

EVOLUZIONE DI UN SISTEMA ROBOTICO COMANDATO IN TELEMANIPOLAZIONE E RETROAZIONATO IN POSIZIONE E FORZA

Dottorando: Nicola De Rossi

Tutor: Prof. Roberto Caracciolo

INDICE

- 1. Introduzione**
 - 1.1 Aspetti generali di telemanipolazione via Internet**
 - 1.2 Caratteristiche del sistema sviluppato e obiettivi del lavoro**
- 2. Allestimento del sistema per la sperimentazione**
- 3. Pianificazione “*on-line*” della traiettoria del manipolatore**
 - 4.1 Scelta del tempo di pianificazione**
 - 4.2 Definizione delle condizioni al contorno**
- 4. Algoritmo ritardante basato sul segnale di forza misurato**
 - 5.1 Calcolo del ritardo controllato basato sulla forza misurata**
 - 5.2 Ritardo complessivo e indice di ritardo**
- 5. Validazione sperimentale**
 - 5.1 Test di inseguimento**
 - 5.2 Test di foratura**
- 6. Conclusioni**

1.1 Aspetti generali di telemanipolazione via Internet

Telemanipolazione via Internet



Un **operatore umano** che controlla un sistema robotico remoto in **real time** attraverso **Internet**

Campi di applicazione



- ✓ Tele-chirurgia
- ✓ Manipolazione di materiali pericolosi
- ✓ Attività in ambienti ostili
- ✓ Esplorazione spaziale

Ostacoli principali



La comunicazione **real time** basata su **Internet** è affetta da una serie di **limitazioni e difficoltà**:

- ✓ Banda di trasmissione limitata
- ✓ Ritardi di trasmissione arbitrari
- ✓ Perdita di pacchetti ed errori di trasmissione



- ✓ **Instabilità e de-sincronizzazione**
- ✓ **Scarse prestazioni** del sistema telerobotico

1.2 Caratteristiche del sistema sviluppato e obiettivi del lavoro

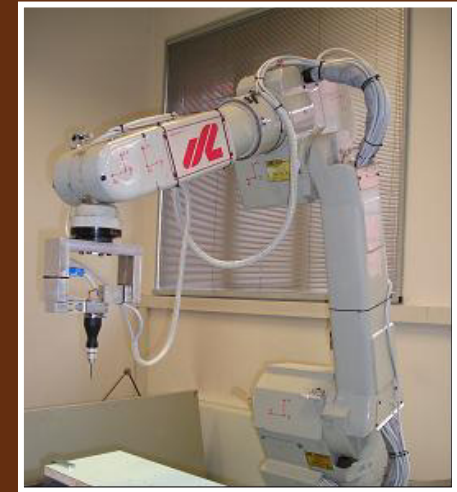
- ❑ **Sistema robotico per la telemanipolazione** costituito da un **master aptico** e da un **robot antropomorfo** collegati tra loro in **real time** attraverso **Internet**
- ❑ Realizzazione di operazioni di **foratura a distanza**: task adatto all'impiego in diversi settori (telechirurgia, telemanutenzione, ecc.)
- ❑ L'operatore muove il manipolatore attraverso **un'interfaccia aptica a cinque gradi di libertà** dotata di un attuatore a forma di penna; i movimenti compiuti dall'operatore sono riprodotti a distanza dal robot
- ❑ L'interfaccia aptica è in grado di generare **ambienti virtuali** che consentono di **guidare l'operatore nell'esecuzione del task**
- ❑ L'operatore dispone di un **feedback di forza** prodotto da una **cella di carico estensimetrica monoassiale** montata sull'end effector del manipolatore e in grado di misurare le **forze lungo l'asse di foratura**
- ❑ Ambiente reale **non strutturato**

2. Allestimento del sistema per la sperimentazione

Sistema aptico a 5 gradi di libertà PiRoGa5 (MASTER)



Manipolatore antropomorfo SystemRobot RM10 (SLAVE)



CONTROLORE DELL'UNITA' MASTER E GESTIONE DELLA COMUNICAZIONE

CONTROLORE DELL'UNITA' SLAVE

Riferimenti di posizione e orientamento



COMUNICAZIONE VIA INTERNET

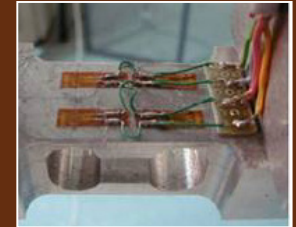
Retroazione di posizione e forza



Retroazione visiva



End effector



UNITA' SLAVE

- ✓ Controllore ad architettura VME
- ✓ Interfaccia utente: teaching pendant
- ✓ Programmazione per auto-apprendimento

Sistema “**chiuso**” non adatto ad applicazioni di telemanipolazione

Passaggio ad un sistema “**aperto**” basato su PC e su un **sistema operativo real-time** commerciale (xPc-target) attraverso:

- ✓ Un **ricondizionamento** completo sia **hardware** che **software** del controllore dell'unità slave
- ✓ La progettazione e la sintesi di un **controllore “aperto”**:

1. **Comunicazione** via rete Internet con l'**interfaccia optica**
2. **Interfacciamento** con la parte di **potenza** del robot (generazione dei segnali di abilitazione e controllo)
3. **Posizionamento** iniziale degli **assi**
4. Calcolo degli algoritmi di **cinematica diretta e inversa** del manipolatore

5. **Pianificazione** della traiettoria

6. **Regolazione PID** per il controllo di posizione degli assi

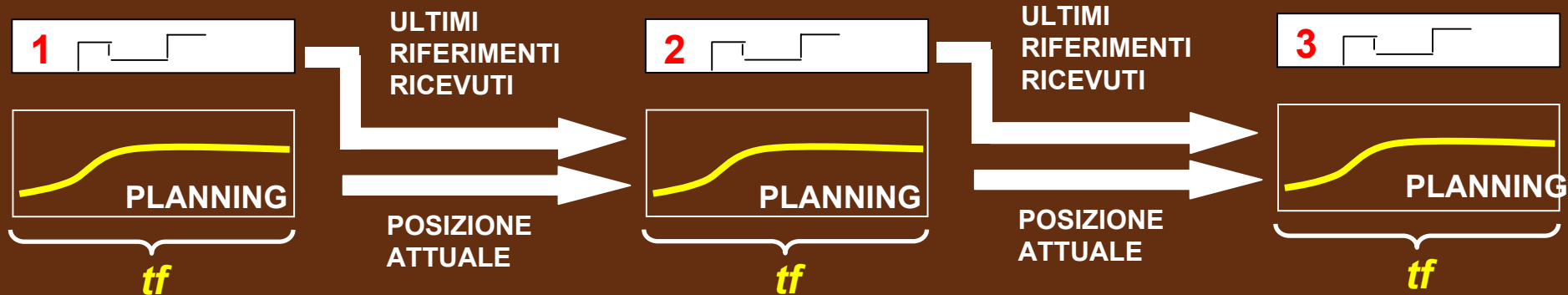
7. Implementazione di un **innovativo algoritmo**, basato su un approccio di tipo **non-time-based**, in grado di assistere l'operatore durante la foratura in remoto e migliorare il risultato finale della lavorazione

8. Generazione del **feedback di forza**

3.1 Pianificazione “on-line” della traiettoria e tempo di pianificazione

Pianificazione “on-line” della traiettoria \longrightarrow Calcolo della traiettoria successiva **durante l’intervallo di tempo** in cui il manipolatore sta eseguendo la **traiettoria attuale**.
I riferimenti di posizione **non sono noti a priori**;
essi sono generati “on line” dai movimenti dell’operatore.

All’inizio del generico step di pianificazione, per il calcolo della traiettoria successiva sono noti e impiegabili solamente la **posizione attuale del manipolatore** e i **riferimenti di posizione ricevuti durante il tratto di pianificazione precedente** :



La pianificazione avviene nello **spazio dei giunti** impiegando **polinomi cubici** i cui coefficienti vengono **aggiornati con un intervallo di tempo fisso**:

$$\theta(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad 0 \leq t \leq t_f$$



Tempo di calcolo breve e semplice definizione delle **condizioni al contorno**

La scelta di un **intervallo di tempo (t_f) adeguato per l’aggiornamento della traiettoria** risulta di fondamentale importanza per assicurare un buon inseguimento. In teoria, più piccolo è t_f migliore è l’inseguimento di posizione e inferiore il ritardo rispetto alla posizione di riferimento

3.2 Pianificazione “on-line” della traiettoria e condizioni al contorno

LA SCELTA DI t_f DEVE ESSERE FATTA CONSIDERANDO:

- ✓ La **dinamica** del fenomeno che deve essere riprodotto
- ✓ Le **caratteristiche** del canale di trasmissione



Banda passante della mano di un operatore umano: 5-10 Hz [*].

Adozione di un tempo di campionamento ≥ 50 Hz



Tempo di aggiornamento della traiettoria:
20 millisecondi ($t_f = 20\text{ms}$).



Comunicazione basata su Internet:
ritardi e perdite di dati.

Utilizzo di una **banda di trasmissione più ampia (200 Hz)** rispetto al necessario

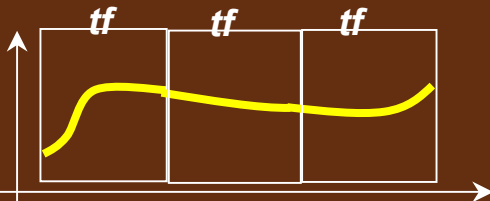


Riduzione della probabilità di avere **vuoti informativi** nella definizione della traiettoria

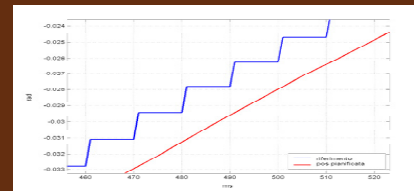
Raccordo dei polinomi relativi ai diversi step di pianificazione impostando adeguate **condizioni al contorno** al fine di assicurare:

✓ CONTINUITA' DI POSIZIONE

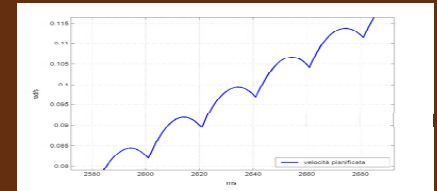
✓ CONTINUITA' DI VELOCITA'



L'impiego di polinomi cubici preclude la possibilità di assicurare la **continuità della funzione di accelerazione** alla giunzione dei segmenti di pianificazione



⇒ **Fenomeni vibratori** ⇒



Discontinuità di **entità contenuta** nelle funzioni di accelerazione: gli effetti risultano trascurabili

[*] S. Bortolato, A. Gasparetto, A. Trevisani, and V. Zanotto, “Towards a model of the human hand: Linear system identification of the human grasp”, In Proceedings of the 1st IASME International Conference on Advances in Mechanics and Mechatronics (483-144), Udine, Italy, 2004

4.1 Calcolo del ritardo controllato basato sulla forza misurata

- ✓ Introduzione di un ritardo nei riferimenti di posizione basato sulla forza misurata dalla cella di carico

$$\mathbf{R}^*(t) = \mathbf{R}(t - \tau)$$

$$\mathbf{R}_i^* = \mathbf{R}_{i-1}^* + \frac{\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i-1}^*}{t_i - t_{i-1}} \cdot \left[(t_i - t_{i-1}) - \tau_i(f) \right]$$

$$0 \leq \tau_i(f) \leq (t_i - t_{i-1})$$

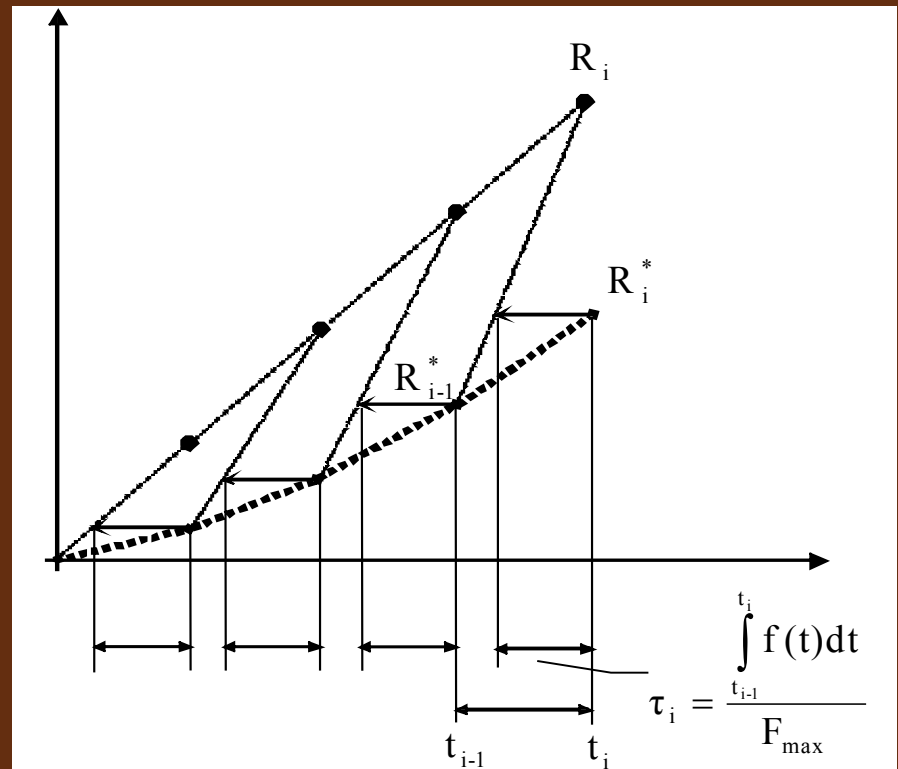
$$\tau_i(f) = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t) dt}{F_{\max}}$$

$$\mathbf{R}_i^* = \mathbf{R}_{i-1}^* + (\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i-1}^*) \cdot \left(1 - \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t) dt}{F_{\max} (t_i - t_{i-1})} \right)$$

$$\frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t) dt}{t_i - t_{i-1}} = f_{t_i - t_{i-1}}^{\text{mean}}$$

$$1 - \frac{f_{t_i - t_{i-1}}^{\text{mean}}}{F_{\max}} = T_{t_i - t_{i-1}}$$

$$\mathbf{R}_i^* = \mathbf{R}_{i-1}^* + (\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i-1}^*) \cdot T_{t_i - t_{i-1}}$$



4.2 Ritardo complessivo e indice di ritardo

✓ Velocità di foratura costante (rampa di riferimenti di posizione con pendenza costante)

Ipotizzando una forza di foratura costante

$$R_i^* = R_{i-1}^* + (R_i - R_{i-1}^*) \cdot T$$



$$R_i = k \cdot t_i \quad R_i = k \cdot \Delta t \cdot i \quad i = 0, 1, \dots, n$$



$$1 - \frac{f_{t_i-t_{i-1}}^{\text{mean}}}{F_{\text{max}}} = T_{t_i-t_{i-1}} \quad \text{è costante} \quad T_{t_i-t_{i-1}} = T$$

Riferimenti di posizione

i	R_i	R_i^*
1	$k\Delta t$	$k\Delta t T$
2	$2k\Delta t$	$3k\Delta t T - k\Delta t T^2$
3	$3k\Delta t$	$6k\Delta t T - 4k\Delta t T^2 + k\Delta t T^3$

Gap di posizione

i	$R_i - R_i^*$
1	$k\Delta t(1 - T)$
2	$k\Delta t(2 - 3T + T^2)$
3	$k\Delta t(3 - 6T + 4T^2 - T^3)$

Ritardo complessivo

i	$S_i = \sum_{j=1}^i \tau_j$
1	$\Delta t(1 - T)$
2	$\Delta t(2 - 3T + T^2)$
3	$\Delta t(3 - 6T + 4T^2 - T^3)$

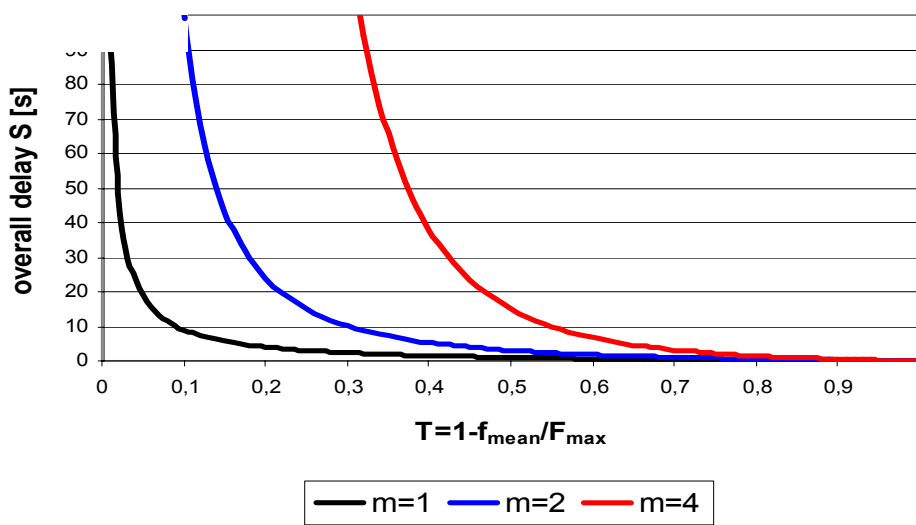
$$S_\infty = \sum_{j=1}^{\infty} \tau_j = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{10}{20} \Delta t T^2 + \frac{5}{15} \Delta t T^3 - \frac{k\Delta t T^4}{15k\Delta t T^3 - 6} \right)$$

Serie geometrica di ragione: $0 \leq (1 - T) \leq 1$

$$S_\infty = \Delta t \cdot \frac{1 - T}{1 - (1 - T)} = \Delta t \cdot \frac{1 - T}{T} = \Delta t \cdot \left(\frac{1}{T} - 1 \right)$$

Indice di ritardo "m" per modificare l'effetto del ritardo:

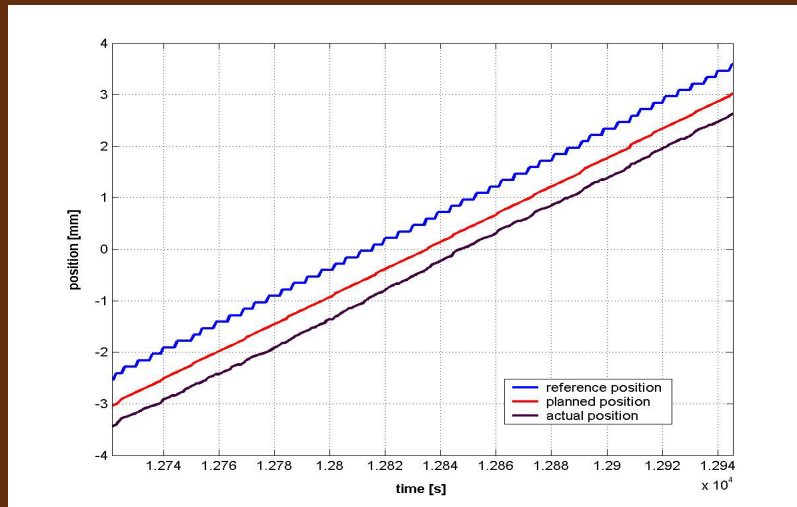
$$S_\infty = \Delta t \cdot \left(\frac{1}{T^m} - 1 \right) \quad m \geq 1$$



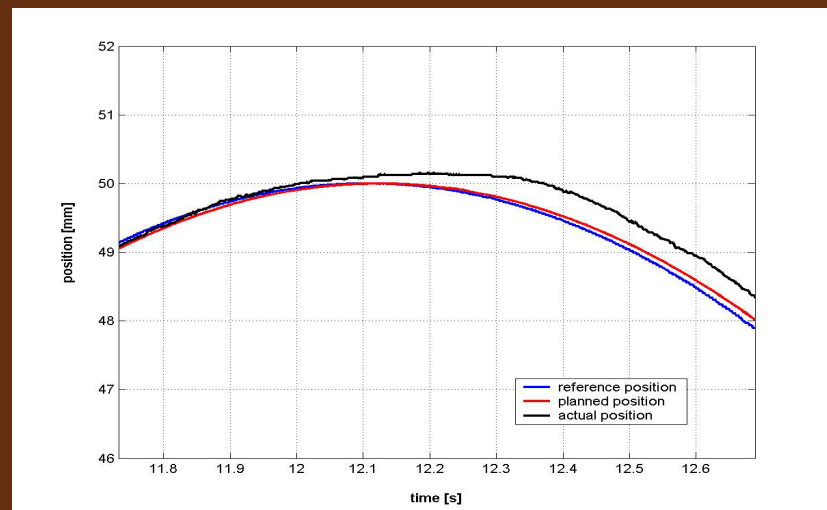
5.1 Test di inseguimento

✓ Riferimento di posizione ad andamento sinusoidale con feedback di forza nullo

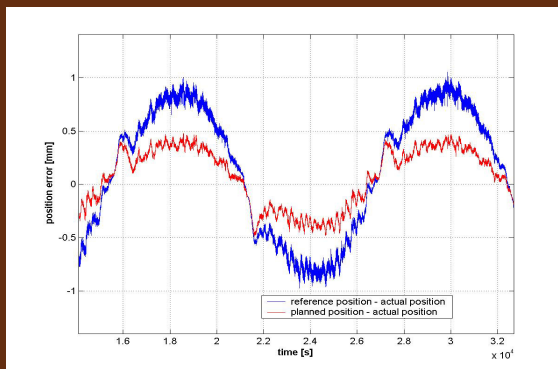
Inseguimento in corrispondenza dell'attraversamento dello zero



Inseguimento in corrispondenza del valore di picco



Errore di inseguimento



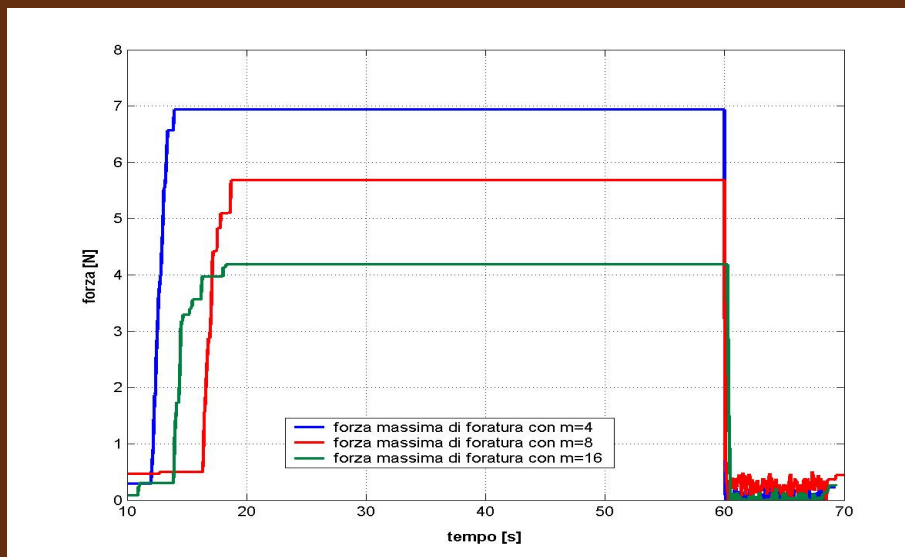
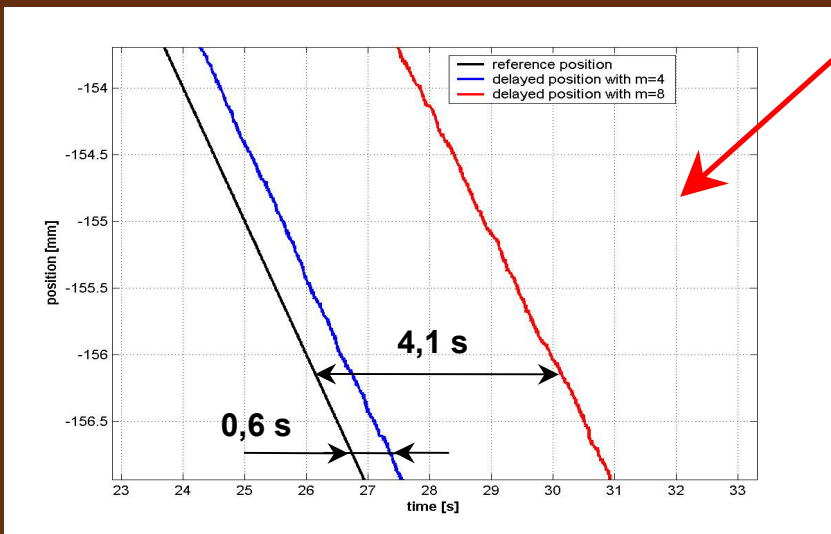
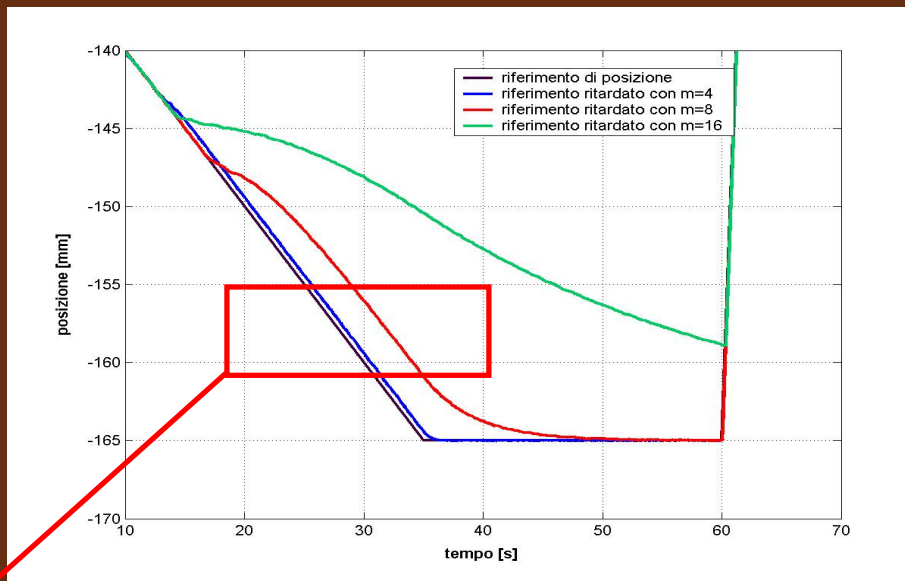
- ✓ L'errore di inseguimento tra posizione attuale e riferimento di posizione si mantiene inferiore ad 1 mm
- ✓ Dal momento che $t_f=20\text{ms}$, il pianificatore introduce un ritardo sistematico di 20 ms tra la posizione attuale del manipolatore e il riferimento di posizione. L'errore conseguente si mantiene comunque contenuto

5.2 Test di foratura

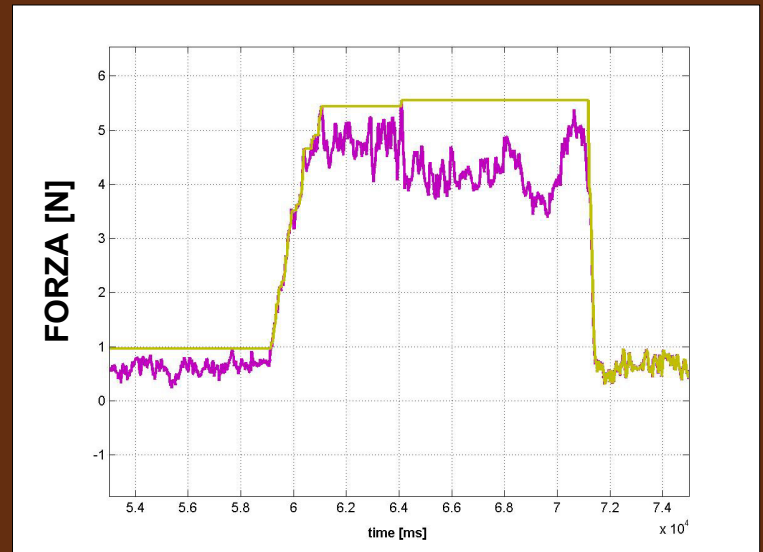
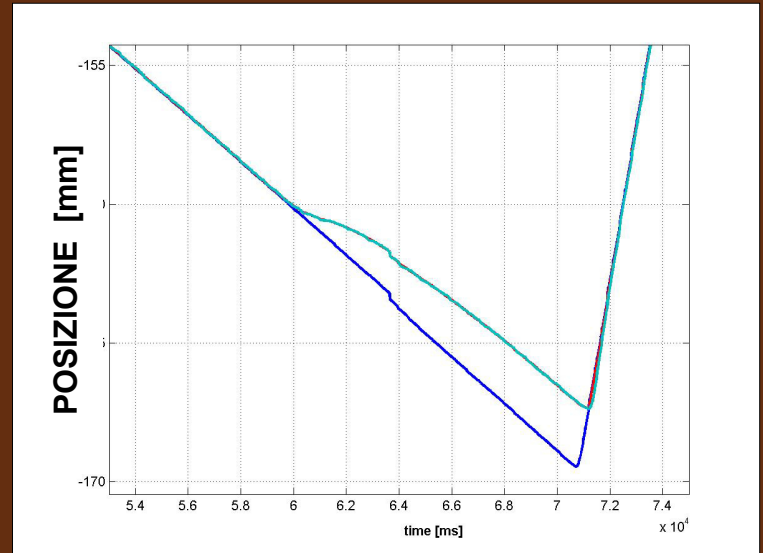
- ✓ Test di foratura condotti su **pannello in legno**
- ✓ Profondità di foratura : **20 mm**
- ✓ Velocità di foratura: **1 mm/s**
- ✓ Al termine della foratura, l'utensile viene mantenuto nella posizione finale per circa **25 secondi prima dell'estrazione**
- ✓ Impiego di tre diversi valori dell'**indice di ritardo** (m=4, m=8, and m=16)

$$F_{\max} = 10\text{N} \quad \Delta t = 5 \cdot 10^{-3}\text{s} \quad 1 - \frac{f_{t_i - t_{i-1}}^{\text{mean}}}{F_{\max}} = T_{t_i - t_{i-1}} \quad S_{\infty} = \Delta t \cdot \left(\frac{1}{T^m} - 1 \right)$$

Con m=4 $\rightarrow S_{\infty} = 0,61\text{s}$ Con m=8 $\rightarrow S_{\infty} = 4,27\text{s}$



Filmato di un test di foratura



START

6. Conclusioni

- ✓ E' stato implementato un sistema costituito da un'interfaccia aptica (master) e da un manipolatore antropomorfo (slave) in grado di realizzare operazioni di foratura in remoto utilizzando la rete Internet
- ✓ Il sistema slave è stato dotato di una retroazione di forza al fine di fornire all'operatore la sensazione del reale contatto con l'oggetto in lavorazione
- ✓ In particolare, sono stati realizzati gli interventi necessari per mettere in grado il robot industriale di funzionare come operatore remoto in compiti di telemanipolazione
 - ❑ Ricondizionamento completo sia hardware che software del sistema di controllo
 - ❑ Progettazione e sintesi di un controllore aperto per l'unità slave
- ✓ Validazione sperimentale degli algoritmi impiegati

APPLICAZIONI FUTURE

1. Chirurgia tele-robotica (per esempio: training remoto, interventi di inserimento di viti peduncolari negli anelli vertebrali, interventi di laparoscopia)
2. Monitoraggio e manutenzione remota (in particolare con riferimento ad interventi in ambienti ostili: profondità marine, ambienti contaminati)
3. L'algoritmo ritardante potrebbe trovare utile impiego, ad esempio, nel controllo di apparati di sollevamento