



Università degli Studi di Brescia

Dottorato in Meccanica Applicata
XX Ciclo - III anno

Comportamento Dinamico di Manipolatori Interagenti con l'Ambiente

Dottorando:

Nicola Pedrocchi

Tutor:

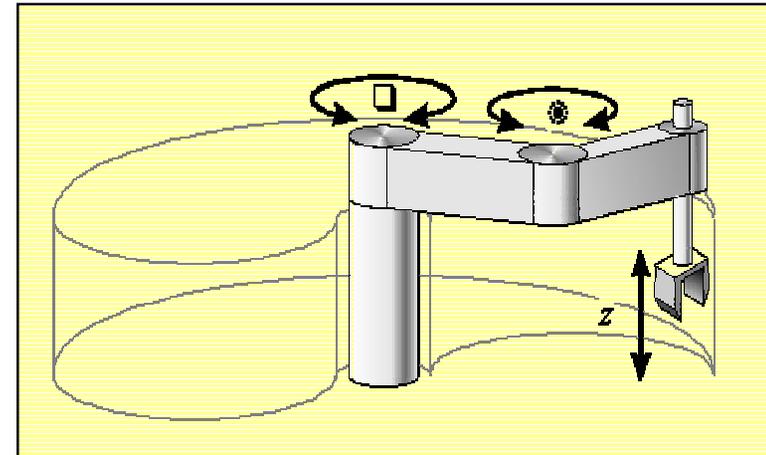
Prof. Giovanni Legnani

Progetto svolto in collaborazione con ITIA-CNR (sede di Milano)



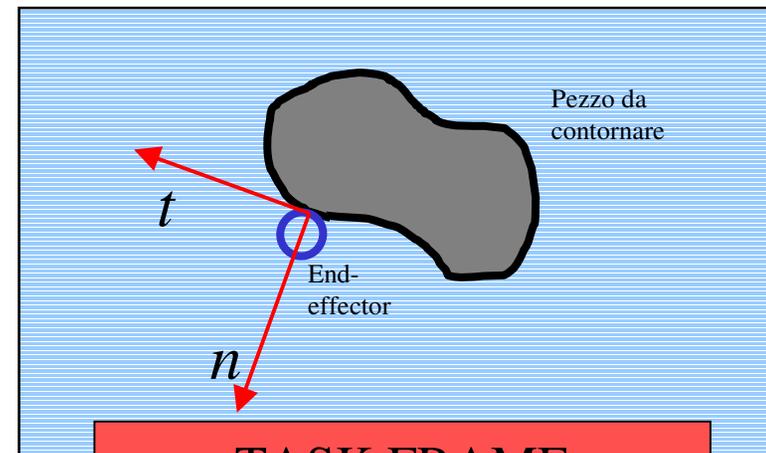
Moto nello Spazio Libero

- Posizione – Velocità – Accelerazione
- Traiettoria
- ...



Moto in Interazione con l'Ambiente

- Direzioni in cui il moto è vincolato;
- Direzioni di moto libero;
- Modellazione dell'interazione
- Ambiente **DESTRUTTURATO**



TASK FRAME
(De Schutter- Mason)



FOCUS DEL PROGETTO

Finalità:

- Studio del comportamento dinamico dei Robot
- Realizzazione di un SW di controllo



Task:

- Assemblaggio
- Contornatura
- Lavorazioni superficiali
- Calibrazione
- Robot guidance
- ...

RISULTATI del I e del II ANNO

- Approfondita la teoria del controllo attraverso la simulazione di differenti task
- Progettato e sviluppato un SW di controllo per Robot interagenti con l'ambiente



Tempo Dedicato

□ **Studio** del comportamento **dinamico**
dei **robot** nelle fasi di **interazione**

→ *Analizzati e proposti* nuovi algoritmi
di controllo basati sul modello
del robot

□ **REALIZZAZIONE** di un **SW di controllo**

→ *Ri-definita* l'architettura ed
integrati nuovi moduli sw

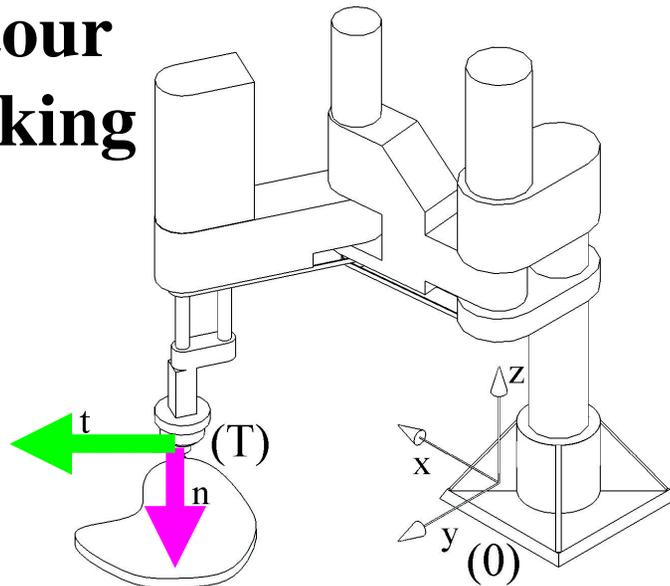
40%

60%

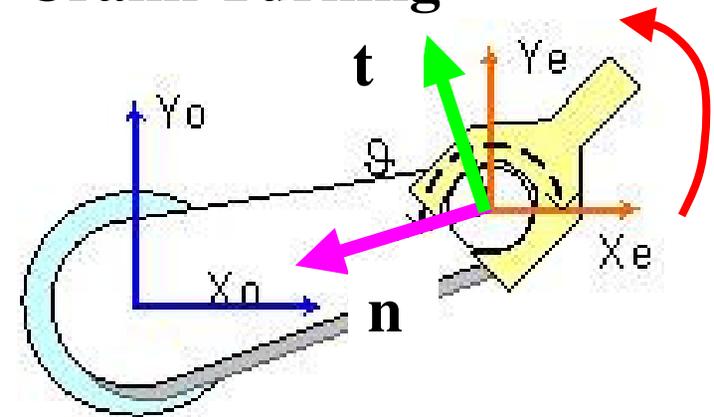


CRANK TURNING CONTOUR TRACKING

Contour Tracking



Crank Turning

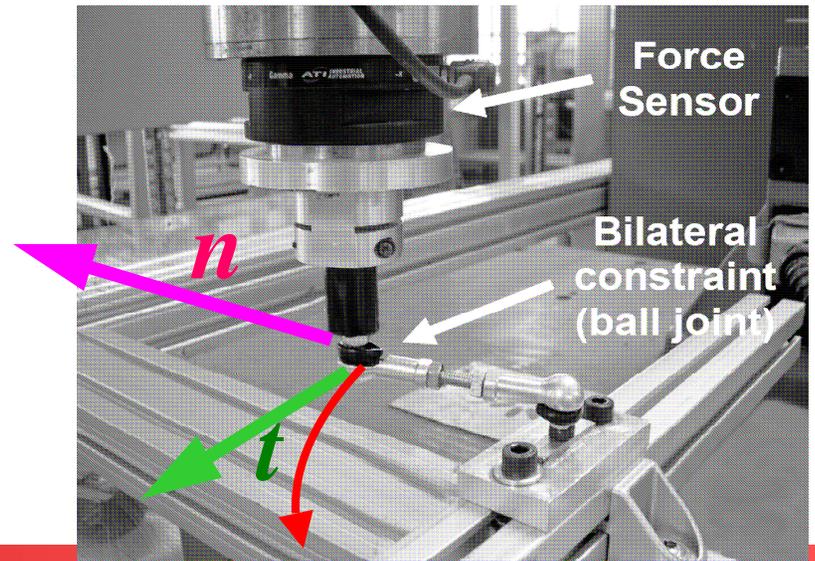


**CONTROLLO
 IBRIDO
 FORZA/VELOCITA'**

Craig (1981)

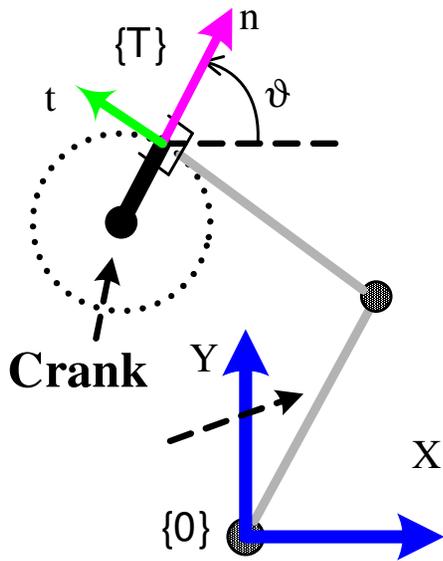
**DIREZIONE di
 CONTROLLO
 IN FORZA**

**DIREZIONE di
 CONTROLLO
 in VELOCITA'**



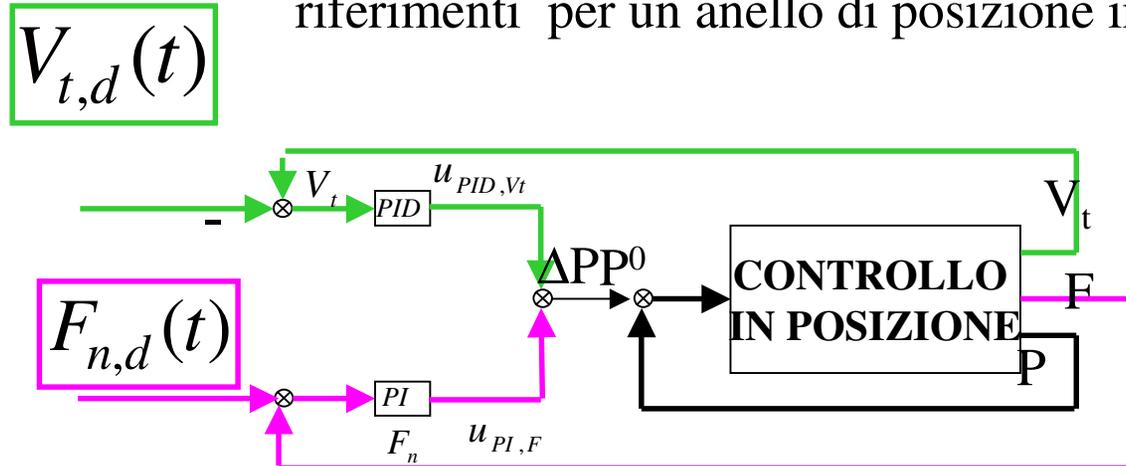


IN LETTERATURA



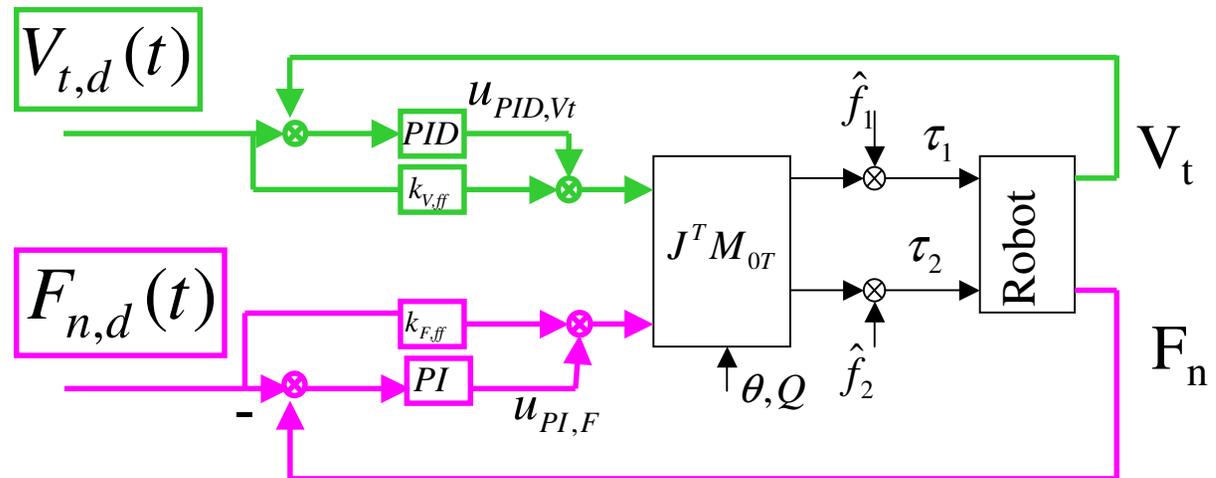
CONTROLLO IBRIDO IMPLICITO:

Il controllore di **Velocità** e **Forza** determina i riferimenti per un anello di posizione interno.



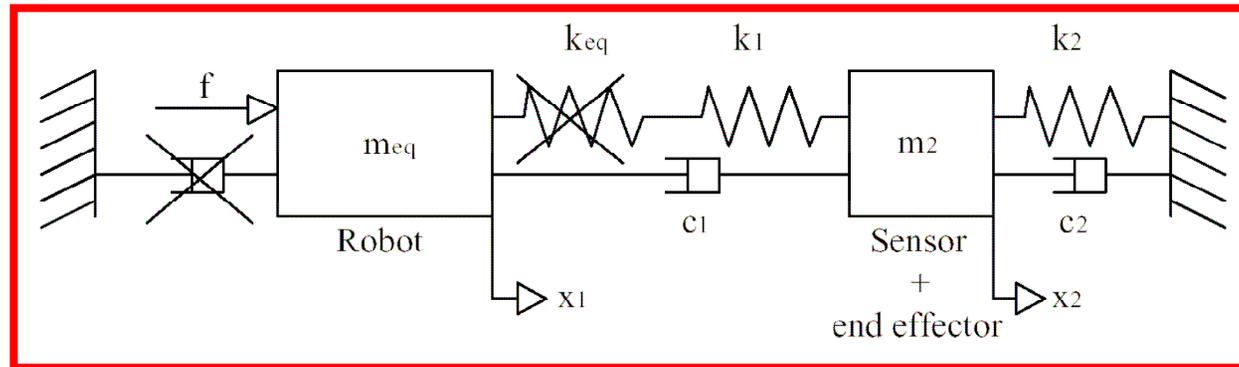
CONTROLLO IBRIDO ESPLICITO:

Il controllore di **Velocità** e **Forza** controlla direttamente i motori tramite lo jacobiano



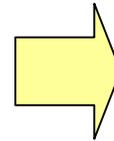


Modello semplificato di robot che interagisce con l'ambiente



Sistema robotico:

- Rigidezza equivalente **VARIABILE**
- Massa equivalente **VARIABILE**



Funzione di:

- *posizione*
- *direzione della forza*



(A) RIGIDEZZA :

TEORICAMENTE variabile

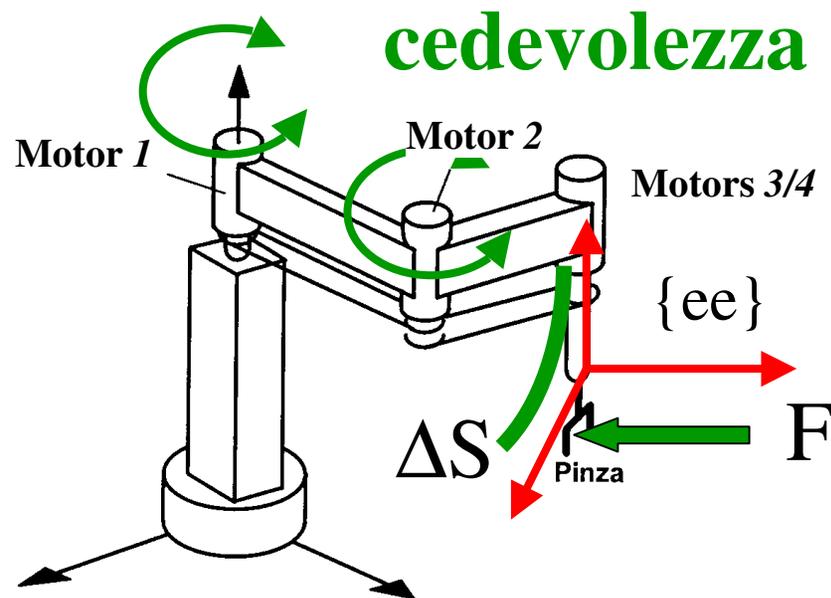
PRATICAMENTE la cedevolezza si concentra
nell'end-effector

$$\mathbf{F}_{\{ee\}} = \mathbf{K}_{s\{ee\}} \Delta \mathbf{S}_{\{ee\}}$$

$\mathbf{K}_{s\{ee\}}$ **COSTANTE**

OSS:

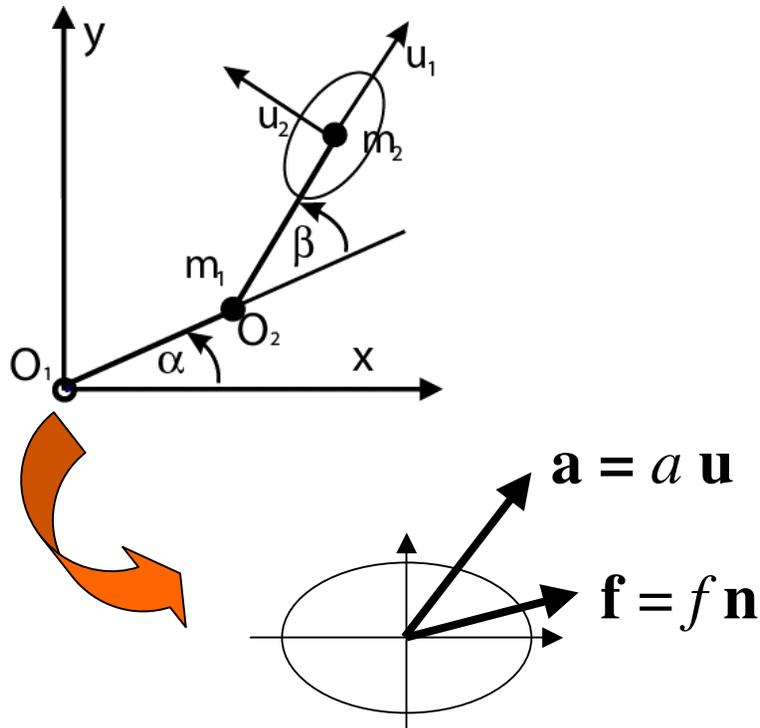
$$\mathbf{F}_{\{0\}} = \mathbf{K}_{s\{0\}}(s) \Delta \mathbf{S}_{\{0\}}$$
$$\mathbf{K}_{s\{0\}} = \mathbf{R}_{0,ee}(s) \mathbf{K}_{s\{ee\}} \mathbf{R}_{ee,0}(s)$$





ROBOT & MOTO VINCOLATO

(B) MASSA:



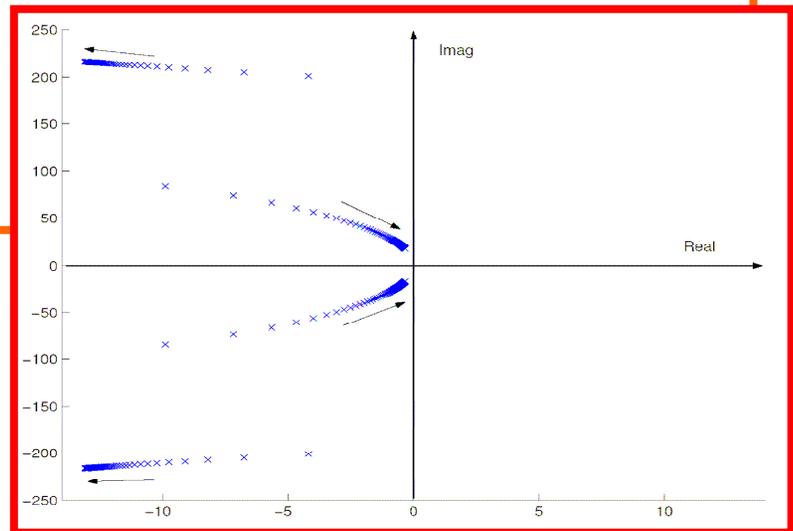
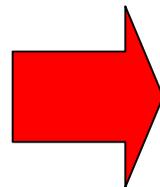
$$\mathbf{f} = \mathbf{M}_s(s) \mathbf{a}$$

$$m_{eq,n} = \mathbf{n}^T \mathbf{M}_s(s) \mathbf{n}$$

$$m_{eq,u} = \mathbf{u}^T \mathbf{M}_s(s) \mathbf{u}$$

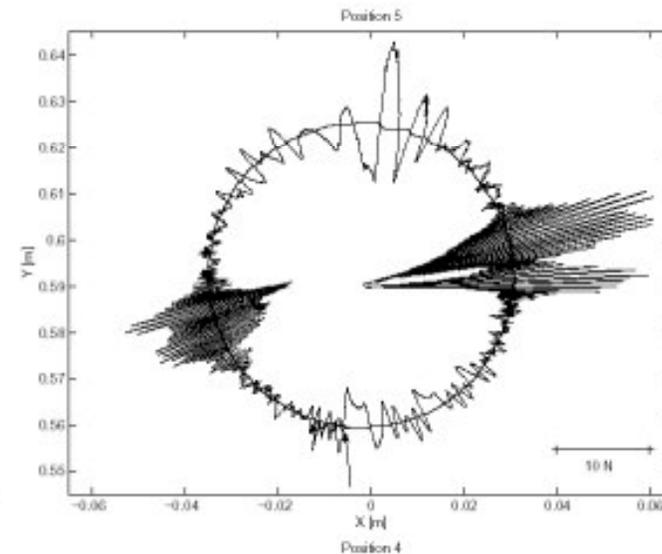
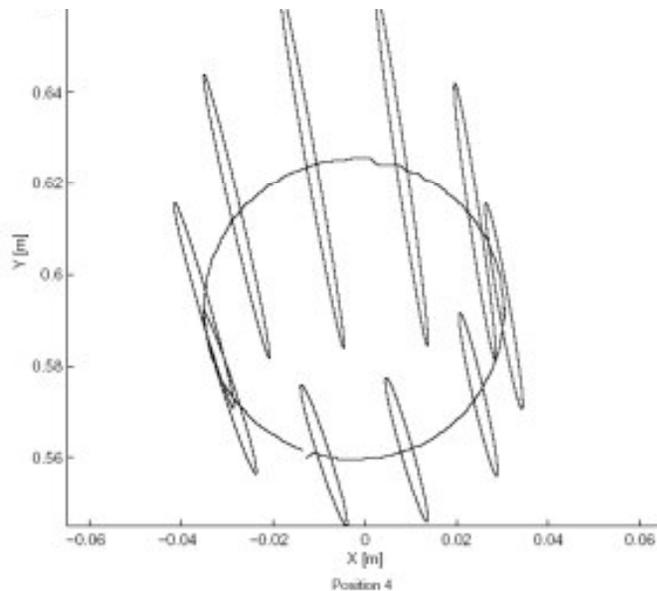
$$m_{eq} = 1/(\mathbf{n}^T \mathbf{M}_s^{-T} \mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{n})^{0.5}$$

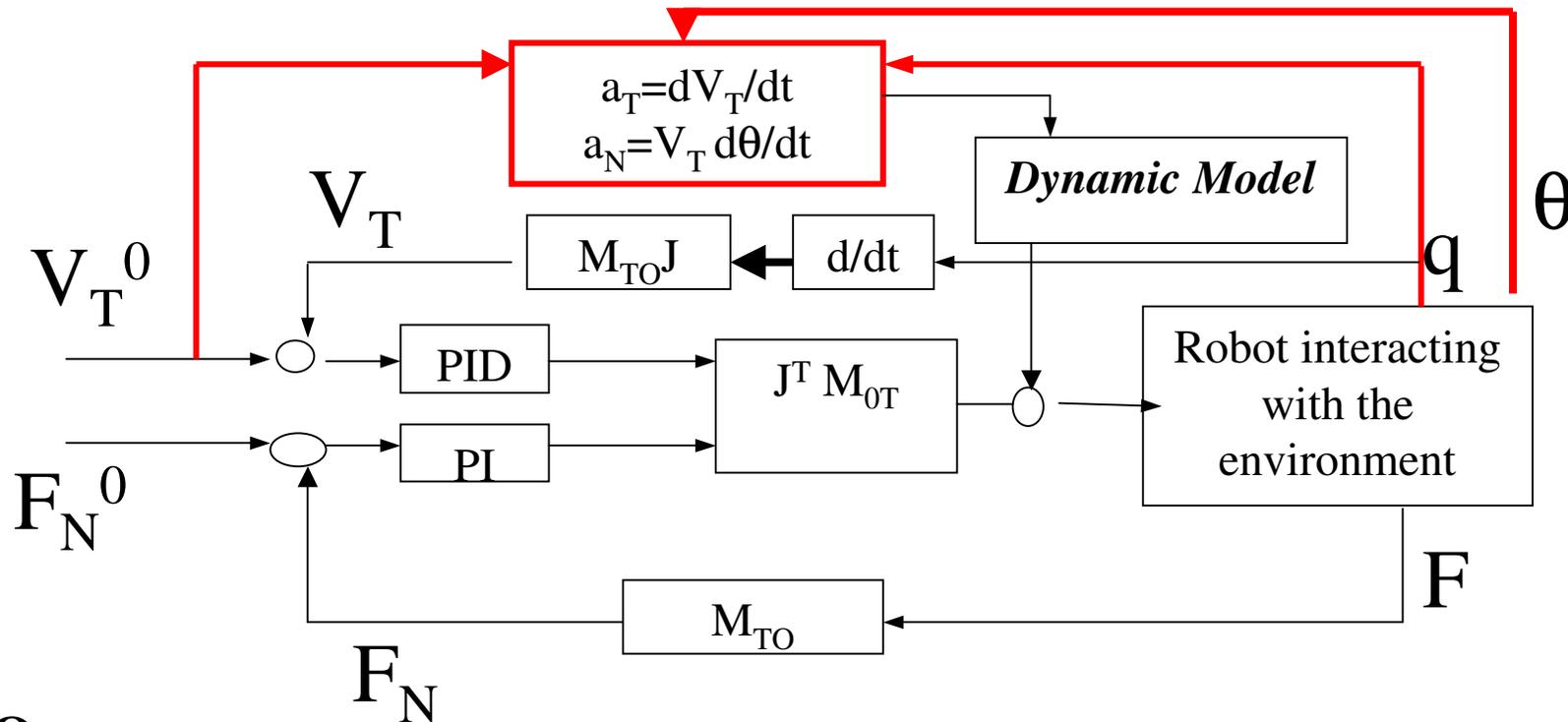
I poli del sistema migrano all'umentare della massa





- Il recupero dei giochi nei giunti causa errori notevoli per il valore della forza al contatto
- Corrispondenza tra **OSCILLAZIONI** e **MASSA EQUIVALENTE** manipolatore



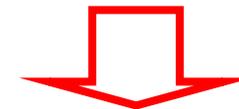


PRO:

- linearizzazione rigorosa del sistema al variare della configurazione

CONTRO:

- necessita dell'**accelerazione**



NON È NOTA A PRIORI



CRANK TURNING

SISTEMA BASE DA CUI SI E' PARTITI

- Compensazione attriti ai giunti
- Gain Scheduling

$$V_{\max} = 16 \text{ cm/s}$$

$$F_{\max} = 58 \text{ N}$$



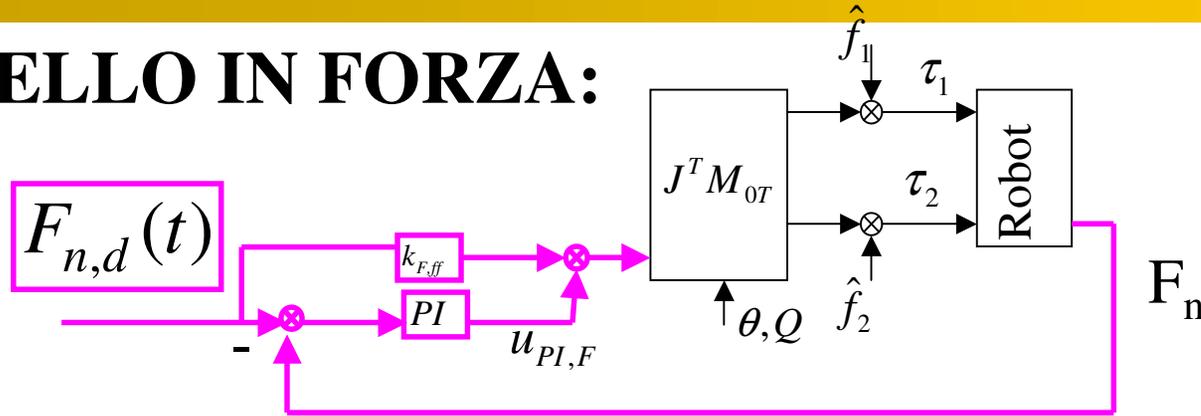
OTTIMIZZAZIONE

- Affinamento stima dell'angolo di contatto $\rightarrow \underline{V_{\max} = 28 \text{ cm/s} + 75 \%}$
- Compensazione dinamica $\rightarrow \underline{V_{\max} = 50 \text{ cm/s} + 310 \%}$
- Affinamento della compensazione dinamica $\rightarrow \underline{V_{\max} = 67 \text{ cm/s} + 415 \%}$
- Alla velocità $V = 16 \text{ cm/s}$ la forza di contatto $F_{\max} = 8 \text{ N}$ con un $- 86\%$



DISACCOPPIMENTO

ANELLO IN FORZA:

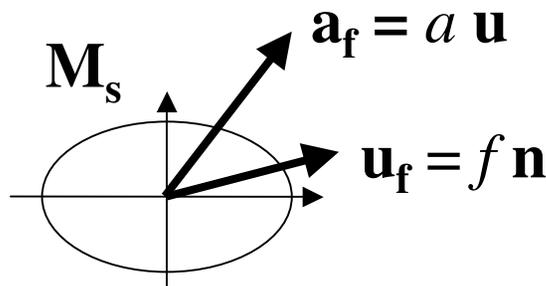


errore di forza e_f



Comando in forza u_f

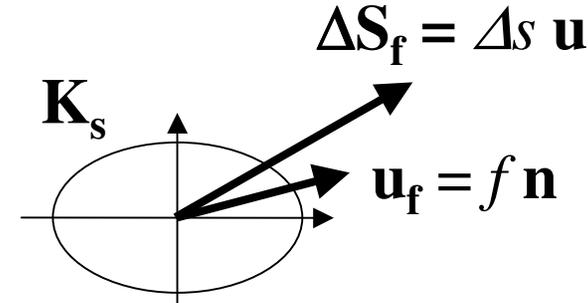
Comando in forza u_f



Accelerazione a_f

dirette anche lungo la direzione in cui si controlla la velocità

Comando in forza u_f

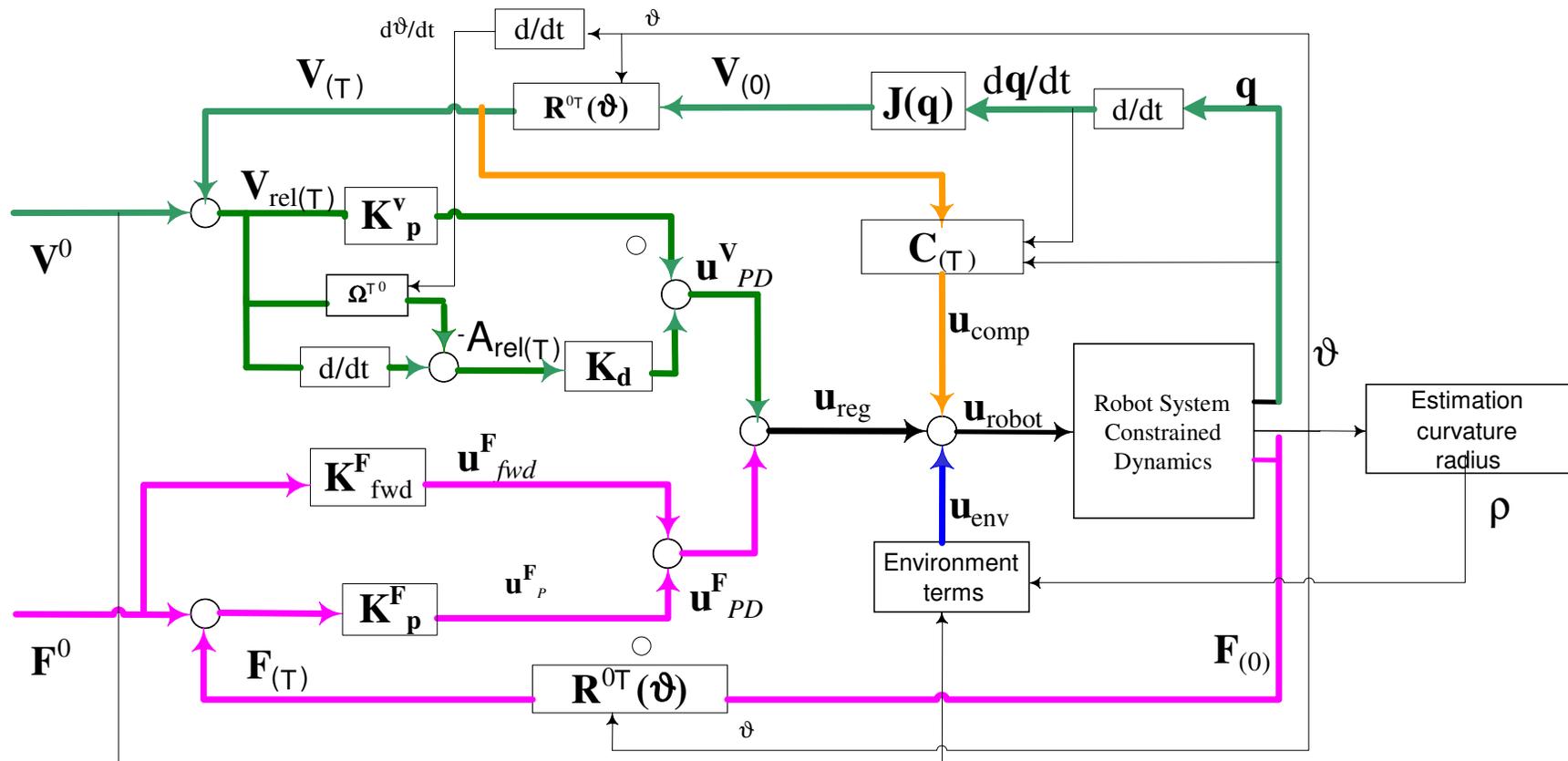


Deformazione ΔS_f



CONTROLLO IBRIDO DISACCOPPIATO ESPLICITO:

Il controllore di **Velocità** e **Forza** determina i riferimenti attraverso regolatori **MATRICIALI** a **TERMINI VARIABILI** in funzione della configurazione

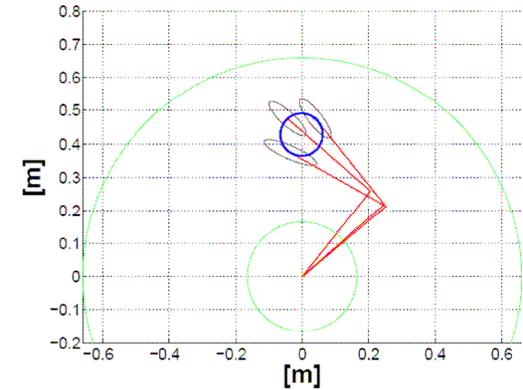




CONTOUR TRACKING

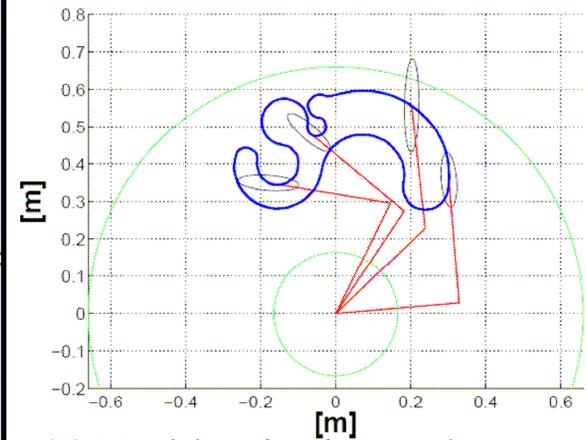
IRON DISK - (referred to Figure 8)

v_t^0	[mm/s]	50	150	500
f_n^0	[N]	20	20	20
$MAX(e_v)$	[mm/s]	2.1	1.7	5.4
$RMS(e_v)$	[mm/s]	0.4	0.7	1.0
$MAX(e_f)$	[N]	5.7	5.6	15.6
$RMS(e_f)$	[N]	1.3	1.6	4.2



WOODEN COMPLEX SHAPE OBJECT (Figure 10)

v_t^0	[mm/s]	10	40	80
f_n^0	[N]	20	20	25
$MAX(e_v)$	[mm/s]	4.3	8.1	11.4
$RMS(e_v)$	[mm/s]	1.3	1.2	1.5
$MAX(e_f)$	[N]	6.0	10.5	17.4
$RMS(e_f)$	[N]	1.2	2.3	3.7

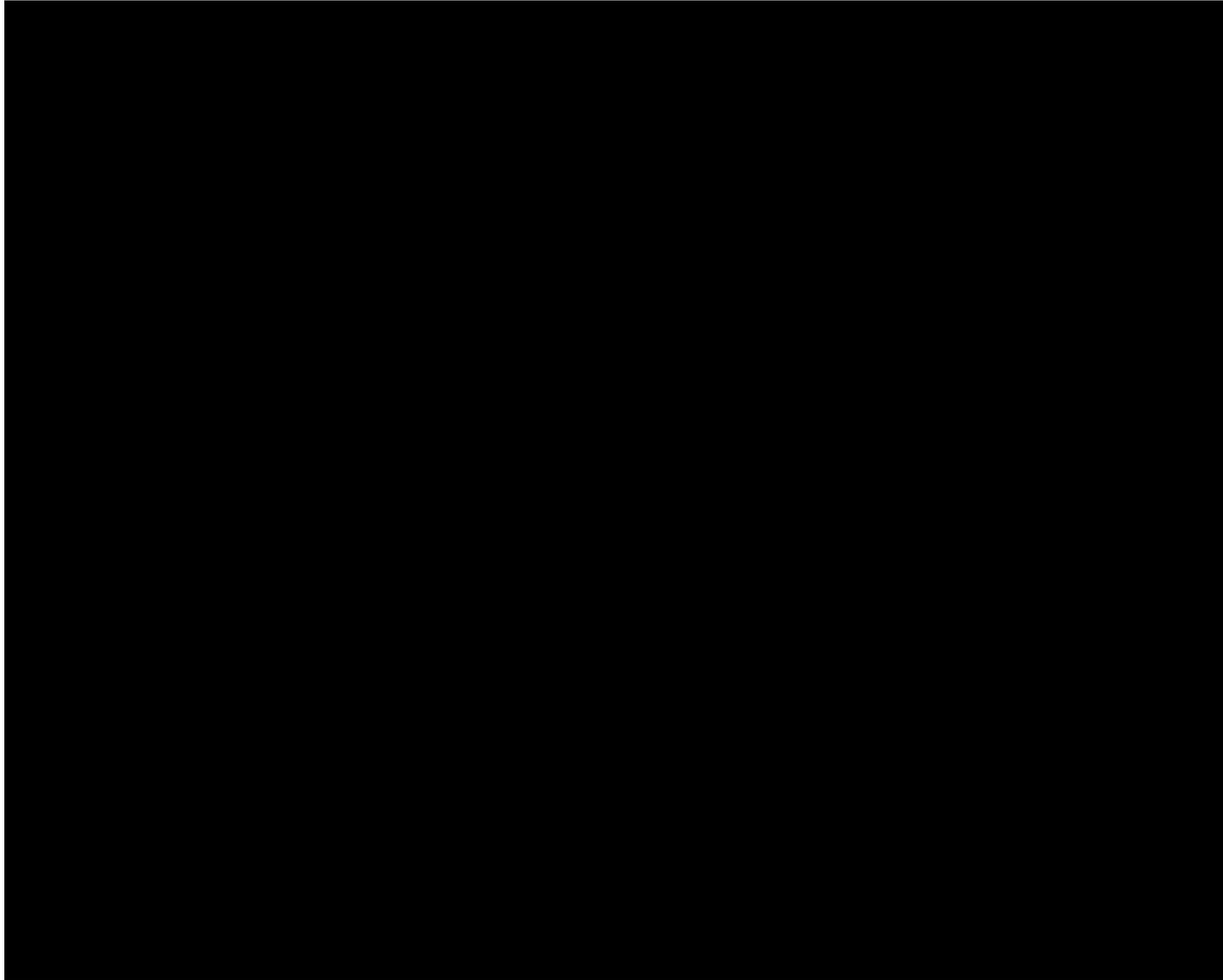




Università degli Studi di Brescia

**Dottorato in Meccanica Applicata
XX Ciclo - III anno**

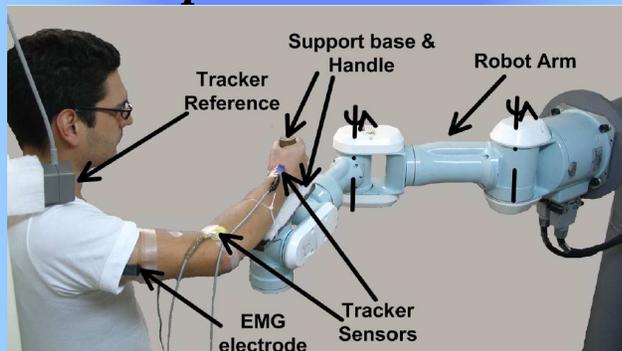
CONTOUR TRACKING





OBIETTIVI *del* SOFTWARE

Riabilitazione e cooperazione uomo



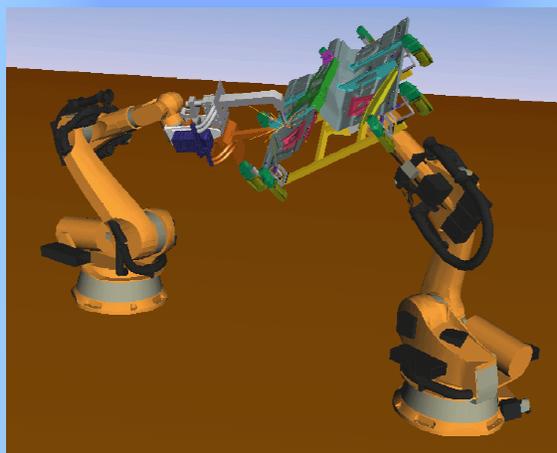
Interfacce aptiche



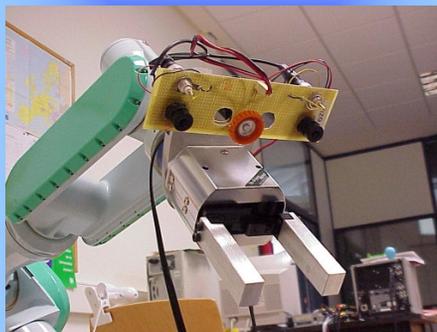
Lavorazioni superficiali



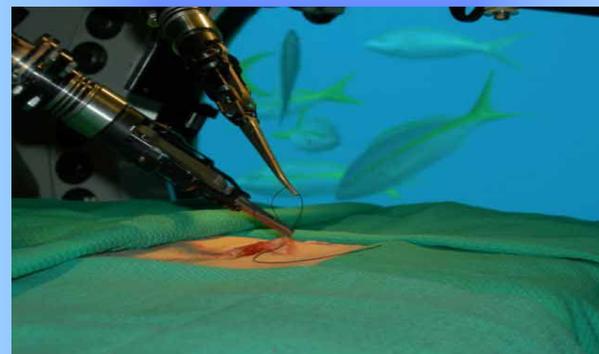
Robot Cooperanti

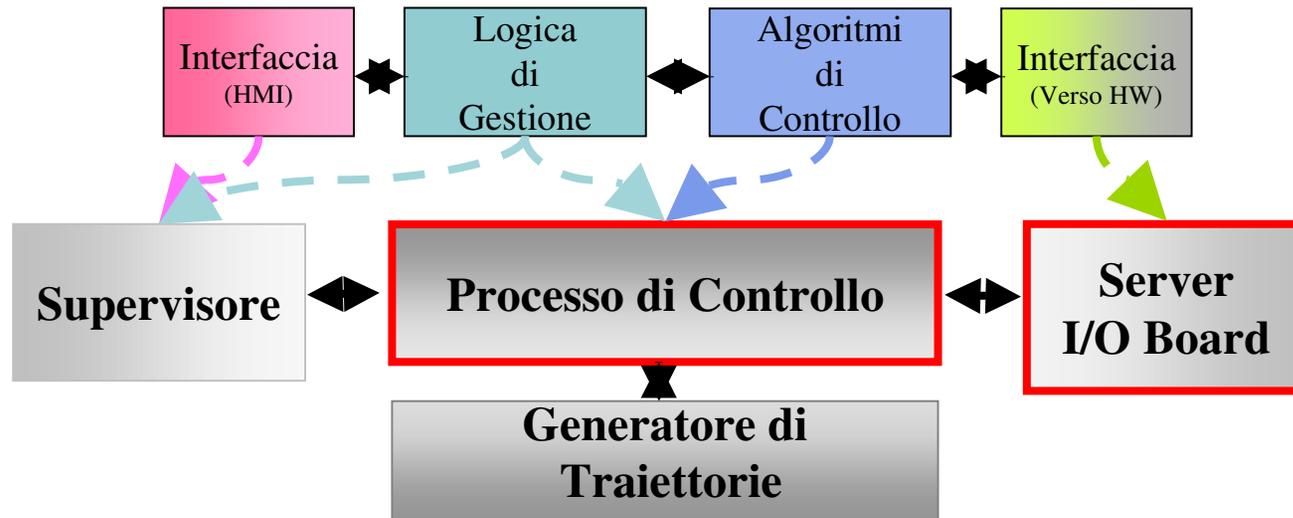


Visione



Chirurgia





CARATTERISTICHE

- Scritto in C++
- Sviluppato in QNX 4.25
- 4 processi cooperanti
- Tempo ciclo del processo di $\ll 1$ ms
- Sincronizzazione processi data da un'interrupt delle schede di acquisizione
- Aggiornamento in runtime dei parametri di controllo (PID, etc.)
- 300 file, 50 cartelle, (ogni file è 500÷50000 righe di codice)
- ...

Criticità risolte:

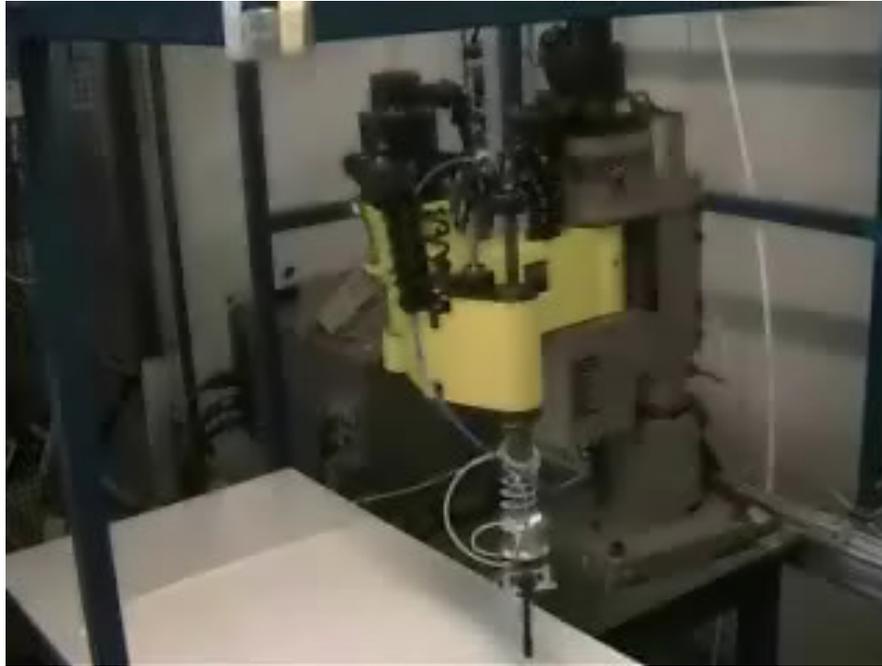
- Formalizzazione dei *Task* non rigorosa
- Architettura non versatile
- Gestione delle risorse SW fragile e non intrinsecamente sicura
- Protocolli di comunicazione con "l'esterno" vincolanti
- Non User-Friendly



Università degli Studi di Brescia

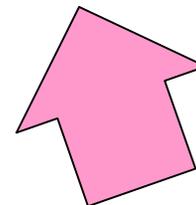
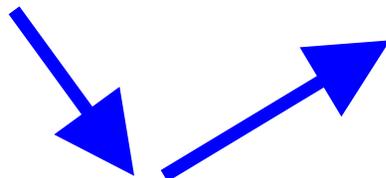
Dottorato in Meccanica Applicata
XX Ciclo - III anno

STATO DELL'ARTE



Fasi del Controllo:

- ✓ Start;
- ✓ Azzeramento;
- ✓ Posizione ai giunti;
- ✓ Coordinate cartesiane;
- ✓ Interazione (Guidance).





□ Studio del comportamento dinamico dei Robot

- ✓ *Approfondito lo studio dell'influenza dinamica*
- ✓ *Approfondito lo studio di algoritmi ibridi-dinamici (Yoshikawa)*
- ✓ *Approfondita l'estensione degli algoritmi di controllo a più gradi di libertà (Fhearstone, Khatib, Duffy, Lipkin)*

- ✓ *Sviluppato e Sperimentato un algoritmo di compensazione dinamica per controlli ibridi in forza e velocità*
- ✓ *Sviluppato e Sperimentato un algoritmo di controllo ibrido in forza e velocità disaccoppiato dinamicamente*

□ Realizzazione di un SW di controllo

- *Approfondita la teoria del controllo multi-task*
- *Ri-definita l'architettura del SW*
- *Implementati alcuni algoritmi di controllo*



Università degli Studi di Brescia

Dottorato in Meccanica Applicata
XX Ciclo - III anno

BUONA GIORNATA!

Grazie per l'attenzione

Dottorato in Meccanica Applicata – XX Ciclo – III anno di corso