



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

**TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA**
(Laurea Triennale DM 270/04 – Curriculum Meccatronico)

**ROBOT ULTRALEGGERI PER PRESTAZIONI AD
ELEVATA DINAMICA**

Relatore: Prof. Dario Richiedei

Laureando: Giovanni Boschello

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Indice

Indice	1
Sommario.....	4
CAPITOLO 1: ROBOT INDUSTRIALI.....	6
1.1 Definizioni, caratteristiche e principali impieghi	6
1.2 Classificazione	7
1.2.1 Analisi dei principali manipolatori a cinematica seriale.....	8
1.2.2 Analisi dei principali manipolatori a cinematica parallela	13
CAPITOLO 2: ANALISI E CONFRONTO TRA I ROBOT INDUSTRIALI IN COMMERCIO.....	18
2.1 Confronto tra cinematica seriale e parallela.....	18
2.1.1 Cinematica seriale.....	19
2.1.2 Cinematica parallela.....	20
2.1.3 Confronto seriale-parallelo	21
2.1.4 Robot SCARA	23
2.1.5 Confronto SCARA-seriale-parallelo.....	25
CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE	26
3.1 Azionamento Adept	26
3.1.1 Motori e stadio di riduzione del moto.....	26
3.1.2 Controllo	27
3.2 Azionamento ABB.....	34
3.2.1 Motori e stadio di riduzione.....	34
3.2.2 Controllo	34
CAPITOLO 4: LIGHTWEIGHT ROBOT	38
3.1 Aspetti progettuali.....	39
4.2 Progetti spaziali DLR.....	42

4.3 Analisi dei lwr sviluppati da DLR.....	43
4.3.1 Lightweight robot I.....	44
4.3.2 Lightweight robot II.....	51
4.3.3 Lightweight robot III	56
4.4 Analisi delle tipologie di controllo presenti nei lightweight robot.....	63
4.4.1 Controllo per l'azionamento dei motori	64
4.4.2 Controllo a livello dei giunti.....	65
4.4.3 Controllo a livello cartesiano.....	68
4.4.4 Valutazione generale del controllo dei lwr.....	68
CAPITOLO 5: ANALISI CONCLUSIVE.....	72
5.1 Barrett WAM arm e Mitsubishi PA 10.....	72
5.2 Confronto lwr e robot industriali: conclusioni	74
Bibliografia e sitografia	78

Sommario

I robot industriali tradizionali sono usati principalmente nel servire impianti all'interno di celle robotizzate. La conoscenza dell'ambiente di lavoro, degli spostamenti da far compiere all'end effector hanno fatto in modo che questi robot avessero le seguenti caratteristiche:

- Massa elevata in relazione al carico applicato
- Controlli standardizzati (controllo di posizione, velocità e corrente)
- Ottima caratteristica di accuratezza
- Elevata ripetibilità

Tuttavia lo sviluppo dei robot negli ultimi anni ha preso un'altra direzione. La necessità di automatizzare processi (industriali e non) nei quali l'ambiente non fosse determinato a priori ha reso possibile lo sviluppo di un nuovo concetto di robot, il cosiddetto robot ultraleggero.

Nella seguente trattazione saranno inizialmente esaminati i robot industriali tradizionali, le loro caratteristiche meccatroniche e i controlli usati, si analizzeranno i nuovi robot ultraleggeri e si farà un confronto fra le diverse caratteristiche costruttive e prestazionali delle due tipologie di robot.

CAPITOLO 1: ROBOT INDUSTRIALI

1.1 Definizioni, caratteristiche e principali impieghi

Il robot industriale può essere definito come “una macchina che è capace di apportare modifiche all’ambiente in cui opera, esplicando azioni che sono condizionate da un insieme di regole di comportamento connaturate alla macchina stessa e da un insieme di informazioni acquisite dal robot sul suo stato e su quello dell’ambiente” [1].

Una definizione completa di robot industriale è stata fornita dall’IFTOMM (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science) che, nel 1983, lo definisce come “una macchina riprogrammabile per svolgere funzioni di manipolazione, movimentazione, [...], lavorazione in grado di interagire con il suo ambiente circostante e dotata di un certo grado di autonomia”.

Il Robot Institute of America definisce il robot industriale una “struttura meccanica multifunzionale e riprogrammabile (manipolatore) progettato per spostare materiali, parti, utensili o dispositivi specializzati, per mezzo di movimenti variabili programmati per l’esecuzione di una varietà di compiti diversi” [2].

Queste descrizioni, oltre che fare rientrare il robot industriale all’interno dell’automazione programmabile, ne fanno emergere le tre principali caratteristiche. Esse sono:

- Versatilità.
- Possibilità di adattamento.
- Autonomia (cioè una qualche capacità del robot di prendere decisioni, in questo caso di parla di robotica autonoma).

Le parti che costituiscono un robot industriale sono [2]:

- Una struttura meccanica (manipolatore) che consiste in un insieme di corpi rigidi (braccia o link) interconnessi tra loro da dei giunti rotoidali o prismatici. A sua volta, all’interno del manipolatore, si possono individuare le seguenti parti:
 1. Una struttura portante. Essa assicura mobilità al robot.
 2. Un polso.

3. Un organo terminale, detto end effector, che esegue il compito per cui il robot è stato progettato (per esempio una mano di presa).
- Degli attuatori che imprimono il movimento al manipolatore attraverso l'azionamento dei giunti. Di solito si impiegano motori elettrici, ma talvolta è possibile l'utilizzo di attuatori idraulici e pneumatici.
 - Una parte sensoristica che misura lo stato del manipolatore e dell'ambiente che circonda il robot.
 - Un'unità di governo (controllore) con funzioni di controllo e supervisione dei movimenti del manipolatore.

Il robot industriale presenta tre modalità di impiego fondamentali in un processo di fabbricazione [1]:

1. Trasporto (pallettizzazione, carico e scarico magazzino e di macchine operatrici, selezione, smistamento, confezionamento).
2. Manipolazione intesa come lavorazione e assemblaggio (saldatura, verniciatura a spruzzo, incollaggio, fresatura e trapanatura, taglio a laser e a getto d'acqua, cablaggio, montaggio di schede elettroniche).
3. Misura (collaudo dimensionale, rilevamento di profili, individuazione dei difetti di fabbricazione).

1.2 Classificazione

I robot manipolatori si possono suddividere in base alla tipologia di catena cinematica in tre grandi categorie:

Robot seriali

I link di questo robot sono connessi tutti in serie da delle coppie rotoidali. Si viene così a creare una catena cinematica aperta (simile ad un braccio umano).

Robot paralleli

Questi robot sono molto meno diffusi dei robot seriali e hanno caratteristiche complementari a questi. Sono costituiti da membri che formano catene cinematiche chiuse. Hanno capacità di carico maggiori rispetto agli altri e hanno una maggiore rigidità. La loro particolare struttura permette di posizionare i motori a terra alleggerendo la struttura stessa e permettendo di avere velocità ed accelerazioni molto più elevate (anche se la capacità di carico in questo caso si riduce molto).

Spesso però hanno una mobilità più ridotta, cioè il volume dello spazio raggiungibile dall'organo terminale è inferiore rispetto a quello dei robot seriali.

Un esempio di questo robot è il robot Delta della ABB.

Robot Ibridi

Questi tipi di robot sono dotati di una parte a struttura cinematica parallela e una parte seriale. Famosi sono il Tricept HP e l'ABB IRB 940. Spesso si tratta di robot paralleli sui quali viene montata una parte a cinematica seriale.

1.2.1 Analisi dei principali manipolatori a cinematica seriale

Ci sono diverse tipologie di manipolatori industriali a cinematica seriale presenti sul mercato.

Possono essere classificati in base al tipo e alla successione dei gradi di libertà della struttura portante, a partire dall'articolazione alla base.

Essi si dividono in [2]:

- Cartesiani
- Cilindrici
- Sferici
- SCARA
- Antropomorfi

A tutte queste geometrie è affidato il compito di posizionare il polso che consente di orientare l'organo terminale del manipolatore. Per garantire orientamenti arbitrari in uno spazio tridimensionale, il polso deve possedere almeno tre gradi di mobilità realizzati da tre giunti rotoidali. Per questi motivi la scelta del polso ricade sempre più spesso verso un polso sferico (i tre assi di rotazione del polso si intersecano in un punto) che offre una maggior mobilità ed una maggiore destrezza.

Per quanto riguarda la scelta dell'organo terminale esso viene specificato a seconda dell'operazione da fare. Per esempio per afferrare un pezzo si può pensare ad una pinza o ad una mano di presa pneumatica che sfrutta il vuoto afferrando il pezzo con delle ventose.

Geometria cartesiana

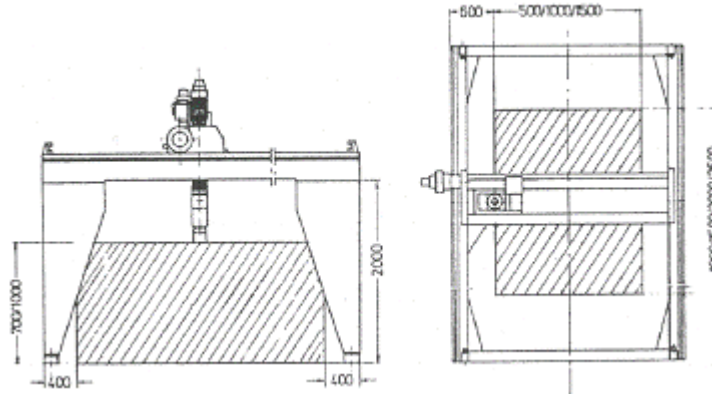


Figura 1 Robot seriale a geometria cartesiana: vista laterale e vista in pianta

I robot rappresentati in figura 1, sono realizzati con tre giunti prismatici con assi perpendicolari tra loro.

Vantaggi:

- Ottime caratteristiche di rigidità meccanica (le parti a sbalzo sono limitate).
- Precisione del polso uniforme in tutto lo spazio di lavoro (volume racchiuso in un parallelepipedo).
- Presentano un'inerzia pressoché costante con il modificarsi della posizione degli assi, si ottiene così un buon comportamento dinamico.
- Buona precisione (o risoluzione).
- Buona ripetibilità.

Svantaggi:

- Scarsa versatilità.
- Pesantezza della struttura e conseguente impossibilità di raggiungere velocità molto elevate (accelerazioni basse).
- A parità di precisione, il costo di realizzazione di questi robot (coppie prismatiche) è superiore a quello di geometrie realizzate con coppie rotoidali.

Geometria cilindrica

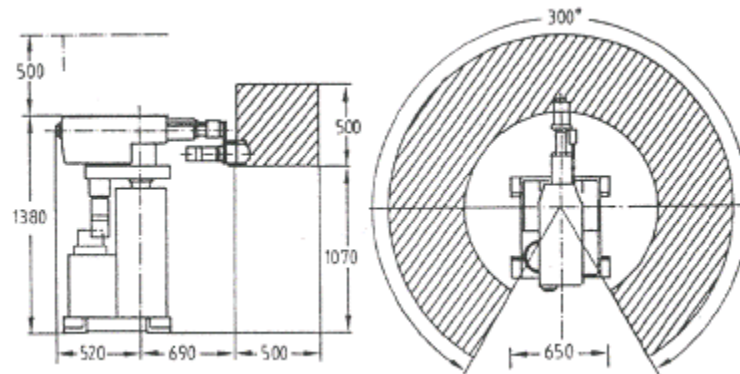


Figura 2 Robot seriale a geometria cilindrica: vista laterale e vista in pianta

La geometria rappresentata in figura 2 si differenzia dalla geometria cartesiana per la sostituzione del giunto prismatico di base con uno rotoidale.

Vantaggi:

- Buona rigidezza meccanica.
- Si prestano particolarmente all'impiego di attuatori pneumatici di tipo lineare facilmente controllabili, per cui in realizzazioni di piccole dimensioni risultano essere veloci e precisi.

Svantaggi:

- Ha molte parti a sbalzo che ne influenzano il comportamento dinamico. Infatti, se si vuole ottenere una buona precisione anche all'aumentare dello sbraccio, è necessario irrobustire la struttura meccanica rendendo il robot più pesante. In questo modo si riducono le accelerazioni e le velocità massime che esso può raggiungere all'interno del suo volume di lavoro.

Geometria sferica

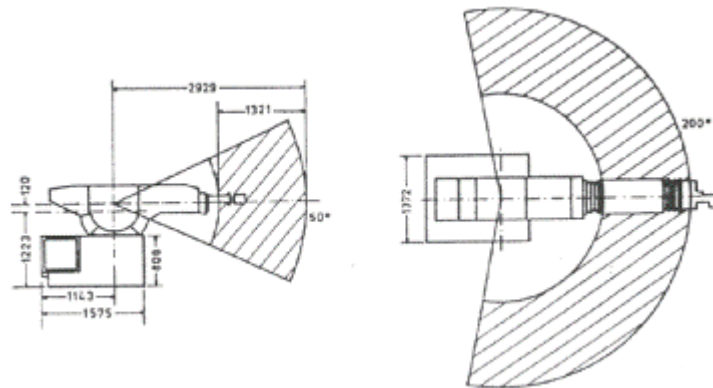


Figura 3 Robot seriale a geometria sferica: vista laterale e vista in pianta

Per ottenere il manipolatore in figura 3 basta sostituire al manipolatore di geometria cilindrica il secondo giunto (prismatico) con uno rotoidale.

Per la movimentazione dell'unico asse con coppia prismatica, vengono spesso usati attuatori oleodinamici.

Vantaggi:

- Discreta versatilità (possibilità di manipolare oggetti posti sulla base del robot).
- Buona precisione.

Svantaggi:

- Minore rigidezza meccanica rispetto alla geometria cartesiana e cilindrica.
- Costruzione meccanica più complessa rispetto alle altre geometrie.
- Ridotta ripetibilità.

Geometria SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

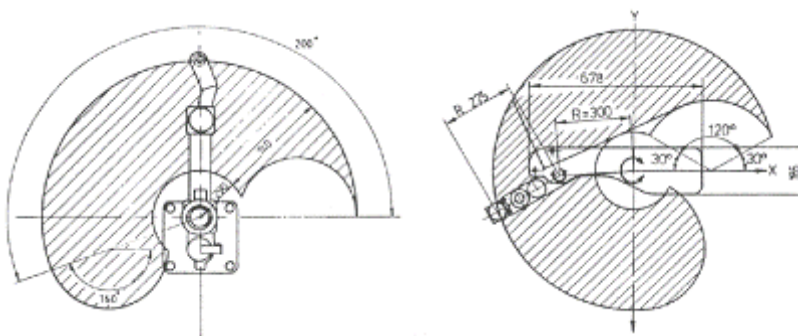


Figura 4 Robot seriale a geometria SCARA: vista in pianta e vista laterale

La geometria rappresentata in figura 4 si realizza disponendo due giunti rotoidali e uno prismatico in maniera tale che gli assi di moto siano tutti paralleli tra loro.

Vantaggi:

- Struttura con elevata rigidità meccanica ai carichi verticali.
- Particolarmente adatti per l'assemblaggio per inserimenti verticali.
- Velocità elevate di assemblaggio.
- Adatto per l'assemblaggio di piccoli oggetti.

Svantaggi:

- Cedevolezza meccanica ai carichi orizzontali (da cui il termine compliance, compatibilità).
- Precisione di posizionamento del polso si riduce alla distanza, del polso stesso, dall'asse di rotazione del primo giunto rotoidale.

Geometria antropomorfa

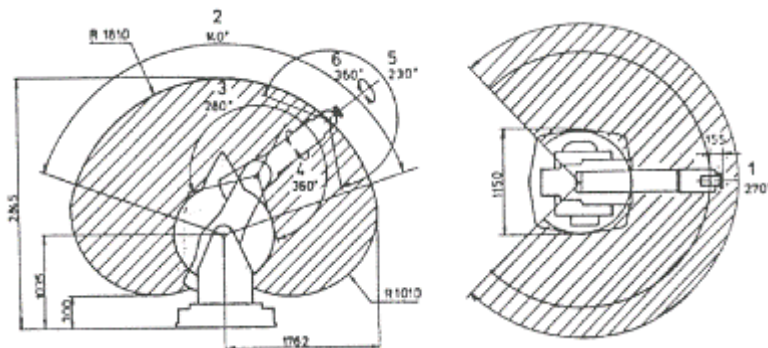


Figura 5 Robot seriale a geometria antropomorfa: vista in pianta e vista laterale

La geometria di figura 5 viene realizzata con tre giunti rotoidali. L'asse di rotazione del giunto di base è ortogonale agli altri due che sono tra di loro paralleli. Per la somiglianza con il braccio umano, il secondo giunto viene detto giunto di spalla e il terzo giunto (quello che unisce 'braccio' e 'avambraccio') viene detto giunto di gomito.

Vantaggi:

- Struttura molto mobile e dotata di maggior destrezza rispetto alle altre strutture considerate precedentemente.
- Ottima versatilità e flessibilità che li rendono adatti a numerose applicazioni.

Svantaggi:

- Precisione di posizionamento del polso variabile in tutto lo spazio di lavoro.

1.2.2 Analisi dei principali manipolatori a cinematica parallela

I robot paralleli sono caratterizzati da una piattaforma mobile unita da alcune “gambe estensibili” ad una piattaforma fissa a telaio. Questi arti sono tutti uguali e sono dotati di un attuatore ciascuno (molte volte pneumatico o idraulico). Questa struttura prende il nome di *Piattaforma di Gough-Stewart* (o più semplicemente *Piattaforma di Stewart*).

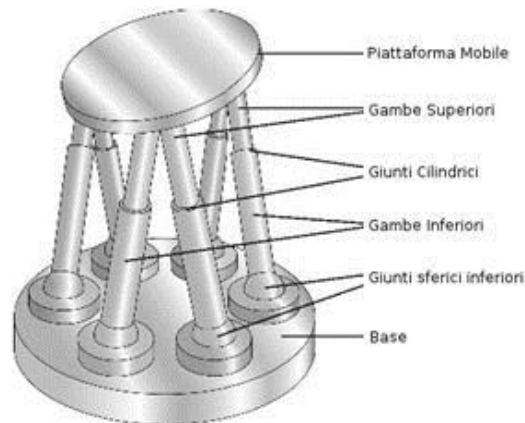


Figura 6 Piattaforma di Stewart

Come si può vedere nella figura 6, nella piattaforma di Stewart gli attuatori sono disposti in maniera tale da avere a due a due un punto in comune alternativamente con la base fissa e l’end-effector. Il collegamento avviene tramite sei giunti sferici uguali sulla base e sei giunti sferici altrettanto uguali sulla piattaforma mobile.

Le strutture parallele più comuni sono a tre gradi di libertà (tripodi) o a sei gradi di libertà (esapodi).

Una classificazione può essere fatta in base alla tipologia del moto che i vari robot paralleli generano:

- Robot per moti piani
- Robot per moti spaziali
- Robot per moti spaziali di pura traslazione
- Robot per moti spaziali sferici

Robot per moti piani

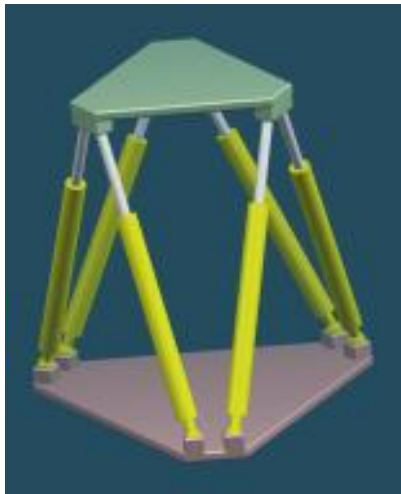
In realtà, questa tipologia di robot, può essere ricondotta a vari meccanismi articolati piani. Per esempio il quadrilatero o il pentilatero.

Robot per moti spaziali

Sono caratterizzati da sei assi. Possono assumere diverse architetture che però, si riconducono a quella fondamentale della *Piattaforma di Stewart*. La sua variante più diffusa è quella rappresentata in figura 7. I sei arti sono disposti simmetricamente in modo da formare due triangoli equilateri sia sulla base fissa sia base mobile e sono ad esse connessi tramite due coppie sferiche.

Ogni arto è composto da due membri collegati tra loro da una coppia prismatica: la sua attuazione consente di variare la lunghezza delle gambe e quindi di controllare la posizione e l'orientamento della piattaforma. Questa architettura viene chiamata 6-SPS per indicare la sequenza delle coppie in ciascuna delle gambe.

In realtà si sostituisce spesso una coppia sferica con una coppia universale (arto SPU), in questo modo vengono eliminate i movimenti dell'arto lungo il proprio asse (si eliminano i gradi di libertà passivi).



(a)



(b)

Figura 7 Realizzazione schematica (a) Realizzazione industriale (b)

Vantaggi:

- Gli arti risultano caricati esclusivamente da sforzi normali, per cui possono essere ottenute elevate rigidità anche con l'uso di strutture più leggere

Svantaggi:

- Difficoltà nella realizzazione del robot. Le coppie multiple suggeriscono la duplicazione dei giunti di estremità

Robot per moti spaziali di traslazione

L'architettura di questi robot è ancora in fase di studio da molte università. Tutte le eventuali nuove strutture si basano comunque sul modello 'Delta' introdotto da Clavel (Figura 8), poi sviluppato da molte case produttrici.



Figura 8 Robot Delta di Clavel

Vantaggi:

- Maggior facilità nel controllo di posizione del robot. La rotazione infatti dell'end-effector rende più difficile il controllo del robot.
- Caratteristiche di leggerezza, buona rigidità, ottime prestazioni dinamiche tipiche di tutti i robot paralleli.
- Semplicità cinematica.

Svantaggi:

- La presenza di dodici giunti sferici, nove rotoidali, nove aste e le due piattaforme rendono la sua realizzazione un processo laborioso e costoso.

Robot per moti spaziali sferici

Un moto si definisce sferico quando caratterizzato da pure rotazioni attorno ad un punto che rimane fisso nello spazio.

E' stato dimostrato che l'unico tipo di giunto ammissibile è quello rotoidale, con l'ulteriore vincolo che gli assi di tutte le coppie siano concorrenti.

Esiste pertanto una sola architettura ammissibile per questo tipo di robot che è quella mostrata in Figura 9 detta versione di *Gosselin e Angels*.

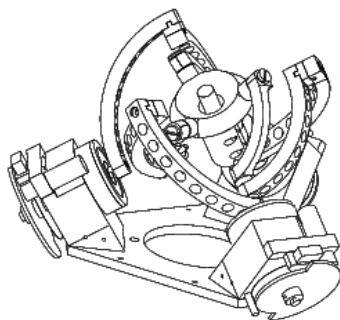


Figura 9 Robot per moti spaziali sferici di Gosselin e Angels

Vantaggi:

- Mobilità assoluta all'interno dello spazio di lavoro.
- Vantaggi tipici dei robot paralleli.

Svantaggi:

- Realizzazione complicata e costosa

CAPITOLO 2: ANALISI E CONFRONTO TRA I ROBOT INDUSTRIALI IN COMMERCIO

Sono presenti sul mercato numerosi tipi di robot industriali, sia a cinematica seriale (antropomorfi) e sia a cinematica parallela. In questo paragrafo verrà fatto un confronto tra i principali tipi di robot delle maggiori case costruttrici. Verranno visti i diversi campi di applicazione dei robot presi in esame, ne verranno verificate le differenze costruttive e verranno messe in luce le differenti prestazioni dinamiche.

2.1 Confronto tra cinematica seriale e parallela

Le principali differenze tra i robot a cinematica seriale e parallela riguardano:

- Lo spazio di lavoro
- Rigidezza della struttura
- Massa del robot a parità di payload (capacità di carico del robot)
- Accelerazioni e velocità raggiunte dall'end-effector e relative prestazioni dinamiche del robot
- Vibrazioni della struttura meccanica in rapporto alle velocità e accelerazioni raggiunte

Per vedere come queste caratteristiche si ripartiscono tra le differenti catene cinematiche in analisi, consideriamo i datasheet di due robot manipolatori, il primo a cinematica seriale e il secondo a cinematica parallela.

Per visualizzare in maniera migliore le differenze prestazionali, tecniche e di impiego, si considerano due robot della stessa casa costruttrice con valori di carico nominali simili (i payload nominali sono infatti 2,5 kg nell'antropomorfo e 2 kg nel parallelo per moti spaziali) .

I robot considerati sono i seguenti modelli:

CAPITOLO 2: ANALISI E CONFRONTO TRA I ROBOT INDUSTRIALI IN COMMERCIO

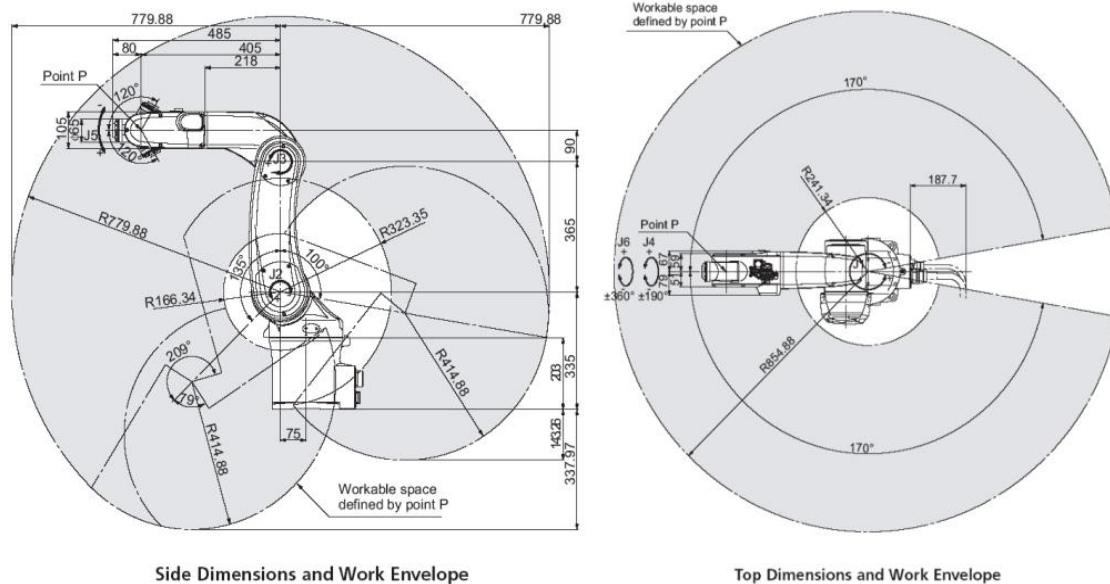


Figura 10 Dimensioni e area di lavoro del Viper s850

2.1.1 Cinematica seriale Robot antropomorfo modello Adept Viper s850

Number of axes	6
Reach	855 mm
Payload	Rated 2,5 kg
	Max 5 kg
Adept cycle	Burst Mode 0 kg - 0,618 s
Joint ranges	Joint 1 $\pm 170^\circ$
	Joint 2 $-190^\circ, 45^\circ$
	Joint 3 $-29^\circ, +259^\circ$
	Joint 4 $\pm 190^\circ$
	Joint 5 $\pm 120^\circ$
Inertia moment (max allowable)	Joint 6 $\pm 360^\circ$
	Joint 4 0,295 kgm ²
	Joint 5 0,295 kgm ²
Max allowable moment	Joint 6 0,045 kgm ²
	Joint 4 11,8 Nm
	Joint 5 9,8 Nm
Joint speeds	Joint 6 5,9 Nm
	Joint 1 250°/s
	Joint 2 250°/s
	Joint 3 250°/s
	Joint 4 375 °/s
	Joint 5 375°/s

	Joint 6 600°/s
Repeatability	XYZ ± 0,03 mm
Pass through connections (routed from robot base to other links)	Electrical
	Pneumatic 4 mm (x6)
	Pneumatic 6 mm (x1)
Brakes	Joints 2 - Joints 6
Mounting	Floor, table and ceiling
Weight	29 kg
Environmental requirements	Ambient temperature 5 - 40°C
	Humidity range 5 - 90% (non condensing)
Power requirements SmartController	24 VDC, 5 A
Power requirements for MotionBlox-60R	24 VDC, 6 A
	- 240 VAC, 10 A (single phase)

Tabella 1 Caratteristiche tecniche Viper s850

2.1.2 Cinematica parallela Modello Adept Quattro s650H

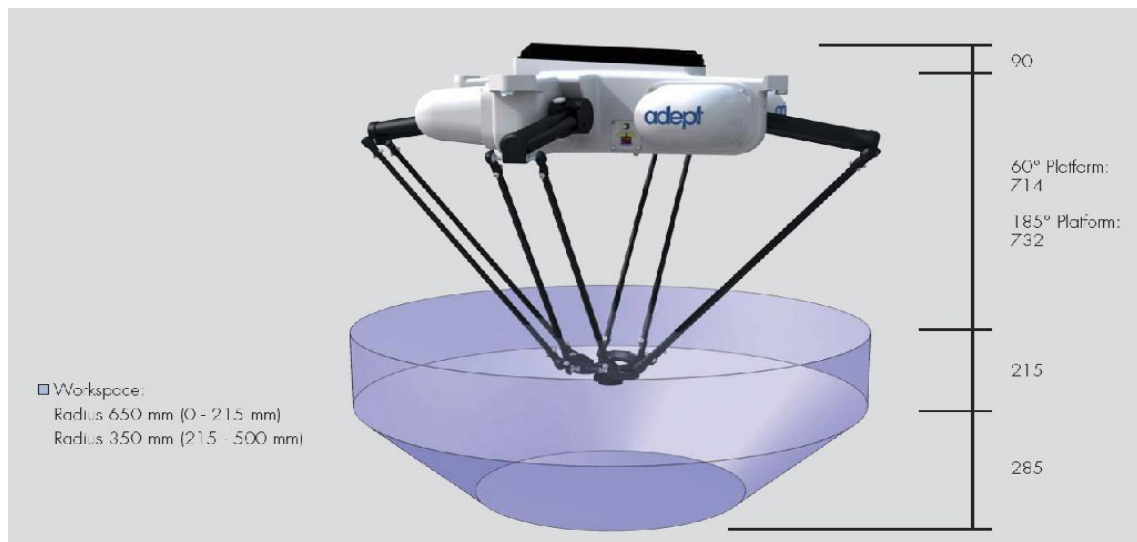


Figura 11 Dimensioni e area di lavoro del Quattro s650H

Number of axes	4
Payload	Rated 2 kg
	Max 6 kg
Working range	Diameter 1300 mm

	Height 500 mm		
	Rotation	0° (fixed) (P30)	
		± 46,25° (P31)	
		± 92,5 (P32)	
		± 185° (P34)	
Repeatability	± 0,1 mm (Uni-directional)		
Max speed	10 m/s		
Max acceleration	150 m/s ²		
Robot cycle Times, sustained (seconds, at 20° C ambient)	Payload	Standard Cycle (Adept cycle in mm 25/305/25)	Extended Cycle (in mm 25/700/25)
	0,1 kg	0,3 s	0,46 s
	1,0 kg	0,36 s	0,47 s
	2,0 kg	0,37 s	0,52 s
	4,0 kg	0,41 s	0,58 s
	6,0 kg	0,43 s	0,61 s
Power requirements	24 VDC, 5 A - Adept smartcontroller		
	24 VDC, 6 A - AIB		
	200 to 240 VAC, 10 A single phase		
Protection	Base IP-65		
	Platform IP-67		
Enviromental requirements	Ambient temperature 1 - 40° C		
	Humidity range 5 - 90% (non condensing)		
Weight	117 kg		

Tabella 2 Caratteristiche tecniche Quattro s650H

2.1.3 Confronto seriale-parallelo

Una prima differenza riguarda lo spazio di lavoro che, nell'antropomorfo è quasi un'intera sfera (cava) di raggio 855 mm (ad eccezione ovviamente dell'angolo morto) mentre nel parallelo questa area si riduce notevolmente.

Per contro, il robot parallelo, grazie ad una maggior distribuzione dei carichi inerziali nella sua struttura, riesce a raggiungere velocità ed accelerazioni molto più elevate rispetto all'antropomorfo (con piccoli carichi). Di conseguenza il 'Quattro' ha dei tempi di ciclo decisamente minori del seriale. Infatti la durata di un ciclo standard nel

Viper senza carico applicato è di 0,618 s, mentre nel parallelo troviamo un valore di circa 0,4 s (chiaramente a parità di carico utile).

Da questo aspetto, si possono trarre conclusioni anche dal punto di vista dei carichi inerziali. Nel robot parallelo le masse sono distribuite in maniera migliore rispetto all'antropomorfo. Se si guarda per esempio al posizionamento dei motori e dei vari stadi di riduzione del moto, si vede come nel 'Quattro' essi siano posizionati simmetricamente, mentre questo non avviene nell'antropomorfo. Questa differenza di distribuzione di masse permette al parallelo di raggiungere accelerazioni e velocità più elevate del seriale.

Un altro aspetto molto importante e sul quale si concentrano i moderni studi sui robot è la massa di questi robot e, più principalmente, sul rapporto massa carico trasportato/massa robot (load to weight ratio). Dalle specifiche tecniche riportate si vede che l'antropomorfo ha una massa di 29 kg con un carico applicabile nominale al polso di 2,5 kg, il 'Quattro' invece supera di molto la massa del seriale con 117 kg con un carico trasportabile nominale pari a 2 kg.

I load to weight ratio risultano quindi essere i seguenti:

- 2,5:29 (circa 1:12) nel Viper s850
- 2:117 (circa 1:59) nel Quattro s650H

Nei due casi i robot hanno una massa di 12 e 59 volte maggiore rispetto al carico trasportato. Verranno trattati in seguito i problemi di questa proprietà comune a tutti i robot industriali, che caratteristiche comporta e quali sono gli sviluppi della robotica in questa direzione.

Un altro aspetto molto importante nel quale i due robot differiscono è la caratteristica di ripetibilità, cioè la capacità di fornire un posizionamento uguale nel tempo. Più piccolo è il valore di ripetibilità, più il robot è preciso nel posizionamento nel tempo. L'antropomorfo è migliore da questo punto di vista. Ha una ripetibilità di 0,03 mm rispetto ai 0,1 mm del parallelo. Questo perché le braccia del 'Quattro' sono interessate da flessibilità e non offrono caratteristiche di ripetibilità come quelle del 'Viper'. Inoltre l'antropomorfo è decisamente più lento del parallelo e anche questo aspetto influisce sulla caratteristica di ripetibilità.

Proprio per queste diversità appena considerate, i principali campi di applicazione dei due robot sono spesso complementari.

Il parallelo è un robot con migliori prestazioni dinamiche rispetto all'antropomorfo (quando i carichi sono relativamente piccoli, altrimenti per carichi grandi le sue prestazioni dinamiche decadono molto rapidamente). Per questi motivi, i suoi principali impieghi sono automazioni che riguardano il packaging, il trasporto di

materiale e automazioni veloci che comunque richiedono un'alta dinamica e carichi non troppo elevati.

Il seriale invece, è un robot più generico (adatto per applicazioni generali di base). Esso deve avere buone prestazioni dinamiche anche con carichi maggiori rispetto al parallelo. Per questi motivi esso viene usato spesso in impianti costituiti da delle celle robotizzate all'interno delle quali è presente il robot antropomorfo per l'asservimento di tutte le altre automazioni dell'impianto trasportando i pezzi, alle volte anche pesanti, da una lavorazione ad un'altra o da una lavorazione ad un nastro trasportatore.

2.1.4 Robot SCARA Modello Cobra i600

Trattiamo separatamente alle altre catene cinematiche una particolare geometria di robot che è lo SCARA. Questo robot ha una particolare geometria che è un'evoluzione della geometria cartesiana (cinematica seriale). Infatti lo SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Arm) presenta rigidità lungo l'asse Z lungo il quale può compiere solo movimenti di pura traslazione (coppia prismatica) mentre presenta cedevolezza negli assi X e Y. Ciò può tornare utile in fase di assemblaggio (si pensi alle problematiche di inserimento di una spina in un foro). Da questa caratteristica deriva il termine 'Selective Compliant'. Uno schema semplificato dello SCARA si ha in figura 12.

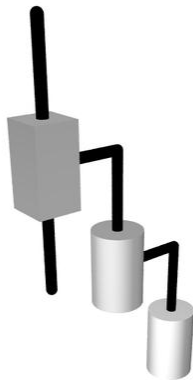


Figura 12 Schema cinematico del robot SCARA

Il robot SCARA che prenderemo in esame sarà il Cobra i600 della Adept. Viene riportato in tabella 3 il datasheet del robot considerato.

CAPITOLO 2: ANALISI E CONFRONTO TRA I ROBOT INDUSTRIALI IN COMMERCIO

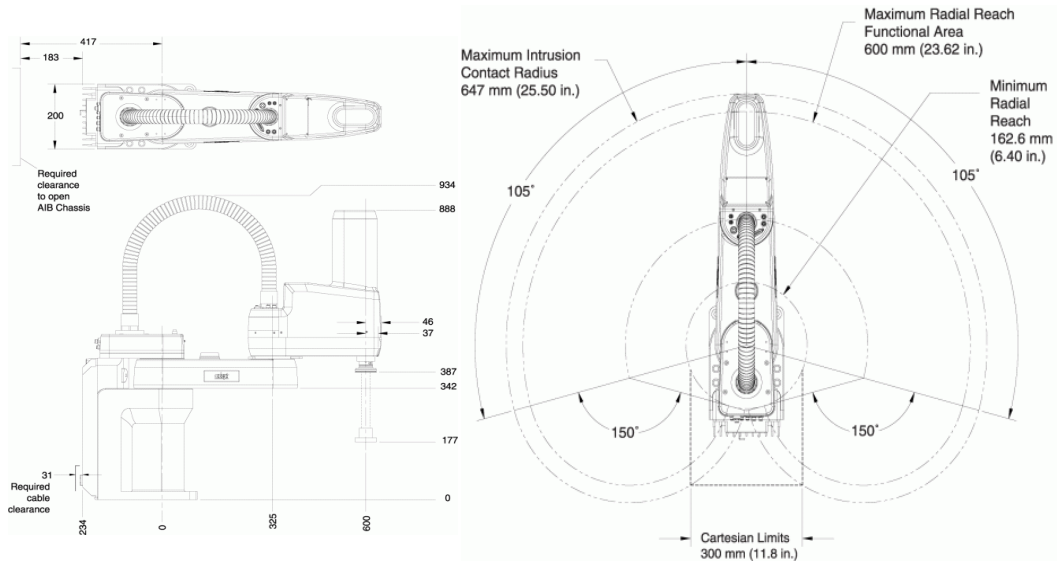


Figura 13 Dimensioni e area di lavoro del Cobra i600

Number of axes	4
Reach	600 mm
Payload	Rated 2 kg
	Max 5,5 kg
Adept cycle	Burst Mode 0,42 s
	Sustained (20°C) 0,45 s
Joint ranges	Joint 1 $\pm 105^\circ$
	Joint 2 $\pm 150^\circ$
	Joint 3 210 mm
	Joint 4 $\pm 360^\circ$
Joint speeds	Joint 1 386°/s
	Joint 2 720°/s
	Joint 3 1100 mm/s
	Joint 4 1200°/s
Repeatability	XY $\pm 0,017$ mm
	Z $\pm 0,03$ mm
	Theta $\pm 0,019^\circ$
Pass through connections	Electrical 24 (12 twisted pairs)
	Pneumatic 6 mm (x2) 4mm (x3)
	DeviceNet 1

Digital I/O channels	AIB: 12 inputs, 8 outputs
	Optional solenoid: 4 outputs
Weight	41 kg
Environmental requirements	Ambient temperature 5 - 40°C
	Humidity range 5 - 90% (non condensing)
Power requirements	24 VDC, 6A
	200-240 VAC, 10 A single phase

Tabella 3 Caratteristiche tecniche del Cobra i600

2.1.5 Confronto SCARA-seriale-parallelo

Le prime differenze che emergono dal datasheet del ‘Cobra’ rispetto agli altri robot trattati precedentemente riguardano lo spazio di lavoro.

Si vede come l'area di lavoro raggiunta dallo SCARA in esame sia notevolmente più piccola rispetto al Viper, anche considerando antropomorfi con sbraccio comparabile, e comunque minore rispetto al 'Quattro'.

Per contro il ‘Cobra’ è però in grado di operare a velocità molto più elevate rispetto all'antropomorfo.

Lo sbraccio di questo SCARA è in genere di 600 mm massimi. Di norma tutti questi tipi di robot hanno raggio di applicazione molto ridotto. Per avere un raggio d'azione più lungo si dovrebbero allungare i membri. Questa operazione però comporterebbe problemi elastici, di distribuzione delle masse e di controllo rilevanti.

Il load-weight ratio di questo robot è leggermente peggiore dell'antropomorfo. Infatti il robot ha una massa di 41 kg e può supportare un carico massimo di 5,5 kg. Il load to weight ratio risulta quindi essere 5,5:41 (circa 1:8).

Queste caratteristiche portano lo SCARA ad avere i suoi principali impieghi in automazioni molto veloci di cui non si ha bisogno di grandi spazi di servizio (questo robot ha lo spazio di lavoro più piccolo) ma di elevate prestazioni in termini di dinamica, precisione e ripetibilità (dal datasheet si nota infatti che la ripetibilità sugli assi X, Y, Z è minore sia rispetto al ‘Viper’ sia rispetto al ‘Quattro’).

CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE

In questo capitolo verranno analizzati i vari azionamenti presenti nei moderni robot industriali. Verranno esaminate la parte elettrica (principalmente i motori usati per muovere i link), la parte meccanica che comprende lo stadio di riduzione del moto (rotismi) e la parte di controllo multiloop classica (anelli di corrente/coppia, velocità e posizione). In entrambi i casi discussi (Adept e ABB) si assumono soluzioni standard allo stato dell'arte, sia in termini di hardware che di algoritmo di controllo.

3.1 Azionamento Adept

3.1.1 Motori e stadio di riduzione del moto

I motori usati da Adept sono principalmente AC Brushless. Essi sono impiegati in tutti i robot analizzati precedentemente.

I pregi di questi motori sono:

- Prestazioni dinamiche elevate
- Ridotta rumorosità
- Non sono presenti contatti striscianti. Si riduce pertanto la manutenzione e si aumenta l'affidabilità del sistema
- Maggior rendimento

Per contro questi motori:

- Necessitano di un'elettronica di comando particolare

I riduttori usati sono tipo 'Harmonic Drive' (riduttori cosiddetti a gioco nullo).

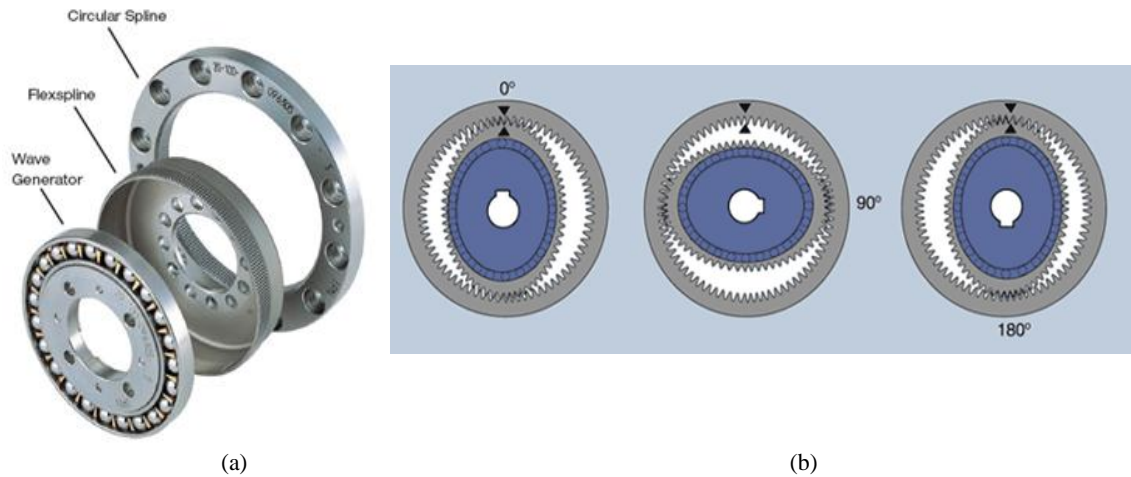


Figura 14 Il riduttore Harmonic Drive: a) componenti b) principio di funzionamento

I vantaggi che offrono gli HD, rappresentati in figura 14, rispetto ad altri sistemi di riduzione, come ad esempio gli epicicloidali, sono i seguenti:

- Elevati rapporti di riduzione (1:50 fino a 1:320)
- Buona accuratezza e ripetibilità
- Basso gioco
- Alta rigidezza torsionale
- Alta affidabilità
- Alta capacità di carico (fino a 6000 Nm)
- Alto rendimento
- Reversibilità
- Elevata compattezza

3.1.2 Controllo

I robot presi in considerazione precedentemente sono supportati dalla stessa unità di controllo che comprende l'Adept SmartController CX e il controllo del moto svolto dall'Adept Smart Motion Control.

Di seguito ne vengono riportati i datasheet.

CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE
DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE

Adept SmartController CX

Dimensions (mm)	329x187x86
Weight	2,75 kg
Power requirements	24 VDC (\pm 10%), 120 W (5 A)
Environmental requirements	Ambient temperature 5 – 40°C
	Humidity Range 5 – 90 % (non condensing)
Mounting Options	Panel mount (kit included)
	Rack mount
	Stack mount
	Desktop
Memory	128 MB Compact Flash
	32 MB RAM
Conveyor Belt Tracking support	(requires V+ extensions)
Digital I/O	Inputs: 12 optically isolated (including 8 fast input)
	Outputs: 8 optically isolated
Communication Interfaces	RS-232 serial port (3x)
	RS-422/485 serial port
	10/100 Base-T Ethernet
	SmartServoInterface (2x)
Software	V+ multitasking operating system & programming language
	Adept ACE
	TCP/IP Interface
Adept Robot Support	Adept Cobra s-series robot
	Adept Viper robot
	Adept Quattro robot
	Adept Python linear modules

Tabella 4 Caratteristiche tecniche dello SmartController CX

**CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE
DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE**

Questo controllore ha la capacità di controllare fino a quindici robot contemporaneamente (fino ad un massimo di 24 assi).

Si tratta di un controllore che integra al suo interno anche il controllore di moto (Adept Motion Control).

Adept Smart Motion Control

Amplifier drive signal command	± 10V analog
Amplifier drive resolution	16 bit
	Instrument grade
	High linearity
Axis interface signals	Dedicated signals for each axes, optical isolated (5 per axis, 1 per sM16)
Encoder channel frequency	32 Mhz edge rate max
Encoder channel type	Incremental A/B quadrature
	Index optional
Encoder channel voltage	5 VDC
	RS-422 line drive
	differential or single ended
Encoder power	User supplied
Maximum axes per system	24 (requires for sM16 modules)
Mechanism parameters	User-defined axis limits
	Duty-cycle limits
	Envelope Limits
	User defined acceleration profiles allow S-curve or trapezoidal velocity profiles
Number of axes of control per module	SM16: 6
Servo gain parameters	Proportional gain
	Proportional pole
	Proportional zero
	Integral gain
	Maximum integrator value
	Maximum integrator step
	Velocity feed-forward gain

**CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE
DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE**

	Acceleration feed-forward gain
	DAC output filter
Servo loop rate	8 kHz
Trajectory generation	Default is 16 ms. User configurable to 2ms, 4ms, 8ms with optional control

Tabella 5 Caratteristiche tecniche del controllore di moto SmartMotion

Come si può dedurre dal datasheet, il controllo del moto (controllo di coppia da dare al motore) e della posizione viene realizzato tramite il classico controllore PID di posizione (Proporzionale-Integrale-Derivativo) con due feed-forward, uno di velocità e uno di accelerazione. Segue un piccolo schema generale per il controllo del motore di ogni asse del robot realizzato da Adept.

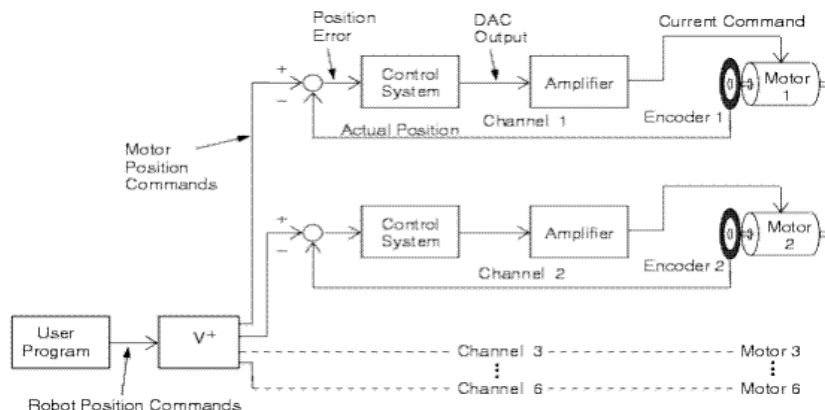


Figura 15 Schema generale per il controllo dei motori degli assi di

Viene visualizzato ora lo schema a blocchi del sistema di controllo (blocco 'Control System') visualizzato nello schema precedente.

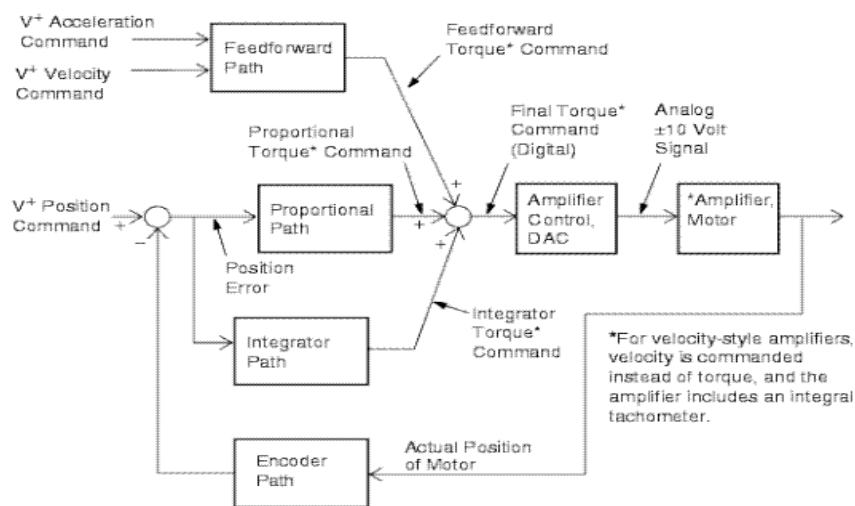


Figura 16 Schema a blocchi che rappresenta la composizione del blocco 'Control System' visualizzato in figura 15

Analizziamo i blocchi che compongono il sistema di controllo di Adept per i vari assi.

Feedforward path

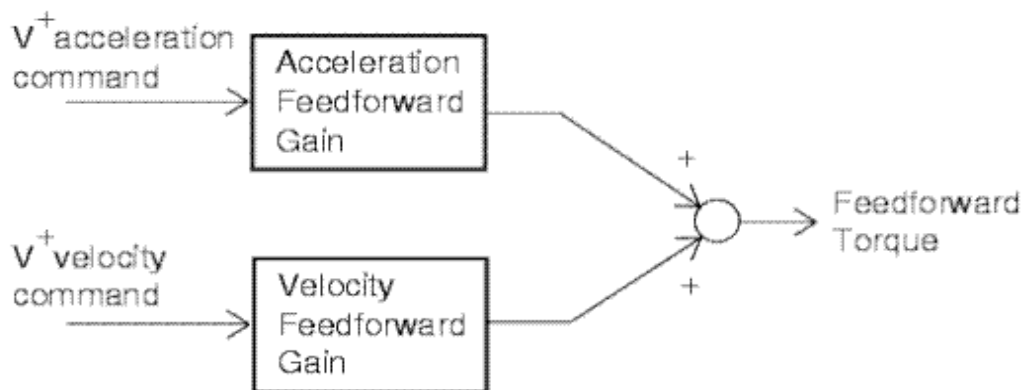


Figura 17 Schema a blocchi relativo al blocco 'feedforward' presente nello schema del sistema di controllo

Il blocco rappresentato in figura 17 è costituito principalmente da tre parametri:

- Guadagno del feedforward di velocità
Il guadagno del feedforward di velocità viene usato per generare un comando di coppia in funzione della velocità richiesta. Tale feedforward di velocità è utile nel ridurre l'errore di inseguimento durante movimenti di rotazione lenti, soprattutto nei sistemi con attrito statico.
- Guadagno del feedforward di accelerazione
Il guadagno del feedforward di accelerazione viene usato nel produrre una coppia direttamente proporzionale al valore di accelerazione dato dal software.
Dalla nota formula $C = J * a$ dove:
C=coppia richiesta al motore
J=momento di inerzia del carico
a=accelerazione angolare
Questo sistema di feedforward risulta utile quando si possono avere sistemi da muovere con carico variabile.
- Guadagno del feedforward di attrito statico.
Questo parametro permette di fornire maggiore coppia al motore facendo diminuire l'errore di inseguimento nella catena di retroazione. Esso permette un movimento più rapido dell'asse all'avvio del motore anche in presenza di un carico (attrito statico maggiore). Questo sistema può anche essere utile per motori che hanno un'elevata induttanza.

Proportional path

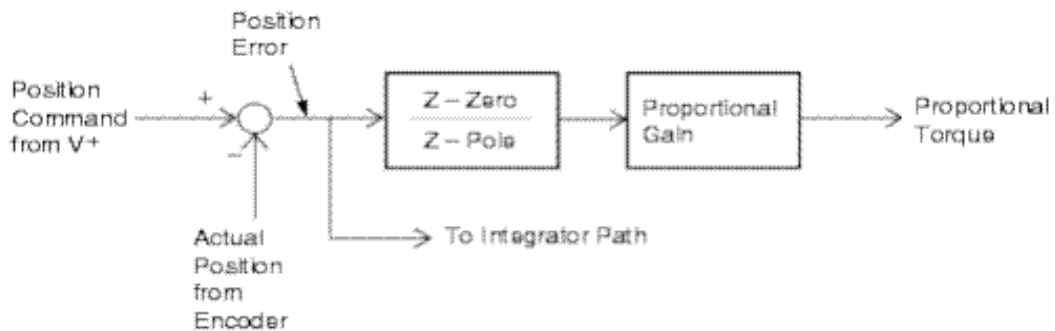


Figura 18 Schema a blocchi relativo al blocco 'proportional path' presente nello schema del sistema di controllo

Nello schema di figura 18 si possono riconoscere due blocchi:

- Un blocco costituito da un filtro digitale con uno zero o un polo nell'origine. La funzione di questo filtro è quella di modificare la risposta impulsiva del sistema motore-carico. Di solito il motore risponde con una sovraelongazione. L'uso dello zero (o del polo nel caso contrario, cioè se si ha una sottoelongazione) ha lo scopo di far avere al motore, e quindi al sistema, una migliore risposta dinamica conferendo il desiderato margine di fase.
- Il secondo è un blocco di guadagno proporzionale. Esso contribuisce a rendere più rigido il sistema e a diminuire l'errore di inseguimento della posizione.

Integrator path

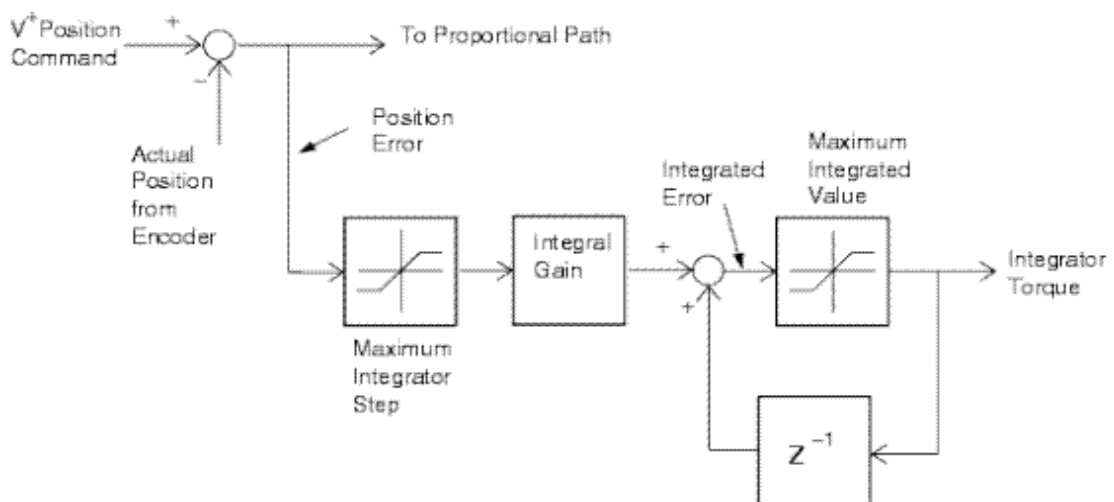


Figura 19 Schema a blocchi relativo al blocco 'integrator path' presente nello schema del sistema di controllo

Il blocco integratore schematizzato in figura 19 annulla l'errore di inseguimento a regime della posizione. La funzione del blocco Z^{-1} è quello di causare un ritardo di un tempo di ciclo in modo che il blocco sommatore sommi sempre l'errore al tempo precedente. Così facendo il sistema riesce a generare un certo valore di coppia che rende nullo a regime l'errore di posizione, prevenendo da crescite incontrollate della variabile integrata e quindi saturazioni che possono determinare sovraelongazione.

Encoder path

Gli encoder utilizzati sono incrementali in quadratura (tramite i due segnali sfasati A e B si può risalire al verso di rotazione del motore) con l'opzione zero index. Frequenza massima di impulsi in ingresso 8 MHz. Il numero di impulsi per giro è modificabile tramite un filtro. Il numero massimo è 65 536 impulsi/giro. L'alta risoluzione permette un'elevata accuratezza nel posizionamento.

Stadio di amplificazione e di controllo

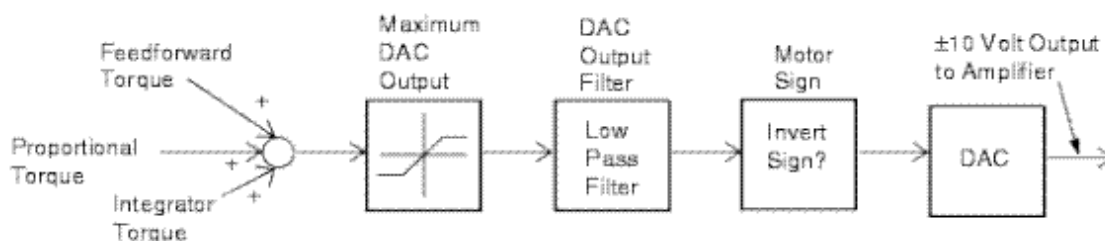


Figura 20 Schema a blocchi relativo al blocco 'amplifier control e DAC' presente nello schema del sistema di controllo

In questa sezione dello schema a blocchi di partenza vengono svolte le seguenti operazioni:

- Il blocco di saturazione controlla ed impone il valore di coppia massima da fornire al motore.
- Il filtro passa basso (LP) rimuove le componenti ad alta frequenza del comando di coppia.
- Il blocco di 'Invert sign' è fondamentale. Effettua il cambiamento di segno al valore della coppia da dare al motore. Se non ci fosse questo blocco si potrebbe verificare il caso di retroazione positiva (positive feedback) che porterebbe all'instabilità del sistema.

Le principali funzionalità offerte dall' Adept Motion Control sono:

- Interpolazione lineare/cicolare
- Possibilità di comandare un asse con due motori differenti (un motore che di norma comanda un certo asse, viene dirottato a pilotare il movimento di un nuovo asse)
- 'Backlash Compensation'. Il software aggiunge automaticamente la distanza di backlash al suo movimento
- Compensazione lineare. Il robot è in grado di correggere gli errori e di tracciare una linea compensando tali errori
- Compensazione ortogonale. Il robot effettua una correzione via software degli errori di posizionamento a 90° tra i link
- Sistema di diagnostica. Permette di risolvere problemi che si sono verificati nel robot

Inoltre vi è anche la presenza di una libreria di comandi da dare al robot che non sono del software V+ (Adept).

3.2 Azionamento ABB

3.2.1 Motori e stadio di riduzione

Per quanto riguarda l'aspetto hardware dell'intero azionamento, ABB usa come i principali costruttori di robot manipolatori industriali riduttori Harmonic Drive e motori AC brushless.

3.2.2 Controllo

Prendiamo in considerazione il controllore IRC5 della ABB. Verranno evidenziate le particolari funzionalità e le soluzioni adottate da ABB nel controllo dei robot.

L'algoritmo di controllo del moto è stato sviluppato sulla base del classico PID e può movimentare un numero massimo di 36 assi.

Particolarmente interessanti a livello software sono le applicazioni denominate 'SoftServo' e 'Absolute Accuracy'. La prima viene usata nei casi in cui i materiali o gli utensili non possono essere posizionati in modo particolarmente preciso. In questo caso il robot si comporta come una molla meccanica dotata di cedevolezza (Soft Servo Mode).

CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE

La funzione 'Absolute Accuracy' invece, compensa i movimenti meccanici del carico indesiderati come le oscillazioni. In questo modo si riesce a diminuire notevolmente il tempo di ciclo. Questo sistema assicura invece una precisione prossima a 0,5 mm all'interno dell'intero workspace.

Viene riportata una tabella con i valori di accuratezza che questa funzione può garantire:

Robot type	Position accuracy (typical product data)		
	Average (mm)	% within 1mm	Maximum (mm)
IRB 140	0,35	100	0,75
IRB 1600	0,3	100	0,65
IRB 4600-45/2.05	0,8	100	0,4
IRB 6640 (all variants)	0,5	97	1,2

Tabella 6 Valori di accuratezza su alcuni robot ABB con la funzione Absolute Accuracy

L'algoritmo di controllo per effettuare queste compensazioni risulta essere di non facile comprensione dato che il problema della compensazione è fortemente non lineare.

La soluzione proposta da ABB è di far compensare la posizione al controllore (tramite il software 'Calibware').

Quest'ultimo software, collegato ad un opportuno sistema di misura 3D è usato per calcolare i parametri di compensazione corretti da fornire al controllore del robot.

Un'altra funzione interessante è la 'Collision Detection'. Questa funzionalità non solo riduce la forza di impatto della collisione, ma previene anche il robot e il suo utensile dalla possibilità di essere schiacciati dopo l'impatto.

Tale specifica software riesce ad individuare probabili collisioni in tutte le direzioni e, dato che è un sistema che non integra al suo interno ne parti meccaniche ne cablaggi di vario genere, è una specifica molto affidabile e che permette migliori performance di orientamento a collisione avvenuta (se non ci sono dispositivi collegati all'end effector).

Per rendersi conto dell'utilità di questa funzione (realizzata tramite controllo di impedenza), vengono riportate di seguito le curve che graficano forza di impatto dell'utensile in funzione del tempo (figura 21). La curva arancione indica la forza di

impatto in mancanza di 'collision detection', la curva azzurra indica il caso di 'collision detection' presente e la curva verde indica la forza di impatto in presenza del solo dispositivo meccanico di riduzione dell'attrito.

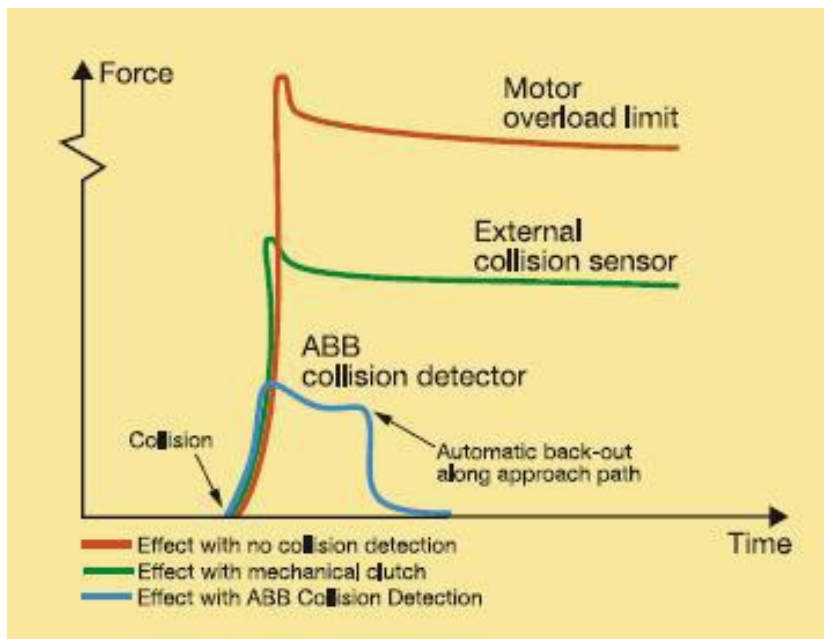


Figura 21 Curve forza impatto in funzione del tempo in assenza di Collision detection, sistema meccanico di riduzione dell'attrito e presenza di Collision detection

I principali vantaggi di questo software sono:

- Individuazione della collisione in ogni direzione
- Riduzione della forza di collisione e quindi anche di danni al robot e ai suoi dispositivi
- Alta affidabilità

I campi di applicazione di questo sistema sono svariati. I casi dove questa funzione risulta essere fondamentale sono:

- Quando non si ha la sicurezza del percorso che deve fare il robot sia libero da ingombri
- In collisioni che possono verificarsi all'avviamento del robot
- In applicazioni nelle quali si possono incontrare oggetti di disturbo del movimento

CAPITOLO 3: ANALISI DELLE MODALITA' DI REALIZZAZIONE
DELL'AZIONAMENTO E DI CONTROLLO DELL'ASSE

CAPITOLO 4: LIGHTWEIGHT ROBOT

I robot industriali sono principalmente usati per posizionamenti ripetitivi (cicli di lavoro) in ambienti conosciuti e determinati. Essi hanno quindi bisogno di ottime caratteristiche di accuratezza di posizionamento e di ripetibilità. Tali robot sono infatti specializzati nel posizionamento accurato dell'utensile (ripetibilità ed massima accuratezza) a relativamente alte velocità (tempi di ciclo bassi). Per avere tali caratteristiche la struttura dei link deve essere molto rigida. Perciò questi robot presentano una struttura meccanica rigida a scapito di un'elevata massa dell'intero robot. Il controllo di questi robot risulta essere relativamente semplice utilizzando schemi standard di controllo.

Da circa un ventennio nuove frontiere si sono aperte nella ricerca e sviluppo di nuovi robot. Particolare interesse suscitano le nuove applicazioni nel campo aerospaziale. Un grande contributo in questo senso a questa innovazione è stato dato dall'Istituto di Robotica e di Sistemi dinamici della DLR (Deutschen Zentrums für Luft-und Raumfahrt), il dipartimento di ricerca spaziale tedesco.

Contrariamente allo sviluppo tecnologico industriale, i robot usati per applicazioni spaziali devono avere caratteristiche diverse. Infatti in quest'ultime applicazioni, certe caratteristiche che erano peculiari del robot industriale non possono più essere sfruttate causa l'ambiente circostante di lavoro dove il robot si trova ad operare. La non conoscenza a priori dell'ambiente in cui dovranno operare fa in modo che alcune caratteristiche dei robot industriali, come l'assoluta accuratezza nel posizionamento, non risultino più fondamentali.

Le caratteristiche peculiari di questi nuovi robot devono quindi essere:

- Leggerezza della struttura meccanica
Alleggerendo la struttura si riducono notevolmente i momenti di inerzia dei link, si riduce il consumo di energia elettrica e si rende l'intera struttura più mobile e si possono usare altre fonti di alimentazione elettrica (batterie, celle fotovoltaiche,...)
- Ottimo load to weight ratio
- Ottime prestazioni dinamiche
- Capacità di lavorare in ambienti non conosciuti a priori
- Capacità di saper interagire sempre di più con l'uomo in processi sempre meno ciclici garantendone comunque l'incolumità e la sua sicurezza.

I lightweight robot possono trovare quindi applicazione in svariati campi quali:[2]

- La robotica di servizio che comprende anche i processi di assemblaggio industriale nei quali il robot deve operare con l'uomo in ambienti di lavoro sconosciuti a priori
- La robotica spaziale (dalla quale nasce proprio il loro sviluppo) che ha bisogno di robot con ottime caratteristiche di autonomia, mobilità e leggerezza.
- Robotica in campo medicale

Per contro questi robot risultano molto complessi nel loro controllo (si rende necessario un cosiddetto controllo di impedenza qualora vi sia interazione con l'ambiente). Verrà illustrato successivamente in questo capitolo la nuova concezione del 'controllo di impedenza'.

Questa nuova tecnologia, in parte già sviluppata e in parte in via di sviluppo, comprende svariate discipline di interesse:

- Meccatronica: sensori, attuatori, materiali leggeri, sviluppo di 'mani' (handling tool) per afferrare oggetti.
- Telerobotica: il controllo remoto di robot nello spazio (per i primi esperimenti)
- Sistemi di visualizzazione e di simulazione: l'uso di strumenti di visione fondamentali nel controllo remoto e la simulazione molto importante per la progettazione e lo sviluppo dei robot ultraleggeri.
- Automatica: l'innovazione di tecniche e degli algoritmi di controllo rispetto ai robot industriali.

3.1 Aspetti progettuali

Il lwr è stato concepito in modo modulare, cioè vari moduli vanno a costituire l'intero robot. Costruendo i vari moduli in materiali più leggeri, quali i compositi (fibre di carbonio) che hanno inoltre migliori caratteristiche prestazionali, è possibile ridurre le dimensioni del robot stesso a parità di resistenza e prestazioni. Si favorisce così la diminuzione dell'inerzia dei link, e quindi è possibile diminuire la massa e l'ingombro degli stadi di riduzione del moto contribuendo alla diminuzione della potenza dei motori che muovono le braccia con conseguente risparmio energetico.

La progettazione dei lightweight robot è il primo studio che si deve concentrare su questo nuovo concetto di modularità. Essa riguarda principalmente due aspetti:

- Aspetto meccatronico che riguarda gli aspetti di progettazione meccanici ed elettronici atti ad ottenere determinate caratteristiche tecniche dei lwr (leggerezza, riduzione delle dimensioni...)
- Aspetto legato alla movimentazione e al controllo dei link che riguarda la progettazione di come attuare e controllare il moto del robot

L'aspetto di progettazione meccatronica comprende:

- Integrazione della parte elettronica all'interno dei vari moduli. Ciò consente la progettazione di robot di complessità cinematica crescente (7 dof).
- Motori efficienti dotati di ottimi rendimenti. In contrasto con gli odierni robot industriali, non sono richiesti motori con elevate velocità. Sono richiesti invece motori elettrici con elevate coppie a moderate velocità, basse perdite di energia e con ottime caratteristiche dinamiche (eccellente risposta dinamica).
- Stadi di riduzione del moto che non appesantiscano la struttura, leggeri e con elevati rapporti di riduzione. Nei moderni robot ultraleggeri si usano principalmente HD.
- Misura completa dello stato del sistema. Per questo sono necessari oltre ai classici sensori di posizione, anche dei sensori di coppia in modo da 'controbilanciare' l'elasticità presente nel giunto.
- Ridondanza di sensori (posizione, forza, coppia) per la sicurezza completa dell'uomo che sta interagendo con il robot.

L'altro aspetto di progettazione comprende:

- Posizione degli attuatori all'interno del giunto in modo da diminuire l'inerzia dei carichi applicati all'end effector.
- Rapporto di riduzione del moto basso (rendimento elevato) in modo che tramite il solo moto dell'organo terminale sia possibile movimentare l'intera struttura del robot (back drivability).



Figura 22 Light-weight robot con mano di presa (DLR)

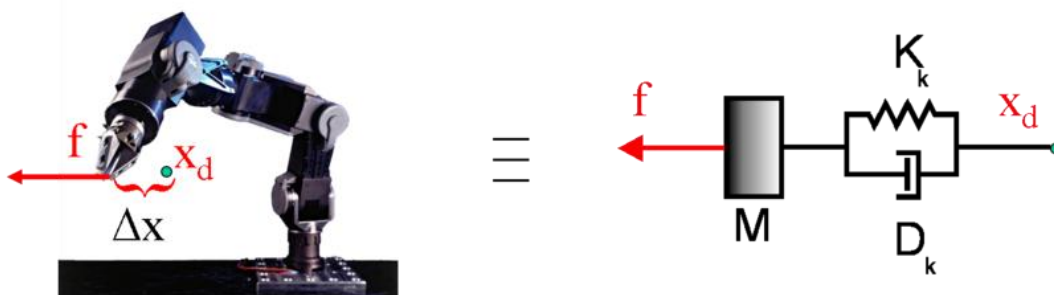
All'interno di questo nuovo concetto di lightweight robot, la progettazione di un appropriato sistema di controllo assume un ruolo di fondamentale importanza. Infatti come già visto nell'introduzione precedentemente, esso deve garantire al robot delle performance adeguate, cioè la non conoscenza di un ambiente già determinato a priori e la sicurezza dell'uomo con cui il robot è chiamato ad interagire devono incontrarsi con la necessità di avere comunque buone velocità e ottime prestazioni dinamiche (controllo adattativo).

Facendo un paragone con i moderni robot industriali, gli aspetti principali della progettazione del sistema di controllo degli lwr sono:

- Uso estensivo di sensori di feedback che misurano grandezze provenienti dall'ambiente circostante (sensori di posizione, sensori di forza, di coppia e nei giunti, ulteriori sensori tattili di coppia, di distanza e di prossimità).
- Implementazione di ulteriori anelli di controllo oltre a quelli classici di posizione, velocità e corrente (coppia) come il controllo di impedenza sviluppato da DLR. Questo controllo è programmato in modo da vedere il robot come se fosse un sistema massa-molla-smorzatore.

A questo proposito è necessario dire che tali robot hanno dei giunti che presentano elasticità e flessibilità. Coniugare infatti buone velocità dei link e ottime prestazioni dinamiche con una struttura leggera comporta infatti delle leggere flessioni e vibrazioni.

Si rende quindi necessario trattare il sistema giunto-link come un sistema massa-molla-smorzatore parametrizzabile. In questa maniera è già conosciuta la relazione dinamica tra il giunto e il link.



$$f = M\Delta\ddot{x} + D_k\Delta\dot{x} + K_k\Delta x$$

Figura 23 Equivalenza del sistema robot ad un sistema M-M-S e relativa legge fisica

I sopracitati anelli di controllo di posizione, velocità e coppia a livello del giunto hanno quindi anche il compito di compensare gli effetti dell'elasticità del giunto come le vibrazioni o un errore di posizione costante, di far inseguire quindi la traiettoria indicata e cercare di offrire un posizionamento corretto al polso.

Sono state implementate nuove strategie di controllo che permettano di evitare inaspettate collisioni con l'ambiente circostante e con l'uomo e di reagire prontamente mantenendosi in condizioni di sicurezza.

4.2 Progetti spaziali DLR

Il primo progetto spaziale di DLR è stato denominato ROTEX. Questo primo robot telecomandato viaggiò nello spazio nel 1993 all'interno dello shuttle 'Columbia'.

L'operazione ebbe molto successo grazie all'uso di robot con le seguenti caratteristiche fondamentali:

- Robot dotato di più mani di presa (Handling tool) multisensoriali
- Simulazioni grafiche predittive che erano in grado di prevenire un qualsiasi evento di circa 5-7 secondi

Il secondo progetto prese corpo nell'Aprile '99 (NASDA'S ETS VII). DLR ottenne il permesso di operare un controllo remoto sul robot giapponese Tsukuba. In questo progetto DLR verificò la bontà del loro sistema di teleassistenza robotica (MARCO), in particolare verificò il livello di capacità di programmazione oltre che l'autonomia del robot basata sui sensori.

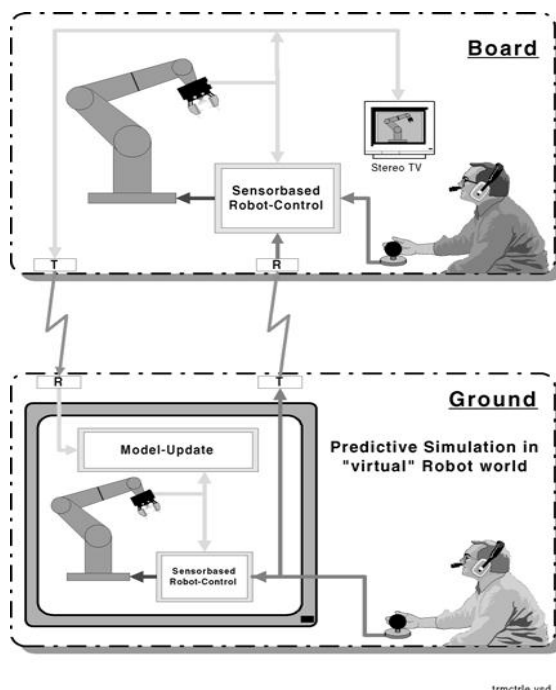


Figura 24 Schema di controllo telecomandato (DLR)

Basati sull'esperienza avuta con ROTEX, DLR ha sviluppato un nuovo sistema di telerobotica detto MARCO, caratterizzato dalla possibilità di programmare i compiti del robot direttamente da un ambiente virtuale quale, per esempio un ambiente di simulazione. Questo sistema può anche essere sviluppato per un ambiente di tipo terrestre.

Gli obiettivi di questo sistema sono:

- Un sistema di controllo remoto del robot che sia flessibile ed efficiente basato sul concetto della simulazione predittiva.
- Un ambiente di programmazione 'off-line' che includa il sistema di controllo basato su un sistema di sensori che permetta al robot di mantenere la propria autonomia, ma che ne permetta anche la programmazione.

Tali esperienze hanno portato a definire le specifiche tecniche di un robot adatto per lo spazio, ma che anche in un futuro prossimo con molta probabilità sarà usato anche per applicazioni terrestri:

- Braccia ultraleggere (realizzate in materiali specifici) che siano in grado di garantire elevate prestazioni dinamiche all'intera struttura.
- Controllo 'soft' e opportuno uso di sensori appropriati (in contrapposizione ad un controllo 'rigido' dei principali robot presenti sul mercato industriale).
- Nuovi algoritmi di controllo (posizione, forza e coppia).

4.3 Analisi dei lwr sviluppati da DLR

Come già spiegato precedentemente, negli ultimi anni le esigenze di mercato sono molto cambiate e si sono trasformate. Gli attuali robot industriali con il loro controllo standard di posizione e con un load to weight ratio pari a 1:10 circa nei casi migliori, non incontrano più le nuove esigenze della futura robotica (impegnata sempre più in piattaforme mobili). Si è reso quindi necessario lo sviluppo di una nuova tecnologia di sviluppo dei robot. Essi sono chiamati ad avere un rapporto massa carico trasportato/massa robot notevolmente superiore agli odierni robot industriali, ulteriori catene di controllo che possano permettere di lavorare in ambienti sconosciuti a priori, 7 gdl che permettano una maggior maneggevolezza e flessibilità all'intera struttura (ridondanza dei gradi di libertà).

Per questi motivi da circa una quindicina d'anni la DLR ha sviluppato e sta sviluppando tutt'ora i cosiddetti lightweight robot facendo propri i concetti studiati e analizzati proprio da DLR nei suoi esperimenti spaziali.

Per rendere più comprensibile l'analisi dei vari robot che ora verranno trattati, verrà seguita la seguente schematizzazione.

a. Analisi delle componenti elettriche ed elettroniche

- a.1 Hardware e sensori
- a.2 Motori

b. Analisi della componentistica meccanica

- b.1 Stadi di riduzione del moto
- b.2 Apparati di frenatura
- b.3 Eventuali ulteriori soluzioni meccaniche utilizzate

4.3.1 Lightweight robot I

L'esperienza di ROTEX fu un esempio di come si potesse telecomandare un robot nello spazio dalla terra. Il robot usato durante questa missione fu appositamente creato e sviluppato da DLR intorno alla prima metà degli anni '90. Costituisce la base e la prima generazione di robot ultraleggeri a 7 gradi di libertà. Essi presentano una grande quantità di sensori (da questo il termine 'multisensoriali' attribuito a questi robot) in ottica di quella ridondanza di sensori tipica dei robot ultraleggeri. La progettazione di questi robot, come quella dei successivi lwr come vedremo, è stata operata in modo da avere un'alta integrazione dell'hardware all'interno di moduli per cercare una riduzione della massa del robot stesso e un aumento del load to weight ratio fino ad 1:1 (progettazione modulare).

La riduzione della massa del robot comporta ulteriori accorgimenti, oltre alla costruzione del robot in materiale leggero, come:

- La riduzione della massa degli stadi di riduzione
- La riduzione della massa dei motori utilizzati
- La riduzione dei cablaggi pesanti lungo tutto il robot e l'uso di altri protocolli di comunicazione seriale

Un obiettivo fondamentale sul quale si è concentrato molto il controllo del robot è una migliore performance dinamica.

Per contro, in tale applicazione, non è importante l'accuratezza di posizionamento.

Analizziamo ora il datasheet (tabella 7) del primo lightweight robot realizzato da DLR

	14,5 kg
Max. Payload	7 kg
Max. Joint Speed	120 °/s
Axes	7 (R-P-R-P-R-P-R)
Total Length	1338 mm
Motors	Stepping Motor Escap
Gears	DLR Planetary Gear
Sensors (each joint)	1 Incremental Position Sensor, 1 Torque Sensor
Brakes	Self-locking Gear
Power Supply	50V 20 kHz AC-Bus
Control	Position-, Torque-, Impedance Control
	Control Cycles: Current 40 kHz, Joint 2 kHz, Cartesian 1 kHz
Electronics	Integrated Electronics, external Cabling, Communications by optical SERCOS-Bus



Figura 25 Iwr I (DLR)

Tabella 7 Caratteristiche tecniche Iwr I

Si noti la velocità massima dei giunti molto bassa.

a. Analisi delle componenti elettriche ed elettroniche

a.1 Hardware e sensori

La concezione modulare con la quale questi robot sono stati sviluppati interessa anche l' elettronica. Ogni giunto possiede un proprio modulo hardware. In questo modo si minimizza la presenza di collegamenti elettrici e si risparmiano molte connessioni elettriche. E' necessario solo distribuire l'alimentazione elettrica di potenza (che quindi è a terra) e le informazioni (misure dei vari sensori) in modo da connettere i vari giunti con l'unità di controllo. In questo robot vengono usati:

- Bus per la linea di alimentazione AC a 20 KHz

Questi sensori, in ottica di costruzione di un robot modulare, verranno integrati nelle cosiddette 'sfere di controllo DLR'. Esse sono delle grandi sfere cave realizzate in materiale plastico posizionate nei giunti che contengono al loro interno buona parte dei sensori.

I sensori presenti in queste sfere sono:

- Un sistema di sensori induttivi per la misura di coppia (uno per giunto)
- Sensori di posizione incrementali integrati nei giunti dei robot per la posizione del link

Il sistema dei sensori di coppia risulta leggermente complesso. La coppia di ogni giunto viene misurata grazie ad un torsionometro a sensori induttivi. Questo sistema è all'interno di una ruota deformabile a 6 razze. All'interno di 2 coppie di razze diametralmente opposte trovano posto i sensori che sono solidali allo stadio di riduzione (figura 27). La ruota è posizionata tra il motore e lo stadio di riduzione. In questa posizione i sensori induttivi riescono a misurare la differenza di coppia tra quella erogata dal motore e quella che arriva al giunto dopo lo stadio di riduzione (misura di 'elasticità' del giunto) sfruttando il fenomeno del 'phase shift' (figura 28). Questo fenomeno consiste in una differenza di fase tra la ruota e l'ingranaggio successivo. Questa differenza di fase che si viene a creare è funzione della coppia con la quale il giunto si oppone (a causa della sua elasticità) al moto impresso dal motore.

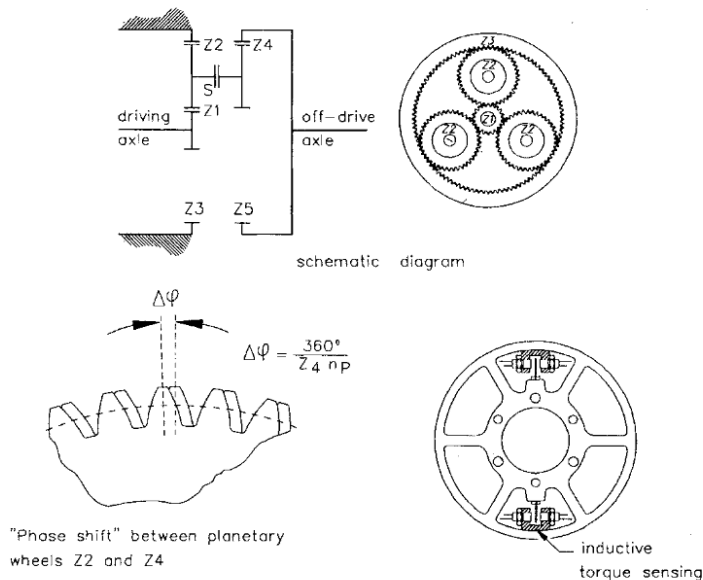


Figura 27 Sistema di misura della coppia con i 2 sensori induttivi diametralmente opposti. Fenomeno del 'phase shift'.

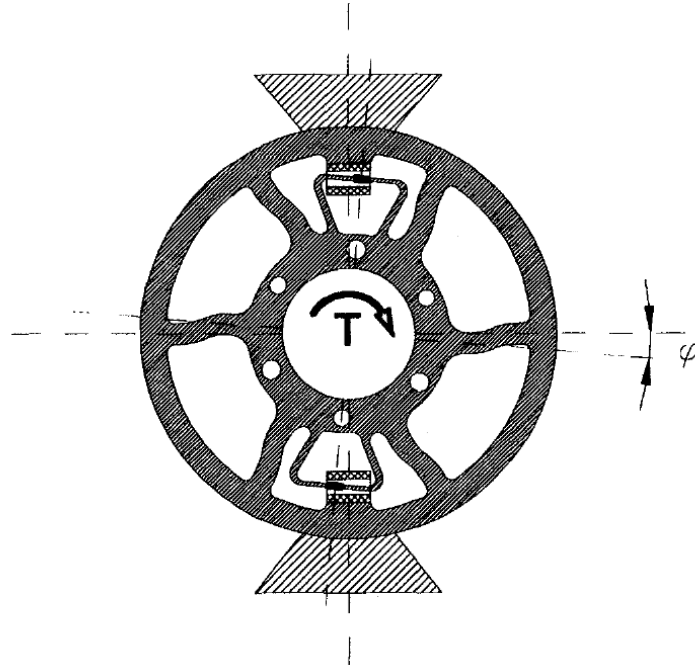


Figura 28 Sistema di misura della coppia integrato all'interno del sistema di riduzione del moto

Oltre ai sensori all'interno dei giunti, sono inoltre presenti una grande quantità di sensori nella mano di presa del lwr I rappresentata in figura 29. E' infatti dotata di circa 16 sensori e di sensori a triangolazione ottica (telemetri laser) per rilevare la distanza di oggetti da prendere.

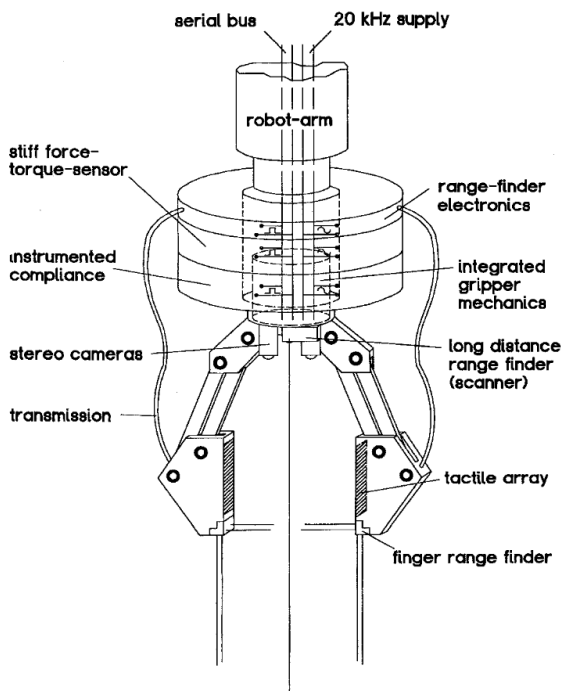


Figura 29 Mano di presa del lwr I: sensori presenti

a.2 Motori

I motori di questa prima generazione di robot ultraleggeri sono gli stessi sviluppati da DLR e utilizzati per la movimentazione della mano nel progetto ROTEX. I motori elettrici utilizzati sono motori a passo bifasi. Questi motori hanno caratteristiche tali da poter essere utilizzati all'interno dei vari moduli che compongono l'ultraleggero. Le principali caratteristiche che li rendono particolarmente adatti per queste applicazioni sono:

- Una bassa inerzia del rotore (disco piatto)
- Piccole dimensioni
- Massa ridotta (circa 0,15 kg)
- Un valore relativamente alto di coppia (0,33 Nm) considerando le ridotte dimensioni grazie al fatto che i magneti permanenti di rotore sono integrati in un disco con un diametro grande.
- Alta accuratezza nel posizionamento (25 coppie polari)
- Non necessitano di encoder per conoscere la posizione angolare dell'albero

All'interno del giunto, vicino al motore è presente l'inverter di potenza in modo da minimizzare la lunghezza delle connessioni tra il motore e l'inverter stesso (minori perdite di energia elettrica).

L'inverter è disaccoppiato dalla parte analogica e digitale della circuiteria per evitare disturbi elettromagnetici possono interferire con il blocco hardware.

b. Analisi delle componenti meccaniche

b.1 Stadi di riduzione del moto

Per ridurre il moto dei vari link, per ogni motore si usano riduttori epicicloidali (figura 30). Hanno un rapporto di riduzione relativamente elevato ma trovano il loro principale svantaggio nella presenza di giochi meccanici.



Figura 30 Riduttore epicicloidale: sezione

b.2 ApparatI di frenatura

Questo robot non usa particolari sistemi di frenatura. Nel datasheet si specifica soltanto di un sistema di frenatura autobloccante caratterizzato da ingranaggi.

b.3 Eventuali ulteriori soluzioni meccaniche adottate

Nella mano di presa di questo robot viene usato un sistema che è in grado di convertire un moto rotatorio in un moto assiale lineare per poter garantire il moto lineare delle dita della mano. La vite a rulli satelliti (PRSD) permette sia un basso coefficiente di attrito sia un elevato rapporto di riduzione del moto (si arriva fino anche fino a 1:1000). Questo sistema di trasformazione del moto accoppiato ad un motore a passo offre numerosi vantaggi:

- Ottima efficienza e poco spazio occupato
- Conversione del moto rotatorio in un moto lineare molto preciso
- Precisione nell'accuratezza di posizione 5 volte superiore al sistema motore elettrico + riduttore (epicicloidale)
- Maggior forza che rende il sistema comparabile agli azionamenti idraulici e pneumatici

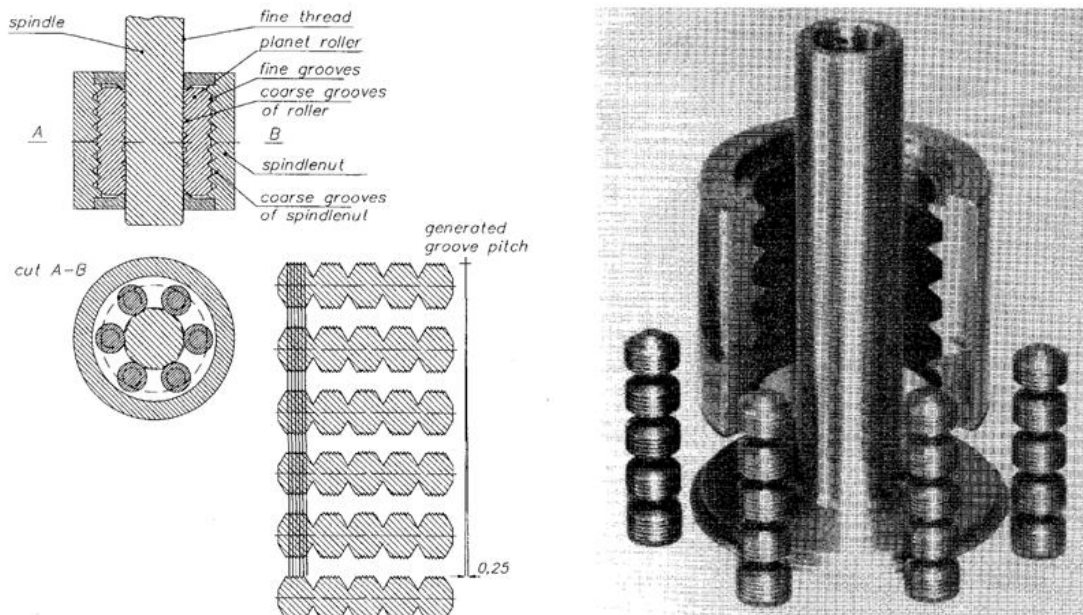


Figura 31 PRSD: trasformazione del moto rotatorio in un moto lineare

4.3.2 *Lightweight robot II*

La seconda generazione di robot ultraleggeri fu sviluppata agli inizi degli anni 2000. I robot di prima generazione pur dotati di un ottimo load to weight (circa 1:2) presentavano dei piccoli problemi. Infatti l'impiego di riduttori come gli epicicloidali con un rapporto di riduzione che si spingeva da 1:600 fino a 1:1000 costituiva uno svantaggio in termini di tolleranze costruttive.

Oltre a questo problema, il sistema induttivo di rilevazione della coppia risultava essere complesso e non robusto meccanicamente.

Per questi motivi si ebbe l'esigenza di sviluppare dei nuovi robot ultraleggeri che facessero propri i concetti dei lwr I ma che li migliorassero in aspetti dove quest'ultimi non erano particolarmente performanti. Non si tratta quindi di differenze progettuali ma di differenze che riguardano tecnologie più avanzate. Quindi restando realizzati da una struttura modulare realizzata in fibra di carbonio e restando ferme le tipologie di controllo, le differenze che caratterizzano gli lwr II rispetto agli lwr I riguardano:

- Nuovi sistemi di riduzione del moto, i riduttori Harmonic Drive oggi usati in tutti i robot antropomorfi nascono proprio da questo sviluppo
- Un nuovo sistema di misurazione della coppia con un sistema ad estensimetri
- Viene abbandonato l'uso di motori a passo che vengono sostituiti da dei DC brushless
- Conseguentemente vengono usati sensori che rilevino anche la posizione dell'albero motore (sonde hall)
- Vengono montati su ogni motore dei freni elettrodinamici per consentire una diminuzione diminuire i tempi di arresto degli assi e, conseguentemente, un aumento delle prestazioni dinamiche del sistema robot
- Completa integrazione dell'hardware all'interno della struttura meccanica del robot, compresa l'elettronica di potenza

Passando ora alla realizzazione dell'ultraleggero, per minimizzare il load to weight ratio, si rende necessaria necessario il progetto di una struttura molto leggera che riesca a compensare, anche grazie all'aiuto di sensori di coppia (controllo di smorzamento e di rigidità), l'elasticità del giunto che è una proprietà intrinseca del robot. In accordo con questa caratteristica di leggerezza, la struttura del robot è realizzata in gran parte in alluminio e solo alcuni componenti sono realizzati in fibra di carbonio, come le parti di collegamento tra i giunti. L'uso di questi materiali molto leggeri richiede un'attenta osservazione ai massimi carichi ai quali la struttura è

sottoposta. E' quindi necessario massimizzare la rigidezza e la resistenza della struttura tenendo conto di due aspetti caratterizzanti il lightweight robot:

- Riduzione della massa del robot
- Diminuzione dell'elasticità della struttura per applicazioni estremamente efficaci dal punto di vista dinamico

Viene riportato nella tabella 8 il datasheet della seconda generazione di ultraleggeri.

Total weight (incl. electronics)	18 kg
Max. payload	7 kg
Max. joint speed	187° /s
Nr. of axes	7
Total length	1024 mm
Motors	Brushless DC
Gears	Harmonic Drive
Sensors (each joint)	2 position sensors
	1 torque sensor
Brakes	electromagnetic safety brake
Power supply	48V DC, 20 kHz AC
Control	position, torque, impedance control
Electronics	integrated electronics
	no external rack
	internal cabling

Tabella 8 Datasheet del lwr II

E' possibile notare come la velocità massima dei giunti aumenti rispetto alla prima generazione dei lwr.

Per un'analisi maggiormente approfondita di questo robot viene seguito lo schema riportato precedentemente.

a. Analisi delle componenti elettriche ed elettroniche

a.1 Hardware e sensori

Come la prima generazione di ultraleggeri, anche la seconda generazione equipaggia i propri giunti con delle grandi sfere cave internamente che contengono l'intero cablaggio interno.

Il cablaggio elettrico lungo tutto il robot è costituito da un cavo per l'alimentazione AC, uno per quella DC e 2 fibre ottiche.

Una prima differenza con i lwr I è che le main board sono raggruppate a coppie in un unico piano definito piano di 'backplane'. Questo per poter diminuire lo spazio occupato dall'hardware. Per esempio le main board che servono i giunti 6 e 7 sono raggruppate in un unico piano di backplane. Quindi un blocco hardware è costituito da:

- Un backplane
- Una scheda hardware di alimentazione elettronica
- Due schede hardware DSP (digital signal processor)
- Due schede elettroniche di interfaccia analogica

Una seconda differenza con i lwr I è l'integrazione completa di tutta la parte hardware: la parte analogica, digitale e di potenza all'interno della struttura del robot. Dato quindi il livello elevato di integrazione è necessario che queste schede siano galvanicamente isolate (optoisolatori, come nel caso dei lwr I) in modo da evitare disturbi elettromagnetici tra i vari moduli.

Si analizzano ora nel dettaglio i vari moduli che compongono il blocco hardware.

Scheda hardware di alimentazione elettrica

L'alimentazione elettrica è costituita da un'onda quadra a 100 Vp-p con frequenza di 20 kHz che viene poi trasformata dalle schede di alimentazione con un trasformatore. La tensione in uscita dal trasformatore viene mandata in ingresso a dei regolatori di tensione che forniscono una tensione continua e stabile in uscita.

Schede hardware DSP

Il componente principale di questa scheda è il processore TMS320C31 (60 MHz) che è in grado di calcolare l'algoritmo di controllo del robot (spiegato in seguito) in 300ms.

Schede di interfaccia analogica

Questa scheda ha la funzione di controllare le correnti da fornire al motore ed esegue la conversione A/D dei segnali provenienti dalle sonde hall e dei segnali dello stato.

Una terza importante differenza con i lwr I è costituita da una presenza di sensori diversi.

Il sistema di misura della coppia all'interno del giunto si basa sull'uso di estensimetri. Sono disposti a lato delle razze di un disco in alluminio posto tra il sistema motore-riduttore e il giunto elastico del robot. Gli estensimetri misurano la deformazione radiale del disco. Questa deformazione è direttamente proporzionale alla coppia con la quale il giunto si oppone al motore. Tra le varie razze come si può vedere in figura 32, è presente l'elettronica di servizio che condiziona il segnale, ne esegue una preamplificazione e lo invia al sistema di controllo del robot. L'uso di 8 estensimetri ha i seguenti vantaggi:

- il differenziale di temperatura non produce effetti sulla misura di coppia applicata
- compensazione di forze trasversali

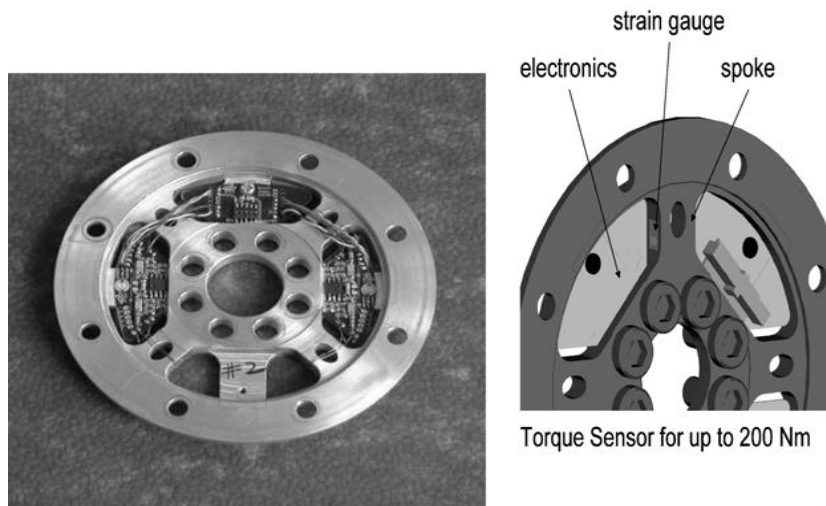


Figura 32 Disco in alluminio solidale al giunto con estensimetri. Si possono vedere gli spazi radiali all'interno dei quali è presente l'elettronica di servizio agli estensimetri

In ogni giunto, il sensore di coppia è posizionato sul 'flex spline' dell'Harmonic Drive. In questo modo riesce a misurare la coppia del giunto che agisce sul link.

Il sensore di posizione del link rappresentato in figura 33 (a) è un sensore ottico in grado di misurare con un'accuratezza di 0.01° . Questo sensore è di tipo assoluto quindi all'accensione, il robot non necessita di posizionamenti nell'origine. Di forma piatta questo sensore può essere usato anche con alberi di medie dimensioni. Il segnale originato da questo sensore viene poi inviato al blocco hardware e più precisamente alla scheda DSP.

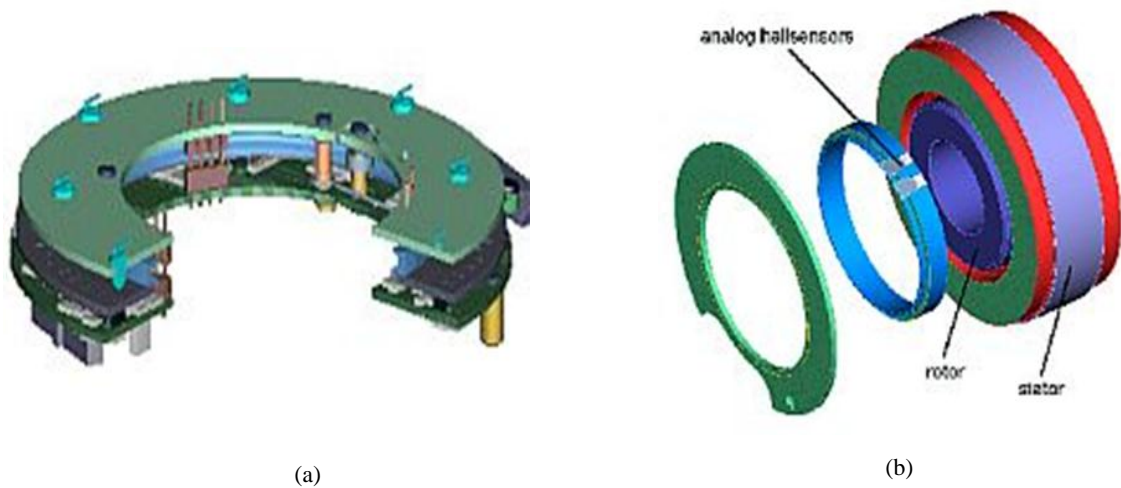


Figura 33 (a) Sensore ottico di posizione del link (b) Sensore ad Hall di posizione del motore

Nella figura 33 (b) invece è rappresentato uno dei sensori ad effetto Hall usati per il posizionamento dell'albero.

Infatti la posizione dell'albero viene rilevata da due sensori di questo tipo che misurano il campo magnetico nel rotore. Essi hanno una disposizione attorno al rotore tale che la loro uscita corrisponda ad segnale sinusoidale o cosinusoidale. Tramite le funzioni trigonometriche è possibile calcolare la posizione dell'albero.

a.2 Macchine elettriche

I motori impiegati in questa generazione di robot sono i BLDCM (Brushless direct current motor). Questi motori necessitano di sonde ad Hall per il controllo di posizione dell'albero.

b. Analisi delle componenti meccaniche

b.1 Stadi di riduzione

Un'altra differenza con i lwr I è l'uso nei lwr II degli Harmonic Drive. Oltre a offrire tutti i vantaggi descritti nel capitolo 1 comporta una diminuzione della massa rispetto agli epicicloidali del 40%. Lo svantaggio è costituito dal costo. Gli epicicloidali sono infatti più economici.

b.2 Apparat di frenatura

Ogni giunto è equipaggiato con freni elettromagnetici. In figura 34 viene rappresentata una sezione di un generico freno elettromagnetico.

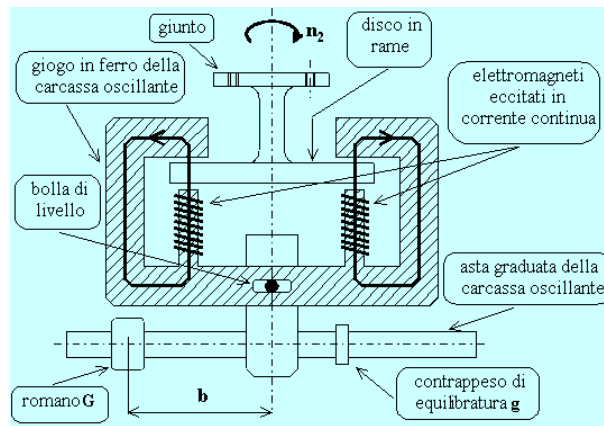


Figura 34 Sezione di un generico freno elettromagnetico

Un apparecchio elettronico riduce la dissipazione di potenza del freno di un fattore pari a 10. Tale controllo elettronico viene montato direttamente sul freno.

La massa totale del sistema può arrivare fino a 300 g.

4.3.3 *Lightweight robot III*

L'ultraleggero di seconda generazione aveva molti aspetti soddisfacenti quali:

- Un load-to-weight ratio elevato
- Un elevato grado di affidabilità grazie a buone soluzioni tecniche adottate quali motori brushless e uso di HD (versione in alluminio che offriva una riduzione della massa stessa del riduttore) che offrivano migliori prestazioni dinamiche ai lwr II rispetto ai lwr I
- Buon controllo di impedenza

Tuttavia le prime due generazioni di ultraleggeri non erano facilmente assemblabili e quindi non erano particolarmente adatti ad una loro produzione su vasta scala. La nuova generazione di ultraleggeri è stata sviluppata quindi in modo da garantire un sistema completamente assemblabile. Il robot, costituito da una base fissa e comune a tutti i robot, viene assemblato con moduli completamente intercambiabili ed adatti a formare configurazioni geometriche diverse. Per questi motivi, la ricerca e lo sviluppo di DLR investirono in un robot ultraleggero di terza generazione che integrasse tutta l'esperienza acquisita con gli LWR I e gli LWR II in termini di soluzioni tecniche adattate all'uso di nuove tecnologie e che collocasse questa parte del progetto in un concetto di modularità. Le soluzioni tecniche innovative di questi nuovi robot riguardano:

- Sviluppo di un particolare motore elettrico adatto a questo tipo di robot

- Sviluppo di un sistema di frenatura ultraleggero (freni piezoelettrici)
- Struttura in fibra di carbonio per garantire una massa minore della struttura meccanica dei vari moduli

Viene fornita una spiegazione più dettagliata del concetto di modularità nell'assemblaggio del robot.

Modularità

Il concetto di modularità viene tradotto nella realizzazione di un sistema di giunti-braccia completamente modulare e assemblabile. Questi moduli realizzano sia il giunto sia il link del robot. Come si vede in figura 34 il link (rigido) si viene a formare con l'unione dei vari moduli. All'interno dei moduli si hanno la parte hardware e i sensori che sono all'interno del giunto. I moduli principali sono due:

- Il primo modulo è detto di link-giunto del robot (tre gradi di libertà)
- Il secondo è detto di polso-giunto (due gradi di libertà)

In figura 35 vengono rappresentati i due modi principali di assemblaggio dei moduli.

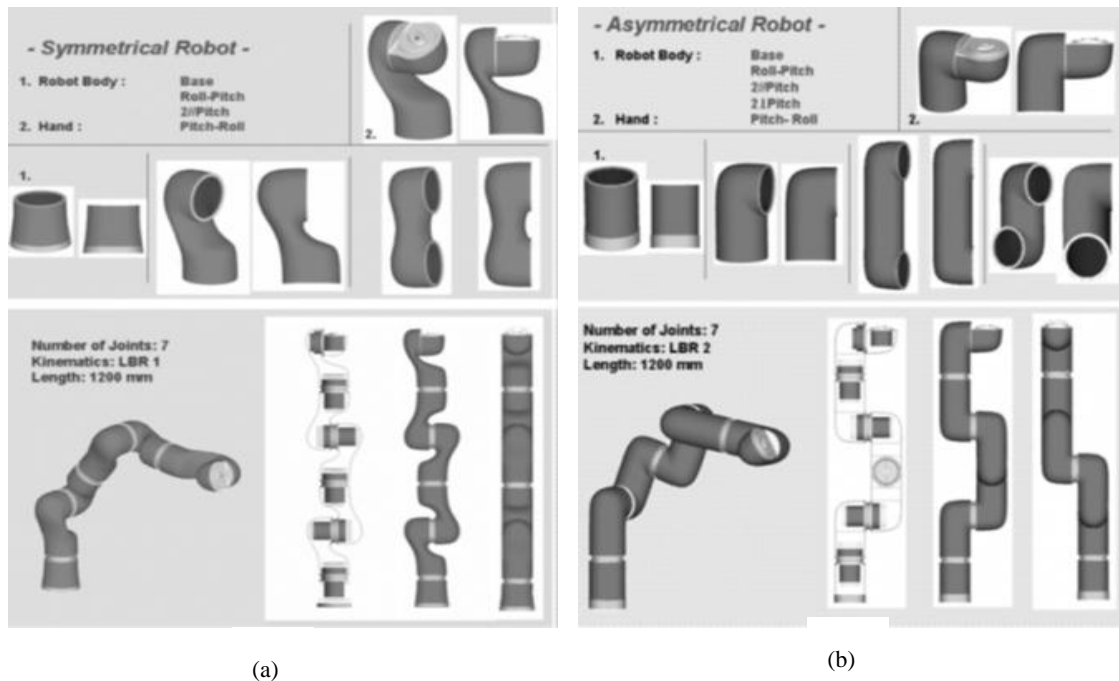


Figura 35 Assemblaggio dei moduli nei lwr III: (a) assemblaggio simmetrico (b) assemblaggio asimmetrico

In questa realizzazione, un ruolo fondamentale viene assunto dalla simulazione cinematico-dinamica in sede di progettazione del robot. Sono state sviluppate fino a questo momento due diverse configurazioni cinematiche del polso (RPR-roll pitch roll e RPP-roll pitch pitch). Esse sono rappresentate in figura 36.

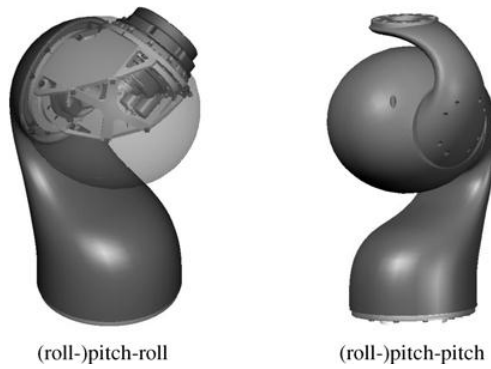


Figura 36 Configurazioni cinematiche del pozo del robot Iwr III sviluppate in sede di simulazione

I vantaggi offerti da una struttura a moduli, oltre ad una grande capacità di assemblaggio dei robot, sono i seguenti:

- La possibilità di una rotazione simmetrica dei componenti
- Alcune parti singole (moduli), trasmissioni di forza lungo brevi tratti, giunti uguali
- Grandi cavità all'interno di tutti i giunti fino a 30 mm di diametro (ottima per il passaggio di cablaggi)

Total Weight	14 kg
Max. Payload	14 kg
Max. Joint Speed	120°/s
Maximum Reach	936 mm
Nr. of Axes	7 (R - P - R - P - R - P - P)
Motors	DLR-RoboDrive
Gears	Harmonic Drive
Sensors (each Joint)	2 Position, 1 Torque sensor
Sensor (wrist)	6-DOF Force/Torque sensor
Brakes	Electromagnetic safety brakes
Power supply	48 V
Control	Position, Torque, Impedance Control
	Control Cycles: Current 40 kHz; Joint 3 kHz; Cartesian 1 kHz

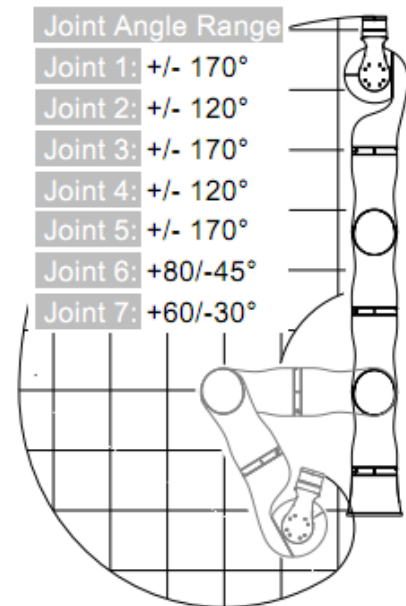


Figura 37 Spazi di lavoro del Iwr III

Electronics	Integrated Electronics, internal Cabling, Communications by optical SERCOS-Bus
--------------------	--

Tabella 9 Caratteristiche tecniche del lwr III

Nella tabella 9 viene riportato il datasheet dell'ultraleggero di terza generazione e nella figura 37 i relativi spazi di lavoro.

Si vede subito come questo robot abbia un load to weight ratio pari a 1. Questo rapporto condiziona pesantemente la velocità massima di giunto che infatti diminuisce rispetto alla seconda generazione di lwr. Le differenze nella realizzazione con le generazioni precedenti di ultraleggeri riguardano:

- Completa modularità nell'assemblaggio del lwr III rispetto agli altri
- Uso di AC brushless in sostituzione dei motori brushless DC usati nel lwr II
- Una versione realizzata in alluminio degli HD

Si procede all'analisi dei lwr III secondo lo schema descritto nel paragrafo 3 di questo capitolo.

a. Analisi delle componenti elettriche ed elettroniche

a.1 Hardware e sensori

Come nei lwr II, l'hardware sia di processo (DSP) sia di controllo dei motori (parte di potenza) è integrata all'interno dei moduli descritti precedentemente. E' presente una sola unità di controllo PC al di fuori del robot.

- La misura dello stato completo viene eseguita ad una frequenza di 3 kHz da diversi sistemi di rilevazione.
- La misura di coppia del link (a valle del giunto) è realizzata da torsimetri basati sull'uso di estensimetri (vedi lwr II).
- La posizione dell'albero motore viene misurata da dei sensori ad effetto hall (vedi lwr II).
- La posizione del link viene misurata dallo stesso sistema ottico presente negli lwr II (figura 33a).

Quindi i sensori e i vari sistemi di misura usati nel lwr III sono gli stessi usati nel lwr II.

All'interno del modulo link-giunto si trovano quindi i seguenti moduli hardware (visualizzabili in figura 38):

- Unità di alimentazione elettrica
- Scheda per il controllo del motore e giunto
- Unità di potenza elettrica

I giunti sono connessi all'unità centrale di comando del robot via seriale (SERCOS). Per la connessione di tutti i giunti si rende necessario l'impiego di soli cinque cavi elettrici, tre per l'alimentazione elettrica e due per il protocollo SERCOS descritto precedentemente.



Figura 38 Integrazione hardware all'interno del modulo link-giunto. Si possono distinguere, dall'esterno verso l'interno, l'unità di alimentazione elettrica, la scheda per il controllo del motore e giunto e l'unità elettrica di potenza

a.2 Motori

Come già detto, nei lwr III i motori brushless trapezoidali vengono sostituiti da altre unità elettriche chiamate RoboDrive, motori brushless sinusoidali caratterizzati da minor ripple di coppia. Lo sviluppo di questi nuovi motori si è reso necessario perché i motori usati nei primi ultraleggeri non erano adatti ad applicazioni robotiche. Essi infatti avevano ottime caratteristiche in termini di velocità ma, una volta scesi con le velocità le caratteristiche dinamiche diminuivano drasticamente. Quindi si è deciso di orientare la ricerca verso nuovi motori che avessero anche minori velocità di punta ma che conservassero eccellenti caratteristiche dinamiche anche a velocità molto basse. Per fare ciò si è optato per la scelta di brushless sinusoidali con diverse ottimizzazioni che hanno riguardato:

- La ricerca di nuovi sistemi di avvolgimento delle bobine sullo statore
- La ricerca di sistemi che minimizzassero i percorsi della corrente sulle bobine in modo da limitare le perdite e la potenza dissipata

Ne è risultato un motore della tipologia sinusoidali a magneti permanenti che ha i poli dello statore separati e avvolti separatamente dalle bobine in rame (figura 39).



Figura 39 RoboDrive sviluppato da DLR. Si vedono chiaramente i poli dello statore separati e avvolti separatamente

Il RoboDrive risulta quindi essere un sistema ad alta densità energetica e presenta i seguenti vantaggi:

- Riduzione della massa
- Poche perdite di potenza, quindi elevato rendimento energetico (a parità di massa)

A testimonianza dei vantaggi del RoboDrive detti precedentemente si riporta la curva di figura 40 che confronta le perdite di potenza elettrica a 1,3 Nm di coppia erogata con velocità intorno agli 0 rpm nei RoboDrive e in altri tipi di motori presenti in commercio in funzione della loro massa.

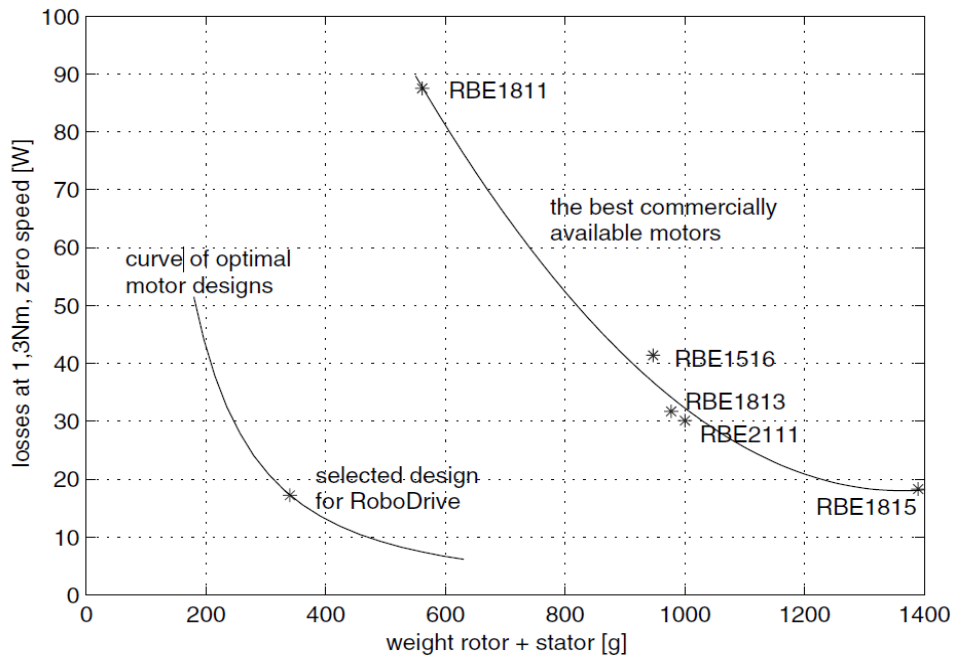


Figura 40 Grafico perdite di potenza in funzione massa motore. Confronto RoboDrive-motori commerciali

L'analisi del grafico di figura 40 evidenzia come questi motori abbiano migliori caratteristiche dinamiche a velocità molto basse e a parità di coppia erogata, minor massa e meno perdite in termini di potenza elettrica. Con il RoboDrive il robot riesce a velocità molto basse a maneggiare carichi con massa di circa 15 kg. In questo caso il load to weight ratio risulta essere addirittura maggiore di 1.

b. Analisi delle componenti meccaniche

b.1 Stadi di riduzione del moto

Lo stadio di riduzione del moto è caratterizzato da HD come nei lwr II. A differenza della precedente generazione di ultraleggeri, nei lwr III sono stati sviluppati particolari HD in alluminio che forniscono un risparmio in termini di massa dello stadio di riduzione del 60%.

b.2 Apparat di frenatura

Non è ancora stato deciso l'apparato frenante di sicurezza da utilizzare in questi robot. Attualmente sono usati gli stessi freni elettrodinamici usati nei lwr II. Sono stati sviluppati tuttavia dei freni piezoelettrici che hanno una massa di circa 70 g, decisamente inferiore rispetto a quella dei freni elettrodinamici utilizzati nei lwr II. Visti però i problemi di compatibilità elettromagnetica a cui sono soggetti gli apparati piezoelettrici, sono stati sviluppati altre tipologie di freni elettrodinamici che sono stati impiegati nel polso (massa freno circa 30 g).

Conclusa l'analisi tecnologica dei componenti del lwr III, viene rappresentata in figura 41 un esempio di assemblaggio tra 2 moduli. Si possono anche visualizzare le componenti interne ai giunti.

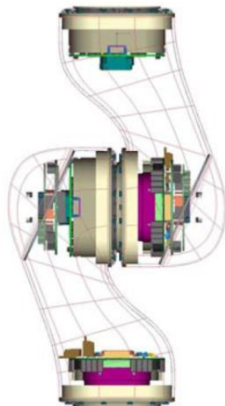


Figura 41 Vista frontale di un assemblaggio di 2 moduli. All'interno di può notare la componentistica meccanica ed elettronica

In figura 42 viene visualizzato un esploso di un modulo link-giunto. Si visualizzano anche i componenti interni al modulo.

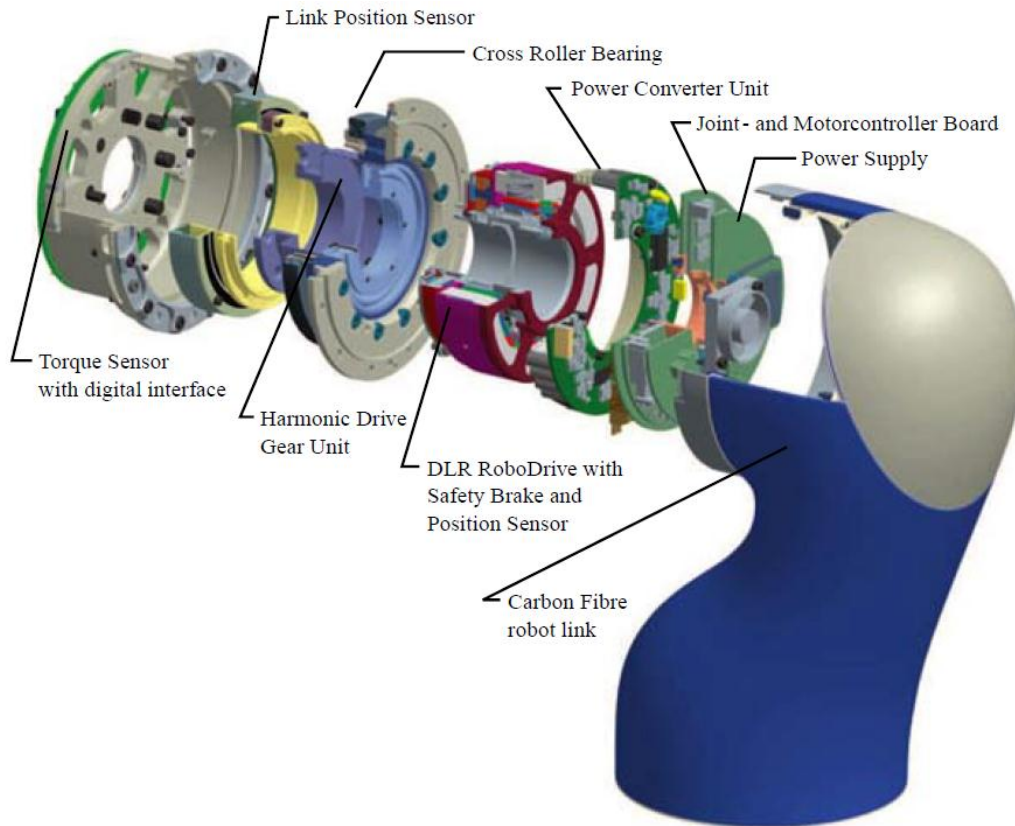


Figura 42 Esploso del modulo link-joint

Allo stato attuale delle cose ci sono sviluppi dei lwr III in ottica di uno sviluppo di unità hardware elettroniche che sfruttino componenti SMD (Surface-Mount technology).

4.4 Analisi delle tipologie di controllo presenti nei lightweight robot

Le varie generazioni di ultraleggeri hanno caratteristiche meccaniche ed elettroniche diverse ma sostanzialmente presentano un controllo identico nelle sue parti fondamentali. Per cui l'analisi del controllo viene svolta per tutti i lwr.

Come già evidenziato all'inizio di questo capitolo, il controllo dei lwr risulta assai più complesso rispetto al controllo presente nei moderni robot industriali. La non conoscenza a priori dell'ambiente di lavoro e la possibilità di poter interagire con l'uomo che il robot deve avere, rende necessario l'uso di molteplici controlli e sensori sia a livello del giunto sia a livello dell'end-effector.

In queste operazioni di controllo, i sensori di coppia e tutti i sensori che ritornano al controllo una misura di una variabile di stato ('feedback sensors') svolgono un ruolo di fondamentale importanza. Essi infatti hanno sostanzialmente il compito di aumentare l'accuratezza del posizionamento dei vari link e di fornire informazioni sulle varie forze che stanno agendo su di essi. La misura della coppia nei giunti è molto importante anche quindi nel ridurre i danni dovuti a collisioni con l'ambiente di lavoro circostante o con l'uomo. Proprio in quest'ottica di sicurezza è possibile aggiungere un ulteriore sensore di coppia sul polso del robot. L'utilizzo del segnale di coppia trasmessa al link consente di controllare più efficacemente, tramite opportuni algoritmi di controllo, l'elasticità del giunto dovuta al riduttore. Questa collocazione dei sensori ben si adatta a strategie di controllo di tipo 'passivity control' (energy based control).

4.4.1 Controllo per l'azionamento dei motori

Il controllo dei motori all'interno dei giunti presuppone i classici anelli di controllo:

- Corrente (coppia)
- Velocità
- Posizione

L'anello più interno è costituito dall'anello di corrente, seguito poi da quello di velocità dell'albero motore e ultimo l'anello del controllo di posizione. Per raggiungere buone performance dinamiche in termini di coppia e di posizionamento, l'anello di corrente ha un ruolo determinante. Infatti la larghezza di banda dell'intera catena di retroazione (anello di posizione) dipende dalla larghezza di banda dell'anello annidato internamente (corrente). Visto che le applicazioni robotiche richiedono alte prestazioni dinamiche a basse velocità, la larghezza di banda deve essere elevata per velocità attorno allo zero e deve cercare di rendere nullo l'errore a regime permanente. Questo anello di controllo di corrente ha dei tempi di ciclo di 40 ms. Il controllore usato per questo controllo di corrente (coppia) è un particolare controllore PI il quale riesce a fornire una larghezza di banda maggiore rispetto ad uno tradizionale. Con l'uso di questo controllore si può arrivare a dei tempi di risposta impulsiva del sistema controllo-motore di circa 250 μ s.

4.4.2 Controllo a livello dei giunti

CONTROLLO A LIVELLO LOCALE DEI GIUNTI

All'interno di ogni singolo giunto sono implementati on board (schede DSP) i seguenti controlli:

- Controllo di posizione
- Controllo di coppia
- Controllo completo dello stato

Essendo il sistema giunto-link assimilabile ad un sistema massa-molla-smorzatore del “quarto ordine”[3] lo stato completo del sistema è composto da quattro variabili di stato:

- La posizione dell'albero motore (θ)
- La velocità dell'albero motore (θ')
- La coppia del giunto fornita dal sensore (τ)
- La derivata della coppia del giunto (τ')

Unitamente al controllo in retroazione dello stato è caratterizzato un feedforward di velocità e di coppia per la compensazione della forza di attrito e di gravità, dovuta alla massa della struttura del robot (funzionamento a ‘zero gravity mode’). Tramite una modifica dei parametri di guadagno della variabili di stato in retroazione è possibile far lavorare questo controllore di stato come un:

- Controllore di posizione del giunto
- Controllore di coppia erogata al giunto
- Controllore di impedenza

Per esempio, parametri di guadagno elevati della retroazione di coppia e della sua derivata combinati al feedforward di velocità (per compensare l'attrito viscoso) forniscono un controllo di coppia, mentre con guadagni elevati nella retroazione di posizione e di velocità si riesce ad operare un controllo di posizione del giunto. Per effettuare un controllo di impedenza è necessario mettere assieme i guadagni elevati nella retroazione di posizione e di velocità con un guadagno della coppia in retroazione basso. Effettuando un controllo di impedenza è quindi possibile attuare uno smorzamento delle vibrazioni che interessano il link e che si trasmettono al giunto.

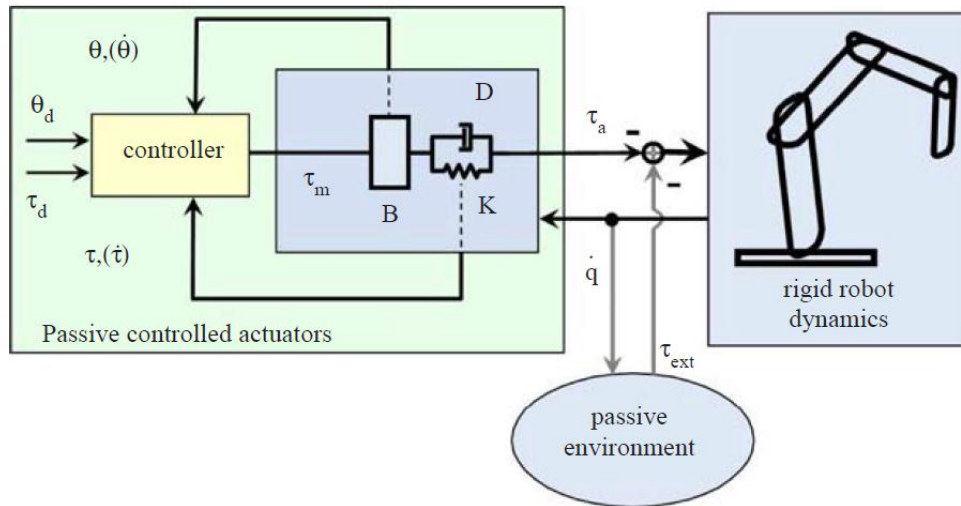


Figura 43 Struttura del controllo a livello di giunto

Con questo sistema parametrico è possibile quindi impostare la coppia al controllore in modo da controllare e possibilmente ridurre le vibrazioni introdotte dal giunto elastico (controllo di impedenza). L'uso di segnali di coppia per lo smorzamento delle vibrazioni viene mostrato in figura 44. Si riportano i risultati sperimentali ottenuti prima con un controllore PD con le sole retroazioni di posizione e di velocità e poi con un controllore con retroazione completa dello stato [3].

In figura 44 (a) i parametri di guadagno di posizione e velocità del controllore PD e del controllore dello stato completo sono identici. Si può notare come la risposta in velocità del PD abbia molte oscillazioni rispetto a quella del controllore di stato che, per contro, è più lenta.

Nella figura 44 (b) invece i parametri di guadagno di posizione e velocità del controllore PD sono stati diminuiti in modo da avere la stessa rigidità di risposta in velocità avuta dal controllore di stato precedentemente. Si nota in questo caso che il controllore PD ha un errore di posizione notevolmente maggiore rispetto al controllore di stato e presenta oscillazioni di coppia verso la fine della traiettoria da seguire.

Quindi l'utilizzo del controllore di stato, basato su più sensori e su algoritmi di controllo più evoluti, consente di ottenere un comportamento più smorzato e con minore errore (determinando minori picchi di coppia), a discapito di una dinamica più lenta dell'anello di velocità. L'effetto a livello di controllo di posizione è comunque positivo e giustifica l'adozione di tali tecniche evolute di controllo.

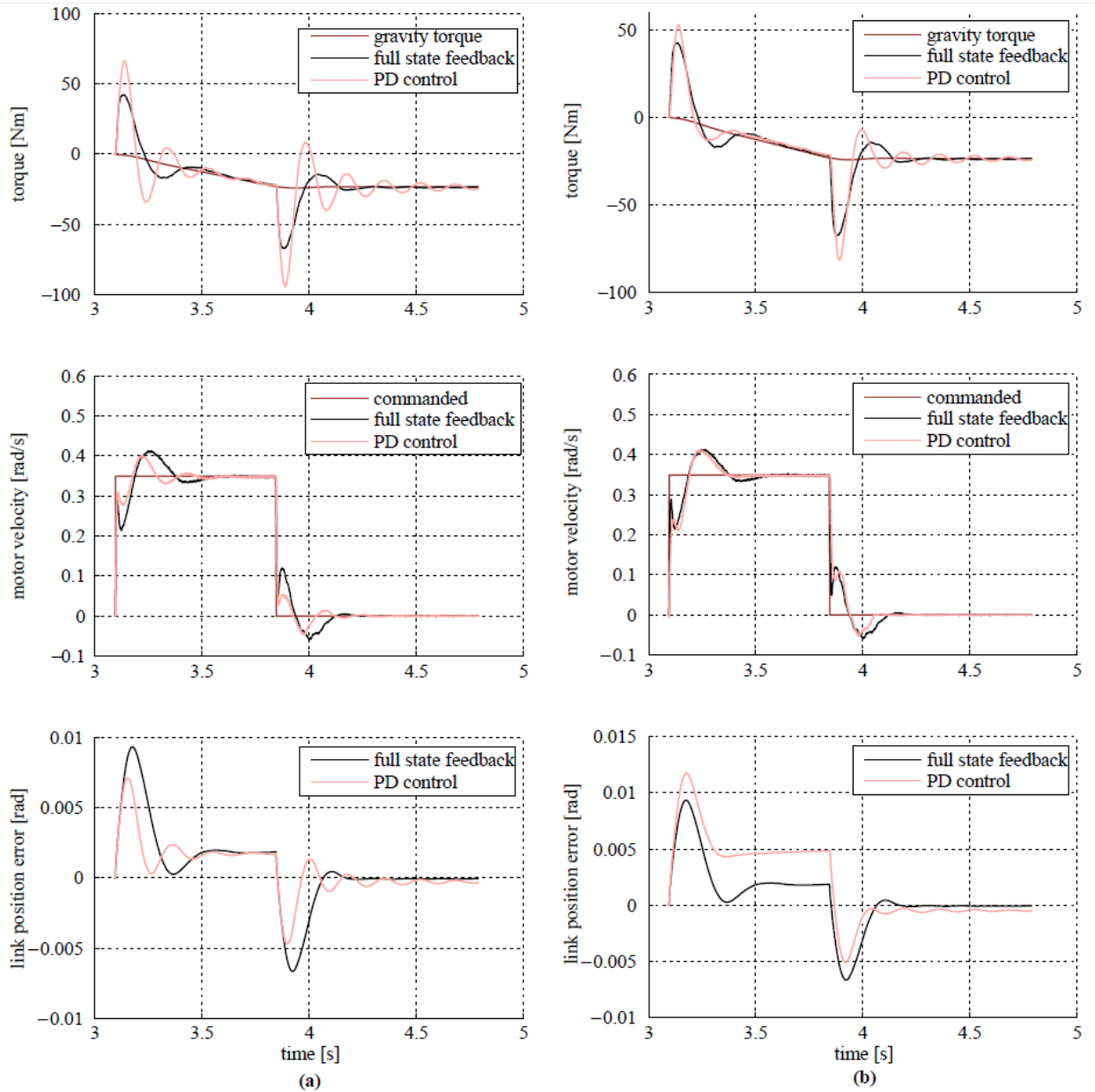


Figura 44 Confronto fra controllore PD e controllore di stato completo

(a) Guadagni di posizione e di velocità uguali

(b) Guadagni di posizione e di velocità nel PD diminuiti fino ad avere la stessa risposta in velocità

Da questa analisi possiamo trarre un'interpretazione fisica dei vari feedback:

Il feedback di coppia riduce l'inerzia del motore e l'attrito del giunto

Il feedback di posizione del motore è equivalente ad una molla

Il feedback di velocità del motore dissipa energia in attrito viscoso

CONTROLLO A LIVELLO CENTRALE DEI GIUNTI

Il controllo dei giunti non è più svolto singolarmente da una singola scheda DSP bensì dall'unità centrale di controllo alla quale arrivano tramite bus seriale sia le informazioni provenienti dai controlli dei vari giunti (che in questo caso fungono da interfaccia) sia le informazioni provenienti dal controllo a livello cartesiano (fatto a livello dell'end effector). Tale controllo è posto in un anello più esterno rispetto ai controllori dei singoli giunti e serve per incrementare le prestazioni del sistema considerando l'interazione con l'ambiente e l'accoppiamento tra giunti.

4.4.3 Controllo a livello cartesiano

Il controllo cartesiano viene fatto a livello della mano di presa e controlla l'interazione tra robot e ambiente. Il suo tempo di ciclo è di 1 ms e viene svolto dall'unità centrale di controllo. Il controllo cartesiano può essere di:

- Controllo di impedenza
- Controllo di ammettenza
- Controllo di rigidezza
- Controllo di posizione
- Controllo di forza/coppia

4.4.4 Valutazione generale del controllo dei lwr

In un'analisi generale di questo sistema di controllo, si evidenziano due concetti molto importanti che stanno alla base del controllo dell'intero robot:

- Il controllo cartesiano
- La ridondanza di sensori

Questi sono due concetti fondamentali. Di fatto tutti i controlli dei motori che si attuano all'interno dei giunti dipendono dall'interazione tra l'end effector e l'ambiente circostante. Tutti i controlli fatti sui motori a livello dei giunti dipendono quindi fortemente dal controllo a livello cartesiano. Il controllo cartesiano comunica ai vari controllori dei giunti gli spostamenti da attuare (controllo di posizione del giunto). Sulla base della cinematica inversa, i controllori di stato nei giunti ricevono i segnali provenienti dai sensori posti sull'end effector e modificano i parametri di guadagno della variabili di stato in retroazione diventando controlli di posizione. I guadagni del controllore di stato a livello dei giunti stesso sono ricalcolati ogni ciclo cartesiano (1 ms).

Il controllo di impedenza a livello del giunto si comporta come una specie di ‘switch’ tra il controllo di posizione e il controllo di coppia del giunto, sempre a seconda delle forze che interagiscono con l’end effector o delle posizioni che esso deve raggiungere. I valori di guadagno delle variabili di stato in retroazione dipendono sostanzialmente dai valori di rigidità del giunto desiderati, dallo smorzamento che si vuole avere e dai valori assunti dalla matrice di inerzia ad ogni ciclo cartesiano. Quindi il controllore di impedenza a livello del giunto svolge le seguenti operazioni:

- Genera uno smorzamento attivo delle vibrazioni dei link a causa del giunto flessibile.
- Massimizza la larghezza di banda (diminuisce tempo di risposta) del controllo a livello del giunto per ogni valore istantaneo della matrice di inerzia (calcolato ogni ms).
- Implementa rigidità e smorzamenti variabili a livello del giunto

In figura 45 viene rappresentata la struttura del controllore cartesiano di DLR sotto forma di schema a blocchi.

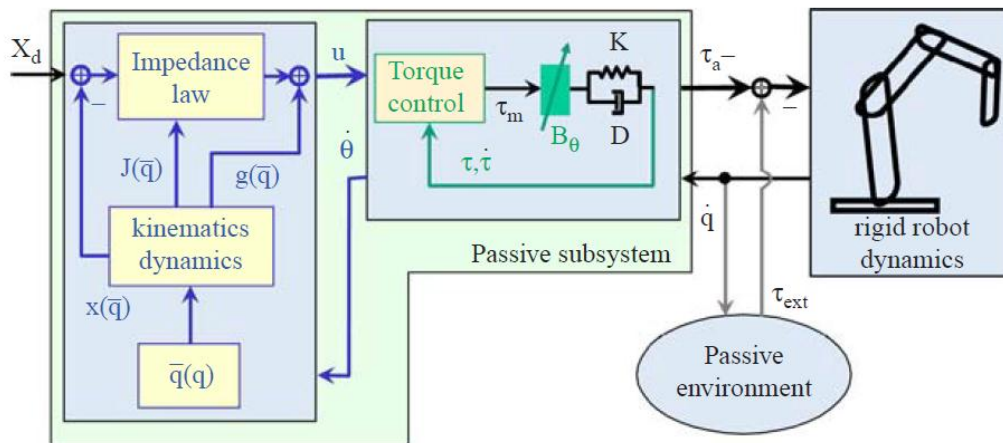


Figura 45 Struttura del controllo cartesiano dei lwr

A livello cartesiano sono state implementate tre diverse strategie per il controllo del moto:

- Controllo di ammettenza che accede al controllo di posizione al livello dei giunti tramite la cinematica inversa.
- Controllo di impedenza che accede al controllo di coppia al livello dei giunti tramite il controllo di forza cartesiano.
- Controllo di rigidità che accede direttamente al controllo di impedenza a livello dei giunti.

Per combinare il vantaggi del controllo di impedenza cartesiana (alta accuratezza nel posizionamento) e il vantaggio in termini di larghezza di banda del controllo di impedenza cartesiana è stato implementato un nuovo controllo.

L'interazione fra controllo di giunto e controllo cartesiano viene rappresentata nelle figure 46 e 47. In figura 46 vengono omessi i vari controlli realizzati a livello cartesiano.

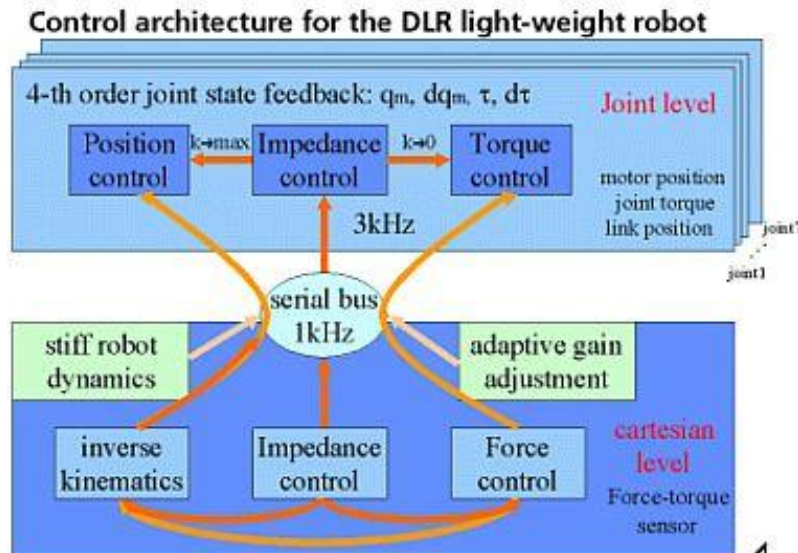


Figura 46 Architettura di controllo dei lwr. Interazione tra il controllo cartesiano e a livello del giunto

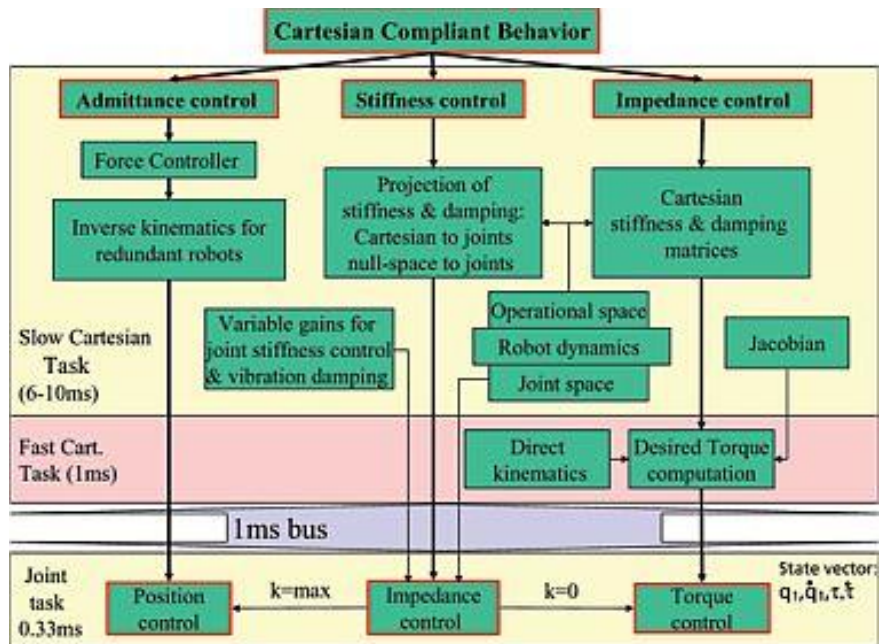


Figura 47 Architettura completa del controllo dei lwr. Interazione tra il controllo cartesiano completo e il controllo di giunto

Un secondo concetto che assume un'importanza rilevante riguarda la ridondanza di sensori. Per spiegare il concetto in maniera più esaustiva meglio viene portato un esempio. La mano di presa di un robot deve prendere un oggetto e trasportarlo da una posizione di coordinate (x_1, y_1) ad una seconda posizione (x_2, y_2) . In questo caso è fondamentale sapere come varia la posizione del braccio del robot. Infatti, sapendo come varia la posizione del braccio, so anche come varia la matrice di inerzia del braccio e quindi posso risalire al valore di coppia che deve uscire dal giunto. Questa informazione può essere fornita da dei sensori di coppia posizionati sul 'gomito' del braccio. Allo stesso modo è molto importante il sistema di misura della coppia nel giunto. Esso infatti misura in un certo qual modo il grado di 'elasticità del giunto' che è fondamentale conoscere in modo da poterlo poi compensare aumentando la coppia desiderata in uscita dall'albero motore fino ad arrivare alla coppia voluta in uscita dal giunto. Le informazioni provenienti dai sensori di giunto vengono inviate all'unità centrale e vanno ad aggiungersi a quelle ottenute dai sensori presenti a livello cartesiano sulla mano di presa del robot. In questo senso la ridondanza di sensori ha un ruolo centrale nella progettazione di questi ultraleggeri e nei rispettivi sistemi di controllo.

CAPITOLO 5: ANALISI CONCLUSIVE

In questo capitolo verranno inizialmente analizzati ulteriori robot considerati ultraleggeri. Verrà poi fatto un confronto tra i vari robot industriali considerati e i lwr. Da un'analisi dettagliata dei datasheet verranno estrapolati importanti considerazioni e conclusioni sullo studio e sullo sviluppo di questa nuova generazione di robot.

5.1 Barrett WAM arm e Mitsubishi PA 10

Nonostante lo sviluppo principale dei lwr sia dovuto a DLR, i robot ultraleggeri sono stati realizzati anche da altre case costruttrici. Sono i casi del braccio robotico WAM della Barret e del Mitsubishi PA10. Si consideri inizialmente il WAN.

Questo robot può presentarsi in due configurazioni diverse, a 4 e a 7 DOF. In tabella 10 vengono riportate le caratteristiche tecniche del braccio e in figura 48 una sua rappresentazione tecnica.

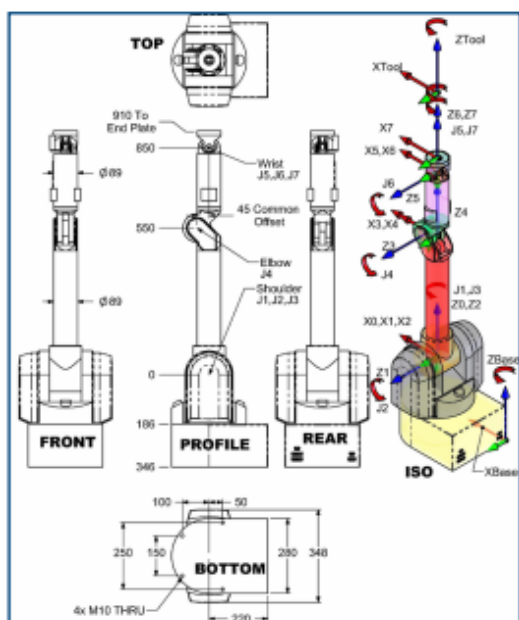


Figura 48 Viste braccio WAN e visualizzazione dei gradi di libertà

CAPITOLO 5: ANALISI CONCLUSIVE

	4-dof	7-dof	Footprint	0.1 m ²		
Shoulder Yaw:	300°	300°	Base Height	160 mm		
Shoulder Pitch:	225°	225°	Motors	Neodymium-iron, brushless motors with Pucks providing high-performance space-vector-		
Shoulder Roll:	315°	315°				
Elbow Joint:	230°	230°	High-Level Interface	High-speed network cable (Ethernet and CANbus) and (Ethernet) wireless		
Wrist Yaw:	–	350°	High-Level Cartesian Control (Trajectory and/or Force)	500 Hz	500 Hz	
Wrist Pitch:	–	180°		Low-Level Joint-Torque Resolution	14-bits	14-bits
Wrist Roll:	–	344°	Mechanisms	Mechanical transmissions based on advanced, patented high-speed cable transmissions and patented zero-backlash, low-friction, cabled differentials.		
Mechanisms				(b)		
Mechanical Stiffness	1.5E6 N/m	1.5E6 N/m				
Payload	4 kg	3 kg				
Reach (w/ hand or gripper tool)	1000 mm	1000 mm	LOWER-LEVEL POSITION FEEDBACK			
Work Volume	3.5 m ³	3.5 m ³	Type	12-bit digital motor position		
				18-20-bit joint position feedback		
Agility Index* (avg. joint mobility in radians raised to the # of dofs)	466	44	Minimum Joint Resolution	0.005°	0.008°	
				0.001	N/A	
Peak Velocity	3 m/s	3 m/s	Power Requirement (AC Operation)	100-240 vac 1Φ 50-60 Hz @ 60 watts minimum		
Peak Accel. (at endtip with 1-kg load)	30 m/s ²	20 m/s ²	Mobile (DCN Operation)	24-80 vdc @ 50 watts minimum		
Repeatability	1000 μm	2000 μm				
	100 μm*	200 μm*				

(a)

(c)

WEIGHT		
Entire Assembly	25 kg	27 kg
Arm beyond shoulder	3.3 kg	5.8 kg

(d)

Tabella 10 Specifiche tecniche del WAM arm: (a) Spazio di lavoro, payload, velocità e accelerazioni (b) Motori, controlli effettuati e sensori (c) Sensoristica a livello del giunto e consumo energetico (d) masse

* Nella versione a 4 gradi di libertà, per permettere elevate precisioni in termini di accuratezza sono disponibili ulteriori sensori di posizione (encoder) da posizionare sul giunto.

Il WAN offre buone prestazioni sia in termini di velocità massime sia in termini di accelerazioni di picco. Il tutto a discapito di un discreto load to weight ratio che risulta pari a 1:9 (nel lwr è pari a 1:1) e di una irrisoria caratteristica di ripetibilità. Questo robot implementa strategie di controllo tipiche dei lwr sviluppati da DLR.

Il robot sviluppato invece da Mitsubishi è un ultraleggero classico a 7 gradi di libertà e un load to weight ratio pari a circa 1:4. Viene considerato ultraleggero anche perché, oltre all'uso di strutture in fibra di carbonio possiede anch'esso il concetto di controllo in back-drivability. Ne viene riportato il datasheet in tabella 11.

Number of Joints	7	Trajectory Control	Point to point
Type of Joints	R-P-R-P-R-P-R	Dimensions	240(W)x400(L)x200(H) mm
Mass	40 kg	Mass	18 kg
Payload	10 kg	Power Supply	AC 100-240V 50/60 Hz, under 1.5kVA
Max. Speed	Sa, S2: 57deg/s; S3, E1: 114deg/s; E2, W1, W2: 360deg/s	(b)	
Drives	AC servomotors	Gripper	Parallel; 0.5 to 7kg grasping force
Position Sensors	Brushless resolver (absolute position)	Force/Torque Sensor	Gamma-R-10-M2, ±130 N, ±10 N-m, 6 DoF from ATI
Position repeatability	±0.1 mm		

(a)

(c)

Tabella 11 Datasheet Mitsubishi PA 10 (a) Caratteristiche meccaniche e tecniche (b) Caratteristiche del controllore (c) Dati di equipaggiamento (sensori e mano di presa)

5.2 Confronto lwr e robot industriali: conclusioni

In questo paragrafo si farà un confronto in termini di prestazioni, soluzioni tecniche utilizzate e dati tecnici tra i lwr e i robot industriali presenti oggi in commercio. Si cercheranno di capire i punti di forza e di debolezza di entrambi i robot e il motivo della presenza di determinate caratteristiche tecniche e prestazionali. Il confronto verrà svolto tra:

CAPITOLO 5: ANALISI CONCLUSIVE

- Adept Viper s850
- Adept Quattro s650H
- Lwr III
- Barrett WAN arm
- Mitsubishi PA 10

Per iniziare si riporta una tabella nella quale vengono messe a confronto per i vari modelli di robot citati precedentemente le seguenti caratteristiche tecniche:

- Gradi di libertà del robot
- Massa del robot, del carico e relativo load to weight ratio
- Spazio di lavoro (sbraccio massimo)
- Velocità di punta
- Accelerazione massima
- Ripetibilità nel posizionamento
- Controlli effettuati
- Sensori presenti

I valori sono riportati in tabella 12.

	Quattro s650H	Viper s850	WAN arm	PA 10	LWR III
Gradi di libertà	4	6	7	7	7
Massa robot	117 kg	29 kg	27 kg	40 kg	14 kg
Massa carico trasportabile	2 kg (rated)	2,5 kg (rated)	3 kg	10 kg	14 kg
	6 kg (max)	5 kg (max)			
Load to weight ratio	1:59 (rated)	1:12 (rated)	1 : 9	1:4	1:1
	1:20 (max)	1:6 (max)			
Spazi di lavoro (sbraccio massimo)	1300 mm (diametro)x500 mm (altezza)	855 mm	1000 mm	n/d	936 mm
Velocità massima	10 m/s (end effector)	375 °/s (giunto)	3 m/s	114 °/s	120°/s
Accelerazione massima	150 m/s ²	n/d (tempo ciclo 0,618 s)	20 m/s ²	n/d	n/d
Ripetibilità	± 0,1 mm	XYZ ±0,03 mm	± 2 mm	± 0,1 mm	n/d
Controlli effettuati	Motori: posizione, velocità, corrente	Motori: posizione, velocità, corrente	Motori: posizione, velocità, corrente. Giunti: impedenza (posizione e coppia). Cartesiano: impedenza	Motori: posizione, velocità, corrente. Giunti: impedenza (posizione e coppia). Cartesiano: impedenza	Motori: posizione, velocità, corrente. Giunti: impedenza (posizione e coppia). Cartesiano: impedenza

Sensori presenti				Giunto: 2 di posizione, 1 di coppia. Polso: sensori a 6 DOF di forza/coppia	Giunto: 2 di posizione, 1 di coppia. Polso: sensori a 6 DOF di forza/coppia
	Giunti:Encoder	Giunti:Encoder	Giunto: 2 di posizione, 1 di coppia. Polso: n/d		

Tabella 12 Confronto tra robot ultraleggeri

Le differenze sono molto evidenti e rilevanti quando si parla di:

- Masse dei robot, dei carichi e i rispettivi load to weight ratio
- Velocità massime
- Accelerazioni massime
- Controlli effettuati
- Sensori presenti

Il confronto mostra quindi come siano palesi le differenze prima di progetto, e poi costruttive, tra i tipi di robot considerati. Per esempio prendiamo il dato di ripetibilità. Nello seriale è pari a circa 0,003 mm, nel parallelo è di 0,1 mm. Questo dato relativo al ‘Quattro’ non è nemmeno paragonabile al dato di 2 mm fornito dal WAN della Barrett. Può essere paragonato con il dato del Mitsubishi, ma in questo caso la ripetibilità del posizionamento si scontra in maniera forte con le velocità e accelerazioni massime tramite le quali questa posizione può essere raggiunta. Infatti, queste sono nettamente superiori nel parallelo rispetto al PA 10. Da notare che il lwr di DLR non fornisce nemmeno il dato di ripetibilità. Questo a testimoniare come i robot non siano stati progettati per soddisfare le stesse esigenze. A testimonianza di ciò, anche a livello di controllo la differenza tra ultraleggeri e industriali è notevole. I robot ad uso industriale necessitano solo dei classici controlli a livello di giunti, anello di corrente, velocità e posizione come evidenziato nel capitolo 2 (con controlli di tipo PID). Per il loro impiego non sono necessari né i sopracitati controlli dei giunti né i controlli a livello dell’end effector (struttura rigida) che invece sono fondamentali negli ultraleggeri visti i loro campi di impiego (ambienti sconosciuti). Inoltre la struttura particolarmente leggera che li caratterizza causa un’elasticità del giunto che deve essere in qualche modo compensata. E’ quindi molto importante l’uso di un gran numero di sensori negli ultraleggeri (ridondanza di sensori) rispetto ai pochi sensori presenti nei robot industriali moderni.

Da un’analisi poco approfondita dei dati di tabella 12, apparentemente può sembrare che i robot ultraleggeri siano meno performanti dinamicamente degli industriali.

Nella realtà questa trattazione ha dimostrato il contrario. I robot industriali hanno fornito la base di partenza su cui improntare lo sviluppo di questa generazione di ultraleggeri. Infatti le specifiche di progetto su cui sono stati sviluppati i lwr sono totalmente diverse da quelle utilizzate per la progettazione dei robot industriali. Lo studio di nuovi materiali da utilizzare per alleggerire la struttura meccanica del robot, di nuovi moduli da poter assemblare, di metodi di integrazione hardware all'interno dei moduli e soprattutto nuove tecniche di controllo sono state tutte operazioni atte a migliorare le prestazioni dinamiche di questi robot. Gli ultraleggeri non offrono grandi prestazioni dinamiche in termini di posizionamento e di ripetibilità perché il loro sviluppo non è stato finalizzato per questo scopo. Per contro, in ambienti sconosciuti dove sono fondamentali le velocità di comunicazione dei dati provenienti dai sensori e di attuazione del moto attraverso il controllo, essi offrono eccellenti prestazioni dinamiche.

Tuttora la ricerca in ambito dei lwr è ancora aperta. I principali aspetti sui quali si sta concentrando sono:

- Nuovi materiali.
- Schemi di controllo innovativi basati su nuovi modelli del sistema.
- Nuove tecniche di progettazione in cui affrontare in modo sinergico il progetto meccanico del sistema e del controllore ('hybrid control').
- Nuove tecniche di pianificazione del moto.

Bibliografia e sitografia

- [1] G. Legnani, Appunti di meccanica dei robot, Milano, 1993.
- [2] Sciavicco-Siciliano, Robotica industriale, modellistica e controllo di manipolatori, Milano: McGraw-Hill, 1995.
- [3] Albu-Schaffer, «The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments,» *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, n. 5, pp. 376, 385, 2007.
- [4] «www.adept.com,» [Online].
- [5] «www.abb.com,» [Online].
- [6] Hirzinger, «Mechatronics for a New Robot Generation,» *Transaction on Mechatronics*, vol. 1, n. 2, pp. 149-157, 1996.
- [7] Schaefer-Sporer-Hirzinger-AlbuSchaffer-Hanle, «On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots,» in *Proceedings of the 2001 IEEE*, Seoul, 2001.
- [8] Schedl-Hirzinger-Brunner-Landzettel-Sporer-Butterfab, «Space Robotics - DLR's Telerobotic Concepts, Lightweight Arms and Articulated Hands,» *Autonomous Robots*, n. 14, pp. 127-145, 2003.
- [9] Grebenstein-Hirzinger-Sporer-Schedl-Butterfab, «Torque-Controlled Lightweight Arms and Articulated Handa: Do We Reach Technological Limits Now?,» *The International Journal of Robotics Research*, pp. 331-340, 2004.
- [10] AlbuSchaffer-Hirzinger, 2008.