

Generalità sui robot industriali

1 - La struttura meccanica

La struttura meccanica dei robot è costituita da una sequenza di elementi meccanici connessi tra loro da giunti che ne consentono il moto relativo.

I singoli elementi possono essere connessi tra loro in serie (Fig.1a) od in parallelo (Fig.1b). 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 rotoidali. 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 "Ea" in una porzione di piano maggiore di quella raggiungibile da "Eb" 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.

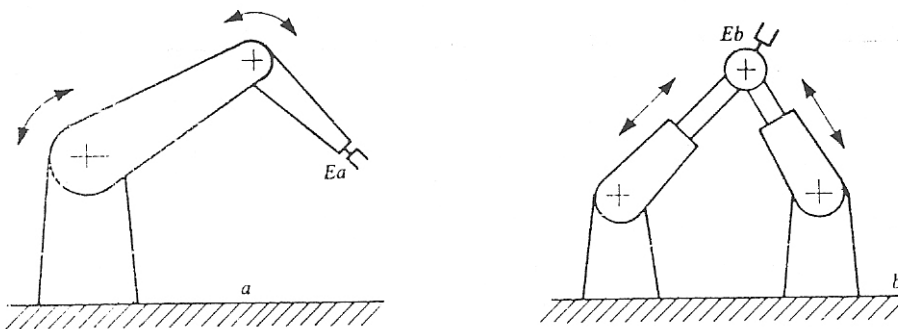


Fig. 1

Va comunque sottolineata 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 è collegato solo al precedente in quanto l'altra sua estremità termina con un attacco a cui andranno collegati gli utensili specifici per l'applicazione alla quale il robot verrà destinato.

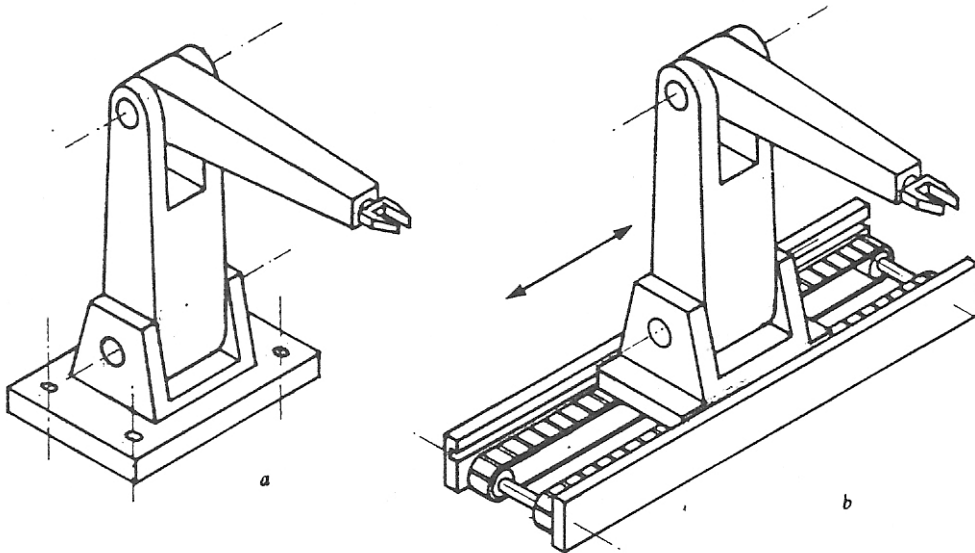


Fig. 2

I giunti di collegamento tra i vari elementi meccanici sono classificati come rotatori o prismatici, in funzione del tipo di movimento relativo che permettono, rispettivamente rotatorio e traslatorio.

2 - Gradi di libertà

Un arbitrario spostamento di un corpo rigido può essere ottenuto componendo dei singoli spostamenti fondamentali; ognuno di essi rappresenta un grado di libertà per l'oggetto. I robot industriali hanno fundamentalmente lo scopo di manipolare degli oggetti, cioè di muoverli nello spazio controllandone posizione ed orientamento. Gli oggetti 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 quelle caratteristiche che la struttura deve possedere per poterli realizzare. Infatti l'oggetto, una volta afferrato, è solidale con l'estremità della struttura e quindi ne riproduce fedelmente gli spostamenti.

2.1 - Gradi di libertà di un corpo rigido

Un corpo rigido ha, nello spazio, sei gradi di libertà corrispondenti ad altrettante possibilità di spostamento.

Ciò significa che la sua posizione e il suo orientamento rispetto ad un sistema di riferimento sono descritte da sei parametri. Per rendere più intuitiva questa affermazione si immagini di rendere solidale con l'oggetto rigido la terna cartesiana xyz (Fig. 3). I sei parametri prima citati risultano ora di facile interpretazione: tre definiscono la posizione dell'origine della terna xyz mentre le rimanenti ne individuano l'orientazione. Gli spostamenti corrispondenti sono tre traslazioni (parallelamente agli assi coordinati) e tre rotazioni (attorno agli stessi assi).

Questo permette di affermare che la struttura di un robot, per poter muovere ed orientare arbitrariamente un corpo nello spazio, ha bisogno di un minimo di sei gradi di libertà.

Con analoghe considerazioni è facile arrivare a concludere che un corpo rigido, se vincolato a muoversi in un piano, ha tre gradi di libertà. Infatti, come mostra la Fig. 4, le sue possibilità di movimento si riducono a due traslazioni (lungo l'asse X od Y) e ad una rotazione (attorno ad un asse verticale).

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 corpi rigidi che 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 oggetti che collega. Un esempio molto semplice dell'utilizzo di questo giunto si ha nei porta penna orientabili (Fig. 5a). In tal caso i gradi di libertà permessi sono tre, 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.

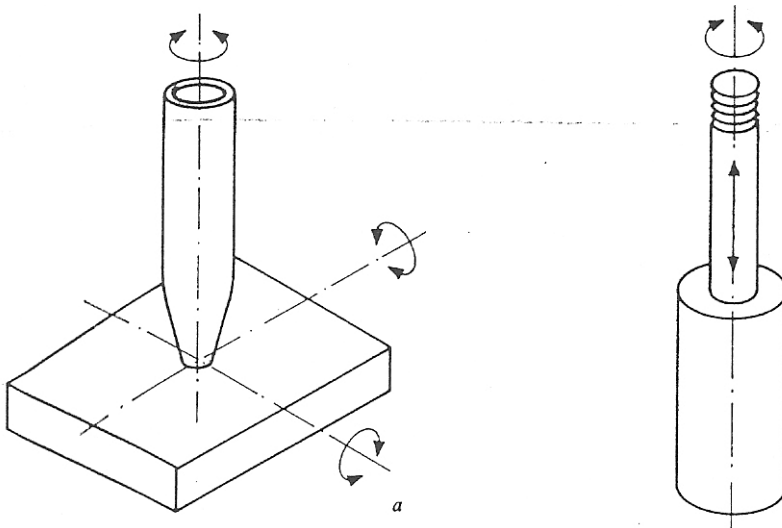


Fig. 3

Il giunto cilindrico (Fig. 5b) ne permette due; infatti il sistema a valle 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.

I giunti a singolo grado di libertà sono classificati in base al tipo di movimento relativo permesso ai corpi ad essi collegati. Il giunto prismatico permette un moto relativo traslatorio, come ad esempio un manicotto che scorre su una guida lineare (Fig. 6a). Quello rotatorio permette ai due membri una rotazione relativa 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).

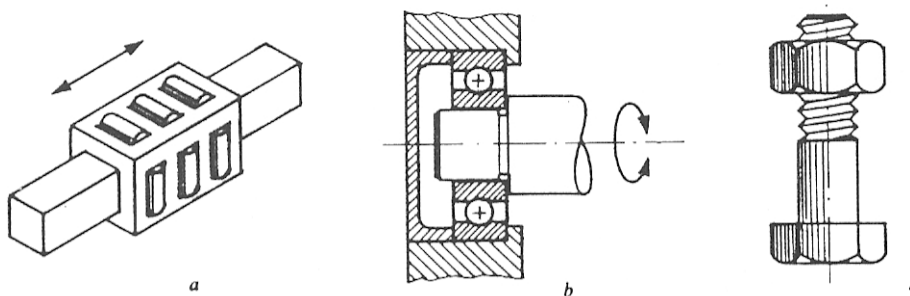


Fig. 6

2.3 - Gradi di libertà della struttura 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.

Questa affermazione è corretta nel momento in cui la si riferisce a quei giunti che sono accoppiati con un motore e quindi sono in grado di produrre un movimento. Infatti 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 comunque sui primi, in quanto essi soltanto sono in grado di spostare e di orientare nello spazio l'estremità della struttura del robot. L'utilizzo esclusivo di giunti a singolo grado di libertà ci permette di affermare che:

i robot hanno tanti gradi di libertà quanti sono i giunti contenuti nella loro struttura.

I gradi di libertà possono essere calcolati anche come numero di parametri necessari per individuare la posizione assunta dalla struttura. Nel caso dei robot tali parametri vengono anche detti variabili di giunto, in quanto esprimono la posizione assunta da ciascuno di essi e quindi sono rappresentati da un angolo di rotazione o da una distanza di traslazione.

2.4 - Gradi di libertà dell'estremità della struttura

La struttura di un robot deve permettere sei diverse possibilità di movimento alla sua estremità 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 corpo rigido.

Lo scopo può essere raggiunto con l'utilizzo di sei giunti ben disposti, cioè in grado di generare dei movimenti indipendenti tra loro. Per meglio comprendere questa affermazione consideriamo quei casi in cui due giunti non generano movimenti indipendenti. Questo accade quando due giunti rotatori hanno gli assi di rotazione paralleli (Fig.7a), o due traslatori permettono il movimento nella medesima direzione (Fig.7b). Si parla allora di giunti ridondanti in quanto entrambi permettono uno stesso tipo di spostamento e quindi, uno dei due potrebbe essere eliminato senza penalizzare le possibilità di movimento dell'estremità della struttura. In conclusione 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.

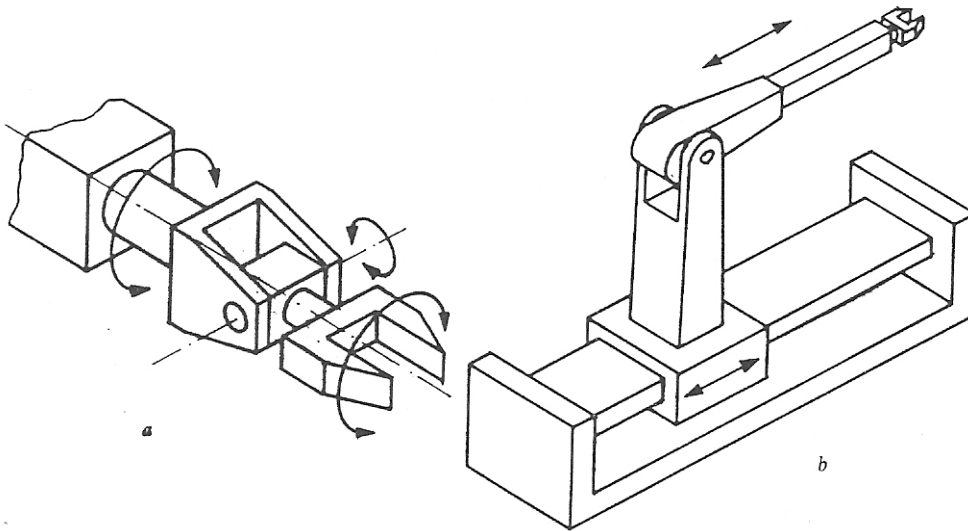


Fig. 7

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 sei gradi di libertà può spostare ed orientare in modo arbitrario nello spazio l'estremità della sua struttura.

Quando un robot ha meno di sei 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 sei gradi di libertà si dice ridondante, in quanto ha a disposizione un giunto supplementare per realizzare i suoi movimenti. Queste particolari strutture permettono di ottenere una desiderata posizione ed un determinato orientamento per un oggetto manipolato con infinite configurazioni diverse della struttura. L'utilizzo di robot ridondanti in ambito industriale è praticamente inesistente.

Quando si parla di robot a sette gradi di libertà i costruttori fanno infatti riferimento al numero di assi (giunti) controllati e, di conseguenza, includono 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 della struttura. 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 mai utilizzata durante il suo ciclo operativo.

2.5 - Gradi di libertà nelle applicazioni pratiche

In molte applicazioni pratiche si utilizzano strutture con meno di sei gradi di libertà nell'intento di ridurre costi e complessità del robot.

Robot a quattro gradi di libertà sono utilizzati in quelle applicazioni di montaggio (Fig.8a) in cui l'unione delle parti si ottiene con una sequenza di inserzioni verticali. In tal caso infatti tre gradi di libertà (traslazioni lungo gli assi X ed Y e rotazione attorno ad un asse verticale) servono per posizionare ed orientare il pezzo nel piano, mentre il quarto (traslazione lungo un asse verticale) esegue l'operazione di inserzione.

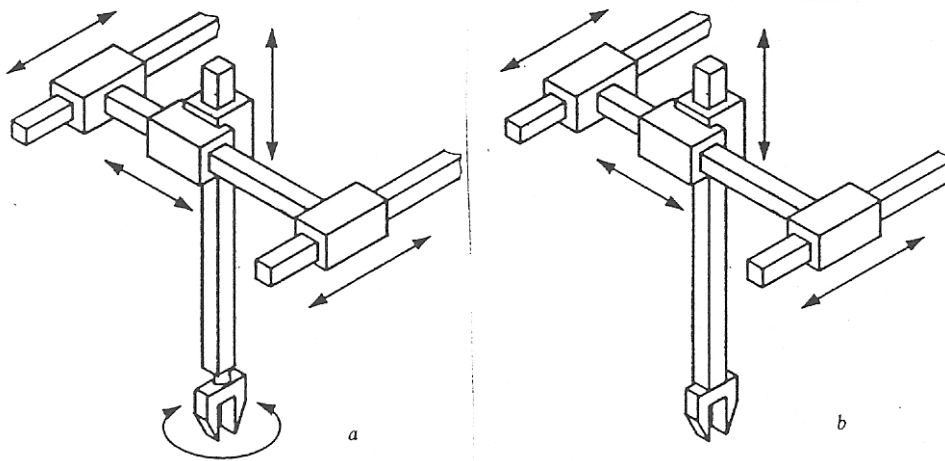


Fig. 8

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 cinque gradi di libertà possono sostituirsi a quelli a sei tutte le volte in cui si devono manipolare degli oggetti dotati di simmetria assiale. Tipicamente si tratterà di oggetti 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).

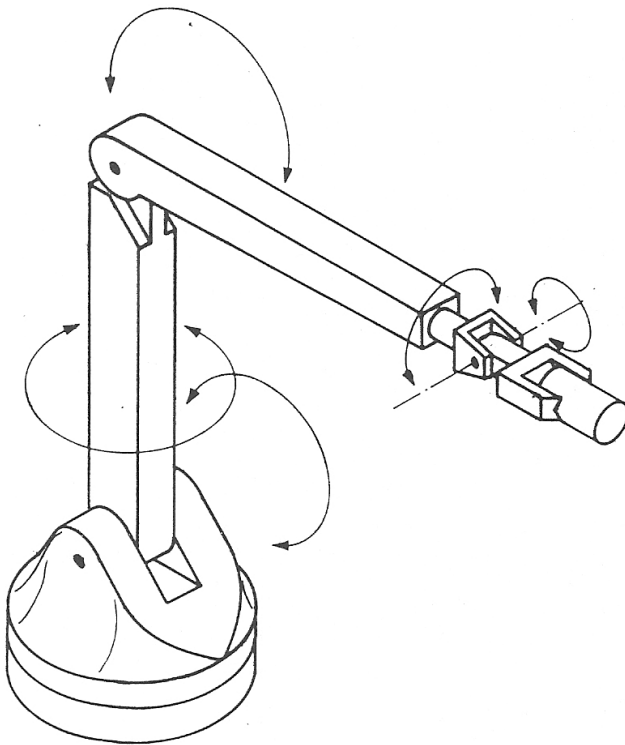


Fig. 9

La stessa motivazione, cioè l'utilizzo di un utensile dotato di un asse di simmetria, spiega perché le teste dei centri di lavoro per asportazione di truciolo sono dotate di soli due gradi di libertà

secondari contro i tre che sembrerebbero essere necessari per non avere limitazioni alle possibili orientazioni dell'utensile.

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 degli 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).

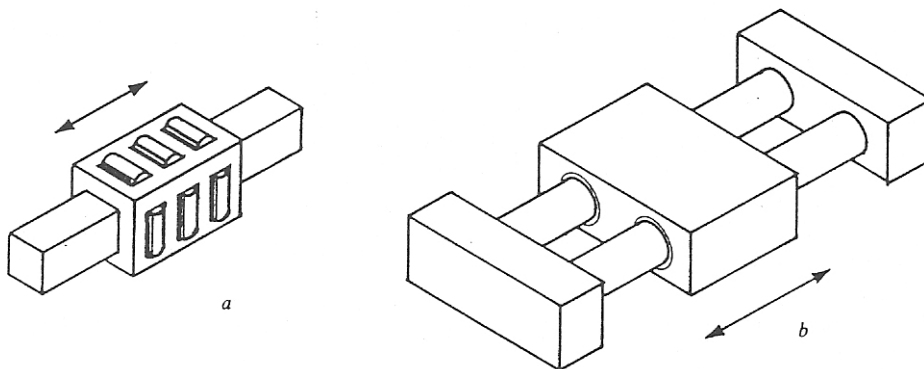


Fig. 10

Un importante punto a favore della soluzione rotoidale è la compattezza. Per rendersene conto basterà 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.

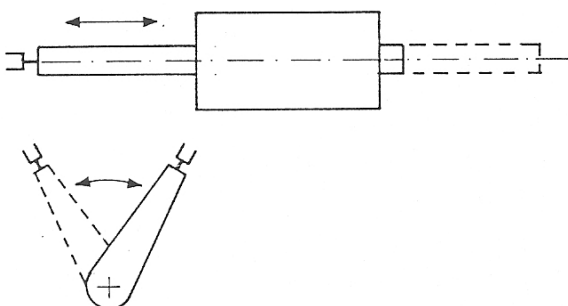


Fig. 11

Sensori ed 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

L'estremità della struttura di un robot possiede in genere sei diverse possibilità di movimento: tre di traslazione per spostamenti nello spazio e tre di rotazione per l'orientazione.

Questa divisione dei gradi di libertà in due gruppi con finalità distinte si riflette generalmente nella struttura con una specializzazione dei giunti.

I gradi di libertà principali si occupano di posizionare nello spazio gli oggetti manipolati dal robot, quelli secondari di orientarli.

Quelli principali formano il braccio del robot mentre quelli secondari il polso. Braccio e polso, in conseguenza della loro funzione, presentano caratteristiche diverse. In primo luogo nella realizzazione del braccio si può scegliere se utilizzare giunti rotoidali o prismatici mentre la realizzazione del polso può avvenire solo con i giunti del primo tipo. Inoltre gli elementi meccanici che compongono il braccio hanno una certa lunghezza mentre quelli del polso sono in genere privi di dimensione, nel senso che 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 possibilità di movimento di tipo traslatorio in quanto deve posizionare gli oggetti nello spazio (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 definisce la forma mentre le dimensioni dei singoli elementi meccanici ne determinano l'ampiezza. La presenza di un eventuale polso collegato alla sua estremità non ne altera in genere le caratteristiche. Più precisamente ciò accade ogni volta che i tre assi di rotazione dei giunti del polso si incontrano in un unico punto. Infatti la posizione occupata da tale punto nello spazio dipende solamente dalla configurazione assunta dal braccio e non dall'orientamento

del polso. Per questo motivo tale punto viene spesso utilizzato per definire il volume di lavoro in sostituzione dell'estremità della struttura.

La configurazione di un braccio può essere sinteticamente descritta utilizzando una notazione a tre lettere in cui "R" sottintende l'utilizzo di un giunto rotoidale e "P" quello di uno lineare. L'ordine riflette quello con cui si incontrano le articolazioni a partire dalla base.

Un punto nello spazio viene individuato da tre coordinate, in quanto può essere considerato come un corpo rigido privo di dimensioni, e quindi non toccato dal problema dell'orientamento.

I sistemi di riferimento stabiliscono delle convenzioni sulla loro determinazione, indicando il tipo di coordinate da utilizzare (lineari od angolari), il loro ordine e le modalità con cui devono essere eseguite le misure.

Quelli utilizzati sono:

cartesiano	- coordinate lineari 3 angolari 0	- PPP (Fig.13A)
cilindrico	- " " 2 " 1	- PRP (Fig.13B)
sferico	- " " 1 " 2	- RRP (Fig.13C)

antropomorfo - " " 0 " 3 - RRR (Fig.14B)

Le strutture, realizzate in modo tale che ogni coordinata possa trovare un giunto corrispondente, prendono il nome del sistema di riferimento. Si avranno così bracci cartesiani (tre articolazioni lineari), cilindrici (due lineari e una rotazionale), sferici (una prismatica e due rotazionali) e antropomorfi (tre articolazioni rotazionali).

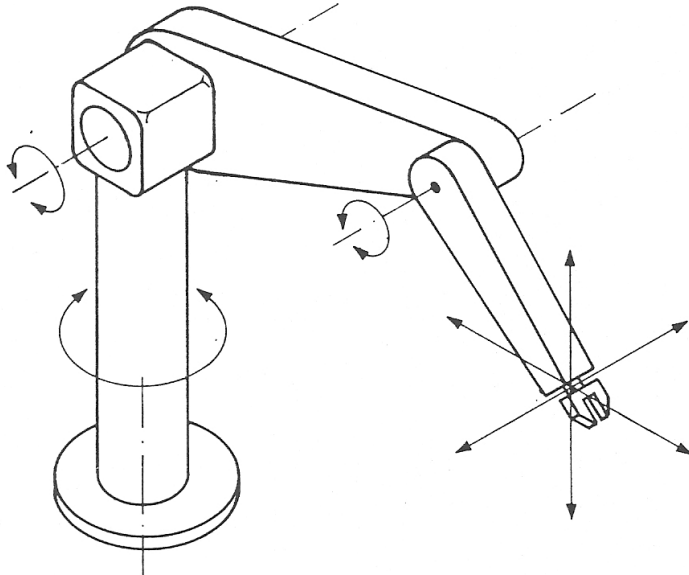


Fig. 12

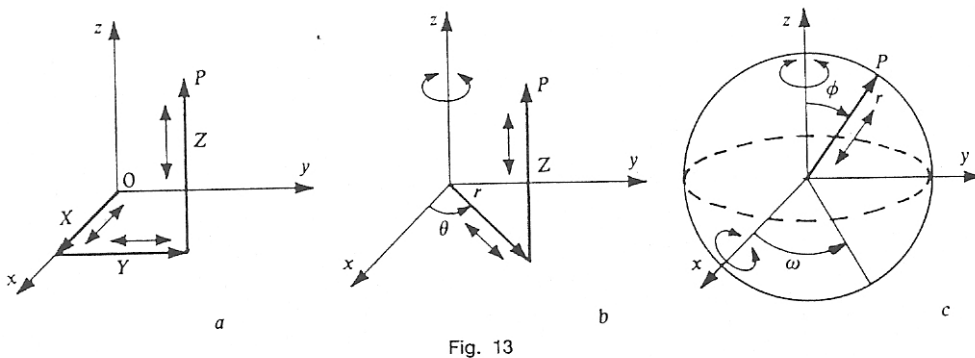


Fig. 13

Fig. 13

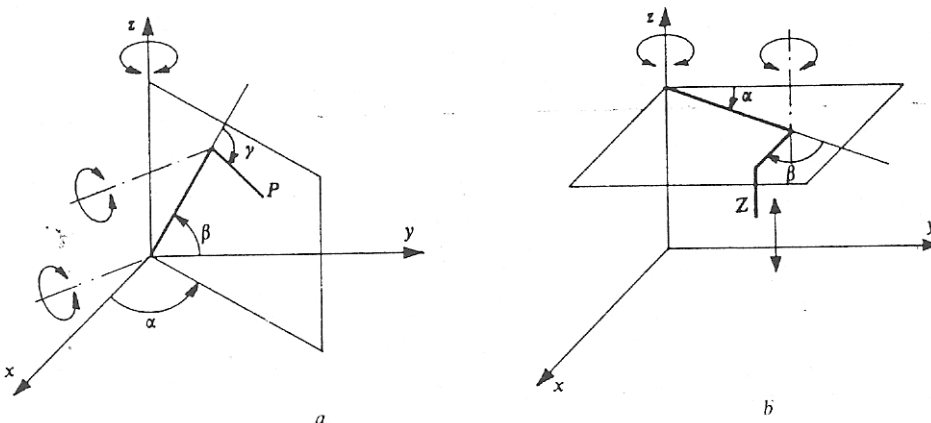


Fig. 14

Le strutture 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).

Questa classificazione delle strutture dei bracci dei robot industriali richiede quindi l'introduzione di almeno cinque categorie. Più semplice risulta la classificazione in base alle caratteristiche del volume di lavoro perchè permette di ridurre a tre sole le categorie necessarie per comprenderli tutti, comprese alcune eccezioni prima non considerate.

Infatti i possibili volumi di lavoro possono essere assimilati a tre solidi soltanto: il parallelepipedo, il cilindro e la sfera.

È doveroso sottolineare che i volumi di lavoro effettivamente permessi dai bracci sono spesso molto complessi e per assimilarli a parallelepipedi, cilindri o sfere, sono necessarie delle approssimazioni.

Nel seguito si adotterà la classificazione basata sulla disposizione dei giunti in quanto permette di chiarire le caratteristiche di ogni singola struttura.

5.1 - Robot cartesiani - PPP

Questi robot realizzano i tre movimenti principali utilizzando tre accoppiamenti prismatici orientati secondo tre assi ortogonali tra loro. Di conseguenza il volume di lavoro è un parallelepipedo le cui dimensioni sono fissate dalle corse dei singoli giunti. I robot cartesiani possono essere realizzati con una struttura a portale (Fig.15) o a montante (Fig.16).

L'utilizzo di giunti lineari semplifica la programmazione e il controllo dei movimenti del braccio.

Si immagini infatti di utilizzare come sistema di riferimento una terna di assi ortogonali paralleli a quelli lungo cui avviene il movimento dei giunti. In tal caso ogni spostamento parallelo agli assi coordinati viene eseguito con un uguale spostamento dell'asse corrispondente. Considerando che un generico spostamento nello spazio può essere facilmente scomposto in tre spostamenti paralleli agli assi di riferimento è facile capire perchè la programmazione dei movimenti risulti intuitiva per l'utente e semplice da gestire per il controllo.

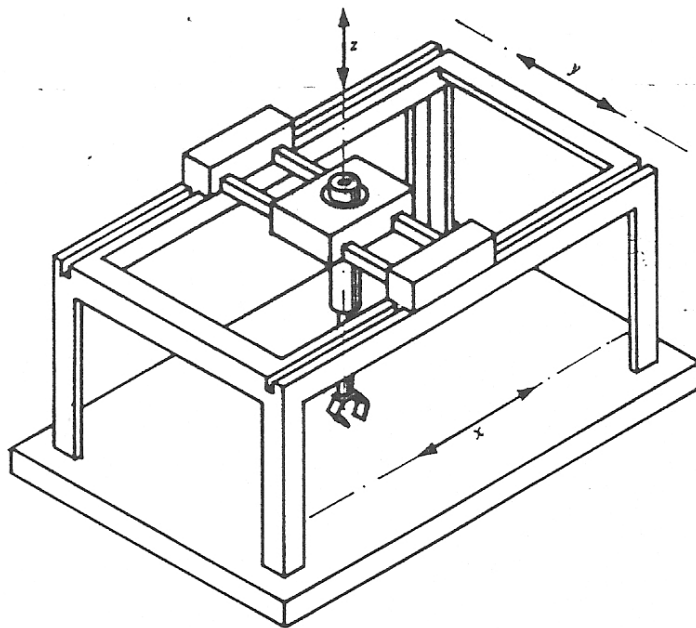


Fig. 15

La precisione di posizionamento raggiungibile è molto elevata anche se a prezzo di costi notevoli. Queste strutture sono infatti utilizzate anche nella costruzione di macchine utensili. Il loro utilizzo in robotica comporta tuttavia l'onere di costi elevati per la necessità di realizzare assi lineari capaci di conciliare un basso coefficiente di attrito con il rispetto di tolleranze molto ristrette. Inoltre, al fine di poter raggiungere elevate prestazioni dinamiche, risulta fondamentale che la struttura sia al contempo rigida e leggera.

L'utilizzo è vantaggioso quando le operazioni di manipolazione possono essere eseguiti in buona parte con movimenti paralleli alle direzioni dei suoi assi principali. Nella pratica i robot cartesiani sono utilizzati per operazioni di assemblaggio che richiedono posizionamenti molto precisi oppure per l'asservimento di macchine utensili (carico/scarico parti lavorate e cambio utensili). Va sottolineato che, mentre nel primo caso il volume di lavoro è modesto (le corse dei giunti sono quasi sempre inferiori al metro) nel secondo esso può essere notevole (corse superiori ai dieci metri per i giunti x ed y).

Robot cartesiani a portale

Il principale vantaggio della struttura a portale è quello di permettere una precisione di posizionamento elevata ed uniforme in tutto lo spazio di lavoro. Non a caso infatti le macchine di misura tridimensionali vengono realizzate con questa struttura.

La rigidità e la modularità della struttura permettono anche la costruzione di robot di notevoli dimensioni che consentono, ad esempio, di asservire tutte le macchine utensili esistenti in un determinato reparto.

I motori di azionamento degli assi possono essere collocati in posizioni tali che il loro peso si scarichi sulla struttura.

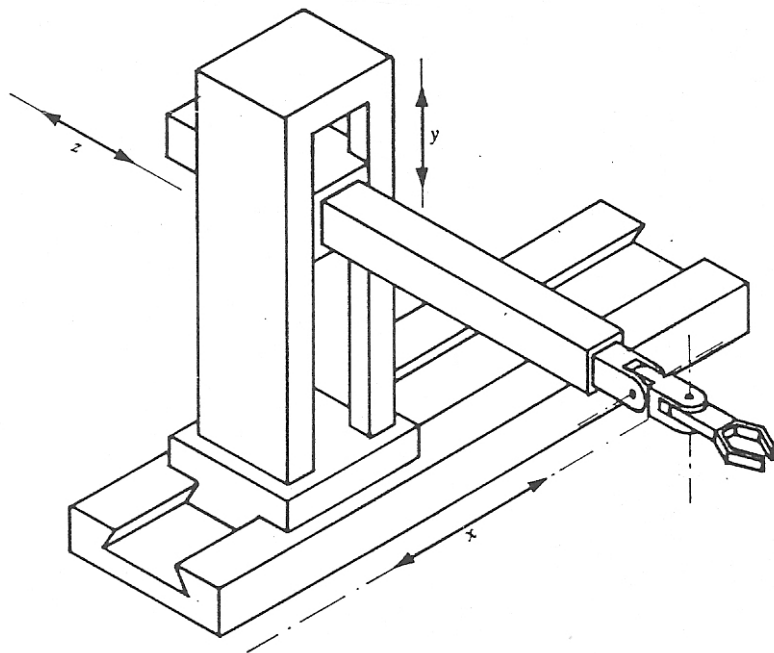


Fig. 16

Questa possibilità permette sia di manipolare grossi carichi che di costruire la struttura rigida e robusta (e quindi pesante) senza penalizzare le prestazioni dinamiche in quanto i motori possono essere sovradimensionati. L'unico problema che può manifestarsi è l'insorgere di vibrazioni durante i

transitori di partenza e di fermata a livello dell'asse Z, l'unico non supportato ad entrambe le estremità, soprattutto se il peso del carico manipolato è notevole. Va tuttavia sottolineato che il fenomeno può anche essere accettato a patto che, soprattutto in prossimità del punto di arrivo, le eventuali vibrazioni si smorzino molto rapidamente dopo che il robot si sia fermato.

Il principale problema dei robot a portale è la difficoltà di integrazione all'interno di impianti produttivi esistenti.

Infatti il volume di lavoro è fisicamente racchiuso dalla struttura e quindi i prodotti su cui il robot opera devono entrare al suo interno; ciò implica delle apposite attrezzature per il carico e lo scarico delle parti. Proprio per rispondere a questo problema sono stati realizzati dei robot tali che lo spazio a terra da essi occupato sia ridotto al puro ingombro della struttura di sostegno (Fig. 17).

La Fig. 17 riporta un esempio in cui il portale è ridotto ad uno solo dei due assi orizzontali.

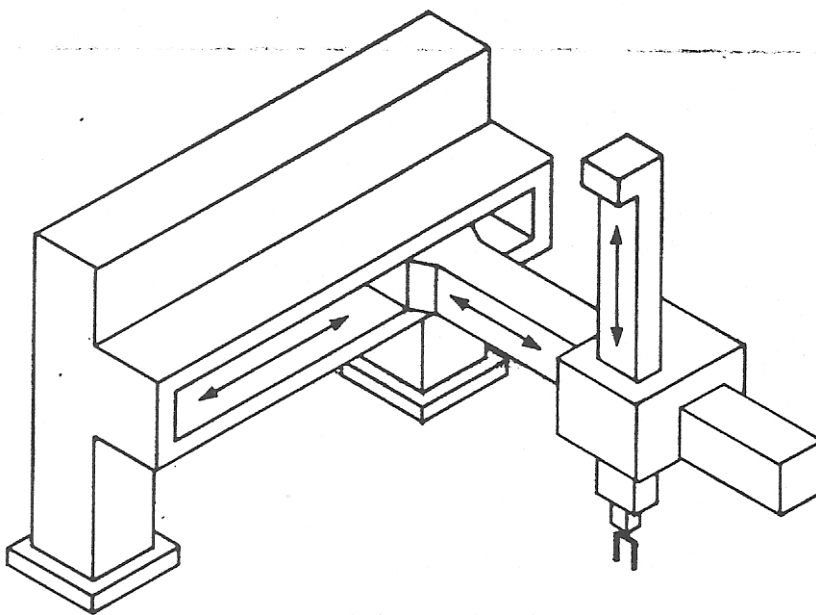


Fig. 17

Robot cartesiano a montante

L'utilizzo di questa struttura semplifica notevolmente l'integrazione del robot, nel layout dell'impianto, anche se preesistente.

La scelta di realizzare dei robot con questa struttura fu probabilmente suggerita dall'idea di sostituire l'operatore umano con una macchina che ne riproducesse, per quanto possibile, le capacità di manipolazione. L'analogia risulta evidente osservando una delle tante stazioni di montaggio realizzate con questo tipo di robot. Essi vengono installati ai bordi dell'area di lavoro e possono essere assimilati a degli uomini che, vicino al bordo del bancone di lavoro, eseguono operazioni di assemblaggio. Ciò facilita le possibilità di integrazione del robot all'interno dell'impianto produttivo in quanto non va ad intaccare la continuità del sistema di movimentazione; ne deriva tuttavia l'impossibilità di aggirare degli ostacoli presenti nel piano di lavoro, qualora questi siano compresi tra la pinza di manipolazione ed il montante della struttura.

La struttura a montante presenta una minore rigidezza rispetto a quella a portale.

Infatti gli assi di scorrimento lineare sono supportati in un singolo punto, mentre nei robot a portale le guide prismatiche per il movimento nel piano sono sostenute ad entrambi gli estremi. Per questo motivo il loro volume di lavoro è quasi sempre modesto ed il loro utilizzo

limitato ad operazioni di assemblaggio leggero. Particolare cura dovrà essere posta nella realizzazione dell'asse Z (il terzo) in quanto sul suo supporto potranno agire momenti notevoli, qualora si vadano a manipolare carichi elevati con notevole sbraccio (la distanza tra quest'ultimo ed il piano degli assi X ed Y).

Trattandosi comunque ancora di una struttura cartesiana sarà possibile raggiungere la stessa precisione di posizionamento ottenibile con quella a portale, ma a prezzo di un irrigidimento della struttura che significa un aumento di peso e quindi l'impossibilità di raggiungere prestazioni dinamiche elevate.

5.2 - Robot antropomorfo - RRR

I bracci antropomorfi sono realizzati con l'utilizzo esclusivo di giunti rotoidali (Fig. 18)

Questa scelta permette di semplificare le lavorazioni meccaniche che verranno eseguite soltanto su superfici di rivoluzione.

Muovendosi dalla base verso l'estremità della struttura si incontrano i tre movimenti principali così organizzati:

- rotazione attorno ad un asse verticale
- " " " " asse orizzontale
- " " " " asse orizzontale

Questi robot sono detti antropomorfi in quanto riproducono abbastanza fedelmente le possibilità di movimento di un braccio umano o a giunti rotoidali verticali (in quanto il secondo e il terzo grado di libertà, detti rispettivamente spalla e gomito, muovono il braccio del robot all'interno di un piano verticale).

Il volume di lavoro può essere considerato, in prima approssimazione, come una porzione di sfera.

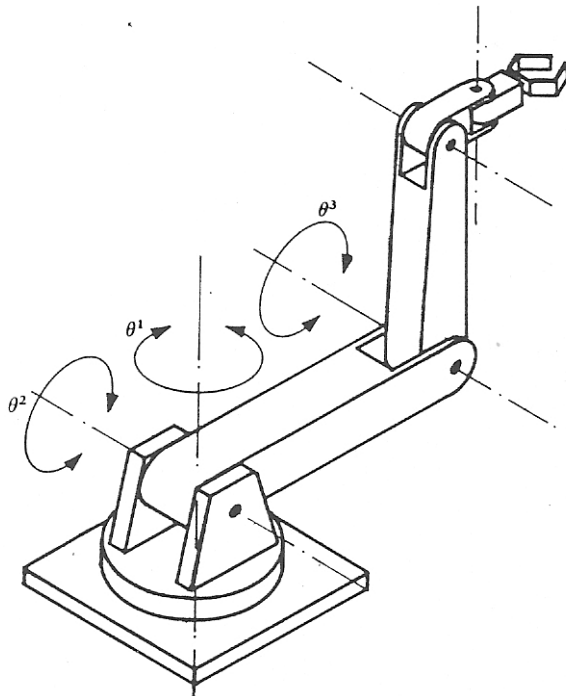


Fig. 18

La sua configurazione è in realtà complessa essendo molto influenzata dalle effettive possibilità di movimento dei giunti. (Fig. 19)

La struttura articolata è molto diffusa in quanto compatta e versatile.

Infatti i robot articolati, a parità di dimensioni, riescono a coprire un più ampio volume di lavoro rispetto alle altre strutture. La versatilità è giustificata sia dalla capacità di raggiungere uno stesso punto del campo di lavoro con diverse configurazioni della struttura sia da quella di poter manipolare facilmente dei pezzi che si trovino sotto, sopra o dietro il basamento. La Fig. 20 mostra le quattro diverse possibilità che questi robot hanno per raggiungere i punti del loro volume di lavoro con ovvi vantaggi per la possibilità di evitare degli ostacoli eventualmente presenti nel campo di lavoro.

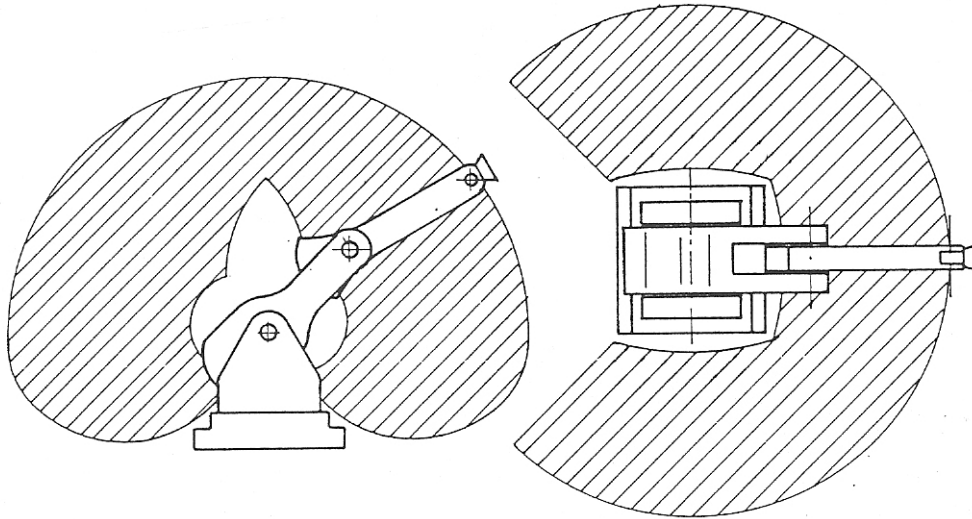


Fig. 19

L'abilità di raggiungere facilmente delle posizioni comunque collocate rispetto al basamento è riportata in Fig. 21 che mostra come il robot possa scendere al di sotto della quota della base (a), estendersi verso l'alto (b) e infine prelevare dei pezzi alle sue spalle con una semplice rotazione attorno al secondo grado di libertà (c); a tutto ciò si aggiunge la possibilità di montarlo a soffitto (d) che permette di annullare il già ridotto ingombro in pianta.

Molte applicazioni pratiche non richiedono necessariamente tutte queste possibilità ma, in generale, si può dire che tutto quello che gli altri robot possono fare, può essere fatto più facilmente da un robot articolato.

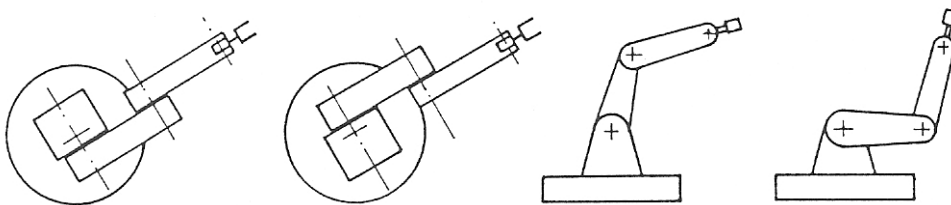


Fig. 20

Il punto debole delle strutture antropomorfe è in genere rappresentato dal costo, superiore a quello delle altre configurazioni, cartesiane escluse.

La motivazione va ricercata in una serie di problemi che l'utilizzo di questa struttura comporta. Innanzitutto la struttura è totalmente a sbalzo e quindi va accuratamente progettata per ridurre al minimo pesi e flessioni. Il peso, soprattutto se concentrato verso l'estremità del braccio, può rappresentare un reale problema in alcune configurazioni particolari, come quella in cui il robot è completamente esteso in orizzontale. Infatti in tale

posizione sia il momento flettente che le inerzie assumono i massimi valori. Questo spiega perchè, spesso, l'indicazione del carico che il robot può manipolare e le sue prestazioni cinematiche (velocità ed accelerazioni) vengono date in riferimento ad una ben definita configurazione del braccio.

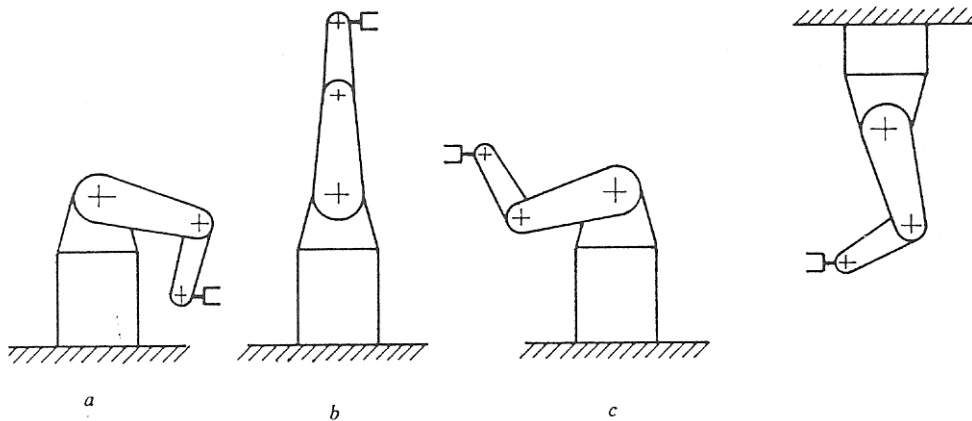


Fig. 21

Per ridurre i pesi gravanti sulla struttura una soluzione generalmente adottata da tutti i costruttori è quella di posizionare i motori sulla base del robot, immediatamente a valle del primo giunto di rotazione. Questa soluzione ha il vantaggio di alleggerire notevolmente la struttura, ma necessita di un sistema di trasmissione che porti il moto dai motori fino ai giunti utilizzatori; la trasmissione, oltre a causare un aumento di complessità del sistema, porterà spesso ad una degradazione delle prestazioni dinamiche del robot. Tale penalizzazione dinamica è spiegabile con la diminuzione di rigidità del sistema di trasmissione del moto conseguente all'introduzione dei suddetti cinematismi tra il motore ed il giunto utilizzatore.

Allo scopo di contenere le flessioni, funzioni sia del carico che della configurazione, si irrigidiscere la struttura, avendo cura di appesantirla il meno possibile.

Inoltre i giochi meccanici dovranno essere il più ridotti possibile in quanto il volume di lavoro coperto è tale che la struttura possa venir sollecitata in direzioni opposte con il risultato di evidenziarne eventuali giochi presenti nella meccanica.

Il controllo del movimento degli assi si presenta complesso se si desidera garantire che le traiettorie reali riproducano fedelmente quelle impostate teoricamente. Infatti il programmatore della macchina quando descrive al robot il ciclo operativo, inteso come sequenza di movimenti, lo farà sempre in riferimento ad un mondo cartesiano e quindi, utilizzando nella maggior parte dei casi, dei movimenti in linea retta. Compito del controllo del robot sarà quindi quello di imporre ai giunti del robot la corretta sequenza di movimenti coordinati in modo che l'estremità della sua struttura realizzi la traiettoria desiderata dall'utente.

5.3 - Robot sferici (polari) - RRP

I tre gradi di libertà principali, ordinati a partire dalla base, sono così organizzati (Fig. 22) :

- rotazione attorno ad un asse verticale
- rotazione attorno ad un asse orizzontale
- traslazione lungo la direzione definita dalla posizione dei due giunti angolari

Il movimento traslatorio è in pratica realizzato dall'estensione telescopica del giunto lineare e viene detto sfilo.

La struttura viene definita sferica in quanto il volume di lavoro è un settore di sfera (Fig 23). I due giunti rotatori descrivono infatti due archi perpendicolari fra loro mentre quello lineare determina il raggio della superficie sferica da essi descritta, variabile tra un minimo (sfilo contratto) e un massimo (sfilo esteso). Immaginando di collocare il robot in modo che il punto di intersezione dei suoi due assi rotatori coincida con l'origine del sistema di riferimento, si nota come i primi due assi rotatori servano ad individuare la direzione del punto obbiettivo, mentre il terzo permetta di raggiungerlo effettivamente.

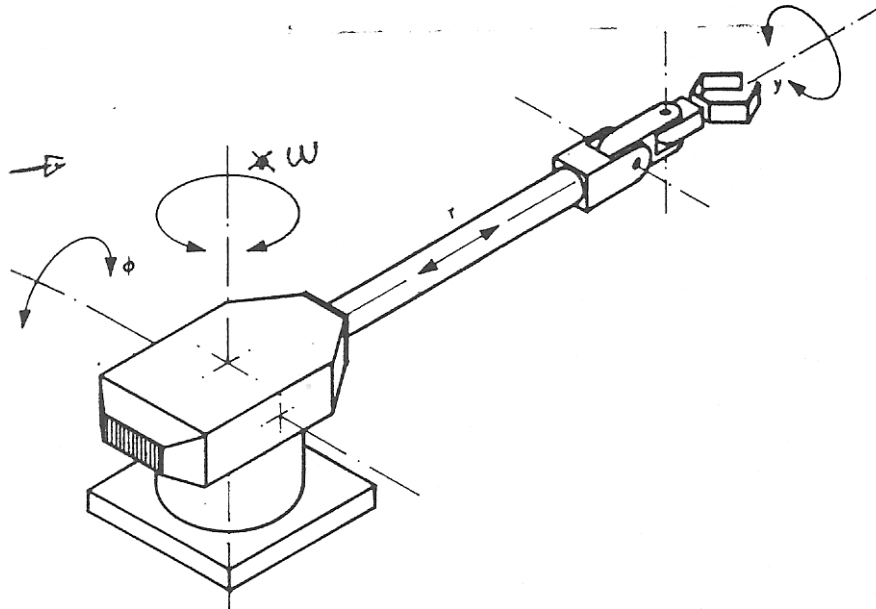


Fig. 22

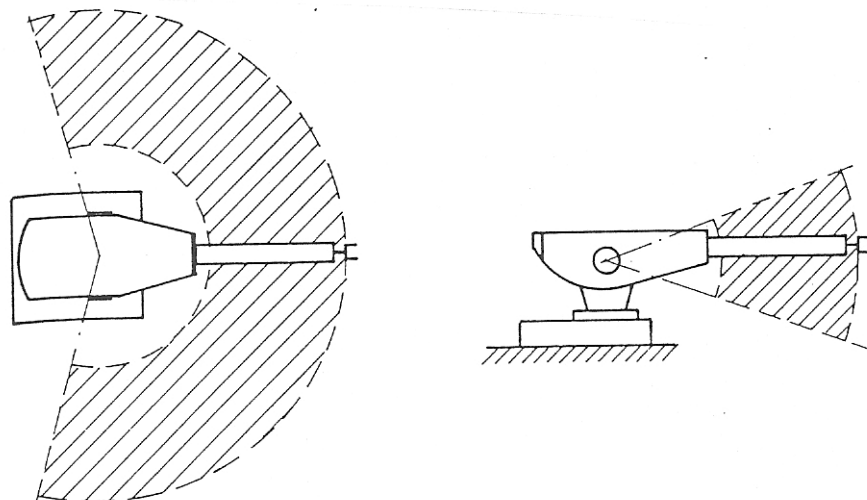


Fig. 23

I robot sferici hanno il vantaggio di poter essere facilmente introdotti nei processi produttivi. Infatti il grosso della struttura, a cui compete l'orientamento del robot, può essere collocato in una posizione abbastanza lontana dal punto in cui esso deve operare, che viene raggiunto utilizzando lo sfilo.

La struttura si presenta semplice e di realizzazione economica se se non si desiderano precisioni di posizionamento elevate. La presenza dello sfilo non comporta costi aggiuntivi particolarmente rilevanti qualora si accettino tolleranze di lavorazione non particolarmente ristrette.

I robot sferici, pur mantenendo tuttora una certa diffusione, soprattutto tra quelli utilizzati in applicazioni pesanti, hanno avuto la loro massima fortuna agli inizi della robotica industriale. I primi robot industriali, prodotti negli anni sessanta dalla americana Unimation, vennero infatti costruiti con questa struttura. Il declino si spiega col fatto che la struttura sferica si presta molto bene all'utilizzo di attuatori idraulici che oggi vengono sempre più soppiantati dall'utilizzo di azionamenti elettrici. L'utilizzo di robot sferici è limitato quasi esclusivamente ad applicazioni gravose come la saldatura a punti o la manipolazione pesante in cui non sono richieste precisioni molto elevate di posizionamento.

5.4 - Robot cilindrico - RPP

I tre gradi di libertà principali, ordinati a partire dalla base, sono così organizzati (Fig.24):

- rotazione attorno ad un asse verticale
- traslazione lungo l'asse di rotazione del giunto precedente.
- traslazione nella direzione definita dalla rotazione del primo giunto ottenuta con uno sfilo

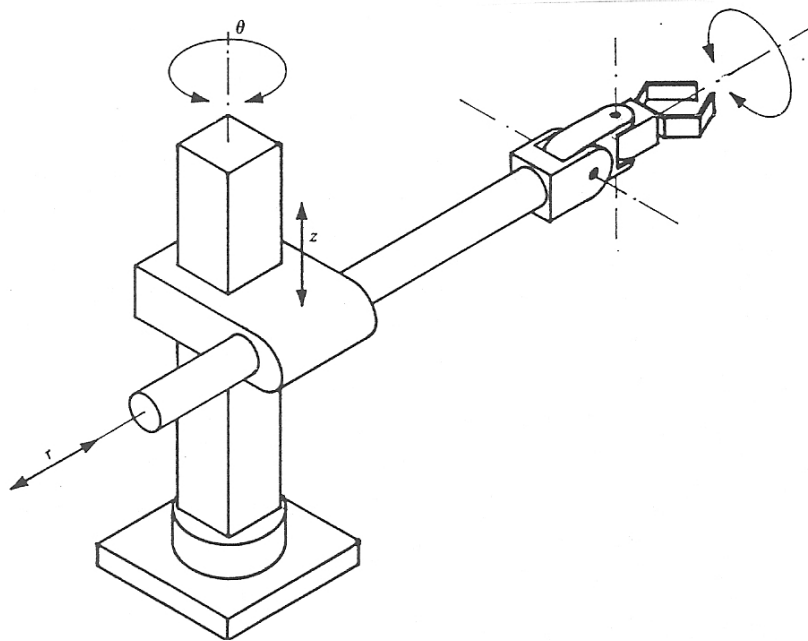


Fig. 24

Questa struttura viene definita cilindrica in quanto il volume di lavoro è facilmente individuabile come quello racchiuso tra due cilindri l'uno interno all'altro (Fig. 25).

Il giunto prismatico orizzontale determina le dimensioni del cilindro interno (sfilo completamente retracts) e di quello esterno (sfilo alla sua massima estensione). Quello verticale definisce invece l'altezza dei due cilindri, pari alla sua corsa.

Questa struttura permette di coprire agevolmente un ampio volume di lavoro e di poter penetrare anche in spazi di lavoro angusti.

Tutto lo spazio che si trova attorno alla base del robot può essere infatti raggiunto agevolmente con una semplice rotazione del primo grado di libertà e la presenza dello sfilo permette di

collocare il grosso della struttura in una posizione abbastanza lontana da quella in cui esso deve operare. Il suo punto debole è rappresentato dalla presenza dello sfilo e, più in generale, di assi lineari.

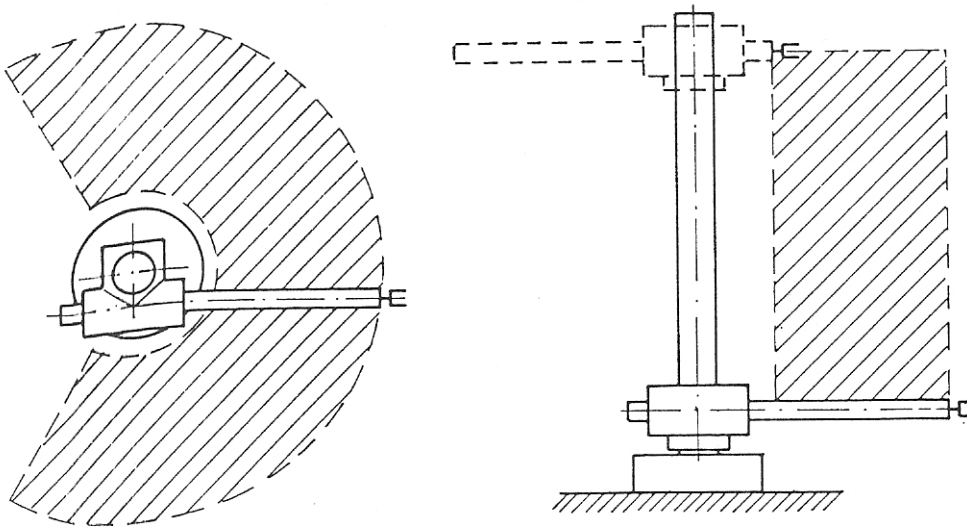


Fig. 25

Lo sfilo è causa di problema in quanto può subire delle flessioni in funzione sia del carico trasportato che della sua estensione. Ciò significa che la precisione di posizionamento di questo robot è funzione sia del carico che della posizione dello sfilo. La presenza di giunti prismatici non è in questo caso causa di notevoli costi aggiuntivi poichè questo robot viene utilizzato in genere in operazioni di manipolazione che non richiedono una elevata precisione di posizionamento. I robot cilindrici trovano la loro applicazione ideale nella movimentazione di parti o nell'asservimento di più macchine operatrici.

Infatti entrambe le applicazioni richiedono che il robot copra un ampio volume di lavoro ma si accontentano anche di precisioni modeste. Per ottimizzare lo sfruttamento dello spazio di lavoro solitamente i pezzi da manipolare (o le macchine da asservire) vengono disposte a corona attorno al robot. La possibilità di eseguire movimenti verticali utilizzando un solo giunto ha permesso l'utilizzo di questi robot anche in operazioni di assemblaggio. Tuttavia in questo ambito sono stati praticamente soppiantati dai robot di tipo SCARA, più rapidi ed economici.

La struttura cilindrica raggiunse, al pari di quella sferica, la massima diffusione agli inizi della robotica industriale. Questo fatto è spiegabile se si pensa che i primi robot utilizzavano prevalentemente degli azionamenti idraulici e che questa struttura si presenta particolarmente adatta per il loro utilizzo.

5.5 - SCARA - RRT

I tre gradi di libertà principali, ordinati a partire dalla base, sono così disposti:

- rotazione attorno ad un asse verticale
- rotazione " " " " "
- traslazione in direzione verticale (Fig. 26).

I primi due permettono all'estremità di muoversi in un piano orizzontale, mentre quello traslatorio rende possibile anche gli spostamenti verticali.

Il volume di lavoro è descrivibile in prima approssimazione come una porzione di cilindro e risulta simile a quello dei robot cilindrici nei casi in cui il loro primo grado di libertà non è in grado di compiere una rotazione completa (Fig. 27).

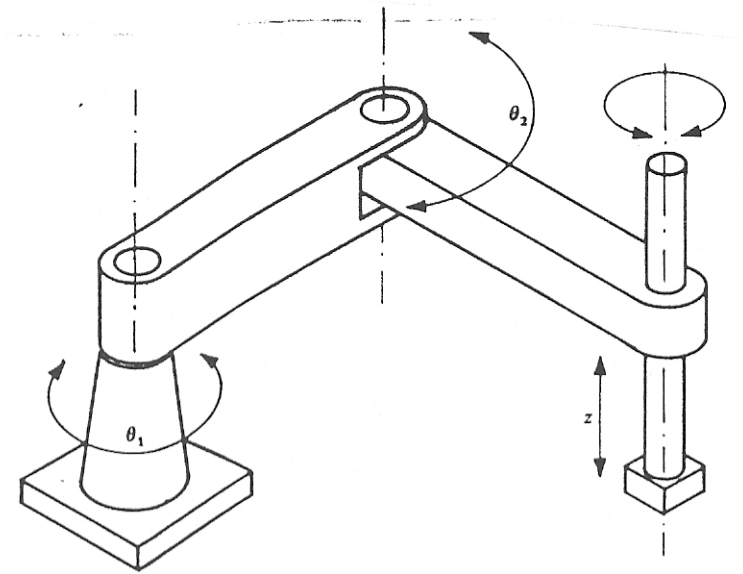


Fig. 26

Gli SCARA vengono comunemente definiti anche come robot a braccio girevole o a giunti rotoidali orizzontali (perché il 2° e il 3° grado di libertà muovono il braccio in un piano orizzontale).

Questa struttura è il risultato di uno studio condotto da più società giapponesi tendente a realizzare un sistema a basso costo in grado di operare con tre o quattro gradi di libertà.

Nonostante la sua introduzione sul mercato sia relativamente recente rispetto alle altre strutture, essa ha già raggiunto una diffusione tale, che oggi praticamente tutti i costruttori di robot la annoverano nei loro cataloghi.

Le applicazioni in cui gli SCARA si stanno imponendo sono quelle dell'assemblaggio e della movimentazione leggera.

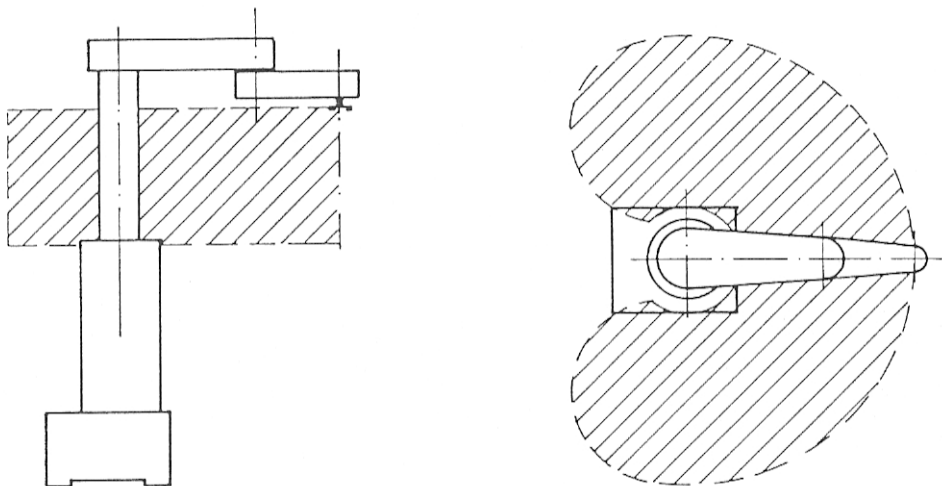


Fig. 27

Le ragioni del successo in questo ambito derivano innanzitutto dall'elevata precisione di posizionamento raggiungibile e dalle notevoli prestazioni dinamiche. Queste ultime sono rese possibili dal fatto che il movimento della parte più pesante della struttura avviene in un piano orizzontale e quindi gli attuatori non devono lavorare contro la forza peso.

Inoltre il comportamento selettivo della struttura la rende molto rigida per sforzi in direzione verticale mentre presenta una maggiore cedevolezza nel piano orizzontale. Infatti la

sigla SCARA deriva dalle iniziali di Selective Compliance Assembly Robot Arm (Braccio robotizzato per assemblaggio con cedevolezza differenziata). La necessità di questo comportamento del robot è molto utile per eseguire in modo affidabile molte operazioni di assemblaggio.

Notevole è poi la possibilità di effettuare operazioni di inserzione verticale utilizzando il solo movimento dell'asse Z. Va sottolineato che, essendo il giunto di traslazione verticale l'ultimo della struttura, il peso della parte in movimento per effettuare un'inserzione sarà modesto. Questo al contrario delle strutture cilindriche, dove ogni movimento verticale comporta lo spostamento di tutta la struttura.

Significativa anche la compattezza della struttura in rapporto al volume di lavoro ricoperto. Si tratta in ogni caso di prestazioni nettamente inferiori a quelle permesse dai robot articolati in quanto gli SCARA non possono afferrare pezzi che si trovino sulla verticale del loro basamento ed hanno difficoltà a manipolare pezzi situati ad altezza uguale od inferiore a quella del basamento. In questi casi infatti l'asse lineare dello Z dovrebbe avere una corsa molto elevata che ne pregiudicherebbe la rigidità andando a penalizzare la precisione di posizionamento del sistema.

Infine la possibilità di realizzare dei robot semplici ed economici. Infatti la maggioranza degli SCARA viene costruita con soli quattro gradi di libertà ed utilizzata per semplici operazioni di assemblaggio che non richiedono al robot una completa capacità di orientazione dei pezzi manipolati. In quei casi in cui risultano indispensabili tutti i sei gradi di libertà, il costo dello SCARA (equipaggiato con un polso che permetta l'orientazione completa dei pezzi) diventa comparabile con quello degli altri robot e, nella maggior parte dei casi, diviene più conveniente orientarsi verso una struttura di tipo articolato per la maggiore flessibilità operativa. Gli studi sulla tipologia delle operazioni di assemblaggio indicano che oltre l'80% di esse può essere eseguita utilizzando uno SCARA a quattro gradi di libertà.

Il maggior limite degli SCARA è la loro struttura che ne limita pesantemente le possibilità di operare in spazi angusti rendendone problematico l'impiego in molti ambiti, come ad esempio quello dell'asservimento di macchine operatrici.

5.6 - Altre strutture utilizzate nei bracci automatici

Robot a Pendolo - RRP

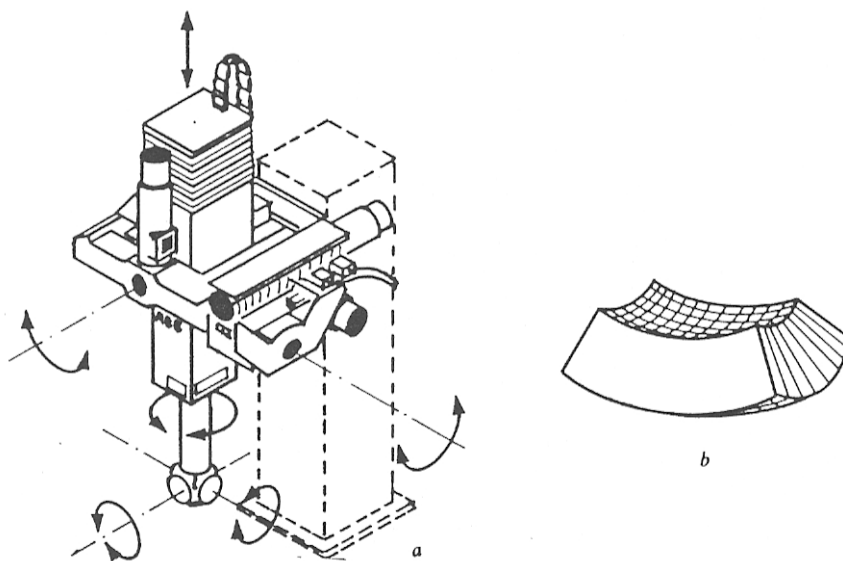


Fig. 28

Si tratta del robot IRB 1000 sviluppato dalla ABB per applicazioni di assemblaggio (Fig.28 a). Il suo nome ne sottolinea la somiglianza con un pendolo in quanto i suoi tre gradi di libertà principali sono così organizzati:

- due rotazioni che permettono al braccio di realizzare i movimenti nel piano X Y tramite delle oscillazioni. Tale scelta è stata la logica conseguenza di voler realizzare un robot ad elevate prestazioni dinamiche. Infatti i suoi attuatori, dal momento che il robot pende dall'alto verso il basso, si troveranno a vincere una forza peso molto ridotta. D'altra parte, dal momento che tutte le masse sono state concentrate in prossimità dei due assi di rotazione, anche le inerzie risulteranno molto ridotte.
- lo sfilo dell'elemento alla cui estremità è stato ricavato il polso. In pratica il movimento che realizza può essere assimilato ad una traslazione verticale.

Il volume di lavoro è, come nel caso dei robot sferici, una corona sferica, come mostrato in Fig. 28b.

Il pendolo è un robot che nasce a sei gradi di libertà e viene sempre impiegato in configurazione completa. Per questo il pendolo si presta all'automazione di operazioni complesse; in ogni caso, la sua maggior destrezza si traduce in una semplificazione della realizzazione della stazione di lavoro, ripagando il suo maggior costo iniziale.

Spine robot

Si tratta di un robot realizzato da una ditta svedese che presenta una struttura molto particolare (Fig.29a).

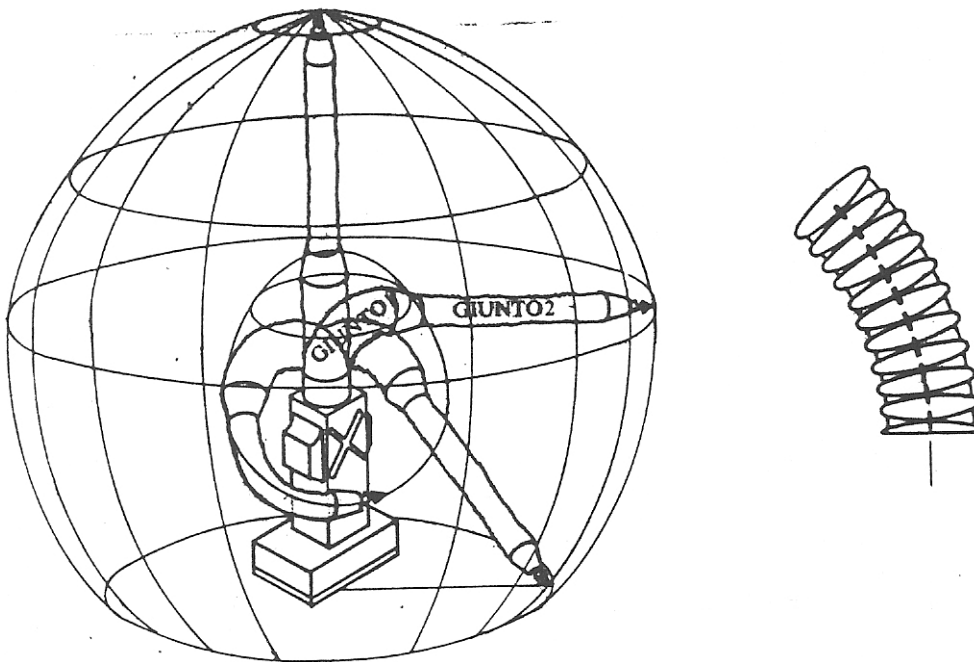


Fig. 29

Essa è infatti costituita da due giunti ognuno dei quali è realizzato con una catena di elementi ciascuno dei quali ricorda vagamente un anello della colonna vertebrale. Infatti entrambi i giunti sono realizzati con una sequenza di dischi convessi, tenuti premuti fra loro da quattro cavi messi in tensione da altrettanti cilindri idraulici. Il precarico della struttura si rende necessario per aumentarne la rigidità e per diminuirne i giochi.

Il movimento viene realizzato agendo sui quattro tiranti che vanno comandati sempre a coppie, intendendo per coppia, due fili diagonalmente opposti. L'azionamento viene affidato a dei

cilindri idraulici che provvedono a mettere in tensione o a rilasciare i tiranti in modo che, grazie alla possibilità che ogni singolo disco ha di ruotare rispetto agli altri, l'estremità della struttura del robot possa raggiungere la desiderata posizione (Fig.29b). I due giunti così realizzati portano al robot quattro gradi di libertà; infatti ciascuno di essi permette di ruotarlo attorno a due assi ortogonali tra loro.

Nel polso sono concentrati i tre secondari, per un totale di sette. Il vantaggio dell'utilizzo di questa struttura è la sua ineguagliabile flessibilità. Tuttavia la presenza dei numerosi contatti superficiali tra i singoli dischi causa una diminuzione sia della rigidità della struttura che della precisione di posizionamento.

6 - Configurazioni dei giunti secondari

Il polso è costituito da un insieme di non più di tre giunti rotoidali realizzati allo scopo di permettere l'orientazione dell'utensile di manipolazione del robot.

Per poter orientare gli oggetti manipolati in modo arbitrario è necessario che il polso permetta di ruotarli attorno a tre assi perpendicolari tra loro (Fig.30). Le diverse modalità con cui è possibile esprimere l'orientazione di un oggetto, fornendo una terna di angoli, saranno trattate in dettaglio nel capitolo successivo.

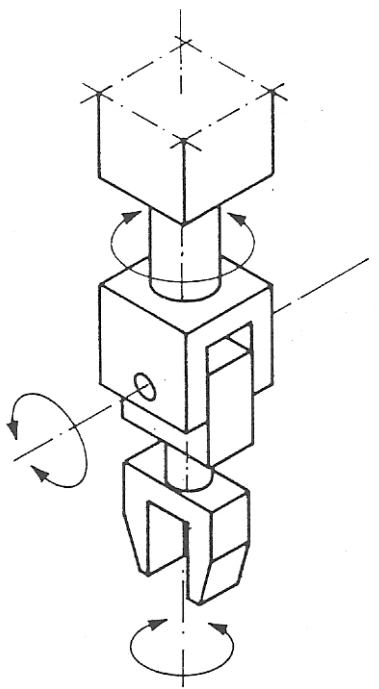


Fig. 30

Sarebbe molto interessante che i tre assi, attorno a cui avvengono le rotazioni, si incontrino in un ben determinato punto del pezzo manipolato, così che l'operazione di orientamento non vada a modificare la sua posizione nello spazio di lavoro. Si pensi, come esempio, ad un robot utilizzato in un'applicazione di incollaggio, il cui polso sia realizzato in modo tale che i tre assi di rotazione si incontrino esattamente sopra l'ugello di distribuzione del collante. Ciò significa che l'ugello può essere comunque orientato, ad esempio per mantenerlo perpendicolare alla superficie da incollare, senza che questo vari la sua posizione nello spazio che risulterebbe governata soltanto dai giunti principali.

Poiché è molto difficile realizzare in pratica un polso di questo tipo, quelli dei robot industriali hanno il punto di incontro degli assi di rotazione in genere contenuto all'interno del polso stesso.

La progettazione di un polso per robot si presenta molto difficoltosa in quanto si devono conciliare molte esigenze contrastanti.

In primo luogo, essendo posizionato all'estremità della struttura è molto importante che la massa del polso sia la più ridotta possibile per ottenere il duplice scopo di minimizzare le inerzie (che penalizzano la dinamica dei movimenti) e di non diminuire eccessivamente il carico che il robot può movimentare.

Secondariamente il polso va realizzato molto compatto per permettere al robot di lavorare anche in spazi angusti. Sempre per lo stesso motivo si dovranno evitare tutte le sporgenze che possono dar luogo ad agganci ed incastri.

Le due possibilità tra cui il progettista si trova a scegliere sono fondamentalmente quelle di fare in modo che gli attuatori movimentino direttamente ciascun asse oppure che utilizzino dei sistemi di trasmissione.

Nel primo caso si realizzerà un polso presumibilmente pesante e voluminoso ma, nel secondo caso si introduce il problema del sistema di trasmissione del moto. Il problema è analogo a quello già accennato a proposito della realizzazione dei gradi di libertà principali.

Non va da ultimo dimenticato che il polso spesso deve permettere il passaggio dei cavi che collegano la sensoristica presente sull'organo di presa con il controllore del robot.