



Corso di Robotica 2

Rilevazione e isolamento

I) di guasti degli attuatori

II) di collisioni ambientali (con reazione)

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Diagnosi dei guasti ("faults")

- nella diagnosi dei guasti in un sistema dinamico si possono considerare due problemi
- **Fault Detection** (rilevazione di un guasto)
 - riconoscere che il sistema si comporta in maniera anomala a causa di un guasto o di un malfunzionamento
- **Fault Isolation** (isolamento del guasto)
 - discriminare quale guasto f è avvenuto tra quelli considerati, distinguendolo da tutti gli altri guasti e da eventuali disturbi agenti sul sistema
- **soluzione FDI** (detection e isolation **simultanee**)
 - costruzione di un sistema dinamico (**Residual Generator**) la cui uscita dipende solo dal guasto f da rilevare e isolare (e non da qualsiasi altro guasto o disturbo) e converge asintoticamente a zero quando $f \equiv 0$



I) Guasti degli attuatori nei robot

$$q \in \mathbb{R}^N$$

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + F_v\dot{q} + F_s \text{sign}(\dot{q}) = u - u_f$$

matrice
d'inerzia
(>0)

centrifughi
e Coriolis

gravità

attrito
viscoso e statico

coppia di
comando

vettore di guasti (anche concorrenti su più assi) nell'attuazione

- fault totale ($u_{f,i} = u_i$)
- fault parziale ($u_{f,i} = \varepsilon u_i$)
- saturazione ($u_{f,i} = u_i - u_{i,\max}$)
- bias ($u_{f,i} = b_i$)
- ...



Ipotesi di lavoro

- è disponibile solo l'ingresso comandato u
 - ovviamente non u_f ...
 - è disponibile una **misura dell'intero stato** (q, \dot{q})
 - non sono comunque necessari altri sensori ("sensorless")
- è **noto il modello** dinamico del robot
 - in assenza di guasti
- **nessuna** richiesta di un **ingresso specifico** $u(t)$
 - può essere ad anello aperto o un controllo in feedback
- **nessuna** richiesta di un **moto specifico** $q_d(t)$



Momenti generalizzati

$$p = M(q)\dot{q}$$

con equazione dinamica

$$\dot{p} = u - u_f - \alpha(q, \dot{q})$$

componenti disaccoppiate
rispetto ai singoli ingressi di fault

$$\alpha_i = -\frac{1}{2}\dot{q}^T \frac{\partial M(q)}{\partial q_i} \dot{q} + g_i(q) + F_{v,i}\dot{q}_i + F_{s,i}\text{sign}(\dot{q}_i)$$

espressioni scalari, per $i=1, \dots, N$



Soluzione FDI

- definizione del vettore dei residui

$$r = K \left[\int (u - \alpha - r) dt - p \right]$$

$K > 0$
diagonale

- non sono richieste né l'accelerazione di giunto né l'inversione della matrice d'inerzia $M(q)$
- in condizioni ideali di conoscenza del modello

$$\dot{r} = -Kr + Ku_f$$

per K sufficientemente grande, r riproduce u_f



Residual Generator come osservatore

$$\begin{aligned}\dot{\hat{p}} &= u - \alpha(q, \dot{q}) + K(p - \hat{p}) \\ r &= K(\hat{p} - p)\end{aligned}$$



osservatore **non lineare** dei fault di attuazione
con dinamica d'errore **lineare**
(r = errore di osservazione)



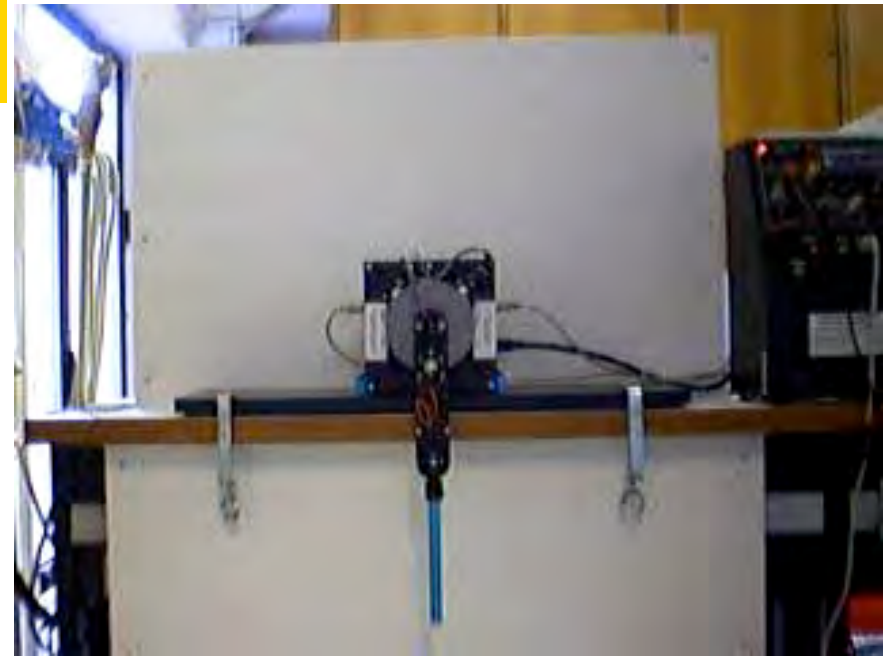
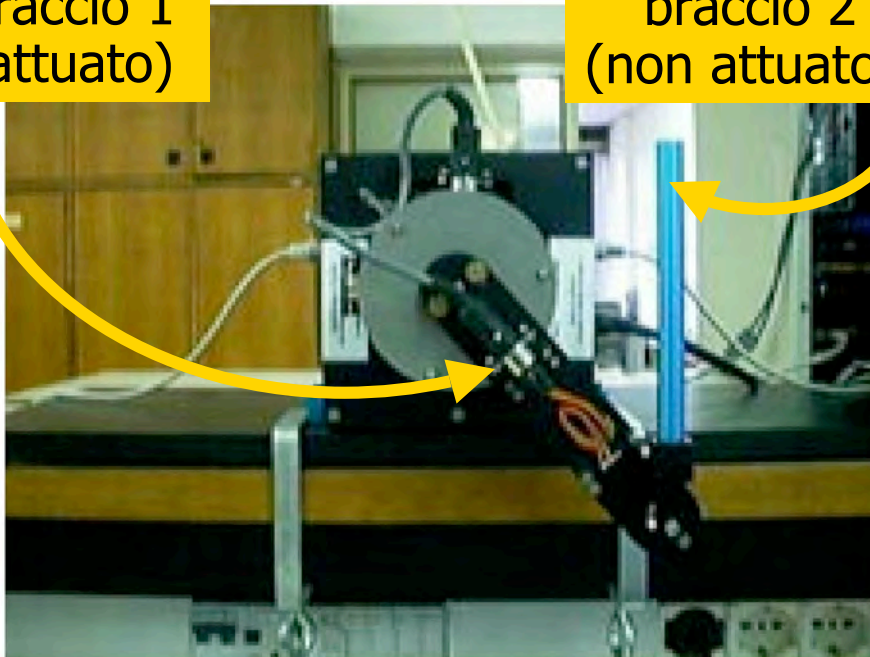
Set up sperimentale

Quanser Pendubot

video

braccio 1
(attuato)

braccio 2
(non attuato)



con encoder su tutti e due i giunti

controllo non lineare di swing-up

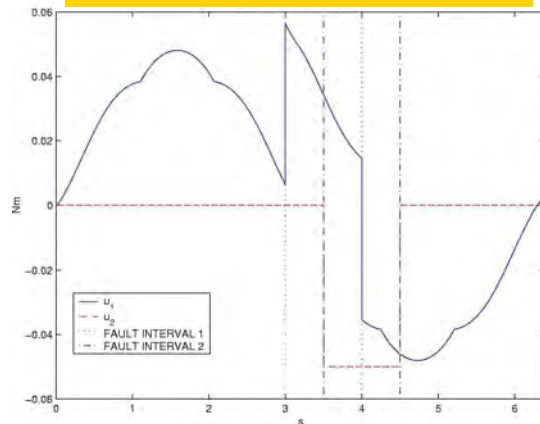
campionamento $T_c = 1$ msec, guadagno residui $K_i = 50$,
soglie pratiche di rilevamento fault $\cong 10^{-2} \div 10^{-3}$ Nm



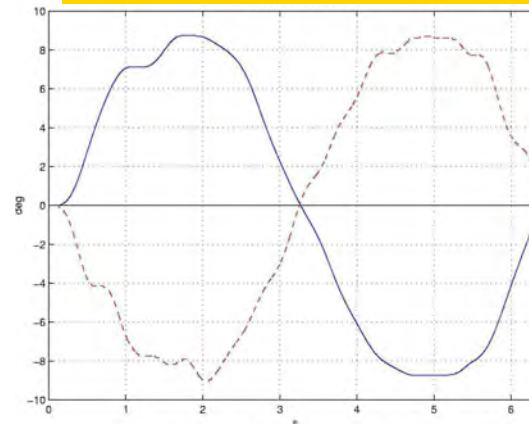
Esperimento 1

- motore 1 pilotato con tensione sinusoidale di periodo 2π sec (**open loop**)
- **bias fault** su u_1 nell'intervallo $t \in [3 \div 4]$ sec
- **total fault** sul secondo giunto nell'intervallo $t \in [3.5 \div 4.5]$ sec (richiesta una coppia costante in assenza di un motore...)
- **concorrenza dei fault** per $t \in [3.5 \div 4]$ sec

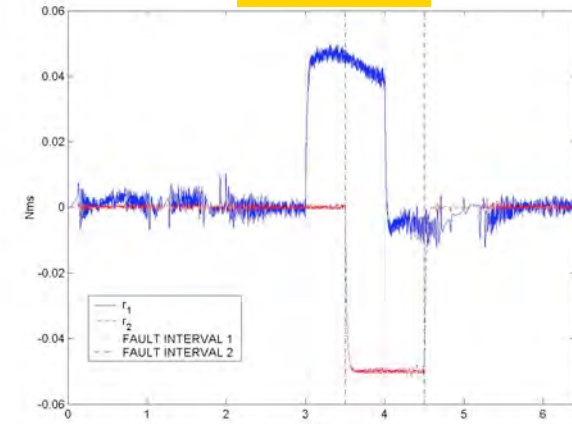
coppie comandate



posizioni dei giunti



residui



—■— giunto 1

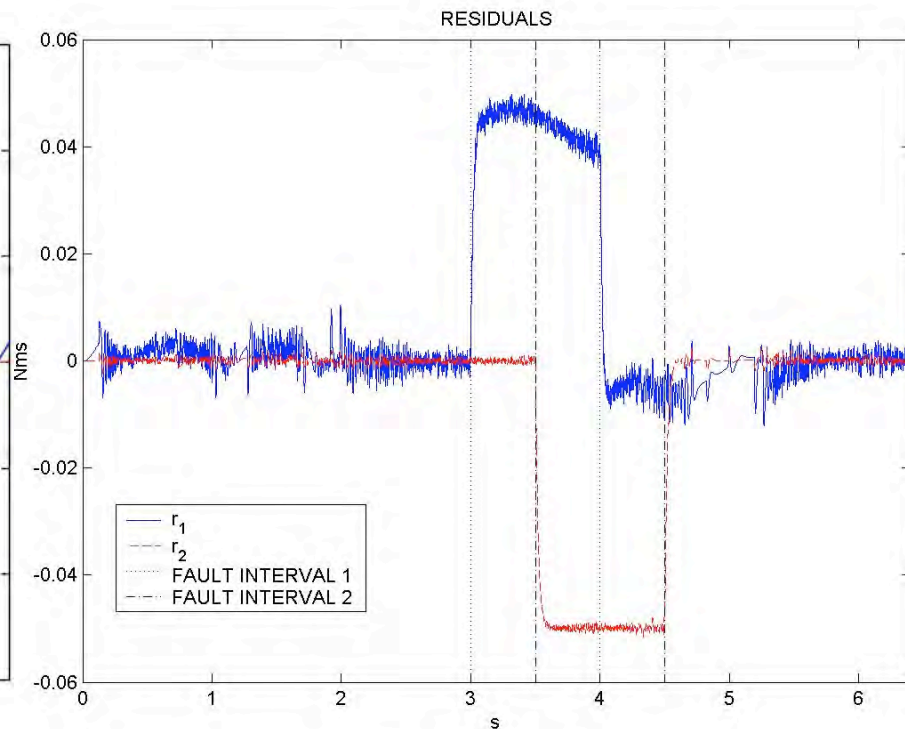
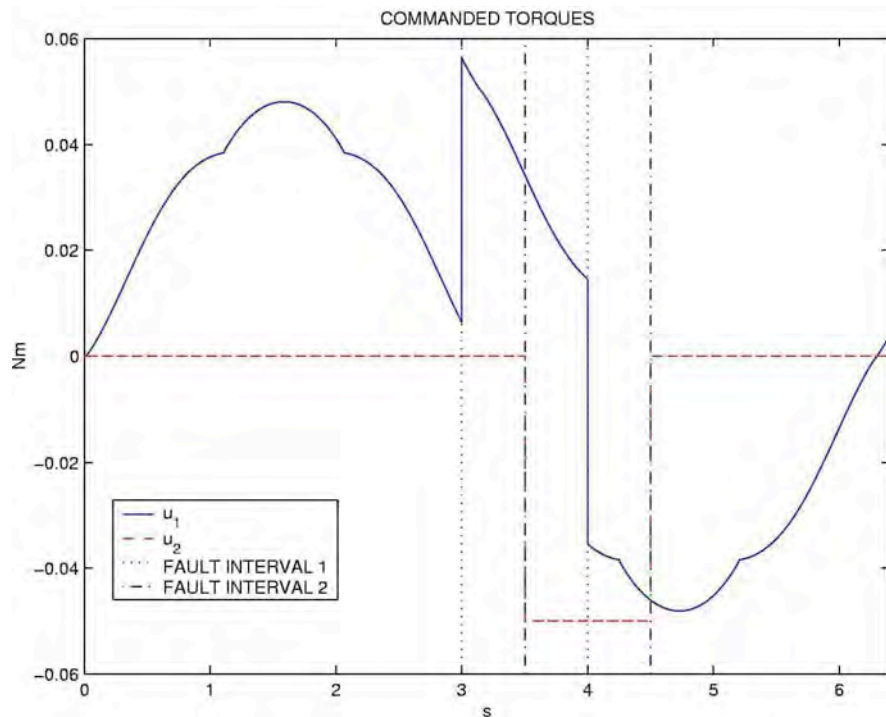
—■— giunto 2



Esperimento 1 - FDI

coppie comandate

residui



— giunto 1

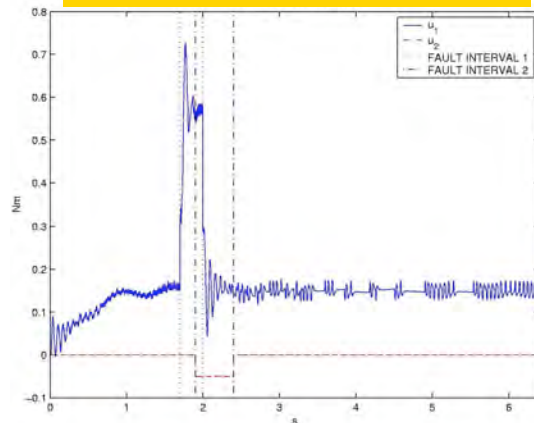
- - giunto 2



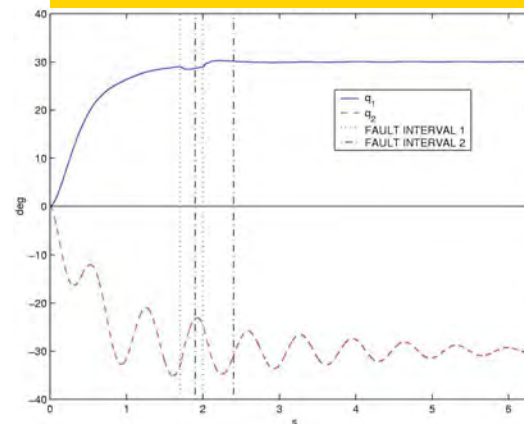
Esperimento 2

- regolazione di posizione del giunto 1 a $q_{1d} = 30^\circ$ (controllo PID)
- perdita del 50% di potenza su motore 1 nell'intervallo $t \in [1.7 \div 2]$ sec
- total fault sul giunto 2 nell'intervallo $t \in [1.9 \div 2.4]$ sec
- concorrenza dei fault per $t \in [1.7 \div 1.9]$ sec

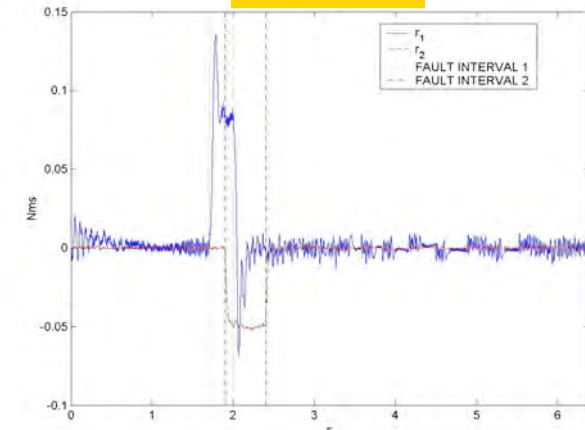
coppie comandate



posizione dei giunti



residui



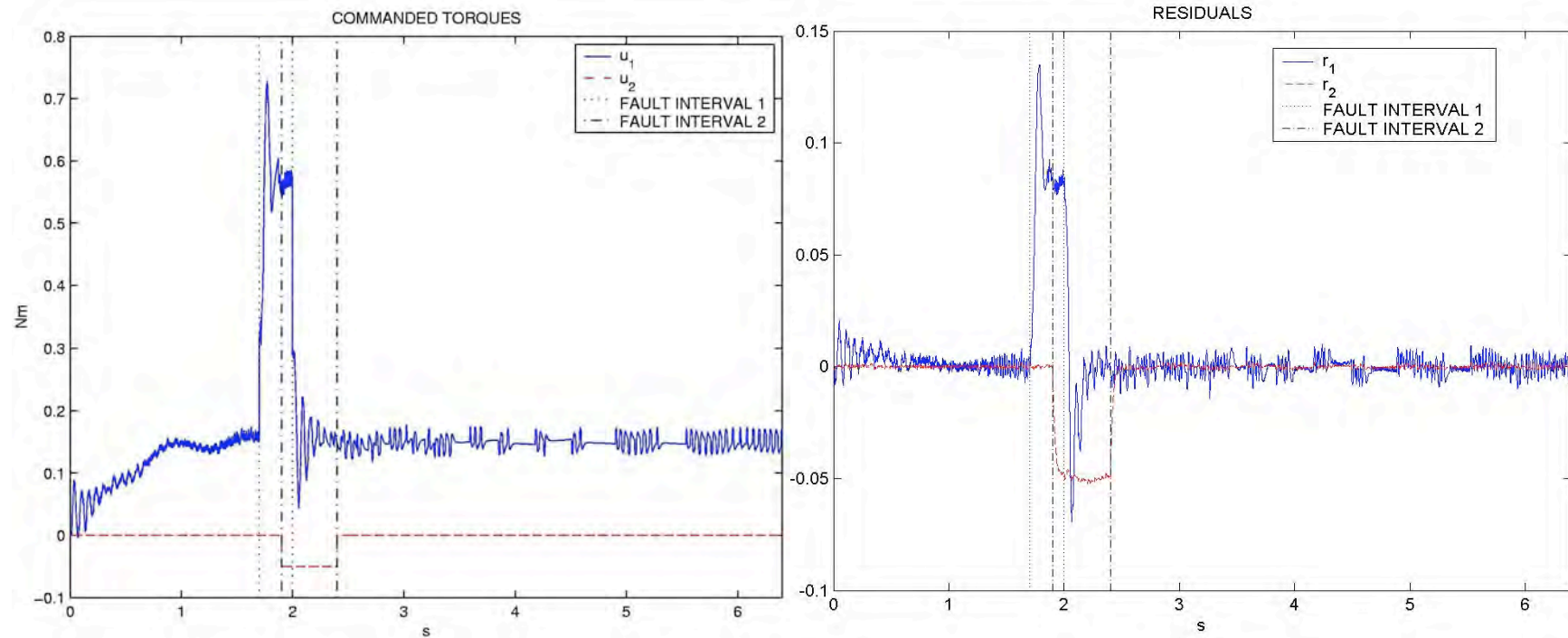
—■—■—■ giunto 1 —■—■—■ giunto 2



Esperimento 2 - FDI

coppie comandate

residui



— giunto 1

- - giunto 2



Estensioni

- il metodo FDI basato sui momenti generalizzati si può estendere facilmente al caso di presenza di **elasticità delle trasmissioni** (giunti), di **dinamica degli attuatori**, ...
- si può rendere lo schema **adattativo** per tener conto di incertezze parametriche sul modello dinamico del robot
- il metodo può essere modificato per la rilevazione e l'isolamento di classi significative di **guasti dei sensori** (ad es., fault del sensore di forza/coppia al polso)
- lo stesso principio è alla base di schemi recenti di **"collision detection and reaction"** nei robot



II) Gestione delle collisioni

- sicurezza nella **p**hysical **H**uman-**R**obot **I**nteraction (**pHRI**)
- “dependability” (affidabilità e più) dei robot
 - **meccanica** leggera e inclusione di cedevolezza
 - tipicamente, richiesti **sensori** esteroceettivi aggiuntivi
 - **pianificazione** del moto “human-oriented” (traiettorie leggibili)
 - strategie di **controllo** con vincoli di sicurezza
- prevenire, evitare, **rilevare** e **reagire** alle collisioni
 - possibilmente, usando solo i sensori propriocettivi del robot
- fasi: pre-impatto, impatto e post-impatto



progetto europeo
(2006-09)



Collisione vista come un "fault"

- modello del robot con (possibile) collisione

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_K = \tau_{\text{tot}}$$

matrice di inerzia Coriolis/centrifughi (con fattorizzazione)

coppia di controllo

coppia dovuta alla collisione

$$\tau_K = J_K^T(q) F_K$$

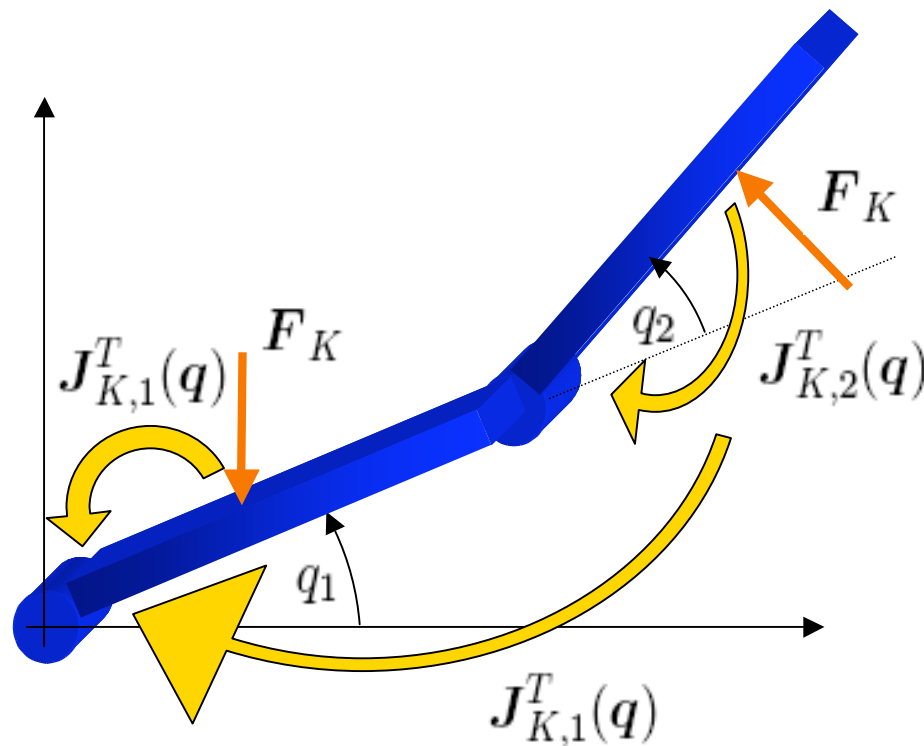
trasposta dello Jacobiano del punto/zona di contatto

- collisioni sono possibili in qualsiasi zona (non nota) lungo l'intera struttura del manipolatore
- ipotesi semplificatrici (non strettamente necessarie)
 - contatto singolo
 - robot visto come catena cinematica aperta



Analisi di una collisione

$$V_K = \begin{bmatrix} v_K \\ \omega_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{K,\text{lin}}(q) \\ J_{K,\text{ang}}(q) \end{bmatrix} \dot{q} = J_K(q) \dot{q} \in \mathbb{R}^6 \quad F_K = \begin{bmatrix} f_K \\ m_K \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6$$



in condizioni **statiche**:
una forza/coppia di contatto
sul braccio i-mo produce
coppie SOLO sui giunti
precedenti $j \leq i$

in condizioni **dinamiche**:
una forza/coppia di contatto
sul braccio i-mo
produce **accelerazioni**
su **TUTTI** i giunti



Proprietà dinamiche rilevanti

- energia totale e sua **variazione**

$$E = T + U = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + U_g(\mathbf{q}) \quad \boxed{\dot{E} = \dot{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\tau}_{\text{tot}}}$$

- momenti generalizzati e loro dinamica **disaccoppiata**

$$\mathbf{p} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

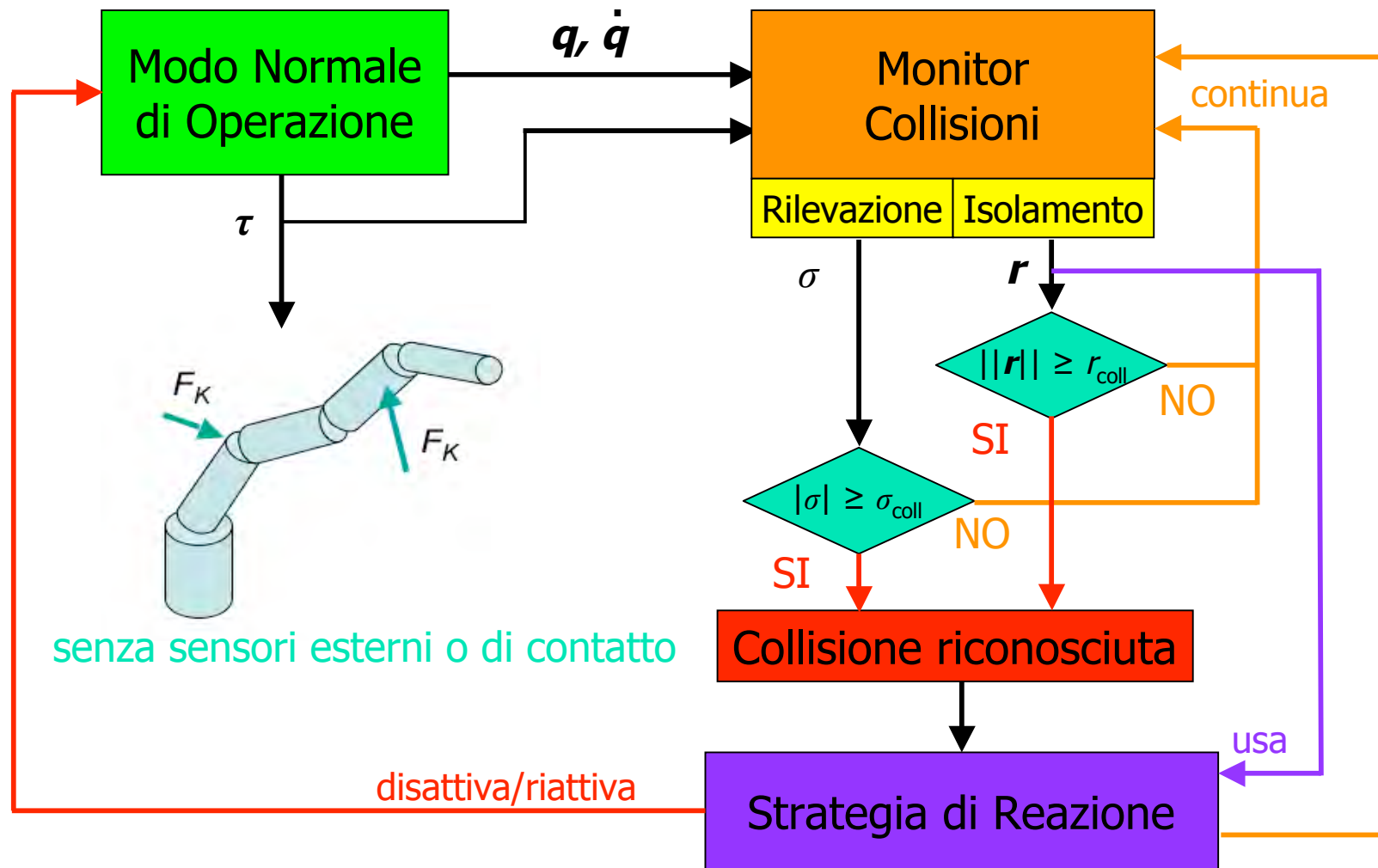
$$\dot{\mathbf{p}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{tot}} + \mathbf{C}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q})$$

N.B. è la versione vettoriale della formula già vista nella FDI degli attuatori

usata la proprietà di anti-simmetria $\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{C}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$



Monitoraggio delle collisioni





“Rilevazione” energetica di collisioni

- residuo **scalare** (calcolabile!)

$$\sigma(t) = k_D \left[E(t) - \int_0^t (\dot{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\tau} + \sigma) ds - E(0) \right]$$

$$\sigma(0) = 0 \quad k_D > 0$$

- ... e sua dinamica (necessaria solo per l'analisi)

$$\dot{\sigma} = -k_D \sigma + k_D \dot{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\tau}_K$$

un filtro lineare stabile del primo ordine, **eccitato dalla collisione!**



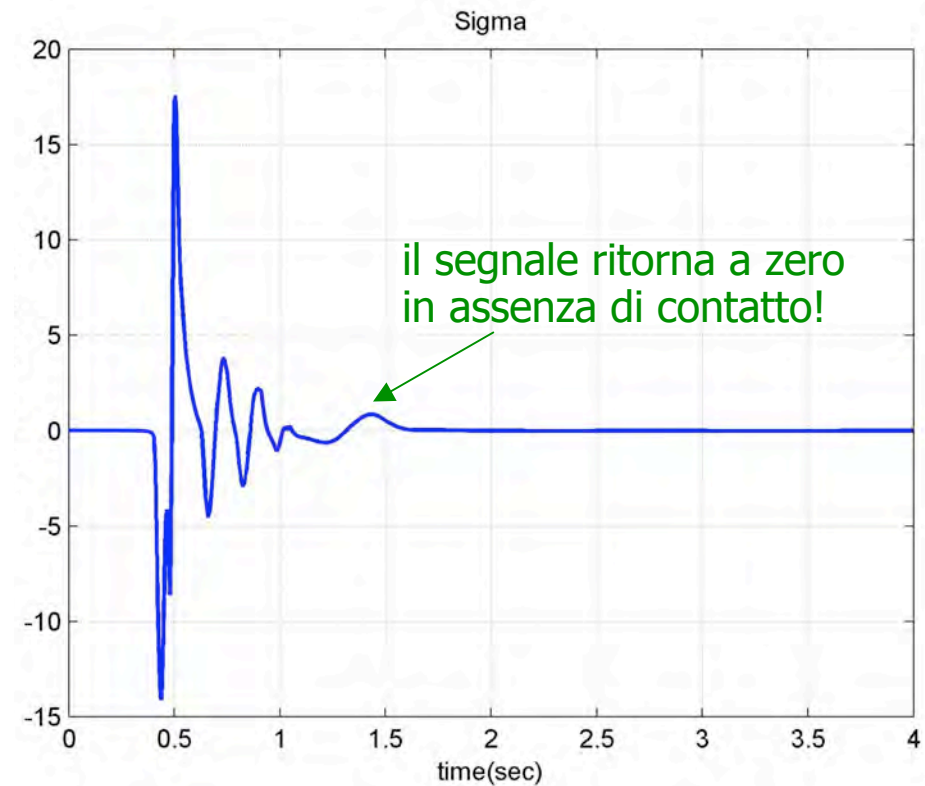
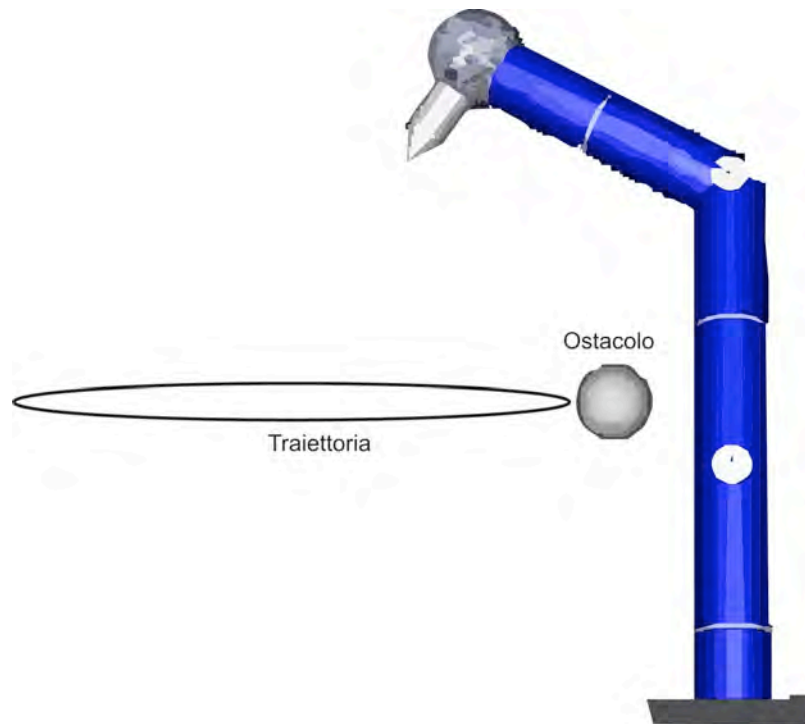
Analisi del metodo energetico

- schema molto semplice (segnale scalare)
- può rilevare solo la presenza di forze/coppie (**wrenches**) di collisione che **producono lavoro** sulle velocità lineari/angolari (**twists**) al contatto
- non funziona a robot fermo ...

$$\dot{q}^T \tau_K = \dot{q}^T J_K^T(q) F_K = V_K^T F_K = 0 \iff \boxed{V_K \perp F_K}$$

$$V_K = \begin{bmatrix} v_K \\ \omega_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{K,\text{lin}}(q) \\ J_{K,\text{ang}}(q) \end{bmatrix} \dot{q} = J_K(q) \dot{q} \in \mathbb{R}^6 \quad F_K = \begin{bmatrix} f_K \\ m_K \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6$$

Simulazione robot 7R



rilevazione di una collisione con un ostacolo **fisso** nello spazio di lavoro durante l'esecuzione di una **traiettoria cartesiana** (robot ridondante)

“Isolamento” di collisioni con i momenti



- **vettore** dei residui (calcolabile!)

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{K}_I \left[\mathbf{p}(t) - \int_0^t (\boldsymbol{\tau} + \mathbf{C}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{r}) ds - \mathbf{p}(0) \right]$$

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{0} \quad \mathbf{K}_I > \mathbf{0} \text{ (diagonale)}$$

- ... e sua dinamica **disaccoppiata**

$$\dot{\mathbf{r}} = -\mathbf{K}_I \mathbf{r} + \mathbf{K}_I \boldsymbol{\tau}_K$$

$$\frac{r_j(s)}{\tau_{K,j}(s)} = \frac{K_{I,j}}{s + K_{I,j}}$$
$$j = 1, \dots, N$$

N filtri lineari stabili del primo ordine indipendenti, **eccitati dalla collisione!**
(tutti i residui **ritornano a zero** se non c'è più contatto = fase post-impatto)



Analisi del metodo con i momenti

- situazione ideale (assenza di rumore/incertezze)

$$K_I \rightarrow \infty \Rightarrow \boxed{r \approx \tau_K}$$

- **isolamento**: la collisione avviene in una zona localizzabile **fino al braccio *i-esimo*** se

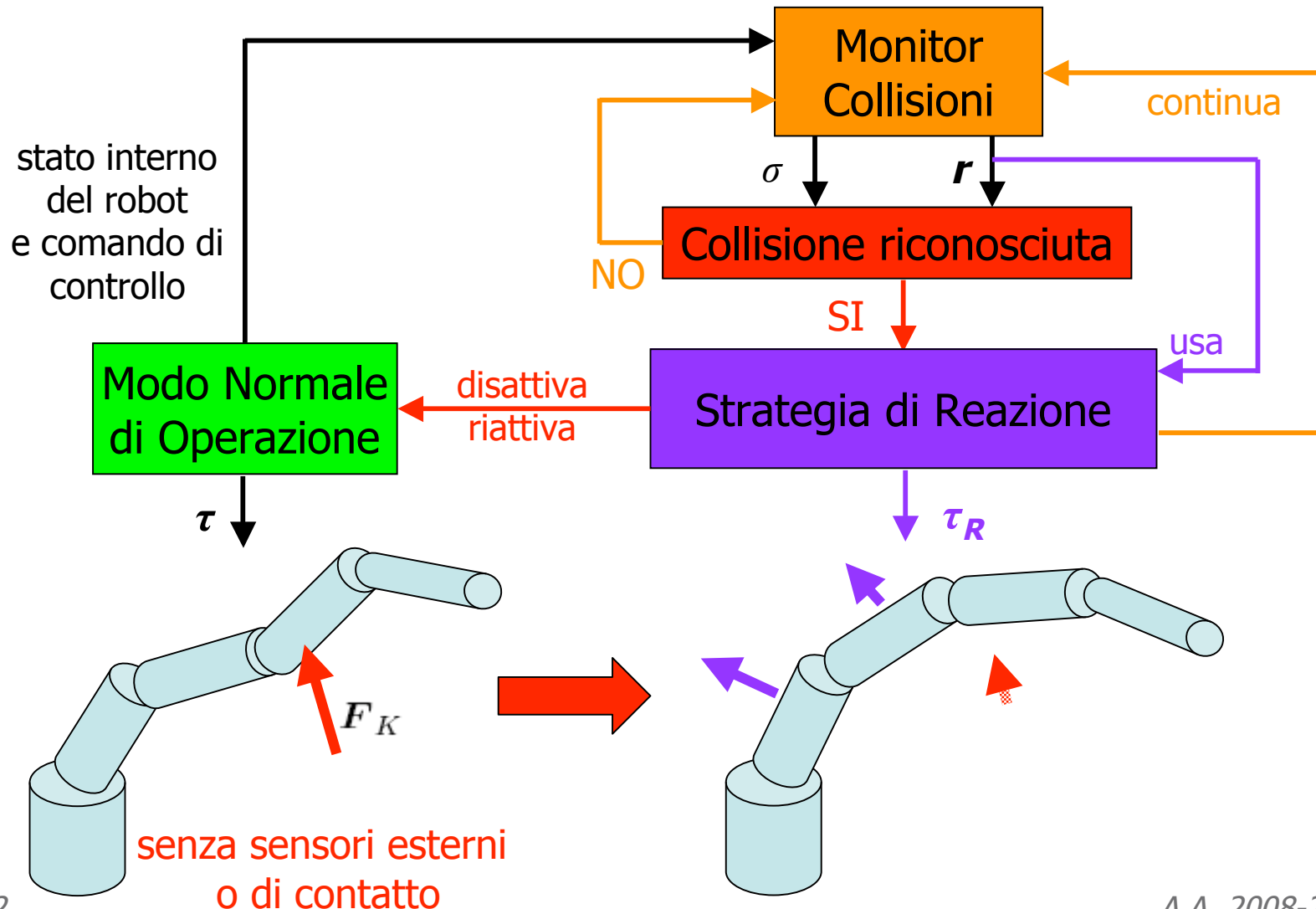
$$r = \begin{bmatrix} * & \dots & * & * & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T$$

$\uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow$
 $i + 1 \quad \dots \quad N$

- contiene informazioni direzionali sulla coppia di collisione risultante a livello dei giunti del robot (utili per la fase immediata di **reazione post-impatto**)



Reazione a collisioni





Strategie di reazione

- controllo “zero-gravity” in ogni modo operativo

$$\tau = \tau' + g(q)$$

- al riconoscimento di una collisione (r supera una **soglia**)
 - **nessuna** azione (**strategia 0**): continua il moto originale...
 - **stop** del moto del robot (**strategia 1**): mediante **frenatura** o bloccando il generatore di traiettorie e passando (“switch”) a un controllo di posizione ad **alto guadagno**
 - **strategia reflex***: switch a controllo basato sul vettore dei residui

$$\tau' = K_R r \quad K_R > 0 \quad (\text{diagonale})$$

“comando di coppia nella stessa direzione della collisione rilevata”

* = in robot con **elasticità delle trasmissioni/giunti**, la strategia **reflex** si può implementare in diversi modi (**strategie 2,3,4**)



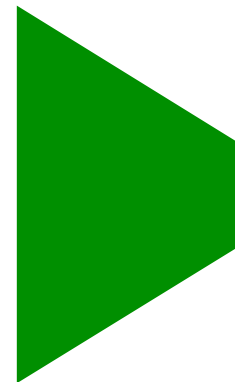
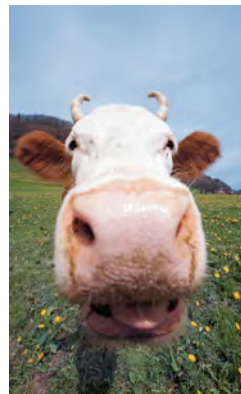
Analisi della strategia reflex

- in condizioni ideali, questa strategia di controllo equivale ad una **riduzione dell'inerzia effettiva** del robot vista dalla forza di collisione

$$(I + K_R)^{-1} (M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q}) = \tau_K$$

"un robot più leggero che può essere più facilmente respinto"

from a cow ...



... to a frog!

Esperimenti su robot DLR LWR-III testa "dummy"



robot 7R leggero
(14 kg complessivi),
con harmonic drive
(giunti elastici) e
sensore di coppia
su tutti i giunti

testa "dummy" attrezzata
con un **accelerometro di misura**

robot allungato orizzontalmente,
moto prevalente del giunto 1 **@30°/sec**

Controllo del robot DLR LWR-III robot con giunti elastici



- legge di controllo generale con **feedback dallo stato**
(posizione e velocità motori, coppie elastiche ai giunti e loro derivata)

$$\tau = K_P(\theta_d - \theta) - K_D\dot{\theta} + K_{P\tau}(\tau_{J,d} - \tau_J) - K_{D\tau}\dot{\tau}_J + \tau_{J,d}$$

errore di
posizione
dei motori

errore di
coppia elastica
ai giunti

comando
di coppia
elastica

- la cancellazione della gravità si può realizzare solo in modo **approssimato** (**quasi statico**) usando la misura di posizione dei **motori**

$$\bar{g}(\theta) = g(q), \quad \forall(\theta, q) \in \Omega := \{(\theta, q) \mid K(\theta - q) = g(q)\}$$

posizione
dei motori posizione
dei bracci

matrice (diagonale)
di rigidità dei giunti

Strategie di reazione specifiche per robot con giunti elastici



- **strategia 2:** reazione **floating** (robot in “zero-gravity”)

$$\tau_{J,d} = \bar{g}(\theta) \quad K_P = 0$$

- **strategia 3:** reazione **reflex torque** (la più simile al caso rigido)

$$\tau_{J,d} = K_R r_{EJ} + \bar{g}(\theta) \quad K_P = 0$$

- **strategia 4:** reazione in **admittance mode** (residuo usato come nuovo riferimento di velocità dei motori)

$$\tau_{J,d} = \bar{g}(\theta) \quad \dot{\theta}_d = K_R r_{EJ}$$

- **altri** possibili tipi di reazione:

- schemi basati su controllo di impedenza
- sequenza di strategie (ad es., 4+2)
- scalatura temporale (arresto/ripresa traiettoria di riferimento)
- **Cartesian task preservation** (uso della ridondanza e proiezione della reazione nello spazio nullo delle coppie dinamiche)

Video

dummy head impact



strategia 0: nessuna reazione

la traiettoria originale termina poco oltre la posizione della testa "dummy"

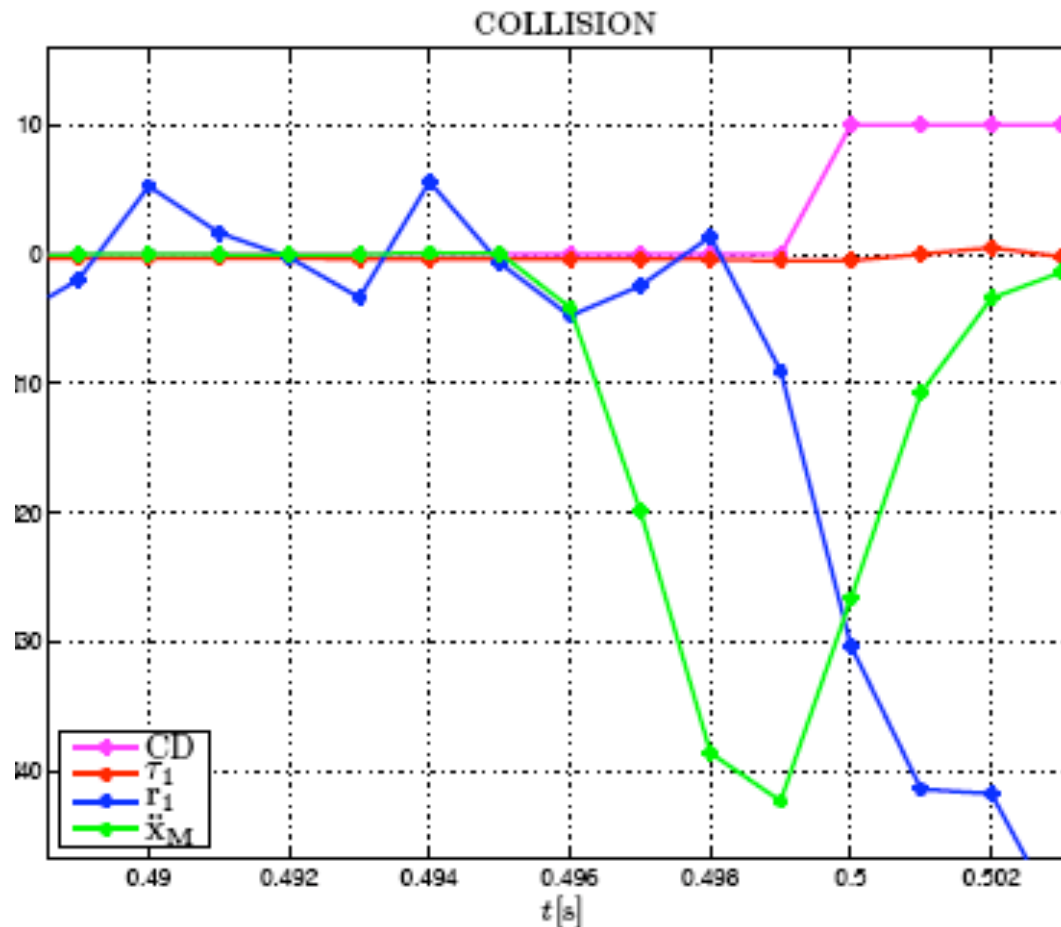


strategia 2: reazione floating

la velocità di impatto è qui limitata il robot si ferma praticamente subito



Ritardo nel riconoscimento di collisione



2-4 msec!

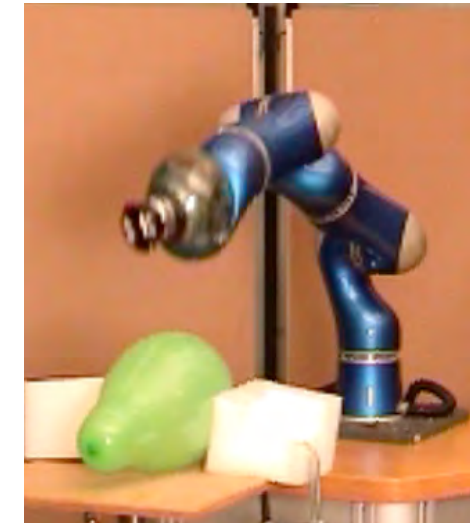
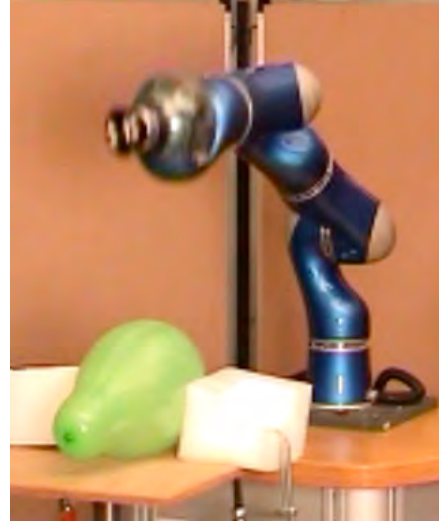
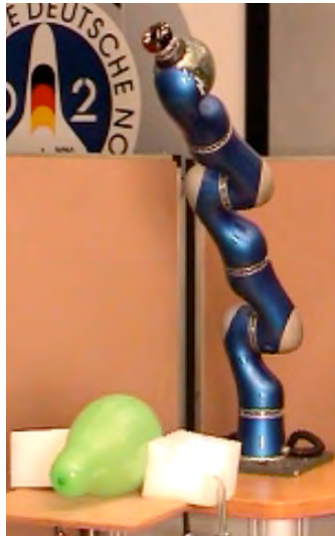
impatto con
la testa "dummy"

- coppia misurata al giunto (elastico)
- residuo r_1
- indice 0/1 di riconoscimento
- accelerazione della testa

guadagno $K_I = \text{diag}\{25\}$

soglia = 5-10% della coppia max

Esperimenti balloon impact



possibilità di confronto
ripetibile di strategie di
reazione di tipo diverso,
ad alta velocità di moto

Video

balloon impact



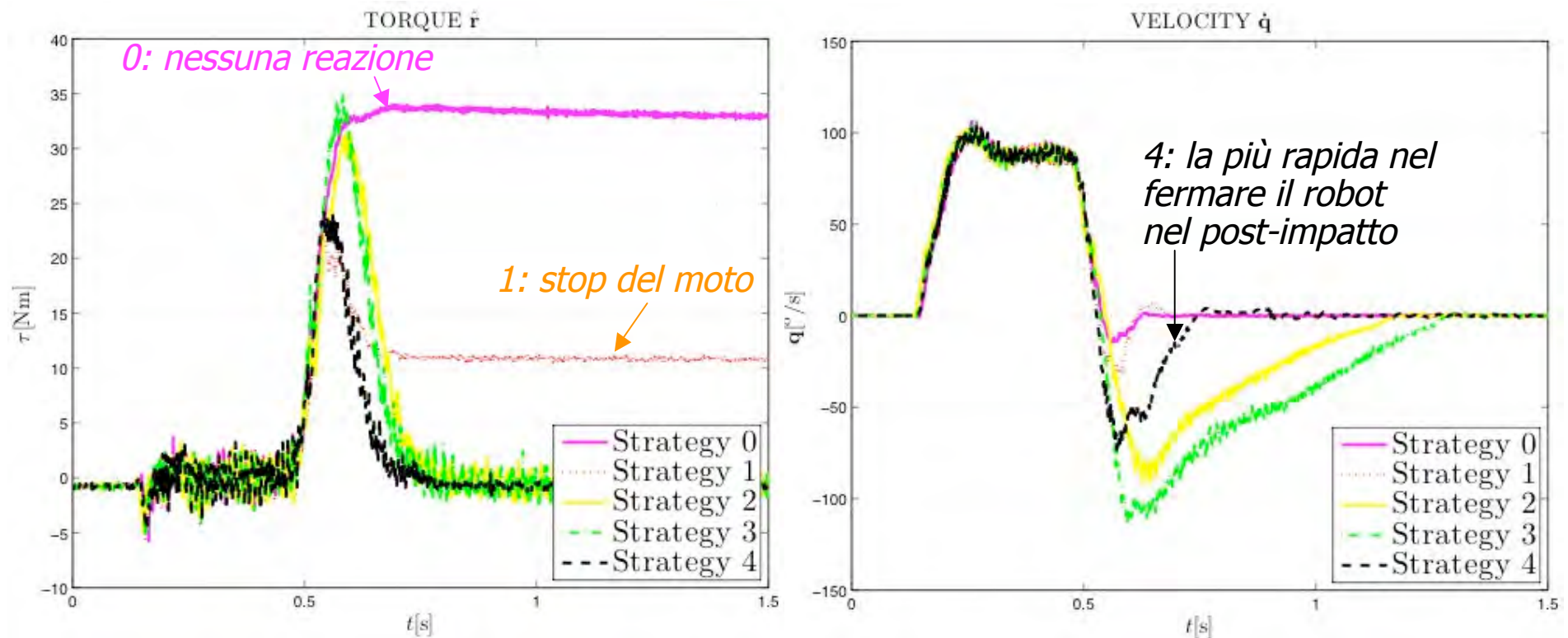
moto
coordinato
dei giunti
@100°/sec

strategia 4: reazione **admittance mode**

Risultati sperimentali balloon impact



- residuo e velocità al **giunto 4** con varie strategie di reazione



impatto a **100°/sec** con moto coordinato dei giunti



Human-Robot Interaction (1)

- primo impatto @60°/sec



strategia 4: admittance mode



strategia 3: reflex torque



Human-Robot Interaction (2)

- primo impatto @90°/sec

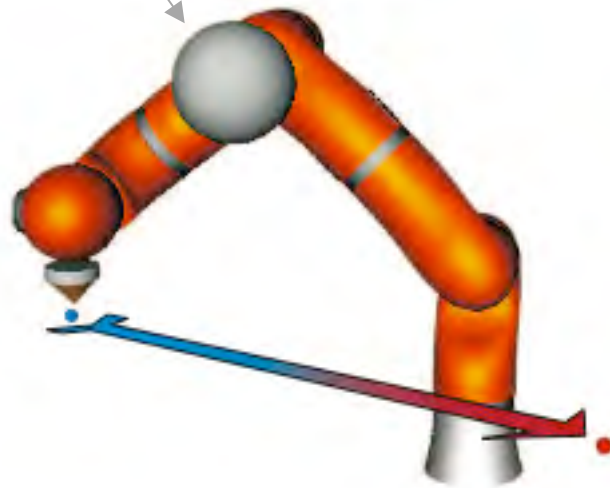


strategia 3: reflex torque



Cartesian task preservation

ostacolo sferico



simulazione in Simulink
visualizzazione in VRML

A. De Luca, L. Ferrajoli
"Exploiting robot redundancy
in collision detection and reaction"
2008 IEEE/RSJ IROS conference
Nice, F, pp. 3299-3305, 2008

- si vuole **preservare** l'intero compito cartesiano (moto posizione/orientamento), reagendo alla collisione con auto-movimenti nello spazio dei giunti
- se il residuo cresce troppo (\propto forze contatto), si **rilassa** prima l'orientamento e poi se necessario si **abbandona** l'intero task (dando priorità alla **sicurezza**)