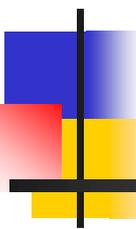


Università di Pisa
Corso di Laurea Magistrale in Informatica
Corso di Robotica



Modulo B. Fondamenti di Robotica

Fondamenti di controllo dei robot

Cecilia Laschi
cecilia.laschi@sssup.it



Modulo B. Fondamenti di controllo dei Robot

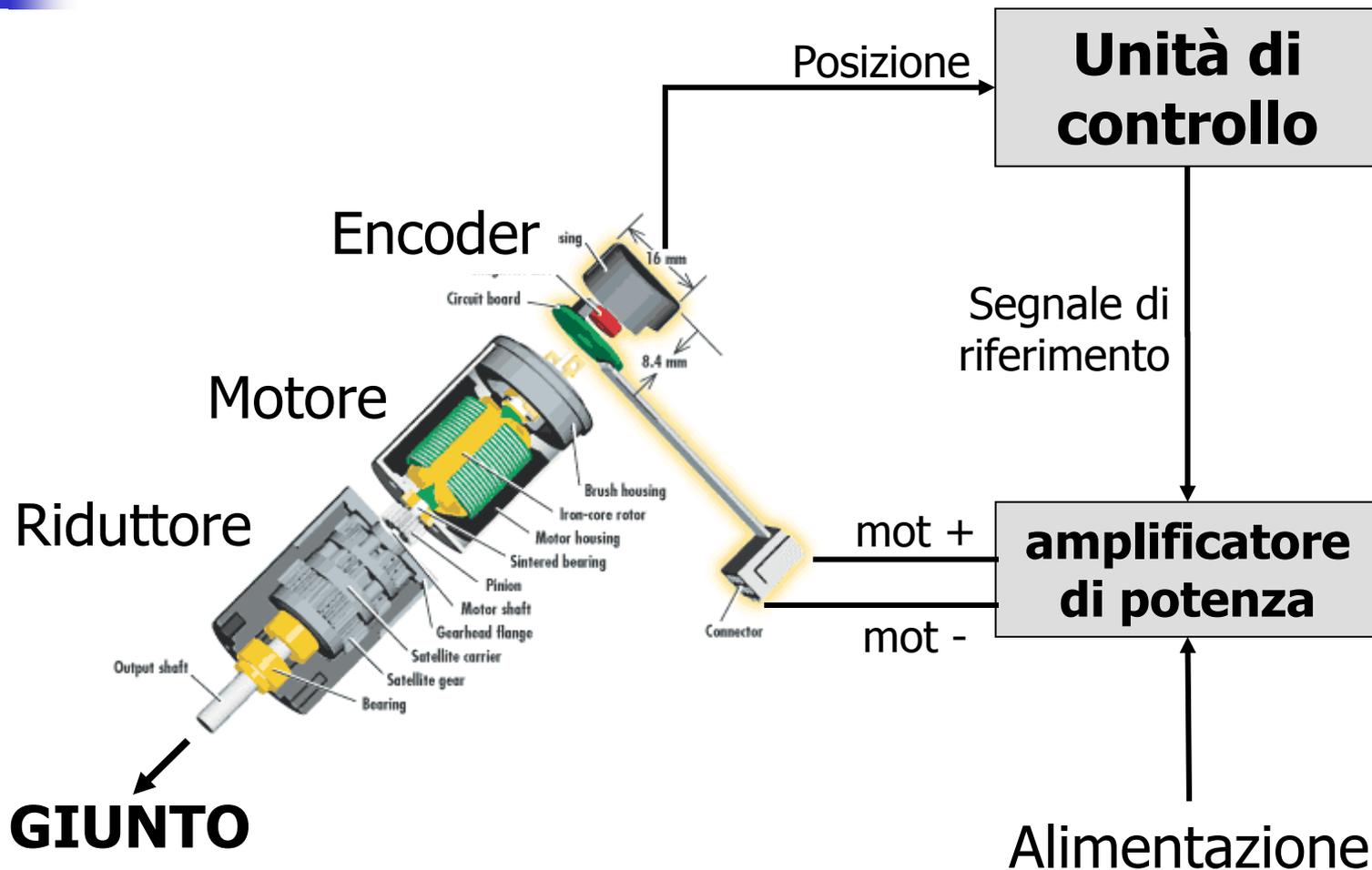
- Controllo del moto di un giunto:
 - Il controllo PID
- Controllo del moto di un manipolatore
 - Pianificazione delle traiettorie
 - Controllo del moto nello spazio dei giunti
 - Controllo del moto nello spazio operativo: cinematica differenziale e Jacobiano
- Dexter Arm:
 - Meccanica, Cinematica, Controllo,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



Sistema di controllo

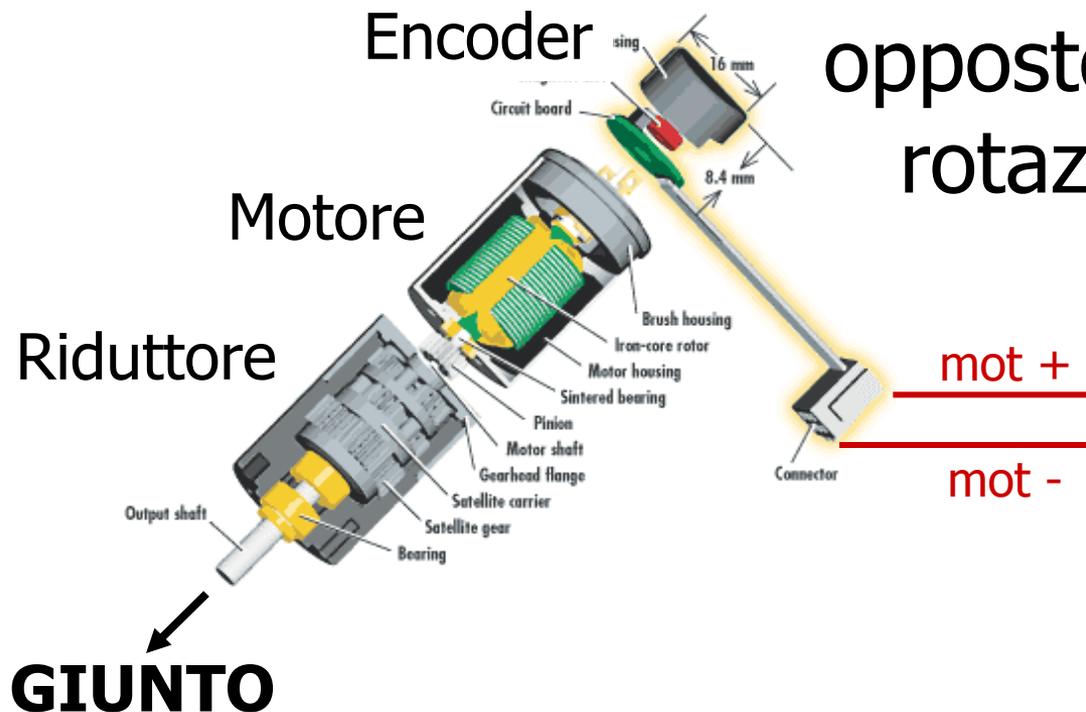
- Un sistema di controllo fornisce un comando in tensione o in corrente agli attuatori (motori) in modo da far assumere ai giunti una configurazione desiderata

Schema di una unità di controllo



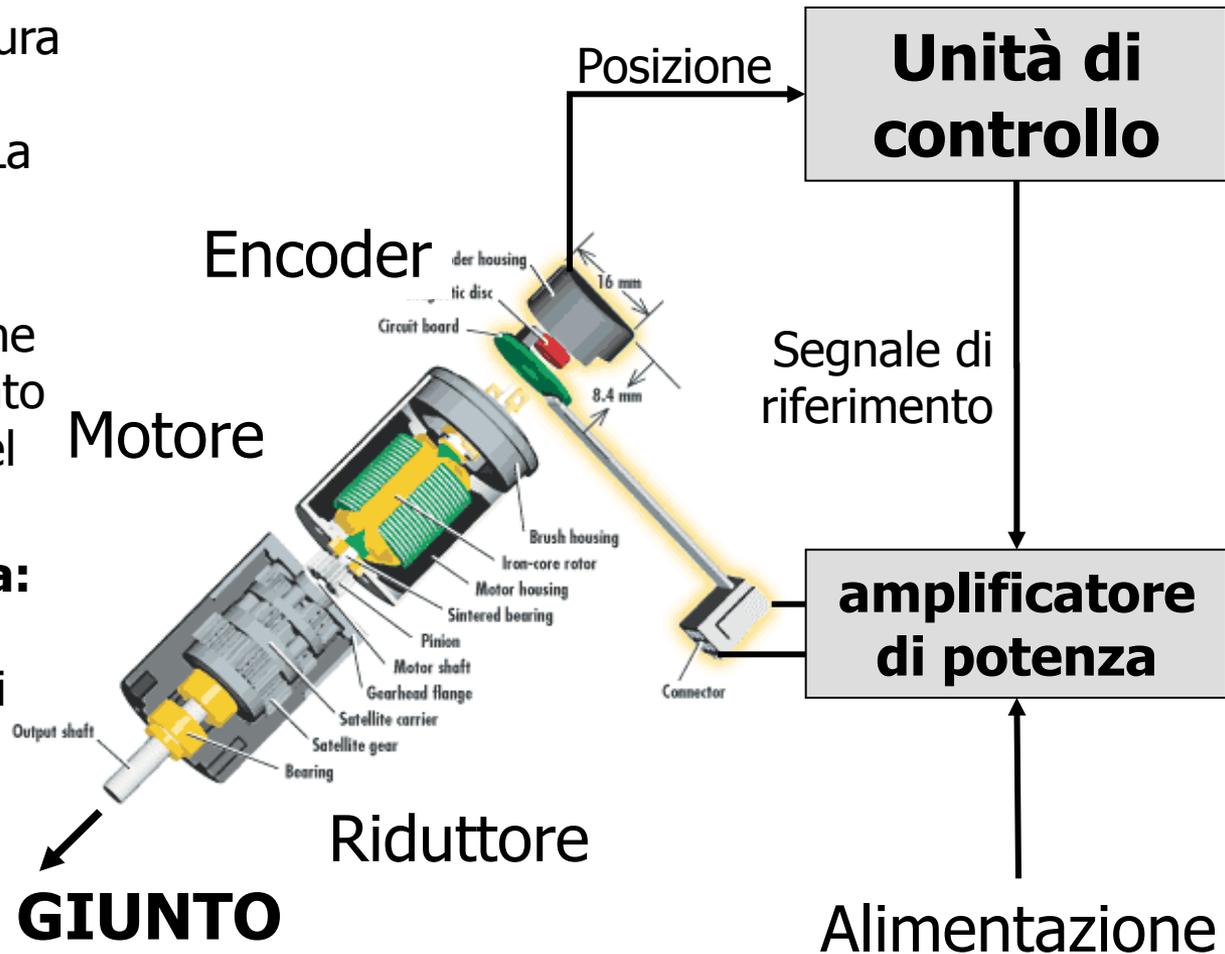
Schema di una unità di controllo

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:k)
- **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 angolare del giunto (in gradi)
- q : posizione del giunto in tacche di encoder
- k : rapporto di riduzione del motore
- R : risoluzione dell'encoder (numero di tacche per giro)

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



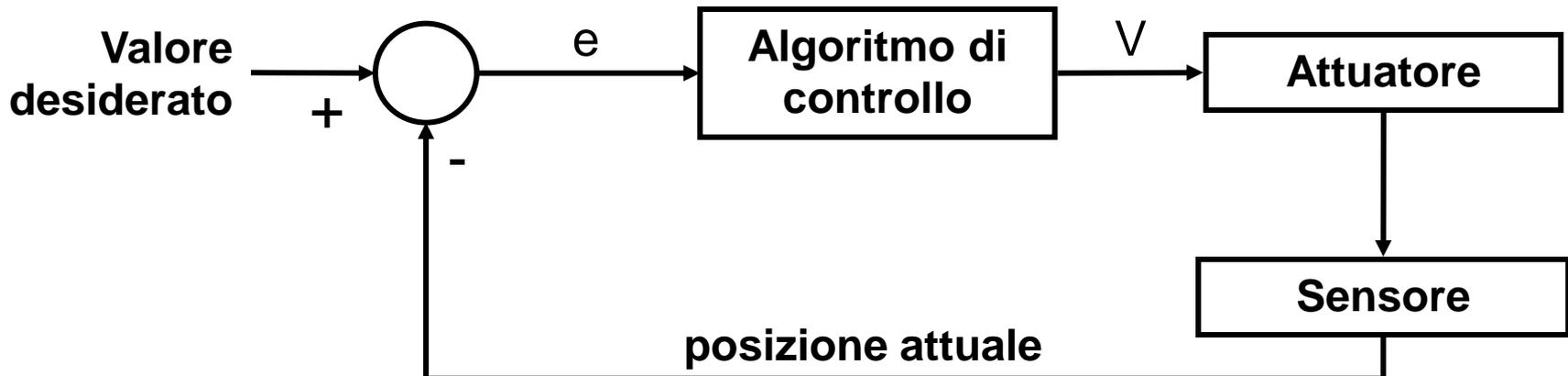
Controllo del moto di un giunto

- Obiettivo: muovere il giunto dalla posizione attuale θ_i (espressa in gradi) alla posizione desiderata θ_f in un intervallo di tempo t :

$$\theta_i \Rightarrow \theta_f$$

Controllo ad anello chiuso (feedback)

- La variabile da controllare è misurata e confrontata con il valore desiderato
- la differenza, o errore, è elaborata secondo un algoritmo prefissato
- il risultato di quest'elaborazione costituisce il valore d'ingresso dell'attuatore





Controllo PID

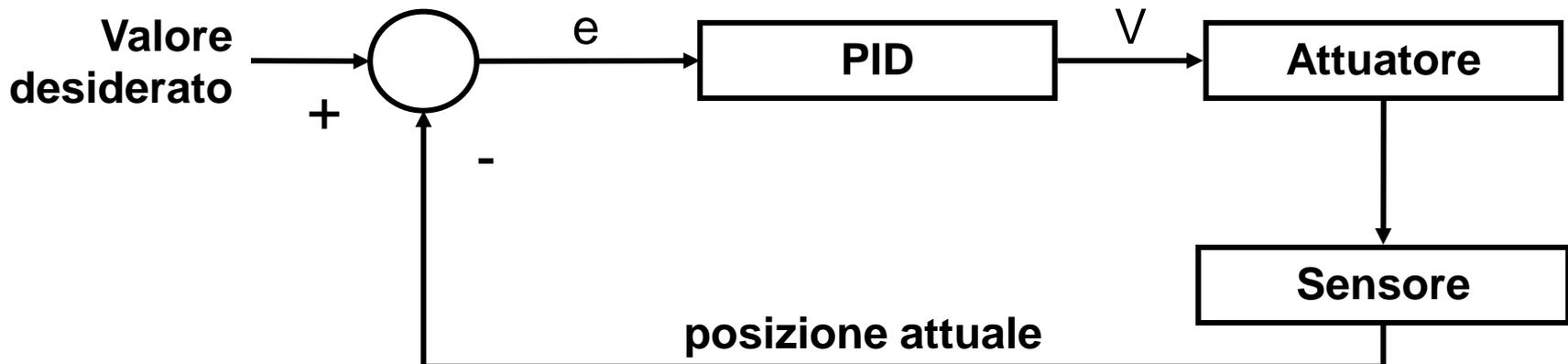
(Proporzionale, Integrativo e Derivativo):

- E' un sistema di controllo ad anello chiuso in cui l'errore è processato con un algoritmo di tipo **Proporzionale, Integrativo e derivativo**.
- Quest'algoritmo è composto di tre parti:
 - Proporzionale, così detta perché il suo effetto è proporzionale all'errore;
 - Integrativa, perché produce in uscita una correzione che rappresenta l'integrale dell'errore nel tempo;
 - Derivativa perché genera una correzione che è funzione della derivata prima dell'errore.
- Non tutti i sistemi di controllo ad anello chiuso fanno uso di un algoritmo di tipo PID

Controllo PID

(Proporzionale, Integrativo e Derivativo):

- In un controllo PID l'errore è dato in ingresso al sistema di controllo il quale calcola le componenti derivativa e integrale e il segnale di uscita V





Controllo PID

(Proporzionale, Integrativo e derivativo):

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

$$e_q = q_d - q_a$$

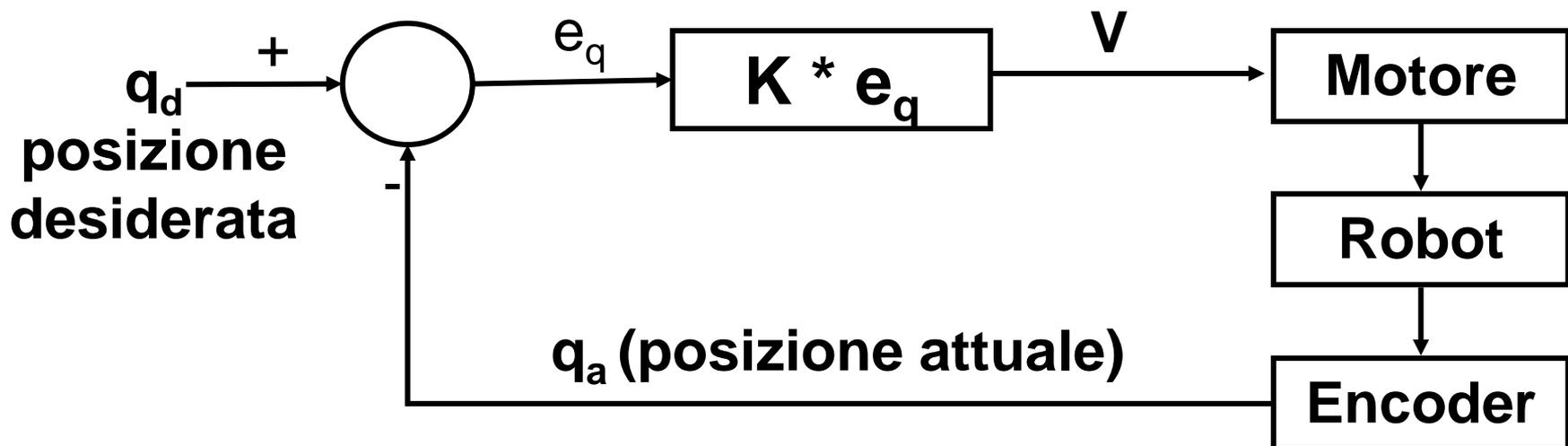
$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

- 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_q rappresenta l'errore, ovvero la differenza tra posizione desiderata e posizione attuale

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 desiderata

$$V = K_p e_q$$

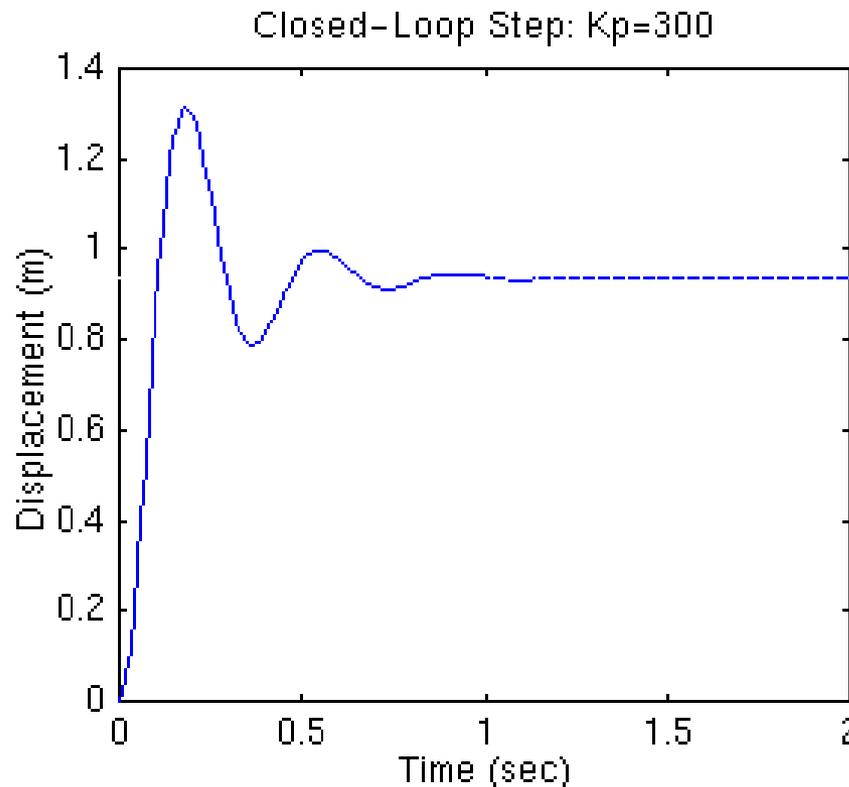
$$e_q = q_d - q_a$$

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:

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

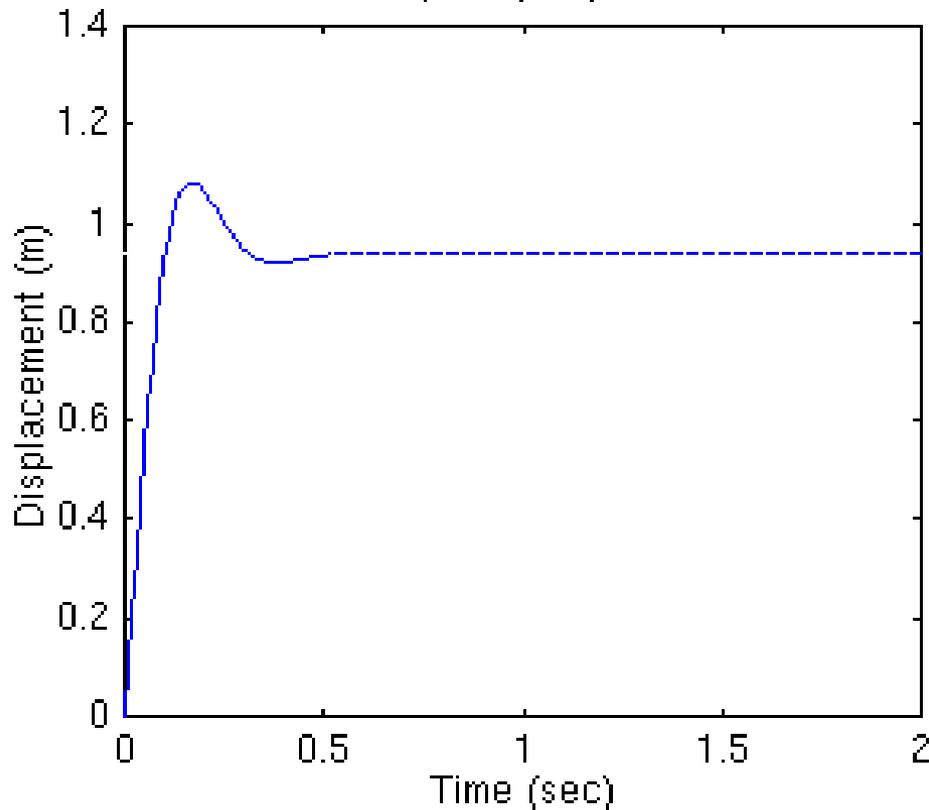
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q \quad K_d: \text{costante derivativa}$$

$$e_q = q_d - q_a$$

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

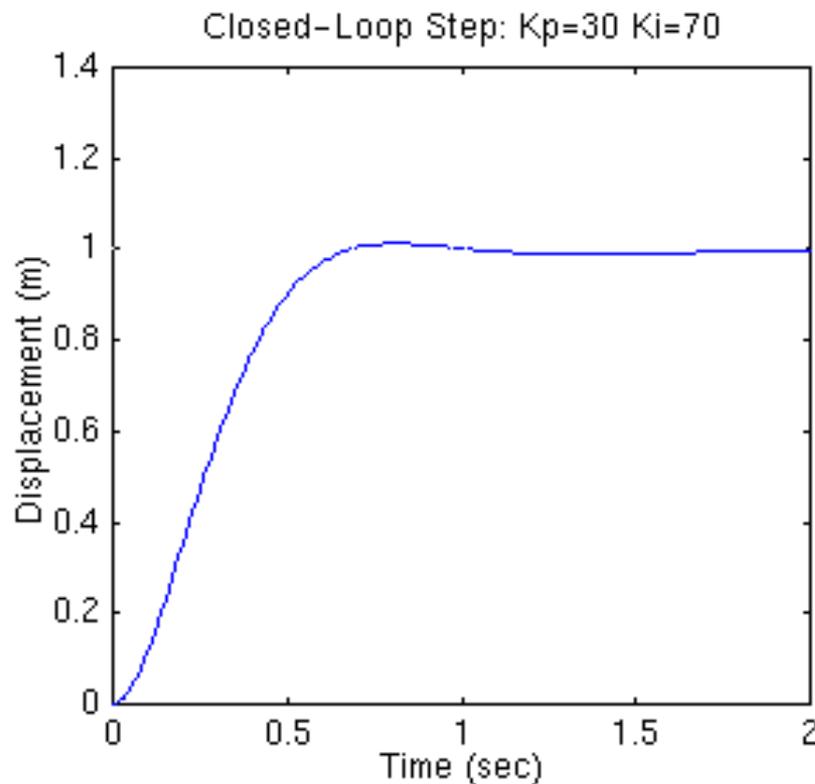
$$V = K_p e_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q_a$$

K_i : costante integrativa

Controllo PID

Controllo Proporzionale e Integrativo:



- Il sistema si assesta annullando l'errore



Controllo PID

- **Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo**

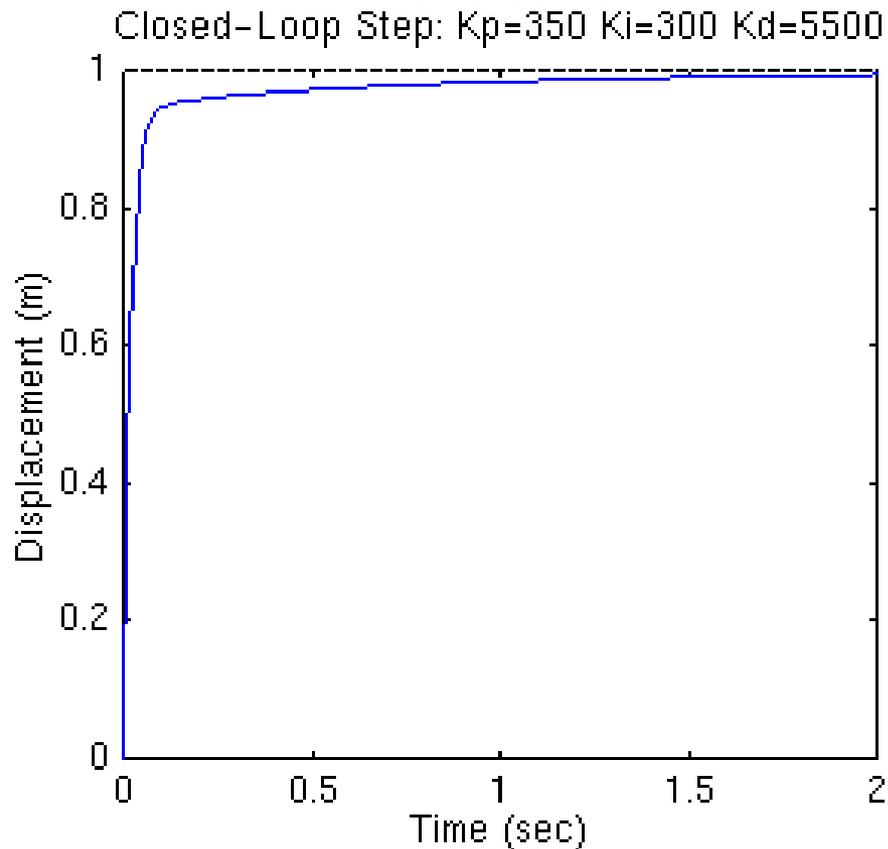
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q_a$$

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

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

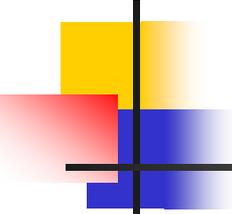


Pianificazione di traiettorie

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

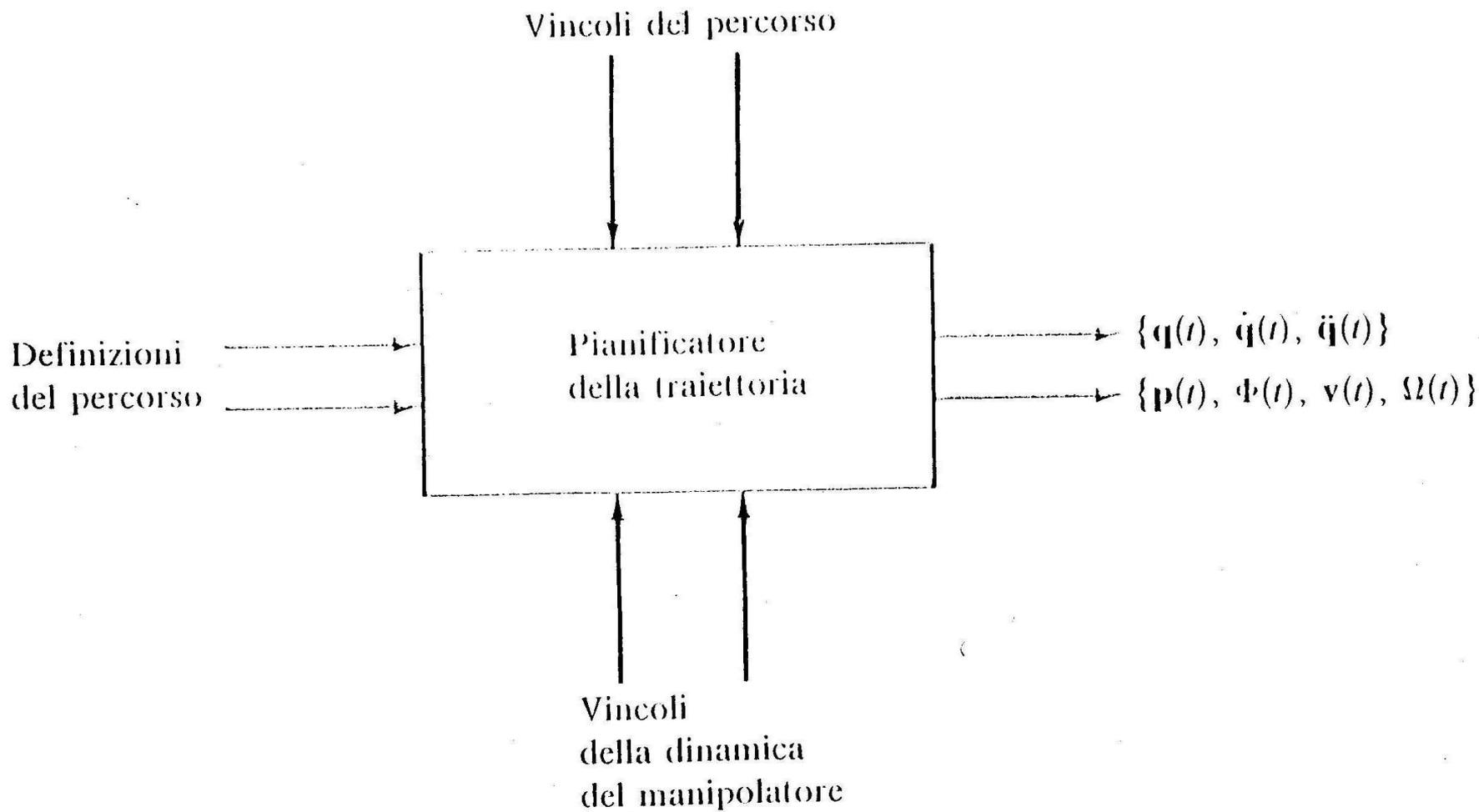


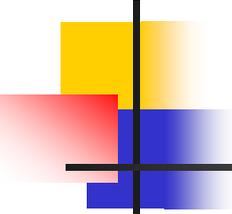
Figura 4.1 Diagramma a blocchi del pianificatore della traiettoria.



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 devono essere funzioni continue del tempo
- Devono essere minimizzati effetti indesiderati (e.g. traiettorie a curvatura non regolare)



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 .
- 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_d 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.



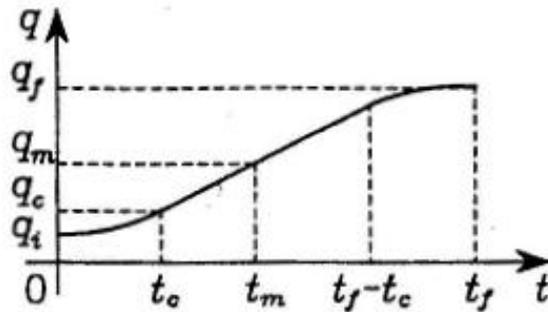
Traiettorie nello spazio dei giunti

Profilo di velocità trapezoidale

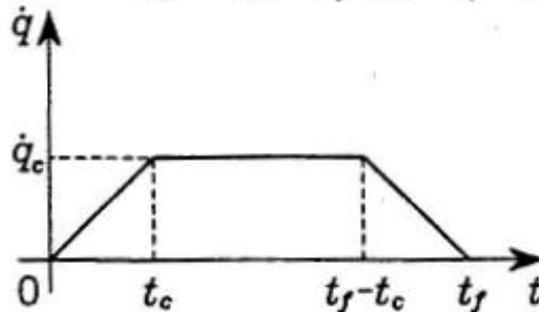
- Presenta una accelerazione costante nella fase di partenza, una velocità di crociera costante e una decelerazione costante nella fase di arrivo.
- La traiettoria corrispondente è di tipo polinomiale misto: un tratto lineare raccordato con due tratti parabolici nell'intorno delle posizioni iniziale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

Profilo di velocità trapezoidale

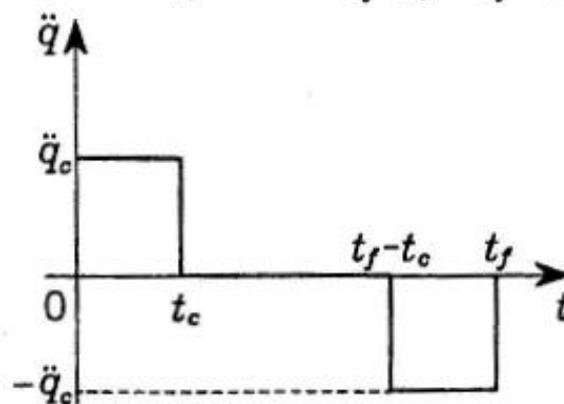
Posizione



Velocità

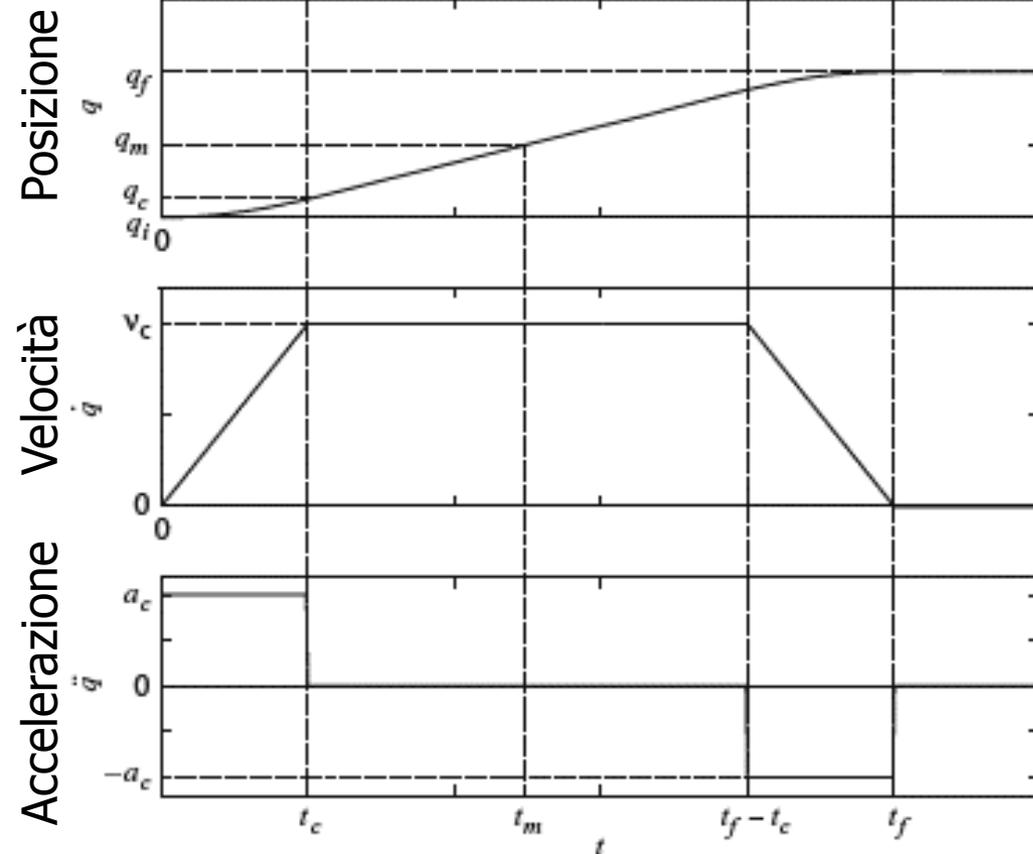


Accelerazione



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

Profilo di velocità trapezoidale



Prima fase:

$$q_1(t) = q_i + \frac{1}{2}a_c t^2 \quad 0 \leq t \leq t_c$$

Seconda fase:

$$q_2(t) = q_i + a_c t_c \left(t - \frac{t_c}{2}\right) \quad t_c < t \leq (t_f - t_c)$$

Terza fase:

$$q_3 = q_f - \frac{1}{2}a_c (t - t_f)^2 \quad (t_f - t_c) < t \leq t_f$$



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

Interpolazione di traiettoria

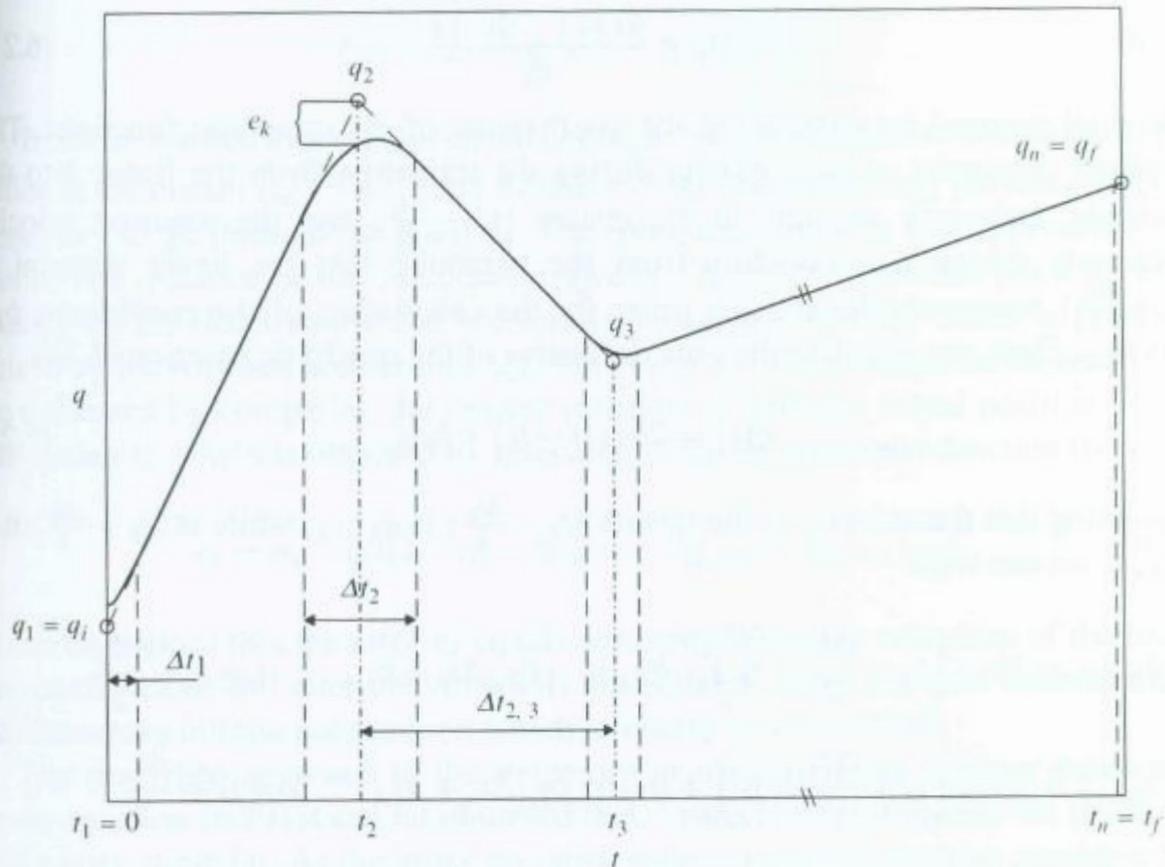


Fig. 6.2 Trajectory interpolation through n via points – linear segments with parabolic transitions are used



Controllo del moto di un manipolatore

Il controllo del moto può essere realizzato nello

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



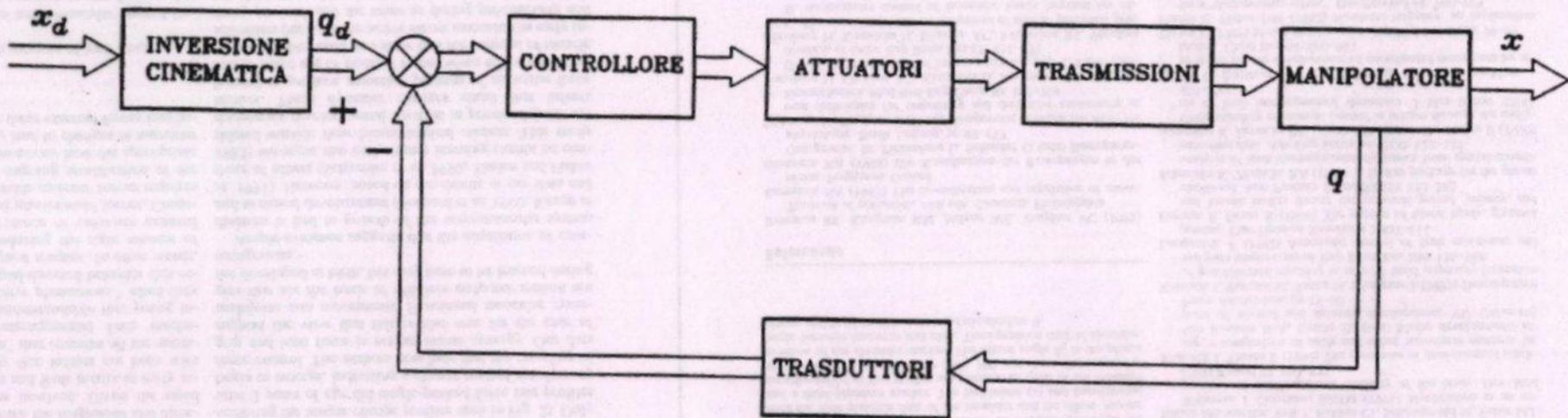
Controllo del moto nello spazio dei giunti

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

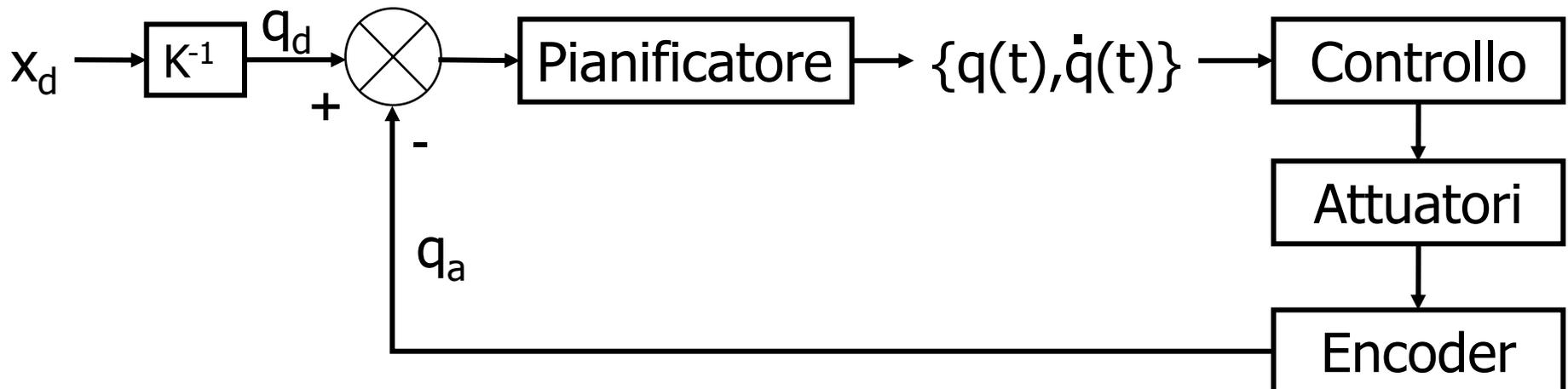


Controllo del moto nello spazio dei giunti

- 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

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

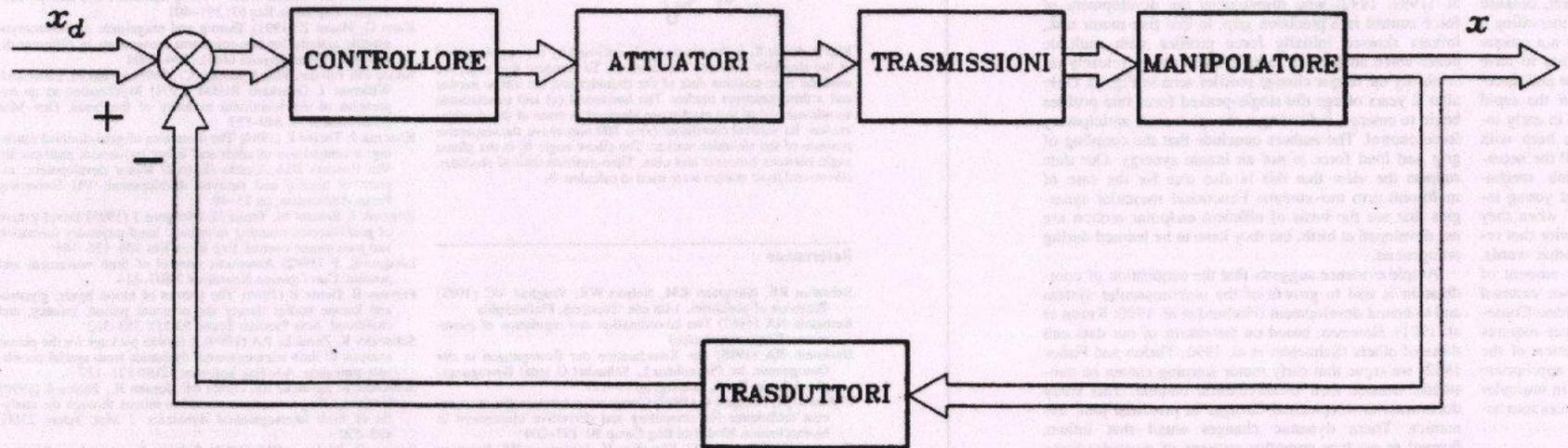




Controllo del moto nello spazio operativo

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

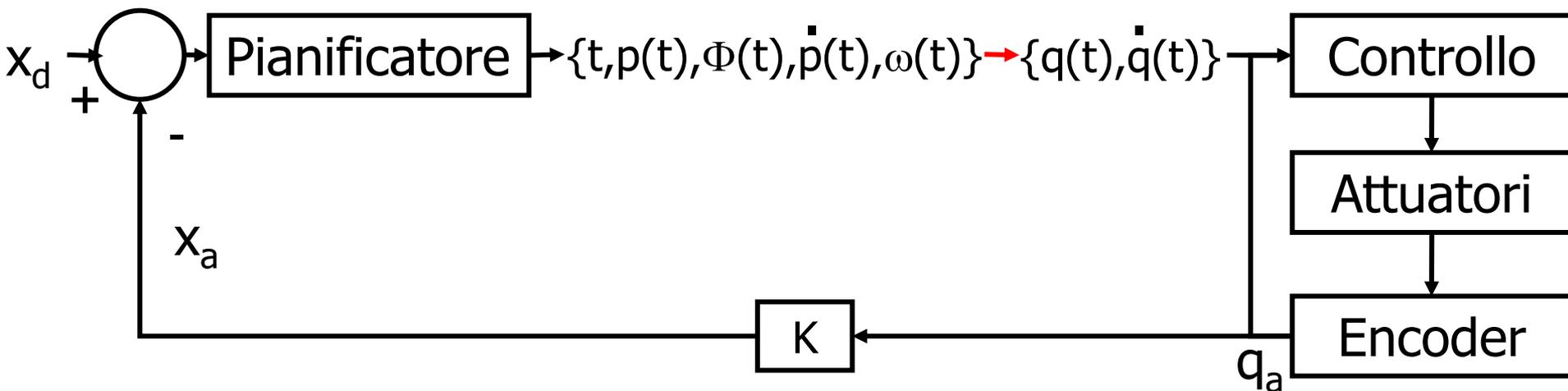
Controllo del moto nello spazio operativo

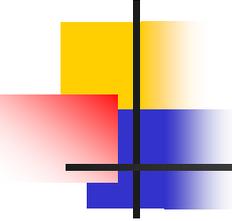


L'inversione cinematica viene effettuata all'interno del ciclo di controllo

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

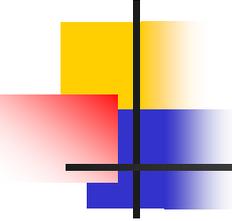
- far eseguire al manipolatore la traiettoria pianificata ($t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t)$)
- determinare velocità e accelerazioni dei giunti nel tempo per raggiungere la posizione finale desiderata espressa nelle coordinate cartesiane (calcolo dello Jacobiano)
- determinare tensioni e correnti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



Controllo del moto nello spazio operativo

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

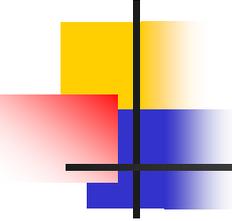
- 1) Inversione cinematica per convertire le specifiche di moto espresse nello spazio operativo in specifiche di moto nello spazio dei giunti
- 2) Sistema di controllo nello spazio dei giunti in grado di garantire l'inseguimento dei riferimenti ottenuti al punto 1)



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 geometrico = matrice di trasformazione dipendente dalla configurazione corrente del braccio

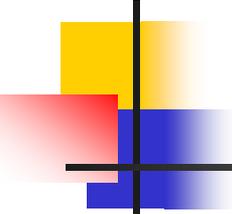
$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

$J(q)$ = Jacobiano geometrico

\dot{p} = velocità dell'effettore finale

ω = velocità di rotazione dell'effettore finale

\dot{q} = velocità ai giunti



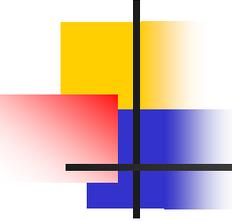
Cinematica differenziale

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



Singularità cinematiche

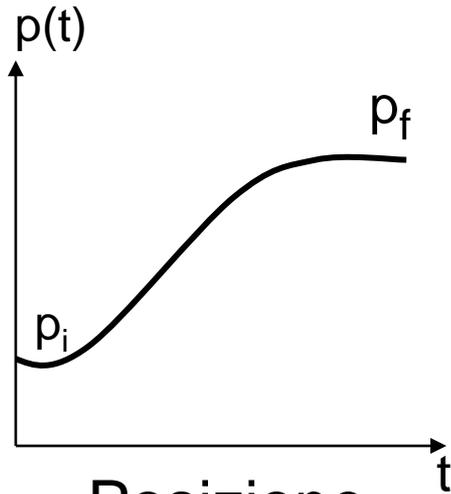
Le configurazioni che causano una diminuzione di rango della matrice Jacobiana J sono dette ***singularità cinematiche***

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**

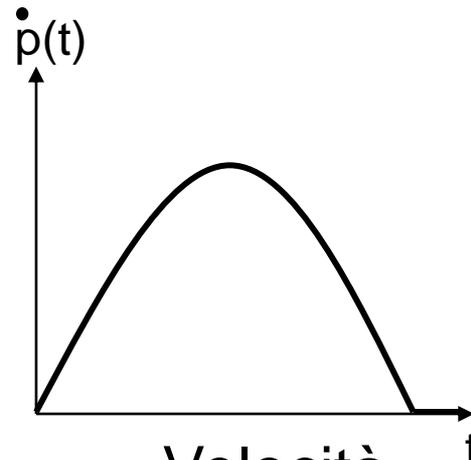
Controllo del moto nello spazio operativo

Pianificatore delle traiettorie



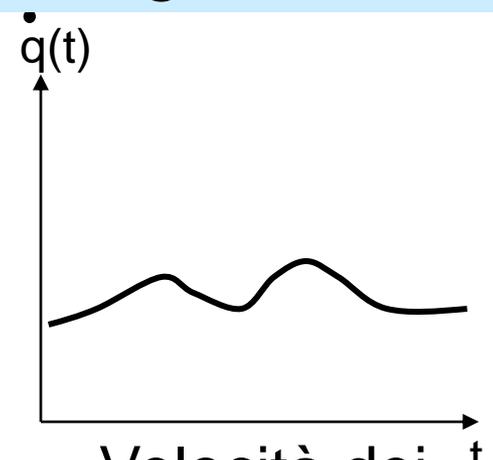
Posizione
nello spazio
operativo nel
tempo

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



Velocità
dell'effettore
finale nel
tempo

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



Velocità dei
giunti nel
tempo

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

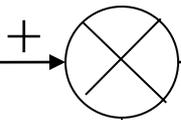


$(t, \dot{q}(t))$

Controllo del moto nello spazio operativo

Posizione desiderata

$x(t+dt)$



(\dot{x}, ω)

*Jacobiano
Cinematica inversa*

$$\dot{q} = J^{-1}(q(t)) (\dot{x}, \omega)$$

\dot{q}

$$q(t+dt) = f(\dot{q}(t), q(t))$$

$q(t+dt)$

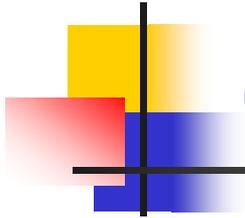
PID

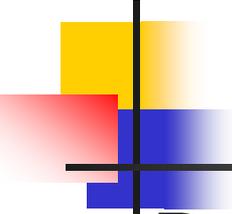
Cinematica diretta

$$x(t) = K(q(t))$$

$q(t)$

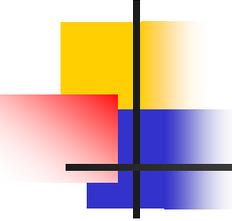
Robot





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

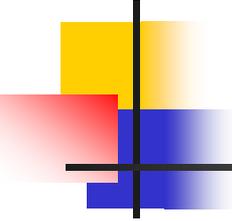
- Dof: 6
- Payload: 15 kg
- Max. reach: 1570 mm
- Repeatability: $< \pm 0.1$ mm
- Weight: 222 kg



Il manipolatore PUMA 560

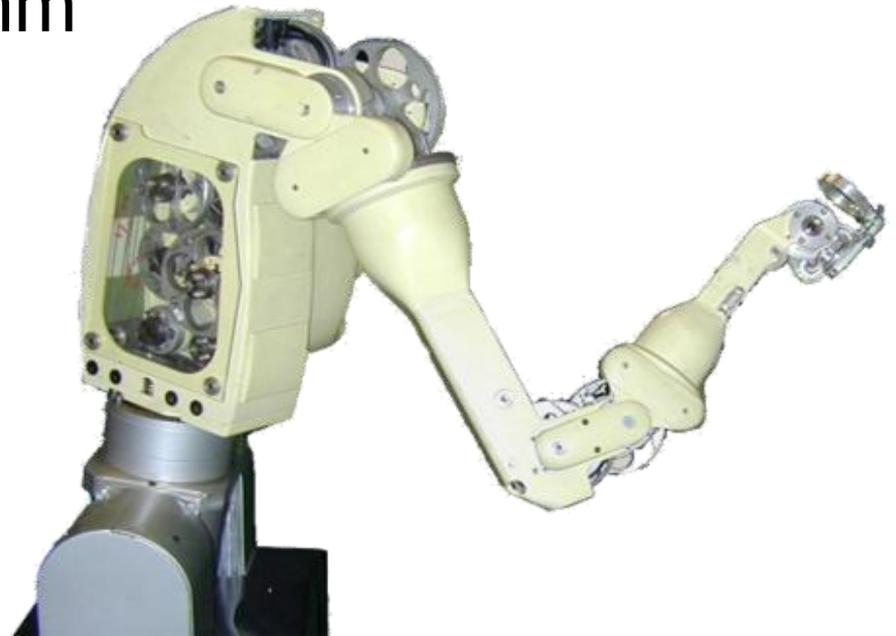
- Dof: 6
- Payload: 2 kg
- Velocità dell'effettore: 1.0 m/s
- Ripetibilità: $< \pm 0.1$ mm
- Peso: 120 lb = 55 Kg





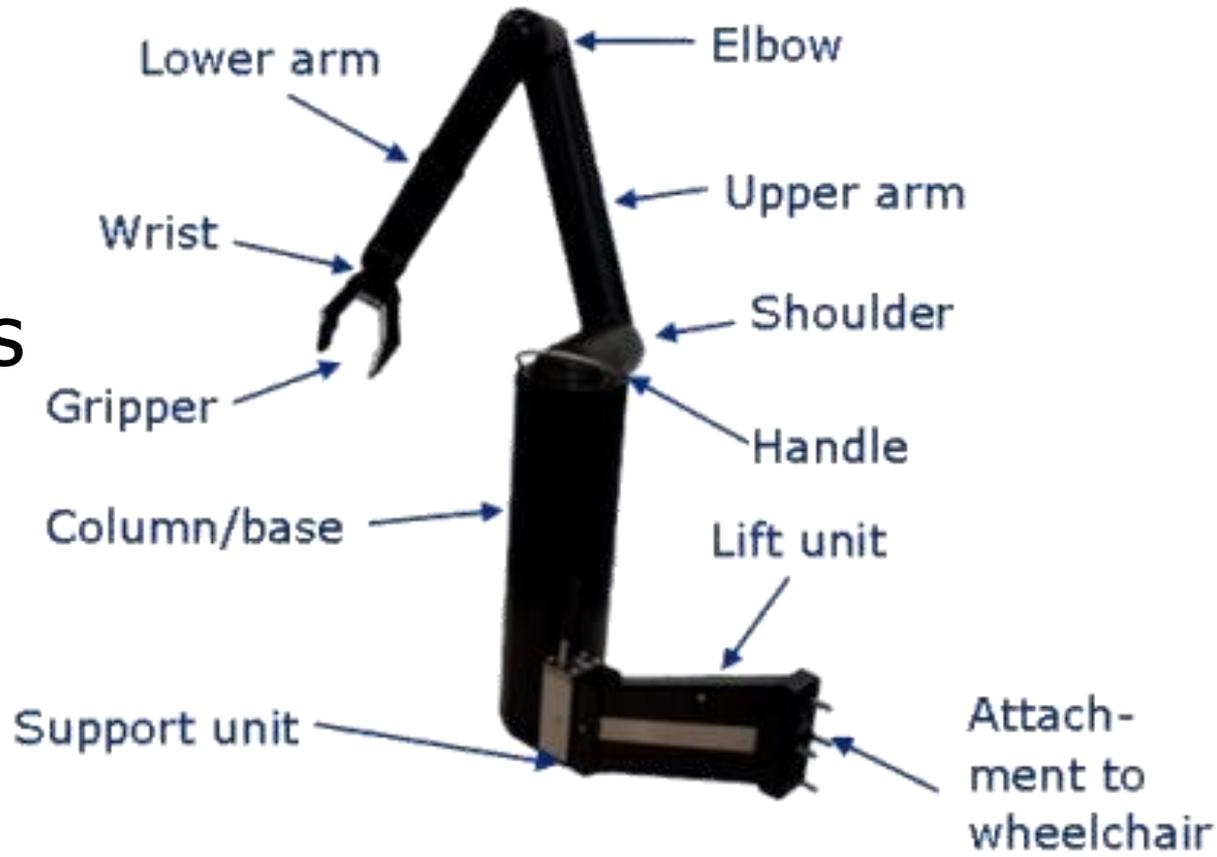
Dexter Arm

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

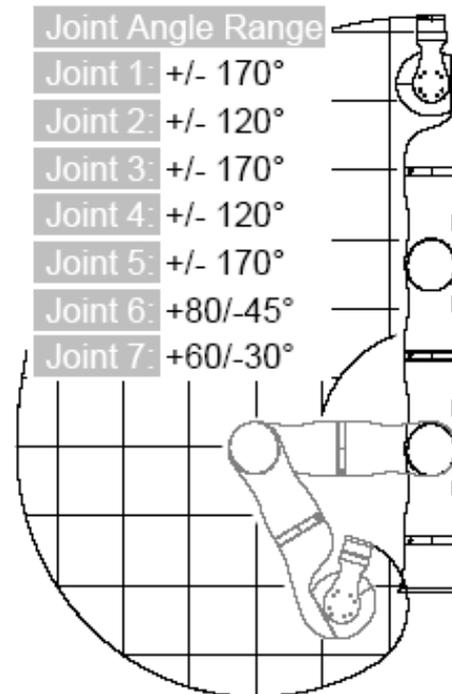
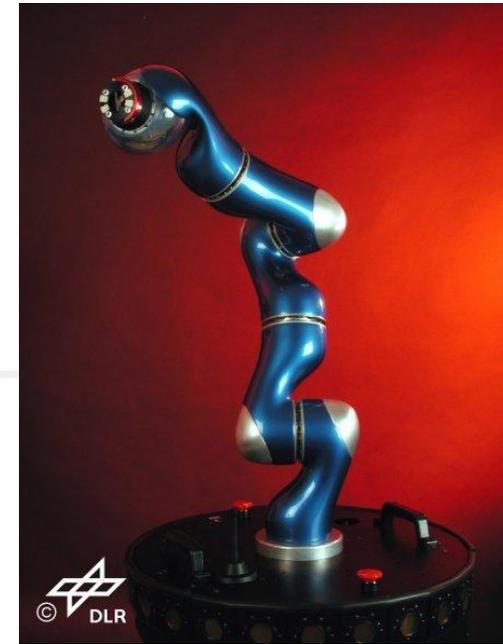


Manus

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



DLR Arm



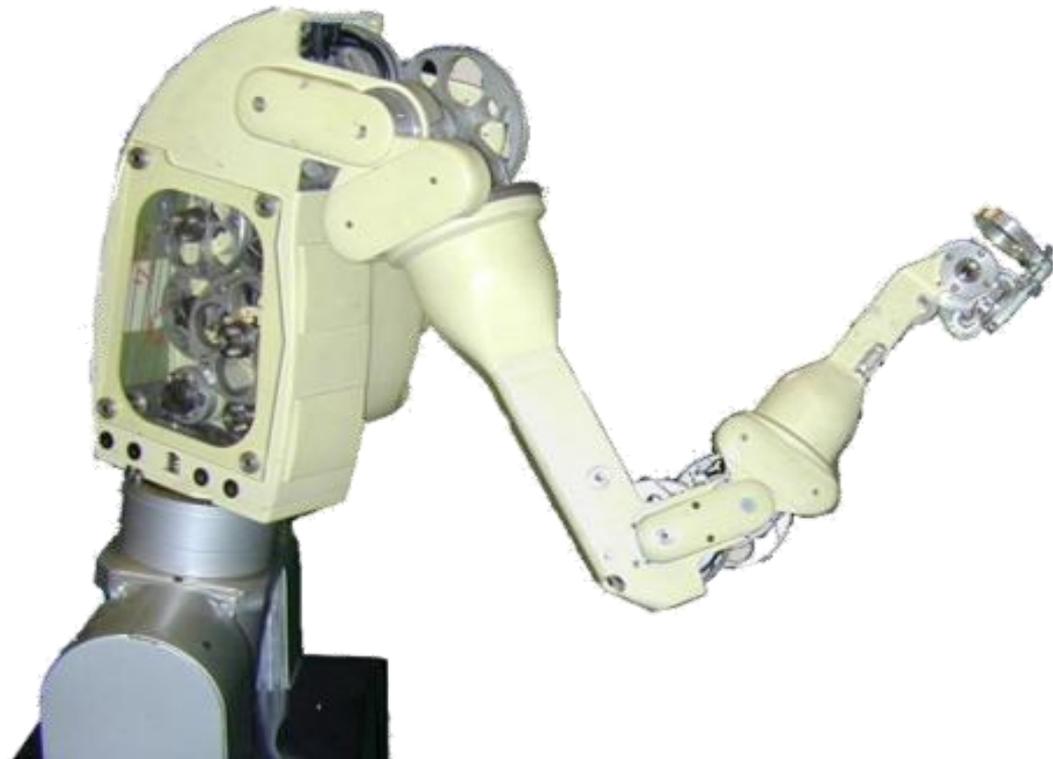
Total Weight	14 kg
Max. Payload	14 kg
Max. Joint Speed	120°/s
Nr. of Axes	7 (R - P - R - P - R - P - P)
Maximum Reach	936 mm
Motors	DLR-Robodrive
Gears	Harmonic Drive
Sensors (each Joint)	2 Position, 1 Torque Sensor
Sensor (wrist)	6-DOF Force/Torque Sensor
Brakes	Electromagnetic Safty Brake
Power Supply	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



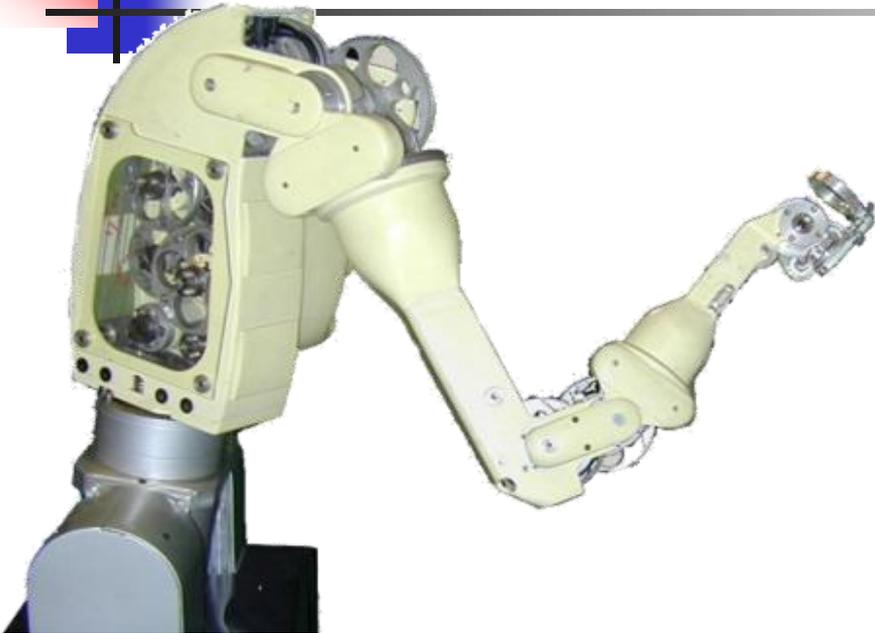
The Dexter Arm

The Dexter Arm

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



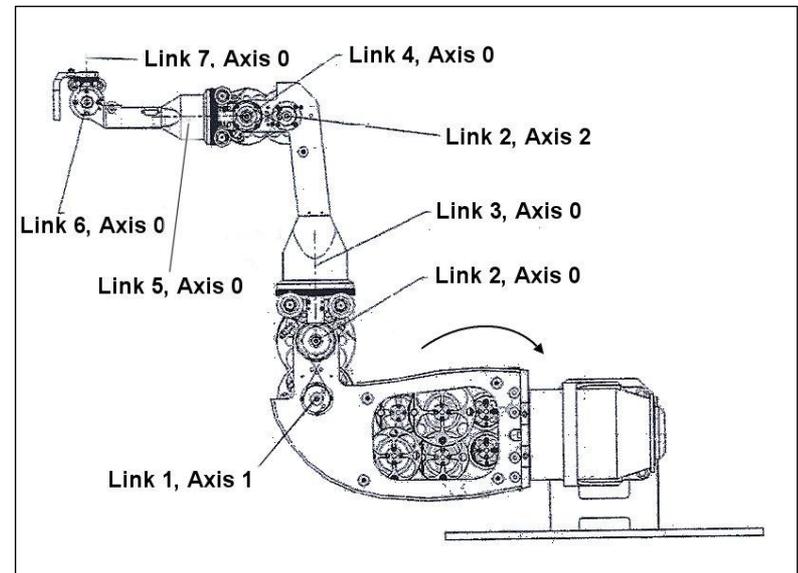
The Dexter Arm



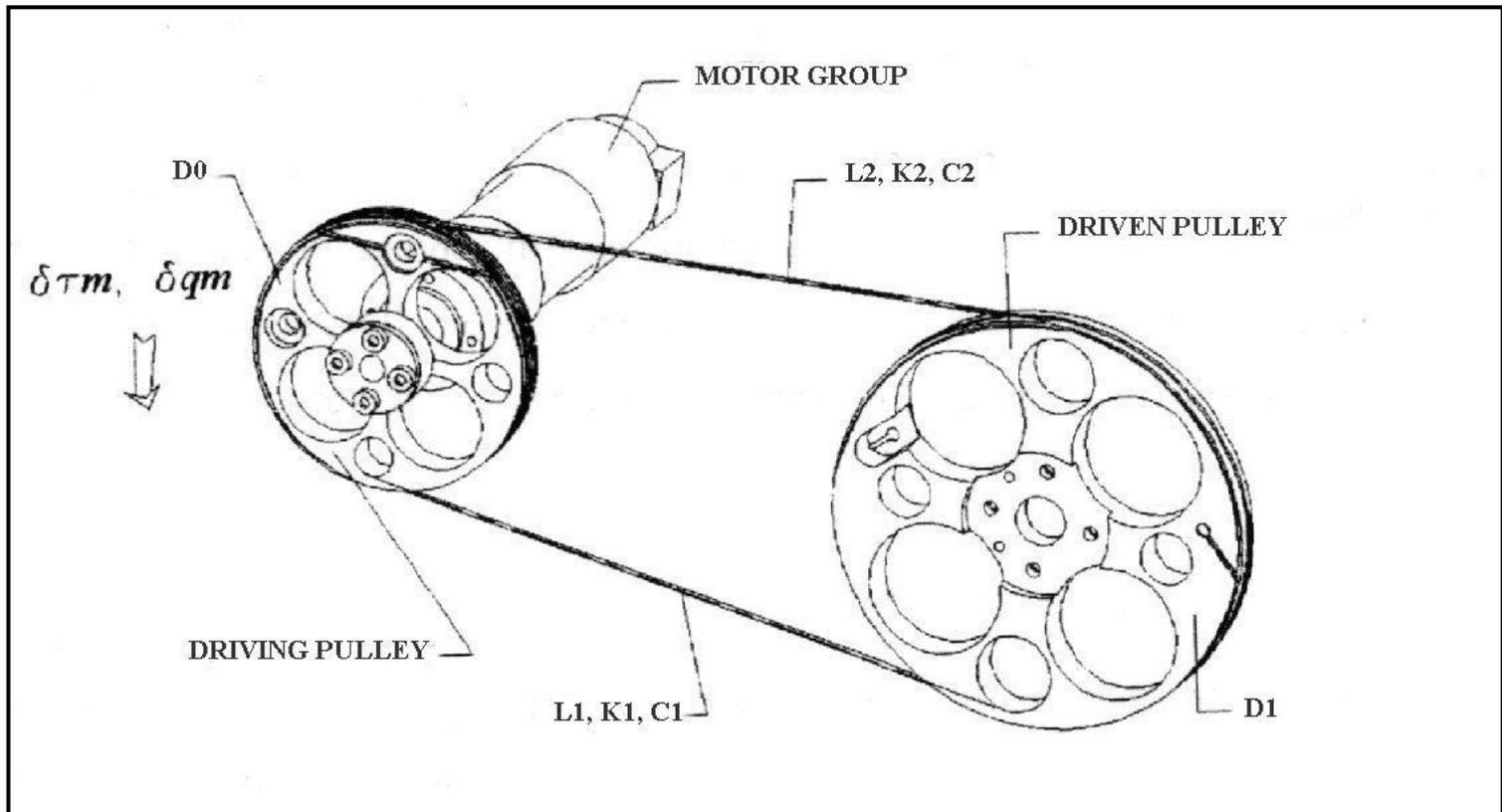
- 8-d.o.f. anthropomorphic redundant robot arm, composed of trunk, shoulder, elbow and wrist
 - designed for service applications and personal assistance in residential sites, such as houses or hospitals
-
- mechanically coupled structure: the mechanical transmission system is realized with pulleys and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

The Dexter arm

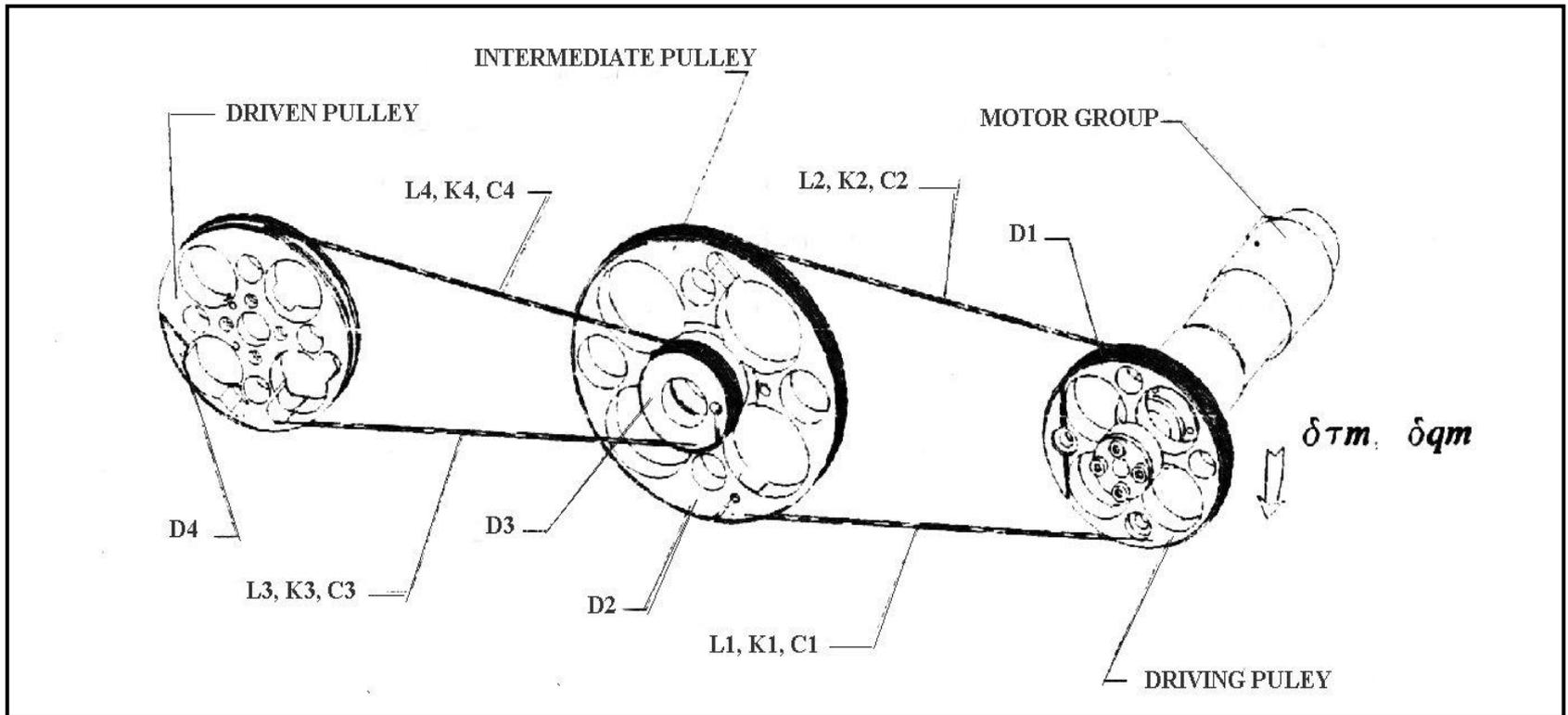
- Transmission system realized with pulleys and steel cables
- Joints J0 and J1 are actuated by motors and driving gear-boxes directly connected to the articulation axis
- Joints J2,...,J7 are actuated by DC-motors installed on link 1



Transmission #6



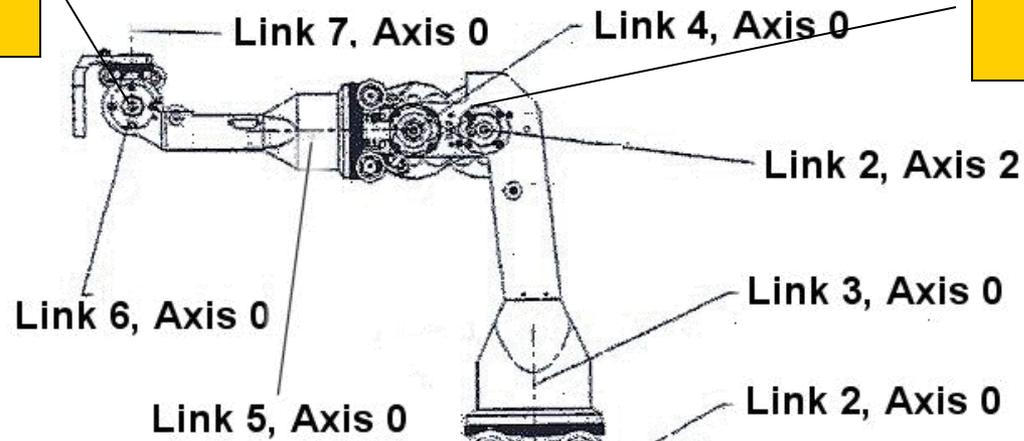
Transmissions #2-5 and 7



Anthropomorphic structure

Wrist

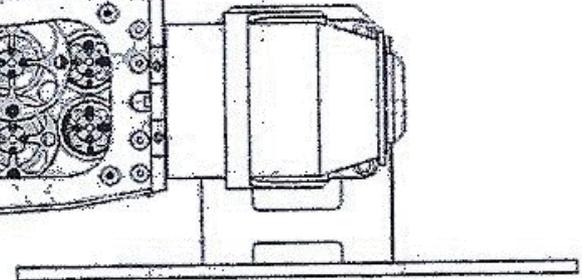
Elbow



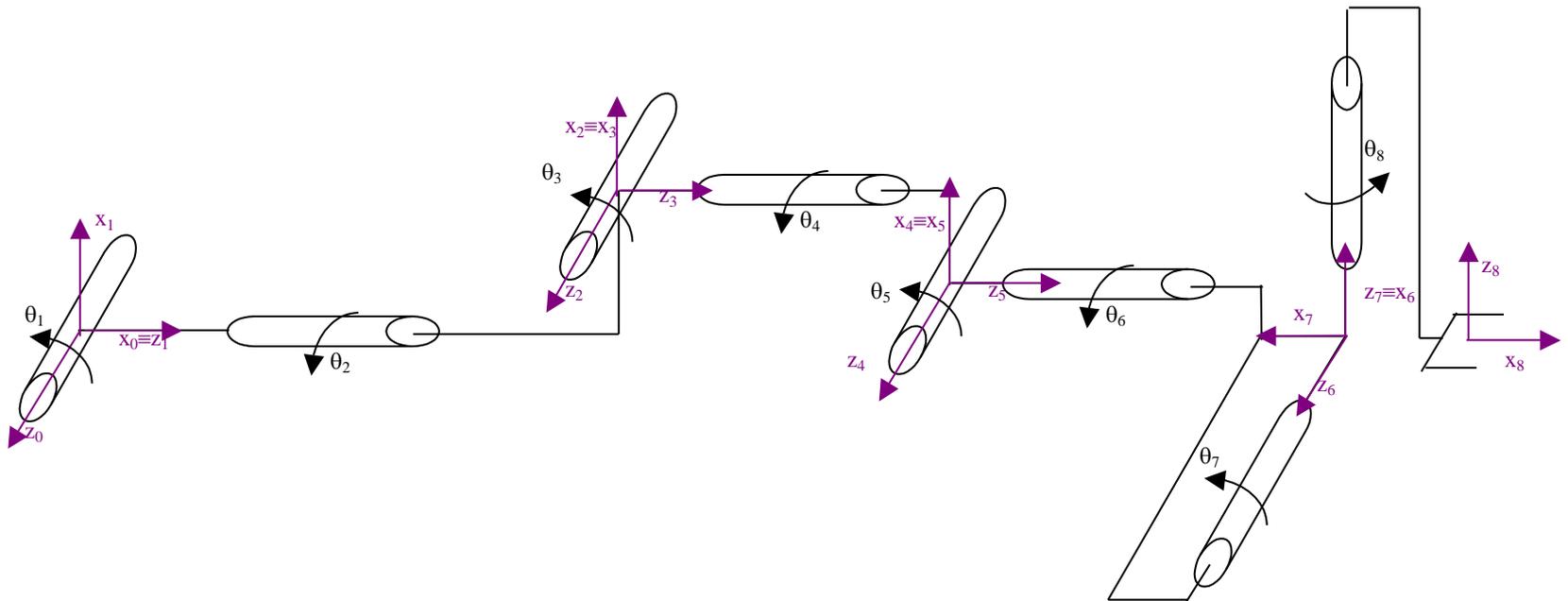
Shoulder

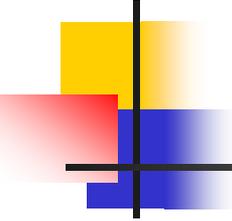
Link 1, Axis 1

Trunk



Geometric Configuration

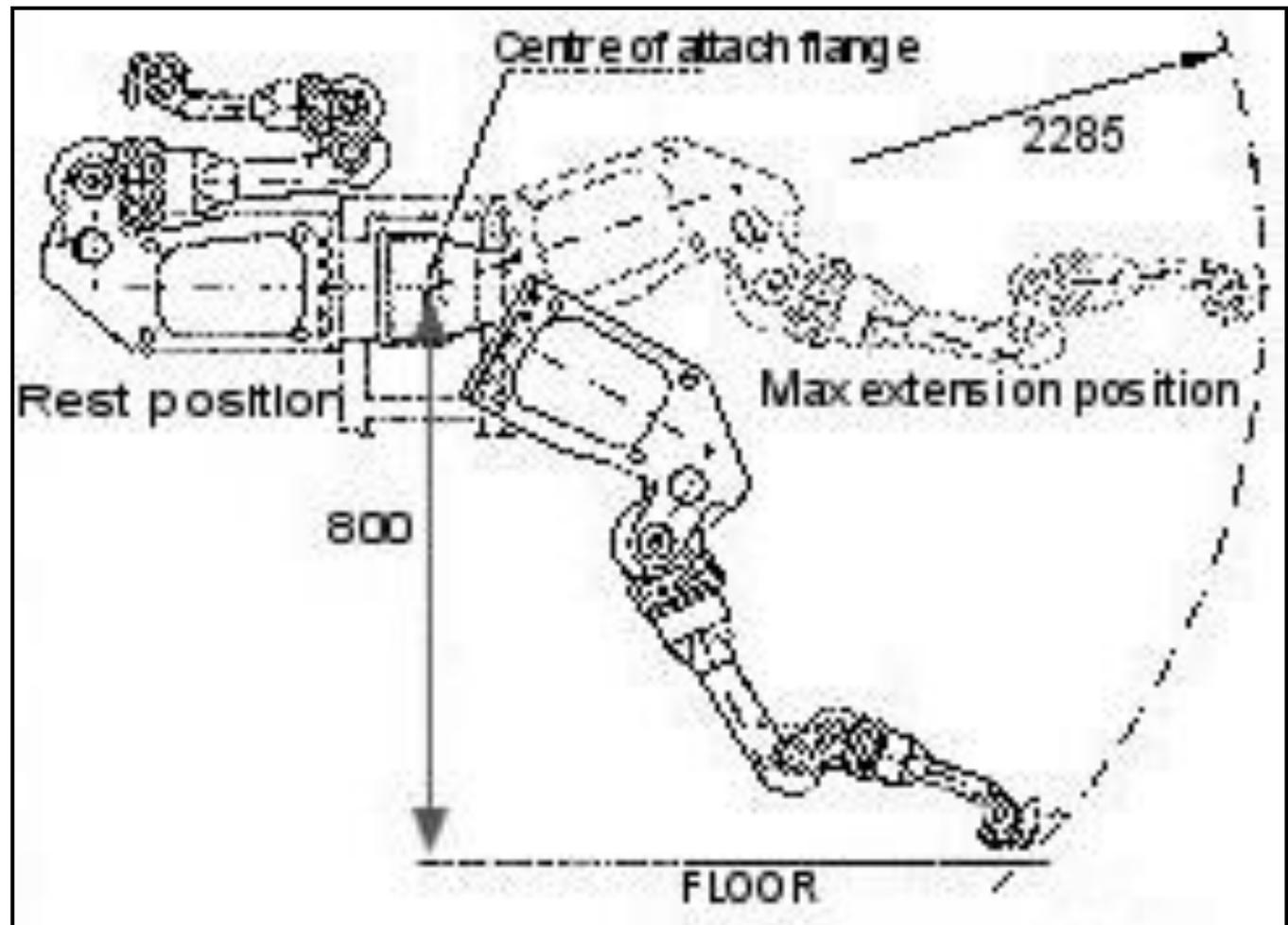




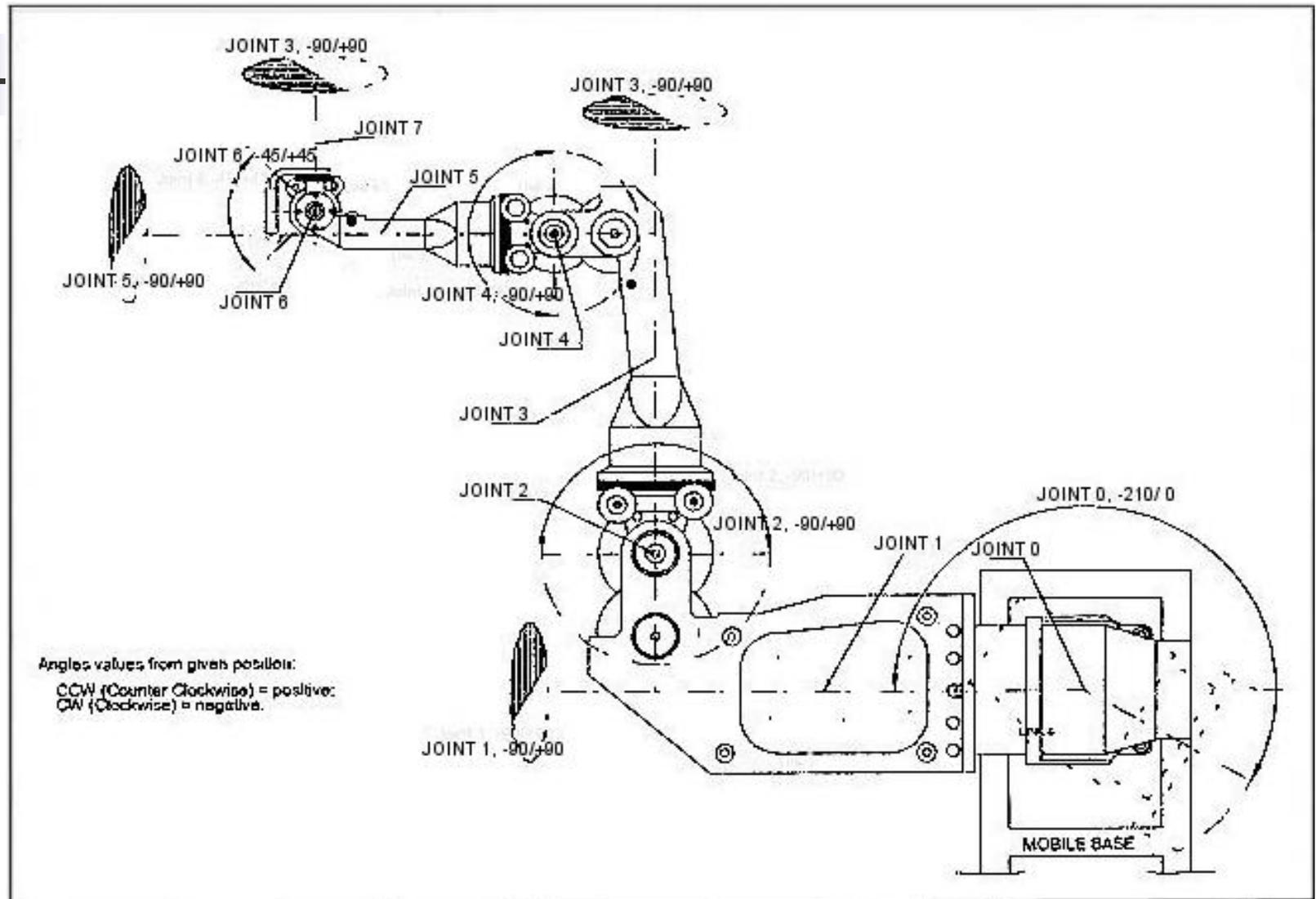
Denavit-Hartenberg Parameters

<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

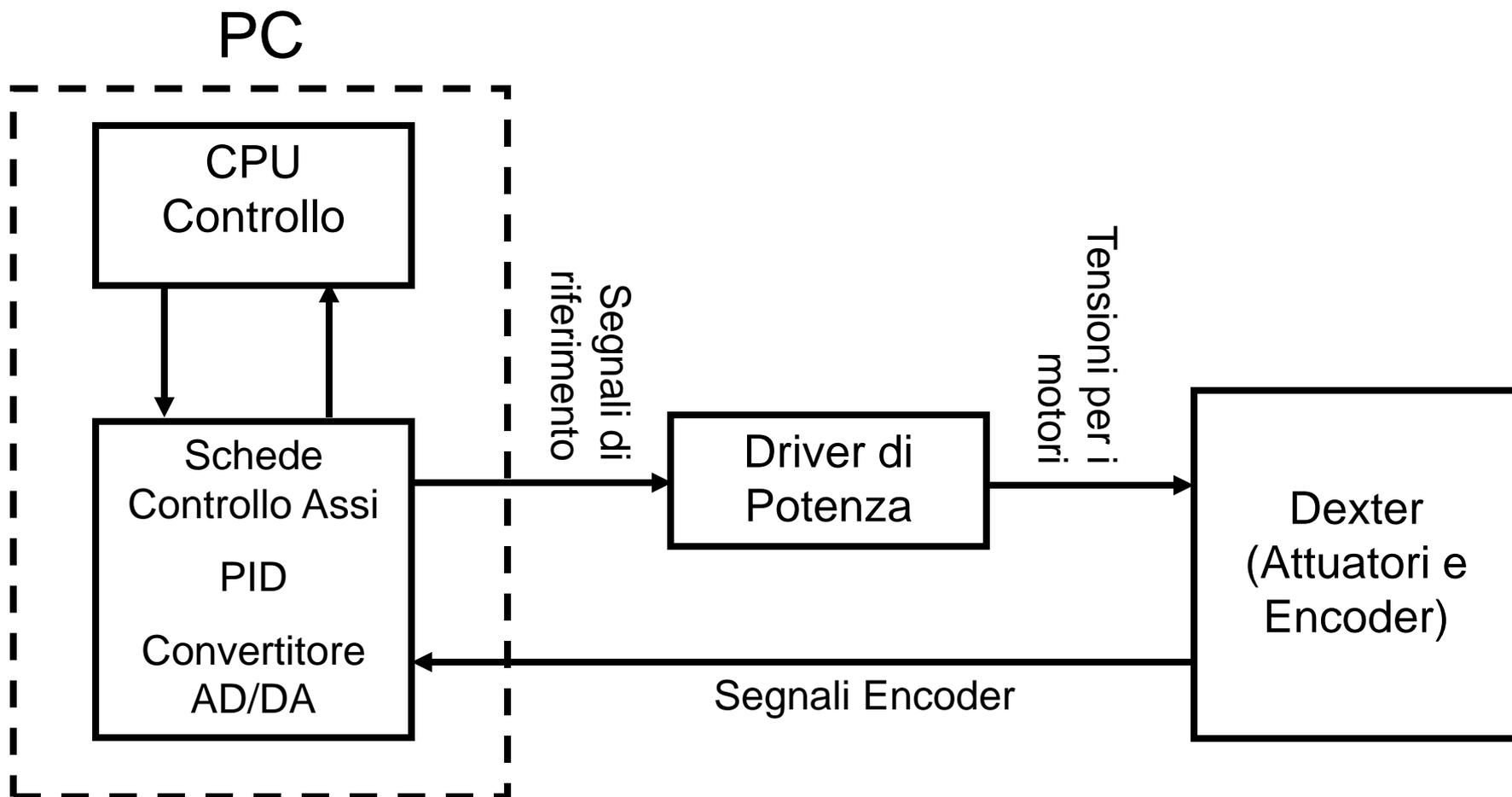
The Dexter Workspace

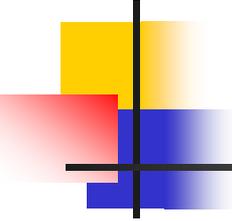


Joint Ranges

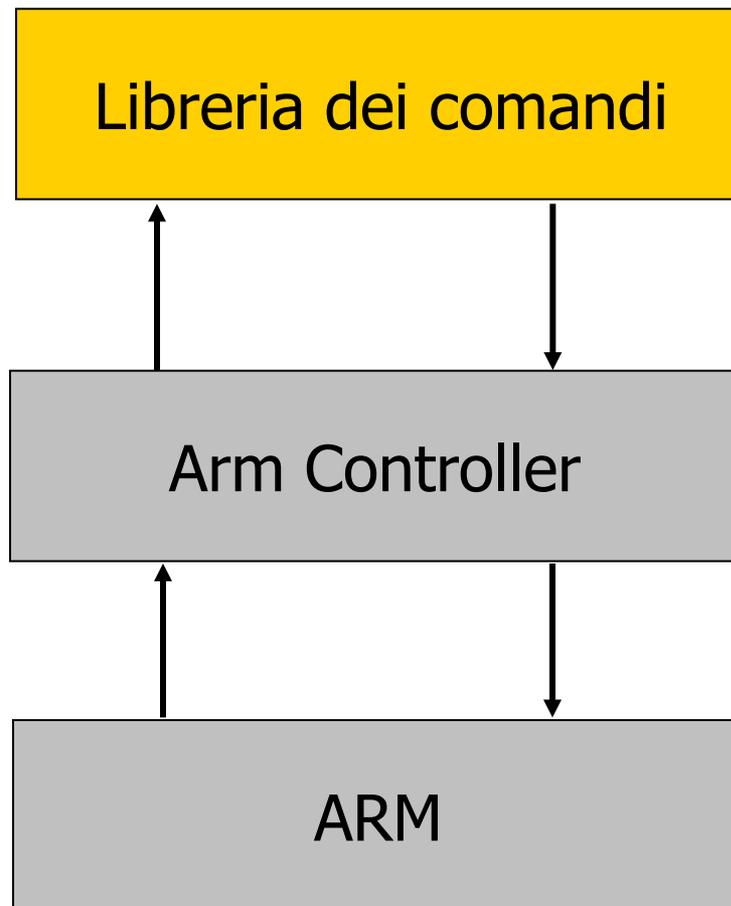


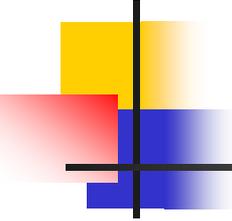
Sistema di controllo





Architettura software





Interfacce Software

Lettura della posizione corrente

- nello spazio dei giunti:

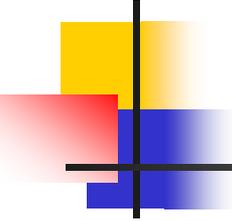
bool read_arm_q (double q)*

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

- nello spazio Cartesiano:

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

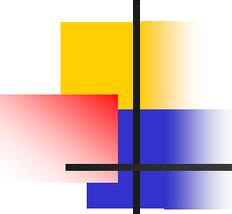


Interfacce Software

Istruzioni di movimento
- nello spazio dei giunti:

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

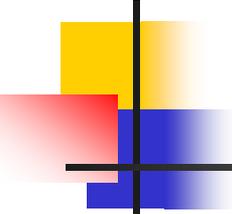
Istruzioni di movimento

- nello spazio Cartesiano:

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

Istruzioni di movimento

- nello spazio Cartesiano:

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