



INTRODUZIONE

# GENERALITÀ SUI ROBOT INDUSTRIALI

*Le pagine seguenti sono tratte e riadattate dal primo capitolo di un testo universitario, non più in pubblicazione: "Generalità sui robot industriali" di A. Curami, R. Sala*

# Generalità sui robot industriali

## 1 - La struttura meccanica

La struttura meccanica dei robot è costituita da una sequenza di elementi meccanici (**link**) connessi tra loro da **giunti (joint)** che ne consentono il movimento relativo. La struttura è seriale quando i singoli elementi sono collegati l'uno all'altro come gli anelli di una catena; è parallela quando tutti gli elementi sono collegati sia a terra sia all'estremità della struttura tramite dei giunti. L'approccio seriale garantisce una più ampia possibilità di movimento, mentre quello parallelo permette di ottenere una maggiore rigidità. Osservando l'esempio di fig. 1 è infatti evidente che il robot di sinistra può spostare la sua estremità "EEa" in una porzione di piano maggiore di quella raggiungibile da "EEb" mentre quello di destra offre una maggiore rigidità grazie alla struttura triangolare.

Le strutture seriali, definite dalla meccanica applicata **catene cinematiche aperte**, attualmente, sono di gran lunga le più diffuse in ambito industriale.

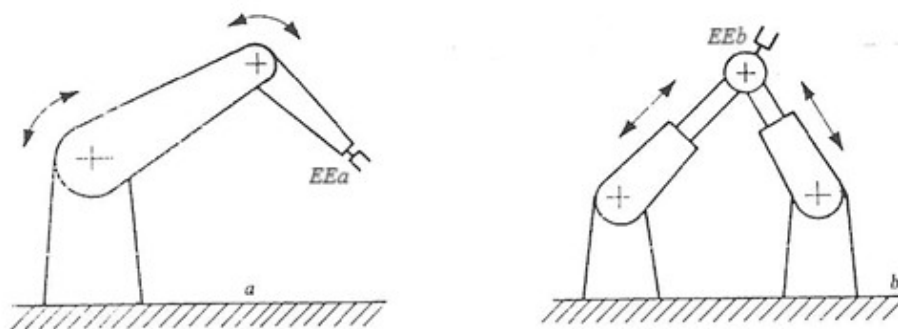


Fig. 1 - le frecce che indicano le possibilità di movimento

Va comunque sottolineato un crescente interesse attorno alle strutture parallele che, oltre a garantire una maggiore rigidità, permettono in alcuni casi di raggiungere prestazioni superiori a quelle seriali; di conseguenza sul mercato cominciano ad essere proposte, solo per ambiti specifici per ora, soluzioni parallele. Tra gli elementi che costituiscono la catena cinematica di un robot il primo è quello collegato a terra che viene definito telaio, quando è fisso (fig.2a) oppure base mobile, quando ha delle possibilità di movimento (fig.2b). L'ultimo elemento della catena seriale è collegato al link precedente e l'altra sua estremità (EE = **End Effector**) termina con un attacco a cui andrà collegato un utensile (**tool**) specifico per l'applicazione alla quale il robot verrà destinato.

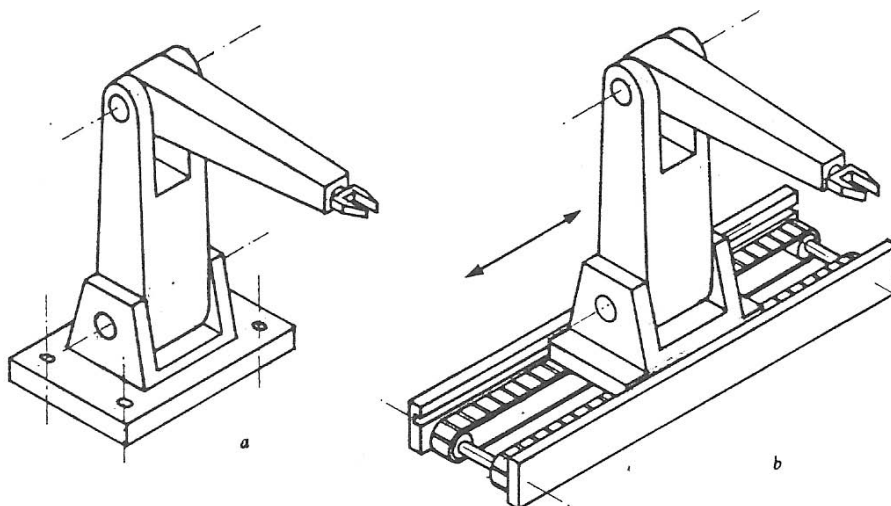


Fig. 2

Il **giunto** di collegamento tra i vari elementi meccanici è classificato come **rotatorio** o **prismatico**, in funzione del tipo di movimento relativo, rotatorio o traslatorio, che consente ai suoi link.

## 2 - Gradi di libertà o Degree of Freedom (DoF)

Un arbitrario spostamento di un corpo rigido può essere ottenuto componendo dei singoli spostamenti elementari, **lineari o rotativi**; ognuno di essi rappresenta un **grado di libertà (DoF)** per l'oggetto. I robot industriali hanno spesso lo scopo di manipolare degli oggetti/tool nello spazio, per muoverli controllandone **posizione e orientazione (P&O)**. Gli oggetti/tool che i robot si trovano a dover manipolare sono, nella quasi totalità dei casi, riconducibili a corpi solidi. Si tratterà quindi di studiarne i possibili movimenti nello spazio per poi definire le caratteristiche che la struttura deve possedere per poterli realizzare. Se l'oggetto viene afferrato, è solidale con l'estremità della struttura e ne riproduce fedelmente gli spostamenti.

### 2.1 - Gradi di libertà di un **corpo rigido**

Un corpo rigido ha, nello spazio 3D, 6 gradi di libertà corrispondenti ad altrettante **possibilità di movimento**. Ciò significa che la sua posizione e la sua orientazione rispetto ad un sistema di riferimento sono descritte da 6 parametri. Per rendere più intuitiva questa affermazione si immagini di rendere solidale con l'oggetto rigido una terna cartesiana OXYZ (fig. 3). I sei parametri prima citati possono essere così interpretati: 3 definiscono la posizione dell'origine della terna OXYZ mentre le rimanenti 3 ne individuano l'orientazione. I movimenti corrispondenti possono essere ricondotti a 3 traslazioni (lungo gli assi XYZ) e 3 rotazioni (attorno agli assi XYZ). Questo permette di affermare che la struttura di un robot, per poter muovere e orientare arbitrariamente un corpo nello spazio, ha bisogno di un minimo di 6 gradi di libertà (6DoF). Con analoghe considerazioni è facile arrivare a concludere che un corpo rigido, se vincolato a muoversi in un piano, ha 3 gradi di libertà. Infatti, come mostra la fig. 4, le sue possibilità di movimento si riducono a due traslazioni (lungo gli assi X e Y) e a una rotazione (attorno a un asse verticale).

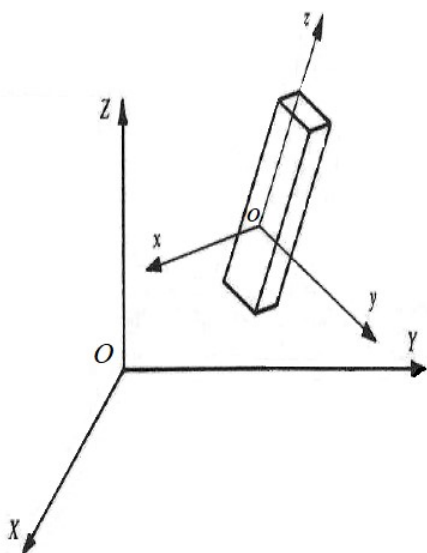


Fig. 3

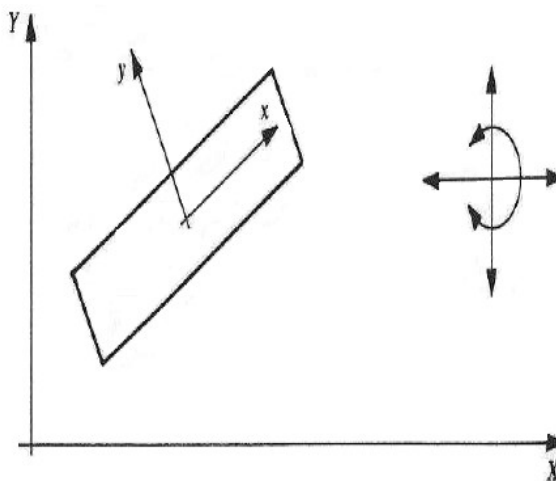


Fig. 4 (un po' deformata)

## 2.2 - Gradi di libertà di un giunto

Un giunto ha tanti gradi di libertà quante sono le possibilità di movimento relative permesse ai due elementi (link) che esso collega.

Nella realtà possono essere realizzati dei giunti che permettono fino a tre gradi di libertà. Il giunto sferico permette ad esempio tre possibilità di spostamento relative ai due elementi che collega; un esempio molto semplice di questo giunto si ha nei porta penna orientabili (fig. 5a). In tal caso i gradi di libertà permessi sono 3, in quanto la penna può essere ruotata sia attorno ad un asse verticale che attorno a due assi orizzontali ortogonali tra loro. In altre parole un solo giunto sferico permette di orientare in tutti i modi possibili un oggetto. Il giunto cilindrico (fig. 5b) ne permette due; infatti un oggetto incollato alla sua estremità può soltanto ruotare attorno all'asse del giunto e traslare lungo esso. Un esempio pratico di un giunto di questo tipo è un cilindro in cui lo stelo, oltre alla possibilità di traslare, ha anche quella di ruotare attorno al suo asse.

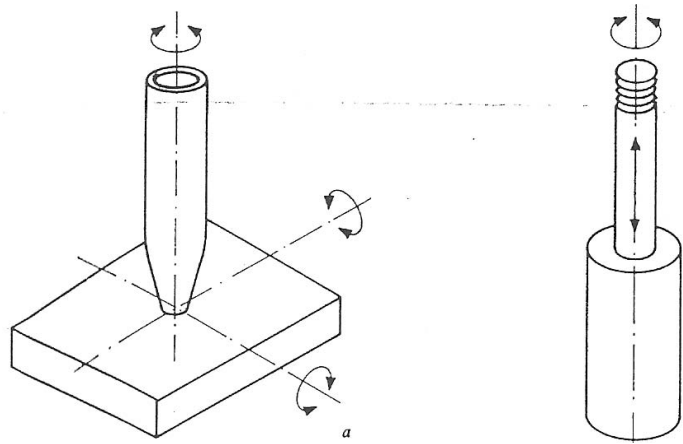


Fig. 5

I giunti a 1 grado di libertà (1DoF) sono classificati in base al tipo di movimento relativo permesso agli elementi ad esso collegati. Il giunto prismatico permette un moto relativo traslatorio, come ad esempio un manicotto che scorre su una guida lineare (fig. 6a). Il giunto rotatorio permette ai due link un movimento relativo rotatorio e si realizza tutte le volte in cui c'è un accoppiamento perno/cuscinetto (fig. 6b). Il giunto elicoidale permette un movimento relativo elicoidale, cioè una rotazione intorno ad un asse accompagnata da una traslazione lungo lo stesso. Tale movimento si realizza ad esempio tra una vite ed il suo dado (fig. 6c).

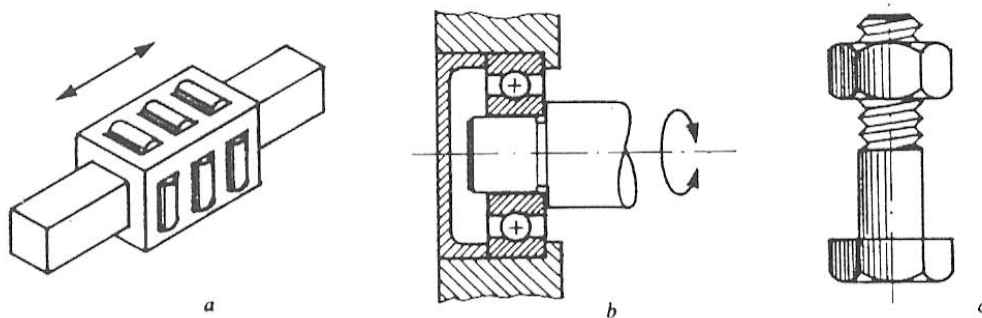


Fig. 6

## 2.3 - Gradi di libertà di un robot

I robot, come tutte le strutture meccaniche realizzate con parti rigide collegate fra loro da giunti, sono caratterizzati dal numero di gradi di libertà. Tale numero dipende dal tipo di giunti utilizzati e dal loro numero.

Le strutture dei robot sono sempre realizzate utilizzando dei giunti di tipo prismatico o rotatorio, ciascuno a 1 grado di libertà.

Il motivo è questo: i giunti sono accoppiati a un motore ed è per questo che sono in grado di produrre un solo movimento; il motore di per sé consente solo un movimento rotatorio che, opportunamente combinato, può trasformare il movimento in lineare. Nei

robot si possono trovare altri tipi di giunti, tipicamente sferici, ma puramente passivi; il loro impiego si rende necessario quando si utilizzano strutture parallele, o all'interno di cinematismi per la trasmissione del moto. Il nostro interesse si soffermerà quindi sui primi, attivi, che sono in grado di spostare e di orientare (P&O) nello spazio l'estremità (EE=end effector) della struttura del robot. L'utilizzo esclusivo di giunti a 1 grado di libertà porta all'affermazione seguente:

I robot hanno tanti gradi di libertà quanti sono i giunti della loro struttura. <sup>1</sup>

Il parametro che definisce la posizione relativa assunta dai 2 elementi (link) del giunto viene detto **variabile di giunto**, ed è rappresentato da un angolo  $\theta$  di rotazione o da una distanza  $d$  di traslazione.

## 2.4 - Gradi di libertà dell'estremità della struttura

La struttura di un robot deve permettere 6 diverse possibilità di movimento alla sua estremità (end effector) in modo da poterla spostare ed orientare nello spazio in modo arbitrario; tanti sono infatti i gradi di libertà necessari per poter manipolare in modo completo un oggetto/tool. Lo scopo può essere raggiunto con l'utilizzo di sei giunti ben disposti, cioè in grado di generare dei movimenti indipendenti tra loro.

Bisogna prestare attenzione in quei casi in cui due giunti non generano movimenti indipendenti; questo accade quando due giunti rotatori ..... hanno gli assi di rotazione paralleli, o quando due giunti prismatici permettono il movimento nella medesima direzione. Si parla allora di giunti ridondanti in quanto entrambi consentono lo stesso grado di libertà e quindi uno dei due potrebbe essere eliminato senza penalizzare le possibilità di movimento dell'estremità della struttura. In sintesi si può dire che una coppia di giunti ridondanti aggiunge due gradi di libertà alla struttura, ma una sola possibilità di movimento alla sua estremità.

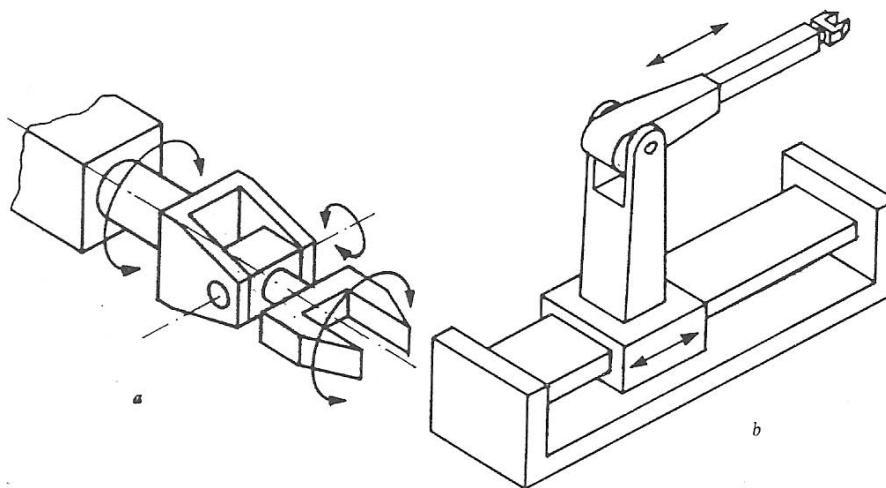


Fig. 7 analizzare le strutture e evidenziare eventuali giunti ridondanti

Nell'ambito della robotica industriale si incontrano solo strutture i cui giunti sono disposti in modo da ottenere movimenti indipendenti; per questo è lecito affermare che i gradi di libertà della struttura coincidono con quelli della sua estremità. Un robot industriale a 6 DoF può spostare e orientare in modo arbitrario nello spazio l'estremità della sua struttura. Quando un robot ha meno di 6 gradi di libertà gli vengono a mancare alcune possibilità di movimento. Dato che la capacità di spostare l'oggetto nello spazio è in genere ritenuta irrinunciabile, si eliminano alcune possibilità di orientazione. Quando il robot ha più di 6 gradi di libertà si dice ridondante, in quanto ha a disposizione giunti supplementari per realizzare i suoi movimenti. Queste particolari strutture permettono di ottenere una desiderata posizione e una determinata orientazione per un oggetto con teoricamente

<sup>1</sup> Bisogna però che i giunti non siano "ridondanti"

infinite configurazioni diverse della struttura. L'utilizzo di robot ridondanti in ambito industriale è praticamente inesistente. Quando si parla di robot a 7 DoF i costruttori fanno infatti riferimento al numero di giunti presenti nella struttura, includendo nel conteggio anche il movimento di apertura/chiusura della pinza e/o la base mobile. Tuttavia si tratta di giunti che non vengono gestiti in contemporanea con quelli della struttura ma in momenti diversi: la pinza viene infatti chiusa per afferrare o rilasciare gli oggetti da manipolare ma non contribuisce alle possibilità di movimento dell'end effector. Anche la base mobile non può essere inclusa tra i gradi di libertà della struttura, in quanto essa serve solo a spostare il robot in zone di lavoro diverse, ma non viene utilizzata durante il suo ciclo operativo.

## 2.5 - Gradi di libertà nelle applicazioni pratiche

In molte applicazioni pratiche si utilizzano strutture con meno di 6 gradi di libertà nell'intento di ridurre costi e complessità del robot. Robot a 4 gradi di libertà sono utilizzati in quelle applicazioni di montaggio (fig. 8a) in cui è richiesta una sequenza di inserzioni verticali. In tal caso infatti 3 gradi di libertà (traslazioni lungo gli assi X ed Y e rotazione attorno ad un asse verticale) servono per posizionare e orientare il pezzo nel piano, mentre il quarto (traslazione lungo un asse verticale) esegue l'operazione di inserzione.

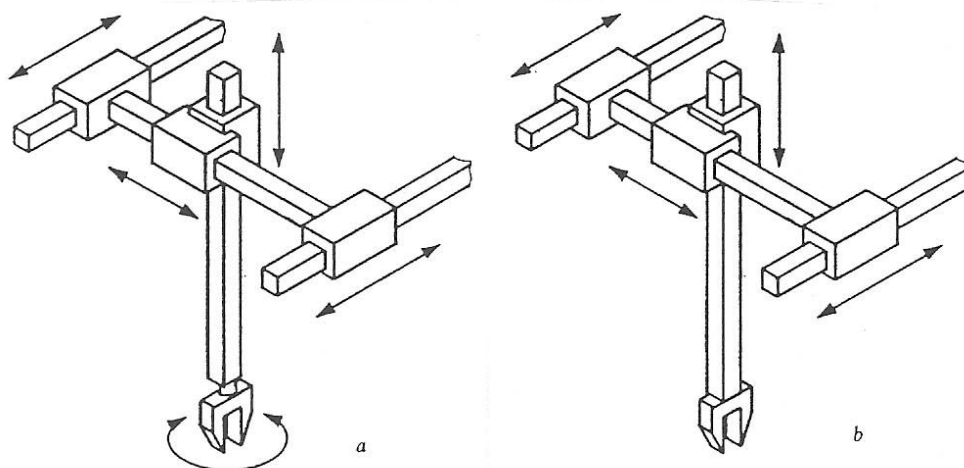


Fig. 8

Robot a tre gradi di libertà possono sostituirsi in modo del tutto equivalente a quelli a quattro ogni volta che i pezzi da montare sono cilindrici (perni, spine, ...). Infatti in questa situazione diventa del tutto superflua la possibilità di ruotare il pezzo attorno ad un asse verticale essendo il pezzo simmetrico rispetto a tale asse (fig. 8b).

Vale la pena di sottolineare che questa situazione si presenta abbastanza frequentemente durante le operazioni di montaggio. Robot a 5 DoF possono sostituirsi a quelli a 6 tutte le volte in cui si devono manipolare oggetti/tool dotati di simmetria assiale. Tipicamente si tratterà di oggetti/tool (p.e. una punta trapanante) di forma cilindrica che rendono del tutto superfluo il fatto che il robot possieda la capacità di ruotarli attorno al loro asse di simmetria (fig. 9).

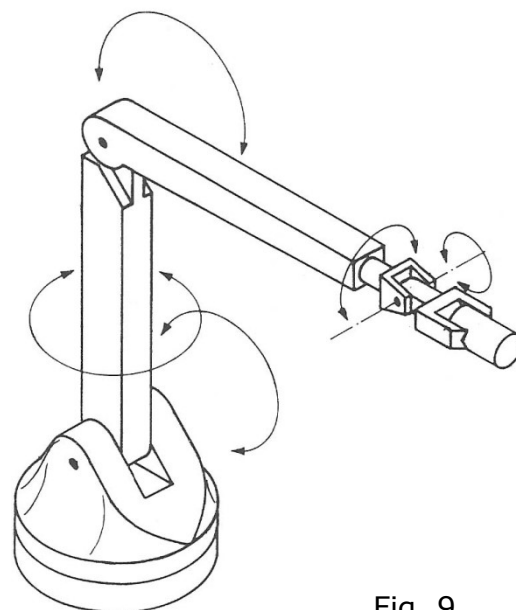


Fig. 9

### 3 - Caratteristiche dei giunti

Il giunto prismatico si presenta costruttivamente più impegnativo di quello rotoidale ma, grazie anche alla esperienza accumulata nella costruzione di guide per macchine utensili, garantisce una maggiore precisione e rigidità. Il movimento relativo tra i due elementi che compongono un giunto viene sempre ottenuto, in robotica, con l'interposizione di corpi volventi (sfere o rulli) in modo da minimizzare le resistenze al moto dovuto all'attrito. Tale scelta si rivela praticamente obbligata per due motivi fondamentali. In primo luogo i movimenti del robot sono caratterizzati da una sequenza di partenze e di arresti e quindi solo l'utilizzo di cuscinetti volventi può garantire basso attrito all'avviamento. Secondariamente va sottolineato che ai robot si richiede la capacità di eseguire rapidi movimenti senza ricorrere all'utilizzo di grosse forze motrici. Per questo nei robot non trovano pratico utilizzo né le guide a coda di rondine (molto diffuse per realizzare spostamenti lineari nelle macchine utensili) né i cuscinetti a strisciamento (utilizzati quando il moto rotatorio dell'albero è continuo). Le articolazioni rotoidali vengono realizzate utilizzando la componentistica standard offerta dai costruttori di cuscinetti volventi. Nel caso di quelli prismatici si può scegliere se utilizzare delle guide a rulli o delle bussole a sfera (fig. 10).

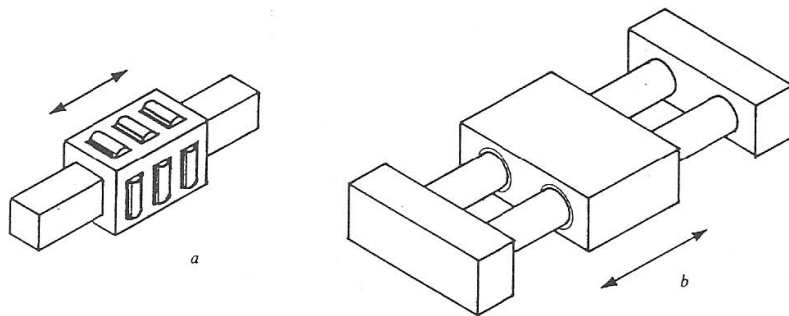


Fig. 10

Un importante punto a favore della soluzione rotoidale è la compattezza. Per rendersene conto si può confrontare in fig. 11 lo spazio necessario ai due tipi di giunto per ottenere un uguale spostamento. Concettualmente nulla vieta di realizzare il giunto lineare con una struttura a telescopio per diminuirne l'ingombro, ma tale approccio può solo raramente essere realizzato nella pratica per i costi e la complessità aggiuntiva che comporta.

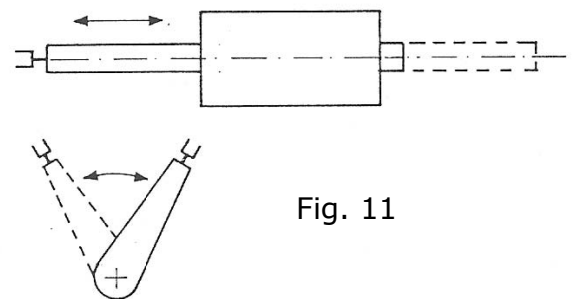


Fig. 11

Sensori e attuatori utilizzati per il movimento delle articolazioni possono essere sia di tipo rotoidale che prismatico in quanto la meccanica mette a disposizione molti modi per convertire un moto da rotatorio a lineare e viceversa.



### 4 - Giunti principali e secondari (braccio e polso)

L'estremità (end effector) della struttura di un robot possiede in genere 6 diverse possibilità di movimento: tre di traslazione per determinarne la posizione e tre di rotazione per l'orientazione. Questa divisione dei gradi di libertà in due gruppi con finalità distinte si riflette generalmente nella struttura stessa del robot, con una specializzazione dei giunti: i giunti principali si occupano di posizionare nello spazio gli oggetti/tool manipolati dal robot, quelli secondari di orientarli. **I giunti principali formano il braccio del robot mentre i giunti secondari formano il polso del robot.** Braccio e polso, in conseguenza della loro funzione,

presentano caratteristiche diverse: nella realizzazione del braccio si può scegliere se utilizzare giunti rotoidali o prismatici, mentre la realizzazione del polso può avvenire solo con giunti rotoidali.

Gli elementi meccanici (link) che compongono il braccio hanno una certa lunghezza mentre quelli del polso sono in genere privi di dimensione (nel senso che, come apparirà chiaro più avanti, gli assi di rotazione dei tre giunti si incontrano in un punto).

## 5 - Configurazioni dei giunti principali

L'estremità del braccio di un robot deve possedere almeno tre 3 gradi di libertà per posizionare oggetti o tool nello spazio (fig. 12).

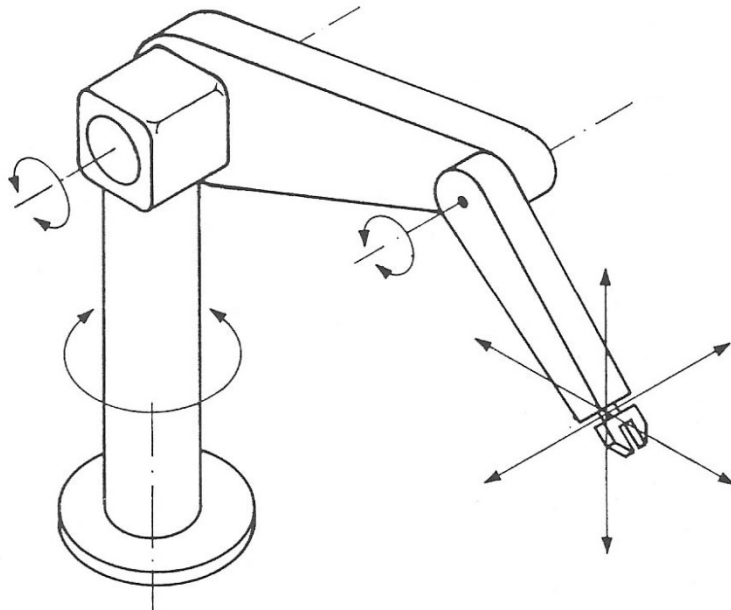


Fig. 12

**Il volume di lavoro** è l'insieme di tutti i punti dello spazio raggiungibili dall'estremità del braccio. Il tipo di giunti - lineari o rotatori - utilizzati nella realizzazione del braccio ne determina la forma mentre le dimensioni dei singoli elementi meccanici ne determinano l'ampiezza.

La presenza di un eventuale polso collegato alla sua estremità non altera in generale il volume di lavoro (più precisamente ciò accade ogni volta che i tre assi di rotazione dei giunti del polso si incontrano in un unico punto; la posizione occupata da tale punto nello spazio dipende solamente dalla configurazione assunta dal braccio e non dall'orientazione del polso. Per questo motivo tale punto viene spesso utilizzato per definire il volume di lavoro in sostituzione dell'estremità della struttura o EE.)

**La configurazione di un braccio può essere sinteticamente descritta o classificata utilizzando una notazione a tre lettere** in cui "R" descrive l'utilizzo di un giunto rotoidale e "P" quello di uno prismatico (=lineare); l'ordine riflette quello con cui si incontrano i giunti, a partire dalla base. Si vengono così a creare strutture robotiche che, in alcuni casi, prendono nome dai sistemi di coordinate<sup>2</sup> utilizzati in geometria:

- PPP → braccio cartesiano *in fig. 13a il corrispettivo sistema di coordinate*
- PRP → braccio cilindrico *in fig. 13b*
- RRP → braccio sferico *in fig. 13c*
- RRR → braccio antropomorfo

<sup>2</sup> Un punto nello spazio 3D viene sempre specificato mediante 3 coordinate, che possono essere lineari o angolari; sono più familiari gli esempi nel piano: si pensi alle coordinate cartesiane (x;y) oppure alle coordinate polari (ρ;θ). Nello spazio si parla di coordinate cartesiane (x;y;z), cilindriche, sferiche, ...



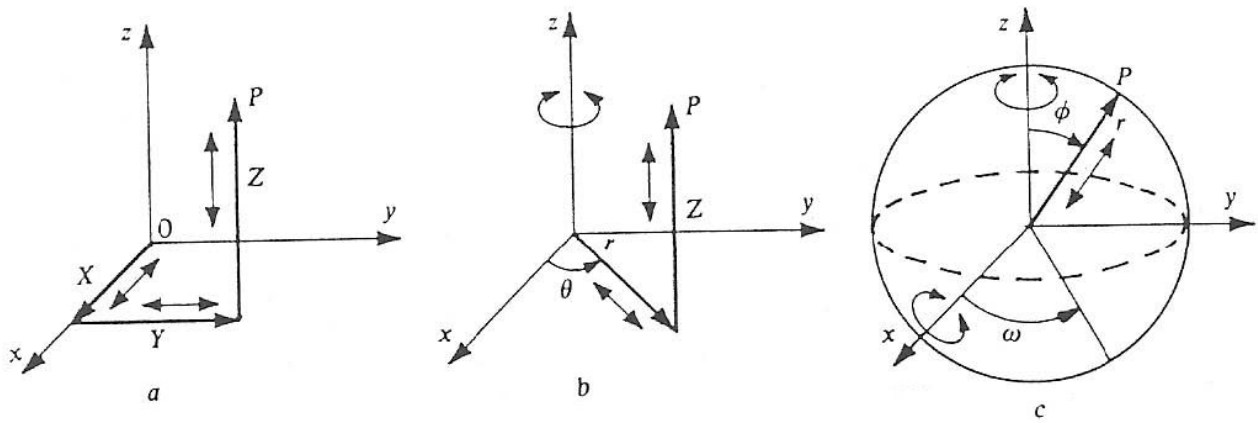


Fig. 13

Le strutture robotiche realizzate con l'utilizzo di almeno due giunti aventi gli assi di rotazione paralleli vengono dette articolate. Queste ultime si dividono fra quelle che realizzano il movimento articolato in un piano verticale (antropomorfe - fig.14a) e quelle che lo realizzano in un piano orizzontale (**SCARA** fig.14b, un tipo particolare di struttura RRP).

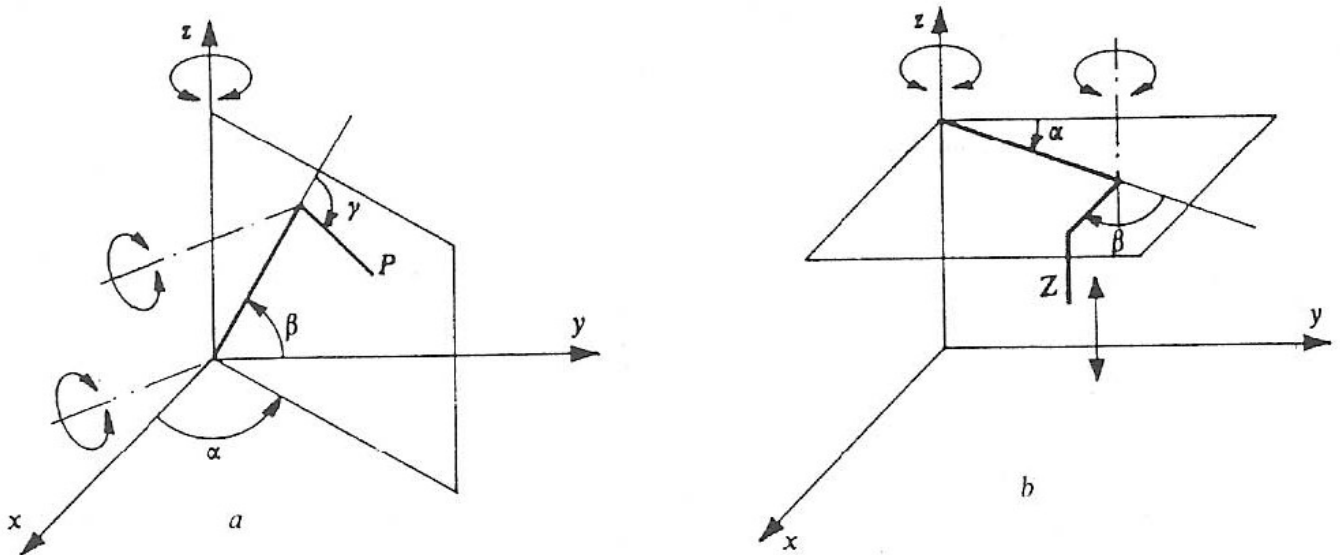


Fig. 14

In totale si sono elencate cinque tipologie di strutture di bracci robotici industriali.