



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Scuola di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

Indirizzo Meccatronica e Sistemi Industriali

Ciclo XXV

SISTEMI FLESSIBILI PER L'ASSEMBLAGGIO INDUSTRIALE

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo Colombo *Paolo Colombo*

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Alberto Trevisani

Supervisore: Ch.mo Prof. Giulio Rosati *Giulio Rosati*

Dottorando: Andrea Carli *Andrea Carli*

Finito di scrivere il giorno 22 gennaio 2013 utilizzando L^AT_EX 2_ε

a me stesso e a chi mi vuol bene...

“ La luce esiste anche in un mondo di ciechi. ”

G. GUARESCHI - DON CAMILLO E I GIOVANI D'OGGI, 1983

Indice

Sommario	XIII
Abstract	XV
Prefazione	XVII
1 Gli impianti automatici flessibili per l'assemblaggio industriale	1
1.1 Definizione di assemblaggio flessibile	1
1.2 Tecnologie e sistemi di assemblaggio industriale	3
1.2.1 Aspetti della flessibilità nell'assemblaggio automatico	6
1.2.2 Idee per la flessibilità dei sistemi di assemblaggio automatico	9
1.3 Limiti dell'automazione nell'assemblaggio	15
2 La cella di assemblaggio F-FAS: idea e prototipo	17
2.1 Ideazione e ciclo di lavoro	17
2.2 I sottosistemi del prototipo	22
2.2.1 La struttura portante	23
2.2.2 Il sistema di alimentazione dei componenti	23
2.2.3 Il sistema di visione	26
2.2.4 Il robot e l'organo di presa	28
2.2.5 Il sistema di sicurezza	29
2.2.6 Il sistema di controllo	31
2.2.7 Utilizzo del prototipo	31
3 Modellazione e validazione del sistema F-FAS	37
3.1 L'assemblaggio manuale	37

3.2	Il sistema FAS tradizionale	42
3.3	La modellazione del sistema F-FAS	44
3.4	Confronto tra i sistemi di assemblaggio flessibile	48
3.4.1	Primi test per la validazione del sistema F-FAS	53
4	Criteri di progettazione e ottimizzazione del sistema F-FAS	57
4.1	Aspetti significativi	57
4.2	Modellazione dell'efficienza del sistema F-FAS	58
4.2.1	Il codice simulativo	60
4.2.2	Percentuale dei componenti riconosciuti e prendibili k_1	63
4.2.3	Percentuale dei componenti assemblati k_2	64
4.2.4	Efficienza k	66
4.3	Regole di progettazione del sistema F-FAS	67
4.3.1	Relazione tra parametri di modello e variabili di produzione e di sistema	68
4.3.2	Analisi di convenienza e settaggio ottimale del sistema F-FAS	71
5	End-Effector Flessibile	75
5.1	I gripper utilizzati nella robotica industriale	75
5.1.1	Gripper industriali dotati di flessibilità	80
5.2	Caratteristiche richieste all'End-Effector per cella F-FAS	83
5.3	Progettazione dell'End-Effector	86
5.3.1	Topologia del meccanismo	87
5.3.2	Utilizzo della teoria di sintesi per meccanismi piani	91
5.3.3	Programma di sintesi iterativa	93
5.3.4	Progettazione esecutiva	105
5.3.5	La soluzione alternativa proposta dalla University of California- Irvine	110
5.4	Il prototipo funzionale	113
	Conclusioni	117
A	Algoritmi utilizzati nel codice di sintesi iterativa	121
A.1	Algoritmo Genetico	121

A.2 Algoritmo Active Set	123
Bibliografia	125

Sommario

L'attività di ricerca presentata in questa tesi di dottorato propone una nuova classe di sistemi flessibili di assemblaggio: la cella robotizzata F-FAS (Fully - Flexible Assembly System). La modellazione di questo sistema automatico, basata e convalidata da prove sperimentali, ha permesso di confrontare le potenzialità di questa macchina con quelle dei sistemi tradizionali di assemblaggio flessibile, consentendo di affermare che tale impianto risulta assai competitivo, in particolare per condizioni di mix produttivo estremamente vario. La modellazione citata inoltre permette di proporzionare adeguatamente la cella di lavoro sulla base delle esigenze di produzione. Durante lo studio condotto sul prototipo di cella F-FAS, sono affiorati alcuni aspetti interessanti relativi ai sottosistemi che la compongono, in particolare è emerso che le caratteristiche dell'end-effector per il robot risultano influenzare pesantemente le prestazioni dell'intera macchina. Ecco perché si è deciso di dedicare una parte importante dell'attività di ricerca alla progettazione di questo sottosistema e alla sua successiva realizzazione, mediante tecniche di prototipazione rapida.

Abstract

Manufacturing companies currently have a tendency to expand more and more their production mix, on the one hand to satisfy fully the requirements of the market, which are becoming increasingly pretentious, on the other hand to diversify production, in order to disengage from any failure that a single product can found. So it will be offered different products of the same family and each product will have some variants that permit to customize it. It is clear that this way of working can become problematic, particularly if factories intend to automate the different stages of the production cycle. There are no doubts about the fact that among all the operations that lead to obtain a finished product, the assembly operation is the most critical, in particular because assembly is affected by all errors due to the operations carried upstream. Then, it is possible to say that to automate the assembly operations of a customizable product is considerably complex and the traditional ways to design an automated system may be inadequate. The necessity of flexibility in automatic assembly is a topic widely discussed in the context of the industrial engineering, however, studies conducted by the research, in order to propose a rational method for the design of an automatic flexible system, are quite modest.

The research activity presented here proposes a new class of flexible assembly systems: the robotized work cell F-FAS (Fully - Flexible Assembly System). The modeling of this automatic system, based and validated by experimental tests, has allowed to compare the potential of this machine with those of traditional systems for flexible assembly, allowing to state that this work cell is very competitive, in particular for conditions of extremely varied productive mix. The modeling cited above also allows to proportion properly the robot work cell, in according with

the necessities of production.

During the study of F-FAS prototype, some interesting aspects of the subsystems that compose the work cell are surfaced, in particular, it was found that the characteristics of the end-effector for the robot heavily influence the performance of the machine. That is why it was decided to dedicate an important part of the research activity at the design of this subsystem and at its subsequent building with rapid prototyping technology.

Prefazione

L'idea di proporre un nuovo metodo per ideare un impianto automatico per l'assemblaggio, che sia dotato della capacità di auto-configurarsi prontamente per diverse modalità di produzione, si accompagna alla crescente necessità da parte delle aziende manifatturiere di commissionare ad enti di ricerca studi per la progettazione di impianti flessibili. Un metodo generale di progettazione di un impianto automatico di assemblaggio permette quindi di far fronte ad un'esigenza che si fa sempre più rilevante.

L'idea di cella robotizzata F-FAS presentata in questa tesi, e la relativa modalità di progettazione dei sottosistemi che compongono il suo layout, può essere recepita da tutte quelle realtà produttive in cui c'è la necessità di assemblare prodotti mediante il montaggio di componenti rappresentati in generale da minuteria, ma che di fatto possono essere molto eterogenei tra loro per proprietà geometriche e dimensioni caratterizzanti.

Questa tesi di dottorato, dopo aver riportato nel primo capitolo lo stato dell'arte per gli impianti automatici di assemblaggio flessibile, evidenziando le lacune presenti in letteratura, presenta nel secondo capitolo la cella F-FAS, definendone il layout, il ciclo di lavoro caratteristico e descrivendo il prototipo di cella presente nel laboratorio di robotica dell'Università degli Studi di Padova. Nel terzo capitolo viene formulato il confronto tra la cella F-FAS e i sistemi tradizionali di assemblaggio flessibile, quali l'assemblaggio manuale e i sistemi FAS tradizionali. In questo capitolo vengono studiati il costo unitario diretto e la produttività ottenibili con i tre diversi sistemi, permettendo così di ottenere una mappa di convenienza, che consente al progettista di stabilire agevolmente quando il sistema F-FAS è conveniente rispetto alle altre due tecnologie di assemblaggio. Nel quarto

capitolo si illustrano le prove sperimentali che hanno permesso di elaborare e convalidare il modello che esprime le capacità produttive di questa macchina. In questo capitolo inoltre è riportata la descrizione sintetica del funzionamento di un codice che, simulando il comportamento della cella F-FAS, permette di evadere velocemente un elevato numero di ordinativi. Perciò con questo codice è stato possibile simulare un elevato numero di evasioni ordine e questo ha permesso di analizzare l'andamento di alcuni parametri presenti nel modello proposto. Anche il comportamento di questo simulatore è stato validato sperimentalmente mediante prove condotte sul prototipo. Per concludere, il quinto capitolo si sofferma sulla progettazione dell'End-Effector per il robot, evidenziando come questo sottosistema influenza le potenzialità della cella F-FAS, permettendo così di individuare le caratteristiche tecniche richieste a questo organo terminale per ottimizzare le performance dell'impianto robotizzato. In questa parte della tesi, si presenta tra l'altro un programma di sintesi iterativa utilizzato per progettare il meccanismo articolato previsto per l'End-Effector, sviluppato durante il periodo di formazione dell'autore negli USA. La soluzione individuata con tale codice viene poi confrontata con quella proposta dal gruppo di ricerca in meccanica applicata alle macchine della University of California-Irvine, ottenuta mediante un programma di sintesi per punti di precisione.

Capitolo 1

Gli impianti automatici flessibili per l'assemblaggio industriale

In questo capitolo viene riportato lo stato dell'arte degli impianti automatici flessibili utilizzati nell'assemblaggio industriale. Dopo aver proposto una definizione di assemblaggio flessibile ed aver individuato le tecnologie utilizzate nell'assemblaggio industriale, evidenziando i diversi sistemi impiegati, si pone l'attenzione su tutti gli aspetti della tecnologia del montaggio che sono stati oggetto di studi approfonditi, al fine di incrementarne il grado di flessibilità. In questo modo si vuole definire il confine dell'assemblaggio automatico, ossia individuare quelle operazioni in cui l'assemblaggio non impiega tecnologie dotate di automazione. Con questo risultato si possono individuare le cause di questo limite e quindi cercare di ideare una soluzione per poterlo superare.

1.1 Definizione di assemblaggio flessibile

Quando si parla di automazione flessibile nel settore manifatturiero, spesso si pensa al concetto di fabbrica automatica, ovvero ad un aspetto dell'industria contemporanea, fortemente legato alla ricerca scientifica nel campo della mecatronica, che prevede il funzionamento dello stabilimento produttivo senza l'ausilio dell'uomo. In effetti, nell'immaginario collettivo anche il concetto di lavoro sta subendo un processo evolutivo sempre più veloce, richiedendo alla ricerca crescenti sforzi per

21. GLI IMPIANTI AUTOMATICI FLESSIBILI PER L'ASSEMBLAGGIO INDUSTRIALE

elaborare idee e soluzioni. Infatti la produzione automatizzata permette una redistribuzione delle mansioni, riducendo la manodopera impiegata nella produzione diretta, ma incrementando il fabbisogno di lavoro nel campo della progettazione, della supervisione, del coordinamento e del controllo. Va infatti sottolineato che la riduzione dell'incidenza dei costi della manodopera sulla produzione è uno dei principali obiettivi delle aziende moderne, per essere competitive nel mercato globale e questo aspetto richiede un alto grado di automazione flessibile nel ciclo produttivo. Bisogna tuttavia sottolineare che il concetto di automazione flessibile, ovvero la capacità di un sistema meccanico di riconfigurarsi a seconda delle esigenze produttive, è una realtà ormai matura nel campo delle lavorazioni di macchina, ma necessita ulteriori approfondimenti per quanto riguarda la fase di assemblaggio, anche a causa della maggior complessità del problema [1].

Indipendentemente dal sistema e dalla tecnologia impiegati, *l'operazione di assemblaggio si definisce flessibile se è svolta grazie alla crescente capacità di movimentare, manipolare e montare con destrezza e velocità un'ampia varietà di componenti, molto eterogenei tra loro, che insieme possono costituire vari modelli di un prodotto finito, i quali, a loro volta, subiscono numerosi e repentini cambiamenti delle caratteristiche progettuali e relativamente alla programmazione della loro produzione.*

In questa definizione si ponga particolare attenzione all'aggettivo crescente usato per descrivere il sostantivo capacità: questa caratteristica sta ad indicare che l'operazione di assemblaggio flessibile, per potersi definire tale, necessita di un sistema in grado di manifestare capacità che possano progredire nel tempo. Questo aspetto non deve però portare ad immaginare il sistema flessibile di assemblaggio come un'entità ideale, in grado di assemblare qualsiasi tipo di oggetto gli venga sottoposto, indipendentemente dall'esigenza reale per cui è stato originariamente ideato. Infatti, anche pensando ad un operatore umano, è ben evidente che neppure in questo caso si è in grado di soddisfare questa necessità perché, per quanto poco, anche l'uomo ha bisogno di imparare un'operazione prima di compierla, in particolare modo quando è complessa e delicata come nel caso dell'assemblaggio. Bisogna inoltre sottolineare che un sistema flessibile di assemblaggio manifesta tale qualità entro lo scopo per cui è stato concepito, così ad esempio un impianto automatico

per il montaggio di automobili risulterà flessibile nel montare autovetture, ma non sarà mai possibile chiedere che si possa auto-adattare per l'assemblaggio di un prodotto diverso, a meno di radicali stravolgimenti. Quindi ciò che la tecnica può ideare e sviluppare sono dei sistemi che siano in grado di assemblare prodotti della stessa famiglia, che costituiscono un mix produttivo estremamente diversificato e variabile.

1.2 Tecnologie e sistemi di assemblaggio industriale

L'importanza di studiare delle modalità innovative per l'operazione di assemblaggio è giustificata dal fatto che quasi tutti i prodotti sono costituiti da più di un componente e quindi per costruirli è necessario un processo di assemblaggio. Inoltre l'assemblaggio industriale occupa una quota significativa del tempo di attraversamento (lead time), ovvero del tempo che trascorre tra l'entrata delle materie prime nello stabilimento industriale e l'uscita del prodotto finito [2]. In aggiunta, risulta noto che in media la fase di assemblaggio incide per un 20% sul costo unitario diretto di produzione, raggiungendo quote che sfiorano il 40% nei casi in cui il prodotto non sia stato ben progettato per essere assemblato [2].

Quando si parla di tecnologia di assemblaggio, si utilizza un termine legato al concetto di processo, ovvero di modo di condurre un'operazione. Ad ogni tecnologia corrisponde poi un sistema hardware e software con cui essa è posta in essere. Alla luce di ciò è possibile distinguere tre tipologie di assemblaggio [3]:

- tecnologia di assemblaggio manuale;
- tecnologia di assemblaggio robotizzato;
- tecnologia di assemblaggio con macchine dedicate;

Alle tre tecnologie indicate corrispondono diversi sistemi di assemblaggio, ad esempio una postazione fissa di assemblaggio con un operatore per l'assemblaggio manuale, una cella di lavoro dotata di due robot per l'assemblaggio robotizzato e



Figura 1.1: Macchina dedicata per l'assemblaggio di cassette. Per gentile concessione di T.S.R. costruzione macchine speciali s.r.l., Mestrino (PD) - Italia.

una macchina automatica speciale a tavola rotante per l'assemblaggio con macchine dedicate. Risulta evidente che le tre tecnologie sono caratterizzate da capacità diverse, che comportano una discriminazione sulla loro scelta, nel momento in cui un nuovo sistema di assemblaggio viene progettato. Tali capacità riguardano la sfera tecnologica, quella economica e infine quella delle tempistiche. Inoltre, le performance che la singola tecnologia riesce a garantire possono essere molto diverse, in base al sistema reale utilizzato. Questo aspetto è molto evidente se si considerano i costi legati al sistema di assemblaggio usato e la velocità con cui esso permette di condurre l'operazione di montaggio, aspetto che influenza la capacità di un'impresa di rispondere prontamente alle esigenze di mercato e quindi la possibilità di relegare i concorrenti al ruolo di inseguitori.

Alla luce di questa premessa, la tecnologia di assemblaggio con macchine dedicate si dimostra, per definizione, quella più rigida e quindi più lontana dallo scopo di questa tesi. Infatti questa tecnologia è caratterizzata da un forte legame tra la macchina e il prodotto da assemblare, perciò ogni modifica del prodotto o di uno dei suoi componenti, determina spesso uno stravolgimento del sistema di assemblaggio. Si può affermare quindi che la vita delle macchine dedicate è pari alla vita del prodotto che assemblano e il loro notevole costo è giustificato solamente dagli alti volumi produttivi che sono in grado di garantire. Gli alti ritmi di produzione di queste macchine necessitano un'alta affidabilità, sia che si tratti di macchine



Figura 1.2: Assemblaggio manuale presso la Calzoni s.r.l., Molinella (Bo) - Italia.

sincrone, sia che si parli di macchine asincrone, dove tra le stazioni di assemblaggio sono interposti dei polmoni interoperazionali. Quindi per evitare interruzioni della produzione, dovute ad un loro malfunzionamento, è necessario banalizzare tutte le operazioni che concorrono ad eseguire l'assemblaggio automatico, rendendo la fase di ideazione di queste macchine ingegneristicamente molto complessa.

Parlando di assemblaggio manuale invece, si può dire che esso è uno dei termini di paragone per valutare il grado di flessibilità di un sistema di assemblaggio automatico. Infatti l'assemblaggio manuale è caratterizzato dal più alto livello di adattamento ad esigenze di produzione mutevoli. In particolare la destrezza di un operatore umano, nelle operazioni di singolarizzazione, manipolazione e montaggio dei componenti, non è attualmente riproducibile da nessuna macchina e tale caratteristica può essere sfruttata maggiormente dotando la stazione di assemblaggio manuale degli utensili più vari. Inoltre l'assemblaggio manuale è caratterizzato da una buona accuratezza e ripetibilità di montaggio, d'altra parte però presenta una distribuzione statistica dei tempi di operazione, aspetto che non rende questa tecnologia adatta a volumi di produzione molto elevati, per i quali è richiesta una precisa e serrata cadenza di lavoro. Bisogna sottolineare inoltre che l'assemblaggio manuale incontra dei limiti non trascurabili quando si tratta di svolgere operazioni che richiedono, ad esempio, di lavorare con componenti pesanti, di grandi dimensioni, acuminati o ad alte temperature. Infine, va precisato che un operatore può essere impiegato non solo per svolgere compiti di assemblaggio non automatizzati, ma può venire coinvolto in mansioni di controllo di conformità di componenti, sottoassiemi e prodotti finiti o può essere adibito a correggere

61. GLI IMPIANTI AUTOMATICI FLESSIBILI PER L'ASSEMBLAGGIO INDUSTRIALE

il montaggio non conforme di alcuni prodotti. Altresì è possibile sostituire temporaneamente con un operatore una stazione automatica fuori uso o ancora un operatore può essere impiegato per il monitoraggio e la supervisione di stazioni automatiche, anche alimentandole con i componenti da assemblare, riempiendo gli alimentatori automatici, oppure singolarizzandoli, ordinandoli e palettizzandoli opportunamente. Risulta tuttavia importante sottolineare che questa tecnologia è caratterizzata anche da aspetti meno lusinghieri, non da ultimo l'alta incidenza della manodopera sui costi diretti di produzione.

Una tecnologia con un grado intermedio di flessibilità, rispetto alle due precedentemente descritte, è rappresentata dall'assemblaggio robotizzato. In effetti l'aspetto multifunzionale e di riprogrammazione che caratterizza un robot, rende queste macchine degli elementi sempre presenti quando si parla di sistemi flessibili di assemblaggio automatico.



Figura 1.3: Cella robotizzata di assemblaggio per cassettiere. Per gentile concessione di T.S.R. costruzione macchine speciali s.r.l., Mestrino (PD) - Italia.

1.2.1 Aspetti della flessibilità nell'assemblaggio automatico

I sistemi flessibili di assemblaggio industriale FAS (dall'inglese Flexible Assembly System) sono quei sistemi, dotati di automazione, che sono in grado di far fronte, entro certi limiti, ad esigenze di produzione mutevoli. Questi sistemi di assem-

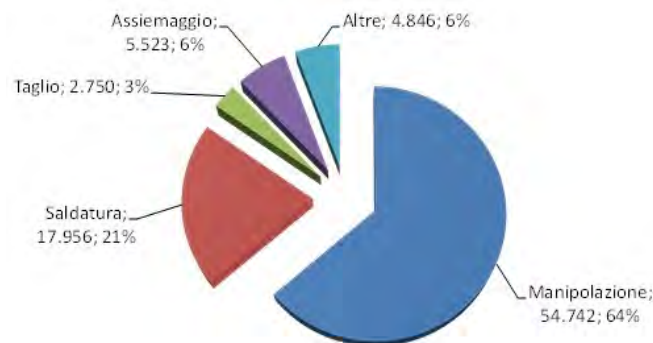


Figura 1.4: Dati dell'unione costruttori italiani macchine utensili, UCIMU - Sistemi per Produrre, sulla diffusione dei robot in Italia, anno 2011.

blaggio fanno riferimento alla tecnologia di assemblaggio robotizzato, prevedendo sempre nel loro layout uno o più manipolatori industriali. Tuttavia risulta interessante verificare, analizzando i dati relativi al totale dei robot installati in Italia nel 2011, che solo il 6% dei manipolatori è destinato a compiti di assemblaggio industriale. Questo dato può far intuire che, nonostante i sistemi FAS siano gli unici sistemi di assemblaggio automatici dotati di un rilevante grado di flessibilità, gli aspetti critici nel renderli maggiormente adattabili a esigenze produttive mutevoli, contiene la diffusione che questa tecnologia potrebbe raggiungere.

Secondo Edmondson e Redford in [11] si possono individuare due configurazioni fondamentali per un sistema FAS:

- sistema FAS organizzato in una linea di assemblaggio;
- sistema FAS a singola stazione;

I sistemi FAS organizzati in linea, sono caratterizzati da un layout dove l'assemblaggio è suddiviso in una serie di semplici operazioni svolte dalle varie stazioni riprogrammabili lungo la linea. Per questa tipologia di sistemi FAS, le varie operazioni di assemblaggio sono svolte in serie ad ogni stazione, ma con contemporaneità lungo la linea, a meno dell'aspetto asincrono della linea stessa, permettendo così di ottenere una capacità produttiva maggiore. Tuttavia la complessità di questi sistemi fa sì che mal si prestino per alti gradi di flessibilità, rendendo le loro caratteristiche più vicine alla tecnologia di assemblaggio con macchine dedicate, piuttosto che alla tecnologia di assemblaggio manuale. I sistemi FAS a singola

81. GLI IMPIANTI AUTOMATICI FLESSIBILI PER L'ASSEMBLAGGIO INDUSTRIALE

stazione invece sono rappresentati da un'isola, o cella di lavoro, dotata di uno o due robot cooperanti, che assemblano i prodotti uno alla volta e completamente. Questa configurazione di FAS permette volumi produttivi più contenuti, ma può essere ideata per far fronte ad un alto grado di flessibilità e quindi risulta più interessante alla luce dell'attività di ricerca affrontata. Un sistema FAS, qualunque sia la sua tipologia, presenta un layout in cui si possono sempre individuare alcuni sottosistemi caratteristici [5]:

- la struttura portante;
- il sistema di alimentazione dei componenti;
- il sistema robotico;
- il sistema di trasporto interno;
- la stazione di lavoro e controllo;

Nel layout di un sistema FAS la struttura portante è rappresentata dalle carpenterie in acciaio e talvolta dalle strutture in profili di alluminio, che costituiscono l'ossatura del sistema, sulla quale sono fissati gli altri sottosistemi. La presenza di almeno un manipolatore industriale, che nella maggior parte dei casi può essere di tipo cartesiano, S.C.A.R.A, antropomorfo e talvolta anche parallelo, è richiesta per svolgere il compito di manipolazione dei componenti da assemblare e talvolta per il montaggio degli stessi, mediante l'utilizzo di uno o più End-Effectors. I vari componenti da assemblare sono alimentati all'interno del sistema FAS da una serie di alimentatori, che hanno il compito di trasportarli, orientarli e singolarizzarli per essere successivamente montati. Il sistema di trasporto interno rappresenta il dispositivo con cui il prodotto in assemblaggio viene fissato, portato nella zona di lavoro e scaricato quando la lavorazione è terminata, ne sono un esempio le tavole rotanti e i nastri trasportatori, abbinati a dispositivi di fissaggio che portano il prodotto. La stazione di lavoro, o maschera di assemblaggio, è il sottosistema dedicato a svolgere l'unione dei componenti, essa è ideata in base alla tipologia di prodotto da assemblare e può essere dotata di sensori che, una volta assemblato il prodotto, ne verificano la conformità.

Risulta facile comprendere quindi che la flessibilità richiesta ai sistemi FAS si concretizza coinvolgendo in maniera diversa i singoli sottosistemi che ne compongono il layout. Alla luce di ciò, si rende necessario intraprendere degli studi che permettano di intervenire nei vari sottosistemi al fine di proporre delle idee innovative che fungano da linea guida per il progetto del singolo sottosistema per incrementarne la flessibilità. In particolare, si chiede al sistema di alimentazione di essere in grado di trasportare, orientare e singolarizzare un'ampia ed eterogenea varietà di componenti, senza operare modifiche hardware significative. Si necessita inoltre che l'End-Effector del manipolatore sia dotato di un grado di destrezza tale da poter manipolare componenti dalle geometrie, dimensioni e masse variabili, evitando numerosi e dispendiosi cambi utensile. Si rende necessario poi che il sistema di trasporto interno sia dotato di sistemi di fissaggio del prodotto che possano regolarsi automaticamente per ospitare numerose varianti di prodotto della stessa famiglia. Infine, per quanto riguarda la stazione di lavoro e controllo, pur dovendo essere ideata al fine di assemblare una determinata tipologia di prodotto, deve garantire di poter far fronte a tutte quelle varianti di montaggio che sono necessarie per costruire i vari modelli di prodotto proposti al mercato. È necessario evidenziare tuttavia che mentre il sistema di trasporto e la stazione di lavoro e collaudo sono maggiormente legate alla tipologia di prodotto da assemblare, lo studio degli altri aspetti della flessibilità, richiesti ad un sistema FAS, possono essere affrontati più in generale.

1.2.2 Idee per la flessibilità dei sistemi di assemblaggio automatico

Al fine di permettere l'assemblaggio flessibile con tecnologia dotata di automazione, alcuni ricercatori si sono dedicati allo studio approfondito dei sistemi di alimentazione dei componenti. Il fatto che i sistemi di alimentazione flessibili siano di complessa ideazione è riportato anche da Tay ed altri in [12]. In particolare questi autori affermano che il sistema di alimentazione risulta il maggior ostacolo all'ideazione veloce di un sistema automatico di assemblaggio. Infatti, il progetto dei sistemi di alimentazione rappresenta una fase molto delicata e,



Figura 1.5: Vibroalimentatore dell'azienda Tecna snc di Caronno Pertusella (VA) - Italia.

se non adeguatamente sviluppata, può essere responsabile di una quota degli inceppamenti dell'intero sistema di assemblaggio che va dal 30% al 50% [14]. Attualmente il dispositivo più comunemente utilizzato per singolarizzare e orientare i componenti da alimentare all'interno di un impianto automatico di assemblaggio è rappresentato dal vibroalimentatore orbitale a gradini come affermato in [15]. Questo dispositivo presenta tuttavia alcuni seri svantaggi: si tratta di un sistema di orientazione prevalentemente passivo, nel senso che rigetta nel fondo della vasca tutti quei componenti che si presentano con un'orientazione diversa da quella desiderata, inoltre questo tipo di alimentatore ha difficoltà a selezionare la corretta orientazione di componenti con caratteristiche discriminanti di piccole dimensioni o interne alla geometria del pezzo. Infine va precisato che gli alimentatori orbitali a gradini sono ideati per alimentare una sola tipologia di componente alla volta, per questa ragione, i sistemi di assemblaggio devono prevederne uno per ciascuna delle tipologie di componente da assemblare. Questo fatto implica che, per prodotti molto complessi, cioè formati da numerosi componenti diversi, oltre a comportare dei costi del sistema maggiori, implica che il layout dell'impianto necessiti di uno spazio notevole solamente per ospitare il sistema di alimentazione ed inoltre anche il robot dovrà essere scelto per operare su uno spazio di lavoro di maggiore entità. Studi recenti hanno cercato di ideare un sistema di alimentazione che sia in grado di superare queste problematiche. Alcuni autori hanno proposto di modificare un tradizionale vibroalimentatore orbitale a gradini con alcuni accorgimenti. In particolare Tay ed altri in [12] descrivono lo sviluppo di un vibroalimentatore flessibile e

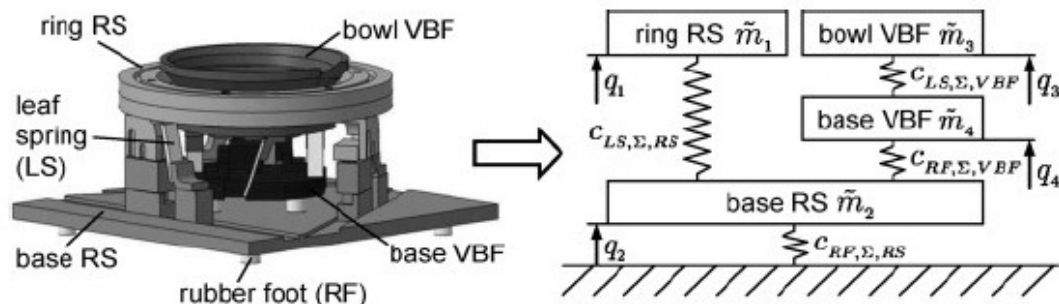


Figura 1.6: Alimentatore proposto da Reinhart and Loy in [15].

programmabile per componenti non dotati simmetria rotazionale. Questo sistema di alimentazione, controllato da un computer, è dotato di attuatori pneumatici e motori passo passo, i quali, una volta identificato un componente e determinata la sua orientazione, mediante sistema di sensori ad infrarosso, vengono azionati per far assumere al componente la corretta orientazione. Lo studio di Reinhart and Loy [15] invece propone un alimentatore modulare basato su un vibroalimentatore orbitale a gradini tradizionale, sulla cui vasca è posto un sistema ad anello, il quale è eccitato da un attuttore separato. Questa soluzione assicura un comportamento ottimale del sistema, poiché la sua frequenza naturale può essere tarata agendo sulle masse e sulle inerzie delle parti che costituiscono l'alimentatore, in modo da poter processare componenti con caratteristiche diverse. Altri autori invece hanno ideato dei sistemi di alimentazione con un funzionamento completamente diverso dai tradizionali vibroalimentatori. L'idea presentata in Wolfson and Gordon in [16] sviluppa un alimentatore innovativo, in grado di riconoscere e orientare piccoli componenti, con un alto grado di automazione, adatto a cicli di lavoro modesti e frequenti cambi nella produzione. La soluzione proposta da Petrovic ed altri in [17] presenta un nuovo sistema di alimentazione multifunzionale, anche in questo caso sviluppato per l'assemblaggio di piccoli componenti ad elevate cadenze di lavoro. L'idea progettuale di questo sistema fornisce la possibilità di introdurre un modulo sensorizzato per la selezione non geometrica dei componenti e un modulo per l'orientazione attiva per incrementare l'efficienza del dispositivo. Gli autori di [10] e [11] hanno studiato un sistema compatto di alimentazione, il quale è in grado di alimentare componenti di geometria complessa grazie alla presenza di sensori

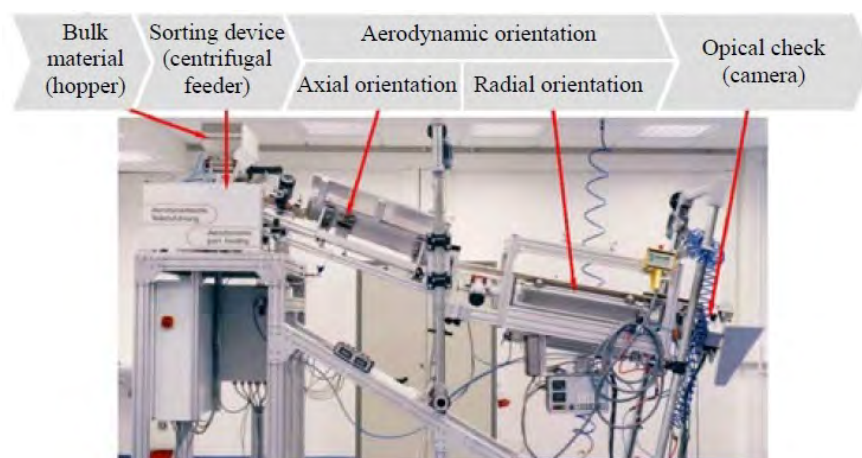


Figura 1.7: Sistema di alimentazione proposto da Fradrich ed altri in [18].

di riconoscimento. In [13] l'autore invece si focalizza sul progetto e lo sviluppo di un alimentatore innovativo per componenti cilindrici. Questo alimentatore è di tipo attivo, ovvero non respinge i componenti con un'orientazione errata, ma cerca di orientare attivamente i componenti permettendo una maggiore efficienza. Fradrich ed altri in [18] propongono un alimentatore flessibile aerodinamico, dimostrando come il grande vantaggio dei sistemi aerodinamici, rispetto a quelli convenzionali, risiede nella loro capacità di essere adatti per diverse tipologie di componenti. Più di recente alcuni autori hanno proposto dei sistemi flessibili di alimentazione ancora basati sul concetto di orientamento e singolarizzazione, in cui la flessibilità però è garantita da un sistema di visione che necessita di modesti tempi di ristrutturazione. Uno dei principali studi fu ideato da Perks in [19], il quale propose un robot guidato da un sistema di visione in grado di determinare la posizione dei componenti casualmente alimentati da un sistema a riciclaggio con nastro trasportatore. In questa idea, il sistema di visione è in grado di fornire al robot le coordinate esatte dei componenti, che sono distribuiti casualmente sotto il campo visivo della telecamera, consentendo al manipolatore di prelevare il singolo componente dal nastro. Gudmundsson and Goldberg in [14] hanno studiato un alimentatore costituito da un manipolatore antropomorfo, un sistema di visione e tre nastri trasportatori disposti in modo da separare e far circolare i componenti da alimentare, individuando opportunamente la velocità ottimale con cui muovere i nastri trasportatori. Va inoltre sottolineato che altri autori utilizzano il sistema

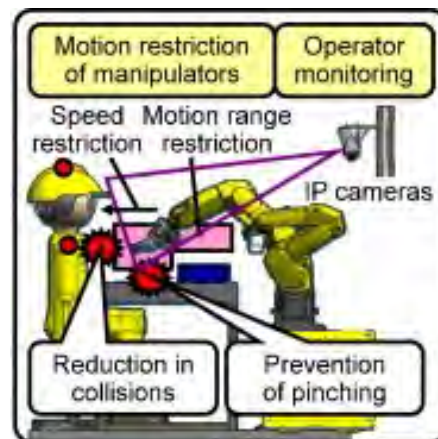


Figura 1.8: Sistema di assemblaggio con cooperazione uomo-robot studiato da Morioka e Sakakibara in [27].

di visione in problemi di controllo di conformità dei componenti da assemblare e dei prodotti assemblati, come ad esempio in [20], [21] e in [22].

L'Aumento di flessibilità nei sistemi di assemblaggio può essere ottenuto anche cercando di mettere insieme la tecnologia manuale con l'automazione, proponendo un sistema di cooperazione uomo-robot. Un gran numero di autori, soprattutto negli ultimi anni, si sono dedicati a queste soluzioni tecnologiche. Ad esempio Heilala e Voho in [23] propongono un sistema ad approccio modulare e semiautomatico al fine di aumentare la riconfigurabilità del sistema. Anche in [24] è proposto un sistema ibrido di montaggio, in cui le stazioni automatiche e manuali di assemblaggio operano insieme, anche grazie a strutture modulari con interfacce innovative e un software di processo, che permettono la rapida reazione ad eventuali cambiamenti nei prodotti, componenti e dimensione dei lotti. Mentre Schraft ed altri in [25] descrivono i vantaggi della stretta cooperazione uomo-robot nell'ambito di una singola cella di produzione dotata di un sistema di visione, che garantisce la sicurezza dell'operatore, permettendo alti livelli di produttività. Gli autori dello studio presentato in [26] propongono una cooperazione uomo-robot in una cella di assemblaggio dotata di un sistema di analisi delle immagini 3D per la sorveglianza dello spazio comune di lavoro, inoltre, nello stesso scritto, gli autori discutono gli aspetti organizzativi ed economici dell'utilizzo di un sistema di assemblaggio di questo tipo, incluso l'associazione di una logistica efficiente. Morioka

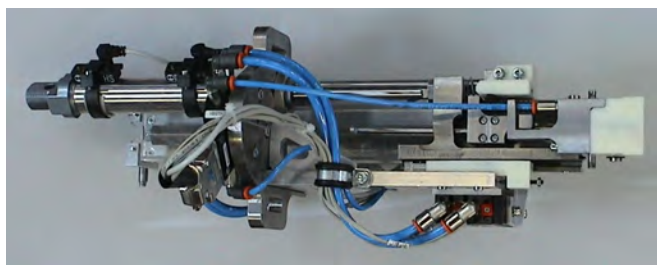


Figura 1.9: End-Effector per sistema di assemblaggio di batterie alettate studiato da Rossi ed altri in [29].

e Sakakibara in [27] descrivono un sistema di produzione a celle di assemblaggio con una cooperazione uomo-robot, dove il robot è utilizzato al fine di aumentare la produttività degli operatori e l'affidabilità del sistema. Questa soluzione si basa, a detta degli autori, su tre chiavi tecnologiche: il sistema di alimentazione, che è rappresentato da manipolatori dotati di una base mobile, il sistema informatico a supporto dell'operatore, che gli fornisce rapidamente le informazioni di produzione, e infine il sistema di gestione della sicurezza per la cooperazione tra l'operatore e il robot. Infine Medellin ed altri [28], studiando la pianificazione automatica del montaggio per un sistema cooperante robot-operatore, usano la tecnica di suddividere l'assemblaggio in piani di montaggio, assegnando ciascuno al robot o all'operatore. In questo studio i ricercatori hanno applicato il metodo ideato ad una cella di assemblaggio, dove venivano impiegati dei cubi per costruire un prodotto.

Un ulteriore sforzo della ricerca, per aumentare la flessibilità dei sistemi di assemblaggio, consiste nello studiare delle soluzioni innovative con cui realizzare il sistema robotico. Un esempio si può trovare nel progetto proposto da Rossi ed altri in [29] per l'assemblaggio di batterie alettate. In questo caso gli autori propongono un End-Effector per il robot in grado di assemblare il prodotto seguendo dei percorsi ottimali, che cambiano in base al modello di batteria da produrre. La possibilità di seguire un percorso ottimale è permesso dall'organo terminale del robot, il quale prevede un caricatore che contiene tutti i componenti da montare. Mentre in un altro lavoro [30], Townsend propone lo sviluppo di un End-Effector composto da tre dita, munite di due falangi ciascuna, in grado di manipolare una grande varietà di tipologie di oggetti, tuttavia il costo del dispositivo è due ordini

di grandezza superiore a un comune gripper industriale. Infine alcuni ricercatori in [31] propongono un robot modulare la cui catena cinematica possa essere ridefinita in base alle esigenze di produzione. Appare ovvio tuttavia che una tale modifica hardware necessita di interrompere il funzionamento del sistema e intervenire ricombinando i moduli giunto con i moduli link.

1.3 Limiti dell'automazione nell'assemblaggio

Esaminando gli studi condotti dalla ricerca nel campo dell'assemblaggio flessibile, si nota che i maggiori sforzi sono destinati ad introdurre l'assemblaggio automatico in una zona di confine con l'assemblaggio manuale. Si tratta in particolar modo di realtà produttive in cui è richiesta la capacità di lavorare su volumi ridotti, con numerosi cambiamenti del lotto di produzione e la possibilità di gestire un alto numero di tipologie di componenti. L'impegno della ricerca nello studiare dei sistemi di cooperazione uomo-robot per l'assemblaggio industriale è quindi giustificato dalla volontà di individuare una soluzione per un modo di produrre intermedio tra un sistema FAS tradizionale e l'assemblaggio manuale. Tuttavia il campo della cooperazione uomo-robot non è ancora una risposta adeguata a detta degli stessi autori, che individuano nel costo della manodopera e nei problemi di sicurezza i limiti più importanti.

Numerosi studi, tra quelli citati, individuano il sistema di alimentazione dei componenti come la prima barriera alla flessibilità richiesta da questo modo di produrre. Va tuttavia evidenziato che, in alcuni casi, questi studi presentano delle soluzioni per il sistema di alimentazione dotate di un grado di flessibilità tale da penalizzare pesantemente la produttività e quindi i costi unitari diretti di produzione. Risulta inoltre chiaro che alcune soluzioni non rispondono ad esigenze di compattezza ed economicità e non sono sempre in grado di garantire un alto grado di flessibilità. Trovare una risposta a questo primo problema è quindi uno scopo dell'attività di ricerca presentata in questa tesi. L'altro aspetto che va risolto è quello di ideare un sistema robotico in grado di sfruttare pienamente la flessibilità permessa da un innovativo sistema di alimentazione, in particolare dotando di flessibilità l'organo terminale del manipolatore, evitando di doversi avvalere di

numerosi cambi dell'utensile con cui il robot lavora. L'idea anche in questo caso va sviluppata tenendo presente i requisiti di compattezza, affidabilità ed economicità. Questo è il secondo scopo dell'attività di ricerca sviluppata. Entrambi gli obiettivi indicati sono stati affrontati nell'ideazione di una nuova cella robotizzata per gli assemblaggi flessibili: il sistema F-FAS (Fully-Flexible Assembly System), che verrà presentato nei seguenti capitoli di questa tesi.

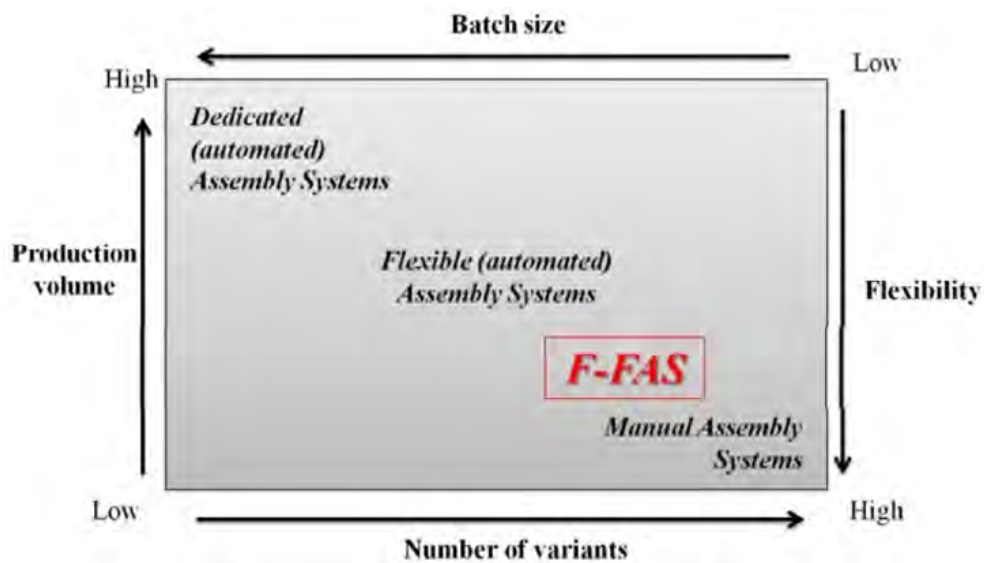


Figura 1.10: Modifica alla mappa delle tecnologie di assemblaggio proposta in [23]. Il sistema F-FAS è ideato per lavorare al limite dell'automazione.

Capitolo 2

La cella di assemblaggio F-FAS: idea e prototipo

La ricerca nel campo dell'assemblaggio industriale flessibile necessita di ulteriori sforzi per individuare un nuovo sistema, che sia in grado di essere competitivo da un lato con i comuni sistemi FAS (Flexible Assembly System), per quanto riguarda la cadenza produttiva, i costi unitari diretti, la qualità dei prodotti assemblati e dall'altro lato con l'assemblaggio manuale, per quanto riguarda la capacità di far fronte a condizioni produttive mutevoli con prontezza e semplicità, anche per la gestione di prodotti complessi. In questo capitolo si presenta una nuova classe di sistemi di assemblaggio flessibile: la cella robotizzata F-FAS (Fully-Flexible Assembly System) nata per essere inserita in quelle realtà produttive dove l'assemblaggio non è dotato di automazione a causa dell'alto grado di flessibilità richiesto dalle varie operazioni. In particolare viene descritta l'idea di cella F-FAS, illustrando il suo ciclo di lavoro, inoltre viene presentato il prototipo realizzato, descrivendo i sottosistemi di cui è composto.

2.1 Ideazione e ciclo di lavoro

Il sistema denominato F-FAS proposto in questa tesi differisce da un comune sistema FAS, in particolare per il sistema di alimentazione dei componenti. Infatti, allo scopo di individuare una metodologia generale che risulti adeguata ad ali-

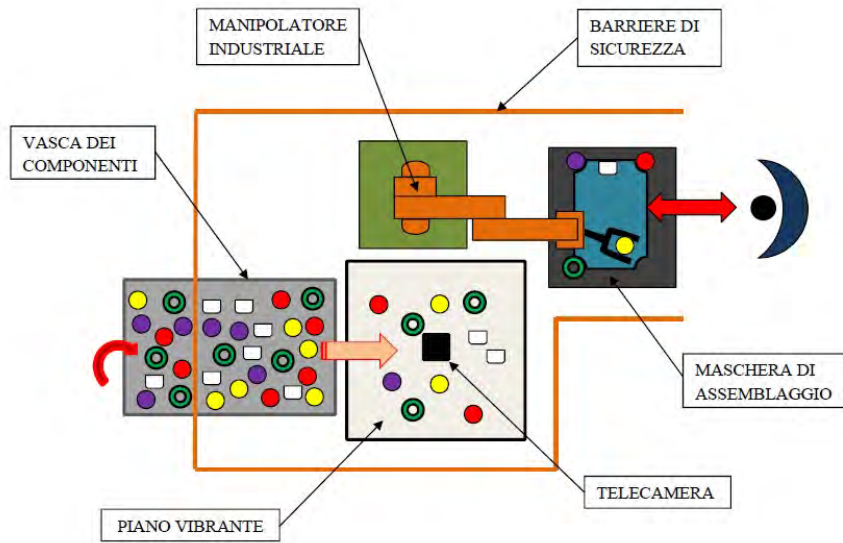


Figura 2.1: Schema per cella di lavoro F-FAS.

mentare la maggior parte dei componenti di un prodotto costituito da minuteria metallica, piccoli sottoassemblati e mini attuatori, si è pensato dotare il sistema di una vasca in cui inserire tutte le tipologie di componenti che sono necessarie per assemblare una famiglia di prodotti, comprese tutte le diverse varianti. Ad esempio se si intende assemblare montature per occhiali, nella vasca verranno inserite tutte le tipologie di cerniere, naselli, astine, occhielli ecc, per i diversi modelli che si intende produrre. I vari componenti sono molto eterogenei tra loro, in particolare per caratteristiche geometriche e dimensionali. Una volta noto quali sono i componenti che costituiscono i vari prodotti, in che numero essi vanno assemblati e in che quantità ogni prodotto deve essere fabbricato, il sistema preleverà i componenti dalla vasca e comincerà ad assemblare. Risulta chiaro che tutti i componenti vanno registrati in un database, che contiene le loro caratteristiche. Quindi la cella F-FAS può essere vista come un sistema in cui da un lato si inseriscono in una vasca disordinatamente tutti i componenti da assemblare e dall'altra escono i prodotti finiti. In questo modo, si garantisce di poter lavorare con un mix produttivo estremamente ampio e variabile, tuttavia per la flessibilità richiesta, si rende necessario garantire che i tempi di re-setting dell'hardware siano azzerati. Perciò è necessario pensare ad una metodologia intelligente per estrarre i componenti dalla vasca e successivamente procedere all'assemblaggio. A tal scopo

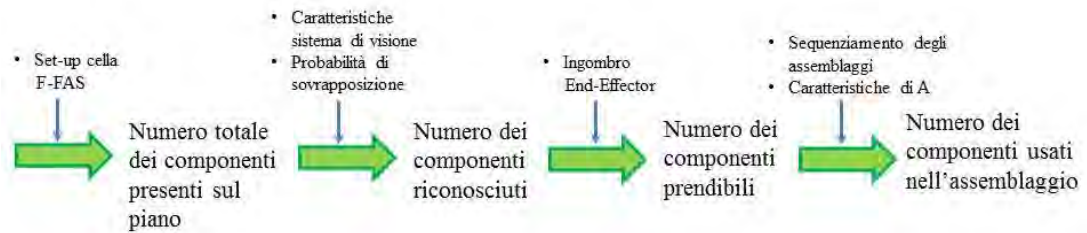


Figura 2.2: Fattori che influenzano il numero di componenti assemblati.

si chiede alla vasca di versare su un piano vibrante e retroilluminato una porzione casuale dei componenti, i quali verranno identificati da una telecamera del sistema di visione, che inquadra da sopra il piano. La telecamera, acquisendo un'immagine, individua tipologia, posizione e orientazione dei componenti sul piano e fornisce le informazioni al sistema di controllo della cella, il quale, confrontando tali informazioni con quelle contenute nel database dei componenti, permette a un manipolatore industriale di prelevare i componenti dal piano e portarli nella maschera di assemblaggio, dove vengono svolte le operazioni di montaggio. Va specificato che della totalità dei componenti versati dalla vasca sul piano, solamente una parte viene riconosciuta dal sistema di visione poiché alcuni componenti risultano troppo vicini al bordo del piano, mentre altri sono troppo vicini tra loro o sovrapposti. Inoltre tra i componenti riconosciuti, solamente una parte risultano prendibili dall'organo terminale del robot, perché le sue griffe hanno un ingombro che potrebbe causare urti o movimentazioni involontarie dei componenti vicini. Infine tra tutti i componenti riconosciuti e prendibili, si individuano quei sottoinsiemi di componenti che permettono di assemblare un intero prodotto e quindi sarà solo questa frazione ad essere utilizzata nell'assemblaggio per quella data composizione del piano. Appare quindi chiaro che questo sistema risulterà tanto più efficiente, quanto maggiore è la quota dei componenti assemblati tra tutti quelli presenti nel piano, ad ogni acquisizione immagine da parte del sistema di visione.

Si vuole ulteriormente chiarire il modo di operare della cella robotizzata F-FAS descrivendone il ciclo di lavoro tipico. Una volta avviata la cella, verrà riversata dalla vasca un quantitativo eterogeneo e casuale di componenti, questa operazione

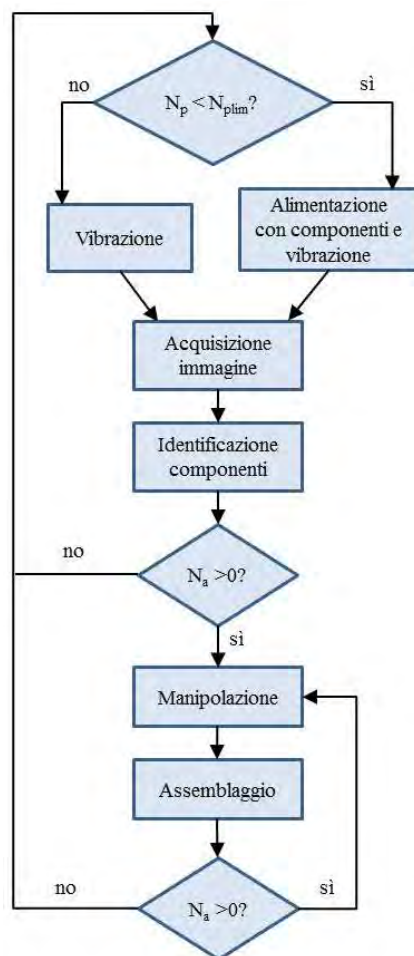


Figura 2.3: Ciclo di lavoro caratteristico per la cella di lavoro F-FAS.

verrà ripetuta ogni qual volta il numero di oggetti presenti sul piano è inferiore a un limite prefissato N_{plim} . Se i componenti sul piano sono già in numero sufficiente, non ne verranno prelevati degli altri dalla vasca, ma ci si limiterà a far vibrare il piano in modo da ridistribuirli sulla superficie. A questo punto la telecamera del sistema di visione acquisisce un'immagine la quale viene elaborata dal sistema di controllo della cella, permettendo così di individuare nella foto il numero totale di oggetti presenti N_p , il numero dei componenti riconosciuti e prendibili N_{cr} e il numero dei componenti effettivamente utilizzabili nell'assemblaggio N_a . A questo punto se il valore di N_a risulta maggiore di 0, il robot procede con la manipolazione dei componenti, rispettando le sequenze di assemblaggio previste per i diversi prodotti, i quali vengono montati nella maschera di assemblaggio. Una volta che il numero dei componenti assemblabili è esaurito, si torna alla fase

di alimentazione, dove nel caso in cui gli oggetti totali presenti nel piano N_p sia inferiore al valore impostato N_{plim} , si procede con un versamento dalla vasca, altrimenti si procede facendo vibrare il piano, ridistribuendo i componenti e quindi ottenendo nuovi valori per N_p , N_{cr} e N_a . Il ciclo di lavoro si ripete finché la vasca non viene svuotata e i prodotti richiesti sono tutti assemblati.

A questo punto risulta indispensabile organizzare opportunamente i dati da fornire al sistema F-FAS, in modo tale che esso possa elaborarli per definire le caratteristiche del ciclo di lavoro e in particolare determinare come riempire la vasca prima dell'inizio dell'assemblaggio. La cella F-FAS è utilizzata per assemblare una determinata famiglia di prodotti, quindi è necessario definire un dato che contenga le informazioni del mix produttivo. A questo scopo si definisce *matrice di assemblaggio* A la matrice che sulle righe presenta tutti modelli di prodotto da assemblare, mentre sulle colonne le tipologie di componenti di cui i vari prodotti sono formati. Così il generico elemento $a_{i,j}$ della matrice indica il numero di componenti di tipologia j che sono necessari per assemblare il prodotto i . Si precisa quindi che un mix produttivo descritto da una matrice A sarà composto da un numero di modelli di prodotti I pari al numero delle righe, i quali potranno essere fabbricati con un numero di tipologie di componenti J , pari al numero delle colonne della matrice.

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,j} & \dots & a_{1,J} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & \dots & a_{i,j} & \dots & a_{i,J} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I,1} & \dots & a_{I,j} & \dots & a_{I,J} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Un altro dato significativo è rappresentato dal *vettore degli ordinativi* R , si tratta di un vettore colonna, in cui le righe corrispondono alle righe della matrice A , che come detto rappresentano le tipologie di prodotti che compongono il mix produttivo. In questo caso l'elemento $r_{i,1}$ del vettore indica quanti prodotti di tipo i devono essere assemblati in quell'ordinativo.

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} \\ \vdots \\ r_{i,1} \\ \vdots \\ r_{I,1} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Per determinare con quali e quanti componenti riempire la vasca si deve calcolare il *vettore magazzino* W :

$$W = R^T A = [w_{1,1} \dots w_{1,j} \dots w_{i,j}] \quad (2.3)$$

Il vettore W è un vettore riga in cui le colonne corrispondono alle colonne della matrice di assemblaggio A , che come detto rappresentano le varie tipologie di componenti. Il generico componente del vettore magazzino $w_{1,j}$ rappresenta il numero di componenti della tipologia j che devono essere inseriti nella vasca per costituire la popolazione iniziale dei componenti che il sistema F-FAS andrà di volta in volta a prelevare per portare a termine l'ordinativo.

2.2 I sottosistemi del prototipo

Sulla base dell'idea descritta, si è deciso di allestire un prototipo con cui condurre delle prove sperimentali per verificare la validità della soluzione proposta e per determinare l'andamento di alcuni parametri presenti nel modello del sistema F-FAS. In base alla descrizione del ciclo di lavoro riportata, è facile individuare i sistemi che compongono la cella robotizzata, i quali devono essere correttamente interfacciati per poter lavorare insieme nell'eseguire le operazioni richieste nell'assemblaggio. Va specificato che il prototipo allestito non prevede di assemblare una particolare famiglia di prodotti, per questo motivo non è stata sviluppata una maschera di assemblaggio, ma si è voluto verificare se questa cella può espletare il compito per cui è stata ideata, senza ricadere nelle specifiche di problemi circoscritti.

2.2.1 La struttura portante

Il primo e basilare sottosistema che costituisce il prototipo è la struttura di supporto dell'intera cella robotizzata. Essa ha il compito di sorreggere e fissare saldamente gli altri sottosistemi, impedendo la trasmissione delle vibrazioni. Per questo scopo è stato utilizzato un basamento in ghisa, fissato a pavimento, che presenta sul piano di lavoro delle scanalature a T su cui fissare gli altri sottosistemi. Va specificato che mentre il manipolatore industriale è direttamente fissato al bancale, il pallet, che sostituisce la maschera di assemblaggio, e le telecamere, che costituiscono il sistema di visione, sono fissate su delle strutture in profili di alluminio, le quali a loro volta sono saldamente ancorate al bancale. Il sistema di alimentazione dei componenti è isolato dagli altri sottosistemi ed è fissato su delle colonne costituite da profili di alluminio direttamente ancorate a pavimento. In effetti il sistema di alimentazione con le sue vibrazioni potrebbe compromettere il funzionamento del sistema di visione, per questo motivo deve essere isolato rispetto al resto della cella. Va evidenziato inoltre che la scelta dell'utilizzo di profili di alluminio come sostegno ad alcuni sottosistemi è giustificata dalla loro leggerezza, facilità di montaggio e dalla possibilità di cambiare velocemente la loro disposizione a causa dell'evolversi sperimentale del progetto.

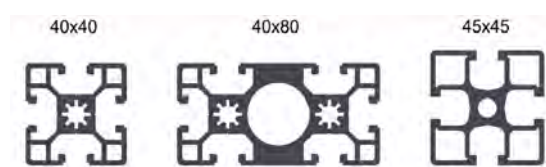


Figura 2.4: Profili di alluminio utilizzati.

2.2.2 Il sistema di alimentazione dei componenti

Per costituire il sistema di alimentazione della cella F-FAS si è deciso di utilizzare l'alimentatore Anyfeed prodotto dalla Flexfactory. Questo dispositivo è formato da due parti fondamentali: il bulk e il piano vibrante. Il bulk rappresenta la vasca del sistema F-FAS, dove un operatore, prima dell'inizio dell'evasione di un ordinativo, carica tutti i componenti da assemblare. Il bulk è posizionato sopra al piano vibrante e ha la funzione di scaricare su questo porzioni della totalità dei



Figura 2.5: Alimentatore Flexfactory Anyfeed.

componenti inizialmente caricati. Il bulk viene mosso da dei motori elettrici, che con dei meccanismi ad eccentrico gli fanno assumere un movimento oscillatorio, del tipo a passo del pellegrino, lungo la sua dimensione maggiore, così da far avanzare i componenti verso la parte anteriore della vasca. Nella parte anteriore il bulk presenta una paratia, la quale viene allineata con il bordo della vasca da un attuatore pneumatico a membrana in modo da scaricare alcuni componenti sul piano. Per scaricare un quantitativo di componenti desiderato è necessario tarare il numero delle oscillazioni del bulk e la loro frequenza. Va precisato che è necessario che tutte le tipologie di componenti siano intimamente mescolate tra loro all'interno del bulk perché la porzione scaricata sul piano presenti una composizione eterogenea rappresentata da tutti i componenti presenti, viceversa se i componenti non sono opportunamente mischiati, potrebbe essere versata sul piano una porzione di componenti che prevede la prevalente presenza di una determinata tipologia, non permettendo in questo modo un funzionamento ottimale della cella. Si pensi al caso limite in cui i pezzi scaricati appartengono tutti alla stessa tipologia di componenti: tutti i prodotti formati da almeno un componente diverso da quelli presenti sul piano non potranno essere assemblati. Si pensi inoltre ai pezzi che sono presenti in piccola quantità relativamente all'intero magazzino e che magari sono necessari a molti modelli di prodotto, se questi non scendono sul piano, la cella non può assemblare tutti quei prodotti che necessitano di tali componenti. Per queste ragioni, o il magazzino iniziale viene adeguatamente mescolato, oppure si può pensare di dividere il bulk in scompartimenti longitudinali,

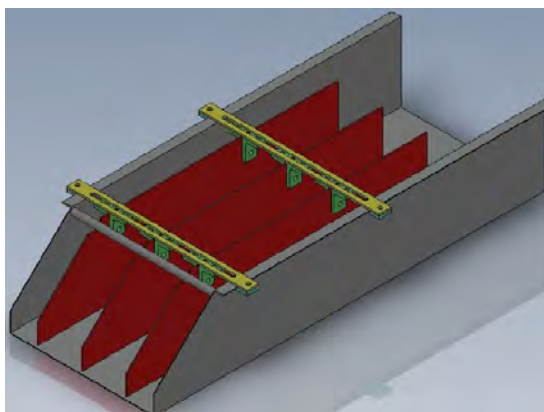


Figura 2.6: Progetto 3D di suddivisione del bulk.

così da poter separare alcune tipologie di componenti dalle altre e favorirne lo scaricamento sul piano. Il sistema per suddividere il bulk è formato da un sistema di paratie che consentono anche la regolazione della larghezza degli scompartimenti a seconda della quantità di componenti da introdurre. Il piano vibrante sottostante il bulk è costituito da un materiale polimerico traslucido e sotto di esso si trova il sistema di retroilluminazione (detto anche di illuminazione diascopica) costituito da strisce di led disposte a matrice. Il sistema a led, appositamente costruito in laboratorio, si è dimostrato il metodo migliore per illuminare omogeneamente il piano evitando, zone d'ombra o frequenze particolari. L'illuminazione diascopica del piano è necessaria per far acquisire al sistema di visione delle immagini in bianco e nero, dove i componenti da manipolare sono oggetti neri sullo sfondo bianco rappresentato dal piano retroilluminato. Il piano, movimentato da due servomotori brushless con meccanismo ad eccentrico, può permettere diverse movimentazioni dei pezzi. In effetti l'anyfeed presenta diversi comandi di movimentazione con i quali far fronte alle esigenze del ciclo di lavoro del sistema F-FAS:

- feed forward: spostamento in avanti;
- feed backward: spostamento indietro;
- flip: vibrazione sul posto;
- feed forward: spostamento in avanti e vibrazione;
- feed backward: spostamento indietro e vibrazione;

Anche in questo caso ciascuno dei movimenti può essere regolato impostando il numero delle oscillazioni e la frequenza.

2.2.3 Il sistema di visione

Il sistema di visione presente nel prototipo di cella F-FAS comprende in realtà due telecamere, una per l'acquisizione delle immagini per individuare i componenti presenti sul piano vibrante ed una che è utilizzata in una postazione per la misura delle caratteristiche dei componenti da assemblare. La telecamera per il riconoscimento dei componenti è il modello Pike F-505 che presenta una risoluzione 2452 X 2054 pixel che nel layout della cella F-FAS permette una risoluzione di circa $8,45 \text{ pixel/mm}$, garantendo l'acquisizione di una porzione del piano vibrante sufficientemente ampia, a scapito di un leggero rallentamento nell'elaborazione delle immagini. La telecamera per la misura dei componenti, non prevista dal ciclo di lavoro del sistema F-FAS, può essere utilizzata per rilevare in automatico le caratteristiche geometriche dei campioni e quindi creare il database di cui è necessario disporre per effettuare il riconoscimento dei componenti e la loro manipolazione durante il ciclo di lavoro. A questo scopo si è pensato di utilizzare una telecamera AVT Marlin serie F-1452B, che presenta una risoluzione di 1392 X 1040 pixel, abbinata ad un ottica telecentrica Computar TEC-M55 per far fronte ad problemi prospettici e di riflessione totale della luce. Il piano su cui vengono appoggiati i campioni di componenti per registrarli nel database è costituito dal dispositivo di retroilluminazione della Phlox, che garantisce un'uniformità della luce fino al 90 %. Va tuttavia precisato che non è indispensabile la presenza della seconda telecamera, poiché la postazione di misura potrebbe essere allestita anche



Figura 2.7: Telecamera Pike F-505 usata per il riconoscimento dei componenti.

utilizzando la telecamera di riconoscimento, ma per ragioni pratiche si è deciso di utilizzare due telecamere.

Per permettere di interfacciare il sistema di visione con gli altri sottosistemi della cella F-FAS è necessario effettuare la calibrazione delle telecamere, in particolare per fornire un riferimento tra le coordinate immagine di un oggetto e quelle nello spazio di lavoro del robot. Per svolgere questa operazione sono necessari l'utensile per la calibrazione e un marcatore, che può essere grande o piccolo a seconda che il piano della telecamera da calibrare sia quello di riconoscimento o quello di misura. La procedura per la calibrazione, identica per entrambe le telecamere precedentemente citate, prevede l'utilizzo della teaching pendant del robot ed è costituita da queste fasi fondamentali:

- posizionare il marcatore in prossimità di uno dei vertici della zona del piano inquadrato dalla telecamera e acquisire un'immagine;
- ripetere ripetere la stessa operazione con il vertice opposto perché il sistema possa comprendere l'ampiezza del piano;
- posizionare il marcatore sul piano e portare il robot in una posizione tale da centrare con l'utensile di calibrazione il marcatore.

A questo punto il manipolatore sposterà il marcatore acquisendo una griglia di punti, per poter poi stabilire la relazione tra coordinate immagine e coordinate robot.

Per un corretto funzionamento della telecamera di riconoscimento risulta inoltre

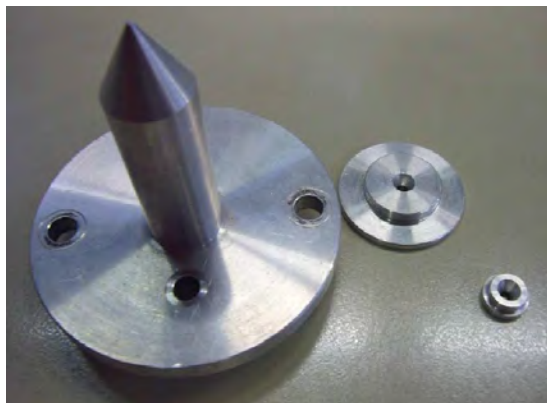


Figura 2.8: Utensile usato per la calibrazione e relativi dischetti marcatori.

necessaria la calibrazione dello sfondo, aspetto molto rilevante per l'elaborazione delle immagini in fase di riconoscimento. Per eseguirla si deve sgombrare e pulire il piano di lavoro e acquisire delle immagini, modificando eventualmente il numero di foto da scattare e l'intervallo di tempo tra una e l'altra. Questa operazione va eseguita ogni qualvolta cambiano le condizioni di illuminazione ambientale sul piano di lavoro o qualora si dovesse andare a modificare il piano stesso. Risulta quindi importante mantenere il piano il più possibile al riparo da fonti luminose esterne dirette.

2.2.4 Il robot e l'organo di presa

Il manipolatore industriale da inserire nella cella di lavoro F-FAS deve essere dotato di un numero di gradi di libertà tali da garantire un significativo spazio destro, che rappresenta quella porzione dello spazio di lavoro in cui il robot può posizionare il suo organo terminale con una qualsiasi orientazione. Per questo motivo nel prototipo allestito si è deciso di inserire un piccolo robot antropomorfo a 6 g.d.l. modello Adept Viper s650. Questo manipolatore industriale presenta un braccio con un raggio di 653 mm che permette di arrivare agevolmente in ogni punto del piano vibrante dell'anyfeed, inoltre riesce a raggiungere una velocità combinata massima di 8,2 m/s e garantisce una ripetibilità di $\pm 0,020$ mm. Il robot è inoltre caratterizzato da un payload pari a 5,5 kg, mentre il sesto giunto ammette un momento d'inerzia di massa massimo pari a $0,045$ kg m²; questi due dati devono essere tenuti in considerazione per la scelta dell'organo terminale. Il robot scelto è ideale alla funzione a cui è destinato, ossia quella di manipolare piccoli carichi con movimenti sufficientemente ripetibili e veloci.

alla luce della descrizione fin'ora riportata, si può notare che tutti i sottosistemi previsti nel prototipo di cella F-FAS sono dei prodotti individuabili in commercio e questo fa del progetto una soluzione snella di integrazione di sistemi. Va però puntualizzato che se preliminarmente si è utilizzata la stessa filosofia anche nella scelta dell'organo terminale del robot, lo studio svolto su questa cella di assemblaggio ha individuato l'End-Effector come uno dei sottosistemi che possono influenzare pesantemente le performance dell'impianto. Per questo motivo, anche se le prove sperimentali sono state condotte con un organo terminale rappresentato



Figura 2.9: Robot antropomorfo Adept Viper s650.

da una pinza pneumatica della MetalWork, si decise successivamente di ideare un innovativo End-Effector flessibile da poter utilizzare nella cella F-FAS per renderne ottimali le prestazioni. Va a questo punto precisato che le prime prove sperimentali, che hanno visto l'utilizzo della pinza pneumatica MetalWork, sono state svolte con dei componenti da manipolare i quali, pur avendo caratteristiche geometriche molto eterogenee, presentano dimensioni di presa molto simili, così che l'organo terminale necessario per manipolarli non debba possedere delle peculiarità particolarmente innovative. Infatti la pinza MetalWork usata è il modello P2-6: si tratta di una pinza a doppio effetto con griffe parallele e corsa di 2 mm per ciascuna griffa. Tale pinza permette una frequenza di lavoro di 2 cicli apertura-chiusura al secondo e alimentandola a 6 bar permette di esercitare una forza in apertura di 5,3 N e in chiusura di 7,3 N. Anche nell'utilizzo della pinza MetalWork, al fine di massimizzare quanto più possibile il numero di componenti prendibili tra quelli presenti sul piano vibrante, si deve porre attenzione agli ingombri delle griffe. Per questo motivo si sono realizzate, per prototipazione rapida, delle griffe speciali in ABS con un ingombro ridotto al minimo e dotate di una superficie di presa ricoperta di gomma.

2.2.5 Il sistema di sicurezza

La cella F-FAS per poter essere utilizzata deve poter lavorare in condizioni di sicurezza, in particolare salvaguardando gli operatori che utilizzano questa

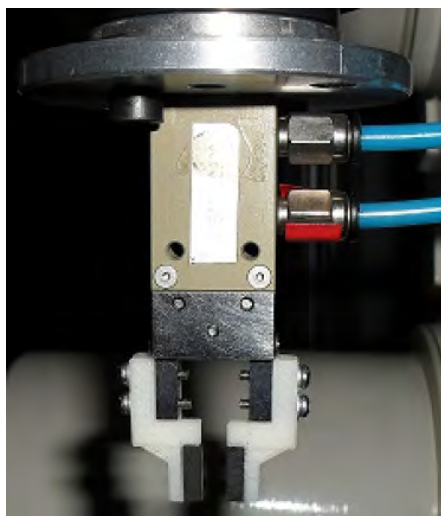


Figura 2.10: Pinza MetalWork P2-6, con griffe speciali, montata su robot.

macchina. A questo scopo il suo perimetro è delimitato da una struttura di profili in alluminio sui quali sono montati dei pannelli. Il soffitto della cella è chiuso quindi con dei pannelli oscuranti, mentre sui lati sono presenti dei pannelli semioscuranti, i quali permettono all'operatore di vedere cosa succede all'interno della cella, anche grazie alla presenza di una lampada al neon che viene spenta solo in occasione dell'acquisizione immagine da parte del sistema di visione. La struttura perimetrale impedisce ad un operatore di entrare nello spazio raggiungibile del robot durante il suo funzionamento e trattiene al suo interno eventuali componenti o altri oggetti che potrebbero venire lanciati per un malfunzionamento di un sottosistema, creando potenziale pericolo per le persone. Va precisato che solo una porzione del bulk, sufficientemente ampia, fuoriesce dal perimetro di sicurezza al fine di poterlo riempire agevolmente con i componenti da alimentare. I pannelli montati sulla struttura in alluminio inoltre attenuano l'intensità della luce esterna, la quale altera la qualità delle immagini acquisite dal sistema di visione. La cella F-FAS è anche dotata di due porte di accesso per poter intervenire al suo interno. Accanto a ciascuna porta e all'interno della cella sono posizionati dei pulsanti di emergenza a fungo rosso. Se durante il funzionamento della cella viene aperta una porta, oppure viene premuto uno dei funghi rossi, il circuito di emergenza blocca il robot nella sua posizione e toglie l'alimentazione agli altri sottosistemi.

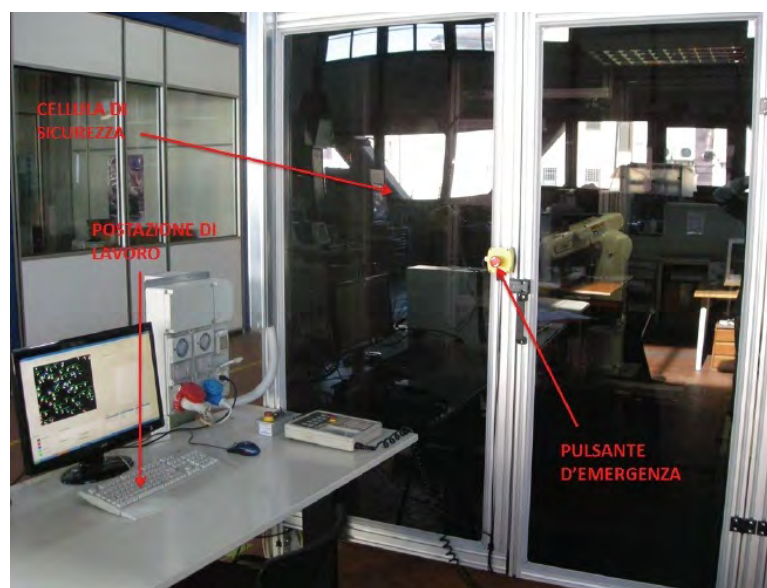


Figura 2.11: Sistemi di sicurezza per cella F-FAS.

2.2.6 Il sistema di controllo

Il sistema di controllo della cella deve essere in grado di gestire e coordinare il manipolatore industriale, le due telecamere ed l'alimentatore Anyfeed. Deve inoltre svolgere i calcoli necessari al riconoscimento ed alla manipolazione dei componenti. Il movimento del manipolatore è gestito, tramite lo specifico codice in linguaggio V+, dal software Adept Desktop, che si interfaccia direttamente con il controllore del robot. Le restanti operazioni necessarie al funzionamento della cella sono gestite da un codice sviluppato su piattaforma MatLab. La comunicazione tra MatLab e Adept avviene tramite rete Ethernet con protocollo TCP^2 , nel quale il controllore funge da server mentre la postazione di lavoro, dove è eseguito il codice MatLab, vi si collega come client. Quindi una volta effettuata la connessione, è MatLab a gestire le operazioni da effettuare ed invia al robot stringhe di comando, l'Adept che è invece rimasto in attesa, ricevute le stringhe, le interpreta ed esegue la movimentazione ad esse associata.

2.2.7 Utilizzo del prototipo

Il prototipo di cella F-FAS realizzato presso il laboratorio di Robotica e Meccatronica dell'Università degli Studi di Padova è stato utilizzato per condurre alcune

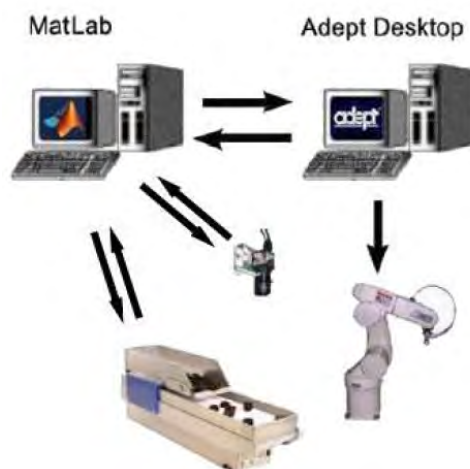


Figura 2.12: Schematizzazione del sistema di controllo e delle comunicazioni.

prove sperimentali sul suo funzionamento, in particolare per studiare l'andamento di alcuni parametri che sono stati individuati nel modello che descrive la sua capacità produttiva. Le prove sperimentali prevedono di testare l'evasione di alcuni ordinativi, caratterizzati da una determinata matrice di assemblaggio A , da un vettore ordinativo R e da un vettore magazzino W , osservando come la lavorazione si evolve. Per svolgere queste prove è inoltre necessario disporre di numerosi componenti divisi in diverse tipologie con le seguenti caratteristiche:

- dimensioni relativamente piccole, prossime a quelle di una moneta;
- forme diverse tra le varie tipologie, per evitare che possano essere confusi nella fase di riconoscimento;
- una sola posa stabile: cioè qualsiasi sia il moto di caduta del componente dal bulk, la figura individuata dal sistema di visione è sempre la stessa;
- una limitata dimensione nella zona di presa, dato che la corsa totale della pinza di presa è pari a 4 mm;
- una decina di tipologie diverse;
- numero di pezzi tra 50 e 100 per ogni tipologia;

Per rispettare queste esigenze sono state disegnate al CAD 12 tipologie di componenti e successivamente questi pezzetti sono stati costruiti in ABS per prototipa-

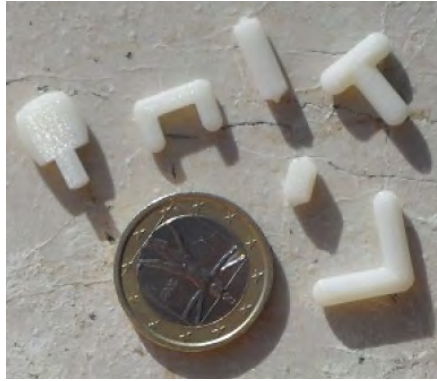


Figura 2.13: Alcuni dei componenti usati nei test sperimentali.

zione rapida. Rispettando il ciclo di lavoro teorico previsto per il sistema F-FAS, il bulk dell'alimentatore viene riempito con i componenti in base alle indicazioni fornite da *W*. I componenti poi vengono di volta in volta versati sul piano vibrante. La telecamera per il riconoscimento acquisisce un'immagine e, in base ai componenti riconosciuti e prendibili presenti, il sistema di controllo determina quelli da utilizzare nell'assemblaggio, secondo un criterio di rimanenza minima, ovvero tra tutte le combinazioni di prodotti assemblabili con i componenti presenti, viene scelta quella che lascia il minor numero di componenti sul piano vibrante. A questo punto il robot antropomorfo preleva i componenti da assemblare e li palletizza in un contenitore a scomparti, che sostituisce la maschera di assemblaggio per il motivo già esposto.

Per poter riconoscere e manipolare le varie tipologie di componenti, è necessario creare un database che contenga per ogni componente le opportune informazioni. Per fare questo, si è reso indispensabile definire una procedura per istruire il riconoscimento e la presa dei componenti utilizzando un'interfaccia grafica MatLab denominata GUI Offline. L'istruzione del riconoscimento è svolta disponendo sul piano dell'Anyfeed un campione di componenti uguali al componente da istruire, facendo attenzione che stiano nella regione inquadrata dalla telecamera e che non siano troppo vicini tra loro. Si posiziona inoltre un componente sul piano di misura. Utilizzando la GUI offline prima si acquisisce l'immagine del componente sul piano di misura, poi si passa al riconoscimento vero e proprio, acquisendo con la telecamera la foto del piano vibrante. Il software di controllo a questo punto

ricava per ogni oggetto presente sul piano la figura bidimensionale corrispondente e ne calcola le seguenti proprietà geometriche, dette più correttamente descrittori regionali:

- Area
- Perimetro
- Area Convessa: l'area dell'involucro convesso dell'immagine. Questo descrittore, abbinato al calcolo dell'area, consente di distinguere gli oggetti convessi da quelli non convessi.
- Compattezza: è definita come $perimetro^2/area$ e fornisce un'idea di quanto i pixel che compongono l'immagine dell'oggetto sono compatti. Ad esempio la compattezza è minima per una regione circolare.
- Elongazione: è il rapporto tra l'altezza e la larghezza del più piccolo bounding box contenente l'oggetto. Il minimo bounding box si ottiene allineando i lati di un rettangolo agli assi principali dell'immagine.

Viene calcolato inoltre un descrittore del contorno della figura visualizzabile mediante un grafico. La funzione che descrive il contorno è la distanza dei pixel del contorno dal centro di massa dell'oggetto. Tale funzione identifica univocamente il contorno dell'oggetto descritto, e ha il grande vantaggio di essere semplice da calcolare. A questo punto il software calcola per ciascun descrittore la media dei valori ottenuti dagli oggetti presenti sul piano. Cambiando il campione sul piano o muovendo i componenti già presenti si può ripetere la procedura integrando le statistiche già calcolate. Infine vengono impostate le tolleranze sui vari descrittori regionali. In questo modo, durante il ciclo di lavoro il software compie la stessa procedura. Se per un oggetto tutti i descrittori regionali rispettano la tolleranza impostata, allora quell'oggetto è riconosciuto, altrimenti non lo è. Le ampiezze delle tolleranze impostate sono importanti poiché, con tolleranze troppo strette, i pezzi non vengono riconosciuti e perciò non sono manipolabili, mentre con tolleranze troppo larghe si rischia che il software confonda i pezzi. É bene impostare le tolleranze al limite in modo tale che la quasi totalità dei pezzi vengono riconosciuti.

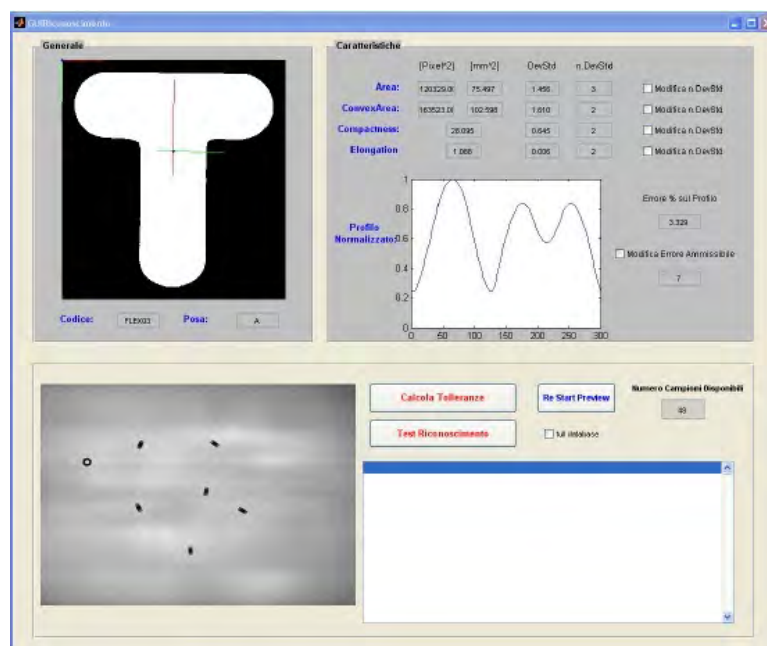
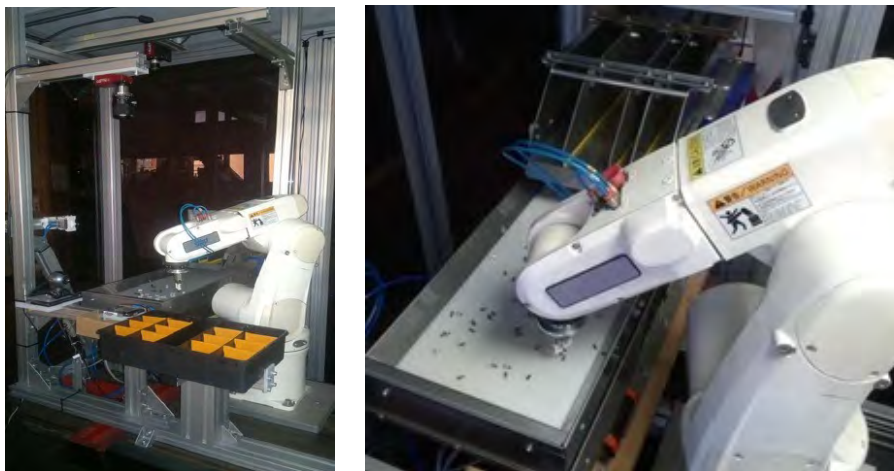


Figura 2.14: GUI per l'istruzione del riconoscimento.

Per verificare la correttezza delle tolleranze, si possono fare delle prove scattando una foto ed elaborando l'immagine, a questo punto il software permette di visualizzare i pezzi riconosciuti in colore verde e quelli non riconosciuti in colore rosso. Durante la fase di riconoscimento il software crea per ogni componente presente sul piano un sistema di riferimento solidale all'oggetto, con origine nel baricentro geometrico della regione, e due assi corrispondenti agli assi principali. Questi sistemi che sono visualizzati dopo l'elaborazione dell'immagine, vengono utilizzati per effettuare la manipolazione. L'istruzione della presa invece permette di fornire al robot le informazioni sulla posizione e l'orientazione che esso deve assumere quando preleva un oggetto dal piano vibrante. Tale posizione è relativa al sistema di riferimento solidale alla regione che ritrae l'oggetto. Per ogni tipologia di componente da manipolare, utilizzando l'apposita GUI, si posiziona un campione sotto alla telecamera di misura, a questo punto la telecamera acquisisce una foto ed il software elabora l'immagine, creando il sistema di riferimento solidale al campione. Dopodiché il manipolatore si posiziona sopra al componente, in corrispondenza del baricentro, ossia sull'origine del sistema relativo all'oggetto e il controllo passa alla teaching pendant. Seguendo le istruzioni a display, si posiziona il robot nella configurazione adatta alla presa e si conferma. A questo punto l'istruzione della



(a) *Sottosistemi che compongono la cella di lavoro.* (b) *Particolare della manipolazione dei componenti presenti sul piano vibrante.*

Figura 2.15: Prototipo di cella robotizzata F-FAS.

presa è completata. Operazione analoga va eseguita dovendo istruire anche la posa, tuttavia nei test i pezzi venivano portati sopra il pallet e rilasciati, perciò la posa corrisponde alla presa. Una volta terminata l'istruzione, la si può testare posizionando il componente sul piano di riconoscimento e chiedendo al robot di andarlo a prelevare. È consigliabile mantenere bassa la velocità del robot per riuscire a bloccarlo prima di eventuali collisioni che possono verificarsi se l'istruzione non è andata a buon fine. Va precisato che per interfacciare il robot antropomorfo con il piano vibrante e il piano di misura è necessaria una preliminare operazione di calibrazione, utilizzando lo stesso utensile menzionato per la calibrazione delle telecamere da montare sul robot. La procedura è la stessa per entrambi i piani e viene svolta utilizzando la teaching pendant, portando il robot a toccare il piano con la punta dell'utensile in almeno in 12 punti sufficientemente lontani tra loro e equamente distribuiti. Ogni punto acquisito è memorizzato e in questo modo la quota verticale del piano rispetto al robot è definita.

Capitolo 3

Modellazione e validazione del sistema F-FAS

Il sistema F-FAS ideato e prototipato necessita di essere studiato a fondo, in modo tale da poterne determinare le modalità progettuali. Prima di questo aspetto però è necessario validare l'idea di questo nuovo sistema di assemblaggio, valutandone le performance e confrontandole con quelle dei tradizionali sistemi di assemblaggio flessibile: l'assemblaggio manuale e i sistemi FAS. In questo capitolo verrà proposto un modello per valutare la produttività e costi unitari diretti del sistema F-FAS e, in base ad un'analisi quantitativa, verrà confrontato con i sistemi tradizionali di assemblaggio a singola stazione, permettendo così di valutarne la convenienza.

3.1 L'assemblaggio manuale

L'assemblaggio manuale a singola stazione è una delle due tecnologie con cui è necessario confrontare il sistema F-FAS, dato le sue note caratteristiche di flessibilità. Il classico layout di una stazione di assemblaggio manuale a postazione singola permette ad un operatore di svolgere tutti i compiti di assemblaggio, quali singolarizzazione, manipolazione, orientazione e montaggio dei componenti, per completare l'assemblaggio dei prodotti uno alla volta. Il layout di questo sistema prevede un tavolo di lavoro, alcuni utensili e, sopra al tavolo, delle scatole contenenti i componenti per assemblare una famiglia di prodotti. Per un dato

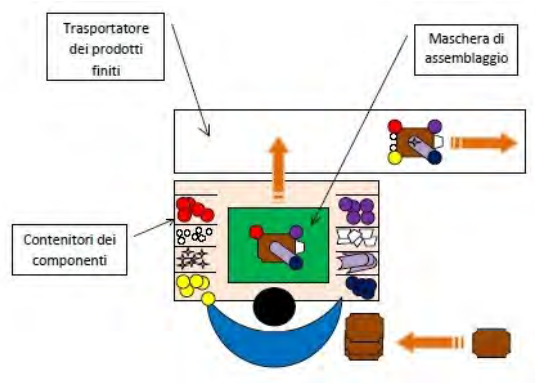


Figura 3.1: Layout di una postazione singola di assemblaggio manuale.

ordinativo di produzione, ovvero il documento che specifica il numero di prodotti che devono essere assemblati per ogni tipo di modello, un operatore singolarizza, manipola e monta i componenti necessari, secondo un ben prestabilito ordine. L'operatore svolge i compiti di assemblaggio solitamente consultando dei disegni tecnici e altri documenti che lo aiutano a eseguire il suo lavoro. Talvolta però la scarsa ripetibilità delle operazioni manuali comporta il montaggio non corretto di alcuni modelli, condizione che si può ripetere con maggior frequenza in caso di condizioni lavorative non ottimali. Infatti alcuni parametri dal layout, come la dimensione del tavolo di lavoro, la postura dell'operatore, la posizione e la distanza dell'operatore dalle varie scatole contenenti i componenti, devono essere decisi sulla base di criteri ergonomici, in modo da minimizzare il tempo di ciclo produttivo e ridurre i disturbi muscolo-scheletrici degli operatori [32]. Solitamente, la postazione singola di assemblaggio manuale è utilizzata per la produzione di un'ampia varietà di prodotti della stessa famiglia, perciò sono necessarie elevate abilità e buona esperienza da parte dell'operatore impiegato. Per questo motivo, l'assenteismo nelle operazioni di assemblaggio ad alta flessibilità produce una maggiore riduzione della produzione, se comparato con gli effetti dell'assenteismo in una postazione singola di assemblaggio manuale per la fabbricazione di un singolo modello di prodotto [33]. La produttività oraria, in termine di componenti manipolati, per una stazione singola di assemblaggio manuale può essere calcolata come segue:

$$Q_{ma} = \frac{\eta}{t_{mpp}} \quad (3.1)$$

dove η è l'efficienza dell'operatore umano, mentre t_{mpp} è il tempo medio, espresso in ore/componente, necessario per la manipolazione e l'assemblaggio di un singolo componente. Mentre il costo orario diretto per questo sistema è dato da:

$$C_{h,ma} = C_{h,op} + \frac{C_{wb}}{h_{pb}} \quad (3.2)$$

dove $C_{h,op}$ è il costo orario dell'operatore, C_{wb} è il costo delle attrezzature e degli equipaggiamenti della stazione manuale, mentre h_{pb} è il periodo di ritorno dell'investimento, espresso in numero di ore di lavoro previste. Così il costo unitario diretto di produzione per l'assemblaggio manuale a postazione singola, espresso in Euro per ogni componente assemblato, può essere ottenuto dal rapporto tra il costo orario e la produttività oraria:

$$C_{u,ma} = \frac{C_{h,ma}}{Q_{ma}} \quad (3.3)$$

Con questa formulazione, risulta chiaro che il dato più complesso da quantificare è il tempo medio necessario per la manipolazione e l'assemblaggio di un singolo componente t_{mpp} . Al fine di confrontare le potenzialità dell'assemblaggio manuale con quelle del sistema F-FAS è stato necessario determinare il valore numerico del tempo t_{mpp} sperimentalmente. Le prove per ottenere questo dato si sono svolte seguendo un protocollo, preceduto da alcune operazioni preliminari:

1. posizionamento di un foglio bianco, che rappresenta la maschera di assemblaggio, in maniera ergonomica (posizionamento e orientazione con lato maggiore parallelo all'operatore);
2. il raggruppamento dei componenti in tipologie sul tavolo di lavoro, a distanza ergonomica dalla zona di assemblaggio, deve essere sempre lo stesso;

3. consegna del documento relativo al vettore ordinativo, esso contiene:
 - i quantitativi dei prodotti da assemblare e i relativi codici;
 - per ogni prodotto, delle caselle da spuntare in numero pari al quantitativo previsto dall'ordinativo per quel prodotto;
4. posizionamento del pacco di fogli istruzioni per l'assemblaggio in una zona dove la sua consultazione risulti agevole. Ogni foglio istruzioni è così caratterizzato:
 - esso è relativo ad un solo prodotto;
 - indica il codice prodotto;
 - presenta lo schema di assemblaggio del prodotto da assemblare (senza prevedere componenti adiacenti uguali);
5. consegna foglio di riepilogo, dove l'operatore deve indicare: nome dell'operatore, lotto assemblato, tempi di inizio e fine test, note eventuali;
6. posizionamento della scatola per lo scarico della maschera di assemblaggio alla fine dell'assemblaggio di ciascun prodotto;

Il protocollo sperimentale prevede poi che l'operatore esegua le seguenti operazioni:

1. prendere visione della sequenza per evadere l'ordine indicata dal vettore ordinativo;
2. il personale di assistenza fa partire il cronometro;
3. prendere il foglio istruzioni per un prodotto;
4. assemblare un prodotto: l'assemblaggio consiste nella semplice posa orientata dei componenti sul foglio bianco, che rappresenta la maschera di assemblaggio. Questa operazione va eseguita da sinistra a destra rispetto allo schema;
5. una volta terminato l'assemblaggio, svuotare la maschera di assemblaggio;
6. spuntare la corrispondente casella nel vettore ordinativo;



Figura 3.2: Disposizione sul tavolo del materiale usato per svolgere i test di assemblaggio manuale. La numerazione corrisponde alle operazioni preliminari elencate.

7. continuare ad assemblare quella tipologia di prodotto fino al quantitativo previsto nel vettore ordinativo;
8. successivamente cambiare il foglio istruzioni, prendendo quello per il prodotto successivo;
9. ripetere fino al completamento dell'ordinativo;
10. il personale di assistenza ferma il cronografo e annota il tempo in secondi;
11. compilazione del foglio di riepilogo.

Il tempo necessario ad evadere un intero ordinativo va poi diviso per il numero di componenti manipolati. In questo modo si determina un valore del parametro t_{mpp} , che va mediato con quelli ottenuti ripetendo la medesima prova per diversi operatori.

3.2 Il sistema FAS tradizionale

Il sistema FAS (Flexible Assembly System) di tipo tradizionale ora considerato è una cella robotizzata composta dai seguenti sottosistemi:

- *un sistema flessibile di alimentazione dei componenti*: composto da alimentatori riconfigurabili per alte produttività. Tipicamente si tratta di vibroalimentatori orbitali a gradini innovativi e flessibili, presenti in numero pari alle tipologie di componenti da alimentare. La flessibilità degli alimentatori, poichè possono essere riconfigurati da un operatore, permette di gestire un'ampia varietà di componenti [10].
- *una o più maschere di assemblaggio*: si tratta di quel sottosistema dove avviene fisicamente il montaggio dei prodotti. Si tratta in particolare di maschere automaticamente riconfigurabili, che permettono di assemblare una famiglia di prodotti.
- *un manipolatore industriale riprogrammabile*: questo robot, dotato di opportuna destrezza, preleva i componenti dalla guida di uscita degli alimentatori per posizionarli sulla maschera di assemblaggio dove avviene il montaggio. In particolare è necessario che il ciclo di lavoro del manipolatore si adatti automaticamente all'ordinativo da produrre.

Questo tipo di cella di lavoro automatizzata è in grado di assemblare una famiglia di prodotti che possono essere costruiti assemblando uno specifico gruppo di componenti, che corrispondono a quelli messi a disposizione dagli alimentatori. Poiché ogni alimentatore è in grado di alimentare una sola tipologia di componente per volta [10], la cella di lavoro dovrà essere dotata di tanti alimentatori quante sono le tipologie di componenti da alimentare. Questo fatto comporta che il costo degli alimentatori può rappresentare la parte più rilevante dell'intero sistema di assemblaggio. Inoltre i vari alimentatori richiedono un tempo di riattrezzaggio, per cambiare il tipo di componente che possono alimentare, e questo influenza pesantemente la produttività e i costi unitari diretti di produzione, in particolar modo quando si lavorano lotti dalle dimensioni contenute. D'altra parte invece, il fatto che i componenti sono orientati e singolarizzati dagli alimentatori in tempo

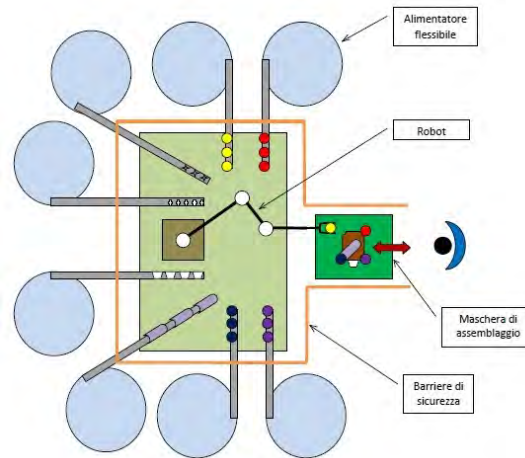


Figura 3.3: Layout di una cella FAS tradizionale

mascherato, rispetto all'operazione di montaggio, fa sì che il tempo ciclo di questo sistema risulta contenuto, includendo solo il tempo di prelievo, movimentazione e posa dei componenti da parte del manipolatore, più il tempo di montaggio. La produttività oraria, in termini di componenti manipolati, per un sistema FAS tradizionale può essere calcolata come segue:

$$Q_{fas} = \frac{h_{res} - N_c t_{set}}{h_{res} t_{pp}} \quad (3.4)$$

dove t_{set} è il tempo, espresso in ore, necessario per riattrezzare ogni alimentatore flessibile, N_c è il numero delle tipologie di componenti da utilizzare nell'assemblaggio, h_{res} è il tempo di lavoro medio, espresso in ore, tra due successivi riattrezzaggi della cella di lavoro, ovvero il tempo medio necessario per completare un ordinativo, infine t_{pp} è il tempo medio, espresso in ore/componente, necessario per la manipolazione e l'assemblaggio di un singolo componente. Va ancora una volta sottolineato che il numero di tipologie di componenti corrisponde al numero di alimentatori [16]. Si noti in particolar modo che la produttività è negativamente influenzata dal numero di componenti N_c , i quali aumentando comportano un aumento dei costi diretti di produzione.

Il costo orario diretto di produzione per questo sistema di assemblaggio automatico risulta:

$$C_{h,fas} = \frac{C_{robot} + C_{cell} + N_c C_{feed}}{h_{pb}} + \frac{N_c t_{set}}{h_{res}} C_{h,op} \quad (3.5)$$

dove C_{robot} , C_{cell} , C_{feed} sono le voci di costo dei sottosistemi della cella di lavoro, $C_{h,op}$ è il costo orario dell'operatore incaricato di riattrezzare gli alimentatori, h_{pb} è il periodo di ritorno dell'investimento, espresso in numero di ore di lavoro previste. Allora, il costo unitario diretto per un sistema FAS tradizionale, espresso in Euro per ogni componente assemblato, può essere ottenuto dal rapporto tra il costo orario e la produttività oraria:

$$C_{u,fas} = \frac{C_{h,fas}}{Q_{fas}} \quad (3.6)$$

3.3 La modellazione del sistema F-FAS

Il layout del sistema F-FAS presentato in questa tesi, come si è già visto, è composto fondamentalmente da:

- *un sistema di alimentazione dei componenti completamente flessibile*: l'alimentazione delle diverse tipologie di componenti può essere fatta con contemporaneità, visto l'alto grado di flessibilità del sistema, e senza la necessità di riattrezzare l'alimentatore. Tuttavia, il tempo necessario per acquisire ed elaborare un'immagine, da parte del sistema di visione, rappresenta un tempo morto nel ciclo produttivo, che influenza negativamente la produttività.
- *una o più maschere di assemblaggio*.
- *un manipolatore industriale riprogrammabile*: questo robot è caratterizzato da un ciclo di lavoro che si adatta alla particolare composizione della porzione di componenti identificati sul piano vibrante.

Ogni ripetizione del ciclo di lavoro del sistema F-FAS inizia con il prelievo di una porzione casuale di componenti dalla vasca, oppure facendo semplicemente vibrare

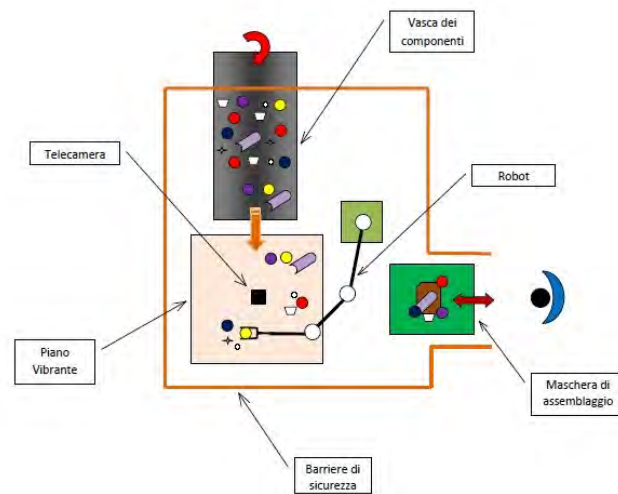


Figura 3.4: Layout della cella F-FAS.

il piano di riconoscimento. Quando un'immagine viene acquisita ed elaborata, per identificare i componenti sul piano, il cui numero è indicato con N_p , possono verificarsi una o più delle seguenti situazioni:

- alcuni componenti non sono riconosciuti perché ad esempio sono sovrapposti;
- alcuni componenti, pur essendo riconosciuti, non sono prendibili dal robot, perché ad esempio sono troppo vicini gli uni agli altri;
- alcuni componenti sono invece riconosciuti e prendibili e il loro numero è indicato con N_{cr} .

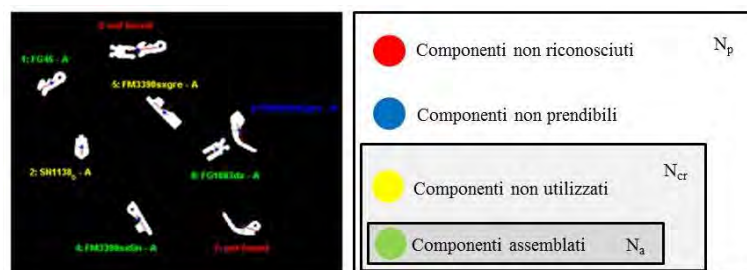


Figura 3.5: Possibili situazioni nell'identificazione dei componenti

Solo i componenti riconosciuti e prendibili possono essere utilizzati per l'assemblaggio, inoltre solo una parte di essi, che indichiamo con N_a , viene effettivamente

assemblata. Infatti, solo certe combinazioni di componenti permettono l'assemblaggio di un prodotto. Se almeno un prodotto può essere assemblato, allora il manipolatore preleverà i componenti dal piano e li porterà in corrispondenza della maschera di assemblaggio. Altrimenti il ciclo si ripete con una nuova alimentazione di componenti dalla vasca, oppure con una semplice riorientazione e distribuzione dei componenti presenti sul piano vibrante.

In base a questa descrizione, che ripropone il ciclo di lavoro, è possibile fare delle considerazioni:

- il sistema F-FAS deve il suo alto grado di flessibilità in particolare al sistema di alimentazione, il quale è in grado di alimentare nella cella qualsiasi tipo componente di modeste dimensioni in contemporaneità. Questo fatto riduce il costo diretto rispetto ai sistemi FAS tradizionali, specialmente quando il numero di tipologie di componenti è elevato.
- il ciclo di lavoro è determinato, nella sua dinamica, non solo dall'ordinativo da produrre, ma anche e in particolare dal processo stocastico di alimentazione e riorientazione dei componenti sul piano vibrante.
- il ciclo di lavoro è negativamente influenzato dal tempo necessario ad acquisire e processare un'immagine, di conseguenza il numero dei componenti effettivamente assemblati per ogni immagine, tra tutti i componenti presenti nel piano, determina l'efficienza del sistema F-FAS, la quale deve quindi essere massimizzata.
- il sistema di alimentazione dei componenti non richiede un tempo di riattrezzaggio per cambiamenti del lotto produttivo. Questa caratteristica permette una produttività elevata, soprattutto per lotti molto piccoli.

La produttività oraria, in termini di componenti manipolati, per il sistema F-FAS può essere calcolata come segue:

$$Q_{f-fas} = \frac{1}{\frac{\sum_j (t_{f,j} + t_{i,j})}{\sum_j N_{a,j}} + t_{pp}} = \frac{1}{\frac{(t_{fs} + t_{is}) \sum_j N_{p,j}}{\sum_j N_{a,j}} + t_{pp}} = \frac{1}{\frac{t_{fs} + t_{is}}{K} + t_{pp}} \quad (3.7)$$

dove t_{pp} è il tempo medio per manipolare e assemblare un singolo componente, j è l'indice per ogni immagine acquisita, $t_{f,j}$ è il tempo per l'alimentazione con i componenti, $t_{i,j}$ è il tempo per l'acquisizione e l'elaborazione immagine, $N_{a,j}$ è il numero di componenti effettivamente assemblati ad ogni immagine, $t_{fs} = \frac{t_{f,j}}{N_{p,j}}$ e $t_{is} = \frac{t_{i,j}}{N_{p,j}}$ sono rispettivamente i tempi medi per l'alimentazione e il riconoscimento di un singolo componente, $N_{p,j}$ è il numero di componenti sul piano vibrante. Il parametro K è il rapporto tra il numero di componenti assemblati ($\sum_j N_{a,j}$) e il numero di componenti identificati ($\sum_h N_{p,h}$), durante l'evasione di un intero ordinativo:

$$K = \frac{\sum_j N_{a,j}}{\sum_h N_{p,h}} \quad (3.8)$$

Il parametro K , il cui valore può variare tra 0 (nessun componente assemblato) e 1 (situazione ideale in cui, ad ogni ciclo, tutti i componenti presenti nel piano sono assemblati), determina l'efficienza del sistema F-FAS e ha un impatto diretto sulla produttività e sui costi unitari diretti di produzione di questa cella di lavoro. Per questo motivo, il valore del parametro K deve essere massimizzato, in modo da ridurre il tempo e il costo necessari per completare l'assemblaggio di un ordinativo. Il costo orario diretto di produzione per questa cella di lavoro risulta:

$$C_{h,f-fas} = \frac{C_{f-fas,plant}}{h_{pb}} = \frac{C_{robot} + C_{cell} + C_{camera} + C_{flexfeed}}{h_{pb}} \quad (3.9)$$

dove C_{robot} , C_{cell} , C_{camera} , $C_{flexfeed}$ sono le voci di costo dei sottosistemi della cella di lavoro, mentre h_{pb} è il periodo di ritorno dell'investimento, espresso in numero di ore di lavoro previste. Allora il costo unitario diretto per il sistema F-FAS, espresso in Euro per ogni componente assemblato, può essere ottenuto dal rapporto tra il costo orario e la produttività oraria:

$$C_{u,f-fas} = \frac{C_{h,f-fas}}{Q_{f-fas}} = \frac{C_{h,f-fas}}{h_{pb}} \left(\frac{t_{fs} + t_{is}}{K} + t_{pp} \right) \quad (3.10)$$

Parametro	Valore	Unità di misura
η	0,85	%
t_{mpp}	4,83	s
$C_{h,op}$	13	Euro/ora
C_{wb}	300	Euro
h_{pb}	1840	ore
t_{set}	60	s
t_{pp}	1,5	s
C_{robot}	25000	Euro
C_{cell}	15000	Euro
C_{feed}	8000	Euro
$C_{flexfeed}$	12000	Euro
C_{camera}	4000	Euro
t_{fs}	40	ms
t_{is}	30	ms

Tabella 3.1: Parametri usati per il confronto dei sistemi di assemblaggio.

3.4 Confronto tra i sistemi di assemblaggio flessibile

Il confronto tra i tre sistemi di assemblaggio presentati può essere fatto sulla base dei modelli visti, al fine di valutarne la produttività e i costi unitari diretti di produzione. Per analizzare quantitativamente i tre sistemi, è necessario individuare il valore numerico per ciascun parametro presente nei modelli, come indicato nella tabella 3.1. Questi valori sono stati individuati sulla base delle informazioni ricavabili in [10], dall'utilizzo del prototipo della cella F-FAS e dalle prove sperimentale di assemblaggio manuale. In particolare, per determinare il parametro t_{mpp} , si sono svolte delle prove di assemblaggio chiedendo a 5 persone, di cui 3 di sesso maschile e 2 di sesso femminile, di eseguire delle prove di manipolazione e assemblaggio usando alcuni componendi, portando a termine 3 diversi ordini produttivi, gli stessi che verranno descritti nel paragrafo seguente. Si evidenzia che, per tutti e

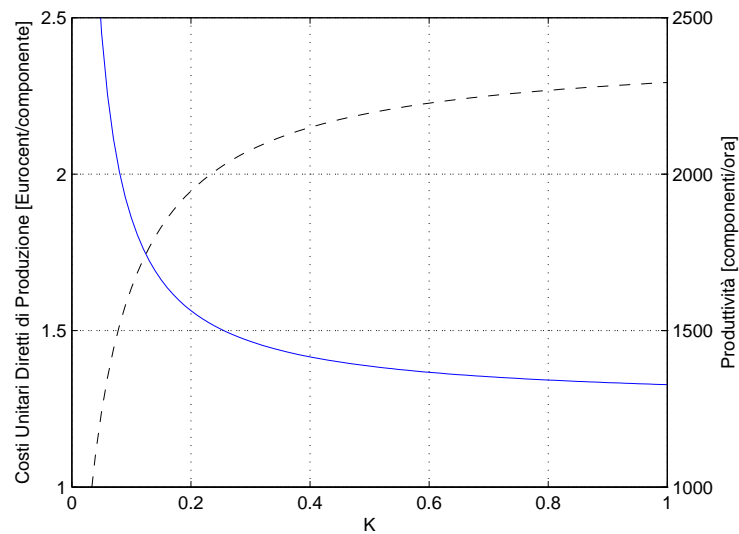


Figura 3.6: Produttività (linea tratteggiata) e costi unitari diretti di produzione per ogni componente assemblato (linea continua) per la cella di lavoro F-FAS, in funzione del parametro K .

tre sistemi di assemblaggio analizzati, i tempi considerati sono relativi solo ad operazione di presa, manipolazione e posa orientata. I componenti poi potrebbero essere montati in una maschera di assemblaggio, la quale è considerata equivalente per tutti e tre i sistemi e perciò non considerata nel confronto. Inoltre il range delle dimensioni dei componenti varia da 1 e 6 centimetri. L'efficienza media di un operatore η invece è stata quantificata in accordo con le informazioni riportate in [32]. Si noti infine che il numero di ore presenti nel periodo di ritorno degli investimenti, valutato pari ad un anno, è stato determinato considerando 8 ore di lavoro al giorno, per 230 giorni di lavoro all'anno. In base ai parametri individuati, l'andamento della produttività e del costo unitario diretto, per la sola cella F-FAS, è mostrato nel grafico 3.6, in funzione dell'efficienza del sistema K .

Mentre il confronto sulla produttività ottenibile con i tre diversi sistemi in studio è visibile nel grafico 3.7, dove è possibile constatare che i valori maggiori di componenti assemblati all'ora sono ottenibili con un sistema FAS tradizionale, a meno che non si considerino dimensioni dei lotti contenute (cioè per valori modesti del parametro h_{res}) e prodotti relativamente complessi (cioè per i valori più elevati del parametro N_c). Perciò se è la produttività l'aspetto più importante della

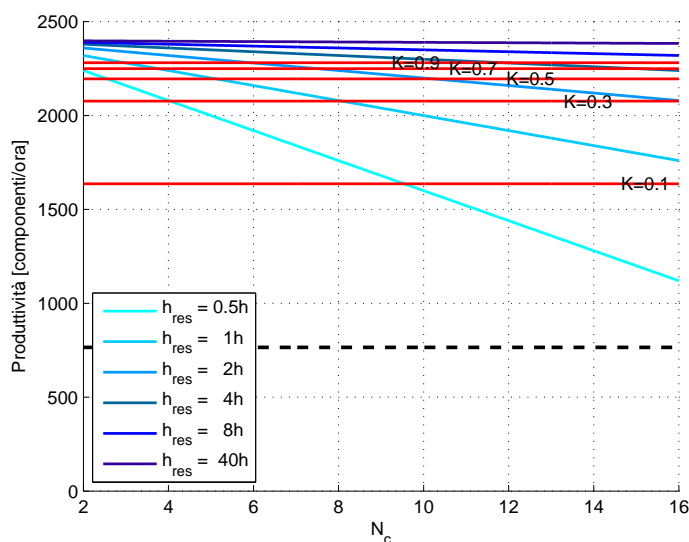


Figura 3.7: Produttività del sistema F-FAS (curve rosse), di un sistema FAS tradizionale (curve blu) e dell'assemblaggio manuale (curva tratteggiata), in funzione del numero delle tipologie di componenti N_c .

produzione, in particolare per realtà produttive con lotti non particolarmente piccoli e prodotti semplici, una cella FAS tradizionale risulta il sistema più adatto. I costi unitari diretti di produzione per i tre sistemi flessibili sono descritti dal grafico 3.8. Le curve blu rappresentano i costi unitari diretti di produzione per la cella FAS, le quali sono parametrizzate sul tempo necessario per evadere un ordinativo (h_{res}). Si noti che i costi unitari diretti di produzione della cella FAS aumentano con N_c (in particolare a causa del costo del sistema di alimentazione e i maggiori tempi di riattrezzaggio) e decresce con h_{res} (a causa della minore incidenza del tempo di riattrezzaggio sulla produttività). Le curve rosse invece rappresentano i costi unitari diretti di produzione per la cella F-FAS. Questi costi non sono influenzati dal numero di tipologie di componenti N_c , ma sono funzione della efficienza del sistema K . Nello stesso grafico, la curva nera tratteggiata rappresenta i costi unitari diretti di produzione per la stazione di assemblaggio manuale. La posizione di questa curva mostra che l'assemblaggio manuale diventa conveniente rispetto alla cella F-FAS solo se questa è stata progettata in maniera non ottimale, cioè con il valore dell'efficienza K estremamente basso. D'altra parte, l'assemblaggio manuale diventa competitivo nei confronti di una cella FAS

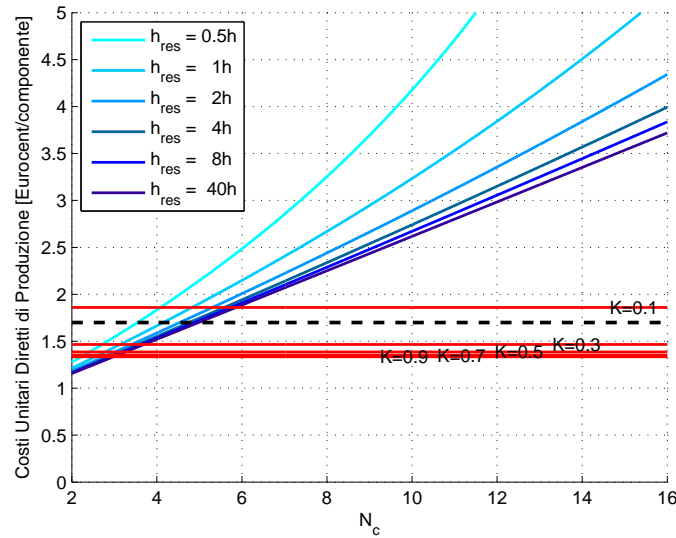


Figura 3.8: Costi unitari diretti di produzione per il sistema F-FAS (curve rosse), per un sistema FAS tradizionale (curve blu) e per l'assemblaggio manuale (curva tratteggiata), in funzione del numero delle tipologie di componenti N_c .

tradizionale per prodotti complessi e dimensione dei lotti contenute.

Il confronto dei costi unitari diretti suggerisce che la cella F-FAS supera il sistema FAS tradizionale, anche per valori modesti del parametro K che caratterizza la cella F-FAS. In particolare la differenza tra i due sistemi è maggiore per:

- alti valori del parametro K , cioè per alta efficienza del sistema F-FAS;
- numerose tipologie di componenti N_c , quindi per prodotti complessi;
- modesti valori del parametro h_{res} , che caratterizzano una dimensione del lotto contenuta.

D'altra parte, confrontando la cella F-FAS con l'assemblaggio manuale, osservando i costi unitari diretti, emerge che:

- nessuno dei sistemi è influenzato dal numero di tipologie di componenti N_c .
- l'assemblaggio manuale è competitivo solo per bassi valori dell'efficienza K della cella F-FAS.

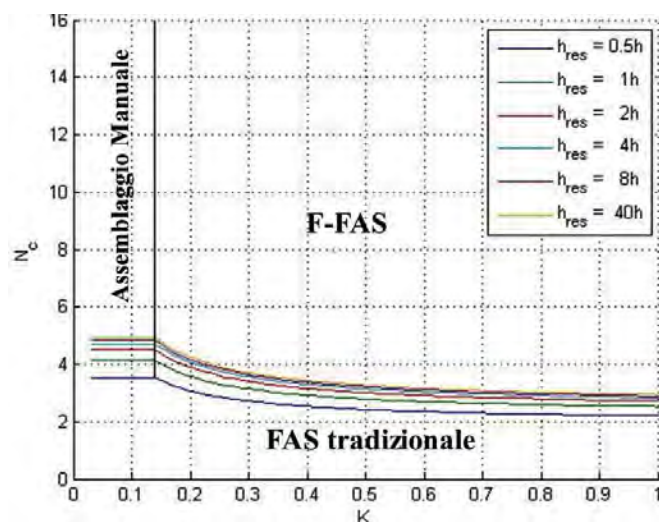


Figura 3.9: Minimo numero di componenti N_c per il quale ognuna delle tre tecnologie di assemblaggio diventa conveniente rispetto alle altre, in funzione del parametro K .

Un confronto diretto tra assemblaggio manuale, cella FAS tradizionale e il sistema F-FAS è presentato in figura 3.9, dove la zona di convenienza di ognuno dei sistemi di assemblaggio è evidenziata in un piano $N_c - K$. In questo grafico, l'area sotto le curve colorate indica la zona dove i costi unitari diretti di produzione risultano minori utilizzando un sistema FAS tradizionale. L'area sopra le curve, alla destra della linea nera verticale, indica minori costi per la cella F-FAS. Infine, l'area sopra le curve colorate, a sinistra della linea nera verticale, indica una zona dove i costi sono minori utilizzando una stazione manuale a postazione singola. Va precisato che le curve colorate, che determinano i confini tra le diverse zone del grafico si sposteranno verso il basso se si tiene conto anche degli inceppamenti che possono avvenire nel sistema di alimentazione di un sistema FAS tradizionale, situazione che invece risulta estranea al sistema F-FAS. Inoltre, se invece di considerare che i sistemi studiati lavorino su un turno, si considera che lavorino su due turni, il risultato è quello mostrato in figura 3.10, dove la zona di convenienza dell'assemblaggio manuale risulta assolutamente compressa. Da tutte queste considerazioni emerge che, in sede di scelta della tecnologia e del sistema da utilizzare per l'assemblaggio flessibile, risulta molto importante prevedere l'efficienza con cui può lavorare il sistema F-FAS, determinando il valore

del parametro K .

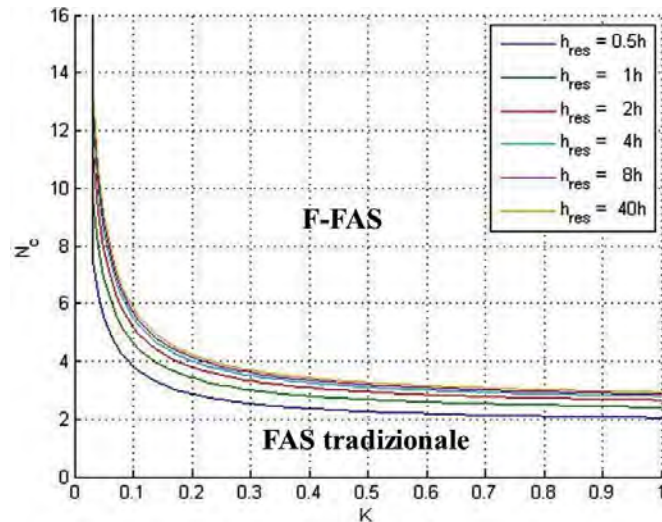


Figura 3.10: Mappa di convenienza per i tre sistemi studiati, ipotizzando di lavorare su due turni.

3.4.1 Primi test per la validazione del sistema F-FAS

Al fine di verificare se l'idea di cella F-FAS può trovare un riscontro nella realtà produttiva, si è deciso di utilizzare il prototipo costruito, al fine di eseguire dei test di evasione di alcuni ordinativi. In base alle definizioni date in 2.2 e in ??, i tre ordinativi, testati più volte, sono caratterizzati dalle seguenti coppie matrice di assemblaggio - vettore ordinativo:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 4 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 6 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 4 & 3 \\ 4 & 1 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad R_1 = \begin{bmatrix} 6 \\ 5 \\ 8 \\ 7 \\ 4 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 8 \\ 3 \\ 10 \\ 13 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_3 = \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \\ 8 \\ 15 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

In base alla 2.3 è facile calcolare la composizione dell'insieme dei componenti che devono essere inseriti nel bulk dell'anyfeed, infatti i vettori magazzino per i tre ordinativi sono così composti:

$$W_1 = R_1^T A_1 = [83 \ 24 \ 61 \ 52 \ 57] \quad (3.14)$$

$$W_2 = R_2^T A_2 = [49 \ 20 \ 14 \ 81 \ 44 \ 63] \quad (3.15)$$

$$W_3 = R_3^T A_3 = [12 \ 41 \ 21 \ 13 \ 81 \ 39 \ 44] \quad (3.16)$$

Gli ordinativi evasi e i componenti utilizzati durante la prova sono gli stessi di quelli impiegati nelle prove di assemblaggio manuale, per individuare il parametro t_{mpp} . In figura 3.11 sono mostrati i risultati ottenuti dall'evasione dei tre ordinativi con il prototipo. Al fine di considerare anche il processo stocastico che caratterizza il funzionamento del sistema di alimentazione dei componenti per la cella F-FAS, lo stesso ordinativo è stato evaso 20 volte. Come conseguenza ogni coppia $A - R$

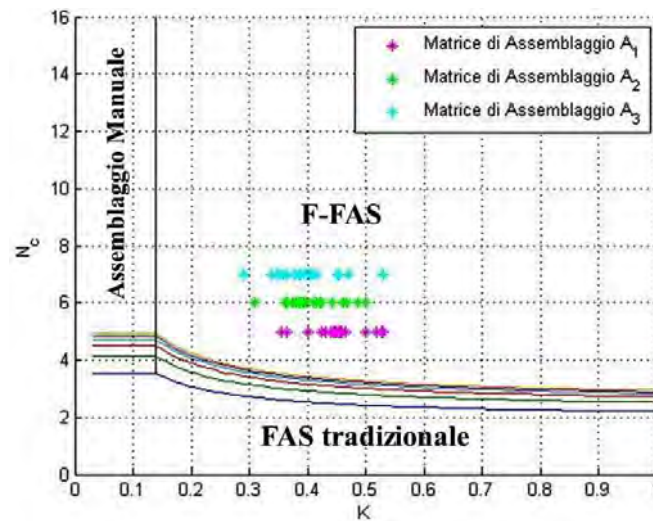


Figura 3.11: Primi test sperimentali con prototipo.

è rappresentata da venti differenti punti sperimentali, tutti ovviamente aventi lo stesso valore di ordinata, il quale rappresenta il numero di colonne della matrice A . Risulta interessante osservare come, per lo stesso ordinativo, è possibile avere differenti valori dell'efficienza del sistema F-FAS (rappresentata dal parametro K). Questa osservazione è in accordo col fatto che, durante i diversi cicli per evadere il medesimo ordinativo, si presentano differenti sequenze di componenti, che appaiono casualmente sul piano vibrante. Inoltre, il valore medio del parametro K , per una singola coppia $A - R$, tende a diminuire quando il numero delle colonne della matrice aumenta, indicando che più la produzione è complessa, necessitando di un numero elevato di tipologie di componenti, minore risulta l'efficienza media del sistema F-FAS. Infine, si può verificare che tutti i punti in figura 3.11 ricadono dentro la zona di convenienza del sistema F-FAS in accordo con la figura 3.10. Questo risultato conferma e valida da un punto di vista economico l'idea di cella F-FAS. Ulteriori test sono stati condotti, provando un gran numero di coppie $A - R$, ma i risultati ottenuti confermano le considerazioni esposte.

Capitolo 4

Criteri di progettazione e ottimizzazione del sistema F-FAS

La cella robotizzata F-FAS risulta conveniente dal punto di vista economico, rispetto ai sistemi tradizionali di assemblaggio flessibile, solo per valori sufficientemente elevati della sua efficienza K . Risulta quindi necessario individuare una modellazione dell'efficienza del sistema F-FAS, validata anche da test sperimentali condotti sul prototipo, al fine di poterne prevedere le performance e riuscire a delineare le regole per il suo settaggio ottimale.

4.1 Aspetti significativi

La produttività della cella F-FAS è fortemente influenzata dall'efficienza del sistema come visto in 3.7. In particolare, va precisato che il sistema F-FAS risulta competitivo, rispetto all'assemblaggio manuale su postazione singola e ad una cella FAS tradizionale, solamente per valori della produttività sufficientemente elevati. Inoltre si può affermare che le variabili che influenzano significativamente la produttività si possono suddividere in due gruppi:

- le variabili di sistema
- le variabili di produzione

Le variabili di sistema sono rappresentate da tutti quei parametri legati alle caratteristiche dei sottosistemi che compongono la cella F-FAS, come ad esempio

la velocità del sistema di visione, le dimensioni del piano vibrante, la velocità del robot, ecc. Mentre le variabili di produzione sono costituite da tutti quei parametri legati ad aspetti della produzione, come ad esempio il numero di tipologie di componenti, il numero di modelli di prodotto, le dimensioni medie dei componenti da assemblare, la variabilità di tali dimensioni, ecc. Alla luce di queste considerazioni, è necessario sviluppare un modello che possa permettere di prevedere la produttività del sistema F-FAS, derivandolo da un'espressione della sua efficienza, che sia funzione delle variabili di sistema e di produzione. Quindi, lo scopo finale è fornire determinate regole progettuali per la cella F-FAS, che permettano di massimizzarne la produttività e minimizzarne i costi unitari diretti di produzione. Per ottenere questo scopo è necessario individuare una relazione tra il numero totale di componenti presenti nel piano N_p , il numero dei componenti riconosciuti e prendibili N_{cr} e il numero di componenti effettivamente assemblati N_a . Questa relazione può essere individuata studiando l'andamento sperimentale dei dati ottenuti con l'utilizzo del prototipo e con l'impiego di un codice che simuli il comportamento della cella F-FAS, permettendo così di ottenere, in poco tempo, un grande quantitativo di dati. In particolare è importante individuare come questi parametri sono funzione dalle variabili di sistema e di produzione. In questo modo sarà possibile, non solo prevedere, per una data famiglia di prodotti se il sistema F-FAS è conveniente rispetto ai sistemi tradizionali di assemblaggio flessibile, ma anche individuare il settaggio ottimale della cella in accordo con le regole progettuali proposte.

4.2 Modellazione dell'efficienza del sistema F-FAS

La valutazione dell'efficienza della cella F-FAS è fatta in base al valore del parametro K come riportato nell'equazione 3.8. Tanto maggiore, e vicino al valore unitario, sarà il suo valore, tanto più la cella è in grado di assemblare con una produttività competitiva e con dei costi unitari diretti di produzione contenuti. L'equazione 3.8 può essere riscritta introducendo un nuovo parametro

k_j che rappresenta l'efficienza al j –esimo ciclo, cioè il rapporto tra i componenti assemblati $N_{a,j}$ e i componenti identificati $N_{p,j}$ nell'immagine j –esima:

$$K = \frac{\sum_j \frac{N_{a,j}}{N_{p,j}} N_{p,j}}{\sum_h N_{p,h}} = \sum_j k_j \frac{N_{p,j}}{\sum_h N_{p,h}} = \sum_j k_j w_j \quad (4.1)$$

Nell'equazione 4.1 il parametro K può essere calcolato pesando i valori dell'efficienza nei vari cicli di lavoro necessari per completare un ordinativo di produzione. L'efficienza k_j è pesata dal rapporto w_j tra i componenti identificati nel j –esimo ciclo e la totalità dei componenti identificati durante l'assemblaggio dell'intero ordinativo. L'equazione 4.1 indica chiaramente che *il massimo valore di K può essere ottenuto massimizzando k_j* , perciò questo è lo scopo principale dello studio per l'ottimizzazione di una cella F-FAS.

D'ora in avanti, si utilizzeranno delle notazioni semplificate, dove viene rimosso l'indice j da tutti i pedici. Perciò si utilizzeranno k , N_a , N_p , invece che k_j , $N_{a,j}$, $N_{p,j}$. Inoltre, come già specificato in precedenza, si utilizzerà la notazione N_{cr} per indicare il numero dei componenti riconosciuti e prendibili per il singolo ciclo di lavoro, durante l'evasione di un intero ordinativo. Alla luce di ciò, possiamo riformulare l'equazione del parametro k come segue:

$$k = \frac{N_a}{N_p} = \frac{N_{cr}}{N_p} \frac{N_a}{N_{cr}} = k_1 k_2 \quad (4.2)$$

dove k_1 è il rapporto tra i componenti riconosciuti e prendibili N_{cr} e quelli identificati N_p , mentre k_2 è il rapporto tra i componenti assemblati N_a e quelli riconosciuti e prendibili N_{cr} . Entrambi i parametri possono assumere un valore contenuto in un range compreso tra 0 e 1. In particolare, il parametro k_1 tiene in considerazione il livello di saturazione del piano vibrante, questo a sua volta dipende dalle caratteristiche geometriche dei componenti (variabili di produzione), dal numero di componenti versati nel piano e dalla dimensione del piano (variabili di sistema). Mentre, il parametro k_2 tiene in considerazione il fatto che i componenti riconosciuti e prendibili possono essere solo in parte utilizzati nell'assemblaggio, in relazione alle caratteristiche dell'ordinativo (variabile di produzione) e dalla speci-

fica composizione del gruppo di componenti riconosciuti e prendibili disponibili sul piano dopo il processo di alimentazione, il quale ha una natura stocastica. Per un'analisi puntuale del sistema F-FAS è necessario studiare i parametri k_1 e k_2 approfonditamente, in particolare individuando delle formulazioni che stabiliscano come essi siano influenzati dalle variabili di produzione e di sistema.

4.2.1 Il codice simulativo

La formulazione di un modello per l'efficienza e in particolare per il parametro k_2 , necessita l'analisi di un grande quantitativo di dati, che descrivono l'evolversi delle evasioni di numerosi ordinativi di assemblaggio. Questo necessiterebbe lo svolgimento di un numero eccessivo di prove con il prototipo, per questo motivo si è sviluppato un codice su piattaforma MatLab, che simula il comportamento della cella di lavoro F-FAS, così da ottenere numerose informazioni in un tempo ragionevole. Il diagramma di flusso del codice simulativo è presentato in figura 4.1. I principali inputs per questo codice sono la matrice di assemblaggio A , il vettore ordinativo R e le proprietà geometriche dei componenti usati per l'assemblaggio. Inoltre, l'utente può specificare il valore medio del numero di componenti estratti dalla vasca dopo ogni istruzione che simula l'alimentazione (N_{feed}) e il numero minimo di componenti presenti sul piano, che indica la necessità di prelevarne degli altri N_{plim} . La simulazione ovviamente inizia con il piano vuoto ($N_p = 0$) e la vasca piena. Successivamente, N_{feed} componenti sono casualmente estratti dalla vasca (ipotizzando che tutti i componenti abbiano la stessa possibilità di essere estratti, come nel caso di un bulk opportunamente suddiviso) e idealmente versati sul piano vibrante, costituendo un nuovo set di N_p componenti sul piano. Il passo successivo consiste nel calcolare il numero dei componenti riconosciuti e prendibili N_{cr} , il quale è ottenuto moltiplicando N_p per il parametro k_1 . Il valore di k_1 è ottenuto dalle prove sperimentali condotte su prototipo e dipende sia dal numero di componenti presenti sul piano N_p sia dalle caratteristiche geometriche dei componenti usati nell'assemblaggio, come verrà chiarito in seguito. La composizione dei componenti riconosciuti e prendibili è ottenuta selezionando casualmente N_{cr} componenti tra quelli presenti nel piano (si precisa che è stato ipotizzato che tutti i componenti abbiano la stessa possibilità di essere selezionati). In base alla composizione del

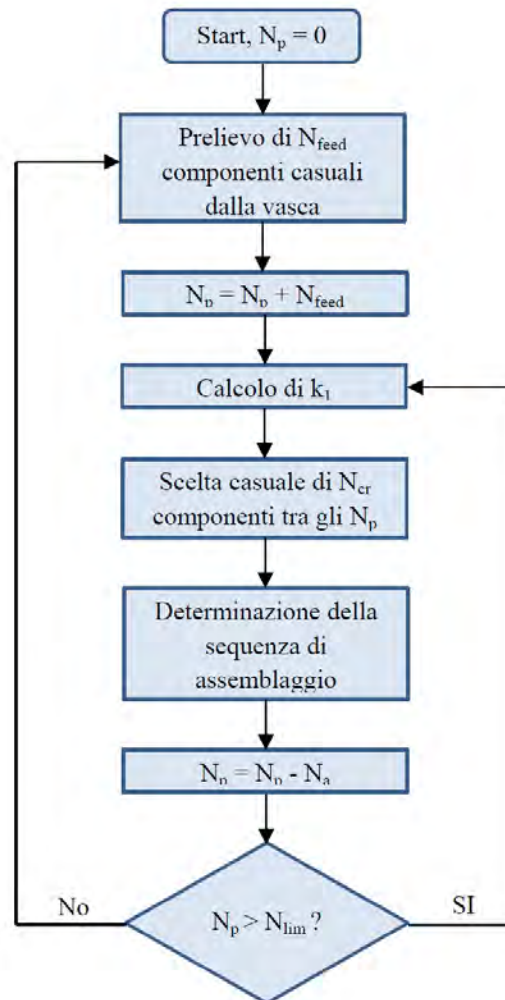


Figura 4.1: Diagramma di flusso del codice simulativo.

set di componenti riconosciuti e prendibili, il software determina la sequenza degli assemblaggi e individua così il numero e il tipo dei componenti utilizzati nell'assemblaggio N_a , nonché l'insieme dei componenti che rimangono nel piano, il cui numero è pari a $N_p - N_a$. Questo valore è confrontato quindi con il valore limite N_{plim} , il quale fornisce due possibilità: se il numero di componenti che rimane nel piano è maggiore di N_{plim} , allora non vengono prelevati altri componenti dalla vasca, i valori di k_1 e N_{cr} vengono aggiornati e un nuovo insieme di componenti riconosciuti e prendibili è determinato; invece se si necessita di prelevare altri componenti dalla vasca, è eseguita nuovamente la procedura di alimentazione, per cui alla fine risulta presente sul piano una nuova composizione di componenti. La

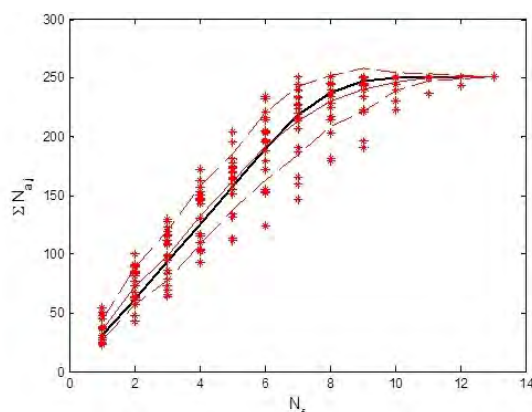


Figura 4.2: Somma cumulativa di N_a rispetto al numero di immagini acquisite per una singola coppia $A - R$. La linea nera continua rappresenta il risultato medio di 100 simulazioni; le stelline rappresentano i dati sperimentali ottenuti con il prototipo; la linea continua rossa è il risultato medio dei test sperimentali (più o meno una deviazione standard: individuabile dalle linee rosse tratteggiate).

simulazione termina non appena tutti prodotti specificati nel vettore ordinativo sono stati assemblati.

Il codice simulativo è stato validato confrontando diverse simulazioni di evasione ordinativo con prove sperimentali svolte con il prototipo di cella F-FAS. In particolare, è stata posta l'attenzione su come l'evasione dell'ordinativo evolve durante l'assemblaggio simulato e reale. Sono stati confrontati i risultati ottenuti per diverse coppie $A - R$, ripetendo ogni ordinativo 100 volte con il simulatore e almeno 10 volte con il prototipo. La figura 4.2 mostra il confronto dei dati simulati e sperimentali per una coppia matrice di assemblaggio - vettore ordinativo, mostrando la somma cumulativa dei componenti assemblati ($\sum_j N_{a,j}$) in funzione delle immagini acquisite N_f . Il grafico mette a confronto il numero medio simulato di componenti assemblati (linea nera) con i dati sperimentali (stelline rosse). Tutti i gruppi di dati mostrano una forte correlazione tra i valori sperimentali e quelli ottenuti dalle simulazioni. Il coefficiente di determinazione, o coefficiente di correlazione quadratico R^2 , tra i dati sperimentali e i valori medi ottenuti dalle simulazioni è maggiore di 0,85 per ogni coppia $A - R$.

4.2.2 Percentuale dei componenti riconosciuti e prendibili

k_1

Lo studio del parametro k_1 si basa su prove sperimentali svolte con il prototipo di cella F-FAS, la quale è usata, in particolare, per analizzare la dipendenza di k_1 rispetto al numero di componenti presenti sul piano vibrante N_p . I test sono stati svolti acquisendo una serie di immagini per diversi valori di N_p e ripetendo questa procedura con sei diverse combinazioni di componenti. Il risultato è mostrato

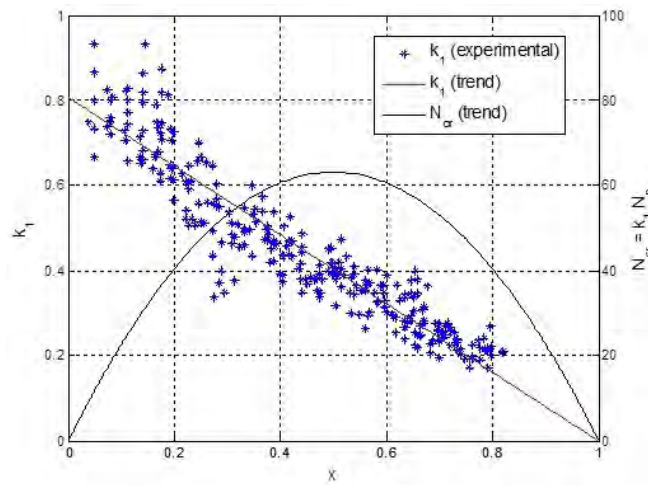


Figura 4.3: Risultati di un test rappresentativo per il parametro k_1 (stelline blu). L'andamento del parametro k_1 è indicato dalla retta rossa, mentre l'andamento del valore di N_{cr} è mostrato dalla parabola tracciata in nero.

in figura 4.3, dove si può notare che per un dato componente o per una data combinazione di componenti, l'andamento di k_1 in funzione di N_p è lineare con pendenza negativa. Perciò è possibile modellare questo comportamento con la seguente formulazione:

$$k = k_{1,max} \left(1 - \frac{N_p}{N_{p,max}} \right) = k_{1,max} (1 - x) \quad (4.3)$$

dove $k_{1,max}$ è l'intercetta con l'asse delle ordinate della retta che descrive l'andamento di k_1 , questo valore è quello massimo che il parametro può assumere. Invece $N_{p,max}$ è l'intercetta della retta con l'asse delle ascisse, questo valore

corrisponde al limite di saturazione del piano vibrante, mentre x è il numero dei componenti presenti sul piano normalizzato rispetto al limite di saturazione:

$$x = \frac{N_p}{N_{p,max}} \quad (4.4)$$

In accordo con l'equazione 4.3, il numero dei componenti prendibili, definito come $N_{cr} = k_1 N_p$, può essere modellato in questo modo:

$$N_{cr} = k_1 N_p = k_1 x N_{p,max} = k_{1,max} N_{p,max} (x - x^2) \quad (4.5)$$

La curva che descrive l'andamento di N_{cr} è perciò una parabola con la concavità verso il basso, che interseca l'asse delle ascisse in 0 e in 1, mentre raggiunge il suo valore massimo, pari a $\frac{k_{1,max} N_{p,max}}{4}$, in $x = \frac{1}{2}$. Questo comportamento può essere spiegato considerando che, per i più alti valori di N_p , il numero di componenti tra loro sovrapposti, o comunque a contatto, sono molto numerosi. In tale situazione si verifica una diminuzione delle performance del sistema di visione e allo stesso tempo si riducono le possibilità di prelevare i componenti dal piano vibrante con il gripper del robot. Da l'altra parte invece, per i valori più bassi di N_p , le prestazioni del sistema aumentano, ma il numero di componenti è di per sé modesto, di conseguenza anche il corrispondente valore del parametro N_{cr} risulta contenuto.

4.2.3 Percentuale dei componenti assemblati k_2

Un'analisi approfondita del parametro k_2 è stata svolta per studiare come esso sia influenzato da N_p . Le prove condotte questa volta sono state svolte interamente con l'utilizzo del simulatore e usando i risultati ottenuti dallo studio del parametro k_1 per tenere in considerazione la saturazione del piano vibrante. Anche in questo caso è stata simulata l'evasione di numerosi ordinativi diversi, combinando ciascuna delle centinaia di matrici utilizzate con con cinque vettori ordinativo diversi. Ogni ordinativo è stato evaso dieci volte, usando valori differenti del numero di componenti N_{feed} estratti dalla vasca nella fase di alimentazione del piano e del limite inferiore dei componenti presenti sul piano N_{lim} . Osservando l'andamento

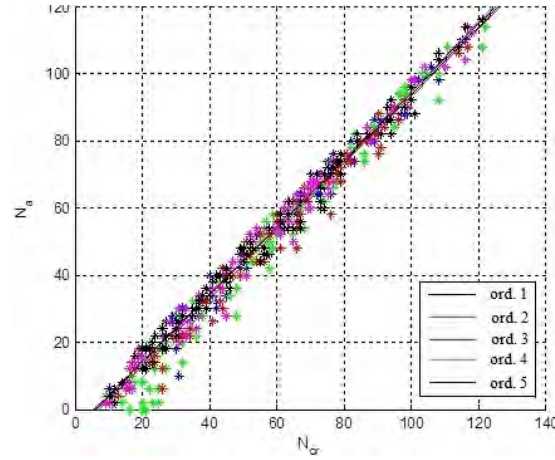


Figura 4.4: Dati ottenuti dalle simulazioni (punti colorati) e curve di tendenza (curve a tratti colorate) per il parametro N_a in funzione di N_{cr} , per una matrice di assemblaggio A rappresentativa, abbinata a cinque diversi vettori ordinativo. I risultati ottenuti per ogni ordinativo $A - R$ sono tracciati in colore diverso.

del parametro N_a rispetto a N_{cr} , ottenuto per le diverse matrici A (un esempio è mostrato in figura 4.4), si è notato che può essere approssimato bene da una funzione lineare:

$$N_a = m(N_{cr} - c) \quad (4.6)$$

dove il parametro m è la pendenza della retta, mentre l'intercetta con l'asse delle ascisse c rappresenta il minimo numero di componenti necessari per assemblare almeno un modello di prodotto. Combinando le equazioni 4.5 e 4.6 può essere ottenuta la seguente espressione per il parametro k_2 :

$$k_2 = \frac{N_a}{N_{cr}} = m \left(1 - \frac{c}{N_{cr}} \right) = m \left(1 - \frac{c}{k_{1,max} N_{p,max} x - x^2} \right) = m \left(1 - \frac{c_n}{x - x^2} \right) \quad (4.7)$$

dove si definisce c_n come:

$$c_n = \frac{c}{k_{1,max} N_{p,max}} \quad (4.8)$$

L'andamento del parametro k_2 , per i dati mostrati in figura 4.4, è descritto nella figura 4.5, dove il massimo valore del parametro, pari a $k_{2,max} = m(1 - 4c_n)$, si ottiene per $x = \frac{1}{2}$. Osservando il grafico, si può notare che il parametro assume valori elevati in un ampio intervallo del rapporto $x = \frac{N_p}{N_{p,max}}$, cioè quando il numero dei componenti riconosciuti e prendibili N_{cr} è sufficientemente elevato da permettere un buon sequenziamento degli assemblaggi.

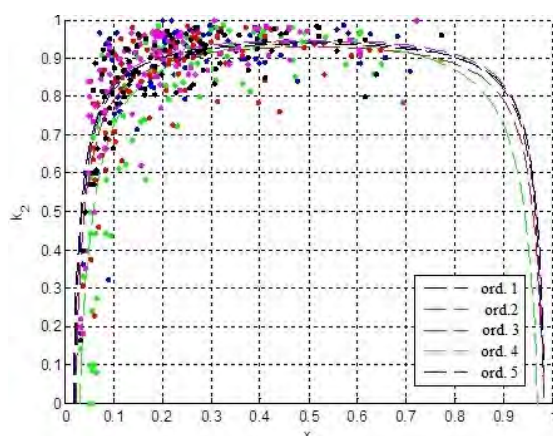


Figura 4.5: Dati ottenuti dalle simulazioni (punti colorati) e curve di tendenza (curve a tratti colorate) per il parametro k_2 , in funzione del grado di saturazione del piano vibrante x , per una matrice di assemblaggio A rappresentativa, abbinata a cinque diversi vettori ordinativo. I risultati ottenuti per ogni ordinativo $A - R$ sono tracciati in colore diverso.

4.2.4 Efficienza k

Le equazioni 4.3 e 4.7 possono essere combinate insieme ottenendo un'espressione dell'efficienza k in funzione del parametro x :

$$\begin{aligned}
 k &= k_1 k_2 = k_{1,max} (1 - x) m \left(1 - \frac{c_n}{x - x^2} \right) = k_{1,max} m \left(1 - x - \frac{c_n}{x} \right) \\
 &= k_{1,max} k_{2,max} \frac{1 - x - \frac{c_n}{x}}{1 - 4c_n}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

derivando questa espressione rispetto a x e uguagliando a zero, si trova che il valore massimo di k si ottiene per x pari a:

$$x_{opt} = \sqrt{c_n} = \sqrt{\frac{c}{k_{1,max}N_{p,max}}} \quad (4.10)$$

e nello specifico il valore massimo del parametro k vale:

$$k_{max} = k_{1,max}m(1 - 2\sqrt{c_n}) = k_{1,max}k_{2,max}\frac{1 - 2\sqrt{c_n}}{1 - 4\sqrt{c_n}} \quad (4.11)$$

Un esempio dell'andamento dei parametri k_1 , k_2 , e k è mostrato in figura 4.6, dove k_1 e k_2 sono stati normalizzati rispetto ai loro valori massimi, mentre il prodotto di questi due valori massimi divide k . Si può notare che, poiché i massimi di k_1 e k_2 si presentano per valori diversi di x , la massima efficienza di una cella F-FAS è minore del prodotto tra $k_{1,max}$ e $k_{2,max}$. Allo scopo di massimizzare la produttività, la cella F-FAS deve essere configurata per lavorare nell'intervallo dei più alti valori di k , in altre parole il sistema di alimentazione deve essere proporzionato e tarato in modo tale che renda possibile mantenere un numero di componenti presenti sul piano vibrante il più prossimo possibile al valore $x_{opt}N_{p,max}$, per tutta la durata dell'evasione di un ordinativo. Va inoltre notato che l'efficienza della cella F-FAS decade repentinamente a sinistra del punto di lavoro ottimale, ovvero per un numero modesto di componenti sul piano, mentre tende a seguire la pendenza della retta k_1 a destra del punto di lavoro ottimale.

4.3 Regole di progettazione del sistema F-FAS

Si è già detto che l'efficienza della cella F-FAS può essere modellata in funzione del numero di componenti presenti sul piano vibrante del sistema di alimentazione N_p , da parte sua il numero di questi componenti dipende dai parametri m , c , $k_{1,max}$ e $N_{p,max}$ come visto nelle equazioni 4.9, 4.10 e 4.11. A questo punto, è necessario spiegare come i parametri che descrivono i modelli di prodotto da assemblare sono correlati con le variabili di sistema e con le variabili di produzione, allo scopo di definire delle regole di progettazione per la cella F-FAS.

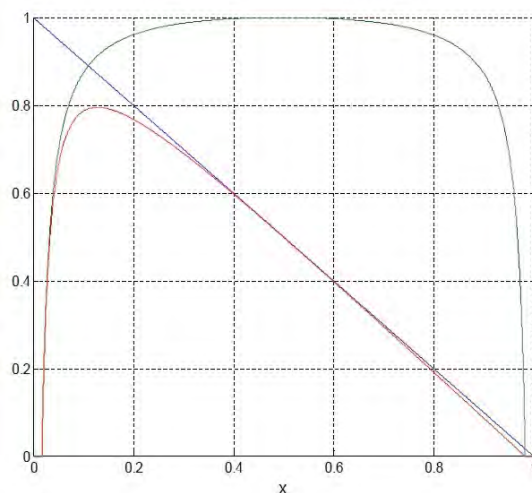


Figura 4.6: Grafico degli andamenti di $\frac{k_1}{k_{1,max}}$ (linea blu), $\frac{k_2}{k_{2,max}}$ (curva verde) e $\frac{k}{k_{1,max}k_{2,max}}$ (curva rossa), in funzione del parametro x , per una matrice di assemblaggio rappresentativa.

4.3.1 Relazione tra parametri di modello e variabili di produzione e di sistema

Comparando i risultati sperimentali ottenuti con diversa composizione dell'insieme dei componenti usati, si può verificare che $k_{1,max}$ non è influenzato né dalla forma, né dalla dimensione dei componenti. Mentre il valore del parametro $N_{p,max}$, che indica il limite di saturazione del piano vibrante, è fortemente legato alle caratteristiche geometriche dei componenti sul piano. Questa dipendenza è stata analizzata tenendo in considerazione diverse caratteristiche geometriche utilizzate per il riconoscimento dei componenti con il sistema di visione, quali l'area, l'area convessa, la compattezza, il perimetro, ecc. Tutti questi parametri geometrici sono stati normalizzati rispetto una dimensione significativa del piano vibrante, ad eccezione della compattezza che è un parametro adimensionale. Ad esempio il perimetro è stato diviso per la lunghezza della diagonale del piano, individuando il perimetro relativo, mentre l'area è stata divisa per l'area della superficie del piano vibrante. La figura 4.7 mostra l'andamento di N_p in funzione del perimetro relativo p , dove ogni stellina blu rappresenta un test effettuato con uno specifico componente o insieme di componenti, si noti che nel secondo caso si considera

il valore di perimetro medio pesato sui quantitativi delle diverse tipologie di componenti presenti nell'insieme. L'analisi di correlazione indica che il parametro $N_{p,max}$ può essere modellato come una funzione lineare del perimetro relativo dei componenti ($R^2 = 0,94$). Ciò significa che maggiore è il perimetro, minore è il limite di saturazione del piano. Questo risultato indica che l'andamento della percentuale dei componenti riconosciuti e prendibili k_1 dipende dal rapporto tra una variabile di produzione e una variabile di sistema, ossia dal rapporto tra il perimetro medio pesato dei componenti da assemblare e la lunghezza della diagonale del piano vibrante.

I parametri c e m , che influenzano direttamente la percentuale di componenti

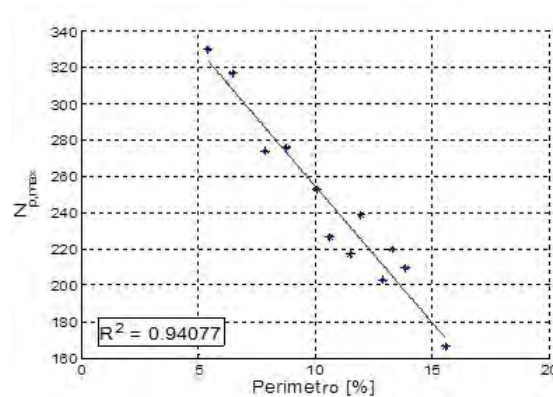


Figura 4.7: Andamento del parametro $N_{p,max}$ in funzione del perimetro relativo dei componenti. Ogni stellina blu rappresenta un test effettuato con uno specifico componente o insieme di componenti, mentre la linea rossa indica l'andamento dei dati.

assemblati k_2 , dipendono invece dalle caratteristiche della matrice di assemblaggio A e dall'algoritmo di sequenziamento. Prove sperimentali e simulazioni hanno dimostrato che, per un dato algoritmo di sequenziamento, entrambi i parametri m e c sono legati a due variabili di produzione: il numero delle tipologie di componenti N_c (ovvero il numero di colonne della matrice A) e la complessità media dei vari modelli di prodotto previsti dalla matrice A . La complessità di un modello di prodotto è definita come il numero di componenti necessari ad assemblarlo, ovvero facendo la somma degli elementi di una riga della matrice A , quindi la complessità media dei modelli può essere definita come:

$$c_m = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \left(\sum_{j=1}^{N_c} A_{i,j} \right) \quad (4.12)$$

dove N_r è il numero delle righe della matrice A . Il risultato finale, che è interessante presentare, consiste nel fatto che l'efficienza massima k_{max} della cella F-FAS (equazione 4.11) e la condizione di settaggio ottimale della cella, rappresentata dal parametro x_{opt} (equazione 4.10), possono essere approssimate dalle seguenti funzioni:

$$k_{max} = \sum_{i=0}^4 \alpha_i(p) (N_c c_m)^i \quad (4.13)$$

$$x_{opt} = \sum_{i=0}^4 \beta_i(p) (N_c c_m)^i \quad (4.14)$$

le quali sono dei polinomi di quarto grado del prodotto tra il numero di tipologie di componenti e la complessità media della matrice di assemblaggio. I coefficienti di entrambi i polinomi sono funzioni linear ($R^2 = 0,9$) del perimetro relativo, e possono essere espressi come segue:

$$\alpha_i(p) = a_{1,i} + a_{2,i}p \quad (4.15)$$

$$\beta_i(p) = b_{1,i} + b_{2,i}p \quad (4.16)$$

Possiamo quindi riassumere i risultati esposti dicendo che il perimetro relativo influenza non solo il limite di saturazione del piano vibrante, ma anche il punto di lavoro ottimale del sistema di alimentazione e l'efficienza massima ottenibile. Il secondo fattore determinate, che influenza le performance della cella F-FAS, è il prodotto tra il numero di tipologie di componenti usati nell'assemblaggio e il numero di componenti che costituiscono i prodotti. Questi due parametri definiscono la complessità della famiglia di prodotti assemblata dal sistema automatico. In

effetti si può dire che maggiore è la complessità, minore sarà l'efficienza del sistema F-FAS. La figura 4.8 mostra i dati ottenuti dalle simulazioni per i parametri k_{max} e x_{opt} , ipotizzando di usare dei componenti con un perimetro relativo pari a 10% (stelline blu). Negli stessi grafici le curve rosse, (espresse dalle equazioni 4.15 e 4.16) rappresentano l'andamento dei dati ($R^2 > 0,95$).

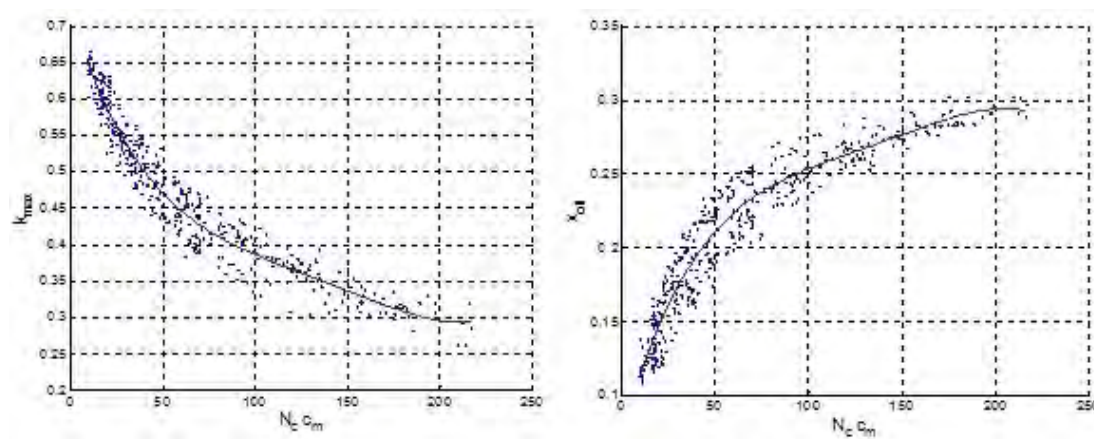


Figura 4.8: Dati ottenuti dalle simulazioni per i parametri k_{max} e x_{opt} , ipotizzando di usare dei componenti con un perimetro relativo pari a 10% (stelline blu). Le curve rosse indicano l'andamento dei dati (curve di fitting con $R^2 = 0,95$).

4.3.2 Analisi di convenienza e settaggio ottimale del sistema F-FAS

La validazione del sistema F-FAS, presentata nel capitolo 3, ha messo a confronto i costi unitari diretti della cella ideata con quelli dei sistemi tradizionali per l'assemblaggio flessibile. In particolare le mappe di convenienza (figure 3.9 3.10) mostrano che il sistema F-FAS risulta vantaggioso rispetto a un sistema FAS tradizionale quando le tipologie di componenti usati nell'assemblaggio sono sufficientemente elevate (maggiore di 3 o 4 componenti). D'altra parte invece, l'assemblaggio manuale può essere un'alternativa valida solamente quando l'efficienza del sistema F-FAS realizzabile è estremamente modesta (attorno al 10%). In accordo con i risultati esposti nel presente capitolo è necessario fare due precisazioni sull'analisi di convenienza. Prima di tutto, l'efficienza del sistema F-FAS di solito è molto maggiore al limite che comporta la convenienza dell'assemblaggio manuale e solo un cattivo

settaggio della cella può portare i valori di efficienza a livelli così modesti. In secondo luogo, l'efficienza della cella F-FAS per un intero ordinativo evaso, la quale può essere calcolata pesando i valori di efficienza nei vari cicli di lavoro (equazione 4.1), è limitata superiormente dal massimo valore del parametro k_{max} (equazione 4.13). In base a ciò la mappa di convenienza può essere modificata aggiungendo una curva tratteggiata come mostrato in figura 4.9, la quale indica la massima efficienza ottenibile k_{max} in funzione del numero di tipologie di componenti N_c . Questa curva delimita l'area di applicabilità del sistema F-FAS, per una data complessità media dei modelli da assemblare e per un dato valore di perimetro relativo dei componenti. Solo il settaggio ottimale del sistema di alimentazione (equazione 4.14) assicura le più elevate prestazioni e la maggior convenienza del sistema F-FAS, mentre una regolazione grossolana comporta dei valori di efficienza inferiori a k_{max} (area grigia nel grafico di figura 4.9). Allo scopo di individuare il

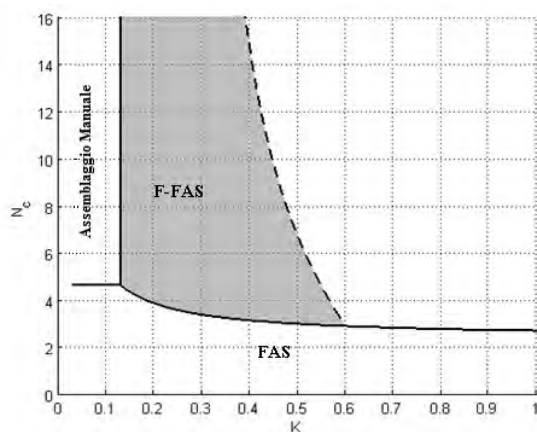
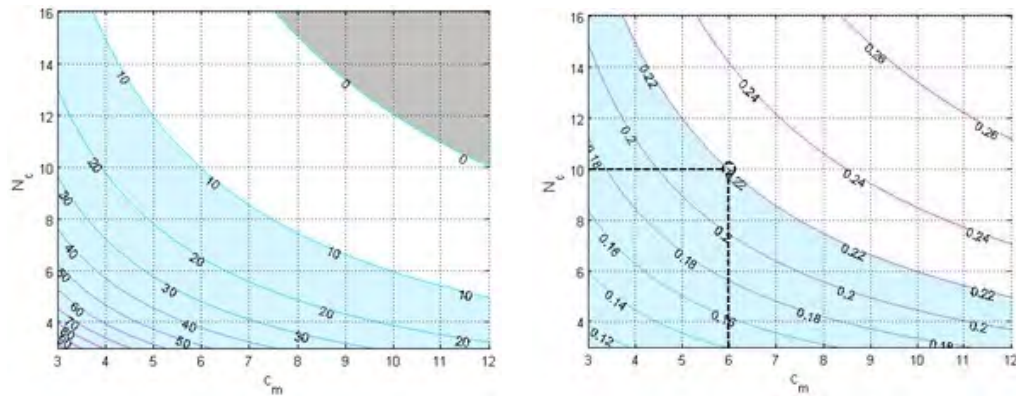


Figura 4.9: Modifica alla mappa di convenienza per i sistemi di assemblaggio flessibile. La curva tratteggiata rappresenta il valore del parametro k_{max} per un dato valore della complessità media c_m e del perimetro relativo p .

settaggio ottimale della cella F-FAS, si possono introdurre altri grafici che possono agevolare questa operazione nella fase progettuale. Per prima cosa, si può utilizzare il grafico 3.6 per individuare l'efficienza K per ottenere dei prefissati costi unitari diretti o una determinata produttività. Imponendo il dato trovato come valore di k_{max} nell'equazione 4.13, si può ottenere un grafico a curve di livello per il perimetro, in funzione di N_c e c_m come in figura 4.10a. Questo grafico permette,



(a) Curve di livello per il perimetro relativo p come funzione di N_c e c_m e per un prefissato valore di k_{max} ($k_{max} = 0,45$). (b) Curve di livello per x_{opt} come funzione di N_c e c_m e per un prefissato valore del perimetro relativo p ($p = 10\%$).

Figura 4.10

da una parte, di verificare se una determinata produzione, caratterizzata da una matrice di assemblaggi A , sia fattibile per un determinato perimetro relativo, cioè per una determinata dimensione dei componenti da assemblare rispetto alla dimensione del piano vibrante. In accordo con questo grafico, si può scegliere la dimensione del piano vibrante per raggiungere l'efficienza necessaria nel più ampio intervallo di variabilità produttiva possibile. Per esempio, il grafico in figura 4.10a individua le coppie $N_c - c_m$, che permettono di ottenere un'efficienza obiettivo del 45% (area azzurra), usando dei componenti con un perimetro relativo del 10%. I punti interni all'area azzurra rappresentano le matrici di assemblaggio che possono essere prodotte con maggiore efficienza di quella posta come obiettivo. In secondo luogo, lo stesso grafico permette di identificare le produzioni che non sono fattibili con l'efficienza richiesta, indipendentemente dal valore di perimetro relativo dei componenti (area grigia).

Una volta individuato il perimetro relativo, e quindi la dimensione del piano, il settaggio ottimale della cella F-FAS può essere determinato utilizzando un grafico come quello in figura 4.10b, il quale indica i valori del parametro x_{opt} (equazione 4.14) per un dato perimetro relativo p , in funzione di N_c e c_m . Per esempio, scegliendo un valore di $k_{max} = 0,45$ e un valore di $p = 10\%$, una matrice di assemblaggio caratterizzata da $N_c = 10$ e $c_m = 6$ può essere prodotta settando il sistema di alimentazione in modo tale che possa lavorare in una condizione

744. CRITERI DI PROGETTAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA F-FAS

prossima a $x_{opt} = 0,22$. Perciò il quantitativo ottimale dei componenti presenti sul piano è il 22% del limite di saturazione $N_{p,max}$. La taratura del sistema può essere cambiata in tempo reale per adattare il comportamento della cella F-FAS allo specifico ordinativo processato, permettendo così di ottenere l'efficienza richiesta per un ampio insieme di famiglie di prodotti.

Capitolo 5

End-Effector Flessibile

In questo capitolo, si riporta sinteticamente lo stato dell'arte dei gripper utilizzati nella robotica industriale, evidenziando l'inconsistenza di studi per un organo terminale che possa essere utilizzato in una cella di lavoro ad alta flessibilità, come quella presentata in questa tesi, al fine di renderne ottimali le performance. Dopo aver indicato le caratteristiche fondamentali che tale dispositivo deve possedere, viene indicata la metodologia che ha portato a progettare un End-Effector elettropneumatico, in grado di auto-configurarsi, per far fronte alle esigenze di lavoro nella cella robotizzata F-FAS. Infine viene presentato il prototipo realizzato.

5.1 I gripper utilizzati nella robotica industriale

In un impianto automatico di assemblaggio si distinguono diversi compiti, alcuni dei quali, se l'impianto in questione è una cella robotizzata, sono richiesti all'organo terminale del manipolatore industriale. In particolare, il compito di grasping, ovvero di afferrare il componente da montare e il successivo compito di transporting, cioè quello di muovere il componente dalla posizione di presa fino a portarlo nella posizione di montaggio, senza la possibilità che esso possa svincolarsi, spettano essenzialmente all'End-Effector del robot. Se i compiti assegnati all'organo terminale sono esclusivamente quelli descritti, che nel loro complesso costituiscono la funzione di handling, senza che all'End-Effector possano essere richiesti ulteriori compiti tecnologici, che caratterizzano il tipo di giunzione

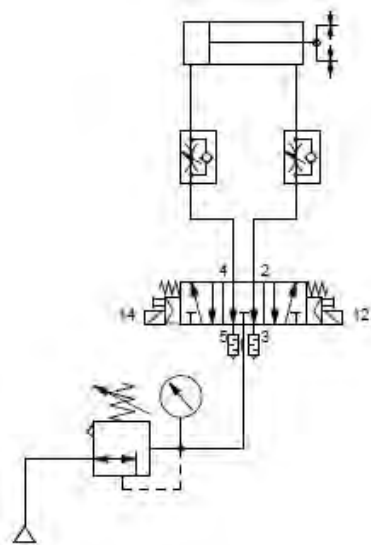


Figura 5.1: Esempio di circuito pneumatico per gripper a doppio effetto con griffe parallele.

(ad esempio inserimento, saldatura, incollaggio ecc), si parlerà semplicemente di gripper. Si vuole subito precisare che in questa sede si è deciso di non riportare la tecnica del vuoto utilizzata in automazione per la manipolazione di componenti, i quali tuttavia non devono avere una forma geometrica troppo complessa e delle dimensioni eccessivamente piccole per poter essere manipolati con ventose. Invece, ci si soffermerà brevemente sui gripper dei quali, in commercio, esistono diverse tipologie e numerose sono le case produttrici di questi dispositivi. In particolare, i gripper pneumatici trovano largo impiego nella manipolazione di componenti, poiché questi dispositivi sono affidabili, relativamente economici, con buone caratteristiche di ripetibilità e precisione, ma in particolar modo, sono molto semplici da regolare. Infatti, per regolare la velocità con cui far chiudere le griffe, si possono utilizzare dei semplici regolatori di portata, che possono essere montati direttamente sulle bocche di alimentazione, mentre per regolare la forza che questi dispositivi riescono ad esercitare, si dovrà agire sulla pressione di alimentazione e questo si può fare facilmente ponendo una valvola regolatrice di pressione a monte della valvola distributrice che li comanda [35]. Va posta l'attenzione sul fatto che la forza di chiusura richiesta a questi organi terminali va determinata sia in base al peso dell'oggetto da sollevare, che alla velocità di spostamento dell'organo



(a) *Gripper pneumatico, a doppio effetto, con due griffe parallele.*

(b) *Gripper pneumatico, a doppio effetto, con tre griffe parallele autocentranti.*

Figura 5.2: Grippers a griffe parallele della Gimatic s.p.a. di Roncadelle (Bs) - Italia.

terminale stesso. Infatti se lo spostamento è troppo rapido, rispetto alla forza di chiusura, l'inerzia dell'oggetto può farlo scivolare dai punti di presa.

Le tipologie di gripper esistenti sono essenzialmente due [34] e si distinguono per il tipo di moto che attuano per la movimentazione delle griffe. Alla luce di ciò si può distinguere tra:

- gripper pneumatici a griffe parallele
- gripper pneumatici a fulcro

La prima tipologia è caratterizzata da un movimento delle griffe di tipo lineare e la presa di un oggetto da manipolare viene eseguita mantenendo le griffe parallele tra loro. Questi gripper possono presentare un attuatore pneumatico a doppio effetto, che in chiusura consente la presa di un oggetto dall'esterno, mentre in apertura permette la manipolazione di un componente dall'interno, ponendo in contatto le griffe con un foro o una cavità. Tuttavia, esistono realizzazioni che presentano un attuatore pneumatico a semplice effetto, il quale permette la presa di oggetti solo in chiusura o in apertura, a seconda della posizione della camera attiva. Tali modelli hanno la peculiarità di garantire il comportamento del gripper in caso di mancanza dell'alimentazione: infatti, dal lato opposto della camera attiva, è

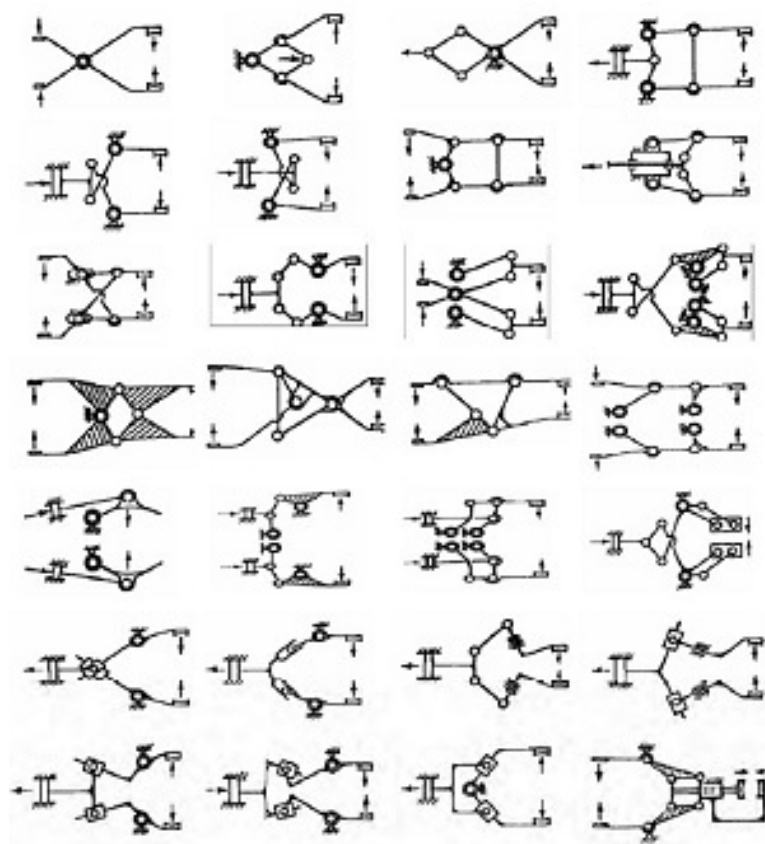


Figura 5.3: Raccolta di schemi cinematici di meccanismi per gripper proposta da F. Y. Chen in [40].

presente una molla che tenderà a chiudere o ad aprire le griffe a seconda della fattispecie. Perciò se in caso di mancanza di alimentazione si vuole garantire che il pezzo manipolato rimanga serrato, oppure viceversa che le griffe risultino aperte, per evitare di creare pericolo per un operatore che interviene nella zona di lavoro, si opterà per questi modelli. Bisogna tuttavia sottolineare che il sistema migliore, per garantire la sicurezza di un operatore che agisce nella zona di lavoro, è quello di un gripper a doppio effetto alimentato mediante una valvola distributrice 5/3 (5 vie e 3 posizioni), con centri allo scarico. In tal modo, in caso di emergenza, la valvola si porterà nella posizione centrale, per cui le griffe non eserciteranno più alcuna forza né in apertura, né in chiusura e anzi saranno movibili dall'operatore per risolvere eventuali condizioni di inceppamento. Va inoltre precisato che questa tipologia di gripper può presentare una chiusura simmetrica delle griffe oppure asimmetrica, questo dipende dal tipo di meccanismo usato per trasmettere il moto



Figura 5.4: Gripper a fulcro della SMC Italia s.p.a. di Carugate (Mi) - Italia.

dall'attuatore pneumatico alle griffe. La tipologia di tale meccanismo è molto varia e notevoli studi e raccolte possono essere trovati in letteratura [40], tuttavia i moderni gripper commerciali spesso presentano una trasmissione a camma che garantisce una buona compattezza. Infine va precisato che il numero delle griffe di questi dispositivi può essere maggiore di due: vi sono infatti modelli a tre e quattro griffe, con funzione di presa autocentrante, in questo caso il costo di tali dispositivi può aumentare sensibilmente. In generale i gripper pneumatici a griffe parallele vengono impiegati per movimentare componenti di modeste dimensioni, ma con caratteristiche geometrico-dimensionali non molto variabili tra loro. Inoltre questi gripper permettono di esercitare sempre la stessa forza sugli oggetti da manipolare, indipendentemente dalla posizione del punto di contatto di questi con le griffe.

I gripper pneumatici a fulcro invece sono caratterizzati da un movimento di rotazione delle griffe attorno a un punto fisso denominato cardine o fulcro. Essi sono utilizzati per movimentare componenti di dimensioni relativamente grandi e variabili, infatti se sono dotati di griffe sufficientemente lunghe, queste amplificano il moto dell'attuatore pneumatico, permettendo facilmente la manipolazione di oggetti dalle dimensioni eterogenee, come ad esempio dei cilindri con diverso diametro. Tuttavia l'entità dell'azione di serraggio di questi gripper dipende dalla distanza tra il fulcro attorno al quale ruota la griffa e il punto di contatto griffa-oggetto. Anche per questa tipologia di gripper si possono trovare modelli con attuatore pneumatico a doppio o semplice effetto, con chiusura simmetrica o asimmetrica.

Il problema generale dei gripper pneumatici è la loro scarsa configurabilità, poiché presentano in ogni caso un attuatore pneumatico la cui corsa è costante, perciò

anche se il componente da manipolare varia notevolmente in dimensione, essi apriranno sempre totalmente le griffe e successivamente le chiuderanno sul pezzo. In altre parole non è possibile aprire le griffe di una quantità appena sufficiente per afferrare l'oggetto, a meno che la valvola distributrice presente a monte non sia una valvola proporzionale in portata, ma in questo caso oltre a complicare notevolmente il comando dell'attuatore, i risultati ottenibili sono assolutamente scarsi. Per questo motivo è senza dubbio necessario passare ad un gripper dotato di attuazione elettrica.

5.1.1 Gripper industriali dotati di flessibilità

Notevoli sforzi sono stati condotti dalla ricerca nell'ideare un dispositivo che sia talmente flessibile da manipolare qualsiasi tipo di oggetto, rendendo le sue performance molto simili alla mano umana. A tal proposito si può citare il progetto ICub dell'Istituto Italiano di Tecnologia, dove l'intero progetto di robot androide è partito, a detta dei ricercatori dell'istituto, proprio dallo studio dell'End-Effector del robot, ovvero dalla mano, la quale presenta 9 gradi di libertà complessivi: 3 per il pollice, 2 per l'indice, 2 per il dito medio, 1 per la coppia anulare-mignolo e 1 per l'abduzione-adduzione. Tuttavia va sottolineato che questi studi, pur indispensabili per sviluppare degli End-Effectors all'avanguardia, mal si prestano ad applicazioni industriali dove è necessario un oggetto semplice, affidabile ed economico.

L'attenzione quindi va posta a quei gripper industriali ad attuazione elettrica, così da poter valutare le loro performance e la possibilità di impiegarli nella cella di lavoro F-FAS. Da alcuni anni ormai, le case produttrici di gripper pneumatici presentano tra i loro prodotti gripper ad azionamento elettrico capaci di muovere le griffe in una posizione qualsiasi della corsa, con estrema precisione e ripetibilità. Tale tendenza ha inoltre coinvolto non soltanto i produttori di dispositivi per manipolazione, ma anche i progettisti di End-Effector nel senso più ampio del termine, come ad esempio le pinze di saldatura a resistenza, che oggi vengono spesso sostituite dalla loro versione innovativa: le elettro-pinze. Si tratta di pinze di saldatura in cui l'attuatore, tradizionalmente pneumatico, è sostituito da un

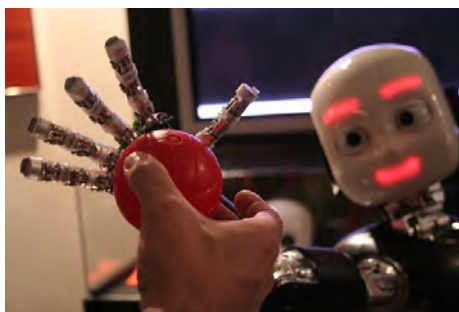


Figura 5.5: Particolare della mano antropomorfa del robot androide ICub dell'Istituto Italiano di Tecnologia.

attuatore elettrico, che permette di aprire gli elettrodi della quantità appena sufficiente da permettere di collocarli in corrispondenza della posizione dove eseguire il punto di saldatura, evitando quindi aperture inutilmente esagerate e permettendo un risparmio nel tempo ciclo e un conseguente aumento della produttività. Questa



Figura 5.6: Elettro-pinza per saldatura nella Spot Welding Machine della COMAU s.p.a. di Grugliasco (To) - Italia.

premessa è utile per comprendere come gli sforzi condotti in questa attività di ricerca non sono destinati solamente al campo della manipolazione, ma possono essere utilizzati anche nella progettazione di End-Effector in generale.

Indagando le caratteristiche dei gripper elettrici si può notare che essi in generale tendono a replicare le modalità di funzionamento di quelli pneumatici, nel senso che anche in questo caso sono individuabili prevalentemente gripper a griffe parallele, simmetrici oppure asimmetrici, con due o più griffe autocentranti. In questo caso però è possibile portare le griffe in una posizione qualsiasi della corsa, con

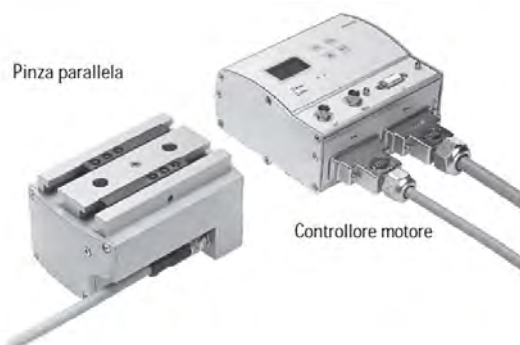


Figura 5.7: Gripper elettrico e sua unità di controllo della Festo Italia, Assago (Mi) - Italia.

estrema precisione ed averne un feedback grazie ad esempio alla presenza di un encoder. I gripper elettrici presentano corse massime che vanno da pochi mm fino a diverse decine di mm, i loro ingombri tuttavia sono maggiori della corsa massima, ad esempio un elettro-gripper con corsa massima di 40 mm presenta un ingombro totale di 124 mm. Questo fatto è dovuto alla tendenza generale dei progettisti di inglobare tutto il dispositivo all'interno di un volume di contenimento destinato a garantirne un certo grado di protezione o IP. Di per sé quindi le soluzioni proposte sono poco compatte, relativamente alla corsa massima realizzabile. La ripetibilità di posizionamento delle griffe è invece molto elevata, potendo raggiungere valori di pochi centesimi, prestazioni difficilmente ottenibili con un gripper pneumatico comandato da una valvola proporzionale in portata. Notevole inoltre risulta la loro silenziosità (< 60 db), in particolar modo se confrontata con l'attuazione pneumatica. La velocità di movimentazione delle griffe si aggira tra i 60 e i 150 mm/s , valori molto inferiori a quelli ottenibili con un gripper pneumatico, che per pressioni normali di 6-8 bar, arriva facilmente a raggiungere velocità di 1 m/s . I gripper elettrici sono in grado di esercitare forze regolabili anche di notevoli entità, arrivando facilmente a qualche centinaio di N, anche se questi valori dipendono dalla velocità di movimentazione delle griffe: aspetto non particolarmente penalizzante visto che l'importante è che riescano a esercitare una determinata forza una volta arrivati in contatto con il pezzo da manipolare e quindi a griffe ferme, tuttavia in tal caso il motore deve rimanere alimentato, quindi sollecitato termicamente, se la trasmissione non è irreversibile. L'aspetto penalizzante di



Figura 5.8: Un esempio di gripper elettrico, dotato di griffe adattabili, proposto dalla ROBOTIQ di St-Nicolas - Canada.

questi dispositivi sta nel circuito di controllo: infatti in questo caso si tratta di movimentare un attuatore elettrico, lineare o rotativo che sia, controllandone la posizione, e talvolta la forza che riesce ad esercitare, spesso mediante un anello in retroazione. Tali dispositivi sono abbinati ad un PLC nelle versioni più semplici e meno performanti (gripper elettrici on-off), mentre sono abbinati ad unità di controllo dedicate nei casi più complessi. Altro aspetto discutibile è che il meccanismo di trasmissione al loro interno è spesso irreversibile, perciò in caso di emergenza l'operatore non ha la possibilità di intervenire movimentando le griffe. Esistono infine alcune realizzazioni di gripper destinati all'industria, dove il meccanismo presente per muovere le griffe fa assumere a queste un'orientazione tale da adattarsi alla geometria del componente da manipolare. Tuttavia, questi dispositivi oltre a richiedere un complesso apparato di controllo, se paragonati con un semplice gripper pneumatico, sono relativamente lenti e presentano degli ingombri notevoli rispetto all'apertura realizzabile dalle griffe.

5.2 Caratteristiche richieste all'End-Effector per cella F-FAS

La cella di lavoro F-FAS necessita di un End-Effector, per il robot, che sia in grado di rendere massimi i componenti prendibili tra quelli riconosciuti dal sistema di visione. Esso ha quindi un importante effetto sulla produttività del sistema e di conseguenza sui costi unitari diretti. A tal scopo è necessario avere un organo

terminale che possa aprire le griffe di una quantità appena sufficiente per prendere un componente, senza andare ad urtare e spostare i componenti vicini. Inoltre, l'organo terminale deve poter compiere questo tipo di operazione per componenti di dimensioni molto variabili: per farsi un'idea deve essere il grado di effettuare il grasping per componenti molto piccoli, come ad esempio un dado M2 e, allo stesso modo, per componenti molto grandi come ad esempio per un piccolo semilavorato, che può costituire il corpo principale del prodotto su cui montare gli altri componenti. Così facendo, si riuscirà ad avere un End-Effector flessibile, che riesce ad auto-adattarsi alle esigenze di manipolazione, senza penalizzare le tempistiche di lavoro della cella F-FAS con numerosi cambi utensile. Come visto nei paragrafi precedenti, questo modo di lavorare è tipico di un gripper elettrico, tuttavia si vuole avere un dispositivo dove sia molto facile regolare la posizione delle griffe, facendo a meno di sensori di posizione, anelli in retroazione e moduli di controllo dedicati. Il gripper dovrà quindi avere un attuatore elettrico, controllato in anello aperto, che muove le griffe entro un ampio range, in modo silenzioso e garantendo una ripetibilità di posizionamento simile ai gripper già esistenti in commercio. Dall'altra parte invece, si ha la necessità di effettuare la presa dell'oggetto con un movimento molto contenuto, ad una velocità ben maggiore di quella ottenibile con la tecnologia elettrica e avendo la possibilità di regolare con semplicità la forza di serraggio, alla quale si chiedono valori che superino facilmente il centinaio di N: questo modo di lavorare caratterizza senza dubbio un attuatore pneumatico. Perciò, l'idea che ha guidato la fase di progettazione, fin dagli stadi iniziali, è quella di avere un dispositivo con due attuatori, in grado di riunire gli aspetti positivi della tecnologia elettrica e della tecnologia pneumatica. Questi due attuatori saranno, come già accennato, un attuatore elettrico per il moto di regolazione dell'apertura delle griffe, ed un attuatore pneumatico per il moto di serraggio delle griffe sul pezzo. Altro aspetto importante è la scelta della traiettoria per la movimentazione delle griffe nei due moti descritti. Premesso che, garantendo un ampio range di regolazione, risulta poco interessante avere un movimento di grasping rotativo e fulcrato, si è deciso quindi di prevedere un movimento parallelo delle griffe nel moto di serraggio, tale movimento potrà eventualmente tollerare valori molto modesti della componente verticale di velocità delle griffe, rispetto

5.2. CARATTERISTICHE RICHIESTE ALL'END-EFFECTOR PER CELLA F-FAS85

alla componente orizzontale, evitando in questo modo di graffiare i componenti più delicati durante il grasping. Il movimento di regolazione invece deve garantire che, indipendentemente dall'apertura richiesta all'End-Effector, le griffe, una volta chiuse, si portino sempre alla stessa quota verticale, in modo tale da agevolare la fase di istruzione della presa dei componenti, senza che l'operatore debba porre particolare attenzione alla distanza dal piano di appoggio. In altre parole, una volta serrate le griffe, il movimento di regolazione si svolgerà lungo una linea retta orizzontale. Tale aspetto permette inoltre al robot di variare la quota verticale a cui si trova l'End-Effector nel momento del prelievo e del rilascio dei componenti, solo per motivi funzionali di manipolazione e non per le caratteristiche del dispositivo di estremità. Altre caratteristiche richieste all'End-Effector, per la cella di lavoro F-FAS, sono la massa contenuta e il momento d'inerzia di massa modesto, per permettere di montare tale dispositivo su un piccolo robot antropomorfo, che si muove con valori di velocità combinata molto prossimi a quelli massimi ammissibili. Anche le dimensioni devono essere contenute per permettere di raggiungere anche i pezzi più vicini ai bordi del piano vibrante, senza avere delle griffe eccessivamente lunghe e sottili. Riassumiamo nei seguenti punti le caratteristiche che deve possedere l'End-Effector per la cella di lavoro F-FAS:

- movimento di regolazione ripetibile ($\leq 0.1\text{ mm}$) con attuatore elettrico silenzioso;
- sistema di comando dell'attuatore elettrico semplice, con elettronica essenziale;
- traiettoria di regolazione, a griffe serrate, rettilinea orizzontale;
- corsa di regolazione griffe $0 - 100\text{ mm}$;
- tempo di regolazione $\leq 1.5\text{ s}$;
- movimento di serraggio con attuatore pneumatico veloce, che permette la facile regolazione della forza di grasping;
- moto di serraggio griffe con una componente modesta di velocità verticale;
- corsa di serraggio griffe $\leq 10\text{ mm}$;

- tempo di serraggio ≤ 0.3 s;
- forza di serraggio pari a circa 200 N;
- massa $\leq 1,5$ kg;
- momento d'inerzia di massa rispetto all'asse robot $\leq 0,045$ kg m²;
- volume di contenimento $h \times l \times p = 140 \times 100 \times 90$ mm;

5.3 Progettazione dell'End-Effector

Una volta verificato che le caratteristiche richieste all'End-Effector della cella F-FAS non possono essere soddisfatte adeguatamente utilizzando un gripper presente in commercio e dopo aver preso consapevolezza che non è disponibile in letteratura nessuno studio su cui basarsi per la costruzione di tale dispositivo, è risultato necessario intraprendere la fase di progettazione di un nuovo organo terminale.

La conoscenza delle caratteristiche che deve possedere l'End-Effector non lasciano alcun dubbio sul fatto che esso debba prevedere un meccanismo articolato che movimenti le griffe. Come sia costituito questo meccanismo articolato riguarda la scelta della topologia, mentre come devono essere proporzionati i suoi membri, allo scopo di far percorrere alle griffe una determinata traiettoria, riguarda invece l'aspetto della sintesi dimensionale, infine come concepire la sua architettura per poterlo poi costruire, quali componenti scegliere, come dimensionarli, riguarda la progettazione esecutiva. Le varie fasi progettuali, pur essendo cronologicamente in successione, devono essere intese come concorrenti al risultato e interagenti tra loro. Ovviamente le fasi a monte influenzano quelle a valle, ma anche le fasi a valle possono raccogliere delle informazioni da reinviare alle fasi a monte, per elaborare una soluzione migliore. Va evidenziato, ancora una volta, che più è completa e accurata la fase di progettazione, fin dalle sue fasi iniziali, tanto più lineare e veloce sarà il percorso dell'idea nel diventare un oggetto fisico, evitando, a costruzione già avviata, fasi di aggiustaggio onerose in termini di tempo e costo.

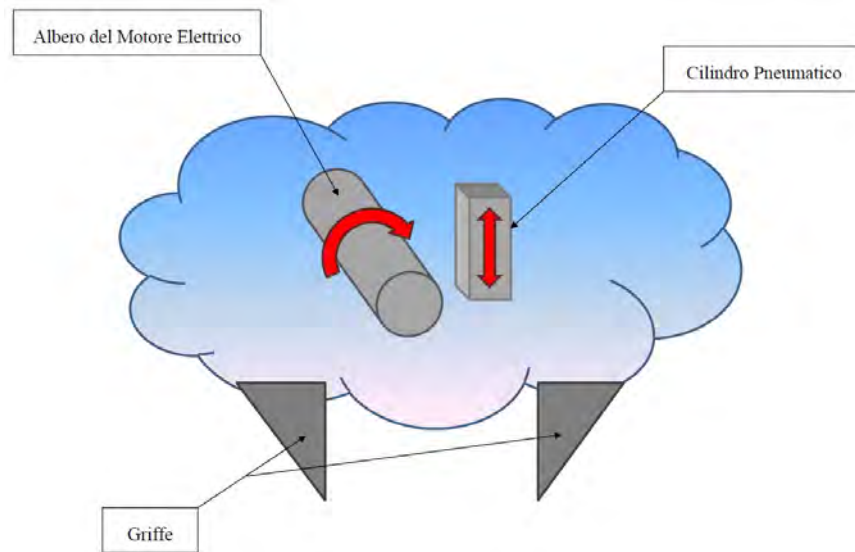


Figura 5.9: Idea preliminare.

5.3.1 Topologia del meccanismo

Questa fase di progettazione è quella che potremo definire di ideazione della soluzione. Infatti, tenute presenti le specifiche richieste, in questa fase si elabora l'idea, che soddisfa il problema ingegneristico affrontato. Nel caso specifico, è necessario pensare ad un sistema che permetta mediante due attuatori, movimentati uno alla volta, di effettuare il moto di regolazione e la presa dei componenti da manipolare. Senza entrare in questo momento nel dettaglio di questo aspetto, va però già specificato che pensando ad un attuttore elettrico, banalmente viene in mente un motore elettrico, mentre pensando agli attuatori pneumatici viene da pensare subito ad un semplice cilindro pneumatico. Se si comincia a buttar giù qualche idea su un foglio bianco, il motore elettrico lo possiamo pensare come un albero che ruota, mentre il cilindro è un semplice pattino che trasla. Detto questo, si possono disegnare le griffe, stilizzate come un triangolo. La fase di ideazione ora deve proseguire riempiendo quella nuvoletta (vedi figura 5.9) che nasconde la soluzione finale. In questa fase si è scelto di sviluppare un gripper simmetrico, il quale permette un impatto minore sui componenti nell'atto della presa. Probabilmente un gripper asimmetrico sarebbe molto più semplice da sviluppare, esso infatti sarebbe composto solamente da una griffa mobile, mentre l'altra, rimanendo fissa, funge da riscontro. Tuttavia la griffa mobile, nel moto di accostamento, probabil-

mente urterebbe e sposterebbe il componente di una quantità non trascurabile, in particolar modo se questo è di modeste dimensioni, non potendo garantirne quindi una presa sicura. A fronte della scelta di sviluppare un gripper simmetrico, nel seguito della discussione si ragionerà solo su metà End-Effector, lasciando il semplice problema di portare il moto nell'altra metà del dispositivo alla fase di progettazione esecutiva.

Risulta facile a questo punto intuire che la nuvola di figura 5.9 nasconda un meccanismo articolato a due gradi di libertà. L'idea di pensare ad un meccanismo articolato, piuttosto che ad altre soluzioni, per trasmettere il moto dagli attuatori alle griffe, è dovuta all'ampio spostamento richiesto rispetto agli ingombri disponibili. La scelta della topologia del meccanismo è un aspetto molto complesso della progettazione. Esistono notevoli studi che affrontano il problema della sintesi di tipo, partendo da un'analisi topologica delle catene cinematiche, che permettono successivamente di ottenere le configurazioni dei meccanismi che possono derivarvi. Talvolta, queste metodologie razionali per l'ideazione di un meccanismo articolato [38] si basano su una fase iniziale, che consiste nell'individuare la catena cinematica dei meccanismi proposti come soluzione a problemi simili, questo aspetto tuttavia potrebbe notevolmente influenzare le scelte sulla struttura del meccanismo elaborato e quindi contenere gli aspetti di originalità dello studio. In questa sede si è preferito individuare una soluzione semplice, senza ricorrere a metodi complessi per concepirla, tuttavia si è reso necessario il rispetto di una regola fondamentale, ovvero quella che indica di privilegiare i meccanismi il cui numero di cerniere, e quindi di membri, sia il minore possibile. In effetti se si vuole far percorrere ad un meccanismo una determinata traiettoria, i giochi irrinunciabili presenti negli accoppiamenti rotoidali, possono comprometterne la precisione del movimento, se tali accoppiamenti sono eccessivamente numerosi.

Una prima topologia studiata è stata quella di un esalatero del tipo Watt I, in cui una cerniera fissa a telaio sarebbe invece stata posta su un pattino, che rappresenta il cilindro pneumatico, formando così un meccanismo a sette membri, con i due gradi di libertà voluti. Questo meccanismo, costituito da un numero di membri contenuti, pur permettendo di ottenere una traiettoria rettilinea nel moto di regolazione, si dimostra poco compatto nella soluzione finale, ottenuta mediante



Figura 5.10: Prima topologia studiata per il meccanismo.

sintesi iterativa dimensionale, poco adatto a mantenere la griffa con una determinata orientazione lungo la traiettoria rettilinea ed inoltre il moto di grasping presenta delle componenti di velocità verticale assolutamente non trascurabili. Per questo motivo questa topologia è stata abbandonata, anche se una topologia della stessa famiglia è stata studiata dal gruppo di ricerca in meccanica applicata alle macchine della University of California-Irvine, con il quale l'autore ha collaborato durante un periodo di studio negli USA. Questo studio verrà presentato in seguito. La topologia che invece ha permesso di risolvere il problema è costituita da un meccanismo a nove membri: figura 5.11. In questo caso il numero di link e cerniere non è poi così modesto, tuttavia i risultati raggiunti si sono dimostrati lusinghieri. Tale topologia è stata pensata partendo dal meccanismo più semplice e diffuso: il quadrilatero articolato. In particolar modo si è pensato di collegare l'albero del motore elettrico alla manovella motrice del quadrilatero (1° dof), mentre di pensare alla biella come un membro ternario, in cui il punto di estremità P è una cerniera a cui collegare la griffa. Questa cerniera di collegamento P tra la griffa e la biella del quadrilatero è il punto del meccanismo che si vuole possa percorrere la traiettoria rettilinea orizzontale per il moto di regolazione dell'apertura. A questo punto è stato necessario pensare a come predisporre il pattino per il moto di serraggio delle griffe, senza complicare eccessivamente la topologia. La soluzione elaborata prevede di montare la seconda cerniera fissa del quadrilatero sul pattino e quindi poter muovere quest'ultimo tenendo ferma la manovella motrice

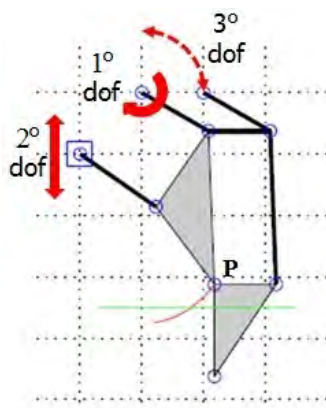


Figura 5.11: Topologia studiata per il meccanismo presente nell'End-Effector.

(2° dof). In questo modo la topologia si riduce ad un semplice meccanismo di spinta non centrato in cui la manovella è il membro condotto. In altre parole, la biella del quadrilatero, nel moto di regolazione, diventa la manovella condotta del meccanismo di spinta nel moto di serraggio delle griffe. Va precisato fin d'ora che i gradi di libertà vanno attuati uno alla volta. L'ultimo aspetto affrontato nello studio della topologia è quello di assicurare che la griffa mantenga sempre la stessa orientazione durante il movimento. Infatti si vuole che essa rimanga sempre con la superficie di presa perpendicolare al piano di appoggio dei componenti, qualsiasi sia il moto degli altri elementi del meccanismo. Per far ciò, senza complicare eccessivamente la topologia, si è inserito un doppio parallelogramma articolato. Il primo parallelogramma è formato dalla manovella motrice, da un membro con cerniera fissa a telaio alla stessa quota verticale di quella della manovella motrice e da un membro di collegamento tra i due. È ovvio che la lunghezza della manovella motrice e del link ad essa parallelo deve essere la stessa, così come la lunghezza del link di collegamento deve essere pari alla distanza tra le due cerniere fisse a telaio. Il secondo parallelogramma è costituito dal link di collegamento, dalla biella del quadrilatero, da un membro di lunghezza uguale e parallelo al lato della biella che collega la manovella motrice alla griffa ed infine dalla griffa stessa, la quale deve presentare due cerniere di collegamento distanti di una quantità pari alla lunghezza del link di collegamento. In questa fase non si è specificata l'orientazione della corsa del cilindro pneumatico: essa può essere orizzontale o verticale. La scelta a questo proposito è stata fatta in base a considerazione tecnico-economiche

in fase di progettazione esecutiva, ma nella fase di sintesi, le soluzioni studiate sono state entrambe. Si vuol porre l'attenzione infine sul fatto che la topologia qui descritta predispone il meccanismo per un terzo grado di libertà (3° dof in figura 5.11): infatti se invece di fissare a telaio la cerniera del link parallelo alla manovella motrice, la si muovesse su un arco di cerchio con centro la cerniera fissa della manovella motrice, si ottiene un moto angolare della griffa, con fulcro nella cerniera di collegamento con la biella del quadrilatero. In questo modo, si potrebbe passare da un gripper a chiusura parallela ad un gripper a chiusura angolare. Pur prevedendo tale predisposizione del meccanismo, si è deciso di non sviluppare questo aspetto in fase di progettazione esecutiva.

5.3.2 Utilizzo della teoria di sintesi per meccanismi piani

Una volta determinata una topologia interessante, per far compiere al meccanismo il compito per cui è stato ideato, è necessario individuare le posizioni corrette delle cerniere a telaio, proporzionare i suoi membri e definire il range di movimentazione dei membri motori. A questo scopo, si è utilizzata la teoria della sintesi cinematica dimensionale per meccanismi piani. La sintesi cinematica infatti indica dei metodi razionali per determinare le caratteristiche strutturali del meccanismo in grado di realizzare il moto desiderato. Tra i vari problemi risolvibili con la teoria della sintesi cinematica, quello affrontato riguarda la generazione di traiettorie. In questo caso, ci si pone l'obiettivo di far passare un punto di un membro del meccanismo per determinati punti prefissati. Nel caso specifico, il meccanismo che si vuole ottenere deve far compiere alla griffa (punto P in figura 5.11) una traiettoria rettilinea orizzontale durante il moto di regolazione. Per semplificare il problema, non si richiede che il moto della biella del quadrilatero sia una funzione matematica del moto della manovella motrice, ovvero non si desidera che la biella si porti in opportuni punti della traiettoria per prefissati valori della coordinata libera. In questo caso, è sufficiente che la biella compia la traiettoria con sufficiente precisione per una non ben predeterminata rotazione della manovella motrice. Inoltre, non è neppure necessario che sia la biella a garantire la corretta orientazione della griffa lungo la traiettoria, per questo scopo è presente il doppio parallelogramma articolato, il cui dimensionamento, che ha come linea guida il contenimento degli

ingombri, è conseguente a quello della parte principale del meccanismo. A questo punto la questione riguarda quale metodo di sintesi adottare per risolvere il problema descritto. Esistono infatti due metodologie di sintesi:

- sintesi diretta mediante punti di precisione
- sintesi indiretta iterativa

Nei metodi di sintesi per punti di precisione viene imposto l'annullarsi dell'errore strutturale tra il parametro di moto assegnato e quello generato solo in corrispondenza dei punti di precisione lungo la traiettoria. Con questo metodo, risolvendo un sistema di equazioni, si ottengono direttamente le dimensioni del meccanismo che soddisfano alle specifiche di progetto. Per il caso specifico però non è necessario raggiungere determinate posizioni con assoluta precisione, ma è invece richiesto che l'intera traiettoria sia seguita con un sufficiente accuratezza. Questo aspetto non è garantito dalla metodologia di sintesi appena descritta: infatti essa permette di ottenere un meccanismo che riesce a raggiungere i punti di precisione con errore nullo, ma non permette di prevedere la traiettoria compiuta dal meccanismo tra un punto di precisione il successivo. Tuttavia, poiché la traiettoria obiettivo è molto semplice, se si impone un passaggio per punti di precisione ben distribuiti lungo la traiettoria e si richiede in aggiunta che il membro condotto li raggiunga sempre con la stessa orientazione, si può pensare che il risultato ottenibile sia soddisfacente lungo l'intera traiettoria. Questa è la metodologia seguita dalla University of California-Irvine nel risolvere il problema di sintesi per la progettazione dell'end-Effector per la cella di lavoro F-FAS.

Nei metodi di sintesi iterativa invece, eseguendo una serie di analisi e affinamenti successivi, si perviene ad una soluzione che soddisfa le specifiche di progetto entro una certa tolleranza prefissata. Perciò, partendo da una soluzione di primo tentativo, questa sarà in grado di far percorrere al punto estremo di biella (punto P in figura 5.11) una determinata traiettoria. Associando poi un indice alla differenza tra la traiettoria obiettivo e quella ottenuta, è possibile, mediante iterazioni successive, cercare dei valori dei parametri di sintesi che minimizzino tale indice e quindi l'errore strutturale del meccanismo. La bontà della soluzione finale e la velocità con cui essa è ottenuta dipendono in generale dalla soluzione di primo

tentativo, dalla definizione dell'indice, dall'algoritmo di minimizzazione e dai vincoli dimensionali imposti al meccanismo. Questa metodologia rappresenta una modalità classica per risolvere un problema di sintesi per meccanismi piani come quello ideato per l'End-Effector della cella di lavoro F-FAS ed è tale metodologia che stata sviluppata mediante la scrittura di un codice su piattaforma MatLab.

5.3.3 Programma di sintesi iterativa

La metodologia scelta per il proporzionamento del meccanismo necessita la scrittura di un programma per la soluzione del problema numerico che sta alla base della teoria della sintesi iterativa. Scopo di questa parte del progetto è stata quella di sviluppare un codice che permetta di calcolare velocemente una soluzione numerica, in accordo con le specifiche di progetto. Tuttavia, si è voluto che il codice sia strutturato in modo tale che possa risolvere qualsiasi problema di sintesi iterativa per generazione di traiettorie, indipendente dal caso specifico esaminato, qualsiasi meccanismo si intendesse studiare e qualsiasi fosse la traiettoria da richiedere ad un suo punto notevole.

Il classico funzionamento di un codice di sintesi iterativa, per generazione di traiettoria, prevede di fornire una soluzione di tentativo z_i , che all'inizio sarà una soluzione arbitraria di primo tentativo scelta opportunamente. Tale soluzione contiene le informazioni relative alle dimensioni dei membri, alla posizione delle cerniere a telaio e al range di variazione della coordinata libera q del meccanismo. Tutte queste informazioni possono essere contenute in un vettore, che rappresenta il dato di ingresso per quella parte di programma che svolge l'analisi cinematica diretta di posizione. A questo punto, è possibile conoscere la traiettoria percorsa dal punto notevole del meccanismo $f(q)$. Successivamente, conoscendo la traiettoria che si vuole ottenere $g(q)$, è possibile associare all'errore strutturale $e(q) = f(q) - g(q)$ un indice I . Se la soluzione di tentativo è sufficientemente buona, cioè è associata ad un indice I minore del valore limite preimpostato I_{lim} , essa rappresenta la soluzione finale, altrimenti è necessaria una nuova iterazione del ciclo per cercare una soluzione migliore. Come cercare la nuova soluzione dipende dall'algoritmo di ottimizzazione implementato per rendere minimo l'indice I e di conseguenza l'errore strutturale. Partendo da questa idea generale, le varie fasi

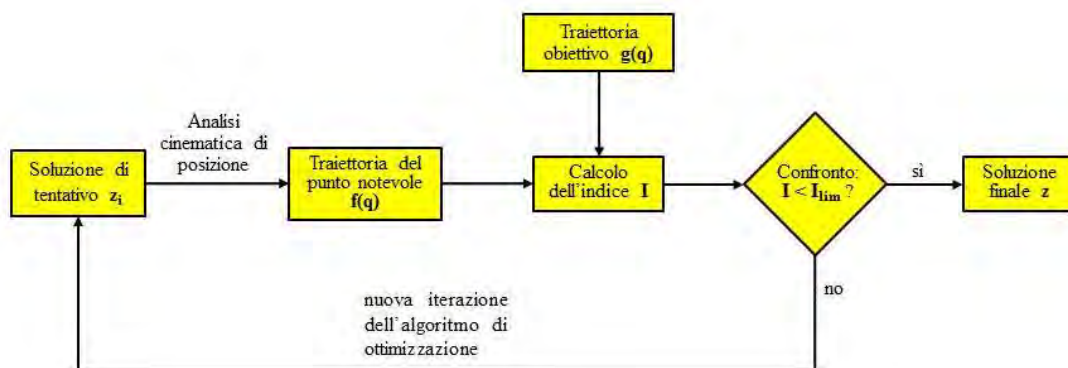


Figura 5.12: Classico schema per un codice di sintesi iterativa.

sono state implementate nel codice sviluppato, con alcuni elementi di specialità. Una prima osservazione va fatta per quanto concerne l'analisi cinematica diretta di posizione. Essa è una parte strettamente legata al meccanismo in studio, perciò deve essere ridefinita per ogni topologia analizzata. Poiché, come già detto, si è inteso scrivere un codice facile da riadattare, va precisato che l'analisi cinematica di posizione, svolta da una funzione richiamata nel programma principale, deve essere strutturata in modo tale da essere costruita con dei piccoli mattoncini, che siano sempre gli stessi, qualsiasi sia il meccanismo in studio. Si può quindi affermare che l'analisi cinematica affrontata esprimendo la congruenza mediante le equazioni di chiusura mal si presta a questa necessità, per questo motivo sono stati utilizzati i gruppi di Assur. Questa modalità di soluzione del problema cinematico diretto di posizione si giustifica per il fatto che, nella maggior parte dei casi di interesse pratico, si possono risolvere in successione gruppi di equazioni di chiusura, anziché l'intero sistema simultaneamente. In particolare, per la cinematica diretta di posizione e di velocità del meccanismo per l'End-Effector è bastato scrivere una function per l'analisi di posizione e velocità della diade di prima specie, per poi richiamarla quattro volte all'interno del file di analisi cinematica. Strutturando il programma in questo modo, se in futuro si dovesse cambiare il meccanismo, si potrà costruirlo con gli stessi mattoncini, usando le diadi già studiate, eventualmente combinandole con altre diadi o gruppi più complessi (come triadi, tetradi, ecc). In altre parole, cambiando meccanismo si deve cambiare la funzione di analisi cinematica, ma per scriverla non si partirà da zero, ma essa

deriverà dalla opportuna combinazione di gruppi di Assur. Va inoltre precisato che l'analisi cinematica con gruppi di Assur permette agevolmente di esplicitare il modo di assemblare il meccanismo ed esso può essere usato, in sede di sintesi, come parametro di progetto, aumentando di conseguenza la possibilità di trovare una soluzione migliore.

Altro aspetto importante è la definizione della traiettoria obiettivo, ossia la traiettoria che si vuole far percorrere al punto notevole del meccanismo, che nel caso in esame è rappresentato dal punto estremo della biella del quadrilatero (punto P in figura 5.13). Nel caso studiato la traiettoria è molto semplice e si è già spiegato il motivo che ha spinto a questa scelta. Tuttavia è necessario predisporre il programma perché possa ricevere in ingresso anche altre tipologie di traiettorie. In particolare durante le fasi di definizione dell'algoritmo di ottimizzazione e di studio dell'indice da associare all'errore strutturale, si è testato il codice fornendo in ingresso traiettorie più complesse, per poter verificare la bontà delle soluzioni ottenute. Per i valori degli ingombri entro cui contenere il meccanismo, una traiettoria sufficientemente regolare, risulta ben descritta con un numero di punti N pari a 100. Il numero di punti è un parametro molto importante poiché definisce il grado di discretizzazione della traiettoria e quindi i punti su cui valutare l'errore strutturale. Esso è specificabile all'inizio del programma. In realtà per definire la traiettoria si può specificare un numero di punti assai minore: ad esempio per la traiettoria rettilinea orizzontale si è specificato il punto iniziale, il punto intermedio e il punto finale del segmento, lo spazio tra questi tre punti viene poi riempito in automatico dal programma equi-spaziando gli altri 97 punti per interpolazione. Va specificato che le traiettorie specificabili sono del tipo $y = f(x)$, dove il valore dell'ordinata e dell'ascissa sono legati dalla definizione della funzione interpolante: si tratta di un polinomio cubico, curva che si è dimostrata adeguata per la maggior parte delle delle traiettorie definite con un numero di punti limitato. La modalità per specificare i punti di definizione della traiettoria può essere manuale, indicando all'interno del programma le singole coordinate, oppure mediante interfaccia grafica cliccando col mouse nei punti corrispondenti sull'area grafica. Uno degli aspetti più importanti della scrittura del codice di sintesi iterativa è la definizione dell'indice di ottimizzazione da associare all'errore strutturale. Infatti,

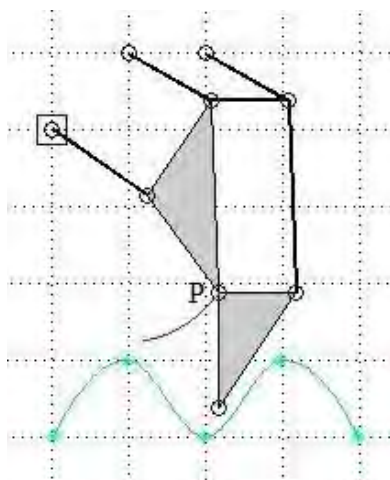


Figura 5.13: Definizione di una traiettoria obiettivo: curva verde.

si tratta di quantificare, con un valore numerico reale e positivo, lo scostamento della traiettoria percorsa dal punto notevole del meccanismo ottenuto, rispetto alla traiettoria obiettivo. In base a questa considerazione, si può pensare che tale indice possa essere rappresentato da una distanza tra funzioni. In uno spazio L^p , cioè lo spazio delle funzioni alla p -esima potenza sommabile, con $p \geq 1$ la distanza tra due funzioni distinte $f(x)$ e $g(x)$, a meno di equivalenza quasi ovunque, è definita come:

$$\left(\int |f(x) - g(x)|^p dx \right)^{1/p} \quad (5.1)$$

questa definizione si presta bene ad essere usata come indice nel codice di sintesi iterativa, poiché a differenza di altre definizioni per distanza tra funzioni, come ad esempio la distanza dell'estremo superiore, la 5.1 tiene conto di tutti i punti sui quali la funzione è definita e l'esponente, se opportunamente scelto, può amplificare adeguatamente e non eccessivamente il peso degli scostamenti maggiori. Infatti, per questo tipo di sintesi, si deve definire un indice che privilegi le soluzioni con un errore strutturale contenuto in un ampio intervallo di definizione, ammettendo comunque zone dove le traiettorie si discostano tra loro significativamente, piuttosto che prediligere una soluzione dove le due traiettorie rimangono sufficientemente distanti ovunque. Alle luce delle prove condotte con traiettorie ad andamento parabolico, iperbolico, sinusoidale, cosinusoidale e anche irregolare, l'indice I si

dimostra dare dei buoni risultati per $p = 3$. La scelta di formulare l'indice di ottimizzazione sulla definizione di distanza delle funzioni cubo sommabili L^3 richiede di tenere in considerazione che la traiettoria obiettivo e la traiettoria effettivamente percorsa dal punto notevole del meccanismo sono discretizzate su un numero limitato punti. Perciò la formulazione in questo caso diventa:

$$\left(\sum_{i=1}^N |f(x_i) - g(x_i)|^3 \right)^{1/3} \quad (5.2)$$

Si deve porre particolare attenzione sul fatto che la traiettoria ottenuta potrebbe non avere lo stesso intervallo di definizione nelle ascisse della traiettoria obiettivo, mentre in entrambi i casi l'intervallo di definizione è il medesimo se lo si concepisce sulla coordinata libera. In questo modo perciò una traiettoria piana è descritta da due leggi in funzione della coordinata libera, una funzione descrive l'ascissa per ogni valore della coordinata libera $X(q)$, mentre l'altra funzione $Y(q)$ descrive l'ordinata per ogni valore della coordinata libera. Anche in questo caso si tratterà di traiettorie discretizzate su N punti, quindi la traiettoria obiettivo $g(q)$ sarà descritta dalle funzioni $X_{ob}(q_i)$ e $Y_{ob}(q_i)$, mentre per la traiettoria percorsa dal punto notevole del meccanismo $f(q)$ sarà rappresentata da $X_{ot}(q_i)$ e $Y_{ot}(q_i)$. Allora in base alla definizione data in 5.2, possiamo scrivere due componenti dell'indice, ovvero:

$$I_x = \left(\sum_{i=1}^{100} |X_{ot}(q_i) - X_{ob}(q_i)|^3 \right)^{1/3} \quad (5.3)$$

$$I_y = \left(\sum_{i=1}^{100} |Y_{ot}(q_i) - Y_{ob}(q_i)|^3 \right)^{1/3} \quad (5.4)$$

Quindi l'indice I_t , che descrive l'errore strutturale lungo la traiettoria, risulta:

$$I_t = \frac{I_x + I_y}{2} \quad (5.5)$$

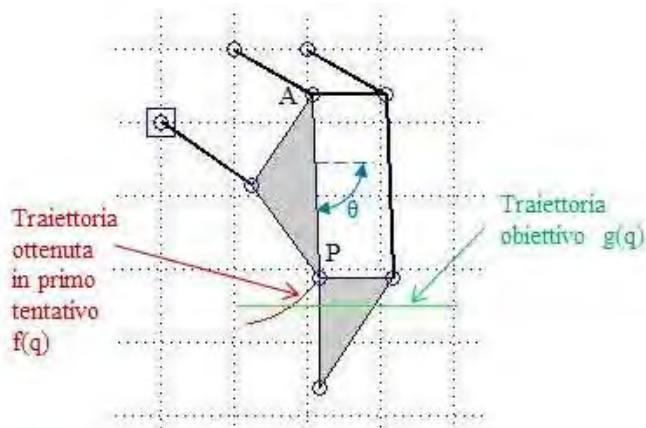


Figura 5.14: Significato della nomenclatura che compare nella formazione dell'indice di minimizzazione.

A questo punto va tenuta in considerazione un'ulteriore specifica progettuale, ossia la richiesta che la componente verticale di velocità delle griffe sia la più contenuta possibile durante il moto di serraggio. Per far fronte a questa esigenza, si può imporre che, nella configurazione di cilindro pneumatico attuato, la congiungente tra la cerniera mobile della manovella motrice (punto A in figura 5.14) e l'estremità della biella del quadrilatero (punto P in figura 5.14) si mantenga il più possibile con una orientazione tale da costituire un angolo θ con l'orizzontale, pari a 90° lungo l'intera traiettoria di regolazione. Anche questo aspetto deve essere descritto nell'indice di ottimizzazione, perciò il problema di generazione di traiettoria, in questo modo, si evolve ad una forma leggermente più complessa, ovvero in un problema di guida di un corpo rigido. Nel caso specifico, si vuole che la biella del quadrilatero passi con il suo punto estremo per la traiettoria obiettivo, assumendo una determinata orientazione. Anche in questo caso, avremo un'orientazione obiettivo $\theta_{ob}(q_i)$ rappresentata da una funzione discretizzata su N punti costantemente pari a 90° e un'orientazione realmente assunta dalla biella del meccanismo $\theta_{ot}(q_i)$. Allora, ancora una volta in accordo con la 5.2, possiamo scrivere:

$$I_\theta = \left(\sum_{i=1}^{100} |\theta_{ot}(q_i) - \theta_{ob}(q_i)|^3 \right)^{1/3} \quad (5.6)$$

Questa componente di indice deve essere inserita nell'indice globale, con un opportuno peso \wp a causa del suo diverso significato. Il valore del peso \wp è stato scelto in modo tale che, in presenza di un errore strutturale nullo sulla traiettoria da percorrere, una deviazione costante di 3° dell'orientazione della biella, lungo l'intero moto di regolazione, fornisca un valore di indice pari a 1. In base a questa scelta il valore del peso \wp risulta:

$$\wp = \left(\left(\sum_{i=1}^{100} 3^3 \right)^{1/3} \right)^{-1} = 0,0718 \quad (5.7)$$

Infine l'indice I utilizzato nel codice di sintesi iterativa risulta:

$$I = \frac{I_t + \wp I_\theta}{2} \quad (5.8)$$

A questo punto si può descrivere il cuore del programma di sintesi iterativa, cioè l'algoritmo di ottimizzazione. Va precisato, che in base alla definizione data in 5.8, una soluzione per il problema di sintesi sarà tanto più adeguata alle specifiche di progetto, quanto più basso è il valore dell'indice ad essa associato. Quindi l'algoritmo di ottimizzazione ha il compito di trovare quel meccanismo a cui è associato il minor valore di indice. Per questo motivo, quando il codice individua un meccanismo non assemblabile, a prescindere dal valore di indice che sarebbe attribuibile in base alla 5.8, viene associato al meccanismo un valore dell'indice molto più elevato. In questo modo i meccanismi non assemblabili sono scartati. Ora, il problema di minimizzazione, che sta alla base della sintesi iterativa, può essere visto nel modo seguente: ogni meccanismo della topologia scelta è completamente descritto da 15 parametri, che descrivono il range della coordinata libera, la posizione delle cerniere a telaio, il modo di assemblare il quadrilatero e le dimensioni di ciascun membro del meccanismo. Uno specifico meccanismo quindi è rappresentato da ben determinati valori dei 15 parametri ed ad esso è associato univocamente un valore dell'indice di ottimizzazione. Esiste perciò una funzione \mathcal{F} in 15 variabili, che associa ad ogni meccanismo della topologia scelta un valore dell'indice I . Scopo dell'algoritmo di ottimizzazione è di trovare il punto di minimo della funzione \mathcal{F} . L' algoritmo di minimizzazione è stato



Figura 5.15: Significato della funzione \mathcal{F} da minimizzare.

ideato utilizzando delle funzioni proprie della piattaforma MatLab. Al fine di individuare il minimo di una funzione si può pensare di utilizzare il comando MatLab denominato *fminsearch*, esso è utilizzabile per problemi di minimizzazione multivariabile non vincolata. Per utilizzare questo tipo di comando è necessario specificare la funzione da minimizzare e una soluzione di partenza, quindi nel caso specifico un vettore contenente i valori dei 15 parametri che descrivono il meccanismo. Questo comando MatLab utilizza l'algoritmo denominato Nelder-Mead Simplex Method, che è uno dei più noti e utilizzati metodi di ricerca diretta. Questo comando tuttavia si è dimostrato subito inadeguato per essere introdotto nel codice sviluppato, in quanto un metodo di minimizzazione non vincolata non pone dei limiti ai valori che possono assumere i singoli parametri e per questo motivo molto spesso si ottengono come soluzioni dei meccanismi dalle dimensioni smisurate. Un altro comando MatLab di minimizzazione multivariabile non vincolata è rappresentato da *fminunc* il quale, oltre a presentare il problema di non assoggettare i parametri del meccanismo a dei limiti, si dimostra adatto più propriamente a trovare minimi locali e spesso quindi la soluzione finale individuata non è soddisfacente. Per la soluzione di problemi di minimizzazione multivariabile vincolata MatLab mette a disposizione il comando *fmincon* ed è quello che di fatto è stato utilizzato nel codice sviluppato. Anche in questo caso, il comando può essere utilizzato specificando la funzione da minimizzare e una soluzione di partenza, inoltre esso permette di definire i limiti per i valori che possono assumere i parametri del meccanismo, in questo modo le soluzioni individuate risulteranno sempre sufficientemente compatte. Il comando *fmincon* ammette diverse modalità nello specificare i vincoli, tuttavia quello scelto per il codice di sintesi riguarda la definizione di un valore minimo e di un valore massimo per ogni parametro che descrive il meccanismo. In questo modo va ricercato il valore minimo che la funzione \mathcal{F} assume all'interno di questo sottodominio, che può non

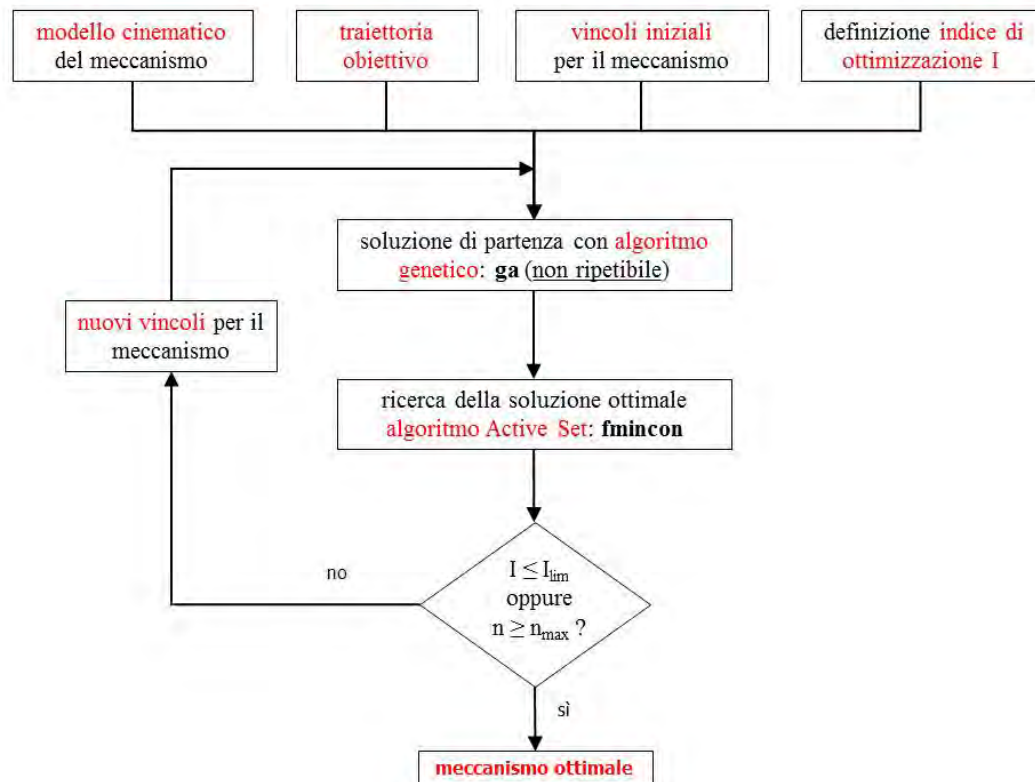


Figura 5.16: Schema del codice di sintesi iterativa.

coincidere con il valore di minimo assoluto, perciò se i limiti sono eccessivamente stringenti, la soluzione trovata potrebbe presentare un indice di ottimizzazione I relativamente elevato e quindi essere inadeguata per le specifiche di progetto richieste. L'algoritmo usato da questo comando MatLab è di default l'algoritmo Active Set, ma possono essere specificati in alternativa gli algoritmi Interior Point oppure Trust Region Reflective. Dalle prove condotte nessuno dei tre algoritmi si è dimostrato particolarmente veloce o in grado di individuare un meccanismo particolarmente migliore rispetto a quelli individuati dagli altri due. In realtà, qualsiasi algoritmo si utilizzi, la soluzione finale è fortemente influenzata dalla soluzione iniziale di primo tentativo scelta. Questo aspetto è un problema non trascurabile, per tale motivo si è reso necessario introdurre a monte del comando *fmincon* un altro comando, in grado di individuare una soluzione di partenza sufficientemente buona. Questo aspetto è stato risolto utilizzando il comando *ga*, che permette la soluzione di problemi di minimizzazione multivariabile vincolata, utilizzando un

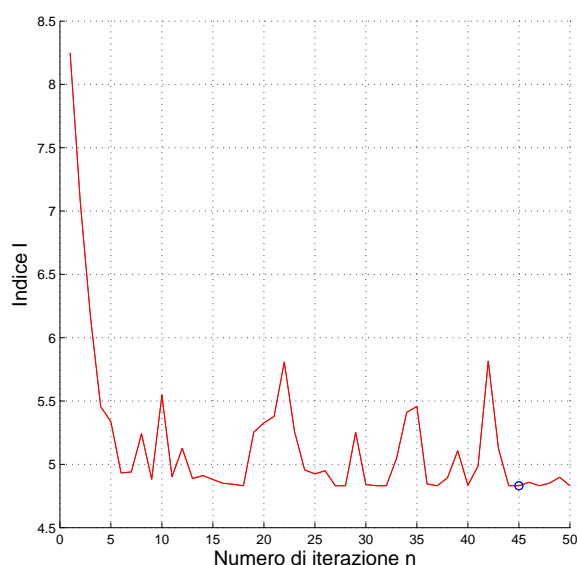


Figura 5.17: Andamento del valore dell'indice durante la ricerca del meccanismo ottimale mediante codice di sintesi iterativa.

algoritmo genetico, quindi senza specificare una soluzione iniziale da cui partire. Va specificato che la soluzione individuata utilizzando il solo comando *ga* non si è dimostrata sufficientemente buona per essere intesa come soluzione finale, ma essa può essere ulteriormente affinata con il comando *fmincon*, consentendo così di ottenere una soluzione finale che si è dimostrata adeguata agli scopi per cui era stato ideato questo codice di sintesi. Una breve descrizione della modalità di funzionamento degli algoritmi Active Set e genetico, propri rispettivamente dei comandi *fmincon* e *ga*, può essere trovata in appendice. Senza entrare nel dettaglio quindi dell'algoritmo genetico, è però necessario evidenziare che esso non è ripetibile. Infatti partendo dai medesimi vincoli per i parametri del meccanismo, la popolazione iniziale, di potenziali soluzioni, generata rispettando questi vincoli, applicando il principio della sopravvivenza del migliore, evolve verso una soluzione che di volta in volta può essere diversa, se l'algoritmo viene ripetuto. Grazie a questa proprietà dell'algoritmo genetico è possibile ripetere la sequenza di comandi *ga* e *fmincon*, finché la soluzione individuata non ha un indice sufficientemente basso. Se i vincoli sono eccessivamente stringenti, da non permettere di individuare un meccanismo a cui corrisponde un valore di indice sufficientemente contenuto, il

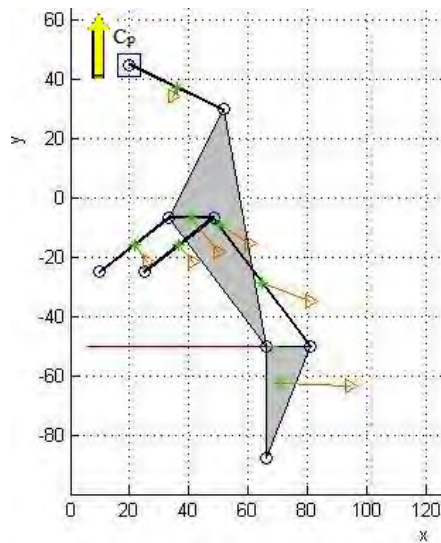


Figura 5.18: Soluzione con attuazione del pattino in direzione verticale.

codice terminerà la ricerca della soluzione quando raggiunge un numero massimo di iterazioni preimpostato n_{max} . Prima di presentare le caratteristiche della soluzione trovata, va ulteriormente specificato che i vincoli iniziali da fornire al codice devono essere sufficientemente ampi da individuare una buona soluzione, tuttavia fornendo dei vincoli eccessivamente ampi la soluzione finale trovata potrebbe comunque essere inadeguata, per questo motivo all'inizio della prima iterazione si forniscono all'algoritmo genetico dei vincoli ampi, ma una volta individuata una prima soluzione, si definiscono dei nuovi vincoli, per la successiva iterazione, definiti sulla soluzione appena trovata. Questa modalità di definizione di nuovi vincoli, calibrati sulla soluzione precedente, si ripete fino a fine del ciclo.

Utilizzando il codice di sintesi iterativa sviluppato, si sono individuate due tipologie di soluzione per il meccanismo presente nell'End-Effector:

- meccanismo con attuazione del pattino in direzione verticale
- meccanismo con attuazione del pattino in direzione orizzontale

Il meccanismo con attuazione verticale del pattino, figura 5.18, è quello che si è deciso di sviluppare nella successiva fase di progettazione esecutiva, in quanto l'attuatore pneumatico, idoneo per questa soluzione, risulta più economico e la sua disposizione nell'End-effector fa assumere alla soluzione finale maggior

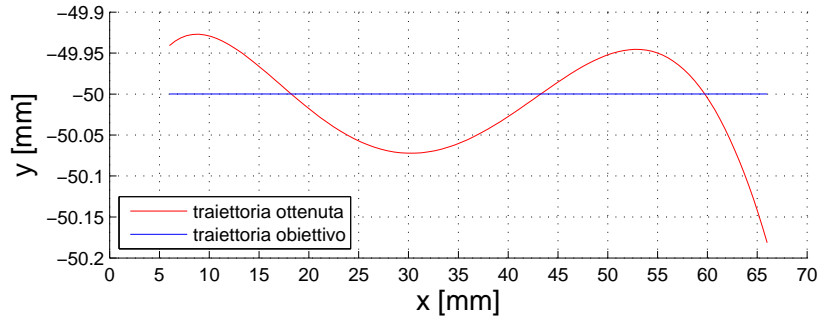
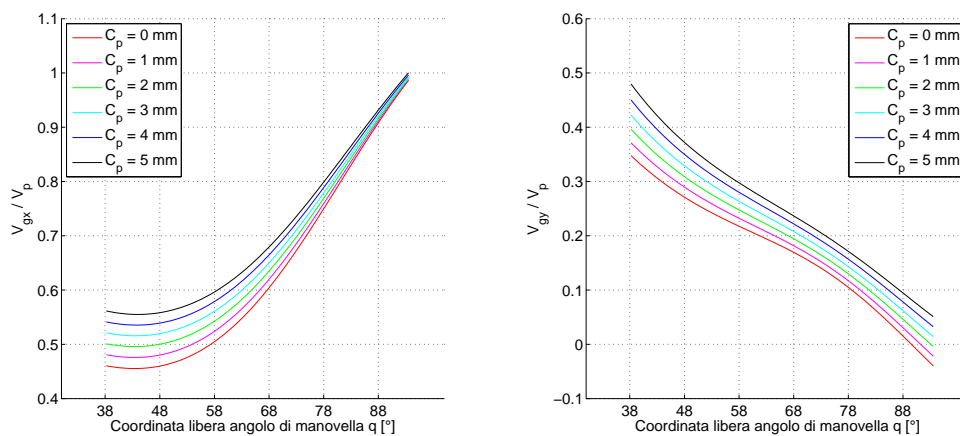


Figura 5.19: Confronto tra la traiettoria risultante e quella obiettivo.

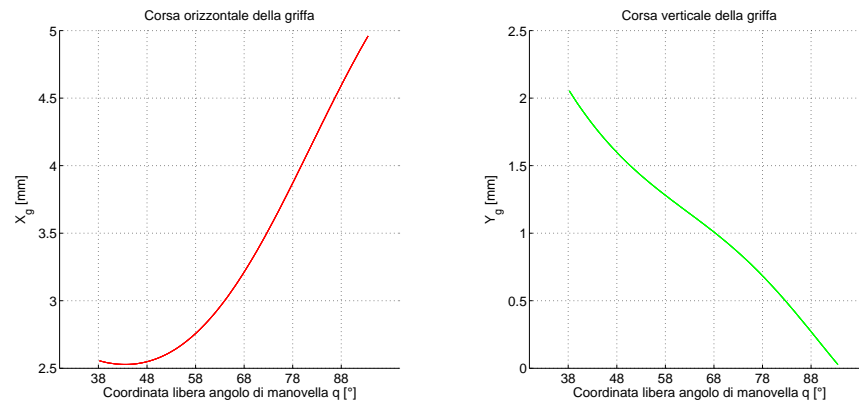
compattezza. Per questa soluzione, la traiettoria percorsa dal punto notevole (figura 5.19) si avvicina molto alla traiettoria obiettivo, presentando un errore strutturale leggermente maggiore solo nella parte terminale. Inoltre, la biella del meccanismo si mantiene orientata opportunamente lungo tutta la traiettoria del moto di regolazione, permettendo così di contenere la componente verticale della velocità della griffa nel moto di serraggio. Infatti, osservando i grafici dei rapporti tra la velocità della griffa e la velocità del pattino (figura 5.20), si può notare che la componente orizzontale della velocità rimane sempre dello stesso segno per le varie posizioni del pattino durante il moto di serraggio, mentre la componente verticale mantiene valori contenuti. Se si osserva la traiettoria di serraggio, figura



(a) Rapporto tra la componente orizzontale di velocità della griffa V_{gx} e la velocità pattino V_p , lungo la traiettoria obiettivo.

(b) Rapporto tra la componente verticale di velocità della griffa V_{gy} e la velocità pattino V_p , lungo la traiettoria obiettivo.

Figura 5.20: Rapporti di velocità griffa-pattino, per varie posizioni del pattino C_p .



(a) *Componente orizzontale del movimento della griffa nel moto di serraggio.* (b) *Componente verticale del movimento della griffa nel moto di serraggio.*

Figura 5.21

5.21, si può notare che essa si mantiene sufficientemente regolare in x e contenuta nella componente y , per tutte le posizioni lungo la traiettoria di regolazione. Al meccanismo con attuazione del pattino in direzione verticale è associato un indice di valore $I = 4,8307$. Tale soluzione è stata individuata dal codice in 326 s con un numero di iterazioni n pari a 50.

Il meccanismo con attuazione orizzontale del pattino (figura 5.22), riportato solo per completezza della trattazione, segue con buona accuratezza la traiettoria obiettivo. Anche in questo caso, la soluzione individuata è caratterizzata da valori della componente orizzontale della velocità sempre dello stesso segno, per le varie posizioni del pattino durante il moto di serraggio, inoltre presenta dei valori della componente verticale contenuti. Infine la traiettoria di serraggio si dimostra sufficientemente regolare in x e contenuta nella componente y . Al meccanismo con attuazione del pattino in direzione orizzontale è associato un indice di valore $I = 4,8767$, tale soluzione è stata individuata dal codice in 109 s con un numero di iterazioni n pari a 30.

5.3.4 Progettazione esecutiva

La fase di progettazione esecutiva consiste nel definire completamente, anche avvalendosi dell'utilizzo di strumenti CAD o CAE, tutti i componenti che costituiscono

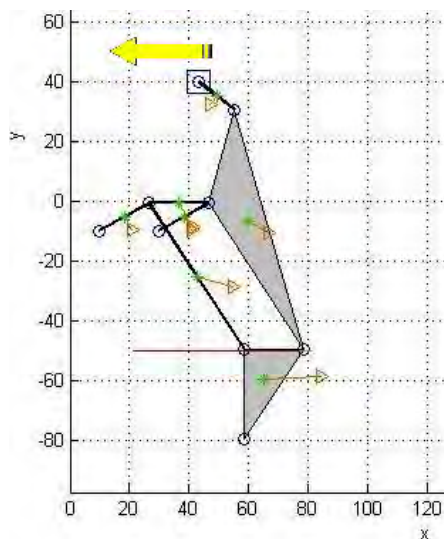


Figura 5.22: Soluzione con attuazione del pattino in direzione orizzontale.

l'End-Effector, dimensionandoli opportunamente in base a esigenze funzionali, di resistenza meccanica e di assemblaggio dell'organo terminale, seguendo quindi un approccio tipico di Concurrent Engineering.

In questa fase la prima operazione da fare è il dimensionamento e la scelta degli attuatori. In particolare, per quanto riguarda l'attuatore pneumatico, utilizzato per il movimento di grasping delle griffe, si è scelto un cilindro della SMC compatto, a doppio effetto, con alesaggio $\emptyset 16 \text{ mm}$ e corsa 5 mm . La scelta di un cilindro a doppio effetto, invece che a semplice effetto, è stata fatta per ragioni di sicurezza, prevedendo di comandarlo con un circuito del tipo indicato in figura 5.1. Osservando l'andamento del rapporto tra la componente orizzontale di velocità della griffa e la velocità del pattino, per varie posizioni della corsa di quest'ultimo e ipotizzando di alimentare il cilindro ad una pressione di 8 bar, si può calcolare la forza di serraggio delle griffe. Il valore massimo di tale forza corrisponde a 240 N per ciascuna griffa, in corrispondenza dell'apertura massima del meccanismo e quindi per i componenti da manipolare di maggiori dimensioni.

Per quanto riguarda l'attuatore elettrico, poiché è stato previsto un controllo ad anello aperto, l'attuatore più indicato in questo caso è senza dubbio il motore passo-passo. Il dimensionamento della coppia da richiedere al motore è stata calcolata mediante il Principio di D'Alembert, ipotizzando di dover movimentare le griffe mentre il robot sposta l'End-Effector con un accelerazione massima di

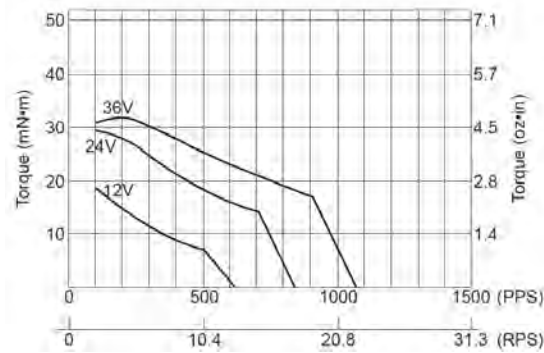


Figura 5.23: Diagramma della coppia per il motore passo-passo NipponPulse scelto.

80 m/s^2 e ipotizzando che tale spostamento sia effettuato in direzione tale che le forze di inerzia si sommino alle forze gravitazionali. Una volta individuata la coppia necessaria, è stato possibile scegliere un motoriduttore passo-passo bipolare della casa NipponPulse, con tensione nominale di alimentazione pari a 12 V e con rapporto di riduzione 1:125. Grazie all'irreversibilità del riduttore scelto, una volta che il motore ha portato le griffe ad una certa quota di apertura, queste non potranno più spostarsi lungo la traiettoria di regolazione, anche se le fasi del motore sono diseccitate.

Una volta individuati gli attuatori e tenendo presente il risultato ottenuto con il procedimento di sintesi, relativo al proporzionamento del meccanismo con attuazione del pattino in direzione verticale, si è potuto disegnare l'End-Effector mediante un software CAD tridimensionale. La definizione del telaio, ovvero di quella struttura che ha il compito di sorreggere gli attuatori, la trasmissione e l'intero meccanismo, è stata ideata tenendo presente la necessità di assemblare agevolmente l'organo terminale. Il telaio è composto, tra l'altro da una flangia per il montaggio dell'End-Effector sul robot. In questa fase di disegno tridimensionale, si è posta particolare attenzione agli ingombri che caratterizzano l'organo terminale, man mano che esso viene definito, riducendoli dove possibile. Una volta progettato il telaio e disegnati gli attuatori, è stato possibile definire il meccanismo, ovviamente rispettando scrupolosamente le informazioni ottenute dalla sintesi. In particolare, per ottenere una soluzione il più compatta possibile si è scelto di progettare gli accoppiamenti rotoidali, dove concorrono tre membri, a piani sfalsati, mentre le coppie rotoidali sono state ideate prevedendo che il perno presente, sia

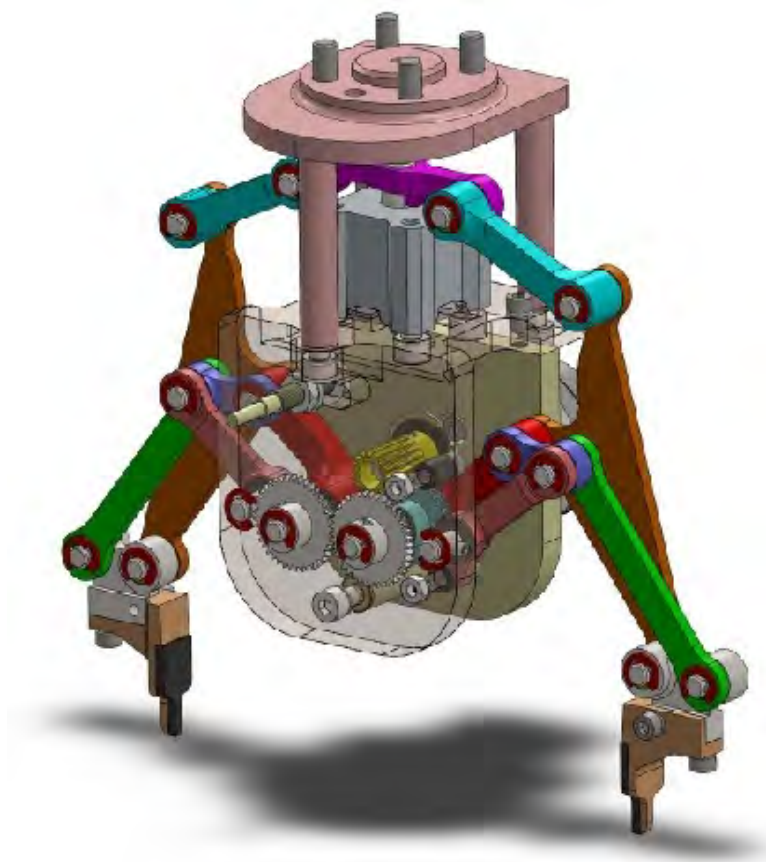


Figura 5.24: Progetto CAD 3D dell'End-Effector innovativo.

supportato da una o più boccia senza olio multistrato, in abbinamento con una boccia in plastica con rasamento, la quale permette un accoppiamento tra i membri, prevenendone l'usura per sfregamento. Per quanto riguarda le griffe, esse sono state progettate in modo tale che la superficie che va a contatto con i componenti da manipolare si restringa verso la parte inferiore, così che questa estremità sia adatta a componenti di modeste dimensioni, mentre la parte superiore sia destinata alla manipolazione di pezzi con dimensioni maggiori. La superficie di grasping inoltre è ricoperta con una gomma poliuretana a base di estere, in modo che essa possa adattarsi alla forma geometrica dei vari componenti da manipolare. Un ulteriore aspetto, tenuto in considerazione nel definire la posizione delle griffe, è stato quello di allineare il loro piano medio verticale con l'asse robot, in modo da prevenire errori di calibrazione dell'utensile. L'End-Effector definito è simmetrico e perciò non risulta particolarmente complesso trasmettere il moto dal cilindro

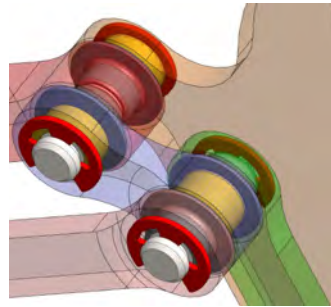


Figura 5.25: Particolare dell'idea per la realizzazione degli accoppiamenti rotoidali a piani sfalsati.

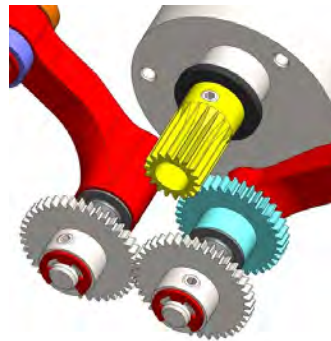


Figura 5.26: Particolare della trasmissione del moto dal motoriduttore passo-passo al meccanismo.

pneumatico a ciascuno dei due meccanismi speculari che movimentano le griffe. Mentre, per trasmettere il moto dal motoriduttore passo-passo al meccanismo di destra, è necessaria la presenza di una coppia di ruote dentate, la quale è stata proporzionata in base alla coppia da trasmettere, scegliendo un rapporto di trasmissione 1 : 2 in modo da ridurre ulteriormente il carico a cui è soggetto il motore. Per quanto riguarda il meccanismo di sinistra invece, esso riceve il moto da quello di destra ancora una volta da una coppia di ruote dentate, questa volta con rapporto di trasmissione 1 : 1, in questo modo è possibile ottenere il movimento simmetrico delle griffe rispetto all'asse di simmetria dell'End-Effector. Grazie al software CAD tridimensionale utilizzato è stata verificata la resistenza meccanica agli elementi finiti dei componenti più sollecitati, ovvero dell'albero motore, della manovella motrice e di un elemento del parallelogramma.

La mancanza di un sensore di posizione non permette di conoscere la posizione

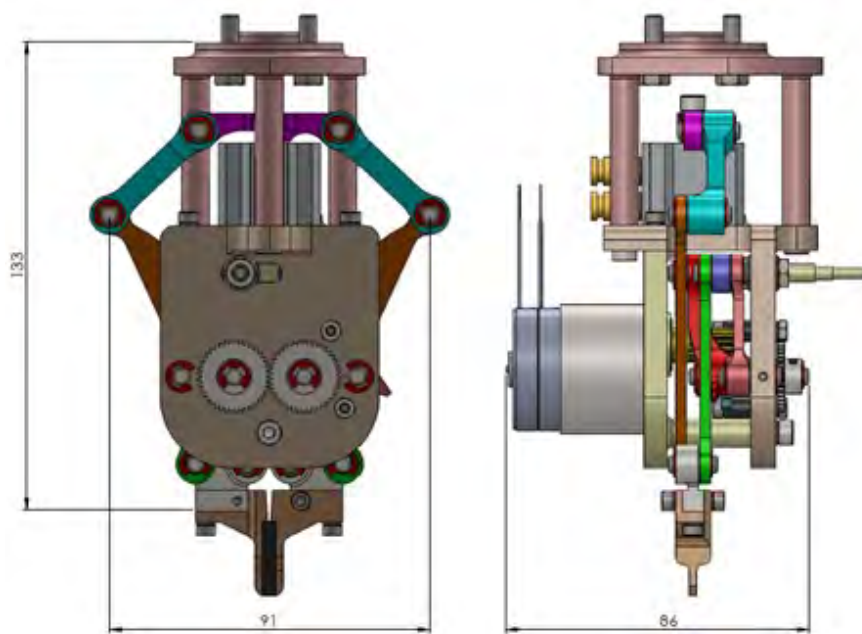


Figura 5.27: Ingombri dell'End-Effector progettato per la cella F-FAS.

delle griffe appena la cella robotizzata viene avviata, perciò è stata prevista la presenza di sensore induttivo, che emette un segnale quando le griffe raggiungono la posizione di minima apertura lungo la traiettoria di regolazione. In questo modo, appena si avvierà la cella, si effettuerà la calibrazione dell'apertura dell'organo terminale, comandando la chiusura delle griffe fino a che il sensore induttivo non da il segnale di posizione raggiunta, da quel momento in poi si conoscerà il grado di apertura delle griffe.

5.3.5 La soluzione alternativa proposta dalla University of California-Irvine

Durante il periodo di formazione dell'autore presso la University of California-Irvine, il gruppo di ricerca in Meccanica Applicata alle Macchine guidato dal prof. J. M. Mc Carthy ha deciso di sviluppare parallelamente un'ulteriore soluzione per l'End-Effector della cella di lavoro F-FAS, avvalendosi di un software di sintesi sviluppato su piattaforma MATEMATICA, per esalateri della famiglia WATT I. In questo caso, l'approccio al problema è diverso da quello precedentemente descritto, pur restando identiche le specifiche di progetto. Anche in questo circostanza,



Figura 5.28: Topologia studiata dalla University of California-Irvine.

si è previsto di utilizzare un attuatore pneumatico per effettuare il movimento di serraggio delle griffe, infatti una delle cerniere dell'esalatero, che si dovrebbe trovare a telaio, viene posta su un pattino dotato di moto orizzontale. Il moto di regolazione invece viene ottenuto muovendo la manovella motrice dell'esalatero. Il software sviluppato ad Irvine permette di risolvere un problema di sintesi cinematica dell'esalatero Watt I per punti di precisione. Quindi, con tale strumento è possibile proporzionare l'esalatero affinché, a seguito del movimento della manovella motrice, il membro che è stato scelto come griffa possa seguire una traiettoria rettilinea orizzontale, per il moto di regolazione. In particolare, per questo tipo di software è necessario specificare 5 punti di precisione, per i quali far passare un punto notevole del membro griffa, inoltre va definita l'orientazione che questo membro deve assumere quando passerà per i punti di precisione specificati. Se i 5 punti di precisione sono ben distribuiti lungo la traiettoria, e poiché l'orientazione della griffa deve rimanere sempre la stessa, la soluzione trovata in effetti permette di seguire bene la traiettoria obiettivo, anche se in generale il metodo di sintesi per punti di precisione garantisce solamente un errore strutturale nullo in corrispondenza dei punti di precisione stessi, ma nulla si può prevedere sul percorso seguito dal meccanismo tra un punto di precisione e il successivo. Il software di sintesi per punti di precisione si interfaccia con il software CAD tridimensionale SolidWorks. Le specifiche iniziali, relative alle coordinate dei punti e l'orientazione del membro scelto come griffa, vengono specificati disegnando con

il software tridimensionale. A questo punto, le informazioni vengono fornite al codice in linguaggio MATEMATICA, che risolve le equazioni per individuare le soluzioni al problema. Il metodo di sintesi diretto per punti di precisione utilizza una rappresentazione nel piano complesso, per la quale, in un meccanismo piano, la generica asta di lunghezza a ed inclinata di un angolo α sull'asse reale può rappresentarsi mediante un vettore complesso del tipo:

$$z = a \cdot e^{i\alpha} \quad (5.9)$$

Una generica rotazione δ_j dalla configurazione iniziale, alla configurazione finale j -esima, può essere semplicemente ottenuta attraverso l'operatore rotazionale $e^{i\delta_j}$:

$$z_j = a \cdot e^{i(\alpha+\delta_j)} = z \cdot e^{i\delta_j} \quad (5.10)$$

Un'asta non può ruotare in modo del tutto arbitrario, poiché soggetta ai vincoli cinematici dei membri a cui è collegata; tali vincoli si esprimono mediante equazioni vettoriali dette equazioni di chiusura. Per descrivere il meccanismo nella generica posizione j -esima, si ricorre alle equazioni di congruenza degli spostamenti, che possono ottenersi semplicemente sottraendo alle equazioni di chiusura nella posizione j -esima le equazioni di chiusura nella posizione iniziale. Nel caso di un generico vettore si ottiene:

$$z - z_j = (e^{i\delta_j} - 1) \cdot z \quad (5.11)$$

dove z indica il vettore nella posizione iniziale e z_j il vettore nella posizione j -esima. Dopo tale sottrazione, nelle equazioni di chiusura rimangono solo i termini di spostamento. Nel caso di 5 punti di precisione si individuano 4 spostamenti del meccanismo e di conseguenza il valore del pedice j andrà da 0 a 4. Il codice sviluppato alla University of California-Irvine, risolvendo le equazioni per il problema di guida di un corpo rigido senza correlazione con il movente, individua alcune soluzioni che possono essere visualizzate nel software CAD tridimensionale. Le soluzioni trovate sono poi valutate dal progettista, nel caso specifico scegliendo quella che segue con maggior accuratezza una traiettoria rettilinea orizzontale tra i punti di precisione. Poiché con l'utilizzo di tale software non è possibile fornire dei vincoli dimensionali al meccanismo, la soluzione ottenibile non risulta

particolarmente compatta. Inoltre, anche se la traiettoria rettilinea risulta seguita con una certa precisione e mantenendo la griffa opportunamente orientata durante il moto di regolazione, si verifica che, muovendo il pattino, la griffa intraprende una traiettoria per il moto di serraggio caratterizzata da una componente verticale della velocità non trascurabile. Va infine precisato, che l'attuatore pneumatico scelto in fase di progettazione esecutiva in questo caso è una pinza a griffe parallele, la quale ha un costo e degli ingombri ben maggiori rispetto al cilindro pneumatico compatto a corsa breve scelto nella soluzione precedentemente descritta.

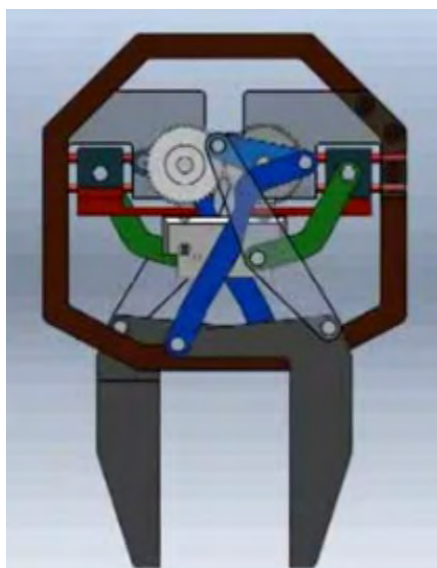


Figura 5.29: Soluzione di End-Effector per cella F-FAS proposta dalla University of California-Irvine.

5.4 Il prototipo funzionale

La realizzazione del prototipo ha lo scopo di verificare la funzionalità dell'End-Effector progettato, testando il comportamento del meccanismo reale nel seguire la traiettoria obiettivo e nel permettere la manipolazione di componenti di diverse dimensioni. Infatti, anche se in fase di progettazione si è cercato di ideare un organo terminale che rispetti scrupolosamente le specifiche di progetto, il suo comportamento effettivo può rivelarsi difforme, in quando si tratta di un dispositivo costruito con metodologie che non sono completamente estranee ad errori di

assemblaggio e imprecisioni nella realizzazione dei componenti.

La costruzione di tutte le parti non commerciali di cui il prototipo è costituito è stata realizzata mediante tecnica di prototipazione rapida FDM (fused deposition modelling), dove il materiale utilizzato è un particolare ABS. Questa tecnologia lavora su un principio additivo, rilasciando il materiale su strati. Il filamento di ABS è srotolato da una bobina che fornisce il materiale da un ugello di estrusione da cui si può avviare e fermare il flusso. L'ugello è riscaldato per poter sciogliere il materiale e può essere spostato in direzione orizzontale, mentre gli spostamenti verticali sono realizzati abbassando la base su cui poggia l'oggetto in costruzione, di una quota pari allo strato di materiale da depositare. Inoltre, nella testa di estrusione è presente un secondo ugello per l'estrusione di un filamento costituito da una particolare resina, che serve per riempire i vuoti dovuti alla particolare geometria dell'oggetto e quindi funge da sostegno al materiale di costruzione. Una volta realizzato il modello, questa resina viene rimossa lasciandolo a bagno in una soluzione a base d'acqua a 70 °C. Questa tecnologia permette di realizzare, con sufficiente accuratezza e velocità, oggetti caratterizzati da una geometria anche molto complessa. Tuttavia nella fase di progettazione esecutiva dell'End-Effector, i componenti sono stati ideati per poter essere realizzati in futuro alle macchine utensili, senza dover operare pesanti revisioni del progetto. L'ABS utilizzato in prototipazione è caratterizzato da una buona resistenza e rigidità ed inoltre permette di eseguire sui componenti operazioni manuali di maschiatura e alesatura, per predisporli all'accoppiamento con componenti commerciali.

Il costo totale di realizzazione delle parti in ABS è stimata in circa 200 Euro, questa voce comprende il costo del materiale, il costo di utilizzo della macchina di prototipazione rapida, il tempo per eseguire le lavorazioni manuali di aggiustaggio e di assemblaggio. Sommando a questa voce il costo totale dei componenti commerciali acquistati, pari a 360 Euro, il costo finale del prototipo realizzato risulta di 560 Euro. Tuttavia, passando ad una costruzione in piccola o media serie del dispositivo, venendo a diminuire il costo dei singoli componenti e l'incidenza delle spese di spedizione, voce risultata tutt'altro che trascurabile, si può pensare di abbattere il costo finale del 40%, permettendo di realizzare l'End-Effector a circa 336 Euro, valore che, se confrontato con i prezzi dei comuni gripper pneumatici,



Figura 5.30: Alcune foto del prototipo di End-Effector realizzato, dove è possibile notare tre gradi di apertura della corsa di regolazione.

risulta senza dubbio competitivo.

Al fine di poter eseguire le prime prove di movimentazione del meccanismo, si è realizzata una scheda elettronica che funge da driver per il motore passo-passo. Il disegno della scheda per poter impressionare il circuito sulla base di vetronite è stato realizzato con il software Eagle 6.3.0. In questo circuito elettronico molto semplice è presente l'integrato L298, per realizzare il ponte ad H di transistor, permettendo quindi di eccitare opportunamente le due fasi del motore passo-passo. Gli ingressi digitali al driver così costruito sono forniti dal programma di comando dell'End-Effector, realizzato su piattaforma MatLab, a mezzo della scheda NI USB 6009, che permette al computer di comunicare con il driver. Le caratteristiche tecniche del prototipo realizzato soddisfano le specifiche di progetto. Dalla lettura della tabella 5.1 sottostante si può verificare che la massa e il momento d'inerzia del dispositivo hanno valori contenuti e comunque molto inferiori a quelli massimi consentiti per il montaggio sul robot antropomorfo Adept Viper s650. Dalle prime prove sperimentali, si è verificato che, durante il moto di regolazione, la griffa segue con accuratezza la traiettoria obiettivo, permettendo di manipolare componenti con dimensione di presa pari a 120 mm. Molto veloce risulta anche l'attuazione dei movimenti, il tempo di serraggio delle griffe, pur dipendendo dalle dimensioni

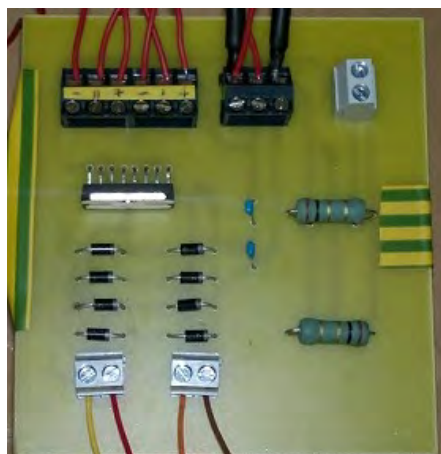


Figura 5.31: Scheda elettronica per il comando del motore passo-passo.

delle vie pneumatiche, dal grado di apertura dei regolatori di portata e dalla pressione di alimentazione, non risulta mai superiore ai 0.3 s. Mentre il tempo per far percorrere alla griffa l'intera traiettoria di regolazione risulta inferiore a 1,5 s. La forza di serraggio, alimentando il cilindro ad una pressione di 6 bar, risulta variabile con la posizione raggiunta dalla griffa nel moto di regolazione, associando i valori maggiori ad un grado di apertura per i componenti di maggior dimensione.

Prototipo di End-Effector innovativo	
Massa Prototipo	590 g
Momento d'inerzia di massa rispetto all'asse robot	$8,84 \cdot 10^{-4} \div 5,90 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$
Corsa di regolazione griffe	$0 \div 120 \text{ mm}$
Tempo di regolazione	$< 1,5 \text{ s}$
Tempo di serraggio griffe a 6 bar	$0,1 \div 0,3 \text{ s}$
Forza di serraggio per ciascuna griffa	<i>fino a 240 N</i>

Tabella 5.1: Caratteristiche del prototipo di End-Effector realizzato.

Conclusioni

Le aziende manifatturiere hanno attualmente la tendenza ad ampliare sempre di più il loro mix produttivo, da un lato per soddisfare esaurientemente le esigenze del mercato, che si fanno sempre più pretenziose, dall'altro per diversificare la produzione, allo scopo di svincolarsi dall'eventuale insuccesso che il singolo prodotto può riscontrare. Ecco quindi che saranno proposti diversi prodotti della stessa famiglia e ogni prodotto avrà a sua volta delle varianti per poterlo personalizzare. Appare quindi evidente che questo modo di lavorare può diventare problematico, in particolar modo se si intende automatizzare le diverse fasi del ciclo produttivo. Bisogna senza dubbio sottolineare che tra tutte le operazioni che portano ad ottenere il prodotto finito, l'assemblaggio risulta la più critica, se non altro perché nell'assemblaggio si ripercuotono e si sommano tutti gli errori dovuti alle operazioni condotte a monte. Quindi automatizzare l'assemblaggio di un prodotto personalizzabile risulta notevolmente complesso e i tradizionali modi di ideare un sistema automatizzato possono risultare inadeguati. La richiesta di flessibilità nell'automazione del montaggio è un tema ampiamente discusso nell'ambito dell'ingegneria industriale, tuttavia risultano assai modesti gli studi condotti allo scopo di proporre un metodo razionale per l'ideazione di un sistema automatico flessibile.

L'attività di ricerca presentata in questa tesi di dottorato è stata rivolta all'ideazione, alla modellazione e alla validazione sperimentale di una nuova classe di sistemi flessibili di assemblaggio, in grado di far fronte con rapidità ad un mix produttivo estremamente variabile, senza necessità di essere riconfigurata: è la cella di lavoro F-FAS (Fully-Flexible Assembly System). Modellando questa nuova tipologia di impianto è stato possibile individuare quei parametri che influenzano

la produttività del sistema e se ne è quindi stabilita la modalità di scelta nella fase di progetto. Inoltre è stato ideato, progettato e costruito il prototipo di un End-Effector per il robot in grado di configurarsi automaticamente in base alle caratteristiche del componente da assemblare. In particolare l'End-Effector prototipato permette di massimizzare il numero di componenti riconosciuti e prendibili presenti sul piano vibrante della cella F-FAS, aumentandone la produttività.

Ulteriori sviluppi di questo studio possono riguardare l'analisi approfondita degli algoritmi di sequenziamento degli assemblaggi, al fine di ridurre il tempo per l'evasione di un ordinativo, e l'ottimizzazione dell'End-Effector per il robot testando le sue performance per l'evasione di numerosi ordinativi.

Appendice A

Algoritmi utilizzati nel codice di sintesi iterativa

In questa sezione sono presentati, con una breve descrizione, gli algoritmi utilizzati nel codice di sintesi iterativa, realizzato su piattaforma MatLab, per l'ottimizzazione del meccanismo presente nel prototipo di End-Effector realizzato. Questi algoritmi sono impiegati per risolvere numericamente il problema di minimizzazione multivariabile vincolato, che permette di determinare la lunghezza dei membri del meccanismo, la posizione della cerniere a telaio e il range della coordinata libera, consentendo così di definire una soluzione che rispetti le specifiche di progetto. I due algoritmi sono usati in successione: l'algoritmo genetico, partendo dai vincoli impostati, definisce una prima soluzione, la quale viene utilizzata come soluzione di partenza dall'algoritmo Active Set, che fornisce la soluzione finale. Poiché l'algoritmo genetico, a parità di vincoli iniziali, non fornisce sempre la stessa soluzione, è possibile ripetere la ricerca per un numero preimpostato di volte, fino a quando il codice non fornisce una soluzione accettabile.

A.1 Algoritmo Genetico

Un algoritmo genetico opera su una popolazione di potenziali soluzioni applicando il principio della sopravvivenza del più adatto, così come avviene in natura, evolvendo verso una soluzione che si avvicina il più possibile alla reale soluzione

del problema. Gli algoritmi genetici sono applicabili alla risoluzione di un'ampia varietà di problemi di ottimizzazione non indicati per gli algoritmi classici, compresi quelli in cui la funzione obiettivo è discontinua, non derivabile, stocastica, o fortemente non lineare. Un tipico algoritmo genetico seleziona un certo numero di possibili soluzioni che formano una popolazione. Ogni individuo della popolazione ha delle caratteristiche, di solito riportate in una stringa definita gene, che lo contraddistinguono dagli altri. L'insieme di queste caratteristiche, combinate, assegna ad ogni individuo un valore di bontà, che viene detto funzione di fitness. Lo scopo dell'algoritmo genetico è generare popolazioni sempre migliori, fino ad individuare le caratteristiche che formano l'individuo con la miglior funzione di fitness. In un certo senso, la funzione di fitness indica l'adattabilità all'ambiente: gli individui che meglio si adattano hanno più probabilità di riprodursi o sopravvivere in modo da trasmettere i propri geni alle generazioni future. Un algoritmo genetico parte da un certo numero di soluzioni che formano la popolazione iniziale e provvede a farle evolvere nel corso dell'esecuzione: a ciascuna iterazione, esso opera una selezione di individui della popolazione corrente, impiegandoli per generare nuovi elementi della popolazione stessa, che andranno a sostituire un pari numero d'individui già presenti e a costituire in tal modo una nuova popolazione per l'iterazione seguente. Tale successione di generazioni evolve verso una soluzione ottimale, locale o globale del problema assegnato. La loro evoluzione viene ottenuta attraverso una parziale ricombinazione delle soluzioni, ogni individuo trasmette parte del suo patrimonio genetico ai propri discendenti, ma l'introduzione di mutazioni casuali nella popolazione di partenza permette sporadicamente la nascita di individui con caratteristiche non comprese tra quelle presenti nel corredo genetico della specie originaria. La mutazione serve, in genere, per inserire un po' di caos tra le soluzioni ed evitare che si cada in un minimo locale. Finita la fase di evoluzione la popolazione delle soluzioni viene analizzata e vengono tenute solo le soluzioni che meglio risolvono il problema: gli individui con le qualità più adatte all'ambiente in cui si trovano hanno quindi maggiori possibilità di sopravvivere e riprodursi. Queste soluzioni subiranno una nuova fase di evoluzione e così via. Alla fine ci si aspetta di trovare una popolazione di soluzioni che riescano a risolvere adeguatamente il problema posto. Tuttavia non vi è modo di decidere a priori se

l'algoritmo sarà effettivamente in grado di trovare una soluzione accettabile. In generale un algoritmo genetico ha la seguente struttura:

- generazione, in maniera casuale, di una popolazione iniziale;
- creazione di una sequenza di nuove popolazioni, o generazioni. In ciascuna iterazione, gli individui della popolazione corrente sono usati per creare la generazione successiva, e a questo scopo si compiono degli ulteriori passi:
 - ciascun membro della popolazione corrente è valutato calcolandone il rispettivo valore di fitness ;
 - si determina un opportuno ordinamento di tali individui sulla base dei valori di fitness;
 - gli individui più promettenti sono selezionati come genitori;
 - a partire da tali individui si genera un pari numero di individui della generazione successiva, e ciò può avvenire secondo due modalità distinte, vale a dire effettuando cambiamenti casuali su un singolo genitore (mutazione) oppure combinando opportunamente le caratteristiche di una coppia di genitori (incrocio);
 - gli individui così generati insieme ai genitori (la progenie) vengono selezionati, in base al loro valore nella funzione di fitness, per formare la generazione successiva;
- infine, l'algoritmo s'interrompe quando uno dei criteri d'arresto è soddisfatto.

A.2 Algoritmo Active Set

Data la funzione obiettivo da minimizzare e indicati i vincoli da rispettare, l'idea del metodo Active Set è di definire ad ogni passo un insieme di vincoli, detto *working set*, da considerare come attivo. A ogni passo si risolve un sottoproblema con solo vincoli di uguaglianza, eliminando tutti gli altri vincoli. In effetti dato un punto x nella regione delle soluzioni ammissibili, un vincolo del tipo $g_i(x) \geq 0$ è chiamato attivo in x se $g_i(x) = 0$ e inattivo se in x vale $g_i(x) > 0$. Così che i

vincoli di uguaglianza sono sempre attivi. Perciò l'insieme attivo nel punto x è costituito dai vincoli $g_i(x)$ attivi al punto corrente. Il working set può cambiare scartando qualche vincolo ed aggiungendone un altro, facendo in modo che la funzione obiettivo decresca. Questo si ottiene osservando il segno dei moltiplicatori di Lagrange, che, come è noto, per l'ottimalità devono essere non negativi. Se, viceversa, uno dei moltiplicatori è negativo, la funzione obiettivo decresce se si scarta il vincolo corrispondente. Se ve ne sono più di uno, è più conveniente scartare quello corrispondente al moltiplicatore più negativo. Essendovi un numero finito di working sets, il processo ha termine dopo un numero finito di passi. In generale un algoritmo Active Set ha la seguente struttura:

- definizione di un punto di partenza nella regione delle soluzioni ammissibili;
- ripetere le fasi di seguito finché la soluzione non è soddisfacente:
 - risolvere il problema di uguaglianza definito dall'insieme attivo;
 - calcolo dei moltiplicatori di Lagrange dell'insieme attivo;
 - rimozione di un sottoinsieme di vincoli con moltiplicatori di Lagrange negativi;
 - ricerca dei vincoli non rispettabili;
- fine ripetizione

Bibliografia

- [1] B. Lotter. *L'automazione del montaggio. Elettronica e meccanica di precisione*. Tecniche Nuove, 1993.
- [2] S. Y. Nof et al. *Industrial Assembly*. Springer, 1993.
- [3] G. Boothroyd. *Assembly automation and product design*, seconda edizione. Taylor and Francis, 2005.
- [4] A. Pareschi. *Impianti Industriali. Criteri di scelta, progettazione, realizzazione*, seconda edizione. Progetto Leonardo Bologna, 2007.
- [5] A. Pareschi et al. *Logistica integrata e flessibile*, prima edizione. Progetto Leonardo Bologna, 2003.
- [6] L. Sciavicco et al. *Robotica. Modellistica, pianificazione e controllo*, prima edizione. McGraw-Hill, 2008.
- [7] G. Rosati, M. Faccio, A. Carli, and A. Rossi. *Convenience analysis and validation of a fully flexible assembly system*. In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation ETFA 2011, Toulouse, France, Sept 5-9 2011
- [8] G. Rosati, M. Faccio, A. Carli, and A. Rossi. *Fully Flexible Assembly System (F-FAS): a new concept in flexible automation*. *Assembly Automation*, 2013, Vol. 33, No. 1.
- [9] G. Rosati, M. Faccio, C. Finetto, and A. Carli. *Modelling and optimization of Fully Flexible Assembly Systems (F-FAS)*. *Assembly Automation*, 2013, Vol. 33, No. 2.

-
- [10] N.F. Edmondson and A.H. Redford. *Flexible parts feeding for flexible assembly*. International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39, No. 11, pagg. 2279-2294.
- [11] N.F. Edmondson and A.H. Redford. *Generic Flexible assembly system design*, Assembly Automation, 2002, Vol. 22, No. 2, pagg. 139-152.
- [12] M.L. Tay, P. S. K. Chua, S.K. Sim and Y. Gao. *Development of a Flexible and programmable parts feeding system*. International Journal of Production Economics, 2005, Vol. 98, pagg. 227-237.
- [13] P.S.K. Chua. *Novel design and development of an active feeder*. Assembly Automation, 2007, Vol. 27, No. 1, pagg. 31-37.
- [14] D. Gudmundsson and K. Goldberg. *Optimizing robotic part feeder throughput with queueing theory*. Assembly Automation, 2007, Vol. 27, No. 2, pagg. 134-140.
- [15] G. Reinhart and M. Loy. *Design of a modular feeder for optimal operating performance*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, Vol. 3, pagg. 191-195.
- [16] W. Wolfson and S.J. Gordon. *Designing a flexible feeding system for maximum flexibility*. Assembly Automation, 1997, Vol. 17, No. 2, pagg. 116-121.
- [17] P.B. Petrovic, V.R. Milacic and G.M. Dzelatovic. *New feeding system for high speed assembly of small parts*. Annals of the CIRP, 2000, Vol. 49, pagg. 9-12.
- [18] T. Fradrich, J. Pachow-Frauenhofer, F. Torsten and P. Nyhuis. *Aerodynamic feeding systems: An example for changeable technology*. Assembly Automation, 2011, Vol. 31, No. 1, pagg. 47-52.
- [19] A. Perks. *Advanced vision guided robotics provide future-proof flexible automation*. Assembly Automation, 2006, Vol. 26, No. 3, pagg. 116-121.
- [20] F. Al-Ghathian, M. Tarawneh, M. A. Nawafleh and N. Al-Kloub. *A mechanical device used to improve the vision inspection in small scale industry*.

- International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2010, Vol. 5, No. 2, pagg. 191-198.
- [21] S. Ravikumar, K. I. Ramachandran and V. Sugumaran. *Machine learning approach for automated visual inspection of machine components*. Expert Systems with Applications, 2011, Vol 38, No. 4, pagg. 3260-3266.
- [22] G. Rosati, G. Boschetti, A. Biondi and A. Rossi. *On-line dimensional measurement of small components on the eyeglasses assembly line*. Optics and Lasers in Engineering, 2009, Vol. 47, pagg. 320-328.
- [23] J. Heilala and P. Voho. *Modular reconfigurable flexible final assembly system*. Assembly Automation, 2001, Vol. 21, No. 1, pagg. 20-28.
- [24] D. Spath and M. Baumeister. *Synchronisation of material flow and assembly in hybrid and modular systems*. Assembly Automation, 2001, Vol. 21, No. 2, pagg. 152-157.
- [25] R.D. Schraft, S. Schmid and S. Thiemermann. *Man-robot cooperation in a Flexible assembly cell*. Assembly Automation, 2002, Vol. 22, No. 2, pagg. 136-138.
- [26] J. Kruger, B. Nickolay, and P. Heyer. *Image based 3D surveillance for flexible man-robot-cooperation*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, Vol. 54, No. 1, pagg. 19-22.
- [27] M. Morioka and S. Sakakibara. *A new cell production assembly system with human-robot cooperation*. Manufacturing Technology, 2010, Vol. 59, pagg. 9-12.
- [28] H. Medellin, J. Corney, J. Ritchie and T. Lim. *Automatic generation of robot and manual assembly plans using octrees*. Assembly Automation, 2010, Vol. 30, No. 2, pagg. 173-183.
- [29] A. Rossi, G. Rosati, S. Cenci, A. Carli, V. G. Riello, A. Foroni, M. Mantovani and L. Zanotti. *Flexible assembly system for heat exchanger coils*. In Procee-

- dings of the 16th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation ETFA 2011, Toulouse, France, Sept 5-9 2011.
- [30] W. Townsend. *The barretthand grasper - programmably flexible part handling and assembly*. Industrial Robot: an International Journal, 2000, Vol. 27, No. 3, pagg. 181-188.
- [31] G. Accia, L. Bruzzone and R. Razzoli. *A modular robotic system for industrial applications*. Assembly Automation, 2008, Vol. 28, No. 2, pagg. 151-162.
- [32] D. Battini, M. Faccio A. Persona and F. Sgarbossa. *New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011, Vol. 41, No. 1, pp. 30-42.
- [33] Y. Cohen and M. Faccio. *The combined effect of multiple models sequencing and absenteeism/turnover on the throughput of assembly lines*. In 17th Industrial Engineering and Management Conference, 2012, 27-28 March, Tel Aviv, Israel.
- [34] H. Meixner, R. Kobler, O. Chinellato, R. Cesarotti. *Pneumatica. Principi e componenti*, seconda edizione. Festo Didactic GmbH, 1999.
- [35] G. Belforte. *Manuale di pneumatica*, seconda edizione. Tecniche Nuove, 2005.
- [36] V. Cossalter. *Meccanica applicata alle macchine*, quarta edizione. Edizioni Progetto, 2004.
- [37] P. L. Magnani e G. Ruggieri. *Meccanismi per macchine automatiche*. Utet, 1986.
- [38] H. S. Yan. *Creative design of mechanical device*. Springer, 1998.
- [39] C. Lanni. *Caratterizzazione dell'impatto di presa e progettazione ottima di gripper*. Tesi di dottorato, 2008.
- [40] F. Y. Chen. *Gripping mechanisms for industrial robot: an overview*. Mechanism and machine theory, 1982a, vol. 17, No. 5, pagg. 295-299.

Ringraziamenti

Il foglio bianco di ringraziamenti che sto scrivendo, alla fine del percorso di Dottorato, non è abbastanza lungo per rendere giustizia a tutte quelle persone che mi sono state vicine nella varie occasioni della vita. Per questo motivo non reputo gradevole compilare una lista di ringraziamenti, che comunque risulterebbe incompleta e grossolanamente inattuale.

Tuttavia, reputo opportuno esprimere riconoscenza al prof. Giulio Rosati e ai colleghi dottorandi, del gruppo di ricerca in Robotica e Meccatronica dell'Università degli Studi di Padova, per avermi insegnato una metodologia di ricerca scientifica legata fortemente alla realtà industriale, cardine della produzione di benessere per la nostra società.

Inoltre non posso sottrarmi dall'esprimere un particolare riconoscimento ai miei genitori e ai miei fratelli perché sono le persone a cui voglio più bene.

Infine, un particolare pensiero lo rivolgo alla mia fidanzata, per me una confidente e una consigliera preziosa, con l'auspicio che non si esaurisca mai quel profondo rapporto che ormai è consolidato da anni.

Valutazione del collegio docenti e
ammissione all'esame finale



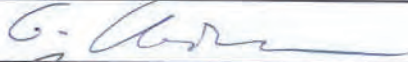
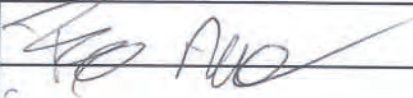


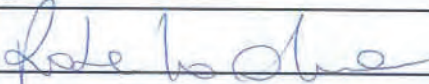
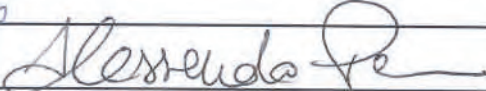
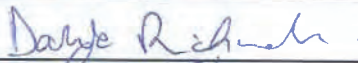
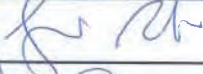

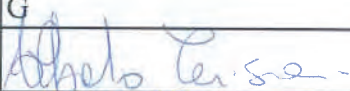
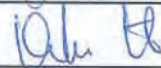
SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

RIUNIONE COLLEGIO DI INDIRIZZO IN MECCATRONICA E SISTEMI INDUSTRIALI

Vicenza, 12 dicembre 2012, ore 14.30. Aula E

Foglio 1 di 2

Collegio di indirizzo:

Battini Daria	
Berto Filippo	G
Bolognani Silverio	G
Bonollo Franco	G
Boschetti Giovanni	
Caracciolo Roberto	G
Chitarin Giuseppe	
Faccio Maurizio	
Ferrari Emilio	G
Ferro Paolo	G
Gamberi Mauro	
Gasparella Andrea	
Manzini Riccardo	G
Mattavelli Paolo	G
Oboe Roberto	
Pareschi Arrigo	G
Persona Alessandro	
Regattieri Alberto	G
Richiedei Dario	
Rosati Giulio	
Rossi Aldo	
Timelli Giulio	G
Trevisani Alberto	
Zambon Andrea	
Zigliotto Mauro	G

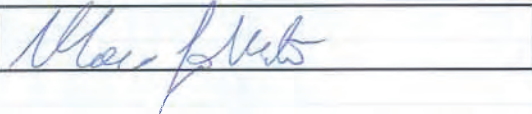
SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

RIUNIONE COLLEGIO DI INDIRIZZO IN MECCATRONICA E SISTEMI INDUSTRIALI

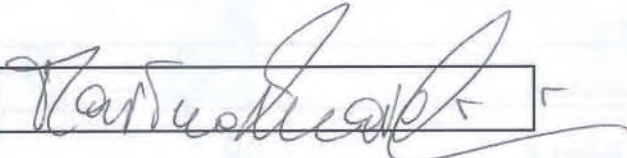
Vicenza, 12 dicembre 2012, ore 14.30. Aula E

Foglio 2 di 2

Rappresentante dei Dottorandi

Marco Salviato	
----------------	--

Supervisore invitato

Marino Quaresimin	
-------------------	--

SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

RIUNIONE COLLEGIO DI INDIRIZZO IN MECCATRONICA E SISTEMI INDUSTRIALI

Vicenza, 12 dicembre 2012, ore 14.30.

Collegio di indirizzo:

Battini Daria	P
Berto Filippo	G
Bolognani Silverio	G
Bonollo Franco	G
Boschetti Giovanni	P
Caracciolo Roberto	G
Chitarin Giuseppe	P
Faccio Maurizio	P
Ferrari Emilio	G
Ferro Paolo	G
Gamberi Mauro	P
Gasparella Andrea	P
Manzini Riccardo	G
Mattavelli Paolo	G
Oboe Roberto	P
Pareschi Arrigo	G
Persona Alessandro	P
Regattieri Alberto	G
Richiedei Dario	P
Rosati Giulio	P
Rossi Aldo	P
Timelli Giulio	G
Trevisani Alberto	P
Zambon Andrea	P
Zigliotto Mauro	G

Rappresentante dei Dottorandi:

Marco Salvato P

Supervisore invitato:

Marino Quaresimin P

Ordine del giorno:

1. Comunicazioni.
2. Valutazione dell'attività svolta dai dottorandi iscritti al XXV ciclo. Ammissione all'esame finale, approvazione dei medaglioni e formulazione del giudizio finale.
3. Commissione esame finale XXV ciclo (ratifica).
4. Pratiche dottorandi.

2. Valutazione dell'attività svolta dai dottorandi iscritti al XXV ciclo. Ammissione all'esame finale, approvazione dei medaglioni e formulazione del giudizio finale.

Il Coordinatore premette che Giovanni Pernigotto, attualmente impegnato in un periodo formativo all'estero presso l'Eindhoven Technical University, non può essere presente in data odierna per presentare l'attività svolta. Il Coordinatore ha pertanto fatto richiesta a Giovanni Pernigotto di preparare una relazione di sintesi che è stata inviata via email ai membri del Collegio, per opportuna valutazione, ieri, martedì 11 dicembre 2012. La relazione è riportata nell'ALLEGATO 2.

Tutti i dottorandi del XXV ciclo escluso Giovanni Pernigotto presentano l'attività da loro svolta. Le presentazioni sono riportate nell'ALLEGATO 2.

Prima di avviare la discussione su ogni dottorando iscritto al XXV ciclo, e dopo aver assistito alla presentazione della loro attività, il Coordinatore ricorda al Collegio i giudizi formulati dalla commissione che lo scorso 11 luglio 2012 ha condotto un accertamento sull'attività svolta da tali dottorandi. La commissione era composta dai Proff. M. Faccio, M. Gamberi (in sostituzione del Prof. E. Ferrari) R. Manzini (in sostituzione del Prof. A. Pareschi) G. Rosati, A. Trevisani, M. Zappalorto (in sostituzione del Prof. M. Quaresimin), C. Zilio (in sostituzione del Prof. A. Gasparella).

Il Collegio passa quindi a valutare ciascun dottorando iscritto al XXV ciclo.

RICCARDO ACCORSI, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Arrigo Pareschi

Titolo della tesi di dottorato:

Integrated Models and Tools for Design and Management of Global Supply Chain.

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, dopo aver assistito alla presentazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Riccardo Accorsi, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

MARCO BORTOLINI, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Emilio Ferrari

1) Titolo della tesi di dottorato:

Design, control and management of renewable energy plants and technologies.

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, dopo aver assistito alla presentazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Marco Bortolini, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

ANDREA CARLI, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Giulio Rosati

1) Titolo della tesi di dottorato:

Sistemi Flessibili per l'Assemblaggio Industriale

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, dopo aver assistito alla presentazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Andrea Carli, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

GIOVANNI PERNIGOTTO, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Andrea Gasparella, Co-supervisore Prof. Jan Hensen (Technische Universiteit Eindhoven)

1) Titolo della tesi di dottorato:

Evaluation of building envelope energy performance through extensive simulation and parametrical analysis.

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, presa visione della relazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Giovanni Pernigotto, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

MARCO SALVIATO, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Marino Quaresimin

1) Titolo della tesi di dottorato:

Experimental analysis and multi-scale analytical and numerical modelling of nanomodified composite mechanical properties

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, dopo aver assistito alla presentazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Marco Salviato, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

GIORGIA ZANIN, XXV ciclo, Supervisore: Prof. Maurizio Faccio

1) Titolo della tesi di dottorato:

Innovative processes in the food industry to protect health and eco-compatibility

Descrizione dell'attività: vedi medaglione nell'ALLEGATO 3.

Il Collegio di Indirizzo, dopo aver assistito alla presentazione dell'attività complessivamente svolta da parte dell'Ing. Giorgia Zanin, preso atto del giudizio formulato dal Supervisore, preso atto del giudizio formulato dalla commissione che in data 11-07-2012 ne ha accertato l'attività svolta e dopo ampia discussione, formula il seguente giudizio di ammissione all'esame finale: OTTIMO.

Il Collegio approva all'unanimità.



ALLEGATO 1: Autorizzazioni dottorandi

RICCARDO ACCORSI - XXV CICLO

- Scrittura tesi di dottorato in lingua inglese.
- Richiesta modifica titolo della tesi di dottorato (versione inglese)
 - o Titolo attuale: *Modelli e Strumenti Integrati per la Progettazione e Gestione di filiere logistico-distributive globali.*
 - o Nuovo titolo proposto: *Integrated Models and Tools for Design and Management of Global Supply Chain.*

MARCO BORTOLINI - XXV CICLO

- Scrittura tesi di dottorato in lingua inglese.
- Richiesta modifica titolo della tesi di dottorato (versione inglese)
 - o Titolo attuale: *Progettazione, controllo e gestione di impianti e tecnologie per le energie rinnovabili.*
 - o Nuovo titolo proposto: *Design, control and management of renewable energy plants and technologies.*
- Riconoscimento di n.3 crediti per il corso “Corso di avvio alla programmazione in ambiente LabView NI” tenuto dall’Ing. M. Rinaldi dell’Università degli Studi di Bologna. Il corso ha avuto una durata complessiva di 30 ore ed ha previsto un accertamento finale, attraverso la stesura di un elaborato che è stato trasmesso al Coordinatore.

ANDREA CARLI - XXV CICLO

- Nessuna richiesta.

GIOVANNI PERNIGOTTO - XXV CICLO

- Scrittura tesi di dottorato in lingua inglese.
- Richiesta aggiunta di un co-supervisore: prof. Jan Hensen della Technische Universiteit Eindhoven
- Richiesta modifica titolo della tesi di dottorato (versione inglese)
 - o Titolo attuale: *Analisi delle problematiche di scambio termico per la valutazione delle prestazioni degli impianti di climatizzazione negli edifici.*
 - o Nuovo titolo proposto: *Evaluation of building envelope energy performance through extensive simulation and parametrical analysis.*

MARCO SALVIATO - XXV CICLO

- Scrittura tesi di dottorato in lingua inglese.
- Richiesta modifica titolo della tesi di dottorato (versione inglese)
 - o Titolo attuale: *Modellazione del comportamento strutturale di nanocompositi a matrice polimerica.*
 - o Nuovo titolo proposto: *Experimental analysis and multi-scale analytical and numerical modelling of nanomodified composite mechanical properties.*

GIORGIA ZANIN - XXV CICLO

- Scrittura tesi di dottorato in lingua inglese.
- Richiesta modifica titolo della tesi di dottorato (versione inglese)
 - o Titolo attuale: *Processi innovativi nell'industria alimentare a difesa della salute e dell'eco-compatibilità.*
 - o Nuovo titolo proposto: *Innovative processes in the food industry to protect health and eco-compatibility*

ALLEGATO 3
RELAZIONI E GIUDIZI (MEDAGLIONI) DEI SUPERVISORI
SULL'ATTIVITÀ SVOLTA DAGLI ALLIEVI ISCRITTI AL XXV CICLO

(in 4/4 fogli)

Il presente allegato è costituito da 4 fogli, nei quali sono riportate le relazioni e i giudizi dei supervisori sulle attività svolte dagli allievi iscritti al XXV ciclo. Le relazioni sono redatte in forma di medaglioni e contengono informazioni relative alle attività svolte, ai risultati ottenuti e ai giudizi dei supervisori. Le medaglie sono divise in quattro categorie: "Oro", "Argento", "Rame" e "Bronzo".

Le medaglie "Oro" sono assegnate agli allievi che hanno dimostrato un'ottima performance durante l'attività. Le medaglie "Argento" sono assegnate agli allievi che hanno dimostrato una buona performance. Le medaglie "Rame" sono assegnate agli allievi che hanno dimostrato una performance soddisfacente. Le medaglie "Bronzo" sono assegnate agli allievi che hanno dimostrato una performance accettabile.

Le medaglie sono assegnate dai supervisori in base ai risultati ottenuti durante l'attività. Le medaglie "Oro" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto. Le medaglie "Argento" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Oro". Le medaglie "Rame" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Argento". Le medaglie "Bronzo" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Rame".

Le medaglie sono assegnate ai supervisori in base ai risultati ottenuti durante l'attività. Le medaglie "Oro" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto. Le medaglie "Argento" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Oro". Le medaglie "Rame" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Argento". Le medaglie "Bronzo" sono assegnate agli allievi che hanno ottenuto il punteggio più alto tra quelli che non hanno ottenuto la medaglia "Rame".



RELAZIONE SULL'ATTIVITÀ SVOLTA DALL'ALLIEVO
ING. ANDREA CARLI
NEL CORSO DEL TRIENNIO DI
DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE, INDIRIZZO
MECCATRONICA E SISTEMI INDUSTRIALI
(XXV ciclo)

Titolo della ricerca:

Sistemi Flessibili per l'Assemblaggio Industriale

L'ing. Andrea Carli ha svolto la sua attività di ricerca con l'obiettivo di studiare un'innovativa classe di sistemi flessibili per l'assemblaggio industriale, denominati Fully-Flexible Assembly Systems (F-FAS), caratterizzandone le potenzialità rispetto alle tecnologie di assemblaggio tradizionali. L'attività di ricerca ha compreso lo studio della convenienza del sistema F-FAS, intesa in termini di costo unitario diretto di produzione, prendendo in considerazione le caratteristiche produttive richieste dal ciclo industriale nel quale il sistema deve operare. A tal scopo l'attività del dottorando si è rivolta alla formulazione di un modello matematico per la stima della produttività del sistema oggetto di studio, che è influenzata sia dall'efficienza del sistema flessibile di alimentazione sia dalle caratteristiche della famiglia di prodotti da assemblare. Per la scrittura di tale modello e la sua validazione, ci si è basati sui risultati di una vasta serie di prove sperimentali di assemblaggio condotte su prototipo fisico dal candidato. Inoltre, sono stati condotti test simulativi di evasione ordine, su piattaforma Matlab, che hanno consentito di ottenere un gran numero di dati sul comportamento del sistema di assemblaggio in studio, caratterizzando l'andamento dei parametri fondamentali per la scrittura del modello matematico, con particolare riferimento alla matrice modelli-componenti.

Un ulteriore passo dell'attività di ricerca è stato quello di individuare dei criteri progettuali per il sistema F-FAS, definendo le caratteristiche dei sottosistemi in esso presenti in base alle necessità di flessibilità e cadenza produttiva richieste dal ciclo industriale. In particolar modo, data l'influenza dell'end-effector del robot sulle potenzialità del sistema, è stato progettato un end-effector flessibile innovativo, che consenta di manipolare componenti di dimensioni sensibilmente diverse tra loro senza dover ricorrere al cambio utensile, grazie ad un meccanismo che consente la riconfigurabilità on-line del gripper. Tale studio è stato effettuato nell'ambito di un periodo all'estero, da Marzo a Settembre 2012, presso il gruppo del prof. Michael J. McCarthy della University of California-Irvine. Lo studio, mediante applicazione delle tecniche analitiche e numeriche di sintesi dei meccanismi, ha portato alla progettazione di due differenti versioni di un organo terminale flessibile per robot, adatto al sistema F-FAS. Una delle due versioni, quella con maggiori caratteristiche di flessibilità, è stata realizzata in fase prototipale ed è attualmente in sperimentazione.

Nel corso degli anni 2011-2012, inoltre, l'Ing. Andrea Carli ha partecipato ad un progetto di ricerca nel campo dell'automazione industriale promosso dal Metadistretto Calzaturiero Veneto con scopo finale l'introduzione nel processo produttivo di sistemi automatizzati innovativi al fine di migliorare la realizzazione delle scarpe di alta moda.

Il percorso scientifico nel triennio 2010-2012 ha permesso al candidato di acquisire la padronanza

- delle metodologie di analisi e simulazione, anche basata su metodi statistici, di sistemi automatici di produzione;



- delle metodologie di progettazione ed implementazione di sistemi robotizzati flessibili per la produzione di piccoli lotti di prodotto;
- delle metodologie di progettazione sia analitica che numerica di meccanismi articolati piani apèipù gradi di libertà;
- delle metodologie di analisi di problematiche applicative legate all'automazione industriale.

L'attività effettuata ha progressivamente rivelato l'interessante valenza applicativa dei risultati ottenuti e la crescita di autonomia e maturità scientifica da parte dell'ing. Andrea Carli.

Il buon livello del percorso scientifico è documentato dalla stesura di memorie, presentate a convegni nazionali ed internazionali e pubblicate su riviste internazionali. Al termine del triennio di Dottorato, l'Ing. Carli risulta autore delle seguenti pubblicazioni:

- [1] G. Rosati, M. Faccio, A. Carli, and A. Rossi
Fully Flexible Assembly System (F-FAS): a new concept in flexible automation
Assembly Automation, 2012 (in press)
- [2] G. Rosati, M. Faccio, C. Finetto, and A. Carli
Modelling and optimization of Fully Flexible Assembly Systems (F-FAS)
Assembly Automation, 2013 (in press)
- [3] A. Rossi, A. Persona, G. Rosati, M. Faccio, S. Cenci, A. Carli, and C. Finetto
Sistemi di assemblaggio industriale ad elevata flessibilità
In Quinta giornata di studio Ettore Funaioli - 15 luglio 2011. A cura di U. Meneghetti, A. Maggiore e V. Parenti Castelli, Bologna, Italy
- [4] G. Rosati, M. Faccio, A. Carli, and A. Rossi
Convenience analysis and validation of a fully flexible assembly system
In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Emerging Technology & Factory Automation ETFA 2011, Toulouse, France, Sept 5-9 2011
- [5] A. Rossi, G. Rosati, S. Cenci, A. Carli, V. G. Riello, A. Foroni, M. Mantovani, and L. Zanotti
Flexible assembly system for heat exchanger coils
In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Emerging Technology & Factory Automation ETFA 2011, Toulouse, France, Sept 5-9 2011
- [6] A. Rossi, G. Rosati, S. Cenci, A. Carli, L. Zanotti, M. Mantovani, A. Foroni, and V. G. Riello
La mecatronica per l'assemblaggio flessibile
In Quarta giornata di studio Ettore Funaioli - 16 luglio 2010. A cura di U. Meneghetti, A. Maggiore e V. Parenti Castelli, Bologna, Italy, 2011

In conclusione, al termine del percorso formativo l'allievo presenta buone capacità di analisi e di risoluzione di problematiche inerenti la robotica flessibile, ed un ottimo livello di autonomia nella conduzione di sperimentazioni scientifiche. Tali risultati sono stati raggiunti grazie anche al periodo svolto all'estero, che ha determinato una importante crescita del profilo del candidato.

Il giudizio complessivo è ottimo.

Il Supervisore
Prof. Giulio Rosati

