



Università degli Studi di Ferrara

---

*Facoltà di Ingegneria*

*Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica*

CONTROLLO DI ROBOT MEDIANTE  
ASSERVIMENTO VISUALE

Tesi di

Damiano Fabbri

Relatore

Dott. Ing. Cesare Fantuzzi

Correlatore

Ing. Marcello Bonfè

---

Anno Accademico 2000/2001



# Ringraziamenti

La realizzazione di questo lavoro (errori esclusi) è stata fortemente facilitata dalla collaborazione e dall'aiuto di moltissime persone.

Prima di tutto ringrazio Maria per avermi pazientemente seguito ed assistito in questi mesi, i miei genitori, mio fratello, i miei nonni e i miei zii per essersi occupati di me in questi anni.

Desidero inoltre sottolineare la proficua collaborazione instauratasi durante la stesura della tesi con il Prof. Fantuzzi e l'Ing. Bonfè. Un particolare ringraziamento va anche al Prof. Piccardi per le utili indicazioni datemi.

Per finire non posso tralasciare i miei amici di *università* in particolar modo Valio per i preziosi appunti, Pregno Nardo e Lizzi che si sono dimostrati, in questi ultimi anni trascorsi insieme, tre “*veri*” amici (numero di erre a parte).



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Cenni storici . . . . .	1
1.2	Asservimento visuale (visual servoing) . . . . .	3
1.3	Architetture di asservimento . . . . .	4
1.4	Obiettivi della tesi . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Componenti Hardware</b>	<b>9</b>
2.1	Sistema di elaborazione . . . . .	9
2.2	La scheda Frame Grabber . . . . .	10
2.3	La videocamera . . . . .	11
2.4	Il controllore Unival del robot . . . . .	12
2.5	Il braccio robotico . . . . .	13
2.5.1	Modo di funzionamento "WORLD" . . . . .	15
2.5.2	Modo di funzionamento "TOOL" . . . . .	15
2.6	Pinza pneumatica . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Basi teoriche</b>	<b>17</b>
3.1	Cinematica del corpo rigido . . . . .	17
3.1.1	Generalità . . . . .	17
3.1.2	Proprietà della matrice R . . . . .	21
3.1.3	Corpo rigido . . . . .	22
3.1.4	Trasformazioni omogenee. . . . .	23
3.1.5	Teoria della robotica . . . . .	25
3.1.6	Cinematica diretta e inversa . . . . .	28
3.2	Modello della telecamera . . . . .	29
3.2.1	Coordinate omogenee . . . . .	30
3.2.2	Generalizzazione . . . . .	32

3.2.3	Matrice CCD . . . . .	33
3.3	Calibrazione . . . . .	34
3.3.1	Stima della posizione di un oggetto. . . . .	37
3.4	Piano di lavoro . . . . .	38
3.4.1	Matrice di calibrazione . . . . .	39
3.4.2	Matrice di calibrazione (secondo caso) . . . . .	40
3.5	Elaborazione dell'immagine . . . . .	44
3.5.1	Immagini binarie discrete . . . . .	46
3.5.2	Etichettamento . . . . .	47
3.5.3	Connettività . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Componenti Software</b>	<b>51</b>
4.1	Windows NT . . . . .	51
4.1.1	Organizzazione dei thread . . . . .	53
4.1.2	API Application programming interface . . . . .	53
4.2	La libreria MIL-lite . . . . .	55
4.3	La libreria "IMEL" . . . . .	58
4.4	L'oggetto "Matrice" . . . . .	65
4.5	L'oggetto "Robot" . . . . .	66
4.6	La libreria "Control" . . . . .	69
4.7	Linguaggio VAL II del Robot Puma 260 . . . . .	70
4.7.1	Programmi di controllo del robot(Robot Control Programs)	71
4.7.2	Programmi di controllo dei processi(Process Control Programs) . . . . .	71
4.7.3	Controllo in tempo reale (Alter Mode) . . . . .	71
4.7.4	Programmi <i>Pick,Goa</i> e <i>Goa1</i> . . . . .	73
4.7.5	Istruzioni utilizzate . . . . .	73
4.8	Locazioni e Trasformazioni . . . . .	74
4.8.1	Locazioni (Location) . . . . .	74
4.8.2	Trasformazioni (Transformation) . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Applicazioni sviluppate</b>	<b>77</b>
5.1	Applicazione ad anello aperto "pick and place" . . . . .	78
5.1.1	Procedura di calibrazione . . . . .	79
5.1.2	Obiettivo dell'applicazione . . . . .	80

5.2	Applicazione ad anello chiuso “Eye in hand” . . . . .	81
5.2.1	Calibrazione telecamera . . . . .	81
5.2.2	Obiettivi dell’applicazione . . . . .	82
5.3	Ulteriori commenti . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Controllo lineare</b>	<b>85</b>
6.1	Elementi del sistema di controllo . . . . .	85
6.2	Risposta del sistema ad anello aperto . . . . .	89
6.3	Risposta del sistema ad anello chiuso . . . . .	90
6.3.1	Controllo digitale . . . . .	90
6.3.2	Controllo proporzionale . . . . .	91
6.3.3	Controllore PD . . . . .	93
6.3.4	Controllore PID . . . . .	94
6.4	Profilo di velocità . . . . .	97
6.4.1	Raccordo continuo di velocità . . . . .	98
6.5	Il predittore . . . . .	100
6.5.1	Spazio degli stati . . . . .	103
6.5.2	Modello del predittore . . . . .	104
6.5.3	Predittore di Smith . . . . .	107
6.5.4	Prestazioni del predittore . . . . .	107
6.5.5	Limiti di utilizzo del predittore . . . . .	109
6.5.6	Errore del PD con un target in movimento . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Controllo non lineare</b>	<b>115</b>
7.1	Introduzione . . . . .	115
7.2	Stima della velocità del Target . . . . .	115
7.2.1	Progetto del blocco di calcolo della derivata . . . . .	116
7.3	<i>Modello del sistema reale</i> ed osservatore. . . . .	117
7.4	Controllore PIDNL . . . . .	118
7.5	Schema di controllo non lineare . . . . .	120
7.6	Prestazioni del PIDNL . . . . .	121
7.6.1	Interpretazione degli andamenti . . . . .	121
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>123</b>
<b>A</b>	<b>Calcolo dell’angolo di inclinazione.</b>	<b>125</b>

<b>B</b>	<b>Controllo con raccordo di velocità</b>	<b>129</b>
<b>C</b>	<b>Installazione del software</b>	<b>133</b>
<b>D</b>	<b>Codici VAL II</b>	<b>135</b>
D.1	Applicazione “ <i>Pick and Place</i> ” . . . . .	135
D.2	Applicazione “ <i>Eye in Hand</i> ” . . . . .	136
D.3	Raccordo continuo di velocità . . . . .	138
<b>E</b>	<b>Libreria IMEL</b>	<b>141</b>
E.1	File IMEL.h . . . . .	141
E.2	File IMEL.c . . . . .	143
<b>F</b>	<b>Codici Applicazioni</b>	<b>155</b>
F.1	Codici di controllo . . . . .	155
F.1.1	File Eyehand.c . . . . .	155
F.1.2	File Openloop.c . . . . .	166
F.2	Codice dell’oggetto Robot . . . . .	170
F.2.1	File Robot.h . . . . .	170
F.2.2	File Robot.cpp . . . . .	171
F.3	Libreria Control . . . . .	174
F.3.1	File Control.h . . . . .	174
F.3.2	File Control.cpp . . . . .	174
F.4	Codici dell’oggetto Matrix . . . . .	187
F.4.1	File Matrice.h . . . . .	187
F.4.2	File Matrice.cpp . . . . .	188



# Elenco delle figure

1.1	Struttura di tipo <i>guarda e muovi</i> basata sulla posizione. . . . .	4
1.2	Struttura ad <i>asservimento visuale diretto</i> basato sulla <i>posizione</i> . . . . .	5
1.3	Struttura di tipo <i>guarda e muovi</i> basata sull' <i>immagine</i> . . . . .	6
1.4	Struttura ad <i>asservimento visuale diretto</i> basato sull' <i>immagine</i> . . . . .	6
2.1	Struttura hardware del sistema. . . . .	10
2.2	Diagramma a blocchi del controllore Unival . . . . .	12
2.3	Angoli di rotazione dei giunti del Puma 260 . . . . .	14
2.4	Posizione "NEST" del robot Puma 260 . . . . .	14
2.5	Coordinate "WORLD" . . . . .	15
2.6	Coordinate "TOOL" . . . . .	16
3.1	Vettore associato ad un punto P. . . . .	18
3.2	Proiezione del vettore $\vec{P}$ sull'asse x. . . . .	18
3.3	Effetto della matrice di rotazione R. . . . .	20
3.4	Rotazione di un vettore P. . . . .	20
3.5	Corpo rigido. . . . .	22
3.6	Esempio pratico di calcolo della trasformata omogenea. . . . .	24
3.7	Manipolatore a 2 gradi di libertà. . . . .	26
3.8	Parametri utilizzati nella notazione Danavit-Hartenberg . . . . .	27
3.9	Esempio di giunti prismatici e rotoidali. . . . .	28
3.10	Schema di acquisizione di un'immagine tramite l'occhio. . . . .	29
3.11	Relazione geometrica tra un punto reale ed un punto dell'immagine. . . . .	30
3.12	Esempio di posizionamento telecamera. . . . .	33
3.13	Relazione tra piano visivo e griglia dei pixel. . . . .	34
3.14	Esempio di due combinazioni in un P3P. . . . .	36
3.15	Piano visivo parallelo al piano di lavoro. . . . .	39
3.16	Situazione tipica al momento della calibrazione. . . . .	41

3.17	Calibrazione tramite successive immagini di un oggetto fermo. . .	41
3.18	Calcolo della profondità dall'acquisizione di 2 sole immagini. . .	43
3.19	Esempio di proiezione di un oggetto. . . . .	45
3.20	Orientamento di un oggetto sul piano visivo. . . . .	46
3.21	Esempio di valori di una griglia di pixel per una immagine binaria.	47
3.22	Esempio di etichettamento immagine. . . . .	47
3.23	Esempio di catalogazione pixel. . . . .	48
4.1	Struttura di una applicazione MIL . . . . .	55
4.2	Rappresentazione dei parametri del metodo ImelLabeling. . . . .	60
4.3	Schema riassuntivo dell'utilizzo della libreria IMEL. . . . .	64
4.4	Scomposizione funzionale dell'oggetto <i>Robot</i> . . . . .	68
5.1	Schema funzionale dell'intero sistema di visual servoing. . . . .	77
5.2	Applicazione ad anello aperto. . . . .	78
5.3	Esempio di allineamento di 3 oggetti. . . . .	79
5.4	Applicazione ad anello chiuso. . . . .	81
5.5	Esempi di diverse condizioni operative. . . . .	83
6.1	Schema logico dell'intero sistema. . . . .	86
6.2	Modello del Puma 260 in Alter Mode. . . . .	88
6.3	Modello del sistema comprensivo del ritardo della seriale. . . . .	89
6.4	Risposta ad anello aperto del sistema. . . . .	90
6.5	Rappresentazione schematica di un PID. . . . .	90
6.6	Andamento dell' <i>errore</i> nel tempo in risposta ad un impulso. . .	92
6.7	Prestazioni regolatore PD e corrispondente modello simulato. . .	93
6.8	Esempio di risposta ad un gradino con un regolatore PID. . . . .	96
6.9	Risposta del PID ad una rampa. . . . .	97
6.10	Tipico profilo di velocità del programma <i>Goa</i> . . . . .	98
6.11	Profilo di velocità con raccordi lineari. . . . .	99
6.12	Schema di principio del controllo effettuato. . . . .	100
6.13	Utilizzo del <i>modello del sistema reale</i> . . . . .	101
6.14	Secondo sistema componente del predittore. . . . .	102
6.15	Schema di utilizzo del <i>predittore</i> . . . . .	103
6.16	Schema funzionale del <i>predittore di Smith</i> . . . . .	108
6.17	Prestazione del controllo con il solo predittore. . . . .	108

6.18	Prova con l'utilizzo di un predittore e regolatore PID. . . . .	109
6.19	Schema in variabile $s$ del predittore di Smith. . . . .	110
6.20	Simulazione schema di controllo predittore con PID. . . . .	113
7.1	Schema per la stima della velocità del target. . . . .	116
7.2	Schema funzionale del PIDNL. . . . .	119
7.3	Profilo di $fnl(\dot{q})$ . . . . .	119
7.4	Schema di controllo con con il PIDNL. . . . .	120
7.5	Confronto tra PIDNL, PID e PD. . . . .	122
A.1	Asse di inerzia di un oggetto. . . . .	126
B.1	Schema di un intervallo di controllo. . . . .	129
B.2	Spazio percorso con il controllo del profilo di velocità. . . . .	131



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Cenni storici

L'evoluzione storica della *robotica*, ovvero di quella disciplina rivolta alla realizzazione di automi denominati “*robot*”, è tutt'altro che lineare. Trovare un legame tra gli attuali robot industriali e i primi *organismi artificiali* creati verso l'inizio degli anni '50<sup>1</sup>, non è cosa immediata.

I primi automi erano macchine che presentavano rudimentali *sistemi nervosi* e che permettevano tuttavia un certo grado di interazione con l'ambiente circostante, un esempio tra tutti la tartaruga CORA (Conditioned Reflex Analogue) di W. Grey Walter (1950), un piccolo automa in grado di muoversi liberamente in una stanza e capace di ricaricare quando necessario le proprie batterie in maniera autonoma. Alla base di questi primi esperimenti di *robotica* vi era l'intento di studiare il comportamento e l'apprendimento di macchine che emulassero le forme di vita ed intelligenza più semplici, prendendo come modello la struttura comportamentale degli insetti (approccio di tipo *bottom-up*).

La difficoltà nel trovare applicazioni e committenti per queste primitive macchine cibernetiche è stata la causa principale della brusca interruzione del percorso evolutivo di questo tipo di sistemi. D'altra parte il repentino sviluppo dell'elettronica e dei calcolatori, spostò in maniera definitiva l'interesse dei costruttori dagli automi e tra gli anni '60-70 si delinearono chiaramente i confini e le differenze tra l'intelligenza artificiale (IA) e la robotica.

Abbandonando l'approccio di tipo bottom-up seguito dalla cibernetica, l'IA

---

<sup>1</sup>Decennio di nascita della cibernetica, vedere [18].

lascia i *rudimentali sistemi nervosi* e definisce un nuovo percorso metodologico di tipo *top-down*. Viene così intrapreso lo studio delle sofisticate metodologie di apprendimento dell'essere umano (psicologia cognitiva), usando come terreno di sviluppo il puro software che viene eseguito su elaboratori sempre più veloci e prestanti.

Contemporaneamente la robotica spinta da politiche di ricerca e sviluppo diventa una disciplina *tecnologica* ed imbecca una strada del tutto diversa dalla cibernetica. Nasce così la *robotica industriale*.

Tra gli anni '70-80 i compiti in cui i robot trovano il più largo utilizzo sono rappresentati da operazioni tecnologiche altamente ripetitive tipiche degli impianti produttivi di grande serie. Tali sistemi automatizzati sono in grado di gestire svariati compiti che si svolgono in situazioni quasi del tutto predeterminate<sup>2</sup>.

La possibilità di avere un elevato controllo sull'ambiente in cui il robot opera, ovvero la catena di montaggio, diventa il punto di forza della robotica che permette di raggiungere con il passare degli anni un'altissima efficienza nella produzione industriale, ma ciò rappresenta allo stesso tempo un punto debole della disciplina, infatti, quando alla fine degli anni '80 compaiono nuove possibilità applicative che prevedono l'utilizzo dei robot in ambienti esterni alla fabbrica, la robotica si rivela inadatta per tali applicazioni.

In contesti come catastrofi ambientali-industriali e nell'esplorazioni sottomarine e spaziali, il robot si trova ad operare in ambienti non strutturati nè predeterminati e quindi le funzionalità richieste ai sistemi robotici diventano completamente differenti da quelle sviluppate per l'*asettico* ambiente industriale.

Le nuove macchine devono allora essere in grado di operare in un ambiente non conosciuto ed è proprio sotto questa spinta che la robotica abbandona la sua posizione *fabbrico-centrica* e diventa l'asse portante di nuove discipline.

Come per i primi *organismi* cibernetici, si ripropone l'obiettivo di realizzare sistemi artificiali in grado di interagire con un ambiente reale ed ora, a causa del considerevole sviluppo tecnologico (sono passati 30-40 anni), questo obiettivo è raggiungibile.

Materie come la *visione artificiale* permettono di realizzare, attraverso svariati sistemi di visione, veri e propri "occhi" per il robot. Questi rappresentano un

---

<sup>2</sup>Vedere [17].

primo esempio di sofisticato apparato sensoriale in grado di fornire un cospicuo flusso di informazioni riguardanti il mondo esterno; grazie all'IA è possibile creare un tessuto rappresentativo in grado di elaborare una *visione* del mondo e dare quindi una schematizzazione interna della realtà percepita tramite i sensi artificiali.

Con queste nuove sinergie il numero di applicazioni concrete legate alla robotica aumenta considerevolmente, diventa così possibile gettare le basi (tecniche e scientifiche) per le nuove applicazioni che richiedono un'intensa interazione con ambienti "*inusuali*".

## 1.2 Asservimento visuale (visual servoing)

È proprio in questo panorama che si è sviluppato il *visual servoing*, una materia che attinge da svariate discipline come la robotica, la teoria del controllo, la cinematica, la dinamica, la visione artificiale e l'IA.

Il *controllo visuale* di un robot ottiene sostanziali vantaggi in tutte quelle applicazioni in cui gli oggetti con i quali il robot deve interagire occupano una posizione imprecisata. In questo contesto operativo un sistema di asservimento visuale è in grado di ricostruire la posizione di un oggetto utilizzando le immagini riprese da una o più telecamere ed impartire al robot i comandi di movimentazione che permettono di raggiungere l'obiettivo prefissato, esempi sono: la cattura e spostamento di un oggetto (applicazione denominata *pick and place*) o l'inseguimento di un target in movimento (*visual tracking*).

L'asservimento visuale è una disciplina che si è sviluppata negli anni 70. I primi lavori (iniziati alla fine degli anni '60) di fusione tra la visione artificiale e la robotica utilizzavano una metodologia denominata *guarda e muovi* (look and move), con la quale veniva prima di tutto analizzata l'immagine per mezzo di hardware appositamente dedicato, una volta avvenuta l'estrazione delle informazioni ricercate veniva movimentato alla "*cieca*" il robot. L'accuratezza di queste applicazioni dipendeva direttamente sia dalla definizione dell'immagine acquisita sia dalla precisione dei movimenti del robot.

I contesti di utilizzo di questo tipo di sistemi erano però limitati, infatti un eventuale movimento dell'oggetto che fosse avvenuto ad elaborazione dell'immagine compiuta avrebbe reso il sistema inaffidabile.

Questo primo approccio era imposto dall'esigua potenza di calcolo dei sistemi

di visione artificiale utilizzati all'epoca, quando invece lo sviluppo tecnologico ha permesso di ottenere elaborazioni dell'immagine più veloci (un frame almeno ogni 30ms) è stato possibile realizzare i primi sistemi in tempo reale (*real-time*), ovvero macchine in grado di correggere la loro strategia di azione durante l'esecuzione dell'azione stessa. Uno dei primi lavori di questo tipo fu realizzato da Hill e Park nel 1979, i quali introdussero per primi il termine "*visual servoing*"<sup>3</sup>.

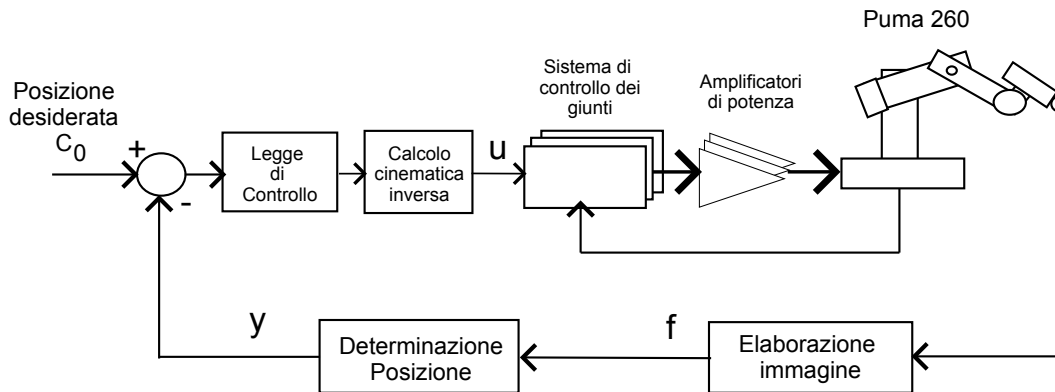


Figura 1.1: Struttura di tipo *guarda e muovi* basata sulla posizione.

### 1.3 Architetture di asservimento

Verrà ora effettuata una classificazione delle più comuni architetture dei sistemi di asservimento visuale<sup>4</sup>. La prima distinzione si effettua sull'architettura del sistema di controllo dei giunti del robot, ne esistono 2 tipi:

1. "*Guarda e muovi basato sulla posizione*": nella quale vengono utilizzate le informazioni  $y$  estratte dall'immagine ripresa dalla telecamera. La grandezza  $y$  rappresenta la posizione stimata dell'oggetto ripreso dalla telecamera ed in generale è espressa in coordinate cartesiane. Tale misura serve a generare un set-point  $u$  di posizione<sup>5</sup> per una retroazione di giunto, in questo modo il robot stabilizza la propria posizione inseguendo il set-point.

<sup>3</sup>Vedere per una breve panoramica storica [19, 21].

<sup>4</sup>Vedere [19].

<sup>5</sup>Esistono anche sistemi che possono ricevere un set-point di velocità come il robot Puma 260 in modalità *Alter mode* utilizzato in questa tesi.



2. “Asservimento visuale diretto basato sulla posizione”: in questo schema di controllo i segnali che determinano le posizioni dei giunti vengono ricavati direttamente dalle informazioni  $y$  estratte dall’immagine, in questa architettura quindi viene usata la sola visione per stabilizzare la posizione del robot.

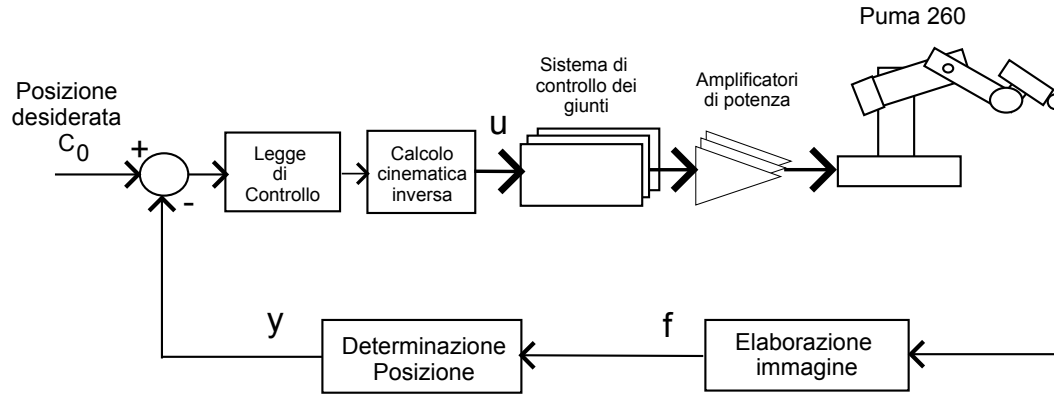


Figura 1.2: Struttura ad *asservimento visuale diretto basato sulla posizione*.

Il vantaggio della retroazione di giunto (caso 1) è molteplice: primo, il problema è matematicamente più semplice da risolvere, secondo, allevia l’algoritmo di controllo dall’incombenza della gestione delle singolarità cinematiche nel movimento del robot, terzo, rende il sistema più modulare e quindi in generale più portatile e facile da gestire.

È possibile dividere ulteriormente il panorama delle architetture in altre due classi denominate rispettivamente IBVS (*Image Based Visual Servo*) ed PBVS (*Position Based Visual Servo*). Gli schemi trattati e rappresentati nelle figure 1.1 e 1.2 appartengono alla seconda categoria.

Mentre i casi appena studiati utilizzano l’immagine per ricostruire un modello dello spazio tridimensionale in cui opera il robot e calcolano l’errore attraverso la differenza tra la posizione corrente dell’oggetto  $y$  e la posizione voluta  $c_0$  del medesimo, l’IBVS ricava il segnale errore elaborando opportunamente le differenze tra l’immagine acquisita  $f$  ed una immagine desiderata  $f_0$ . In questo tipo di approccio non vi è la necessità di implementare una rappresentazione interna della posizione dell’oggetto, si agisce direttamente sull’immagine cercando di cambiarla nella forma voluta attraverso il movimento del robot e non vi è

nemmeno la necessità di effettuare calcoli sulla cinematica inversa, il problema però è di difficile soluzione.

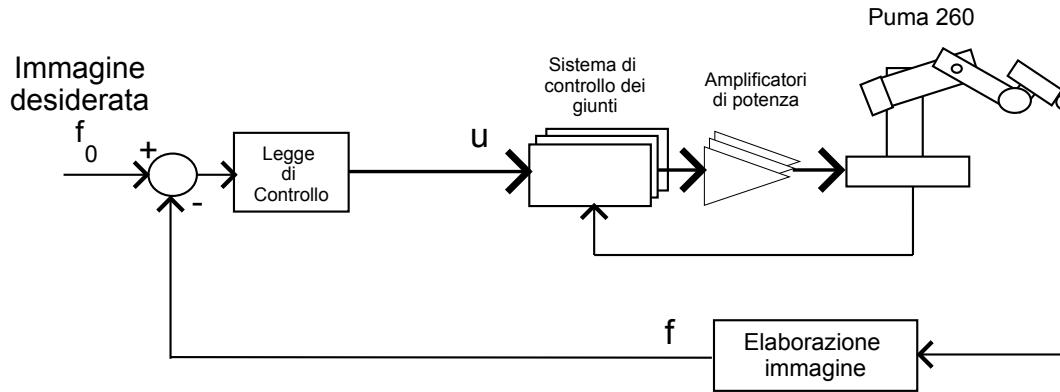


Figura 1.3: Struttura di tipo *guarda e muovi* basata sull'immagine.

Anche L'IBVS, come il PBVS, può essere diviso in schemi di tipologia *guarda e muovi* (figura 1.3) oppure *asservimento visuale diretto* (figura 1.4).

La presente tesi utilizza un modello di tipo PBVS di figura 1.1

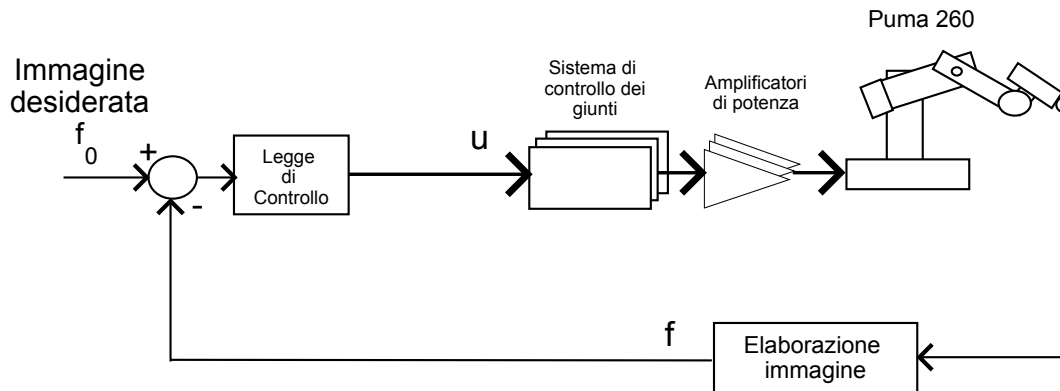


Figura 1.4: Struttura ad *asservimento visuale diretto* basata sull'immagine.

## 1.4 Obiettivi della tesi

La tesi, in un primo momento, si propone di affrontare le principali problematiche presenti nella gestione di un sistema di *visual servoing*.

Una volta acquisiti gli strumenti necessari viene intrapreso il progetto di due sistemi di asservimento visuale: il primo basato su un'architettura *ad anello aperto* (denominata anche con il nome di applicazione *Pick and Place*) ed il secondo basato su un'architettura con feedback visivo (applicazione *Eye in Hand* o *ad anello chiuso*) operante in *real time* quindi in grado di svolgere compiti più complessi e strutturati.

Il lavoro svolto si divide in 3 parti fondamentali:

1. la prima parte si occupa dell'acquisizione e del riconoscimento della immagine (*image processing*) operazione necessaria per poter fornire quel flusso di informazioni atte ad ottenere una rappresentazione, interna alla macchina, del mondo reale.
2. La seconda affronta la progettazione dell'architettura del software che gestisce il coordinamento tra i vari componenti (robot, telecamera, PC) che formano i sistemi di asservimento visuale realizzati.
3. La terza analizza le più comuni metodologie di controllo, come i regolatori standard PID, applicate alla dinamica del robot e affronta il progetto di un sistema di controllo non lineare in grado di mantenere elevate le prestazioni del sistema in un più ampio ventaglio di condizioni operative.

