

Sergio Carbone

CIAO. IO SONO COBOT



Guida tecnica per
l'utilizzo del robot
collaborativo Cobot.

Indice

Capitolo 1	5
L'evoluzione dei robot: il Cobot.....	5
1.1 L'aiuto intelligente	5
1.2 La collaborazione uomo-robot	6
1.3 Industria 4.0: i robot nella fabbrica digitale	7
 Capitolo 2	 9
I robot collaborativi.....	9
2.1 Definizione e requisiti generali.....	9
2.2 I cobot: l'evoluzione	9
2.3 Il mercato dei Cobot	11
2.4 Caratteristiche generali	13
2.5 Specifiche tecniche	15
2.6 Ambienti applicativi	18
2.7 Calcoli cinematici per robot	21
2.8 Principali catene cinematiche	21
2.8.1 Cinematica diretta	23
2.8.2 Convenzione di Denavit-Hartenberg.....	30
2.8.3 Cinematica inversa	33
 Capitolo 3	 34
La valutazione della collaborazione	34
3.1 La valutazione di una collaborazione uomo-robot	34
3.2 Le regole collaborative secondo la ISO 10128.....	35
3.3 Classificazione degli scenari collaborativi	37
3.4 Verso un nuovo modello.....	40
 Capitolo 4	 42
Un nuovo modello di valutazione della collaborazione	42
4.1 Le ragioni per un nuovo modello	42
4.2 Caratteristiche dimensionali della collaborazione	43

4.3 Organizzazione del task.....	45
4.4 Autonomia	46
4.4.1 <i>Proposta di metrica</i>	47
4.5 Adattabilità	50
4.5.1 <i>Proposta di metrica</i>	50
4.6 Usabilità.....	51
4.6.1 <i>Proposta di metrica</i>	52
4.7 Comunicazione	53
4.7.1 <i>Tecnologie per la comunicazione uomo-robot</i>	54
4.7.2 <i>Tecnologie per la percezione dell'ambiente</i>	57
4.7.3 <i>Modalità di insegnamento e apprendimento</i>	58
4.7.4 <i>Proposta di metrica</i>	59
4.8 Sicurezza.....	59
4.8.1 <i>Proposta di metrica</i>	60
4.9 Ergonomia	63
4.9.1 <i>Proposta di metrica</i>	64
4.10 Workload fisico e cognitivo	66
4.10.1 <i>Proposta di metrica</i>	67
4.11 Fiducia	69
4.11.1 <i>Proposta di metrica</i>	70
4.12 Accettazione sociale	72
4.12.1 <i>Proposta di metrica</i>	73
4.13 Impatto sociale.....	74
4.13.1 <i>Proposta di metrica</i>	76
4.14 Il “profilo della collaborazione”	77

Capitolo 5 80

Analisi di casi applicati 80

5.1 Case Study.....	80
5.2 Il caso “FEVE Srl - Bologna”	82
5.2.1 <i>Organizzazione del task</i>	83
5.2.2 <i>Autonomia</i>	87
5.2.3 <i>Adattabilità</i>	87
5.2.4 <i>Usabilità</i>	88
5.2.5 <i>Comunicazione, percezione e apprendimento</i>	88

5.2.6 Workload fisico e cognitivo	90
5.2.7 Fiducia	90
5.2.8 Accettazione Sociale.....	90
5.2.9 Ergonomia	91
5.2.10 Sicurezza	92
5.2.11 Impatto sociale.....	93
5.3 Il caso “IRIDE Srl - Milano”	95
5.3.1 Organizzazione del task	96
5.3.2 Autonomia.....	101
5.3.3 Adattabilità	102
5.3.4 Comunicazione, percezione e apprendimento	102
5.3.5 Ergonomia	104
5.3.6 Sicurezza	108
5.3.7 Impatto sociale.....	109
Capitolo 6	112
Collaboration Scale: la scala della collaborazione uomo-robot aziendale	112
6.1 Un modello ottimale	112
6.2 I passi verso la teoria di una Collaboration Scale aziendale	114
6.3 L’uso della Collaboration Scale	115
6.4 Considerazioni e consigli	117
Capitolo 7	121
Analisi di alcuni robot collaborativi	121
7.1 Alcuni modelli di robot collaborativi	121
7.2 ABB – IRB 14000 YuMi	121
7.3 Universal Robots	124
7.4 Fanuc serie CR.....	128
7.5 Tabelle di confronto tra cobot	133
Capitolo 8	137
Conclusioni	137

Indice degli acronimi

AR	Augmented reality
ASR	Automatic Speech Recognition
EAWS	Ergonomic Assessment Work-Sheet
EEG	Elettroencefalografia
HCI	Human computer interaction
HMI	Human machine interaction
HRC	Human robot collaboration
IAD	Intelligent Assist Device
IEA	International Ergonomics Association
IOT	Internet of things
IT	Information technology
LORA	Level of Autonomy Assessment Scale
MGI	McKinsey Global Institute
MRK	Mensch Roboter Kollaboration
N/A	Not applicable
NIST	National Institute Standards of Technology
OLP	Off-line programming
PBD	Programming by demonstration
PTZ	Pan/tilt/zoom
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TCP	Tool central point
TLX	Task Load Index
TTS	Text-To-Speech
UAV	Unmanned aerial vehicle
USAR	Urban search and rescue
UX	User-experience

Capitolo 1

L'evoluzione dei robot: il Cobot.

1.1 L'aiuto intelligente.

L'attività di collaborazione può essere vista come un'interazione sociale in cui gli individui cooperano per compiere atti individuali nel perseguimento di un obiettivo condiviso che richiede un coordinamento.

Collaborare significa partecipare attivamente insieme con altri a un lavoro per lo più intellettuale o alla realizzazione di un'impresa, di un'iniziativa, a una produzione e simili.

Di rilievo è la distinzione tra il concetto di cooperazione e di collaborazione, spesso adoperati come sinonimi, rimarcata invece con vigore da alcuni studi nell'ambito del lavoro di gruppo orientato al *problem solving*, descrivono il lavoro cooperativo come un'attività che viene portata a termine dividendo il lavoro tra i partecipanti, che ne diventano responsabili.

Il lavoro collaborativo, invece, viene descritto come “l'impegno mutualistico dei partecipanti in uno sforzo coordinato per risolvere, insieme, un problema”. Una collaborazione di successo, perciò, richiede ai partecipanti di condividere il processo di creazione della conoscenza, cioè la cooperazione può essere raggiunta se tutti i partecipanti assolvono ai compiti loro assegnati separatamente, mentre la collaborazione implica l'interazione diretta tra le persone e comporta trattative, discussioni e l'adattamento alle prospettive altrui.

Questi aspetti del concetto di collaborazione, così come declinati dalle scienze sociali, assumono particolare interesse nel mondo tecnologico. La prospettiva di vedere una macchina, un computer o finanche un robot non più come uno strumento o un servitore “stupido” ma come un “collaboratore” per la risoluzione di problemi è infatti una delle frontiere più promettenti che coinvolgono il mondo dell'IT (*Information Technology*) e della robotica, sia dal punto di vista accademico, che imprenditoriale. Il principio alla base di questo processo è il seguente: la progettazione di sistemi predisposti a lavorare in modo collaborativo può consentirci di progettare sistemi individuali più semplici e realizzare obiettivi più complessi.

C.S. AUTOMATION

1.2 La collaborazione uomo-robot

La collaborazione uomo-robot è una nuova tendenza nel campo della robotica industriale e di servizio. Conosciuta con l'acronimo tedesco MRK (*Mensch Roboter Kollaboration*) o l'acronimo inglese HRC (*Human Robot Collaboration*), la robotica collaborativa può quindi essere considerata come la scienza e l'insieme delle tecniche di progettazione, costruzione, studio e valutazione di un sistema uomo-robot.

L'obiettivo principale di questa strategia innovativa è di creare un ambiente sicuro di collaborazione tra esseri umani e robot.

I prodromi dello sviluppo degli studi su HRC sono rappresentati dall'ampio filone di ricerca su HRI (*Human Robot Interaction*), un campo di studio della robotica dedicato alla comprensione, progettazione e valutazione di sistemi robotici da utilizzare da o con gli esseri umani.

Il nucleo teorico di HRI è una derivazione dei più consolidati ambiti di ricerca: HMI (*Human Machine Interaction*) e HCI (*Human Computer Interaction*). Tuttavia, differisce da HCI e HMI perché riguarda sistemi che hanno strutture di controllo complesse e dinamiche, che mostrano autonomia e cognizione e che operano in ambienti mutevoli del mondo reale.

Per descrivere l'interazione tra agenti in un sistema uomo-robot occorre tener conto di due caratteristiche fondamentali: il livello di interazione cognitiva tra agenti e il livello di interazione fisica tra agenti. Pertanto, HRI copre diverse aree di ricerca come la cognizione, la linguistica e la ricerca fisiologica combinata con l'ingegneria, la matematica, l'informatica e i fattori umani. Inoltre, vi sono differenze nei tipi di interazione e nei ruoli assolti all'interno di essa, nella natura fisica dei robot, nel numero di sistemi con cui un utente può essere chiamato ad interagire simultaneamente e nell'ambiente in cui si verificano le interazioni.

HRC si può considerare una sotto-branca di HRI.

L'idea principale di HRC è di combinare le capacità dell'uomo con quelle dei robot. Da un lato, gli esseri umani hanno innata flessibilità, intelligenza, destrezza, elaborazione della visione e capacità di *problem solving*; dall'altro lato, i robot forniscono precisione, potenza, ripetibilità e indifferenza al pericolo.

Come precedentemente riferito, in merito alla collaborazione nelle interazioni sociali, anche nel campo della robotica vale il principio secondo il quale il risultato della collaborazione non è semplicemente la somma dei piani individuali.

1.3 Industria 4.0: i robot nella fabbrica digitale

Negli ultimi anni, una nuova complessa trasformazione strutturale sta interessando le fabbriche di tutti i settori. Il processo nasce dalla convergenza di diversi fenomeni tecnologici, dal mondo digitale (*big data, internet of things*) agli studi sui materiali, fino allo sviluppo dell'intelligenza artificiale. La portata innovatrice di questi fenomeni e i significativi risvolti assunti nel panorama industriale hanno portato gli osservatori ad annoverare il complesso delle trasformazioni sotto la dicitura di Quarta Rivoluzione industriale o Industria 4.0.

Il punto di svolta principale dell'Industria 4.0 è il concetto di fabbrica digitale o intelligente. Più nota con il termine anglosassone *smart factory*, essa rappresenta un nuovo paradigma di gestione della produzione di beni e servizi. Si propone di digitalizzare e integrare le catene del valore orizzontali e verticali dell'azienda, basandosi su un nuovo livello di organizzazione e controllo di tutta la catena del valore e del ciclo di vita dei prodotti ed è orientata alle esigenze dei clienti sempre più individualizzate.

La nuova frontiera nel campo della produzione è la “personalizzazione di massa”, ovvero l'offerta di prodotti e servizi che soddisfano le esigenze di ogni cliente e che vengono erogati con l'efficienza della produzione di massa. La produzione di massa personalizzata richiede sistemi di produzione flessibili, versatili, facilmente riconfigurabili.

La transizione della produzione manifatturiera verso l'adozione di questi sistemi, insieme al progressivo contrarsi del tempo di vita dei prodotti, stanno proiettando i sistemi di produzione verso lo sviluppo di una fabbrica che risponda in modo proattivo alla mutevolezza del mercato.

Questo processo, insieme all'avanzamento tecnologico descritto, mette profondamente in discussione i paradigmi dell'automazione industriale, così come conosciuta finora. I sistemi robotici e le automazioni largamente diffusi in questi anni, in grado di assicurare alta efficienza e ripetibilità, risultano non idonei ad un uso flessibile, a

causa delle dimensioni tipicamente ragguardevoli, della complessità di programmazione, dei rilevanti problemi di sicurezza e della difficoltà di integrarsi nell'architettura della *smart factory*. I robot, al pari delle altre macchine, possono essere integrati in un contesto di fabbrica digitale, mediante le altre tecnologie abilitanti, quali *Internet of things*, *Cloud Computing* e *Big Data*.

Non potendo rinunciare ai benefici dell'automazione e dovendo far fronte alle istanze scaturite dalla personalizzazione di massa, una promettente soluzione, che restituisce un bilanciamento tra automazione e flessibilità, appare risiedere nella Collaborazione Uomo- Robot (HRC).



Figura 0 – Alcuni Settori applicabili per Cobot

Capitolo 2

I robot collaborativi

2.1 Definizione e requisiti generali

Il termine robot collaborativo è introdotto per la prima volta nel 1996 (Colgate et al. 1996). In questo lavoro, un robot collaborativo, chiamato anche Cobot, è definito come un dispositivo robotico che manipola gli oggetti in collaborazione con un operatore umano.

Nello stesso anno è depositato il primo brevetto relativo ai cobot (US 5.923.129, Colgate et al. 1996) ed uno ulteriore (US 5.952.796, Colgate e Peshkin 1997) nel 1997. La descrizione dell'invenzione recita: *“La presente invenzione si concretizza in un nuovo tipo di dispositivo robotico, chiamato robot collaborativo o “cobot”. Un cobot rende possibile una collaborazione fisica diretta tra una persona e un manipolatore controllato dal computer. I cobot possono assumere una serie di configurazioni comuni ai robot convenzionali [...]. Superfici virtuali, campi potenziali virtuali e altri schemi di guida possono essere definiti nel software e resi fisicamente efficaci dal cobot [...]. Questa interazione fisica del cobot con un operatore umano richiede che il cobot sia in grado di resistere a forze comparabili a quelle esercitate dall'operatore umano [...]. A differenza di un robot convenzionale, ogni giunto o asse di movimento di un cobot non è azionato da un potente motore o attuatore, ma da un elemento di trasmissione. Questi elementi di trasmissione sono dispositivi meccanici, non motori, e quindi non possono fornire energia. Di conseguenza, il loro guasto non si traduce in un movimento improvviso. Lo sterzo o la regolazione di questi elementi di trasmissione viene eseguita da un motore sotto il comando di un computer”*.

Oggi, la normativa tecnica ISO 10218-1 2011 definisce un robot collaborativo come *“un robot destinato ad interagire fisicamente con gli esseri umani in uno spazio di lavoro condiviso”*.

La definizione proposta da Colgate e la descrizione del brevetto non identificano in modo univoco la destinazione applicativa dei robot collaborativi. Non mancano riferimenti ai robot assistenziali,

riabilitativi, sociali, domestici, sanitari e umanoidi a cui viene associata la connotazione di robot collaborativi. La normativa ascrive *de facto* i robot collaborativi alla famiglia più generale dei robot industriali, definiti a loro volta come “*manipolatori multifunzione riprogrammabili, con tre o più assi di rotazione, che possono essere fissi o mobili per l’impiego in applicazioni di automazione industriale*”.

Si ritiene pertanto opportuno, nel prosieguo della trattazione, riferirsi ai robot collaborativi come sotto-classe dei robot industriali, in ossequio a quanto previsto dalla normativa.

2.2 I cobot: l’evoluzione

L’idea di un dispositivo in grado di assistere l’uomo nelle mansioni industriali più faticose e ripetitive nasce negli anni ‘90 dal tentativo di General Motors, uno dei più importanti gruppi automobilistici mondiali, di rispondere alle problematiche legate all’ergonomia del lavoro e al proliferare delle malattie professionali all’interno dei suoi stabilimenti. È da una proficua simbiosi tra l’azienda e le università di Northwestern e California Berkeley che nascono i progetti dei primi cobot. Non dotati di una forza motrice interna, essi consentono il controllo computerizzato del movimento, reindirizzando o guidando un carico utile, in modo cooperativo, con il lavoratore umano. Le sperimentazioni eseguite rappresentano un contributo fondamentale alla comunità robotica per gli sviluppi successivi.

Nel corso degli anni i cobot via via passano dall’essere dispositivi “passivi” (IAD -*Intelligent Assist Device*) ad essere in grado di muoversi autonomamente, alimentati da forza motrice.

Nel 2004, il pioniere tedesco dei robot industriali KUKA rilascia il suo primo cobot, LBR 3, un robot leggero controllato al computer, risultato di una lunga collaborazione con l’istituto tedesco Aerospace Center. Successivamente, con il progresso tecnologico, rilascia il KUKA LBR 4 nel 2008 e il KUKA LBR iiwa nel 2013 (Figura 1-a).

Universal Robots (Figura 1-b) inizia a commercializzare il suo primo cobot, l’UR5, nel 2008; negli anni successivi rilascia il cobot UR10 (2012), un cobot da tavolo, UR3 (2015) e un cobot per carichi più elevati, UR16 (2019).

Rethink Robotics produce un cobot industriale, Baxter, nel 2012 e un robot collaborativo più piccolo e veloce, Sawyer, nel 2015, progettato per compiti di alta precisione (Figura 1-c). FANUC, il più grande produttore mondiale di robot industriali, rilascia il suo primo robot collaborativo nel 2015 - il FANUC CR-35iA con un carico utile di 35 kg (Figura 1-d). Da allora FANUC rilascia una linea più piccola di robot collaborativi, tra cui il FANUC CR-4iA, CR-7iA, CR-15 iA e le versioni a braccio allungato CR-7iA/L e Cr-14 iA/L.

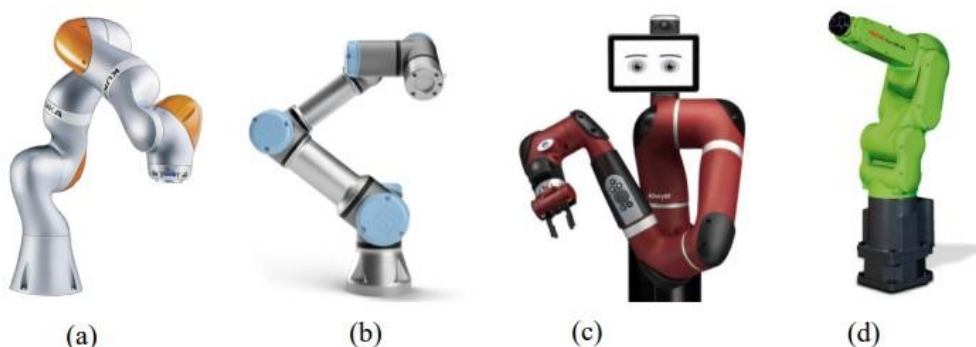


Figura 1 - Alcuni modelli delle aziende pioniere nel campo della robotica collaborativa.

(a) KUKA; (b) Universal Robots; (c) Rethink Robotics; (d) FANUC

2.3 Il mercato dei Cobot

Il mercato dei robot collaborativi è cresciuto esponenzialmente negli ultimi anni, trainando tutto il comparto della robotica. Gli analisti stimano che il mercato dei cobot, cresciuto oltre le 130 mila unità nel 2020 con un valore di mercato stimato in 3 miliardi di dollari, raggiungerà e supererà le 430 mila unità nel 2025 per un valore di oltre 6,8 miliardi di dollari. Certamente - stando ai dati disponibili

- i robot collaborativi rappresentano una piccola fetta del mercato complessivo dei robot industriali. Tuttavia, le previsioni lasciano presagire che nel giro di pochi anni i cobot rappresenteranno una porzione rilevante del mercato della robotica. Stando ai trend, infatti, nel 2025 la quota di mercato dei cobot dovrebbe avvicinarsi al 40% dell'intero comparto (Figura 2).

Le ragioni della rapida ascesa sono duplici: da una parte, i robot collaborativi consentono alle grandi imprese manifatturiere, che hanno già un alto grado di automazione, di riconfigurare in modo più sicuro,

C.S. AUTOMATION

flessibile e ergonomico alcune porzioni del processo produttivo, apportando solo modifiche minime all'assetto produttivo preesistente; dall'altra offrono l'opportunità per piccoli e medi produttori, che non dispongono ancora di processi produttivi automatizzati, di avere accesso ai miglioramenti di produttività e qualità offerti dai robot, fornendo un punto di partenza economico.

Non a caso, la robotica collaborativa rientra nei “sistemi avanzati di produzione” annoverati dalla Boston Consulting tra i 9 pilastri di Industria 4.0 che condurranno verso un nuovo modo di pensare il paradigma produttivo.

Quello dei robot collaborativi è un mercato ancora in fase “infantile”. La fase di “maturità” della tecnologia, e di conseguenza del mercato, si delinea attraverso l'acquisizione di esperienza nella progettazione e nella realizzazione di applicazioni collaborative di utenti finali e integratori di sistemi, nonché negli sviluppi tecnologici che riguardano *device*, *end effectors*, interfacce di programmazione che amplieranno ancor più il ventaglio di opportunità d'impiego dei robot collaborativi.

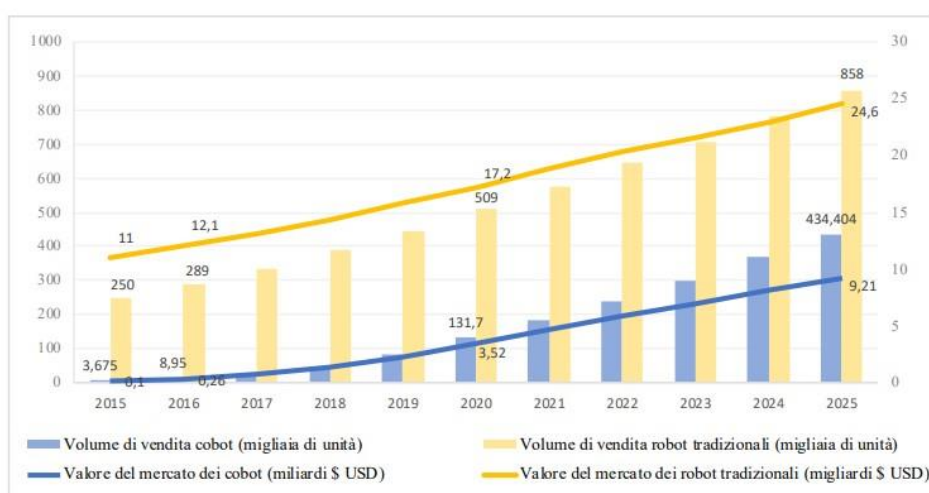


Figura 2 - Previsioni andamento del mercato dei robot collaborativi e tradizionali
(rielaborazione grafica dati Loup Ventures 2017)

Di pari passo alla crescita del mercato dei cobot, all'ingresso di un numero sempre maggiore di player e all'evoluzione dei modelli è cresciuta anche la necessità di standardizzare e consolidare il quadro normativo. In particolare, si registra l'emanazione della già citata normativa armonizzata ISO 10218:2011 “Robot e attrezzature per

robot: requisiti di sicurezza per robot industriali” e della specifica tecnica a suo supporto, ISO/TS 15066:2016 “Robot e attrezzature per robot - robot collaborativi”, che espande e completa le clausole riguardanti le modalità collaborative.

2.4 Caratteristiche generali

L’evoluzione repentina e frammentaria di questo fenomeno tecnologico e la comparsa sul mercato di nuovi produttori e di nuovi modelli rende complessa una definizione univoca dei requisiti e delle caratteristiche di un robot collaborativo o una classificazione organica dei modelli. Questa circostanza, tuttavia, non impedisce di individuare degli elementi di carattere generale.

Tipicamente i robot collaborativi sono robot antropomorfi, in grado, cioè, di riprodurre il movimento di un braccio umano con movimenti su 6 assi ed un inviluppo di lavoro sferico. Essi sono progettati per rispettare criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza e studiati per lavorare a stretto contatto con l’operatore anche senza barriere protettive intorno.

Essi presentano analogie e sostanziali differenze rispetto alla configurazione tipica dei robot industriali tradizionali.

Sono generalmente composti da:

- una struttura meccanica o manipolatore, che consiste in un insieme di corpi rigidi (bracci) interconnessi tra di loro per mezzo di articolazioni meccaniche (giunti). La maggior parte dei produttori presentano robot collaborativi mono-braccio, come ad esempio, Universal Robots, KUKA LBR iiwa e Fanuc CR-iA. Altri costruttori optano per robot a doppio-braccio (ad es. ABB YuMi, Figura 3). I cobot, ridotti nell’ingombro, sono realizzati con materiali leggeri e tendono ad avere forme più arrotondate rispetto ai robot tradizionali, in modo da diffondere la forza su una superficie maggiore e ridurre la pressione applicata su un oggetto esterno o su una persona.



Figura 3 - Esempio di modello *dual-arm*: ABB Yumi

- attuatori elettrici, che imprimono il movimento al manipolatore attraverso l'azionamento dei giunti. Infatti, mentre i robot tradizionali hanno giunti molto rigidi con dispositivi di azionamento ad alta forza e coppia elevata, i cobot hanno giunti che possono fornire movimenti fluidi, in modo che possano interagire senza soluzione di continuità con le loro controparti umane e non necessitino di dispositivi di azionamento ad alta forza.

- un'unità elettronica di programmazione e controllo, dotata di un'unità di memoria, dove viene memorizzato il programma di istruzioni e un'unità di elaborazione aritmetico- logica, costituita da un componente hardware, che traduce e codifica i dati in entrata (le istruzioni del programma e le informazioni esterne raccolte dai sensori) e trasmette i dati in uscita agli attuatori, permettendo così il movimento del manipolatore.

- un terminale di interfaccia, per mezzo del quale l'operatore umano può programmare il robot ed interagire con esso (Figura 4). Per mezzo del videoterminale l'unità di controllo può inoltre comunicare con l'operatore mostrando messaggi, ad esempio in caso di anomalie.



Figura 4 - Terminale portatile SmartPAD e sistema di controllo per robot KUKA

C.S. AUTOMATION

- sensori che misurano lo stato del manipolatore (sensori propriocettivi) ed eventualmente lo stato dell'ambiente (sensori eterocettivi). Tra questi ultimi, i sensori di coppia e di forza incorporati nei robot a “forza limitata” consentono di fermare il robot quando è sovraccarico e di rilevare gli impatti e le forze anomale. Qualora il braccio del robot colpisca un oggetto o un operatore, infatti, viene indotto un arresto di protezione. Questa prerogativa, assente nei robot industriali tradizionali, consente ai cobot, al verificarsi di ulteriori stringenti condizioni, di lavorare a fianco degli esseri umani senza barriere fisiche.

2.5 Specifiche tecniche

Le caratteristiche tecniche principali che differenziano i modelli attualmente in commercio di robot collaborativi, riassunti in Tabella 1, sono le seguenti:

- GDL (gradi di libertà): detti anche assi, sono il numero dei giunti di un manipolatore. Un cobot ha generalmente 6 GDL, che è il numero minimo teorico affinché il suo braccio possa raggiungere ogni punto all'interno dello spazio di lavoro ed il suo terminale sia in grado di assumere qualunque orientamento. Vi sono, tuttavia, robot collaborativi dotati di un numero maggiore di gradi di libertà, che ne conferiscono maggiore manovrabilità.

Esempi in tal senso sono i modelli Yumi di ABB e KUKA LBR iiwa, dotati di 7 GDL (Figura 5).

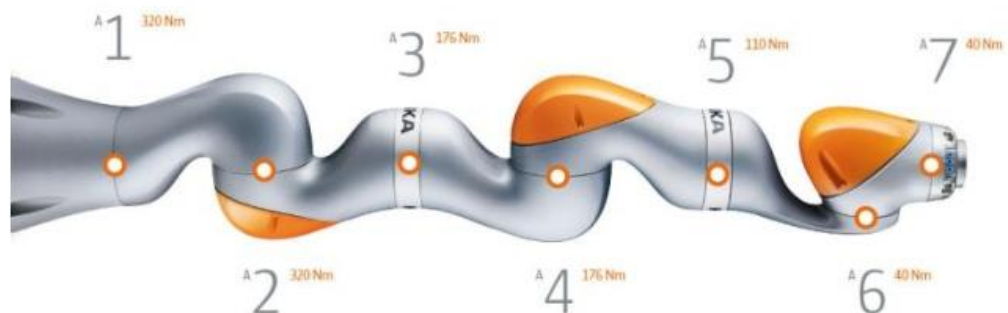


Figura 5 - Dettaglio giunti e GDL di un modello KUKA LBR iiwa

- payload (carico utile): è il peso che il robot può sopportare. Tutti i robot hanno un determinato carico utile, che viene calcolato senza il peso dell'*end effector* o dell'utensile. Tendenza comune dei costruttori è quella di progettare robot collaborativi con payload bassi. Fanno eccezione taluni modelli collaborativi di Fanuc e Comau (Tabella 1).

- peso del robot: è un parametro significativo per rilevare la flessibilità d'impiego del robot. Un robot "pesante" potrebbe necessitare di un'intera struttura per posizionare il robot in un nuovo posto.

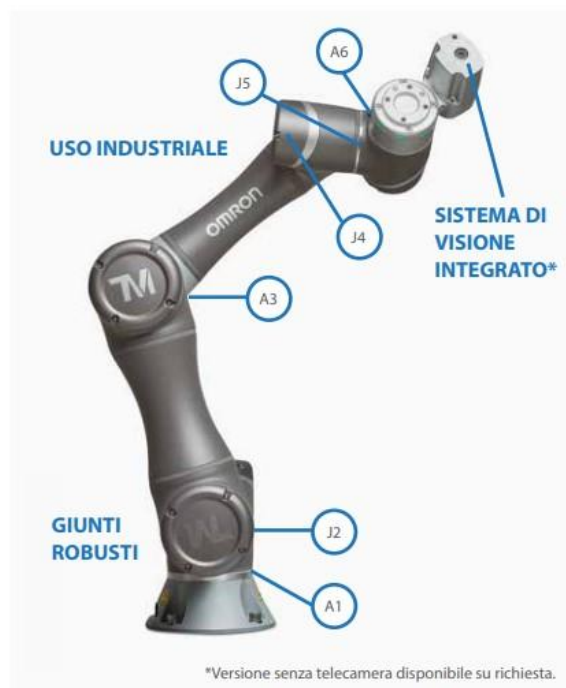
- raggiungibilità: è la misura della distanza di presa del robot da un punto minimo a quello più lontano. Denominato anche *raggio d'azione* con base il centro del robot.

- ripetibilità: capacità del robot di raggiungere le coordinate cartesiane indicate in sede di programmazione. In particolare, il parametro indica la tolleranza di riproducibilità dei movimenti del robot.

Gli obiettivi chiave della progettazione di robot collaborativi possono essere così riassunti:

- interazione sicura con i lavoratori;
- riduzione dei costi per giustificare l'uso di manodopera robotizzata;
- operazioni robotizzate ad una velocità compatibile con le capacità umane; - operazioni fluenti e silenziose;
- "fattori di forma" compatti e leggeri;
- programmazione semplice e veloce per produzione flessibile.

Anatomia del cobot OMRON TM



- 1 Il tasto VISION (Visione) introduce attività di visione e sequenze.
- 2 Il tasto POINT (Punto) registra la posizione nel programma del cobot
- 3 Il tasto FREE (Hand Guide) consente il movimento servo-assistito del robot
- 4 Porta I/O analogica
- 5 L'indicatore luminoso ad anello indica lo stato del robot
- 6 Porta I/O digitale
- 7 Telecamera integrata con luce incorporata
- 8 Tasto Gripper
- 9 Flangia dell'end-effector

Figura 5.1 – Dettagli e anatomia del cobot OMRON TM

Tabella 1 - I principali robot collaborativi con descrizione delle loro caratteristiche tecniche principali

		Modello	N°assi	Payload (Kg)	Raggiungibilità (mm)	Peso (Kg)	Velocità giunti* (Rad/s)	Visione e Sensori
UNIVERSAL ROBOT		UR3	6	3	500	11	da 1,57 a 3,14	Sensore di forza virtuale (monitoraggio corrente assorbita dai giunti)
		UR5	6	5	850	18,4	1,57	
		UR10	6	10	1300	28,9	1,05	
		UR16	6	16	900	33,1	da 1,05 a 1,57	
KUKA		LBR iiwa 7	7	7	800	22,3	da 1,71 a 3,14	Sensori di forza e coppia per ogni assi
		LBR iiwa 14	7	14	820	29,3	da 1,48 a 2,36	
ABB		Yumi IRB 14000	7	0,5	559	9,5	da 3,14 a 6,98	Sistema di visione sui terminali, sensori di forza e coppia per ogni assi
		Yumi IRB 14050	7+7	1	500	38	da 3,14 a 6,98	
Fanuc		CR-4 iA	6	4	550	48	4,36	Pelle esterna, sensori di forza e coppia alla base
		CR-7 iA	6	7	717	53	4,36	
		CR-7 iA/L	6	7	911	55	4,36	
		CR-15 iA	6	15	1441	255	4,36	
		CR- 35 iA	6	35	1813	990	4,36	
Rethink robotics		Sawyer	7	4	1026	19	N/A**	Sensori di forza per ogni asse e camera frontale al polso
Comau		AURA	6	170	2790	1615	da 0,74 a 1,66	Pelle sensorizzata, rilevatori laser
TechMan		TM5-700	6	6	700	22,1	da 1,57 a 2,35	Sistema di visione integrato
		TM5-900	6	4	900	22,6	da 1,57 a 2,35	
Yaskawa		Motoman HC 10	6	10	1200	45	da 1,13 a 2,18	Sensori di forza e coppia per ogni asse
Doosan		M0609	6	6	900	27	da 1,31 a 1,96	Sensori di forza e coppia per ogni asse
		M1509	6	15	900	32	da 1,31 a 1,96	
		M1013	6	10	1300	33	da 1,05 a 1,96	
		M0617	6	6	1700	34	da 0,87 a 1,96	
AUBO		i3	6	3	625	15,5	1,53	Sensori di forza e coppia integrati negli azionamenti del motore
		i5	6	5	924	24	da 1,31 a 1,57	
		i7	6	7	1150	32	da 1,53 a 1,57	
		i10	6	10	1350	37	da 1,53 a 1,57	

2.6 Ambienti applicativi

Le caratteristiche dei robot collaborativi più apprezzate dal mercato figurano certamente flessibilità e versatilità di impiego. Lo attesta la penetrazione del prodotto in svariati settori industriali e in molteplici contesti applicativi. Eccettuano, in tal senso, i compiti che richiedono la movimentazione di carichi eccessivamente pesanti o tempi di esecuzione impossibili da sostenere. Se più complessa risulta la penetrazione nel settore farmaceutico e alimentare (velocità elevate) o nell'industria pesante (metallurgico), i robot collaborativi hanno conquistato il settore automotive, dell'elettronica, della mecatronica, della lavorazione della plastica, attraverso il loro funzionamento in numerose applicazioni (Figura 6). In particolare, in:

- *Compiti di finitura (lucidatura, sbavatura o rettifica)*: i robot collaborativi possono imprimere lungo l'intera traiettoria una forza di pressione ortogonale al movimento dell'utensile, garantendo omogeneo dosaggio della stessa.

- *Avvitatura*: i cobot possono essere utilizzati per eseguire automaticamente la maggior parte delle applicazioni di avvitatura, grazie alla dotazione software e alla gestione del controllo di forza.

- *Confezionamento e palletizzazione*: i cobot possono eseguire tali compiti, migliorando la sincronizzazione con l'intero processo produttivo, la standardizzazione della qualità di imballaggio, la velocizzazione delle operazioni e una maggior efficienza.

- *Incollaggio e erogazione*: la maggior parte dei cobot sono certificati per l'impiego in processi che necessitano l'erogazione di fluidi, garantendo efficienza, flessibilità e sicurezza.

- *Asservimento macchine*: i cobot possono essere utilizzati per la maggior parte delle applicazioni di asservimento macchine utensili e sono facilmente riadattabili al variare del mix produttivo, evitando la presenza per lunghe ore di un operatore umano davanti a un macchinario industriale.

- *Assemblaggio*: i cobot possono gestire il montaggio di plastiche, legni, metalli e un'ampia gamma di altri materiali, migliorando allo stesso tempo l'efficienza e la qualità del processo.

- *Pick and place*: i cobot possono eseguire compiti di prelievo e posizionamento in modo autonomo, riducendo tempi ciclo e sprechi di materiale, liberando l'operatore umano da compiti ripetitivi.

-*Controllo qualità*: i cobot, opportunamente equipaggiati, possono effettuare ispezioni e controllo qualità di parti e prodotti industriali, rilevando scarti e componenti difettosi prima che i prodotti siano confezionati, in modo da aumentare il livello di qualità finale dei lotti di produzione e ridurre i costi per i pezzi non conformi agli standard.

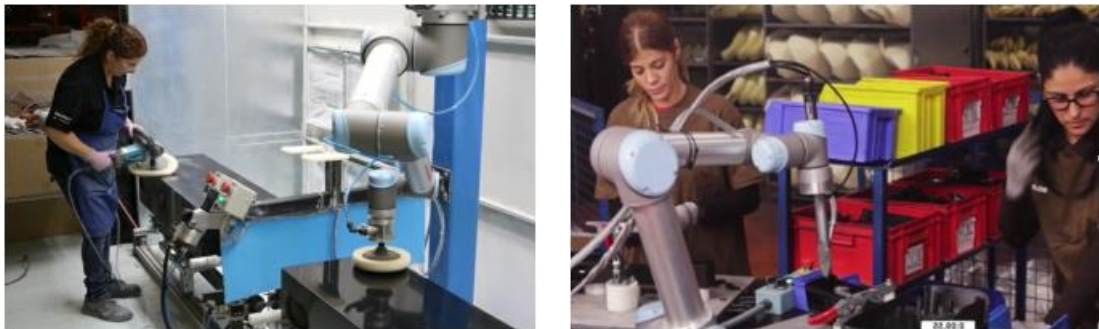


Figura 6 – Robot collaborativi Universal Robot impiegati in applicazioni di lucidatura e avvitatura.

Robot industriali tradizionali		Cobot
Sicurezza	Richiedono una barriera fisica, ad esempio una recinzione o una gabbia, per garantire la sicurezza.	Sono progettati per essere intrinsecamente sicuri, ma potrebbero richiedere sensori per garantire la sicurezza dell'applicazione (ad es. lo scanner laser di sicurezza OMRON) in base alla valutazione dei rischi. Generalmente non richiedono barriere fisiche quando si lavora in modalità collaborativa. L'impostazione di sicurezza del software è semplice grazie all'interfaccia utente grafica.
Area di lavoro	Separata dall'area di lavoro degli esseri umani.	Può essere condivisa con le persone.
Ingombro	Elevato	Compatto
Flessibilità	No. Fissi in una posizione, lavorano a un'attività dedicata.	Sì. Possono essere spostati da una posizione all'altra nel corso della giornata per lavorare su diverse attività. La telecamera integrata e il posizionamento dei landmark consentono un rapido spostamento.
Programmazione	Difficile. Richiede competenze e formazione.	Facile. Può essere eseguita con una formazione minima.
Configurazione	Richiede tempo e competenze avanzate.	Facile e veloce.
Applicazione	Adatti per la produzione di massa ad alte velocità.	Adatti per una produzione di volumi altamente diversificati e di volumi ridotti a una velocità paragonabile a quella degli esseri umani. Utilizzabili a velocità elevate con misure di sicurezza.
Tempo di ciclo (Pick & Place)	Pochi secondi	Oltre 5 secondi
Velocità di processo (percorso)	Inferiore a 8,2 m/s	Inferiore a 1,4 m/s
Ripetibilità	+/- 0,02 mm	+/- 0,05 mm
Ambiente	Requisiti IP Oltre IP54	IP54 (braccio robotico), IP32 (box di comando)
Complessità dei processi	Possono essere complessi	Devono essere semplici

Tabella 0 – Differenza tra robot antropomorfi e cobot

2.7 Calcoli cinematici per robot

Per poter utilizzare il robot è bene conoscere e comprendere come, dal punto di vista cinematico, riesce il robot con i giunti connessi ai rispettivi bracci, a svolgere determinati movimenti per ottenere una posizione desiderata nello spazio di lavoro.

In questo capitolo viene spiegata la cinematica diretta e inversa del robot iniziando con le definizioni principali e concludendo con le soluzioni della cinematica.

2.8 Principali catene cinematiche

Consideriamo il robot come una catena cinematica aperta costituita da un insieme di giunti (detti joint) ovvero elementi di collegamento dei singoli segmenti chiamati link; questi, a loro volta, sono azionati da un motore elettrico.

Il giunto può essere rotatorio, planare, cilindrico, prismatico, sferico, o elicoidale. Per ogni tipologia di robot per poter collegare uno o più bracci servono uno o più giunti. Ad esempio, nel nostro caso di robot rotazionale, ci serviamo di 6 giunti rotoidali. Un estremo della catena cinematica è vincolato ad una base solida (ad esempio tavolo da lavoro), mentre all'altro estremo è collegato un accessorio che consentirà di svolgere una determinata lavorazione o procedimento oppure una presa come una pinza.

Il robot è descritto da un determinato numero di gradi di libertà che fornisce la posizione dei bracci robotici. In fisica, il numero di gradi di libertà di un punto materiale equivale al numero di variabili indipendenti essenziali per poter definire, senza possibilità di equivoci, la sua posizione nello spazio. Inoltre, il numero di gradi di libertà di un sistema è pari a quello del numero di coordinate generalizzate per descrivere il suo moto all'interno dello spazio.

Diciamo che: un punto materiale libero di muoversi nello spazio monodimensionale possiede un grado di libertà, un punto che si muove all'interno di uno spazio bidimensionale ha due gradi di libertà, ed un punto che si muove all'interno di uno spazio tridimensionale ha tre gradi di libertà. Se invece

considerassimo di avere n° punti materiali, e se tutti i punti sono liberi di muoversi nello spazio, il sistema avrà $3n^\circ$ gradi di libertà.

Definiamo corpo rigido un sistema di punti materiali dove le distanze fra i punti si mantengono costanti nel tempo indipendentemente dalle eventuali sollecitazioni a cui è soggetto il sistema. Un corpo rigido in moto piano possiede tre gradi di libertà: due sono le coordinate del punto e il terzo è l'angolo formato dalla retta rispetto al riferimento preso in considerazione. Invece, se, il corpo rigido può muoversi liberamente nello spazio i suoi gradi di libertà saranno sei di cui tre sono le coordinate e altri tre sono gli angoli. Le coordinate permettono al corpo di traslare mentre gli angoli permettono di ruotare, come in Figura 2.1.

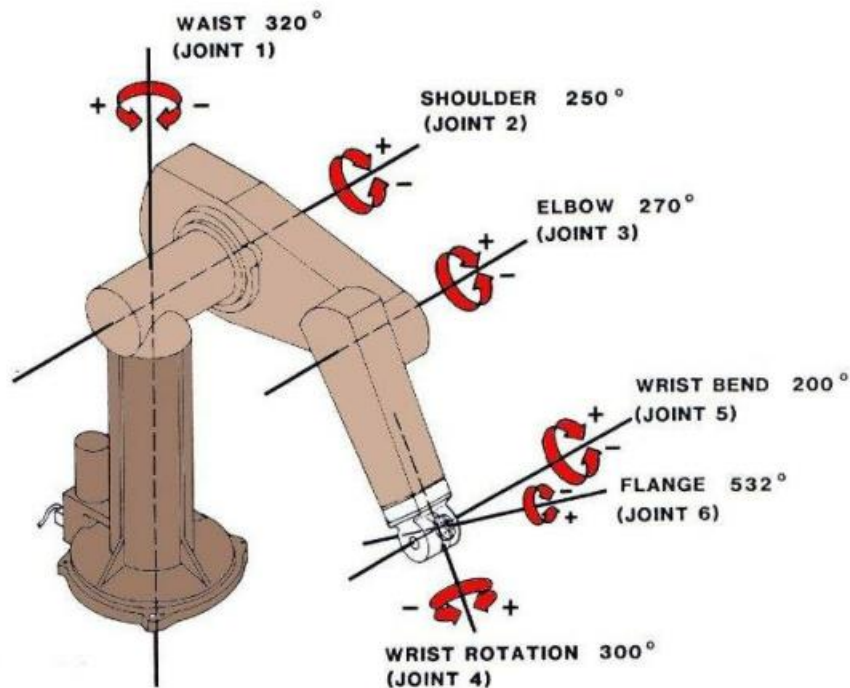


Figura 2.1 – Rappresentazione grafica dei gradi di libertà.

La catena cinematica è l'unione di più componenti, nel nostro caso i componenti vengono chiamati bracci (in inglese arms o links).

Una catena cinematica può essere definita sia semplice che composta; nel primo caso ogni braccio è accoppiato ad un solo membro o al più membri adiacenti, invece, nel secondo caso, almeno un segmento è accoppiato con tre o più altri membri.

Se viene fissato un segmento della catena cinematica dove il membro fisso è detto telaio otterremmo un meccanismo, mentre se fissiamo tutti i membri della catena cinematica otteniamo una struttura.

Elenchiamo ora le principali catene cinematiche:

- Catena cinematica aperta: è un sistema composto da un braccio accoppiato ad un giunto; l'estremità della catena, come nel nostro caso l'effetto finale è libera cioè priva di alcun vincolo. Questo tipo di catena riguarderà il nostro caso del Cobot dove all'estremo finale è libero di muoversi per poter effettuare la lucidatura.
- Catena cinematica chiusa: ogni braccio è accoppiato da entrambi le parti ad un giunto e le estremità della catena cinematica sono fisse cioè non sono libere di muoversi.

2.8.1 Cinematica diretta

Descriviamo il metodo costruttivo per definire le posizioni, velocità e delle accelerazioni dell'effettore finale (l'ultima parte della catena cinematica) in base alla posizione di ogni giunto attivo.

Per quanto riguarda la soluzione per la posizione dell'utensile nello spazio di lavoro si può usare la Cinematica Diretta, mentre per quanto concerne la soluzione della posizione dei giunti in modo da avere una determinata posizione del robot all'interno dello spazio di lavoro usiamo Cinematica Inversa.

Nel nostro caso si tratta di una struttura meccanica composta da $n+1$ bracci (7 bracci) connessi fra di loro da n giunti (6 giunti) dove il braccio 0 è fissato su una base fissa. Per determinare il numero dei gradi di libertà è

bene sapere che ogni giunto fornisce un singolo grado di libertà (6 gradi di libertà).

Definiamo ora i tipi di spazio a disposizione:

- Lo spazio di lavoro o Workspace è la regione fornita dall'utensile quando ai giunti del robot si fanno svolgere tutti i possibili movimenti. Esso, infatti, dipende dalla lunghezza di ogni braccio e dall'intervallo di variazione associato ad ogni giunto.
- Lo spazio dei giunti (o spazio delle configurazioni) è lo spazio in cui è definito il vettore $q(t)$ delle variabili di giunto, dove il vettore è il vettore di posizione nel tempo. La sua dimensione è indicata con N ed è lo spazio a cui appartiene il vettore q .
- Lo spazio operativo è lo spazio cartesiano in cui è definito il vettore $r = (p, \phi)$. La sua dimensione è indicata con M ed è lo spazio che contiene il vettore r .

Dove:

- q è il vettore delle variabili di giunto, ha dimensione $N \times 1$ (unità di misura in gradi)
- p è il vettore delle coordinate cartesiane della posizione dell'ultimo effettore
- ϕ è il vettore che rappresenta l'orientamento dell'ultimo effettore

Per quanto riguarda la cinematica Diretta, sono noti i vettori degli angoli dei giunti (q) e i parametri geometrici dei segmenti per procedere alla soluzione dobbiamo trovare la funzione vettoriale non lineare:

$r = f(q)$, dove r è l'incognita.

La funzione f , non lineare in generale, permette quindi di trovare le variabili nello spazio operativo con la conoscenza delle variabili nello spazio dei giunti.

Mentre per la cinematica inversa:

$q = f^{-1}(r)$, dove q è l'incognita e r è nota.

Prima di affrontare il problema della cinematica è bene richiamare qualche nozione di algebra lineare.

Consideriamo innanzitutto un punto P le cui coordinate sono espresse in due sistemi di riferimento

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, \text{ sistema di riferimento iniziale OXYZ} \rightarrow p' = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix}, \text{ sistema di riferimento ruotato OUVW}$$

Definiamo le matrici di rotazione, esso trasforma le coordinate del vettore espresse in un sistema rotazionale OUVW (sistema solidale con il corpo rigido e si muove con esso) nelle coordinate espresse in un sistema di riferimento OXYZ (sistema fisso nello spazio tridimensionale). Ma prima di svolgere la trasformazione introduciamo gli angoli di Eulero che descrivono la posizione di un sistema di riferimento UVW solidale con un corpo rigido attraverso delle rotazioni a partire da un sistema fisso XYZ; entrambi i sistemi di riferimento coincidono nell'origine.

I 3 angoli di Eulero sono:

- Angolo di precessione(α): è l'angolo tra l'asse X e la linea dei nodi, esso è definito in $[0, 2\pi]$ oppure in $[-\pi, \pi]$
- Angolo di mutazione (φ): è l'angolo tra gli assi Z e W, definito in $[0, \pi]$, oppure $[-\pi/2, \pi/2]$
- Angolo di rotazione propria (θ): è l'angolo tra la linea dei nodi e l'asse U, è definito in $[0, 2\pi]$ oppure $[-\pi, \pi]$

La relazione per compiere questa trasformazione, come in Figura 2.2, è:

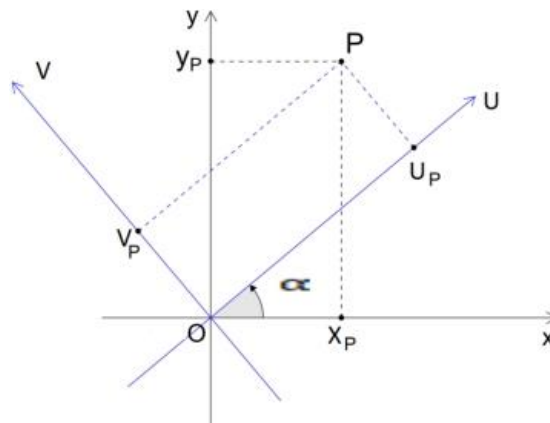


Figura 2.2: Rappresentazione sul piano cartesiano della rotazione

C.S. AUTOMATION

$$\begin{aligned} p_{xyz} &= R p'_{uvw} \\ p^T p &= p'^T R^T R p' \end{aligned}$$

Dove R indica la rotazione. Le matrici di rotazione, come in Figura 2.3, ci fornisce l'orientamento di una terna di coordinate rispetto ad un'altra mettendo in relazione le coordinate di uno stesso punto in due terne differenti cioè di origine comune.

La matrice di rotazione fondamentali intorno agli assi XYZ sono:

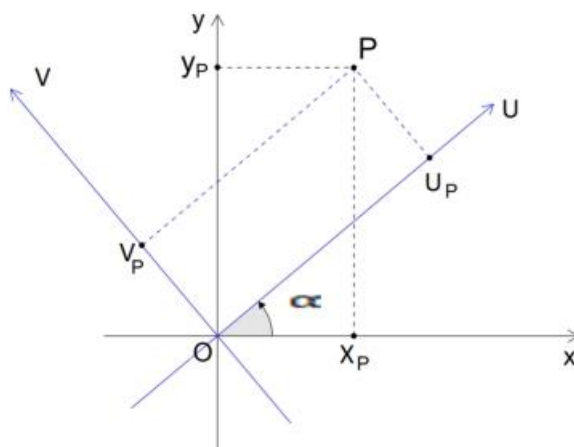


Figura 2.3: Rappresentazione sul piano cartesiano della rotazione

- Rotazione intorno all'asse X:

$$R_{x,\alpha} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

- Rotazione intorno all'asse Y:

$$R_{y,\varphi} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

- Rotazione intorno all'asse Z:

$$R_{z,\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Per poter rappresentare una sequenza di rotazioni finite intorno agli assi principali del sistema di riferimento abbiamo bisogno delle matrici di rotazione scomposte che è sostanzialmente un prodotto (non commutativa) fra le matrici fondamentali.

$$R = R_{x,\alpha} R_{y,\varphi} R_{z,\theta}$$

Vista la vasta facile applicazione della notazione matriciale al calcolo automatico introduciamo una nuova rappresentazione in modo tale da scrivere ogni trasformazione rigida che incontriamo in forma matriciale. Questo metodo può essere fatto introducendo lo spazio R3 in un sottoinsieme di R4, fissando la seguente relazione:

$$\alpha \in R3 \rightarrow \bar{\alpha} \in R4 ,$$

Questa rappresentazione è una rappresentazione dove nel nostro caso si traduce in una rappresentazione di un vettore posizione di N componenti con un vettore N+1 componenti:

$$P = (p_x, p_y, p_z)^T \rightarrow P' = (wp_x, wp_y, wp_z, w)^T$$

C.S. AUTOMATION

Se siete interessati a ricevere senza impegno la seconda parte della guida tecnica per l'uso del robot collaborativo ...

”Ciao. Io sono Cobot”

mandate una e-mail di richiesta a:

info@csautomatic.com