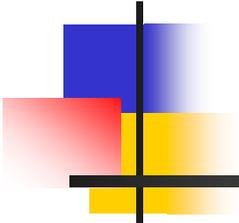


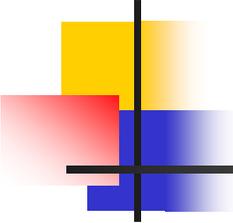
# Corso di Percezione Robotica (PRo)



## Modulo B. Fondamenti di Robotica

---

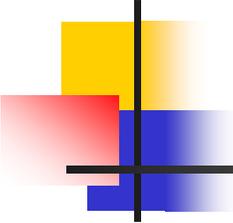
### **Fondamenti di controllo dei robot**



# 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

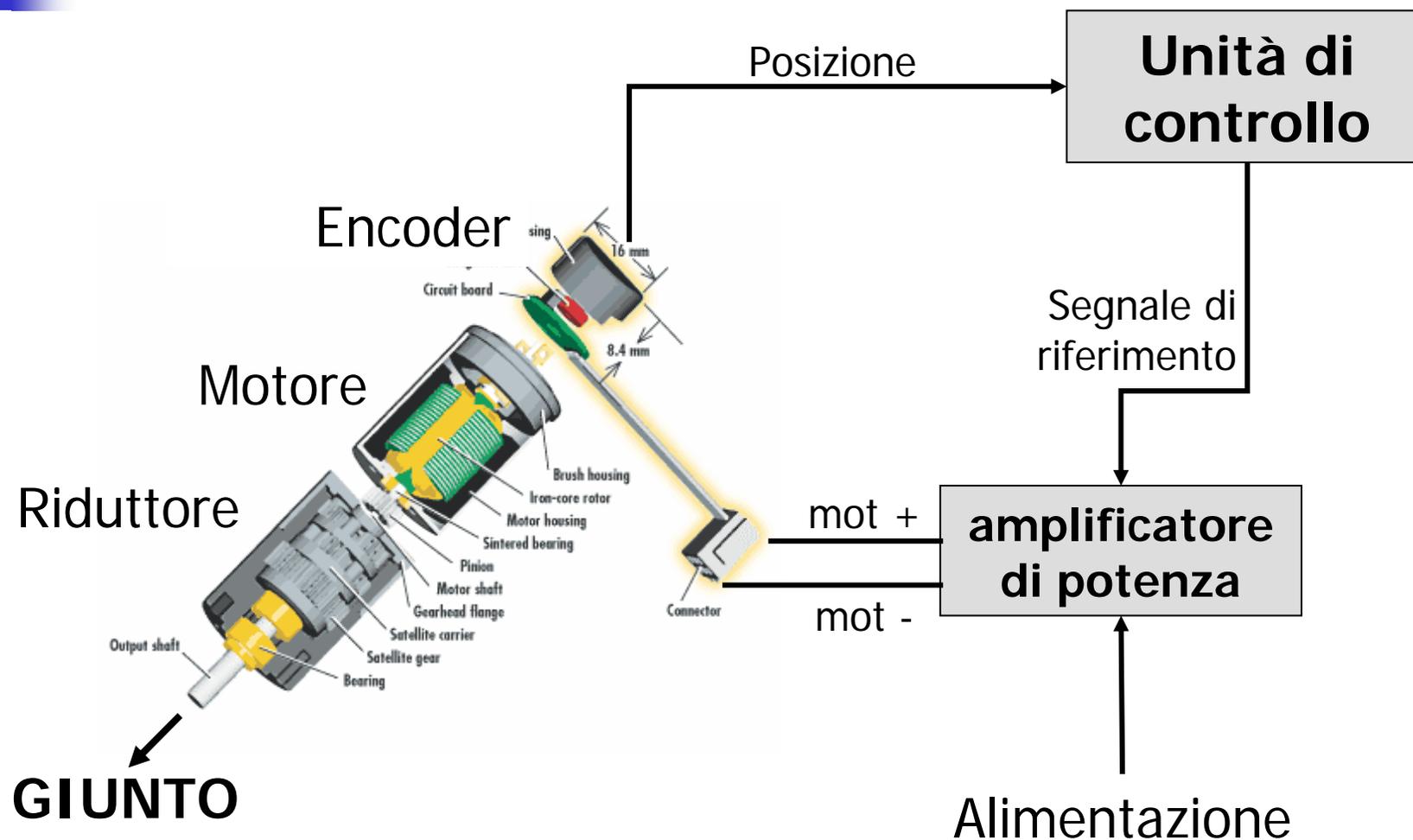


# Sistema di controllo

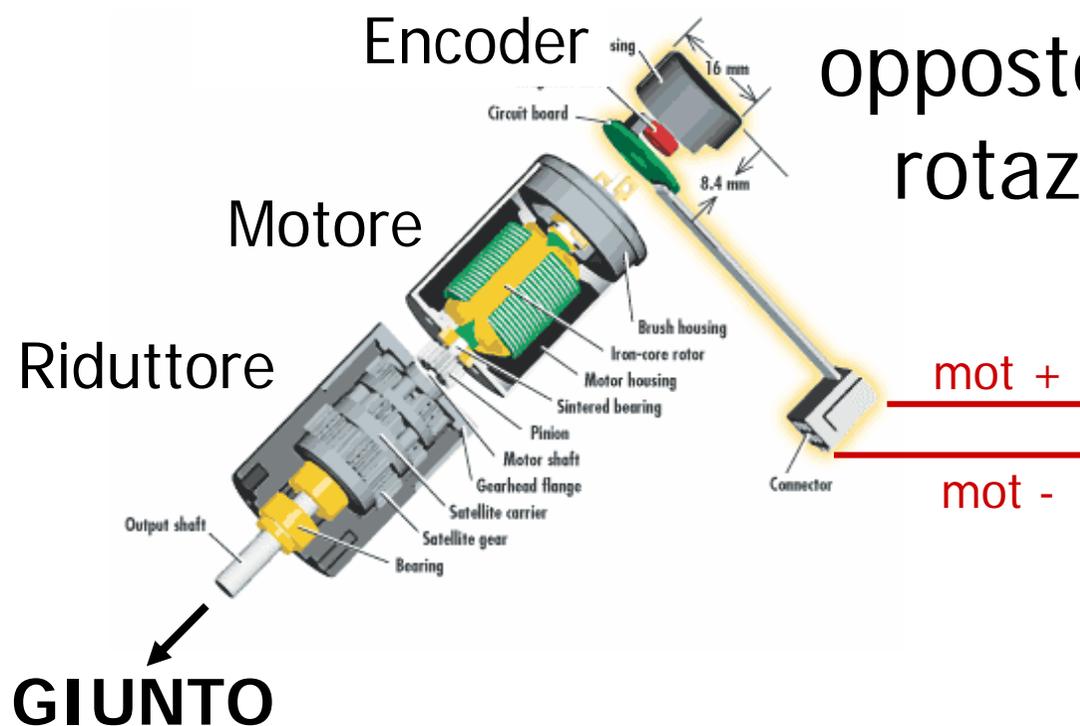
---

- 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



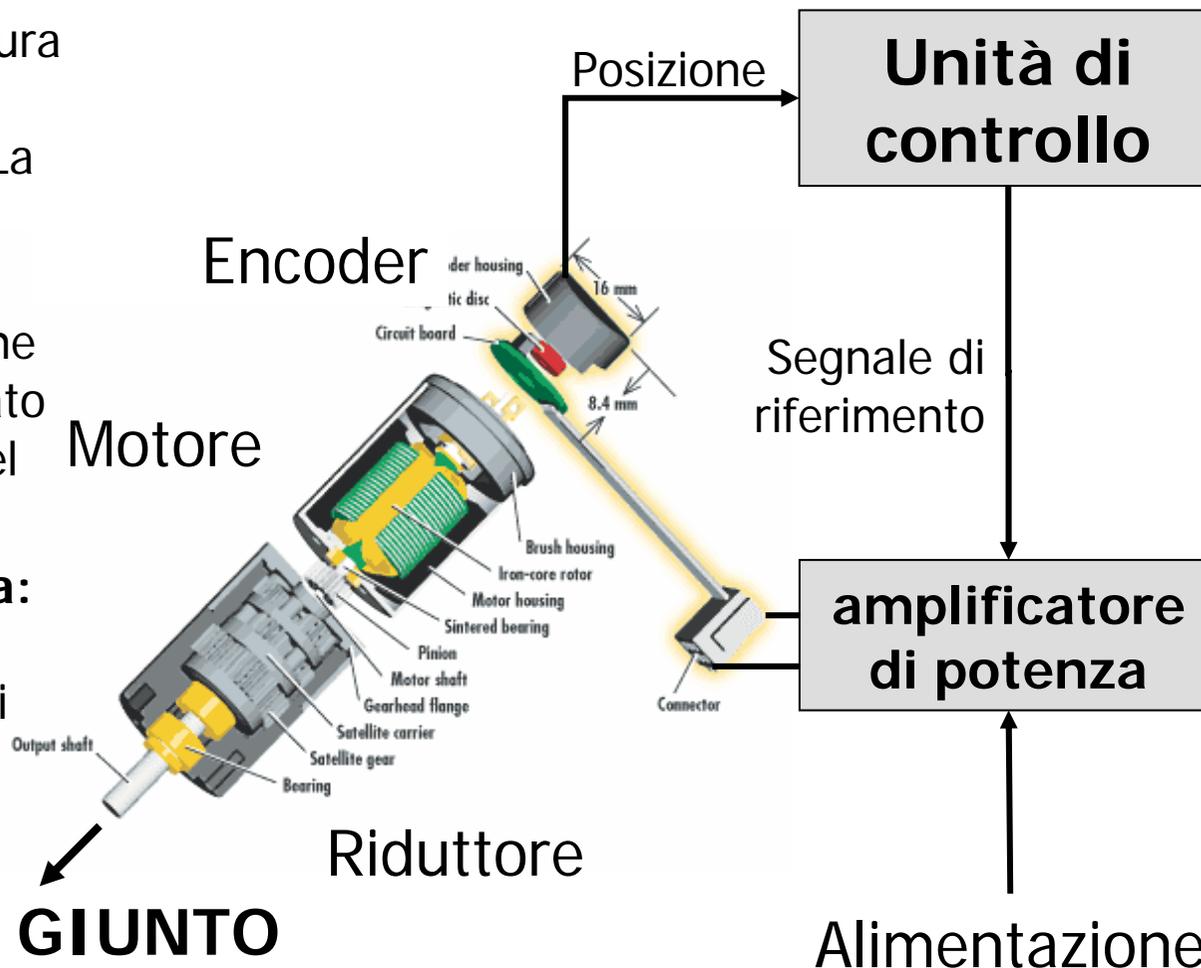
# Schema di una unità di controllo

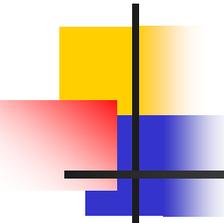


A tensioni in ingresso al motore di segno opposto corrispondono rotazioni opposte del motore

# 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: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



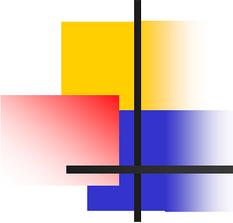


# Relazione tra posizione del giunto e posizione encoder

---

- $\theta$ : posizione giunto in gradi
- $q$ : posizione giunto in tacche di encoder
- $N$ : rapporto di riduzione del motore
- $R$ : risoluzione dell'encoder (numero di tacche per giro)

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



# Controllo del moto di un giunto

---

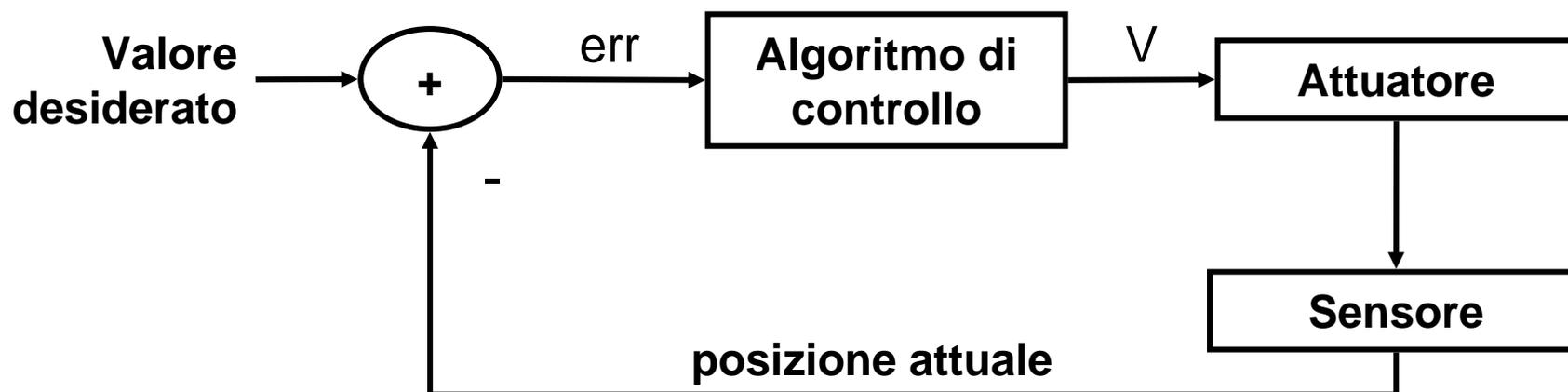
- Obiettivo: muovere il giunto dalla posizione attuale  $\theta_i$  (espressa in gradi) alla posizione desiderata  $\theta_f$  in un intervallo di tempo  $t$  :

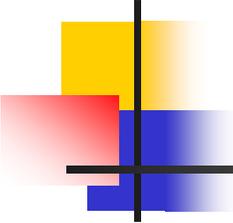
- $\theta_i \Rightarrow \theta_f$                        $\theta_i \Rightarrow q_i$

- $q_i \Rightarrow q_f$                        $\theta_f \Rightarrow q_f$

# Controllo ad anello chiuso (feedback control)

- 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):

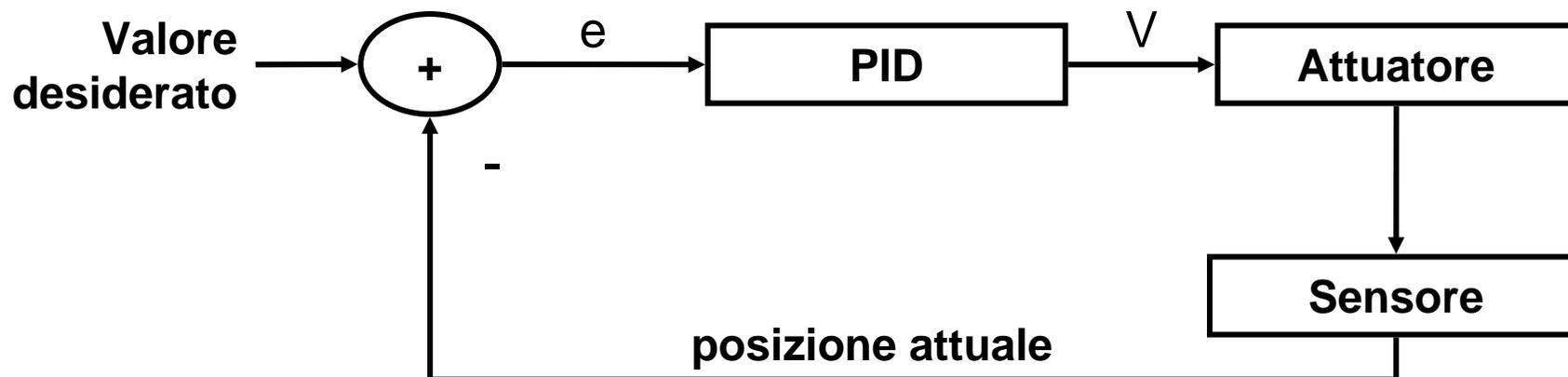
---

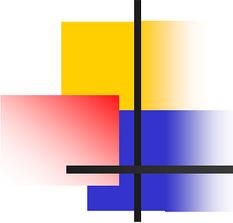
- E' un sistema di controllo ad anello chiuso in cui l'errore è processato con un algoritmo di tipo **Proporzionale, Integrativo e derivativo**.
- Quest'algoritmo è composto di tre parti:
  - proporzionale, così detta perché il suo effetto è proporzionale all'errore;
  - Integrativa, perché produce in 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 P.I.D.

# 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):

---

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

$$e_q = q_d - q$$

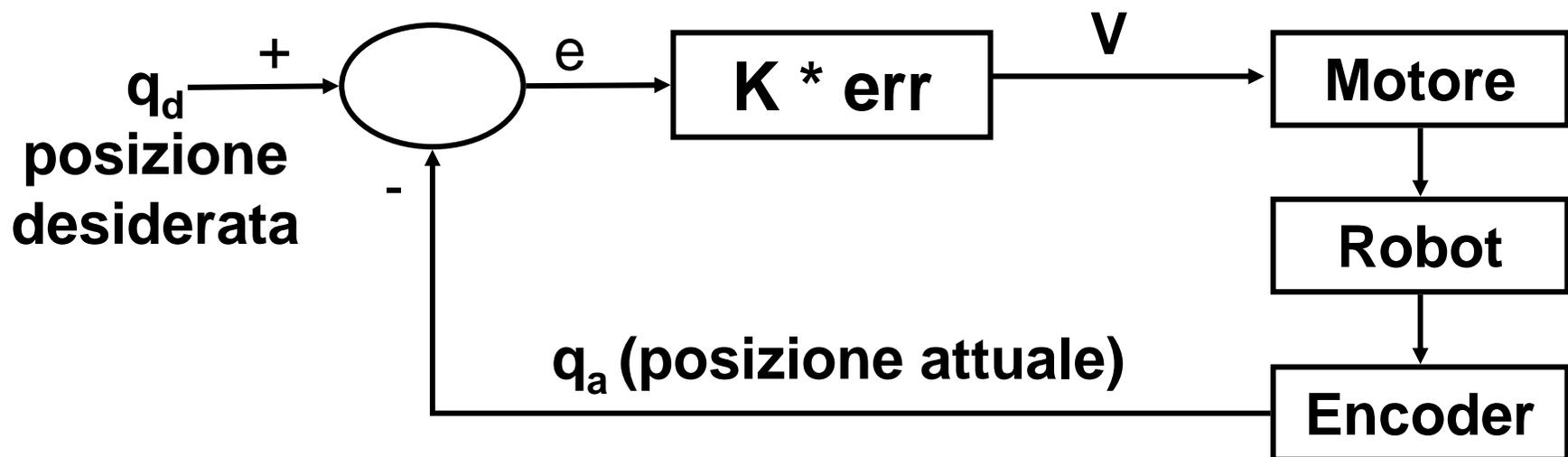
$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

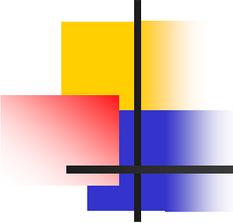
- $K_p$  è il guadagno o costante *proporzionale*
- $K_i$  è il guadagno o costante *integrale*
- $K_d$  è il guadagno o costante *derivativa*
- $e$  rappresenta l'errore, ovvero la differenza tra posizione desiderata e la posizione attuale

# Controllo 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

$$V = K_p e_q$$

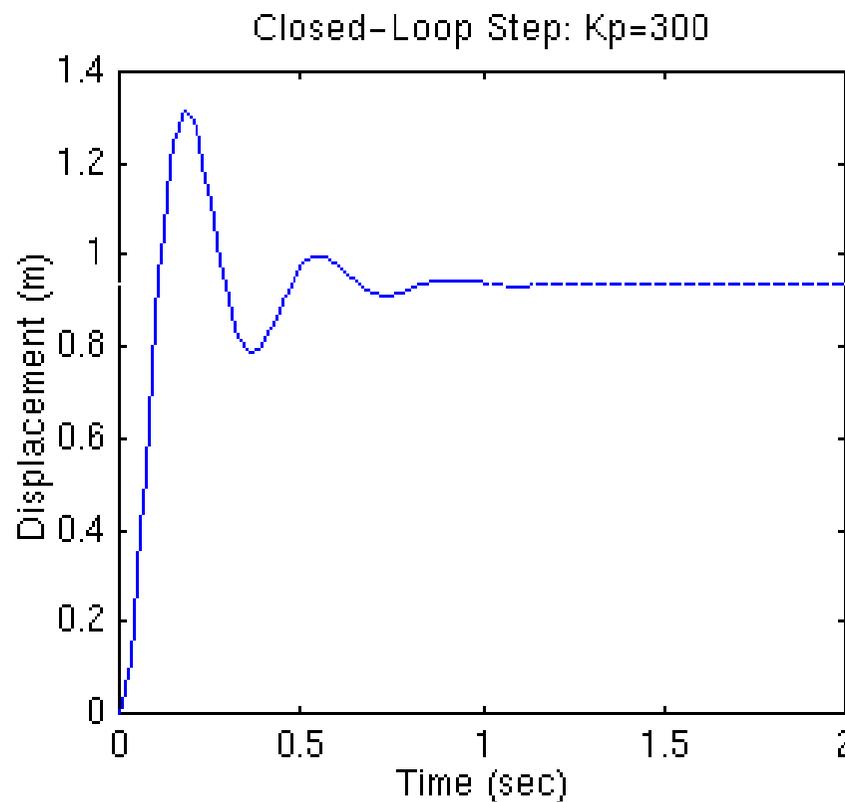
$$e_q = q_d - q$$

$K_p$  costante proporzionale

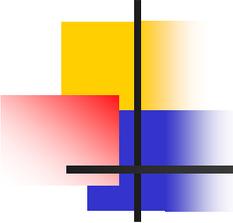
# Controllo PID

## 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:

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

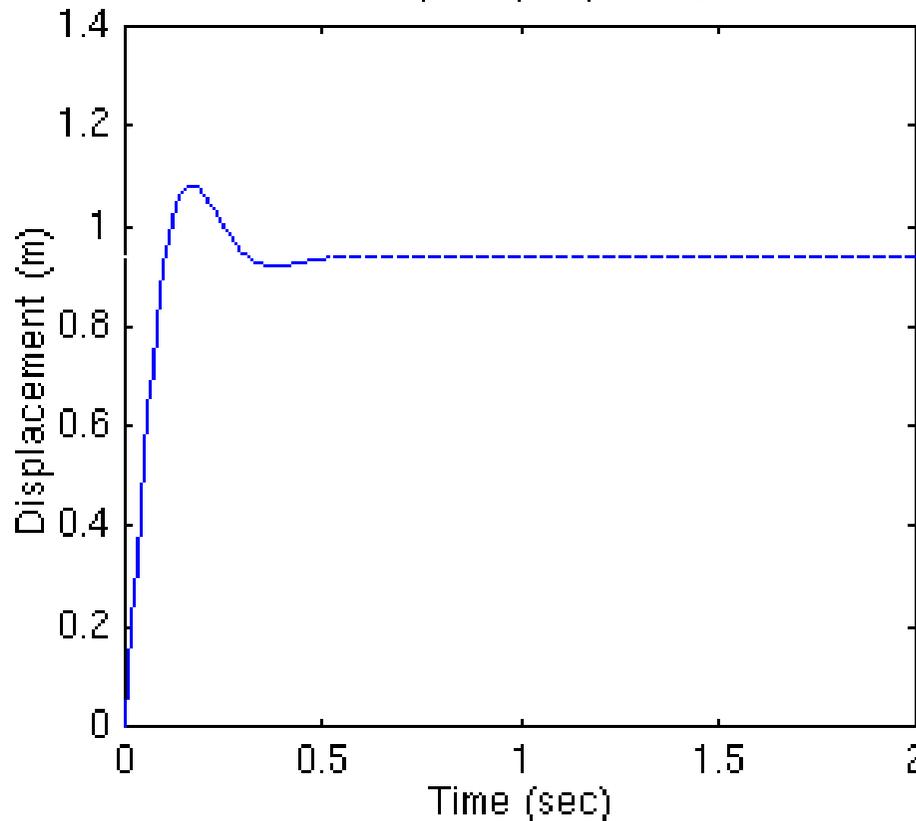
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q \quad K_d \text{ costante derivativa}$$

$$e_q = q_d - q$$

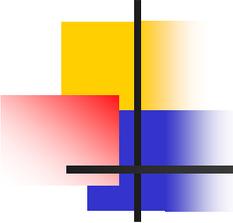
# Controllo PID

## 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

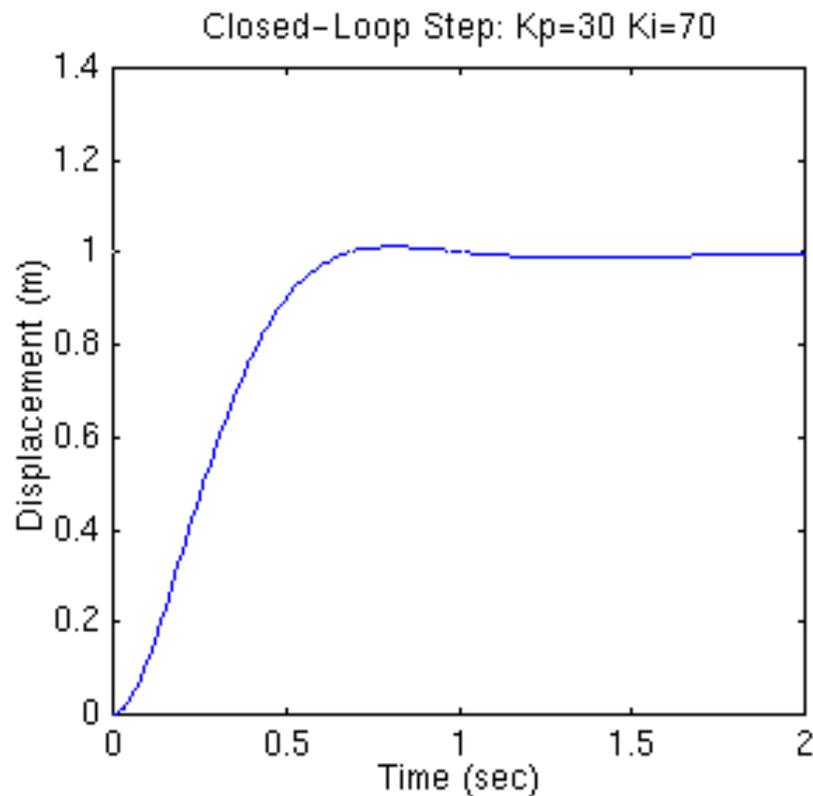
$$V = K_p e_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

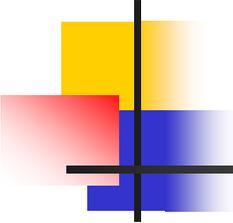
$K_i$  costante integrativa

# Controllo PID

## Controllo Proporzionale e Integrativo:



- Il sistema si assesta annullando l'errore



# Controllo PID

---

- **Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo**

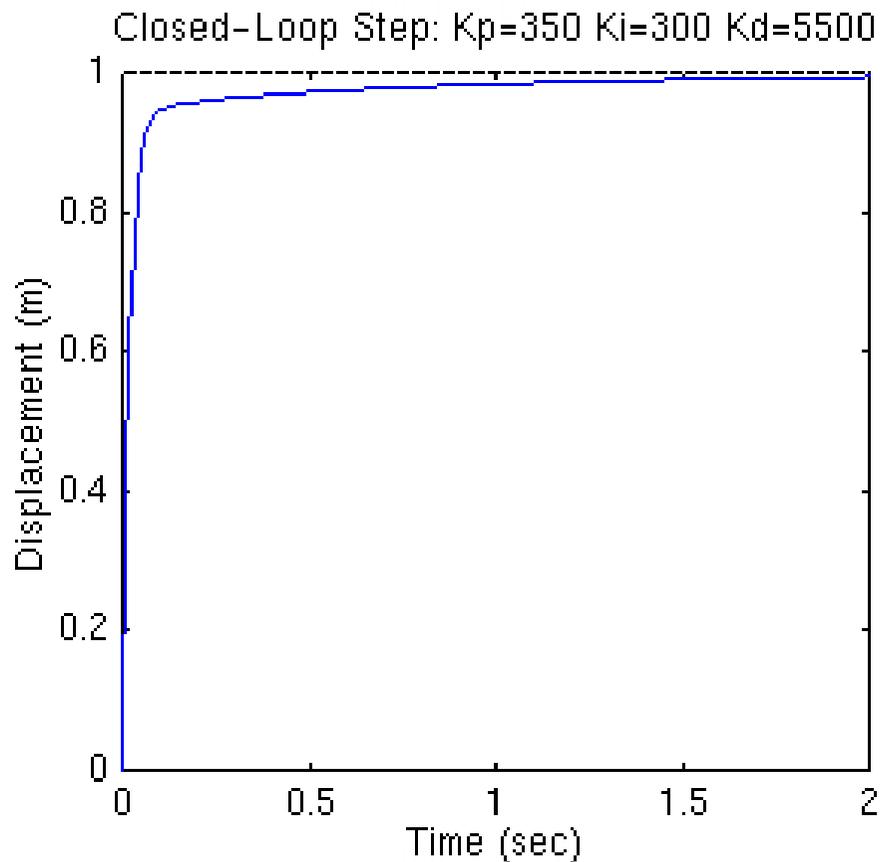
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

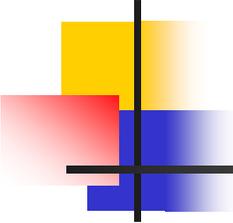
$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

# Controllo PID

## Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo:



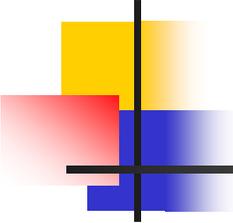
- Le costanti  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  vengono determinate in modo empirico o con metodi specifici



# Controllo del moto di un manipolatore

---

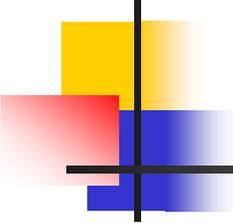
- Obiettivo del controllo del moto di un manipolatore è muovere il braccio da una posizione iniziale ad una posizione finale espresse nelle coordinate dello spazio operativo
- In generale, il problema del controllo del moto di un manipolatore consiste nel determinare l'andamento delle forze o coppie 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**



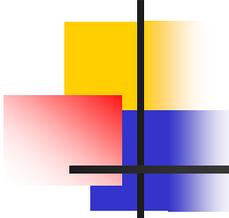
# Pianificazione di traiettorie

---

**OBIETTIVO:** generare gli ingressi di riferimento per il sistema di controllo del moto per muovere il braccio da  $x_{start} \rightarrow x_f$

**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

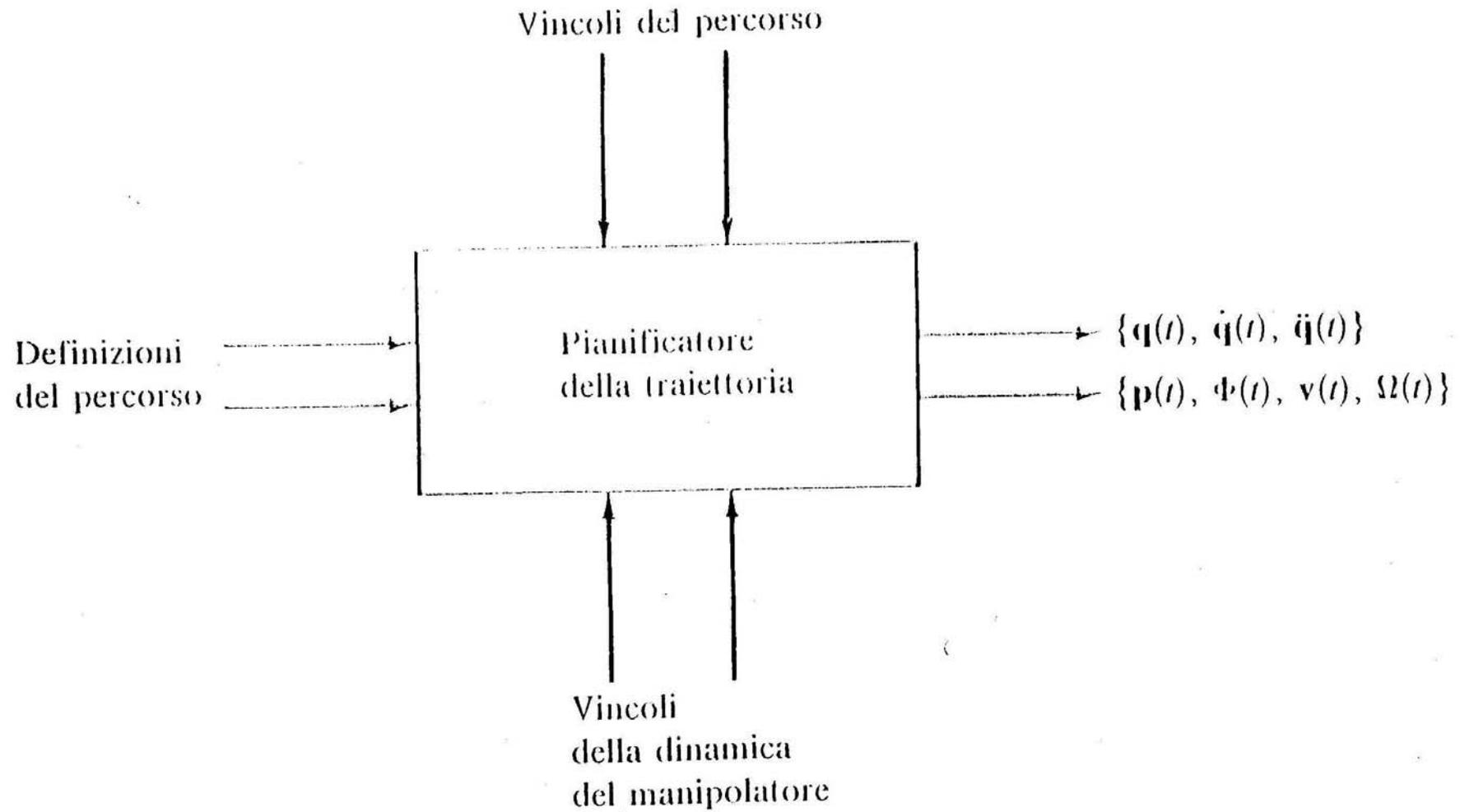
vincoli del percorso

vincoli dovuti alla dinamica del manipolatore

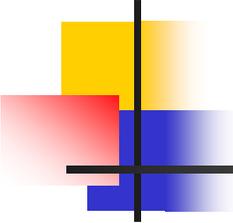
DATI IN OUTPUT:

**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.

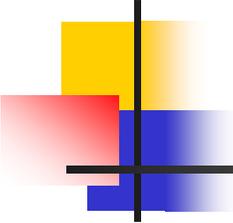


# Pianificazione di traiettorie

---

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)

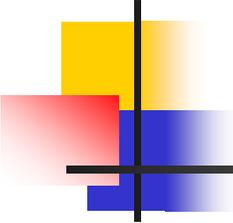


# Controllo del moto di un manipolatore

---

Il controllo del moto può essere realizzato nello

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



# Controllo del moto nello spazio dei giunti

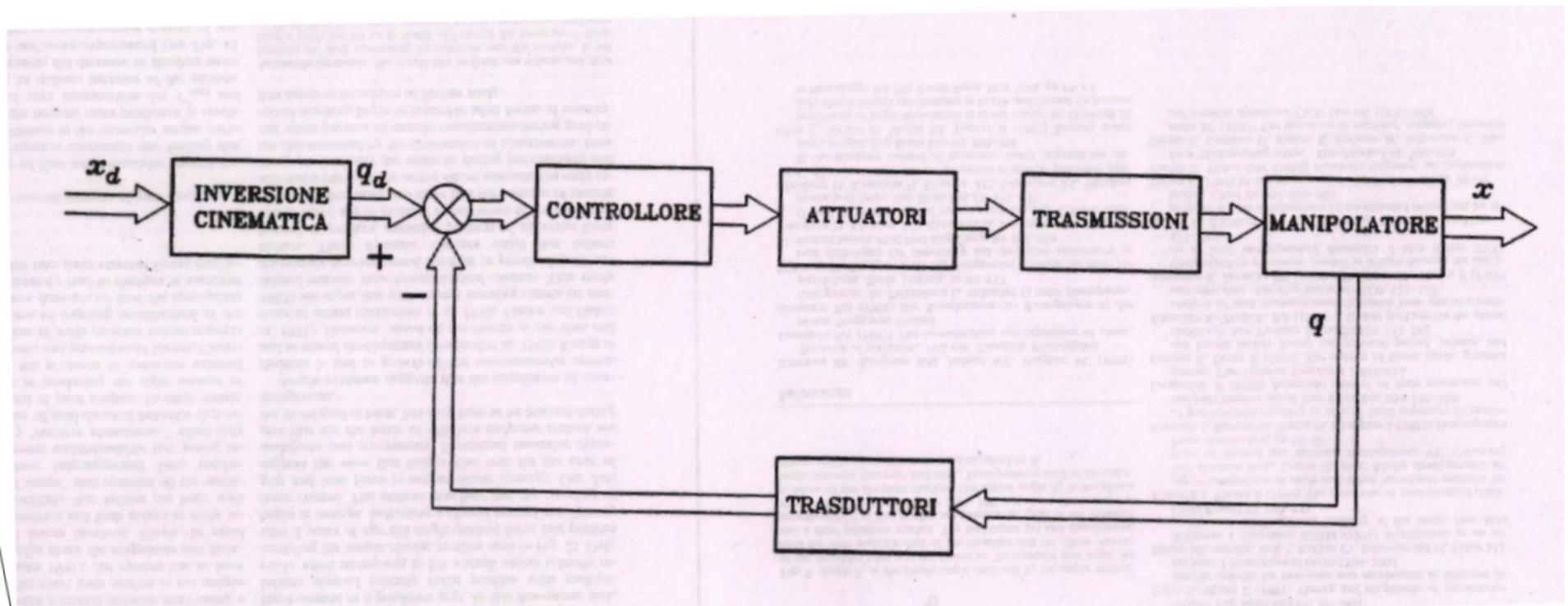
---

- 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  $q_f$  tramite la cinematica inversa

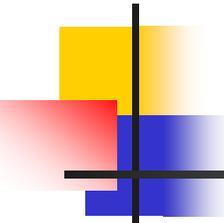
$$q_d = K^{-1}(x_d)$$

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

# Controllo del moto nello spazio dei giunti



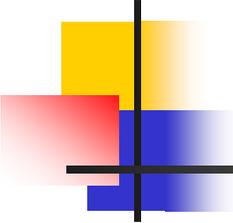
L'inversione cinematica viene effettuata al di fuori del ciclo di controllo



# Controllo del moto nello spazio dei giunti

---

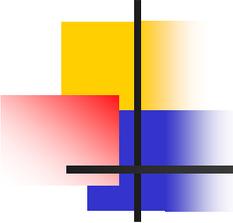
- Nell'effettuazione del movimento l'organo terminale del manipolatore esegue nello spazio operativo un percorso non prevedibile, a causa degli effetti non lineari introdotti dalla cinematica diretta



# 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

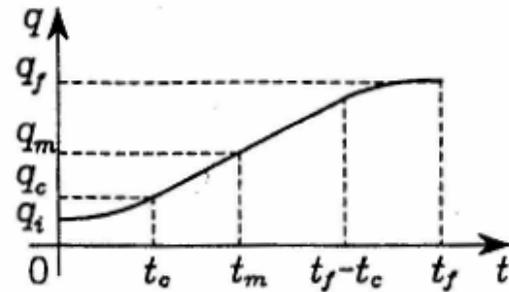
---

## **Profilo di velocità trapezoidale**

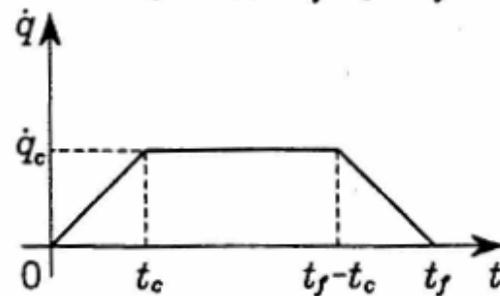
- Presenta una accelerazione costante nella fase di partenza, una velocità di crociera e una decelerazione costante nella fase di arrivo.
- La traiettoria corrispondente è di tipo polinomiale misto: un tratto lineare raccordato con due tratti parabolici nell'intorno delle posizioni iniziale e finale.

# Profilo di velocità trapezoidale

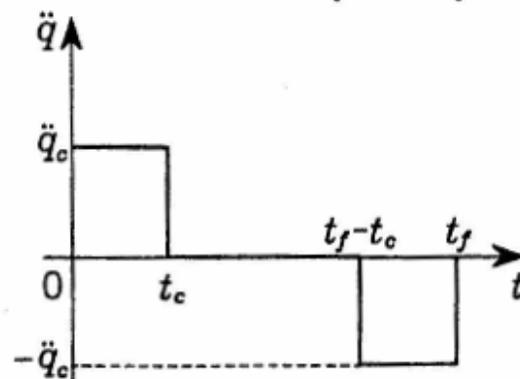
Posizione



Velocità



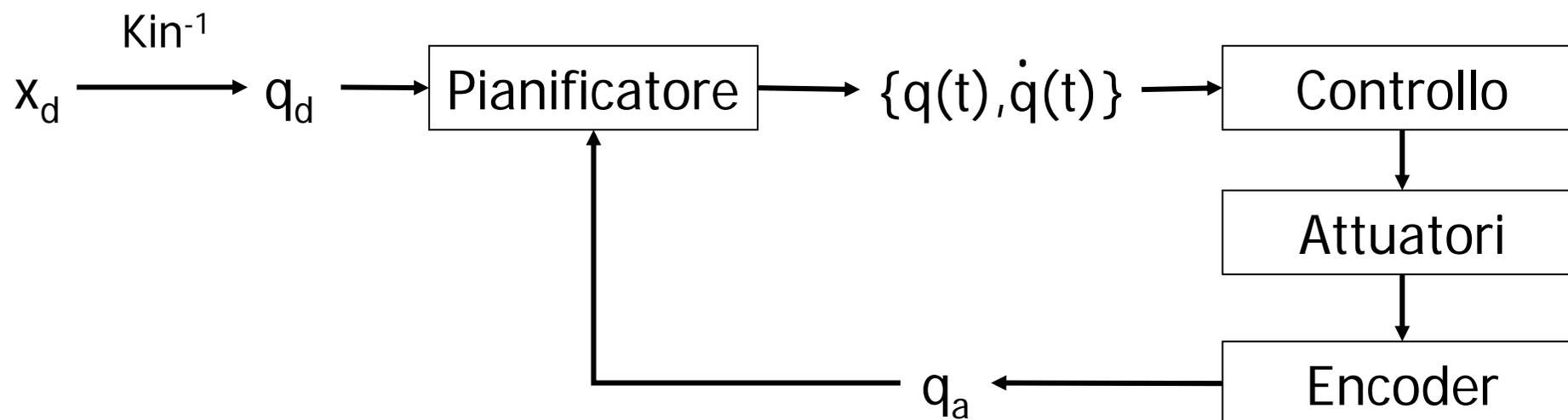
Accelerazione

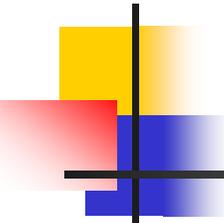


NB: velocità ed accelerazioni all'istante finale ed iniziale possono essere diverse da zero

# 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

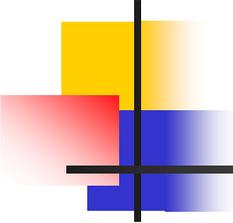




# Controllo del moto nello spazio operativo

---

- 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

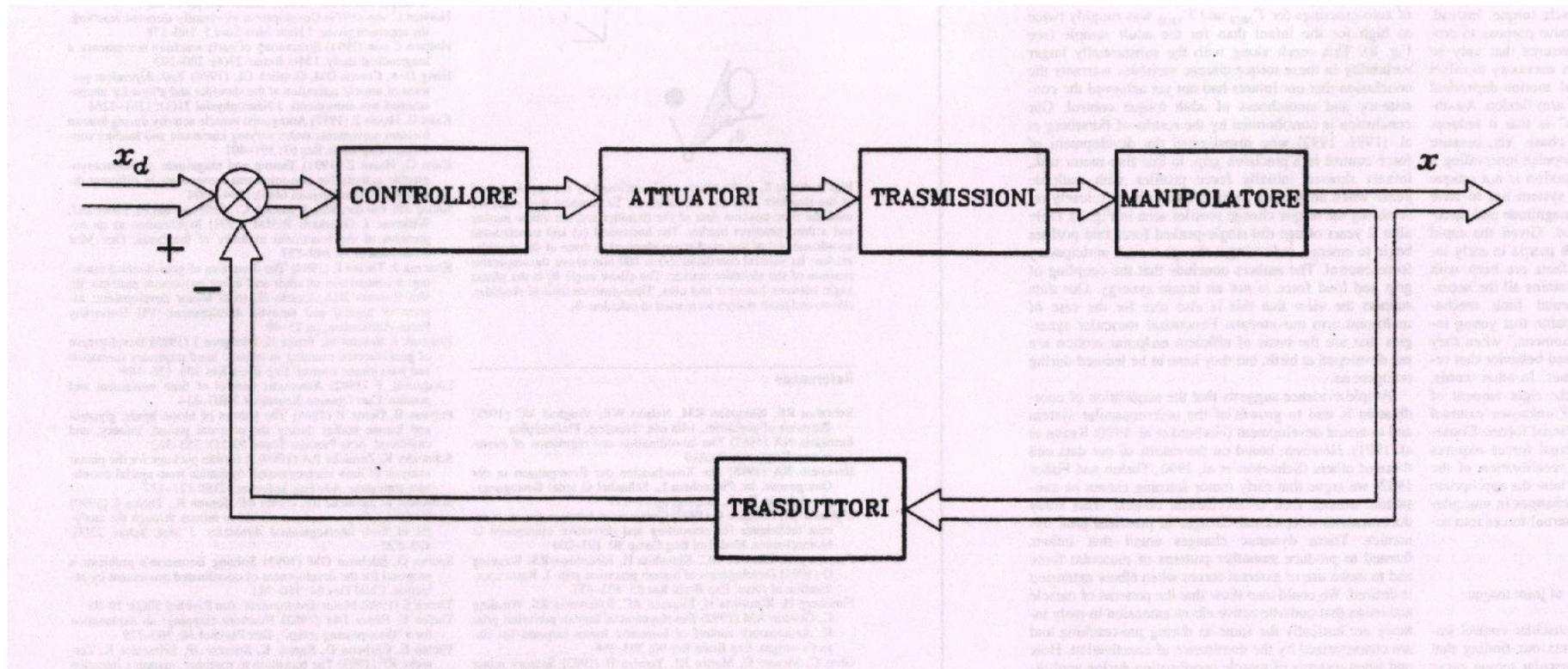


# Traiettorie nello spazio operativo

---

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

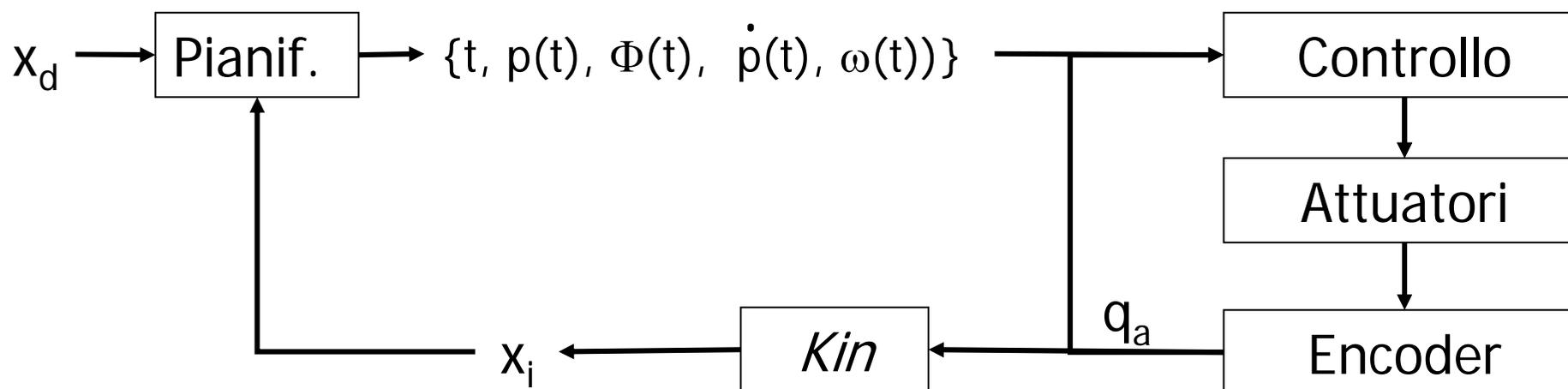
# Controllo del moto nello spazio operativo

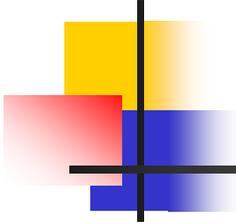


**L'inversione cinematica viene effettuata all'interno del ciclo di controllo**

# 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



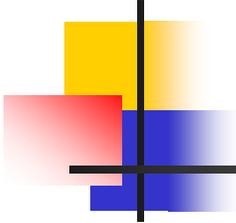


# Controllo del moto nello spazio operativo

---

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

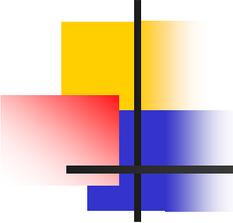
- 1) Inversione cinematica per convertire le specifiche di moto espresse nello spazio operativo in specifiche di moto nello spazio dei giunti
- 2) Sistema di controllo nello spazio dei giunti in grado di garantire l'inseguimento dei riferimenti ottenuti al punto 1)



# 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

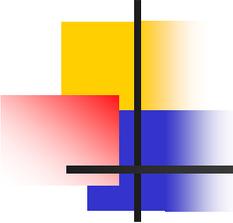


# Cinematica differenziale

---

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 geometrico** = matrice di trasformazione dipendente dalla configurazione corrente del braccio

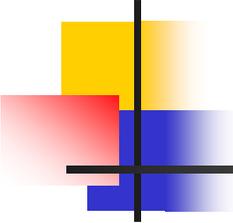
$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

$J(q)$  = Jacobiano geometrico

$\dot{p}$  = velocità dell'effettore finale

$\omega$  = velocità di rotazione dell'effettore finale

$\dot{q}$  = velocità ai giunti



# Cinematica differenziale

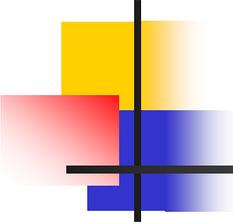
---

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

---

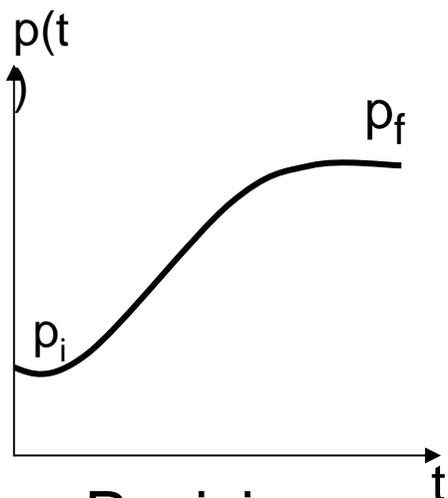
Le configurazioni che causano una diminuzione di rango della matrice Jacobiana  $J$  sono dette ***singularità cinematiche***.

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**

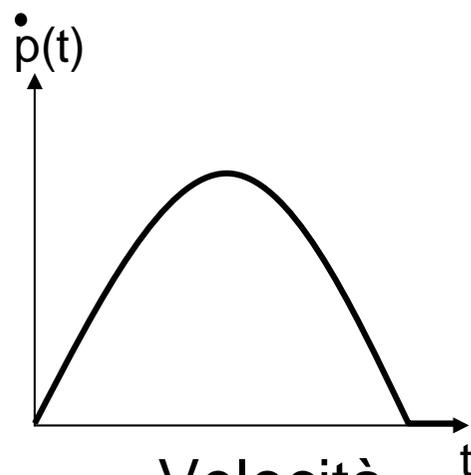
# Controllo del moto nello spazio operativo

## Pianificatore delle traiettorie



Posizione  
nello spazio  
operativo nel  
tempo

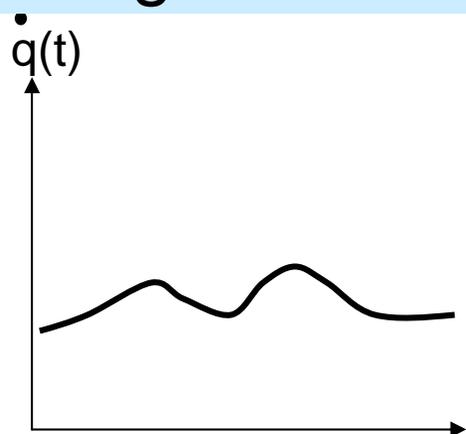
$(t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t))$



Velocità  
dell'effettore  
finale nel  
tempo

$J^{-1}(q(t))$   
→

## Velocità ai giunti



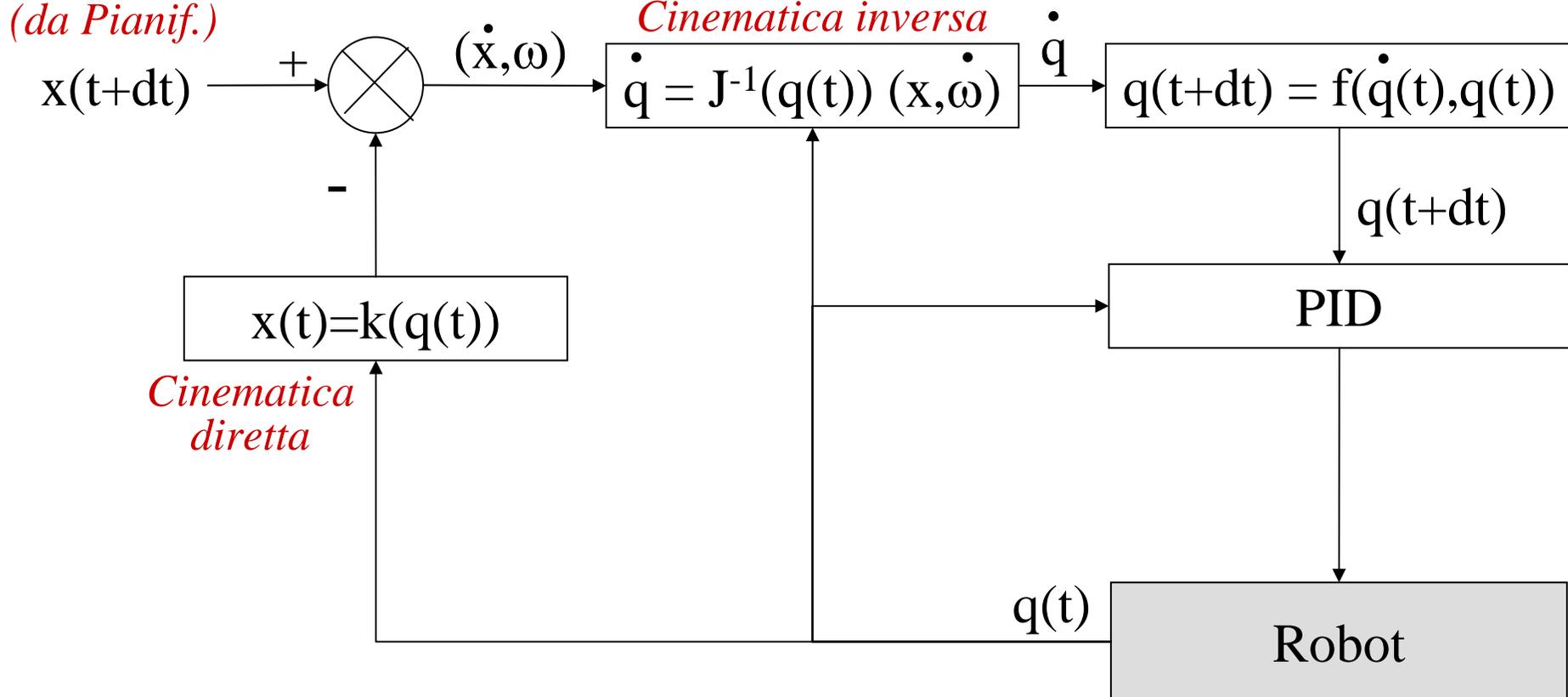
Velocità dei  
giunti nel  
tempo

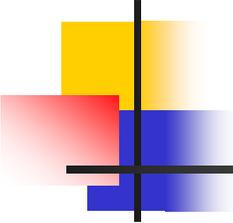
$J^{-1}(q(t))$   
→

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

# Controllo del moto nello spazio operativo

*Posizione desiderata (da Pianif.)*

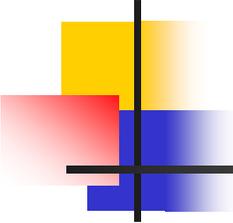




# Performance di un manipolatore industriale

---

- **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

---

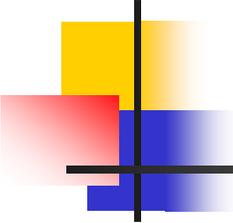
- Dof: 6
- Payload: 15 kg
- Max. reach: 1570 mm
- Repeatability:  $< \pm 0.1$  mm
- Weight: 222 kg



# Il manipolatore PUMA 560

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

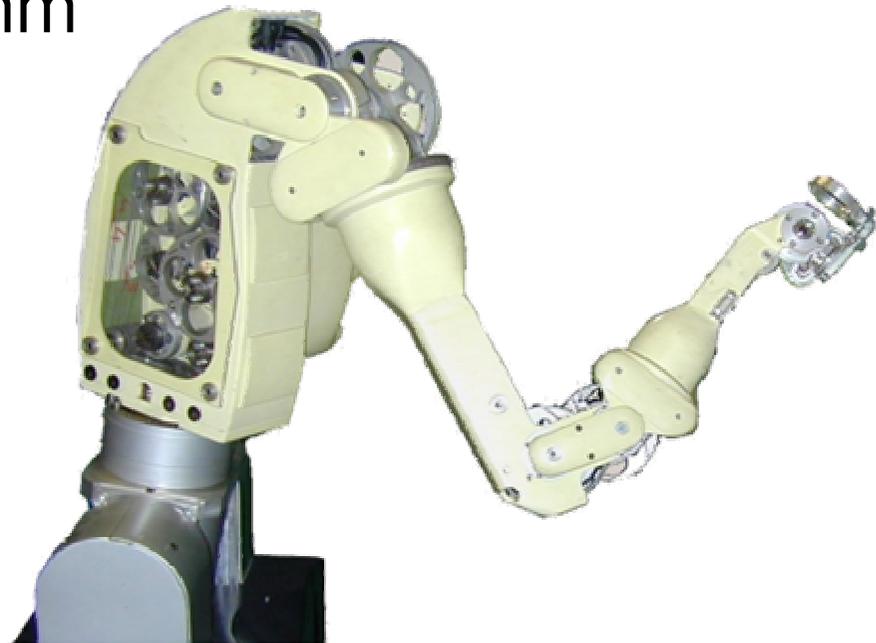




# Dexter Arm

---

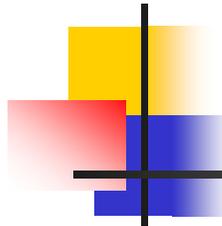
- Cable actuated
- d.o.f.: 8
- Workspace: 1200 mm x 350°
- Repeatability: + 1mm
- Velocity: 0.2 m/s
- Payload: 2 Kg
- Weight: 40 Kg



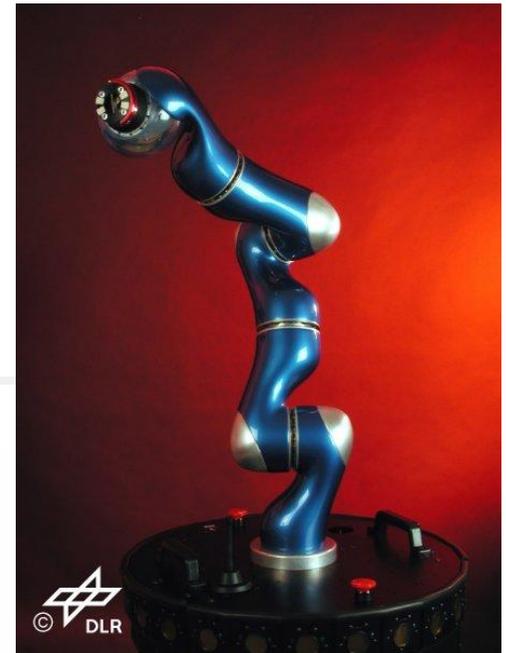
# Manus

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

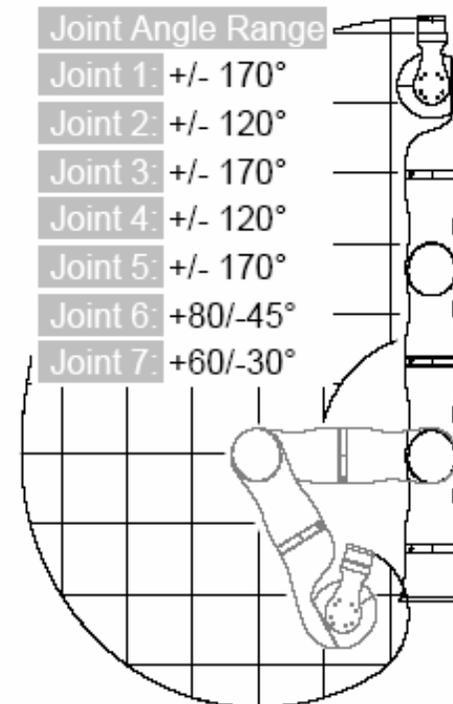


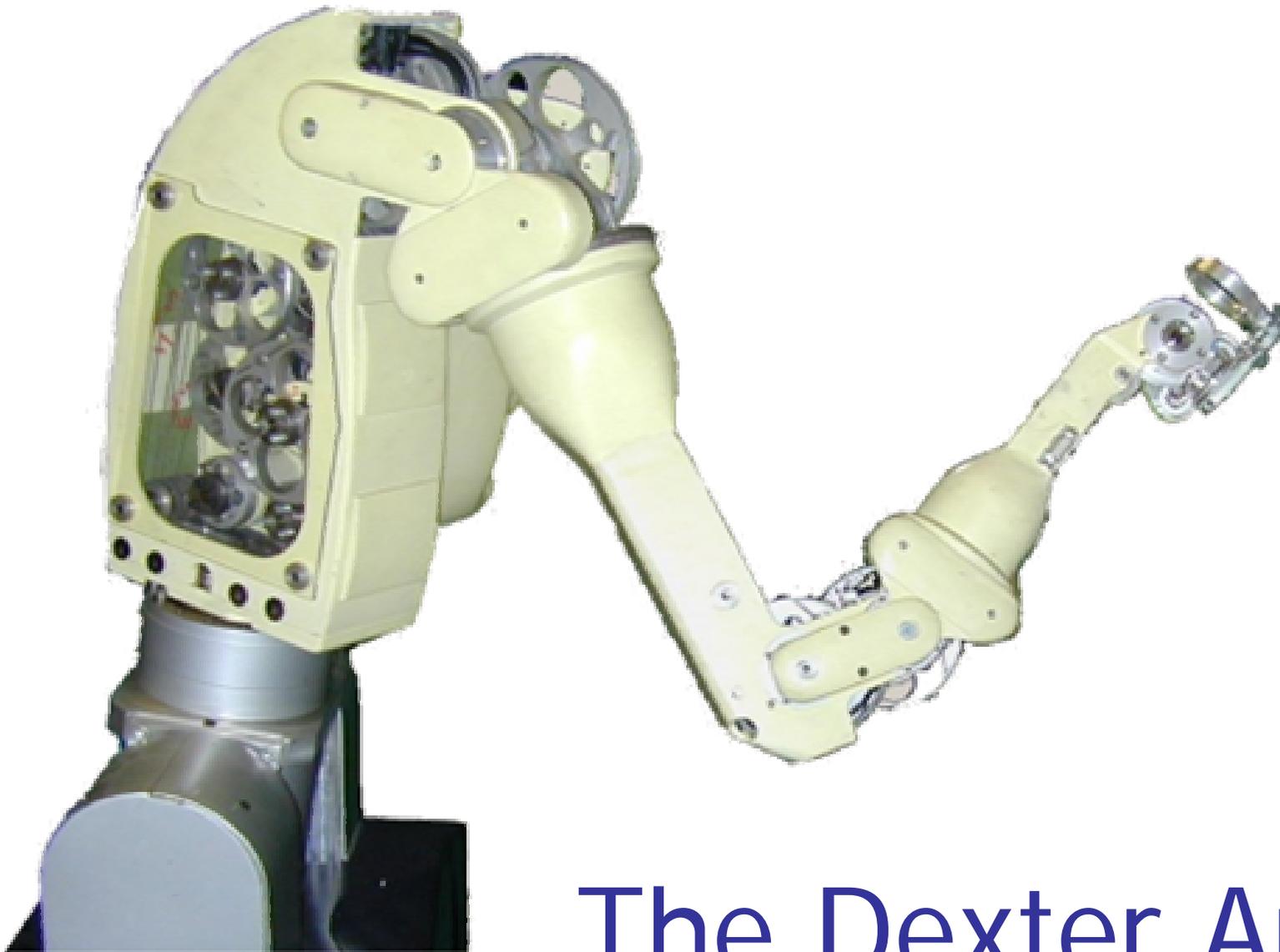


# DLR Arm

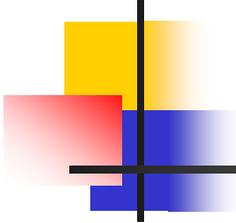


Total Weight	14 kg
Max. Payload	14 kg
Max. Joint Speed	120°/s
Nr. of Axes	7 (R - P - R - P - R - P - P)
Maximum Reach	936 mm
Motors	DLR-Robodrive
Gears	Harmonic Drive
Sensors (each Joint)	2 Position, 1 Torque Sensor
Sensor (wrist)	6-DOF Force/Torque Sensor
Brakes	Electromagnetic Safety Brake
Power Supply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





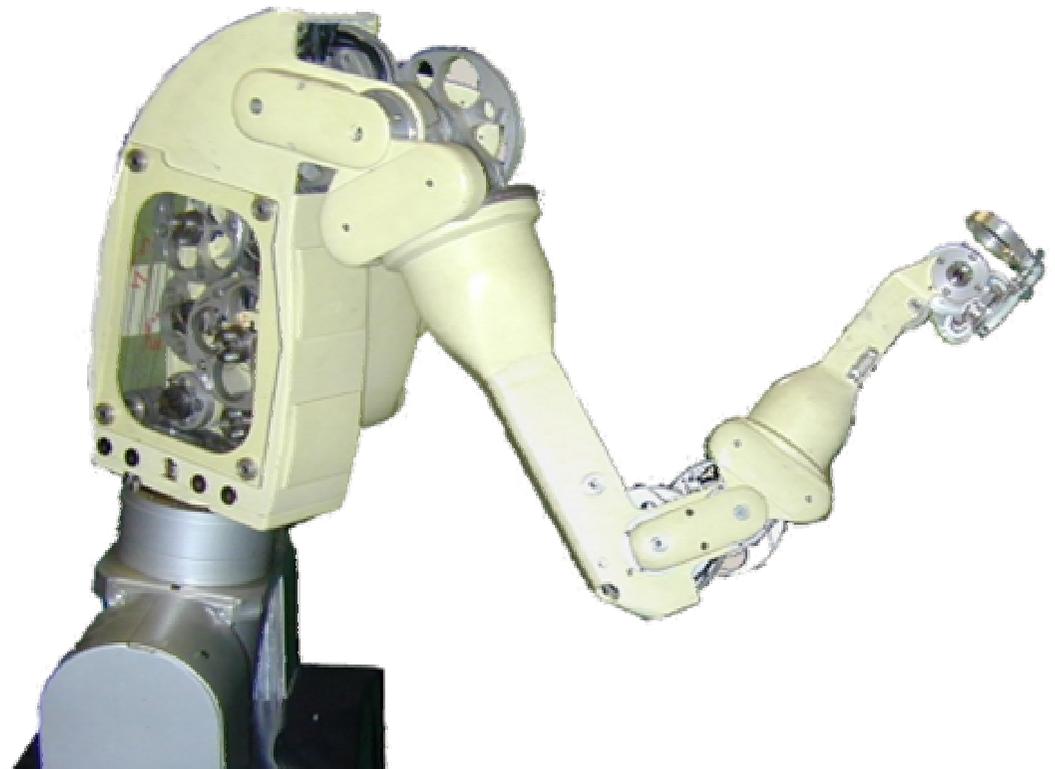
The Dexter Arm



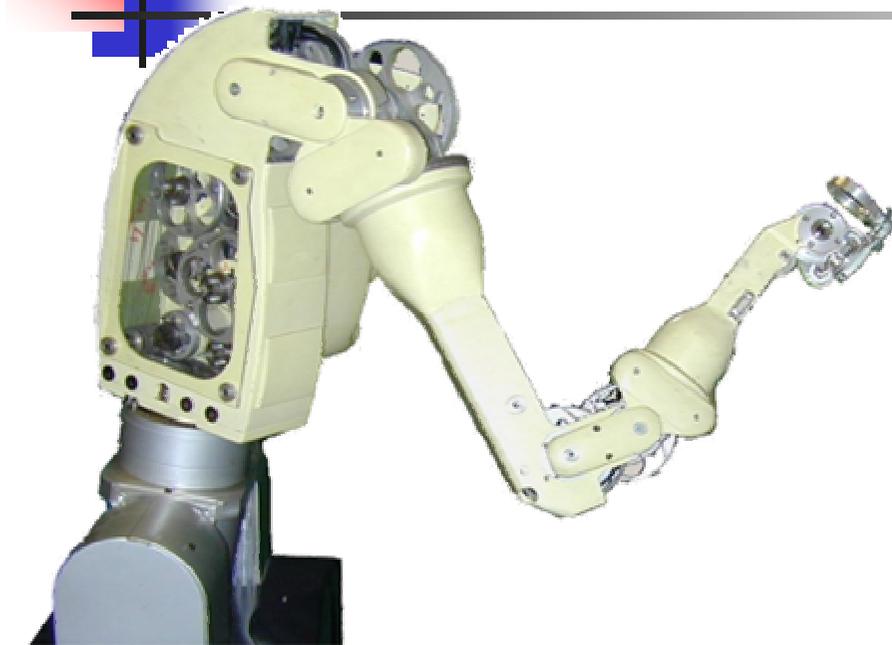
# The Dexter Arm

---

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



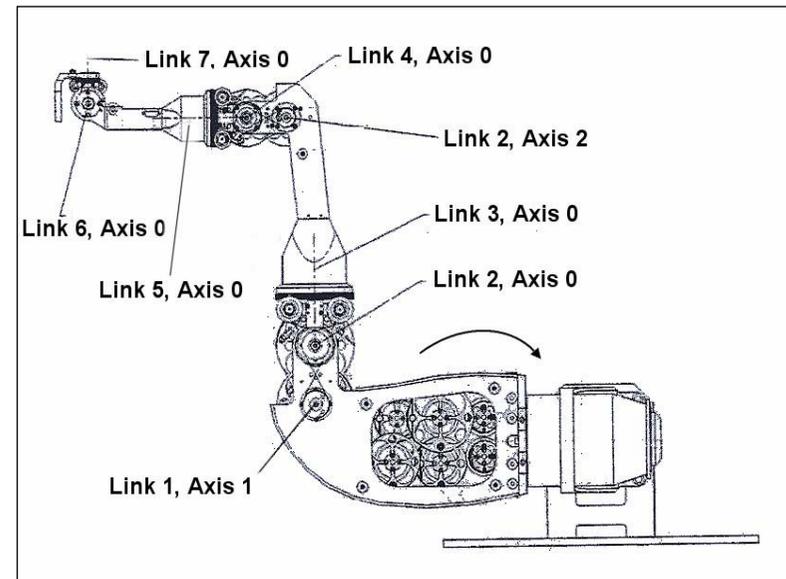
# The Dexter Arm



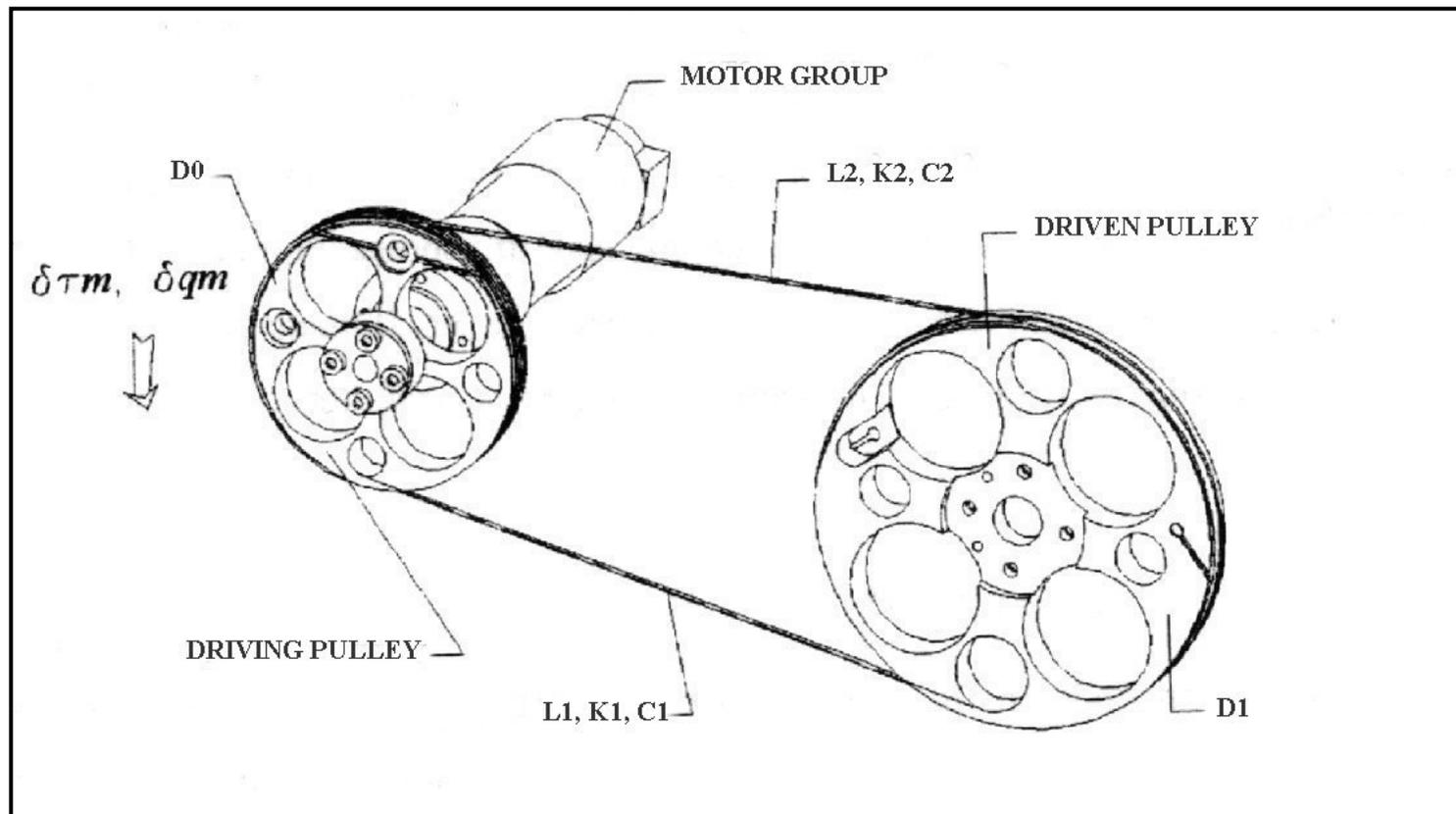
- 8-d.o.f. anthropomorphic redundant robot arm, composed of trunk, shoulder, elbow and wrist
- designed for service applications and personal assistance in residential sites, such as houses or hospitals
- mechanically coupled structure: the mechanical transmission system is realized with pulleys and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

# The Dexter arm

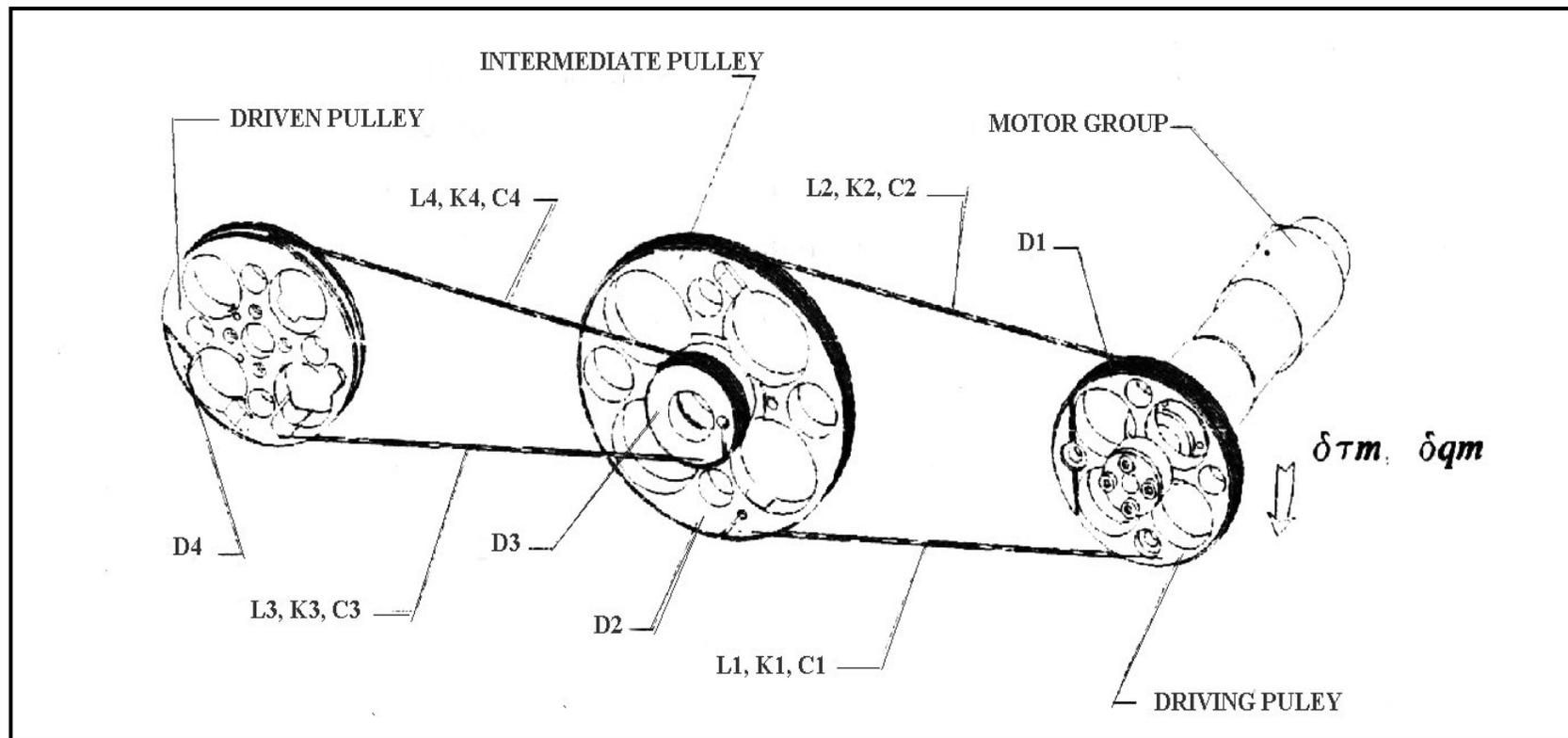
- Transmission system realized with pulleys and steel cables
- Joints J0 and J1 are actuated by motors and driving gear-boxes directly connected to the articulation axis
- Joints J2,...,J7 are actuated by DC-motors installed on link 1



# Trasmission #6



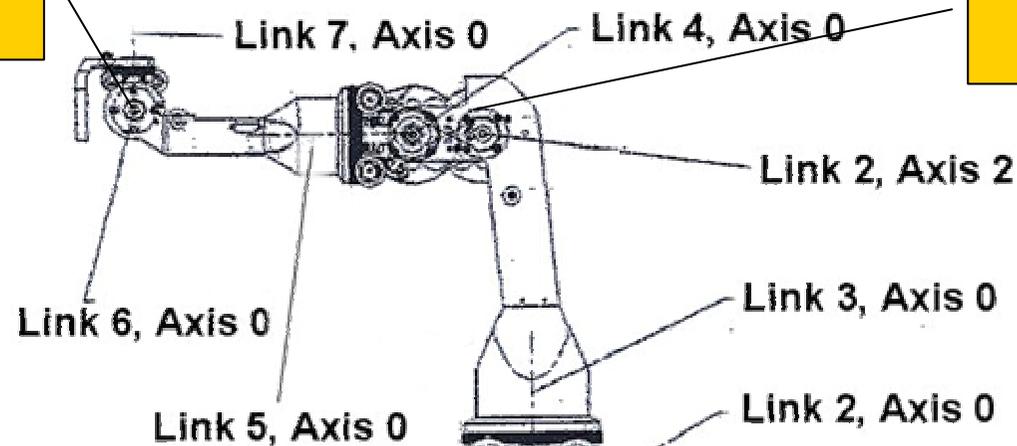
# Trasmissions #2-5 and 7



# Anthropomorphic structure

Wrist

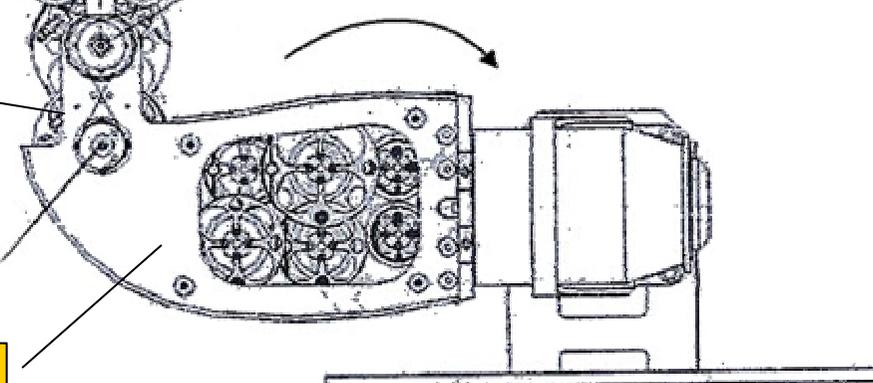
Elbow



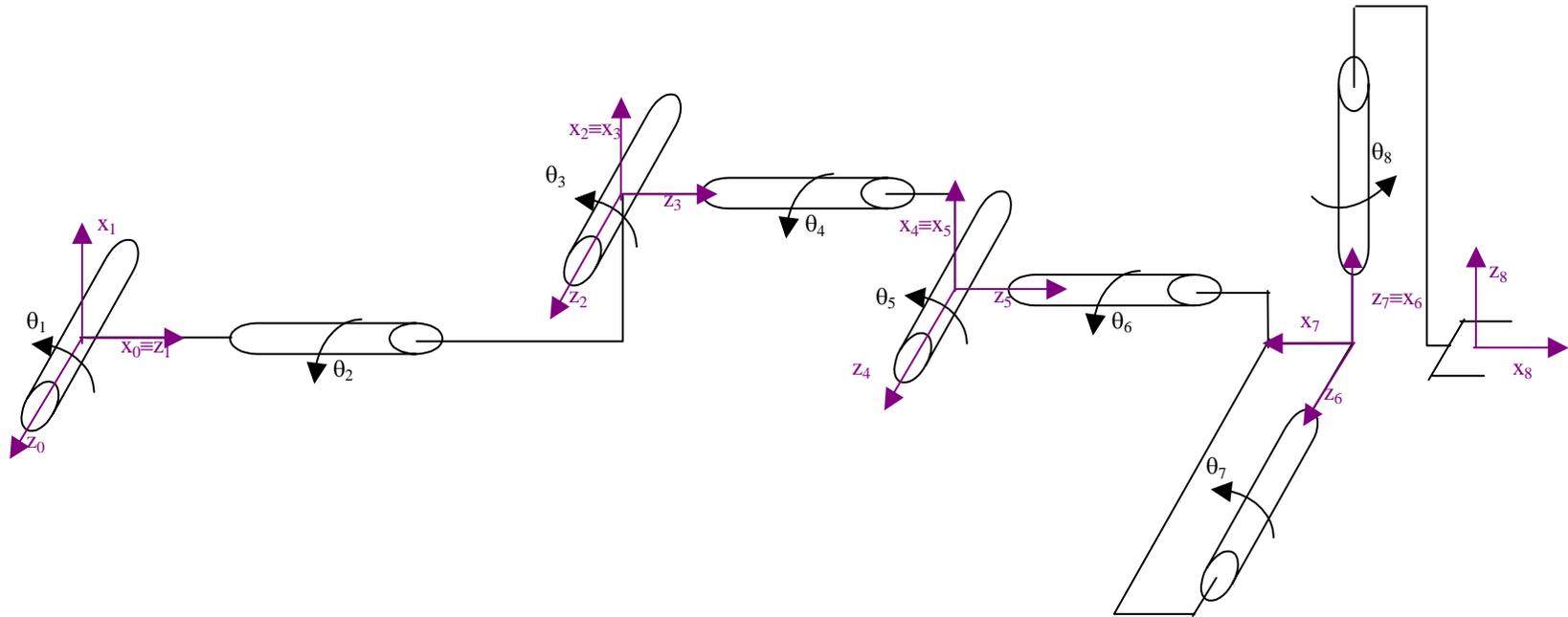
Shoulder

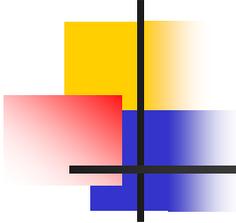
Link 1, Axis 1

Trunk



# Geometric Configuration

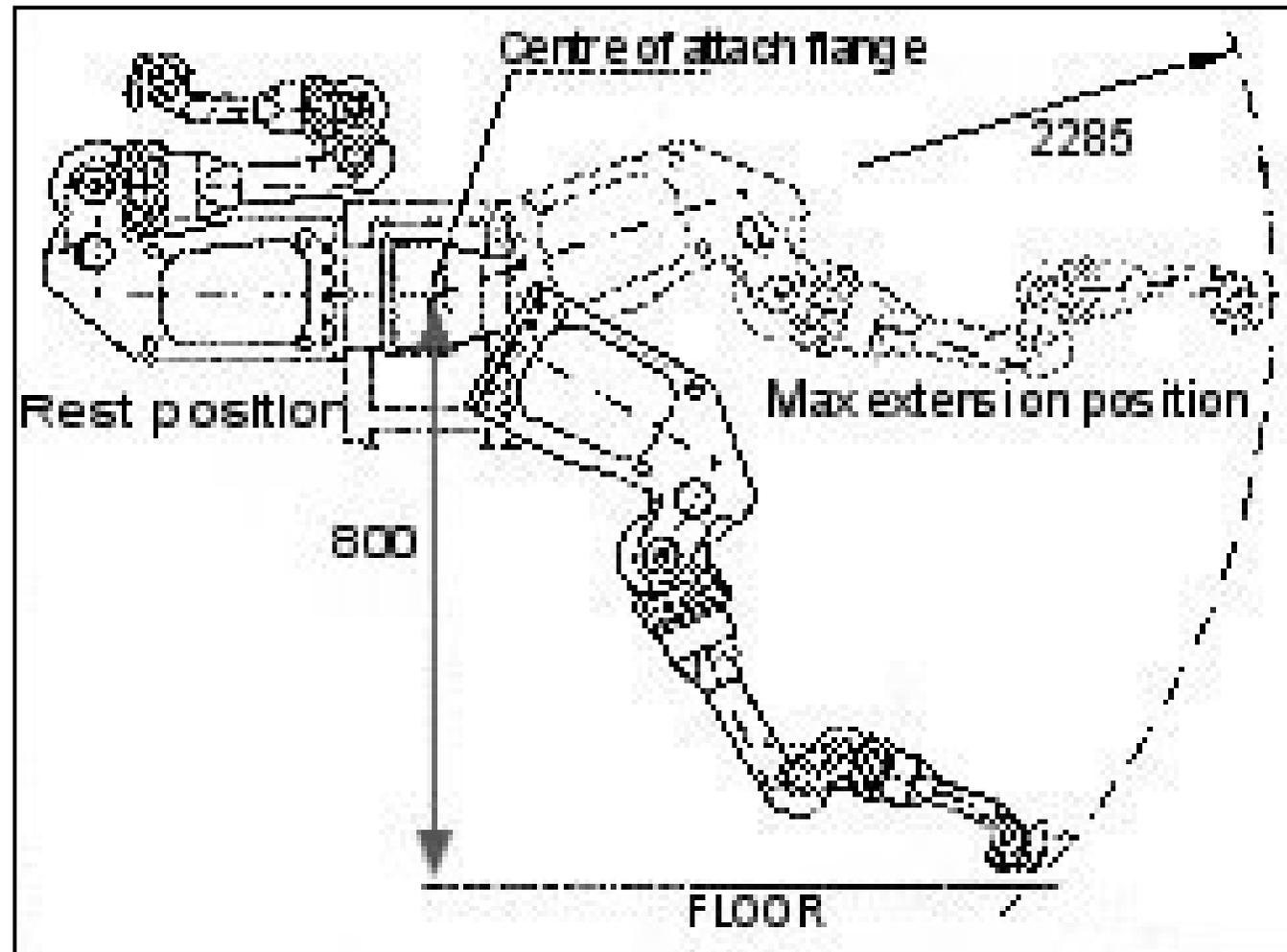




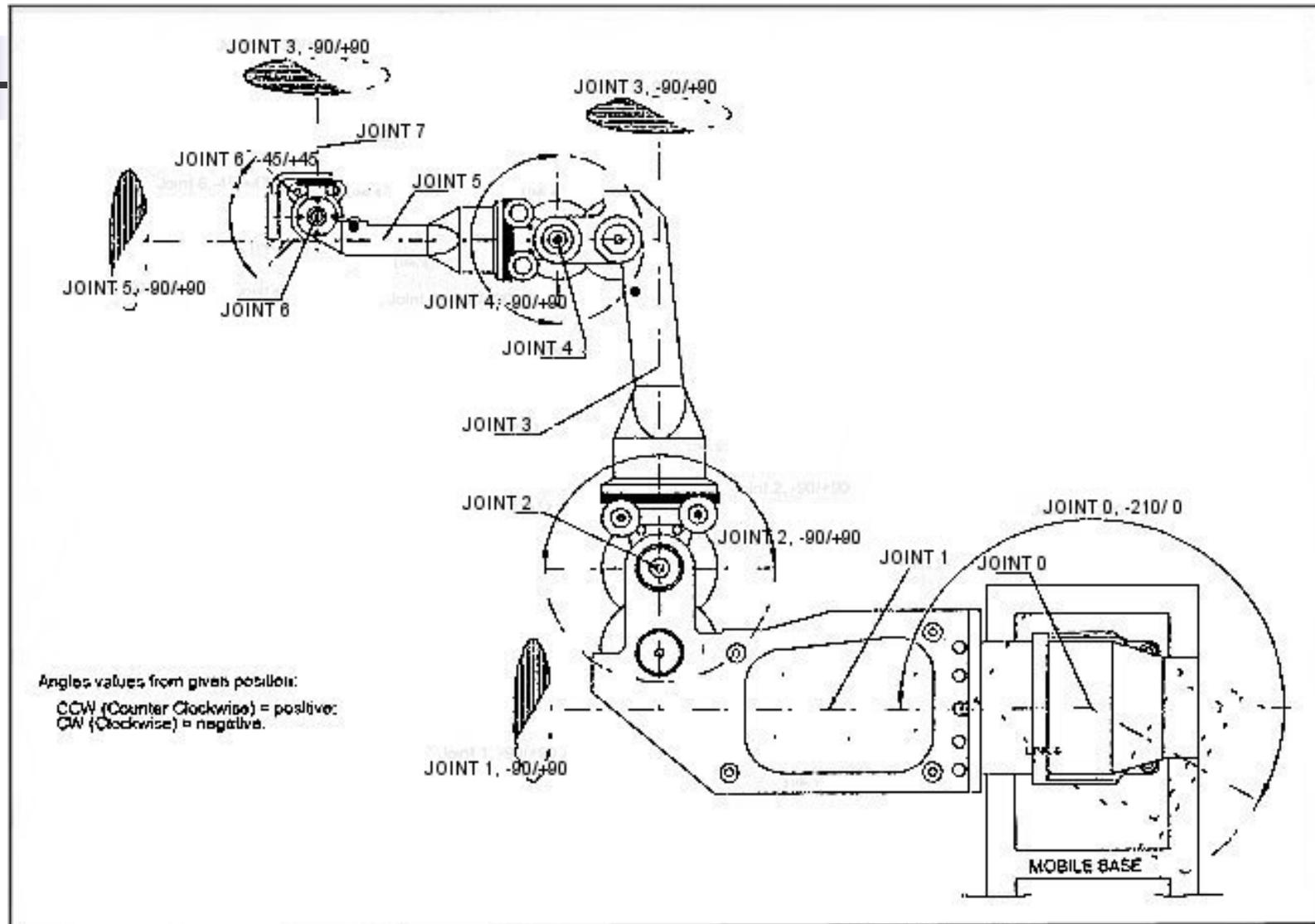
# Denavit-Hartenberg Parameters

<i>Joint</i>	$a_i$ [mm]	$d_i$ [mm]	$\alpha_i$ [rad]	$\theta_i$ [rad]
1	0	0	$\pi/2$	$\theta_1$
2	144	450	$-\pi/2$	$\theta_2$
3	0	0	$\pi/2$	$\theta_3$
4	-100	350	$-\pi/2$	$\theta_4$
5	0	0	$\pi/2$	$\theta_5$
6	-24	250	$-\pi/2$	$\theta_6$
7	0	0	$\pi/2$	$\theta_7$
8	100	0	0	$\theta_8$

# The Dexter Workspace

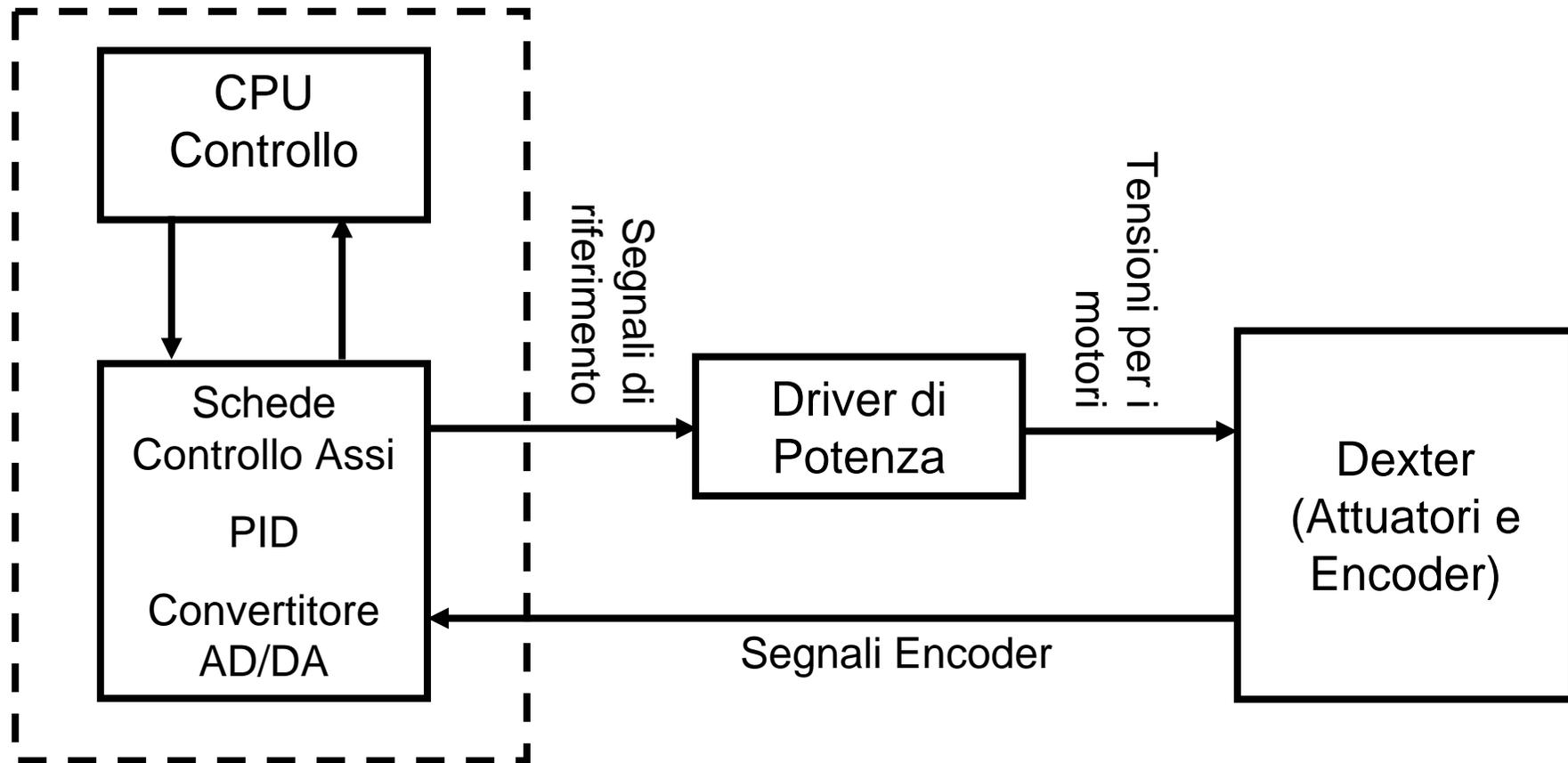


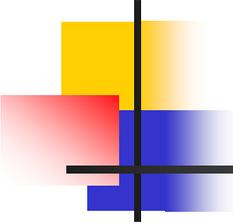
# Joint Ranges



# Sistema di controllo

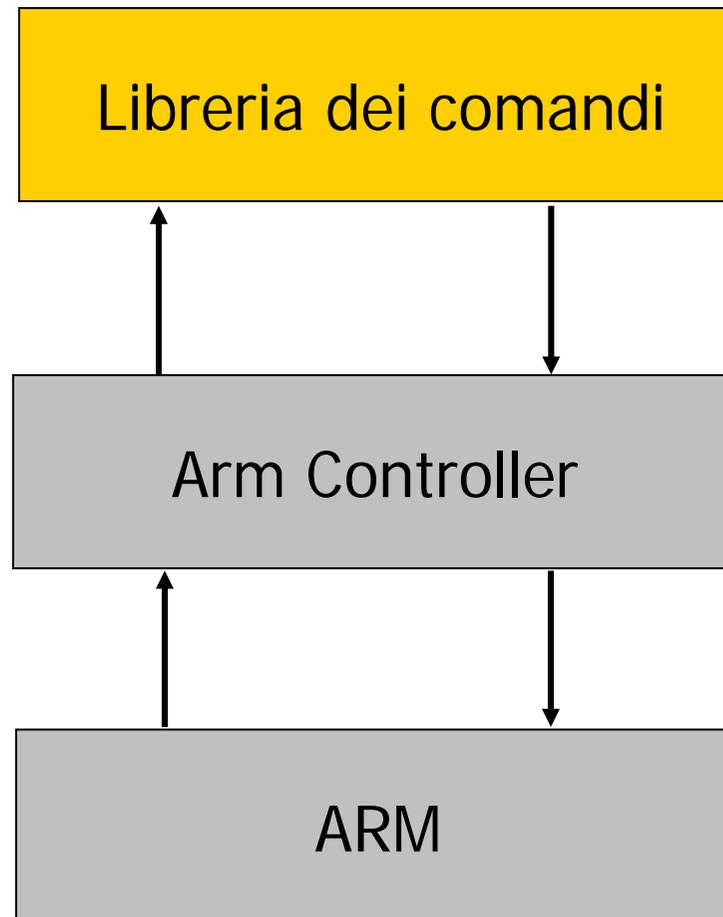
PC

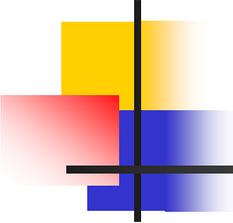




# Architettura software

---





# Interfacce Software

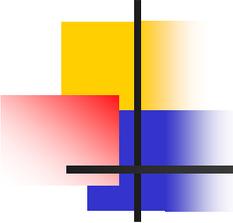
---

*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

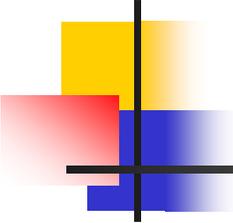


# Interfacce Software

---

*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



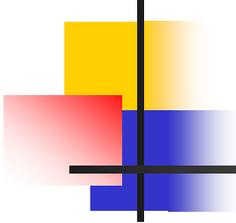
# Interfacce Software

---

*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