



Corso di Robotica 2

Controllo ibrido di forza/velocità

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



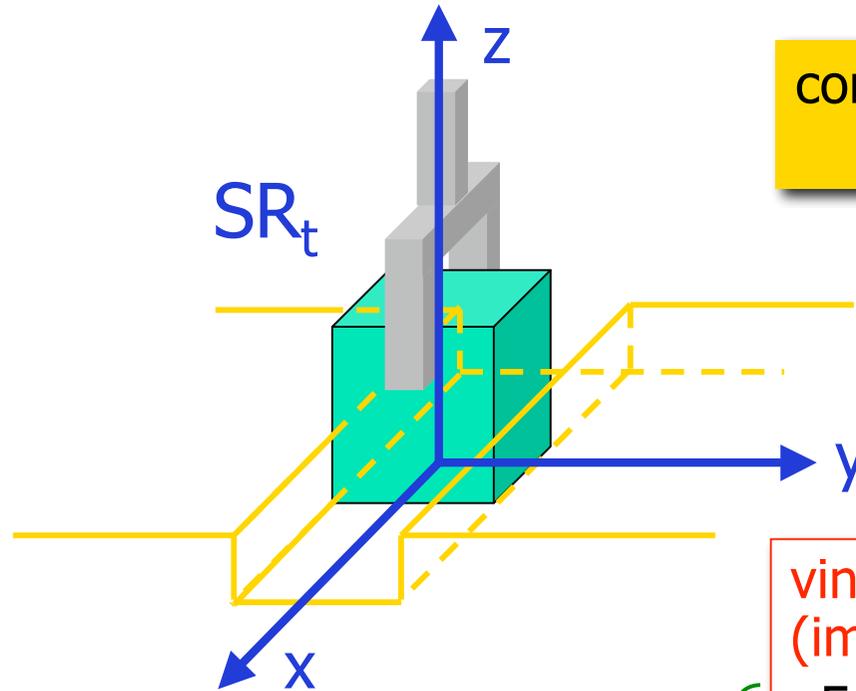
Vincoli naturali e artificiali

- il **contatto** fra robot e ambiente (rigido e privo di attrito = puramente geometrico) **vincola in modo "naturale"** il moto dell'E-E
- in **condizioni ideali** (robot e ambiente perfettamente rigidi, assenza di attrito), nello **spazio del compito (task space)** si possono individuare **due set di direzioni generalizzate selezionate** in modo che
 - è possibile il **moto** dell'E-E nel **primo set di k direzioni** (lungo cui l'ambiente non può opporre alcuna reazione)
 - esistono **reazioni vincolari** nel **secondo set di 6-k direzioni** (lungo cui l'ambiente impedisce il moto dell'E-E)

vincoli "naturali"
su forza e moto
imposti dal compito
- queste direzioni sono **"ortogonali"** tra loro (in realtà **complementari**, ossia complessivamente coprono tutto lo spazio cartesiano) e definiscono un opportuno **task frame** SR_t (tipicamente associato poi all'E-E del robot)
- per compiti di interazione generali, posizione e orientamento del **task frame** dipendono dal **tempo**
- le **specifiche di esecuzione del compito** impongono poi **vincoli "artificiali"** in termini di valori desiderati (e imposti dal controllo) per le velocità, nelle **k direzioni ammissibili di moto**, e per le forze di contatto, nelle **6-k direzioni ammissibili di forza**



Task frame e vincoli - esempio 1



compito: far slittare il cubo lungo il binario

vincoli naturali (geometrici)

$$\left. \begin{array}{l} v_y = v_z = 0 \\ \omega_x = \omega_z = 0 \end{array} \right\} 6-k=4$$
$$\left. \begin{array}{l} F_x = M_y = 0 \end{array} \right\} k=2$$

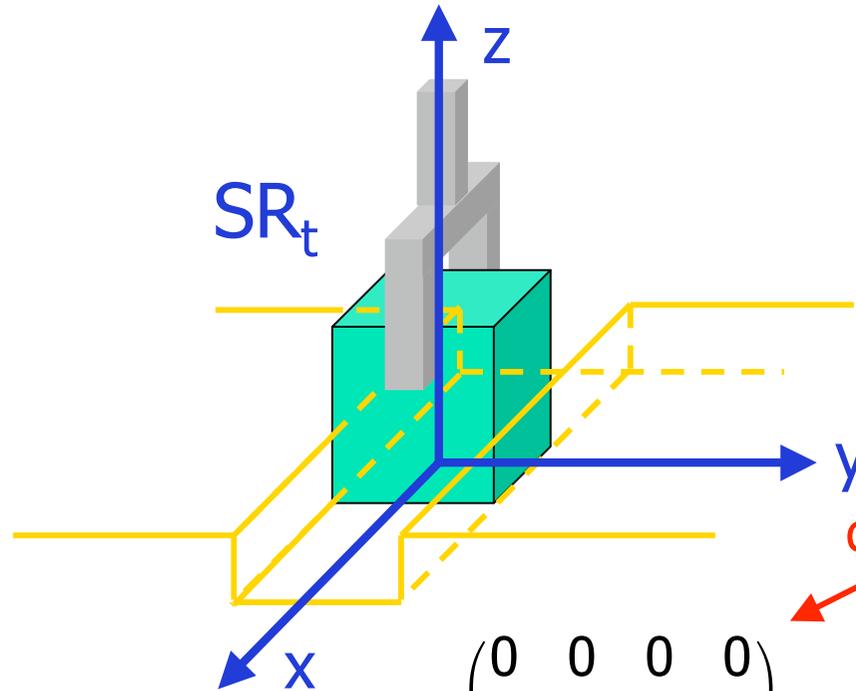
v = velocità lineare
 ω = velocità angolare
 F = forza
 M = momento

vincoli artificiali (imposti dal controllore)

$$6-k=4 \left\{ \begin{array}{l} F_y = F_{y,des} = 0 \\ M_x = M_{x,des} = 0, \quad M_z = M_{z,des} = 0 \\ F_z = F_{z,des} \end{array} \right.$$
$$k=2 \left\{ \begin{array}{l} \omega_y = \omega_{y,des} = 0 \\ v_x = v_{x,des} \end{array} \right.$$



Selezione delle direzioni - esempio 1



$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ \omega_y \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ \omega_y \end{pmatrix}$$

qui, costanti

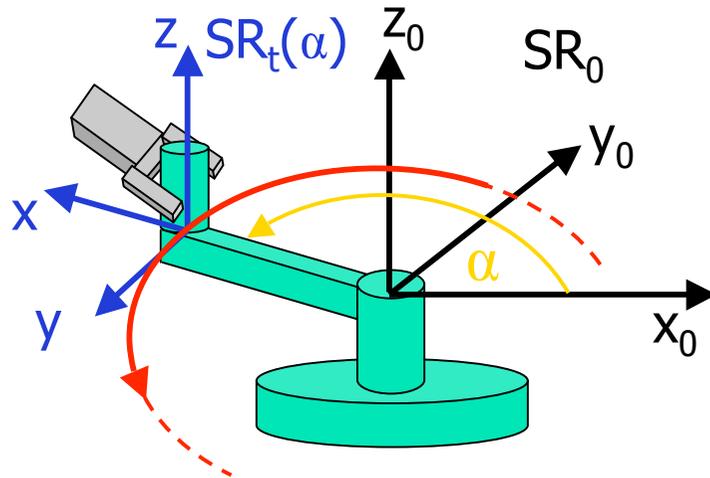
$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_z \end{pmatrix} = Y \cdot \begin{pmatrix} F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_z \end{pmatrix}$$

$$T^T \cdot Y = 0$$

reazioni vincolari non possono compiere lavoro



Task frame e vincoli - esempio 2



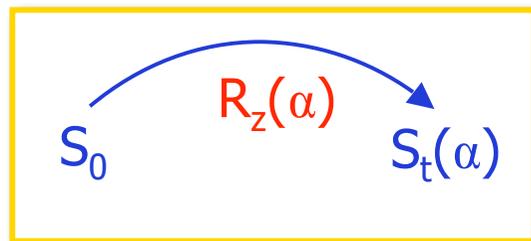
compito: girare la manovella
(manicotto folle)

vincoli naturali

$$\begin{aligned}v_x &= v_z = 0 \\ \omega_x &= \omega_y = 0 \\ F_y &= M_z = 0\end{aligned}$$

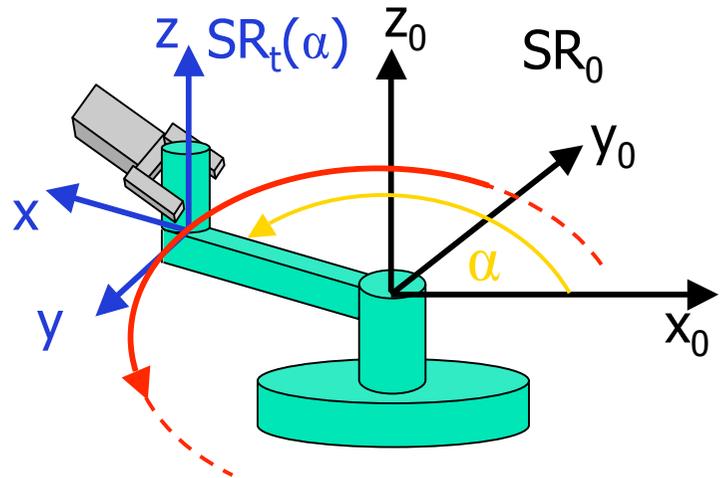
vincoli artificiali

$$\begin{aligned}F_x &= F_{x,des} = 0, \quad F_z = F_{z,des} = 0 \\ M_x &= M_{x,des} = 0, \quad M_y = M_{y,des} = 0 \\ v_y &= v_{y,des} \\ \omega_z &= \omega_{z,des} = 0\end{aligned}$$





Selezione delle direzioni - esempio 2



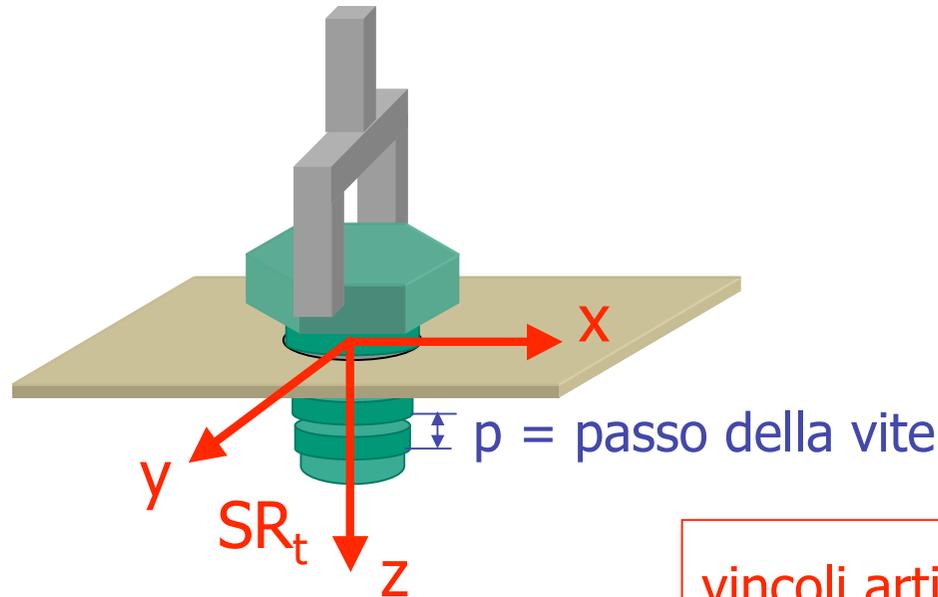
$$\begin{pmatrix} {}^0\mathbf{v} \\ {}^0\boldsymbol{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T(\alpha) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}^T(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{v}_y \\ \boldsymbol{\omega}_z \end{pmatrix} = \mathbf{T}(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{v}_y \\ \boldsymbol{\omega}_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} {}^0\mathbf{F} \\ {}^0\mathbf{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T(\alpha) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}^T(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{F}_x \\ \mathbf{F}_z \\ \mathbf{M}_x \\ \mathbf{M}_y \end{pmatrix} = \mathbf{Y}(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{F}_x \\ \mathbf{F}_z \\ \mathbf{M}_x \\ \mathbf{M}_y \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}^T(\alpha) \cdot \mathbf{Y}(\alpha) = \mathbf{0}$$



Task frame e vincoli - esempio 3



compito: avvitare una vite
in un foro filettato

vincoli naturali (parziali...)

$$v_x = v_y = 0$$
$$\omega_x = \omega_y = 0$$

la vite si muove sia **lungo** che **intorno** l'asse **z**, ma **non** in modo **indipendente!** (1 dof)

analogamente, F_z ed M_z **non** possono essere **indipendenti**

vincoli artificiali (abbondanti...)

$$F_x = F_{x,des} = 0, \quad F_y = F_{y,des} = 0$$

$$M_x = M_{x,des} = 0, \quad M_y = M_{y,des} = 0$$

$$v_z = v_{z,des}, \quad \omega_z = \omega_{z,des} = (2\pi/p) \cdot v_{z,des}$$

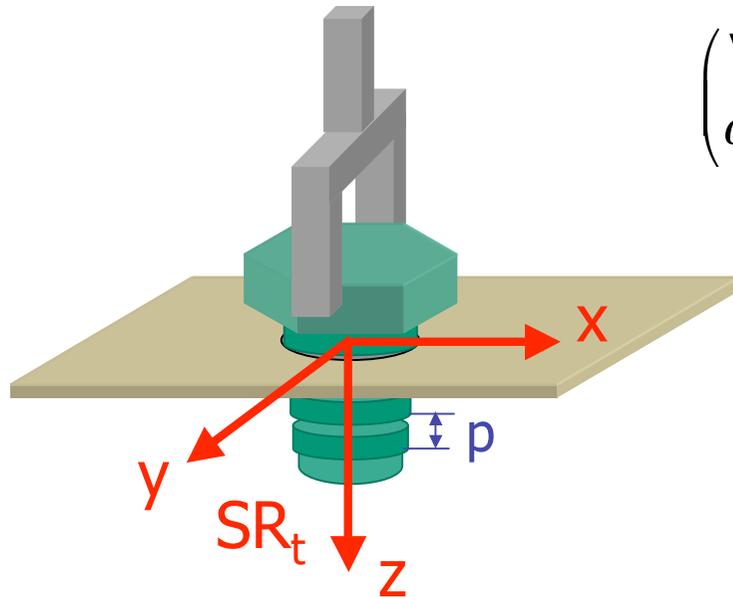
$$F_z = F_{z,des}, \quad M_z = M_{z,des}(F_{z,des})$$

le direzioni di forza sono ortogonali a quelle di moto!

A.A. 2008-2009



Selezione delle direzioni - esempio 3



$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{2\pi}{p} \end{pmatrix}^T \cdot v_z = T \cdot v_z \quad k=1$$

Y: tale che $T^T \cdot Y = 0$



$$F_z = -\frac{2\pi}{p} M_z$$

6-k=5

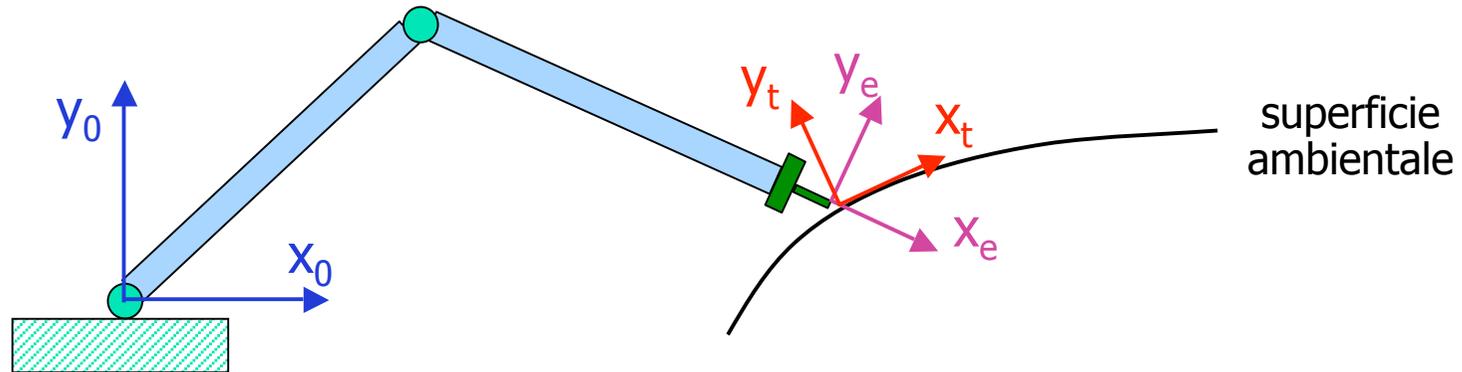
le colonne di T ed Y
non coincidono necessariamente
con direzioni cartesiane
(colonne della matrice identità)
⇨ direzioni generalizzate

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2\pi}{p} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = Y \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}$$



Terne di interesse - esempio 4

moto planare di un robot 2R in contatto con superficie (M=2)

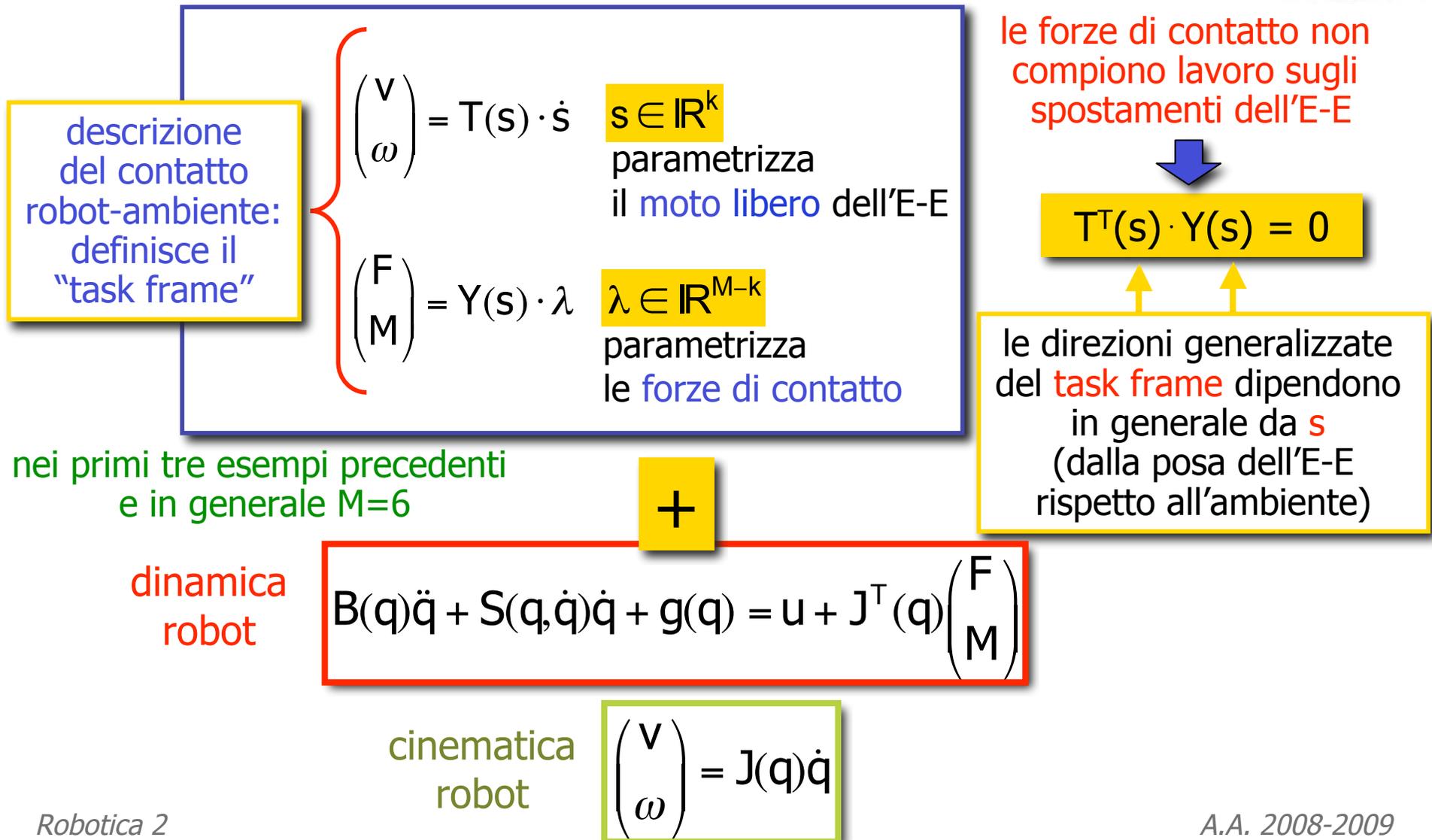


- terna SR_t di task, per la definizione indipendente delle **specifiche** ibride (qui: ${}^t v_{x,des}$ [$k=1$] e ${}^t F_{y,des}$ [$M-k=1$]) e il calcolo degli errori per il **controllo**
- terna SR_e del sensore (qui = SR_2) dove si misura la **forza** ${}^e F = ({}^e F_x, {}^e F_y)$
- terna SR_0 di base nella quale è espressa la **velocità** dell'organo terminale (qui, ${}^0 v = ({}^0 v_x, {}^0 v_y)$ di O_2), ottenuta dal calcolo dello Jacobiano e dalle velocità di giunto

servirà poi esprimere (ruotare) tutte le grandezze nella **stessa** terna di riferimento: quella di **task!**



Formalismo per il controllo ibrido





Controllo ibrido di forza/velocità

- **obiettivo del controllo:** imporre andamenti desiderati ai parametri di **moto** s e a quelli di **forza** λ

$$s(t) \rightarrow s_d(t), \quad \lambda(t) \rightarrow \lambda_d(t)$$

- legge di controllo progettata in **due passi**

1. **disaccoppiamento e linearizzazione** via feedback nel **task frame**

modello ad anello chiuso \rightarrow
$$\begin{pmatrix} \ddot{s} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_s \\ a_\lambda \end{pmatrix}$$

2. sintesi (**lineare**) di a_s e a_λ per imporre la **dinamica desiderata** agli **errori** $e_s = s_d - s$, ed $e_\lambda = \lambda_d - \lambda$

- **assunzioni:** $N = M$ ($= 6$, di solito), $J(q)$ non singolare
(+ $T^T \cdot Y = 0$)

Feedback linearizzazione nel task space



$$J(q) \cdot \dot{q} = T(s) \cdot \dot{s} \Rightarrow J \cdot \ddot{q} + \dot{J} \cdot \dot{q} = T \cdot \ddot{s} + \dot{T} \cdot \dot{s} \Rightarrow \ddot{q} = J^{-1}(T \cdot \ddot{s} + \dot{T} \cdot \dot{s} - \dot{J} \cdot \dot{q})$$

$$B(q)\ddot{q} + S(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u + J^T(q) \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = u + J^T(q)Y(s) \cdot \lambda$$

$$\left(B(q)J^{-1}(q)T(s) \quad \vdots \quad -J^T(q)Y(s) \right) \begin{pmatrix} \ddot{s} \\ \lambda \end{pmatrix} + B(q)J^{-1}(q)(\dot{T}(s)\dot{s} - \dot{J}(q)\dot{q}) + S(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u$$

matrice $N \times N$
non singolare
sotto le ipotesi
fatte

$$u = \left(BJ^{-1}T \quad \vdots \quad -J^TY \right) \begin{pmatrix} a_s \\ a_\lambda \end{pmatrix} + BJ^{-1}(\dot{T}\dot{s} - \dot{J}\dot{q}) + S \cdot \dot{q} + g$$

controllo
disaccoppiante
e linearizzante

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \ddot{s} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_s \\ a_\lambda \end{pmatrix} \left. \begin{array}{l} \} k \\ \} M - k \end{array} \right\} \begin{array}{l} s \text{ ha "grado relativo" } 2 \\ \lambda \text{ ha "grado relativo" } 0 \end{array}$$



Stabilizzazione con a_s e a_λ

al solito, sufficienti tecniche di controllo **lineare** (sui singoli canali ingresso-uscita scalari)

$$a_s = \ddot{s}_d + K_D(\dot{s}_d - \dot{s}) + K_P(s_d - s)$$

$$\Rightarrow \ddot{e}_s + K_D\dot{e}_s + K_P e_s = 0 \quad e_s = s_d - s \rightarrow 0$$

$$a_\lambda = \lambda_d + K_I \int (\lambda_d - \lambda) d\tau$$

N.B. qui basterebbe $a_\lambda = \lambda_d$ ma non avremmo un "errore" di forza (scarsa robustezza)

$$\Rightarrow \dot{\varepsilon}_\lambda + K_I \varepsilon_\lambda = 0 \quad \varepsilon_\lambda = \int (\lambda_d - \lambda) d\tau \rightarrow 0$$

servono "misure" di s , \dot{s} e λ !



Filtraggio misure di posizione e forza

- ➔ s, \dot{s} ricavate dalle misure di q e \dot{q} , uguagliando le descrizioni di posa e velocità dell'E-E dal "punto di vista del robot" (cinematica diretta e differenziale) e dal "punto di vista dell'ambiente" (funzioni di s)

esempio

$${}^0r = {}^0f(q) = \begin{pmatrix} L \cos s \\ L \sin s \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow s = \text{ATAN2}({}^0f_y(q), {}^0f_x(q))$$
$$J(q) \cdot \dot{q} = T(s) \cdot \dot{s} \Rightarrow \dot{s} = T^\#(s) J(q) \cdot \dot{q}$$

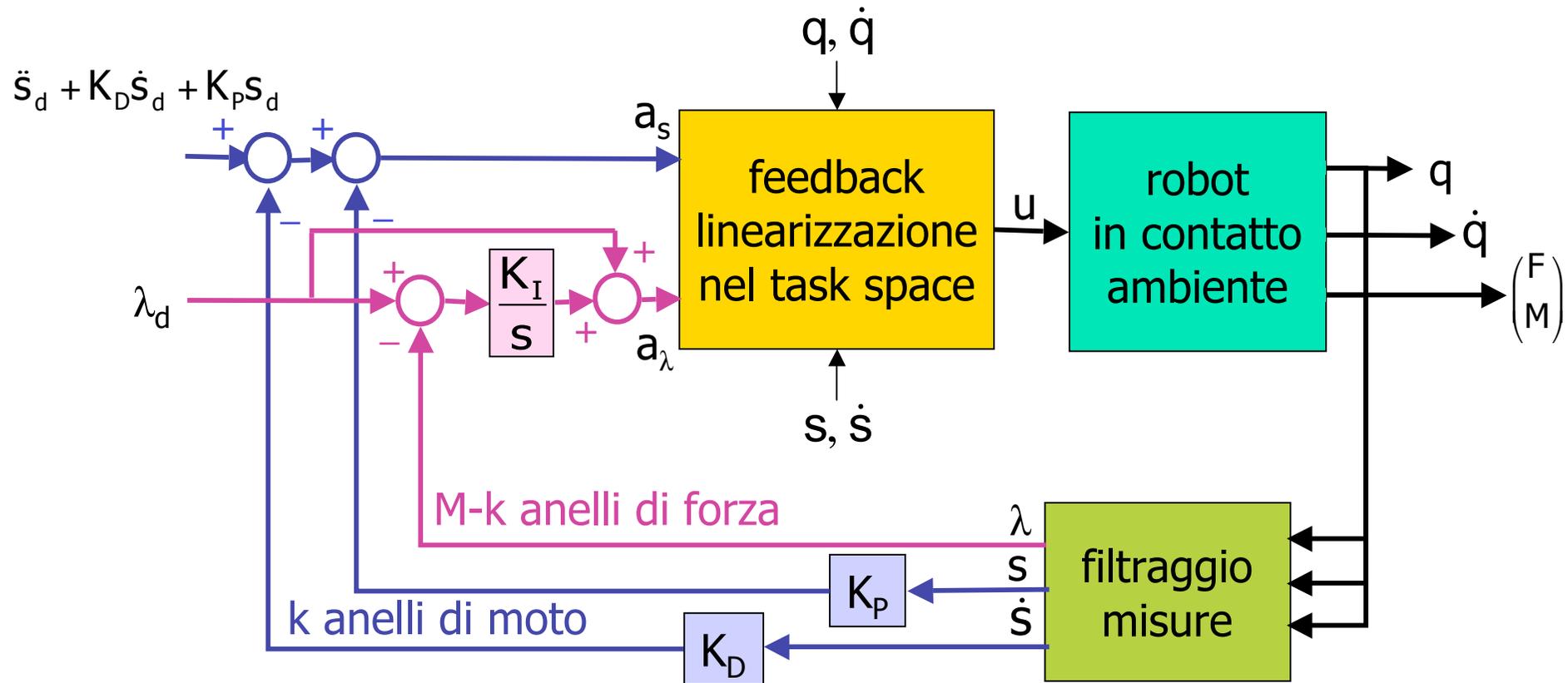
- ➔ λ ricavato dalle misure delle forze/momenti all'end-effector

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = Y(s) \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = Y^\#(s) \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix}$$

pseudoinverse di matrici "strette" a rango pieno, ad es. $(T^T T)^{-1} T^T$ (o anche pesate)



Schema a blocchi complessivo



casi limite $k=M$ (moto nello spazio libero): nessun controllo di forza, solo di moto
 $k=0$ (E-E del robot "bloccato"): nessun controllo di moto, solo di forza

Fonti di incongruenze fra misure



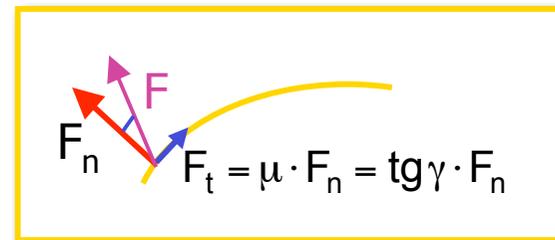
1. presenza di **attrito** al contatto
 - c'è una componente di forza nelle direzioni "libere" di velocità che si oppone al moto (se attrito di Coulomb, dipendente anche dalla forza normale applicata...)
2. **cedevolezza** nella struttura robotica e/o al contatto
 - ci può essere uno spostamento nelle direzioni "vincolate" dalla reazione ambientale
 - N.B.** se però la geometria dell'ambiente è nota con precisione, gli errori causati da 1. e 2. sulle "misure" di s e λ sono filtrati automaticamente dalla pseudo-inversione di T ed Y
3. incertezze sulla **geometria dell'ambiente** nel contatto
(da stimare real-time con sensori esterni: visione, ma anche forza!)



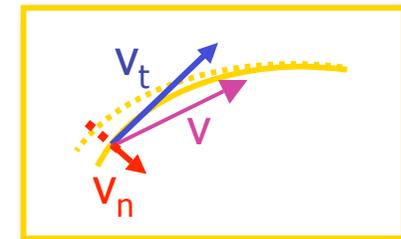
Identificazione di un profilo incognito

si può **identificare** un profilo incognito della superficie di contatto, a partire dalle misure di velocità e forza?

1. **normale** = direzione della **forza** misurata
... ma la presenza di attrito provoca una rotazione della forza rispetto alla normale effettiva di un angolo γ (incognito)



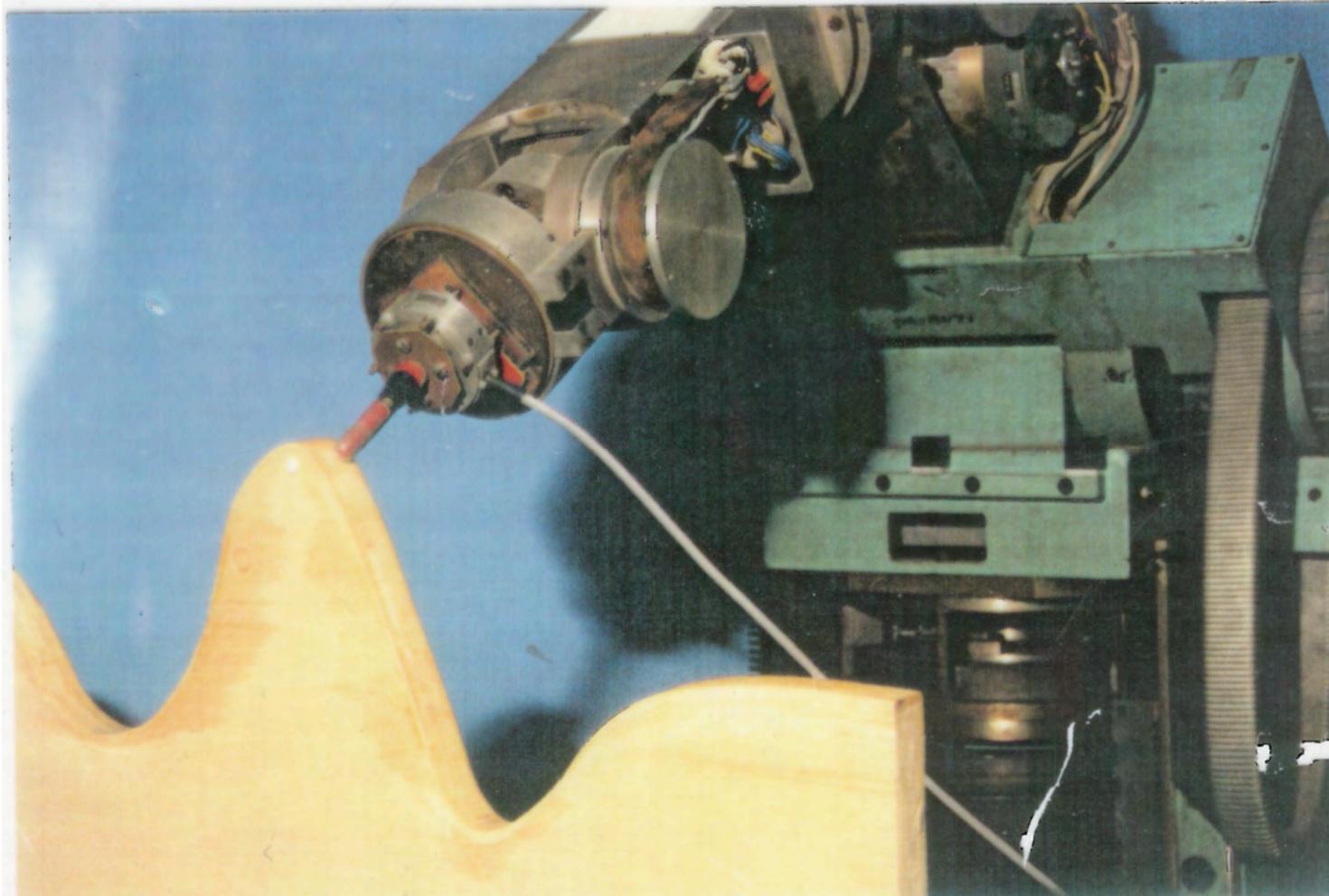
2. **tangente** = direzione della **velocità** misurata
... ma l'elasticità nella struttura robotica e/o al contatto possono indurre una componente di velocità lungo la normale



3. metodo misto (**fusione sensoriale**) con RLS
 - a. tangente identificata **in modo ricorsivo** da misure di posizione
 - b. angolo di attrito identificato **in modo ricorsivo** dalla tangente trovata in a. e dalle misure di forza

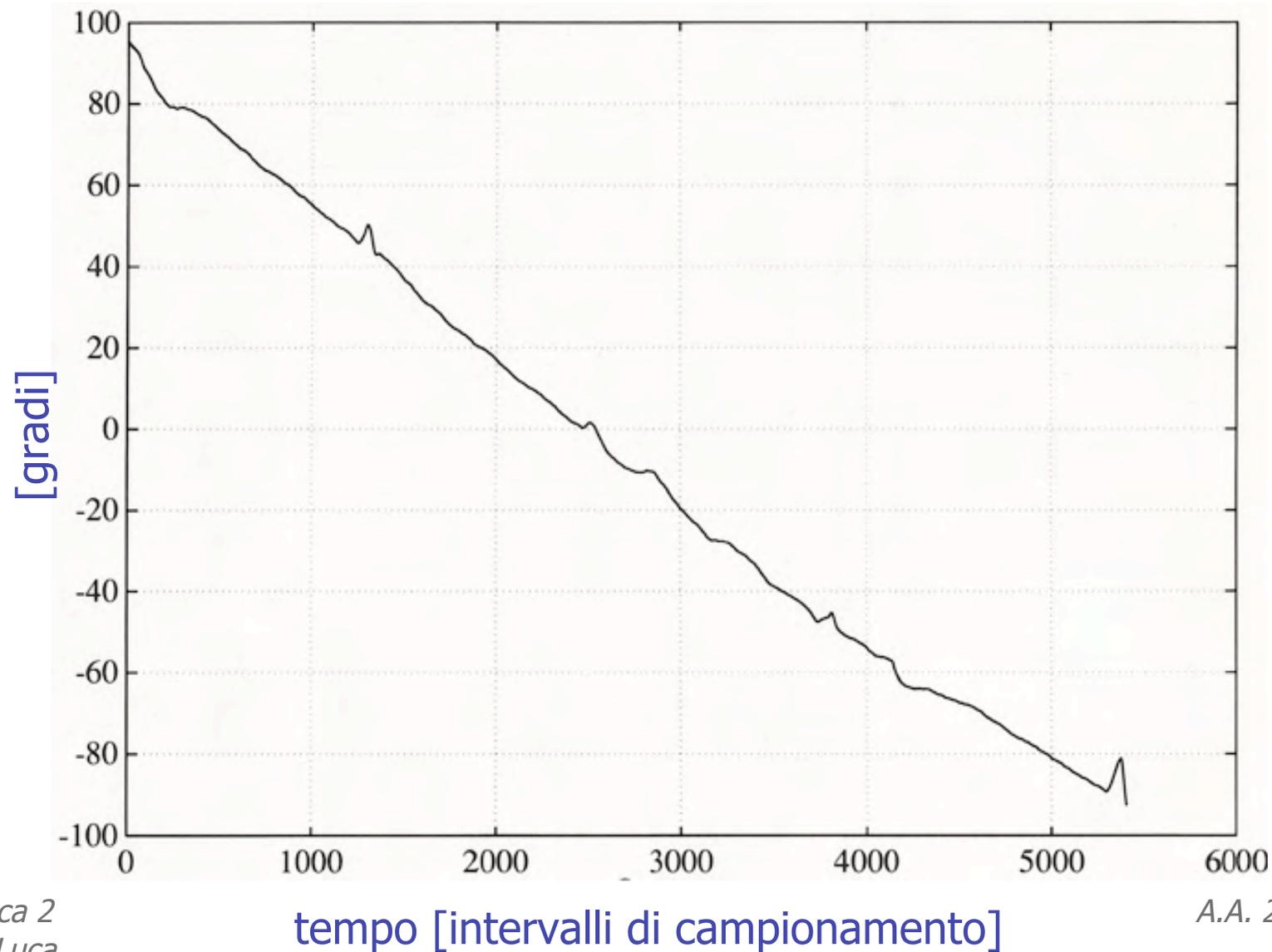
il robot è mantenuto in moto di contatto "in qualche modo"...

Identificazione e controllo ibrido effettuati in modo simultaneo



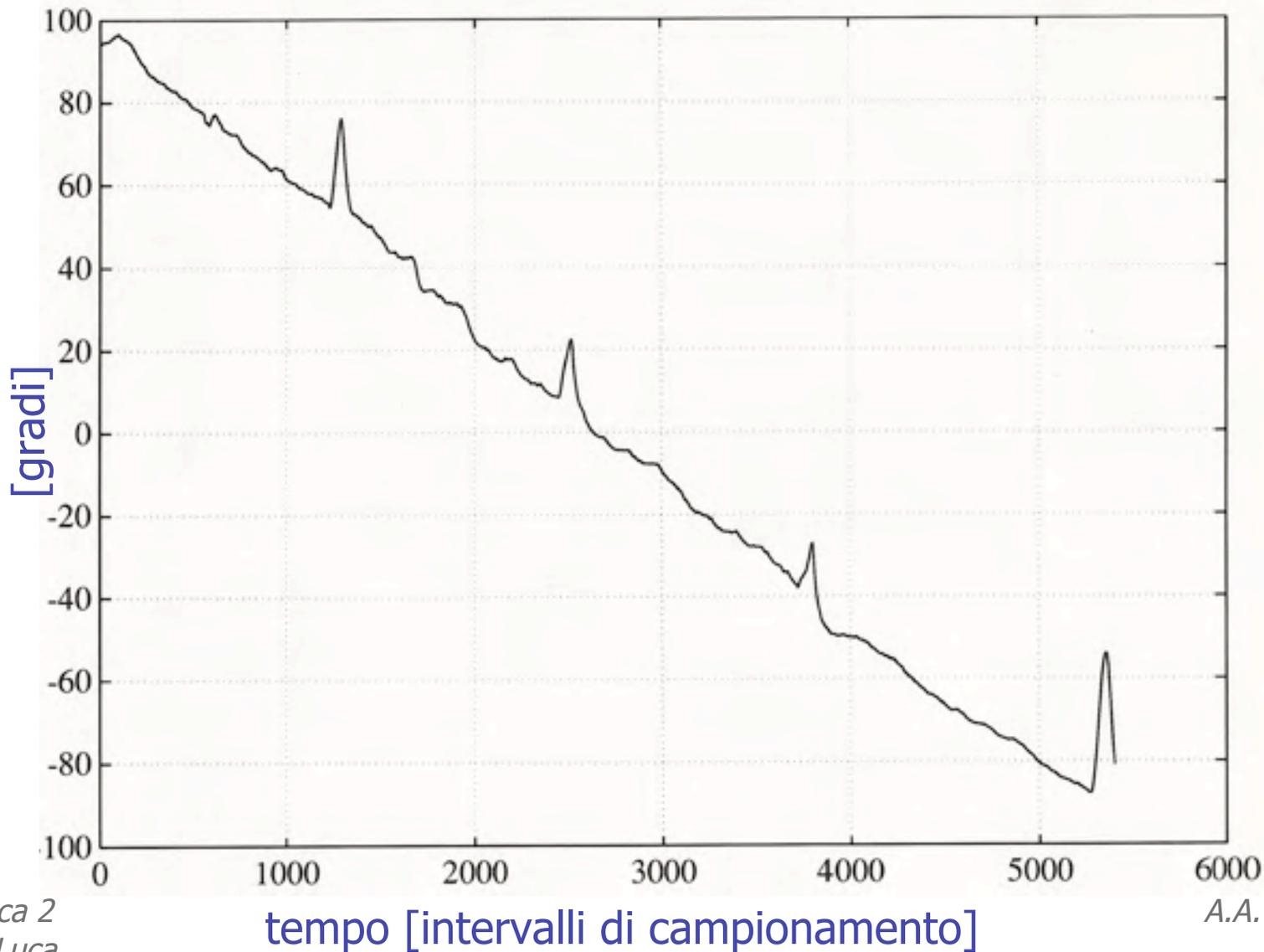
robot MIMO-CRF (DIS, Laboratorio di Robotica, 1992)

Tangente stimata da misure di posizione (superficie circolare percorsa a velocità costante)



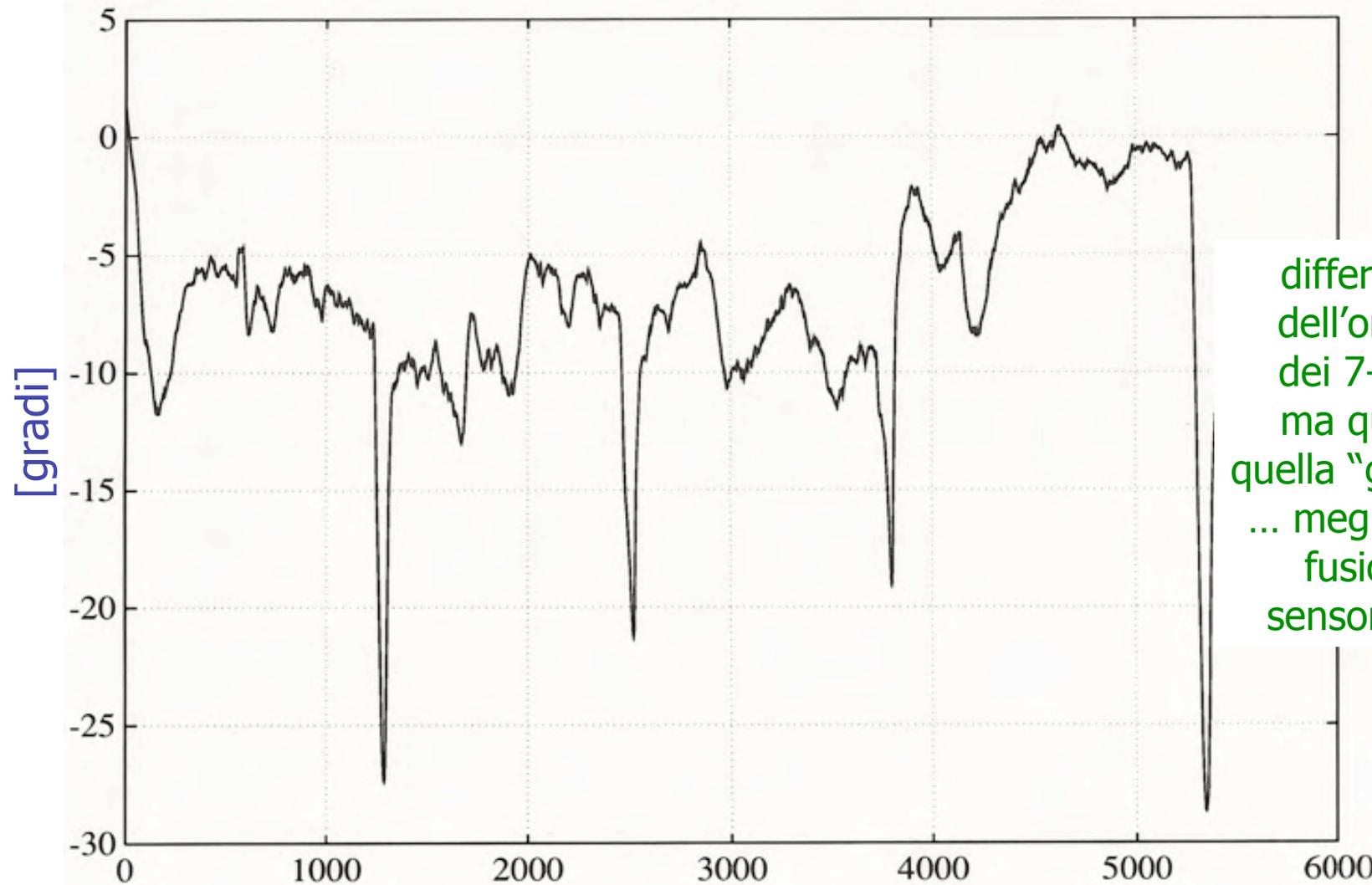
Tangente stimata da misure di forza

(stessa superficie circolare percorsa a velocità costante)





Differenza fra le tangenti stimate

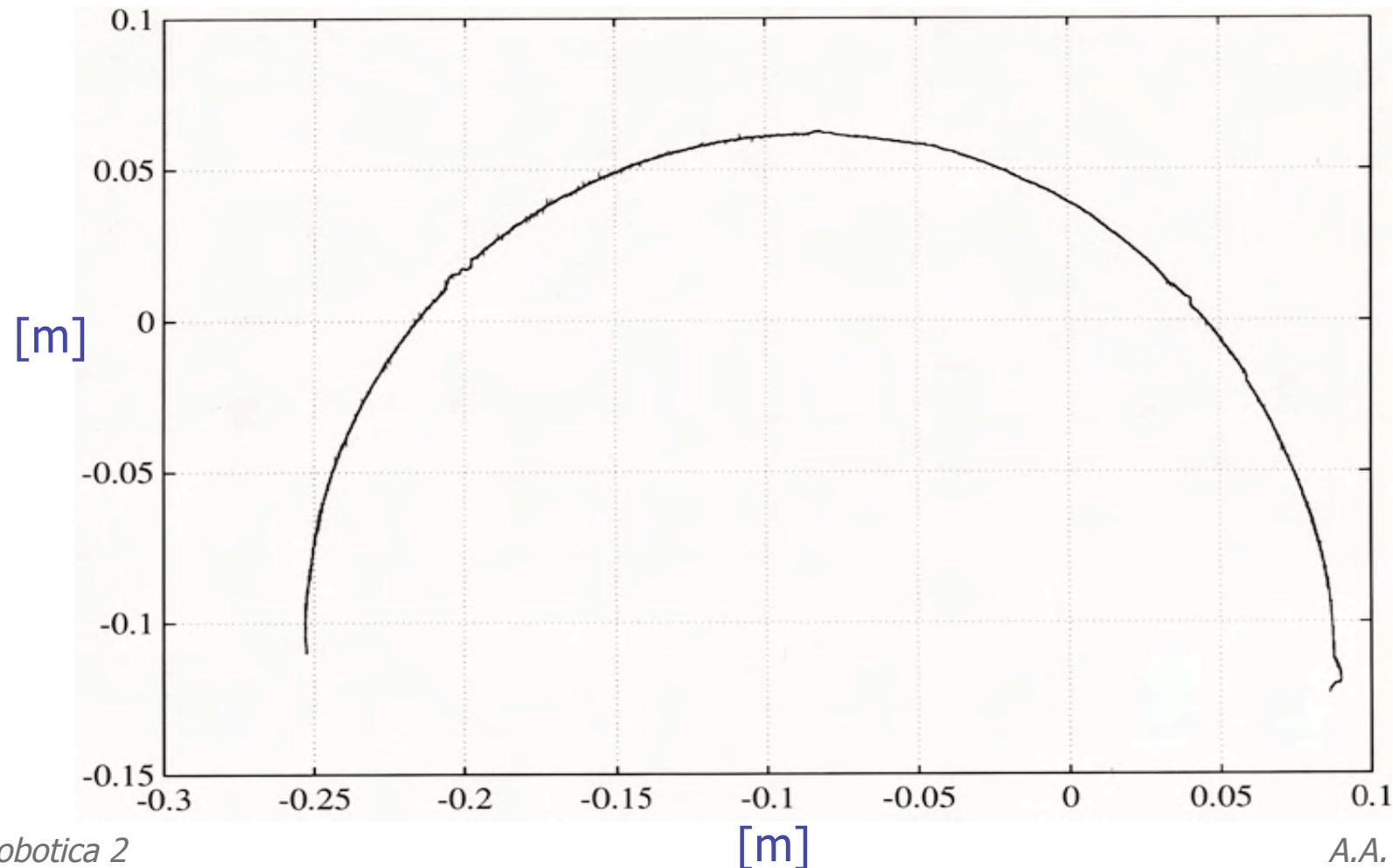


differenze dell'ordine dei 7-8°...
ma qual è quella "giusta"?
... meglio una fusione sensoriale!!



Profilo superficie riconosciuta

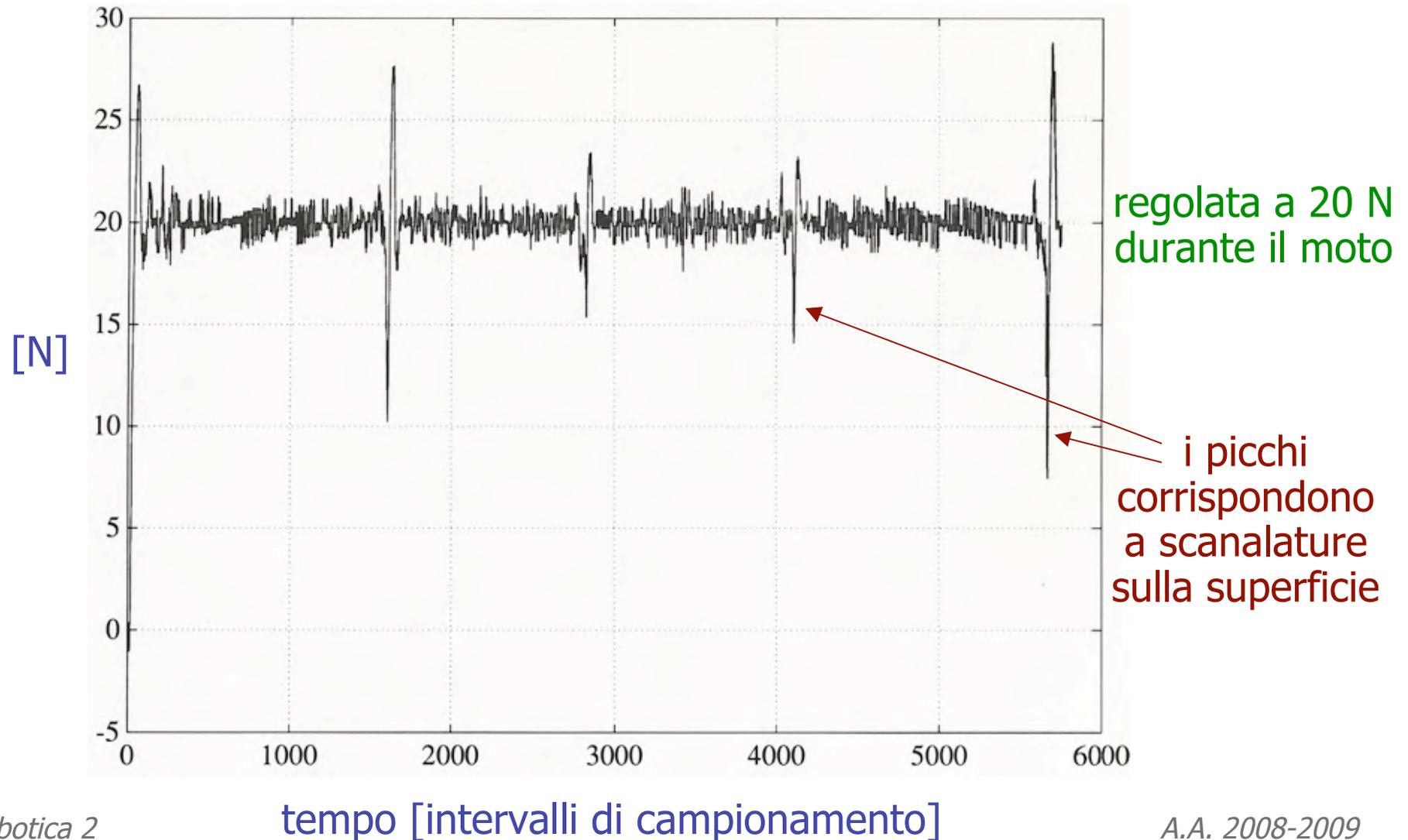
identificazione con metodo RLS (Recursive Least Squares),
fondendo sia misure di forza che di velocità



...era la
"pizza" di
un film
(raggio
= 17 cm)



Forza normale



Sbavatura robotizzata di parabrezza



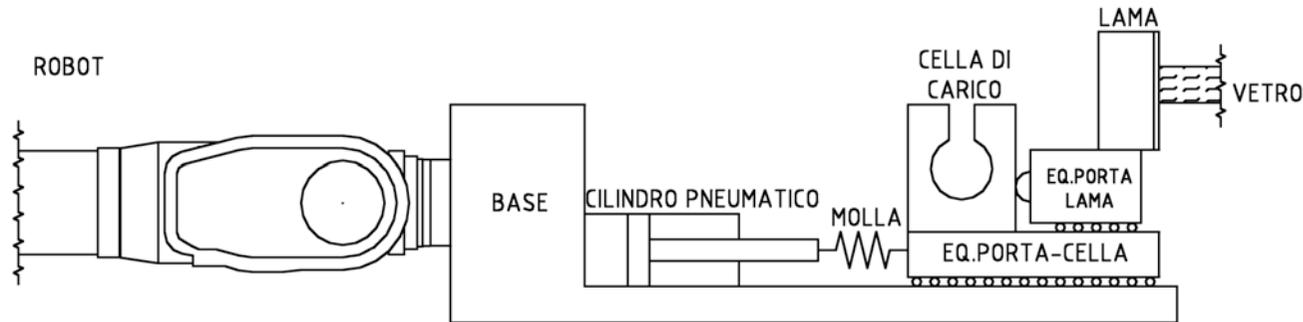
- parabrezza con spigoli vivi e **tolleranze** dimensionali dovute alla lavorazione e all'eccesso di materiale collante (PVB) tra strati vetrosi del parabrezza
- il robot segue il percorso prefissato, nonostante gli errori sulla forma nominale, grazie alla **cedevolezza passiva** nella testa di sbavatura
- la forza di contatto fra lama e vetro può essere controllata, in modo indipendente dal moto, grazie a un **cilindro pneumatico** nella testa di sbavatura

la testa di sbavatura è dotata di

- due lame per tagliare il PVB
- **cella di carico** per misurare la forza applicata
- **sistema di controllo**

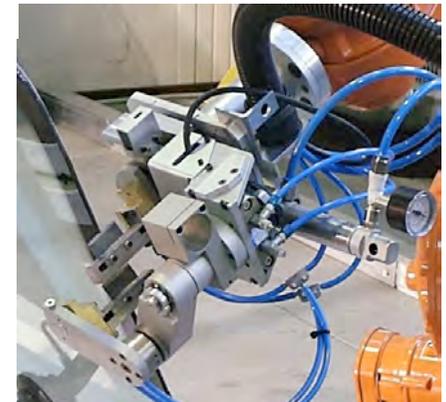
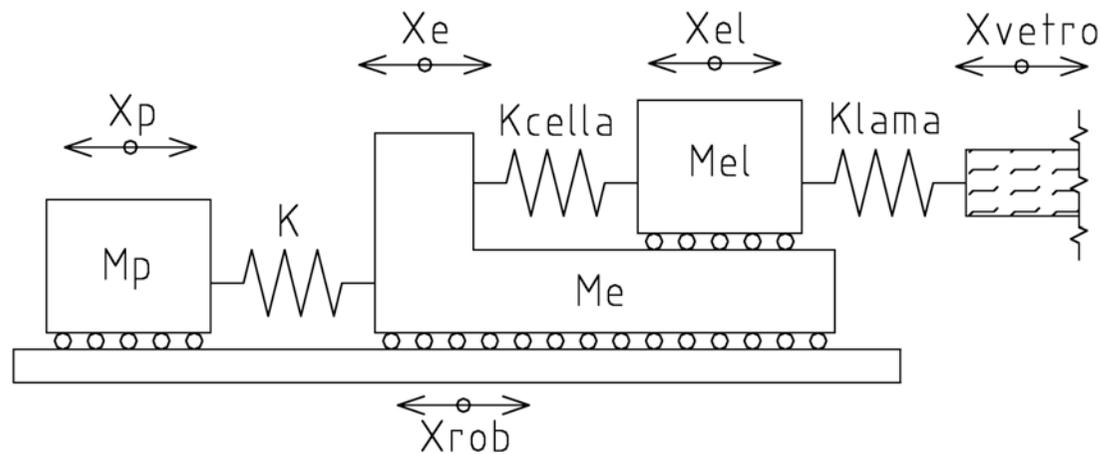


Modello testa di sbavatura



fisico

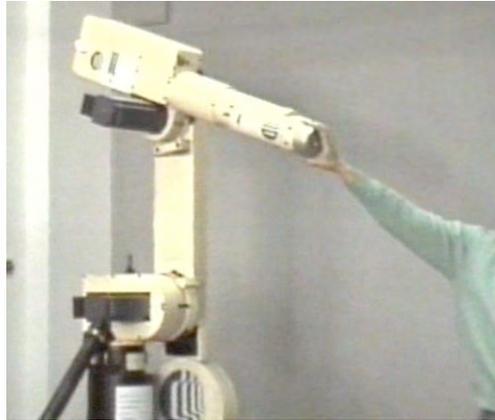
matematico



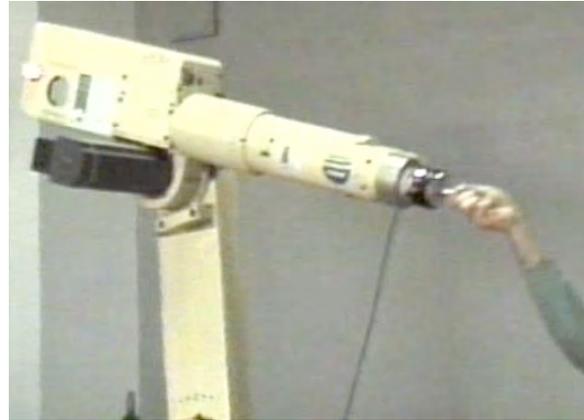
per l'analisi della stabilità (con luogo delle radici) del controllo di forza in una singola direzione in presenza di masse/elasticità multiple come in questo caso, vedi Eppinger & Seering, IEEE CSM, 1987 (materiale didattico)



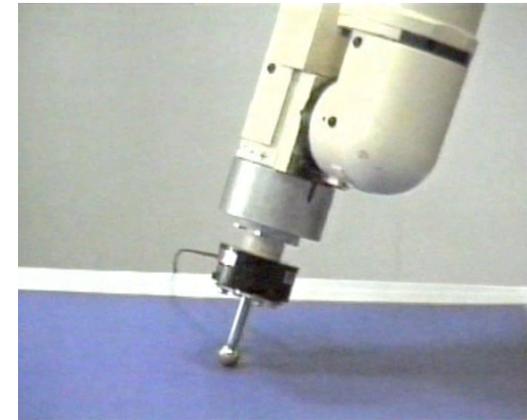
Video di ricapitolazione



compliance control
(controllo attivo di cedevolezza
senza sensore di forza)



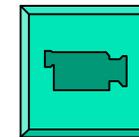
impedance control
(controllo di impedenza)



force control
(controllo di forza come
anello esterno ad un
controllore di posizione)



hybrid force/position control
(controllo ibrido)



robot COMAU
c/o Università di Napoli