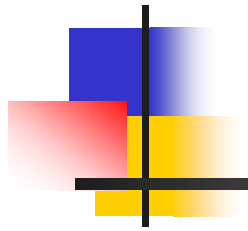


Corso di Percezione Robotica (PRo)

Modulo B. Fondamenti di Robotica



**Fondamenti di controllo dei
robot**



Modulo B. Fondamenti di controllo dei Robot

- Controllo del moto di un giunto:
 - Il controllo PID
- Controllo del moto di un manipolatore
 - Pianificazione delle traiettorie
 - Controllo del moto nello spazio dei giunti
 - Controllo del moto nello spazio operativo: cinematica differenziale e Jacobiano
- Dexter Arm:
 - Meccanica, Cinematica, Controllo, Interfacce software

Sistema di controllo

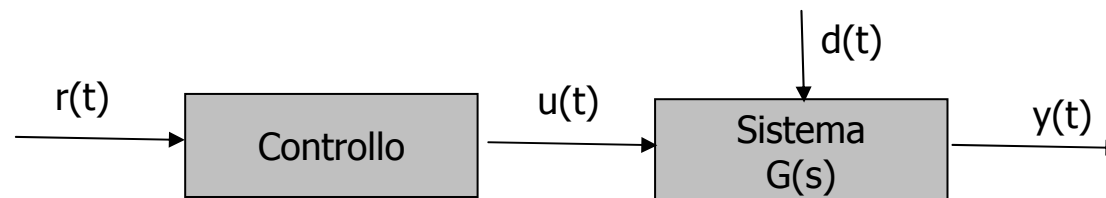
Dato un sistema S che genera una uscita $y(t)$ in base all'ingresso $u(t)$ si definisce **Processo** la successione di Stati che il sistema attraversa per ottenere una particolare uscita finale $y_f(t)$. Nel caso di Sistemi **Discreti** un processo può essere descritto attraverso un Diagramma degli Stati, mentre per Sistemi **Continui** occorre utilizzare un modello matematico.

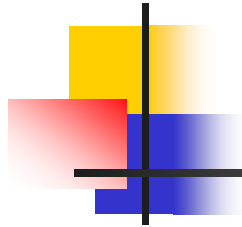
Controllo di Processo: operazioni necessarie per ottenere nel tempo, una sequenza prefissata di valori delle grandezze di processo, indipendente dalla presenza di eventuali fattori esterni incontrollabili che agiscono sul sistema, detti Disturbi.

Disturbi: cause esterne, invecchiamento componenti, fenomeni legati al funzionamento stesso del sistema, non perfetta identificazione del sistema.

Occorre precisare che, se il sistema controllato è in genere il più soggetto ad alterazioni di funzionamento, errori più o meno gravi possono colpire anche i dispositivi di controllo.

Sistema di controllo: dispositivo atto a comandare il sistema per ottenere l'uscita desiderata nel tempo desiderato.

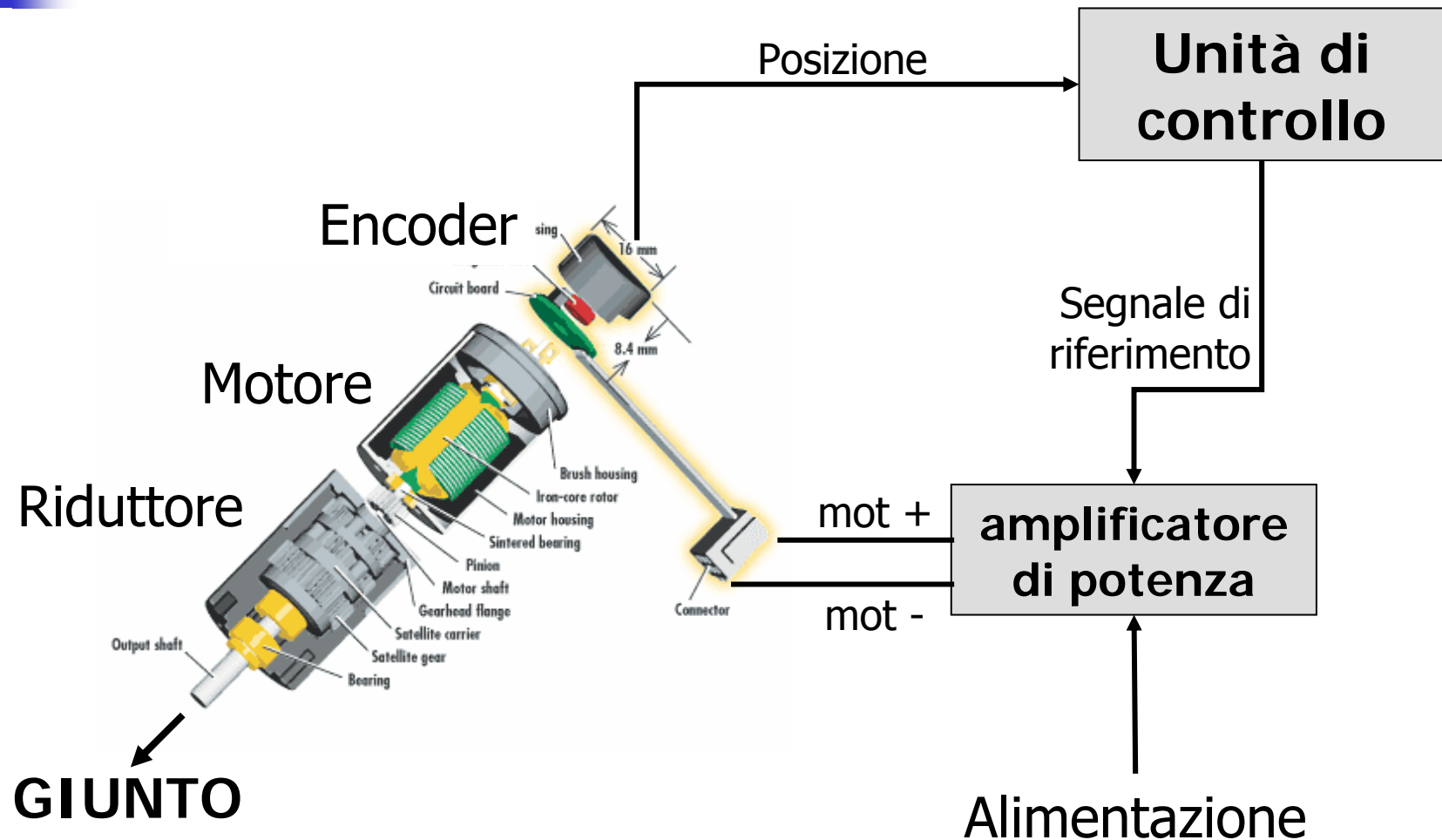




Controllo di un giunto

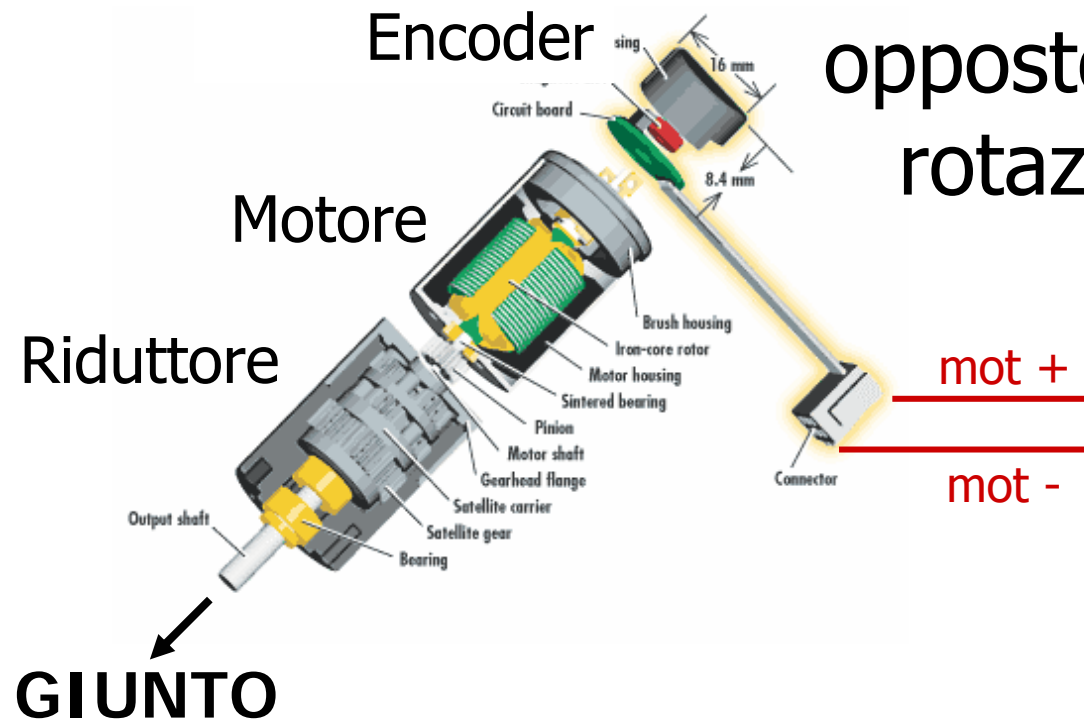
- Un sistema di controllo fornisce un comando in tensione o in corrente agli attuatori in modo da far assumere ai giunti una configurazione desiderata

Schema di una unità di controllo



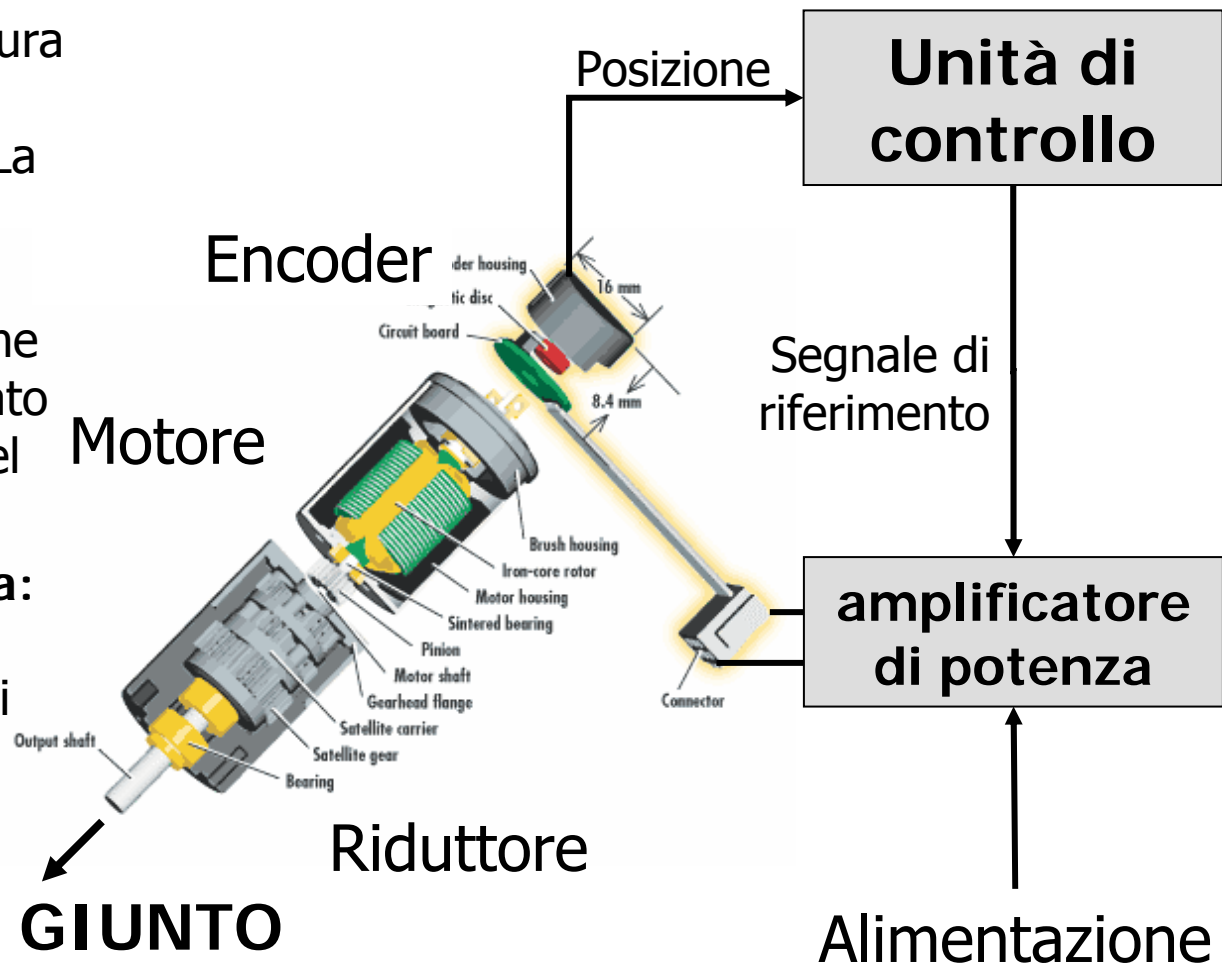
Schema di una unità di controllo

A tensioni in ingresso al motore di segno opposto corrispondono rotazioni opposte del motore



Schema di una unità di controllo

- **Encoder:** sensore che misura la rotazione dei giunti in valore relativo o assoluto. La misurazione avviene in "tacche di encoder"
- **Riduttore:** meccanismo che riduce i giri dell'asse montato sul giunto rispetto ai giri del motore (es. riduzione 1:N)
- **Amplificatore di potenza:** amplifica un segnale di riferimento in un segnale di potenza per muovere il motore
- **Unità di controllo:** unità che produce un segnale di riferimento per il motore





Schema di una unità di controllo

- **Encoder:** sensore che misura la rotazione dei giunti in valore relativo o assoluto. La misurazione avviene in "*tacche di encoder*"
- **Riduttore:** meccanismo che riduce i giri dell'asse montato sul giunto rispetto ai giri del motore (es. riduzione 1:N)
- **Amplificatore di potenza:** amplifica un segnale di riferimento in un segnale di potenza per muovere il motore
- **Unità di controllo:** unità che produce un segnale di riferimento per il motore



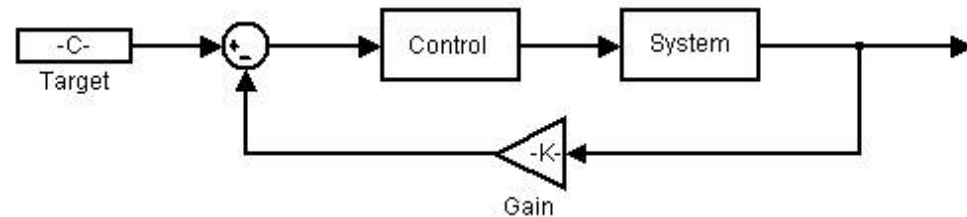
Relazione tra posizione del giunto e posizione encoder

- θ : posizione giunto in gradi
- q : posizione giunto data dall' encoder
- N : rapporto di riduzione del motore
- R : risoluzione dell'encoder

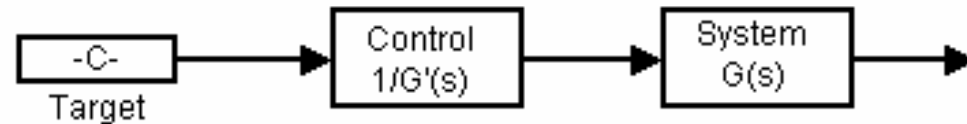
$$\theta = \frac{q}{R \times N} \times 360^\circ$$

Tipologie di controllo

Feedback

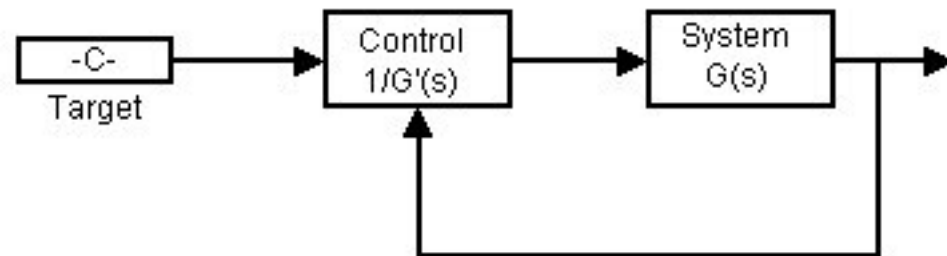


Feed-Forward



Feed-Back

Feed-Forward





Controllo PID

(Proporzionale, Integrativo e Derivativo):

- E' un sistema di controllo di tipo feed-back con tre azioni fondamentali: **P-proporzionale, I-integrativo e D-derivativo.**
- La funzione di trasferimento è la seguente:

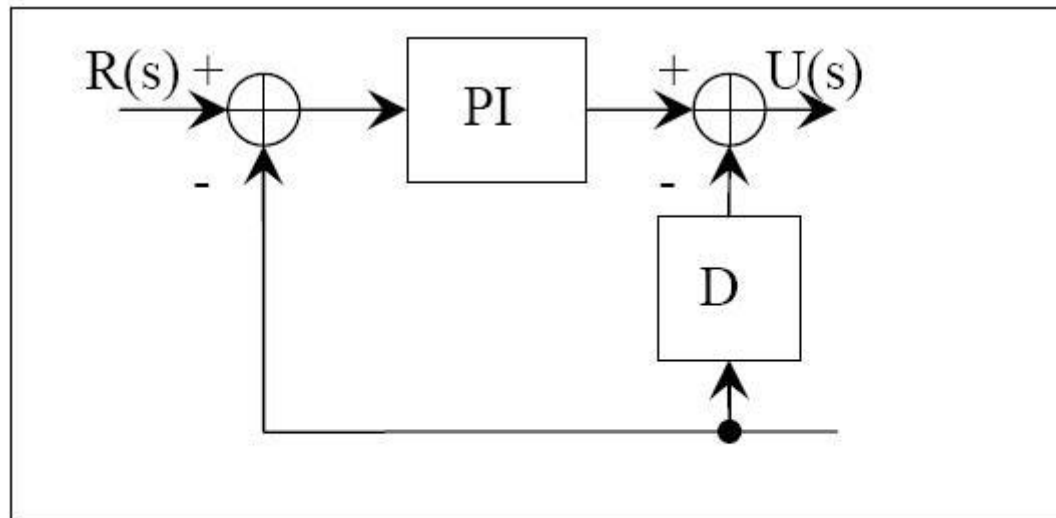
$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

- La realizzazione dell'azione derivativa può essere implementata nel seguente modo ($N > 10$)

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right)$$

Controllo PID

- Realizzazione azione Derivativa
KICKING: variazione improvvisa di $u(t)$



$$U(s) = K_p(1 + 1/sT_i)[R(s) - Y(s)] - K_p s T_d Y(s)$$

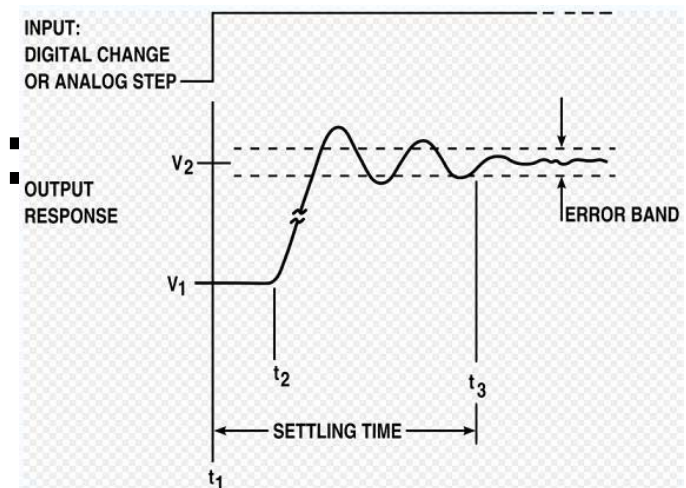


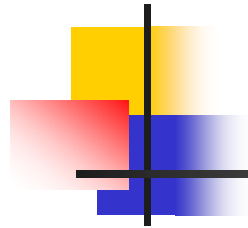
Performance Index

<u>IAE</u> Integral of Absolute Error	$IAE = \int_0^{\infty} e(t) dt$
<u>ITAE</u> Integral of Time xAbsolute Error	$ITAE = \int_0^{\infty} t e(t) dt$
<u>ISE</u> Integral of Squared Error	$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$
<u>ITSE</u> Integral of TimexSquared Error	$ITSE = \int_0^{\infty} t e(t)^2 dt$
<u>IT²SE</u> Integral of T ² xSquared Error	$IT^2SE = \int_0^{\infty} t^2 e(t)^2 dt$
<u>IT^{2N}SE</u> Integral of T ^{2N} xSquared Error	$IT^{2N}SE = \int_0^{\infty} t^{2N} e(t)^2 dt$

Performance Index

- Tempi caratteristici di risposta:
- 10%
- 50%
- 90%
- Sovraelongazione
- Tempo di assestamento:
 - Settling-time





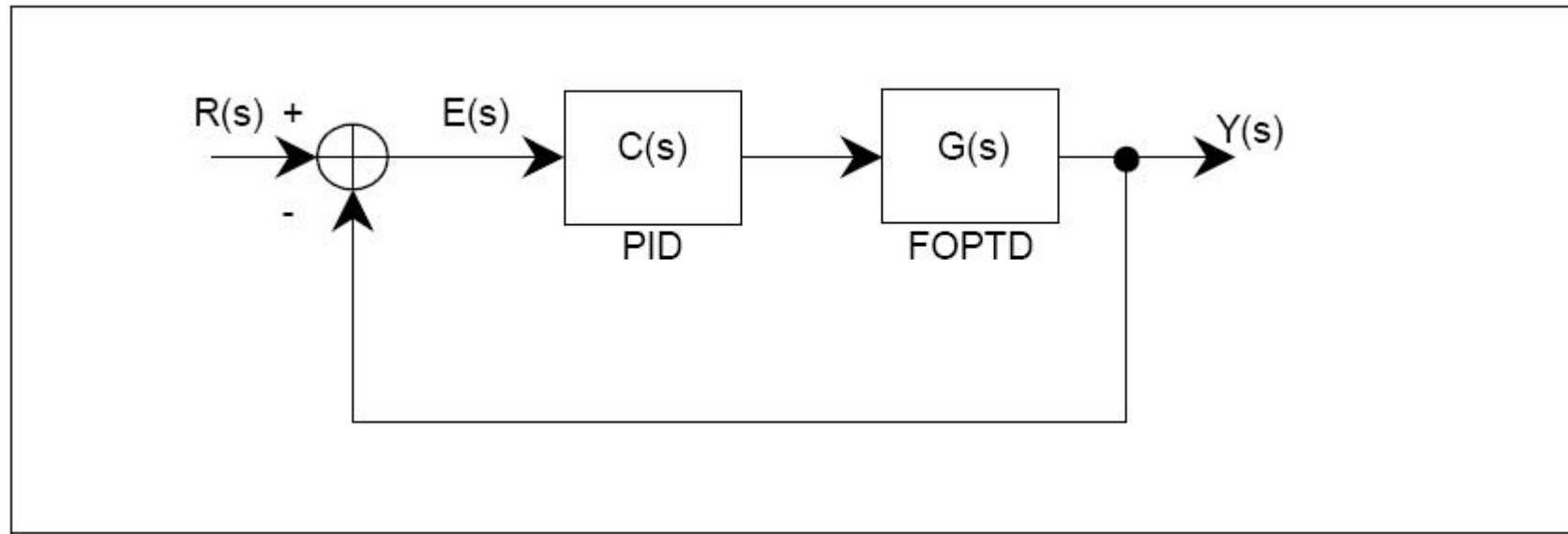
Impianto di controllo tipico

- Guadagno K
- Ritardo puro τ
- Costante di tempo T

$$G(s) = \frac{K e^{-s\tau}}{(1 + sT)}$$



PID - FOPTD





Ziegler – Nichols (1942)

- Criteri di ottimizzazione: Rapporto di smorzamento $r=1/4$ (rapporto tra la prima e la seconda sovraelongazione nell'oscillazione della variabile d'uscita)
- Parametri utilizzati: K, τ, T
- Limiti di validità:
 $0.1 \leq \tau/T \leq 1.0$

	K_p	T_i	T_d
P	$K_p = \frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{-1}$	-	-
PI	$K_p = \frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{-1}$	$T_i = 3.33\tau$	-
PID	$K_p = \frac{1.2}{K} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{-1}$	$T_i = 2\tau$	$T_d = 0.5\tau$



Controllo PID

(Proporzionale, Integrativo e derivativo):

$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q(t) dt$$

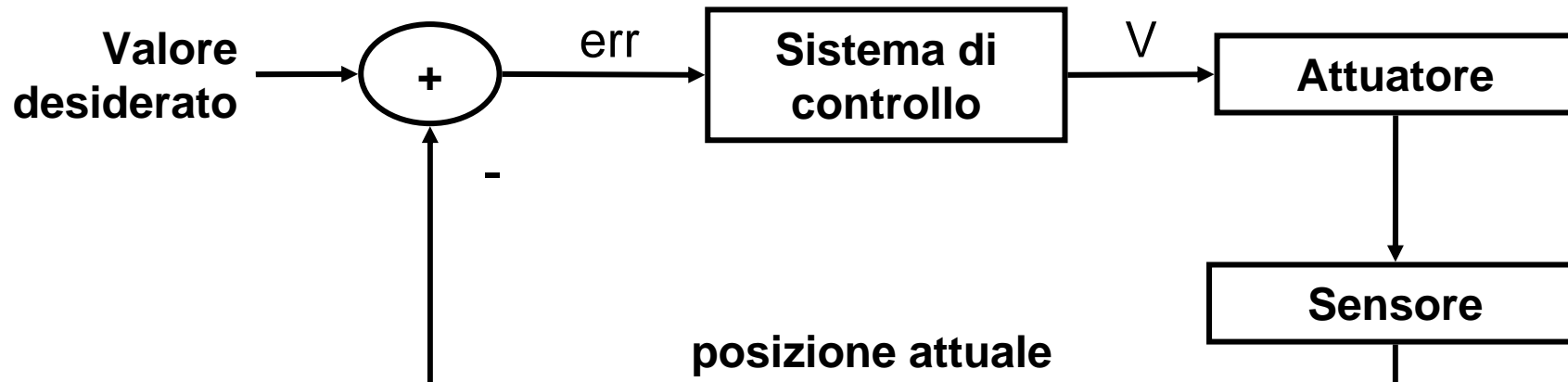
$$e_q = q_d - q$$

$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

- K_p è il guadagno o costante *proporzionale*
- K_i è il guadagno o costante *integrale*
- K_d è il guadagno o costante *derivativa*
- e rappresenta l'errore, ovvero la differenza tra posizione desiderata e la posizione attuale

Controllo ad anello chiuso (feedback control)

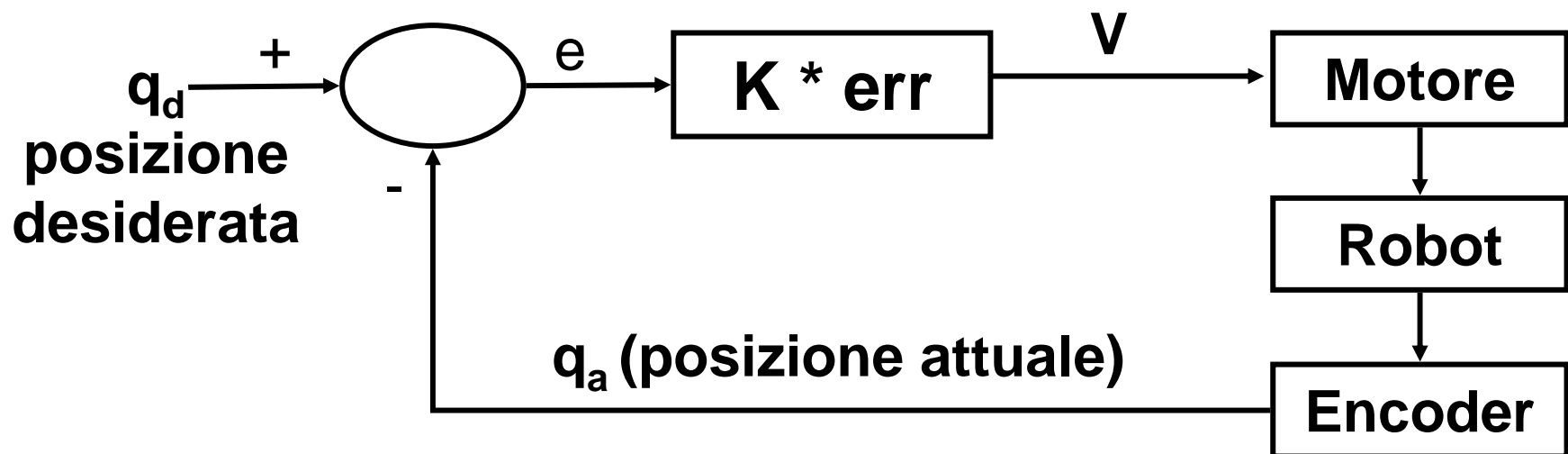
- La variabile da controllare è misurata e confrontata con il valore desiderato
- la differenza, o errore, è l'ingresso al sistema di controllo
- L'uscita del sistema di controllo è la variabile di comando dell'Attuatore dell'attuatore

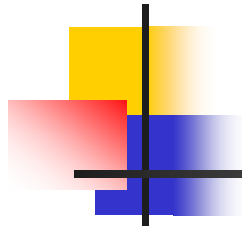


Controllo PID

Componente Proporzionale

- La tensione V imposta al motore è proporzionale alla differenza tra la posizione effettiva misurata dal sensore e la posizione desiderata





Controllo PID

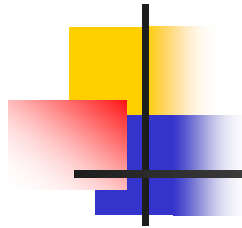
Componente Proporzionale:

La tensione imposta al motore nell'unità di tempo è proporzionale alla differenza tra la posizione effettiva misurata dal sensore e la posizione voluta

$$V = K_p e_q$$

$$e_q = q_d - q$$

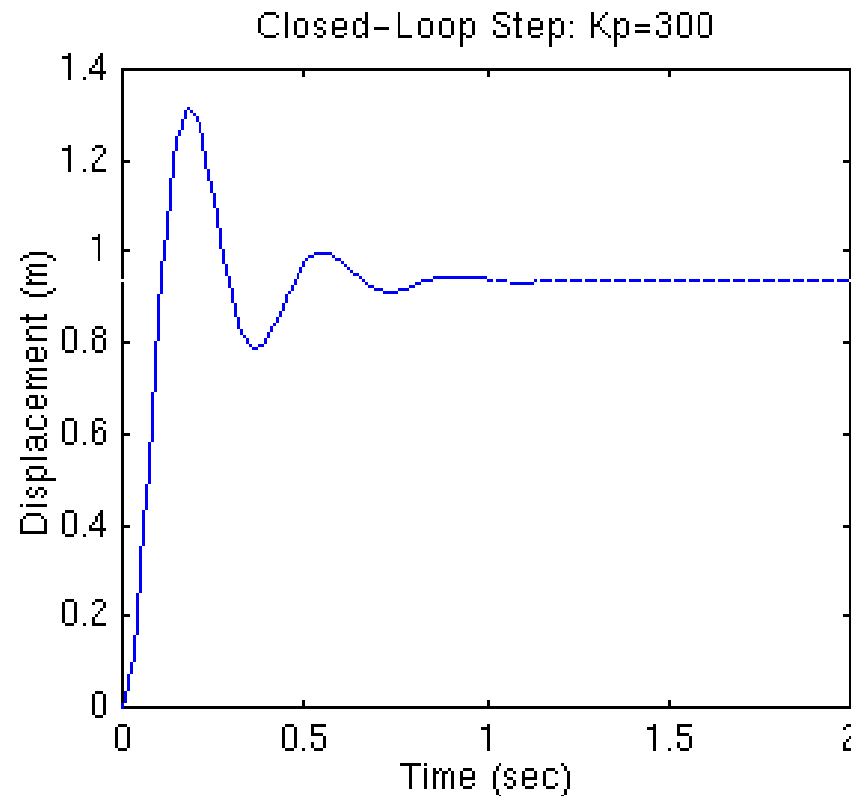
K_p costante proporzionale



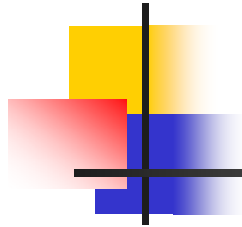
Controllo PID

Componente Proporzionale: comportamento del sistema

Posizione
desiderata: 1



- Il motore oscilla prima di convergere verso la posizione desiderata
- Il sistema si assesta senza annullare l'errore



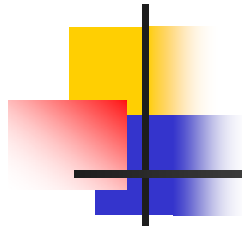
Controllo PID

Componente derivativa:

$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt} \quad \text{Derivata dell'errore nel tempo}$$

$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q \quad K_d \text{ costante derivativa}$$

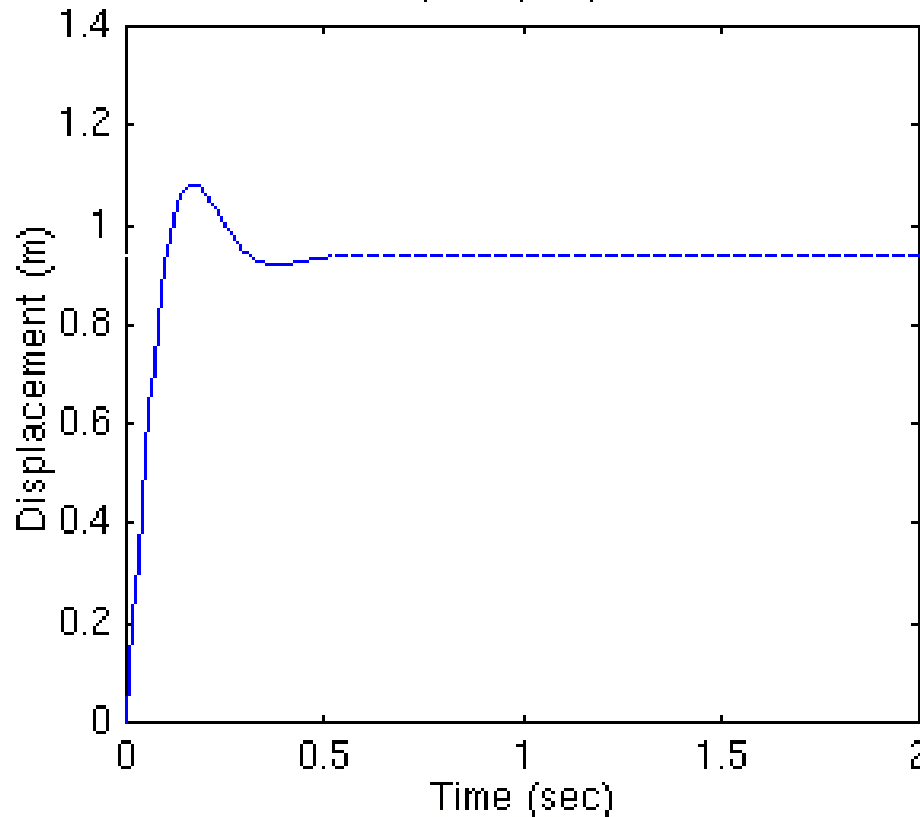
$$e_q = q_d - q$$



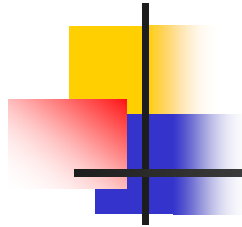
Controllo PID

Controllo Proporzionale e Derivativo:

Closed-Loop Step: $K_p=300$, $K_d=10$



- Riduzione delle oscillazioni
- Diminuzione del tempo di assestamento
- Il sistema si assesta senza annullare l'errore



Controllo PID

Componente integrativa:

$K_i \int e_q(t) dt$ Integrazione dell'errore nel tempo

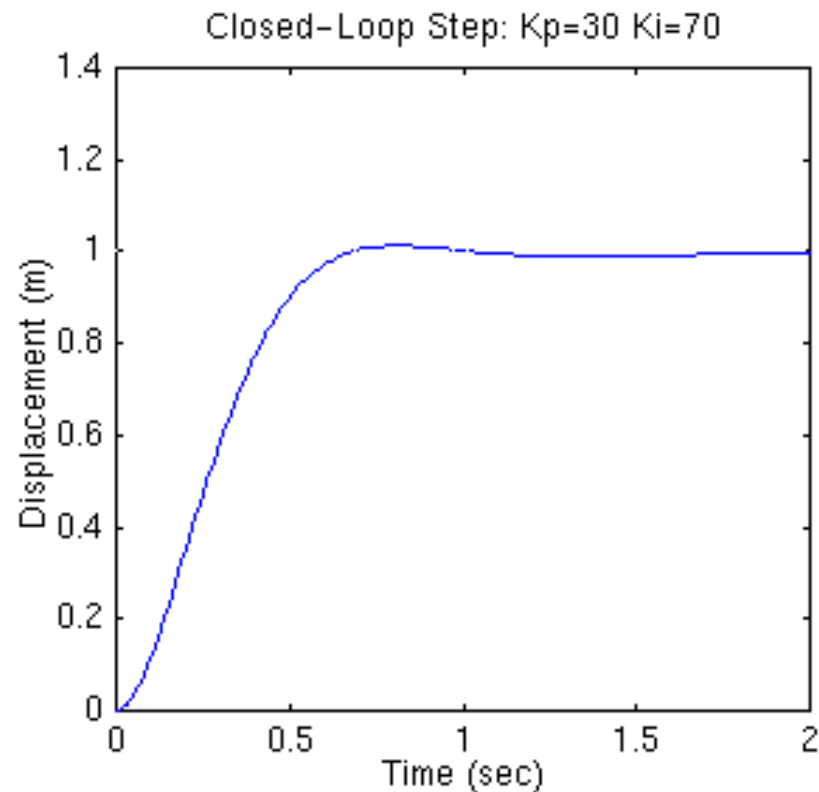
$$V = K_p e_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

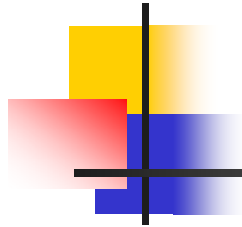
K_i costante integrativa

Controllo PID

Controllo Proporzionale e Integrativo:



- Il sistema si assesta annullando l'errore



Controllo PID

- **Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo**

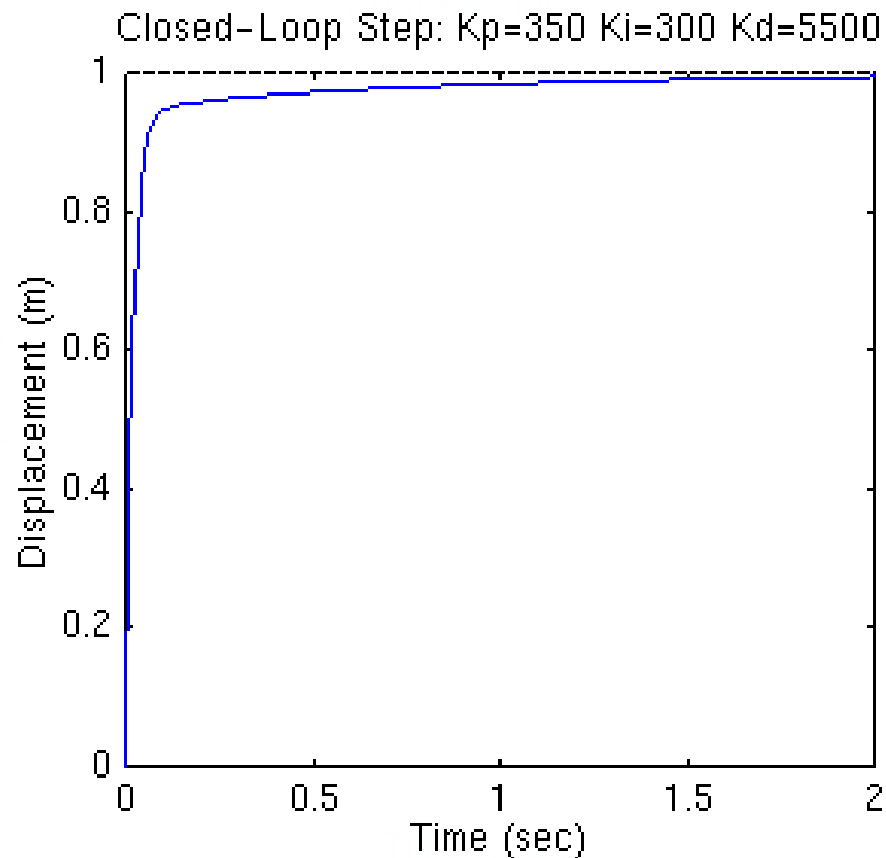
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

Controllo PID

Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo:



- Le costanti K_p , K_d , K_i vengono determinate in modo empirico o con metodi specifici



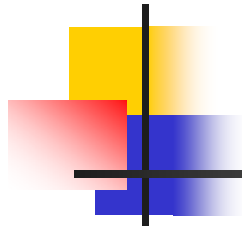
Controllo del moto di un manipolatore

- Obiettivo del controllo del moto di un manipolatore è muovere il braccio da una posizione iniziale ad una posizione finale espresse nelle coordinate dello spazio operativo
- In generale, il problema del controllo del moto di un manipolatore consiste nel determinare l'andamento delle forze o coppie che gli attuatori devono applicare ai giunti in modo da garantire l'esecuzione di una traiettoria pianificata



Controllo del moto di un manipolatore

- Nel controllo del moto di un manipolatore si individuano le seguenti problematiche:
 - **Cinematica**
 - **Cinematica differenziale e statica**
 - **Dinamica**
 - **Pianificazione di traiettorie**
 - **Controllo del moto**
 - **Controllo dell'interazione**

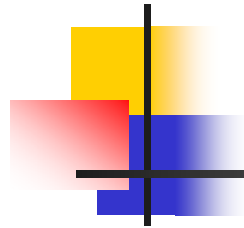


Pianificazione di traiettorie

OBIETTIVO: generare gli ingressi di riferimento per il sistema di controllo del moto per muovere il braccio da x_{start} --> x_f

PERCORSO: luogo dei punti dello spazio dei giunti o dello spazio operativo che il manipolatore deve descrivere nell'esecuzione del movimento assegnato

TRAIETTORIA: percorso su cui è specificata la legge oraria di moto (velocità ed accelerazione in ogni punto)



Pianificazione di traiettorie

OBIETTIVO: generare gli ingressi di riferimento per il sistema di controllo del moto:

$$X_{\text{start}} \dashrightarrow X_f$$

DATI IN INPUT:

definizione del percorso

vincoli del percorso

vincoli dovuti alla dinamica del manipolatore

DATI IN OUTPUT:

nello spazio dei giunti: traiettorie dei vari giunti

nello spazio operativo: traiettoria dell'organo terminale

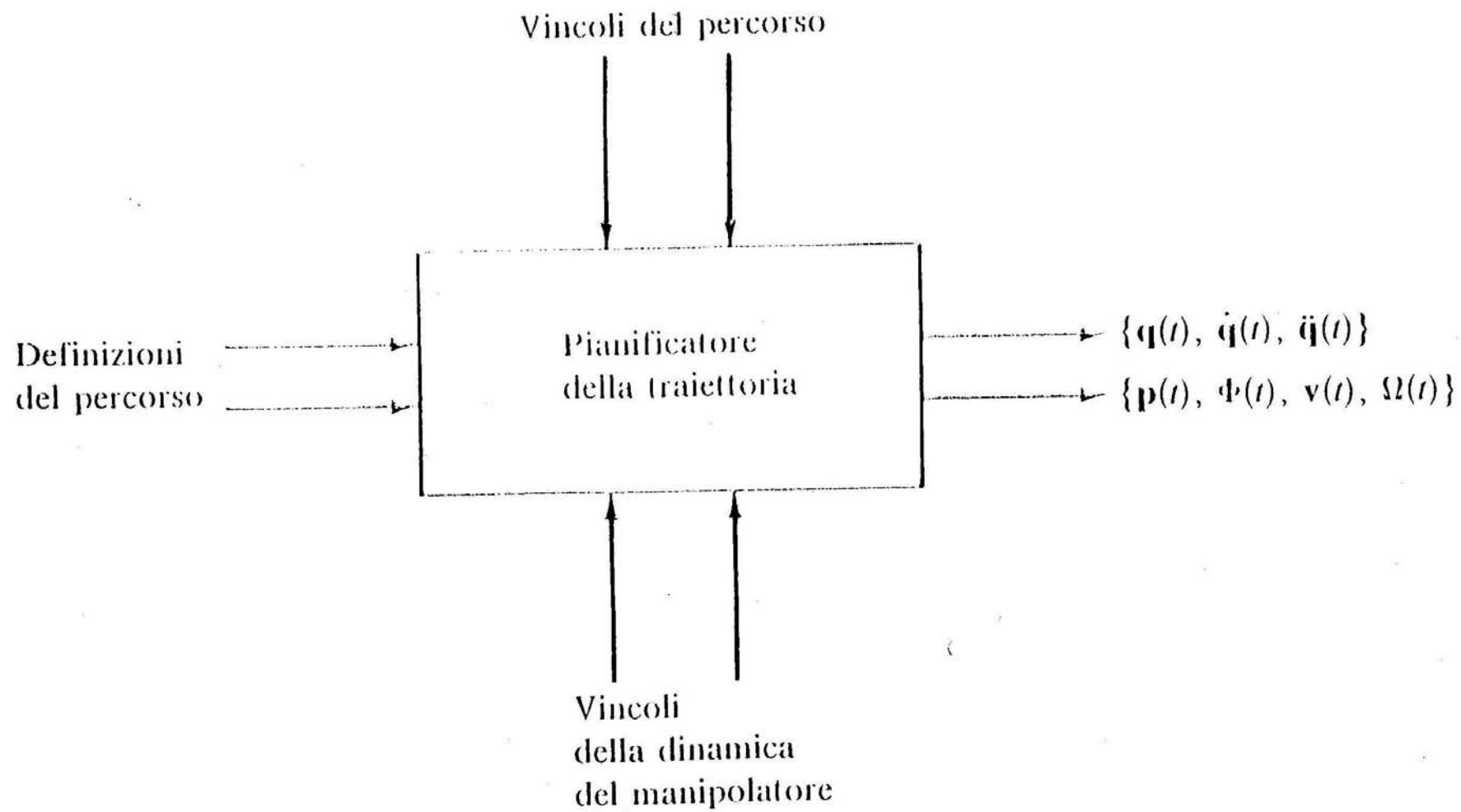
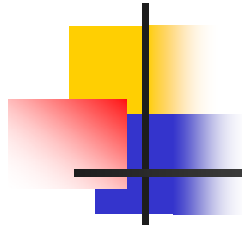


Figura 4.1 Diagramma a blocchi del pianificatore della traiettoria.



Pianificazione di traiettorie

L'algoritmo di pianificazione deve in generale soddisfare i seguenti requisiti:

- Le traiettorie generate devono rendere minima una opportuna funzione peso
- Le posizioni e le velocità dei giunti siano funzioni continue del tempo
- Siano minimizzati effetti indesiderati (e.g. traiettorie a curvatura non regolare)



Pianificazione di traiettorie

Modalità:

		VINCOLO DELL'OSTACOLO	
		Sì	No
VINCOLO DEL PERCORSO	Sì	Pianificazione fuori linea del percorso esente da collisioni e inseguimento in linea del percorso	Pianificazione fuori linea del percorso e inseguimento in linea del percorso
	No	Controllo della posizione e ricerca e aggiornamento in linea degli ostacoli	Controllo della posizione

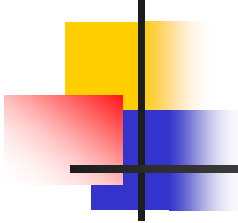
Due sottoproblemi:
pianificazione della traiettoria e controllo del movimento



Controllo del moto di un manipolatore

Il controllo del moto può essere realizzato nello

- **spazio dei giunti**
- **spazio operativo**



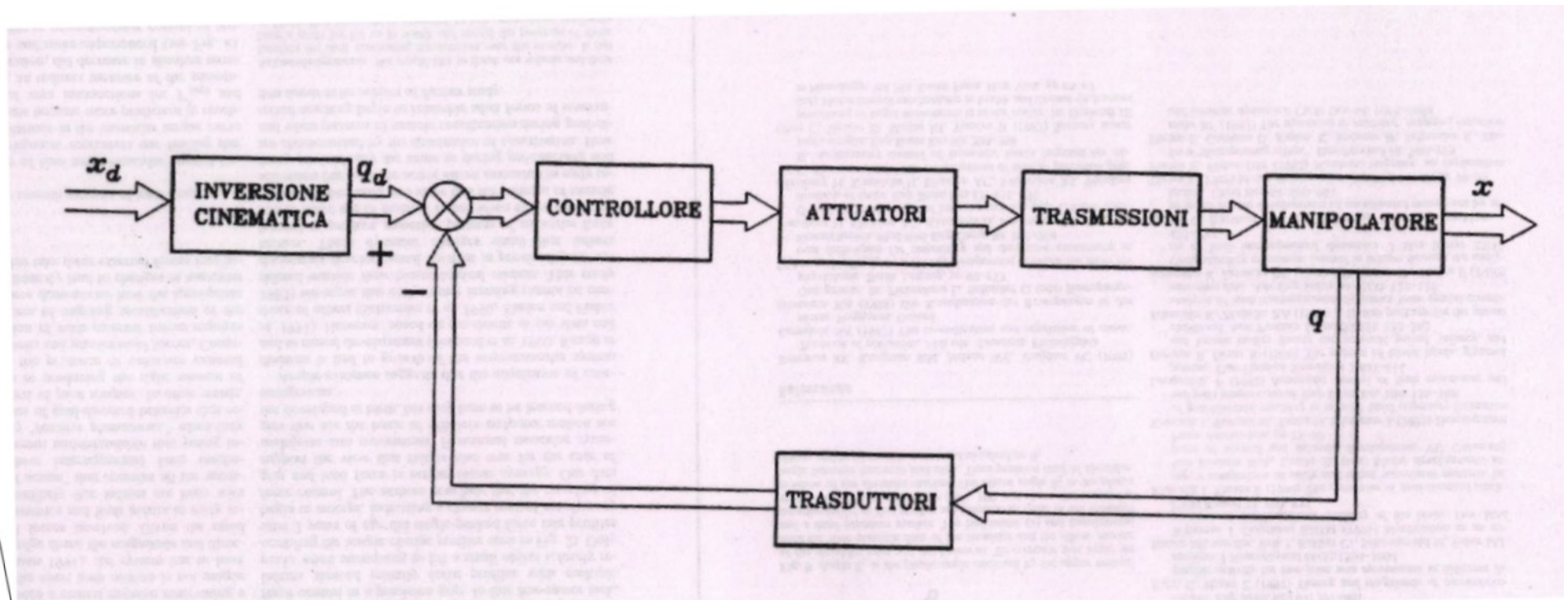
Controllo del moto nello spazio dei giunti

- Muovere il braccio da x_i a x_d espresse nello spazio dei giunti del robot senza interessarsi alla traiettoria percorsa dall'organo terminale del braccio
- Si determina la posizione finale del braccio nello spazio dei giunti q_f tramite la cinematica inversa

$$q_d = K^{-1} (x_d)$$

- Si muovono i giunti dalla posizione attuale q_i alla posizione desiderata q_d

Controllo del moto nello spazio dei giunti



L'inversione cinematica viene effettuata al di fuori del ciclo di controllo



Controllo del moto nello spazio dei giunti

- Nell'effettuazione del movimento l'organo terminale del manipolatore esegue nello spazio operativo un percorso non prevedibile, a causa degli effetti non lineari introdotti dalla cinematica diretta



Traiettorie nello spazio dei giunti

- Moto punto-punto: il manipolatore deve muoversi da una configurazione iniziale delle variabili di giunto ad una finale in un intervallo di tempo fissato t_f .
- Per imporre la legge di moto su un giunto si possono scegliere funzioni polinomiali.
- Polinomio cubico: consente di imporre i valori iniziale q_i e finale q_f delle variabili di giunto e le velocità iniziale e finale (generalmente nulle).
- Polinomio di quinto grado: consente di imporre i valori iniziale q_i e finale q_f delle variabili di giunto, le velocità iniziale e finale e il valore dell'accelerazione iniziale e finale.



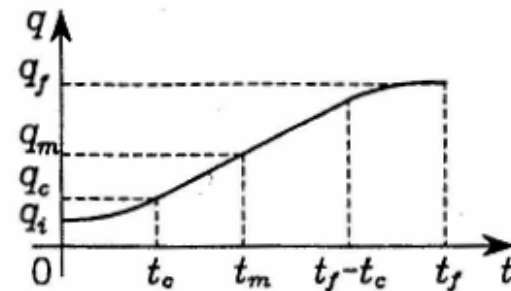
Controllo del moto di un giunto

Profilo di velocità trapezoidale

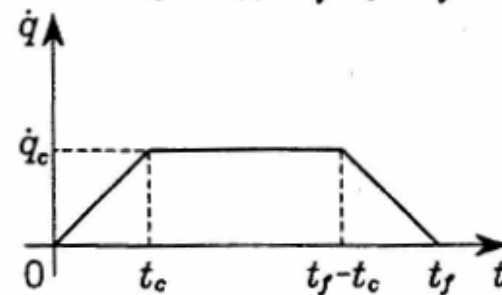
- Presenta una accelerazione costante nella fase di partenza, una velocità di crociera e una decelerazione costante nella fase di arrivo.
- La traiettoria corrispondente è di tipo polinomiale misto: un tratto lineare raccordato con due tratti parabolici nell'intorno delle posizioni iniziale e finale.

Profilo di velocità trapezoidale

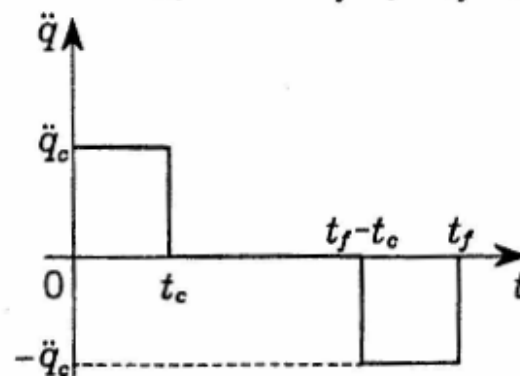
Posizione



Velocità



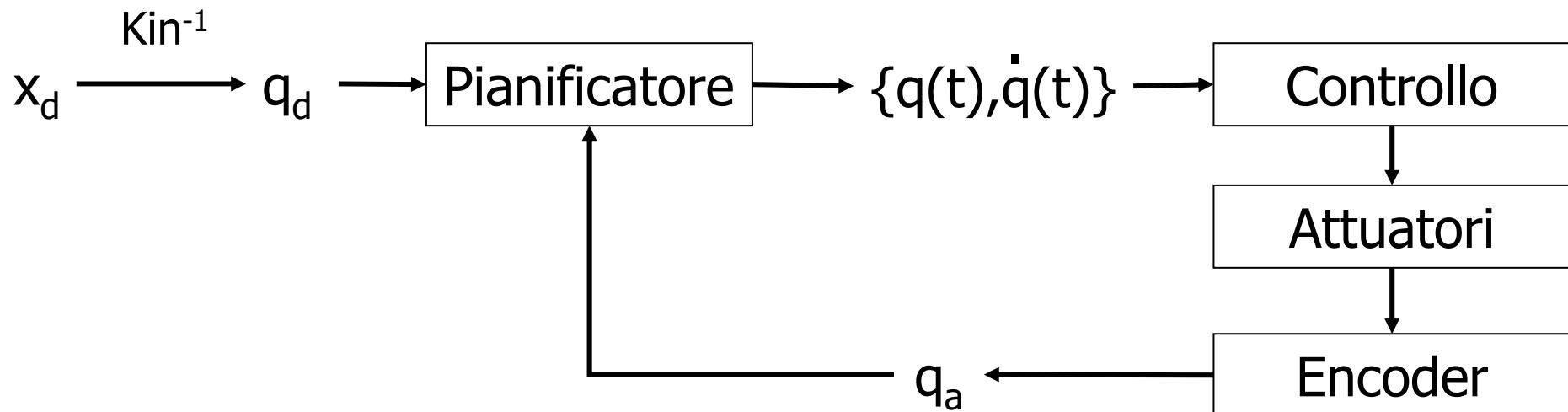
Accelerazione



NB: velocità ed accelerazioni all'istante finale ed iniziale possono essere diverse da zero

Controllo del moto nello spazio dei giunti

- Il pianificatore delle traiettorie stabilisce per ogni giunto la traiettoria di movimento in accordo alla legge utilizzata
- Il movimento viene eseguito tramite il controllo PID





Controllo del moto nello spazio operativo

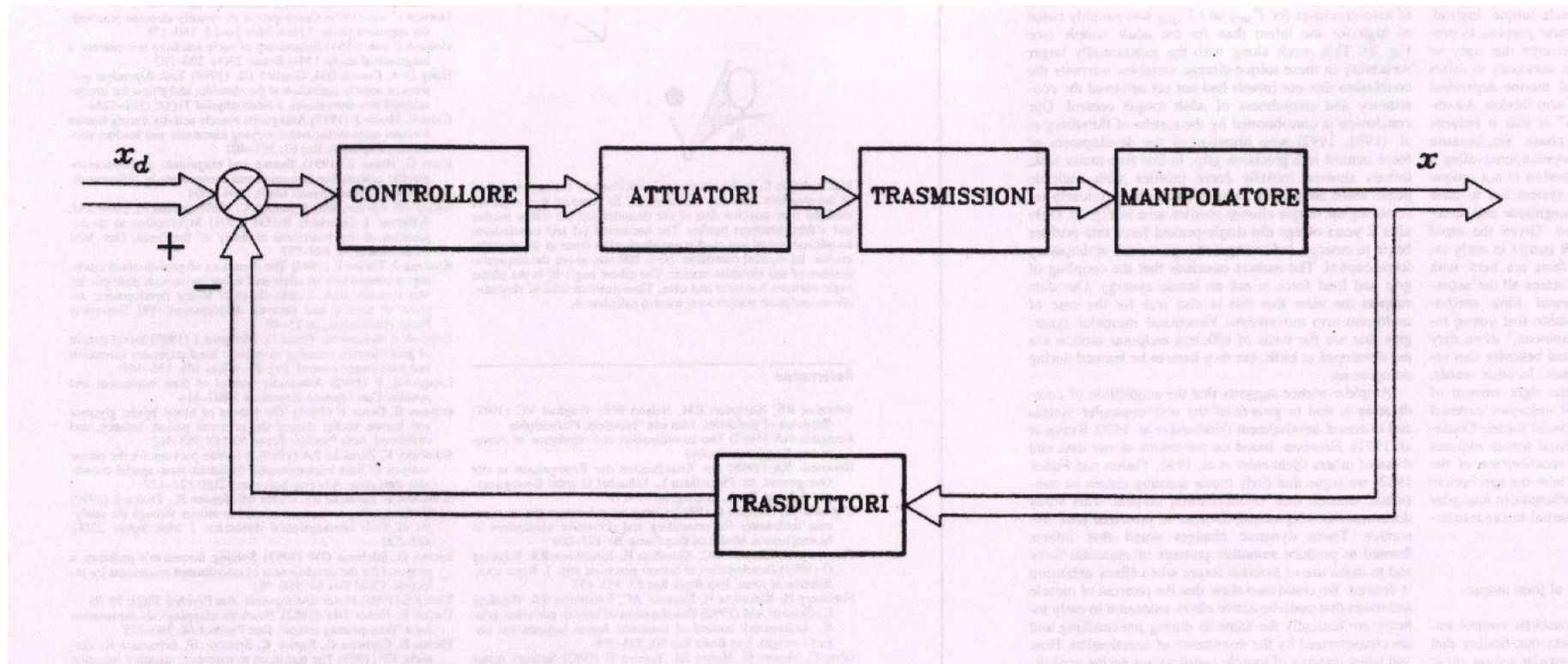
- Nell'effettuazione del movimento da x_i a x_d l'organo terminale del manipolatore esegue nello spazio operativo un' traiettoria in accordo ad una legge prestabilita
- Es. traiettoria lineare o curvilinea



Traiettorie nello spazio operativo

- L'algoritmo di pianificazione di traiettoria nello spazio operativo genera la legge di moto dell'organo terminale, secondo un percorso di caratteristiche geometriche definite nello spazio operativo.
- Il risultato di una pianificazione è una sequenza di n-uple: $(t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t))$

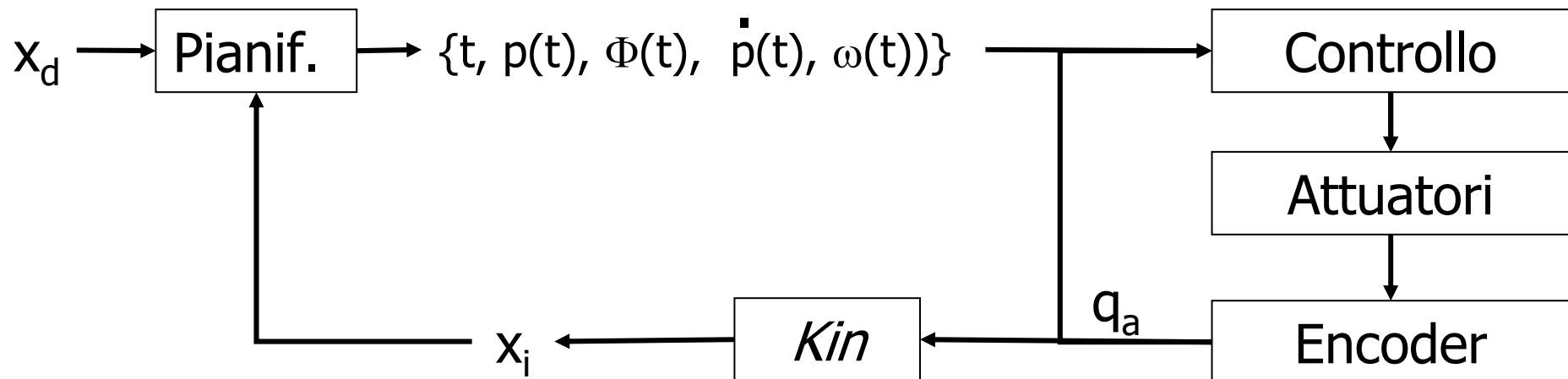
Controllo del moto nello spazio operativo



L'inversione cinematica viene effettuata all'interno del ciclo di controllo

Controllo del moto nello spazio operativo

- Il pianificatore delle traiettorie stabilisce per ogni giunto la traiettoria di movimento in accordo alla legge utilizzata
- Il movimento viene eseguito dal controllore





Controllo del moto nello spazio operativo

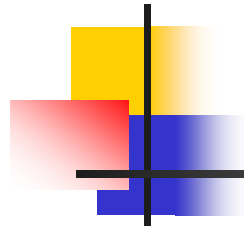
Il problema del controllo nello spazio operativo richiede in ogni istante la risoluzione di due problemi:

- 1) Inversione cinematica per convertire le specifiche di moto espresse nello spazio operativo in specifiche di moto nello spazio dei giunti
- 2) Sistema di controllo nello spazio dei giunti in grado di garantire l'inseguimento dei riferimenti ottenuti al punto 1)



Controllo del moto nello spazio operativo

- far eseguire al manipolatore la traiettoria pianificata ($t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t)$)
- determinare velocità e accelerazioni dei giunti nel tempo per raggiungere la posizione finale desiderata espressa nelle coordinate cartesiane (calcolo dello Jacobiano)
- determinare tensioni e correnti da applicare ai motori per far assumere ai giunti velocità e accelerazioni calcolate dallo Jacobiano



Cinematica differenziale

Determinazione della relazione tra le velocità dei giunti e le corrispondenti velocità angolari e lineari dell'organo terminale.

Tali legami sono descritti da una matrice di trasformazione (Jacobiano) dipendente dalla configurazione del manipolatore.



Cinematica differenziale

Jacobiano = matrice di trasformazione
dipendente dalla configurazione corrente del
braccio

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

$J(q)$ = Jacobiano

\dot{p} = velocità dell'effettore finale

ω = velocità di rotazione dell'effettore finale

\dot{q} = velocità ai giunti



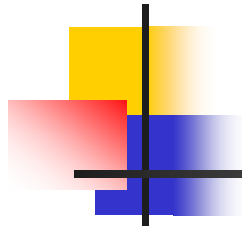
Cinematica differenziale

Determinare le velocità ai giunti data la velocità nello spazio operativo

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} \quad J^{-1} \text{ è l'inversa dello Jacobiano}$$

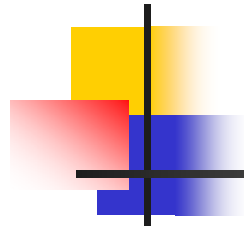
Metodi di integrazione numerica consentono di ricavare il vettore q dal vettore delle velocità ai giunti



Cinematica differenziale

Importanza del calcolo dello Jacobiano del braccio:

- individuazione delle singolarità
- analisi della ridondanza
- algoritmi per l'inversione cinematica
- individuazione del legame tra forze applicate all'organo terminale e coppie sviluppate ai giunti (statica)
- derivazione equazioni di moto e sintesi degli schemi di controllo



Singularità cinematiche

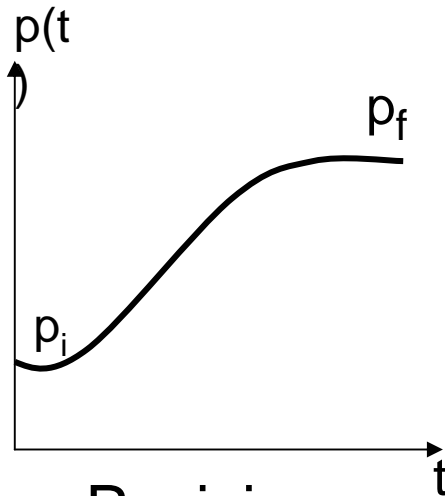
Le configurazioni che causano una diminuzione di rango della matrice Jacobiana J sono dette ***singularità cinematiche***.

In corrispondenza delle singularità:

- a) si ha una perdita di mobilità della struttura
- b) possono esistere infinite soluzioni al problema cinematico inverso
- c) **velocità ridotte nello spazio operativo possono causare velocità molto elevate nello spazio dei giunti**

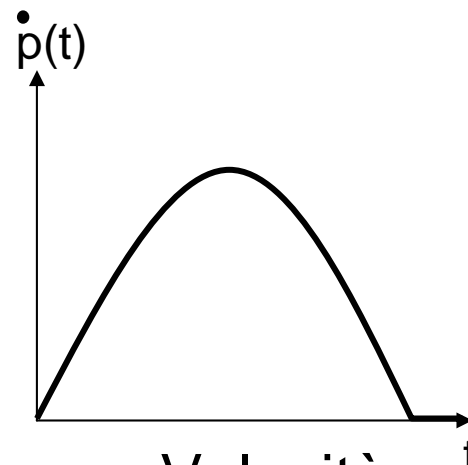
Controllo del moto nello spazio operativo

Pianificatore delle traiettorie



Posizione
nello spazio
operativo nel
tempo

$(t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t))$

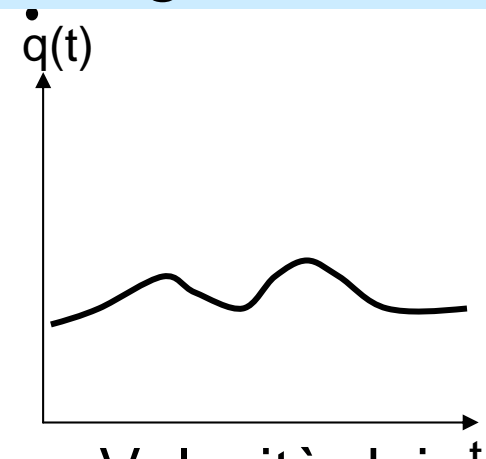


Velocità
dell'effettore
finale nel
tempo

$J^{-1}(q(t))$

→

Velocità ai giunti



Velocità dei
giunti nel
tempo

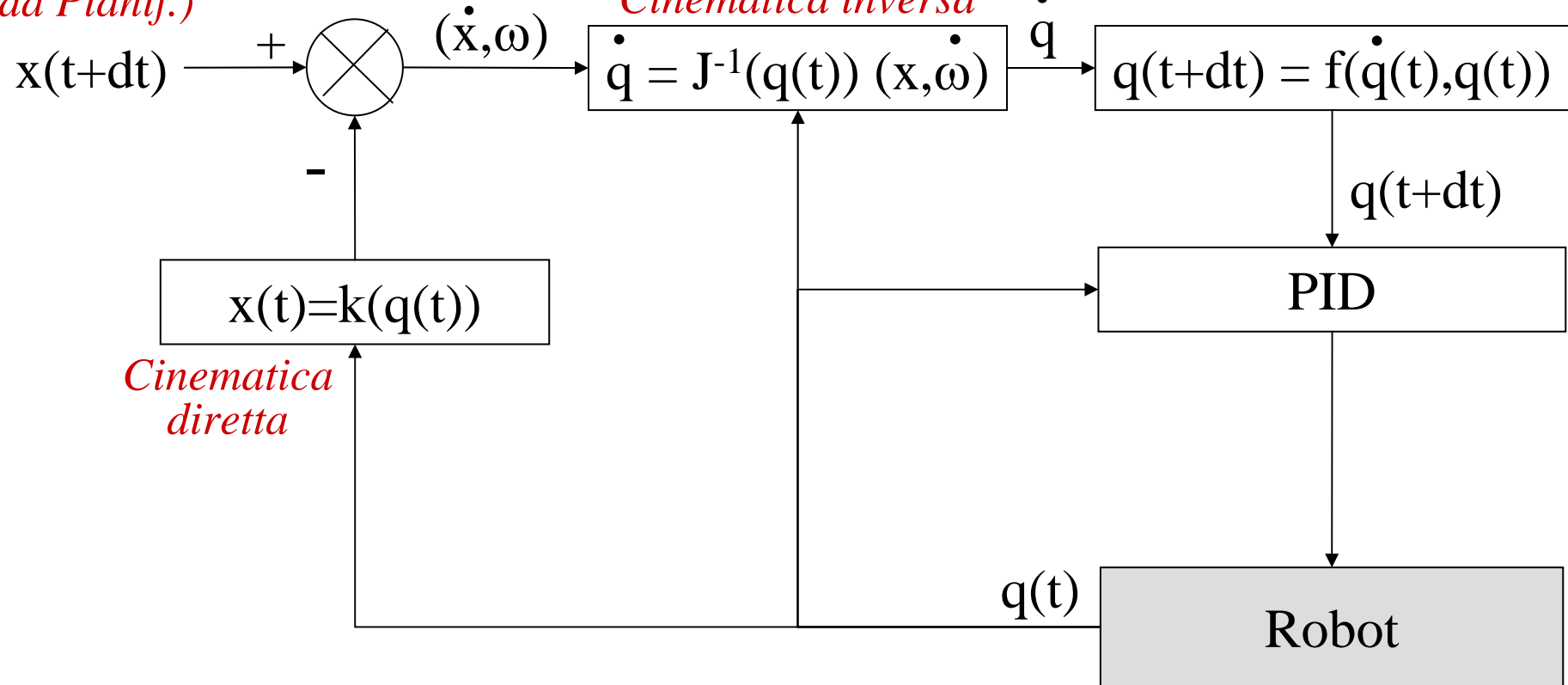
$J^{-1}(q(t))$

→

$(t, \dot{q}(t))$

Controllo del moto nello spazio operativo

*Posizione
desiderata
(da Pianif.)*



*Cinematica
diretta*



Performance di un manipolatore industriale

- **Payload:** massimo carico sollevabile
- **Velocità:** velocità massima di movimento nello spazio operativo
- **Accuratezza:** scostamento tra la posizione calcolata sulla base dei parametri di targa dal sistema di controllo e la posizione reale
- **Ripetibilità:** misura della capacità del manipolatore di tornare in una posizione precedentemente assunta (funzione del sistema e degli algoritmi di controllo, oltre che delle caratteristiche meccaniche del robot).



KUKA KR 15/2

- Dof: 6
- Payload: 15 kg
- Max. reach: 1570 mm
- Repeatability: $<\pm 0.1$ mm
- Weight: 222 kg



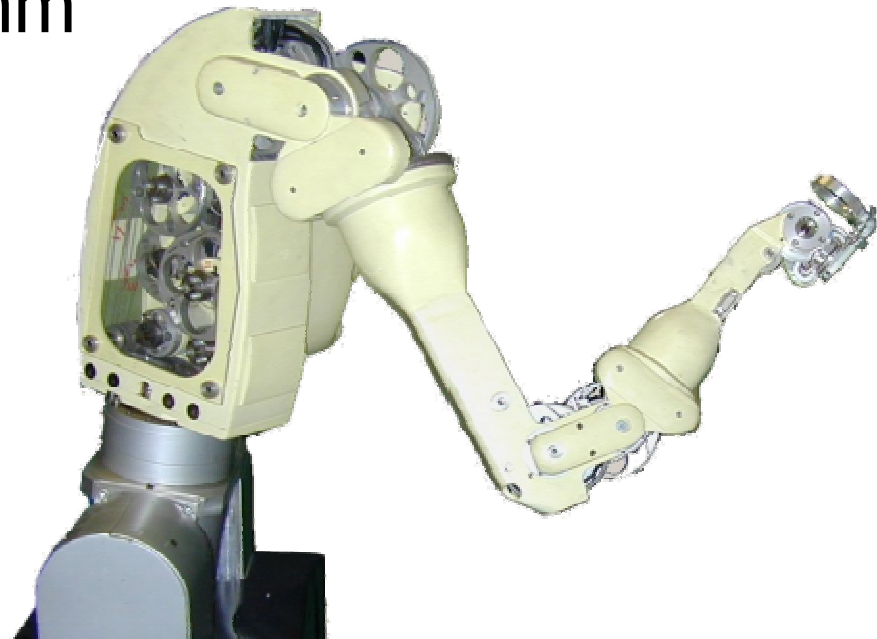
Il manipolatore PUMA 560

- Dof: 6
- Payload: 2 kg
- Velocità dell'effettore: 1.0 m/s
- Ripetibilità: $<\pm 0.1$ mm
- Peso: 120 lb



Dexter Arm

- Cable actuated
- d.o.f.: 8
- Workspace: 1200 mm x 350°
- Repeatability: + 1mm
- Velocity: 0.2 m/s
- Payload: 2 Kg
- Weight: 40 Kg



Manus

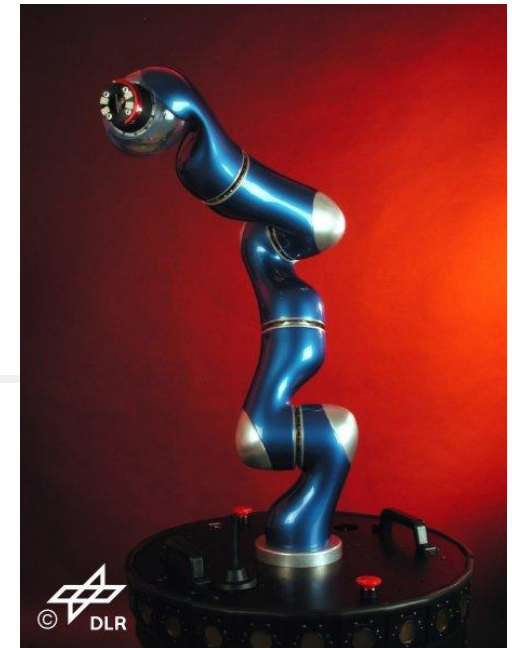
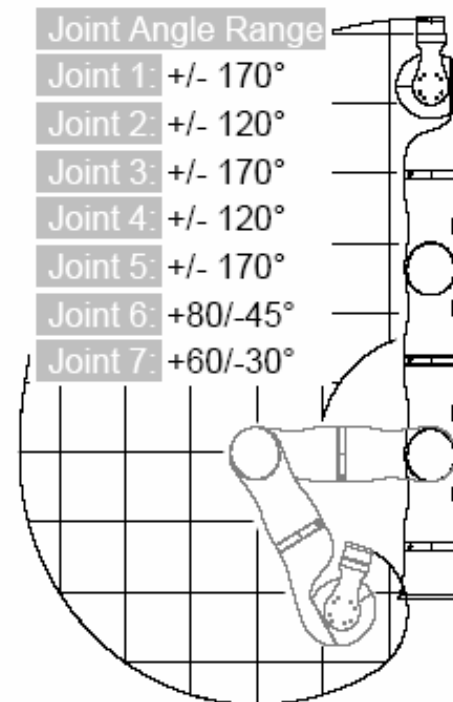
- Cable actuated
- d.o.f.: 6
- Velocity: 0.2 m/s
- Payload: 2 Kg
- Power: 24V DC
- Weight: 12 Kg

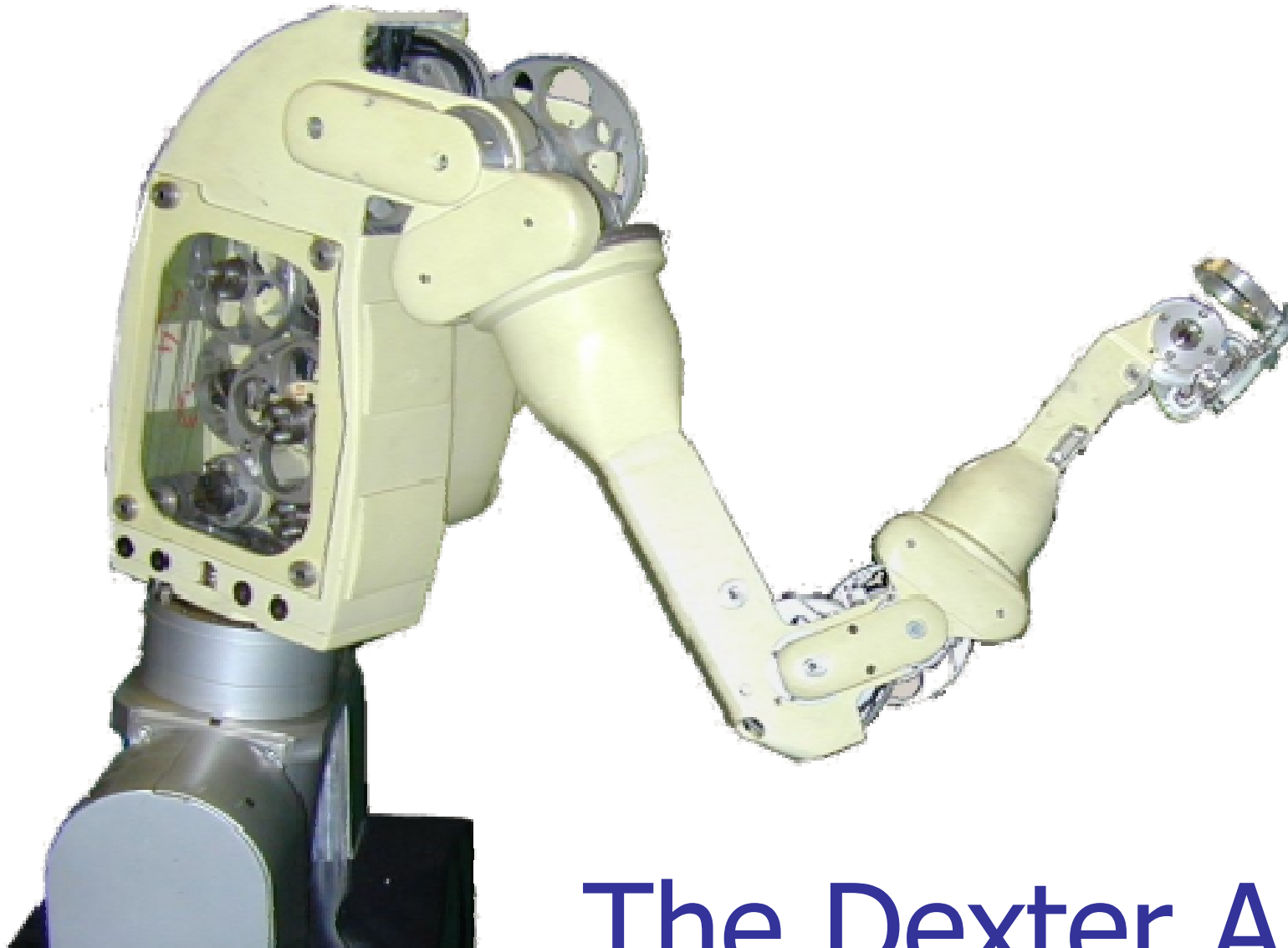




DLR Arm

Total Weight	14 kg
Max. Payload	14 kg
Max. Joint Speed	120°/s
Nr. of Axes	7 (R - P - R - P - R - P - P)
Maximum Reach	936 mm
Motors	DLR-Robodrive
Gears	Harmonic Drive
Sensors (each Joint)	2 Position, 1 Torque Sensor
Sensor (wrist)	6-DOF Force/Torque Sensor
Brakes	Electromagnetic Safety Brake
Power Supply	48 V DC
Control	Position-, Torque-, Impedance Control Control Cycles: Current 40 kHz; Joint 3 kHz; Cartesian 1 kHz
Electronics	Integrated Electronics, internal Cabling, Communications by optical SERCOS-Bus

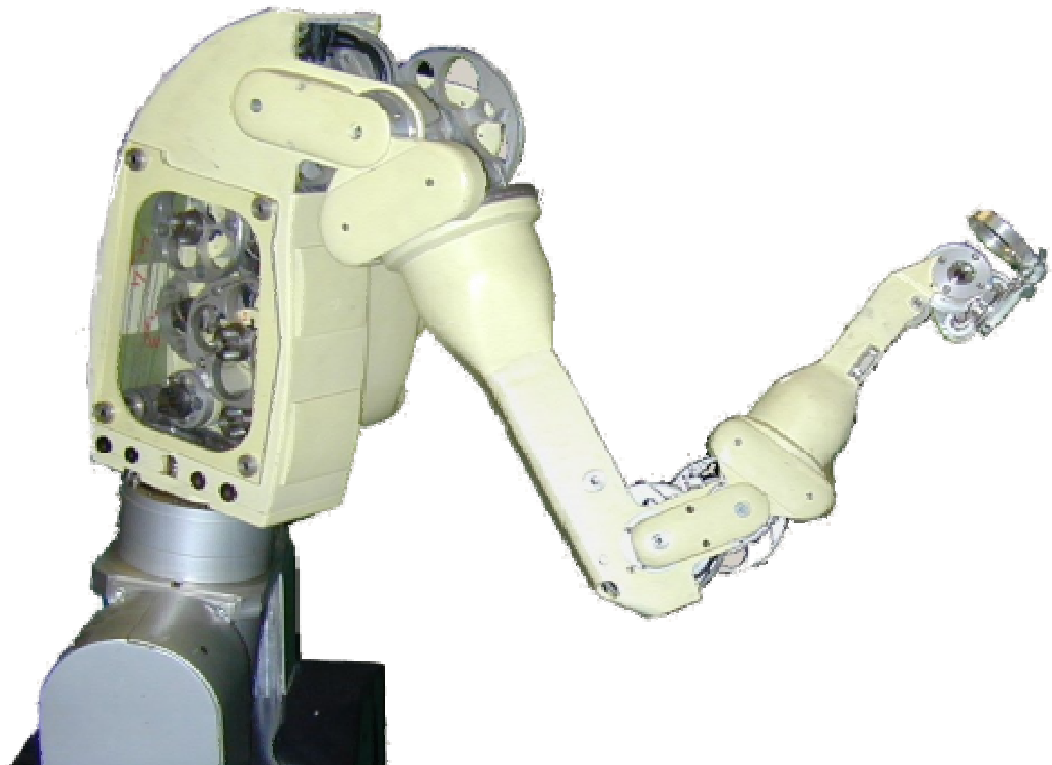




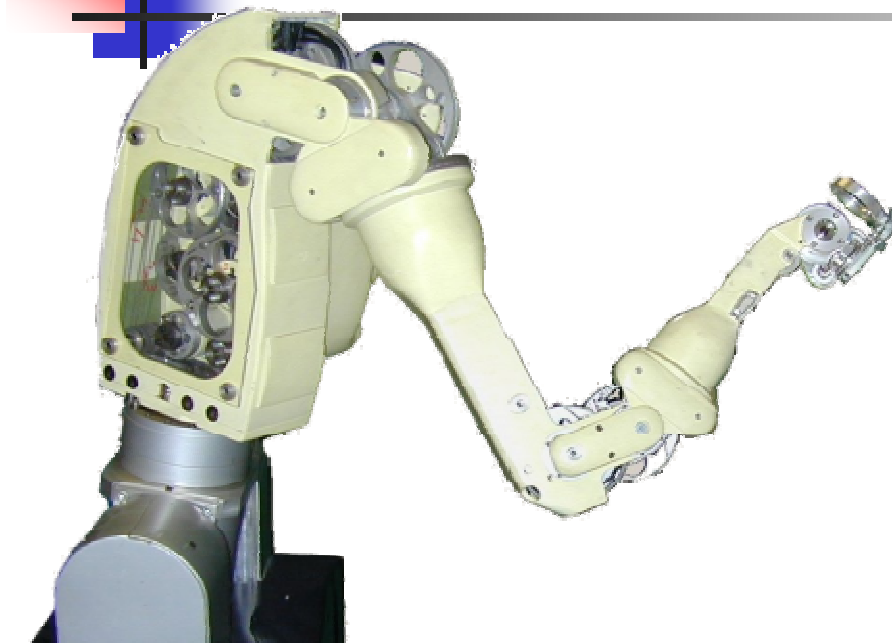
The Dexter Arm

The Dexter Arm

- Workspace: 1200 mm x 350°
- Repeatability: $\pm 1\text{mm}$
- Velocity: 0.2 m/s
- Payload: 2 Kg
- D.o.f.: 8
- Power: 24V DC
- Weight: 40 Kg



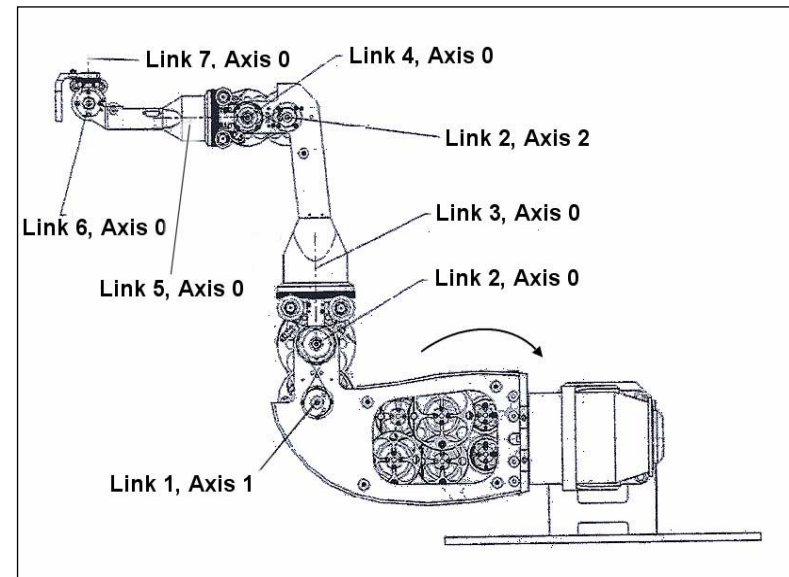
The Dexter Arm



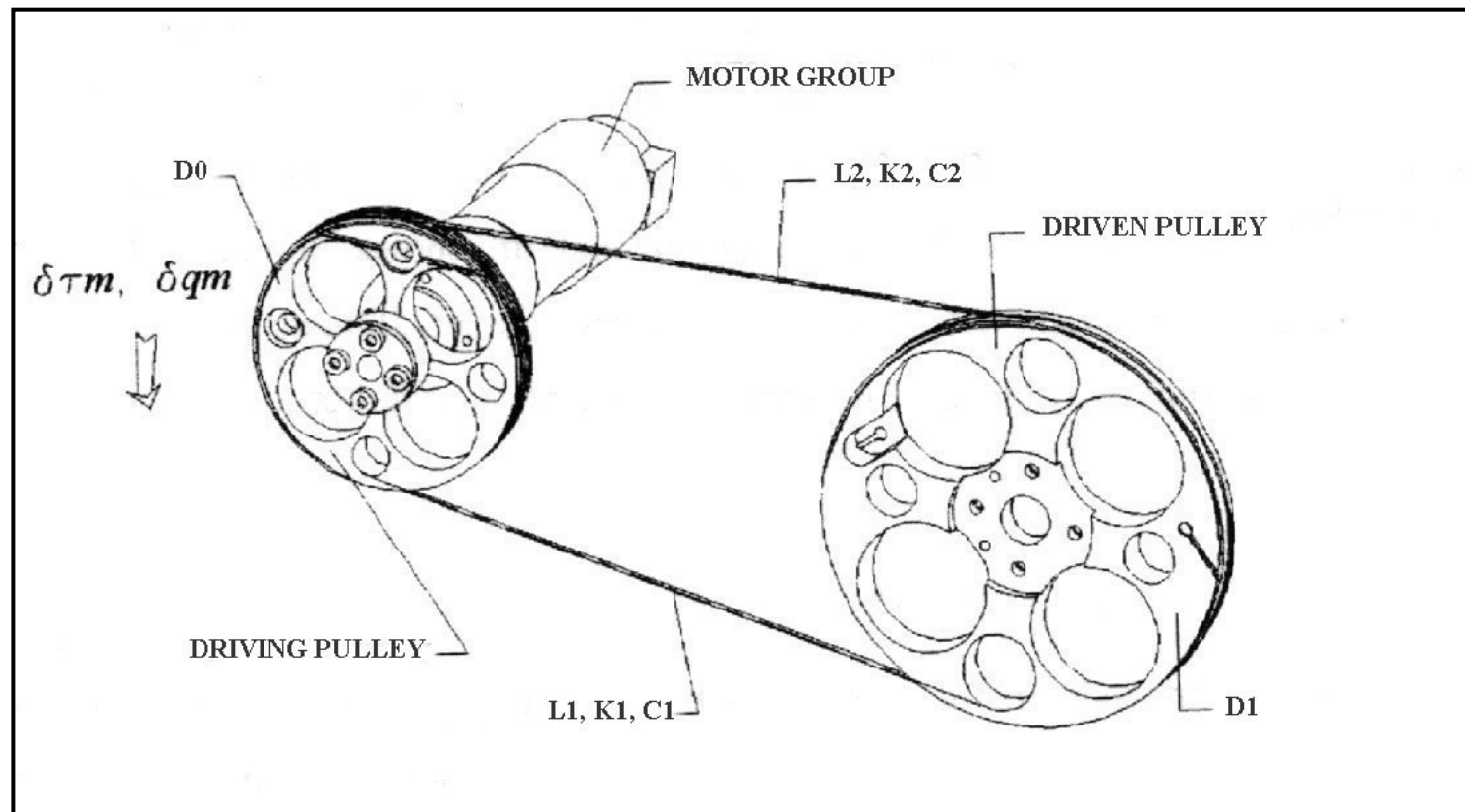
- 8-d.o.f. anthropomorphic redundant robot arm, composed of trunk, shoulder, elbow and wrist
 - designed for service applications and personal assistance in residential sites, such as houses or hospitals
-
- mechanically coupled structure: the mechanical transmission system is realized with pulleys and steel cables
 - main characteristics: reduced accuracy, lighter mechanical structure, safe and intrinsically compliant structure

The Dexter arm

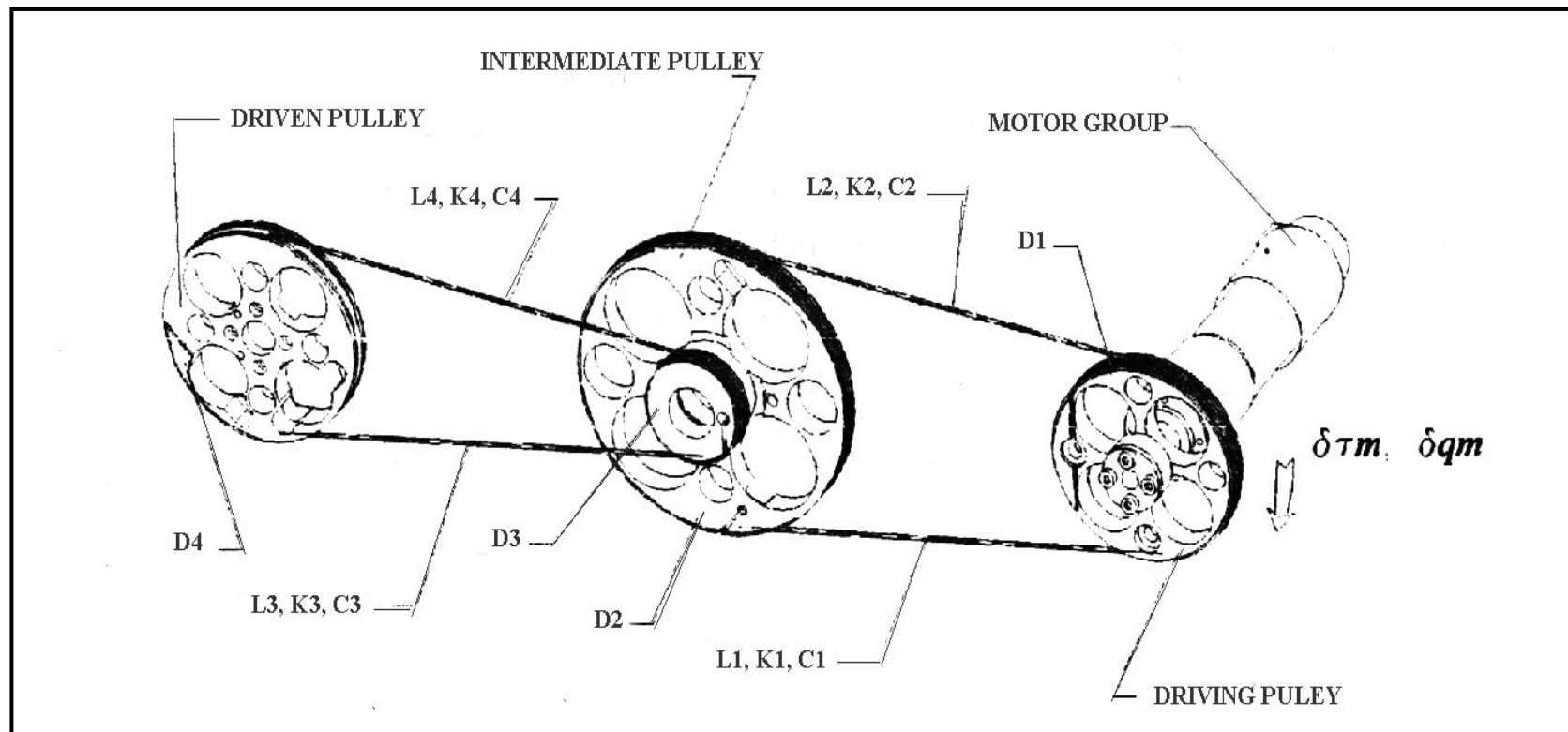
- Transmission system realized with pulleys and steel cables
- Joints J0 and J1 are actuated by motors and driving gear-boxes directly connected to the articulation axis
- Joints J2,...,J7 are actuated by DC-motors installed on link 1



Transmission #6



Trasmissions #2-5 and 7



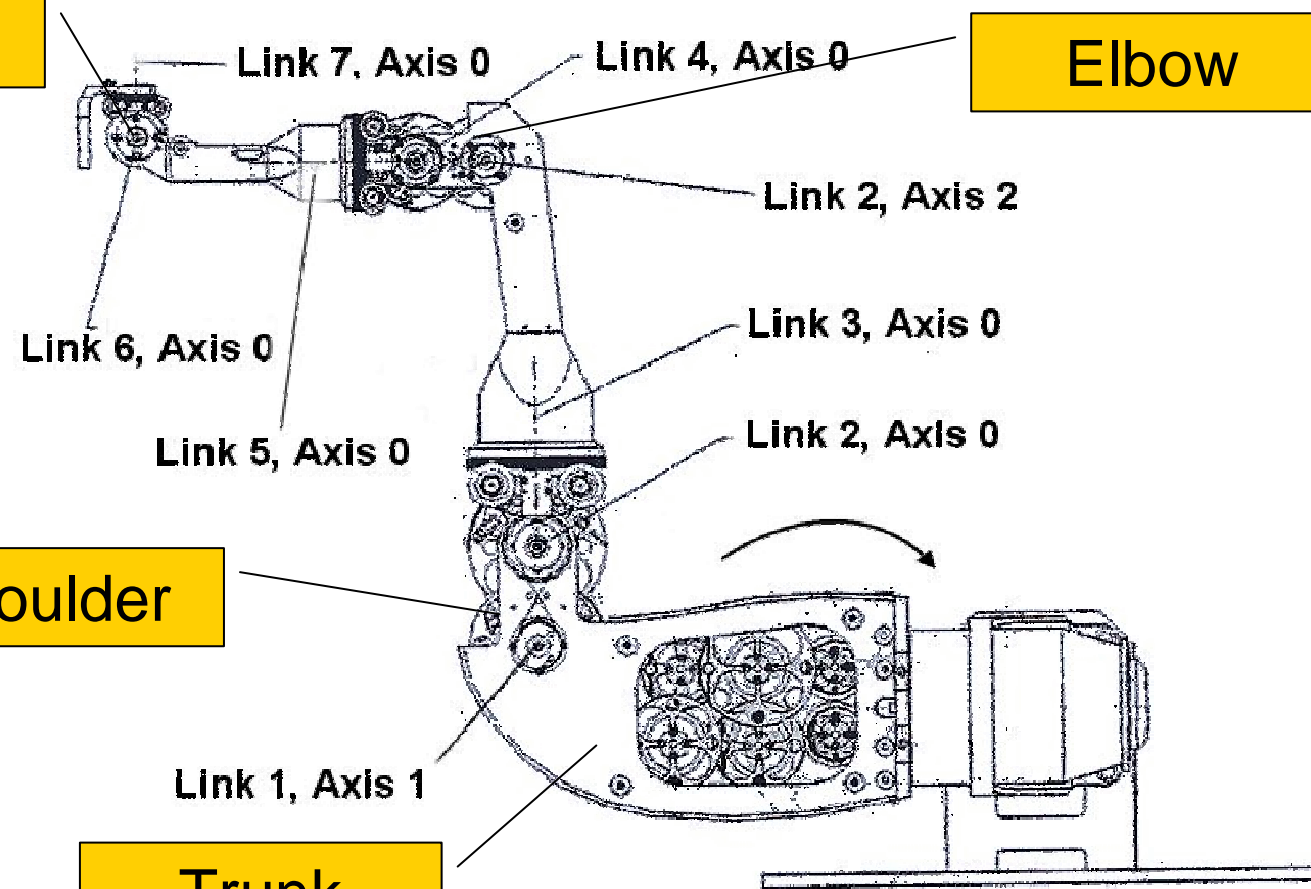
Anthropomorphic structure

Wrist

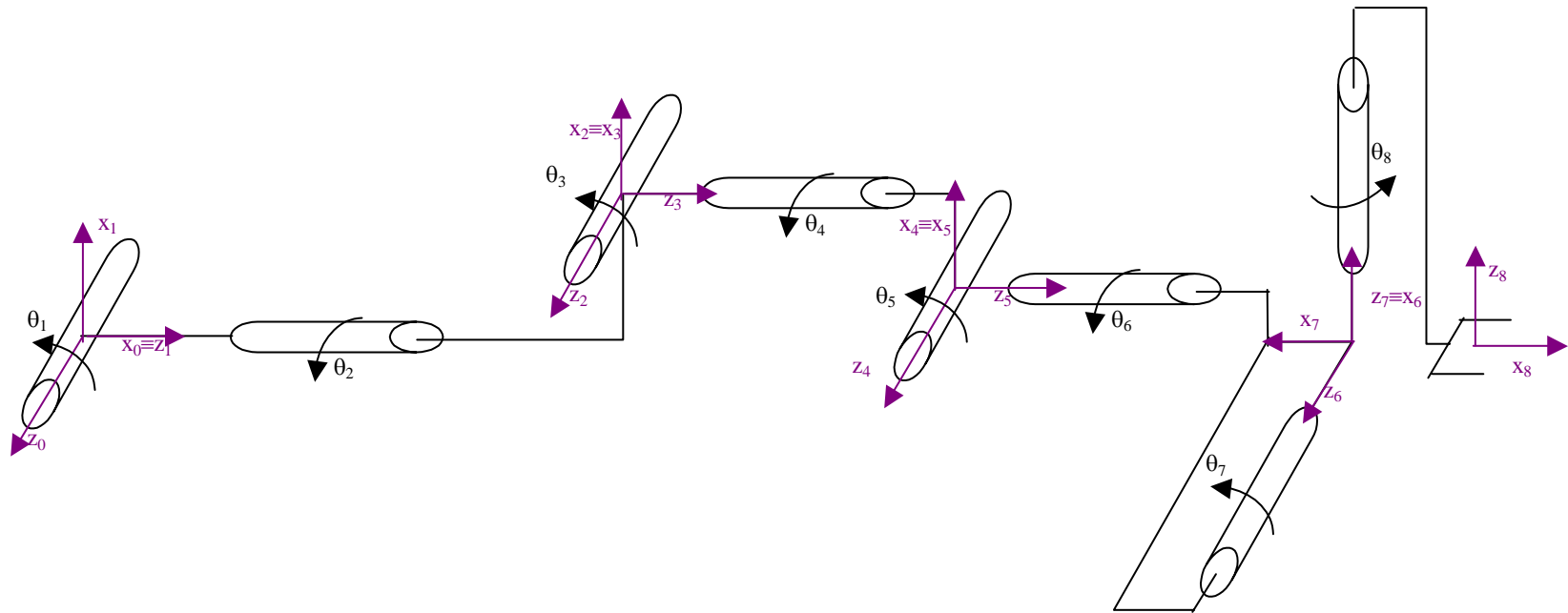
Elbow

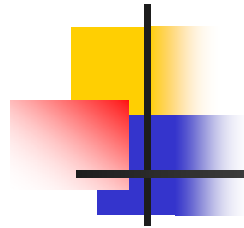
Shoulder

Trunk



Geometric Configuration

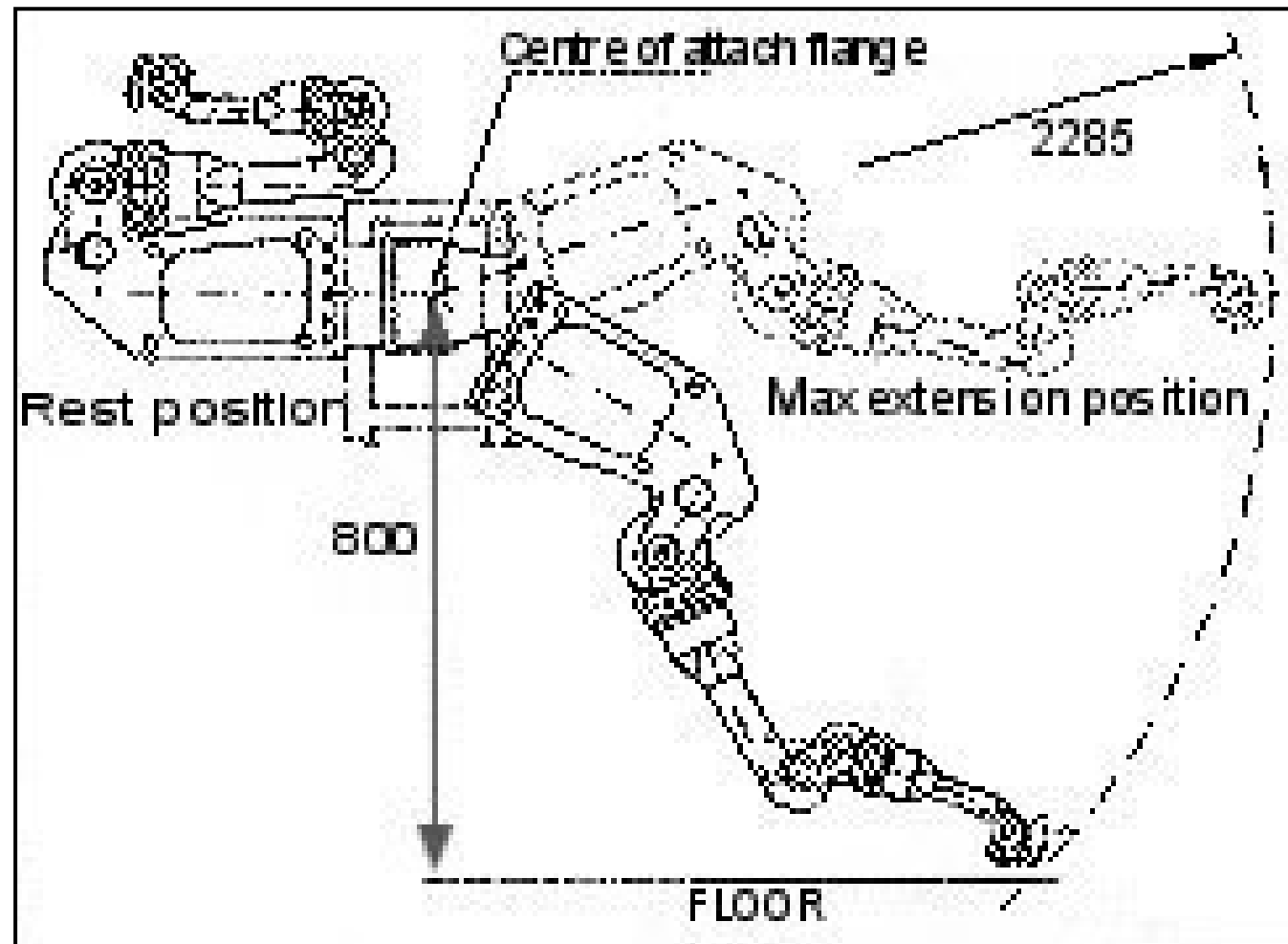




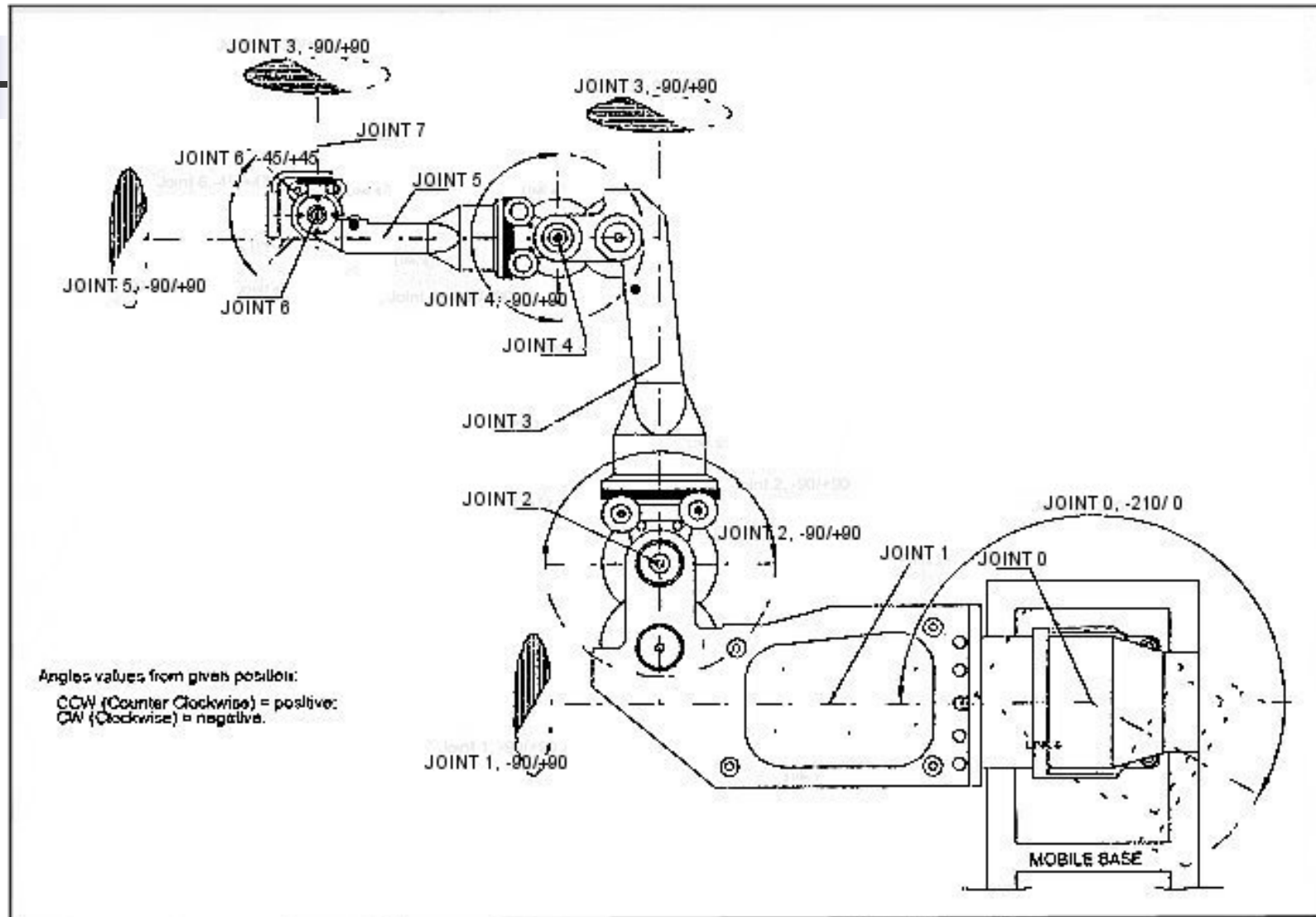
Denavit-Hartenberg Parameters

<i>Joint</i>	a_i [mm]	d_i [mm]	α_i [rad]	θ_i [rad]
1	0	0	$\pi/2$	θ_1
2	144	450	$-\pi/2$	θ_2
3	0	0	$\pi/2$	θ_3
4	-100	350	$-\pi/2$	θ_4
5	0	0	$\pi/2$	θ_5
6	-24	250	$-\pi/2$	θ_6
7	0	0	$\pi/2$	θ_7
8	100	0	0	θ_8

The Dexter Workspace

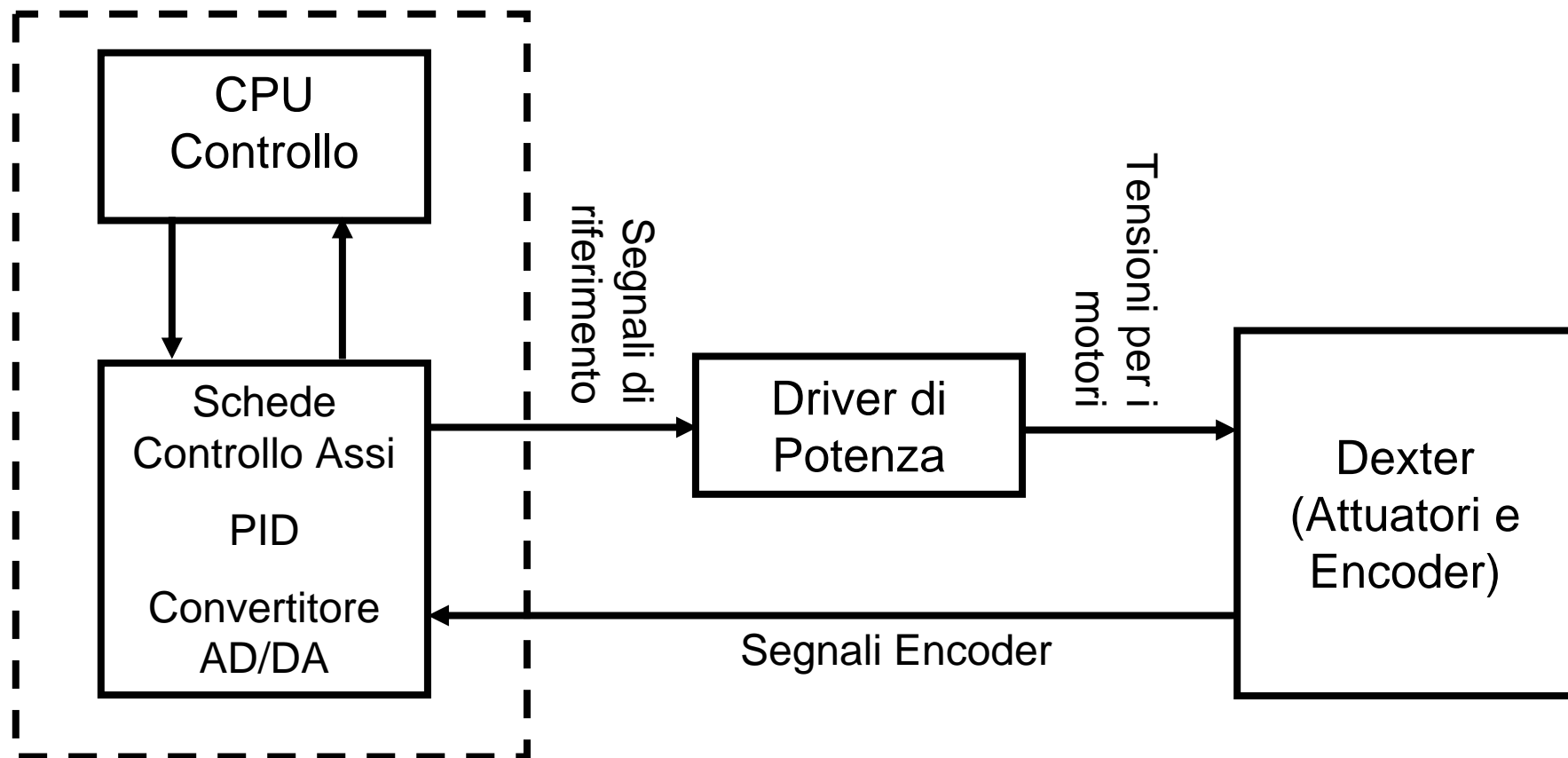


Joint Ranges



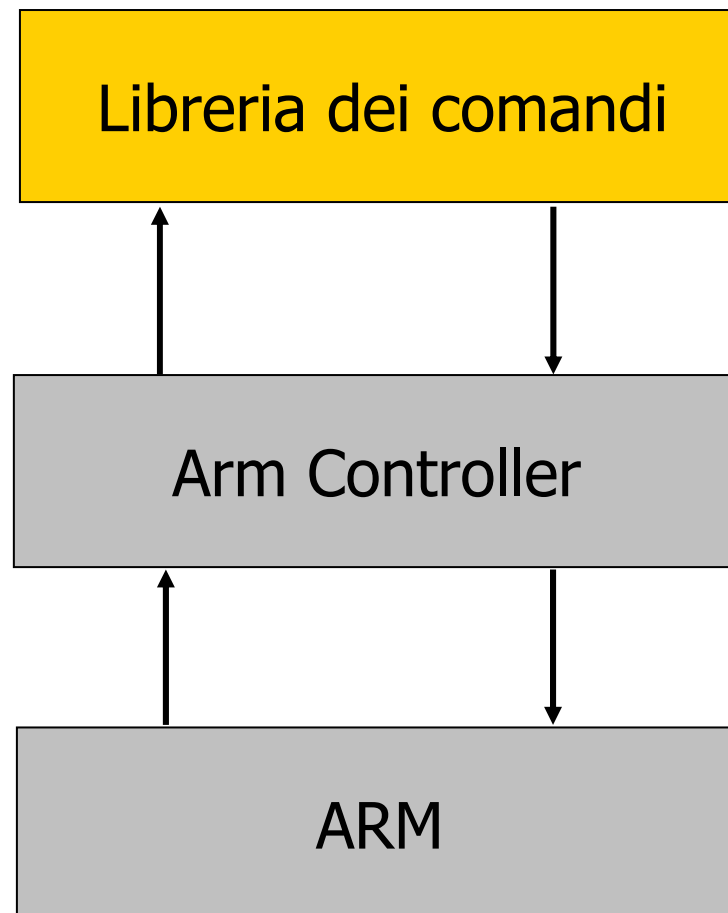
Sistema di controllo

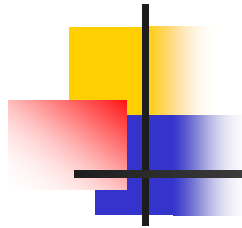
PC





Architettura software





Interfacce Software

bool read_arm_q (double q)*

- *q*: puntatore ad un array di 8 double in cui viene restituita la posizione in gradi dei giunti del braccio

bool move_arm_q(double q)*

- *q*: puntatore ad un array di 8 double contenente la posizione in gradi dei giunti del braccio



Interfacce Software

bool read_arm_c (double p)*

- p: puntatore ad un array di 6 double contenenti
posizione in mm ed orientamento in gradi del braccio
nello spazio cartesiano



Interfacce Software

bool move_arm_c7(double p, double elbow, double J0,
double velocity)*

- *p*: puntatore ad un array di 6 double contenenti posizione in mm ed orientamento in gradi nello spazio cartesiano
- *Elbow*: angolo del gomito espresso in gradi
- *J0*: posizione finale del giunto 0
- *Velocity*: frazione della velocità massima di movimento

Inversione cinematica su 7 dof



Interfacce Software

bool move_arm_c(double p, double elbow, double velocity)*

- *p*: puntatore ad un array di 6 double contenenti posizione in mm ed orientamento in gradi nello spazio cartesiano
- *Elbow*: angolo del gomito espresso in gradi
- *Velocity*: frazione della velocità massima di movimento

Inversione cinematica su 8 dof