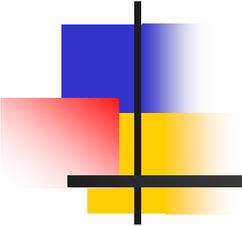


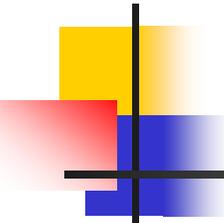
# Corso di Percezione Robotica (PRo)



## 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

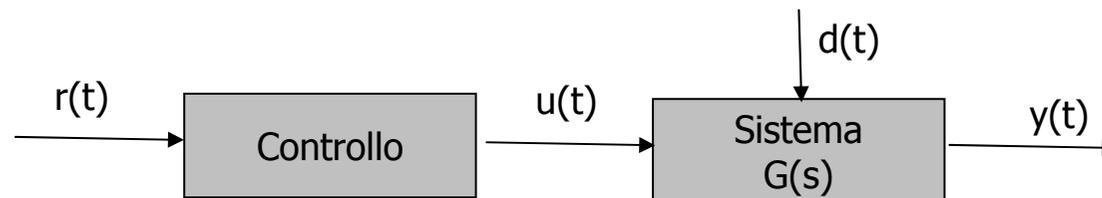
Dato un sistema  $S$  che genera una uscita  $y(t)$  in base all'ingresso  $u(t)$  si definisce **Processo** la successione di Stati che il sistema attraversa per ottenere una particolare uscita finale  $y_f(t)$ . Nel caso di Sistemi **Discreti** un processo può essere descritto attraverso un Diagramma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

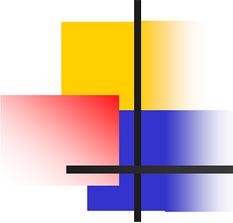
**Controllo di Processo:** operazioni necessarie per ottenere nel tempo, una sequenza prefissata di valori delle grandezze di processo, indipendente dalla presenza di eventuali fattori esterni incontrollabili che agiscono sul sistema, detti Disturbi.

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.



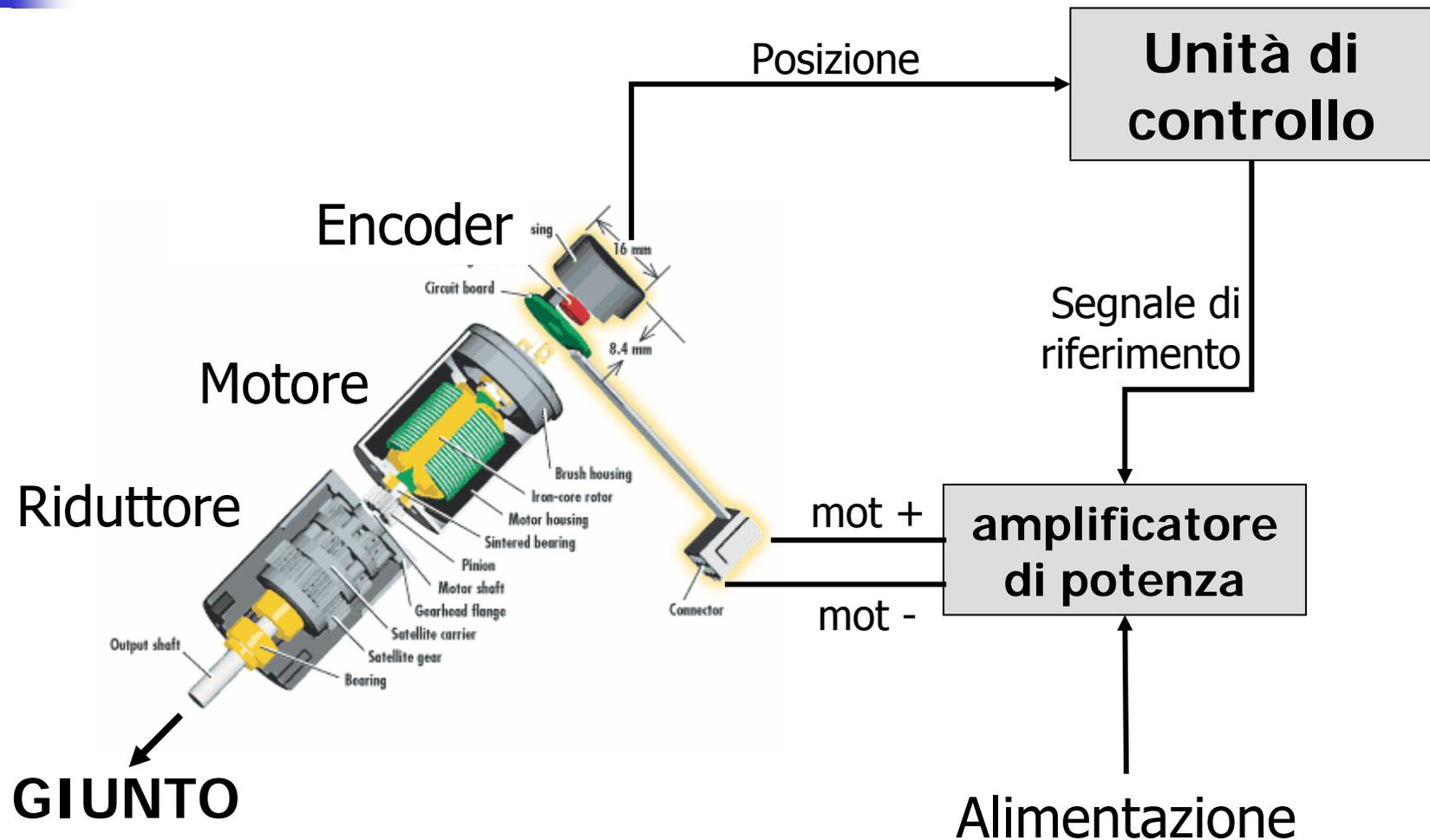


# Controllo di un giunto

---

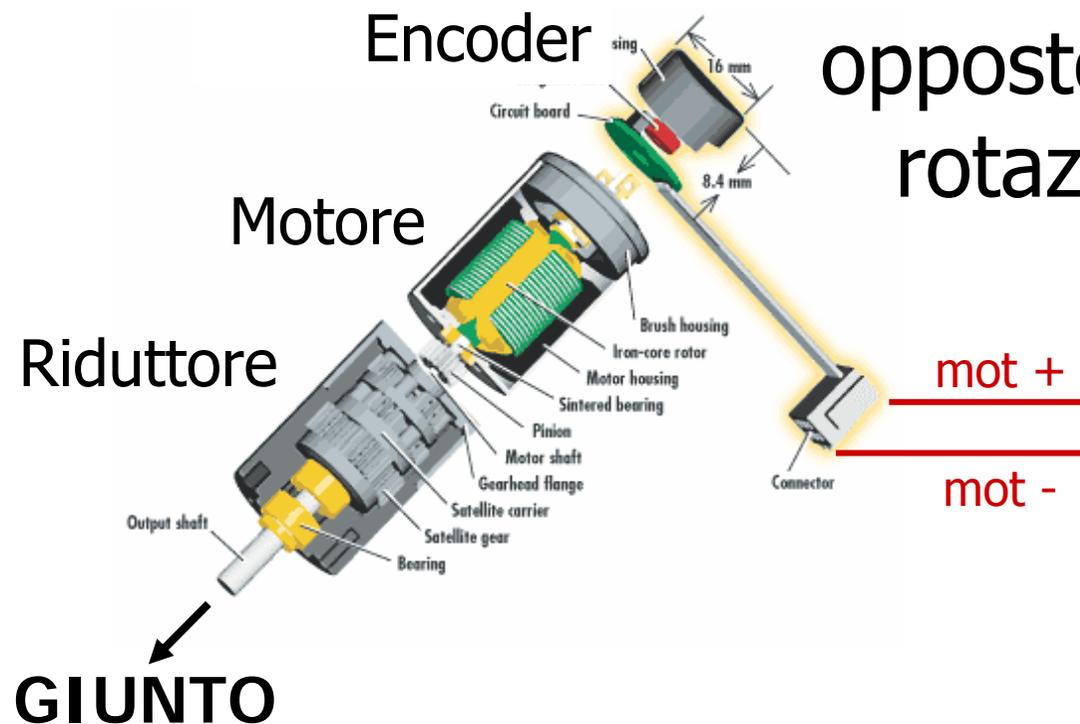
- Un sistema di controllo fornisce un comando in tensione o in corrente agli attuatori in modo da far assumere ai giunti una configurazione desiderata

# Schema di una unità di controllo



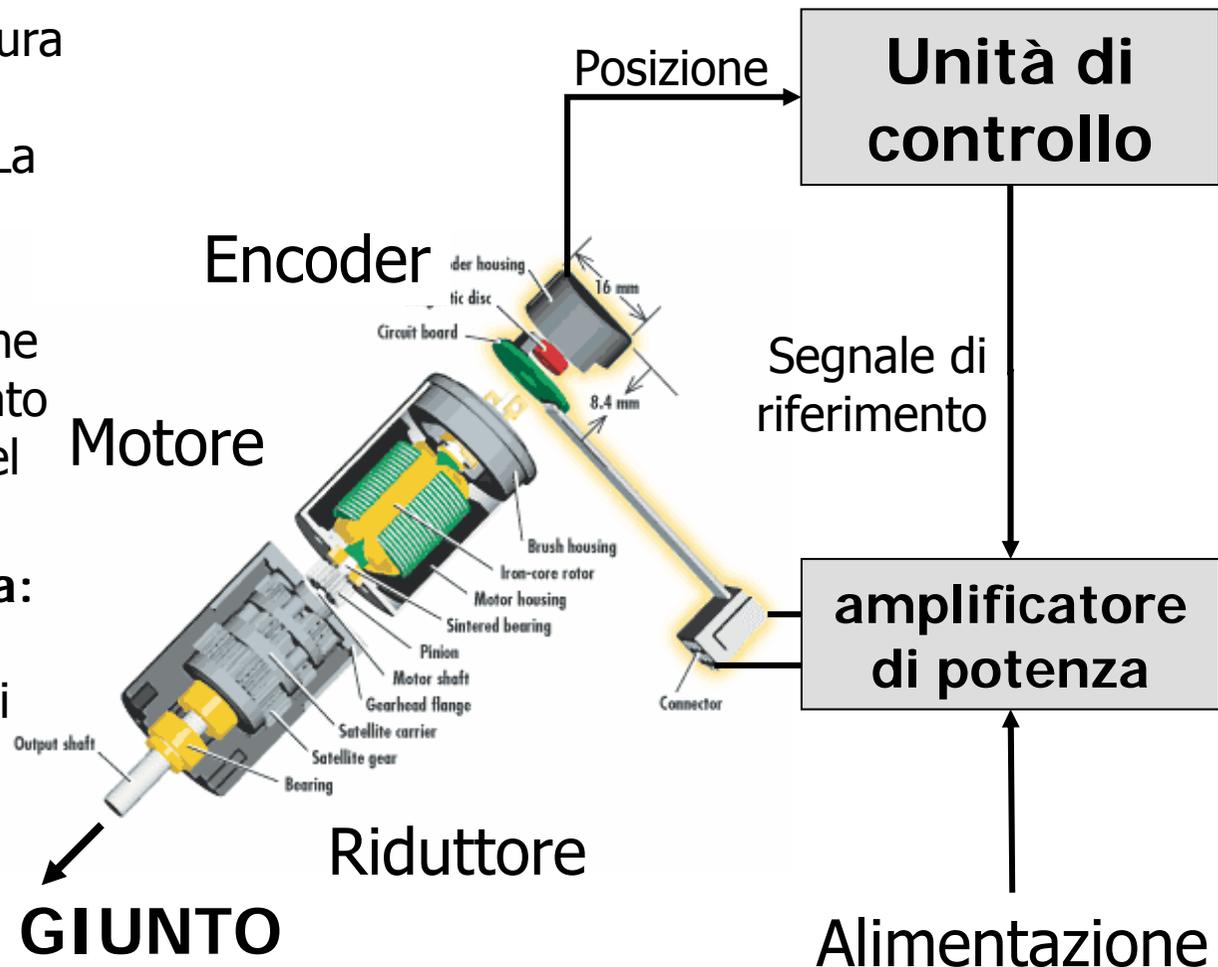
# Schema di una unità di controllo

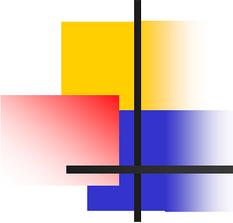
A tensioni in ingresso al motore di segno opposto corrispondono rotazioni opposte del motore



# 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

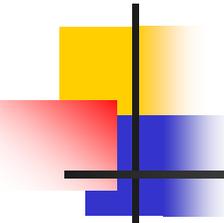




# Schema di una unità di controllo

---

- **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

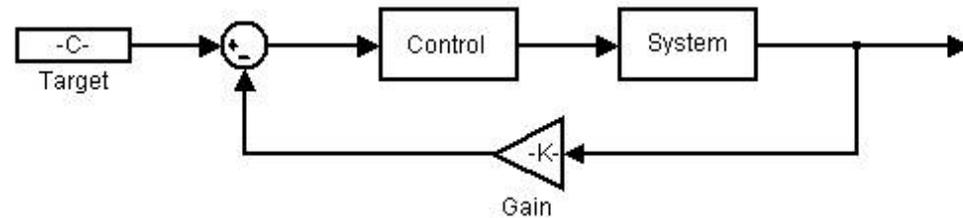
---

- $\theta$ : 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

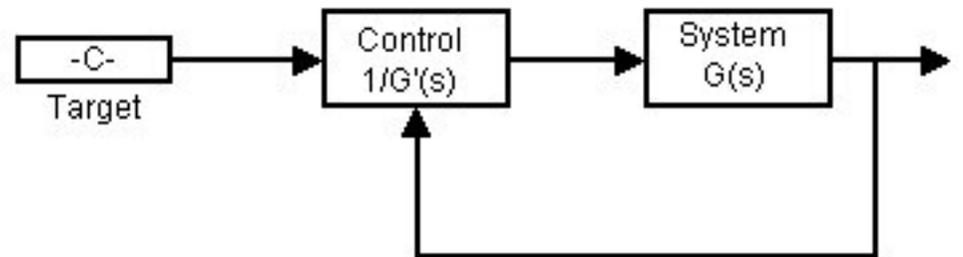
**Feedback**



**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:

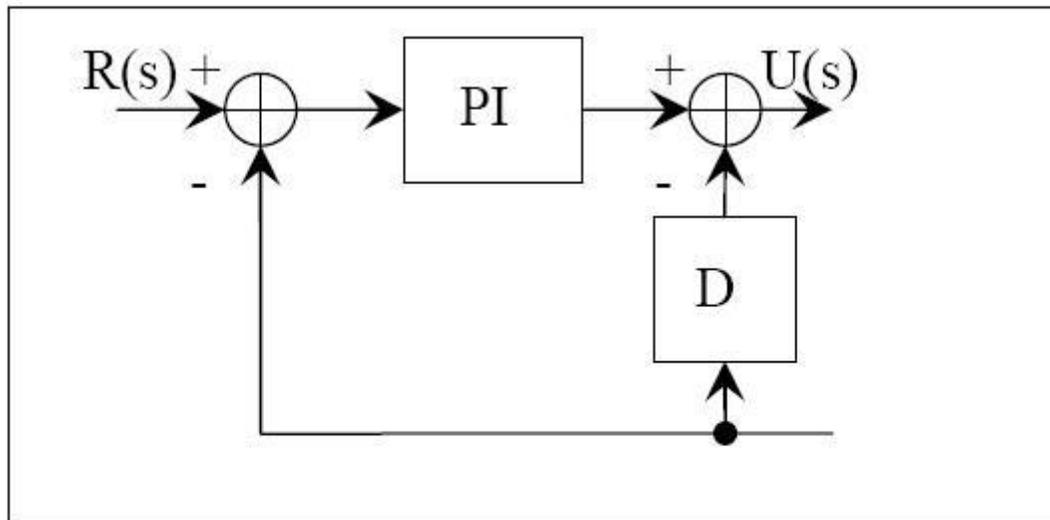
$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

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

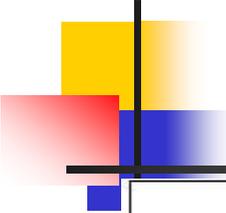
$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right)$$

# Controllo PID

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



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

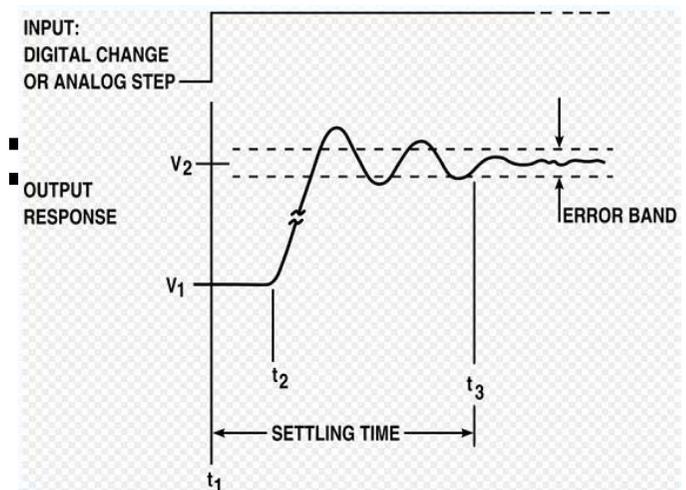


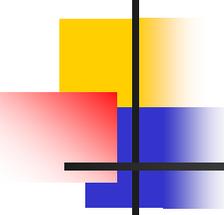
# Performance Index

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





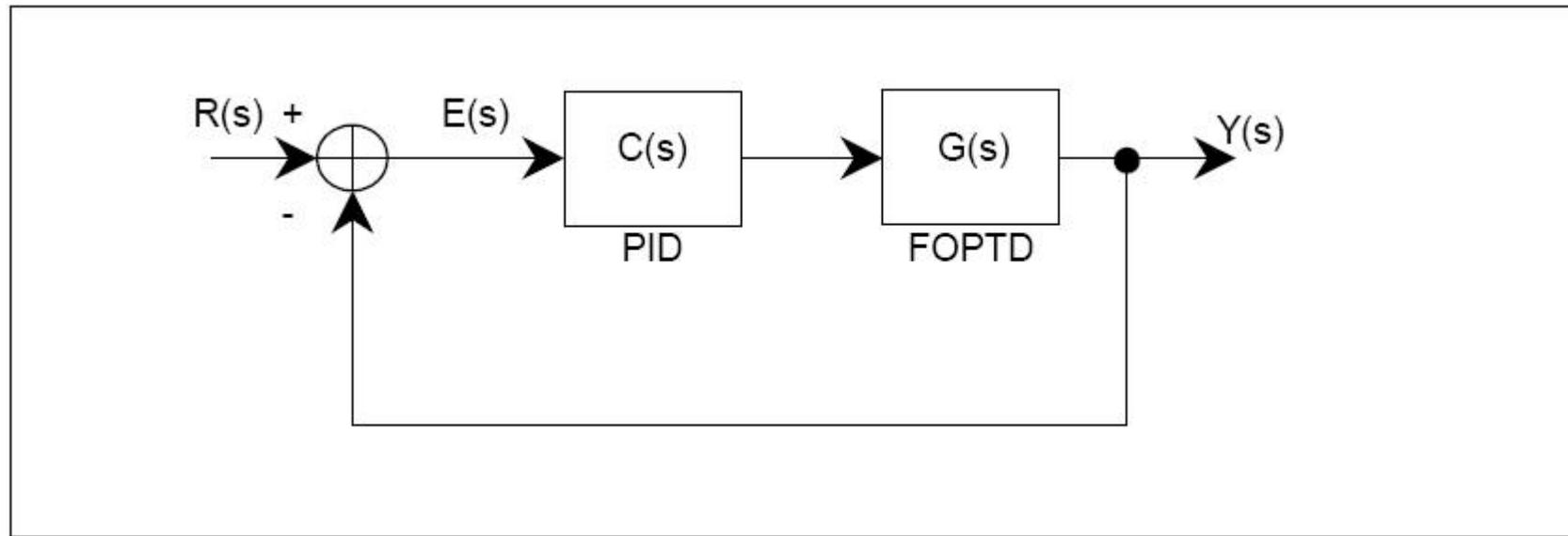
# Impianto di controllo tipico

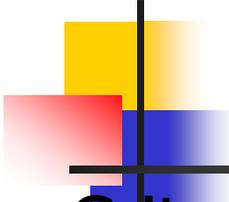
---

- Guadagno  $K$
- Ritardo puro  $\tau$
- Costante di tempo  $T$

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

# PID - FOPTD





# Ziegler – Nichols (1942)

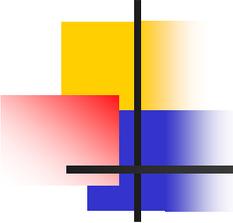
- Criteri di ottimizzazione: Rapporto di smorzamento  $r=1/4$  (rapporto tra la prima e la seconda sovraelongazione nell'oscillazione della variabile d'uscita)

- Parametri utilizzati:  $K, \tau, T$

- 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):

---

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

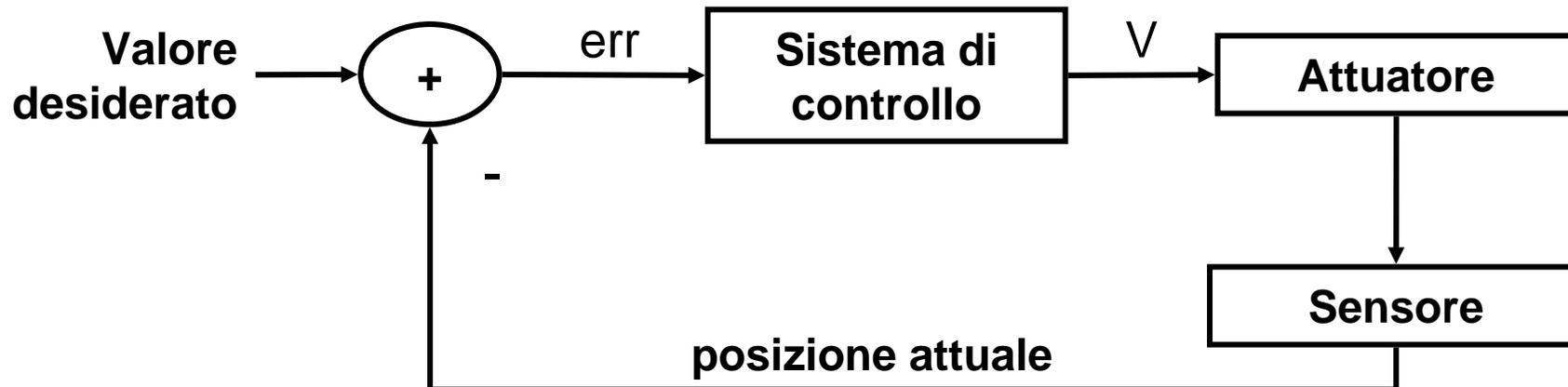
$$e_q = q_d - q$$

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

- $K_p$  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)

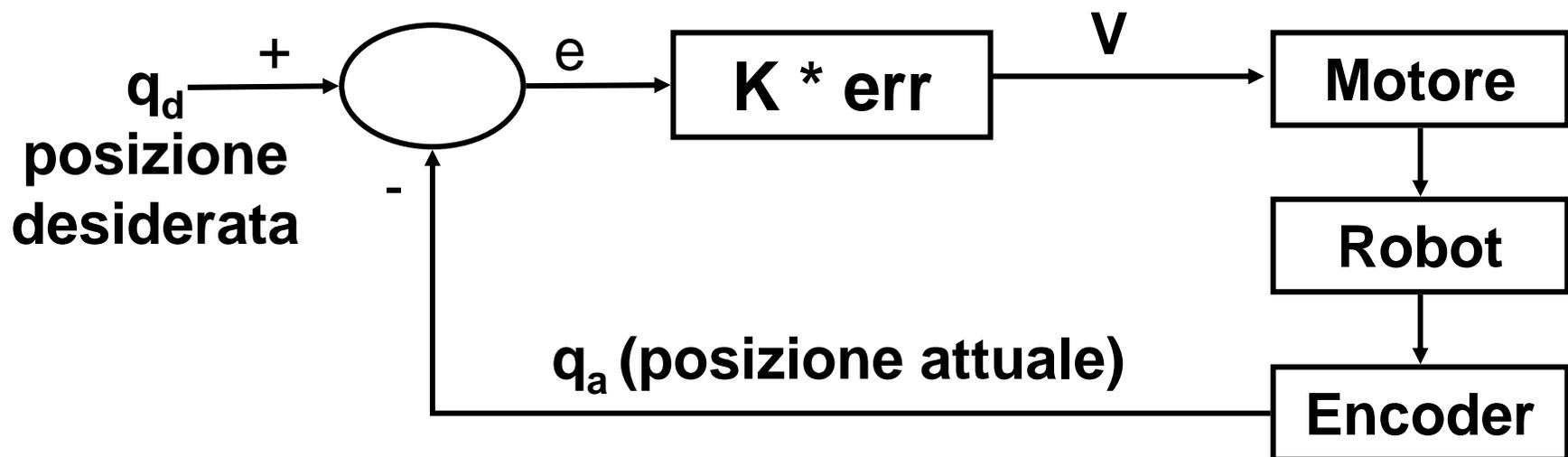
- La variabile da controllare è misurata e confrontata con il valore desiderato
- la differenza, o errore, è l'ingresso al sistema di controllo
- L'uscita del sistema di controllo è la variabile di comando dell'Attuatore dell'attuatore

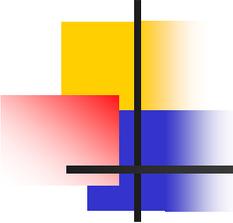


# Controllo PID

## 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

$$V = K_p e_q$$

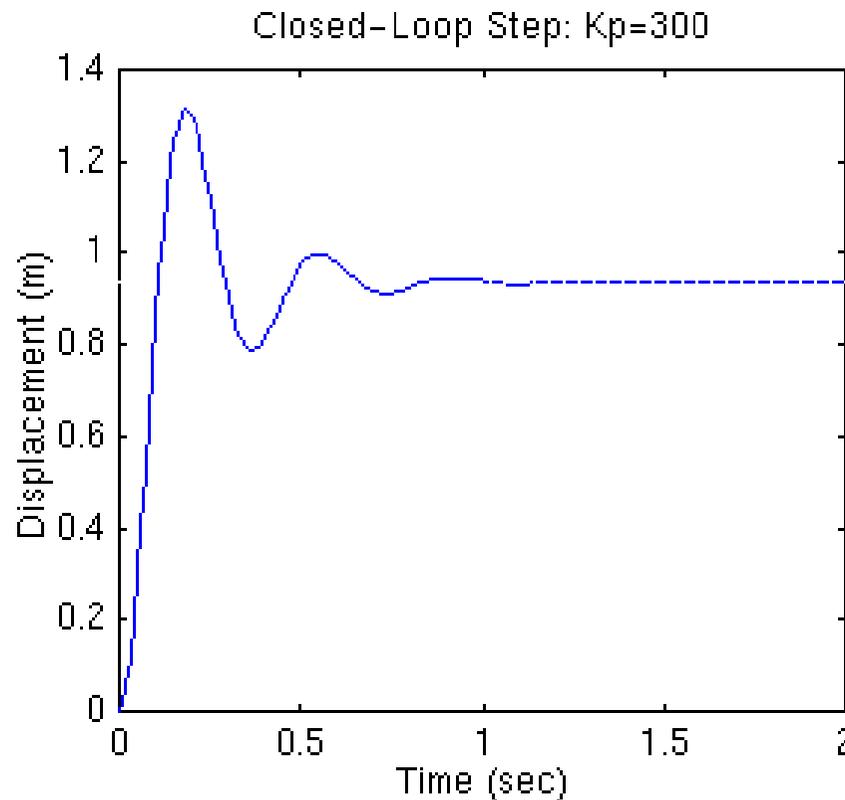
$$e_q = q_d - q$$

$K_p$  costante proporzionale

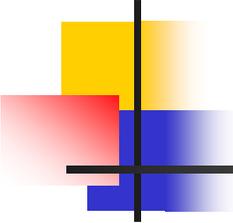
# Controllo PID

## 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:

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

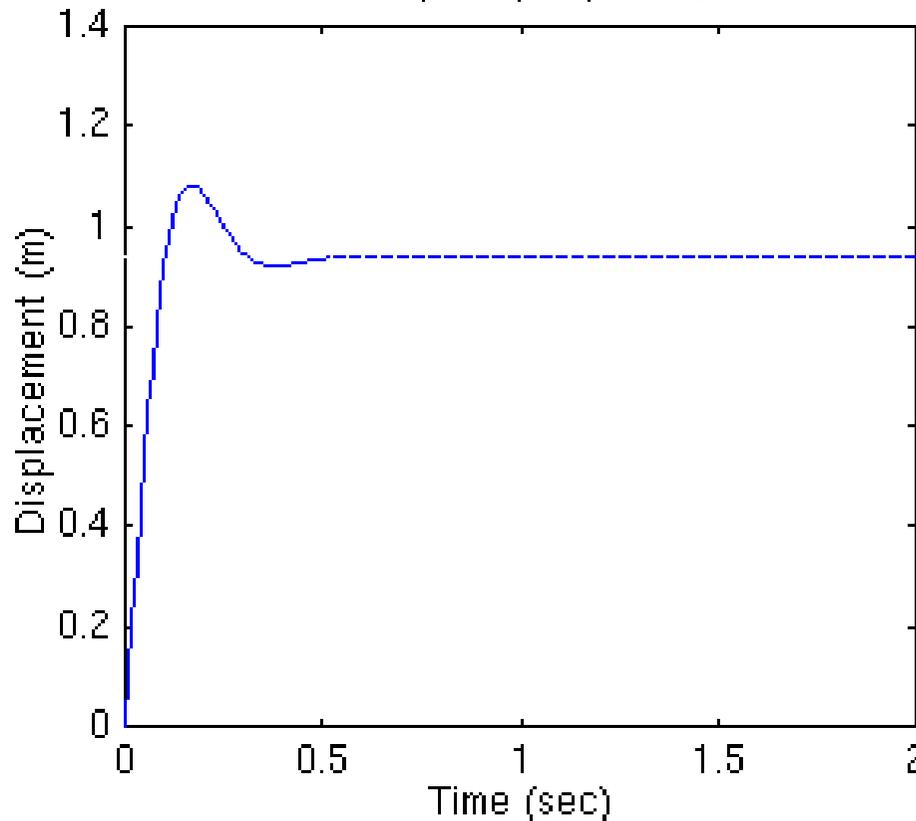
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q \quad K_d \text{ costante derivativa}$$

$$e_q = q_d - q$$

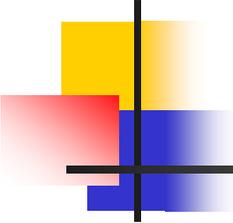
# Controllo PID

## 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

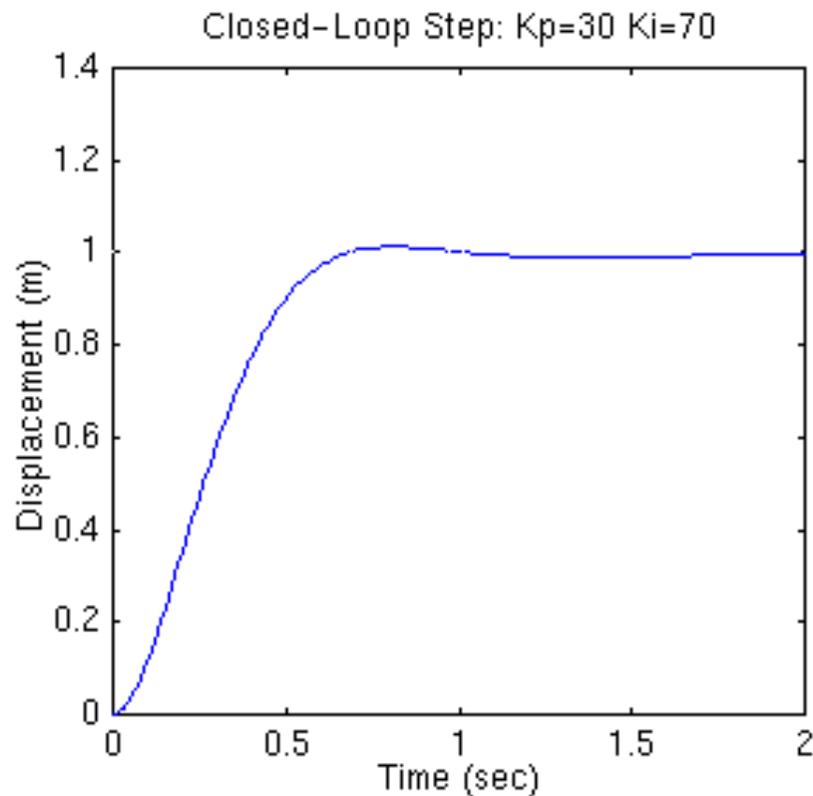
$$V = K_p e_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

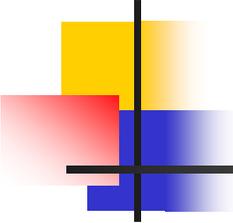
$K_i$  costante integrativa

# Controllo PID

## Controllo Proporzionale e Integrativo:



- Il sistema si assesta annullando l'errore



# Controllo PID

---

- **Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo**

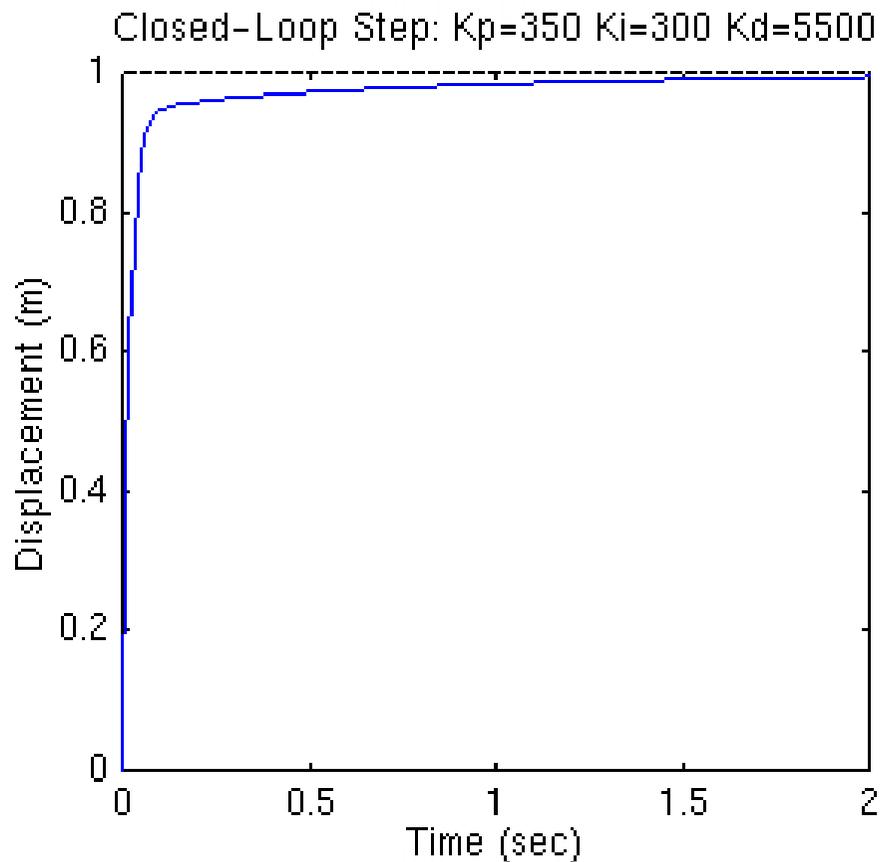
$$V = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q(t) dt$$

$$e_q = q_d - q$$

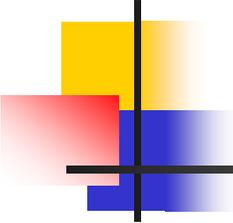
$$\dot{e}_q = \frac{de_q}{dt}$$

# Controllo PID

## Controllo Proporzionale, Derivativo e Integrativo:



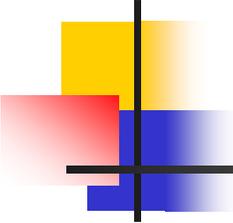
- Le costanti  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  vengono determinate in modo empirico o con metodi specifici



# Controllo del moto di un manipolatore

---

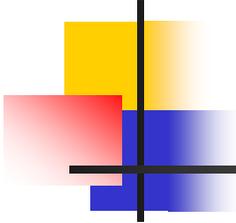
- Obiettivo del controllo del moto di un manipolatore è muovere il braccio da una posizione iniziale ad una posizione finale espresse nelle coordinate dello spazio operativo
- In generale, il problema del controllo del moto di un manipolatore consiste nel determinare l'andamento delle forze o coppie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



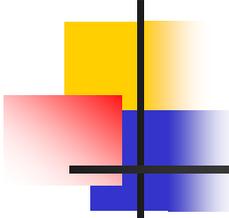
# Pianificazione di traiettorie

---

**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:

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

DATI IN INPUT:

definizione del percorso

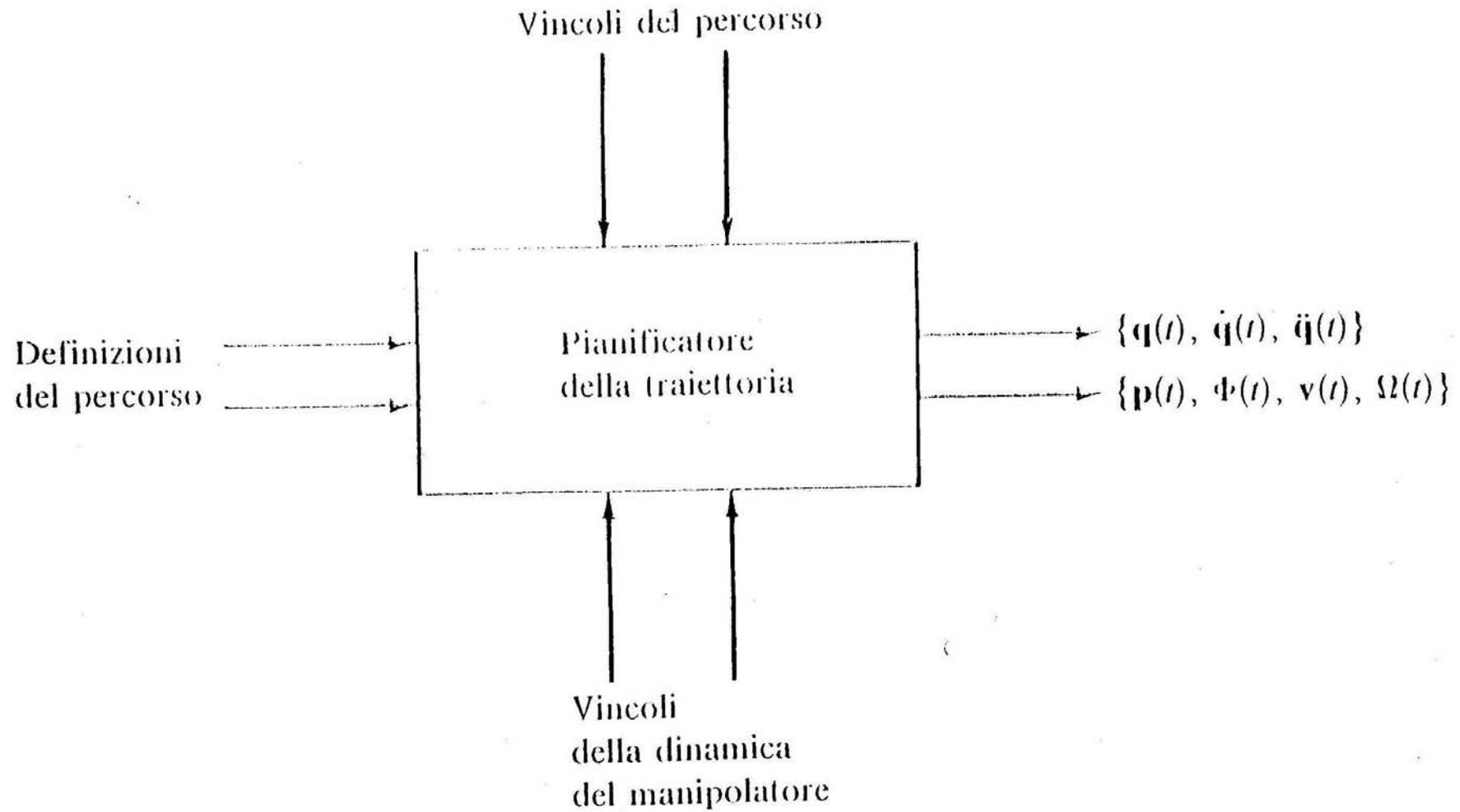
vincoli del percorso

vincoli dovuti alla dinamica del manipolatore

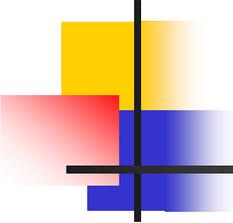
DATI IN OUTPUT:

**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.

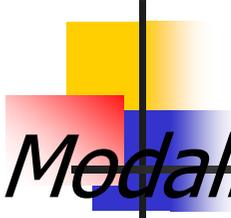


# Pianificazione di traiettorie

---

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

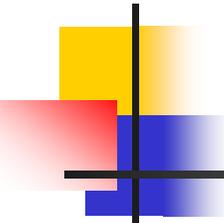
Pianificazione fuori linea  
del percorso e  
inseguimento in linea del  
percorso

No

Controllo della  
posizione e ricerca e  
aggiornamento in linea  
degli ostacoli

Controllo della posizione

Due sottoproblemi:  
pianificazione della traiettoria e controllo del movimento

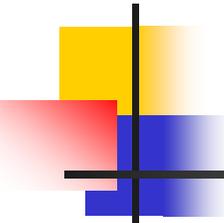


# Controllo del moto di un manipolatore

---

Il controllo del moto può essere realizzato nello

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



# Controllo del moto nello spazio dei giunti

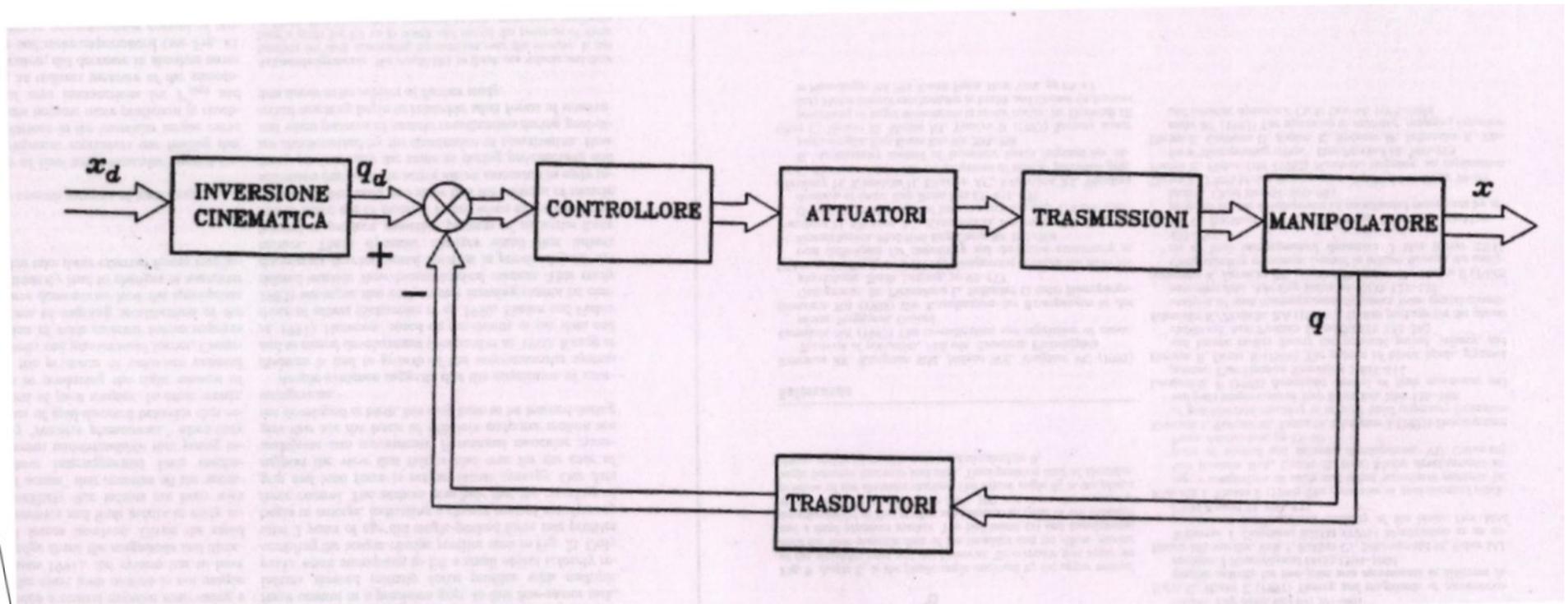
---

- 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

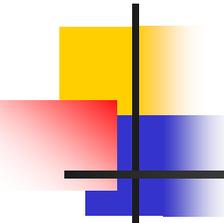
$$q_d = K^{-1}(x_d)$$

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

# Controllo del moto nello spazio dei giunti



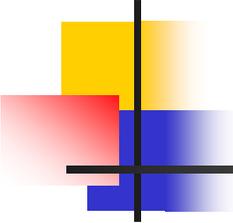
L'inversione cinematica viene effettuata al di fuori del ciclo di controllo



# Controllo del moto nello spazio dei giunti

---

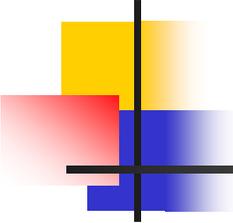
- Nell'effettuazione del movimento l'organo terminale del manipolatore esegue nello spazio operativo un percorso non prevedibile, a causa degli effetti non lineari introdotti dalla cinematica diretta



# 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

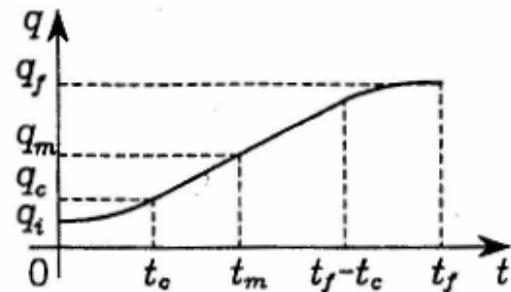
---

## **Profilo di velocità trapezoidale**

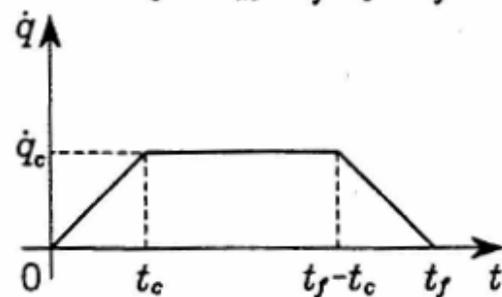
- Presenta una accelerazione costante nella fase di partenza, una velocità di crociera e una decelerazione costante nella fase di arrivo.
- La traiettoria corrispondente è di tipo polinomiale misto: un tratto lineare raccordato con due tratti parabolici nell'intorno delle posizioni iniziale e finale.

# Profilo di velocità trapezoidale

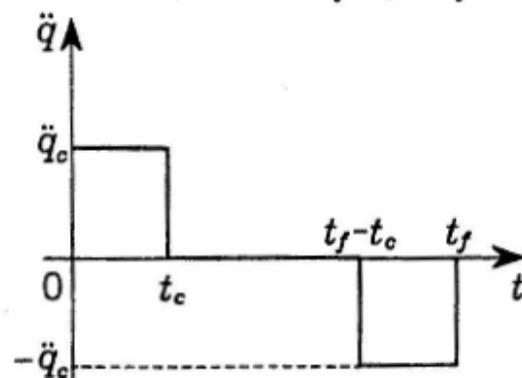
Posizione



Velocità



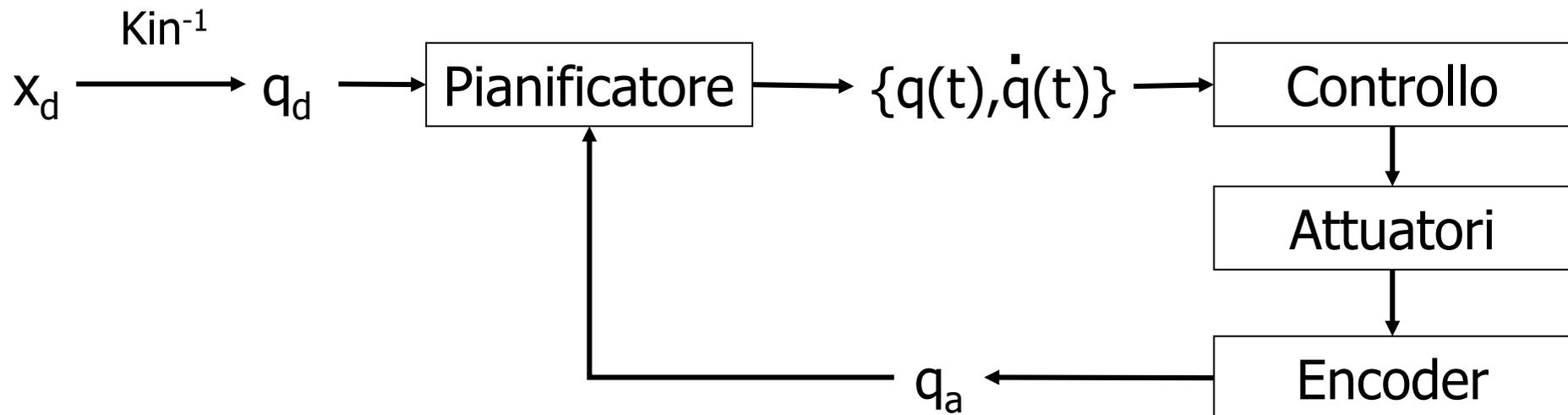
Accelerazione

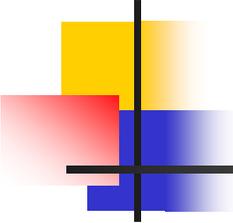


NB: velocità ed accelerazioni all'istante finale ed iniziale possono essere diverse da zero

# 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

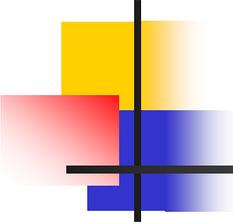




# Controllo del moto nello spazio operativo

---

- 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

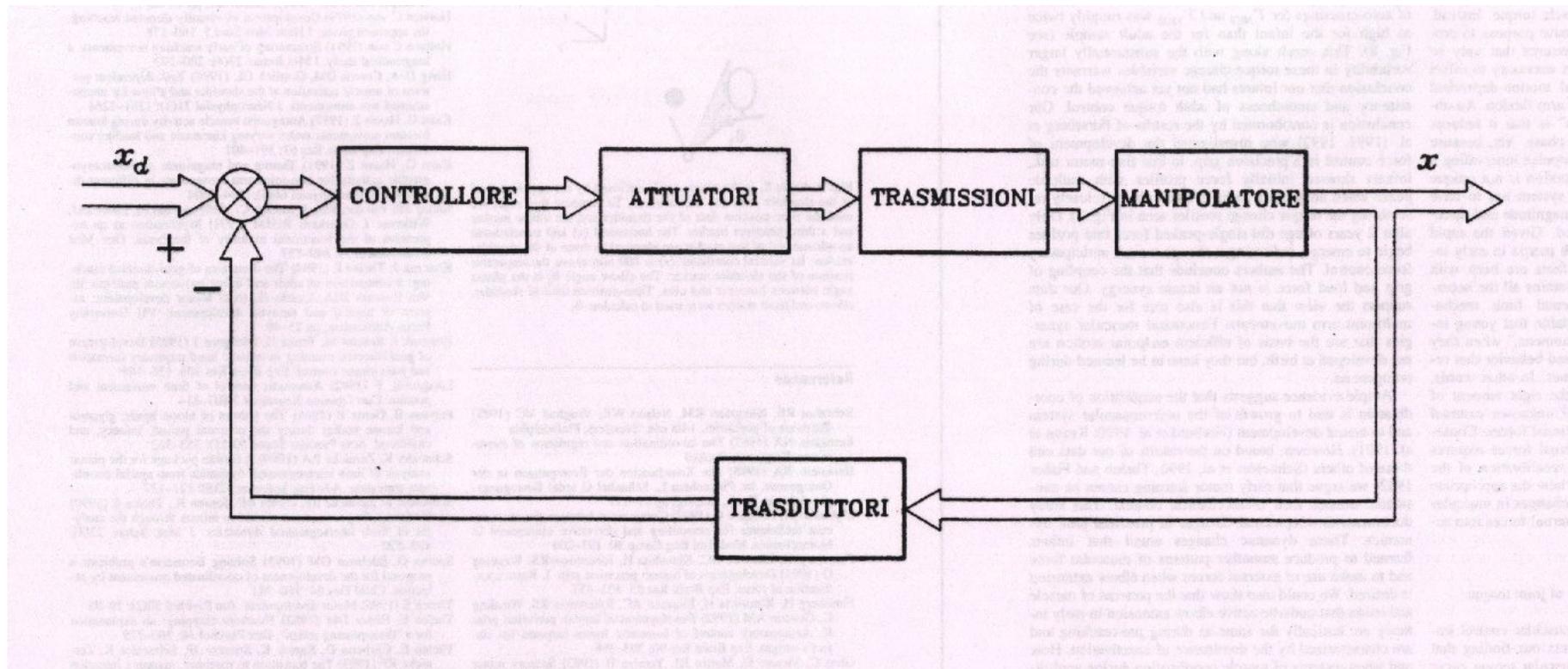


# Traiettorie nello spazio operativo

---

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

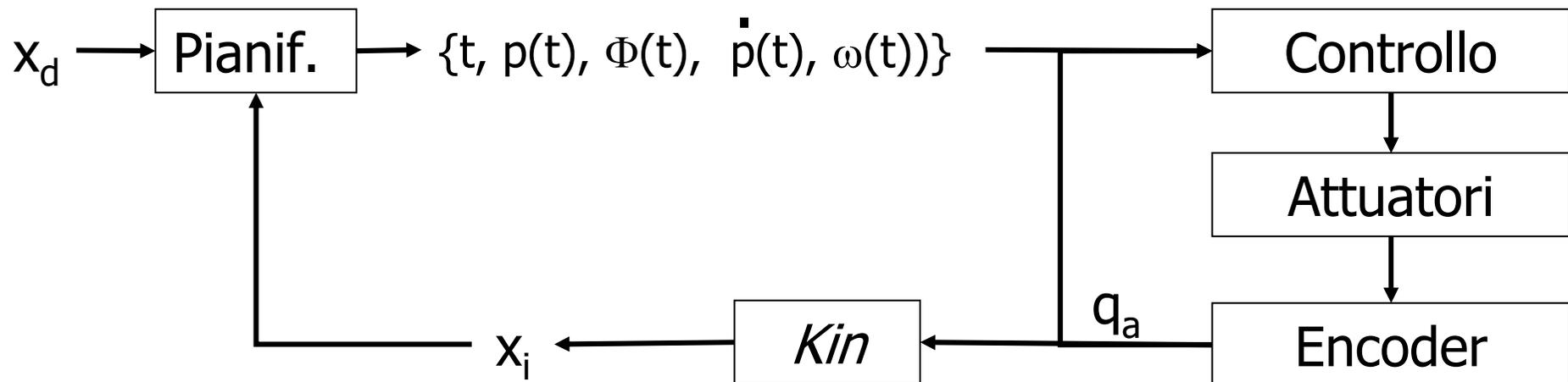
# Controllo del moto nello spazio operativo

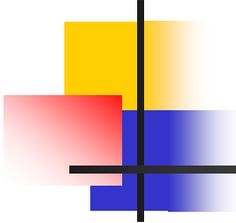


**L'inversione cinematica viene effettuata all'interno del ciclo di controllo**

# 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



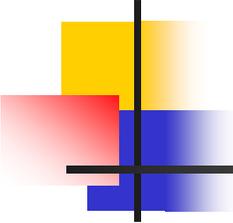


# Controllo del moto nello spazio operativo

---

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

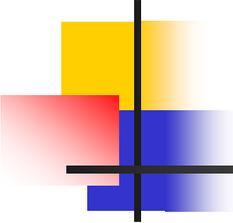
- 1) Inversione cinematica per convertire le specifiche di moto espresse nello spazio operativo in specifiche di moto nello spazio dei giunti
- 2) Sistema di controllo nello spazio dei giunti in grado di garantire l'inseguimento dei riferimenti ottenuti al punto 1)



# 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

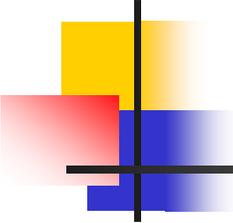


# Cinematica differenziale

---

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

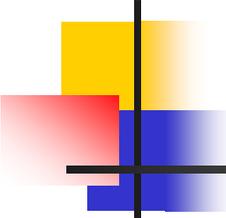
$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

$J(q)$  = Jacobiano

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

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

$\dot{q}$  = velocità ai giunti



# Cinematica differenziale

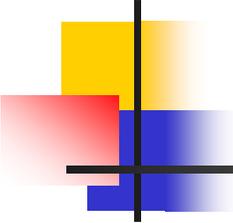
---

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

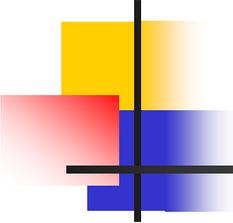


# Cinematica differenziale

---

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

---

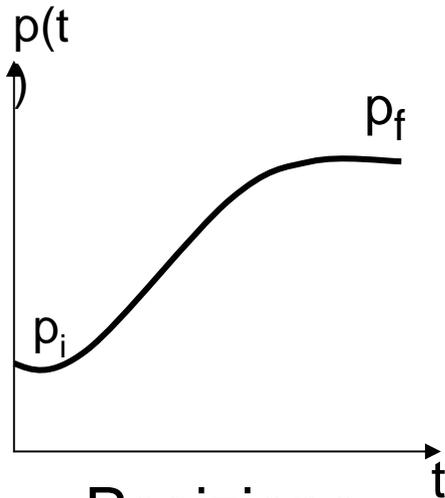
Le configurazioni che causano una diminuzione di rango della matrice Jacobiana  $J$  sono dette *singularità cinematiche*.

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**

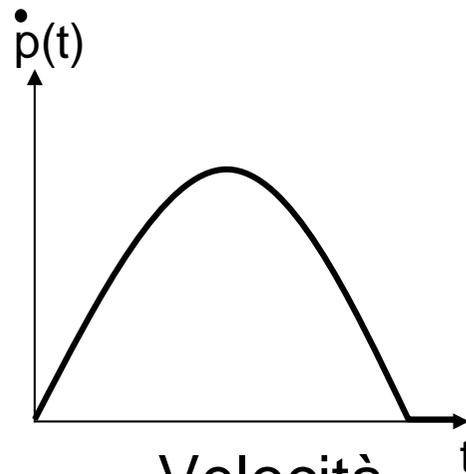
# Controllo del moto nello spazio operativo

## Pianificatore delle traiettorie



Posizione  
nello spazio  
operativo nel  
tempo

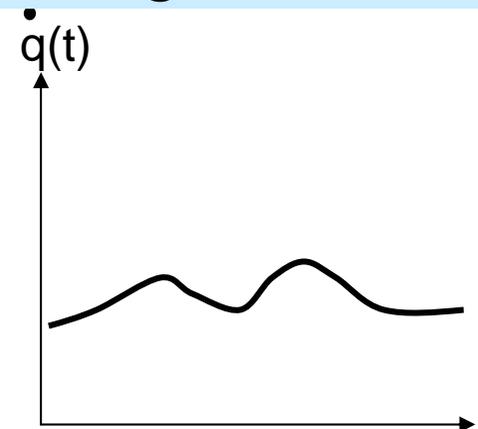
$(t, p(t), \Phi(t), \dot{p}(t), \omega(t))$



Velocità  
dell'effettore  
finale nel  
tempo

$J^{-1}(q(t))$   
→

## Velocità ai giunti



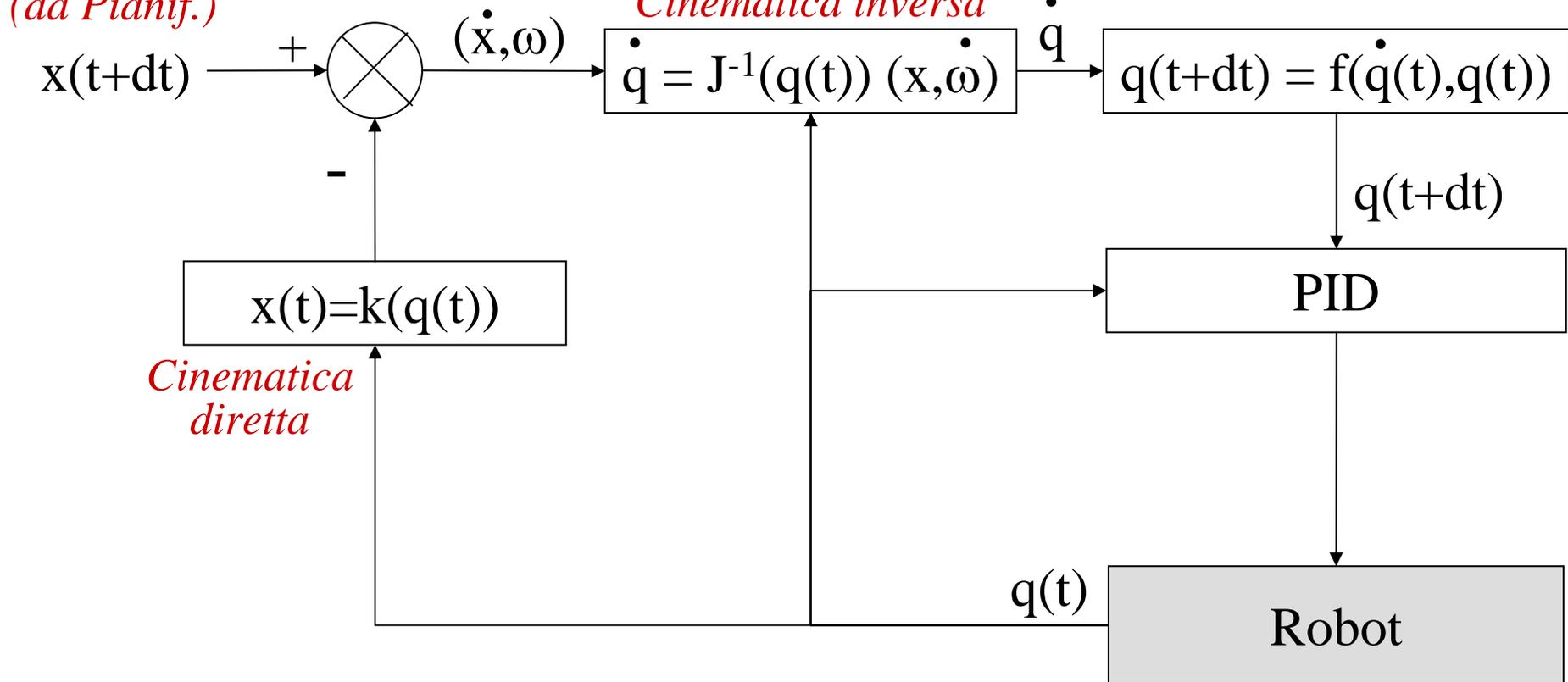
Velocità dei  
giunti nel  
tempo

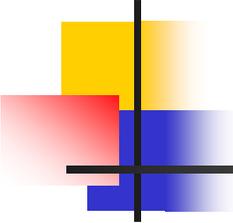
$J^{-1}(q(t))$   
→

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

# Controllo del moto nello spazio operativo

*Posizione desiderata (da Pianif.)*

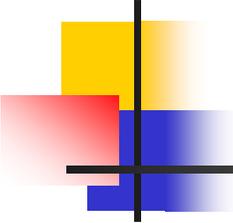




# Performance di un manipolatore industriale

---

- **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

---

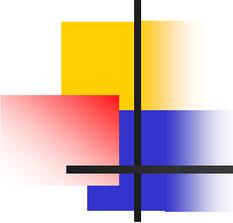
- Dof: 6
- Payload: 15 kg
- Max. reach: 1570 mm
- Repeatability:  $< \pm 0.1$  mm
- Weight: 222 kg



# Il manipolatore PUMA 560

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

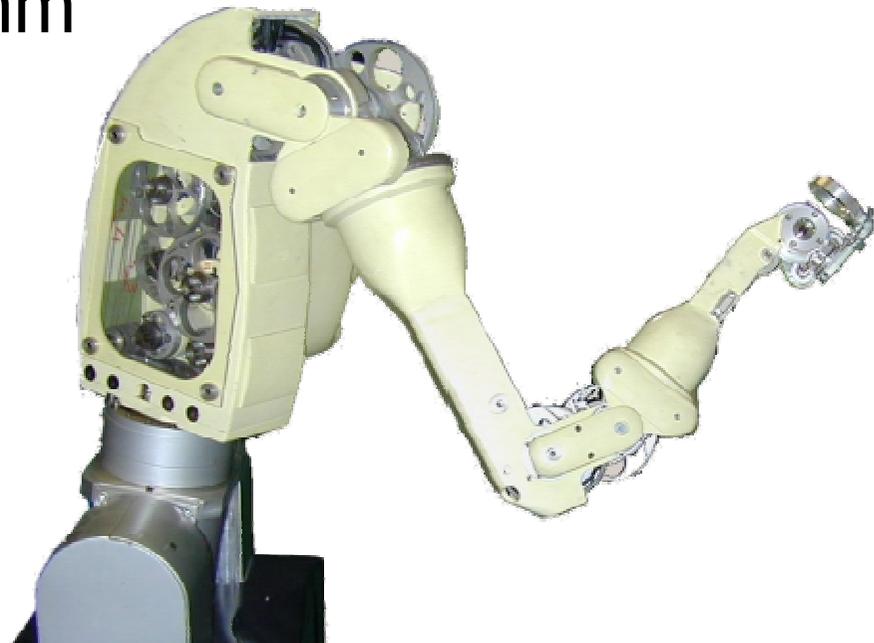




# Dexter Arm

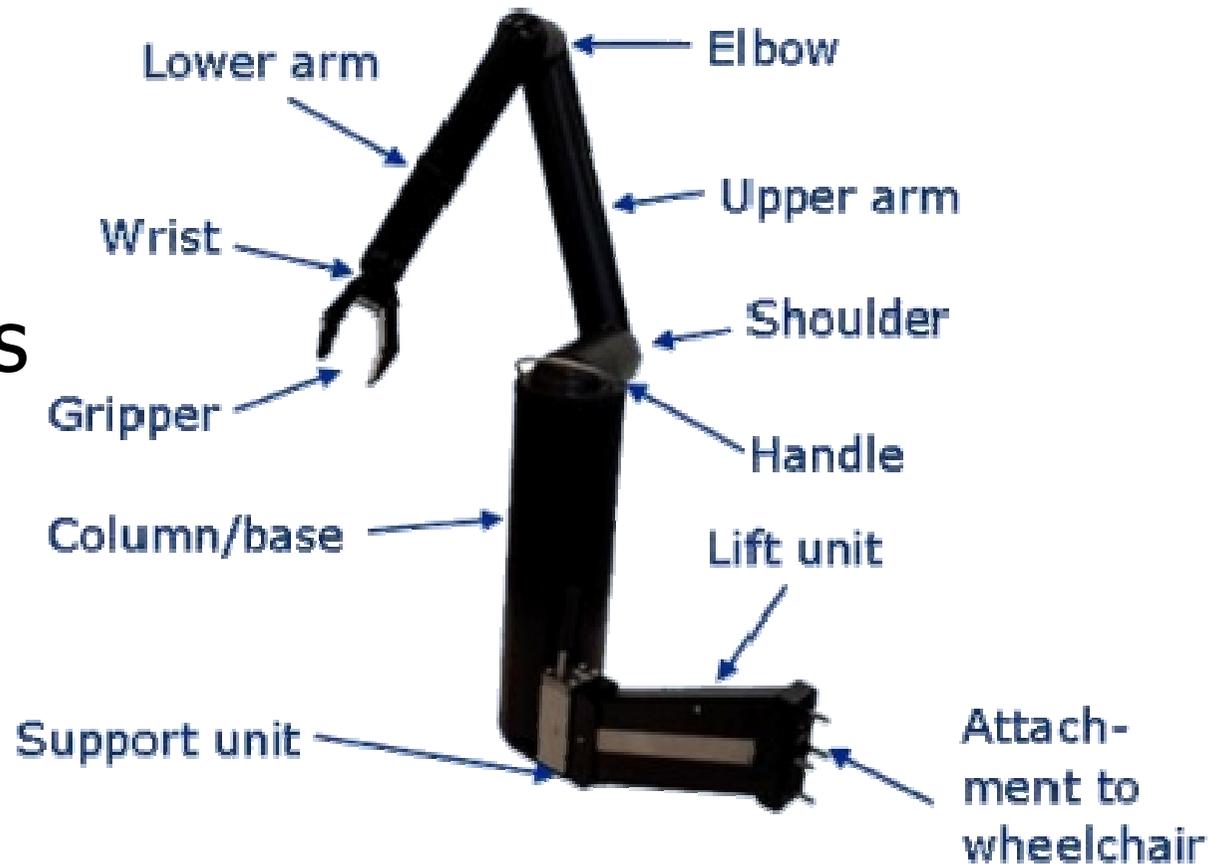
---

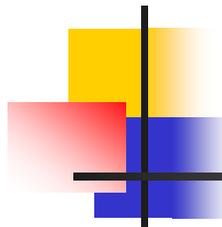
- Cable actuated
- d.o.f.: 8
- Workspace: 1200 mm x 350°
- Repeatability: + 1mm
- Velocity: 0.2 m/s
- Payload: 2 Kg
- Weight: 40 Kg



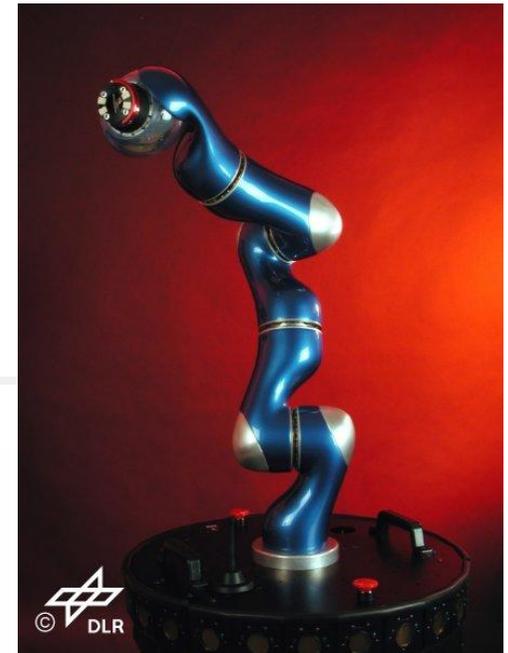
# Manus

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



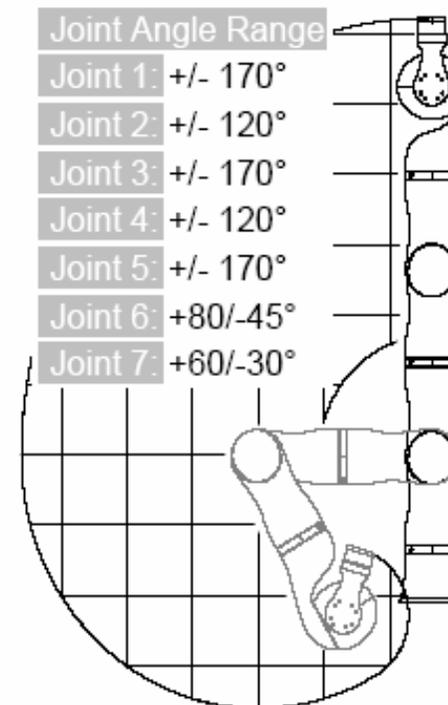


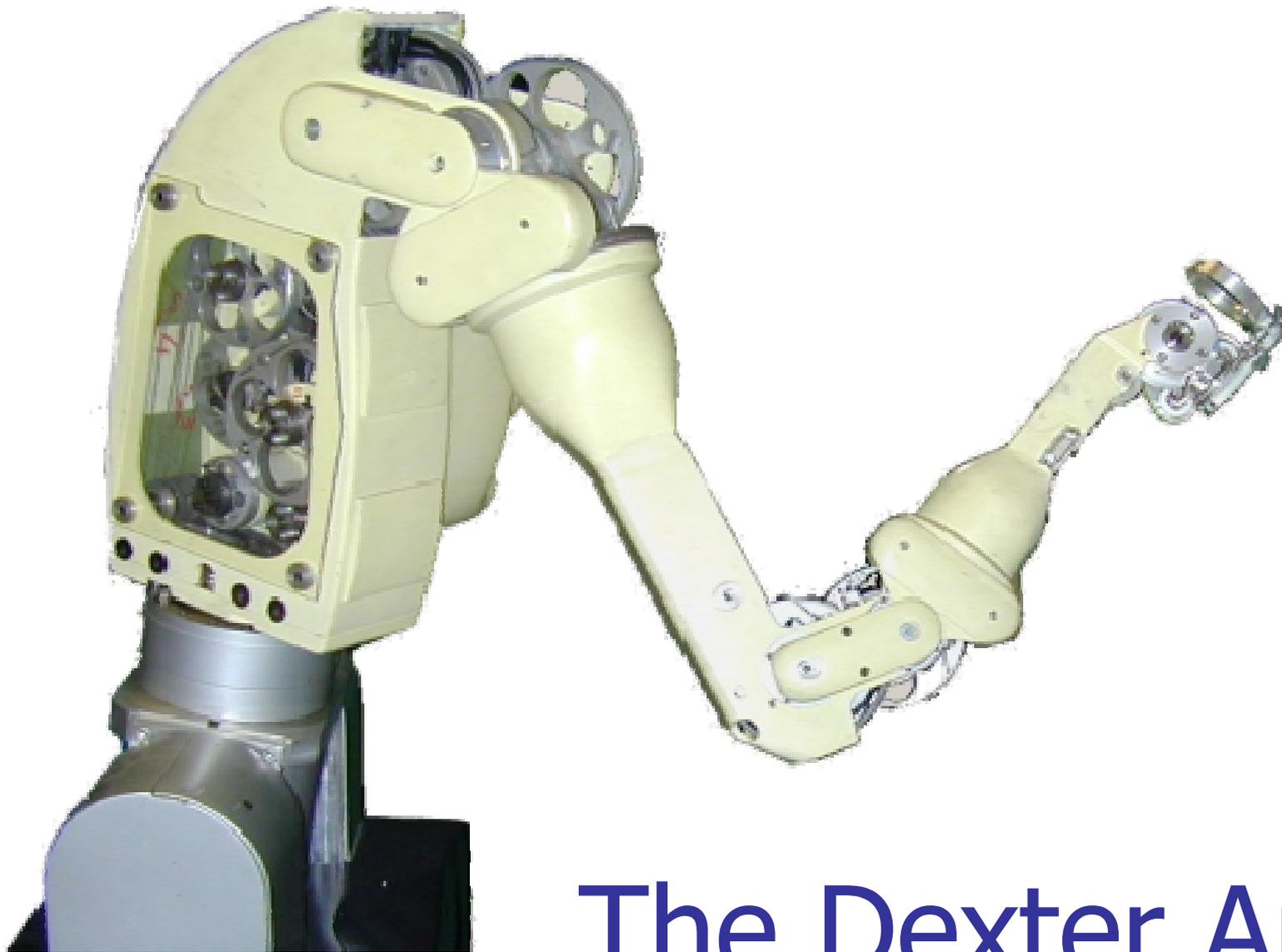
# DLR Arm



© DLR

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

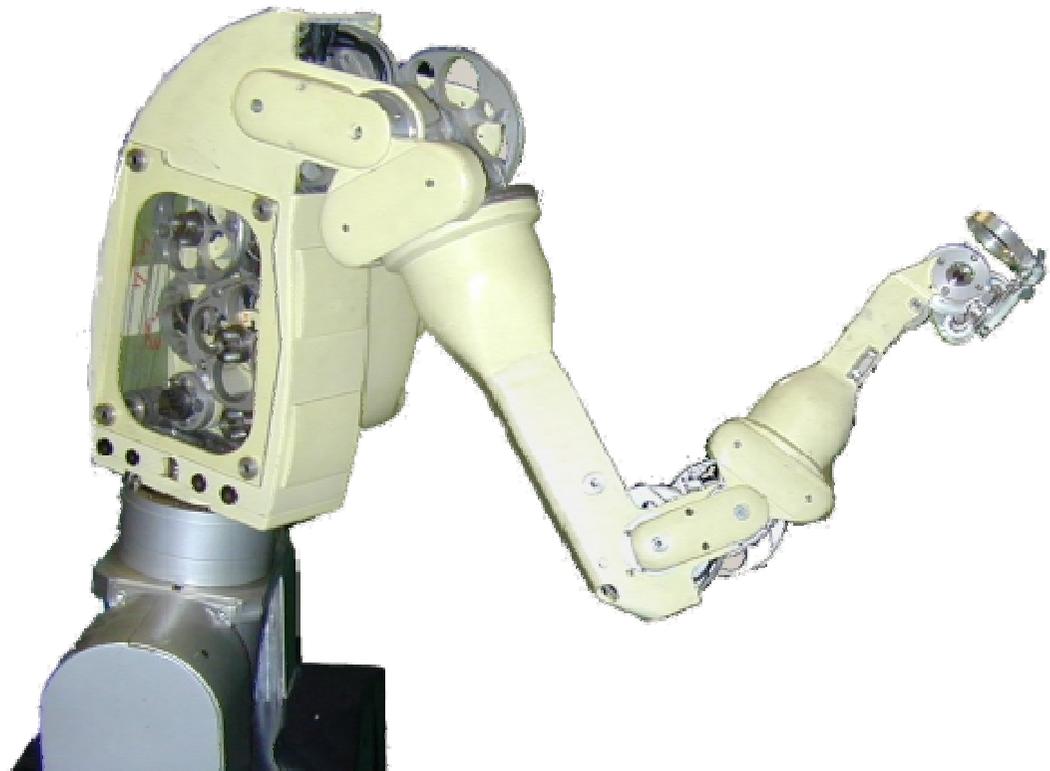




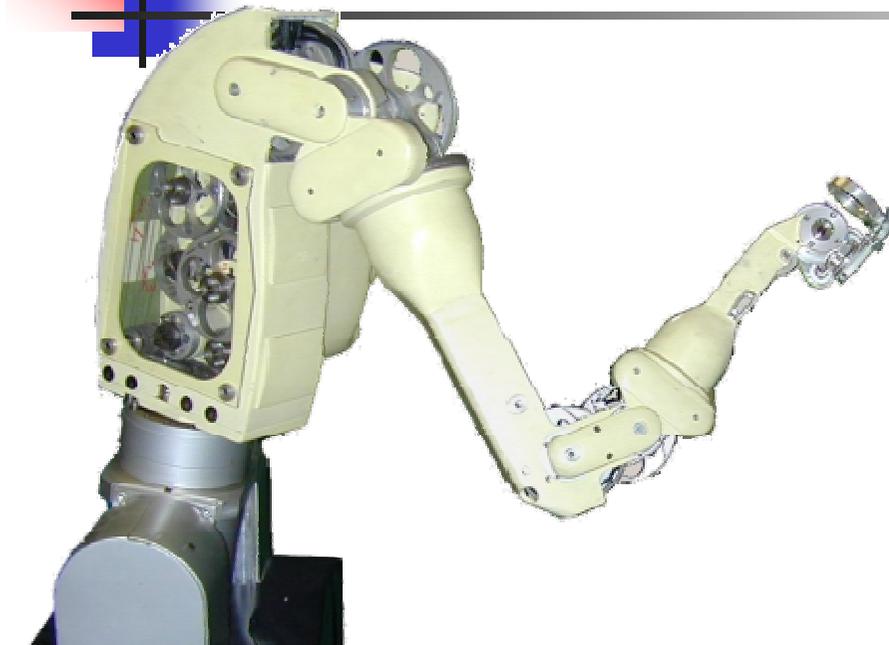
The Dexter Arm

# 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



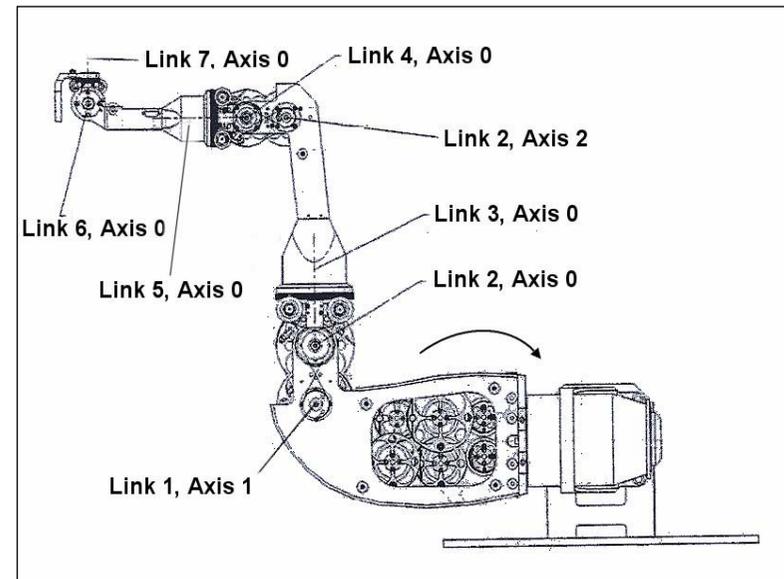
# The Dexter Arm



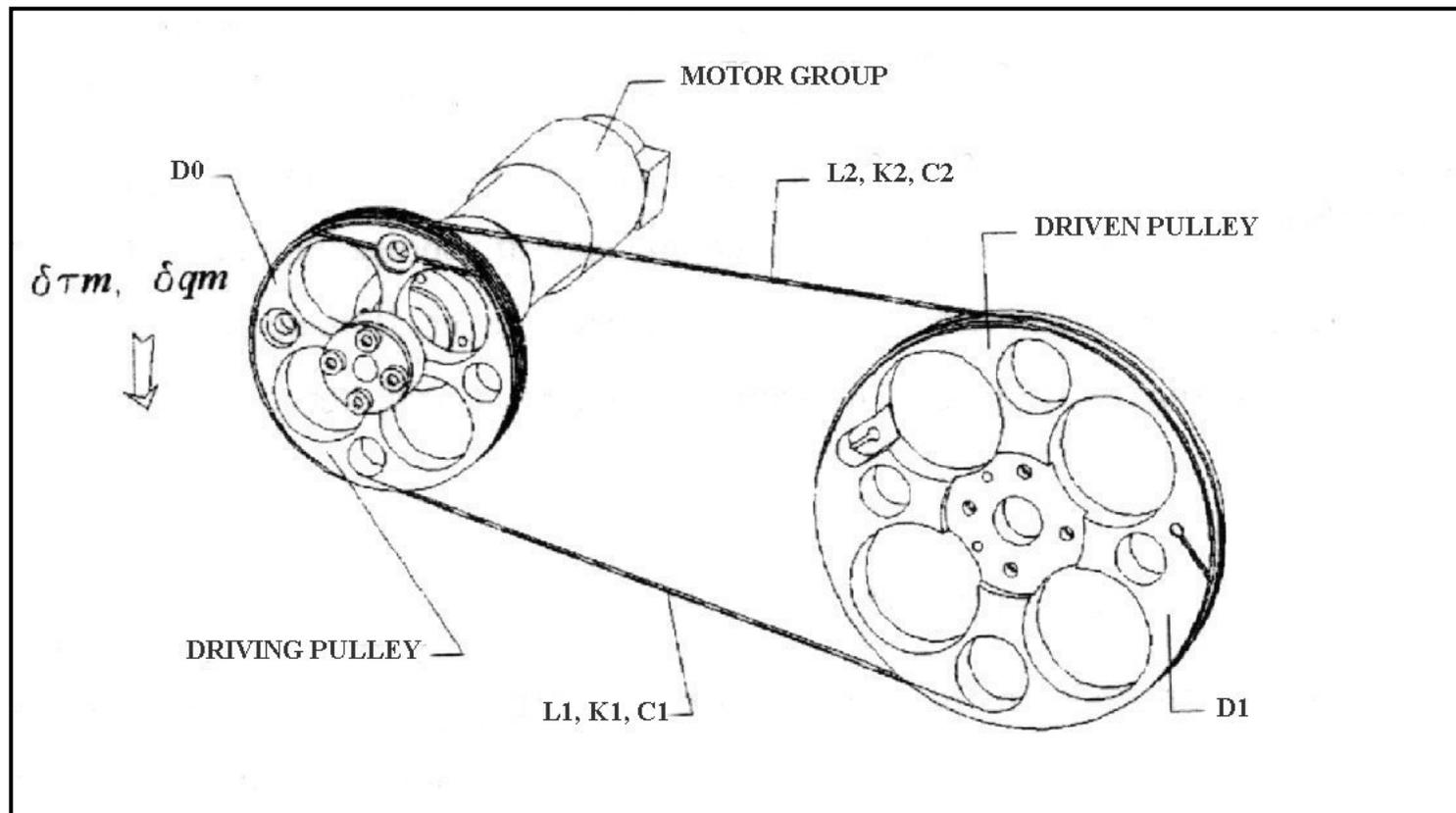
- 8-d.o.f. anthropomorphic redundant robot arm, composed of trunk, shoulder, elbow and wrist
  - designed for service applications and personal assistance in residential sites, such as houses or hospitals
- 
- mechanically coupled structure: the mechanical transmission system is realized with pulleys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

# The Dexter arm

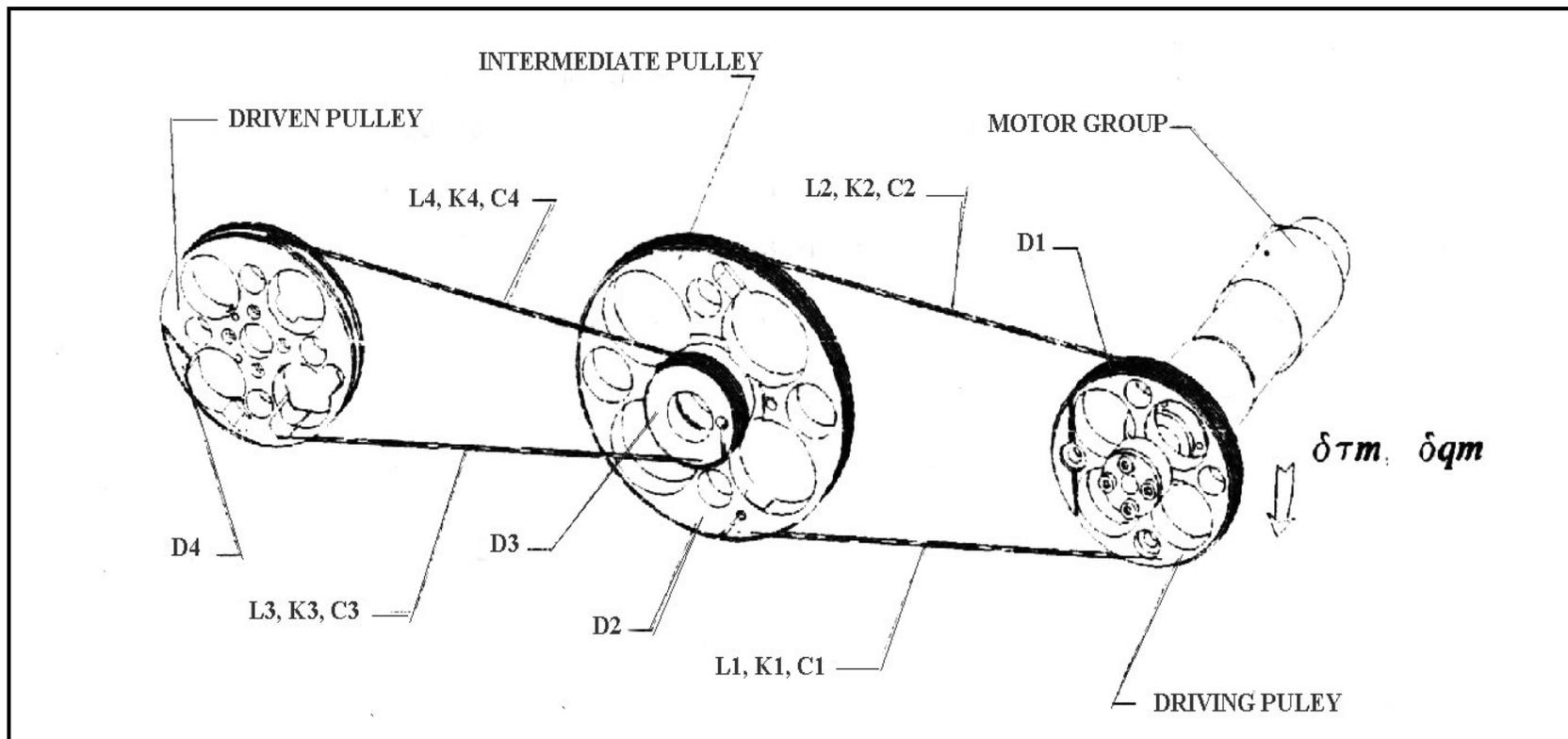
- Transmission system realized with pulleys and steel cables
- Joints J0 and J1 are actuated by motors and driving gear-boxes directly connected to the articulation axis
- Joints J2,...,J7 are actuated by DC-motors installed on link 1



# Transmission #6



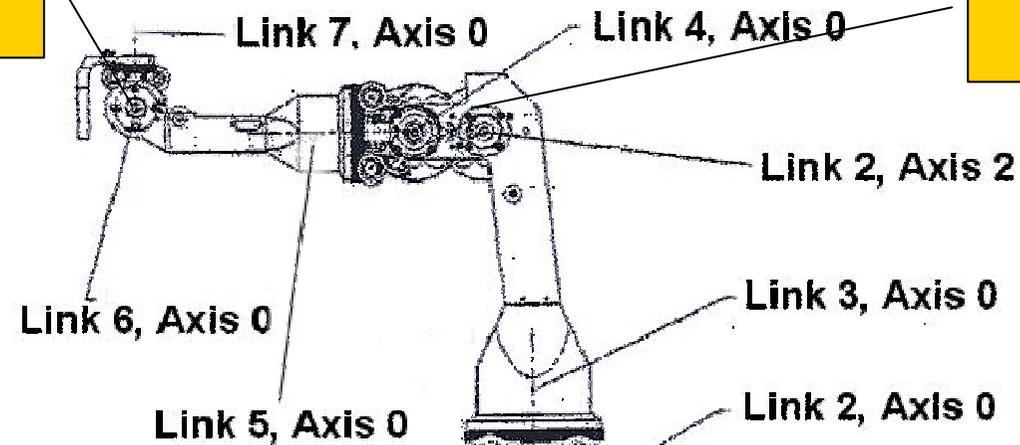
# Trasmissions #2-5 and 7



# Anthropomorphic structure

Wrist

Elbow



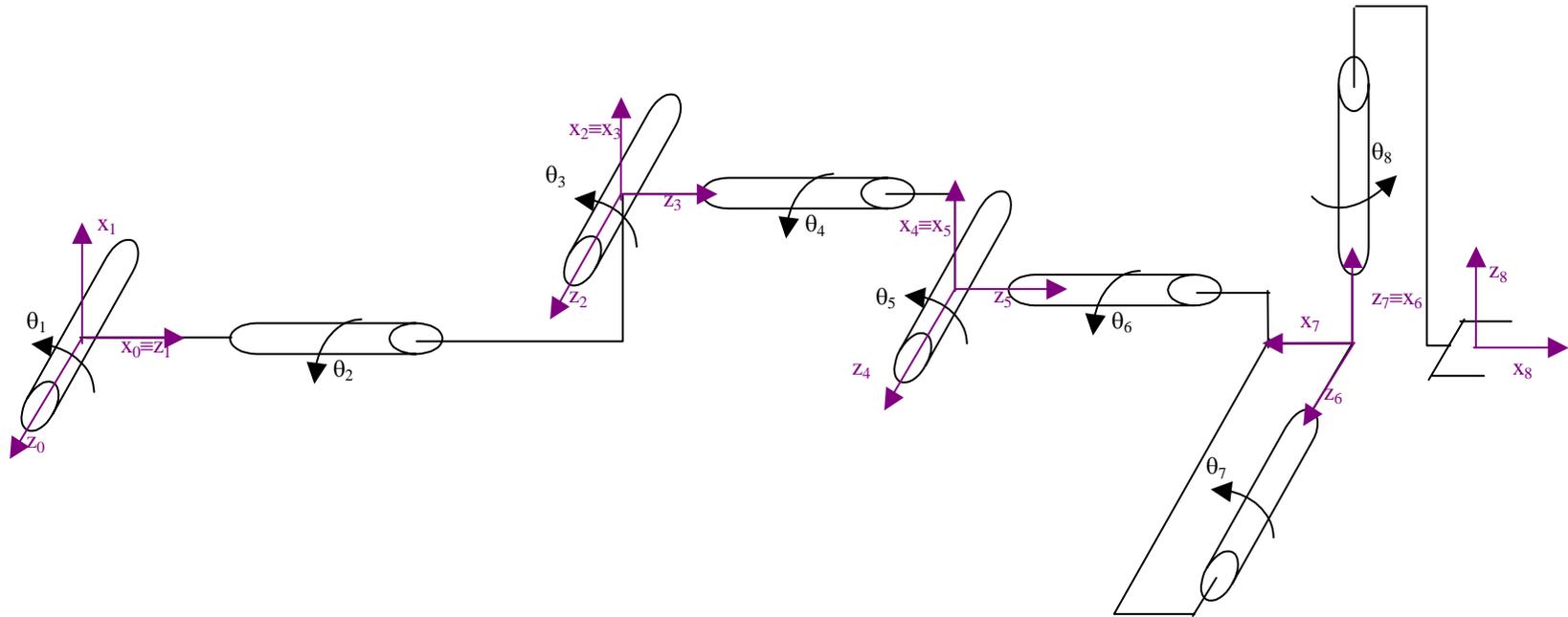
Shoulder

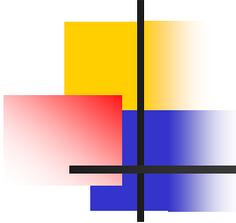
Link 1, Axis 1

Trunk



# Geometric Configuration

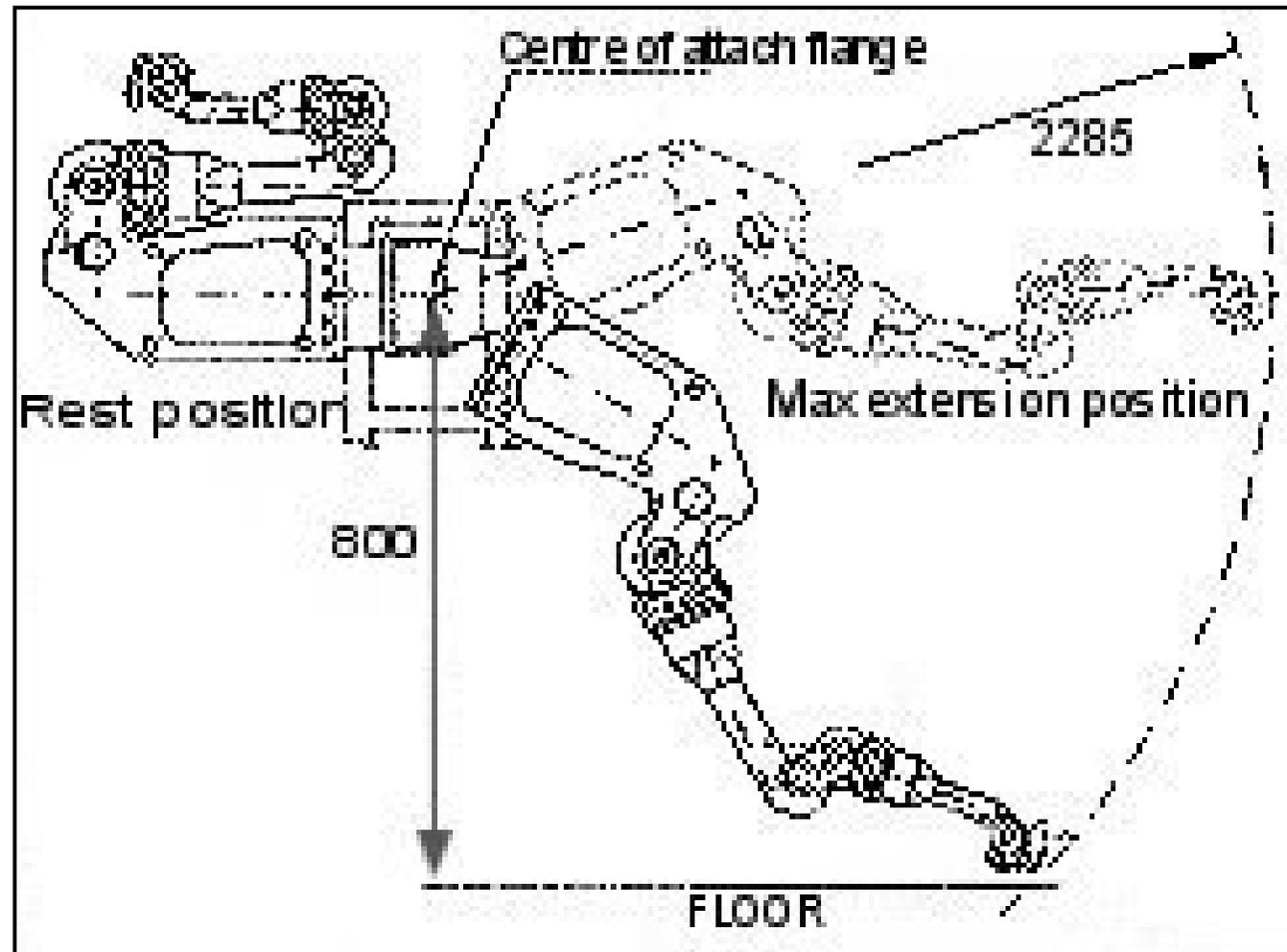




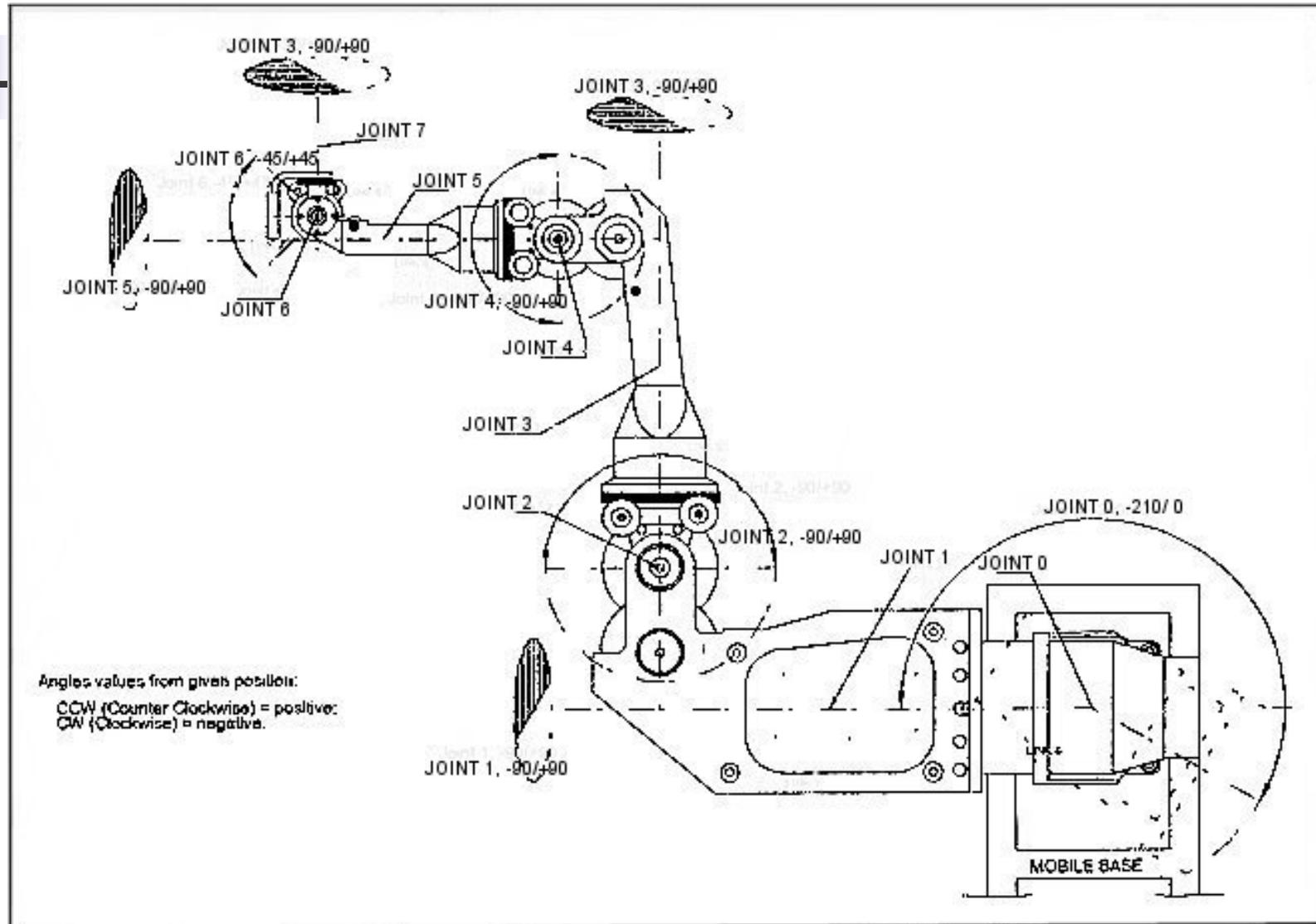
# Denavit-Hartenberg Parameters

<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

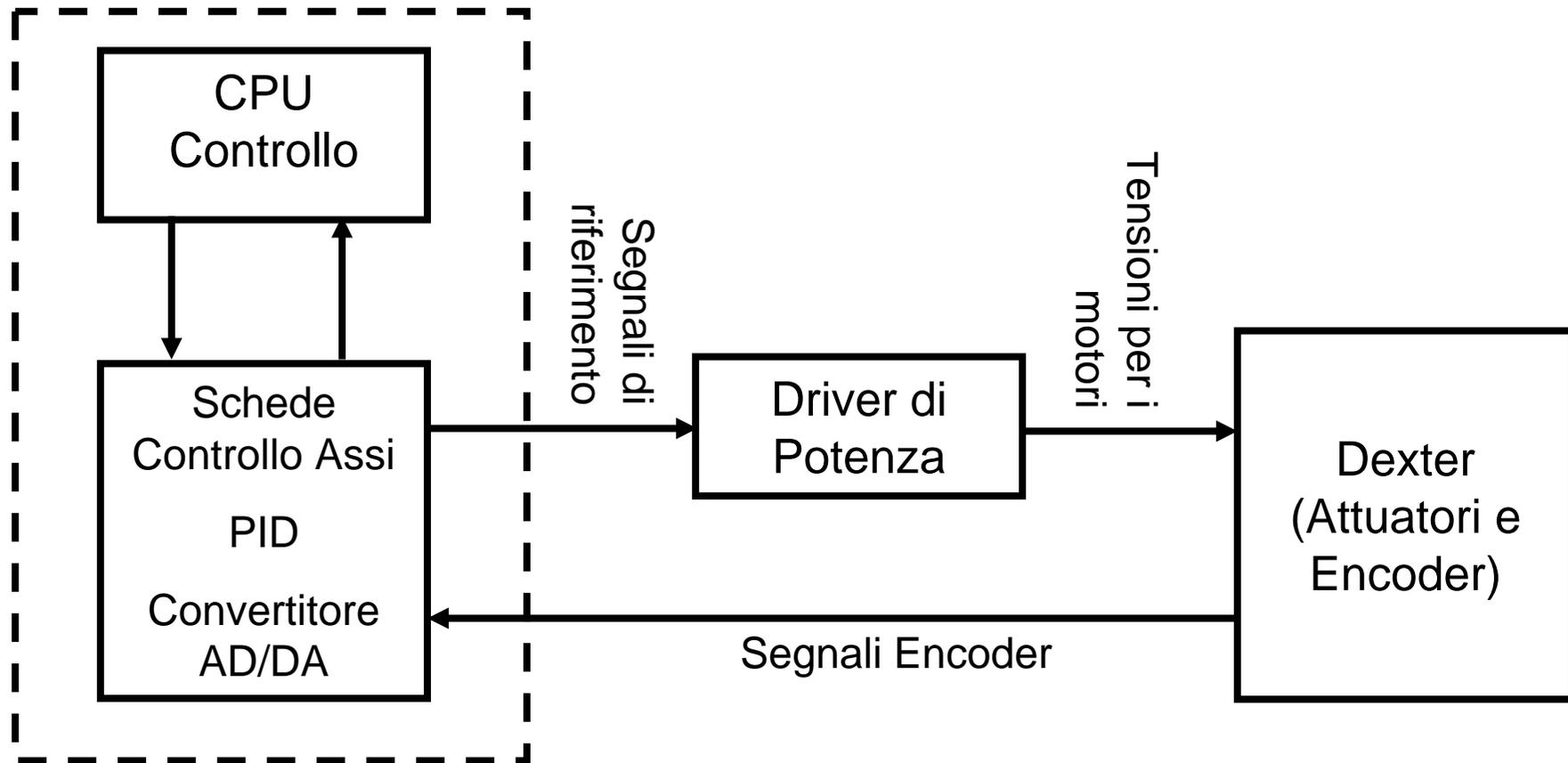


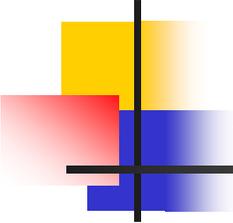
# Joint Ranges



# Sistema di controllo

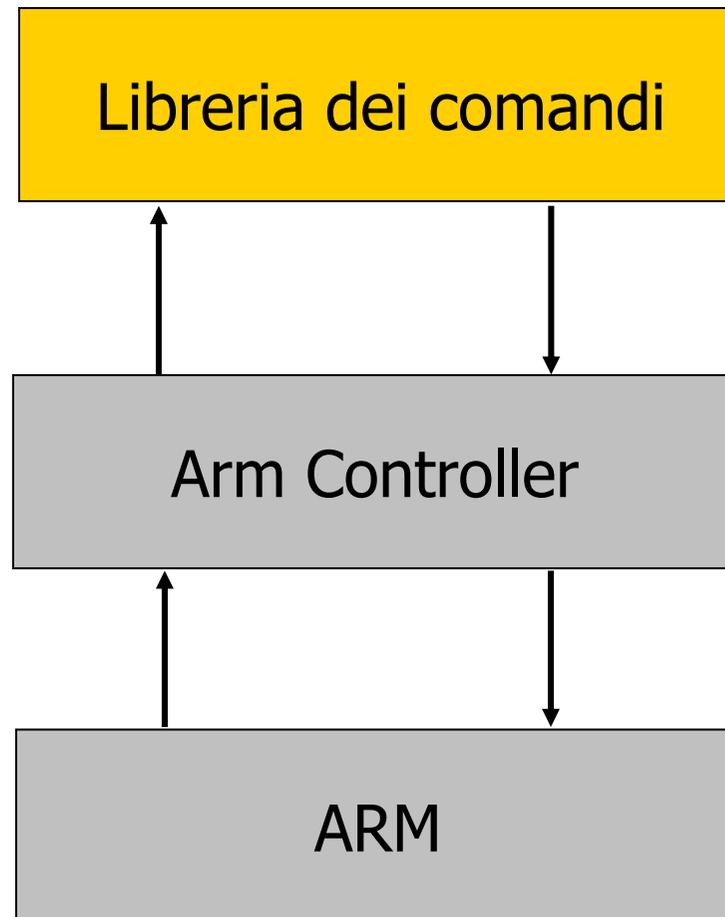
PC

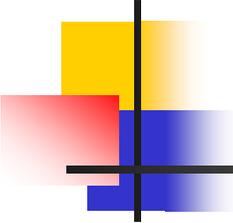




# Architettura software

---





# Interfacce Software

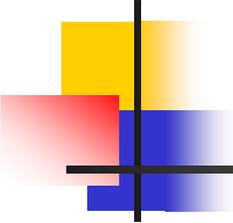
---

*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

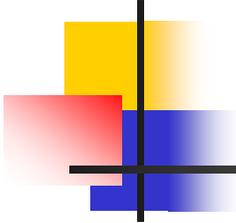


# Interfacce Software

---

*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



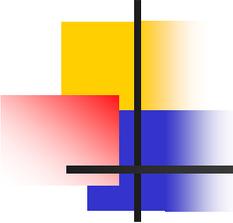
# Interfacce Software

---

*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