventose (*passive suction cups*).

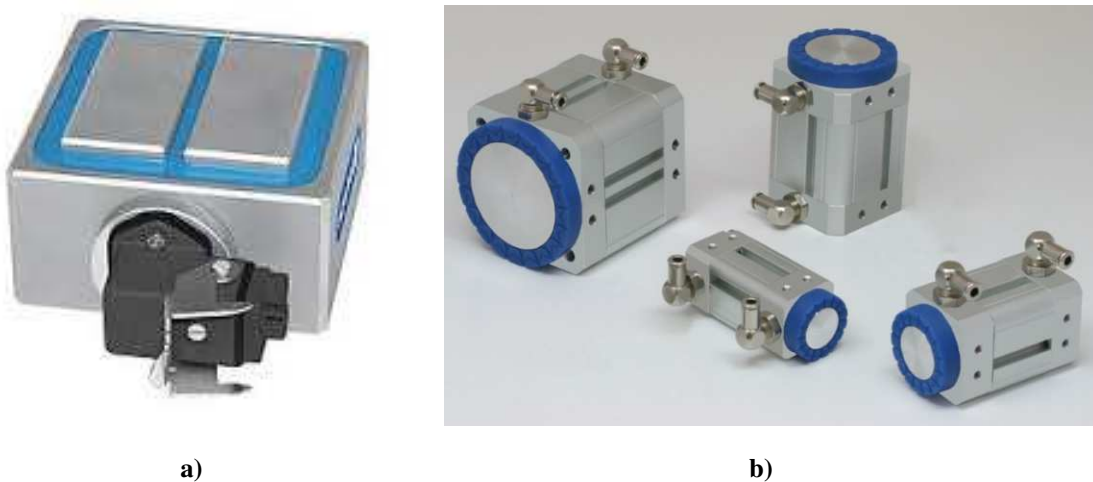


Fig. 2-16: Esempi di “Astrictive gripper” ad aspirazione, [27].

La prima tipologia viene usata per sollevare oggetti di grande dimensione e pesanti ma anche per piccoli componenti come nell'industria dei semiconduttori, nel microassemblaggio o nel campo dell'alimentare. Il principio di funzionamento è molto semplice ed utilizza una calotta flessibile (*suction cap*) viene compressa ermeticamente sulla superficie dell'oggetto. A questa fase segue la generazione del vuoto all'interno della calotta creando una depressione che fornisce la forza necessaria per il sostegno dell'oggetto.

Nelle ventose il vuoto viene creato semplicemente comprimendo la calotta di materiale morbido contro una superficie liscia o leggermente curva dell'oggetto. La compressione può essere manuale o meccanica, ad azionamento pneumatico o elettrico. La presa non dipende da nessuna fonte di alimentazione quindi viene considerata sempre sicura anche se eventuali perdite di pressione non possono essere compensate. Il rilascio dell'oggetto può essere realizzato tramite una valvola sulla calotta che permette la compensazione con la pressione atmosferica.

I gripper ad azione magnetica invece possono essere utilizzati solamente per la manipolazione di oggetti ferromagnetici. Sono classificati in due distinte tipologie: ad elettromagnete (forma attiva) e a magnete permanente (forma passiva).



**Fig. 2-17: “Astrictive gripper” ad azione magnetica: a) di tipo attivo, [15]; b) di tipo passivo, [27].**

I gripper a magnete permanente utilizzano magneti di forma e caratteristiche appositamente disegnate. Il magnete viene avvicinato o posto a contatto con l'oggetto consentendone la presa. Il procedimento di rilascio avviene meccanicamente attraverso il distanziamento forzato dei componenti. Punto di forza di questi gripper è la sicurezza in caso di mancanza improvvisa dell'alimentazione, infatti il magnete continua a svolgere il suo lavoro mantenendo la presa. Sussiste però il problema della magnetizzazione residua sull'oggetto che può causare l'attrazione di altri corpi ferromagnetici. Un altro problema può derivare dal fatto che la presa effettiva non comincia a contatto avvenuto come per i gripper elettromagnetici, ma il magnete attira l'oggetto prima dell'effettivo contatto. Questo causa un impatto tra oggetto e gripper e in alcuni casi può provocare danni ai componenti.

Infine, riguardo al principio di funzionamento dei gripper ad azione elettro-adesiva, è il campo elettrico a fornire la forza necessaria per la presa di un oggetto. Questa tecnologia è diffusa nel campo dei semiconduttori, in particolare per la movimentazione dei “*wafers*” di semiconduttori. I gripper elettro-adesivi, se confrontati con quelli ad aspirazione, possono sollevare oggetti contenenti fori e possono lavorare in ambienti dove è stato creato il vuoto.



Fig. 2-18: Esempio di “Astrictive gripper” ad elettro adesiva, [28].

#### 2.1.4 Contigutive Gripper

Per quanto riguarda la tipologia dei “Contigutive gripper” vi è una sostanziale differenza tra questi ultimi e le altre categorie di gripper. Infatti se generalmente per la presa di un oggetto si prevede il contatto diretto tra la superficie attiva del gripper e quella dell’oggetto stesso, per questa tipologia la presa è garantita mediante l’apporto di materiale specifico. In base al tipo di materiale usato, si possono distinguere due principali categorie di prese: la termoadesione e l’adesione mediante materiali chimici.

La termoadesione viene realizzata con l’inserimento di piccole gocce d’acqua tra la superficie attiva del gripper e la superficie dell’oggetto e successivamente congelate da un improvvisa applicazione di azoto o biossido di carbonio liquido. Il ghiaccio che si viene a formare funziona da strato adesivo (*ice bridge*), la superficie congelata è mantenuta in genere ad una temperatura di circa  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ed il rilascio dell’oggetto avviene riscaldando tale superficie causando lo scioglimento del ghiaccio. Questa tecnologia viene solitamente usata per la presa di materiali tessili i quali non soffrono per variazioni di temperatura.

L’adesione chimica utilizza strati di materiale adesivo creato appositamente per la specifica applicazione. Esistono numerosi materiali utilizzabili che devono soddisfare due importanti requisiti: fornire un’adeguata forza di adesione ed essere facilmente e velocemente sostituibili quando le proprietà adesive vengono meno. L’avanzata ricerca nel campo della chimica dei polimeri ha portato allo sviluppo di un materiale riutilizzabile (*Permatack*) con elevata forza adesiva in grado di mantenere le sue proprietà per centinaia di operazioni prima di necessitare di una pulizia o della sostituzione.



Fig. 2-19: Esempio di “Contigutive gripper” ad adesione chimica.

## 2.2 Sensoristica e controllo

I gripper utilizzati attualmente nei processi di manipolazione, presentano un sistema di sensoristica che interessa principalmente il posizionamento e la rilevazione degli oggetti. Questo gruppo di sensori serve per raccogliere le informazioni provenienti dall'ambiente esterno e dalle interazioni con esso. Queste poi vengono inviate all'unità di controllo, la quale monitorizza il movimento e sincronizza ogni singola operazione.

Esistono essenzialmente tre tipi di percezione legate alle operazioni che interessano i gripper:

- Rilevamento della presenza dell'oggetto da prendere.
- Verifica della presa o del rilascio.
- Controllo della posizione e dell'orientamento dell'oggetto.

Tutte queste funzioni possono essere implementate attraverso l'utilizzo di quattro categorie di sensori. Le categorie generali sono i sensori di prossimità, i sensori tattili, i sensori di forza/coppia e i sensori di posizione/velocità.

I sensori di prossimità (*Proximity Sensors*) sono in grado di rilevare la presenza di un ostacolo/oggetto a distanza, entro la loro portata nominale, senza contatto fisico. La caratteristica di questi sensori è l'assenza di parti in movimento e quindi godono di elevata durabilità e ripetibilità. Per questi motivi sono molto impiegati nei processi industriali. Esistono due categorie di sensori di prossimità: una fornisce un'informazione binaria (ON-OFF) sulla presenza dell'oggetto, l'altra consente una misura della distanza dell'oggetto rilevato.

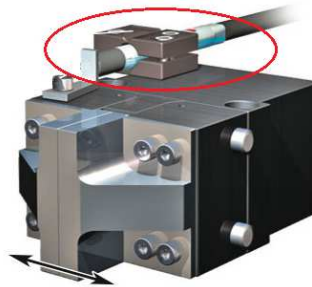
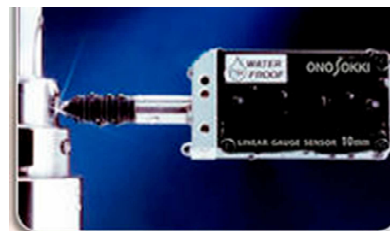


Fig. 2-20: Esempio di utilizzo di un sensore di prossimità, [29].

Per quanto riguarda la misura di posizione o velocità, fanno parte di questa categoria i potenziometri, i trasduttori ad induzione, gli encoder. I potenziometri misurano una rotazione o uno spostamento lineare e sono formati da un cursore mobile che scorre su un resistore: ogni valore di resistenza corrisponde a una diversa posizione. Sono sensori economici e robusti di limitata sensibilità con andamento lineare e bassa frequenza di lavoro. I trasduttori ad induzione servono per misurare uno spostamento che può essere lineare o angolare. Gli encoder sono dispositivi ottici o magnetici in grado di misurare una rotazione angolare o uno spostamento lineare e possono essere incrementali o assoluti.



a)



b)

Fig. 2-21: Esempi di encoder per misure di posizione: a) tipo rotativo; b) tipo lineare, [30].

La misura di coppia è un elemento importante per il controllo delle operazioni di un organo di presa. I sensori di forza/coppia sono generalmente montati tra il gripper e la flangia di fissaggio. Questi sensori sono composti da un elemento deformabile di varia struttura e da componenti sensibili a tale deformazione. Questi componenti possono essere sistemi optoelettronici o “*strain gauge pairs*”, ovvero particolari sensori a film sottile metallico, semiconduttivo o piezoresistivo costruiti per avere sensibilità maggiore per deformazioni in direzioni preferenziali.

I sensori tattili (*Tactile Sensors*) reagiscono al contatto fisico con un oggetto. Ci sono due principali categorie di sensori: i sensori di contatto i quali generano solamente un informazione binaria e i sensori tattili che forniscono invece un informazione sulla pressione esercitata sulla superficie del sensore. Entrambe le tipologie possono essere organizzate in array (o matrici) per fornire una ricostruzione del tipo di contatto. I sensori tattili a matrice vengono generalmente installati su ogni superficie utile delle dita di presa consentendo così di determinare e modificare l'accuratezza della presa. L'elevato costo e il complesso controllo di questi sensori trova campo principalmente sulle mani robotiche antropomorfe.

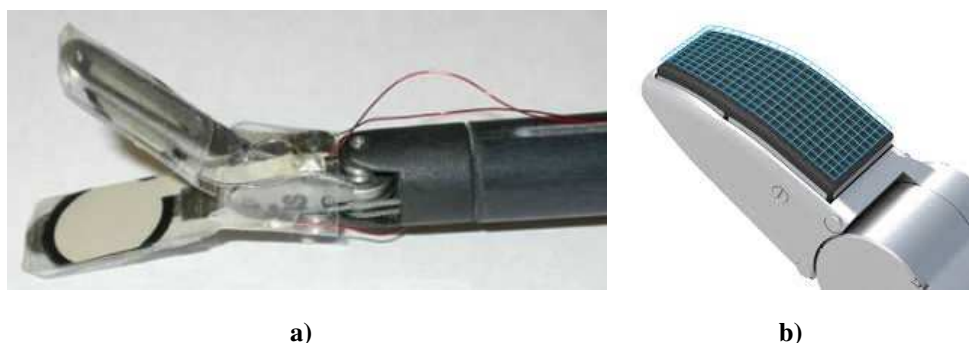


Fig. 2-22: Esempio di sensori tattili: a) tipo piezoresistivo, [31]; b) tipo capacitivo, [15].

Una categoria di sensori, che sono sempre più integrati nei sistemi di manipolazione robotica, sono quelli utilizzati nei sistemi di visione artificiale. In particolare, esistono diversi livelli di integrazione che possono andare dall'individuare prefissate coordinate di lavoro di un robot al guidare l'intero sistema di manipolazione nello spazio senza nessuna condizione esterna.

### 2.3 Nuovi sviluppi e trend di ricerca

Le caratteristiche fisiche dei prodotti da manipolare, come la geometria, la struttura, le dimensioni, l'estensione superficiale, il tipo di materiale, il coefficiente di attrito, la posizione del baricentro e le zone sensibili, possono influenzare significativamente il processo di manipolazione.

Per quanto riguarda le caratteristiche più importanti dei gripper industriali, queste sono la definizione della forza da applicare, la rigidità strutturale, che influenza la qualità di presa, il posizionamento. Il ridotto numero di gradi di libertà ne aumenta l'affidabilità e ne riduce il suo costo ma di contro necessitano di attrezzature specifiche che dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'oggetto e quindi devono essere sostituiti ogni volta che si cambia prodotto. Queste sostituzioni richiedono tempo e rendono in certi casi il processo antieconomico.

Nei recenti anni, i costruttori di gripper industriali e non, hanno incominciato a presentare dei gripper con più gradi di libertà (*mani di presa, robot hand*), che sono in grado di cambiare la loro configurazione, adattandosi quindi all'oggetto da manipolare. Inoltre, il maggior numero di gradi di libertà permette loro di avere un'elevata cedevolezza e una destrezza maggiore permettendo così di avere una presa reattiva. Tutte questi aspetti permettono la manipolazione

di oggetti che può essere comparata a quella umana, che ha una capacità eccezionale in termini di manipolazione. I diversi progetti di robot hand tentano di simulare queste attitudini al fine di afferrare qualsiasi tipo di prodotto. L'idea è di aumentare i gradi di libertà delle dita di presa e di incorporare sensori al fine di adattarsi il più possibile alle esigenze di presa. Di contro, presentano una grande complessità per permettere di realizzare e controllare la presa di un oggetto. Il tempo di risposta è basso, si ha attualmente un alto costo e la complessità generale del sistema limita la loro applicazione. Ma questa capacità di adattamento a forme molto complesse, le possibilità di un controllo sempre più efficace ed efficiente e la riduzione dei costi farà sì che le mani robotiche entreranno sempre di più nelle varie fasi dei processi industriali.

Una tipologia delle mani di presa robotiche è quella cosiddetta “sotto attuata”, [32]. Questa tipologia di gripper si caratterizza dal fatto di avere un numero definito di gradi di libertà maggiore del numero di attuatori dedicati. Questa tipologia ha il vantaggio di presentare un sistema meno complesso ed un minore costo pur garantendo un'elevata destrezza di presa.

Un particolare interesse è l'area di ricerca definita “Soft robotics”. Quest'area di ricerca infatti vede l'utilizzo di materiali che presentano delle caratteristiche meccaniche e fisiche tali da adattarsi agli oggetti afferrati, [33], [34].

Per quanto riguarda lo sviluppo di nuovi prodotti, è sempre più crescente l'utilizzo di tecniche di progettazione definite “per analogia”. Generalmente queste tecniche danno un maggior supporto nelle fasi iniziali del processo di progettazione in quanto si considera non solo il settore di riferimento del prodotto da progettare, quindi non viene realizzata soltanto un'analisi benchmarking, ma vengono considerati e analizzati i settori più diversi. Questi possono variare dal mondo animale a quello vegetale (biomimetica), dal mondo dei dispositivi/macchine di uso quotidiano e non a quello dei vestiti o accessori. In letteratura sono presentate diverse tecniche di progettazione per analogia, che sono state sviluppate e strutturate considerando come principi base i concetti di “funzione” e di “flusso”. Questi sono utilizzati per classificare, all'interno di diversi database, gli effetti e i principi di funzionamento. Tutto questo per permettere ai progettisti di scegliere la soluzione migliore partendo dalla conoscenza delle soluzioni che hanno risolto diversi problemi.

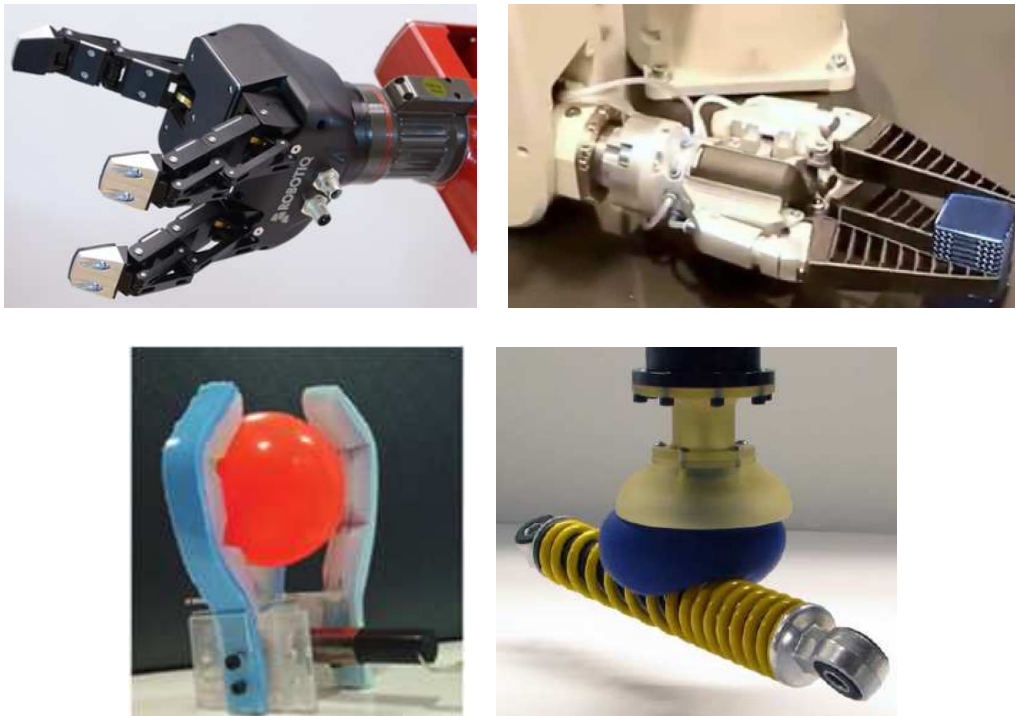


Fig. 2-23: Esempi di gripper “innovativi”, [13], [19], [33], [35].



## 2.4 Presentazione dei gripper utilizzati attualmente nel processo di produzione

Il gripper utilizzato nelle celle di stampaggio robotizzate dell'unità produttiva di anelli di tenuta, è essenzialmente composto da due sottosistemi che, pur presentando diverse caratteristiche costruttive, permettono di compiere le due principali operazioni che vengono eseguite durante l'esecuzione di un ciclo di produzione. La prima operazione è l'estrazione dell'anello dallo stampo ed il rilascio dello stesso sul piano di raffreddamento, l'altra operazione invece riguarda la manipolazione della lamiera e dell'anello durante tutte le altre fasi che interessano il ciclo di produzione. Il motivo dell'uso di due sottosistemi è legato alla diversa natura delle due operazioni. Il fattore principale che differenzia le due operazioni è il livello delle forze scambiate tra il gruppo "Gripper-Anello-Stampo".

In seguito i due sottosistemi che costituiscono il gripper connesso al polso del robot verranno chiamati:

- o Pinza di estrazione
- o Pinza di manipolazione

Lo schema generale del gripper nella soluzione di stampaggio 1x1, Fig. 2-24.

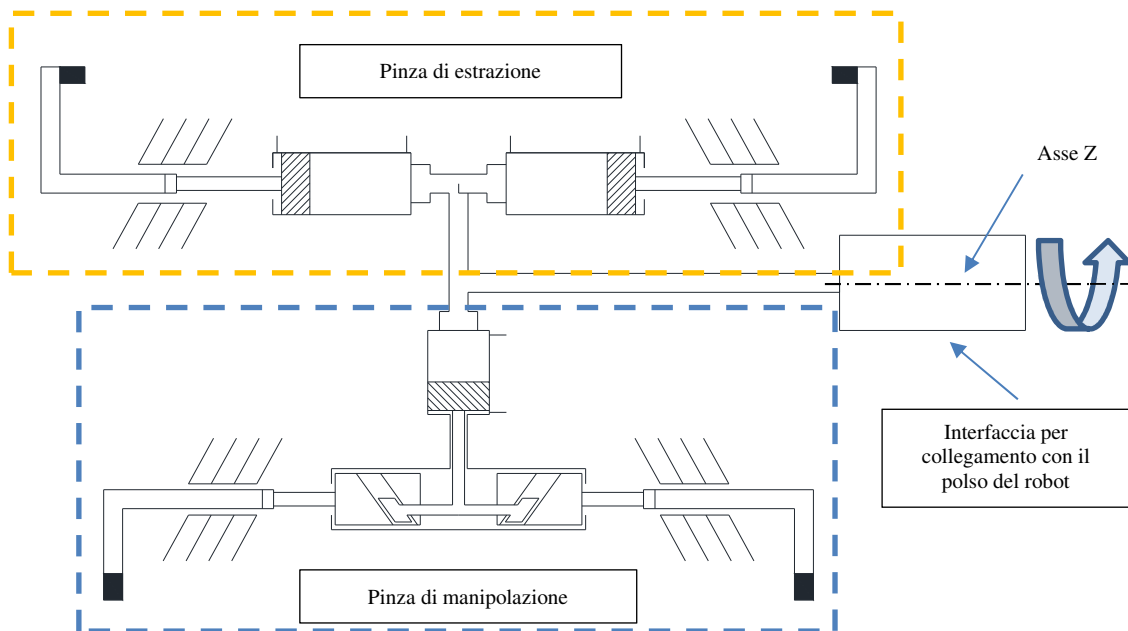


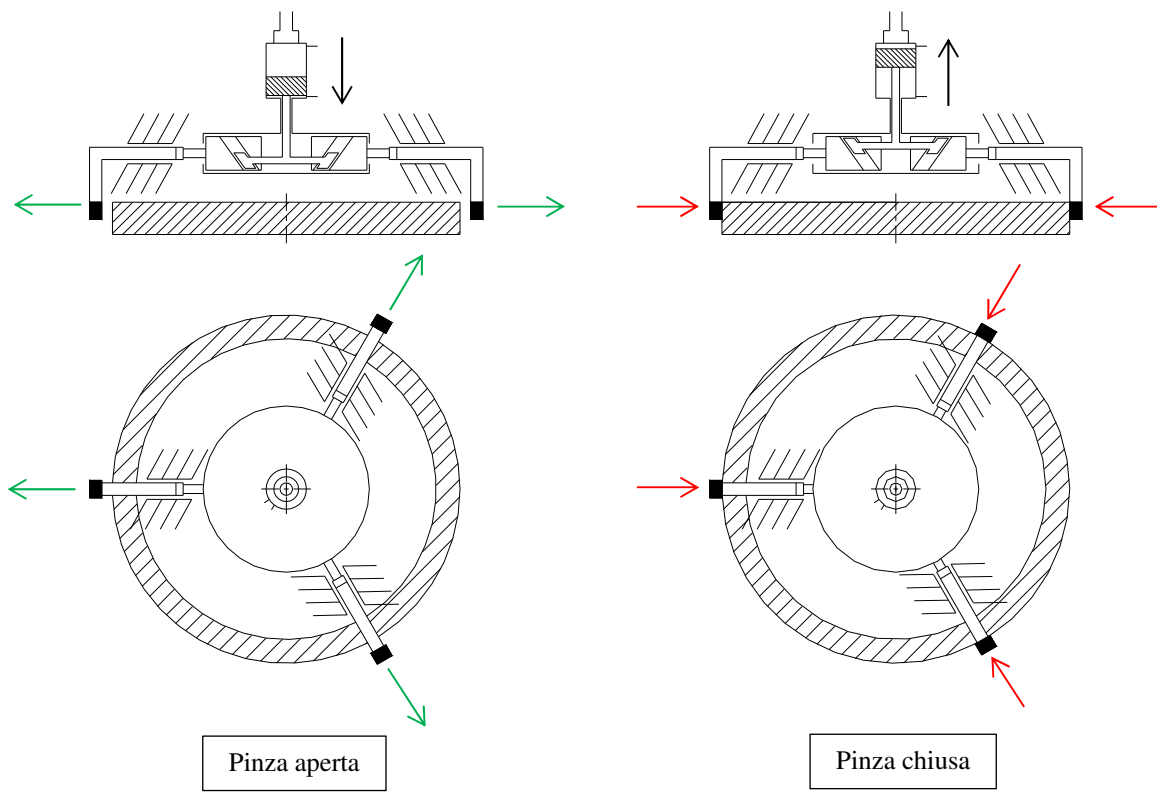
Fig. 2-24: Schema generale del gripper utilizzato attualmente (vista laterale).

Il gripper presenta i due sottosistemi posti su due livelli e posizionati in maniera simmetrica rispetto al piano orizzontale di stampaggio. Il gripper può quindi ruotare liberamente rispetto all'asse Z, grazie al collegamento dell'interfaccia con il polso del robot.

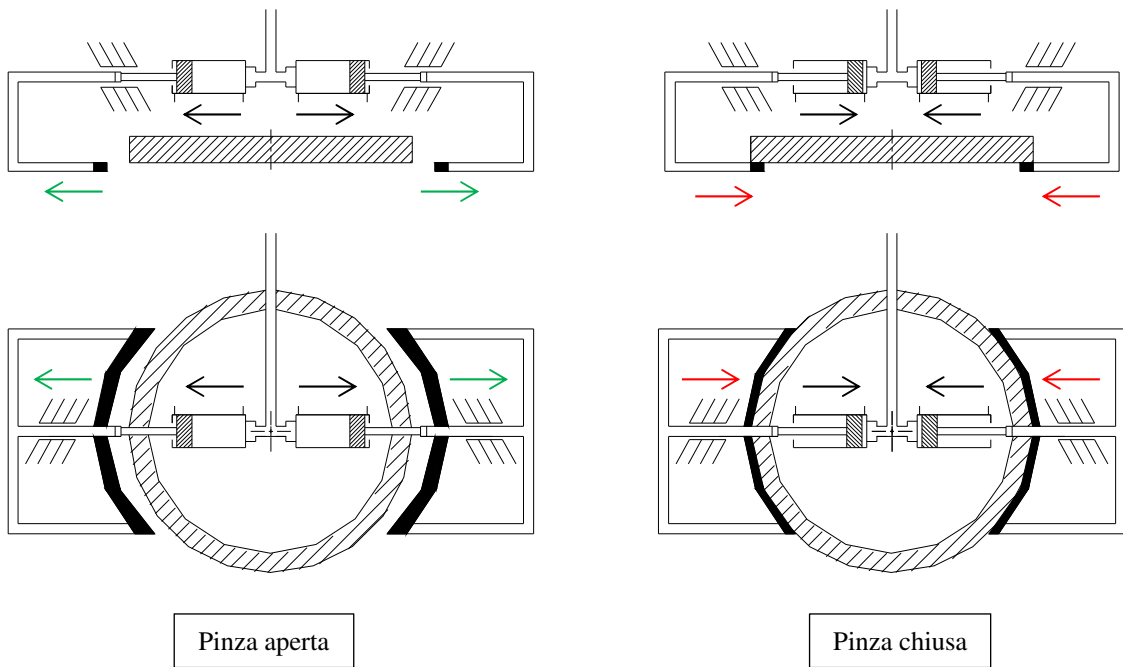
La pinza di manipolazione lamiera/prodotto finito, esegue l'operazione di presa in modo autocentrante ad 1 grado di libertà che va in contatto con il pezzo attraverso 3 punti di presa posti a 120° tra loro. L'attuatore che movimentava le parti della pinza è di tipo pneumatico a due posizioni ed utilizzava un meccanismo del tipo guidato a cuneo.

L'operazione di estrazione dell'anello dalla matrice dello stampo viene eseguita dalla pinza di estrazione. Strutturalmente è più robusta in quanto l'operazione interessata prevede uno scambio di forze di un certo livello tra la pinza per l'estrazione e la matrice dello stampo. Per questa operazione i due attuatori che movimentano in maniera simultanea le parti della pinza sono di tipo pneumatico a due posizioni.

Gli schemi di funzionamento dei due gripper nelle due diverse configurazioni di lavoro. La Fig. 2-25 riporta lo schema che interessa la pinza di manipolazione. La Fig. 2-26 invece riporta lo schema che interessa la pinza di estrazione anello.



**Fig. 2-25: Pinza per le operazioni di manipolazione lamiera / prodotto finito nelle due posizioni di lavoro.**



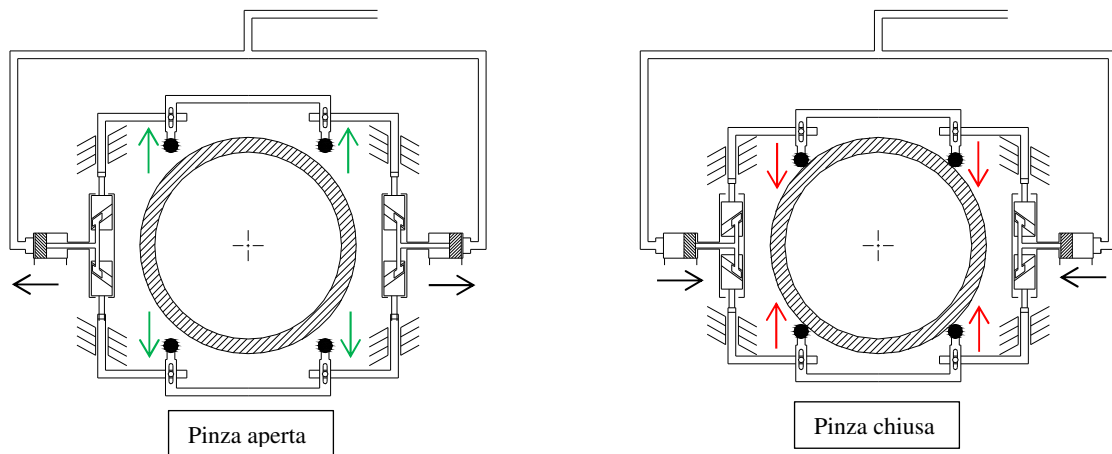
**Fig. 2-26: Pinza per l'operazione di estrazione nelle due posizioni di lavoro.**

Il metodo di presa utilizzato dalle due pinze che compongono il gripper è di tipo Impactive. Per quanto riguarda la pinza di estrazione la presa è di tipo “Form-closure” in quanto è realizzata grazie alla particolare forma geometrica delle griffe. Queste ultime, grazie all’utilizzo di attrezzature che sono modellate in funzione dell’oggetto da manipolare, sostengono l’oggetto mediante il contenimento dello stesso.

Per quanto riguarda la pinza di manipolazione la presa è di tipo “Force-closure”. Questa permette la presa dell’oggetto solo grazie all’effetto delle forze di attrito tra la superficie dell’oggetto e le griffe della pinza. Il livello di forze scambiate dipende dal materiale utilizzato nelle griffe e da quello che interessa le zone di presa dell’oggetto da manipolare.

Per quanto riguarda le tecniche di controllo, entrambe le pinze non presentano un controllo della forza applicata, limitata solamente da un riduttore di pressione installato nel gripper e per quanto riguarda la posizione delle griffe, il controllo è del tipo “On-Off” con un riferimento delle due posizioni di lavoro e cioè “Pinza aperta”, “Pinza chiusa”.

Una tipologia di pinza di manipolazione, definita di tipo B, è quella che esegue l’operazione di presa mediante il contatto delle griffe, costituite da 4 pin, con l’oggetto da manipolare, Fig. 2-27.



**Fig. 2-27: Pinza tipo B per le operazioni di manipolazione lamiera / prodotto finito nelle due posizioni di lavoro (vista dall’alto)**

Sono utilizzati due attuatori di tipo pneumatico che movimentano simultaneamente le griffe della pinza. Anche per questa pinza la presa è di tipo “Force-closure”. Questa permette la presa dell’oggetto solo grazie all’effetto delle forze di attrito tra la superficie dell’oggetto ed i pin della pinza.

## Capitolo 3 Progettazione e prototipazione del gripper

### 3.1 Fasi del processo di progettazione e di prototipazione

Il processo di progettazione del gripper, eseguite le analisi preliminari e definiti i requisiti di progetto, ha visto l'esecuzione di diverse fasi che hanno portato alla realizzazione del primo prototipo del QuBu gripper. Tale processo ha riguardato la pinza di manipolazione, mentre per la pinza di estrazione, la soluzione esistente è stata reputata valida ed efficace e quindi non ha visto uno sviluppo specifico.

In particolare, una prima fase di tale processo ha visto l'introduzione e la definizione del concetto di modularità. Questo perché, analizzando il processo di presa di un anello, sono state individuate e distinte tre diverse fasi che permettono di realizzare il processo di presa. Tale distinzione ha poi permesso di individuare i possibili sensori in grado di fornire le informazioni necessarie per comprendere se le rispettive fasi sono state eseguite correttamente. Il processo di progettazione ha poi visto la definizione del tipo di architettura con la conseguente determinazione dei principali parametri geometrici caratterizzanti. La fase successiva ha invece interessato l'analisi cinematica del sistema di trasmissione per poi definire il sistema di attuazione e di monitoraggio delle grandezze fisiche principali. Queste ultime dipendenti dalla definizione delle tecniche di controllo di presa e di movimentazione degli anelli. Infine si è passati alla progettazione esecutiva e poi alla costruzione dei componenti costituenti il gripper, per poi essere assemblati e costituire quindi il primo prototipo del QuBu Gripper.

#### 3.1.1 Definizione del concetto di modularità

Il processo di analisi preliminare ha permesso di identificare gli aspetti principali che caratterizzano l'ambiente di lavoro e i compiti che il gripper esegue durante il processo di produzione. Il fatto poi di focalizzarsi sull'atto di presa di un anello, ha indicato che tale atto può essere scomposto in tre specifiche fasi che possono essere eseguite da tre rispettivi sottosistemi che compongono il gripper. Questo ha permesso di introdurre il concetto di modularità che può comunque essere applicato a seconda del tipo di applicazione. I tre sottosistemi o moduli individuati possono essere:

- Modulo di centraggio: il compito di questo sottosistema è quello di garantire il corretto posizionamento dell'anello rispetto al gripper ed in particolare di garantire la coassialità tra gripper e anello;
- Modulo di applicazione della forza di presa: questo, dopo aver eseguito il centraggio permette di trasferire la forza di presa voluta senza causare danni locali o superficiali all'anello;
- Modulo RCC (Remote Centre of Compliance): questo permettere piccoli moti relativi del gripper rispetto al polso del robot. In questo modo è possibile avere un maggiore controllo dell'interazione tra il sistema considerato e l'ambiente di lavoro

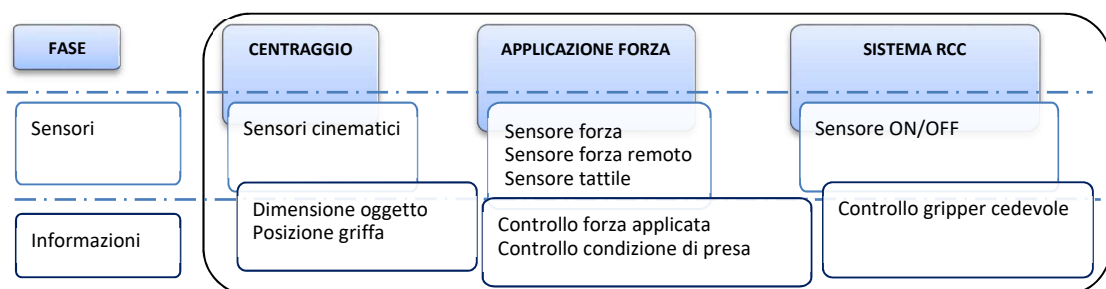


Fig. 3-1: Schema dei possibili moduli costituenti il gripper.

Lo schema che visualizza l'esecuzione sequenziale del processo di presa considerando il concetto di modularità introdotto in precedenza, Fig. 3-2.

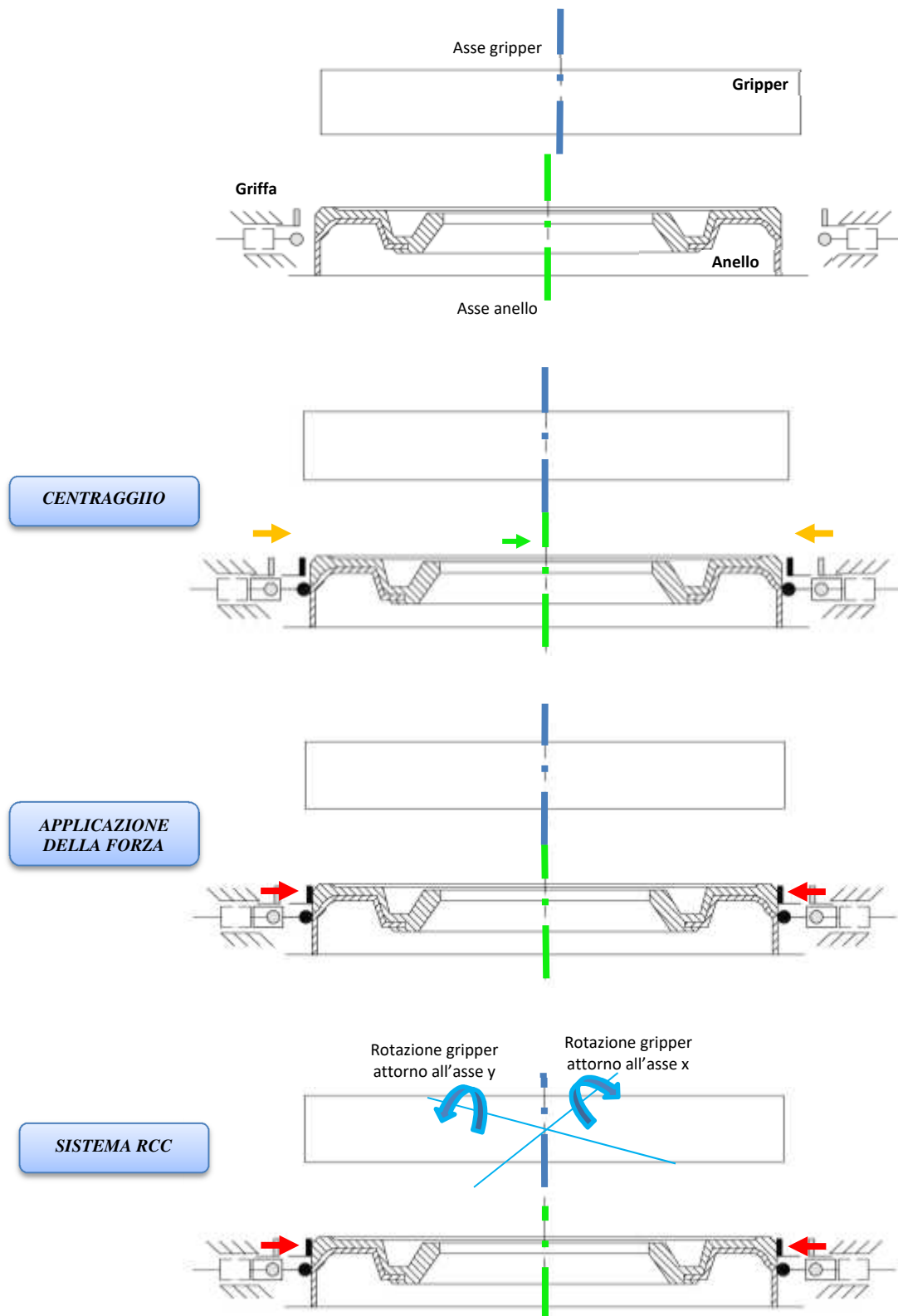


Fig. 3-2: Schema della sequenza del processo di presa applicando il concetto modulare.

## 3.2 Processo di definizione dell'architettura

Il processo di definizione dell'architettura della pinza di manipolazione, in primis ha interessato la definizione della tipologia di presa. Questa è stata scelta considerando sia i pro e i contro della soluzione utilizzata attualmente che delle soluzioni presenti in letteratura.

L'analisi successiva ha invece riguardato i possibili movimenti che possono interessare le griffe e come questi movimenti possono influenzare la presa dell'oggetto, sia durante la fase di centraggio che durante la fase di applicazione della forza.

Infine, dopo aver definito quale tipologia di architettura adottare, è stato eseguito un processo di ottimizzazione dei parametri geometrici e funzionali della stessa, per definire la soluzione identificata come la migliore per l'applicazione oggetto di questa tesi.

### 3.2.1 Definizione della tipologia di presa

Gli aspetti che possono influenzare la tipologia di presa sono molteplici e i principali generalmente dipendono dalla forma dell'oggetto da afferrare, dal materiale che costituisce l'oggetto, dagli spazi disponibili, dall'orientamento dell'oggetto prima della presa e in fase di rilascio.

Se si restringe però l'analisi al caso in esame e cioè alla forma assial-simmetrica degli oggetti, al fatto che questi presentano una rigidità tale da poter essere afferrati con una forza di una certa entità e si tengono in considerazione gli spazi disponibili, le tipologie di presa si restringono notevolmente.

In letteratura, se si considera come punto di riferimento la mano umana, l'analisi delle tipologie di presa in funzione della geometria dell'oggetto da afferrare, riporta che, per oggetti assial-simmetrici, la cui geometria può essere paragonata ad un disco, la tipologia di presa della mano assume una configurazione a tripode, classificata come "3 virtual fingers" [37], Fig. 3-1.

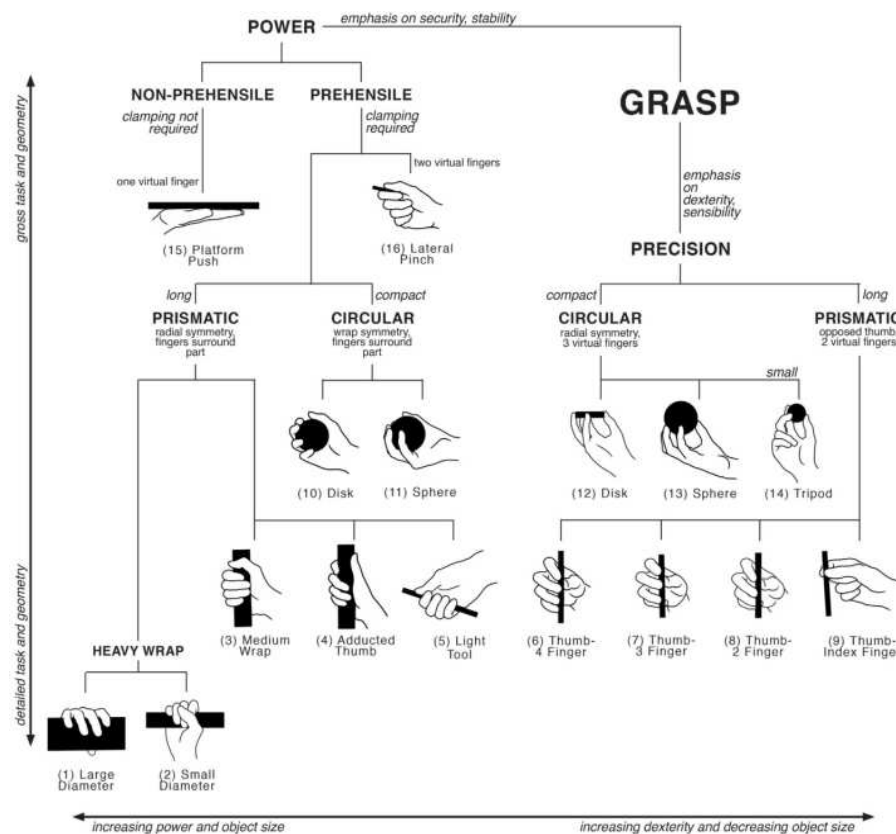


Figura 3-1: Classificazione tipologie di presa, [37].

Analizzando il gripper attuale, la soluzione adottata è quella che presenta una presa con tre griffe poste a  $120^\circ$  tra loro, con un moto di accostamento rettilineo delle stesse. Il vantaggio è quello di avere un auto-centraggio dell'oggetto rispetto al gripper, anche se limitato dalla forma geometrica delle attrezzature specifiche utilizzate. Lo svantaggio è quello di avere una limitata corsa radiale ed un ingombro relativamente elevato e quindi la necessità di posizionare le attrezzature di presa in funzione del diametro dell'oggetto da manipolare.

Come descritto nel paragrafo 1.1.1, l'oggetto da manipolare ha la forma "disco" e considerando il tipo di applicazione presentano, la configurazione di presa a tre griffe a  $120^\circ$  è quella scelta per lo sviluppo della pinza di manipolazione. Il tipo di accostamento delle griffe all'oggetto da afferrare verrà analizzato in seguito.

### 3.2.2 Definizione del movimento delle griffe

Il tipo di contatto che si può realizzare tra le griffe e l'oggetto da manipolare deve tenere in considerazione i diversi aspetti che sono elencati sotto:

- Evitare livelli di pressione superficiale tra griffa e anello che causano deformazioni permanenti sull'oggetto;
- Evitare problemi di incollaggio tra griffe e gomma;
- Indipendenza dal diametro dell'anello da manipolare
- La superficie di presa può essere deformabile e non regolare, Fig. 1-9.

Definito il tipo di presa, si sono considerati due diversi possibili movimenti che può avere la parte estrema di ogni singola griffa e cioè i movimenti considerati sono o rettilineo o circolare, Fig. 3-3.

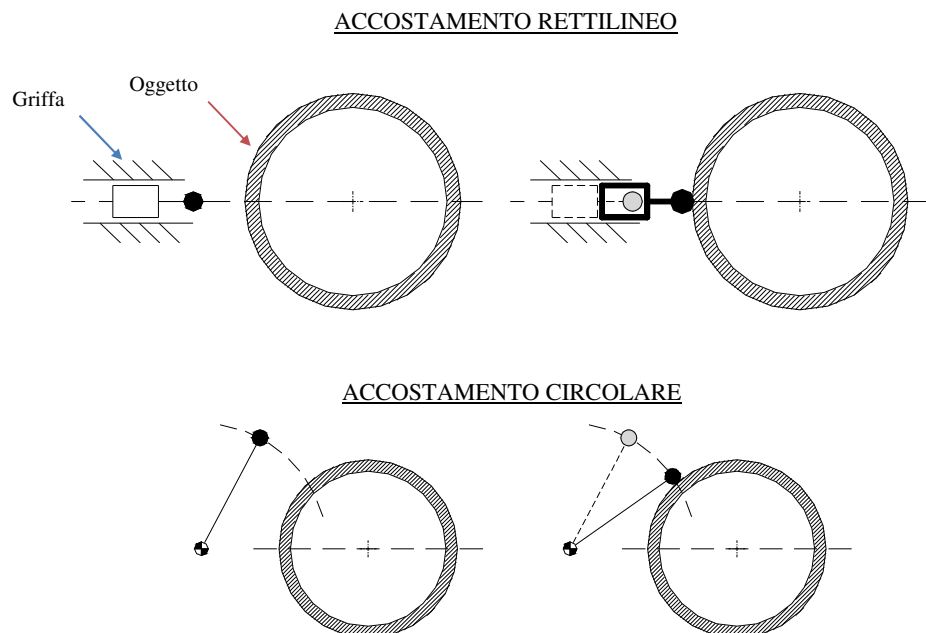
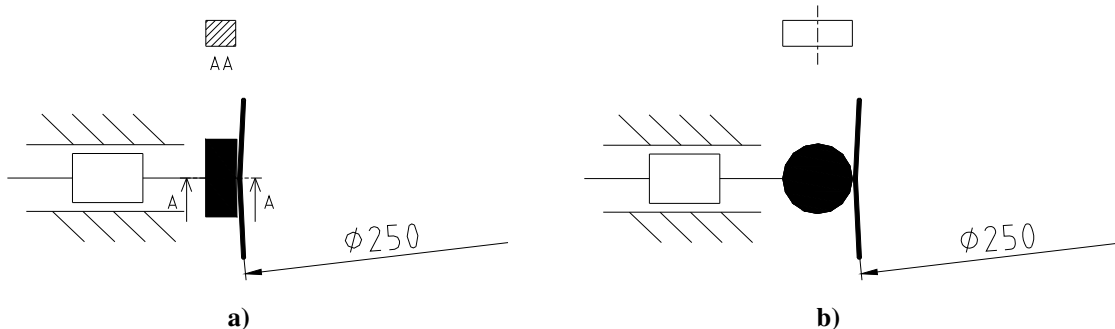


Fig. 3-3: Movimento possibile delle griffe – rettilineo, circolare.

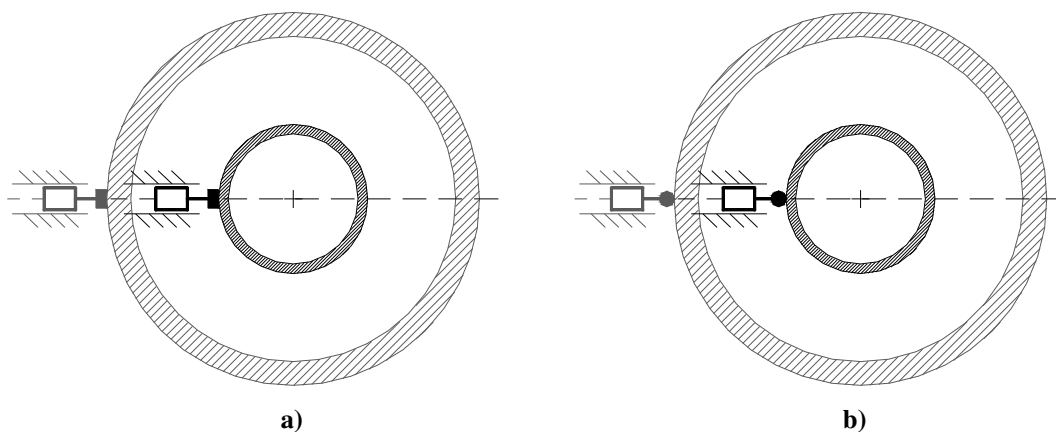
Definiti i possibili movimenti della griffa si sono considerate due diverse tipologie di contatto che possono aversi tra ogni griffa e l'oggetto. In particolare, le due tipologie riguardano o un contatto di superficie o uno su una linea, Fig. 3-4.

Nel caso in cui si consideri un contatto superficiale, il raggio di curvatura da considerare è quello dell'anello massimo.



**Fig. 3-4: Due possibili forme geometriche assunte dalla parte terminale della griffa: a) contatto di superficie; b) contatto su una linea.**

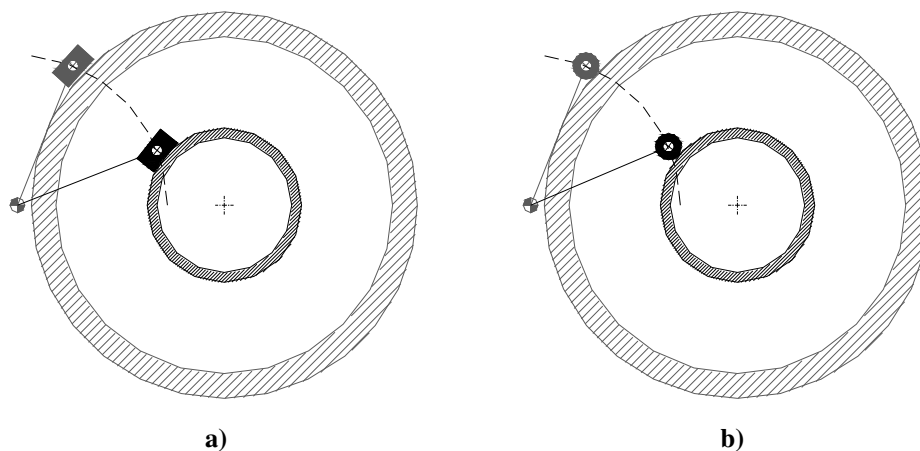
Andando a combinare il tipo di contatto con il tipo di accostamento, si ottengono quattro possibili configurazioni. La Fig. 3-5 mostra le prime due possibili configurazioni considerando un accostamento di tipo rettilineo.



**Fig. 3-5: Accostamento di tipo rettilineo: a) Contatto di superficie; b) contatto su una linea.**

Per un accostamento di tipo rettilineo le due diverse tipologie di contatto non presentano sostanziali differenze. L'aspetto da tenere in considerazione riguarda invece la differenza delle pressioni superficiali che vengono a crearsi tra la griffa e l'anello.

La Fig. 3-6 mostra le possibili configurazioni considerando un accostamento di tipo circolare.



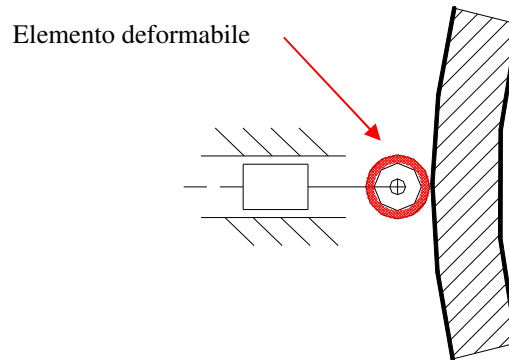
**Fig. 3-6: Accostamento di tipo circolare: a) Contatto di superficie; b) contatto su una linea.**



Considerando un contatto di superficie è necessario che la parte terminale della griffa sia orientabile in funzione delle dimensioni dell'oggetto da manipolare.

Per quanto riguarda il contatto su una linea, è stato considerato l'utilizzo di una cerniere sulla parte terminale della griffa per annullare eventuali sforzi tangenziali che potrebbero instaurarsi durante la fase di accostamento della stessa.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione per la tipologia di accostamento lineare, è l'entità delle pressioni superficiali che vengono ad instaurarsi con un contatto di tipo lineare. Una soluzione che presenta una superficie deformabile diminuirebbe i valori di pressione superficiale massimi, Fig. 3-7.



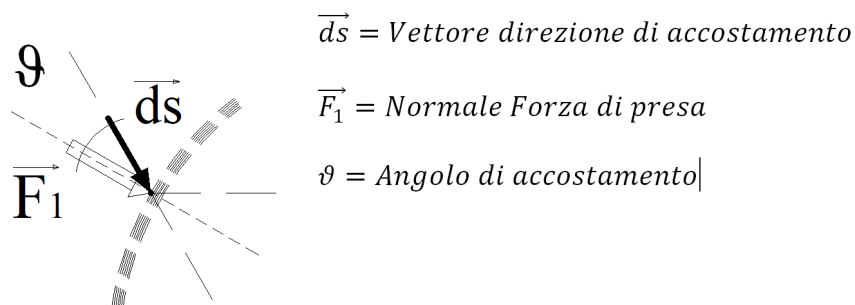
**Fig. 3-7: Parte terminale della griffa con elemento deformabile.**

Eseguita questa analisi preliminare su tipo di accostamento e sul tipo di contatto, ci si è focalizzati sulle possibili combinazioni dei movimenti delle griffe, prendendo come riferimento iniziale la tipologia di presa a tripode e come tipo di contatto quello su una linea. La Tab. 3-1 elenca le quattro soluzioni analizzate.

**Tab. 3-1: Elenco delle possibili soluzioni di movimentazione delle griffe.**

Tipologia di presa	n° griffe mobili	Movimento griffe	Codice
Tre punti	2	Rettilineo	T2R
Tre punti	2	Circolare	T2C
Tre punti	3	Rettilineo	T3R
Tre punti	3	Circolare	T3C

Un aspetto caratterizzante il movimento delle griffe e quindi la tipologia di architettura, è l'angolo di accostamento "θ", Fig. 3-8. Questo influenza il contributo della forza di presa applicata rispetto a quella scambiata tra griffa e oggetto.



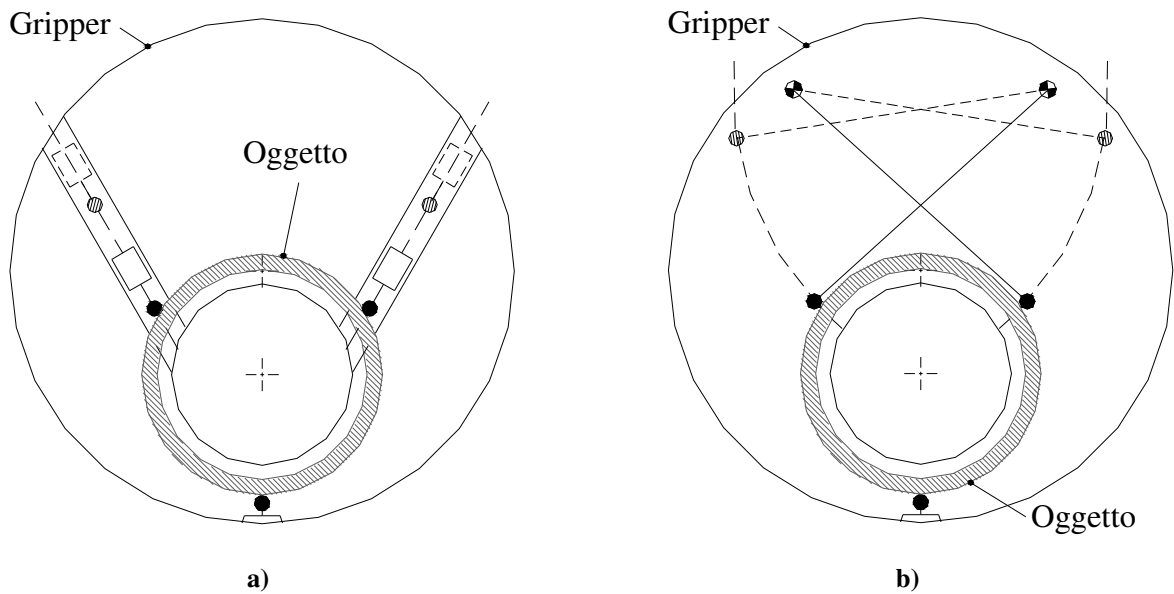
$\vec{ds}$  = Vettore direzione di accostamento

$\vec{F}_1$  = Normale Forza di presa

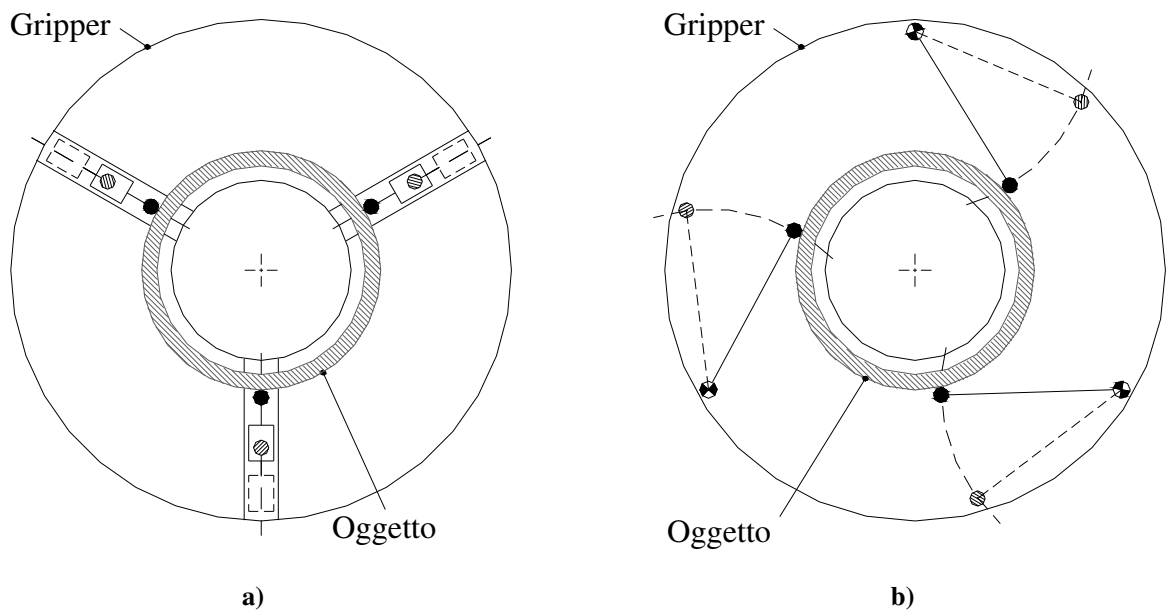
$\vartheta$  = Angolo di accostamento

**Fig. 3-8: Angolo di accostamento.**

Le possibili soluzioni sono per l'appunto visualizzate nella Fig. 3-9 e nella Fig. 3-10.



**Fig. 3-9: a) T2R Tipologia a Tre punti, con due griffe mobili, movimento rettilineo; b) T2C Tipologia a Tre punti, con due griffe mobili, movimento circolare.**

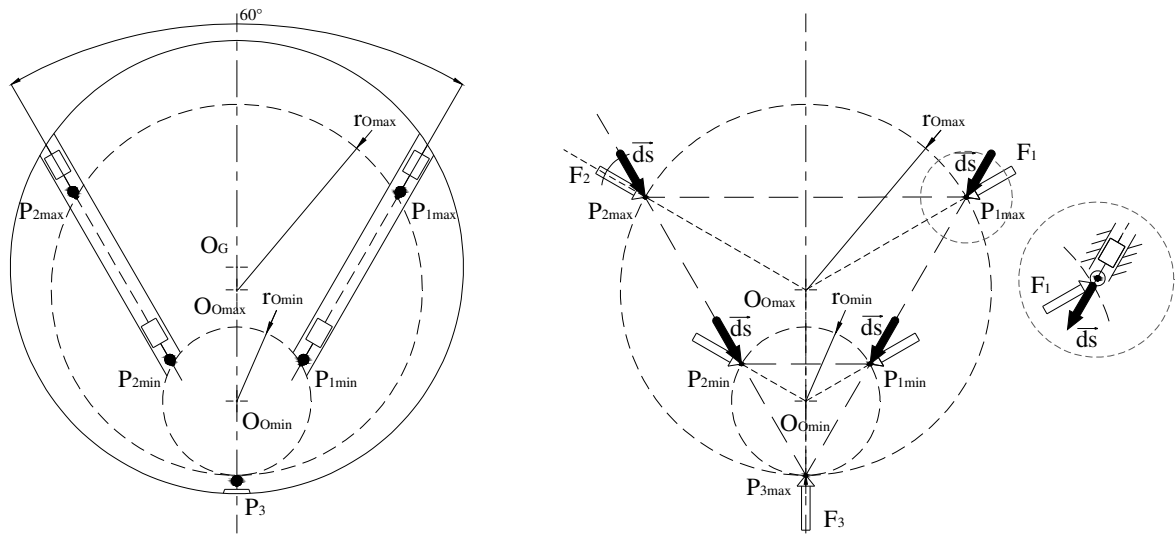


**Fig. 3-10: a) T3R- Tipologia a Tre punti, con tre griffe mobili, movimento rettilineo; b) T3C- Tipologia a Tre punti, con tre griffe mobili, movimento circolare.**

Il passaggio successivo è stato quello di analizzare e quindi confrontare tra loro le soluzioni individuate in maniera da evidenziare i pro e contro di ognuna.

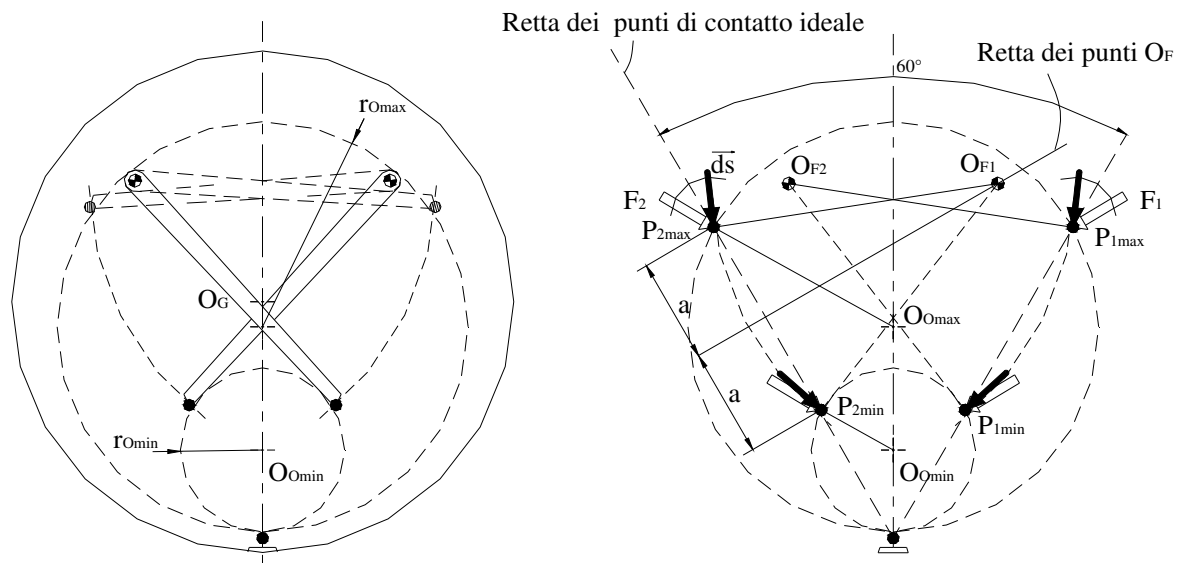
La prima tipologia di architettura analizzata è quella definita con il codice "T2R". Gli aspetti principali che la caratterizzano sono diversi. In primo luogo il numero di membri in movimento è ridotto rispetto ad una architettura a tre griffe mobili. Che l'angolo di accostamento rimane costante in tutto il range dimensionale degli oggetti afferrati. Che la posizione del centro dell'oggetto afferrato si muove lungo una retta e la posizione dipende proprio dal raggio dell'oggetto. Questo ultimo aspetto evidenzia il fatto che non si ha l'operazione di autocentratura dell'oggetto rispetto al gripper e quindi per ogni tipo di anello afferrato deve

essere determinata la distanza relativa tra il centro dell'oggetto ed il centro del gripper per determinare le coordinate di lavoro del robot, Fig. 3-11.



**Fig. 3-11: Architettura "T2R", due griffe mobili con movimento rettilineo.**

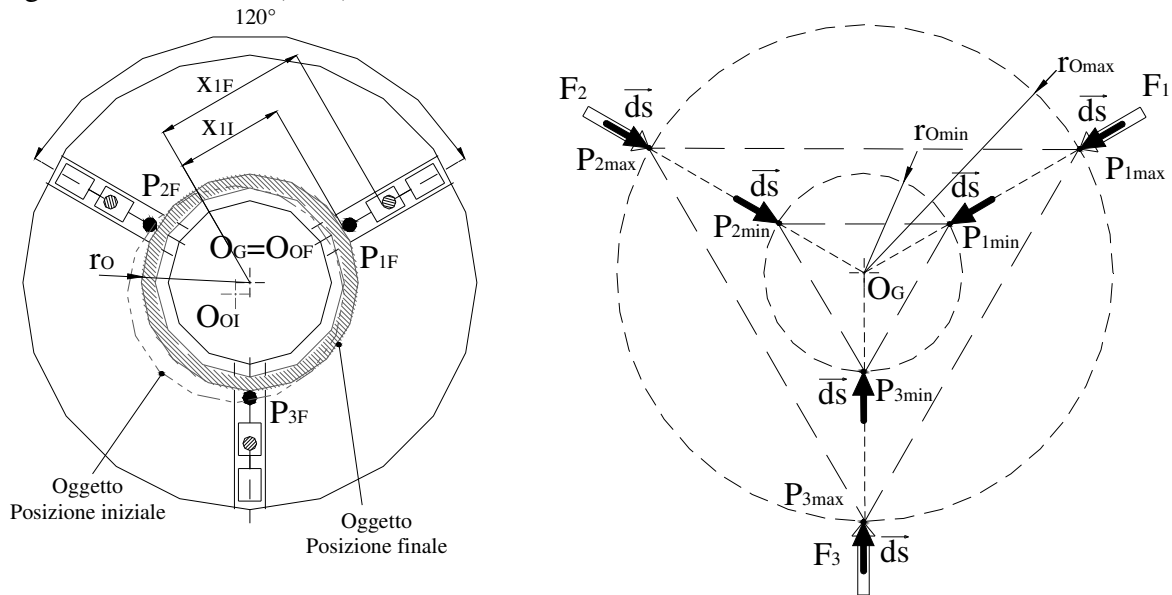
L'analisi dell'architettura identificata con il codice "T2C" è una soluzione che è molto simile alla precedente. L'unica differenza sostanziale è che l'angolo di accostamento non è più costante per tutto il range dimensionale degli oggetti afferrati ma varia in funzione della posizione delle cerniere fisse, Fig. 3-12.



**Fig. 3-12: Architettura "T2C", due griffe mobili con movimento circolare.**

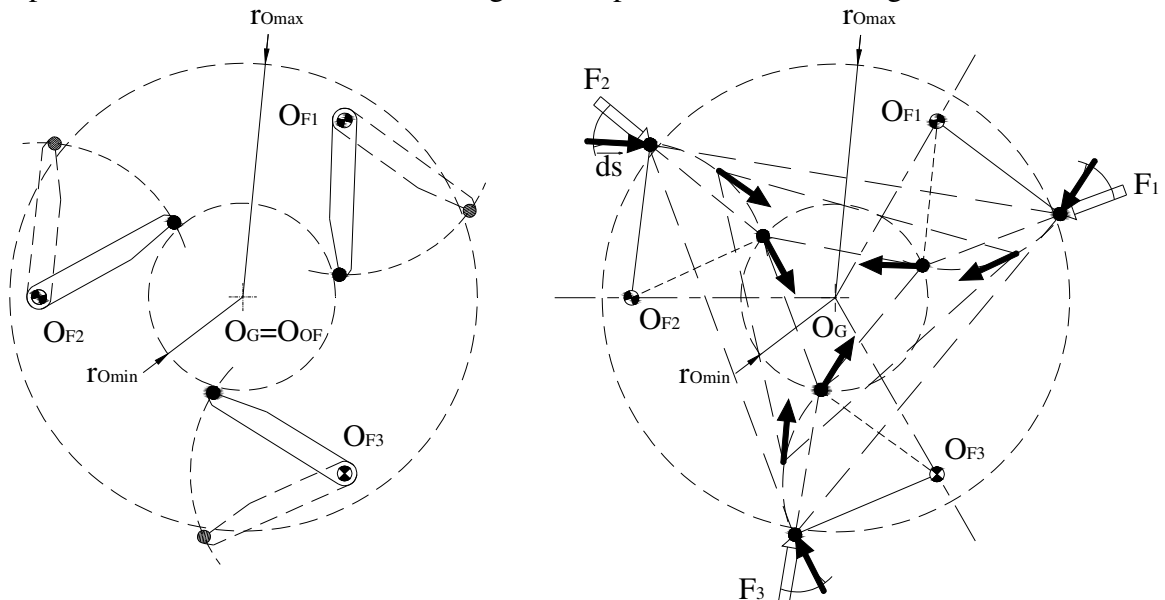
Riguardo all'analisi dell'architettura di tipo "T3R", un aspetto fondamentale è che realizza l'operazione di centratura dell'oggetto rispetto al centro l'architettura se le tre griffe sono movimentate in maniera sincronizzata ( $x_{1F} = x_{2F} = x_{3F} = r_0$ ). Un altro aspetto è quello che riguarda la direzione dell'applicazione della forza di presa rispetto alla superficie di contatto. Questa si mantiene sempre normale alla superficie, indipendentemente dalle dimensioni dell'oggetto e quindi garantisce sempre la stessa forza di presa. Tale forza passa sempre per i vertici di triangoli equilateri concentrici, Fig. 3-13.

Come per le altre tipologie di architetture presentate fino a questo punto, il range dimensionale degli oggetti afferrati è funzione della corsa delle griffe (T2R e T3R) e della lunghezza delle stesse (T2C).



**Fig. 3-13: Architettura "T3R", tre griffe mobili con movimento rettilineo.**

L'ultima tipologia di architettura analizzata è quella identificata con il codice "T3C". Questa, come la "T3R", se le tre griffe sono movimentate in maniera sincronizzata, permette di realizzare l'operazione di centratura dell'oggetto rispetto al centro dell'architettura. Per quanto riguarda l'angolo di accostamento, che varia in funzione delle dimensioni dell'oggetto, dipende dal posizionamento relativo delle cerniere di rotazione delle griffe rispetto al centro dell'architettura. Le direzioni delle tre forze di presa passano per i vertici di triangoli concentrici che però ruotano attorno ad un asse ortogonale al piano di rotazione, Fig. 3-14.



**Fig. 3-14: Architettura "T3C", tre griffe mobili con movimento circolare.**

L'analisi delle diverse tipologie di architetture e quindi il confronto delle stesse ha portato alla scelta dell'architettura reputata la migliore per la particolare applicazione oggetto dello studio. In particolare la scelta è ricaduta sulla tipologia "T3R", Fig. 3-15. I motivi principali

che hanno guidato la scelta di questa architettura sono il fatto che permette di realizzare il centraggio del pezzo e quindi permette di ottenere la coassialità del gripper con l'anello afferrato; l'utilizzo di coppie rotoidali implica costi ridotti, una maggiore vita di utilizzo e una maggiore facilità d'implementazione rispetto all'utilizzo di coppie prismatiche. Per questa tipologia di architettura sono stati individuati i parametri funzionali che ne influenzano le caratteristiche cinematiche:

- $r_F$  = rappresenta la distanza radiale delle tre cerniere fisse  $O_{Fi}$  dal centro geometrico del gripper;
- $r_P$  = rappresenta la lunghezza della griffa che ruota attorno alle cerniere fisse;
- $\vartheta_r$  = angolo di accostamento. Considerando il punto di contatto tra la griffa e l'anello, viene definito angolo di accostamento l'angolo che viene a formarsi tra la retta che passa radialmente nel punto di contatto e la perpendicolare alla griffa, sempre passante per il punto di contatto;
- $\psi$  = corsa angolare tra i due limiti dimensionali degli anelli  $r_{Omax}$  e  $r_{Omin}$ .

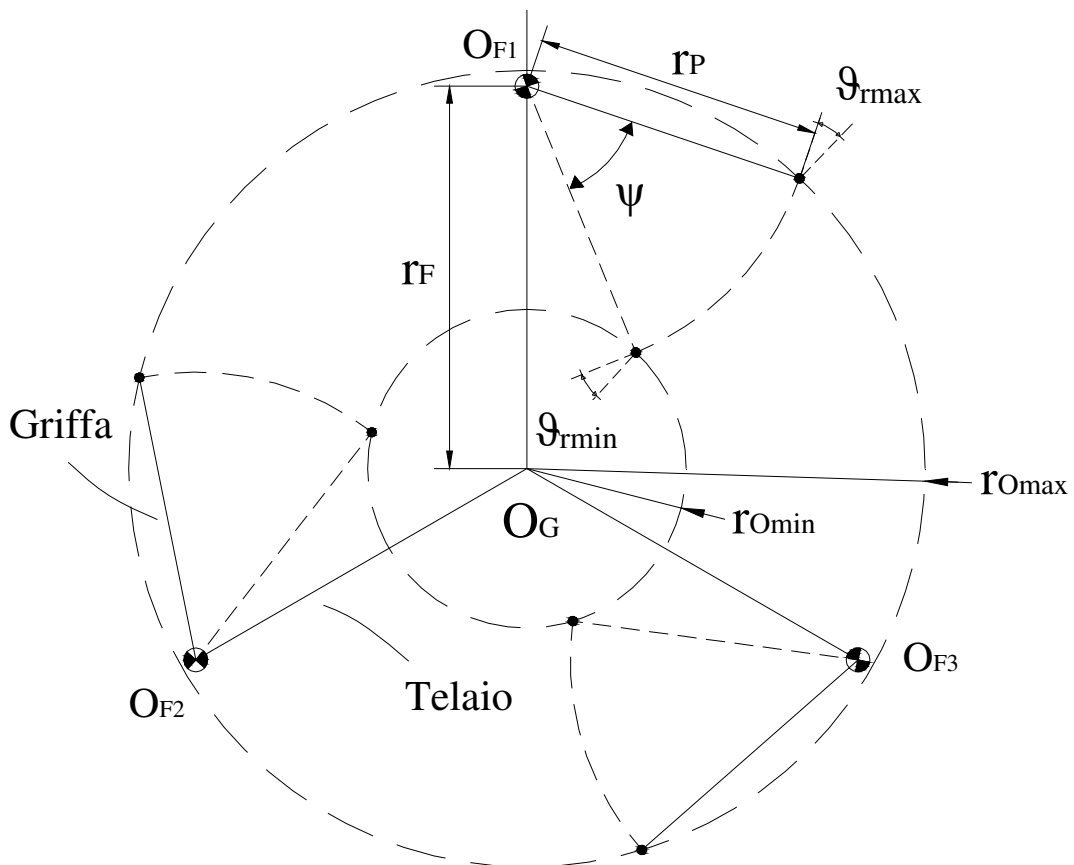


Fig. 3-15: Schema dell'architettura scelta con i relativi parametri geometrici.

L'obiettivo successivo è quello di analizzare e definire i parametri principali che caratterizzano questa tipologia di architettura.

### 3.2.3 Analisi e definizione dei parametri geometrici dell'architettura

Come riportato nel paragrafo precedente, l'architettura scelta è quella definita "T3R" e cioè quella che presenta tre griffe mobili con accostamento circolare e contatto di tipo su una linea, Fig. 3-16.

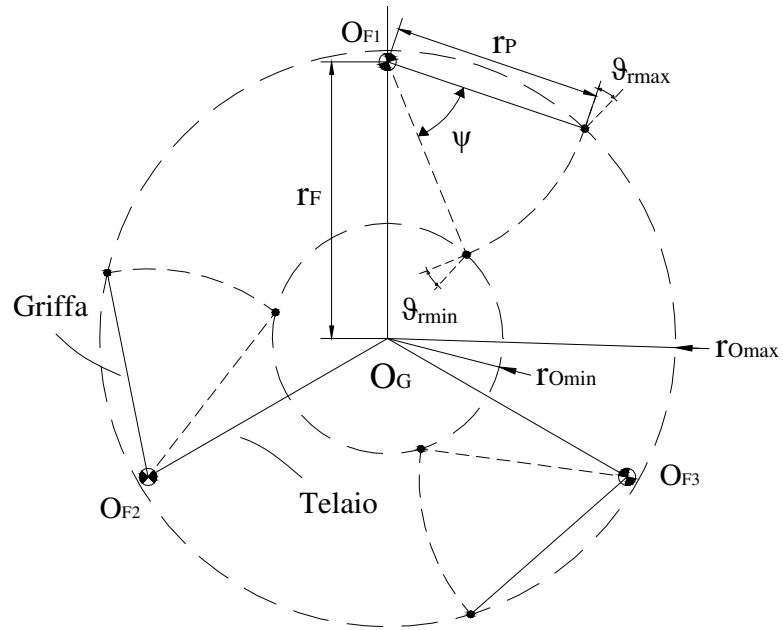


Fig. 3-16: Architettura T3R

La Fig. 3-17 riporta lo schema che rappresenta i parametri geometrici principali dell'architettura scelta.

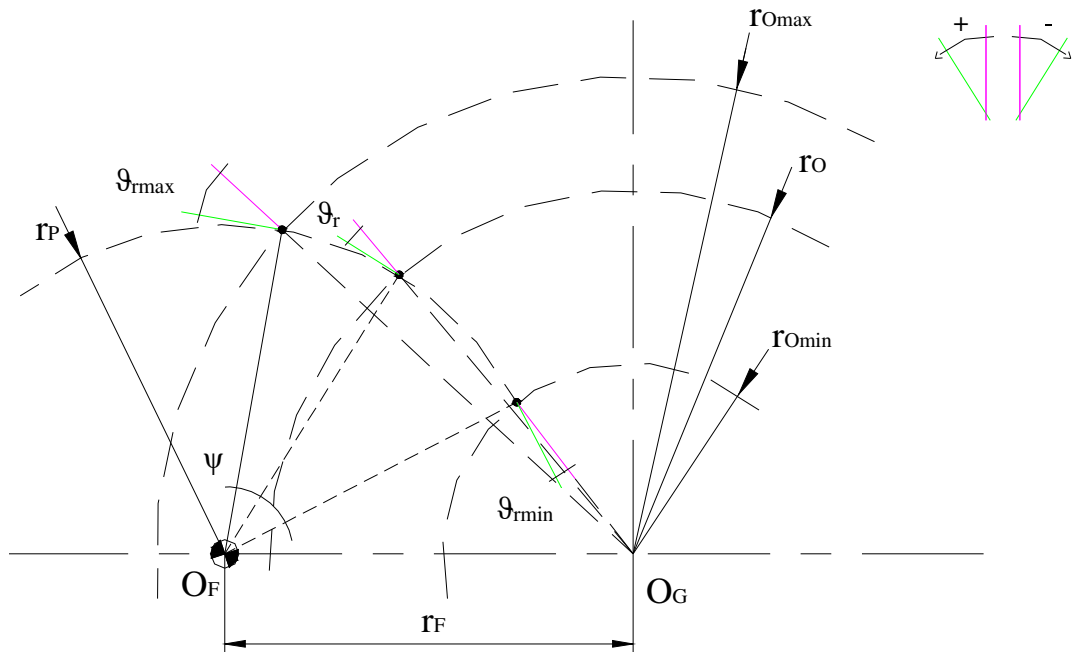
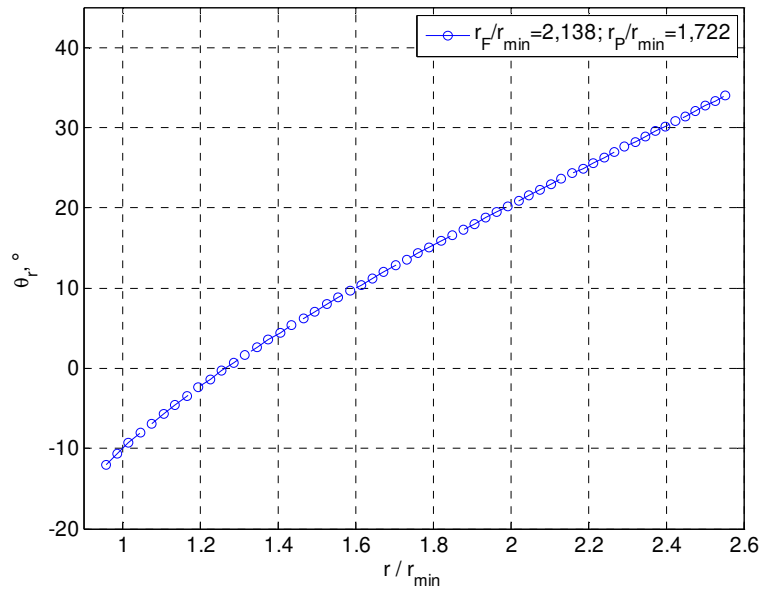


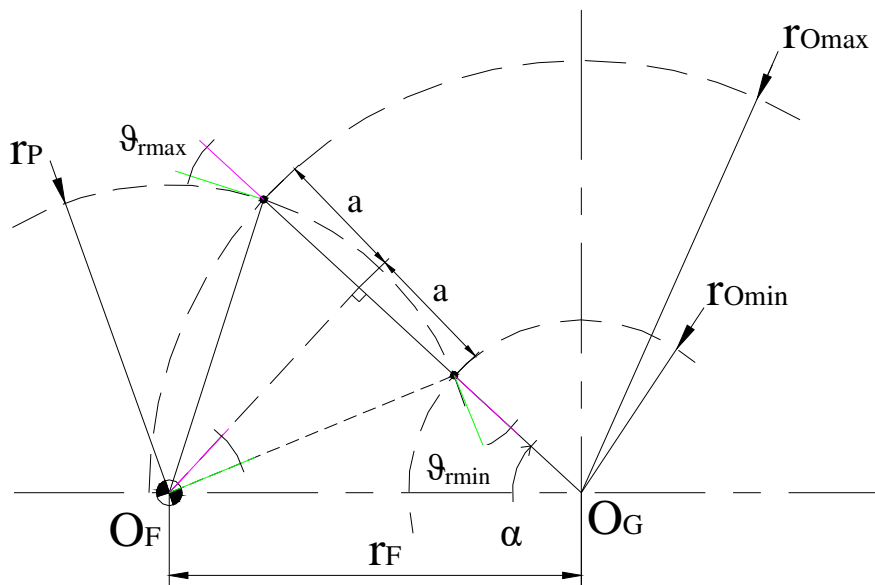
Fig. 3-17: Schema rappresentazione parametri geometrici dell'architettura.

Riguardo allo schema riportato Fig. 3-16, questo rappresenta una configurazione libera da ogni vincolo geometrico in quanto sia la lunghezza della griffa  $r_F$  che la distanza  $r_P$  sono state definite senza nessuna condizione. Questo è stato fatto per visualizzare come varia l'angolo di accostamento in funzione della dimensione degli oggetti afferrati per una configurazione generica dell'architettura. L'andamento dell'angolo di accostamento è stato visualizzato parametrizzando il raggio degli oggetti afferrati rispetto al raggio minimo  $r_{Omin}=50$  mm.



**Fig. 3-18: Andamento angolo di accostamento ( $r_F/r_{min}=2,138$ ;  $r_P/r_{min}=1,722$ ).**

Il processo di definizione dei parametri geometrici dell'architettura ha visto prima l'ideazione e l'applicazione di un metodo grafico sviluppato secondo un'ipotesi principale. Tale ipotesi è quella che permette di definire la posizione della cerniera fissa  $O_F$ , della lunghezza della griffa  $r_P$  e i limiti dell'angolo di accostamento, Fig. 3-19. Questa particolare costruzione geometrica permette di avere un andamento dell'angolo di accostamento simmetrico, che varia tra due valori uguali tra loro ma diversi in segno e che si annulla per un anello che ha un diametro che si trova nel range dimensionale considerato.

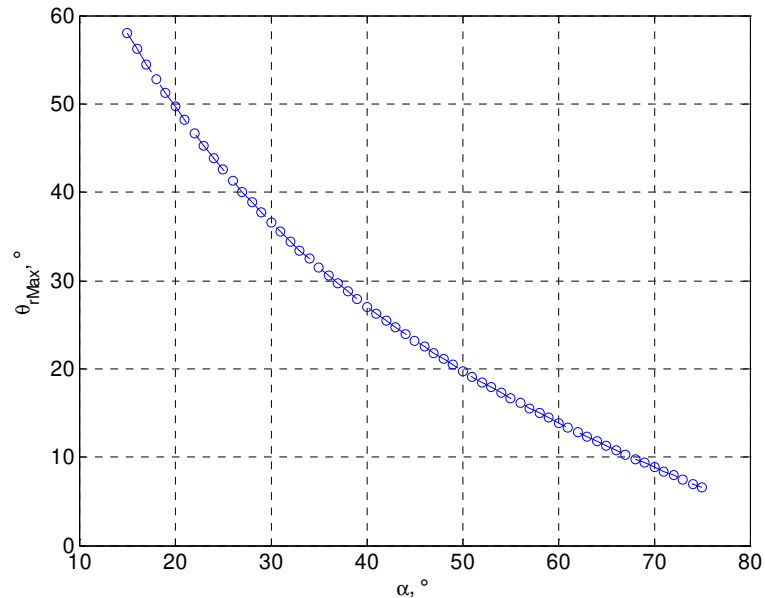


**Fig. 3-19: Metodo grafico per la definizione di  $r_F$  e  $r_P$ .**

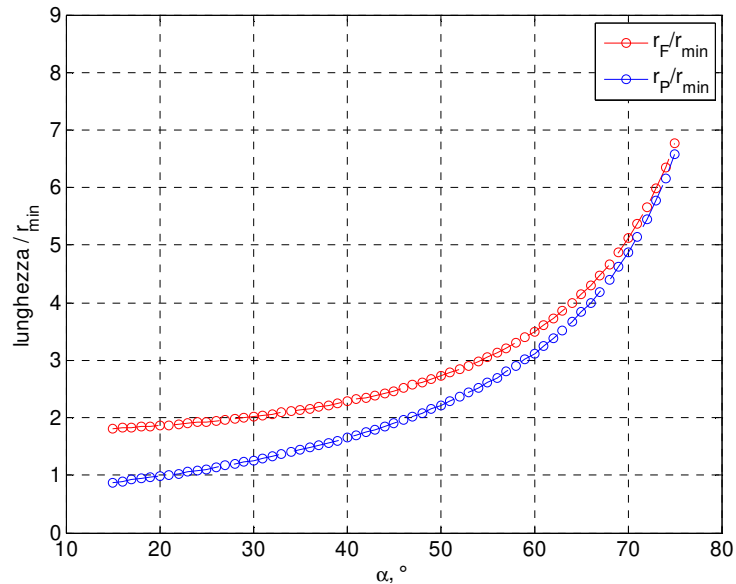
Come primo passo si tracciano le due circonferenze limite di raggio  $r_{Omax}$  e  $r_{Omin}$ . In funzione dell'angolo " $\alpha$ " si determina il segmento radiale che unisce le due circonferenze limite. Dal punto medio di questo segmento viene tracciata la perpendicolare che interseca l'asse orizzontale. Il punto di intersezione identifica la posizione della cerniera fissa  $O_F$  e di

conseguenza la griffa di lunghezza  $r_P$ . Questa ultima è rappresentata dal segmento che unisce il punto trovato  $O_F$  con uno dei punti del segmento che interseca le circonferenze limite.

La Fig. 3-20 e la Fig. 3-21 mostrano gli andamenti dei parametri geometrici principali in funzione dell'angolo " $\alpha$ ". È possibile osservare che all'aumentare di tale angolo, l'angolo di accostamento tende ad annullarsi mentre la lunghezza della griffa e la posizione della cerniera tendono all'infinito. In questo modo, il movimento circolare del punto estremo della griffa tende a diventare rettilineo, approssimando la traiettoria generata da una guida prismatica.



**Fig. 3-20: Andamento dell'angolo di accostamento in funzione di  $\alpha$ .**



**Fig. 3-21: Andamento di  $r_F$  e  $r_P$  in funzione di  $\alpha$ .**

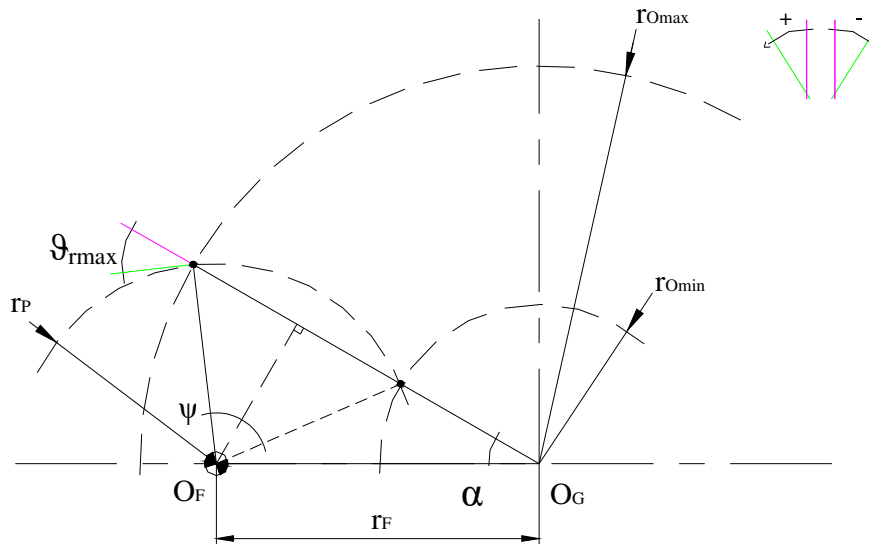
Di seguito vengono riportate tre diverse configurazioni e i relativi andamenti dell'angolo di accostamento per i seguenti valori di  $\alpha$ :

- Configurazione A  $\rightarrow \alpha = 30^\circ$
- Configurazione B  $\rightarrow \alpha = 45^\circ$
- Configurazione C  $\rightarrow \alpha = 70^\circ$

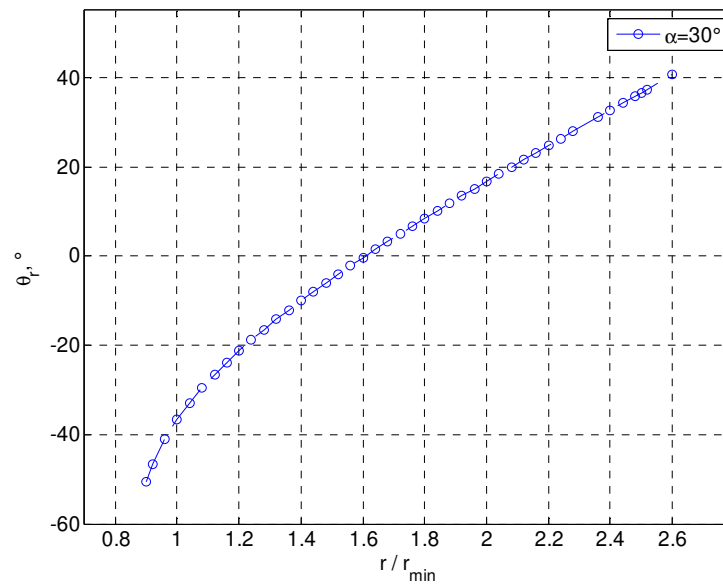


Configurazione A  $\rightarrow \alpha = 30^\circ$

- Distanza posizione cerniera  $\rightarrow r_F = 101,04 \text{ mm}$
- Lunghezza griffa  $\rightarrow r_P = 62,92 \text{ mm}$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\max} \rightarrow \vartheta_{r_{\max}} = 36^\circ,59$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\min} \rightarrow \vartheta_{r_{\min}} = -36^\circ,59$
- Corsa angolare griffe  $\rightarrow \psi = 73^\circ,18$



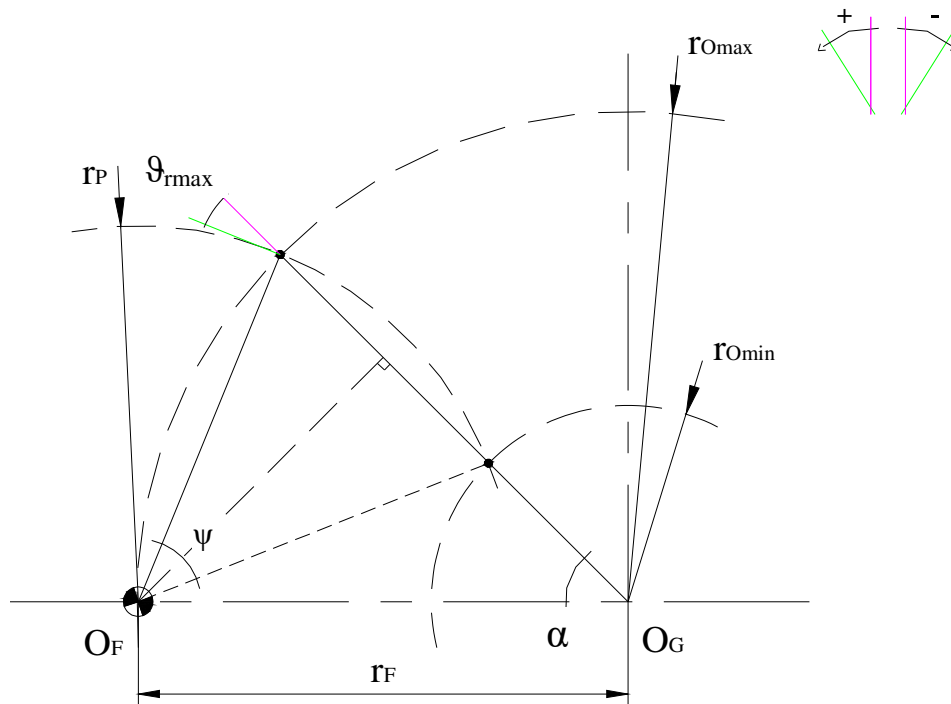
**Fig. 3-22: Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=30^\circ$ .**



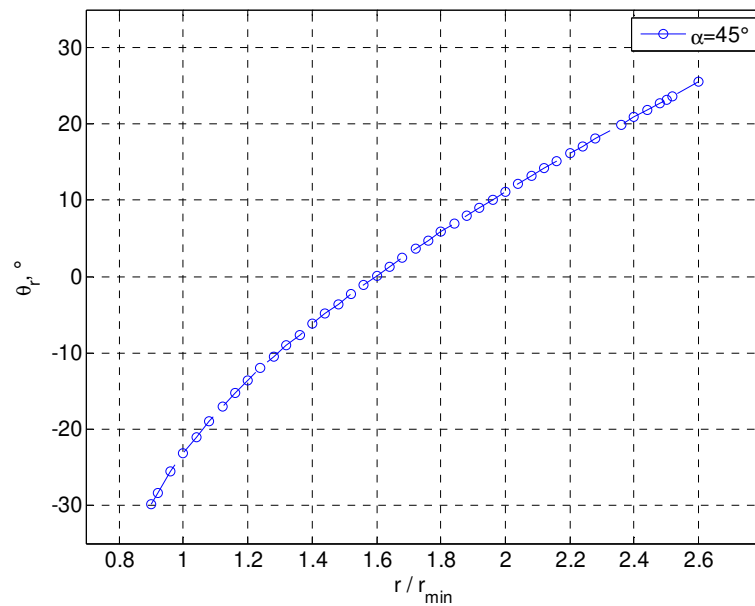
**Fig. 3-23: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=30^\circ$ .**

Configurazione B  $\rightarrow \alpha = 45^\circ$

- Distanza posizione cerniera  $\rightarrow r_F = 123,74 \text{ mm}$
- Lunghezza griffa  $\rightarrow r_P = 95,20 \text{ mm}$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\max} \rightarrow \vartheta_{r_{\max}} = 23^\circ,20$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\min} \rightarrow \vartheta_{r_{\min}} = -23^\circ,20$
- Corsa angolare griffe  $\rightarrow \psi = 46^\circ,40$



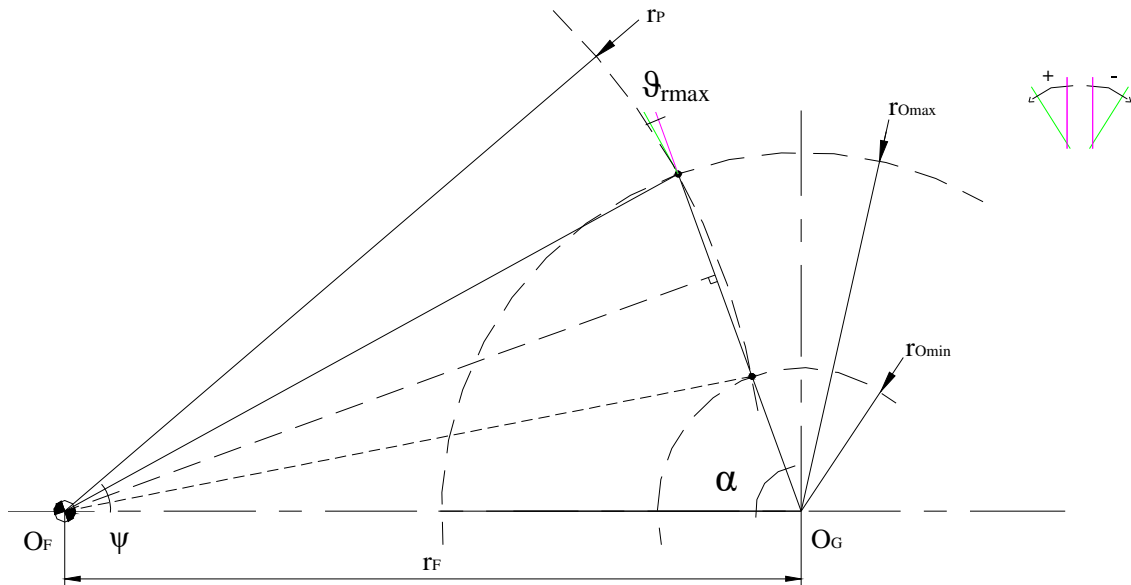
**Fig. 3-24: Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=45^\circ$ .**



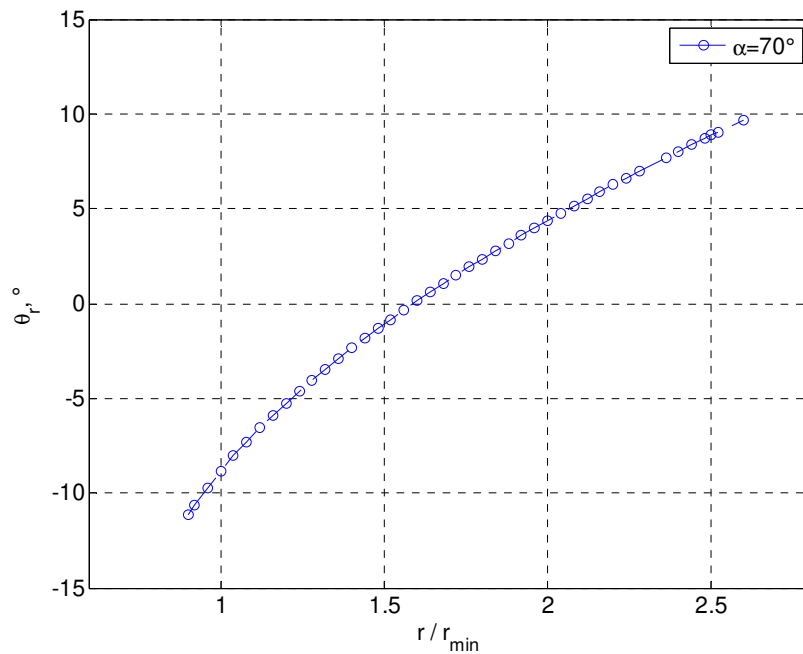
**Fig. 3-25: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=45^\circ$ .**

Configurazione C  $\rightarrow \alpha = 70^\circ$

- Distanza posizione cerniera  $\rightarrow r_F = 255,83 \text{ mm}$
- Lunghezza griffa  $\rightarrow r_P = 243,33 \text{ mm}$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\max} \rightarrow \vartheta_{r_{\max}} = 8^\circ,84$
- Angolo di accostamento oggetto  $r_{\min} \rightarrow \vartheta_{r_{\min}} = -8^\circ,84$
- Corsa angolare griffe  $\rightarrow \psi = 17^\circ,68$

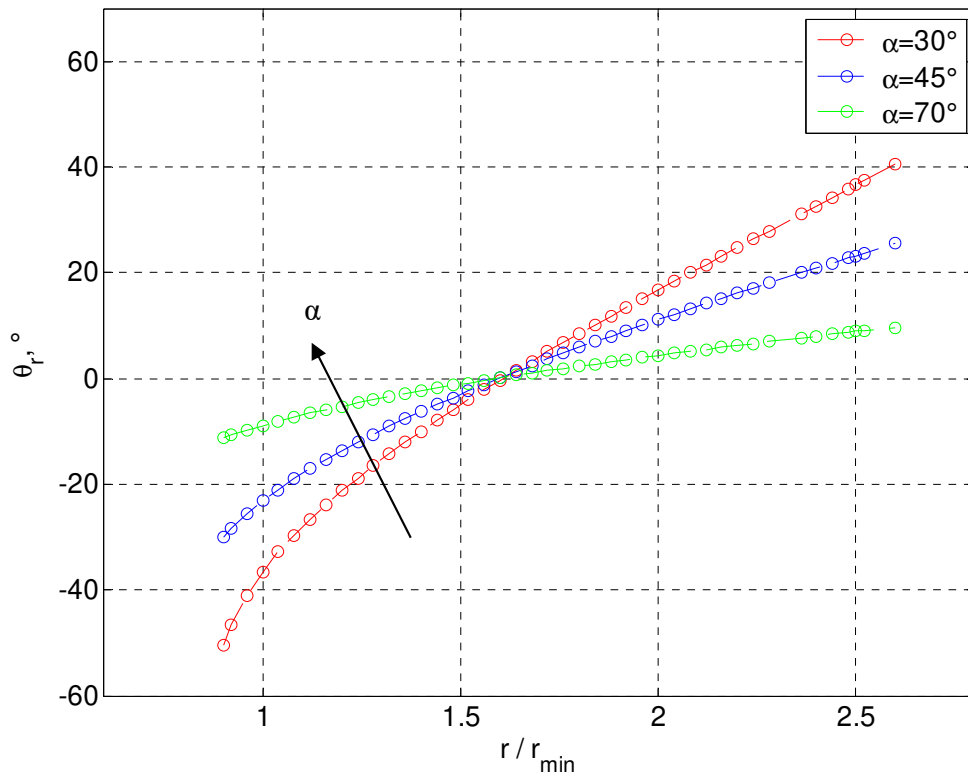


**Fig. 3-26: Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=70^\circ$ .**



**Fig. 3-27: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A  $\rightarrow \alpha=70^\circ$ .**

La Fig. 3-28 mostra con varia l'andamento dell'angolo di accostamento in funzione dell'angolo "α". Come ci si poteva aspettare, all'aumentare di quest'ultimo, il range in cui varia l'angolo di accostamento si riduce e assume valori vicini allo zero.

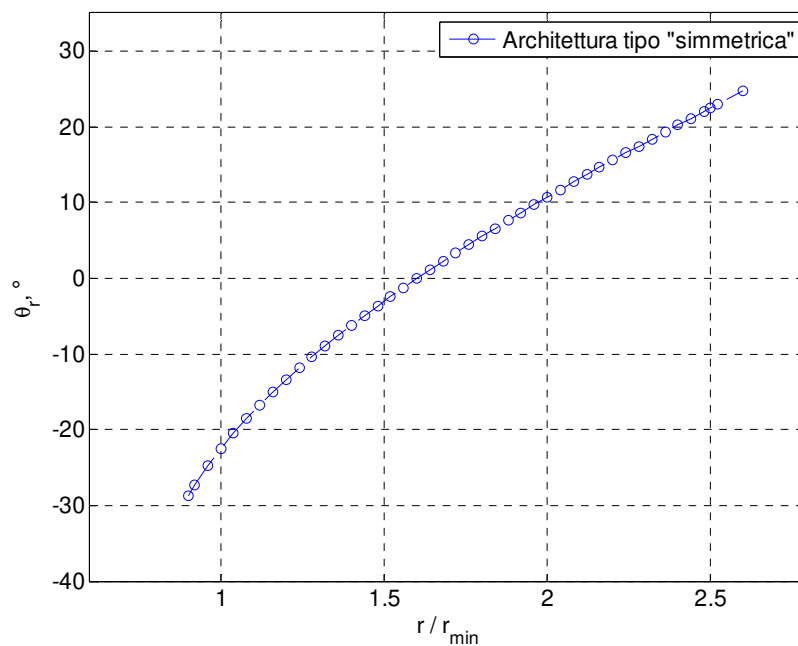
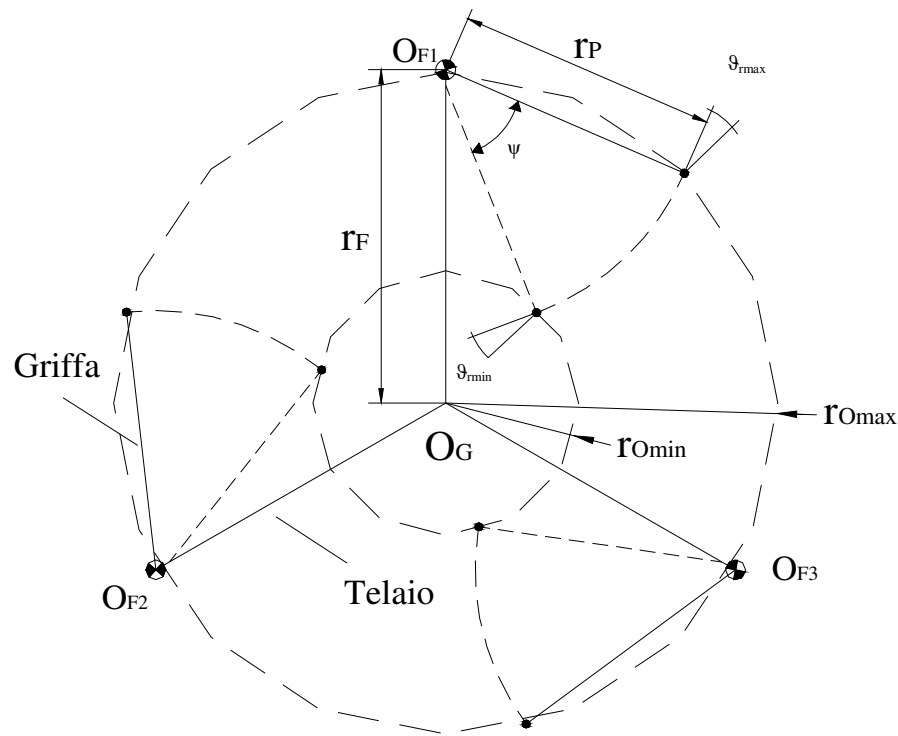


**Fig. 3-28: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A, B, C.**

In riferimento alle analisi svolte e ai requisiti di progetto si è scelta una configurazione dell'architettura, definita di tipo "simmetrica", che ha i seguenti parametri geometrici, Tab. 3-2.

**Tab. 3-2: Elenco parametri geometrici architettura tipo "simmetrica".**

Parametro	
Distanza posizione cerniera, $r_F$ , mm	126,00
Lunghezza griffa, $r_P$ , mm	98,00
Angolo di accostamento $r_{max}$ , $\vartheta_{rmax}$ , °	22°,50
Angolo di accostamento $r_{min}$ , $\vartheta_{rmin}$ , °	-22°,50
Corsa angolare, $\psi$ , °	44°,95



**Fig. 3-29: Architettura tipo “simmetrica”: schema e andamento dell’angolo di accostamento.**

I motivi principali che hanno portato alla scelta di questa configurazione dell’architettura sono:

- La scelta delle posizioni delle cerniere  $O_F$  e della lunghezza delle griffe  $r_p$  sono state fatte in funzione della minimizzazione dell’angolo di accostamento mantenendo la posizione delle cerniere fisse nell’intorno della dimensione dell’anello più grande.
- Al crescere di  $r_F$  gli angoli di accostamento  $\theta$  si riducono, ma questo implica un aumento dell’ingombro del gripper.

### Definizione dell'architettura finale: Architettura di tipo "compatta"

Un ulteriore aspetto che è stato considerato e che ha visto una relativa analisi è quella che ha riguardato la definizione di una "soluzione compatta" dell'architettura.

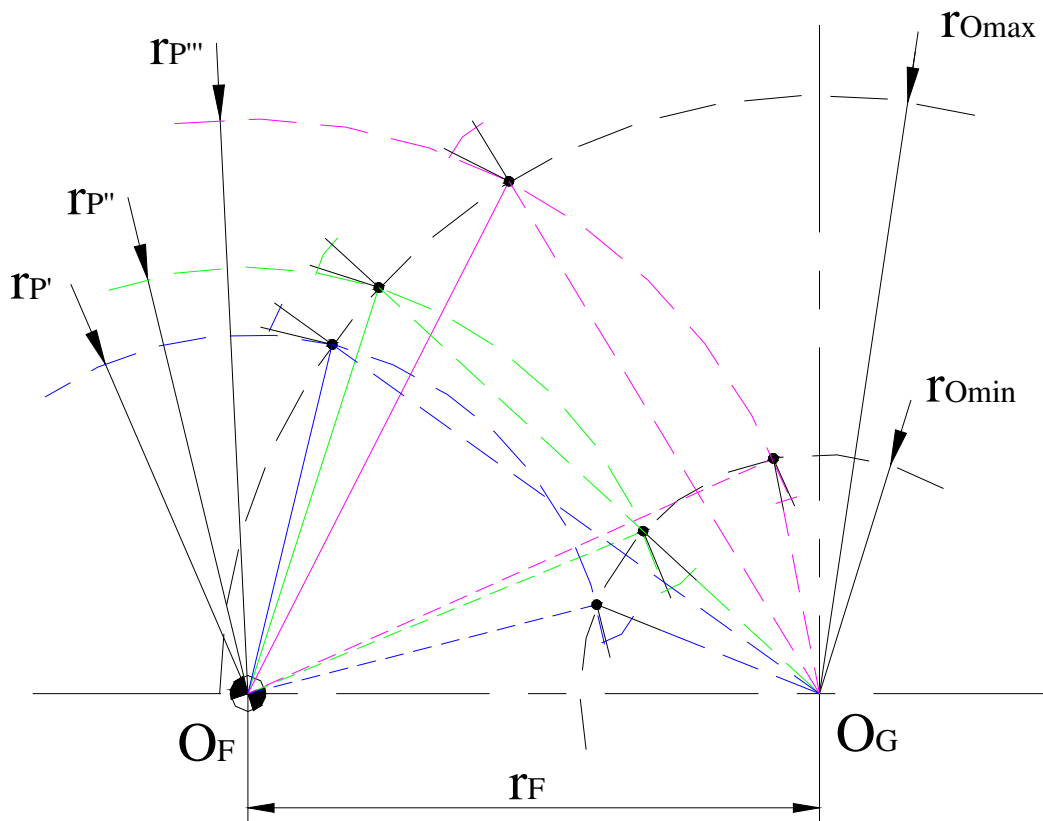
Il motivo di questa scelta è legato al requisito di avere una soluzione che presenta il minore ingombro in pianta in maniera da ottimizzare lo spazio necessario per il gripper in funzione delle dimensioni dell'oggetto più grande da manipolare.

Questa rende necessaria la modifica della distanza radiale delle cerniere di rotazione delle griffe dal centro del gripper stesso e la modifica della lunghezza della griffe. Per verificare cosa implica questa modifica è stata svolta un'analisi parametrica dei parametri  $r_F$  e  $r_P$ .

In particolare la prima parte dell'analisi riguarda come varia l'angolo di accostamento mantenendo fissa la distanza  $r_F$  e variando la lunghezza della griffa  $r_P$ , Fig. 3-31.

La seconda parte dell'analisi invece riguarda sempre come varia l'angolo di accostamento mantenendo fissa la lunghezza della griffa  $r_P$  e variando la lunghezza  $r_F$ , Fig. 3-33.

L'analisi parametrica ha visto come parametro di riferimento il raggio minimo dell'anello che deve essere manipolato,  $r_{Omin} = 50$  mm.



**Fig. 3-30: Schema configurazioni architettura con lunghezza della griffa variabile e con posizione fissa della cerniera di rotazione.**

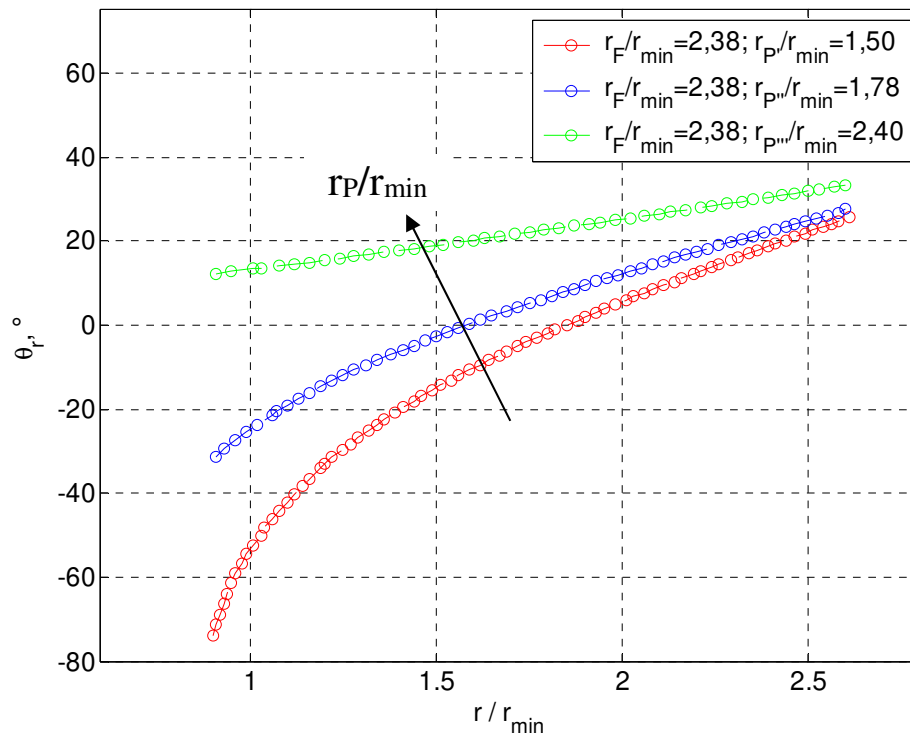


Fig. 3-31: Andamento angolo di accostamento per configurazioni architettura con lunghezza della griffa variabile e con posizione fissa della cerniera di rotazione.

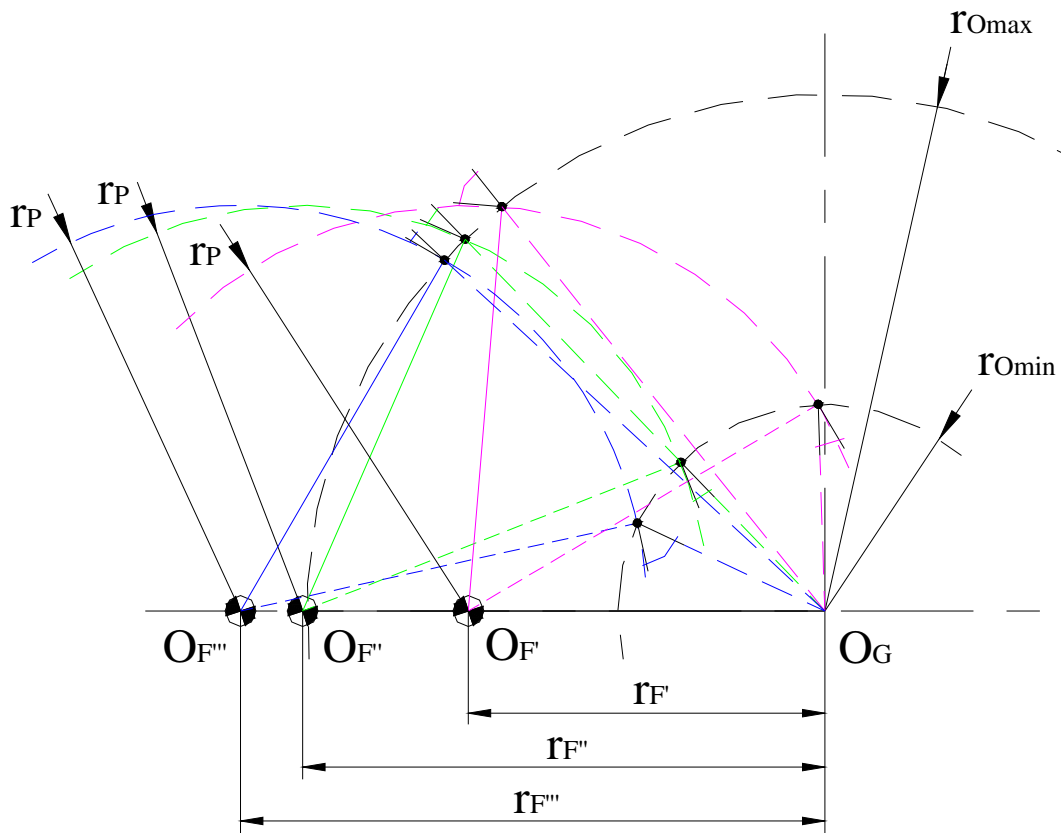
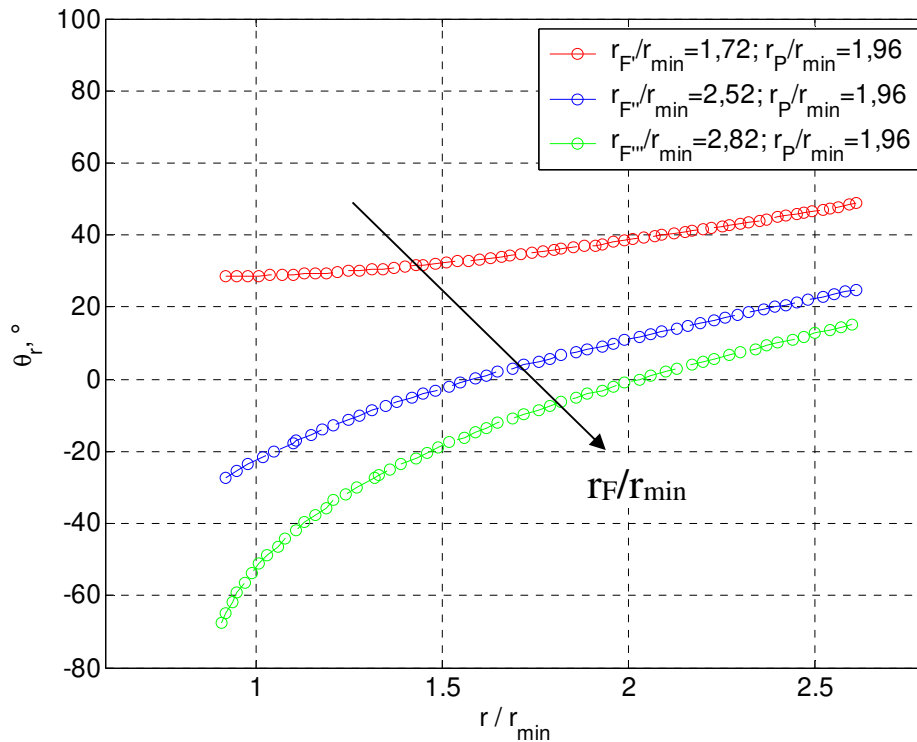


Fig. 3-32: Schema configurazioni architettura con lunghezza della griffa fissa e con posizione variabile della cerniera di rotazione.



**Fig. 3-33: Andamento angolo di accostamento per configurazioni architettura con lunghezza della griffa fissa e con posizione variabile della cerniera di rotazione.**

Il tipo di architettura definita “compatta” necessita la riduzione della distanza  $r_F$ . I dati presentati permettono di osservare che per valori decrescenti di  $r_F$  si verifica una riduzione del range che interessa l’angolo di accostamento ma con valori che non si annullano e sono sempre più elevati.

Prendendo invece in considerazione la lunghezza della griffa  $r_P$  si evince che all’aumentare di  $r_P$  si verifica una riduzione del range che interessa l’angolo di accostamento ma con valori che non si annullano mai.

A seguito delle considerazioni riportate sopra e dal metodo grafico descritto in Fig. 3-19, che permette di definire i principali parametri di costruzione, si definisce il seguente procedimento per la definizione dei nuovi parametri dell’architettura che interessa un’architettura “compatta” rispetto a quella presentata in Fig. 3-29.

Il nuovo procedimento prevede di applicare il metodo grafico per un range dimensionale degli oggetti da manipolare che varia tra  $\varnothing$  100 mm e  $\varnothing$  160 mm. Questo permette di determinare le nuove dimensioni di  $r_P$  e  $r_F$ . Per gli anelli di dimensioni maggiori di  $\varnothing$  160 mm e minori di  $\varnothing$  250 mm, l’angolo di accostamento di conseguenza varia in funzione delle dimensioni di  $r_P$  e  $r_F$  determinate secondo il metodo grafico, Fig. 3-34.

Il range dimensionale  $\varnothing$  100 mm ÷  $\varnothing$  160 mm è stato scelto perché rappresenta la famiglia degli anelli prodotti maggiormente dalla cella robotizzata.





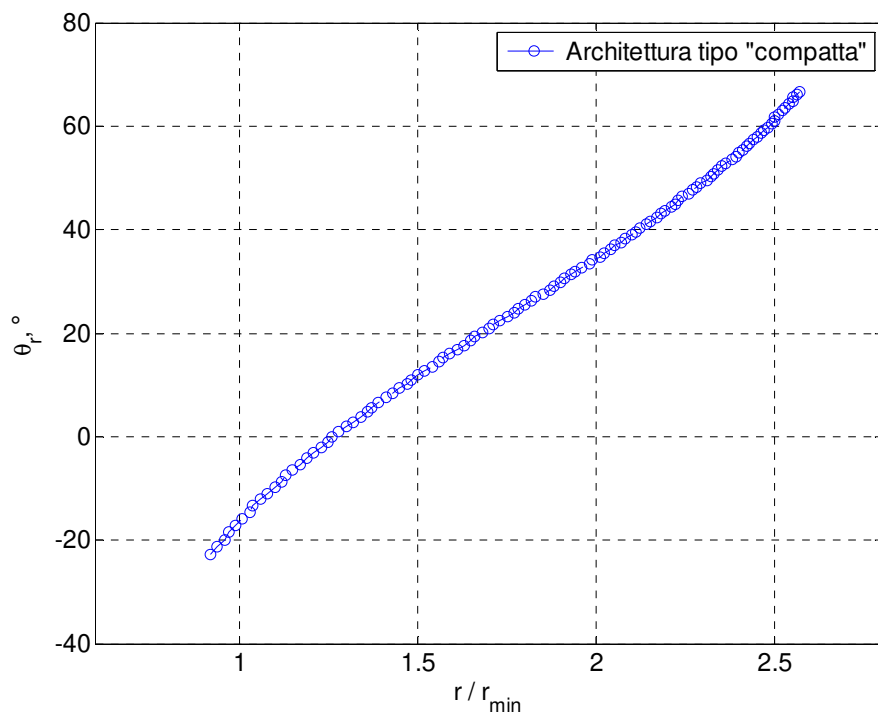
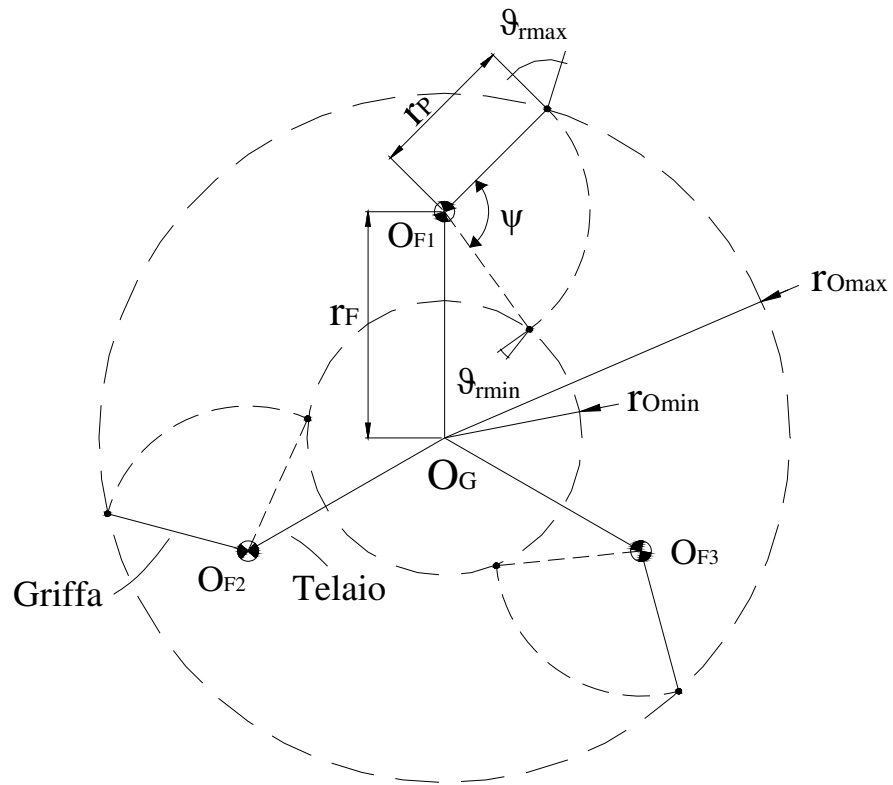


Fig. 3-35: Andamento angolo di accostamento per l'architettura di tipo "compatta".

### 3.3 Processo di definizione del sistema di trasmissione e di attuazione

Questa parte della tesi riguarda il processo che ha portato alla definizione del sistema di trasmissione per poi definire, di conseguenza, il sistema di attuazione ed infine i sensori e le tecniche di controllo per eseguire la presa ed il rilascio degli oggetti da manipolare, durante tutte le fasi del ciclo di produzione della cella robotizzata.

La prima parte ha interessato l'analisi delle forze coinvolte durante l'esecuzione della fase di centraggio e durante la fase di presa vera e propria della lamiera o dell'anello stampato.

La parte successiva ha poi visto la scelta del sistema di trasmissione reputato il più idoneo per l'applicazione dopo aver comparato diverse possibili soluzioni. Questo ha poi permesso di definire, dopo aver determinato alcuni vincoli di funzionamento, i componenti del sistema e del relativo gruppo di attuazione.

Infine sono state fatte delle considerazioni sul ciclo e sulle tecniche di controllo da adottare per la definizione dei sensori necessari per il controllo del gripper.

#### 3.3.1 Analisi delle forze coinvolte durante la fase di centraggio e di presa

Il primo passo che ha permesso di definire il sistema di trasmissione è stato quello che ha riguardato l'analisi delle forze in gioco scambiate tra gripper e oggetto durante le fasi del ciclo di presa. In particolare, dopo un'analisi preliminare che ha portato a determinare una relazione tra il peso degli oggetti e il diametro esterno degli stessi, si è pensato di dividere ed analizzare due fasi distinte che interessano il ciclo di presa. Queste sono la fase di centraggio e la successiva fase di presa. Questa distinzione è stata fatta perché le forze scambiate tra oggetto e gripper dipendono da condizioni esterne diverse.

Per quanto riguarda la relazione che è stata determinata tra peso degli oggetti da manipolare e la rispettiva dimensione principale e cioè il diametro esterno, i dati di partenza sono quelli riportati in Tab. 1-1. Infatti questi ultimi hanno permesso di determinare la relazione cercata sia per l'oggetto "lamiera" che per l'oggetto "anello", Fig. 3-36. Partendo dalla definizione di una funzione che interpolasse i dati, si è passati alla determinazione della relazione cercata considerando, sia requisiti di progetto che quelli derivanti da considerazioni in grado di garantire un margine di sicurezza.

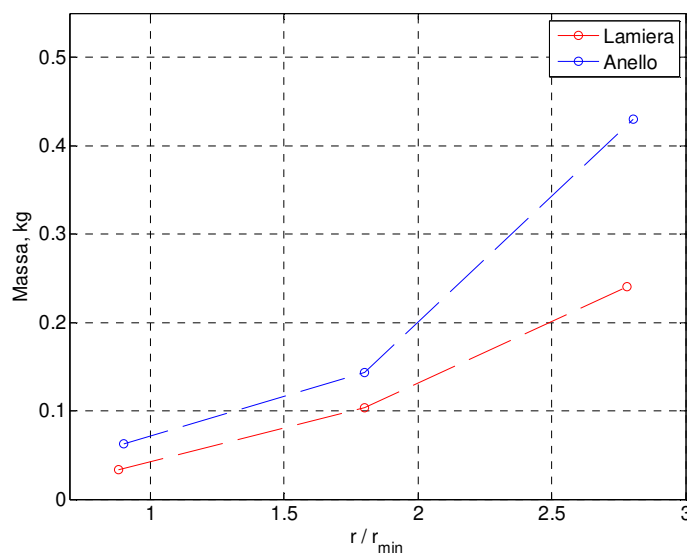
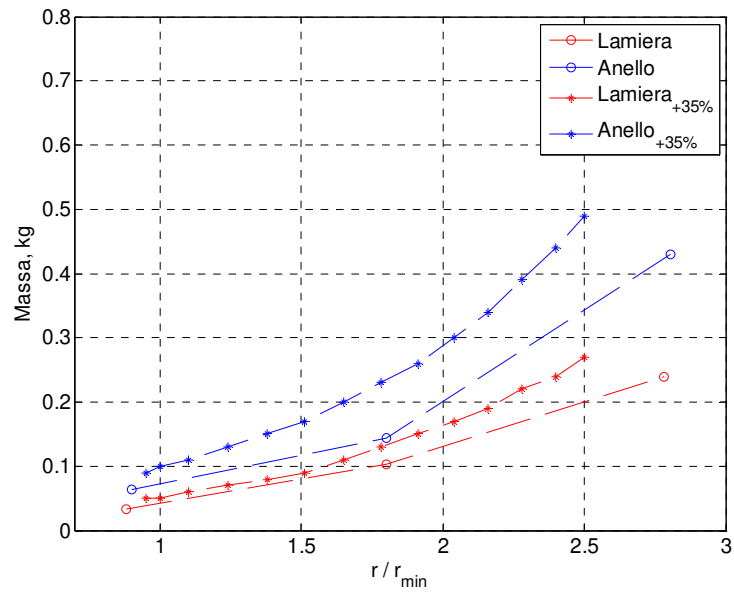


Fig. 3-36: Andamento della massa in funzione del diametro esterno per la lamiera e l'anello, Tab. 1-1.

I dati presenti in Fig. 3-37 sono stati ricavati considerando una maggiorazione media del 35% rispetto a quelli calcolati considerando la funzione interpolante i dati originali, Fig. 3-37.



**Fig. 3-37: Relazione massa-diametro esterno dell'oggetto.**

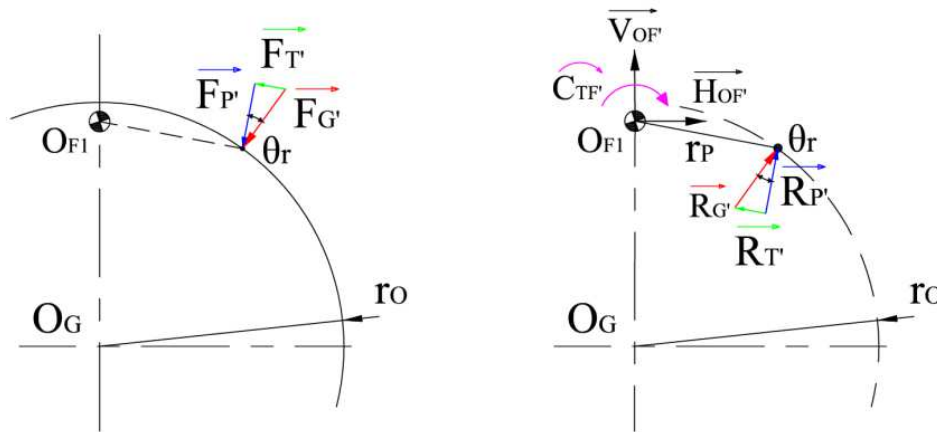
Trovata questa relazione, i successivi calcoli e cioè quelli riguardanti l'analisi della fase di centraggio e la fase di presa, sono stati fatti considerando la relazione che riguarda l'oggetto "anello". Questo perché è quella che vede in gioco una massa maggiore per tutto il range dimensionale considerato.

### Analisi Fase di centraggio

L'obiettivo di questa analisi è la determinazione della coppia minima da applicare alle griffe per garantire la coassialità tra il gripper stesso e l'oggetto da afferrare prima della fase di applicazione della forza. Come oggetto di riferimento si considererà l'anello.

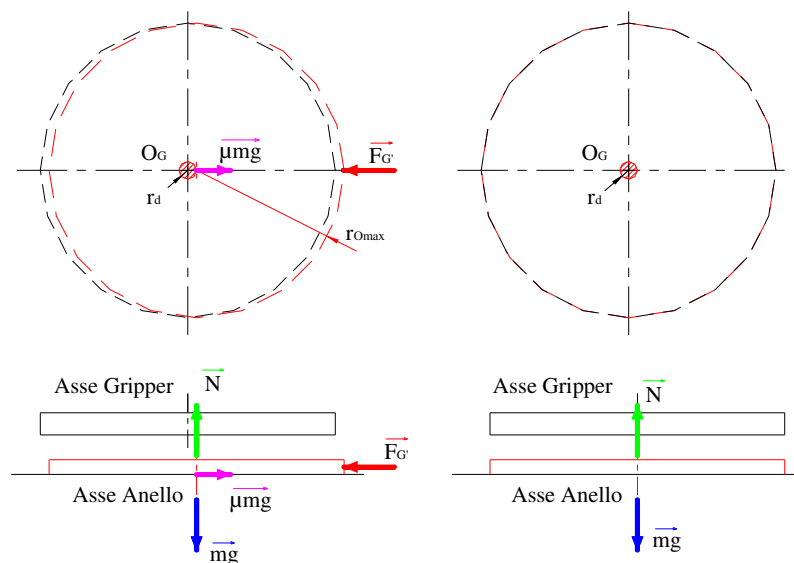
La definizione delle forze e delle coppie in gioco considerate durante la fase di centraggio:

- $C_{TF}$  : Coppia di centraggio;
- $F_G$  : Forza di centraggio;
- $F_P$  : Forza normale alla griffa durante il centraggio;
- $F_T$  : Forza tangenziale alla griffa durante il centraggio;
- $\theta_r$  : Angolo di accostamento.



**Fig. 3-38: Schema delle forze in gioco considerate durante la fase di centraggio.**

La Fig. 3-39 mostra lo schema delle azioni e delle reazioni scambiate durante la fase di centraggio tra oggetto e griffa. Si ipotizza che la forza di centraggio sia applicata all'oggetto da una griffa soltanto. Si ipotizza una traslazione dell'oggetto in direzione parallela ad  $F_G$ , considerando nulle le forze di attrito tangenziali tra griffa e anello.



**Fig. 3-39: Schema delle azioni e delle reazioni agenti durante la fase di centraggio.**

L'Eq. 3-1 permette di ricavare la forza di centraggio che deve esercitare una griffa sull'oggetto, .

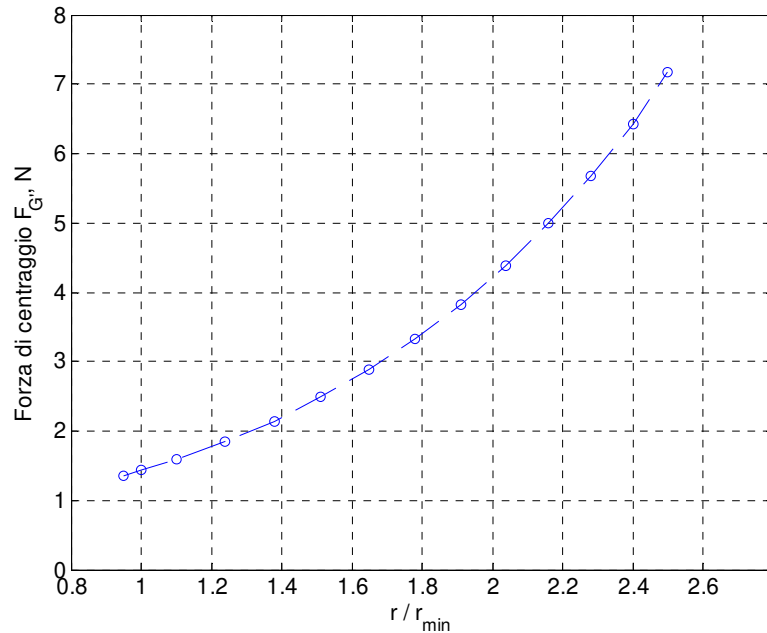
$$F_{G'} = k \cdot \mu \cdot m \cdot g \quad (\text{Eq. 3-1})$$

- k = coefficiente di sicurezza
- $\mu$  = coefficiente di attrito statico
- m = massa, kg
- g = accelerazione di gravità, m/s<sup>2</sup>

Se si considerano i seguenti valori:

- Coefficiente di sicurezza = k = 3
- Coefficiente di attrito gomma / metallo =  $\mu_{gm} = 0,5$
- Massa = m = 0,05 ÷ 0,5 kg
- Accelerazione di gravità = g = 9,8 m/s<sup>2</sup>

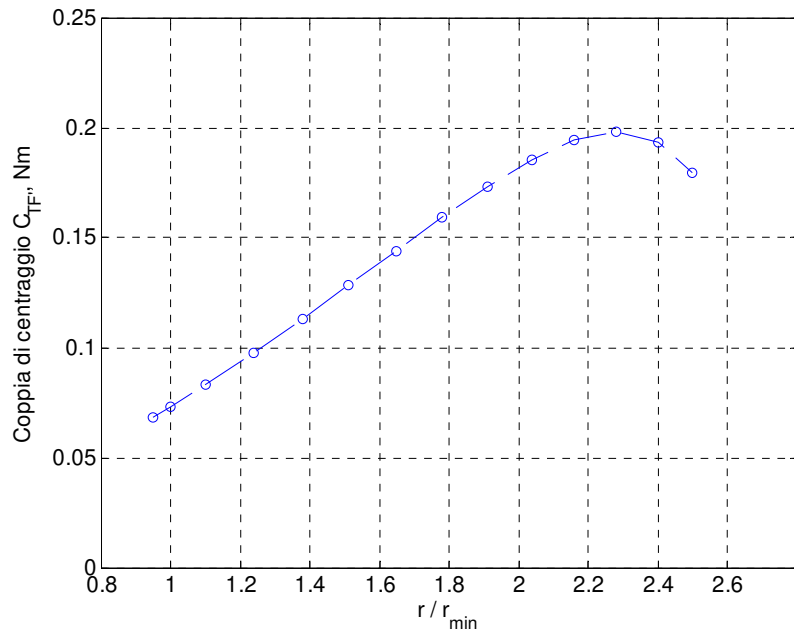
Si considera il coefficiente di attrito tra gomma e metallo per considerare il caso sfavorevole.



**Fig. 3-40: Andamento forza di centraggio F<sub>G'</sub>.**

Ricavata la forza di centraggio e conoscendo l'angolo di accostamento in funzione del raggio dell'oggetto da centrare, è possibile ricavare l'andamento della coppia di centraggio, Fig. 3-41, secondo l'Eq. 3-2:

$$C_{TF'} = F_{G'} \cdot \cos \theta_r \cdot r_p \quad (\text{Eq. 3-2})$$



**Fig. 3-41: Andamento Coppia di centraggio  $C_{TF}$ .**

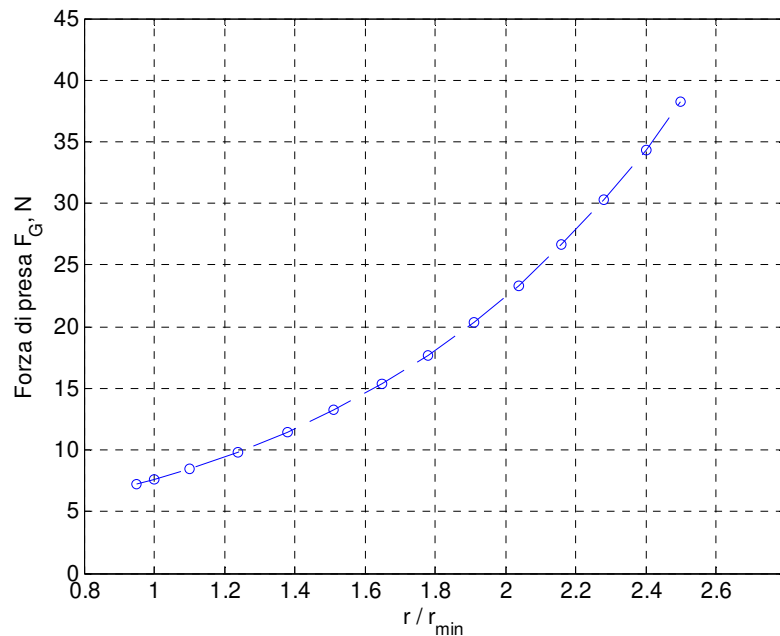
### Analisi Fase di presa

L'obiettivo di questa analisi è la determinazione della coppia minima da applicare alle tre griffe per garantire l'applicazione della forza di presa necessaria per la manipolazione dell'oggetto durante l'esecuzione del ciclo di produzione.

La definizione delle forze e delle coppie in gioco durante le operazioni di manipolazione:

- $C_{TF}$  : Coppia di presa
- $F_G$  : Forza di presa;
- $F_P$  : Forza normale alla griffa durante la presa;
- $F_T$  : Forza tangenziale alla griffa durante la presa;
- $\theta_r$  : Angolo di accostamento.

Considerando la formula che permette di ricavare la forza di presa, Eq. 1-1, i range delle varie grandezze in gioco e l'andamento della massa dell'oggetto in funzione delle dimensioni esterne si determina l'andamento della forza di presa, Fig. 3-42. Lo schema che visualizza le forze scambiate tra oggetto e griffe è quello di Fig. 1-29.



**Fig. 3-42: Andamento forza di presa  $F_G$ .**

Si considera il coefficiente di attrito tra metallo e metallo per considerare il caso sfavorevole.

Come fatto per la determinazione della coppia necessaria da applicare alla griffa per eseguire il centraggio dell'oggetto rispetto al gripper, si ripete lo stesso procedimento per il calcolo della coppia necessaria da applicare alle griffe per l'applicazione della forza di presa.

Ricavata la forza di presa in funzione delle dimensioni dell'oggetto e conoscendo l'angolo di accostamento in funzione del raggio dell'oggetto da centrare, è possibile ricavare l'andamento della coppia di presa, secondo lo schema di Fig. 3-43 e l'Eq. 3-3.



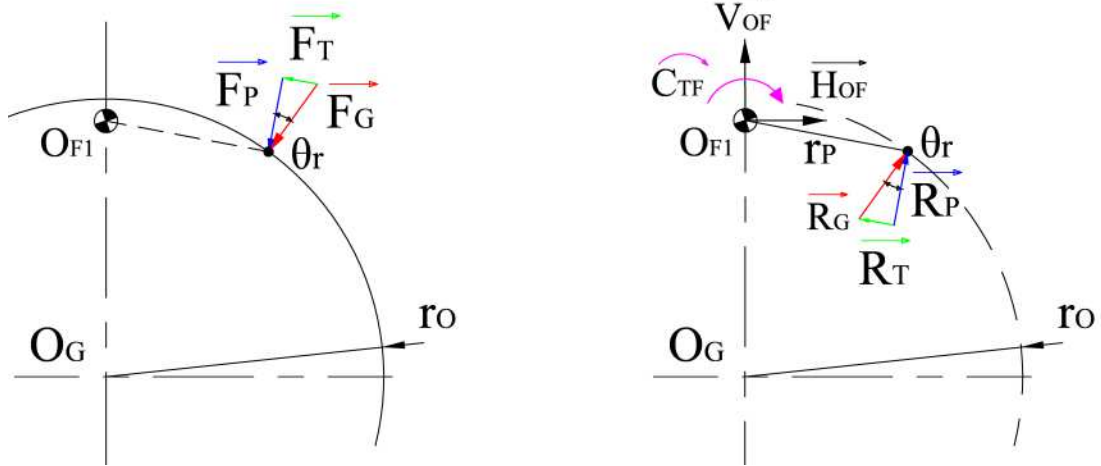


Fig. 3-43: Schema delle forze in gioco considerate durante la fase di presa.

$$C_{TF} = F_G \cdot \cos \theta_r \cdot r_P \quad (\text{Eq. 3-3})$$

L'andamento della coppia di presa, Fig. 3-44, vede un andamento che è dipendente dall'angolo di accostamento ed in particolare da coseno di quest'ultimo.

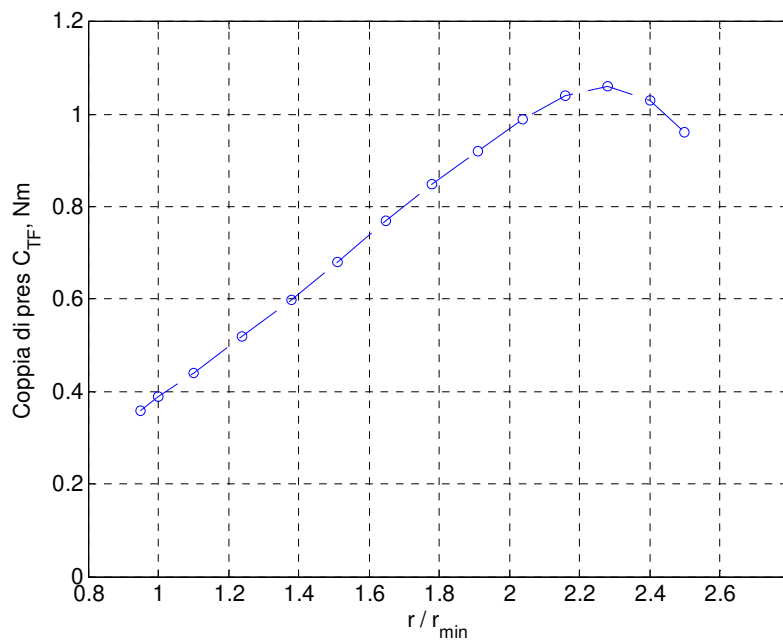
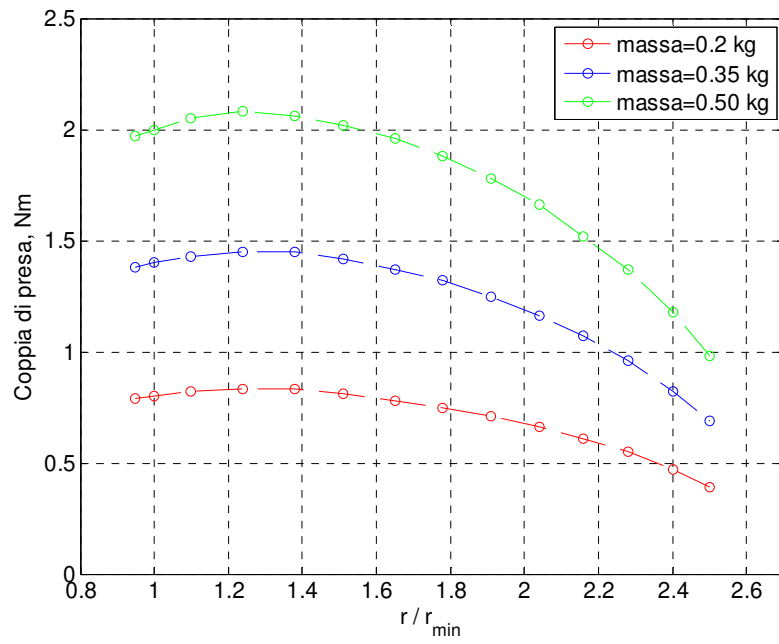


Fig. 3-44: Andamento coppia di presa  $C_{TF}$ .

Proprio sul valore di coppia di presa necessaria per eseguire la presa degli oggetti, è stata fatta una ulteriore analisi che ha riguardato come questa grandezza fisica varia in funzione di oggetti che presentano una massa costante al variare delle dimensioni esterne. Questo comportamento visualizzato in Fig. 3-45 evidenzia come il fattore peso e il fattore angolo di accostamento influenzano tale andamento in maniera opposta rispetto a quello visualizzato in Fig. 3-44.



**Fig. 3-45: Confronto andamento di coppia di presa al variare delle dimensioni con massa costante.**

### 3.3.2 Definizione del sistema di trasmissione e di attuazione

In questo paragrafo viene prima riportato il processo di confronto e di scelta del sistema di trasmissione e successivamente l'analisi che ha portato alla definizione del sistema di attuazione.

L'ipotesi di partenza principale, che caratterizza il gripper, è che si è scelto di utilizzare un sistema di trasmissione ad un grado di libertà. Questo perché, in funzione del tipo di architettura scelta, un unico grado di libertà permette di ottenere il moto sincronizzato delle griffe e quindi di realizzare la coassialità del gripper con l'oggetto afferrato. Un'altra motivazione, che ha guidato la scelta di questa tipologia di meccanismi, è stata quella di non voler introdurre delle complessità al sistema. Un ulteriore vincolo è quello dettato dal fatto di avere un limitato spazio in altezza e quindi deve essere un sistema che utilizza un meccanismo piano.

I sistemi di trasmissione ipotizzati sono:

- Sistema di trasmissione con meccanismo articolato a leve;
- Sistema di trasmissione con meccanismo a camme;
- Sistema di trasmissione con ruote dentate.

Per quanto riguarda la prima tipologia dei sistemi di trasmissione ipotizzati, e cioè quello che prevede l'utilizzo di un meccanismo articolato a leve, gli aspetti principali considerati sono diversi. Pur essendo meccanismi efficaci, la presenza di un certo numero di coppie rotoidali, introduce come aspetto critico il fattore giochi ed attriti tra i membri che costituiscono il meccanismo. Le configurazioni di equilibrio sono diverse e dipendono dalle dimensioni dell'oggetto afferrato. Per ottenere il range di movimento delle griffe, i parametri di progetto da tenere in considerazione e da ottimizzare sono la lunghezza delle aste e l'angolo  $\delta$ , Fig. 3-46.

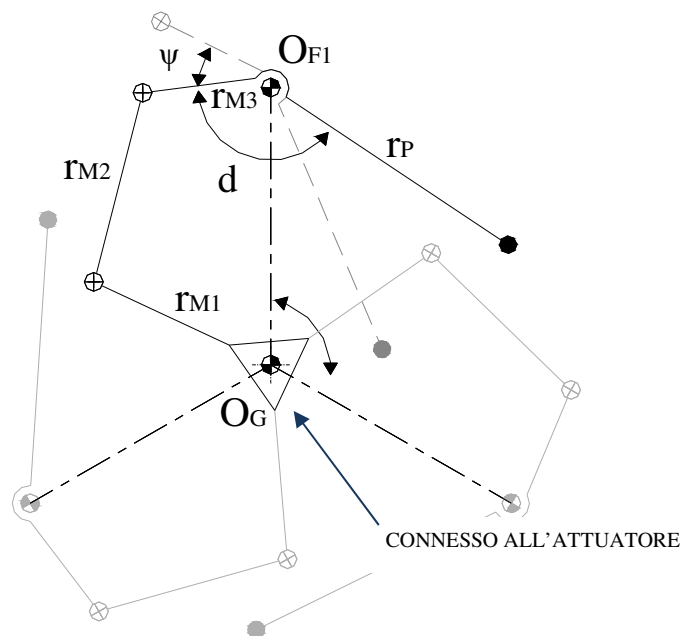
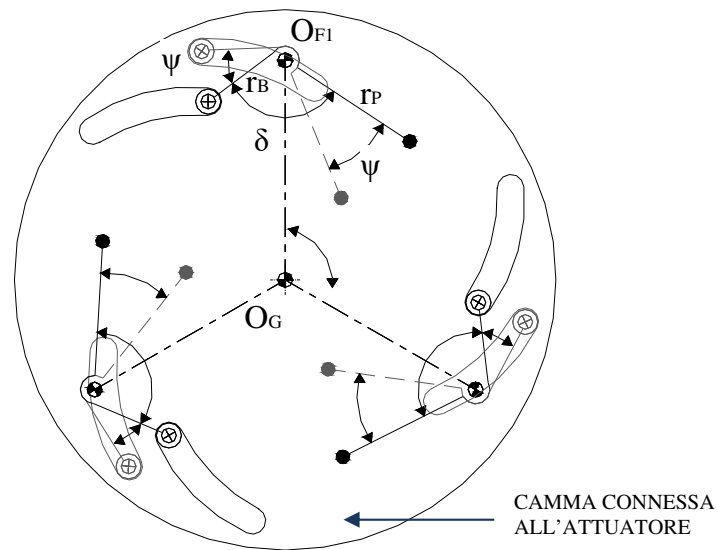


Fig. 3-46: Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo articolato a leve.

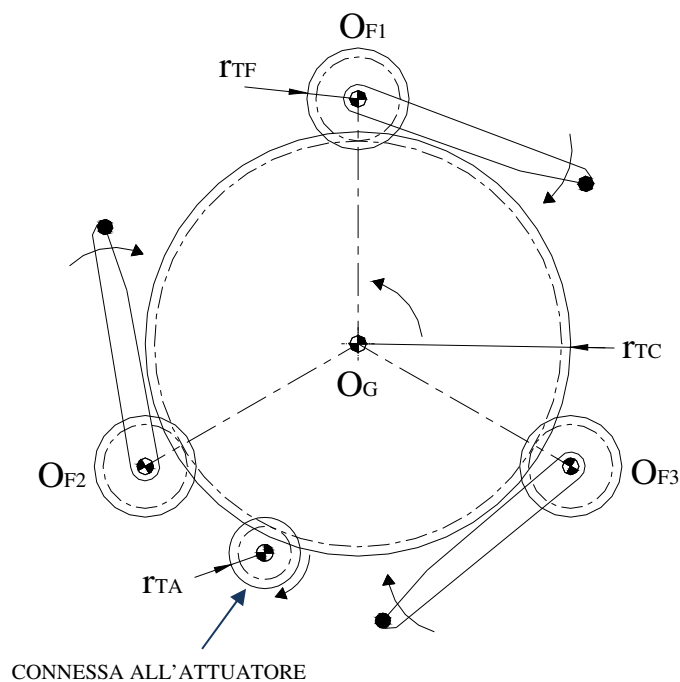
Gli aspetti principali che invece interessano i sistemi di trasmissione che utilizzano un meccanismo a camme riguardano la semplicità del sistema, il numero limitato di membri coinvolti per la trasmissione del moto, di contro però possono presentare costi di realizzazione elevati, se paragonati agli altri sistemi e problemi che riguardano il recupero di eventuali giochi

dovuti all'usura del sistema, Fig. 3-47. I parametri di progetto sono l'angolo  $\delta$ , la lunghezza  $r_B$  ed il profilo della camma che è funzione del rapporto di trasmissione voluto.



**Fig. 3-47: Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo a camme.**

Infine, i sistemi che presentano l'utilizzo di ruote dentate, si rivelano sistemi compatti, che realizzano la sincronizzazione degli elementi in maniera semplice e che richiedono, come parametri di progetto, la sola scelta dei raggi delle ruote.



**Fig. 3-48: Schema di un sistema di trasmissione con ruote dentate.**

Un ulteriore aspetto qualificante che è stato considerato è quello che prevede l'irreversibilità del moto senza ulteriori complicazioni al meccanismo. Questo perché, a seguito dell'applicazione della forza di presa, questa possa essere in grado di mantenere tale forza senza l'utilizzo ulteriore di energia. Questo nell'ottica di progettare un sistema efficiente senza quindi

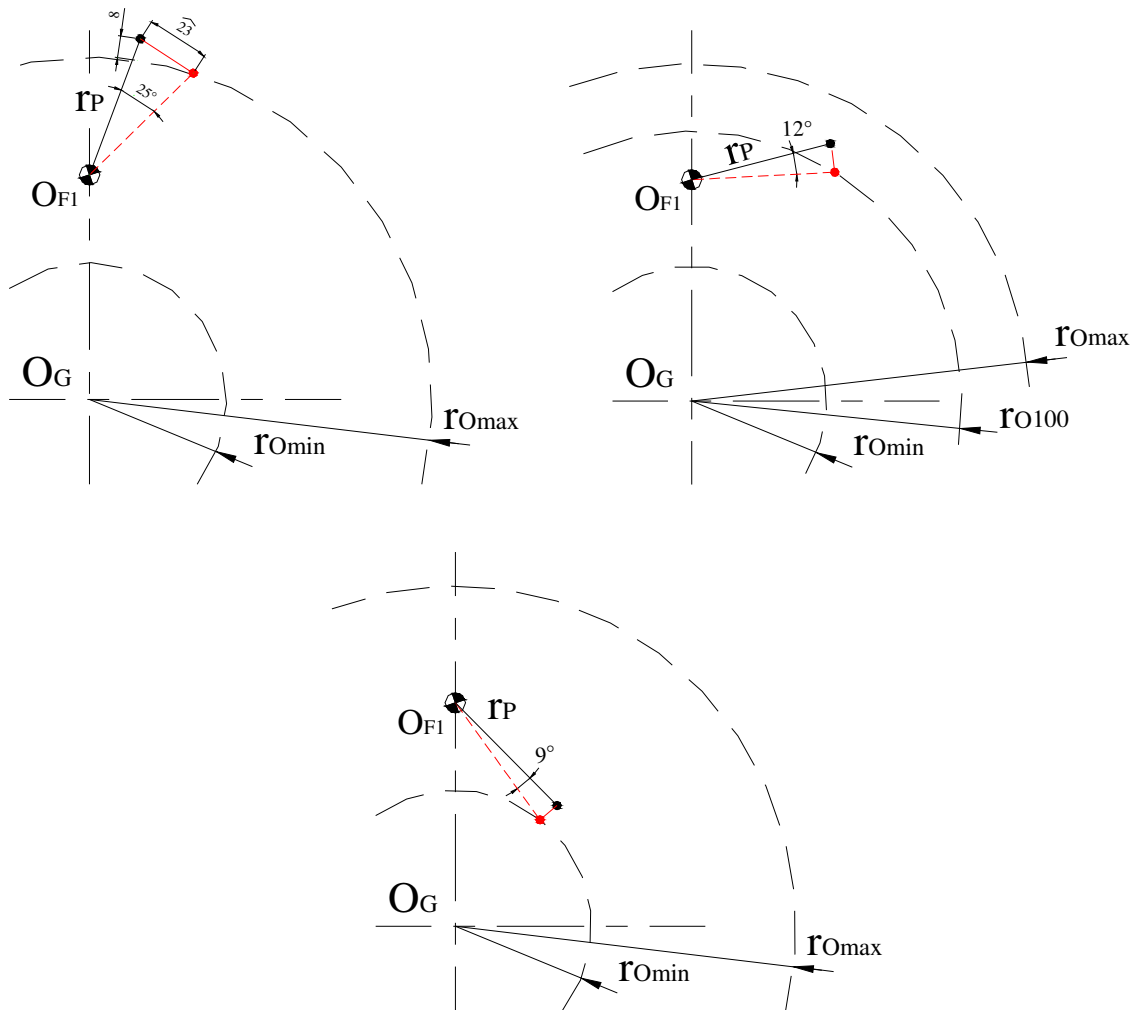


- $s_{Pn}$  : corsa griffe attuatore pneumatico = 8 mm
  - $t_{Pn}$  : tempo di chiusura/apertura griffe attuatore pneumatico = 0,20 s
- La velocità media di chiusura  $v_{mPn}$  è pari a:

$$v_{mPn} = \frac{s_{Pn}}{t_{Pn}} = \frac{0,008 \text{ m}}{0,20 \text{ s}} = 0,04 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Eq. 3-4})$$

Il valore di velocità media appena calcolato è quindi considerato come riferimento per il nuovo gripper.

Come è possibile vedere in Fig. 3-50, la corsa angolare della griffa varia in funzione delle dimensioni dell'oggetto da afferrare. Il motivo è dettato dal fatto di garantire la distanza  $s_{Pn}$  tra l'estremo della griffa e la superficie di presa per tutto il range dimensionale considerato degli anelli, Fig. 3-50.



**Fig. 3-50: Configurazione griffe per i casi di  $r_{Omax}$ ,  $r_{O100}$  e  $r_{Omin}$ .**

Adesso si definiscono le seguenti grandezze:

- $s_{Ga}$  : corsa angolare griffe;
- $s_{Gl}$  : corsa lineare griffe dovuto ad uno spostamento angolare;
- $v_{mG}$  : velocità media di chiusura;
- $t_G$  : tempo di chiusura;

Per garantire la distanza  $s_{Pn}$ , le griffe, per il raggio  $r_{Omax}$ , devono realizzare una corsa angolare  $s_{Ga} = 25^\circ$ . Questo si traduce in una corsa lineare  $s_{Gl}$ , pari a:

$$s_{Gl} = 2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot \frac{s_{Ga}}{360^\circ} = 2 \cdot \pi \cdot 53 \text{ mm} \cdot \frac{25^\circ}{360^\circ} = 23,1 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Se si sceglie di mantenere come tempo di chiusura il tempo  $t_{Pn}$ , la velocità media di chiusura  $v_{mG}$  è pari a:

$$v_{mG} = \frac{s_{Gl}}{t_{Pn}} = \frac{0,0231 \text{ m}}{0,20 \text{ s}} = 0,116 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Eq. 3-6})$$

Questo valore è circa tre volte il valore di velocità media  $v_{mPn}$ . Se si considera che questa velocità è quella che interessa ogni griffa, durante l'impatto di quest'ultima con l'anello, potrebbero presentarsi dei problemi proprio sulla superficie esterna degli oggetti da manipolare.

Se invece si sceglie di avere come velocità media la velocità  $v_{mPn}$ , il tempo di chiusura vale:

$$t_G = \frac{s_{Gl}}{v_{mPn}} = \frac{0,0231 \text{ m}}{0,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,58 \text{ s} \quad (\text{Eq. 3-7})$$

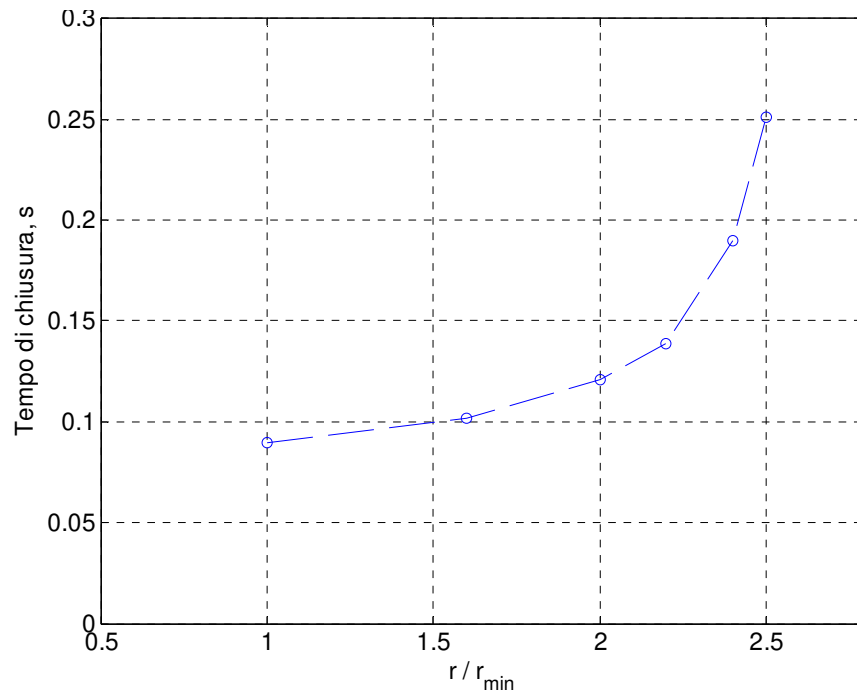
Anche per questo caso, il valore calcolato è circa tre volte quello di riferimento. Questo implicherebbe un tempo ciclo triplicato e quindi non accettabile.

Alla luce dei calcoli presentati nelle relazioni precedenti, si è scelto di trovare un compromesso, sia per il tempo di chiusura che per la velocità media, in modo da avere una soluzione reputata ottimale.

Ipotizzando un tempo di chiusura  $t_G = 0,25 \text{ s}$ , la velocità media vale:

$$v_{mG} = \frac{s_{Gl}}{t_G} = \frac{0,0231 \text{ m}}{0,25 \text{ s}} = 0,092 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Eq. 3-8})$$

Per quanto riguarda il tempo di chiusura, il valore preso in considerazione è quello relativo al caso più sfavorevole e cioè quello relativo alla presa dell'anello più grande. Al diminuire delle dimensioni dell'anello, poiché varia la corsa della griffa, a parità di velocità media, il tempo ciclo diminuisce secondo, Fig. 3-51.



**Fig. 3-51: Tempo di chiusura in funzione della corsa angolare.**

La parte seguente riporta i passaggi che hanno permesso di definire sia i rapporti di trasmissione tra le ruote dentate del sistema che la definizione delle caratteristiche dell'attuatore. Per quanto riguarda l'attuatore, per soddisfare i requisiti di progetto di flessibilità e le considerazioni di efficienza, la tipologia di attuatore considerato è di tipo elettrico.

La determinazione del sistema di trasmissione e di attuazione ha visto l'esecuzione di un processo iterativo che ha preso in considerazione diversi aspetti. I vincoli di partenza hanno riguardato l'ingombro massimo del sistema, il peso complessivo, ed infine l'utilizzo di componenti commerciali che non necessitano di lavorazioni speciali.

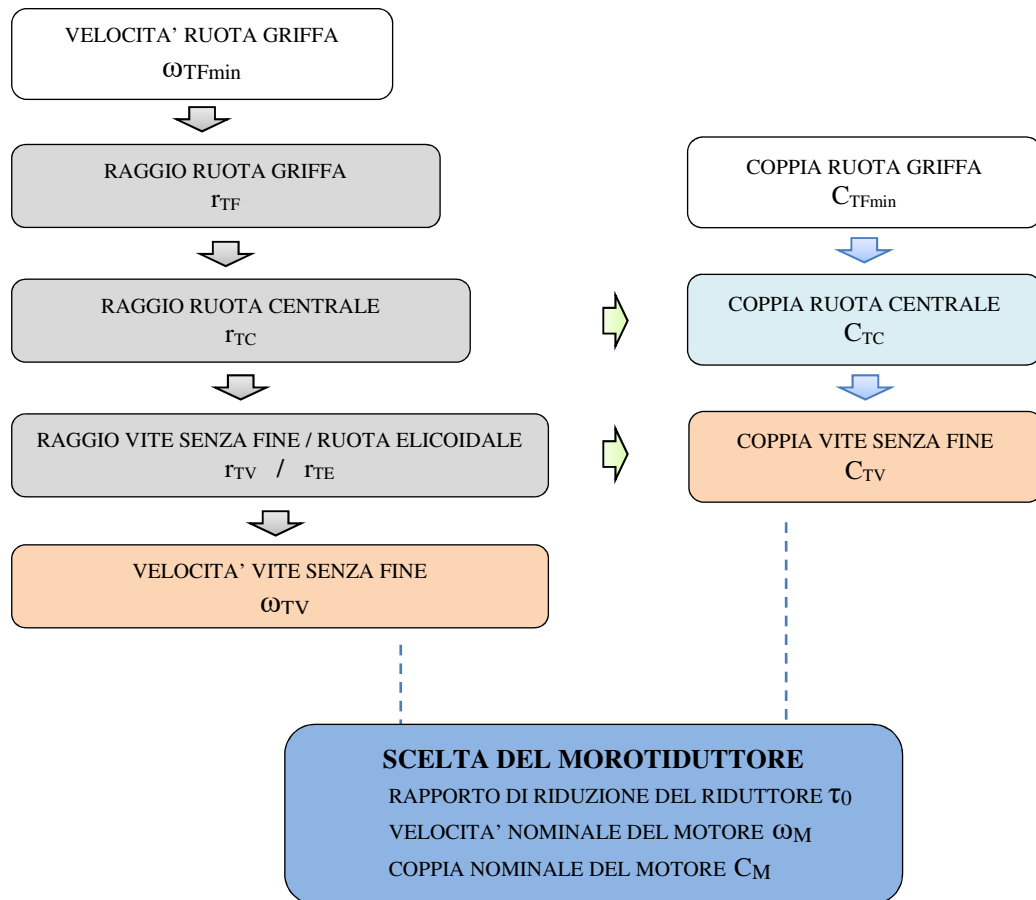
I dati di progetto iniziali hanno invece interessato:

- Velocità angolare della ruota griffa minima =  $\omega_{Tf_{\min}}$
- Coppia ruota griffa minima =  $C_{Tf_{\min}}$

Tati dati derivano dall'analisi che ha interessato il tempo ciclo e dall'analisi delle forze di presa per garantire la presa dell'oggetto.



Lo schema di Fig. 3-52, riporta il flusso dei passaggi seguiti per la determinazione delle caratteristiche principali del sistema di trasmissione e dell'attuatore.

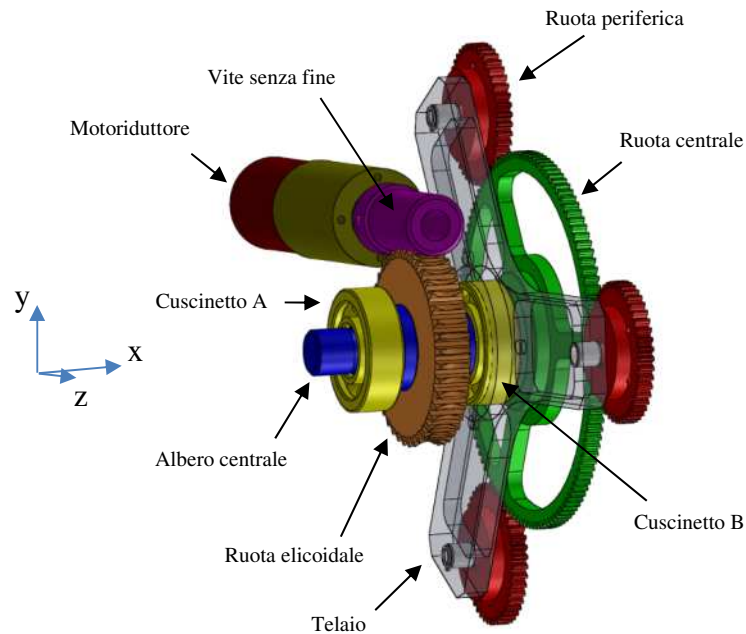


**Fig. 3-52: Diagramma di flusso del processo di determinazione del sistema di trasmissione e di attuazione.**

Scelta una configurazione del sistema di trasmissione e del motoriduttore, la fase successiva ha interessato la verifica della stessa e cioè determinando la velocità di rotazione e della coppia dell'albero del motoriduttore.

La scelta dei parametri funzionali dei singoli componenti del sistema è limitata dai particolari presenti nei cataloghi considerati e dai vincoli dell'applicazione considerata.

La Fig. 3-53 riporta lo schema del sistema di trasmissione considerato.



**Fig. 3-53: Schema del sistema di trasmissione.**

Questa parte riporta i dati che hanno interessato il processo di definizione dei componenti del sistema di trasmissione e del motoriduttore.

Per le ruote periferiche e la ruota centrale si scelgono ruote a denti dritti di modulo 1. Considerando la lunghezza della griffa  $r_F$  e la velocità media  $v_{mg}$  che questa ha quando si afferra un oggetto di diametro esterno di 250 mm, la velocità angolare della ruota griffa  $\omega_{TF}$  si calcola secondo l'Eq. 3-9:

$$\omega_{TF} = \frac{v_{mG}}{r_F} = \frac{0,092 \frac{m}{s}}{0,053 m} = 1,74 \frac{rad}{s} = 16,66 rpm \quad (\text{Eq. 3-9})$$

Scegliendo il raggio della ruota griffa  $r_{TF}=22$  mm e di conseguenza quello del raggio della ruota centrale  $r_{TC} = 60$  mm si ha un rapporto di trasmissione  $\tau_1$  tra le due ruote pari a:

$$\tau_1 = \frac{\omega_{TC}}{\omega_{TF}} = \frac{r_{TF}}{r_{TC}} = \frac{22 mm}{60 mm} = 0,37 \quad (\text{Eq. 3-10})$$

Quest'ultimo permette di calcolare la velocità angolare della ruota centrale  $\omega_{TC}$

$$\omega_{TC} = \tau_1 \cdot \omega_{TF} = 0,37 \cdot 1,74 \frac{rad}{s} = 0,64 \frac{rad}{s} = 6,11 rpm \quad (\text{Eq. 3-11})$$

La velocità della ruota centrale è pari a quella della ruota elicoidale  $\omega_{TE}$  connessa alla ruota senza fine. Considerando l'ipotesi di utilizzare una ruota a denti elicoidali che ha un modulo di 1,5 con un numero di denti  $z_{TE} = 40$  e raggio  $r_{TE} = 30$  mm e che la ruota senza fine connessa presenta un numero di filetti  $z_{TV} = 2$  e un raggio primitivo  $r_{TV} = 8$  mm con angolo di pressione

$\Phi_n=20^\circ$ , angolo dell'elica  $\varphi=8,3^\circ$  e passo vite  $l=4,712$  mm è possibile determinare la velocità angolare della vite senza fine  $\omega_{TV}$ .

In funzione del rapporto di trasmissione:

$$\tau_2 = \frac{z_{TE}}{z_{TV}} = \frac{40}{2} = 20 \quad (\text{Eq. 3-12})$$

quindi

$$\omega_{TV} = \tau_2 \cdot \omega_{TE} = 20 \cdot 0,64 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 12,79 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 122,16 \text{ rpm} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

Questa velocità è quella in uscita dal motoriduttore. Se si utilizza un riduttore epicicloidale con un rapporto di riduzione  $\tau_3 = 35$ , la velocità minima del motore deve essere pari a:

$$\omega_M = \tau_3 \cdot \omega_{TV} = 35 \cdot 12,79 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 447,74 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 4276 \text{ rpm} \quad \text{Eq. 3-14}$$

Considerando i valori di coppia minima che deve essere trasmessa dalle ruote periferiche per garantire l'applicazione della forza di presa dall'estremità della griffa, si determina la coppia che deve essere trasmessa dalla ruota centrale.

Il valore di coppia minimo che interessa una singola ruota periferica si considera  $C_{TF} = 1,50$  Nm, quindi la ruota centrale deve trasmettere una coppia  $C_{TC}$  pari a tre volte quella di una singola ruota periferica a meno del rapporto di trasmissione  $\tau_1 = 0,37$  e del rendimento  $\eta_1 = 0,95$ :

$$C_{TC} = \frac{3 \cdot C_{TF}}{\tau_1 \cdot \eta_1} = \frac{3 \cdot 1,5 \text{ Nm}}{0,37 \cdot 0,95} = 12,92 \text{ Nm} \quad (\text{Eq. 3-15})$$

Ipotizzando un rendimento del gruppo ruota elicoidale vite senza fine pari a  $\eta_2 = 0,5$  la coppia che deve essere trasmessa dal motoriduttore alla vite elicoidale vale:

$$C_{MR} = C_{TV} = \frac{C_{TC}}{\tau_2 \cdot \eta_2} = \frac{12,92 \text{ Nm}}{20 \cdot 0,5} = 1,29 \text{ Nm} \quad (\text{Eq. 3-16})$$

Infine, se consideriamo il rendimento del riduttore epicicloidale connesso al motore pari a  $\eta_3 = 0,7$ , la coppia che deve essere fornita dal motore è:

$$C_{Mmin} = \frac{C_{MR}}{\tau_3 \cdot \eta_2} = \frac{1,29 \text{ Nm}}{35 \cdot 0,7} = 0,053 \text{ Nm} \quad (\text{Eq. 3-17})$$

Infine si è voluto procedere con il dimensionamento dell'albero centrale del sistema di trasmissione. Questo perché è l'unico componente non commerciale del sistema. Come primo step sono state determinate le forze che vengono scambiate tra la ruota senza fine e la ruota elicoidale durante l'applicazione della forza massima di presa. La Fig. 3-55 mostra lo schema delle forze considerate, prendendo come riferimento l'albero centrale.

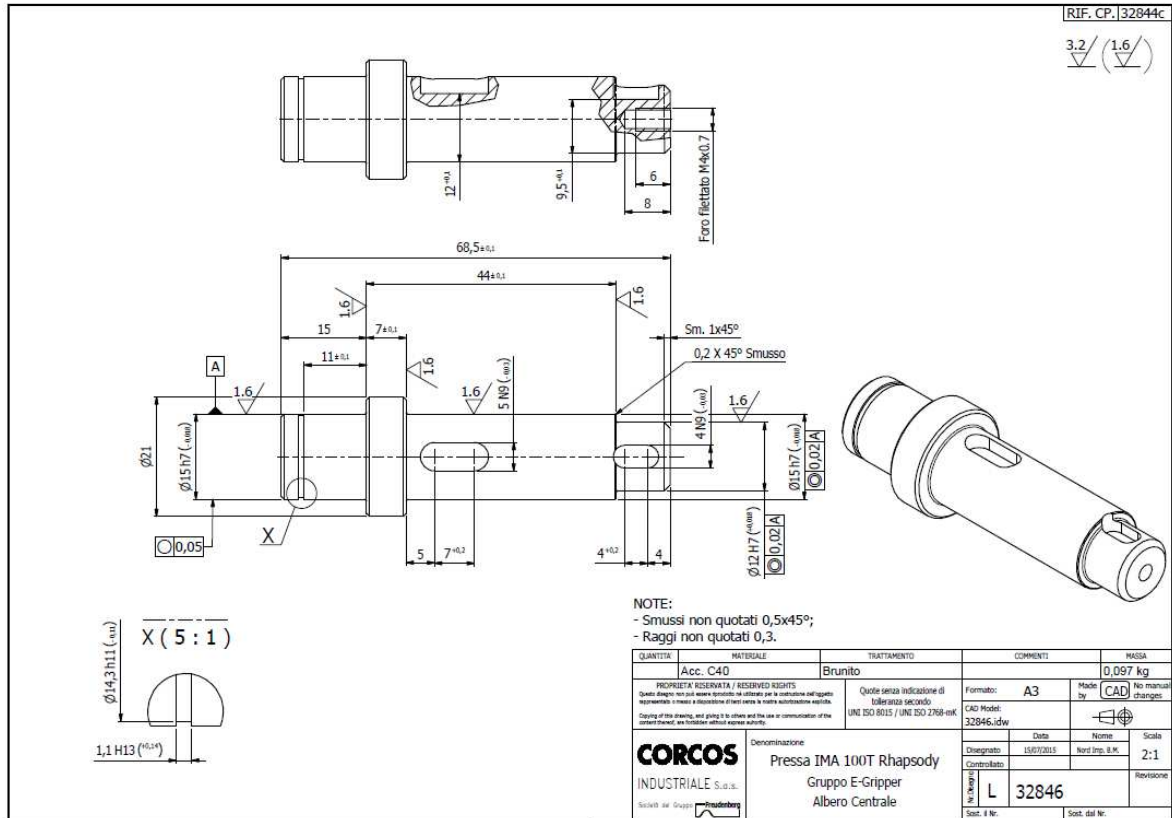


Fig. 3-54: Disegno costruttivo dell'albero centrale.

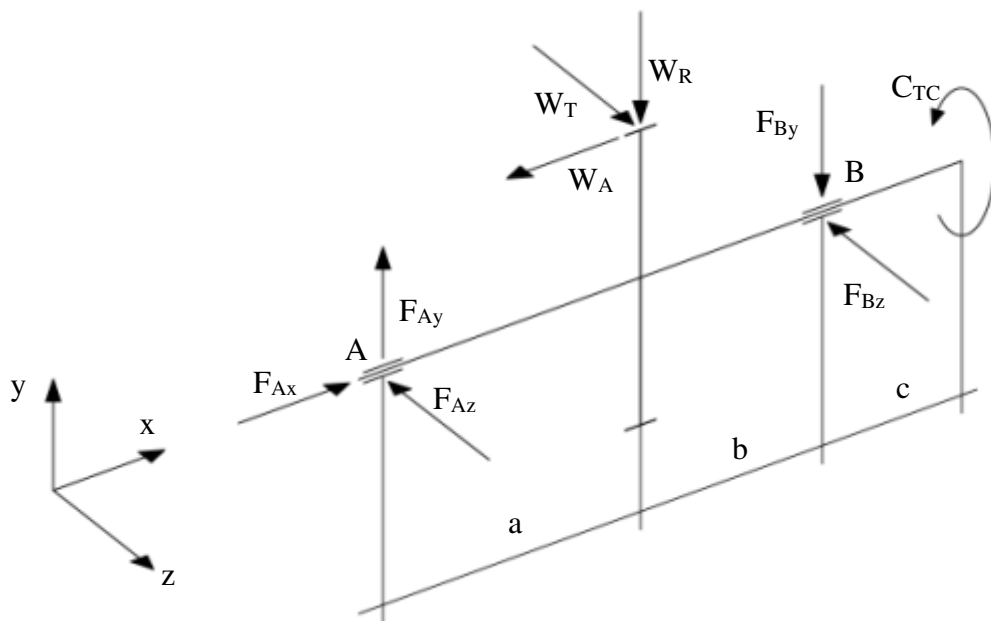


Fig. 3-55: Schema delle azioni e delle reazioni agenti sull'albero centrale.

Prendendo in considerazione la coppia  $C_{TC}$  che interessa la ruota centrale e poiché  $C_{TC} = C_{TE}$ , si determina la forza trasversale  $W_T$ :

$$W_T = \frac{C_{TC}}{r_{TE}} = \frac{12,92 \text{ Nm}}{0,03 \text{ m}} = 430 \text{ N} \quad (\text{Eq. 3-18})$$

La formula che permette di calcolare la forza che agisce assialmente è:

$$W_A = \frac{C_{TV}}{r_{TV}} = \frac{1,29 \text{ Nm}}{0,008 \text{ m}} = 161 \text{ N} \quad (\text{Eq. 3-19})$$

La forza che invece agisce sulle due ruote lungo l'asse y e cioè  $W_R$  è stata calcolata secondo il seguente procedimento.

L'angolo sul passo  $\lambda = \text{tg}^{-1}(2l/\pi d_{TV}) = 8,53$  ed il coefficiente di attrito  $f = 0,2$ :

$$W = \frac{W_A}{\cos \phi_n \cdot \sin \lambda + f \cdot \cos \lambda} = 477 \text{ N} \quad (\text{Eq. 3-20})$$

$$W_R = W \cdot \sin \phi_n = 477 \text{ N} \cdot \sin 20^\circ = 163 \text{ N} \quad (\text{Eq. 3-21})$$

Determinate le forze agenti sulla ruota elicoidale si procede con la determinazione delle reazioni vincolari che agiscono sull'albero centrale.

1) Equilibrio delle forze – Asse x:

$$- W_A + F_{Ax} = 0 \rightarrow F_{Ax} = W_A \quad (\text{Eq. 3-22})$$

2) Equilibrio dei momenti – Asse y:

$$- W_T \cdot a + F_{Bz} \cdot (a+b) = 0 \rightarrow F_{Bz} = W_T \cdot a / (a+b) \quad (\text{Eq. 3-23})$$

3) Equilibrio dei momenti – Asse z:

$$- W_R \cdot a + W_A \cdot r_{TE} - F_{By} \cdot (a+b) = 0 \rightarrow F_{By} = - W_R \cdot a + W_A \cdot r_{TE} / (a+b) \quad (\text{Eq. 3-24})$$

4) Equilibrio delle forze – Asse y:

$$+ F_{Ay} - W_R - F_{By} = 0 \rightarrow F_{Ay} = W_R + F_{By} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

5) Equilibrio delle forze – Asse z:

$$- F_{Az} + W_T + F_{Bz} = 0 \rightarrow F_{Az} = + W_T + F_{Bz} \quad (\text{Eq. 3-26})$$

Di seguito viene riportata l'analisi delle sollecitazioni per il piano x-y ed il piano x-z. Non è stata considerata la sollecitazione assiale.

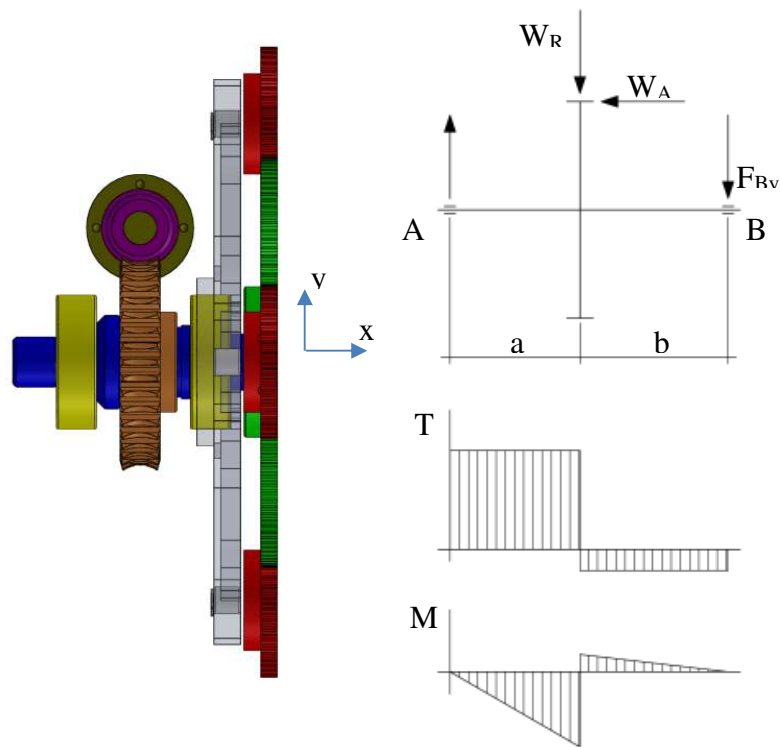


Fig. 3-56: Schema del sistema di trasmissione – Piano x-y.

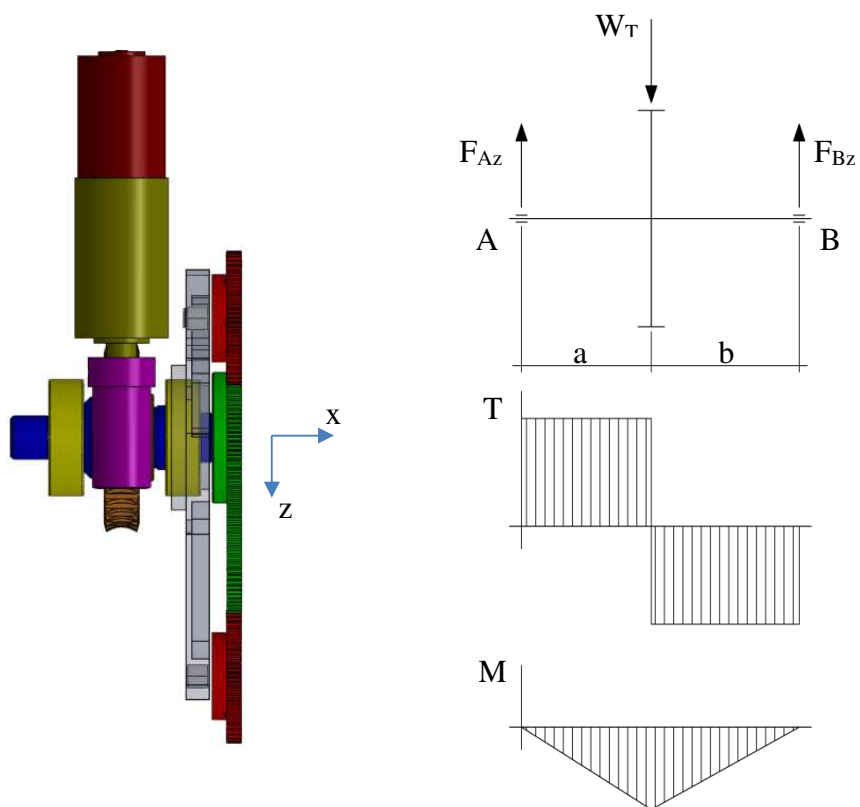


Fig. 3-57: Schema del sistema di trasmissione – Piano x-z.

Considerando che la ruota elicoidale viene posizionata in mezzeria rispetto ai due appoggi e che quindi  $a=b=20$  mm, le reazioni vincolari valgono:

- $F_{Ax} = 161$  N;
- $F_{Bz} = 215$  N;
- $F_{By} = 39$  N;
- $F_{Ay} = 202$  N;
- $F_{Az} = 215$  N.

Le sollecitazioni massime derivanti assumono i seguenti valori:

- Momento flettente massimo – Piano x-y = 4,0 Nm
- Momento flettente massimo – Piano x-z = 4,3 Nm
  - o Momento flettente totale massimo  $M = 5,9$  Nm

Per quanto riguarda la coppia torcente questa assume un valore costante lungo i tratti “b” e “c” dell’albero e vale:

- o Momento torcente massimo  $T = 12,9$  Nm.

Infine viene calcolato il valore minimo ammissibile del diametro della sezione dell’albero centrale secondo il criterio della massima energia di distorsione (ED) e secondo il criterio della massima tensione tangenziale (TTM).

Il materiale scelto per la costruzione dell’albero è Acciaio C40 con tensione di snervamento pari a:

- $S_y = 490$  Mpa

Il coefficiente di sicurezza “n” = 3.

Diametro minimo della sezione dell’albero secondo il criterio ED:

$$- d_{min} = \left[ \frac{16n}{\pi S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \right]^{1/3} = 9,30 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3-27})$$

Diametro minimo della sezione dell’albero secondo il criterio TTM:

$$- d_{min} = \left[ \frac{32n}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} = 9,60 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3-28})$$

Dai calcoli, si evince che la sezione minima dell’albero deve avere un diametro di almeno 10 mm.

### 3.3.3 Sensorizzazione e controllo

Come riportato nel paragrafo 2.2, esistono essenzialmente tre tipi di percezione legate alle operazioni che interessano i gripper:

- Rilevamento della presenza dell'oggetto da prendere.
- Verifica della presa o del rilascio.
- Controllo della posizione e dell'orientamento dell'oggetto.

Se il sistema in cui lavora un gripper presenta delle fasi di manipolazione "semplici" oppure che sono monitorate da un gruppo di sensori esterni, quest'ultimo può presentare un'integrazione di sensori minimizzata allo stretto necessario per il proprio funzionamento e per il funzionamento dell'intero sistema in cui lavora.

Per quanto riguarda l'operazione di rilevamento della presenza dell'oggetto da manipolare, i sensori possono essere installati proprio sul gripper oppure possono essere installati nella zona di presa o rilascio. Questo fa sì che tale informazione sia sempre presente all'interno del sistema di lavoro.

L'informazione che invece riguarda la verifica della presa o del rilascio e nei casi più evoluti, la verifica della corretta applicazione della forza di presa, questa può essere rilevata da diverse tipologie di sensori che permettono di avere anche una diversa "sensibilità" a riguardo. I sensori utilizzabili per verificare la corretta applicazione della forza di presa sono di natura diversa ed ognuno fornisce un livello di percezione diversa, Fig. 3-58.

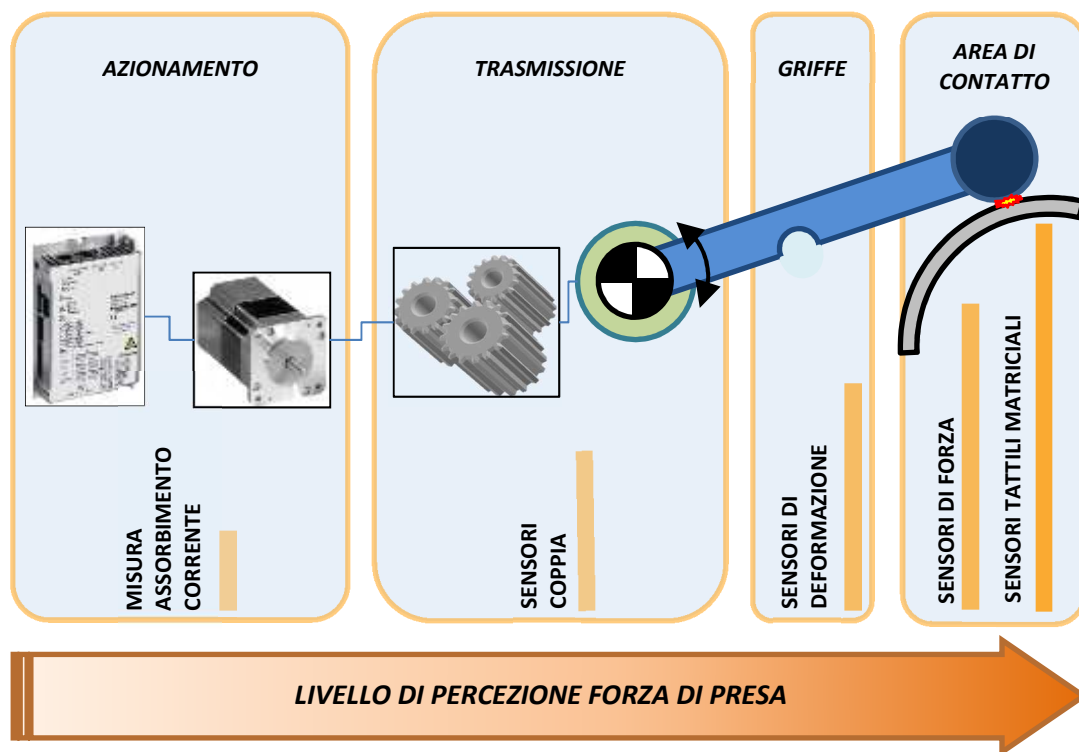


Fig. 3-58: Schema livello percezione forza di presa in funzione del tipo di sensore utilizzato.

Infine per quanto riguarda l'informazione della posizione o dell'orientamento dell'oggetto, se quest'ultimo ha delle posizioni di presa fisse con l'oggetto orientato sempre nello stesso modo può non essere necessaria in quanto è strettamente dipendente dalle condizioni al contorno del gripper. Nel caso in cui il sistema presentasse la necessità di avere questo tipo d'informazione, esistono diversi tipi di sensori che permettono di ricavarla, un esempio può essere quello dei sistemi di visione.



Riguardo all'applicazione oggetto di questa tesi, come primo step è stato definito il ciclo e le sotto-fasi che riguardano la fase di presa e poi di rilascio. Per quanto riguarda la presa, è stato ipotizzato che partendo da una posizione iniziale della griffa, punto A, si ha un avvicinamento veloce fino al punto B, a questo segue un avvicinamento lento fino al punto C in maniera da eseguire il centraggio dell'oggetto rispetto al gripper. Infine si ha il raggiungimento della posizione D applicando la forza richiesta per la presa, Fig. 3-59.

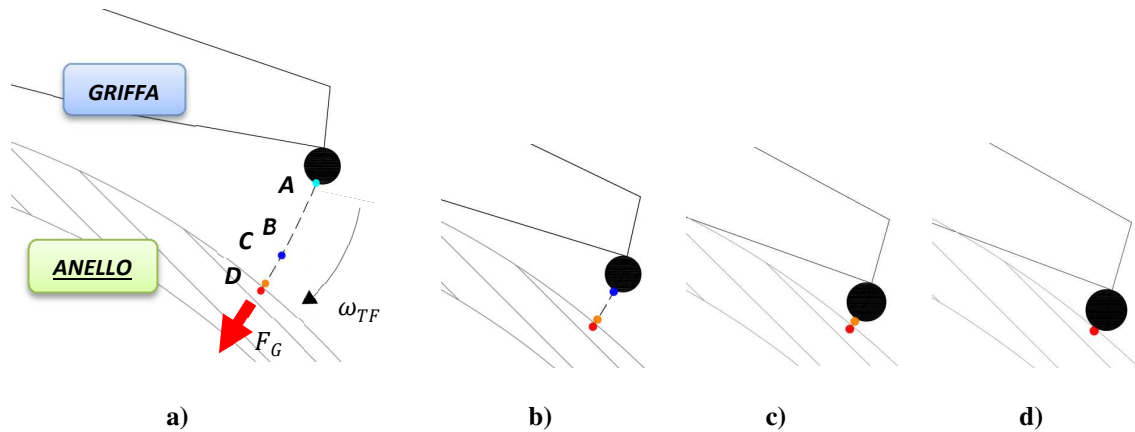


Fig. 3-59: Fase di presa.

Per quanto riguarda la fase di rilascio, è stato ipotizzato che questa avvenga allontanando in maniera veloce la griffa dall'oggetto fino al raggiungimento della posizione iniziale, punto A, Fig. 3-60

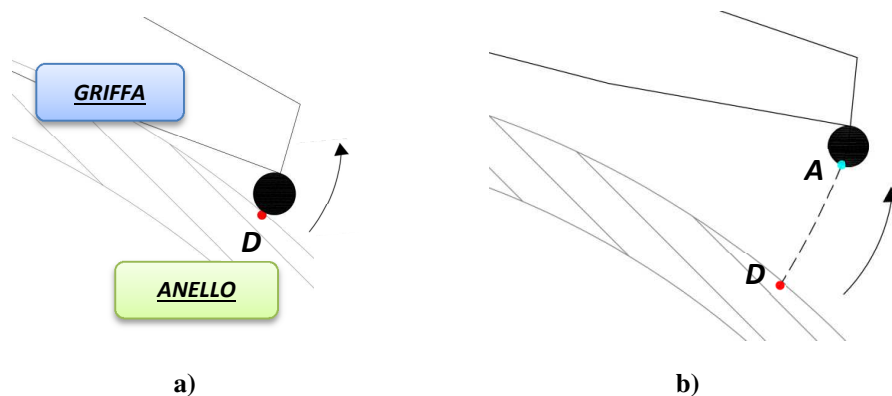


Fig. 3-60: Fase di rilascio.

Definito il ciclo di presa e di rilascio, lo step successivo è stato quello di definire quali sensori utilizzare per monitorare la manipolazione della lamiera o dell'anello durante tutte le fasi del ciclo di produzione della cella robotizzata.

Una scelta fondamentale, che caratterizza il gripper ed il suo funzionamento, è stata quella di non avere sensori applicati all'estremità della griffa o sulla griffa stessa per avere una soluzione "robusta" e affidabile. Questo perché il numero di cicli di manipolazione effettuati dal gripper inserito nella cella robotizzata è tale che la massima affidabilità e robustezza, sia in termini di sistema generale che in termini di ogni singolo componente che costituisce il gripper, sono aspetti fondamentali.

La scelta definitiva è stata quella di avere l'informazione che riguarda la posizione della griffa, a meno di un fattore moltiplicativo, utilizzando un encoder sul motoriduttore e di controllare il valore di corrente assorbita durante la fase di presa per avere un limite sulla forza di presa.

### 3.4 Progettazione esecutiva e prototipazione

In questo paragrafo vengono riportate due fasi che hanno interessato il processo di progettazione del gripper e cioè la progettazione esecutiva dei componenti e dopo la prototipazione.

La progettazione esecutiva è stata interessata anche dalle decisioni di “make or buy” di tutti i componenti che costituiscono il gripper. La linea guida è stata quella di utilizzare principalmente componenti commerciali.

L’attività di costruzione e di assemblaggio ha invece interessato la verifica che tutti i componenti rispettassero i vincoli imposti nei disegni costruttivi e che la fase di assemblaggio si realizzasse senza presentare problemi specifici.

#### 3.4.1 Progettazione esecutiva del gripper

La progettazione esecutiva ha visto, oltre alla scelta dei componenti commerciali, la progettazione di tutti quei componenti che costituiscono il gripper, Fig. 3-61.

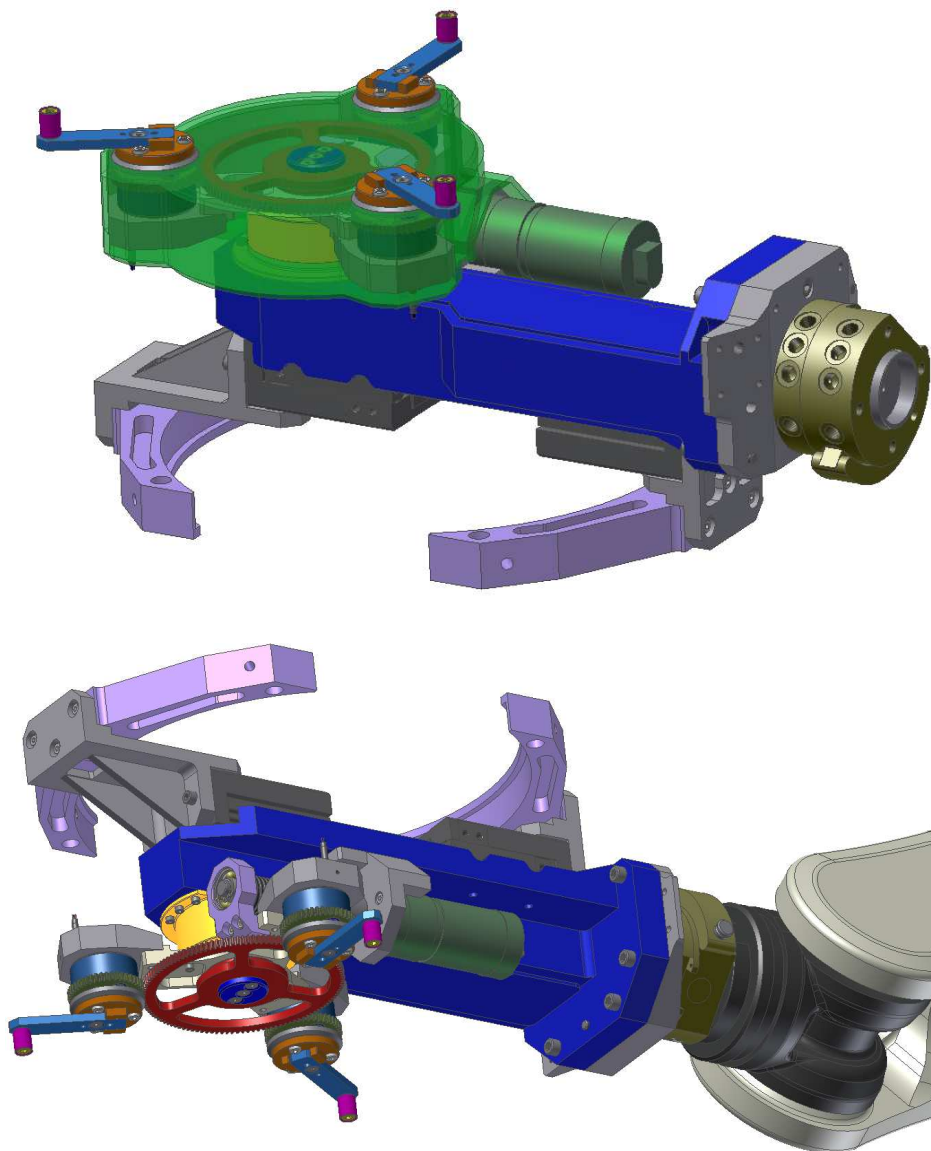


Fig. 3-61: Immagini Cad del gripper, con e senza carter di protezione.

Per quanto riguarda la pinza di manipolazione, un aspetto che è stato tenuto in considerazione è anche quello che riguarda il sistema di anticollisione. Questo perché, in caso di configurazioni del sistema cella non previste, causate da errori dell'operatore o da anomalie di funzionamento dei diversi dispositivi installati, la pinza può andare in collisione con un altro oggetto e quindi causare la possibile rottura di alcune parti della pinza stessa. Proprio per questo motivo è stato progettato un sotto-sistema della pinza che svolge la funzione di interrompere il ciclo di manipolazione in caso di collisioni.

Lo schema di funzionamento è quello riportato in Fig. 3-62, mentre la Fig. 3-63 mostra la progettazione esecutiva. In caso di collisione, la griffa trasla secondo la direzione ortogonale al piano principale del gripper e quest'ultima, entrando nel campo di lavoro del sensore di prossimità, causa il messaggio di sistema in anomalia con relativo blocco del robot.

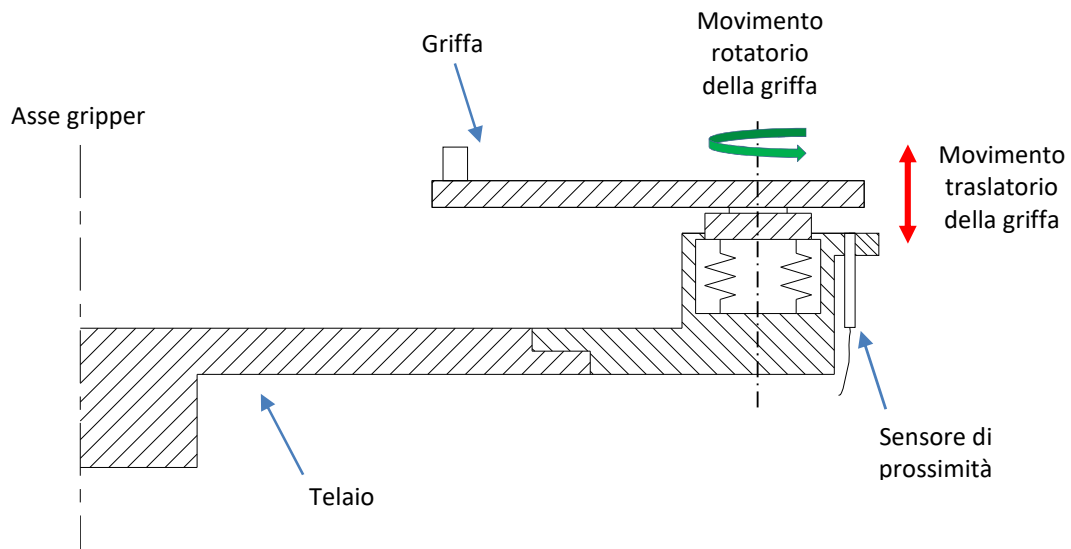


Fig. 3-62: Schema di funzionamento del sistema di anticollisione.

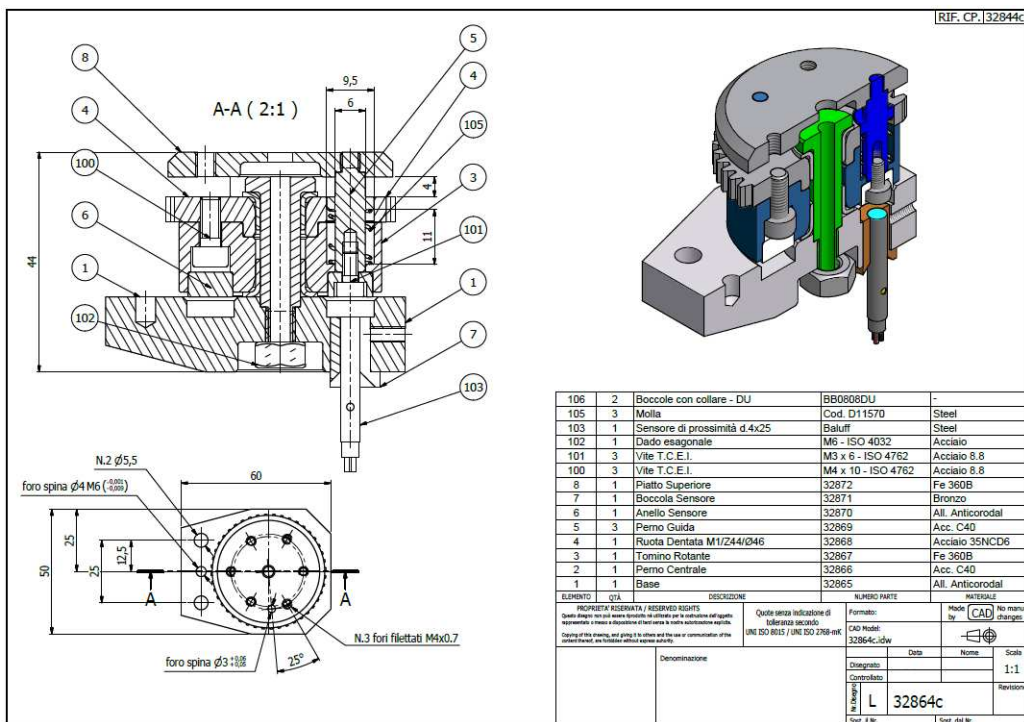
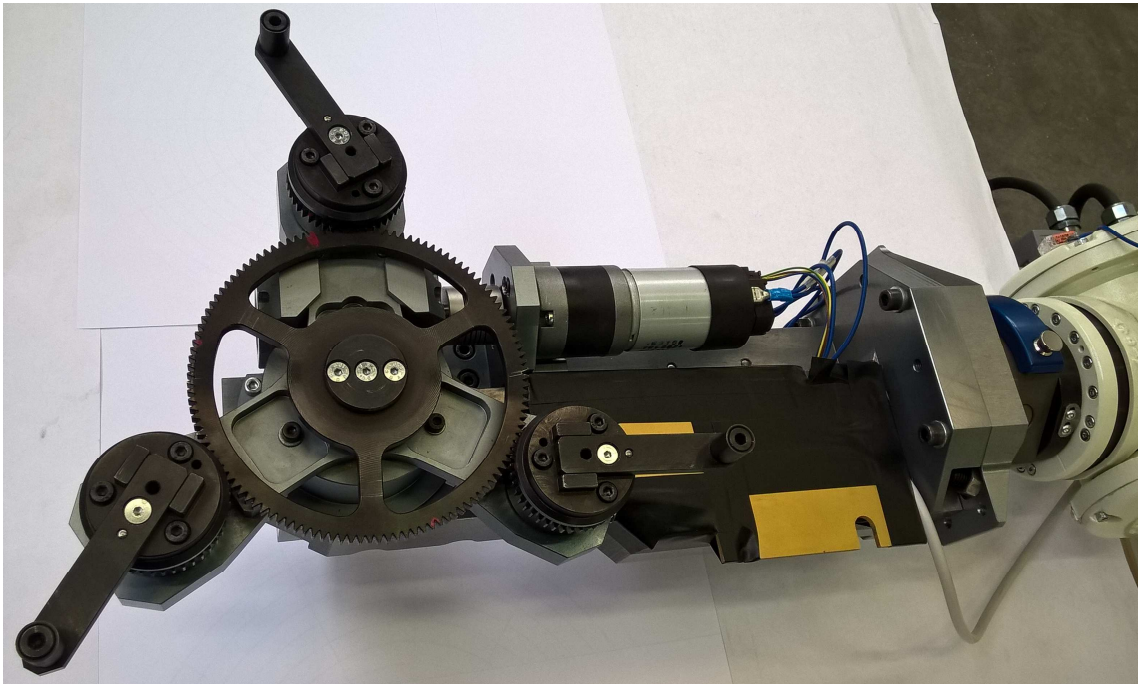


Fig. 3-63: Particolare del sistema di anticollisione.

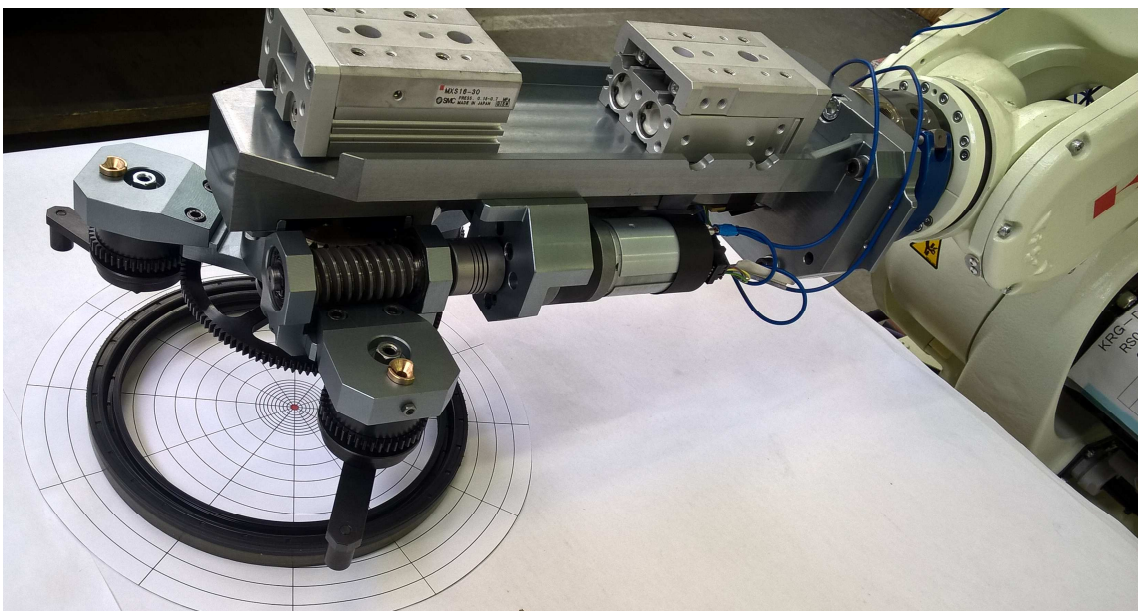


### 3.4.2 Prototipo del QuBu gripper

In questo paragrafo vengono riportate alcune immagini del primo prototipo del QuBu gripper. In particolar e viene visualizzata la pinza di manipolazione.



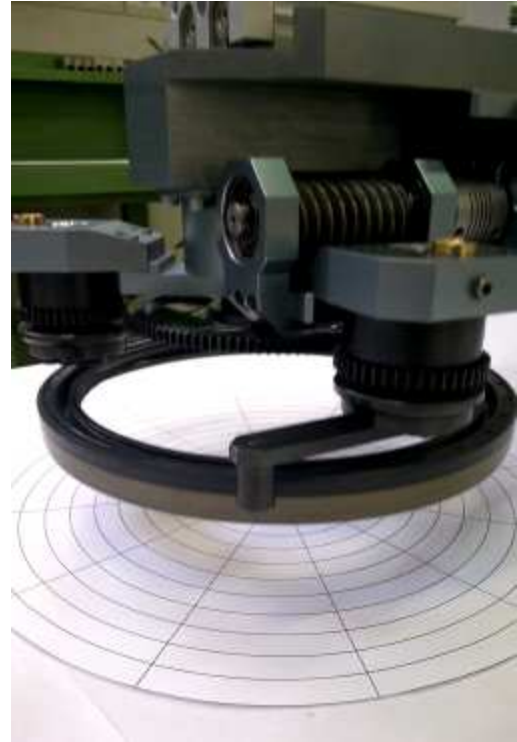
**Fig. 3-65: Vista dal basso del QuBu gripper.**



**Fig. 3-66: Vista dall'alto durante la fase di posizionamento per eseguire la presa di un anello.**



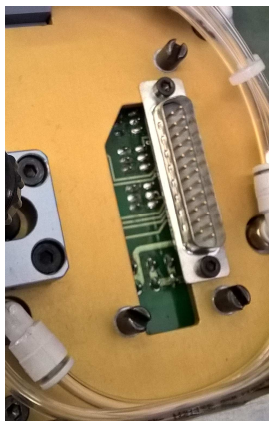
a)



b)

**Fig. 3-67: a) Fase di applicazione della forza di presa; b) Fase di movimentazione dell'anello afferrato.**

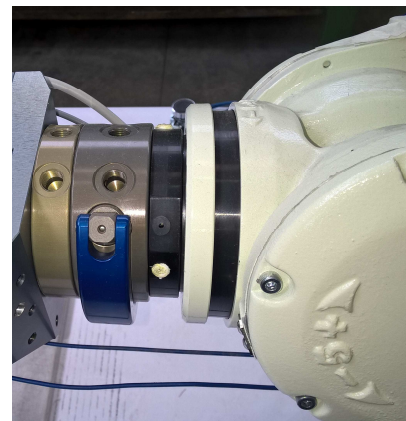
Un ulteriore aspetto considerato per il gripper è quello che riguarda il cambio rapido manuale dell'intero sistema. Infatti sia le connessioni elettriche che quelle pneumatiche prevedono delle interfacce che permettono una rapida connessione. Per quanto riguarda il collegamento con il polso del robot è stato utilizzato un elemento commerciale che assicura uno sgancio dell'intero gripper dal polso con una semplice operazione manuale.



a)



b)



c)

**Fig. 3-68: a) Interfaccia elettrica; b) Interfaccia pneumatica; c) Interfaccia polso robot.**

## Capitolo 4 Sistema di controllo e prove sperimentali

In questo capitolo vengono descritte le attività che hanno permesso di definire il sistema di controllo del gripper ed infine, dopo l'esecuzione di una campagna sperimentale, di mapparne il funzionamento.

In particolare la prima parte di questo capitolo riporta la descrizione del sistema di controllo del gripper implementato, partendo dallo schema generale della cella di produzione. Questo perché, un requisito fondamentale del gripper, è la completa integrazione di questo nuovo dispositivo all'interno della sistema cella senza la necessità di stravolgerne lo schema attualmente sviluppato. Questa parte riporta anche la descrizione del ciclo di funzionamento derivante dalle scelte del sistema di controllo.

La seconda parte del capitolo invece riporta la campagna sperimentale svolta per la caratterizzazione del dispositivo. La sperimentazione svolta può essere divisa in due parti. La prima riguarda la capacità di autocentraggio della pinza di manipolazione in termini di precisione, di accuratezza e di campo di lavoro ammissibile. La seconda parte invece riporta la sperimentazione che ha riguardato la mappatura delle principali grandezze fisiche che interessano il ciclo di funzionamento del gripper.

### 4.1 Sistema di controllo

Il QuBu gripper, essendo un sistema da installare all'interno di una cella di produzione robotizzata, deve essere sviluppato in maniera da potersi integrare proprio con la stessa che presenta una propria rete di gestione e comunicazione, Fig. 4-1.

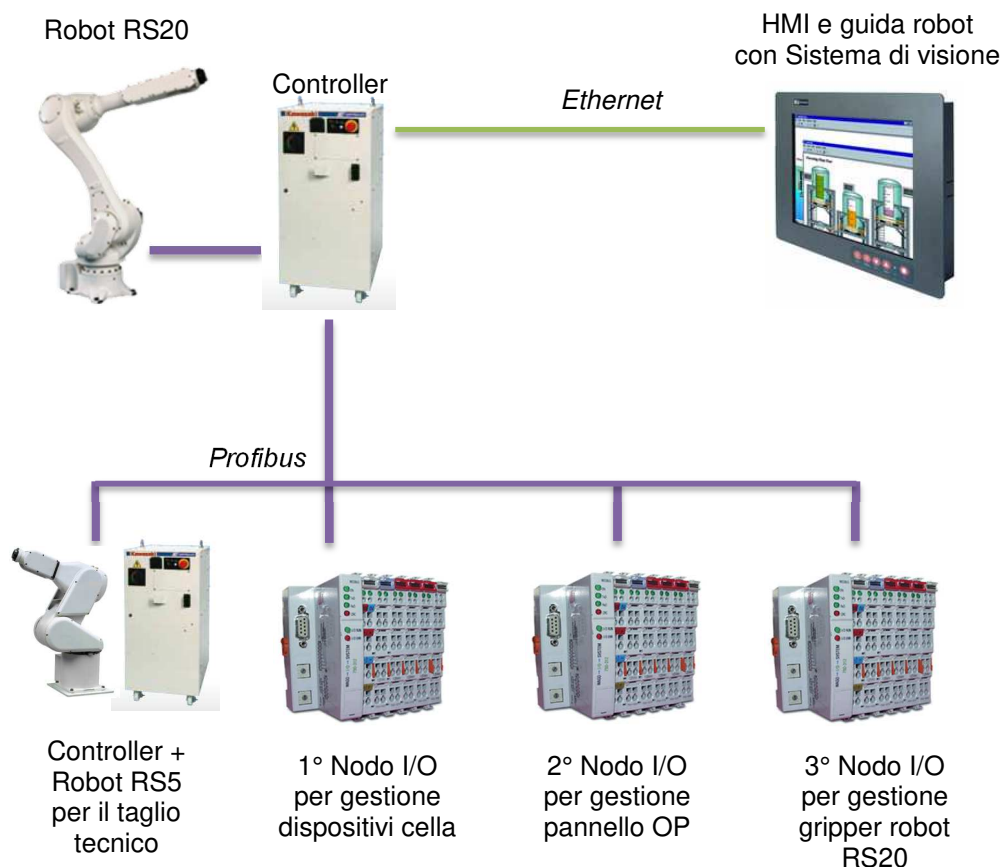


Fig. 4-1: Esempio schema generale del sistema di controllo della cella di produzione robotizzata, [37], [38].

Tutti i dispositivi installati, che realizzano le diverse fasi di lavoro, insieme ai differenti tipi di sensori realizzano una rete integrata che vede un continuo scambio di informazioni e quindi anche di comandi durante l'esecuzione del ciclo di produzione. Questa rete ha un nodo principale, che è il controller del robot, che raccoglie, elabora ed invia i comandi agli altri nodi della rete.

A loro volta, gli altri nodi possono essere dei “semplici” punti di scambio di informazioni in ingresso e in uscita o possono essere uno specifico sottosistema, come un controllore di un robot secondario oppure un sistema di visione che permette di guidare il robot principale durante l'esecuzione delle diverse fasi che compongono un ciclo di produzione.

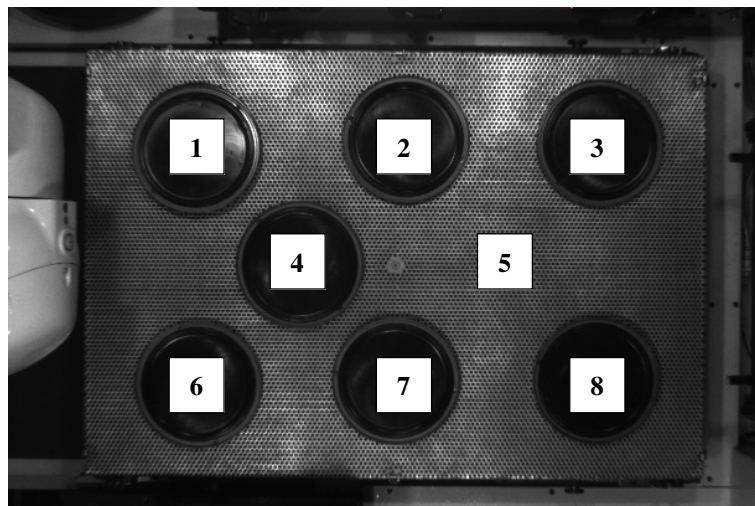
Per quanto riguarda il sistema di visione, questo vede l'interazione di tre specifici sottosistemi della cella e cioè il robot principale, il gripper ed il sistema di visione stesso.

La fase del ciclo di produzione che vede l'interazione di questi tre elementi è quella che interessa la manipolazione degli anelli che vengono rilasciati o che si trovano già sul piano di raffreddamento, Fig. 1-12.

In particolare, l'anello, dopo che è stato afferrato dalla pinza di estrazione del gripper dalla zona di stampaggio, viene rilasciato nella zona di raffreddamento, che nello specifico prevede otto posizioni di lavoro. Questo viene depositato per “caduta libera” e non c'è nessun riferimento meccanico che ne determini la posizione specifica assunta dopo il rilascio. Dopo il raffreddamento dell'anello, questo deve essere prelevato tramite la pinza di manipolazione del gripper e seguire le fasi successive del ciclo di produzione.

Il processo che vede l'esecuzione di queste operazioni viene gestito dal sistema di visione che guida il robot nelle diverse posizioni di lavoro del piano di raffreddamento; posizioni che devono essere libere se è previsto il rilascio di un anello, che devono essere occupate se devo prelevarne uno.

In particolare la Fig. 4-2 mostra il piano di raffreddamento con sette posizioni occupate ed una libera. Il sistema di visione, grazie ad una telecamera installata all'interno della cella, acquisisce l'immagine del piano e questa viene poi elaborata da uno specifico software per determinare quale anello deve essere prelevato e dove andare a rilasciare l'anello afferrato nello stampo.



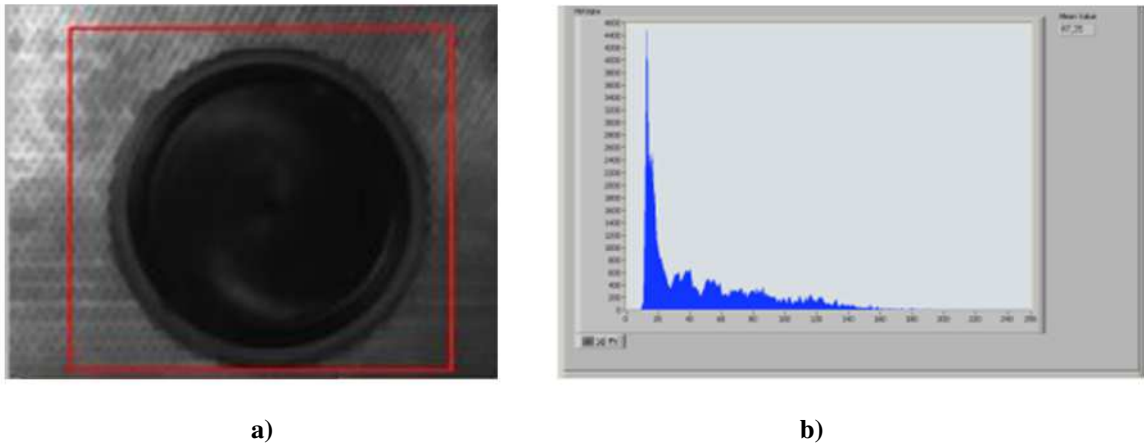
**Fig. 4-2: Immagine del piano di raffreddamento con le otto posizioni di lavoro.**

In particolare, il ciclo di elaborazione dell'immagine prevede che, per ogni posizione di lavoro, venga prima determinata la presenza o meno dell'oggetto.

Questa viene eseguita andando ad elaborare l'istogramma dell'immagine che visualizza lungo l'asse orizzontale la “Luminosità dei Pixel” mentre sull'asse verticale la “Quantità



relativa di Pixel”. In base al valore medio dei pixel che stanno sotto una determinata soglia di luminosità, si determina la presenza o meno dell’oggetto. Se assente, le coordinate del centro di questa posizione vengono inviate al controllore del robot per utilizzarla come posizione di rilascio anello.

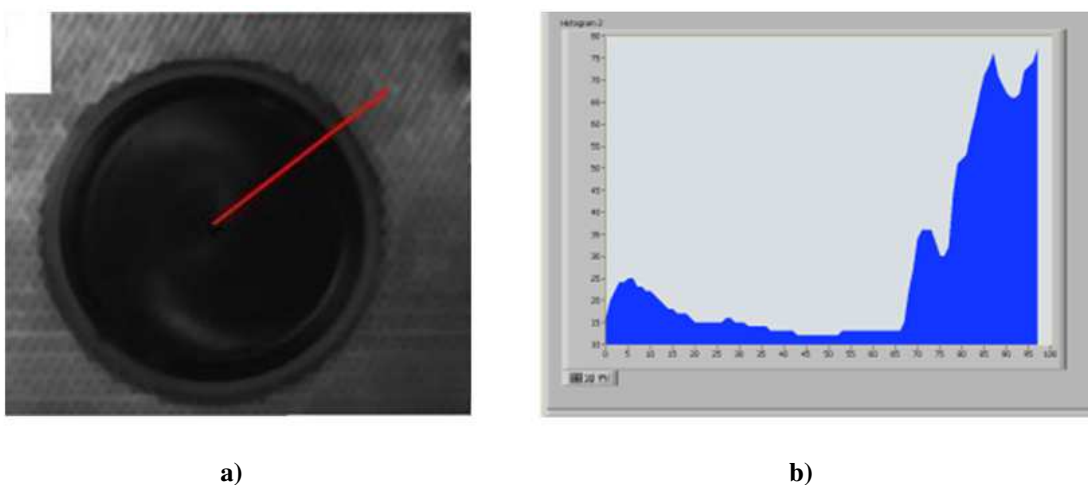


**Fig. 4-3: Esempio elaborazione immagine per la determinazione della presenza oggetto: a) Immagine; b) Istogramma relativo.**

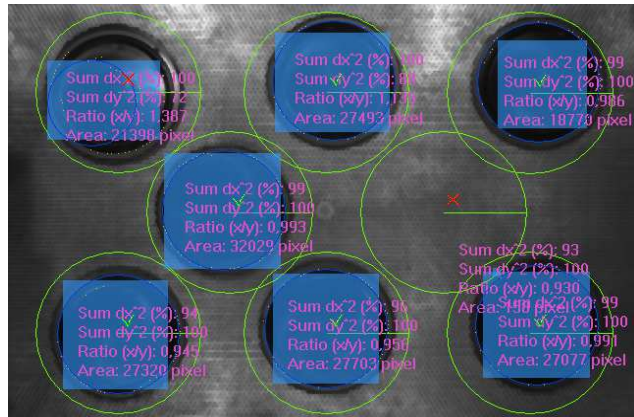
Se invece l’anello è presente, viene determinato il centro dell’oggetto da prelevare e se questo si trova all’interno di un determinato range dimensionale, tali coordinate vengono inviate al controllore del robot per considerarla come posizione di presa, Fig. 4-5. Nel caso in cui il centro dell’oggetto si trovi fuori dal range dimensionale il sistema va in anomalia.

Il centro dell’oggetto viene determinato eseguendo l’elaborazione dell’istogramma delle linee tracciate sull’immagine. L’istogramma di ogni linea tracciata riporta il “Numero identificativo del Pixel” lungo l’asse orizzontale e la relativa “Luminosità” sull’asse verticale. Il numero identificativo del pixel viene attribuito secondo il seguente processo. Al primo pixel della linea viene attribuito il numero “0” mentre al pixel finale della linea viene attribuito il valore “n”.

A questo punto, l’elaborazione degli istogrammi permette di intercettare la posizione dei “Pixel soglia” e quindi dopo aver interpolato tali punti si determina il centro relativo dell’oggetto.



**Fig. 4-4: Esempio elaborazione immagine per la determinazione del centro dell’oggetto: a) Immagine con linea tracciata; b) Istogramma relativo alla linea tracciata.**



**Fig. 4-5: Elaborazione dell'immagine acquisita dalla telecamera.**

L'assenza di un riferimento meccanico nelle posizioni di lavoro del piano di raffreddamento, determina che l'oggetto rilasciato dal gripper per caduta assuma una posizione che è sempre diversa da quella teorica. Questo determina che il requisito di un gripper in grado di autocentrare l'oggetto in presa in maniera precisa e accurata è essenziale per eseguire in maniera efficace il ciclo di lavoro.

#### 4.1.1 Descrizione del sistema di controllo del gripper

Come riportato in Fig. 4-1, il nodo che interessa il gripper e quindi tutte le operazioni eseguite da questo sottosistema, è quello installato nella zona vicino al polso del robot RS20. In particolare, questo nodo che gestisce sia la pinza di estrazione che quella di manipolazione ha una configurazione che prevede l'installazione di moduli fisici I/O che permettono lo scambio delle informazioni provenienti dai sensori e dagli attuatori installati nel gripper. In particolare, oltre all'utilizzo di due moduli di Input digitali e di due moduli di Output digitali è previsto un ulteriore modulo fisico in grado di controllare il nuovo sistema di attuazione installato, Fig. 4-6.

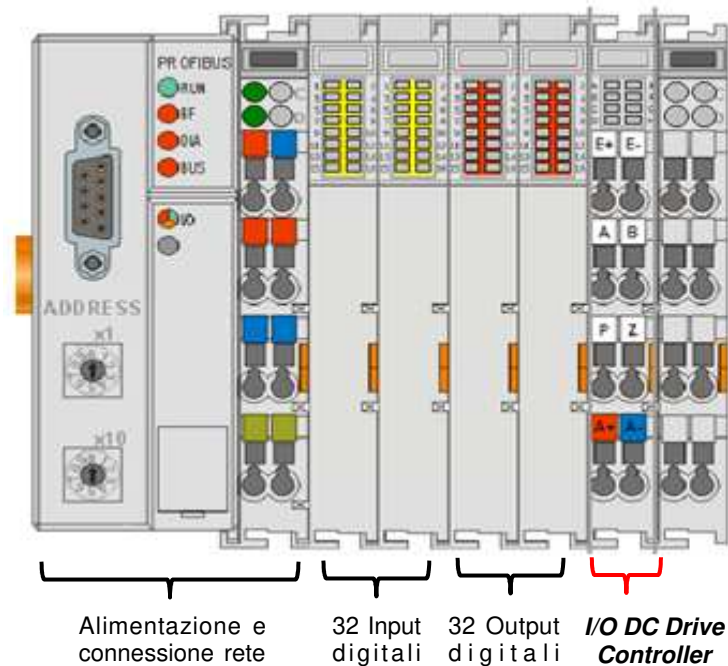


Fig. 4-6: Configurazione modificata del nodo per la gestione del gripper, [37].

Per quanto riguarda il modulo di gestione del nuovo sistema di attuazione della pinza di manipolazione, questo permette di modulare l'alimentazione del motore, di ricevere i segnali provenienti da un encoder e di ricevere un eventuale segnale di "Preset" da un sensore di tipo digitale.

Il segnale di "Preset" è utilizzato per individuare una posizione di riferimento e quindi per determinare in maniera univoca la posizione istantanea delle griffe.

Lo schema è riportato in Fig. 4-7 e mostra le connessioni implementate per il controllo della pinza di manipolazione. Tale modulo, in funzione dei parametri di funzionamento impostati, permette di gestire il posizionamento dell'attuatore collegato secondo una specifica legge del moto. Per alimentare l'encoder è stato installato anche un convertitore DC/DC 24/5 V.

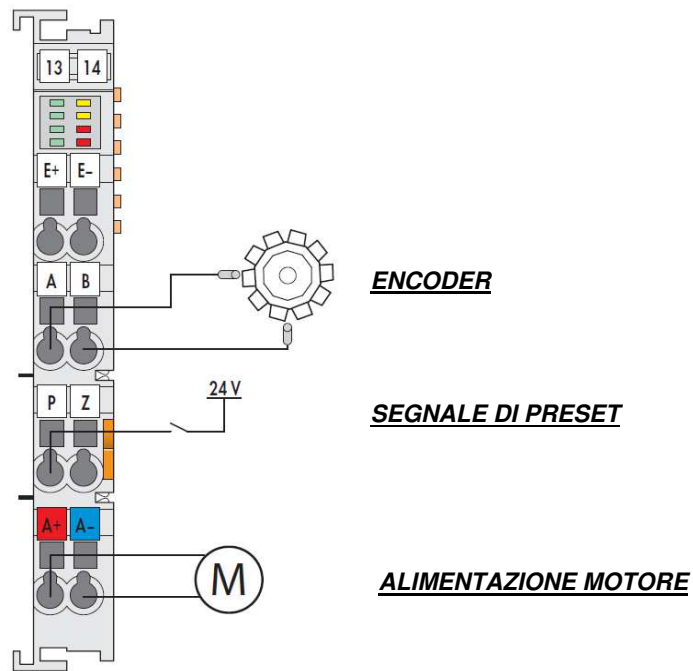


Fig. 4-7: Schema del modulo “I/O DC Drive Controller” integrato nel nodo per la gestione del gripper, [37].

#### 4.1.2 Descrizione del ciclo di funzionamento del gripper

In questo paragrafo viene riportata la descrizione del ciclo di funzionamento del gripper, ed in particolare della pinza di manipolazione.

Una fase importante del processo di definizione del sistema di controllo della pinza di manipolazione è quella che ha riguardato le principali grandezze fisiche coinvolte durante l’esecuzione del ciclo di presa, Fig. 4-8, o di rilascio, Fig. 4-9 ed in particolare quali grandezze e come misurare/monitorare quelle considerate indispensabili. Queste, vista l’applicazione oggetto di tesi, sono la posizione e la velocità delle griffe e la forza di presa applicata.

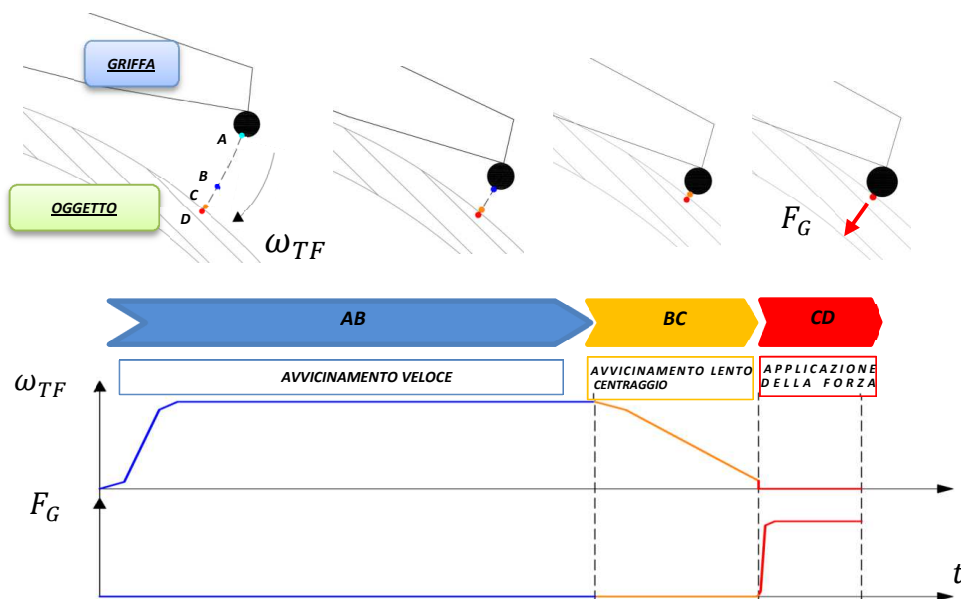
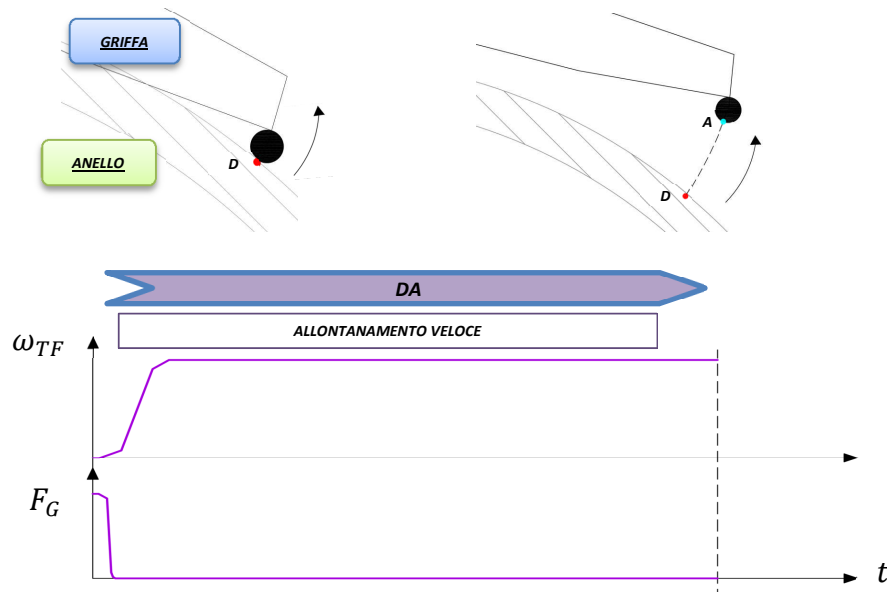


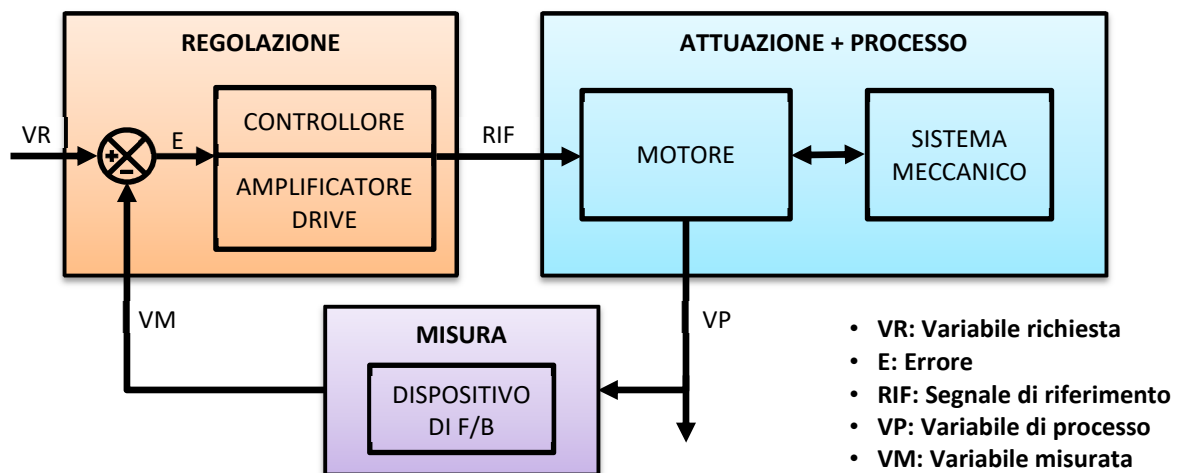
Fig. 4-8: Fasi del ciclo di presa e andamento grandezze fisiche principali, velocità angolare delle griffe  $\omega_{TF}$  e Forza di presa  $F_G$ .



**Fig. 4-9: Fasi del ciclo di rilascio e andamento grandezze fisiche principali, velocità angolare delle griffe  $\omega_{TF}$  e Forza di presa  $F_G$ .**

Riguardo alla manipolazione degli anelli, questi presentano una specifica forma geometrica, con una propria rigidezza strutturale all'interno di un determinato ambiente di lavoro. Se si considera che il gripper, essendo inserito in un ambito produttivo, dovrà essere in grado di eseguire un elevato numero di cicli in maniera affidabile e robusta e che la manipolazione deve comunque essere eseguita in maniera stabile senza causare danneggiamenti locali o estesi al prodotto afferrato, la scelta delle informazioni che riguardano sia la configurazione interna che quelle che derivano dall'interazione del gripper con l'ambiente esterno è appunto ricaduta su uno specifico sistema di controllo che è in grado di eseguire il ciclo di presa o di rilascio secondo uno specifico ciclo di funzionamento.

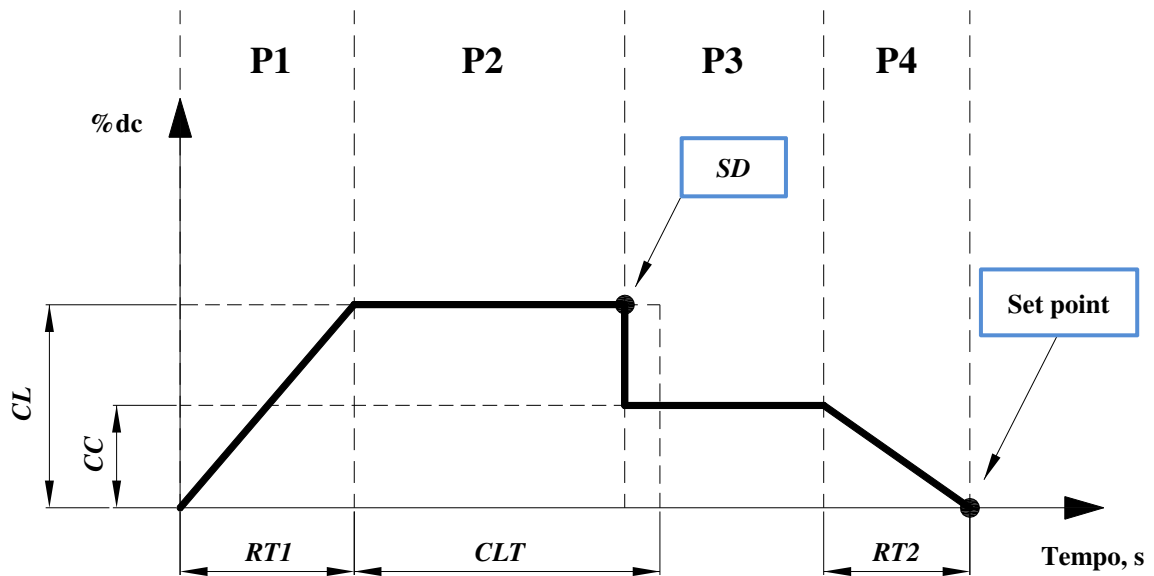
Questo sistema infatti è grado di controllare la posizione e la velocità di movimentazione delle griffe, grazie all'utilizzo di un encoder sull'albero motore, mentre non è stato previsto l'utilizzo di particolari sensori in grado di controllare la forza applicata all'oggetto afferrato. Tuttavia, questo ultimo aspetto, grazie al sistema scelto, vede un monitoraggio in anello aperto di una grandezza che è strettamente legata alla forza di presa applicata durante la presa e che è per l'appunto la corrente assorbita dal motore.



**Fig. 4-10: Schema generale del sistema di controllo della pinza di manipolazione.**

Riguardo allo schema riportato in Fig. 4-10, la variabile misurata è la posizione dell'attuatore, che grazie ad un fattore di conversione, permette di ricavare la posizione delle griffe. Vi è una ulteriore grandezza misurata all'interno del sistema di regolazione e che è, per l'appunto, la corrente assorbita dal motore durante il funzionamento dello stesso. In questo modo, limitando la corrente assorbita, a meno di un fattore di conversione, è possibile limitare la forza di presa applicata durante la presa.

In Fig. 4-11 viene riportato lo schema che riporta l'esempio del ciclo di funzionamento della pinza di manipolazione realizzato dal sistema di controllo installato.



**Fig. 4-11: Esempio generale del ciclo di funzionamento della pinza di manipolazione.**

In particolare la grandezza controllata dal modulo installato è il "duty cycle" del PWM per l'alimentazione del motore. Questo è dipendente dai parametri di funzionamento del controllore. In particolare, alcuni parametri gestiscono la variabile indipendente tempo mentre altri gestiscono la variabile indipendente posizione.

La fase P1 e la fase P2 del ciclo di presa interessano l'avvicinamento veloce all'oggetto. La fase P3 e poi la fase P4 determinano invece le fasi del ciclo di presa che interessano prima l'avvicinamento lento, dopo l'autocentraggio ed infine l'applicazione della forza di presa. La descrizione dei parametri è riportata in Tab. 4-1.

## 4.2 Prove sperimentali

Questa parte del documento descrive la campagna di prove sperimentali eseguite per la caratterizzazione della pinza di manipolazione. In particolare sono state eseguite due diverse tipologie di prove sperimentali per analizzare i principali aspetti che interessano il funzionamento della pinza.

Sotto viene riportato l'elenco delle prove eseguite:

- Prove di “Tipo A”: Prove di Autocentraggio
  - o *Tipo A.1*: Prove di ripetibilità di presa
  - o *Tipo A.2*: Valutazione della capacità di autocentraggio
- Prove di “Tipo B”: Caratterizzazione della pinza di manipolazione
  - o *Tipo B.1*: Analisi dei parametri di funzionamento del controllore
  - o *Tipo B.2*: Processo di caratterizzazione della pinza di manipolazione

Le prove di “Tipo A” hanno interessato la capacità di autocentraggio della pinza. Nello specifico, quelle di *Tipo A.1* hanno riguardato la ripetibilità di presa della pinza di manipolazione. Le prove di *Tipo A.2* hanno invece analizzato l'area di lavoro in maniera da definire l'area che permette una presa autocentrante in funzione delle dimensioni proprie dell'oggetto da afferrare.

Per quanto riguarda le prove di “Tipo B”, un primo set di prove e cioè quelle di *Tipo B.1*, hanno permesso di analizzare l'influenza dei parametri di funzionamento del controllore sul ciclo di presa eseguito dalla pinza. Le prove di *Tipo B.2* hanno invece interessato la caratterizzazione delle principali grandezze che interessano la pinza durante la fase di presa o di rilascio. Queste ultime prove hanno permesso di definire il processo di definizione dei parametri di set-up del controllore in funzione del tipo di oggetto da manipolare.

### 4.2.1 Prove di “Tipo A”: Prove di Autocentraggio

Lo scopo di questa tipologia di prove è quello di valutare due diversi aspetti che interessano il gripper durante l'operazione di presa di un oggetto. Il primo aspetto riguarda la valutazione della ripetibilità di presa; il secondo aspetto riguarda la capacità propria di autocentraggio del gripper. La Fig. 4-12 mostra il banco prova utilizzato per la caratterizzazione della ripetibilità di presa della pinza di manipolazione.



Fig. 4-12: Foto del banco prova per le prove di “Tipo A.1”

Il banco permette di misurare lo scostamento lungo l'asse "x" e lungo l'asse "y" dell'oggetto afferrato dopo l'esecuzione di un ciclo sequenziale di presa-rilascio-presenza, Fig. 4-13. Gli strumenti di misura utilizzati sono due comparatori meccanici che hanno una risoluzione di 0,01 mm.

#### 4.2.2 Esecuzione delle prove e analisi dei risultati

Il progetto e la relativa realizzazione delle prove di *Tipo A.1* ha visto l'esecuzione del seguente procedimento. Come primo passo, l'oggetto da afferrare è stato posizionato al centro della tavola di appoggio. Successivamente, dopo aver afferrato l'oggetto con la pinza di manipolazione, i due comparatori meccanici sono stati posizionati lungo due assi principali, ortogonali fra loro e passanti per il centro dell'oggetto. Il posizionamento dei comparatori è stato realizzato grazie ai relativi supporti posizionati su due slitte lineari. Eseguito il posizionamento dei comparatori, è seguita la fase di misura che ha visto le seguenti fasi; dopo il rilascio dell'oggetto nel piano di appoggio, poiché non vi è nessun riferimento meccanico, questo ha assunto una posizione indeterminata. A questo punto l'oggetto è stato nuovamente afferrato e quindi si è potuto misurare lo scostamento lungo i due assi di riferimento rispetto alla posizione precedente. Questa ultima fase del ciclo di misura è stata poi ripetuta un numero determinato di volte.

Le prove sono state eseguite su tre oggetti che presentano un diverso diametro esterno. In particolare i diametri considerati sono:  $\text{Ød}_1=100$  mm;  $\text{Ød}_2=1800$  mm;  $\text{Ød}_3=250$  mm.

Per ogni oggetto sono stati eseguiti 20 cicli di misura dello scostamento lungo i due assi di riferimento.

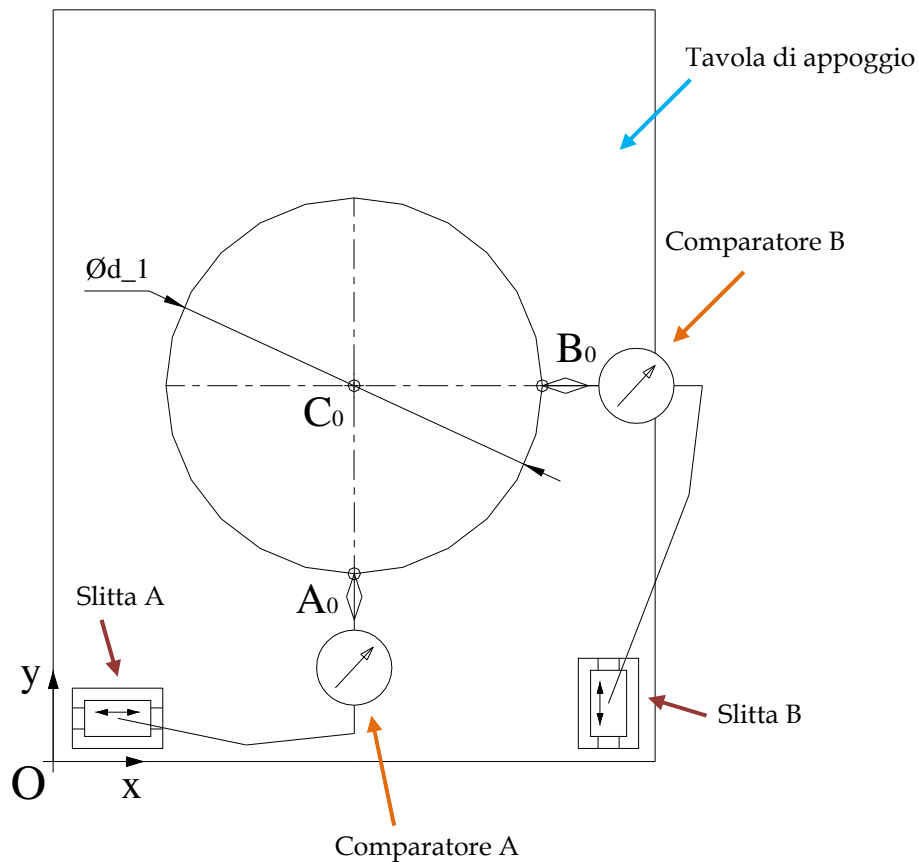


Fig. 4-13: Schema banco prova per l'autocentraggio.



La Fig. 4-14 a) mostra la configurazione iniziale del sistema di misura, dopo aver posizionato i due comparatori. Fig. 4-14 b) e la Fig. 4-15 invece mostrano la posizione dell'oggetto dopo l'i-esimo ciclo di presa. Sono evidenziati gli scostamenti assiali misurati dai comparatori.

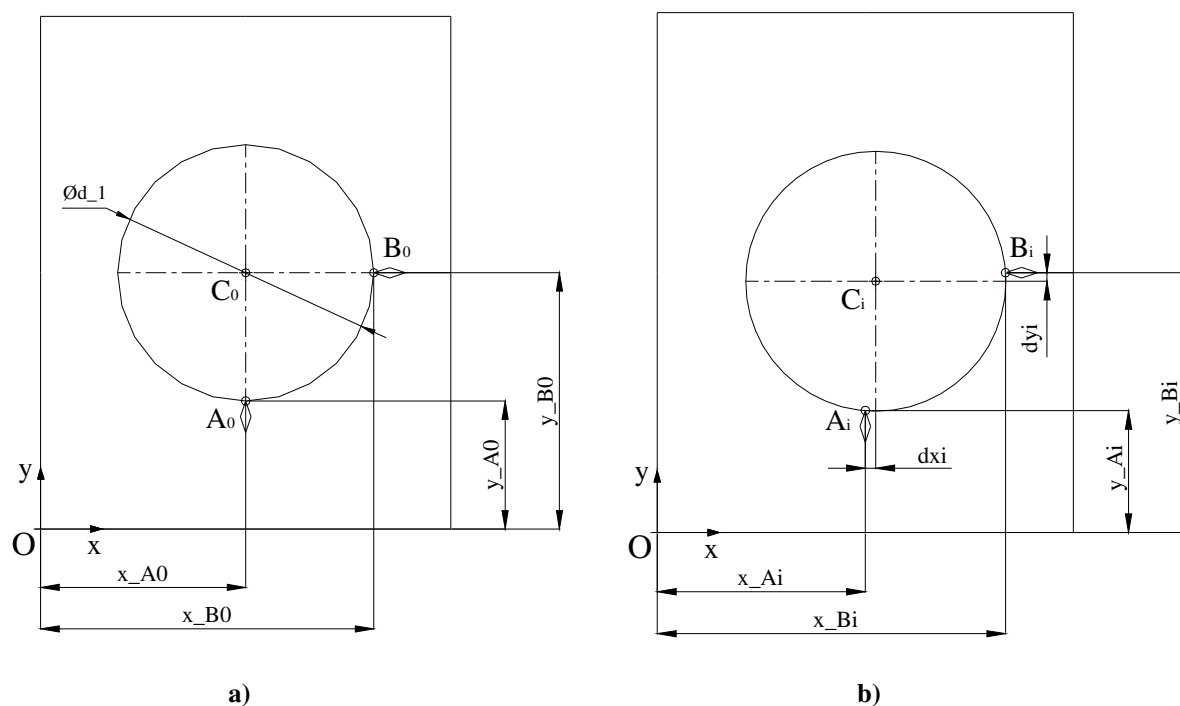


Fig. 4-14: a) Posizione dell'oggetto iniziale; b) Posizione dell'oggetto dopo l'i-esima presa.

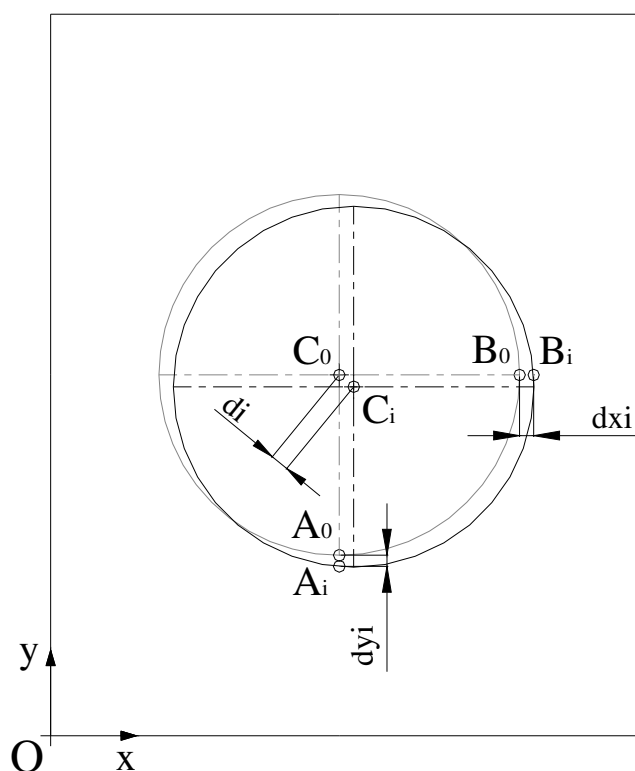
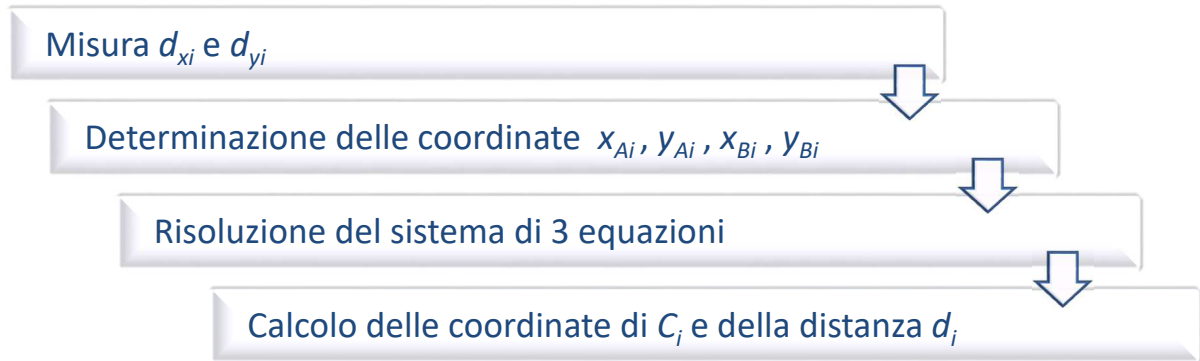


Fig. 4-15: Confronto tra la posizione iniziale e l'i-esima dopo la presa.

Eseguita la misura degli scostamenti lungo i due assi principali, l'analisi dei dati ha visto l'esecuzione di un processo numerico per la determinazione del centro dell'oggetto per ogni i-esima presa, Fig. 4-16.



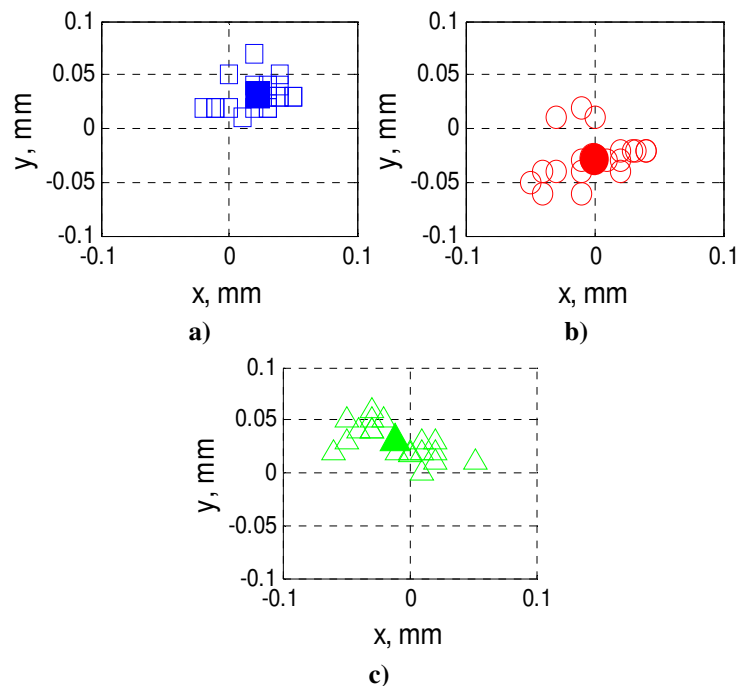
**Fig. 4-16: Processo numerico per il calcolo del centro dell'oggetto per ogni i-esima presa.**

Il sistema di tre equazioni da risolvere numericamente è quello riportato in Eq. 4-1.

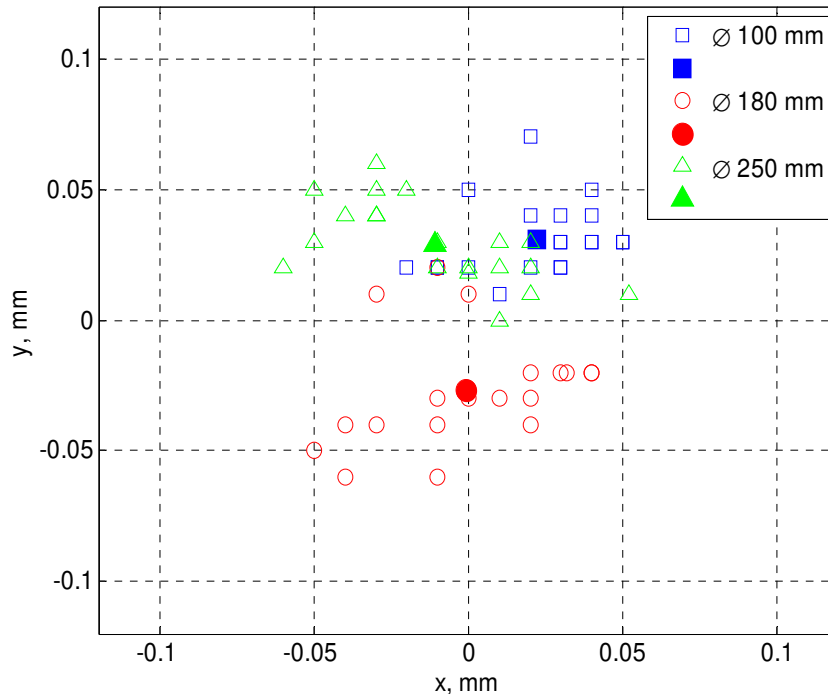
$$\begin{cases} x_{Ai}^2 + y_{Ai}^2 - 2a_i x_{Ai} - 2b_i y_{Ai} + c_i = 0 \\ x_{Bi}^2 + y_{Bi}^2 - 2a_i x_{Bi} - 2b_i y_{Bi} + c_i = 0 \\ r = a_i^2 + b_i^2 - c_i \end{cases} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

Determinata la posizione del centro dell'oggetto dopo ogni ciclo di presa e determinata la distanza relativa tra il centro i-esimo e quello di partenza, si è proceduti con l'analisi dei risultati.

La Fig. 4-17 riporta la posizione relativa dei centri e la posizione del centro medio dei centri  $C_i$ , per ognuno dei tre oggetti considerati.



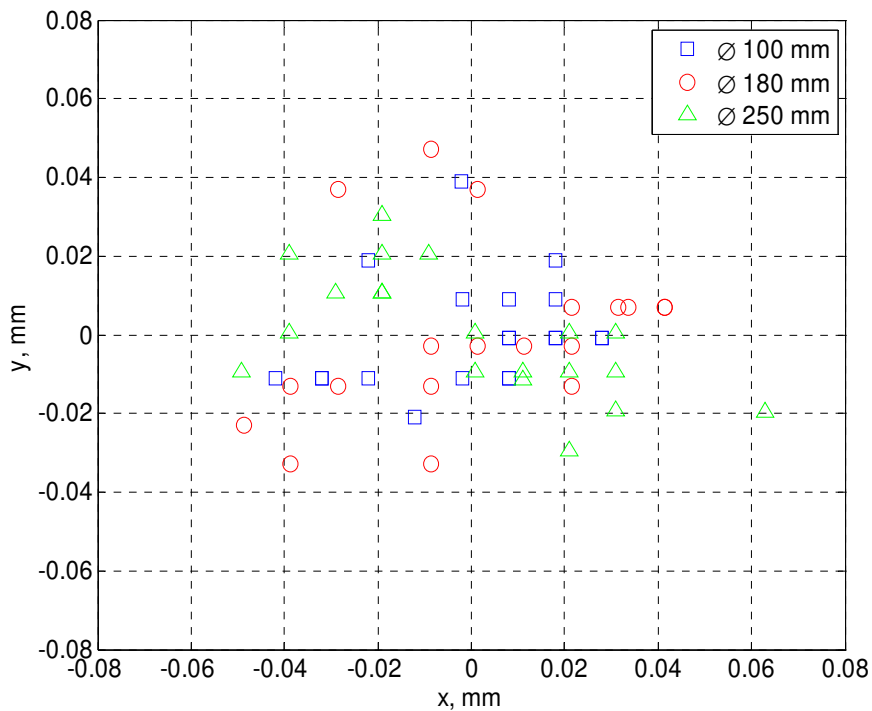
**Fig. 4-17: Posizione relativa dei centri "Ci": a) Ød\_1=100 mm; b) Ød\_2=180 mm; c) Ød\_3=250 mm.**



**Fig. 4-18: Distribuzione dei centri  $C_i$  nel piano di lavoro.**

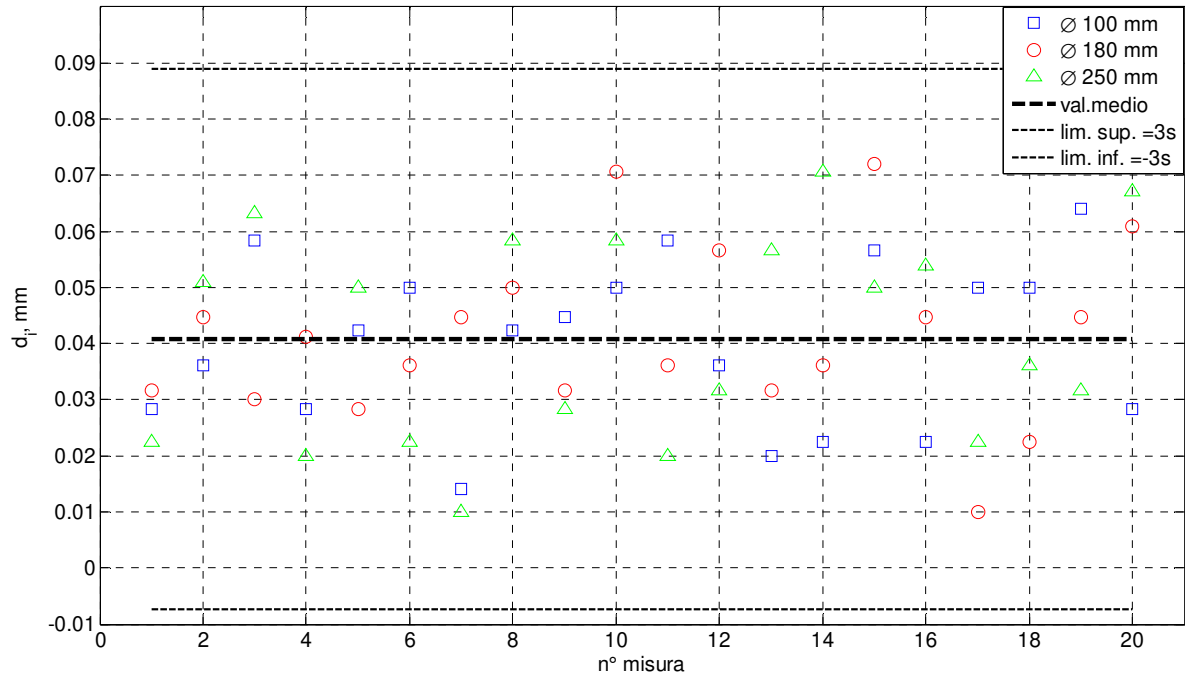
La distribuzione dei punti  $C_i$  e la posizione del centro medio di ogni serie di dati vede che questi ultimi sono posizionati in punti diversi del piano. Questo effetto può essere dovuto al non perfetto posizionamento relativo delle tre griffe.

La Fig. 4-19 invece riporta la distribuzione dei centri, riferita per ogni oggetto considerato, centrata rispetto al valore medio della serie considerata. In questo caso viene evidenziato come sarebbe la distribuzione dei centri se fosse nullo l'errore dovuto al non corretto posizionamento relativo delle griffe.



**Fig. 4-19: Posizione dei centri "centrata".**

La Fig. 4-20 riporta invece la distanza relativa dei centri calcolati rispetto a quello iniziale. Il valore medio di tutte le misure eseguite è  $\bar{x} = 0,041 \text{ mm}$  mentre la deviazione standard è  $s = 0,0161 \text{ mm}$ . Il limite superiore e quello inferiore sono posizionati tre deviazioni standard al di sopra e al di sotto del valore medio.



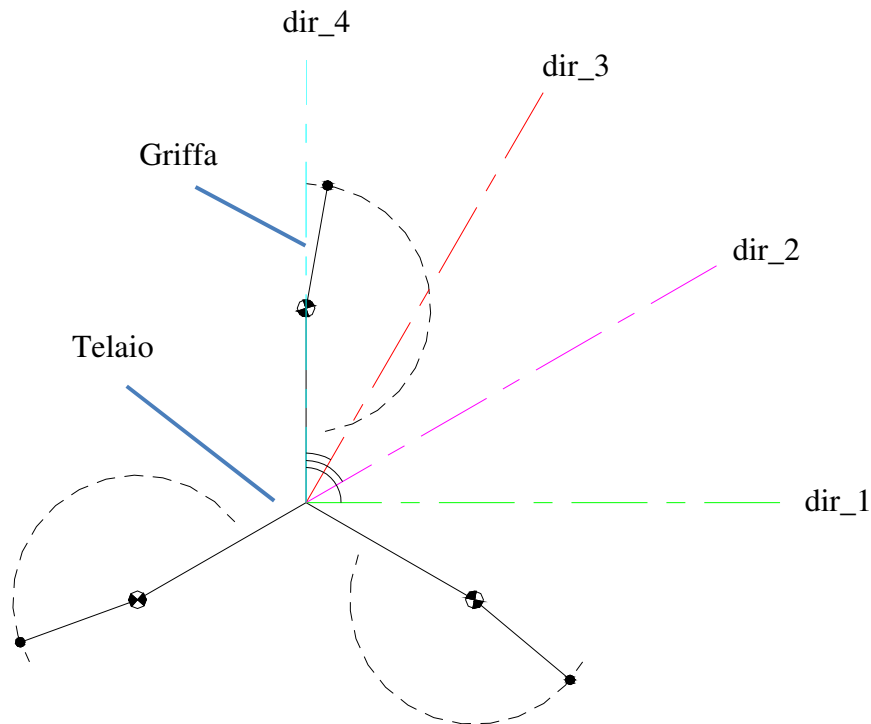
**Fig. 4-20: Distanza relativa tra i centri "d".**

Oltre a valutare la ripetibilità della presa, con le prove di *Tipo A.2* è stato analizzato l'aspetto che riguarda la capacità propria di autocentraggio del gripper.

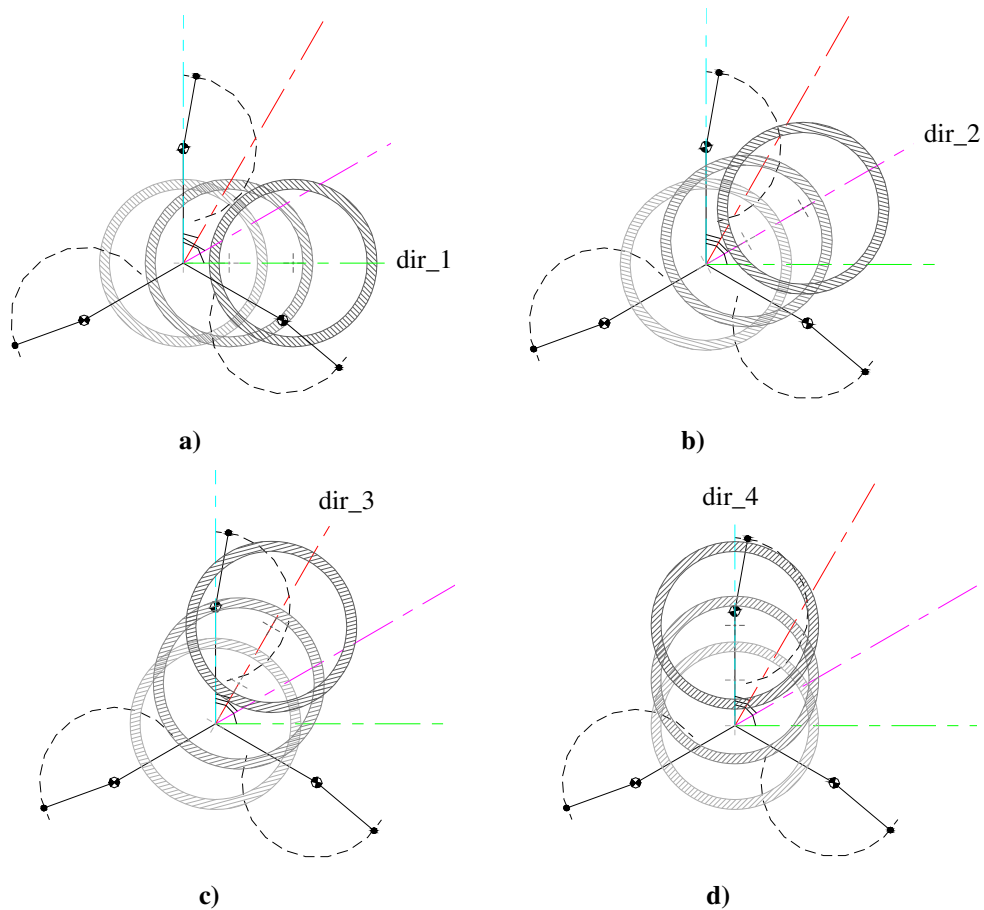
Per valutare questo aspetto, è stato progettato un metodo che ha il seguente procedimento di esecuzione. Il primo passo consiste nel posizionare l'oggetto al centro del piano di lavoro. Successivamente si procede spostando l'oggetto di una determinata distanza lungo una direzione di riferimento. A questo punto si procede con la presa dell'oggetto. Se questo viene riportato al centro ed afferrato in maniera corretta si procede spostando nuovamente l'oggetto, sempre lungo l'asse considerato, di una distanza maggiore rispetto alla precedente. Se ripetendo la presa, questa volta l'oggetto viene afferrato con due griffe, la nuova distanza determina il limite di funzionamento di autocentraggio del gripper. Aumentando ancora la distanza, se l'oggetto non viene più afferrato viene a determinarsi il limite di presa del gripper.

Le prove sono state eseguite su oggetti che presentano un diverso diametro esterno.

Per quanto riguarda le semirette che determinano il luogo dei punti dei centri degli oggetti prima che venga eseguita l'operazione di autocentratura, ne sono state individuate quattro e sfasate tra loro di  $30^\circ$ , Fig. 4-21.

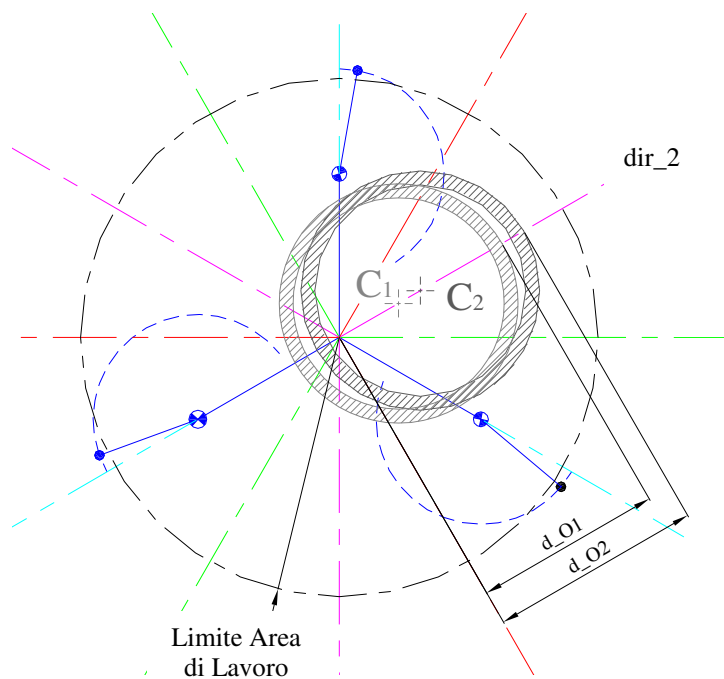


**Fig. 4-21:** Schema di misura per la valutazione dell'autocentraggio.



**Fig. 4-22: Posizioni relative dell'anello lungo le direzioni di misura considerate: a) dir\_1; b) dir\_2; c) dir\_3; d) dir\_4.**

Grazie alla simmetria angolare della struttura, le quattro direzioni individuate sono poi ripetute su tutto il piano di lavoro individuando 12 semirette.



**Fig. 4-23: Esempio di misura della distanza dei centri per due posizioni lungo la direzione "dir\_2".**

L'area di lavoro considerata per la valutazione della capacità di autocentraggio è quella che presenta un raggio pari a  $r_{AL}=130$  mm e che è appunto l'area di ingombro massimo delle griffe della pinza.

Per ogni oggetto considerato, che presenta uno specifico diametro esterno, sono state individuate tre differenti aree di presa.

1. Area "Autocentraggio OK"
2. Area "Autocentraggio KO"
3. Area "No presa"

La prima è quella che individua l'area dove è possibile eseguire la presa eseguendo l'autocentraggio dell'oggetto. Questa è l'area delimitata dalla linea di colore verde. La seconda è quella che individua il campo di lavoro dove è possibile afferrare l'oggetto ma senza eseguire l'autocentraggio. Questa è l'area delimitata dalle linee di colore verde e arancione. Infine, la terza area è quella dove la pinza non riesce ad afferrare l'oggetto considerato. Quest'ultima è l'area delimitata dalle linee di colore arancione e rosso.

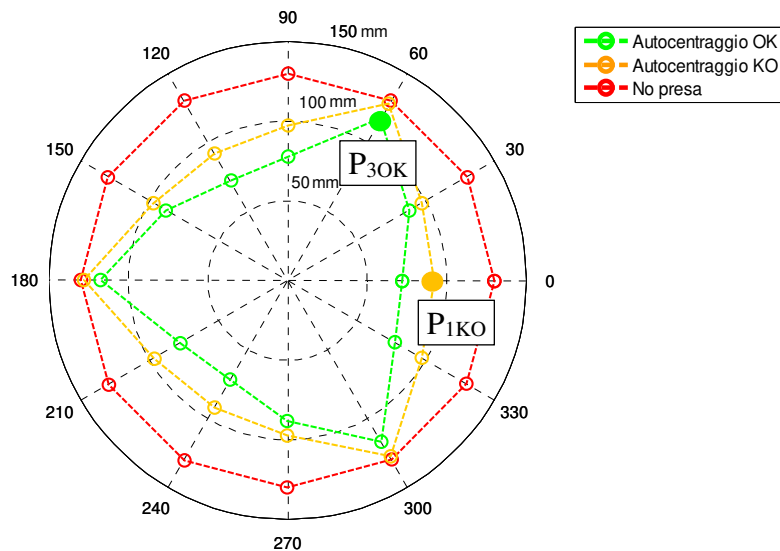


Fig. 4-24: Aree di lavoro per oggetto con  $r_o=50$  mm.

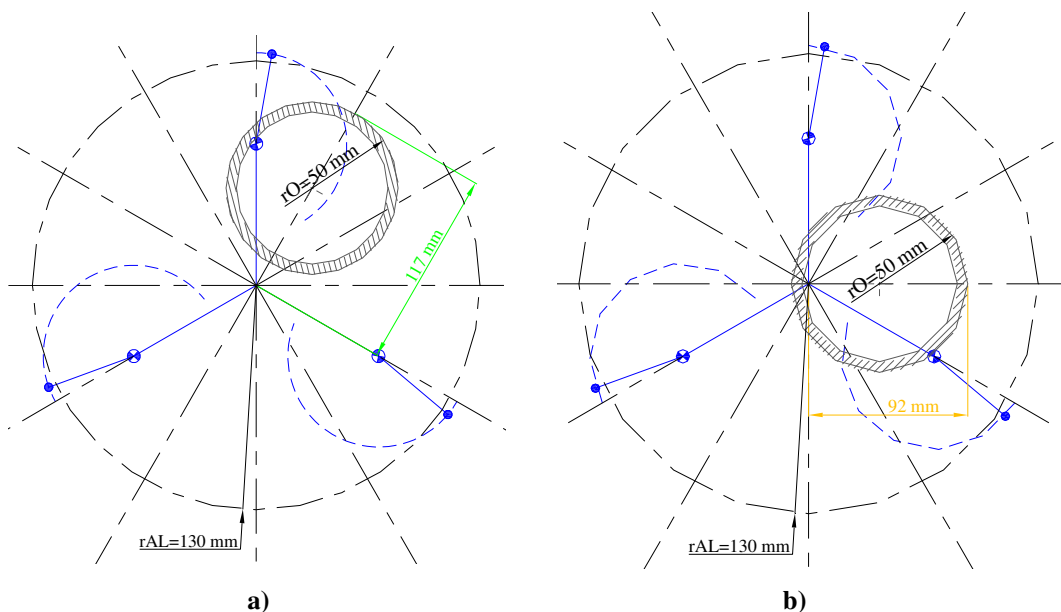


Fig. 4-25: Posizione relativa dell'oggetto con  $r_o=50$  mm: a) Punto  $P_{3OK}$ ; b) Punto  $P_{1KO}$ .

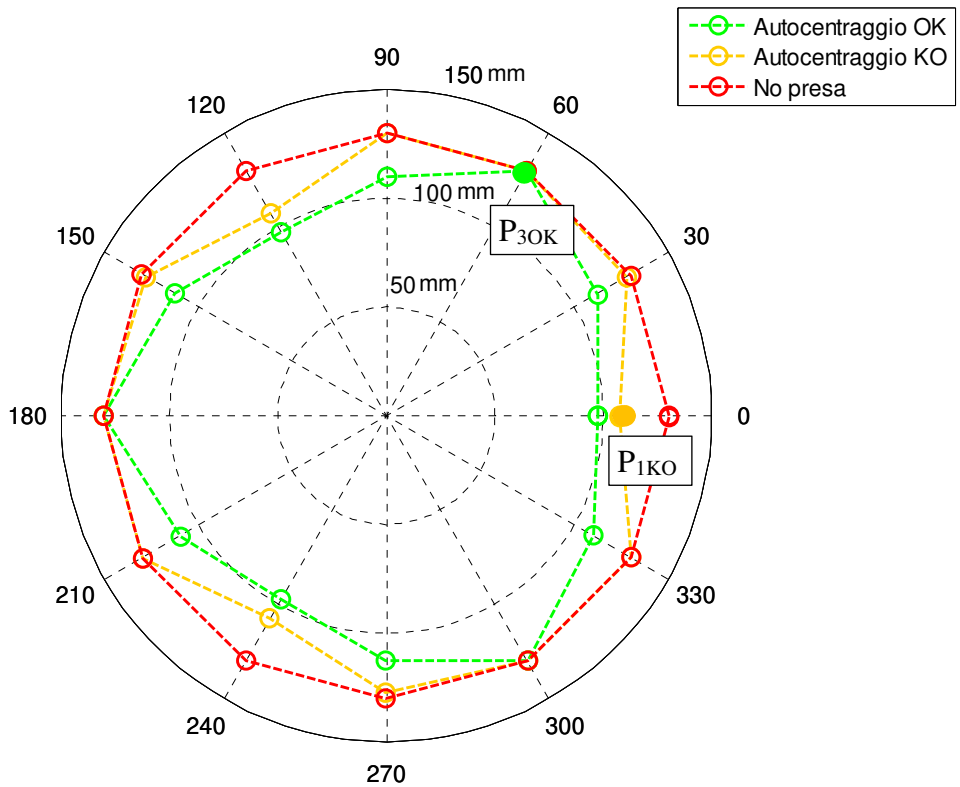


Fig. 4-26: Aree di lavoro per oggetto con  $r_0=65$  mm.

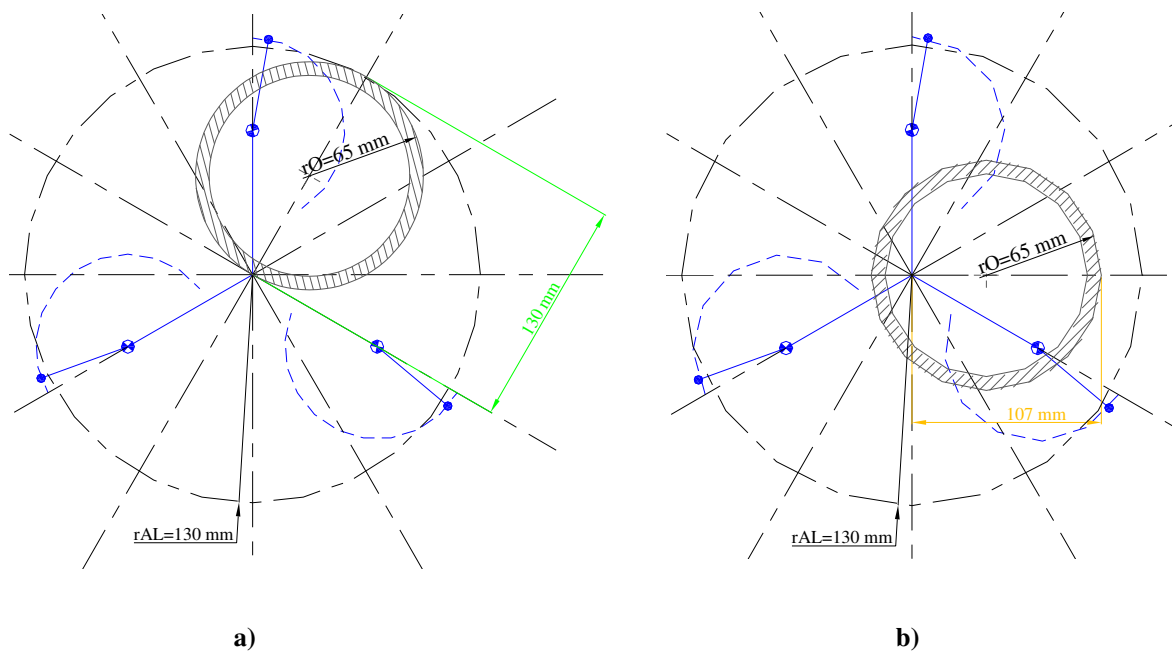


Fig. 4-27: Posizione relativa dell'oggetto con  $r_0=65$  mm: a) Punto  $P_{3OK}$ ; b) Punto  $P_{1KO}$ .



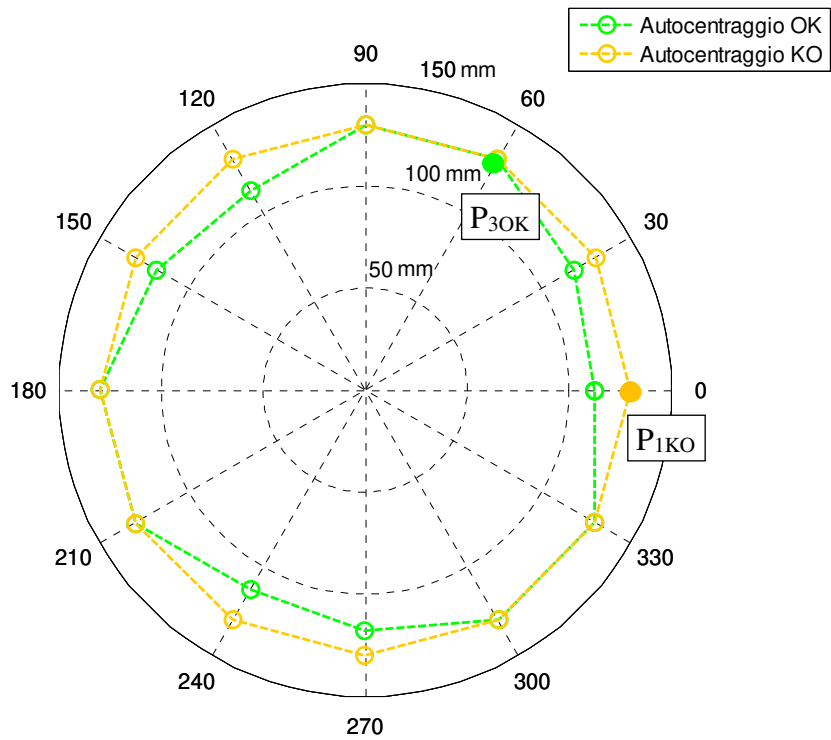


Fig. 4-28: Aree di lavoro per oggetto con  $r_o=75$  mm.

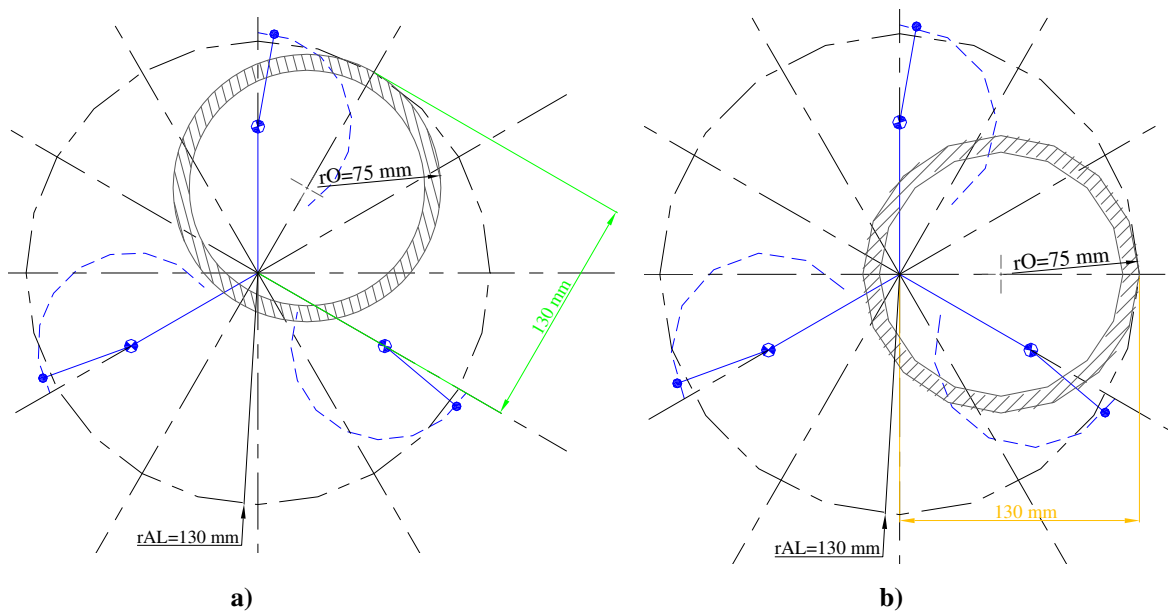


Fig. 4-29: Posizione relativa dell'oggetto con  $r_o=65$  mm: a) Punto  $P_{3OK}$ ; b) Punto  $P_{0KO}$ .

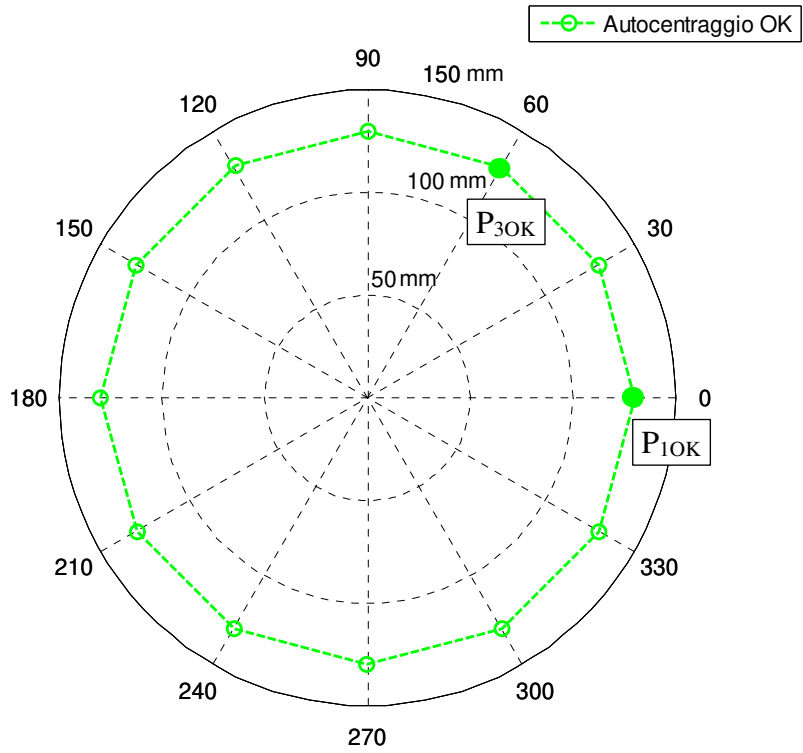


Fig. 4-30: Aree di lavoro per oggetto con  $r_o=90$  mm.

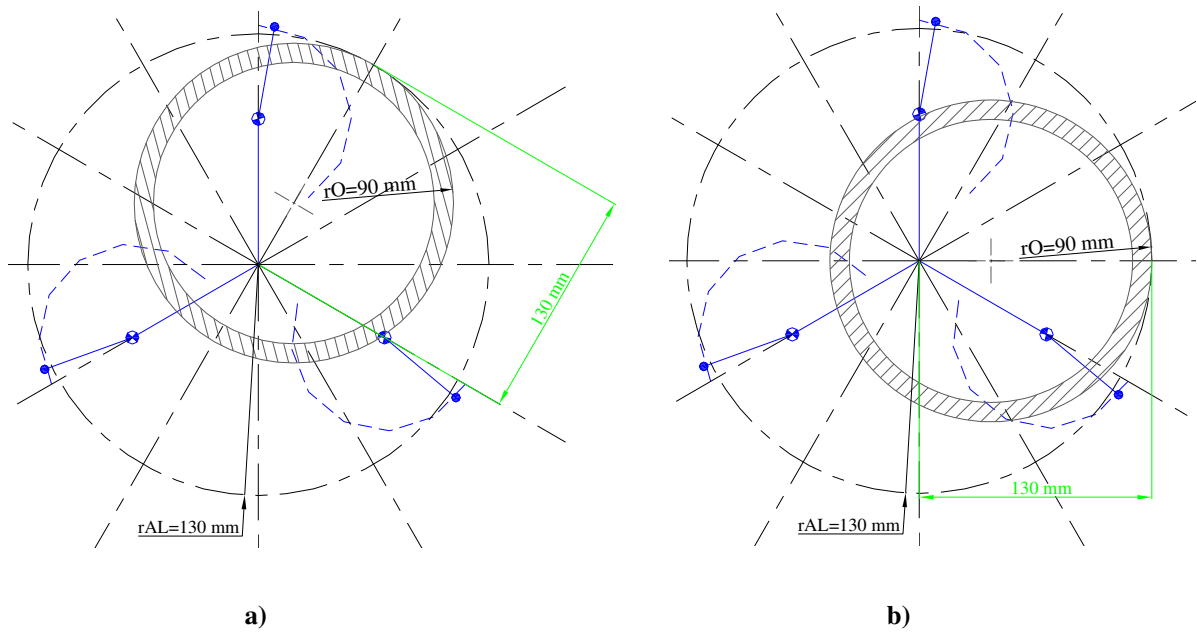
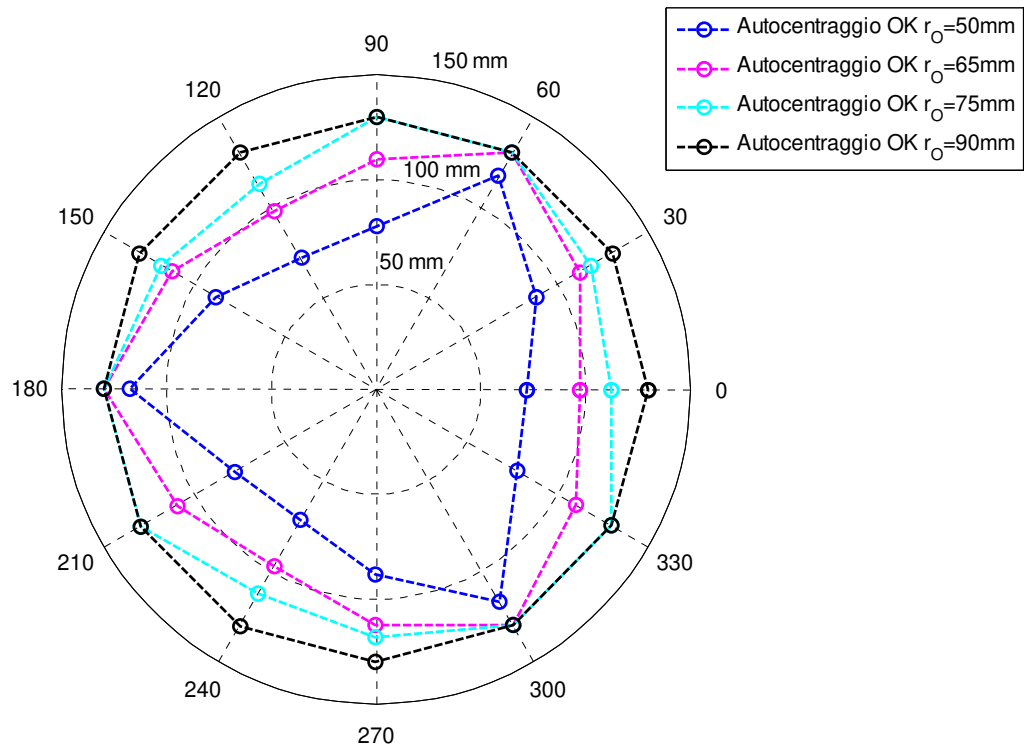


Fig. 4-31: Posizione relativa dell'oggetto con  $r_o=90$  mm: a) Punto  $P_{3OK}$ ; b) Punto  $P_{0KO}$ .

La Fig. 4-32 invece riporta come cambia l'area in cui è possibile eseguire la presa dell'oggetto in maniera autocentrante al crescere del raggio dell'oggetto considerato.



**Fig. 4-32: Area di lavoro "Autocentraggio OK" per oggetti con raggio esterno crescente.**

Un aspetto che caratterizza il gripper e che è stato evidenziato dalle prove descritte in questo paragrafo, è quello che riguarda l'ingombro in pianta. Infatti, pur presentando un'area in pianta che può essere più piccola dell'oggetto più grande da afferrare consente al tempo stesso un ampio range dimensionale degli oggetti manipolabili.

### 4.2.3 Prove di “Tipo B”: Caratterizzazione della pinza di manipolazione

L’obiettivo di questa tipologia di prove definite di “*Tipo B*” è quello di caratterizzare il funzionamento della pinza di manipolazione per ottenere la configurazione dei parametri di set-up in funzione del tipo di oggetto da manipolare.

La prima parte di questa tipologia di prove, le prove di *Tipo B.1*, ha interessato l’influenza dei principali parametri del controllore installato sul funzionamento del gripper ed in particolare come questi condizionano il ciclo di presa e di rilascio ipotizzato.

La seconda parte delle prove, quelle di *Tipo B.2*, ha invece interessato la caratterizzazione delle principali grandezze che interessano la pinza durante la fase di presa o di rilascio. Quest’ultima categoria di prove infatti permette di definire i parametri di set-up del controllore in funzione del tipo di oggetto da afferrare.

La Fig. 4-33 riporta lo schema generale del set-up di prova. In particolare sono evidenziati i principali componenti costituenti la strumentazione di misura e le grandezze fisiche misurate durante l’esecuzione delle prove.

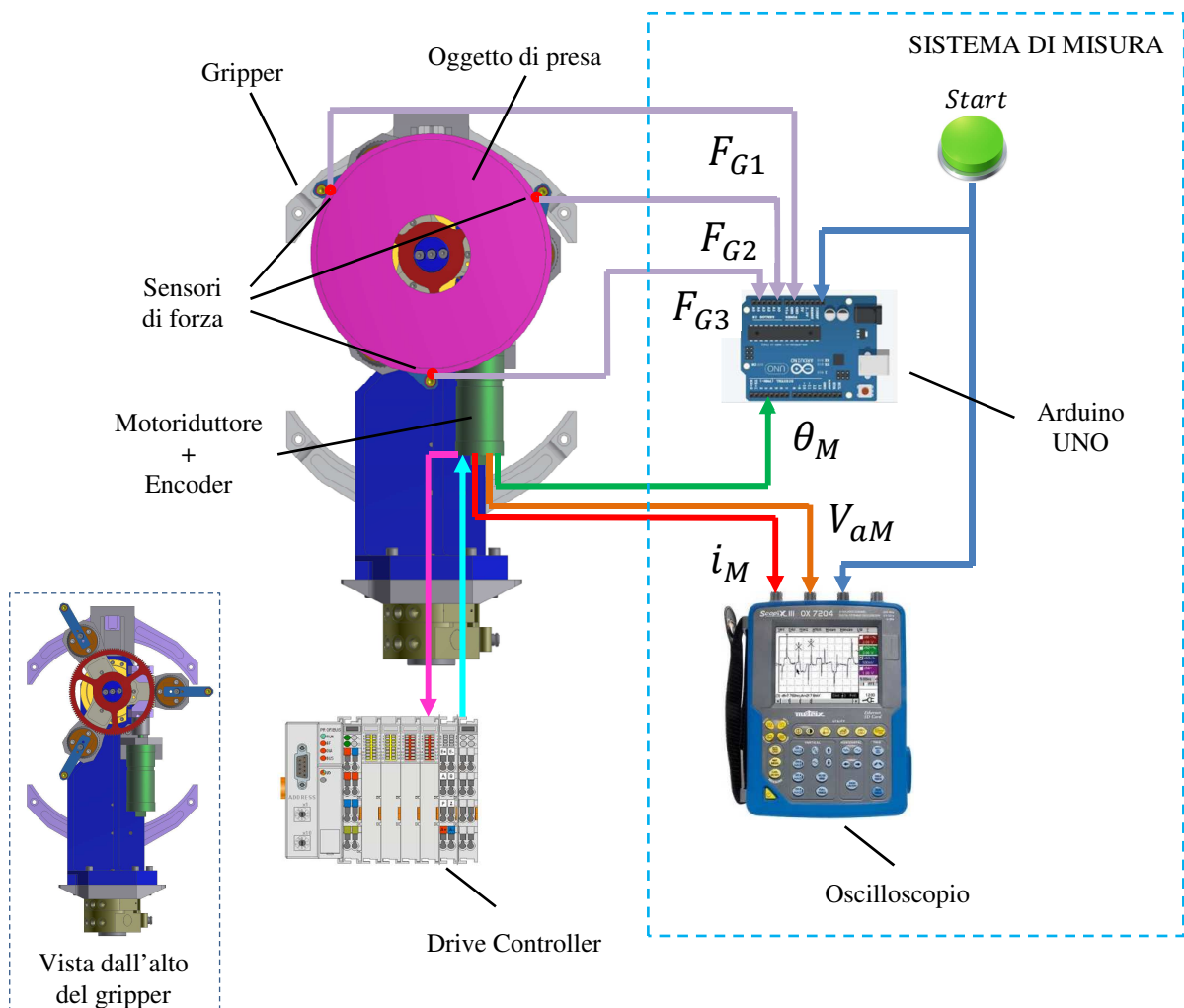


Fig. 4-33: Schema generale set-up di prova.

La strumentazione di misura installata per l'esecuzione delle misure prevedeva i seguenti componenti:

- Oscilloscopio "SCOPIX II 0X7104" con relativo software "SX-Metro", [39]
- Microcontrollore "Arduino UNO" con relativo software "Arduino 1.6.5", [40]
- n° 3 Sensori di forza "FlexiForce® A301", [31]
- n° 3 Resistori 11 kohm ¼W 5% - per ricavare la forza di presa applicata
- Resistore 2 Ohm 5W 5% - per ricavare la corrente assorbita dal motoriduttore

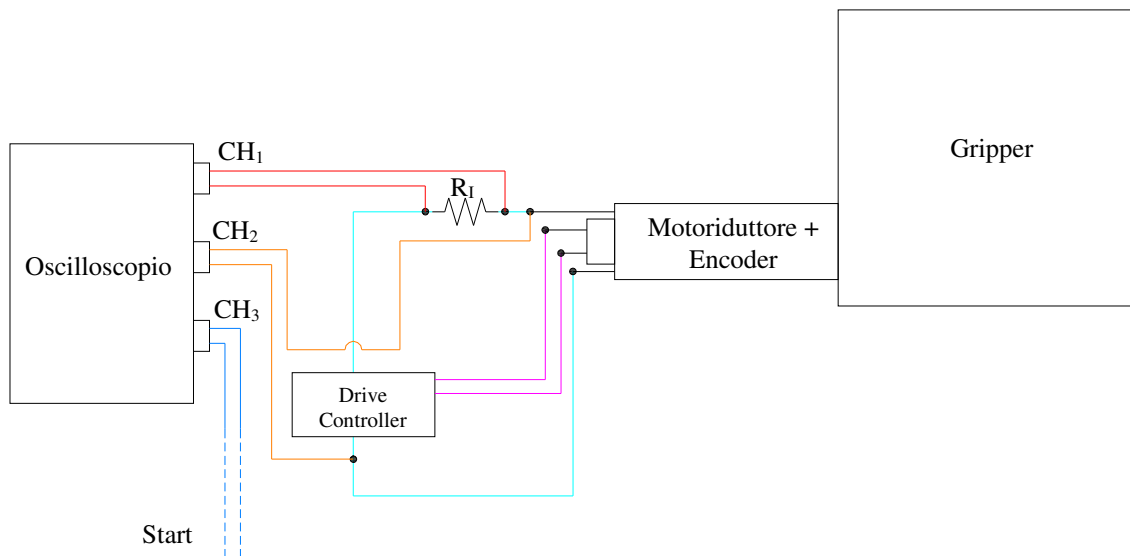
Le grandezze fisiche principali misurate o ricavate durante l'esecuzione delle prove sono le seguenti:

- Tensione di alimentazione del motoriduttore  $V_{aM}$
- Corrente assorbita dal motoriduttore  $i_M$
- Posizione angolare dell'albero del motore  $\vartheta_M$
- Forza di presa applicata dalle griffe sull'oggetto afferrato  $F_{Gi}$

Per quanto riguarda la misura della tensione di alimentazione  $V_{aM}$  e della corrente  $i_M$  assorbita dal motoriduttore durante il proprio funzionamento, lo schema del sistema di misura è quello riportato in Fig. 4-34. In particolare è possibile notare che la misura della corrente  $i_M$  è stata ricavata a posteriori in quanto, durante le prove, la grandezza fisica misurata è la tensione ai capi della resistenza  $R_I$ .

I canali dell'oscilloscopio utilizzati per le misure sono:

- Canale CH1 → Tensione  $V_{R_I}$ .
- Canale CH2 → Tensione di alimentazione del motoriduttore  $V_{aM}$
- Canale CH3 → Segnale di *Start*



**Fig. 4-34: Schema sistema di misura per la misura della tensione di alimentazione e della corrente assorbita del motoriduttore.**

Per quanto riguarda la misura della posizione angolare dell'albero motore  $\vartheta_M$  e della forza di presa  $F_G$  applicata all'oggetto afferrato, lo schema di misura è quello riportato in Fig. 4-35.

La misura della forza di presa è stata eseguita posizionando i sensori di forza sulla superficie esterna dell'oggetto di presa.

I pin della scheda Arduino Uno utilizzati per le misure sono:

- Pin Digitale 1 → Segnale di *Start*
- Pin Digitale 2 → Segnale Encoder *Ch A*
- Pin Digitale 3 → Segnale Encoder *Ch B*
- Pin Analogico 1 → Tensione Sensore di Forza  $S_1$
- Pin Analogico 2 → Tensione Sensore di Forza  $S_2$
- Pin Analogico 3 → Tensione Sensore di Forza  $S_3$

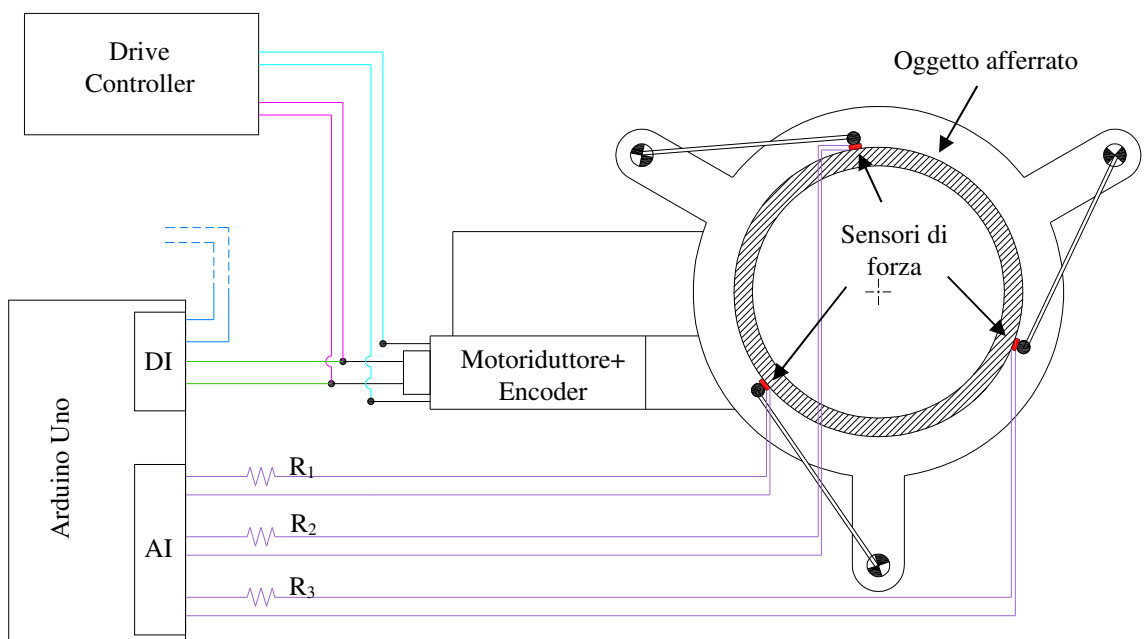


Fig. 4-35: Schema sistema di misura per la misura della forza di presa e della posizione del motoriduttore.

#### 4.2.4 Esecuzione delle prove e analisi dei risultati

Di seguito viene riportata l'analisi dei dati misurati durante l'esecuzione della campagna di prove di *Tipo B.1*. In Fig. 4-36 viene riportato l'esempio generale del ciclo di funzionamento che permette di eseguire l'esecuzione della presa di un oggetto. Tale ciclo è eseguito dopo aver scelto una combinazione adeguata dei parametri di funzionamento.

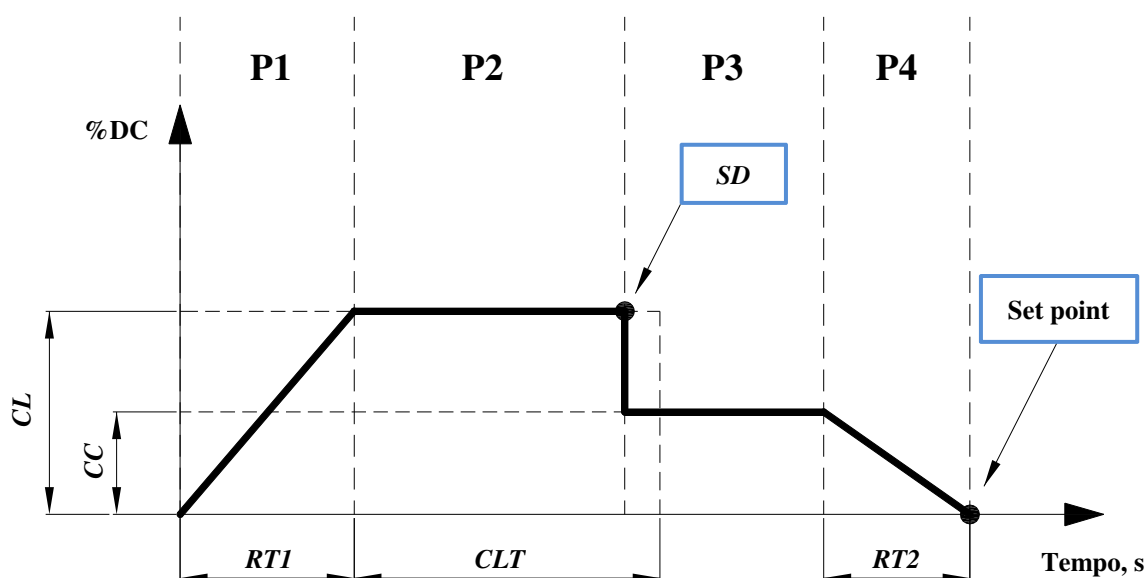


Fig. 4-36: Esempio generale del ciclo di funzionamento della pinza di manipolazione.

La fase P1 e la P2 sono quelle fasi del ciclo di presa che interessano l'avvicinamento veloce all'oggetto. La fase P3 e poi la fase P4 determinano invece le fasi del ciclo di presa che interessano prima l'avvicinamento lento, dopo l'autocentraggio ed infine l'applicazione della forza di presa.

Tab. 4-1: Elenco dei principali parametri di funzionamento del controllore.

Parametro	Range	Coeff. K	Significato
RT1	[0÷255]	$K_{RT1} = 25 \text{ ms}$	Durata rampa di accelerazione
CLT	[0÷255]	$K_{CLT} = 100 \text{ ms}$	Durata corsa avvicinamento veloce
CL	[0÷200]	$K_{CL} = 0,5\%$	% duty cycle fase P2
CC	[0÷200]	$K_{CL} = 0,5\%$	% duty cycle fase P3
SD	-	$K_{SD} = 1$	Numero di impulsi encoder fase P3+P4
RT2	[0÷255]	$K_{RT2} = 25 \text{ ms}$	Durata rampa di decelerazione

Alcuni esempi che permettono di esplicitare i parametri del controllore:

- Esempio 1: Parametro RT1

$$RT1 = 15 \rightarrow \text{Durata rampa accelerazione} = RT1 \cdot K_{RT1} = 15 \cdot 25 = 375 \text{ ms} = 0,375 \text{ s}$$

- Esempio 2: Parametro CL

$$CL = 120 \rightarrow \% \text{ duty cycle fase P2} = CL \cdot K_{CL} = 120 \cdot 0,5 = 60\%$$

- Esempio 3: Parametro SD

$$SD = 150 \rightarrow \text{Numero di impulsi fase P3+P4} = SD \cdot K_{SD} = 150 \cdot 1 = 150 \text{ impulsi encoder}$$

La Fig. 4-37 riporta lo schema di riferimento dei parametri geometrici che interessano la posizione delle griffe rispetto ad un oggetto da afferrare.

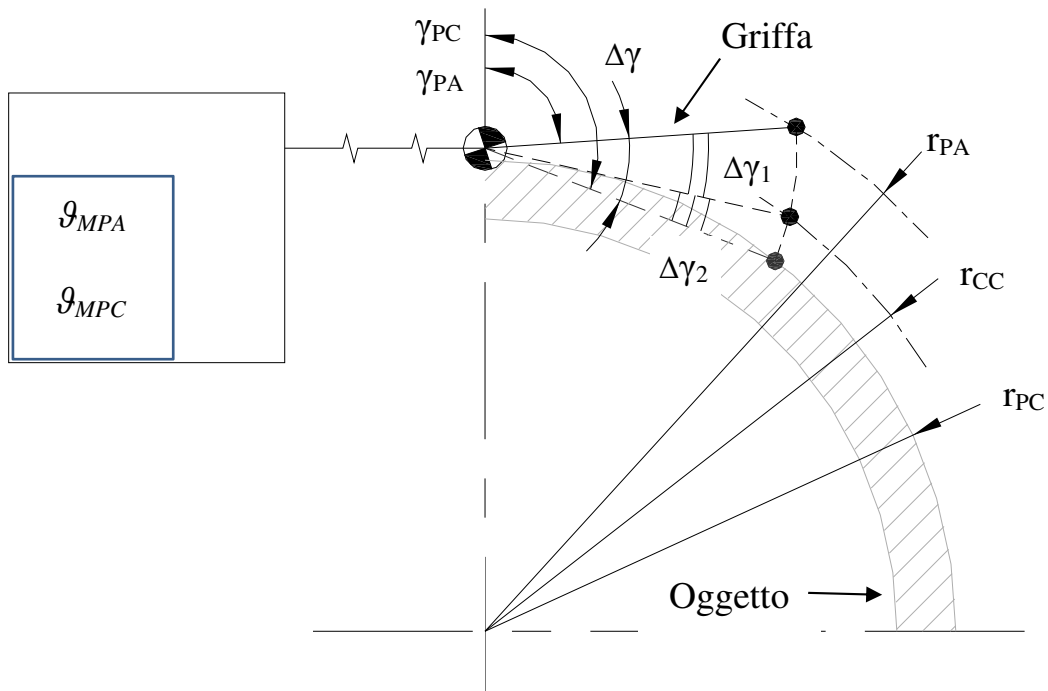


Fig. 4-37: Schema grandezze di riferimento per la posizione griffe.

Tab. 4-2: Elenco dei parametri geometrici relativi alla posizione delle griffe.

Parametro	Unità di misura	Significato
$g_{MPA}$	rad	Posizione angolare “Pinza Aperta” dell’albero motore
$g_{MPC}$	rad	Posizione angolare “Pinza Chiusa” dell’albero motore
$\gamma_{PA}$	°	Posizione angolare “Pinza Aperta” della griffa
$\gamma_{PC}$	°	Posizione angolare “Pinza Chiusa” della griffa
$\Delta\gamma$	°	Corsa angolare della griffa tra le due posizioni di lavoro
$\Delta\gamma_1$	°	Corsa angolare “Avvicinamento veloce” della griffa
$\Delta\gamma_2$	°	Corsa angolare “Avvicinamento lento” della griffa
$r_{PA}$	mm	Distanza radiale “Pinza Aperta”
$r_{CC}$	mm	Distanza radiale posizione iniziale “Avvicinamento lento”
$r_{PC}$	mm	Distanza radiale “Pinza Chiusa”



### Analisi dei parametri di funzionamento del controllore

Il controllore permette di modulare la tensione di alimentazione del motore secondo la tecnica di modulazione PWM. In particolare il controllore regola il duty cycle in funzione del set-up dei parametri di funzionamento.

La prima parte delle prove ha permesso di osservare l'influenza dei parametri del controllore sul ciclo di funzionamento. In particolare, il valore del duty cycle influenza i due principali aspetti che interessano il ciclo di presa e cioè la velocità di movimentazione delle griffe e la forza di presa applicata dalle griffe sull'oggetto afferrato. Proprio per questo motivo è stato necessario analizzare nel dettaglio i diversi parametri di funzionamento.

Un primo aspetto analizzato è stato quello di trovare la relazione tra il duty cycle e quindi dei parametri CL e CC, e la velocità del motore.

Sono state misurati diversi livelli del duty cycle, Fig. 4-38, e per ogni livello considerato, è stata determinata la velocità angolare del motore, Fig. 4-39.

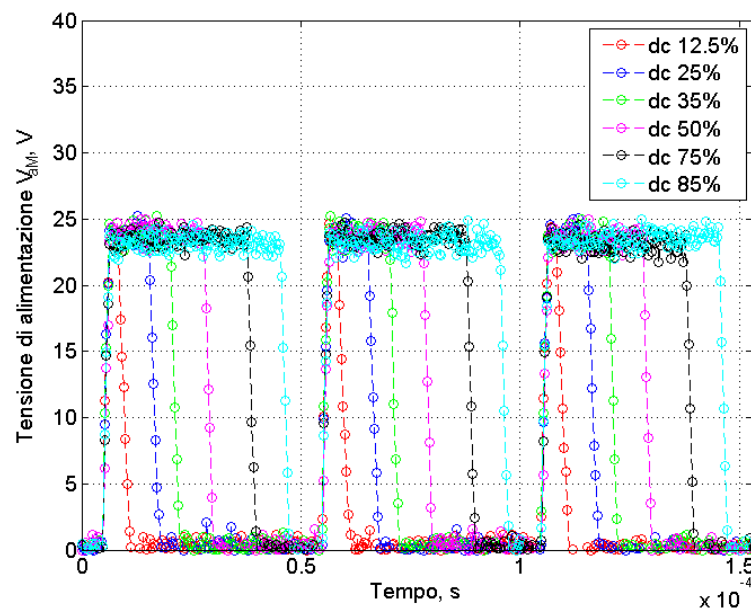


Fig. 4-38: Esempio andamento segnale PWM di alimentazione.

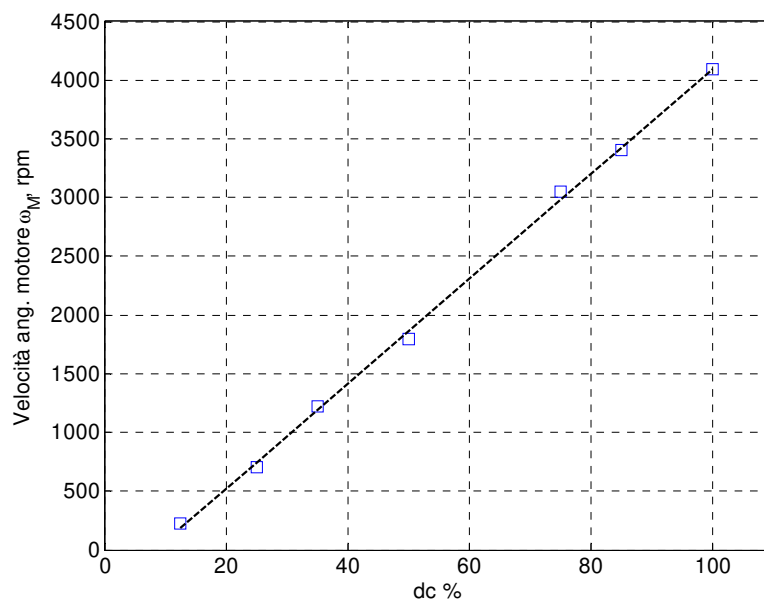
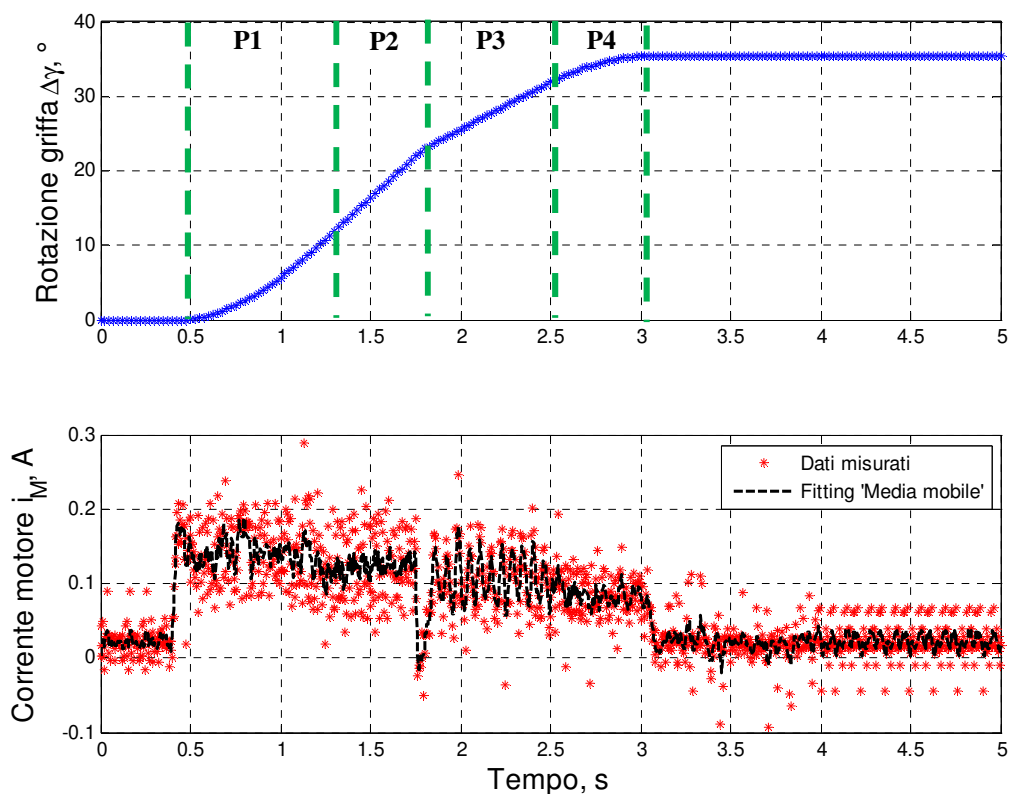


Fig. 4-39: Relazione Duty cycle - Velocità angolare motore  $\omega_M$ .

La relazione tra il duty cycle e la velocità angolare del motore permette di definire i parametri CL e CC in funzione della velocità voluta durante la fase di avvicinamento veloce e lento delle griffe durante un ciclo generico di presa.

Inoltre tali prove hanno permesso di evidenziare che il sistema di attuazione presenta un valore limite di duty cycle, sotto il quale la coppia erogata dal motore non è sufficiente a vincere le resistenze interne dei componenti che costituiscono il sistema di trasmissione. Il limite è stato valutato pari a  $dc \approx 10\%$ .

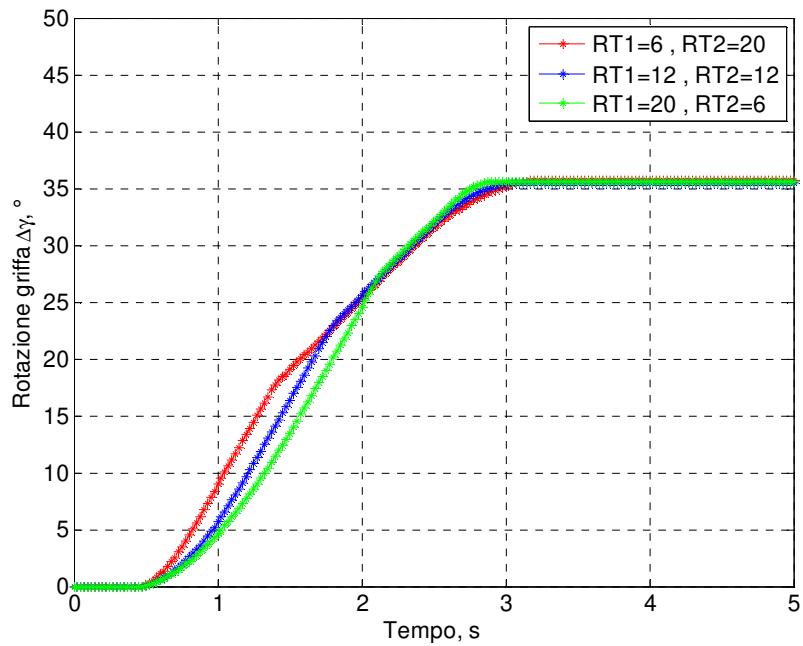
In questa sezione invece viene riportata l'analisi dei parametri RT1 e RT2 che interessano la prima ed ultima fase del ciclo di funzionamento. Questi influenzano la durata della fase di accelerazione e di decelerazione del sistema. Un esempio che riporta la posizione delle griffe in funzione del tempo e il relativo andamento della corrente assorbita dal motore durante il ciclo di movimentazione considerato è quello riportato in Fig. 4-40. In questo esempio il sistema è stato lasciato libero di muoversi senza quindi eseguire la presa di un oggetto specifico.



**Fig. 4-40: Esempio movimentazione griffe senza l'esecuzione di una presa, [RT1=12; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=20; RT2=12].**

La Fig. 4-41 riporta invece come si modificano le fasi del ciclo di funzionamento, variando la combinazione dei parametri RT1 e RT2 e lasciando invariati gli altri parametri di funzionamento. In particolare è possibile notare come varia sia la fase di avvicinamento veloce che quella di avvicinamento lento delle griffe all'oggetto da afferrare al variare dei parametri considerati.

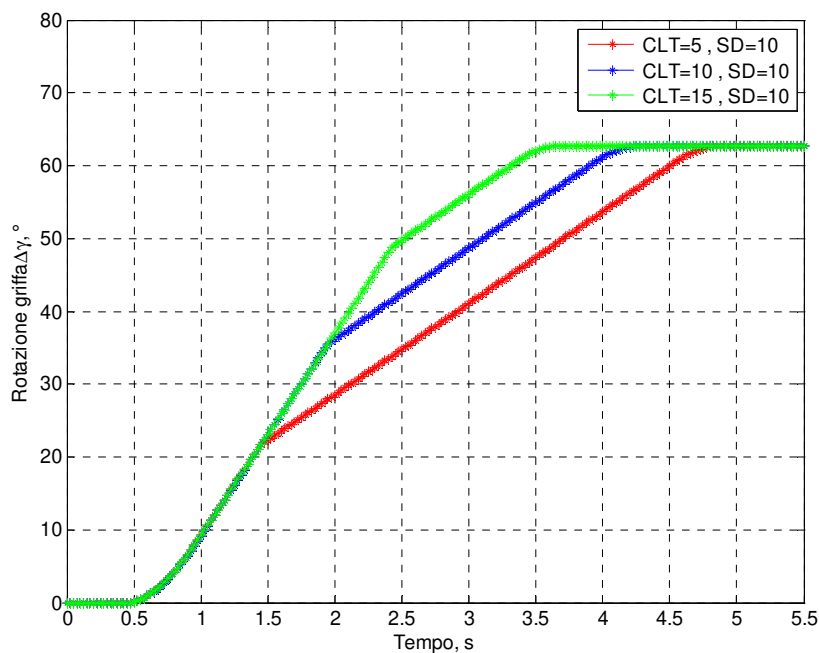
Poiché l'applicazione industriale oggetto della tesi richiede un tempo ciclo il più piccolo possibile, si può affermare che, nel caso di un ciclo di funzionamento reale, con la pinza installata al polso del robot della cella di produzione, le fasi di accelerazione e di decelerazione, funzione dei parametri RT1 e RT2 siano annullate ponendo uguale a zero i relativi parametri. In questo modo, il tempo ciclo totale di presa sarà influenzato dai parametri che interessano le fasi P2 e P3.



**Fig. 4-41: Confronto influenza dei parametri RT1 e RT2 sul ciclo di funzionamento, [RT1=(6,12,20); CLT=6; CL=120; CC=80; SD=20; RT2=(20,12,6)].**

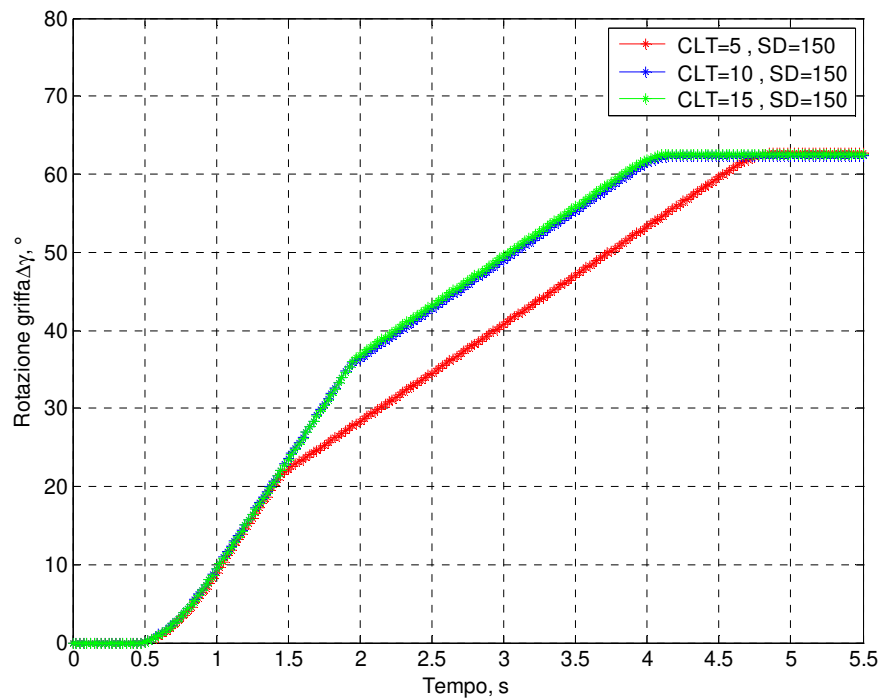
Le prove successive hanno interessato i parametri di funzionamento CLT e SD che influenzano le fasi P2 e P3 del ciclo di funzionamento. In particolare il primo è un parametro che rappresenta la durata della fase del ciclo di funzionamento interessata dallo stesso; il parametro SD invece è un parametro che determina uno spostamento indipendentemente dal tempo.

La Fig. 4-42 mostra come varia il ciclo di funzionamento in funzione delle diverse combinazioni di CLT e SD. È possibile notare come al crescere di CLT, cresce sia la durata della fase P2, influenzata direttamente da CLT, ma cresce in maniera inversamente proporzionale anche la durata della fase P3.



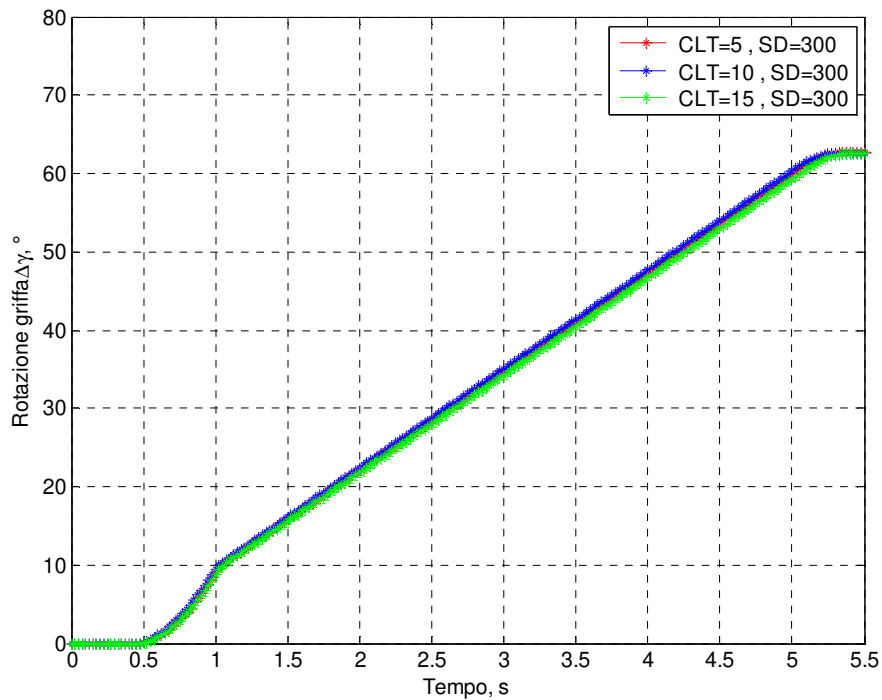
**Fig. 4-42: Confronto influenza dei parametri CLT e SD sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=10; RT2=5].**

La Fig. 4-43 invece mostra come a crescere del parametro SD viene influenzato il ciclo di funzionamento. Infatti è possibile notare che la fase P2 viene comunque limitata indipendentemente dal valore del parametro di riferimento CLT.



**Fig. 4-43: Confronto influenza dei parametri sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=150; RT2=5].**

Un'estremizzazione di tale effetto è quello riportato in Fig. 4-44 dove è possibile osservare che il parametro SD è quello vincolante sul ciclo di funzionamento.



**Fig. 4-44: Confronto influenza dei parametri sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=300; RT2=5].**

## Processo di caratterizzazione del gripper

Di seguito viene riportato il processo di analisi e le prove che hanno permesso prima di caratterizzare i principali parametri di funzionamento della pinza e dopo, di determinare le condizioni per ottenere un ciclo di funzionamento ottimale in funzione dei vincoli esterni.

L'esecuzione delle prove sperimentali di *Tipo B.2* ha visto l'esecuzione di cicli di presa secondo diversi set-up dei parametri di funzionamento. Questo perché è stato necessario individuare le relazioni che legano fra loro la corrente assorbita dal motore, la posizione delle griffe e la forza di presa applicata dalle stesse griffe all'oggetto afferrato.

Una prima tipologia di prove ha interessato la misura della forza di presa applicata all'oggetto afferrato. Come è stato detto in precedenza, la forza di presa è stata misurata utilizzando tre sensori di forza piezoresistivi applicati sulla superficie di presa dell'oggetto da afferrare. Questo perché le griffe non presentano un sistema di sensorizzazione in grado di valutare la forza applicata e quindi di regolare il ciclo di presa.

La Fig. 4-45 mostra l'andamento della forza di presa applicata ad un generico oggetto che presenta una rigidità tale da non deformarsi durante l'applicazione della forza di presa. In particolare sono riportate i dati che interessano tre diversi livelli di forza di presa applicata. È possibile osservare che le tre griffe applicano lo stesso livello di forza tale che, per le prove successive che riportano i dati di forza di presa, si è considerato il valore medio misurato dai tre sensori applicati.

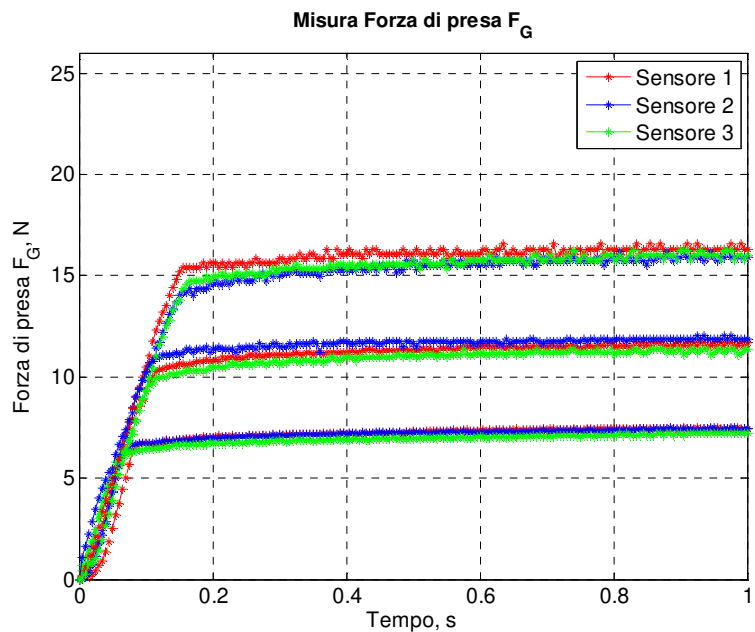
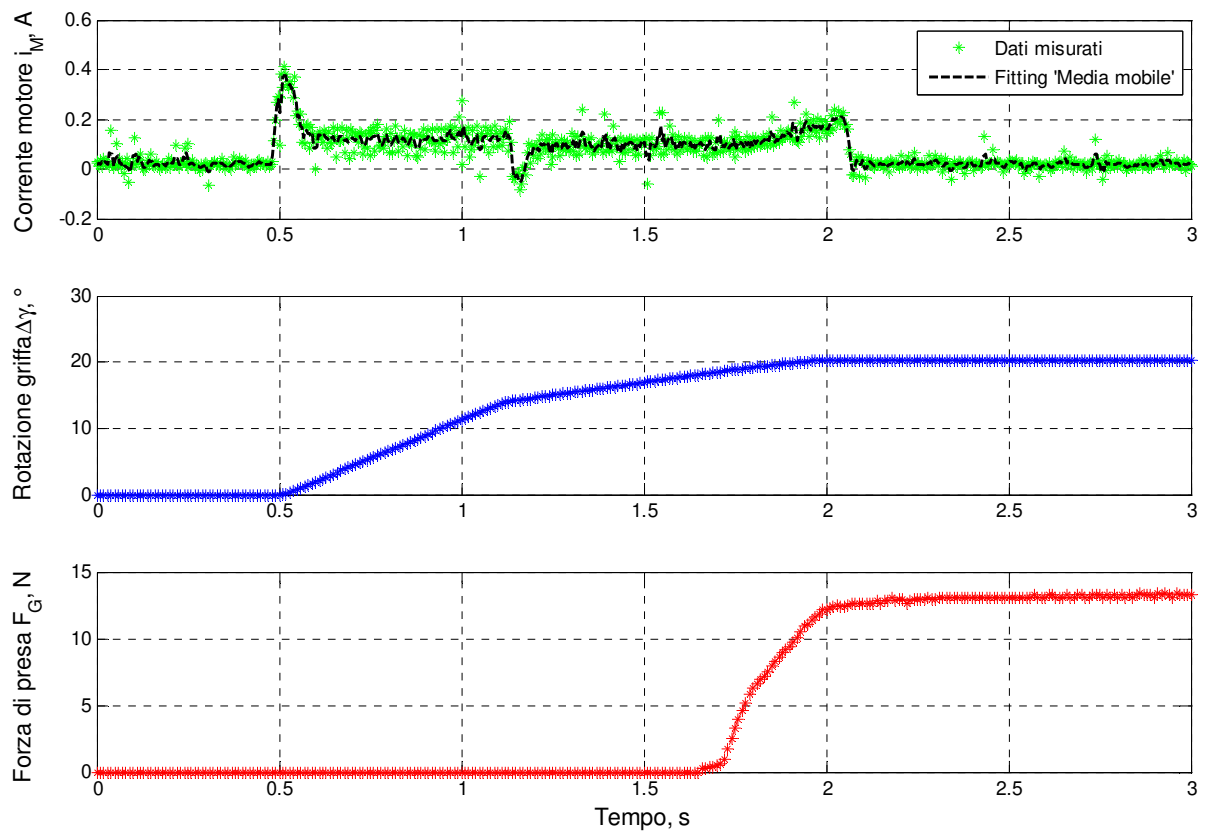


Fig. 4-45: Andamento forza di presa  $F_G$ , [RT1=1; CLT=6; CL=150; CC=80; SD=5; RT2=1; Set-point (290,305,335)].

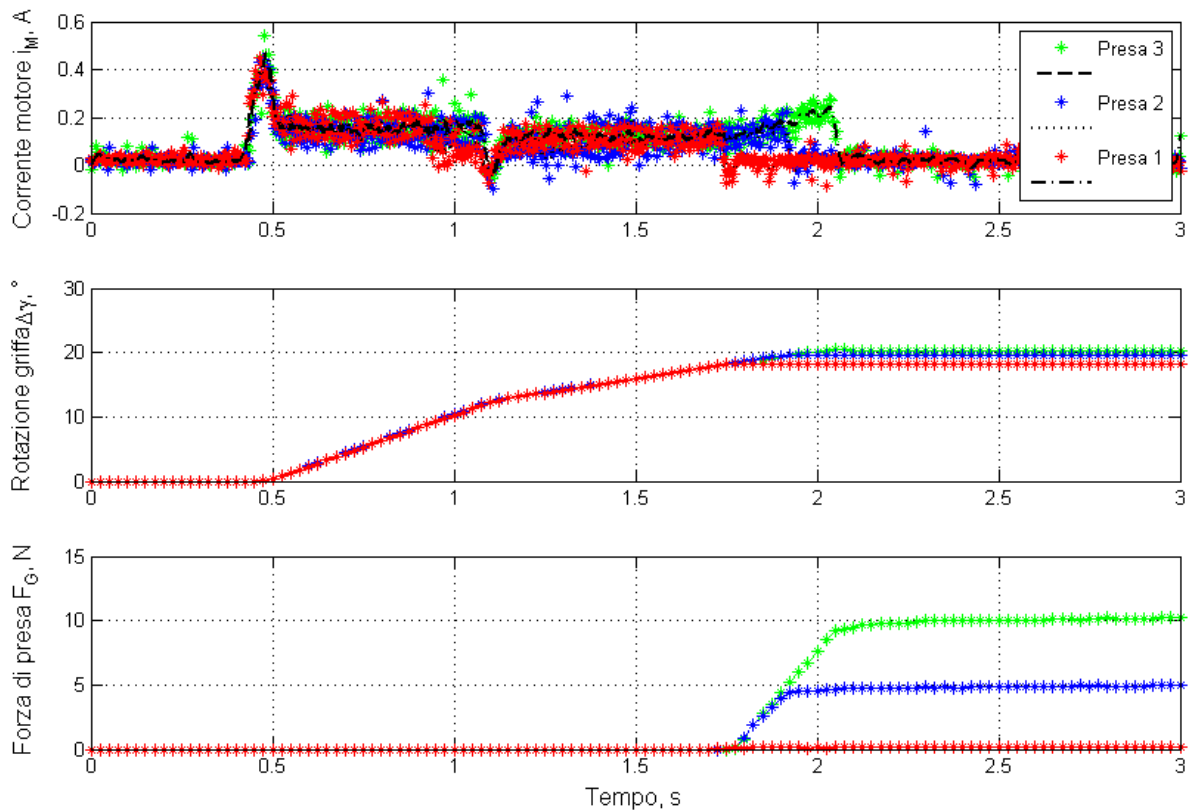
In Fig. 4-46 sono riportati i dati misurati durante un ciclo di presa di un oggetto generico.



**Fig. 4-46:**Esempio ciclo di presa, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=5; RT2=1].

È possibile notare che al crescere della forza di presa applicata si ha un corrispettivo aumento della corrente assorbita da parte del motore. Il valore massimo corrisponde al raggiungimento della posizione di set “Pinza Chiusa”.

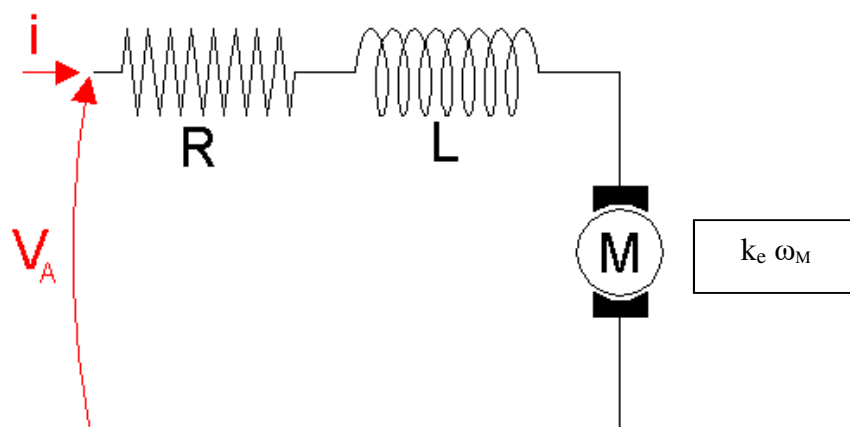
La Fig. 4-47 riporta il confronto dei dati misurati durante l'esecuzione di tre cicli di presa diversi tra loro. Il parametro di riferimento che ha differenziato i cicli di presa è la posizione di set finale e cioè la posizione di "Pinza Chiusa".



**Fig. 4-47: Confronto cicli di presa con diversi livelli di forza di presa applicata, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=5; RT2=1].**

Eseguita questa prima campagna di prove, ed evidenziato il comportamento del gripper in funzione dei diversi parametri di funzionamento, si è deciso di eseguire delle ulteriori prove in maniera da trovare la relazione tra il parametro del controllore CC e la relativa forza di presa massima applicabile all'oggetto afferrato. Infatti, il parametro CC è quello che permette di scegliere il duty cycle del segnale di alimentazione del motore.

Il motore utilizzato nella pinza di manipolazione è un motore a corrente continua con collettore. Questo può essere schematizzato come segue:



**Fig. 4-48: Schema elettrico del motore.**

Si tratta sostanzialmente di un circuito RL in cui è presente anche una forza controelettrica proporzionale alla velocità angolare del rotore. L'equazione elettrica del motore è data dall'Eq. 4-2:

$$V_A = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + k_e \cdot \omega \quad (\text{Eq. 4-2})$$

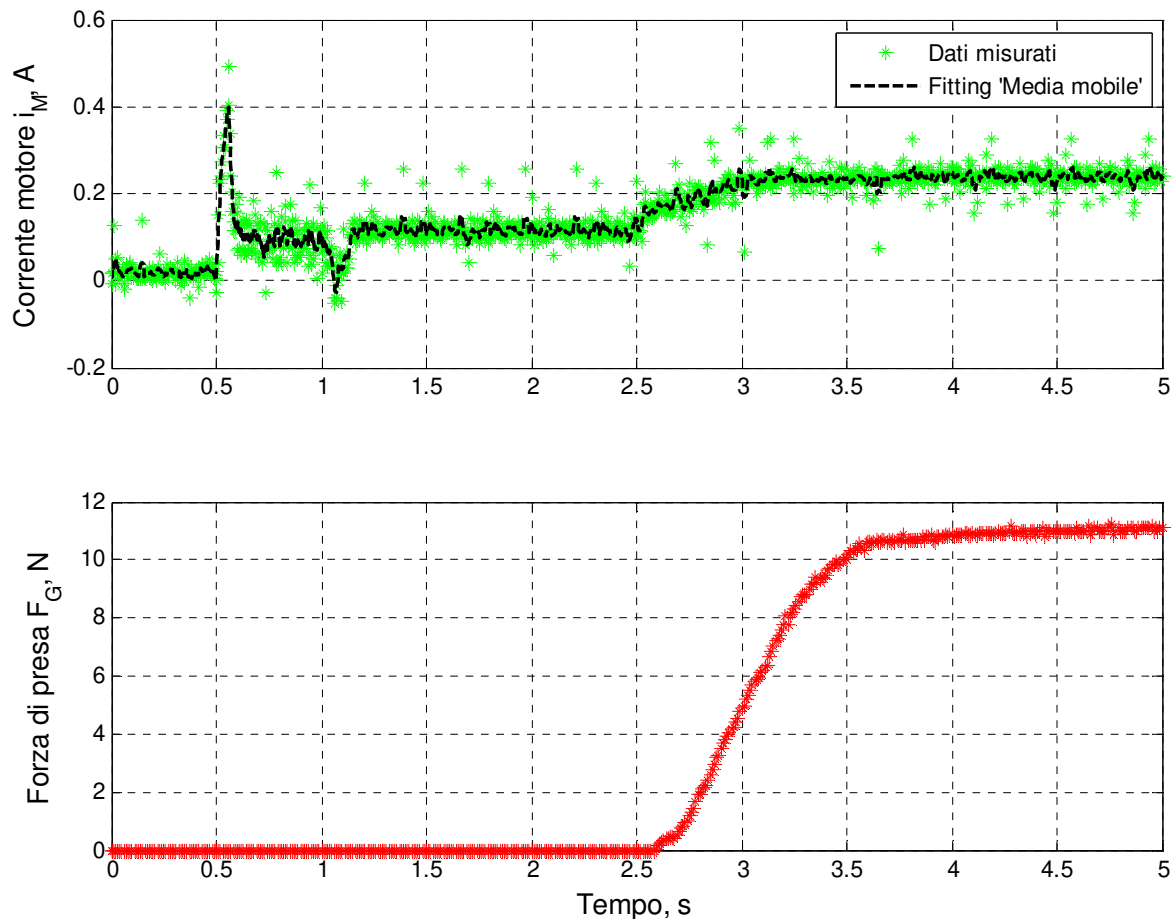
Inoltre, in un motore elettrico DC, la coppia erogata è proporzionale alla corrente  $i$  con una costante di proporzionalità  $k_c$  (costante di coppia) che è uguale alla costante  $k_e$  (costante di tensione) della forza controelettrica.

Dunque vale, Eq. 4-3:

$$C = k_c \cdot i = k_e \cdot i \quad (\text{Eq. 4-3})$$

Quindi un valore della corrente assorbita, direttamente proporzionale alla tensione di alimentazione, determina una coppia erogabile dal motore e di conseguenza una forza di presa massima applicata all'oggetto afferrato.

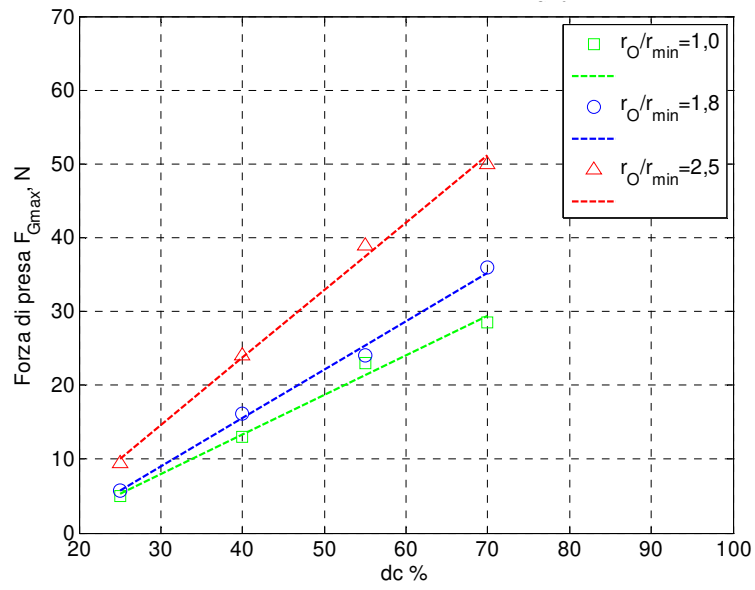
Un esempio di misura è quello che è riportato in Fig. 4-49. Questo tipo di misure ha permesso di ricavare la relazione tra la corrente assorbita, il duty cycle e la forza di presa applicata all'oggetto.



**Fig. 4-49: Andamento corrente assorbita e relativa forza di presa massima applicata per determinato valore di duty cycle, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=35; SD=5; RT2=1].**

La Fig. 4-50 riporta i dati misurati durante l'esecuzione di questa tipologia di prove. In particolare i dati sono riferiti alla presa di tre diversi oggetti che nello specifico presentano una dimensione del diametro esterno crescente.



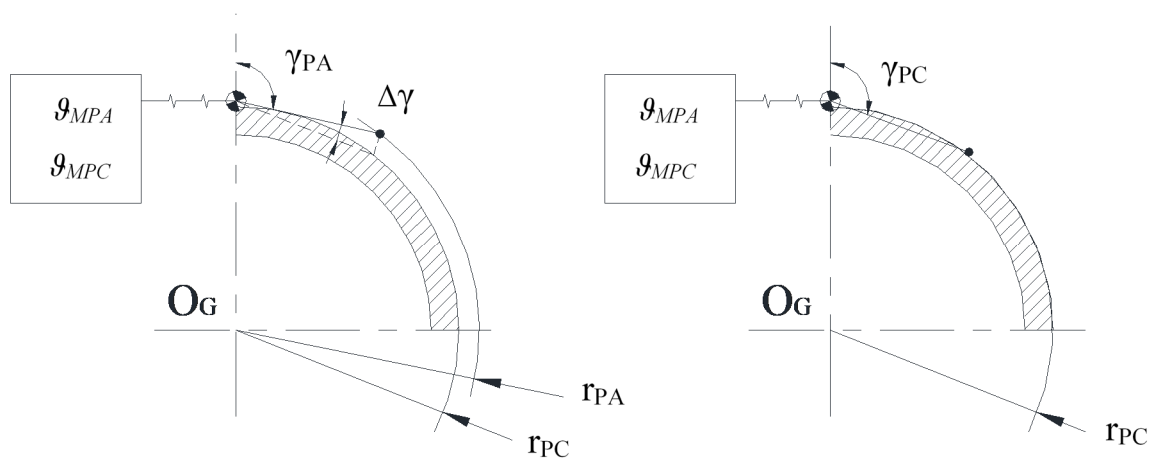


**Fig. 4-50: Relazione tra il segnale di alimentazione del motore e la relativa forza di presa massima  $F_{Gmax}$ .**

Un ultimo aspetto che permette di caratterizzare la pinza di manipolazione è la valutazione della rigidità propria e del sistema pinza-anello afferrato. La Tab. 4-3 riporta i parametri geometrici che interessano la posizione delle griffe rispetto ad un oggetto da afferrare. La Fig. 4-51 riporta lo schema equivalente semplificato della pinza e dell'oggetto da afferrare.

**Tab. 4-3: Elenco dei parametri principali relativi alle griffe.**

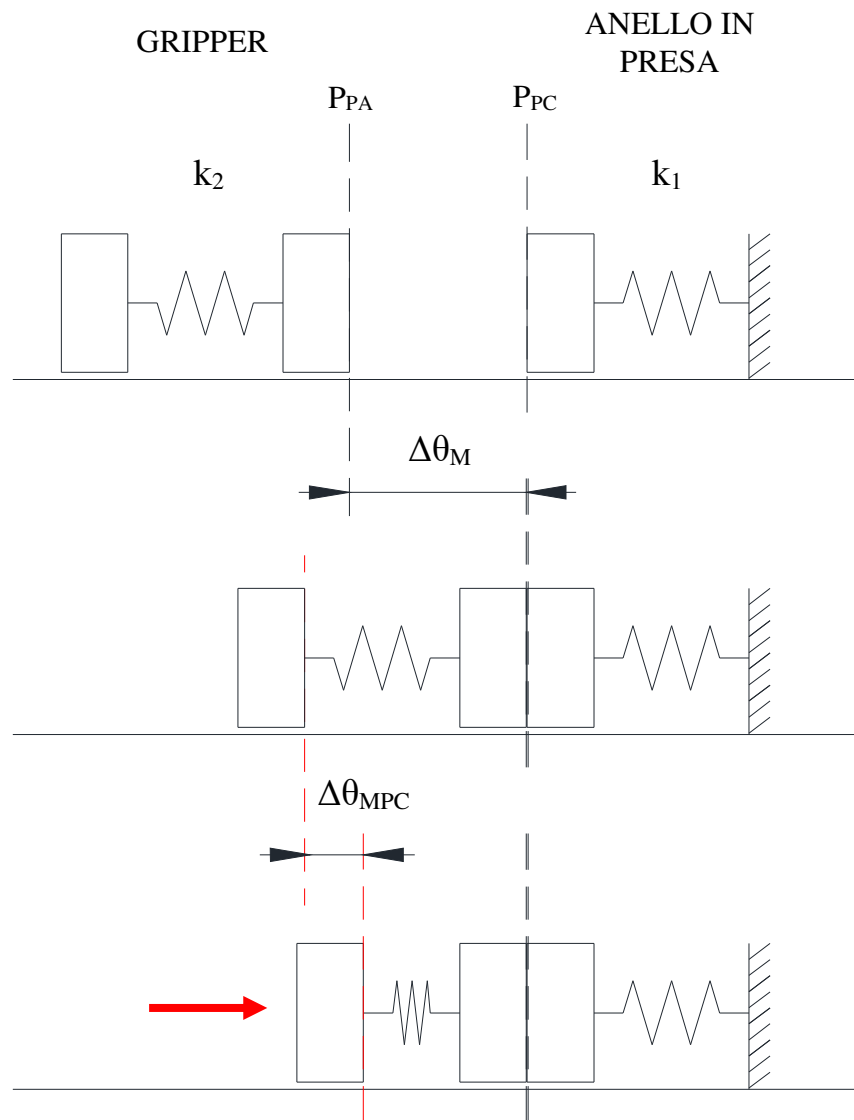
Parametro	Unità di misura	Significato
$\vartheta_{MPA}$	rad	Posizione angolare "Pinza Aperta" dell'albero motore
$\vartheta_{MPC}$	rad	Posizione angolare "Pinza Chiusa" dell'albero motore
$\Delta\vartheta_M$	rad	Escursione angolare tra "Pinza Aperta" e "Pinza Chiusa" dell'albero motore
$\Delta\vartheta_{MPC}$	rad	Escursione angolare dell'albero motore per l'applicazione della forza di presa
$\gamma_{PA}$	°	Posizione angolare "Pinza Aperta" della griffa
$\gamma_{PC}$	°	Posizione angolare "Pinza Chiusa" della griffa
$\Delta\gamma$	°	Corsa angolare della griffa tra le due posizioni di lavoro
$r_{PA}$	mm	Distanza radiale "Pinza Aperta"
$r_{PC}$	mm	Distanza radiale "Pinza Chiusa"



**Fig. 4-51: Semplificazione e schema equivalente del sistema Pinza-oggetto afferrato.**

Secondo lo schema equivalente semplificato del sistema Pinza-oggetto afferrato, è possibile affermare che la rigidità equivalente del sistema è:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

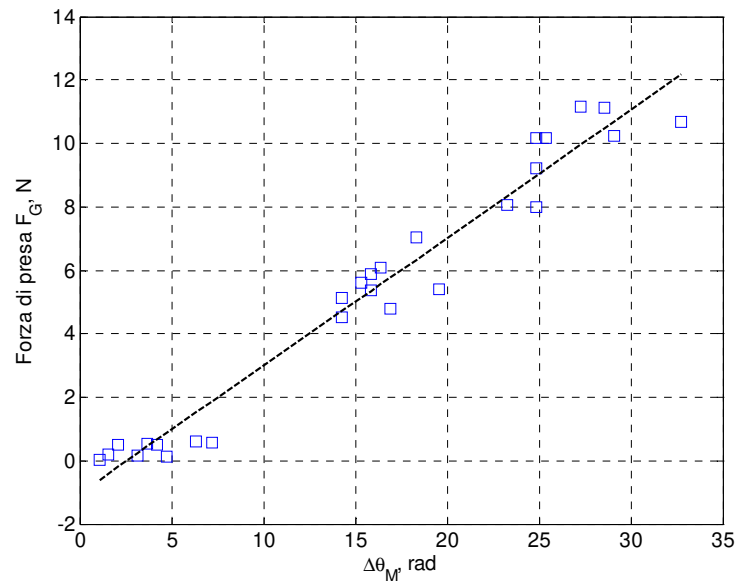


**Fig. 4-52: Schema equivalente Gripper-oggetto afferrato.**

Se si considera che gli oggetti da afferrare presentano una rigidezza propria  $k_1 \gg k_2$  vale la relazione:

$$\frac{1}{k_{eq}} \approx \frac{1}{k_2} \quad (\text{Eq. 4-5})$$

L'ipotesi che permette di eguagliare la rigidezza equivalente a quella della pinza consente di affermare che, determinato il valore della rigidezza della pinza  $k_2$  è possibile calcolare la forza di presa in funzione della posizione angolare relativa dell'albero motore. La Fig. 4-53 riporta i dati misurati per la determinazione della rigidezza della pinza  $k_2$ .



**Fig. 4-53: Caratteristica equivalente della pinza di manipolazione.**

Questa ultima parte del capitolo riporta lo schema del processo per la determinazione dei parametri di funzionamento del controllore per la gestione della pinza di manipolazione durante l'esecuzione del ciclo di presa e di rilascio dell'oggetto da manipolare, Fig. 4-54.

Il flusso è quello che vede come prima fase la definizione dei dati di input che riguardano le caratteristiche fisiche e geometriche dell'oggetto da manipolare. A questa fase segue il processamento dei dati ed infine si determina il set-up dei parametri di funzionamento della pinza. Tale processo permette di definire i parametri di funzionamento per ogni tipo di anello che presenta le caratteristiche fisiche e geometriche appartenenti a quelle definite nei requisiti di progetto.

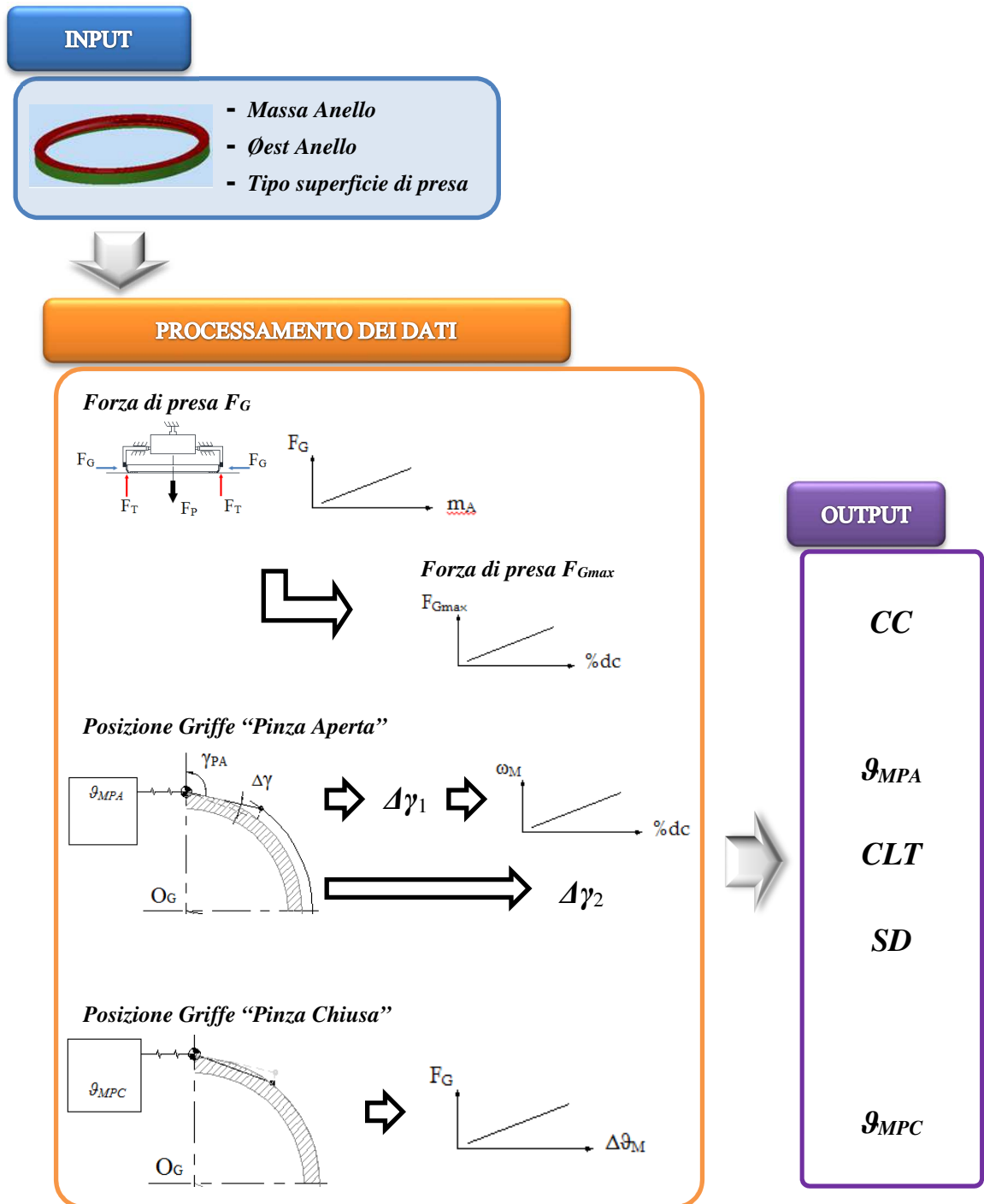


Fig. 4-54: Schema del processo di determinazione dei parametri di funzionamento del controllore.

- **Forza di presa  $F_G$  e forza di presa massima  $F_{Gmax}$**

Se si considerano i principali parametri caratteristici dell'oggetto da afferrare questi sono:

- Raggio della circonferenza di presa,  $r_0$
- Massa dell'oggetto da manipolare,  $m$
- Tipo della superficie di presa, gomma o metallo

La formula generale che permette di calcolare la forza di presa  $F_G$  scambiata tra le griffe di un gripper ed il pezzo afferrato, considerando le forze inerziali e la direzione della forza peso, ortogonale alla direzione di presa, è riportata sotto:

$$F_G = k \cdot \frac{m \cdot (g+a)}{\mu \cdot n} \quad (\text{Eq. 4-6})$$

dove:

- $k$  = coefficiente di sicurezza forza di presa
- $m$  = massa oggetto, kg
- $g$  = accelerazione di gravità,  $m/s^2$
- $a$  = accelerazione in direzione ortogonale al piano di presa del polso del robot,  $m/s^2$
- $\mu$  = coefficiente di attrito statico tra le griffe e l'oggetto afferrato
- $n$  = numero di griffe

La forza di presa massima che si può applicare all'oggetto vale:

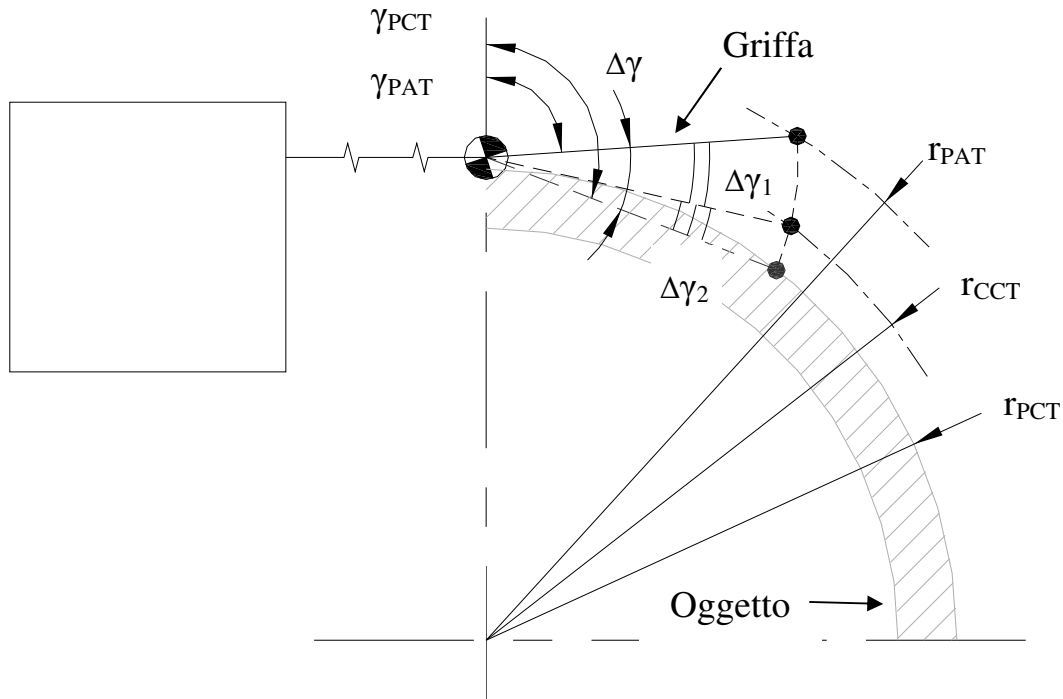
$$F_{Gmax} = k_s \cdot F_G \quad (\text{Eq. 4-7})$$

dove:

- $k_s$  = coefficiente di sicurezza forza di presa massima

- **Schema grandezze di riferimento per le posizioni delle griffe**

La Fig. 4-55 riporta lo schema delle grandezze di riferimento che interessano il posizionamento delle griffe.



**Fig. 4-55: Schema grandezze di riferimento per le posizioni delle griffe.**

**Tab. 4-4: Elenco dei parametri geometrici che interessano la posizione delle griffe.**

Parametro	Unità di misura	Significato
$\gamma_{PAT}$	°	Posizione angolare "Pinza Aperta teorica" della griffa
$\gamma_{PCT}$	°	Posizione angolare "Pinza Chiusa teorica" della griffa
$\Delta\gamma$	°	Corsa angolare della griffa tra le due posizioni di lavoro
$\Delta\gamma_1$	°	Corsa angolare "Avvicinamento veloce" della griffa
$\Delta\gamma_2$	°	Corsa angolare "Avvicinamento lento" della griffa
$r_{PAT}$	mm	Distanza radiale "Pinza Aperta teorica"
$r_{CC}$	mm	Distanza radiale posizione iniziale "Avvicinamento lento teorica"
$r_{PCT}$	mm	Distanza radiale "Pinza Chiusa teorica"

- **Definizione delle grandezze di movimentazione delle griffe**

Un parametro da fissare è la distanza radiale teorica tra la posizione di pinza aperta e pinza chiusa:

$$\Delta r_P = r_{PAT} - r_{PCT} \quad (\text{Eq. 4-8})$$

In questo modo, poiché è nota anche la distanza radiale teorica di pinza chiusa, che è funzione dell'oggetto da afferrare, è possibile determinare la distanza radiale teorica di pinza aperta,  $r_{PAT}$ :

$$r_{PAT} = r_{PCT} + \Delta r_P \quad (\text{Eq. 4-9})$$

In funzione del raggio della circonferenza passante per l'estremità della griffa, è possibile determinare la posizione angolare teorica di pinza aperta.

Definita la posizione angolare teorica di pinza aperta e pinza chiusa e quindi definita la corsa angolare tra le due posizioni di lavoro è possibile definire la corsa angolare di avvicinamento veloce e quella di avvicinamento lento.

$$\Delta \gamma_1 = k_1 \cdot \Delta \gamma \quad (\text{Eq. 4-10})$$

$$\Delta \gamma_2 = k_2 \cdot \Delta \gamma \quad (\text{Eq. 4-11})$$

Si può ipotizzare  $k_1=0,8$  e  $k_2=0,2$ .

Il parametro  $\Delta r_P$  è strettamente legato ai parametri di funzionamento del controllore, per questo motivo, dopo aver determinato il set-up dei parametri di funzionamento del controllore, è necessario verificare la corretta esecuzione del ciclo di presa e rilascio anello. In caso di esito negativo occorre aumentarne il valore e ridefinire i parametri di funzionamento.



## Capitolo 5 Sviluppi futuri del gripper e conclusioni

### 5.1.1 Sviluppi futuri

L'obiettivo principale del processo di progettazione del QuBu gripper è stato quello di ottenere un dispositivo affidabile e perfettamente integrato con la cella di produzione robotizzata. Il sistema di monitoraggio e di controllo implementato permette di svolgere in maniera efficace le operazioni di manipolazione.

I fattori principali che hanno influenzato le scelte progettuali del gripper e del relativo sistema di gestione, sono quelli derivanti dal tipo di oggetto da manipolare e dall'ambiente in cui deve operare il gripper. In particolare, l'ambiente di lavoro presenta specifiche condizioni che hanno permesso di semplificare la gestione dell'intero processo di manipolazione che viene a realizzarsi all'interno della cella robotizzata.

Tuttavia, un sistema di sensorizzazione e controllo più "intelligente" potrebbe rendere il gripper un dispositivo utilizzabile per manipolare oggetti diversi, indipendentemente dalle condizioni esterne legate all'ambiente di lavoro.

La completa gestione di un generico processo di manipolazione necessita la conoscenza delle informazioni che sono derivanti dall'interazione del dispositivo "gripper" con l'oggetto afferrato. Le informazioni, che sono di diversa natura, possono essere rilevate secondo tecniche differenti che vedono sia l'utilizzo di particolari componenti hardware che l'implementazione di specifiche tecniche di controllo.

Lo sviluppo del QuBu gripper può quindi vedere l'evoluzione di alcuni propri aspetti caratteristici, in maniera da ottenere la gestione di ulteriori specifiche informazioni relative al processo di manipolazione.

#### Sensorizzazione griffa e controllo in anello chiuso

Come riportato nello schema di Fig. 3-58, le informazioni che interessano la corretta esecuzione della presa possono essere rilevate da diverse tipologie di sensori. In base al tipo di sensore scelto e alla tecnica di monitoraggio implementata, si può avere un diverso livello di percezione della presa di un oggetto. Più si è prossimi alla zona di contatto più la qualità dell'informazione relativa al contatto tra gripper ed oggetto è alta.

Se si prendono in considerazione le griffe e cioè le parti del gripper in cui si verifica l'interazione tra il gripper stesso e l'oggetto da afferrare, è possibile implementare diverse tipologie di sensori.

In particolare, secondo lo schema della griffa riportato in Fig. 5-1, sono state individuate due aree in cui è possibile implementare dei sensori per la valutazione della presa.

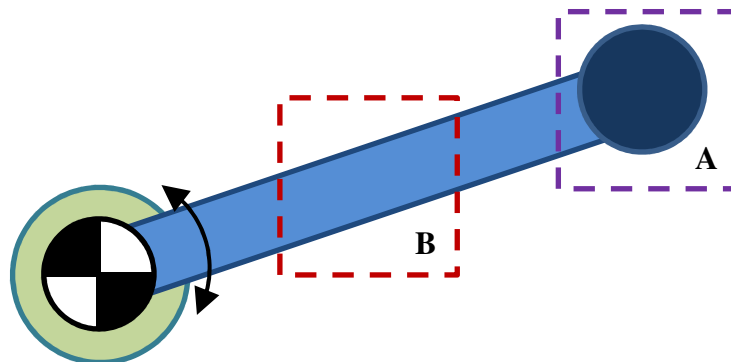
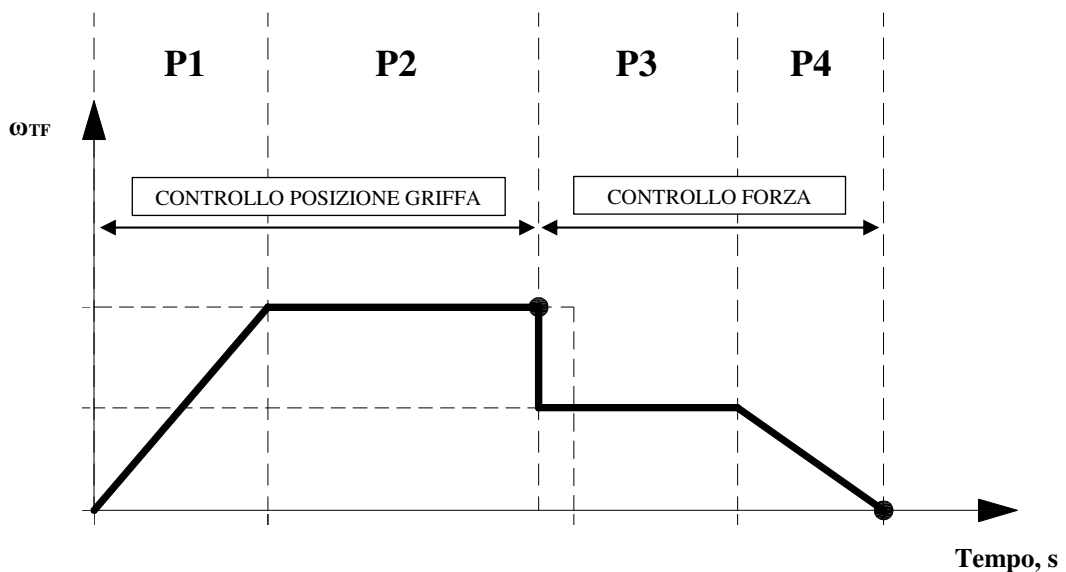


Fig. 5-1: Schema esempio griffa e aree possibili di sensorizzazione.

Nello specifico, l'area A è quella che interessa la parte della griffa in cui si verifica il contatto. In questa area è possibile rilevare le informazioni che interessano il contatto tra griffa e oggetto. Nello specifico, l'utilizzo di sensori tattili, permette di rilevare il livello di pressione agente su tutta l'area di contatto. In questo modo è possibile misurare la distribuzione del livello di forza applicato su tutta l'area sensibile del sensore interessata dal contatto. Tale sistema di misura permette quindi di definire il livello di forza applicato e se questo è eseguito secondo le specifiche di progetto. L'utilizzo di sensori di forza invece permette di conoscere solo il livello medio di forza scambiato tra griffa e oggetto.

Per quanto riguarda l'area B della griffa, è possibile ricavare le informazioni che interessano la presa per via indiretta. Un'ipotesi è quella che vede l'utilizzo di strain gauge che permettono di misurare le deformazioni dell'elemento griffa e quindi, conosciute le caratteristiche meccaniche e fisiche proprie dell'elemento, di ricavare in modo indiretto la forza di presa applicata all'oggetto afferrato. L'utilizzo di questi strumenti di misura può essere utilizzato per misurare forze agenti in direzioni diverse e quindi per rilevare eventuali collisioni del gripper con l'ambiente esterno.

Per utilizzare le informazioni derivanti dall'utilizzo di sensori che permettono di monitorare la forza di presa applicata, è necessario l'implementazione di un sistema di controllo in grado di gestire tali informazioni. Considerando un ciclo di presa e le fasi che lo costituiscono, una tecnica di controllo è quella riportata in Fig. 5-2. In questo modo si ha un controllo in anello chiuso sia della posizione della griffa che della forza applicata in base alla fase del ciclo di presa interessata.



**Fig. 5-2: Schema generale ciclo di funzionamento con controllo in anello chiuso della posizione delle griffe e della forza di presa.**

In particolare lo schema riportato sopra, prevede il controllo della posizione delle griffe durante la corsa di avvicinamento veloce per poi controllare la forza applicata durante la fase di avvicinamento lento e applicazione della forza di presa voluta.

### **Griffa cedevole**

L'implementazione di griffe con struttura cedevole potrebbe portare alla capacità di afferrare oggetti dalla forma non strettamente legata a quella considerata in questo lavoro.

Sono meccanismi che generalmente presentano un basso costo, la realizzazione non prevede fasi complesse ed il montaggio non necessita particolari attenzioni. Per la realizzazione possono essere utilizzati sia materiali plastici che materiali metallici. I vantaggi di questi meccanismi riguardano anche l'affidabilità, la bassa usura, il peso ridotto, e la bassissima manutenzione.

Poiché prevedono l'utilizzo di elementi elastici distribuiti, si ha il vantaggio di avere una maggiore flessibilità durante la fase di configurazione del meccanismo ma si ha una maggiore complessità nelle fasi che interessano il processo di sintesi e di analisi.



Fig. 5-3: Esempio meccanismo cedevole, [41].

### **Misura avvicinamento zona di presa**

Un aspetto che potrebbe rendere il gripper più indipendente dalle condizioni strettamente connesse all'ambiente di lavoro, è l'utilizzo di sensori in grado di misurare la distanza del gripper stesso o delle griffe dalla zona di lavoro, Fig. 5-4. Esistono diverse tipologie di sensori come per esempio quelli ad ultrasuoni, a triangolazione laser oppure ad infrarossi.

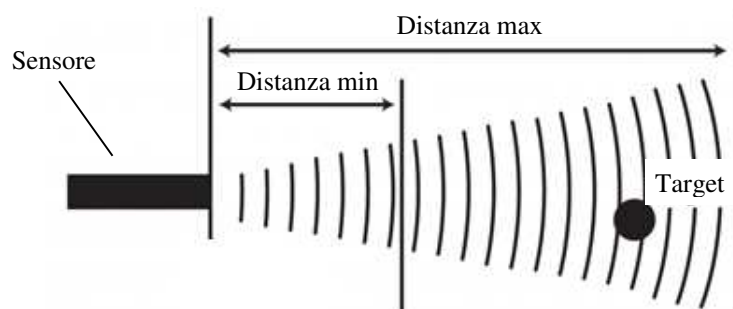


Fig. 5-4: Esempio di sensore di distanza, [42].

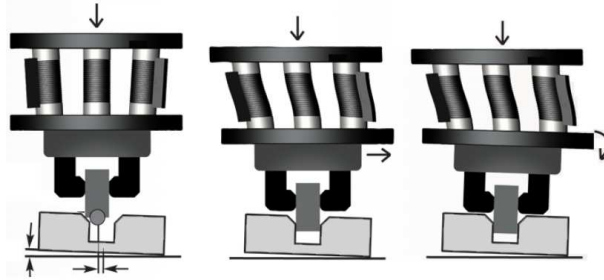
### **Ottimizzazione strutturale**

Riguardo alla progettazione dei componenti costituenti il gripper, un aspetto che non è stato preso in considerazione in questa tesi ma che potrebbe interessare lo sviluppo di un nuovo prototipo è quello legato all'ottimizzazione strutturale, orientata alla riduzione del peso e dei costi di realizzazione. In parallelo potrebbero essere integrate nuove funzionalità quali quelle precedentemente indicate sulla sensorizzazione, e progettate nuove modalità per rendere il gripper in grado di affrontare possibili collisioni.

## Dispositivo RCC

L'introduzione del concetto di modularità ha visto la presentazione del dispositivo Remote Center of Compliance (RCC). In particolare, questo è in grado di introdurre nel sistema integrato Robot+Gripper una nuova caratteristica che è quella che riguarda un maggiore controllo dell'interazione tra il sistema considerato e l'ambiente di lavoro.

Si tratta di dispositivi meccanici che, installati tra il polso del robot ed il gripper, permettono di reagire in modo opportuno a forze esterne grazie all'introduzione di una cedevolezza passiva.



**Fig. 5-5: Esempio applicazione dispositivo RCC, [43].**

In questo modo, se si prende in considerazione il caso presentato in questa tesi, l'utilizzo di un dispositivo RCC permetterebbe al sistema Robot+gripper di reagire ad eventuali sforzi che potrebbero verificarsi durante l'esecuzione del ciclo di produzione.

In particolare, una fase critica è quella che vede l'estrazione dell'anello appena stampato dallo stampo. L'estrazione avviene grazie al movimento relativo tra il gripper, che è fermo ed ha afferrato l'anello, ed l'estrattore, che si muove verso il basso. Proprio questo movimento verso il basso dell'estrattore dello stampo, a causa dell'interferenza con l'anello, determina il movimento non voluto del sistema robot+gripper verso il basso. L'utilizzo di un sistema RCC permetterebbe l'esecuzione di tale movimento senza causare nessuno sforzo sull'intero sistema di movimentazione.

### 5.1.2 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi sono state presentate tutte le fasi che hanno interessato il processo di progettazione di un gripper industriale innovativo, chiamato “QuBu Gripper”.

Il gripper, installato al polso di un robot antropomorfo a sei assi, ha come obiettivo la manipolazione di prodotti appartenenti alla famiglia “Anelli di tenuta olio” all’interno di una cella di stampaggio robotizzata ad elevata automazione.

I criteri principali che hanno guidato l’intero processo di progettazione, che è iniziato con lo studio e la ricerca di una soluzione innovativa di gripper fino alla realizzazione e industrializzazione del primo prototipo, sono stati la flessibilità, la versatilità, l’affidabilità e l’ottimizzazione delle prestazioni.

La prima fase del processo di progettazione del QuBu Gripper ha avuto come obiettivo la definizione dei requisiti di progetto specifici del gripper. Il metodo utilizzato per la definizione di tali requisiti è stato quello che ha interessato l’analisi degli aspetti principali del processo produttivo. Un primo aspetto è quello che riguarda le caratteristiche fisiche e geometriche dell’oggetto da manipolare. Sono state esaminate sia le proprietà geometriche e fisiche proprie del semilavorato “lamiera” che del prodotto finito “Anello di tenuta”. Un particolare interesse è stato posto alla superficie di presa e cioè alle specifiche superficiali e ai materiali la caratterizzano. Un ulteriore aspetto analizzato nella prima fase del processo di progettazione è stato il ciclo di produzione realizzato nella cella robotizzata. In particolare l’analisi ha riguardato tutte le possibili configurazioni di presa e i vincoli al contorno che si presentano durante l’esecuzione di ogni singola fase del ciclo di produzione. Infine, l’ultimo aspetto esaminato è stato l’ambiente di lavoro in cui opera il gripper.

La seconda fase del processo di progettazione ha interessato lo studio dello stato dell’arte dei gripper utilizzati maggiormente nei processi industriali. Questo ha permesso di ottenere gli elementi di base per poi poter definire e caratterizzare gli aspetti fondamentali del gripper oggetto di questa tesi. In particolare, gli elementi che hanno contraddistinto questa fase sono stati: a) lo studio delle principali categorie dei gripper industriali e dei relativi aspetti qualificanti; b) lo studio delle principali categorie di sensori utilizzati nei gripper; c) l’analisi dei diversi sistemi di manipolazione utilizzati attualmente nel processo di produzione oggetto di studio.

La terza fase del processo di progettazione ha avuto come obiettivo la realizzazione del primo prototipo del QuBu gripper. La prima parte vede l’introduzione e la definizione del concetto di modularità. Questo perché, grazie all’analisi del processo di presa di un oggetto, è stato possibile identificare e distinguere tre diversi stati che sono: l’adattamento alle condizioni esterne, il riposizionamento dell’oggetto e l’applicazione della forza di presa. Definito il concetto di modularità è stata determinata la tipologia di presa da adottare prendendo in considerazione sia le applicazioni industriali affini che le teorie di manipolazione presenti in letteratura. Successivamente, sono state presentate e confrontate diverse possibili tipologie di architetture dipendenti dal tipo di movimento che interessa le griffe durante la presa di un oggetto. Il processo di sintesi del tipo di architettura ha poi visto la sintesi dei parametri geometrici che la caratterizzano per poi definire la configurazione geometrica migliore per l’applicazione oggetto di questa tesi. Un aspetto fondamentale per la sintesi dei parametri geometrici dell’architettura scelta è quello che ha visto l’ideazione e l’applicazione di un metodo grafico originale e sviluppato proprio in questa tesi.

Anche il processo di definizione del sistema di trasmissione, eseguito dopo aver definito l’architettura, ha visto l’analisi di aspetti specifici. Il primo aspetto esaminato è stato quello che ha permesso di determinare il livello delle forze coinvolte durante l’esecuzione della fase di centraggio e durante la fase di presa dell’oggetto. A questo è seguita la presentazione e la comparazione di diversi sistemi di trasmissione. L’ipotesi di partenza principale, che ha caratterizzato i diversi sistemi di trasmissione è quella che ha portato alla scelta di utilizzare dei

sistemi di trasmissione che presentano un unico grado di libertà. Questo perché permette di ottenere il moto sincronizzato delle griffe e quindi di realizzare la coassialità del gripper con l'oggetto afferrato. Un ulteriore vincolo di progetto è quello legato al limitato spazio in altezza. Questo ha imposto l'utilizzo di un meccanismo piano per il sistema di trasmissione. Quest'analisi ha quindi permesso di definire il sistema di trasmissione da implementare per il gripper oggetto di questa tesi. Il passo successivo ha interessato la definizione del sistema di attuazione e del relativo sistema di sensorizzazione e controllo. In particolare, il sistema di sensori e di controllo implementato, è strettamente dipendente dalla definizione delle tecniche di controllo di movimentazione e di presa degli anelli ipotizzate durante l'esecuzione del ciclo di produzione. Infine, dopo aver eseguito l'attività di progettazione esecutiva del gripper, è stato realizzato il primo prototipo del "QuBu Gripper".

L'ultima fase del processo di progettazione ha poi permesso di definire il sistema di controllo del gripper e di caratterizzare le grandezze fisiche principali che interessano il gripper stesso durante il funzionamento. In particolare, il sistema di controllo è stato implementato dopo lo studio dello schema generale della cella di produzione. Questo perché, uno dei requisiti fondamentali imposti al gripper, è quello che vede la completa integrazione di questo nuovo dispositivo all'interno della sistema cella. Per quanto riguarda la caratterizzazione del gripper, è stata concepita e svolta una specifica campagna sperimentale. Una prima tipologia di prove ha interessato la valutazione della capacità di autocentraggio della pinza di manipolazione. In particolare è stata valutata la ripetibilità della presa autocentrante ed è stato valutato il campo di lavoro ammissibile del gripper. La seconda tipologia di prove ha invece riguardato l'analisi dei parametri di funzionamento del controllore implementato e la caratterizzazione delle principali grandezze fisiche che interessano il ciclo di manipolazione. In questo modo è stato possibile sviluppare un processo che permette di definire i parametri di funzionamento del sistema gripper in funzione dell'oggetto da manipolare.

La parte finale di questa tesi, presenta delle possibili evoluzioni di alcuni aspetti caratteristici del gripper. L'obiettivo è quello di poter ottenere un dispositivo più "intelligente" e cioè in grado di manipolare oggetti diversi da quelli considerati indipendentemente dalle condizioni esterne legate all'ambiente di lavoro.

I risultati ottenuti da questa tesi sono quelli che, attraverso l'applicazione di un approccio metodologico, hanno permesso di realizzare il QuBu gripper che è un dispositivo di presa originale ed innovativo e che risponde efficacemente ai requisiti di un processo ad elevata automazione.

## Capitolo 6 Bibliografia

- [1] acatech, «Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0,» acatech – National Academy of Science and Engineering, Berlino, 2013.
- [2] S. C. Mukhopadhyay e N. K. Suryadevara, *Internet of Things: Challenges and Opportunities*, Springer International Publishing, 2014.
- [3] «rVantage.net,» [Online]. Available: <http://rvantage.net/>.
- [4] E. R. CPS, «Strategic Vision and Business Drivers for 21st Century Cyber-Physical Systems,» National Institute of Standards and Technology - U.S. Department of Commerce, 2013.
- [5] «Fabbrica Intelligente,» [Online]. Available: <http://www.fabbricaintelligente.it>.
- [6] IFR, «World Robotics 2015 - Industrial Robots,» 2015.
- [7] R. C. Michelini e R. M. Molfino, «Instrumental Grasping and Handling Devices: Design Cycle and Example Applications,» Genova, Italy, 2002.
- [8] G. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann e H. Schunk, *Robot Grippers*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [9] G. J. Monkman, «Robot grippers for use with fibrous materials,» *The International journal of robotics research*, 14, pp. 144-151, 1995.
- [10] E. B. Paz, M. Ceccarelli, J. E. Otero e J. L. Sanz, *A brief illustrated history of machines and mechanisms (Vol. 10)*, Springer Science & Business Media, 2010.
- [11] M. Ceccarelli, «Notes for a history of grasping devices,» in *Grasping in Robotics*, Springer London, 2013, pp. 3-16.
- [12] M. Ceccarelli, «Renaissance of machines in Italy: from Brunelleschi to Galilei through Francesco di Giorgio and Leonardo,» *Mechanism and Machine Theory* 43, pp. 1530-1542, 2008.
- [13] «Robotiq,» [Online]. Available: <http://robotiq.com/>.
- [14] «Universal Robot,» [Online]. Available: <http://www.universal-robots.com/>.
- [15] «Schunk,» [Online]. Available: <http://www.schunk.com>.
- [16] A. Wolf, R. Steinmann e H. Schunk, *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks*, Springer Science & Business Media, 2006.
- [17] F. Y. Chen, «Gripping mechanisms for industrial robots: an overview,» *Mechanism and machine Theory*, 17, pp. 299-311, 1982.

- [18] A. Rovetta, P. Vicentini e I. Franchetti, On development and realization of multipurpose grasping system, Proc. 11 Internat. Conf. Industrial Robot, 1981.
- [19] «Festo,» [Online]. Available: <https://www.festo.com>.
- [20] «Gimatic,» [Online]. Available: <http://www.gimatic.com>.
- [21] «SMC,» [Online]. Available: <http://www.smc.com>.
- [22] «Zimmer Group,» [Online]. Available: <http://zimmer-group.com/>.
- [23] G. Fantoni, D. Gabelloni e J. Tilli, «Concept design of new grippers using abstraction and analogy,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013.
- [24] G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi e P. Bettini, Tecnologie e materiali aerospaziali - Cap. 63.
- [25] H. Liu e t. al, «The modular multisensory DLR-HIT-Hand,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, n. 5, pp. 612-625, 2007.
- [26] «Shadow Dexterous Hand,» [Online]. Available: <https://www.shadowrobot.com>.
- [27] «Schmalz,» [Online]. Available: <http://us.schmalz.com>.
- [28] «Altius Space Machines,» [Online]. Available: <http://www.altius-space.com>.
- [29] «Assembly Magazine,» [Online]. Available: <http://www.assemblymag.com>.
- [30] «Ono Sokki,» [Online]. Available: <https://www.onosokki.co.jp>.
- [31] «Tekscan,» [Online]. Available: <https://www.tekscan.com>.
- [32] L. Birglen, T. Laliberté e C. M. Gosselin, Underactuated Robotic Hands, Springer Science & Business Media, 2008.
- [33] M. Manti, T. Hassan, G. Passetti, N. D'Elia, C. Laschi e M. Cianchetti, «A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping,» *Soft Robotics*, vol. 2, n. 3, pp. 107-116, 2015.
- [34] «Soft Robotics,» [Online]. Available: <http://www.softroboticsinc.com/>.
- [35] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. L. H. Zakin e J. H. M., «Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010.
- [36] M. R. Cutkosky e R. D. Howe, «Human Grasp Choice and Robotics Grasp Analysis,» in *Dextrous robot hands*, New York, Springer-Verlag, 1990, pp. 5-31.



- [37] «Wago,» [Online]. Available: <http://www.wago.it>.
- [38] «Kawasaki,» [Online]. Available: <https://robotics.kawasaki.com>.
- [39] «Chauvin Arnoux Metrix,» [Online]. Available: <http://www.chauvin-arnoux.com>.
- [40] «Arduino,» [Online]. Available: <https://www.arduino.cc>.
- [41] P. Steutel, G. A. Kragten e L. J. Herder, «Design of a fully compliant under-actuated finger with a monolithic structure and distributed compliance,» in *Proceedings of IDETC/CIE 2010*, 2010.
- [42] «Senix,» [Online]. Available: <https://senix.com>.
- [43] «ATI Industrial Automation,» [Online]. Available: <http://www.ati-ia.com>.

## Capitolo 7 Elenco figure

Fig. 1-1: Industry 4.0, [3].	6
Fig. 1-2: Andamento vendite robot industriali, [6].	7
Fig. 1-3: Vendite robot industriali per settore, [6].	8
Fig. 1-4: Andamento vendite robot per area di mercato, [6].	8
Fig. 1-5: a) Cella di stampaggio robotizzata; b) Robot+gripper attuale.	9
Fig. 1-6: Anello di tenuta olio assial-simmetrico: anello stampato e rispettiva lamiera.	10
Fig. 1-7: Esempi di lamiere da manipolare con relative aree di presa.	11
Fig. 1-8: Esempi di anelli da manipolare con relative aree di presa.	11
Fig. 1-9: Esempio di un anello che presenta un'area di presa non piana e deformabile.	12
Fig. 1-10: a) Anello con sfrido ad un canale; b) anello con sfrido a quattro canali.	12
Fig. 1-11: Esempio di presa di un anello con sfrido.	12
Fig. 1-12: Layout della cella di produzione robotizzata.	13
Fig. 1-13: Sequenza delle fasi di un ciclo di produzione.	13
Fig. 1-14: Schemi soluzioni di stampaggio: a) Schema 1x1; Schema 1x2; Schema 1x4.	14
Fig. 1-15: Flusso delle operazioni eseguite durante la fase di stampaggio.	14
Fig. 1-16: Schema del gripper utilizzato attualmente.	15
Fig. 1-17: Fase di lavoro – Prelievo lamiera nelle due possibili configurazioni.	16
Fig. 1-18: Posizioni del gripper dopo il prelievo della lamiera.	16
Fig. 1-19: Fase di lavoro – Estrazione anello dallo stampo.	17
Fig. 1-20: Particolare della fase di estrazione anello dallo stampo.	17
Fig. 1-21: Fase di lavoro – Rilascio della lamiera nello stampo.	18
Fig. 1-22: Fase di lavoro – Rilascio dell'anello nella zona di raffreddamento.	18
Fig. 1-23: Fase di lavoro – Presa dell'anello dalla zona di raffreddamento.	19
Fig. 1-24: Fase di lavoro – Rimozione dello sfrido con posizionamento dell'anello nel mandrino.	19
Fig. 1-25: Fase di lavoro – Rilascio dell'anello sul nastro di uscita.	20
Fig. 1-26: Esempio di attrezzature specifiche utilizzate dal gripper sia per la pinza di estrazione che per quella di manipolazione.	20
Fig. 1-27: Ingombri del gripper attualmente utilizzato nelle celle di produzione robotizzate.	21
Fig. 1-28: Range dimensionale anelli assial-simmetrici.	22
Fig. 1-29: Schema delle forze scambiate tra un gripper a 3 griffe e l'oggetto afferrato.	23
Fig. 1-30: Andamento forza di presa.	24
Fig. 1-31: Project plan del QuBu Gripper	25
Fig. 2-1: Esempi di dispositivi presa di epoca romana, [11].	26
Fig. 2-2: Esempi di dispositivi di presa di epoca rinascimentale, [11].	27
Fig. 2-3: Esempi di gripper attuali e di mano robotica, [13], [14], [15].	27
Fig. 2-4: Schema generale degli elementi che compongono un gripper di tipo "Impactive", [16].	28
Fig. 2-5: Schema delle due tecniche di presa: a) Force-lock; b) Forme-lock, [16].	29
Fig. 2-6: Schema delle diverse tipologie di contatto.	30
Fig. 2-7: Esempi di "Impactive gripper", [13], [15].	30
Fig. 2-8: Esempio di sistemi articolati a leve, [17].	31
Fig. 2-9: Esempio di sistemi con ingranaggi a vite e madrevite, [17].	31
Fig. 2-10: Esempi di sistemi con meccanismi a camme, [17].	32
Fig. 2-11: Esempi di sistemi con meccanismi a rocchetto e cremagliera, [17].	32
Fig. 2-12: Esempio di sistema con meccanismo a cinghia e puleggia, [17], [18].	32

Fig. 2-13: Principali metodi di accostamento per i gripper industriali: a) due griffe ad accostamento angolare; b) due griffe ad accostamento lineare; c) tre griffe ad accostamento angolare; d) tre griffe ad accostamento lineare, [15].	33
Fig. 2-14: Esempi di soluzioni biomimetiche, [19], [25], [26].	33
Fig. 2-15: Esempi di “Ingressive gripper”, [27].	34
Fig. 2-16: Esempi di “Astrictive gripper” ad aspirazione, [27].	34
Fig. 2-17: “Astrictive gripper” ad azione magnetica: a) di tipo attivo, [15]; b) di tipo passivo, [27].	35
Fig. 2-18: Esempio di “Astrictive gripper” ad elettro adesiva, [28].	36
Fig. 2-19: Esempio di “Contigutive gripper” ad adesione chimica.	36
Fig. 2-20: Esempio di utilizzo di un sensore di prossimità, [29].	37
Fig. 2-21: Esempi di encoder per misure di posizione: a) tipo rotativo; b) tipo lineare, [30].	37
Fig. 2-22: Esempio di sensori tattili: a) tipo piezoresistivo, [31]; b) tipo capacitivo, [15].	38
Fig. 2-23: Esempi di gripper “innovativi”, [13], [19], [33], [35].	39
Fig. 2-24: Schema generale del gripper utilizzato attualmente (vista laterale).	40
Fig. 2-25: Pinza per le operazioni di manipolazione lamiera / prodotto finito nelle due posizioni di lavoro.	41
Fig. 2-26: Pinza per l’operazione di estrazione nelle due posizioni di lavoro.	41
Fig. 2-27: Pinza tipo B per le operazioni di manipolazione lamiera / prodotto finito nelle due posizioni di lavoro (vista dall’alto).	42
Fig. 3-1: Schema dei possibili moduli costituenti il gripper.	43
Fig. 3-2: Schema della sequenza del processo di presa applicando il concetto modulare.	44
Fig. 3-3: Movimento possibile delle griffe – rettilineo, circolare.	46
Fig. 3-4: Due possibili forme geometriche assunte dalla parte terminale della griffa: a) contatto di superficie; b) contatto su una linea.	47
Fig. 3-5: Accostamento di tipo rettilineo: a) Contatto di superficie; b) contatto su una linea.	47
Fig. 3-6: Accostamento di tipo circolare: a) Contatto di superficie; b) contatto su una linea.	47
Fig. 3-7: Parte terminale della griffa con elemento deformabile.	48
Fig. 3-8: Angolo di accostamento.	48
Fig. 3-9: a) T2R Tipologia a Tre punti, con due griffe mobili, movimento rettilineo; b) T2C Tipologia a Tre punti, con due griffe mobili, movimento circolare.	49
Fig. 3-10: a) T3R- Tipologia a Tre punti, con tre griffe mobili, movimento rettilineo; b) T3C- Tipologia a Tre punti, con tre griffe mobili, movimento circolare.	49
Fig. 3-11: Architettura “T2R”, due griffe mobili con movimento rettilineo.	50
Fig. 3-12: Architettura “T2C”, due griffe mobili con movimento circolare.	50
Fig. 3-13: Architettura “T3R”, tre griffe mobili con movimento rettilineo.	51
Fig. 3-14: Architettura “T3C”, tre griffe mobili con movimento circolare.	51
Fig. 3-15: Schema dell’architettura scelta con i relativi parametri geometrici.	52
Fig. 3-16: Architettura T3R.	53
Fig. 3-17: Schema rappresentazione parametri geometrici dell’architettura.	53
Fig. 3-18: Andamento angolo di accostamento ( $r_f/r_{min}=2,138$ ; $r_p/r_{min}=1,722$ ).	54
Fig. 3-19: Metodo grafico per la definizione di $r_f$ e $r_p$ .	54
Fig. 3-20: Andamento dell’angolo di accostamento in funzione di $\alpha$ .	55
Fig. 3-21: Andamento di $r_f$ e $r_p$ in funzione di $\alpha$ .	55
Fig. 3-22: Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=30^\circ$ .	56
Fig. 3-23: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=30^\circ$ .	56
Fig. 3-24: Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=45^\circ$ .	57
Fig. 3-25: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=45^\circ$ .	57
Fig. 3-26: Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=70^\circ$ .	58
Fig. 3-27: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A $\rightarrow \alpha=70^\circ$ .	58

Fig. 3-28: Andamento angolo di accostamento – Schema configurazione A, B, C.....	59
Fig. 3-29: Architettura tipo “simmetrica”: schema e andamento dell’angolo di accostamento. .....	60
Fig. 3-30: Schema configurazioni architettura con lunghezza della griffa variabile e con posizione fissa della cerniera di rotazione.....	61
Fig. 3-31: Andamento angolo di accostamento per configurazioni architettura con lunghezza della griffa variabile e con posizione fissa della cerniera di rotazione.....	62
Fig. 3-32: Schema configurazioni architettura con lunghezza della griffa fissa e con posizione variabile della cerniera di rotazione.....	62
Fig. 3-33: Andamento angolo di accostamento per configurazioni architettura con lunghezza della griffa fissa e con posizione variabile della cerniera di rotazione.....	63
Fig. 3-34: Costruzione geometrica per l’architettura di tipo “compatta”.....	64
Fig. 3-35: Andamento angolo di accostamento per l’architettura di tipo “compatta”.....	65
Fig. 3-36: Andamento della massa in funzione del diametro esterno per la lamiera e l’anello, Tab. 1-1.....	66
Fig. 3-37: Relazione massa-diametro esterno dell’oggetto. ....	67
Fig. 3-38: Schema delle forze in gioco considerate durante la fase di centraggio. ....	68
Fig. 3-39: Schema delle azioni e delle reazioni agenti durante la fase di centraggio.....	68
Fig. 3-40: Andamento forza di centraggio $F_G$ . ....	69
Fig. 3-41: Andamento Coppia di centraggio $C_{TF}$ .....	70
Fig. 3-42: Andamento forza di presa $F_G$ .....	71
Fig. 3-43: Schema delle forze in gioco considerate durante la fase di presa.....	72
Fig. 3-44: Andamento coppia di presa $C_{TF}$ .....	72
Fig. 3-45: Confronto andamento di coppia di presa al variare delle dimensioni con massa costante. ....	73
Fig. 3-46: Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo articolato a leve. ....	74
Fig. 3-47: Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo a camme. ....	75
Fig. 3-48: Schema di un sistema di trasmissione con ruote dentate.....	75
Fig. 3-49: Schema di un sistema di trasmissione con ruote dentate e vite senza fine. ....	76
Fig. 3-50: Configurazione griffe per i casi di $r_{Omax}$ , $r_{O100}$ e $r_{Omin}$ .....	77
Fig. 3-51: Tempo di chiusura in funzione della corsa angolare. ....	79
Fig. 3-52: Diagramma di flusso del processo di determinazione del sistema di trasmissione e di attuazione.....	80
Fig. 3-53: Schema del sistema di trasmissione.....	81
Fig. 3-54: Disegno costruttivo dell’albero centrale.....	83
Fig. 3-55: Schema delle azioni e delle reazioni agenti sull’albero centrale. ....	83
Fig. 3-56: Schema del sistema di trasmissione – Piano x-y. ....	85
Fig. 3-57: Schema del sistema di trasmissione – Piano x-z.....	85
Fig. 3-58: Schema livello percezione forza di presa in funzione del tipo di sensore utilizzato. .....	87
Fig. 3-59: Fase di presa. ....	88
Fig. 3-60: Fase di rilascio. ....	88
Fig. 3-61: Immagini Cad del gripper, con e senza carter di protezione. ....	89
Fig. 3-62: Schema di funzionamento del sistema di anticollisione. ....	90
Fig. 3-63: Particolare del sistema di anticollisione.....	90
Fig. 3-64: Tavola complessivo gripper.....	91
Fig. 3-65: Vista dal basso del QuBu gripper. ....	92
Fig. 3-66: Vista dall’alto durante la fase di posizionamento per eseguire la presa di un anello. .....	92

Fig. 3-67: a) Fase di applicazione della forza di presa; b) Fase di movimentazione dell'anello afferrato. ....	93
Fig. 3-68: a) Interfaccia elettrica; b) Interfaccia pneumatica; c) Interfaccia polso robot. ....	93
Fig. 4-1: Esempio schema generale del sistema di controllo della cella di produzione robotizzata, [37], [38]. ....	94
Fig. 4-2: Immagine del piano di raffreddamento con le otto posizioni di lavoro. ....	95
Fig. 4-3: Esempio elaborazione immagine per la determinazione della presenza oggetto: a) Immagine; b) Istogramma relativo. ....	96
Fig. 4-4: Esempio elaborazione immagine per la determinazione del centro dell'oggetto: a) Immagine con linea tracciata; b) Istogramma relativo alla linea tracciata. ....	96
Fig. 4-5: Elaborazione dell'immagine acquisita dalla telecamera. ....	97
Fig. 4-6: Configurazione modificata del nodo per la gestione del gripper, [37]. ....	98
Fig. 4-7: Schema del modulo "I/O DC Drive Controller" integrato nel nodo per la gestione del gripper, [37]. ....	99
Fig. 4-8: Fasi del ciclo di presa e andamento grandezze fisiche principali, velocità angolare delle griffe $\omega_{TF}$ e Forza di presa $F_G$ . ....	99
Fig. 4-9: Fasi del ciclo di rilascio e andamento grandezze fisiche principali, velocità angolare delle griffe $\omega_{TF}$ e Forza di presa $F_G$ . ....	100
Fig. 4-10: Schema generale del sistema di controllo della pinza di manipolazione. ....	100
Fig. 4-11: Esempio generale del ciclo di funzionamento della pinza di manipolazione. ....	101
Fig. 4-12: Foto del banco prova per le prove di "Tipo A.1" ....	102
Fig. 4-13: Schema banco prova per l'autocentraggio. ....	103
Fig. 4-14: a) Posizione dell'oggetto iniziale; b) Posizione dell'oggetto dopo l'i-esima presa. ....	104
Fig. 4-15: Confronto tra la posizione iniziale e l'i-esima dopo la presa. ....	104
Fig. 4-16: Processo numerico per il calcolo del centro dell'oggetto per ogni i-esima presa. ....	105
Fig. 4-17: Posizione relativa dei centri "C <sub>i</sub> ": a) $\varnothing d_1=100$ mm; b) $\varnothing d_2=180$ mm; c) $\varnothing d_3=250$ mm. ....	105
Fig. 4-18: Distribuzione dei centri C <sub>i</sub> nel piano di lavoro. ....	106
Fig. 4-19: Posizione dei centri "centrata" ....	106
Fig. 4-20: Distanza relativa tra i centri "d <sub>i</sub> " ....	107
Fig. 4-21: Schema di misura per la valutazione dell'autocentraggio. ....	108
Fig. 4-22: Posizioni relative dell'anello lungo le direzioni di misura considerate: a) dir_1; b) dir_2; c) dir_3; d) dir_4. ....	109
Fig. 4-23: Esempio di misura della distanza dei centri per due posizioni lungo la direzione "dir_2". ....	109
Fig. 4-24: Aree di lavoro per oggetto con $r_0=50$ mm. ....	110
Fig. 4-25: Posizione relativa dell'oggetto con $r_0=50$ mm: a) Punto P <sub>3OK</sub> ; b) Punto P <sub>0KO</sub> . ....	110
Fig. 4-26: Aree di lavoro per oggetto con $r_0=65$ mm. ....	111
Fig. 4-27: Posizione relativa dell'oggetto con $r_0=65$ mm: a) Punto P <sub>3OK</sub> ; b) Punto P <sub>0KO</sub> . ....	111
Fig. 4-28: Aree di lavoro per oggetto con $r_0=75$ mm. ....	112
Fig. 4-29: Posizione relativa dell'oggetto con $r_0=65$ mm: a) Punto P <sub>3OK</sub> ; b) Punto P <sub>0KO</sub> . ....	112
Fig. 4-30: Aree di lavoro per oggetto con $r_0=90$ mm. ....	113
Fig. 4-31: Posizione relativa dell'oggetto con $r_0=90$ mm: a) Punto P <sub>3OK</sub> ; b) Punto P <sub>0KO</sub> . ....	113
Fig. 4-32: Area di lavoro "Autocentraggio OK" per oggetti con raggio esterno crescente. ....	114
Fig. 4-33: Schema generale set-up di prova. ....	115
Fig. 4-34: Schema sistema di misura per la misura della tensione di alimentazione e della corrente assorbita del motoriduttore. ....	116
Fig. 4-35: Schema sistema di misura per la misura della forza di presa e della posizione del motoriduttore. ....	117

Fig. 4-36: Esempio generale del ciclo di funzionamento della pinza di manipolazione. ....	118
Fig. 4-37: Schema grandezze di riferimento per la posizione griffe. ....	119
Fig. 4-38: Esempio andamento segnale PWM di alimentazione. ....	120
Fig. 4-39: Relazione Duty cycle - Velocità angolare motore $\omega_M$ . ....	120
Fig. 4-40: Esempio movimentazione griffe senza l'esecuzione di una presa, [RT1=12; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=20; RT2=12]. ....	121
Fig. 4-41: Confronto influenza dei parametri RT1 e RT2 sul ciclo di funzionamento, [RT1=(6,12,20); CLT=6; CL=120; CC=80; SD=20; RT2=(20,12,6)]. ....	122
Fig. 4-42: Confronto influenza dei parametri CLT e SD sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=10; RT2=5]. ....	122
Fig. 4-43: Confronto influenza dei parametri sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=150; RT2=5]. ....	123
Fig. 4-44: Confronto influenza dei parametri sul ciclo di funzionamento, [RT1=5; CLT=(5,10,15) ; CL=120; CC=80; SD=300; RT2=5]. ....	123
Fig. 4-45: Andamento forza di presa $F_G$ , [RT1=1; CLT=6; CL=150; CC=80; SD=5; RT2=1; Set-point (290,305,335)]. ....	124
Fig. 4-46: Esempio ciclo di presa, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=5; RT2=1]. ....	125
Fig. 4-47: Confronto cicli di presa con diversi livelli di forza di presa applicata, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=80; SD=5; RT2=1]. ....	126
Fig. 4-48: Schema elettrico del motore. ....	126
Fig. 4-49: Andamento corrente assorbita e relativa forza di presa massima applicata per determinato valore di duty cycle, [RT1=1; CLT=6; CL=120; CC=35; SD=5; RT2=1]. ....	127
Fig. 4-50: Relazione tra il segnale di alimentazione del motore e la relativa forza di presa massima $F_{Gmax}$ . ....	128
Fig. 4-51: Semplificazione e schema equivalente del sistema Pinza-oggetto afferrato. ....	129
Fig. 4-52: Schema equivalente Gripper-oggetto afferrato. ....	130
Fig. 4-53: Caratteristica equivalente della pinza di manipolazione. ....	131
Fig. 4-54: Schema del processo di determinazione dei parametri di funzionamento del controllore. ....	132
Fig. 4-55: Schema grandezze di riferimento per le posizioni delle griffe. ....	134
Fig. 5-1: Schema esempio griffa e aree possibili di sensorizzazione. ....	136
Fig. 5-2: Schema generale ciclo di funzionamento con controllo in anello chiuso della posizione delle griffe e della forza di presa. ....	137
Fig. 5-3: Esempio meccanismo cedevole, [41] . ....	138
Fig. 5-4: Esempio di sensore di distanza, [42]. ....	138
Fig. 5-5: Esempio applicazione dispositivo RCC, [43]. ....	139

## Capitolo 8 Elenco tabelle

Tab. 1-1: Dati tecnici principali di alcuni anelli di tenuta. ....	11
Tab. 1-2: Dati principali che interessano l'area di stampaggio. ....	15
Tab. 2-1: Classificazione generale dei gripper, [8] ....	28
Tab. 3-1: Elenco delle possibili soluzioni di movimentazione delle griffe. ....	48
Tab. 3-2: Elenco parametri geometrici architettura tipo "simmetrica". ....	59
Tab. 3-3: Elenco parametri geometrici architettura tipo "compatta". ....	64
Tab. 4-1: Elenco dei principali parametri di funzionamento del controllore. ....	118
Tab. 4-2: Elenco dei parametri geometrici relativi alla posizione delle griffe. ....	119
Tab. 4-3: Elenco dei parametri principali relativi alle griffe. ....	129
Tab. 4-4: Elenco dei parametri geometrici che interessano la posizione delle griffe. ....	134

## **Ringraziamenti**

I risultati di questa tesi sono il frutto di un percorso di studio e di lavoro che mi hanno visto coinvolto in prima persona con passione e determinazione, ma che derivano anche dal supporto, dai consigli e dagli stimoli di tutti i miei cari amici e colleghi che mi sono stati vicino e con cui ho collaborato in questi anni.

Per questo motivo voglio ringraziarli tutti, perché ogni singola attenzione è stata molto importante per me e mi ha permesso di raggiungere questo obiettivo della mia vita.

Chiuso questo capitolo, mi auguro di affrontare le nuove sfide della vita con la stessa passione e determinazione che ho avuto fino ad ora, con la speranza di trovarmi accanto amici e colleghi sinceri, come quelli che ho avuto fino a questo momento.

Ovviamente un ringraziamento speciale va a tutta la mia famiglia, che mi è stata vicina di continuo, anche nei momenti più difficili, e che lo sarà sempre!

GRAZIE.