

DEFINIZIONE DI ROBOT

La parola **robot** è stata introdotta dal commediografo Karel Čapek nel 1921 nel titolo del dramma *I Robot Universali di Rossum*, coniando il termine slavo *robota* che significa *lavoro esecutivo*. Nella finzione scenica un **automa** si ribellava all'uomo che l'aveva costruito.

Definizione di **ROBOT** del *Robot Institute of America* (1980)

Un robot è un manipolatore **multifunzionale riprogrammabile**, progettato per operare su materiali, parti, utensili o dispositivi specializzati, con movimenti variamente programmati per l'esecuzione di una varietà di compiti diversi.

Caratteristiche

- connessione intelligente tra percezione e azione
- autonomia con capacità di prendere decisioni
- versatilità e adattabilità a situazioni diverse
- flessibilità e riprogrammabilità
- possibilità di lavorare in modo simile all'uomo

1

DEFINIZIONE DI ROBOT INDUSTRIALE

È una macchina con caratteristiche di **versatilità** e **flessibilità** adatta a operare in un **ambiente fortemente strutturato** come quello industriale.

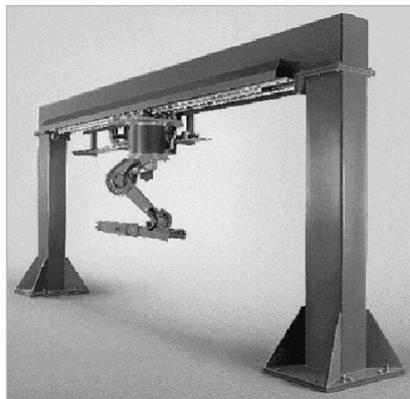
Definizione nel corso di Meccanica dei Robot:
Manipolatore industriale controllato da un calcolatore.

Capacità fondamentali dei robot per i processi manifatturieri:

- trasporto
- manipolazione
- misura

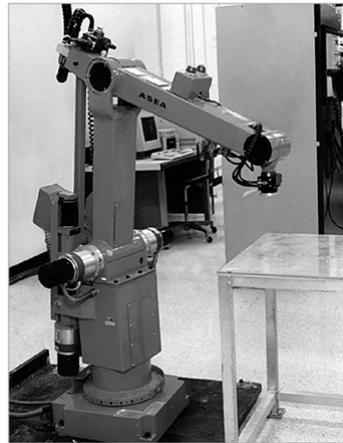
Caratteristiche di impiego:

- riduzione dei costi di produzione
- Aumento della produttività
- incremento della qualità del prodotto
- eliminazione dei compiti rischiosi e alienanti per l'operatore umano



STRUTTURA DEL ROBOT INDUSTRIALE

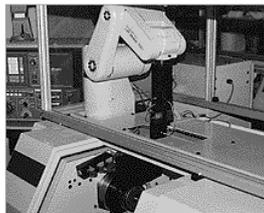
- struttura meccanica o **manipolatore**, costituita da
 - **struttura portante**, composta da bracci uniti da giunti, che assicura la mobilità
 - **polso** che conferisce destrezza
 - **organo terminale** detto anche **mano**, **effettore** (end effector), **pinza**, ecc.
- **attuatori**, che azionano i giunti, costituiti da
 - **servomotori**
 - **azionamenti** per il comando dei motori



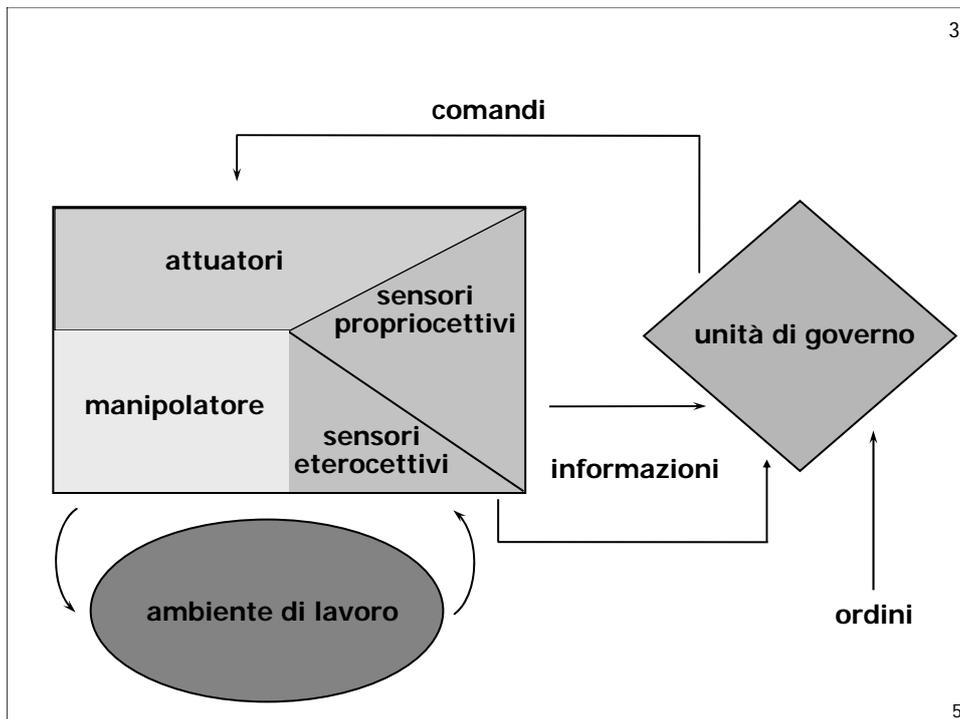
3

2

- **sensori** che misurano
 - lo stato del manipolatore \Rightarrow **trasduttori propriocettivi**
 - lo stato dell'ambiente di lavoro \Rightarrow **trasduttori eterocettivi**
- **unità di governo** con funzioni di controllo e supervisione dei movimenti del manipolatore; comprende
 - **calcolatore**
 - **elettronica di interfaccia** con i motori e i sensori



4



MANIPOLATORE

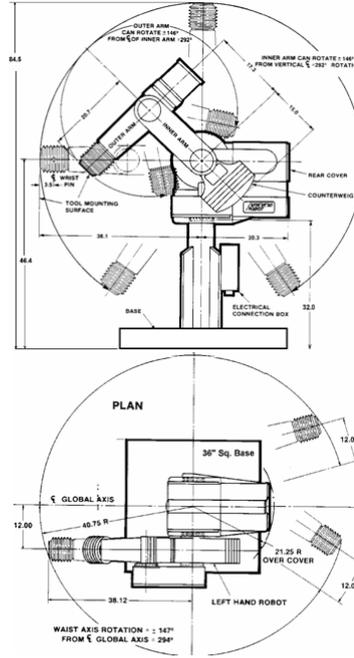
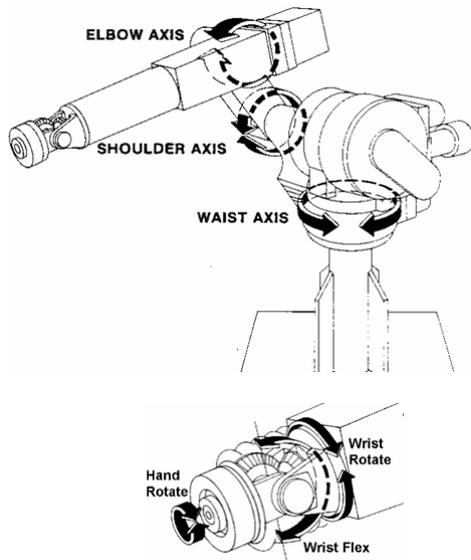
La struttura fondamentale dei manipolatori è una **catena cinematica**

- **membri** o **bracci**, spesso considerati rigidi
- **giunti** o **articolazioni** tra i bracci
 - **Rotoidali (R)**: conferiscono un **grado di mobilità di rotazione** relativo
 - **Prismatici (P)**: conferiscono un **grado di mobilità di traslazione** relativo

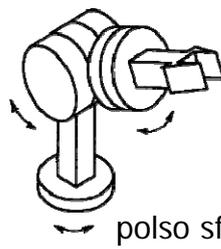
- **manipolatore**
- **attuatori**
- **sensori**
- **unità di governo**

manipolatore { **struttura portante**
polso
organo terminale

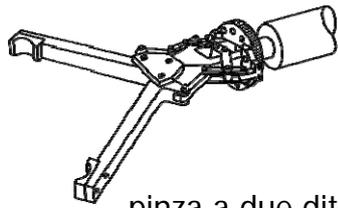
6



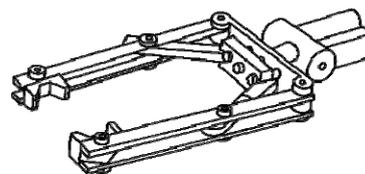
POLSO SFERICO (RRR) E ORGANI DI PRESA



polso sferico



pinza a due dita



pinza a dita parallele

ATTUATORI E SENSORI

- manipolatore
- **attuatori**
- **sensori**
- unità di governo

Attuatori

- Attuatori: producono il movimento del manipolatore azionando i giunti tra i vari bracci
 - motori in corrente continua, brushless, passo-passo
 - sistemi di azionamento idraulici e pneumatici

Sensori

- Sensori propriocettivi per la misura dello stato del manipolatore
 - dinamo tachimetrica, encoder, resolver, potenziometro
- Sensori eterocettivi per la misura dello stato dell'ambiente di lavoro
 - sistemi di visione, laser a inseguimento, sistemi a ultrasuoni
 - trasduttori di posizione, velocità e accelerazione
 - sensori tattili

9

UNITÀ DI GOVERNO

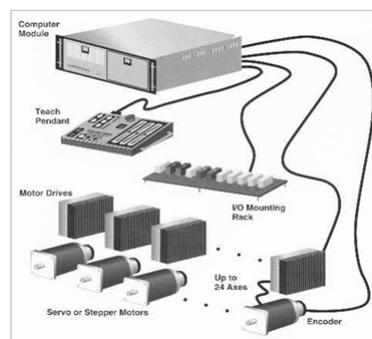
- manipolatore
- attuatori
- sensori
- **unità di governo**

È costituita da un **processore centrale** (microprocessore e coprocessore matematico) e da varie **interfacce** per comunicare con gli azionamenti dei motori e i sensori. Contiene algoritmi e riceve informazioni

- modello del robot
- modello dell'ambiente di lavoro
- strategie di comando
- misure dai sensori
- dati sul compito da svolgere

PC Based
24 Axis, 4 Machine
Complete Kinematics
Analog & Digital I/O
Basic Language
Resolver or Encoder
Stepper or Servo

Absolute Position
Rack or Panel Mounting
Rugged Teach Pendant
Linear, Circular Motion
Absolute & Relative
Path Coordinated I/O



10

GLOSSARIO DELLA ROBOTICA

Per esprimere concetti e relazioni relative alla robotica è necessario introdurre alcuni **termini** e **definizioni**

- **organo terminale**: mano, effettore, *pinza*
 - la posizione è la posizione del punto di riferimento cinematico dell'organo terminale, in genere il centro pinza
 - l'orientamento è l'orientamento di una terna solidale alla pinza
 - con *posa* si indica la posizione e l'orientamento della pinza
- **gradi di mobilità**
 - di un giunto sono i gradi di libertà del moto relativo tra i membri collegati dal giunto;
 - del manipolatore sono la somma dei gradi di mobilità dei suoi giunti
- **gradi di libertà** di un robot sono quelli dell'organo terminale
 - per descrivere la posizione e l'orientamento di un corpo rigido in uno spazio 3-D sono necessarie **6 coordinate** → **6 gradi di libertà**

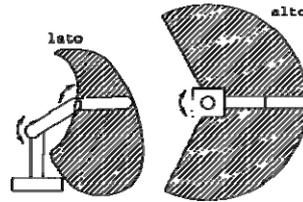
11

2

- **robot con 6 gradi di libertà** ⇔ caso generale nello spazio 3-D
- per un **robot con 6 gradi di libertà** sono necessari e sufficienti **6 gradi di mobilità** opportunamente disposti
 - la struttura portante posiziona il centro pinza → **3 gradi di mobilità**
 - il polso orienta l'organo terminale → **3 gradi di mobilità**
 - per posizionare e orientare l'organo terminale → **6 gradi di mobilità**
- si ha un **robot ridondante** quando il numero di gradi di mobilità è maggiore del numero dei gradi di libertà
- **configurazioni singolari**: sono particolari configurazioni (ad esempio allineamenti) in cui la pinza del robot perde dei gradi di libertà istantanei. Il robot può avere difficoltà di movimento e le relazioni cinematiche e dinamiche mostrano **singularità**

12

- **volume di lavoro:** luogo geometrico dei punti raggiungibili dalla pinza; dipende dalle dimensioni, dalla struttura cinematica, dall'ampiezza dei movimenti ammessi; si distingue in
 - primario o raggiungibile: insieme dei punti raggiungibili dal centro della pinza
 - secondario o di destrezza: insieme dei punti raggiungibili con orientamento arbitrario della pinza



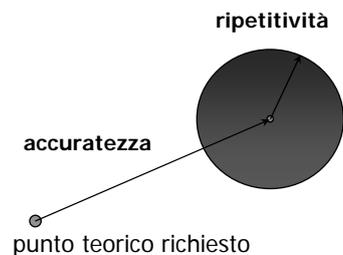
- **carico pagante:** peso massimo trasportabile dal robot nel rispetto delle tolleranze (accuratezza e ripetitività), dipende dalla velocità

➤ Precisione di posizionamento

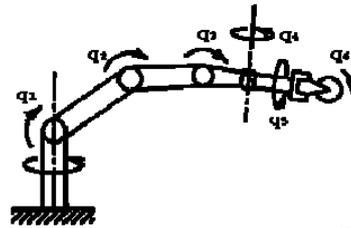
- **Ripetitività** → precisione con cui l'organo terminale torna in un determinato punto: **raggio della sfera** dei punti raggiunti
- **Accuratezza** → è la precisione con cui l'organo terminale raggiunge il punto richiesto: **distanza** tra il **punto teorico** e il **centro** dei punti raggiunti

Gli errori sistematici influenzano l'accuratezza, quelli casuali la ripetitività. Possibili cause di errore sono

- **errori strutturali** → dimensioni, allineamenti
- presenza dei **giochi** dei giunti
- **elasticità** dei giunti e dei bracci
- imprecisione di **sensori** e **attuatori**



- **coordinate nello spazio di lavoro o esterne:** specificano la **posa**, **velocità** e **accelerazione** della pinza in un **riferimento solidale con la base** fissa del robot → riferimento esterno o universale
 - **3 coordinate cartesiane** → x, y, z
 - **3 angoli** → α, β, γ (ad esempio di Eulero)
 - è utilizzato per descrivere il compito da eseguire
- **coordinate nello spazio dei giunti:** specificano la **configurazione del robot** e quindi della pinza con riferimento alle **coordinate dei giunti (q_i) e relative derivate** → dipendono dalla struttura del robot
 - **angolo** → accoppiamento rotoidale
 - **lunghezza** → accoppiamento prismatico
 - è utilizzato per descrivere la postura e il funzionamento del robot



ROBOTICA

La robotica è una materia **intersettoriale** che trae le radici da numerose discipline:

- **meccanica**
 - **automatica**
 - elettrotecnica
 - elettronica
 - informatica
 - cibernetica
 - bioingegneria
- } **ruolo fondamentale nelle applicazioni industriali**

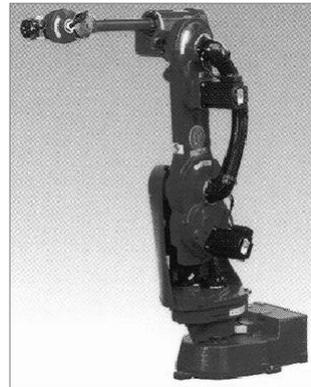


MECCANICA DEI ROBOT



In particolare si occupa

- modellistica
- analisi meccanica
 - cinematica
 - dinamica
- struttura meccanica
 - struttura e componenti meccanici
 - attuatori
 - sensori e trasduttori
- nozioni di controllo



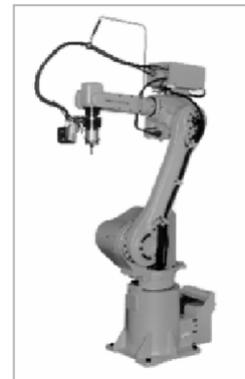
Comau SMART S2

17

PROGRAMMA DEL CORSO

Il corso tratta principalmente degli **aspetti meccanici** dei sistemi robotici:

- **Quadro introduttivo**
 - definizioni e classificazioni
 - caratteristiche strutturali e componenti
 - formulazione dei problemi cinematico e dinamico
- **Cinematica**
 - posizione e orientamento dei corpi nello spazio
 - cinematica differenziale
 - problema cinematico diretto e inverso



18

➤ **Dinamica**

- cinetostatica
- matrici per la dinamica dei sistemi multicorpo
- problema dinamico diretto e inverso

➤ **Pianificazione delle traiettorie**

- movimenti punto-punto
- movimenti con traiettorie assegnate

➤ **Nozioni sul controllo dei robot**

- controllo della velocità dei giunti
- controllo della posizione dei giunti
- controllo della forza



ABB IRB 4400

Letture consigliate

➤ **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**

J.J. Craig
Addison-Wesley

➤ **Robotica industriale**

G. Legnani
Casa Editrice Ambrosiana

➤ **Robot Dynamics and Control**

M.W. Spong, M. Vidyasagar
John Wiley & Sons

➤ **Robotica Industriale**

G. Legnani
McGrawHill

➤ **Robotica Industriale**

L. Sciavicco, B. Siciliano
McGrawHill Italia

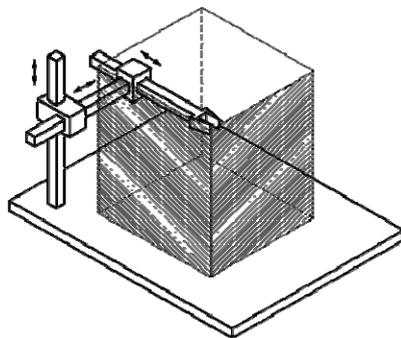


CLASSIFICAZIONE DEI ROBOT INDUSTRIALI

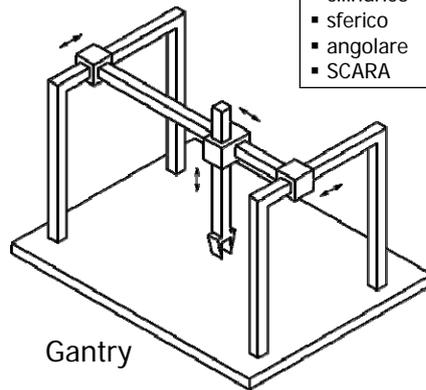
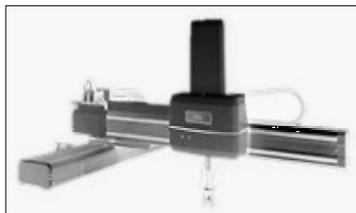
- per grado di **autonomia**
 - teleoperatore → comandato direttamente dall'operatore
 - programmabile → punto-punto, in traiettoria, controllato in linea e fuori linea, per apprendimento, tramite linguaggio
- per **funzione**
 - montaggio, verniciatura, trasporto, taglio, saldatura, ... ecc.
- per tipo di **catena cinematica** del manipolatore
 - aperta \Rightarrow robot seriale unica sequenza dalla base alla pinza
 - chiusa \Rightarrow robot parallelo
- per **catena cinematica** della struttura portante
 - cartesiano (PPP) } \Rightarrow prendono il nome dal fatto che i loro
 - cilindrico(RPP) } movimenti sono convenientemente
 - sferico (RRP) } descrivibili con le omonime coordinate
 - angolare o antropomorfo (RRR)
 - SCARA (RRP) → Selective Compliant Assembly Robot Arm

21

ROBOT CARTESIANO (PPP)



- 3 giunti prismatici ortogonali



Gantry



- cartesiano
- cilindrico
- sferico
- angolare
- SCARA

22

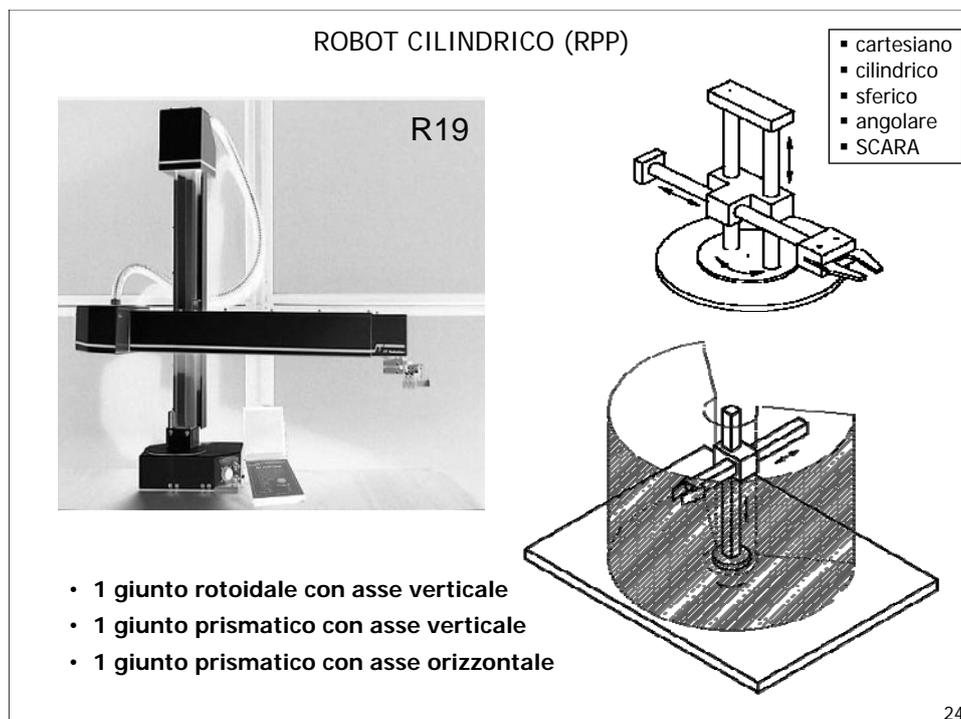
Vantaggi

- moti lineari nelle tre dimensioni
- modello cinematico semplice
- struttura rigida → impiegato specialmente quando si vuole ottenere una elevata precisione di posizionamento dell'organo terminale

Svantaggi

- spazio di lavoro ristretto
- spazio di lavoro più piccolo del volume del robot
- giunti prismatici meno efficienti di quelli rotoidali
- i giunti devono essere coperti per prevenire l'ingresso di polvere
- non possono raggiungere l'area sottostante gli oggetti
- la velocità di lavoro sul piano orizzontale è generalmente più bassa di quella tipica dei robot aventi una base rotante

23



Vantaggi

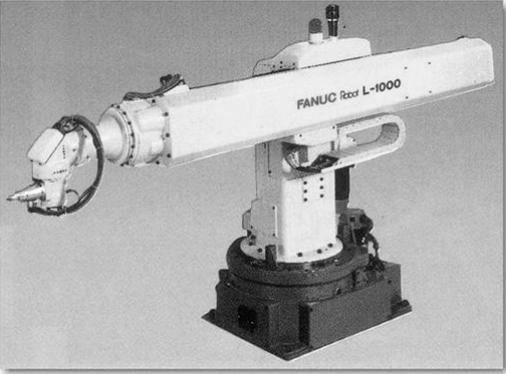
- modello cinematico semplice
- buona accessibilità dentro cavità e macchine aperte → usati generalmente per la manipolazione e l'asservimento di macchine utensili
- possono spostare carichi paganti molto grandi quando si usano motori oleodinamici

Svantaggi

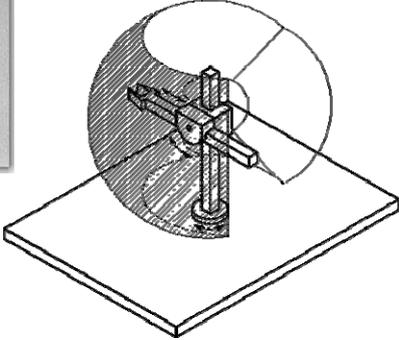
- spazio di lavoro ristretto
- il retro del robot può non essere accessibile
- giunti prismatici meno efficienti di quelli rotoidali
- guide prismatiche difficili da sigillare per evitare infiltrazioni di polvere e perdite di liquidi → lubrificanti
- l'incertezza nel posizionamento non è costante ma dipende dalla distanza r della pinza dalla colonna. Se l'incertezza alla base rotante è α si ha che l'incertezza di posizionamento della pinza è αr

25

SFERICO (RRP)



- cartesiano
- cilindrico
- sferico
- angolare
- SCARA



- **1 giunto rotoidale con asse verticale**
- **1 giunto rotoidale con asse orizzontale**
- **1 giunto prismatico con asse ortogonale al precedente**

26

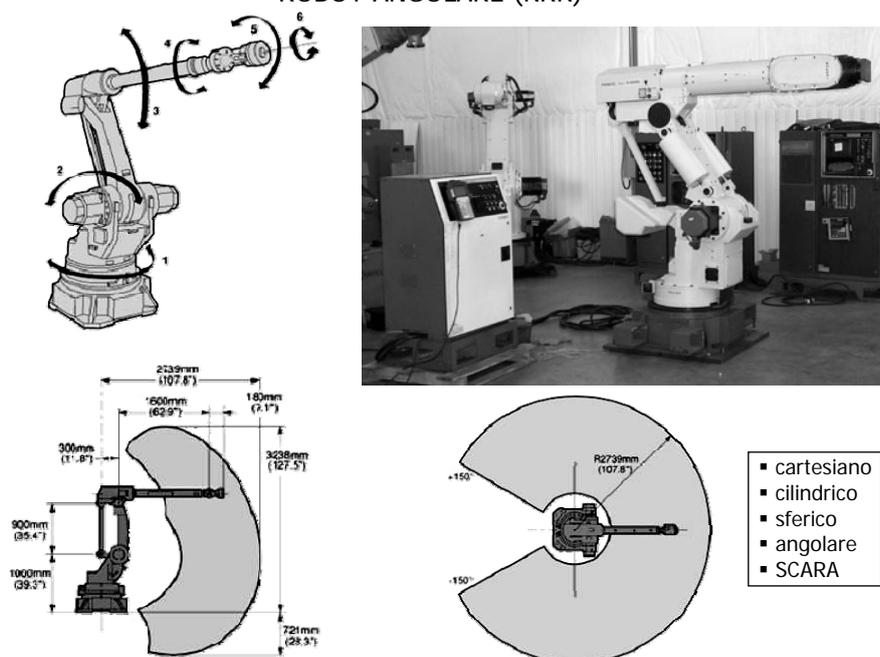
Vantaggi

- modello cinematico semplice
- copre un vasto volume intorno al supporto centrale
- può piegarsi in avanti per afferrare oggetti sul piano di supporto della base
- robot di questo tipo si prestano bene ad operazioni di carico e scarico pezzi, di saldatura, di verniciatura

Svantaggi

- rigidità meccanica inferiore alle strutture precedenti
- la precisione di posizionamento si riduce al crescere dello sbraccio radiale

ROBOT ANGOLARE (RRR)



Vantaggi

- massima flessibilità
- copre un volume di lavoro grande rispetto al volume del robot
- possono raggiungere le parti sovrastante e sottostante degli oggetti
- giunti rotoidali
 - ✓ facili da sigillare per prevenire polvere e fuoruscite di lubrificante
 - ✓ adatti per l'impiego di motori elettrici
- può muoversi ad alta velocità

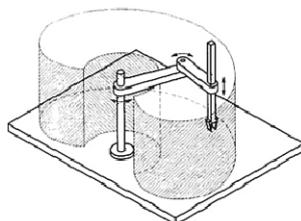
Svantaggi

- modello cinematico più complesso
- esecuzione di movimenti lineari più difficile
- struttura non molto rigida sul bordo del volume di lavoro

29



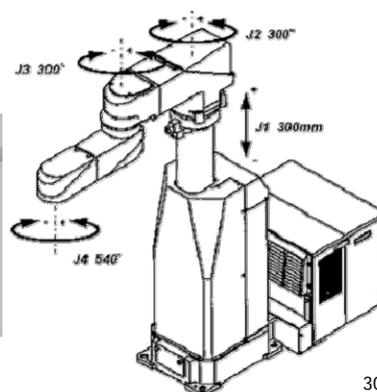
AdeptOne XL



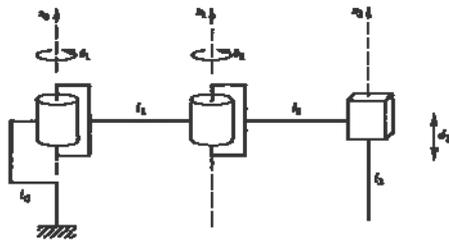
ROBOT SCARA (RRP)

- cartesiano
- cilindrico
- sferico
- angolare
- SCARA

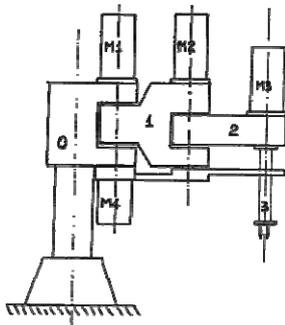
- 2 giunti rotoidali con asse verticali
- 1 giunto primatico con asse verticale



30

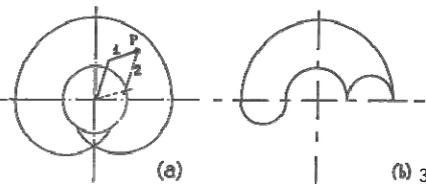
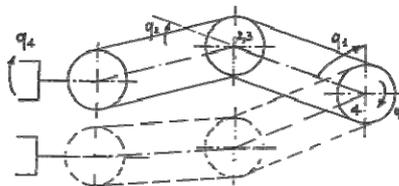


- 2 accoppiamenti rotoidali
- 1 accoppiamento prismatico
- orientamento della pinza



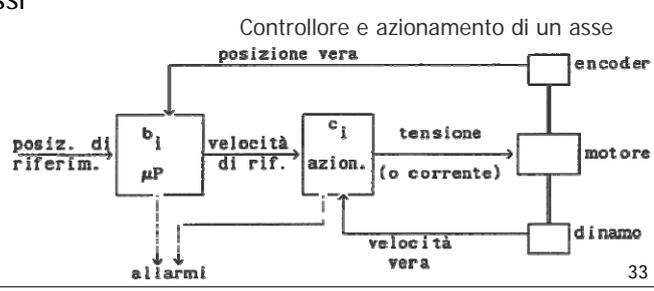
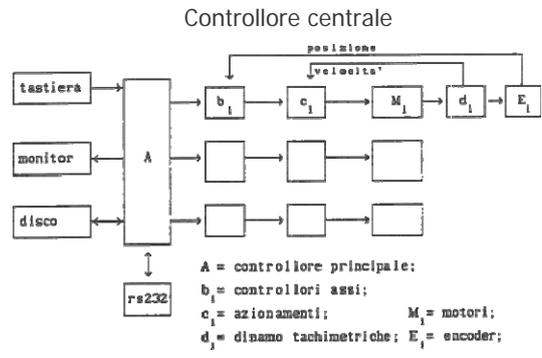
lunghezza 1° membro	330 mm	corsa verticale	200 mm
lunghezza 2° membro	330 mm	vel. max vertic	0.5 m/s
sbraccio max	660 mm	acc. max vertic	5 m/s ²
corsa braccio	256°	ripetitività.	0.05 mm
corsa avambraccio	254°	accuratezza.	0.02 mm
velocità rot. bracci	216°/s	carico pagante	6 kg
vel. max orizz.	1.8 m/s	forza verticale	10 kg
acc. max orizz.	9 m/s ²	forza assiale	10 kg
rotazione pinza	400°	peso	50 kg
vel. rotaz. pinza	256°/s		

- gli accoppiamenti rotoidali
 - sono azionati da motori elettrici
 - tramite riduttori di velocità HD
 - su ogni asse si trova un encoder e una dinamo tachimetrica
- per il moto verticale c'è una coppia vite senza fine-ruota elicoidale
- orientamento della pinza
 - puleggia 4 azionata dal motore M4 oppure
 - puleggia 4 bloccata
- spazio di lavoro
 - a) q_2 può assumere valori positivi e negativi (vantaggi e svantaggi)
 - b) q_2 solo positivo



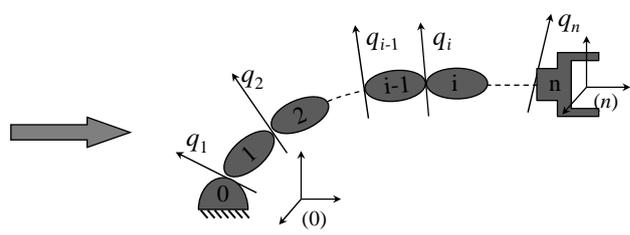
Logica di Controllo

- unità centrale
 - ROM
 - RAM
 - interfaccia con l'operatore
 - converte ordini di movimentazione
- controllori degli assi
- azionamenti
- motori
- sensori



MODELLISTICA E ANALISI

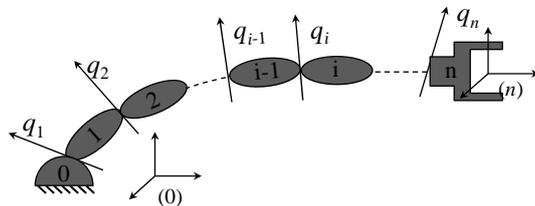
L'analisi meccanica viene eseguita tramite modelli
 struttura reale \Rightarrow modello fisico \Rightarrow modello matematico



Sistema
di
equazioni algebriche o differenziali

➤ **modello fisico**: i robot industriali si schematizzano con una **catena cinematica aperta**, di **membri rigidi** connessi da **coppie cinematiche**, rotoidali o prismatiche, sulle quali agiscono gli attuatori

- giunti con **gradi di mobilità multipli** sono simulati con **coppie cinematiche inferiori in serie**: ad esempio un giunto sferico è schematizzabile con 3 coppie rotoidali equivalenti in serie
- l'accoppiamento tra 2 membri diventa di tipo **prismatico** o **rotoidale** e la posizione reciproca è rappresentata da un angolo o da una lunghezza
- a ogni giunto è associato un **attuatore equivalente** che agisce direttamente tra i 2 membri adiacenti senza riduttori → equazioni di equivalenza
- i 2 assi di azionamento di ogni membro sono generalmente paralleli o ortogonali e a volte incidenti



- ❖ base fissa → **0**
- ❖ braccio generico → **i**
- ❖ giunto **i** → coppia **i** + attuatore **i**
- ❖ braccio **i-1** ↔ giunto **i** ↔ braccio **i**
- ❖ organo terminale → **n**

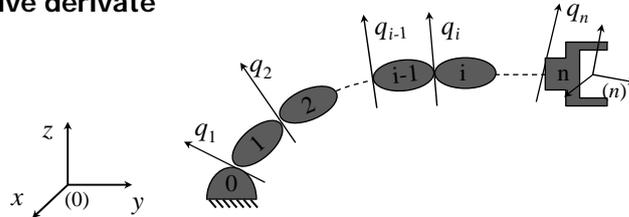
➤ **modello matematico**: relazioni matematiche tra le **grandezze cinematiche e dinamiche** nello **spazio dei giunti** e quelle nello **spazio di lavoro o operativo**; si adottano diversi modelli in funzione delle analisi

- **analisi cinematica**: manipolatore composto da corpi rigidi con giunti ideali
- **analisi dinamica a corpi rigidi**: : manipolatore composto da corpi rigidi con accoppiamenti ideali → analisi preliminare
- **analisi dinamica con modello discreto**: robot composto da corpi rigidi e accoppiamenti elastici e con giochi → analisi realistica
- **analisi dinamica con modello continuo**: robot composto da elementi, membri e trasmissioni, elastici → analisi approfondita

- trattate nel corso
- non trattate nel corso

ANALISI CINEMATICA DIRETTA E INVERSA

L'analisi cinematica descrive il moto del manipolatore, **posizione**, **velocità** e **accelerazione**, attraverso relazioni funzionali tra le **coordinate cartesiane di un sistema fisso** e le **coordinate dei giunti** e le **rispettive derivate**



$\mathbf{S}, \dot{\mathbf{S}}, \ddot{\mathbf{S}} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Vettore delle } m \text{ coordinate (} m \text{ gradi di libert\`a) dell'effettore nel} \\ \text{sistema di riferimento esterno, ad esempio } x, y, z \text{ e angoli di} \\ \text{Eulero } \alpha, \beta, \gamma \text{ e relative derivate.} \end{array} \right.$
 $\mathbf{Q}_g, \dot{\mathbf{Q}}_g, \ddot{\mathbf{Q}}_g \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Vettore delle } n \text{ coordinate } q_1, q_2, \dots, q_n \text{ nello spazio dei giunti} \\ \text{(} n \text{ gradi di mobilit\`a del manipolatore) e relative derivate} \end{array} \right.$

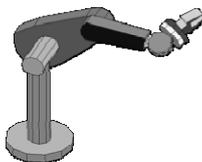
37

2

Problema diretto: posizione \rightarrow

Incognita	Termine noto
\mathbf{S}	\mathbf{Q}_g

- Relazioni che forniscono le coordinate cartesiane della pinza in funzione delle variabili dei giunti, cioè la descrizione della posizione assoluta dell'organo terminale in funzione delle coordinate dei giunti
- per un robot con m gradi di libertà si possono scrivere m relazioni nelle m incognite \mathbf{S}
- sono ottenute dalla geometria del robot \rightarrow metodo delle matrici di trasformazione
- è generalmente un metodo sistematico e relativamente semplice e produce equazioni in forma chiusa



38

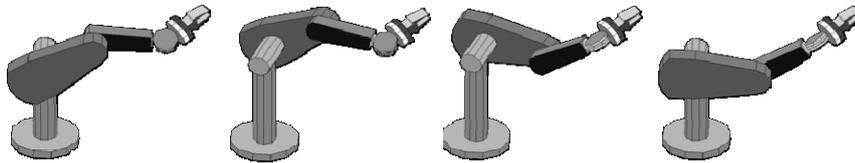
Problema inverso: posizione \Rightarrow

Incognita	Termine noto
Q_g	S

- **problema cinematico inverso:** traduzione delle specifiche della posizione assegnata dal compito all'organo terminale nella posizione da imporre ai giunti
- il problema generalmente **non è lineare**, deve essere risolto con metodi specifici per ogni tipo di robot, a volte la soluzione si può trovare solo numericamente, e presenta in genere **molteplici soluzioni**

Inversione delle relazioni della posizione con $n \geq m$ \rightarrow $n \rightarrow$ gradi di mobilità del manipolatore
 $m \rightarrow$ gradi di libertà dell'organo terminale

Ad esempio un robot RRR-RRR può avere sino a 16 soluzioni.



Problema diretto: velocità \Rightarrow

Incognita	Termine noto
\dot{S}	\dot{Q}_g

- Relazioni che forniscono le velocità assolute della pinza in funzione delle velocità dei giunti
- è generalmente un metodo sistematico e relativamente semplice e produce equazioni in forma chiusa

Problema inverso: velocità \Rightarrow

Incognita	Termine noto
\dot{Q}_g	\dot{S}

- traduzione delle specifiche della velocità assegnata dal compito all'organo terminale nella velocità da imporre ai giunti
- il problema è lineare e può essere risolto con metodi automatici
- nelle configurazioni singolari la matrice dei coefficienti (Jacobiano) non è invertibile. Alcuni termini tenderebbero all'infinito e i corrispondenti movimenti dell'organo terminale sono limitati: dovendo $\dot{Q}(t)$ essere finito, devono corrispondere termini di $\dot{S}(t)$ nulli.

Problema diretto: accelerazione \Rightarrow

Incognita	Termine noto
$\ddot{\mathbf{S}}$	$\ddot{\mathbf{Q}}_g$

- Relazioni che forniscono le accelerazioni assolute della pinza in funzione delle accelerazioni dei giunti
- è generalmente un metodo sistematico e relativamente semplice e produce equazioni in forma chiusa

Problema inverso: accelerazione \Rightarrow

Incognita	Termine noto
$\ddot{\mathbf{Q}}_g$	$\ddot{\mathbf{S}}$

- traduzione delle specifiche dell'accelerazione assegnata dal compito all'organo terminale nell'accelerazione da imporre ai giunti
- il problema è lineare e può essere risolto con metodi automatici
- per le configurazioni singolari valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per le velocità

Riepilogo

L'analisi cinematica stabilisce le **relazioni** tra coordinate nello **spazio dei giunti** e nello **spazio esterno** per posizioni, velocità e accelerazioni del manipolatore.

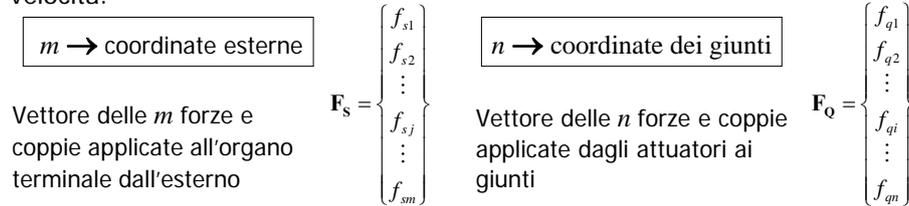
problema cinematico	posizione		velocità		accelerazione	
	equazioni	difficoltà	equazioni	difficoltà	equazioni	difficoltà
diretto	$\mathbf{Q}_g \rightarrow \mathbf{S}$	automatizzabile	$\dot{\mathbf{Q}}_g \rightarrow \dot{\mathbf{S}}$	lineare	$\ddot{\mathbf{Q}}_g \rightarrow \ddot{\mathbf{S}}$	lineare
inverso	$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{Q}_g$	non lineare	$\dot{\mathbf{S}} \rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_g$	lineare	$\ddot{\mathbf{S}} \rightarrow \ddot{\mathbf{Q}}_g$	lineare

Il problema **cinematico inverso per la posizione** offre le maggiori complicazioni.

- non linearità delle equazioni
- si hanno spesso soluzioni multiple \rightarrow in numero variabile e non noto a priori
- si incontrano configurazioni singolari \rightarrow singolarità matematiche
- non sempre è risolubile analiticamente \rightarrow a volte si ricorre a metodi numerici

ANALISI CINETOSTATICA

Calcolo delle **azioni dei motori** devono esercitare per **equilibrare le azioni applicate staticamente all'organo terminale** del robot. Così chiamata perché derivabile da una dualità tra statica e cinematica delle velocità.



Principio dei lavori virtuali: il lavoro totale di tutte le azioni applicate, esterne e motrici, è nullo per qualsiasi spostamento virtuale compatibile con i vincoli

$$\sum \delta L = \sum_{j=1}^m \delta s_j \cdot \vec{f}_{sj} + \sum_{i=1}^n \delta q_i \cdot \vec{f}_{qi} = \delta \mathbf{S}^T \mathbf{F}_s + \delta \mathbf{Q}_g^T \mathbf{F}_Q = 0$$

Data l'analogia tra velocità e spostamenti infinitesimi (virtuali), si ottengono espressioni analoghe a quella delle velocità.

ANALISI DINAMICA DIRETTA E INVERSA

Il modello dinamico è costituito dalle equazioni che legano il **moto del manipolatore** alle **forze e momenti agenti** su di esso. Il modello dinamico permette il **progetto** della struttura, il dimensionamento dei **bracci, riduttori, trasmissioni e attuatori**, la strategia di **controllo** e la **simulazione** del comportamento del manipolatore.

Problema dinamico diretto \Rightarrow

Incognite	Termini noti
$\mathbf{Q}_g, \dot{\mathbf{Q}}_g, \ddot{\mathbf{Q}}_g$	$\mathbf{F}_Q, \mathbf{F}_s$

- consiste nel determinare il movimento del manipolatore quando sono assegnate le coppie e forze ai giunti e le forze e coppie all'organo terminale eventualmente presenti, noto lo stato iniziale del sistema
- integrazione di un sistema di n (gradi di mobilità) equazioni differenziali del secondo ordine: è complessa e spesso condotta per via numerica
- la soluzione del problema diretto è utile per simulare il movimento di un robot per effetto di tutte le azioni agenti su di esso (verifiche in fase di progetto, studio di comportamenti dinamici, ...)
- L'integrazione del sistema di equazioni differenziali deve essere effettuata a ogni passo della simulazione.

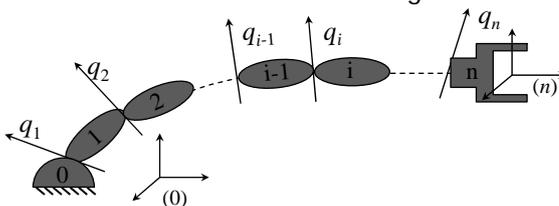
Problema dinamico inverso \Rightarrow

Incognite	Termini noti
\mathbf{F}_Q	$(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}, \ddot{\mathbf{s}}, \mathbf{F}_s)$

- consiste nel calcolare le forze e le coppie che gli attuatori devono fornire ai giunti affinché il robot esegua il compito assegnato $(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}, \ddot{\mathbf{s}}, \mathbf{F}_s)$
 - si risolve prima il problema cinematico inverso: $\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}, \ddot{\mathbf{s}} \rightarrow \mathbf{Q}_g, \dot{\mathbf{Q}}_g, \ddot{\mathbf{Q}}_g$
 - essendo note tutte le grandezze cinematiche, il problema dinamico inverso è algebrico
 - è più facilmente solubile rispetto al problema diretto
 - necessario per il controllo dinamico del robot
 - alcuni autori usano la terminologia opposta per indicare i problemi cinematici diretto e inverso

METODI MATRICIALI PER LA ROBOTICA

Alcuni **metodi matriciali specializzati per lo studio della cinematica e della dinamica dei robot** sono stati sviluppati per superare la complessità degli algoritmi tradizionali. Tali metodi si avvalgono di alcune caratteristiche



- ❖ i manipolatori sono schematizzabili con una **catena cinematica aperta** costituita da corpi rigidi detti bracci: un estremo è vincolato alla base, l'altro porta la pinza
- ❖ i bracci sono connessi in cascata con **giunti rotoidali** o **prismatici** che conferiscono alla struttura i gradi di mobilità
- ❖ **la posizione e l'orientamento di un corpo rigido** è esprimibile con una terna a esso solidale
- ❖ il **compito** del robot è descritto rispetto una **terna di riferimento fissa**, la **postura** del manipolatore è descritta nello **spazio dei giunti**