



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA  
“TOR VERGATA”

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Automazione

*Tesi di Laurea*

“Manipolazione robotica con feedback visuale”

Relatore  
**Ing. F. Martinelli**

Laureando  
**Daniele Chirivì**

Anno Accademico 2008/2009

---

---

*Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia che mi ha sostenuto in questi anni, ai miei amici che mi hanno aiutato in questa carriera universitaria e all'ing. Martinelli che mi ha seguito nella stesura di questo lavoro.*

---

---

## INDICE

1 INTRODUZIONE.....	5
2 IL VISUAL SERVOING.....	7
2.1 Configurazione del sistema visuale	
2.2 Numero di telecamere	
2.3 Controllo visuale	
3 NOZIONI PRELIMINARI SUI MANIPOLATORI.....	10
3.1 Cinematica	
3.1.1 Cinematica diretta	
3.1.2 Cinematica inversa	
3.2 Dinamica	
3.3 Controllo del moto	
3.3.1 Controllo PD	

---

---

### 3.3.2 Controllo di traiettoria con matching

4	POSIZIONAMENTO DELL'EFFETTORE.....	16
4.1	Controllo con feedback visivo	
4.1.1	Schema generale	
4.1.2	Calcolo della traiettoria	
4.1.3	Approssimazione lineare	
4.2	Controllo a catena aperta	
5	SIMULAZIONE.....	23
5.1	Risposta ad un riferimento costante	
5.2	Traiettoria dell'effettore	
5.3	Risposta del sistema linearizzato	
5.4	Sensibilità alle variazioni parametriche	
6	CONCLUSIONI.....	38
	BIBLIOGRAFIA.....	39

---

---

## 1. INTRODUZIONE

La maggioranza dei robot usati oggi lavorano in industrie dove l'ambiente di lavoro può essere modificato per adattarsi al robot stesso. Sono meno usati invece in situazioni in cui non è facile controllare la configurazione dell'ambiente di lavoro e la disposizione degli oggetti. Questa limitazione è dovuta in grande parte alla mancanza di capacità sensoriali nella maggioranza dei sistemi robotici commerciali.

L'integrazione di un sensore visivo in un sistema robotico è fondamentale per aumentare la versatilità e il dominio di applicazione dei robot.

Uno dei primi lavori in cui si parla di controllo di un robot attraverso un feedback visuale è “Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks” <sup>[1]</sup> di Y. Shirai e H. Inoue nel 1973.

Tipicamente le informazioni visuali vengono usate con un approccio “look and move”, cioè a catena aperta in cui vengono alternati acquisizione e interpretazione dell'immagine e movimento del robot. L'uso delle informazioni visuali può essere anche usato per ottenere un sistema di controllo per la posizione dell'effettore a ciclo chiuso. Questa tecnica è meglio nota come controllo visuale o visual servoing.

---

Il termine “visual servoing” appare per la prima volta nel 1979 in “Real time control of a robot with a mobile camera” <sup>[2]</sup> di Hill e Park.

Anche se nei primi anni '80 esistevano già i primi sistemi robotici integrati con sensori visivi, la loro diffusione si è avuta solo in tempi recenti grazie all'aumento delle capacità computazionali dei personal computer che permettono quindi l'elaborazione delle immagini a una frequenza sufficiente per effettuare il controllo del moto di un manipolatore robotico. Un primo tutorial per il visual servoing risale al 1996 ad opera di Hutchinson, Hager e Corke <sup>[3]</sup>.

Lo scopo di questo lavoro è quello di sviluppare un sistema di controllo per il posizionamento dell'effettore di un manipolatore robotico attraverso un feedback visivo. Di tale tecnica si darà una descrizione per quanto riguarda un manipolatore planare a due gradi di libertà, ma può essere facilmente esteso a casi più complessi.

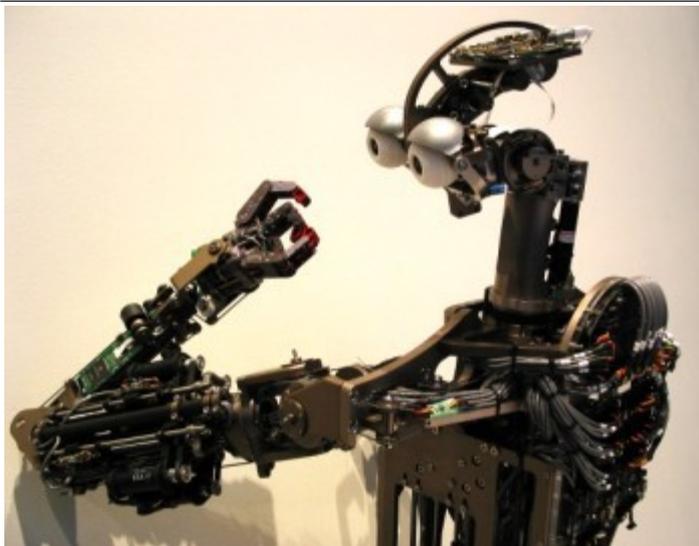
Nel capitolo 2 si parlerà prima di tutto degli aspetti principali del visual servoing; nel capitolo 3 verranno introdotte brevemente la cinematica e la dinamica del manipolatore in questione e il sistema di controllo dei giunti per il manipolatore stesso; nel capitolo 4 si studierà un sistema di controllo che sfrutta le informazioni visuali a ciclo chiuso per ottenere il posizionamento dell'effettore a delle coordinate desiderate; nel capitolo 5 infine verranno riportati i risultati di alcune prove simulative del controllo con feedback visivo e verrà analizzata la sua robustezza alle incertezze sui parametri, confrontandolo in particolare con un sistema di controllo per il posizionamento dell'effettore a catena aperta.

---

## **2. IL VISUAL SERVOING**

Le informazioni visuali possono essere utilizzate a vari livelli: per la semplice pianificazione del compito da svolgere oppure per il controllo del moto. Nel secondo caso si parla propriamente di controllo visuale o visual servoing.

Esistono diversi modi per affrontare il problema del visual servoing.



*Visual servoing*

## **2.1. Configurazione del sistema visuale**

Il sistema visuale può assumere due diverse configurazioni:

- eye-to-hand, in cui la telecamera è fissa ed è quindi solidale alla terna base del manipolatore;
- eye-in-hand, in cui la telecamera è disposta sul manipolatore.

Nella configurazione eye-to-hand, si ha il vantaggio di avere un campo visivo costante della telecamera ma si ha lo svantaggio che il manipolatore si possa frapporre tra la telecamera e l'oggetto di cui si vuole individuare la posizione.

Nella configurazione eye-in-hand, se la telecamera è disposta sull'organo terminale del manipolatore la visuale è sempre libera, ma il campo visivo della telecamera cambia continuamente rendendo più difficile il calcolo delle coordinate a partire dalle caratteristiche dell'immagine.

## **2.2. Numero di telecamere**

I sistemi visuali possono variare a seconda del numero di telecamere. In sistemi in cui è presente una sola telecamera, è necessario conoscere la forma geometrica degli oggetti presenti nello spazio di lavoro, in modo tale che sia possibile riconoscerne la profondità. Questa conoscenza non è necessaria in sistemi in cui ci sono due o più telecamere, nei quali con particolari tecniche è possibile definire posizione e dimensione definita di un oggetto.

## **2.3. Controllo visuale nello spazio operativo e nello spazio delle immagini**

---

Esistono due approcci principali per il visual servoing:

- visual servoing nello spazio operativo (3D);
- visual servoing nello spazio dell'immagine (2D).

Nel primo caso, le informazioni visuali vengono usate per ricavare la posizione dell'effettore del manipolatore e l'errore rispetto alla posizione da raggiungere e la legge di controllo quindi viene definita direttamente in base alle variabili di spazio operativo.

Nel secondo caso, la legge di controllo si basa sull'errore tra le caratteristiche dell'immagine nella configurazione corrente e le caratteristiche dell'immagine nella configurazione desiderata.

In questo lavoro si farà riferimento ad una configurazione eye-to-hand, quindi con la telecamera esterna rispetto al manipolatore. Inoltre si suppone di attuare l'azione di controllo rispetto alle variabili di spazio operativo che si suppone siano direttamente disponibili attraverso l'interpretazione dell'immagine.

---

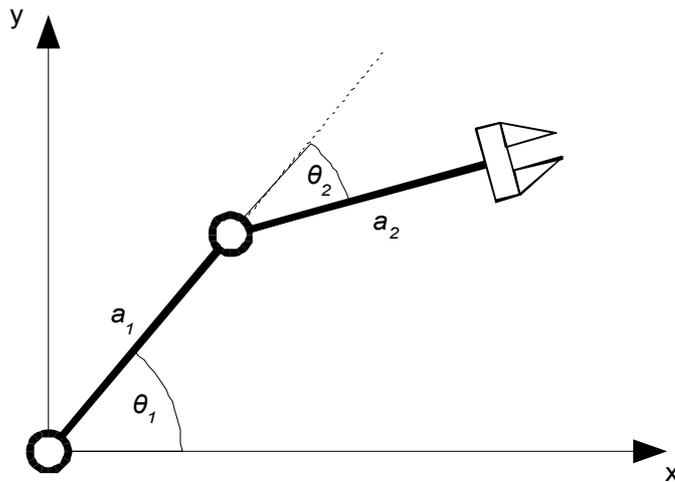
## 3. NOZIONI PRELIMINARI SUI MANIPOLATORI

In questo capitolo verranno trattati alcuni concetti di base nello studio dei manipolatori con riferimento al robot in esame, come la cinematica, la dinamica e il controllo del moto.

### 3.1. Cinematica

Il manipolatore a cui si farà riferimento in questo lavoro si suppone che sia composto da due giunti rotazionali, di cui il primo vincolato e da due link rigidi. All'estremità del secondo link vi è l'effettore che è costituito da una pinza. Inoltre gli angoli  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  vengono considerati positivi in senso antiorario.

Per semplicità non verrà considerato l'orientamento della pinza.



*Schema del manipolatore*

Il robot ha due gradi di libertà, quindi ogni sua configurazione può essere rappresentata con un vettore di due variabili.

In particolare si faccia riferimento a due diverse rappresentazioni:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

definito nello spazio delle variabili di giunto e

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

che rappresenta la posizione dell'effettore ed è definito nello spazio operativo.

### 3.1.1 Cinematica diretta

Prima di tutto è utile ricavare l'espressione della posizione dell'effettore a partire dagli angoli di giunto. Dalla figura è facile ricavare  $\mathbf{p}_e$  come:

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

Conoscendo la posizione dell'effettore in funzione delle variabili di giunto è possibile calcolare la matrice jacobiana che è:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

La matrice è singolare per  $\theta_2 = 0$  e  $\theta_2 = \pi$ .

### 3.1.2 Cinematica inversa

Per attuare un posizionamento dell'effettore a catena aperta è possibile calcolare i valori degli angoli di giunto corrispondenti ad una posizione desiderata per l'effettore.

L'angolo  $\theta_2$  può essere trovato in questo modo:

$$\cos(\theta_2) = \frac{r^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 a_1 a_2}.$$

dove  $r$  è la norma del vettore  $\mathbf{p}_e$ .

Questa equazione è soddisfatta da due valori di  $\theta_2$ , uno positivo e uno negativo, tutti e due equivalenti per quanto riguarda la posizione finale dell'effettore.

Conoscendo  $\theta_2$  è possibile calcolare  $\theta_1$ :

Quindi:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + a_2 \cos(\theta_2) & -a_2 \sin(\theta_2) \\ a_2 \sin(\theta_2) & a_1 + a_2 \cos(\theta_2) \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{p}_e,$$

da cui si ricava facilmente  $\theta_1$ .

Il calcolo del valore degli angoli di giunto è possibile solo se  $|\mathbf{p}_e| < a_1^2 + a_2^2$ .

### 3.2. Dinamica

Dati  $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$  le coordinate di giunto e  $\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$  le coppie applicate ai giunti,

l'equazione che caratterizza la dinamica del manipolatore è:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}$$

dove:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 a_1^2 + m_2 l_2^2 + 2 m_2 a_1 l_2 \cos \theta_2 + I_2 & m_2 l_2^2 + m_2 a_1 l_2 \cos(\theta_2) + I_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 a_1 l_2 \cos(\theta_2) + I_2 & m_2 l_2^2 + I_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -2 m_2 a_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 & -m_2 a_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \\ m_2 a_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} (m_1 l_1 + m_2 a_1) g \cos(\theta_1) + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix},$$

in cui

$$a_1 = \frac{l_1}{2}, \quad a_2 = \frac{l_2}{2},$$

e  $I_1$ ,  $I_2$  sono i momenti di inerzia dei due segmenti riferiti all'asse passante per il baricentro e perpendicolare al piano del manipolatore.

Se rappresentiamo il manipolatore come un sistema dinamico con variabili di stato  $\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$ , ingresso  $\mathbf{u} = \boldsymbol{\tau}$  e uscita  $\mathbf{y} = \mathbf{q}$ , allora:

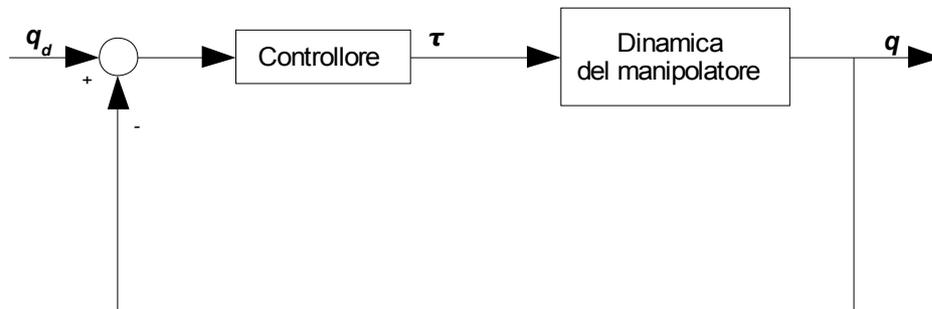
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2; \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= -\mathbf{D}(\mathbf{x}_1)^{-1} (\mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{h}(\mathbf{x}_1)) + \mathbf{D}(\mathbf{x}_1)^{-1} \mathbf{u}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{x}_1. \end{aligned}$$

Tutti gli stati  $\mathbf{x}_e$  in cui  $\mathbf{x}_2 = 0$ , sono stati di equilibrio associati all'ingresso  $\mathbf{u}_e = \mathbf{h}(\mathbf{q}_e)$ .

### 3.3. Controllo del moto di un manipolatore

Il sistema del controllo del manipolatore, dato  $\mathbf{q}_d$  il valore di riferimento degli angoli di giunto, deve garantire a regime  $\mathbf{q}_d - \mathbf{q}$  nullo o molto piccolo e  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{h}(\mathbf{q}_d)$ .

Si riporteranno due possibili sistemi di controllo che verranno poi integrati nel controllo di posizionamento dell'effettore con feedback visuale del successivo capitolo.



*Controllo del moto di un manipolatore*

### 3.1.1. Controllo PD

Uno dei metodi più semplici per controllare il moto del manipolatore è un controllo di tipo proporzionale-derivativo con l'aggiunta del vettore di coppia  $\mathbf{h}(\mathbf{q})$  come compensazione della gravità. Se  $\mathbf{q}(t)$  e  $\mathbf{q}_d(t)$  sono rispettivamente l'andamento e la posizione desiderata delle variabili di giunto allora applicando ai giunti la coppia:

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{K}_P(\mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t)) + \mathbf{K}_D(\dot{\mathbf{q}}(t) - \dot{\mathbf{q}}_d(t)) + \mathbf{h}(\mathbf{q}),$$

si ottiene un errore costante a regime, piccolo a piacere a patto di scegliere  $\mathbf{K}_D$  e  $\mathbf{K}_P$  sufficientemente grandi.

### 3.1.2. Controllo di traiettoria con matching

Se si ha una buona conoscenza dei parametri del manipolatore si può applicare una coppia tale che la dinamica del manipolatore venga sostituita da una dinamica desiderata.

Si applichi ai giunti un vettore di coppia:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{h}(\mathbf{q}) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{K}_P(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) - \mathbf{K}_D(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d)]$$

In questo modo la dinamica del robot è descritta dalla seguente equazione:

---

$$\ddot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_P \mathbf{e}_q = \mathbf{0}$$

con  $\mathbf{e}_q = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$

Se  $\mathbf{K}_D$  e  $\mathbf{K}_P$  sono matrici definite positive l'errore tende asintoticamente a zero. L'errore a regime è costante se ci sono errori sulle stime dei parametri del manipolatore.

---

## **4. POSIZIONAMENTO DELL'EFFETTORE**

In generale è scomodo comandare il manipolatore direttamente attraverso le variabili di giunto; invece è utile disporre di un sistema di posizionamento dell'effettore che consenta all'operatore di comandare il robot attraverso le coordinate dell'organo terminale. Si possono usare due approcci principali:

- in retroazione, sfruttando un feedback che può essere di tipo visivo;
- a catena aperta, calcolando tramite la cinematica inversa gli angoli di giunto corrispondenti ad una determinata posizione dell'effettore.

### **4.1. Controllo con feedback visivo**

In questo lavoro si vedrà come sfruttare la conoscenza in tempo reale dell'errore di posizione dell'effettore ricavata sulla base di informazioni visuali per realizzare un'azione di controllo che porti l'effettore nella

---

posizione desiderata. Inoltre si suppone che il manipolatore sia dotato di encoder che forniscano il valore degli angoli di giunto.

Il vantaggio del controllo con feedback visivo rispetto ad un controllo a catena aperta è la robustezza rispetto alle variazioni parametriche e ad errori di calcolo.

Il controllo può essere attuato in due modi:

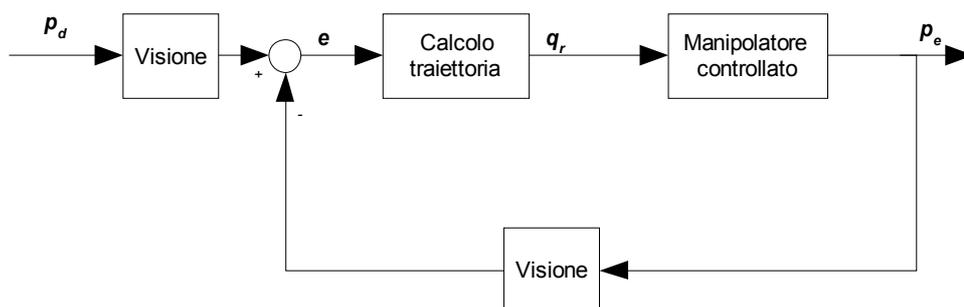
- le coppie applicate ai giunti vengono calcolate direttamente a partire dall'errore di posizione;
- dato l'errore di posizione, si calcola la traiettoria di riferimento per le variabili di giunto e a partire da essa si calcola il vettore di coppia da applicare ai giunti.

Da qui in seguito sarà fatto riferimento al secondo metodo. Per questo si suppone che il manipolatore sia già dotato di un suo sistema di controllo dei giunti.

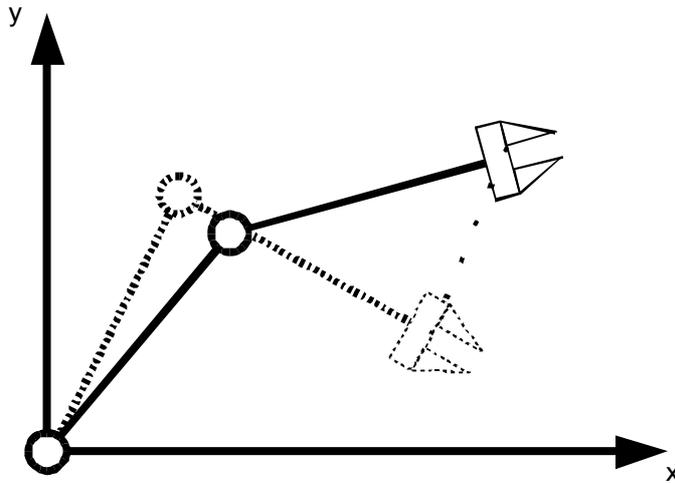
#### 4.1.1. Schema generale

La tecnica di controllo studiata in questo lavoro consiste nel portare l'effettore nella posizione desiderata attraverso una traiettoria di riferimento nello spazio dei giunti.

Questa traiettoria è definita a tempo discreto tramite una sequenza di posizioni calcolate ad ogni istante di campionamento. La sequenza dovrà convergere ad un valore costante in modo tale che l'effettore si trovi nella posizione desiderata.



*Schema di controllo con feedback visivo*



*Il manipolatore segue la traiettoria di riferimento*

#### **4.1.2. Calcolo della traiettoria**

Per il calcolo della traiettoria di riferimento si facciamo le seguenti ipotesi:

- il manipolatore controllato è approssimabile a un dispositivo ideale di posizionamento, trascurando in un primo momento il ritardo dovuto alla dinamica del manipolatore;
- si supponga di avere un'ottima conoscenza della cinematica del manipolatore;
- si supponga di lavorare sempre in punti dove la matrice  $J(q)$  non è singolare;
- la posizione desiderata per l'effettore sia all'interno dello spazio di lavoro.

Siano  $p_d$  la posizione desiderata per l'effettore e  $p_e$  la posizione in tempo reale dell'effettore.

L'errore di posizione è:

$$e = p_d - p_e .$$

La derivata dell'errore (supponendo  $p_d$  costante) è:

---

$$\dot{e} = -\dot{p} ,$$

dove:

$$\dot{p} = J(q)\dot{q} .$$

Dalle due precedenti equazioni si ottiene:

$$\dot{e} = -J(q)\dot{q} .$$

A questo punto se imponiamo una velocità di riferimento ai giunti:

$$\dot{q}_r = J(q)^{-1} K e ,$$

$$\text{con } K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}$$

e supponendo  $\dot{q}_r \approx \dot{q}$  per l'ipotesi fatta in precedenza, si ottiene:

$$\dot{e} = -K e .$$

Se  $k > 0$  allora l'errore  $e$  tende asintoticamente a zero e le coordinate dell'effettore quindi tendono al valore desiderato con costante di tempo  $k$ .

La traiettoria di riferimento  $q_r$  sarà calcolata attraverso l'integrazione a tempo discreto di  $\dot{q}_r$ .

La correzione della traiettoria  $\Delta q_r(i)$  ad ogni intervallo di campionamento  $i$  sarà :

$$\Delta q_r(i) = T \dot{q}_r(i) ,$$

dove  $T$  è il periodo di campionamento e  $i \in \mathbb{N}$ ; la posizione di riferimento  $q_r$  seguirà quindi l'andamento:

$$q_r(i+1) = q_r(i) + \Delta q_r(i) .$$

#### 4.1.4. Approssimazione lineare

I valori della posizione desiderata e della posizione reale dell'effettore sono disponibili come informazioni campionate a una frequenza che dipende dalla frequenza di quadro della telecamera. Supponiamo che i valori campionati  $p_d(i)$  e  $p_e(i)$  arrivino alla stessa frequenza usata per il calcolo della traiettoria.

Per trovare un'espressione approssimata della funzione di trasferimento tra  $p_d(i)$  e  $p_e(i)$ , prendiamo in considerazione le ipotesi fatte in precedenza.

Come verrà evidenziato nelle prove simulative, l'assunzione di trascurare il ritardo introdotto dalla dinamica del manipolatore è valida se il guadagno  $k$  assume valori abbastanza ridotti. Il manipolatore in questo modo è in grado di seguire fedelmente la traiettoria di riferimento.

Inoltre l'ottima conoscenza della cinematica del manipolatore fa sì che la moltiplicazione  $\mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}(\mathbf{q})$  dia esattamente la matrice identità.

Quindi se rappresentiamo la funzione di trasferimento a tempo discreto tra  $\dot{\mathbf{q}}_r(i)$  e  $\mathbf{q}_r(i)$  come:

$$\begin{bmatrix} \frac{T}{z-1} & 0 \\ 0 & \frac{T}{z-1} \end{bmatrix},$$

per le ipotesi fatte la funzione di trasferimento errore-uscita è:

$$\mathbf{F}(z) = \begin{bmatrix} k \frac{T}{z-1} & 0 \\ 0 & k \frac{T}{z-1} \end{bmatrix},$$

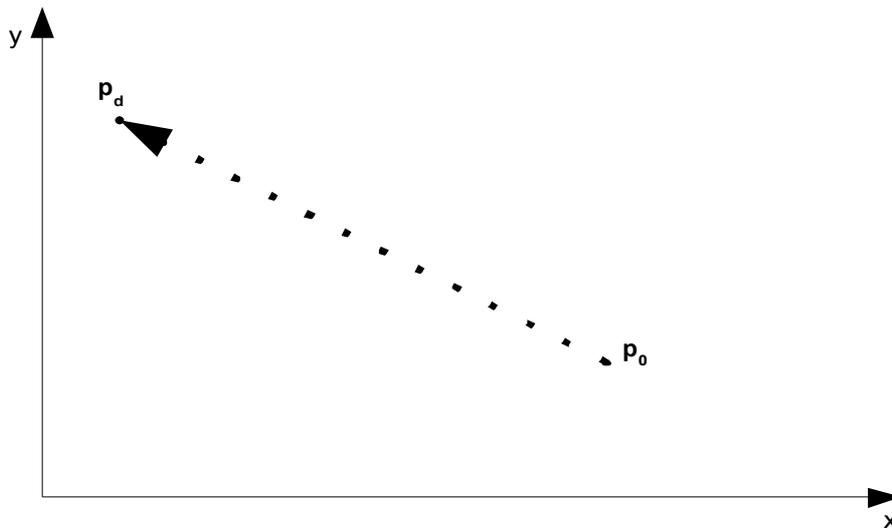
e quindi la relazione finale tra  $\mathbf{p}_d$  e  $\mathbf{p}_e$  può essere approssimata a tempo discreto come:

$$\mathbf{p}_e(z) = \begin{bmatrix} \frac{kT}{z-(1-kT)} & 0 \\ 0 & \frac{kT}{z-(1-kT)} \end{bmatrix} \mathbf{p}_d(z).$$

Se  $\mathbf{p}_d$  assume un valore costante  $\mathbf{P}_d$ , data la posizione iniziale dell'effettore  $\mathbf{p}_0$ , la posizione dell'effettore  $\mathbf{p}_e(i)$  può essere approssimata come:

$$\mathbf{p}_e(i) = \mathbf{P}_d + (\mathbf{p}_0 - \mathbf{P}_d)(1-kT)^i,$$

un'equazione parametrica che al variare di  $i \in \mathbb{N}$  dà luogo a una sequenza di punti che appartengono al segmento di retta che unisce i punti di coordinate  $\mathbf{p}_0$  e  $\mathbf{P}_d$ .



### Traiettoria dell'effettore

Se il guadagno è uguale per le due coordinate, queste tenderanno al valore desiderato con la stessa costante di tempo, in modo tale che l'effettore tracci sul piano  $xy$  un segmento. E' possibile però scegliere  $\mathbf{K}$  come:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix},$$

con  $k_1, k_2 > 0$ , in modo da assegnare due diverse dinamiche alle coordinate  $x$  e  $y$ . Quindi:

$$\mathbf{p}_e(z) = \begin{bmatrix} \frac{k_1 T}{z - (1 - k_1 T)} & 0 \\ 0 & \frac{k_2 T}{z - (1 - k_2 T)} \end{bmatrix} \mathbf{p}_d(z).$$

In questo caso la traiettoria tracciata dall'effettore sul piano  $xy$  non sarà più rettilinea ma curvilinea.

### 4.1.3. Scelta del guadagno

In precedenza si è approssimato il manipolatore come un dispositivo ideale di posizionamento. Se si introduce il ritardo dovuto alla dinamica del manipolatore, dobbiamo scegliere  $\mathbf{K}$  in modo tale che la traiettoria di riferimento non sia troppo veloce rispetto alle prestazioni del sistema di

---

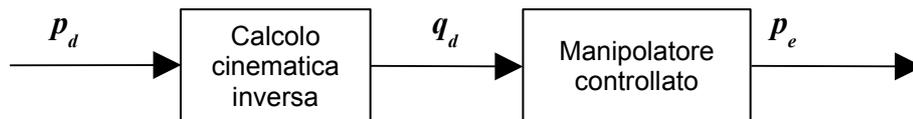
controllo del manipolatore. Gli autovalori di  $K$  quindi non possono assumere valori troppo elevati.

Inoltre se  $K$  è abbastanza grande, l'errore converge comunque a zero, ma il sistema si allontana dal modello lineare per cui la traiettoria tracciata dall'effettore si allontana dalla curva desiderata.

## 4.2. Controllo a catena aperta

Il posizionamento con controllo a catena aperta è semplice da realizzare, supponendo che il manipolatore sia controllato nello spazio dei giunti. Con un calcolo di cinematica inversa, si ricavano gli angoli di giunto corrispondenti ad una posizione desiderata dell'effettore e si inviano come riferimento al sistema di controllo del manipolatore. Le prestazioni di questo sistema derivano quindi essenzialmente da quelle del sistema di controllo del manipolatore.

Questo metodo risulta poco robusto sia per possibili errori di calcolo, sia per variazioni parametriche.



*Schema di controllo a catena aperta*

---

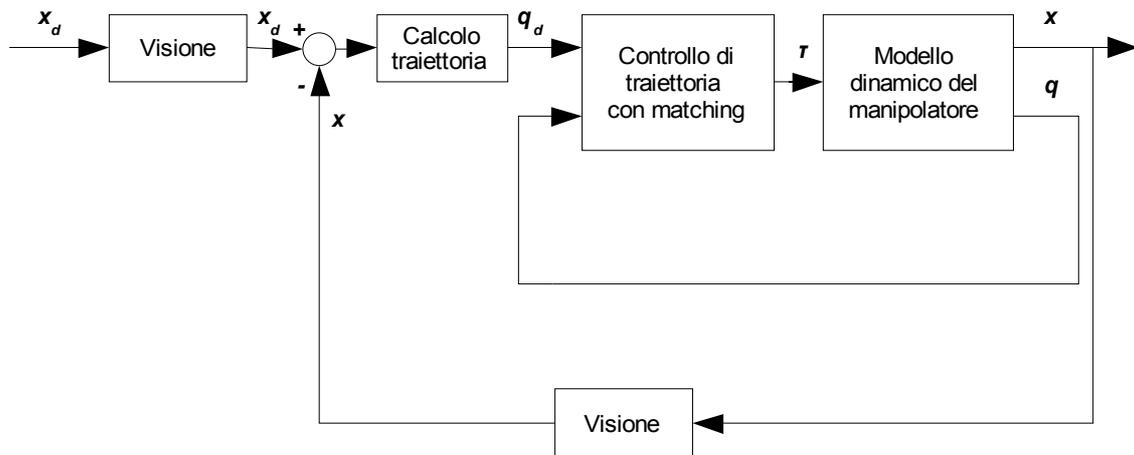
## 5. SIMULAZIONE

In questo capitolo verranno mostrati i risultati di una simulazione del posizionamento dell'effettore del manipolatore a due gradi di libertà attraverso il controllo con feedback visivo.

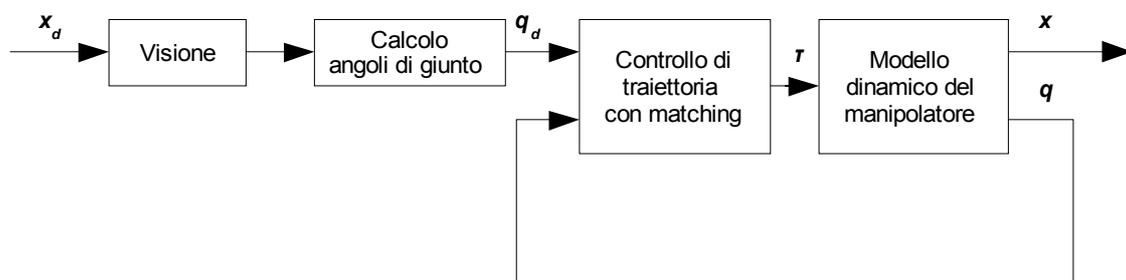
Verranno mostrati gli andamenti delle grandezze caratteristiche soprattutto in riferimento a variazioni del guadagno per il calcolo della traiettoria e a variazioni delle stime dei parametri, mettendo in evidenza le differenze con uno schema di controllo di posizione dell'effettore in cui le informazioni visuali vengono usate a catena aperta e gli angoli di giunto vengono calcolati tramite cinematica inversa.

Il sistema di controllo è composto da: un primo blocco che riceve in ingresso l'errore di posizione e dà in uscita la traiettoria di riferimento per il manipolatore; un secondo blocco che riceve in ingresso una traiettoria di riferimento e calcola la coppia da applicare al manipolatore attraverso il controllo di traiettoria con matching; inoltre l'ultimo blocco simula la dinamica del manipolatore secondo il modello  $D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + h(q) = \tau$ .

Inoltre le informazioni di posizione provengono da due blocchi che rappresentano il sistema di visione.



*Modello del controllo con feedback visivo*



*Modello del controllo a catena aperta*

Il manipolatore ha le seguenti caratteristiche:

$$m_1 = 5 \text{ kg} ;$$

$$m_2 = 5 \text{ kg} ;$$

$$a_1 = 1 \text{ m} ;$$

$$a_2 = 1 \text{ m} .$$

---

Il tempo di campionamento per il controllo è invece:

$$T = 0.05 \text{ ms},$$

che supponiamo coincida con il periodo al quale sono disponibili le informazioni visuali.

Il controllo di traiettoria con matching è stato realizzato con i seguenti parametri:

$$\mathbf{K}_P = \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 25 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}.$$

Il guadagno usato per il calcolo della traiettoria è invece:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Il guadagno è stato scelto per via empirica, in modo da garantire prima di tutto la stabilità del sistema e da evitare eccessive sovraelongazioni nella posizione dell'effettore.

### 5.1. Risposta ad un riferimento costante

L'effettore si trova in una posizione iniziale:

$$\mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} 1.7071 \\ 0.7071 \end{bmatrix},$$

e quindi gli angoli di giunto hanno valori iniziali:

$$\mathbf{q}_0 = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{4} \\ -\frac{\pi}{4} \end{bmatrix}.$$

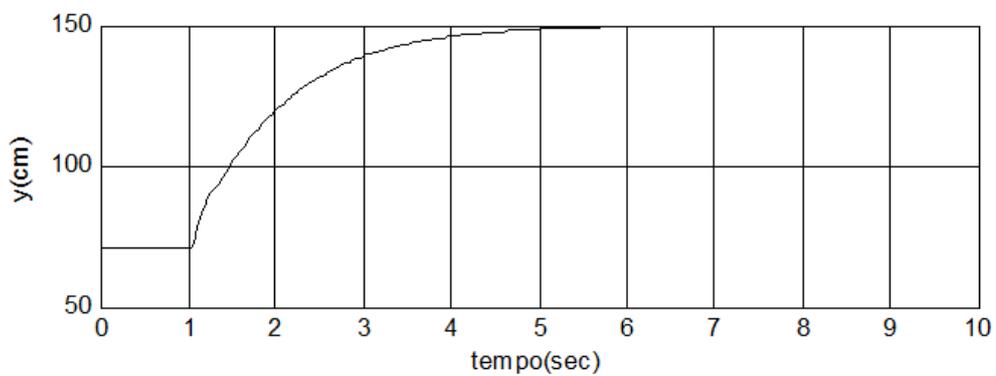
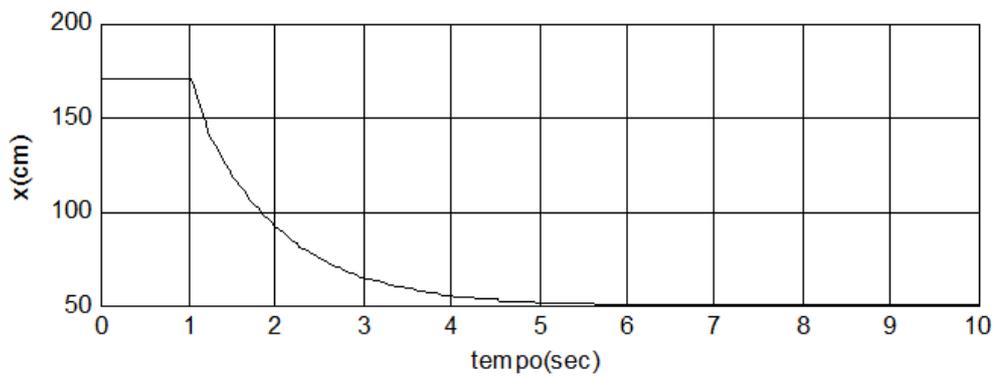
Per  $t \geq 1 \text{ sec}$ , si imponga che la nuove coordinate (in metri) da raggiungere per l'effettore siano:

$$\mathbf{p}_d = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1.5 \end{bmatrix}.$$

La simulazione dura per un tempo di 10 secondi.

---

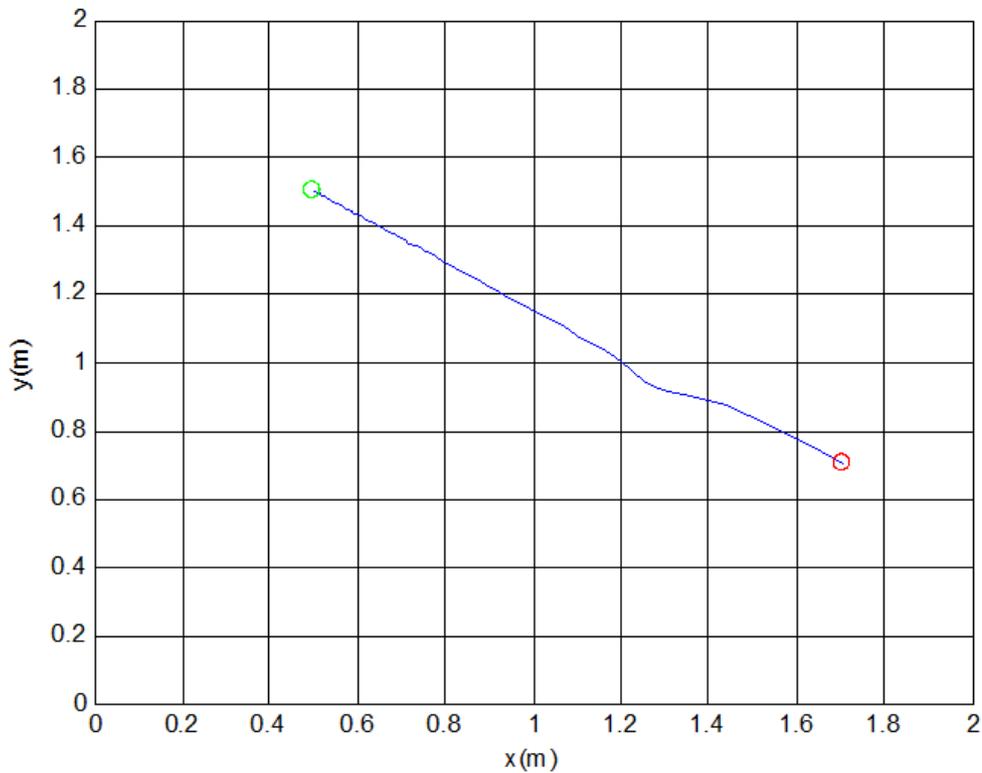
I seguenti grafici mostrano l'andamento nel tempo delle coordinate  $x$  e  $y$  dell'effettore.



*Andamento delle coordinate  $x$  e  $y$  al variare del tempo*

I valori delle due coordinate tendono ai valori desiderati con la stessa costante di tempo.

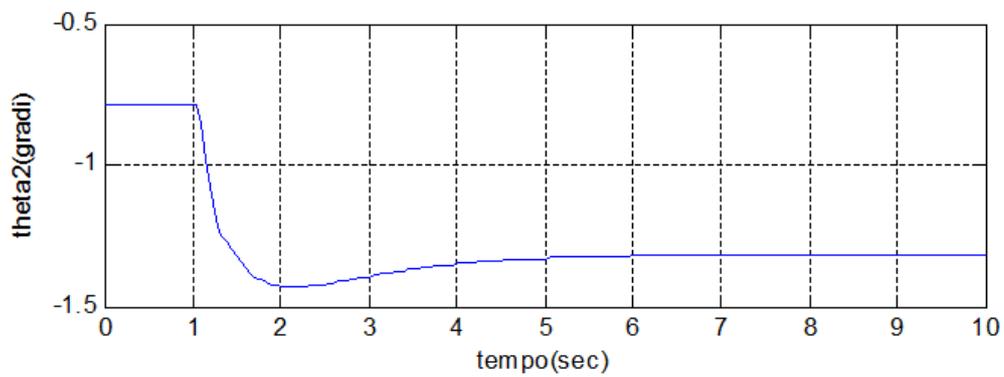
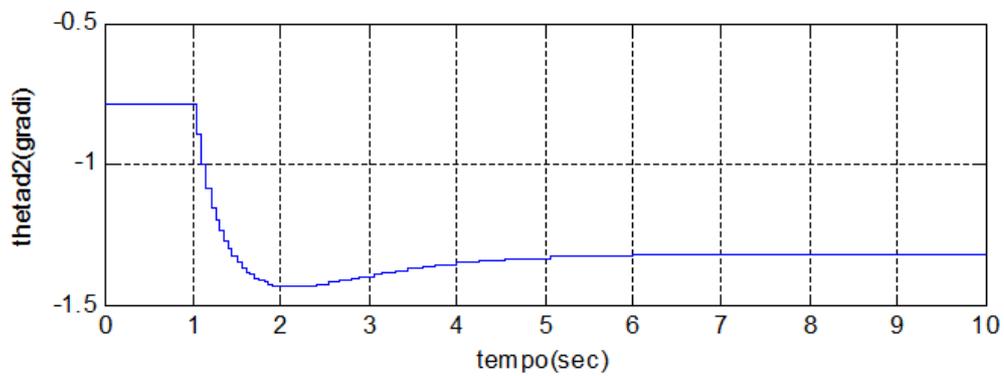
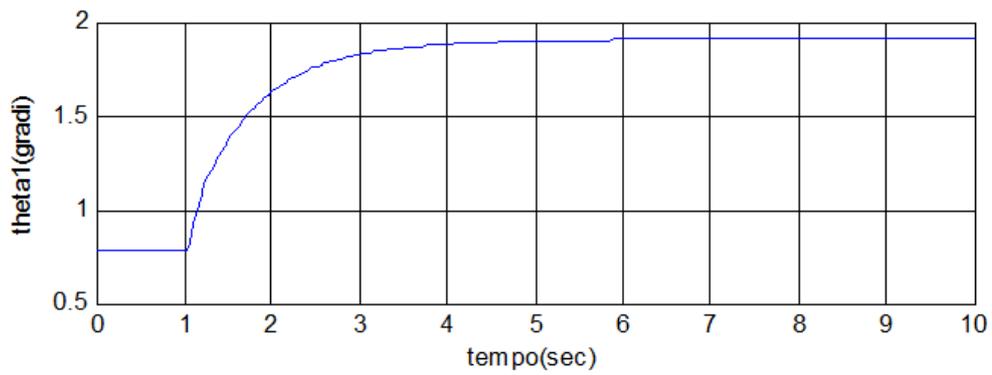
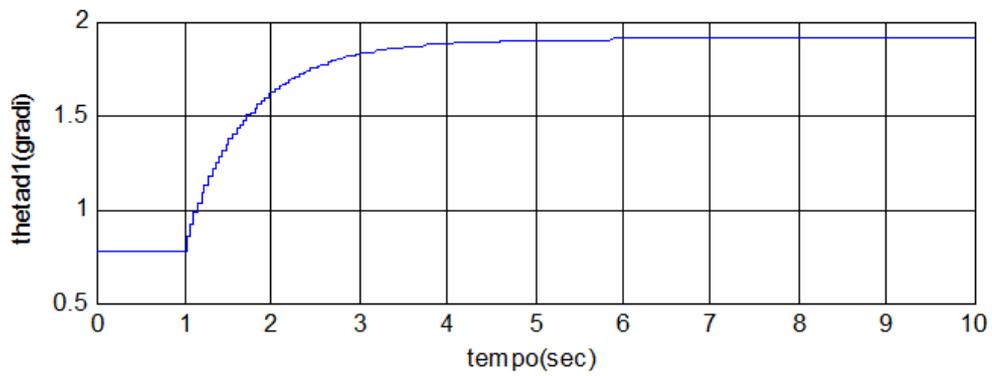
E' possibile inoltre visualizzare la traiettoria descritta dall'effettore sul piano  $(x,y)$ . Nella figura la posizione iniziale dell'effettore è indicata con un cerchio rosso, mentre quella finale è indicata con un cerchio verde. Il punto  $(0,0)$  corrisponde all'origine della terna base del manipolatore.



*Traiettoria dell'effettore sul piano  $xy$*

La traiettoria che l'effettore segue sul piano  $(x,y)$  è approssimativamente una linea retta. Questo è dovuto al fatto di aver scelto il guadagno  $k$  uguale sia per la coordinata  $x$  che per la coordinata  $y$ .

I seguenti grafici mostrano per ciascuno dei due angoli di giunto  $\theta_1$  e  $\theta_2$  la traiettoria di riferimento e la traiettoria reale seguita dal manipolatore.



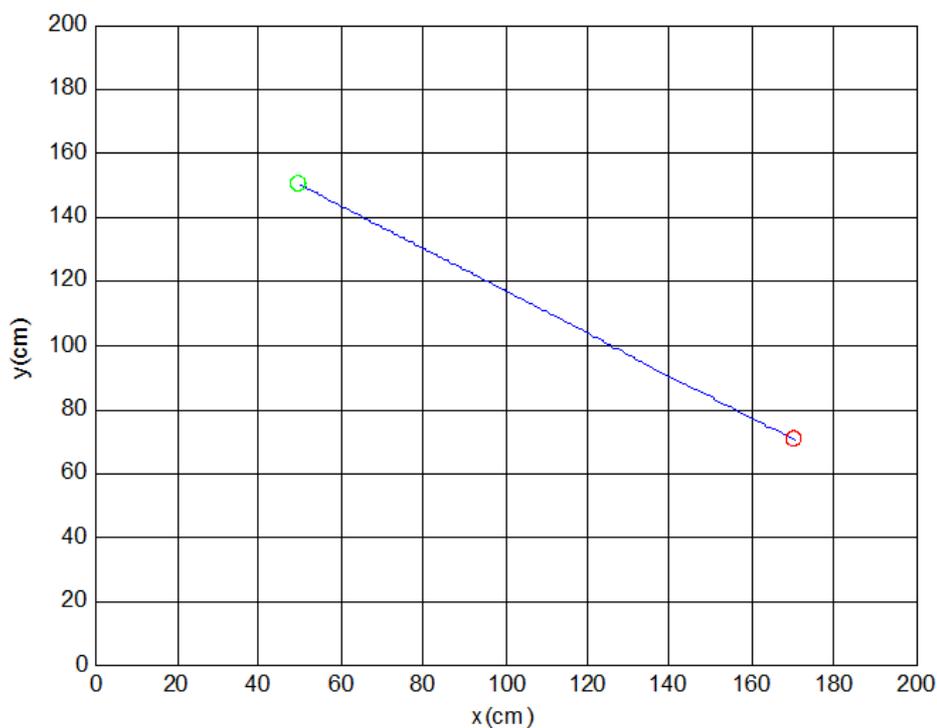
*Andamento degli angoli di giunto al variare del tempo*

---

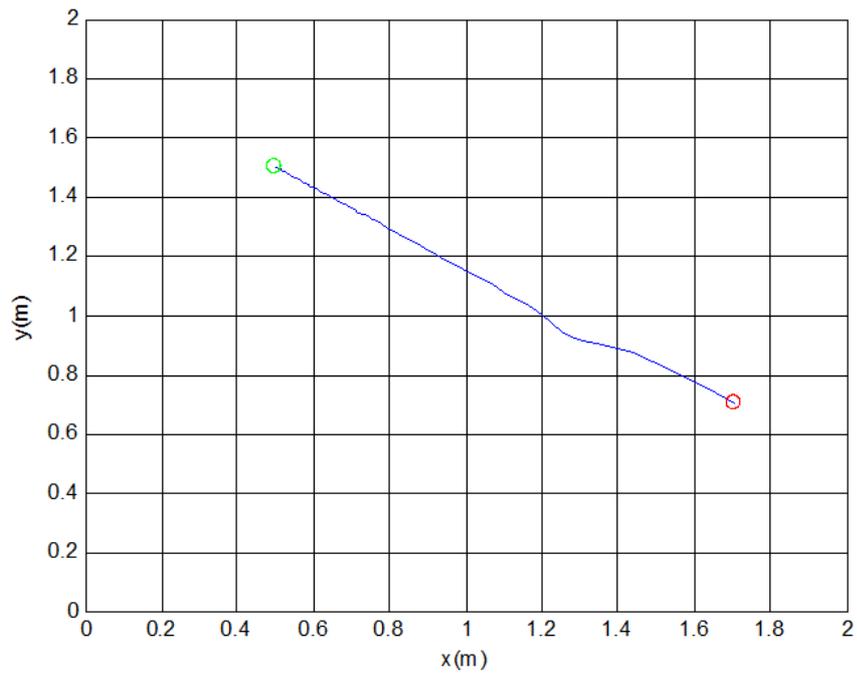
Si può notare che, avendo scelto  $\mathbf{K}$  con autovalori non elevati, gli angoli di giunto seguono quasi istantaneamente la traiettoria di riferimento confermando quindi l'ipotesi fatta nel capitolo precedente per il calcolo della traiettoria che  $\dot{q}_d \approx \dot{q}$ .

## 5.2. Traiettoria dell'effettore

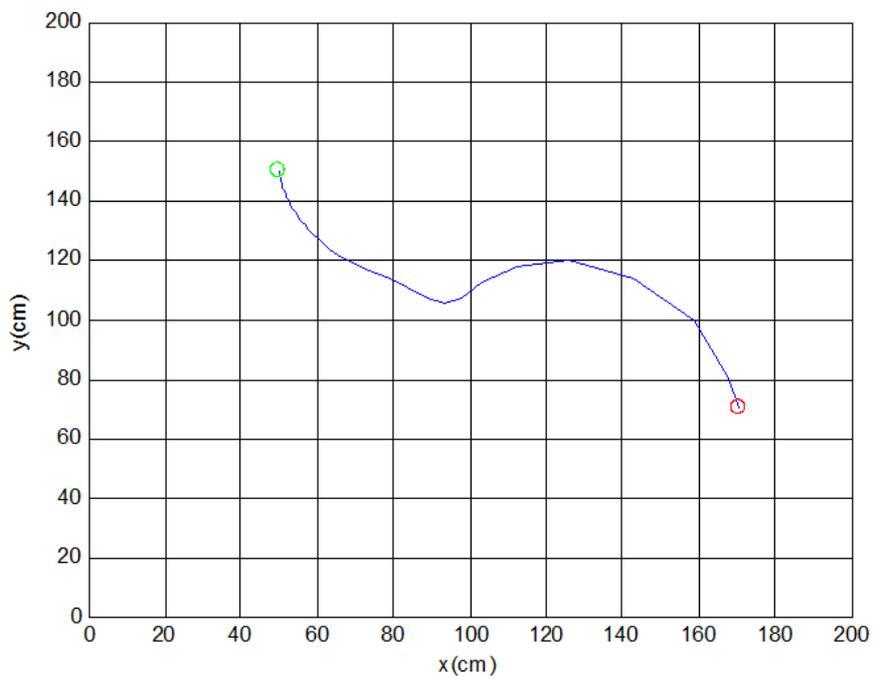
E' interessante notare la dipendenza della traiettoria dell'effettore dal guadagno  $\mathbf{K}$ . I seguenti evidenziano l'andamento della traiettoria dell'effettore nel caso in cui gli autovalori di  $\mathbf{K}$  siano uguali e il caso in cui vengano assegnate due diverse dinamiche alla coordinata  $x$  e la coordinata  $y$ .



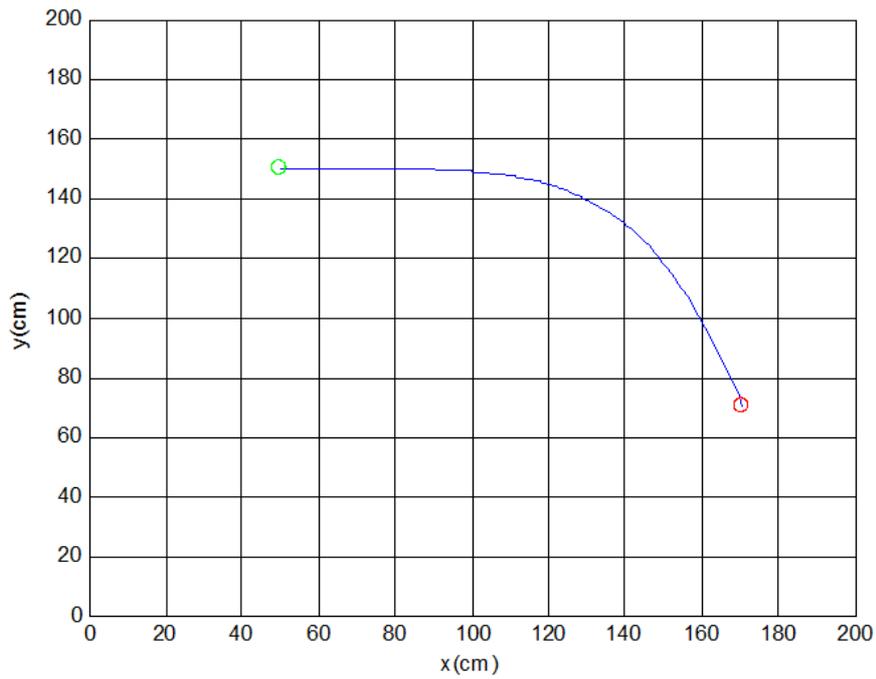
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$



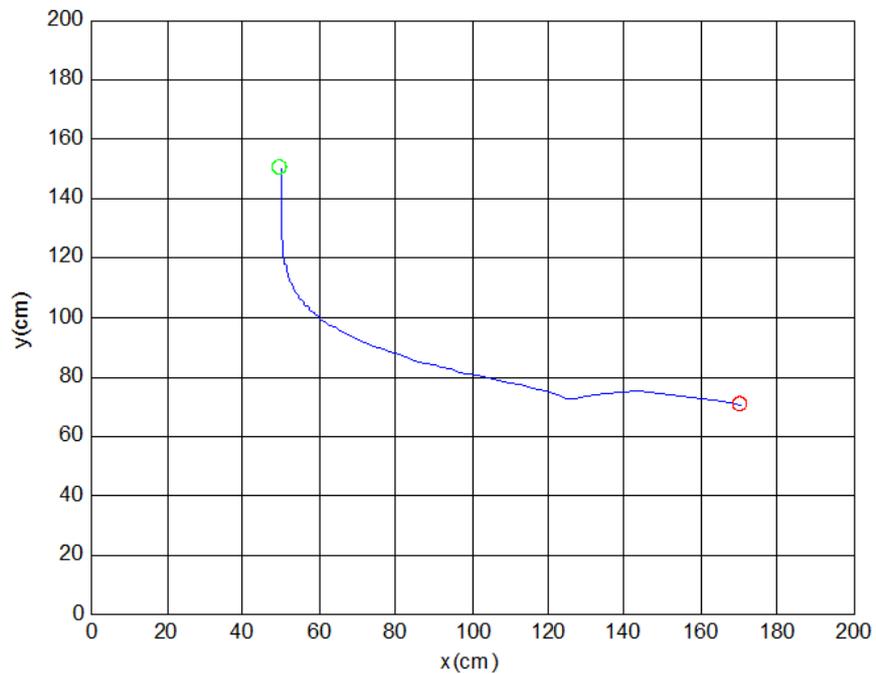
$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$K = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

Si può notare che la precisione della traiettoria dipende dal valore degli autovalori di  $\mathbf{K}$ . Più essi sono bassi, più la dinamica del sistema si avvicina

---

alla sua approssimazione lineare aumentando la precisione della traiettoria. Si può notare inoltre che nelle ultime figure scegliendo guadagni diversi per le coordinate  $x$  e  $y$  l'effettore traccia delle curve sul piano  $xy$ .

### 5.3. Risposta del sistema linearizzato

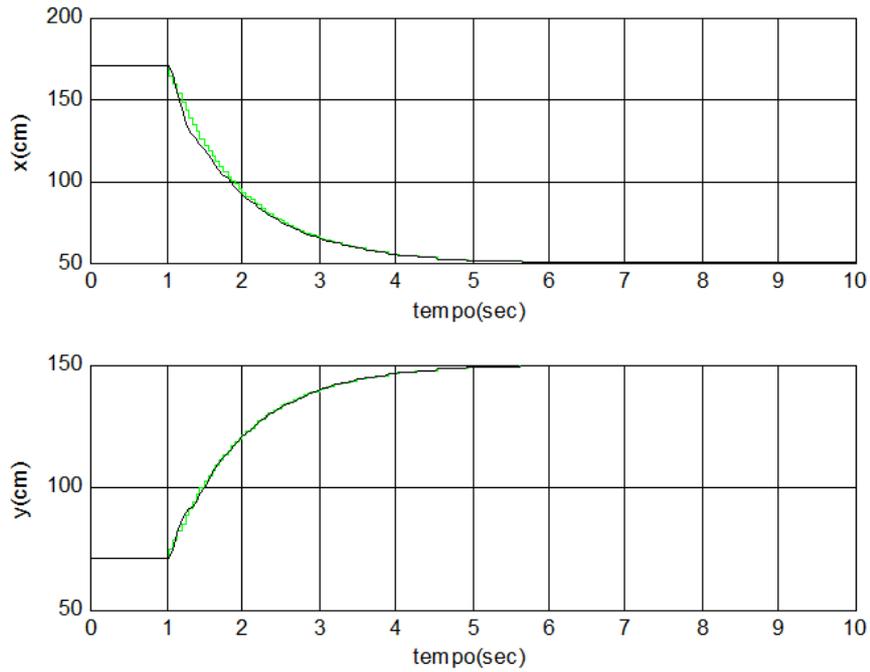
Secondo quanto visto nel capitolo precedente si può approssimare l'intero sistema di posizionamento a tempo discreto secondo lo schema:



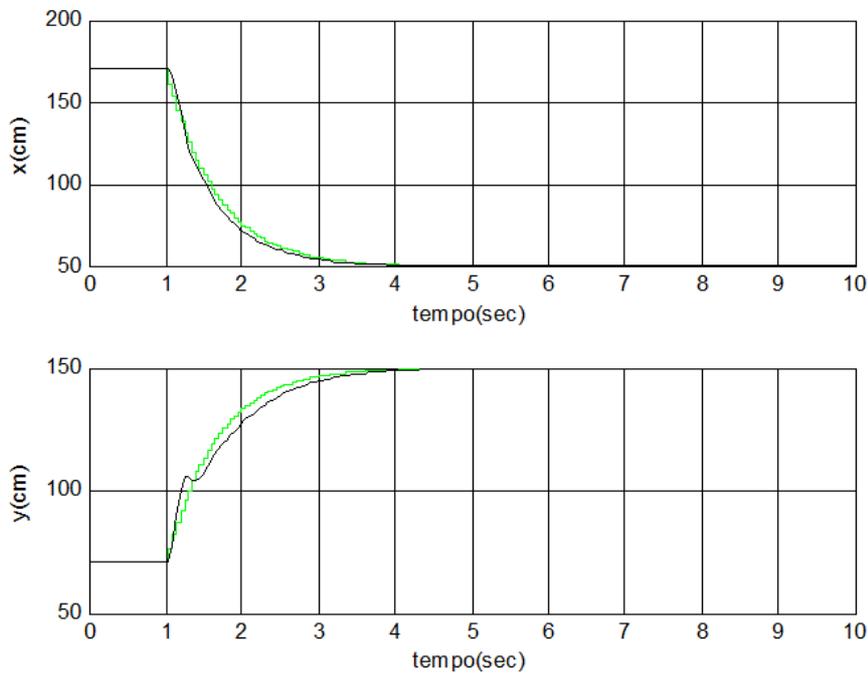
*Approssimazione lineare del posizionamento dell'effettore*

$$\text{con } \mathbf{W}(z) = \begin{bmatrix} \frac{k_1 T}{z - (1 - k_1 T)} & 0 \\ 0 & \frac{k_2 T}{z - (1 - k_2 T)} \end{bmatrix}.$$

Se simuliamo la risposta ad un riferimento costante di questo sistema, per la posizione dell'effettore otteniamo un andamento simile a quello del sistema originario. In figura è mostrata la posizione dell'effettore al variare del tempo nei due casi al variare di  $\mathbf{K}$ .



Andamento reale della posizione dell'effettore (in nero) e andamento della posizione dell'effettore nell'approssimazione lineare del sistema (in verde) con  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$



Andamento reale della posizione dell'effettore (in nero) e andamento della posizione dell'effettore nell'approssimazione lineare del sistema (in verde) per  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}$ .

## 5.4. Sensibilità a variazioni parametriche

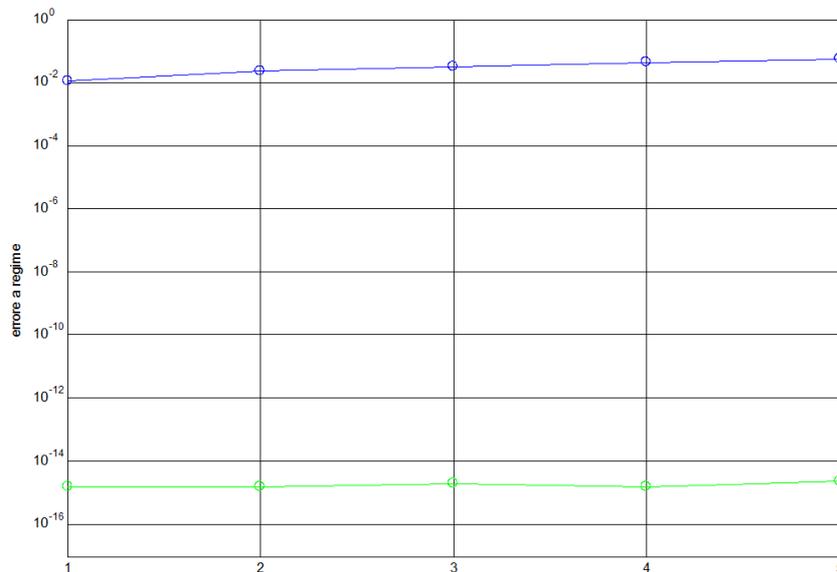
Per analizzare la sensibilità alle variazioni dei parametri, si metta a confronto il sistema per il posizionamento dell'effettore con feedback visivo e un sistema a catena aperta che utilizza il calcolo della cinematica inversa.

Si supponga che le lunghezze dei segmenti del manipolatore non siano conosciuti perfettamente ma si abbiano dei valori stimati  $\tilde{a}_1$  e  $\tilde{a}_2$  tali che:

$$\begin{aligned}\tilde{a}_1 &= a_1 + \Delta a, \\ \tilde{a}_2 &= a_2 + \Delta a.\end{aligned}$$

Nella tabella e nel grafico al variare dei valori di  $\Delta a$  è riportato l'errore a regime nel caso del controllo attraverso cinematica inversa e nel caso del controllo visuale. L'errore è inteso come la distanza tra la posizione finale dell'effettore e la posizione desiderata.

$\Delta a/a_1$	Controllo a catena aperta	Controllo con feedback
1,00%	0.01137	$1.601 \cdot 10^{-15}$
2,00%	0.02249	$1.601 \cdot 10^{-15}$
3,00%	0.03337	$2.047 \cdot 10^{-15}$
4,00%	0.04403	$1.601 \cdot 10^{-15}$
5,00%	0.05448	$2.342 \cdot 10^{-15}$



*Errore a regime per il controllo con feedback visivo (in verde) e il controllo a catena aperta (in blu) al variare di  $\Delta a$*

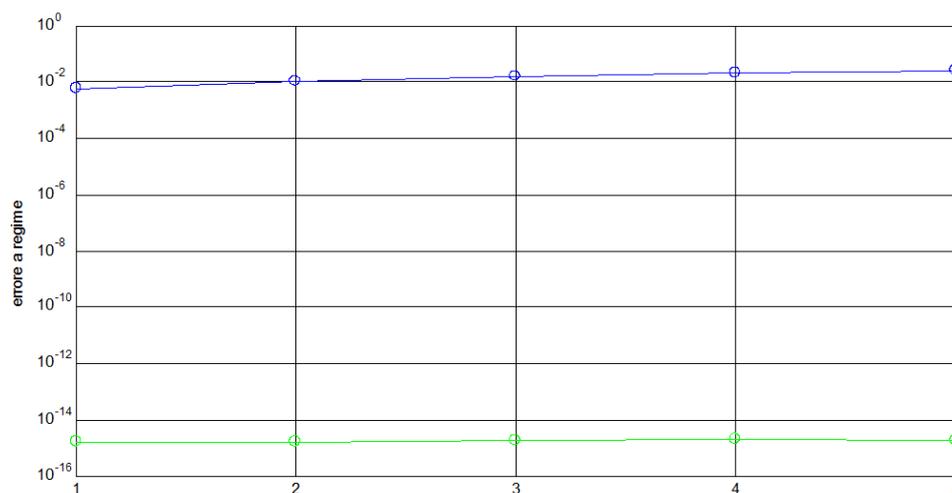
Si può osservare che il controllo con feedback visivo assicura un errore a regime praticamente nullo e una buona robustezza al variare dei parametri. Al contrario il controllo a catena aperta è sensibile ai parametri e presenta un errore a regime consistente.

Le stesse considerazioni possono essere fatte se vi è un'errore  $\Delta m$  sulla stima delle masse tale che i valori stimati siano:

$$\begin{aligned}\tilde{m}_1 &= m_1 + \Delta m, \\ \tilde{m}_2 &= m_2 + \Delta m.\end{aligned}$$

I risultati per quanto riguarda l'errore a regime permanente sono evidenziati nella tabella e nel grafico.

$\Delta m / m_1$	Controllo a catena aperta	Controllo con feedback
1,00%	0.005434	$1.617 \cdot 10^{-15}$
2,00%	0.01076	$1.691 \cdot 10^{-15}$
3,00%	0.01598	$1.831 \cdot 10^{-15}$
4,00%	0.0211	$2.047 \cdot 10^{-15}$
5,00%	0.02612	$1.831 \cdot 10^{-15}$



*Errore a regime per il controllo con feedback visivo (in verde) e il controllo a catena aperta (in blu) al variare di  $\Delta m$*

I valori delle masse vengono usati per implementare il controllo dei giunti del manipolatore che è uguale in tutti e due i casi. Nel controllo con feedback però la retroazione assicura una maggiore robustezza.

---

Una volta accertato che l'errore a regime si mantiene quasi nullo anche in presenza di incertezze, si deve tenere conto degli effetti degli errori parametrici sul transitorio.

A tale proposito in figura è visualizzata la traiettoria dell'effettore attraverso il controllo con feedback visivo con:

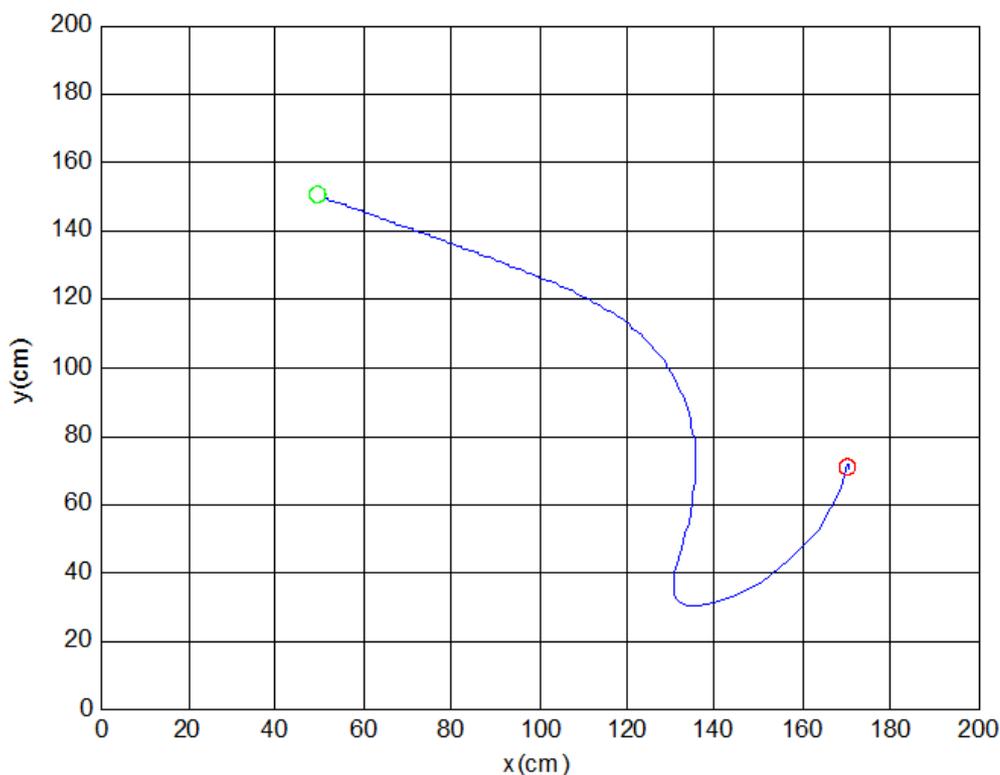
$$\tilde{m}_1 = 5.1 \text{ kg} ;$$

$$\tilde{m}_2 = 5.1 \text{ kg} ;$$

$$\tilde{a}_1 = 1.02 \text{ m} ;$$

$$\tilde{a}_2 = 1.02 \text{ m} ;$$

$$k = 0.2 .$$



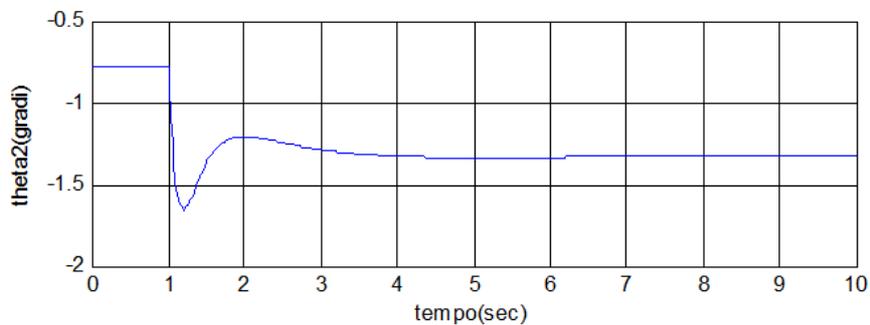
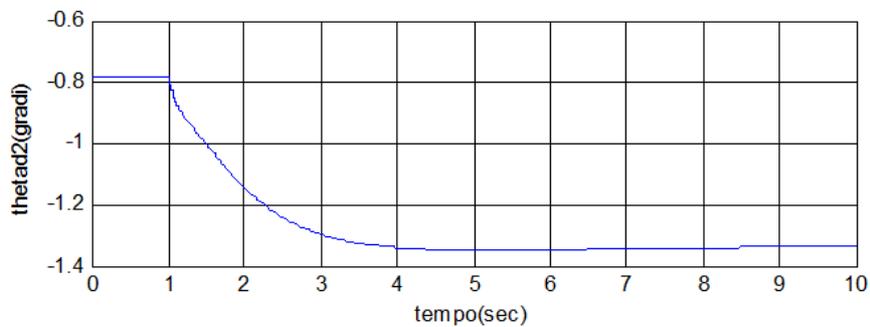
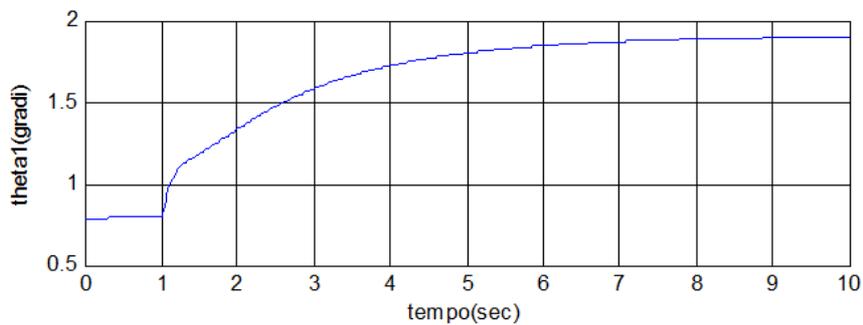
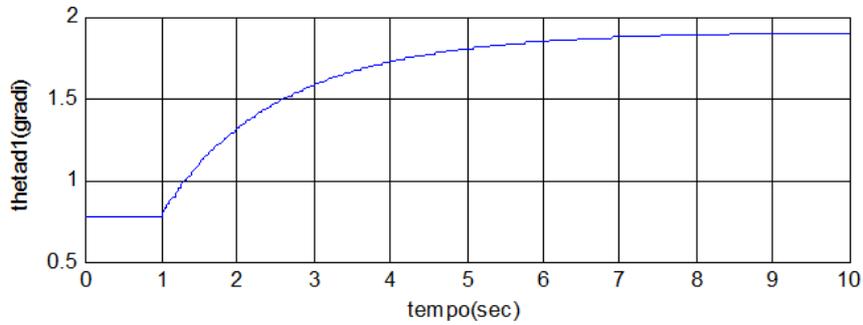
*Traiettoria dell'effettore con incertezze sui parametri*

Se sono presenti incertezze su parametri però è necessario abbassare il guadagno per evitare eccessive sovraelongazioni, con lo svantaggio di aumentare il tempo necessario per il raggiungimento della posizione.

Il sistema per il posizionamento dell'effettore con feedback visuale quindi è abbastanza robusto rispetto alle variazioni parametriche. La sensibilità è dovuta maggiormente al sistema di controllo proprio del manipolatore.

Infatti la traiettoria di riferimento calcolata non presenta delle grosse variazioni se ci sono incertezze sui parametri. Al contrario è la traiettoria seguita dal manipolatore che ne viene influenzata maggiormente. Come esempio si può notare l'andamento della traiettoria di riferimento per gli

angoli di giunto e la traiettoria seguita realmente dal manipolatore. La traiettoria di riferimento è più lenta rispetto al caso precedente per aver scelto il guadagno più basso ma l'andamento è simile. Invece la traiettoria seguita dal manipolatore risente degli errori sui parametri soprattutto nel transitorio.



*Andamento della traiettoria di riferimento e andamento degli angoli di giunto con incertezze sui parametri*

---

## 6. CONCLUSIONI

Dopo lo studio effettuato si può affermare che il sistema di posizionamento dell'effettore con feedback visivo ha una precisione maggiore rispetto ad un controllo a catena aperta ed è molto più robusto rispetto ad errori nelle stime dei parametri.

Inoltre, da quanto si è visto, per aumentare la robustezza conviene piuttosto agire sul sistema di controllo dei giunti del manipolatore, sostituendo al controllo di traiettoria con matching che presuppone un'ottima conoscenza dei parametri del manipolatore, altre azioni di controllo più robuste.

Il sistema studiato può essere esteso facilmente al caso in cui ci siano più di due gradi di libertà. Supponendo che il manipolatore disponga già di un proprio sistema di controllo dei giunti, è sufficiente infatti conoscere la cinematica del manipolatore e quindi la matrice jacobiana per il calcolo del riferimento. L'algoritmo può essere usato inoltre anche quando la cinematica del robot non è ben conosciuta, ricorrendo a una stima dello jacobiano<sup>[6]</sup>.

---

## BIBLIOGRAFIA

1. Y. Shirai and H. Inoue, “**Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks**”;
2. Hutchinson, Hager, Corke, “A tutorial on visual servo control”, IEEE Trans. Robot. Automat., 12(5):651--670, Oct. 1996;
3. J. Hill and W. T. Park, “**Real time control of a robot with a mobile camera**” ;
4. Siciliano, Sciavicco, Villani, Oriolo, “**Robotica: Modellistica, Pianificazione e controllo**”, McGraw-Hill;
5. Paolo Rocco, “**Controllo dei robot**”
6. Koh HOSODA and Minoru ASADA, **Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian**, IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS '94), pp.186–193, M`unchen, Sep. 12–16, 1994