

Non sei forse consapevole
del sentimento come della vista?

William Shakespeare

6.1 INTRODUZIONE

L'uso di meccanismi per la percezione esterna permette al robot di interagire con il suo ambiente in modo versatile. Questo è in contrasto con il funzionamento preprogrammato in cui a un robot si "insegna" a effettuare compiti ripetitivi mediante un insieme di funzioni programmate. Sebbene l'ultimo sia di gran lunga il modo predominante di funzionamento degli attuali robot industriali, l'uso della tecnologia della percezione per dotare le macchine di un più alto grado di intelligenza nell'interazione con l'ambiente è, invero, un argomento fattivo della ricerca e dello sviluppo in campo robotico. Un robot che può "vedere" e "percepire" è più semplice da istruire nell'effettuazione di compiti complessi mentre, allo stesso tempo, richiede meccanismi di controllo meno rigorosi delle macchine preprogrammate. Inoltre un sistema sensorio istruibile può essere adattato a una maggiore varietà di compiti, raggiungendo così un grado di universalità che in definitiva si traduce in più bassi costi di produzione e di mantenimento. La funzione dei sensori di un robot può essere ripartita in due categorie principali: *stato interno* e *stato esterno*. I sensori dello stato interno riguardano la misura di variabili, quali la posizione dei giunti del braccio, che sono usate per il controllo del robot, come trattato nel Capitolo 5. I sensori dello stato esterno, d'altra parte, trattano la misura di variabili quali la distanza, la prossimità e il tatto. La percezione esterna, tema dei Capitoli da 6 a 8, è utilizzata per la guida del robot e inoltre per l'identificazione degli oggetti e la loro manipolazione.

I sensori dello stato esterno possono essere ulteriormente classificati come sensori *a contatto* o *senza contatto*. Come implica il loro nome, la prima classe di sensori risponde a stimoli fisici, come il tatto, lo scorrimento e il

momento. I sensori senza contatto si basano sulla risposta di un rivelatore alle variazioni di radiazioni acustiche o elettromagnetiche. Gli esempi più significativi di sensori senza contatto misurano la distanza, la prossimità e le proprietà visibili di un oggetto.

L'argomento principale di questo paragrafo è la percezione della distanza, prossimità, tatto e forza/momento. I sensori e le tecniche di visione sono trattati dettagliatamente nei Capitoli 7 e 8. È interessante notare che le percezioni visive e della distanza forniscono generalmente indicazioni sulla guida globale per un manipolatore, mentre la prossimità e il tatto sono associati agli stadi terminali della presa dell'oggetto. Sensori della forza e del momento vengono utilizzati per controllare la manipolazione di un oggetto una volta che è stato afferrato (per esempio per evitare la rottura dell'oggetto o per prevenirne lo slittamento).

6.2 PERCEZIONE DELLA DISTANZA

Un sensore di distanza misura la distanza da un punto di riferimento (solitamente sul sensore stesso) agli oggetti nel campo operativo del sensore. Gli uomini valutano la distanza per mezzo del processo stereovisivo, come si dirà nel Capitolo 7, mentre altri animali, come i pipistrelli, utilizzano il concetto di "tempo di volo" in cui la valutazione della distanza è basata sul tempo trascorso tra l'emissione e il ritorno di un impulso sonoro. I sensori di distanza sono utilizzati per la guida del movimento e per evitare ostacoli, dove l'interesse è nella valutazione della distanza dagli oggetti più vicini e per applicazioni più sofisticate in cui si desidera conoscere la posizione e le caratteristiche generali della forma degli oggetti nell'ambiente di lavoro di un robot. In questo paragrafo trattiamo diverse tecniche di percezione della distanza che riguardano questo problema.

6.2.1 TRIANGOLAZIONE

Uno dei metodi più semplici per misurare la distanza è mediante le tecniche di triangolazione. Questo metodo può essere facilmente spiegato esaminando la Figura 6.1. Un oggetto è illuminato da uno stretto fascio di luce che scandisce la superficie. Il movimento di scansione avviene sul piano definito dalla linea che va dall'oggetto al rivelatore e dalla linea che va dal rivelatore alla sorgente. Se il rivelatore è focalizzato su una *limitata* porzione della superficie, quando il rivelatore vede la macchia di luce, la sua distanza D dalla porzione illuminata sulla superficie può essere calcolata dalla geometria della Figura 6.1 dato che l'angolo della sorgente con la linea di base e la distanza tra la sorgente e il rivelatore sono noti.

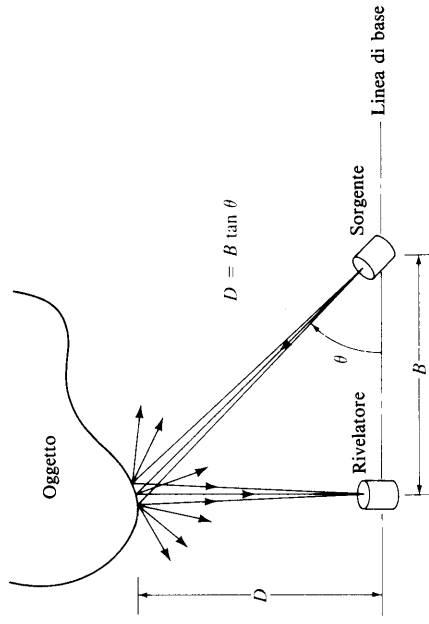


Figura 6.1 Misura della distanza con la triangolazione. (Adattata da Jarvis [1983a], © IEEE).

Il metodo ora esposto fornisce la misurazione di un punto. Se l'insieme sorgente-rivelatore viene mosso su un piano fisso (su e giù e lateralmente su un piano perpendicolare al foglio e contenente la linea di base della Figura 6.1), allora è possibile ottenere un insieme di punti le cui distanze dal rivelatore sono note. Queste distanze vengono trasformate facilmente in coordinate tridimensionali tenendo traccia della posizione e dell'orientamento del rivelatore mentre si esaminano oggetti. Nella Figura 6.2 è mo-



Figura 6.2 (a) Una disposizione di oggetti scanditi con un dispositivo di misurazione di distanza a triangolazione. (b) Immagine corrispondente con intensità proporzionale alla distanza. (Da Jarvis [1983a], © IEEE).

strato un esempio. La Figura 6.2a mostra la disposizione di alcuni oggetti da esaminare nel modo ora descritto. La Figura 6.2b riporta i risultati dell'operazione con un'immagine la cui intensità (a maggiore luminosità corrisponde una maggior distanza) è proporzionale alla distanza misurata dal piano di movimento della coppia sorgente-rivelatore.

6.2.2 METODO DELL'ILLUMINAZIONE STRUTTURATA

Il metodo consiste nel proiettare una figura luminosa su di un gruppo di oggetti e nell'interpretare la distorsione della figura per calcolare la distanza. Una delle figure luminose più usate è una lama di luce generata mediante lenti cilindriche o una stretta fessura.

Come si può vedere nella Figura 6.3, l'intersezione del fascio con gli oggetti nello spazio di lavoro produce una banda luminosa che viene raccolta da una telecamera posta a una distanza B dalla fonte luminosa. Le indicazioni sulla distanza vengono facilmente ricavate da un'analisi della banda luminosa al calcolatore. Per esempio, una flessione indica una variazione di superficie e una discontinuità presuppone una separazione tra le superfici.

I valori della distanza vengono calcolati calibrando per prima cosa il sistema. Una delle disposizioni più semplici è evidenziata nella Figura 6.3b e rappresenta una vista dall'alto della Figura 6.3a. In questa situazione, la sorgente di luce e la telecamera sono poste alla stessa altezza e il fascio di luce è perpendicolare alla linea che unisce l'origine del fascio al centro dell'obiettivo della telecamera. Chiamiamo *piano di riferimento* il piano verticale che contiene questa linea. Chiaramente, il piano di riferimento è perpendicolare al fascio di luce e qualunque superficie piatta verticale che intersechi il fascio produrrà una banda di luce verticale (vedi Figura 6.3a) in cui ciascun punto avrà la stessa distanza perpendicolare dal piano di riferimento. L'obiettivo della disposizione mostrata nella Figura 6.3b è posizionare la telecamera in modo tale che ogni banda verticale appaia verticale anche sul piano dell'immagine. In questo modo, ogni punto lungo la stessa colonna nell'immagine sarà noto per avere la stessa distanza dal piano di riferimento.

La maggior parte dei sistemi basati sul metodo del fascio di luce fa uso di immagini digitali. Supponiamo che l'immagine vista dalla telecamera sia digitalizzata in una matrice $N \times M$ (vedi Paragrafo 7.2) e ammettiamo che $y = 0, 1, 2, \dots, M-1$ sia l'indice della colonna di questa matrice. Come sarà spiegato in seguito, il procedimento per la calibrazione consiste nel misurare la distanza B tra la sorgente di luce e il centro delle lenti e poi determinare gli angoli α_c e α_0 . Una volta noti questi valori, consegue dalla geometria elementare che d nella Figura 6.3b è dato da:

$$d = \lambda \tan \theta \quad (6.2.1)$$

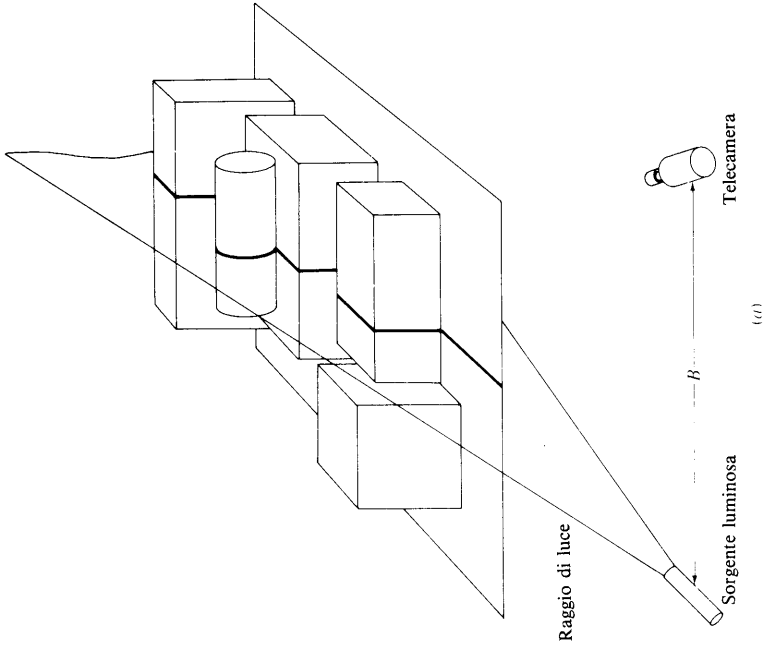


Figura 6.3 (a) Misurazione della distanza con metodo dell'illuminazione strutturata. (b) Vista dall'alto della parte (a) che illustra una disposizione particolare per semplificare la taratura.

dove λ è la lunghezza focale dell'obiettivo e

$$\theta = \alpha_c - \alpha_0 \quad (6.2.2)$$

Per un'immagine digitale a M colonne, l'incremento della distanza d_k tra le colonne è dato da:

$$d_k = k \frac{d}{M/2} = \frac{2kd}{M} \quad (6.2.3)$$

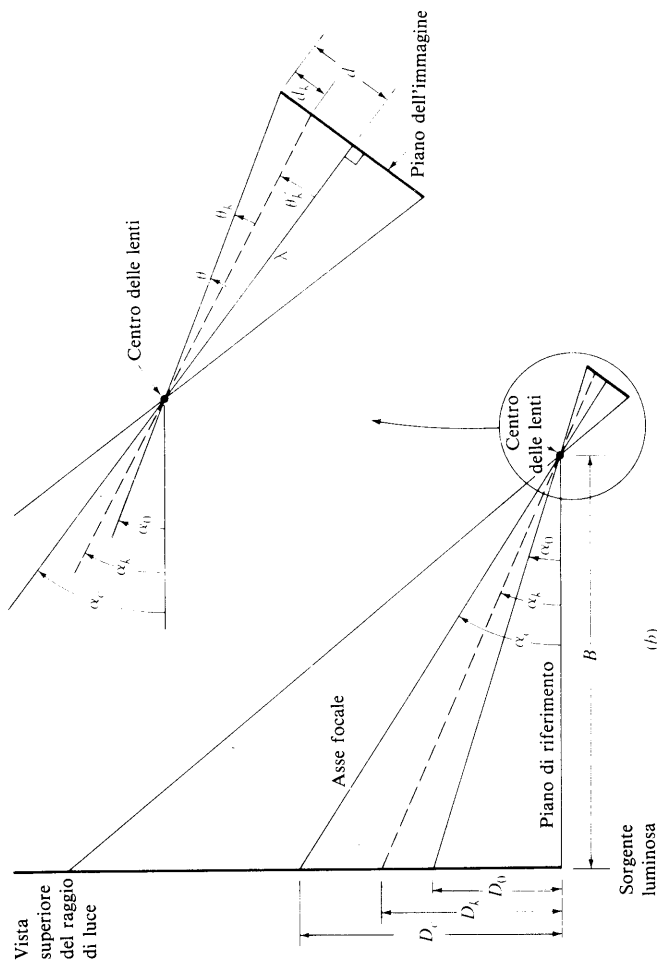


Figura 6.3 (continuazione)

per $0 \leq k \leq M/2$. (In un'immagine visualizzata su un monitor, $k = 0$ corrisponde alla colonna più a sinistra e $k = M/2$ alla colonna di centro.) L'angolo α_k costituito dalla proiezione di una banda arbitraria si ottiene facilmente osservando che:

$$\alpha_k = \alpha_c - \theta'_k \tag{6.2.4}$$

dove

$$\tan \theta'_k = \frac{d - d_k}{\lambda} \tag{6.2.5}$$

o, usando la (6.2.3):

$$\theta'_k = \tan^{-1} \left[\frac{d(M - 2k)}{M\lambda} \right] \tag{6.2.6}$$

dove $0 \leq k \leq M/2$. Per i restanti valori di k (cioè dall'altra parte dell'asse ottico), abbiamo:

$$\alpha_k = \alpha_c + \theta''_k \tag{6.2.7}$$

dove

$$\theta''_k = \tan^{-1} \left[\frac{d(2k - M)}{M\lambda} \right] \tag{6.2.8}$$

per $M/2 < k \leq (M-1)$. Confrontando le (6.2.6) e (6.2.8) osserviamo che $\theta''_k = -\theta'_k$, così le (6.2.4) e (6.2.7) sono identiche per l'intero range $0 \leq k \leq M-1$. Conseguentemente dalla Figura 6.3b che la distanza perpendicolare D_k tra una banda di luce arbitraria e il piano di riferimento è data da:

$$D_k = B \tan \theta_k \tag{6.2.9}$$

per $0 \leq k \leq M-1$, dove α_k è dato dalla (6.2.4) o dalla (6.2.7). È di rilievo il fatto che una volta noti B , α_0 , α_c , M e λ , il numero della colonna nell'immagine digitale determina completamente la distanza tra il piano di riferimento e tutti i punti nella banda raffigurati su quella colonna. Dato che M e λ sono parametri fissi, il procedimento di calibrazione consiste semplicemente nel misurare B e nel determinare α_c e α_0 come precedentemente indicato. Per determinare α_c , poniamo una superficie verticale piatta tale che la sua intersezione con il fascio di luce sia visto al centro del piano dell'immagine (cioè per $y = M/2$). Misuriamo allora fisicamente la distanza perpendicolare D_c tra la superficie e il piano di riferimento. Dalla geometria della Figura 6.3b consegue che:

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left[\frac{D_c}{B} \right] \tag{6.2.10}$$

Per determinare α_0 avviciniamo la superficie al piano di riferimento finché la sua banda di luce è rappresentata in $y = 0$ sul piano dell'immagine. Misuriamo allora D_0 e, dalla Figura 6.3b,

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left[\frac{D_0}{B} \right] \quad (6.2.11)$$

Ciò completa il procedimento di calibrazione.

Il vantaggio principale della situazione ora trattata è la semplicità della relativa tecnica di misurazione della distanza. Una volta completata la taratura, la distanza associata a ogni colonna dell'immagine viene calcolata utilizzando la (6.2.9) con $k = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ e i risultati vengono immagazzinati in memoria. In seguito durante la normale attività, la distanza di un qualunque punto si ottiene semplicemente determinando il suo numero di colonna nell'immagine e leggendo in memoria la posizione corrispondente.

Prima di abbandonare questo paragrafo, sottolineiamo che è possibile utilizzare i concetti trattati nel Paragrafo 7.4 per risolvere un problema di carattere più generale in cui la sorgente luminosa e la telecamera sono poste arbitrariamente l'una rispetto all'altra. Le espressioni risultanti, comunque, sarebbero considerevolmente più complicate e ardue da marciare da un punto di vista computazionale.

6.2.3 SENSORI DI DISTANZA BASATI SUL TEMPO DI VOLO

In questo paragrafo ci occupiamo di tre metodi per la determinazione della distanza basati sul concetto di tempo di volo presentato all'inizio del Paragrafo 6.2. Due dei metodi utilizzano un laser, mentre il terzo è basato sugli ultrasuoni.

Un metodo di impiego del laser per determinare la distanza è la misurazione del tempo impiegato dall'emissione di un impulso di luce per ritornare coassialmente (cioè lungo lo stesso percorso) da una superficie riflettente. La distanza dalla superficie è data dalla semplice relazione $D = cT/2$, dove T è il tempo di transito dell'impulso e c è la velocità della luce. È importante notare che, dal momento che la luce viaggia approssimativamente a 300 mm/ns, la strumentazione elettronica utilizzata deve poter avere una risoluzione di 50 ps per raggiungere una precisione di ± 8 mm nella distanza.

Un sistema a impulsi laser descritto da Jarvis [1983a] fornisce una matrice di valori proporzionali alla distanza. La misurazione bidimensionale si ottiene deflettendo la luce del laser con uno specchio rotante. Il campo di lavoro del dispositivo è dell'ordine di 1 a 4 m, con una tolleranza di ± 0.25 cm. Nella Figura 6.4 si può osservare un esempio dell'uscita di questo sistema. La parte (a) di questa figura mostra un gruppo di oggetti tridimensionali e la Figura 6.4b è la matrice percepita dal sensore e visualizzata come un'immagine in cui l'intensità in ciascun punto è proporzionale alla distanza tra il sensore

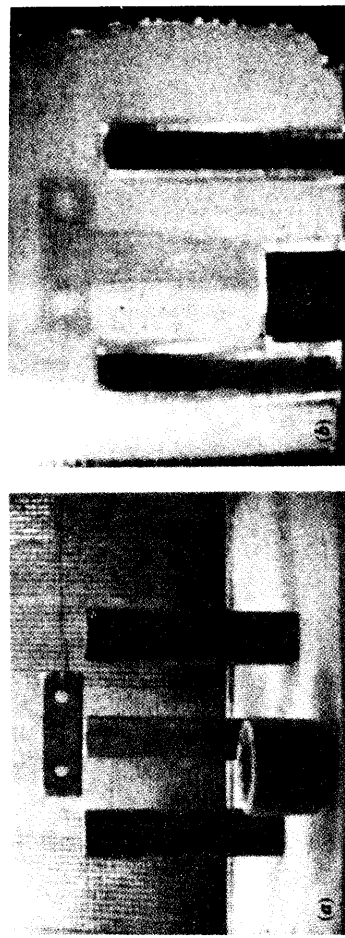


Figura 6.4 (a) Un insieme di oggetti. (b) Immagine con intensità proporzionale alla distanza. (Da Jarvis [1983b], © IEEE).

e la superficie riflettente in quel punto (più scuro corrisponde a più vicino). Le aree brillanti intorno ai contorni dell'oggetto rappresentano discontinuità nella distanza determinate da una successiva elaborazione con un colatore.

Un'alternativa alla luce a impulsi è l'uso di un laser a fascio continuo del quale viene misurato il ritardo (cioè lo slittamento di fase) tra il fascio inviato e quello che ritorna. Spiegheremo questo concetto con l'aiuto della Figura 6.5. Supponiamo che un fascio di luce laser di lunghezza d'onda λ sia diviso in due raggi. Uno di questi (chiamato *fascio di riferimento*) percorre una distanza L per raggiungere un dispositivo di misurazione della fase, e l'altro percorre una distanza D fino a una superficie riflettente. La distanza totale percorsa dal fascio di luce riflessa è $D' = L + 2D$. Supponiamo che sia $D = 0$. In base a questa condizione abbiamo $D' = L$ e sia il fascio di riferimento sia quello riflesso giungono simultaneamente al dispositivo di misurazione della fase. Se lasciamo aumentare D , il fascio riflesso percorre un tragitto più lungo e, quindi, si produce uno slittamento di fase tra i due fasci a livello del punto di misurazione, come è evidenziato nella Figura 6.5b. In questo caso abbiamo che:

$$D' = L + \frac{\theta}{360} \lambda \quad (6.2.12)$$

È importante notare che se $\theta = 360^\circ$ le due forme d'onda sono nuovamente allineate e non possiamo distinguere $D' = L$ e $D' = L + n\lambda$, $n = 1, 2,$

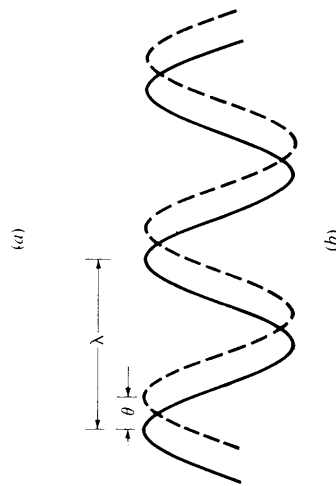
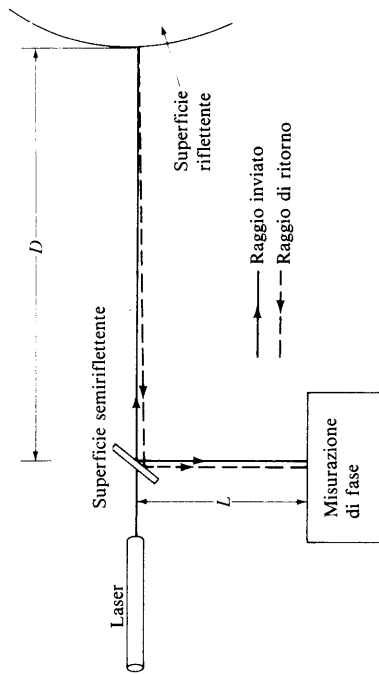


Figura 6.5 (a) Principio di misurazione della distanza tramite lo slittamento di fase. (b) Slittamento tra forme d'onda di luce in uscita e di ritorno.

... basandoci sulle misurazioni del solo slittamento di fase. Così, può essere ottenuta un'unica soluzione solo se chiediamo che sia $\theta < 360^\circ$ o, equivalentemente, che sia $2D < \lambda$. Dato che $D' = L + 2D$ abbiamo, sostituendo nella (6.2.12), che:

$$D = \frac{\theta}{360} \left[\frac{\lambda}{2} \right] \tag{6.2.13}$$

che fornisce la distanza in termini di slittamento di fase se la lunghezza d'onda è nota. Dato che la lunghezza d'onda della luce del laser è piccola (per esempio

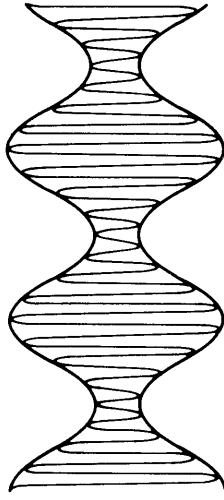


Figura 6.6 Forma d'onda modulata in ampiezza. Si noti la lunghezza d'onda, assai maggiore, della funzione modulante.

632.8 nm per un laser a elio-neon), il metodo abbozzato nella Figura 6.5 è inadatto per applicazioni robotiche. Una soluzione semplice per questo problema è di modulare l'ampiezza della luce del laser con una forma d'onda di lunghezza d'onda molto più grande (per esempio, ricordando che $c = f\lambda$, un'onda sinusoidale modulante di frequenza $f = 10$ MHz ha una lunghezza d'onda di 30 m). Il metodo è illustrato nella Figura 6.6. La tecnica fondamentale è analoga alla precedente, ma il segnale di riferimento è ora la funzione modulante. Il segnale laser modulato viene inviato al bersaglio e al fascio di ritorno viene sottratto il segnale modulante, che è poi confrontato con quello di riferimento per determinare lo slittamento di fase. La (6.2.13) vale ancora, ma ora stiamo lavorando in un campo di lunghezze d'onda più comodo.

Un vantaggio importante della tecnica a fascio continuo rispetto a quella a impulsi consiste nel fatto che la prima fornisce tanto indicazioni di intensità quanto di distanza (Jarvis [1983a]). Comunque, i sistemi continui richiedono una potenza considerevolmente più alta. L'indeterminazione nelle misurazioni della distanza ottenute con entrambe le tecniche richiedono che venga fatta una media del segnale di ritorno per ridurre l'errore. Se trattiamo il problema come quello del rumore della misurazione che si somma a una distanza reale e consideriamo che le misurazioni sono statisticamente indipendenti, allora si può dimostrare che la deviazione standard della media è uguale a $1/\sqrt{N}$ volte la deviazione standard del rumore, dove N è il numero dei campioni sui quali si calcola la media. In altri termini, più misurazioni concorrono nella media e minore sarà l'indeterminazione nella valutazione della distanza.

Un esempio dei risultati che si possono ottenere con un raggio laser modulato deflesso da uno specchio rotante è illustrato nella Figura 6.7b. La par-
te σ di questa figura è la matrice di distanza visualizzata come immagine di intensità (una maggiore brillantezza indica una distanza inferiore). La

cancellazione del segnale. L'ampiezza del fascio di questo sistema è di circa 30° , il che implica notevoli limitazioni nella risoluzione se si desidera usare questo sistema per ottenere una immagine della distanza simile a quelle trattate precedentemente nel presente capitolo. Questo è un problema comune con sensori ultrasonici e, per questo motivo, essi sono usati principalmente per il controllo di rotta e per evitare gli ostacoli. Le caratteristiche strutturali e operazionali dei sensori a ultrasuoni sono trattate più dettagliatamente nel Paragrafo 6.3.

6.3 PERCEZIONE DELLA PROSSIMITÀ

I sensori di distanza trattati nel paragrafo precedente forniscono una valutazione della distanza tra un sensore e un oggetto riflettente. I sensori di prossimità, d'altra parte, hanno generalmente un'uscita binaria che indica la presenza di un oggetto entro un intervallo di distanze specificato. Tipicamente, i sensori di prossimità sono usati in robotica per lavori a breve raggio per afferrare oggetti ed evitare ostacoli. In questo paragrafo considereremo diversi metodi fondamentali per la percezione di prossimità e discuteremo le caratteristiche operazionali fondamentali dei relativi sensori.

6.3.1 SENSORI INDUTTIVI

I sensori basati su una variazione dell'induttanza dovuta alla presenza di un oggetto metallico sono i più largamente usati tra i sensori di prossimità industriali. Il principio operativo di questi sensori può essere spiegato con l'aiuto delle Figure 6.8 e 6.9. La Figura 6.8a mostra lo schema di un sensore induttivo che consiste fondamentalmente in una bobina situata vicino a un magnete permanente racchiuso in un semplice e robusto contenitore. L'effetto che si ottiene portando il sensore in stretta prossimità di un materiale ferromagnetico consiste in un cambiamento nella posizione delle linee di flusso del magnete permanente, come si può osservare nella Figura 6.8b e c.

In condizioni statiche non vi è movimento delle linee di flusso e, dunque, non si induce alcuna corrente nella bobina. Invece, appena un oggetto ferromagnetico entra nel campo magnetico o lo lascia, il cambiamento risultante nelle linee di flusso induce un impulso di corrente la cui ampiezza e forma sono proporzionali alla velocità di variazione del flusso.

La forma d'onda della tensione osservata all'uscita della bobina costituisce un mezzo efficace per la percezione della prossimità. La Figura 6.9a illustra come la tensione misurata attraverso la bobina vari in funzione della velo-

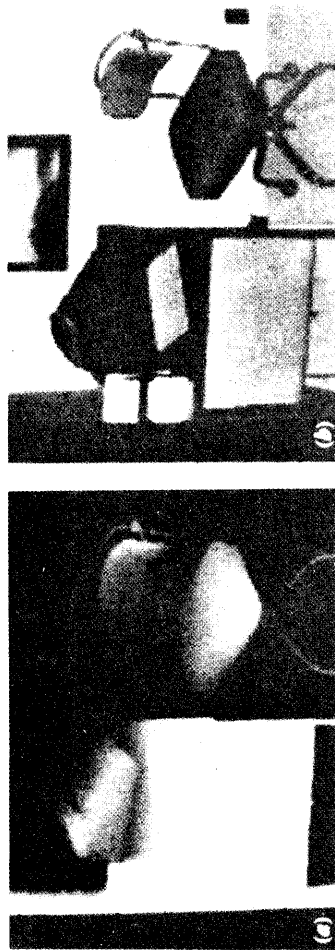


Figura 6.7 (a) Matrice di distanza visualizzata come immagine. (b) Immagine di intensità. (Da Duda, Nitzan e Barrett [1979], © IEEE).

conoscenza dell'intensità reale ottenuta con lo stesso dispositivo è mostrata nella parte (b). È da notare che queste due immagini sono complementari. Ad esempio, è difficile contare il numero degli oggetti sulla superficie della scrivania nella Figura 6.7a, mentre tale operazione risulta semplice con l'immagine di intensità. D'altra parte, non è possibile determinare la distanza tra i bordi vicini e lontani della superficie della scrivania esaminando l'immagine di intensità, mentre questa indicazione è facilmente reperibile nella matrice della distanza. Le tecniche per elaborare questo tipo di informazioni sono trattate nei Capitoli 7 e 8.

Un'altra importante applicazione del concetto di tempo di volo è il misuratore di distanza a ultrasuoni. L'idea fondamentale è la stessa usata per il laser a impulsi. Una frequenza modulata ultrasonica viene trasmessa in un breve periodo di tempo e, dato che la velocità del suono in un determinato mezzo è nota, con un semplice calcolo che comprende l'intervallo di tempo tra l'impulso inviato e l'eco di ritorno si ottiene una valutazione della distanza dalla superficie di riflessione.

In un sistema ultrasonico di misura della distanza messo a punto dalla Polaroid, per esempio, viene trasmesso un treno di impulsi della durata di 1 ms, che consiste in 56 impulsi per quattro frequenze, 50, 53, 57 e 60 kHz, tramite un trasduttore da circa 40 mm di diametro. Il segnale riflesso da un oggetto viene ricevuto dal trasduttore stesso ed elaborato da un amplificatore e da altri circuiti in grado di misurare la distanza approssimativamente da 30 cm a più di 10 m, con una precisione di circa 25 mm. Le diverse frequenze contenute nel treno di impulsi vengono utilizzate per ridurre la

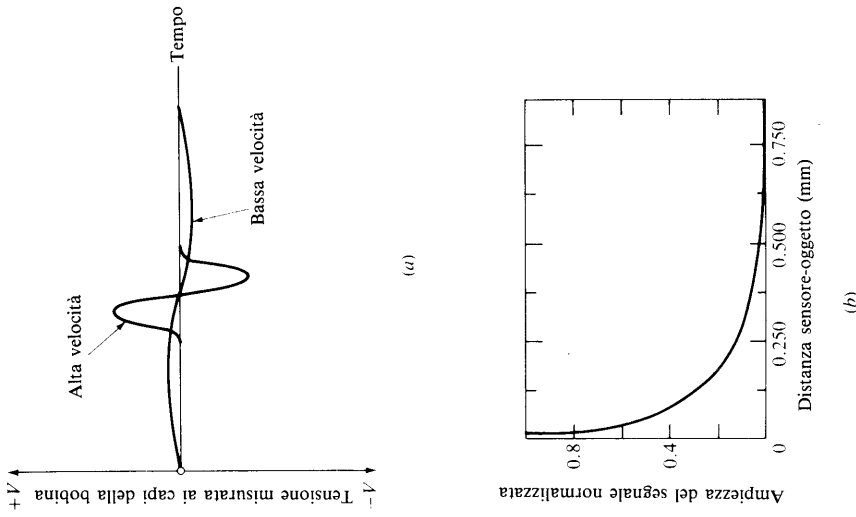


Figura 6.9 (a) Risposta del sensore induttivo in funzione della velocità. (b) Risposta del sensore in funzione della distanza. (*Adattata da Canali [1981a]*, © *Società Italiana di Fisica*).

6.3.2 SENSORI A EFFETTO HALL

Il lettore ricorderà dalla fisica elementare che l'effetto Hall mette in relazione la tensione tra due punti di un materiale conduttore o semiconduttore con un campo magnetico attraverso il materiale. Se usati da soli, i sensori a effetto Hall possono rilevare soltanto oggetti magnetizzati. Invece, se usati in associazione a un magnete permanente come quello mostrato nella

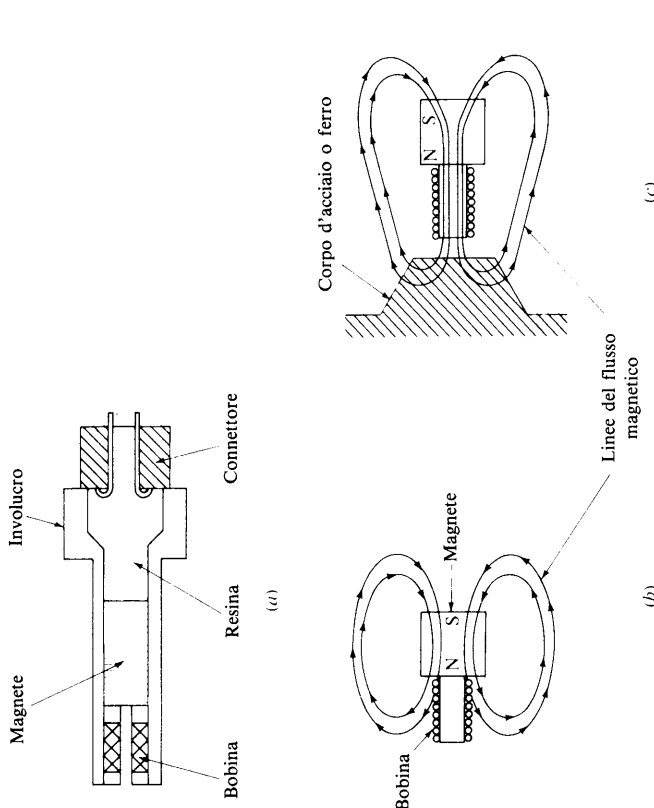


Figura 6.8 (a) Sensore induttivo. (b) Forma delle linee di flusso in assenza di corpi ferromagnetici. (c) Forma delle linee di flusso quando un corpo ferromagnetico è portato vicino al sensore. (*Adattata da Canali [1981a]*, © *Società Italiana di Fisica*).

Figura 6.8 (a) Sensore induttivo. (b) Forma delle linee di flusso in assenza di corpi ferromagnetici. (c) Forma delle linee di flusso quando un corpo ferromagnetico è portato vicino al sensore. (*Adattata da Canali [1981a]*, © *Società Italiana di Fisica*).

Figura 6.8 (a) Sensore induttivo viene introdotto nel campo del magnete. La polarità della tensione che esce dal sensore dipende dal fatto che l'oggetto stia entrando o stia lasciando il campo. La Figura 6.9b evidenzia la relazione tra l'ampiezza della tensione e la distanza sensore-oggetto. In questa figura si nota che la sensibilità cala rapidamente al crescere della distanza e che il sensore è efficace soltanto nel campo di frazioni di millimetro. Dato che il sensore richiede movimento per produrre una forma d'onda in uscita, un metodo per generare un segnale binario è integrare questa forma d'onda. L'uscita binaria rimane bassa finché il valore dell'integrale rimane sotto una soglia specificata e diventa alta (indicando la vicinanza di un oggetto) quando viene superata la soglia.

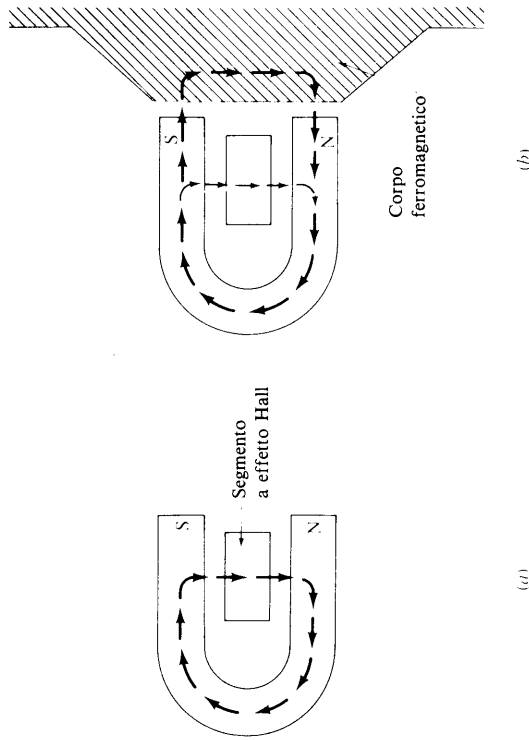


Figura 6.10 Funzionamento di un sensore a effetto Hall in connessione con un magnete permanente. (Adattata da Canali [1981a], © Società Italiana di Fisica).

Figura 6.10, essi sono in grado di rilevare tutti i materiali ferromagnetici. In questo modo, un dispositivo a effetto Hall capta un forte campo magnetico in assenza di un metallo ferromagnetico nelle immediate vicinanze (Figura 6.10a). Quando questo materiale è portato in stretta prossimità del dispositivo, il campo magnetico si affievolisce in corrispondenza del sensore a causa della curvatura delle linee di campo attraverso il materiale, come mostrato nella Figura 6.10b.

I sensori a effetto Hall si basano sul principio di una forza di Lorentz che agisce su una particella carica mentre attraversa un campo magnetico. Questa forza agisce su un asse perpendicolare al piano stabilito dalla direzione del moto della particella carica e dalla direzione del campo. Cioè, la forza di Lorentz è data da $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ dove q è la carica, \mathbf{v} è il vettore velocità, \mathbf{B} è il vettore del campo magnetico e " \times " è il prodotto vettoriale. Supponiamo, per esempio, che una corrente fluisca attraverso un semiconduttore drogato, di tipo n immerso in un campo magnetico, come è osservabile nella Figura 6.11. Ricordando che gli elettroni costituiscono la maggior parte delle cariche in materiali di tipo n e che la corrente convenzionalmente fluisce nel senso opposto alla corrente elettronica, si ha che la forza agente sulle particelle mobili, caricate negativamente, ha la direzione osservabile nel-

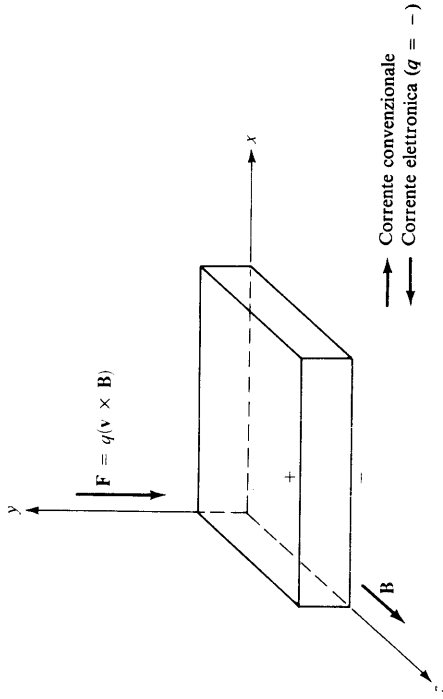


Figura 6.11 Generazione della tensione di Hall.

la Figura 6.11. Questa forza agisce sugli elettroni, che tendono a raccogliersi all'estremità del materiale e a produrre così una tensione attraverso di esso che, in questo caso, è positiva in superficie. Portando un materiale ferromagnetico vicino al dispositivo semiconduttore a magneti si diminuisce la forza del campo magnetico, riducendo così la forza di Lorentz e, infine, la tensione attraverso il semiconduttore. Questa caduta di tensione è la chiave per la percezione della prossimità con i sensori a effetto Hall. Le decisioni binarie riguardanti la presenza di un oggetto vengono prese confrontando la tensione del sensore con una soglia.

È importante notare che utilizzando un semiconduttore, per esempio silicio, si hanno diversi vantaggi in termini di dimensione, robustezza e immunità all'interferenza elettrica. Inoltre, l'uso dei materiali semiconduttori permette la costruzione di circuiti elettronici per l'amplificazione e il rilevamento direttamente sul sensore stesso, riducendo così le dimensioni e il costo.

6.3.3 SENSORI CAPACITIVI

A differenza dei sensori induttivi e di quelli a effetto Hall che percepiscono soltanto i materiali ferromagnetici, i sensori capacitivi sono potenzialmente adatti (in vari gradi di sensibilità) per rivelare la presenza di tutti i materiali liquidi e solidi. Come è implicito nel loro nome, questi sensori si basano sulla percezione di una variazione della capacità indotta da una superficie che viene avvicinata all'elemento percettivo.

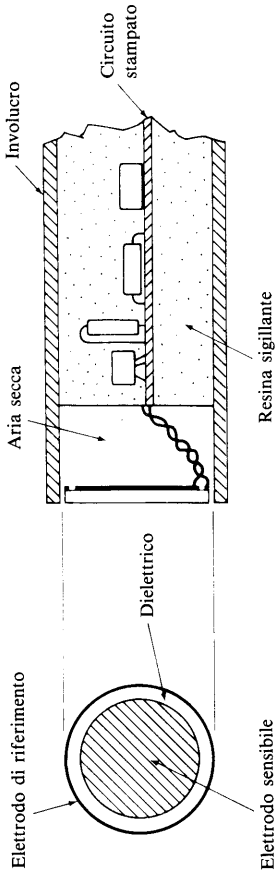


Figura 6.12 Sensore di prossimità capacitivo. (Da Canali [1981a], © Società Italiana di Fisica).

Le componenti fondamentali di un sensore capacitivo sono esposte nella Figura 6.12. L'elemento sensibile è un condensatore composto da un elettrodo sensibile e da un elettrodo di riferimento. Questi possono essere, per esempio, un disco metallico e un anello separati da un materiale dielettrico. Solitamente dietro l'elemento capacitivo è posta una cavità di aria secca per consentire l'isolamento. Il resto del sensore consiste in un circuito elettronico che può essere compreso come parte integrante dell'unità, che in questo caso è normalmente inglobata in una resina che costituisce la sigillatura e il supporto meccanico.

Vi sono vari metodi elettronici per la ricerca della prossimità basati su una variazione capacitiva. Uno dei più semplici vede il condensatore come parte di un circuito oscillatore progettato in modo tale che le oscillazioni iniziano solo quando la capacità del sensore supera un valore di soglia prestabilito.

Un metodo più complesso utilizza l'elemento capacitivo come parte di un circuito pilotato in modo ininterrotto da una forma d'onda sinusoidale di riferimento. Una variazione capacitiva genera uno slittamento di fase tra il segnale di riferimento e un segnale derivato dall'elemento capacitivo. Lo slittamento di fase è proporzionale alla variazione capacitiva e può così essere usato quale meccanismo fondamentale per la ricerca della prossimità. La Figura 6.13 mostra come varia la capacità in funzione della distanza per un sensore di prossimità basato sui concetti appena esposti. È interessante notare che la sensibilità diminuisce nettamente dopo pochi millimetri e che la forma della curva di risposta dipende dal materiale che si sta percependo. Tipicamente, questi sensori operano in modo binario cosicché una variazione nella capacità superiore a una soglia prestabilita T indica la presenza di un oggetto, mentre le variazioni al di sotto della soglia indicano l'assenza di un oggetto rispetto ai limiti di distanza stabiliti dal valore di T .

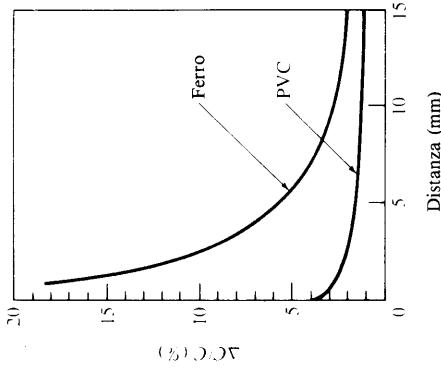


Figura 6.13 Risposta (variazione percentuale della capacità) di un sensore capacitivo di prossimità in funzione della distanza. (Da Canali [1981a], © Società Italiana di Fisica).

6.3.4 SENSORI A ULTRASUONI

La risposta di tutti i sensori di prossimità trattati finora dipende notevolmente dal materiale rilevato. Questa dipendenza può essere ridotta considerevolmente utilizzando sensori ultrasonici, il cui funzionamento per la misura della distanza è stato brevemente presentato alla fine del Paragrafo 6.2.3. In questo paragrafo trattiamo più dettagliatamente la costruzione e il funzionamento di questi sensori e spieghiamo il loro uso nella percezione della prossimità.

La Figura 6.14 mostra la struttura di un tipico trasduttore a ultrasuoni

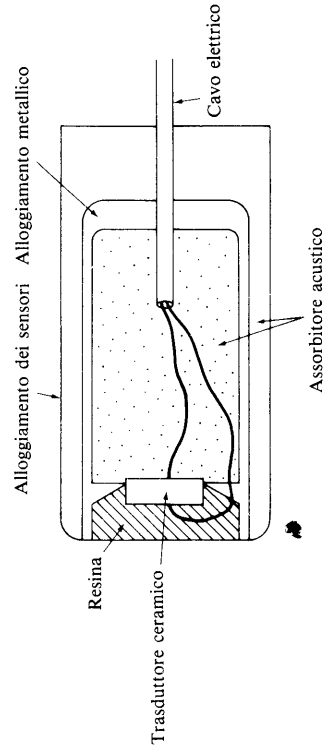


Figura 6.14 Sensore di prossimità a ultrasuoni. (Adattata da Canali [1981b], © Elsevier Sequoia).

utilizzato per la percezione della prossimità. L'elemento fondamentale è un trasduttore elettroacustico, spesso di tipo piezoelettrico o ceramico. Lo strato di resina protegge il trasduttore da umidità, polvere e da altri fattori ambientali; agisce inoltre da adattatore di impedenza acustica. Dato che lo stesso trasduttore è generalmente usato sia per trasmettere sia per ricevere, per trovare oggetti a breve distanza è necessaria l'attenuazione rapida dell'energia acustica. Questo obiettivo si ottiene dotando il sensore di assorbitori acustici e disaccoppiando il trasduttore dal suo alloggiamento. Quest'ultimo è progettato in modo tale da produrre un raggio acustico stretto per ottenere un trasferimento d'energia efficiente e una buona direzionalità del segnale.

Il funzionamento di un sensore di prossimità a ultrasuoni può essere meglio capito analizzando le forme d'onda usate per la trasmissione e per la rivelazione dei segnali di energia acustica. Nella Figura 6.15 si può osservare un tipico insieme di forme d'onda. La forma d'onda *A* è il segnale di sincronismo usato per il controllo della trasmissione. La forma d'onda *B* mostra il segnale in uscita e anche il segnale di eco che ne risulta. Gli impulsi mostrati in *C* risultano sia dalla trasmissione che dalla ricezione. Per differenziare gli impulsi corrispondenti all'invio e al ritorno dell'energia, introduciamo una finestra di tempo (forma d'onda *D*) che in sostanza stabilisce la capacità di rivelazione del sensore: cioè, l'intervallo di tempo Δt_1 è il tempo minimo rivelabile e $\Delta t_1 + \Delta t_2$ il massimo. (Osserviamo che indicare questi due intervalli di tempo equivale a specificare le distanze minima e

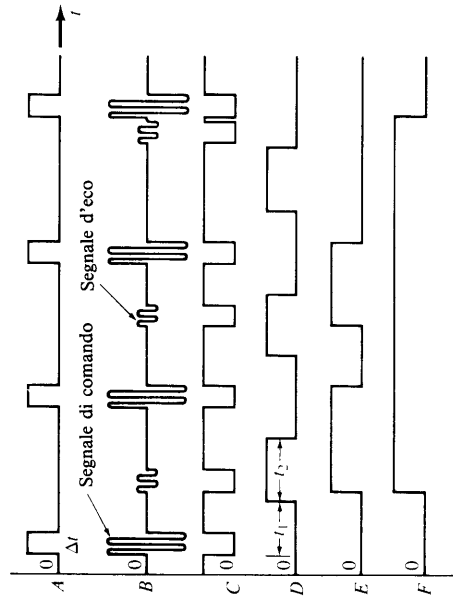


Figura 6.15 Forme d'onda associate a un sensore di prossimità a ultrasuoni. (Adattata da Canali [1981b], © Elsevier Sequoia).

massima dal momento che la velocità di propagazione di un'onda acustica è nota conoscendo il mezzo di conduzione.) Un eco ricevuto mentre il segnale *D* è alto dà luogo al segnale osservabile in *E*, che è riportato al valore basso alla fine di un impulso di trasmissione del segnale *A*. Infine, il segnale *F* è portato al valore alto sul fronte di salita di un impulso in *E* ed è riportato al valore basso quando *E* è basso e contemporaneamente si ha un impulso in *A*. In questo modo, *F* è alto quando un oggetto si trova nell'intervallo di distanza specificato dai parametri della forma d'onda *D*. Cioè, *F* è l'uscita di interesse in un sensore a ultrasuoni operante in modo binario.

6.3.5 SENSORI OTTICI DI PROSSIMITÀ

I sensori ottici di prossimità sono simili ai sensori a ultrasuoni nel senso che rivelano la prossimità di un oggetto attraverso l'influsso che l'oggetto ha su un'onda che viaggia da un trasmettitore a un ricevitore. Uno dei metodi più comuni per rivelare la prossimità con mezzi ottici è mostrato nella Figura 6.16. Il sensore consiste in un diodo a emissione di luce (LED), che si comporta da trasmettitore di luce infrarossa e da un fotodiolo allo stato solido che funge da ricevitore. I coni di luce che si costituiscono focalizzando la sorgente e il rivelatore sullo stesso piano si intersecano in una zona dalla forma allungata simile a una matita. Questa zona definisce il campo di operazione del sensore dato che una superficie riflettente che interseca il solido è illuminata dalla sorgente e "vista" nello stesso istante dal ricevitore.

Sebbene questo approccio sia simile come principio al metodo della triangolazione trattato nel Paragrafo 6.2.1, è importante notare che la zona sen-

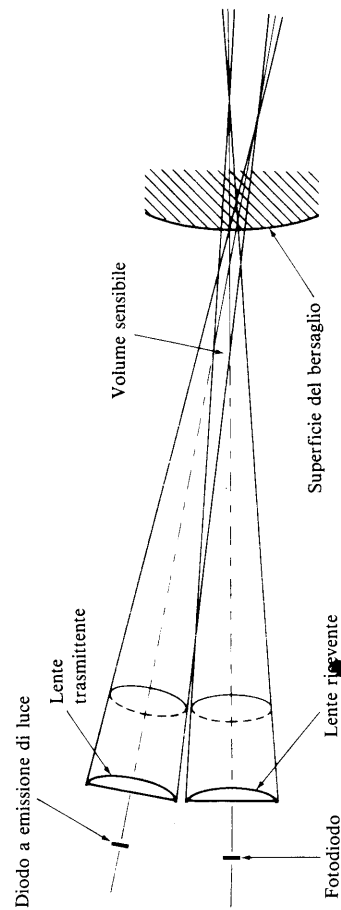


Figura 6.16 Sensore ottico di prossimità. (Da Rosen e Nitzan [1977], © IEEE).

sibile mostrata nella Figura 6.16 non conduce a una misurazione di distanza del punto. In altri termini, una superficie posta *ovunque* nella zona sensibile darà luogo a una lettura. Mentre è possibile calibrare l'intensità di queste letture in funzione della distanza per orientazioni dell'oggetto e per caratteristiche riflettenti note, l'applicazione caratteristica della disposizione osservabile nella Figura 6.16 è tale per cui si genera un segnale binario quando l'intensità di luce ricevuta supera un valore di soglia.

6.4 SENSORI TATTILI

I sensori tattili sono usati nella robotica per ottenere dati associati al contatto tra la mano di un manipolatore e gli oggetti nel campo di lavoro. La percezione tattile può essere usata, per esempio, per localizzare l'oggetto e per identificarlo e anche per controllare la forza esercitata da un manipolatore su un dato oggetto. I sensori tattili possono essere suddivisi in due categorie principali: binari e analogici. I sensori binari sono fondamentali interruttori che rispondono alla presenza o all'assenza di un oggetto. I sensori analogici invece emettono un segnale proporzionale alla forza locale esercitata. Questi sistemi saranno trattati più dettagliatamente nei paragrafi successivi.

6.4.1 SENSORI BINARI

Come indicato precedentemente, i sensori tattili binari sono dispositivi di contatto, come i microinterruttori. Nella situazione più semplice, un interruttore è posto sulla superficie interna di ciascun dito della mano del manipolatore, come è mostrato nella Figura 6.17. Questo tipo di percezione è usata per determinare se un oggetto si trova tra le dita. Spostando la mano su un oggetto e venendo più volte a contatto con la sua superficie, è possibile inoltre centrare la mano sull'oggetto da afferrare e manipolare. Sensori tattili binari multipli possono essere usati sulla superficie interna di ogni dito per fornire un'ulteriore informazione tattile. Inoltre, essi sono spesso montati sulle superfici esterne della mano per fornire segnali di controllo utili nella guida della mano attraverso lo spazio di lavoro. Quest'ultima applicazione della percezione tattile è analoga a ciò che fanno gli uomini quando cercano la strada in una stanza completamente buia.

6.4.2 SENSORI ANALOGICI

Un sensore tattile analogico è un dispositivo cedevole la cui uscita è proporzionale a una forza locale. I più semplici fra questi dispositivi consistono in una molla (Figura 6.18) che è legata meccanicamente a un albero rotante

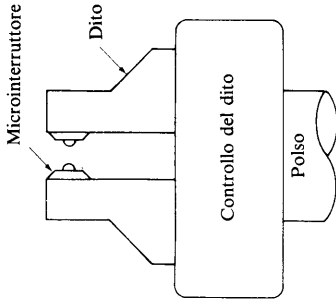


Figura 6.17 Una semplice mano di robot dotata di sensori tattili binari.

in modo tale che lo spostamento dell'asta dovuto a una forza laterale dia luogo a una rotazione proporzionale dell'albero. La rotazione è poi misurata analogicamente facendo uso di un potenziometro o digitalmente utilizzando un disco codificato. La conoscenza della costante della molla dà la forza corrispondente a un dato spostamento.

Durante gli ultimi anni, è stato effettuato uno sforzo considerevole per lo sviluppo di array tattili in grado di ottenere tale informazione su un'area più ampia di quella coperta da un singolo sensore. L'uso di questi dispo-

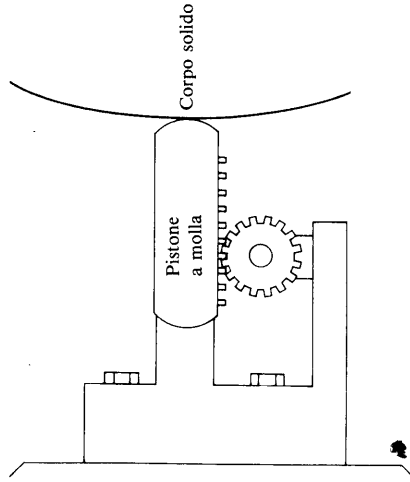


Figura 6.18 Sensore tattile analogico.

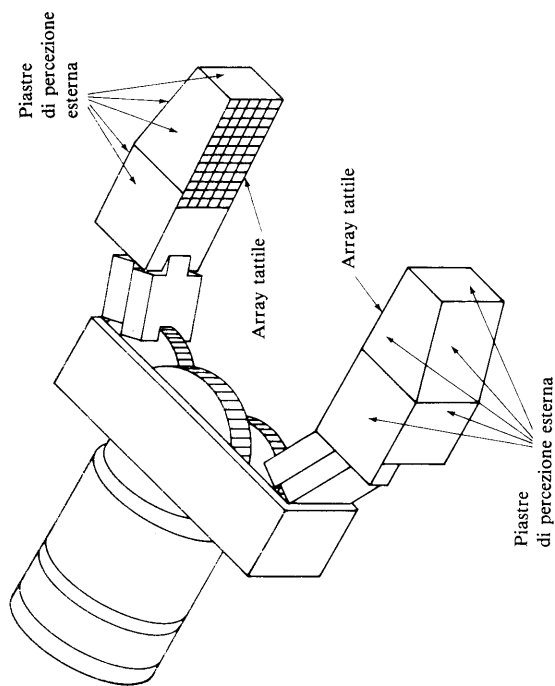


Figura 6.19 Mano di robot dotata di matrice di percezione tattile.

sitivi è illustrato nella Figura 6.19, che mostra la mano di un robot in cui la superficie interna di ogni dito è stata rivestita da un array tattile. Le piastre sensibili esterne sono tipicamente dispositivi binari e hanno la funzione descritta alla fine del Paragrafo 6.4.1.

Sebbene le superfici sensibili possano essere costruite utilizzando più sensori individuali, uno dei metodi più promettenti per affrontare il problema consiste nell'uso di un gruppo di elettrodi in contatto elettrico con un materiale conduttivo cedevole adatto (per esempio sostanze a base di grafite) la cui resistenza varia in funzione della compressione. In questi dispositivi, spesso chiamati *pelle artificiale*, un oggetto che preme contro la superficie provoca deformazioni locali che sono misurate come variazioni continue della resistenza. Queste ultime sono facilmente trasformate in segnali elettrici la cui ampiezza è proporzionale alla forza applicata a ogni dato punto della superficie del materiale.

Nella Figura 6.20 sono mostrati diversi schemi di base usati nella costruzione di pelli artificiali. Il disegno della Figura 6.20a è basato sul concetto di "finestra", caratterizzato da un materiale conduttore posto tra una terra comune e un gruppo di elettrodi incollati al piano di un circuito stampato in fibra di vetro. Ogni elettrodo consiste in un'area rettangolare (da cui il

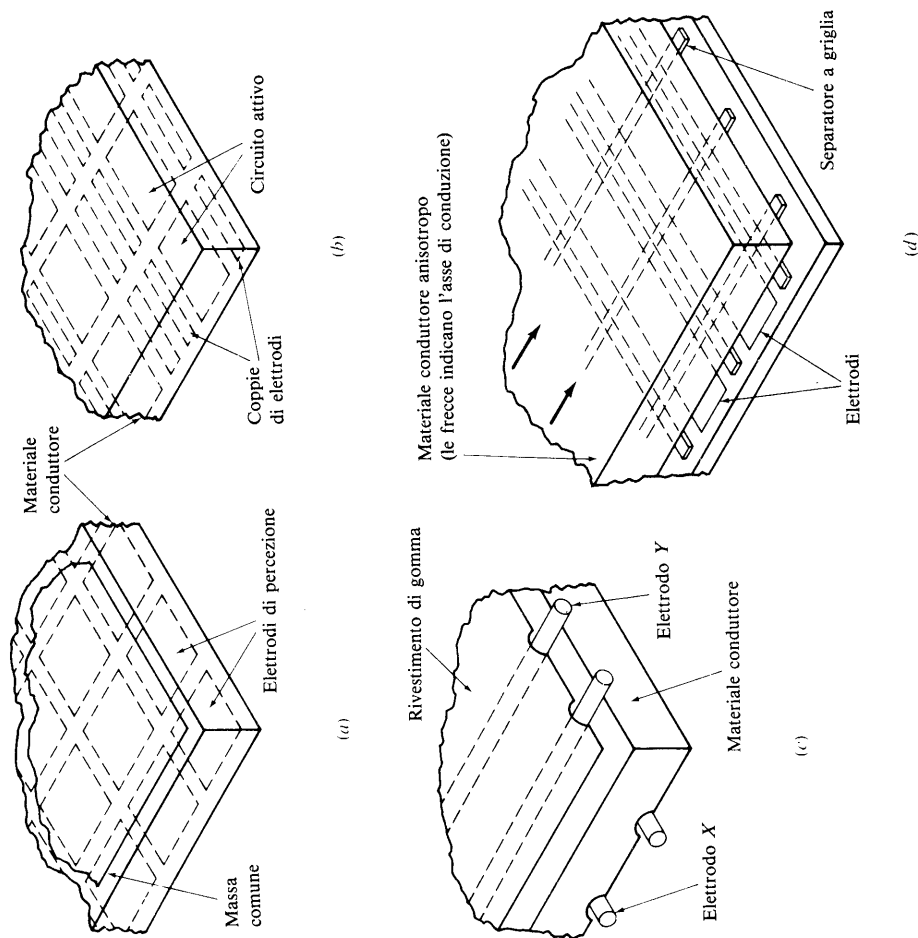


Figura 6.20 Quattro metodi per la costruzione di pelli artificiali (vedi testo).

nome *finestra*) che definisce un punto tattile. La corrente fluisce dalla massa comune verso i singoli elettrodi in funzione della compressione del materiale conduttore.

Nel metodo illustrato in Figura 6.20b, coppie di elettrodi allungati e stretti vengono poste sullo stesso piano della base con circuiti elettronici attivi utilizzando la tecnologia LSI. Il materiale conduttore è posto sopra questo piano e isolato dal piano di base, eccetto a livello degli elettrodi. Le varia-

zioni della resistenza risultanti dalla compressione del materiale sono misurate e interpretate dai circuiti attivi situati tra le coppie di elettrodi. Un'altra tecnica utilizzabile è evidenziata nella Figura 6.20c. In questo modo il materiale conduttore viene posto tra due serie di elettrodi sottili, flessibili che si intersecano perpendicolarmente. Ogni intersezione e il materiale conduttore posto al livello di queste costituiscono un punto di percezione. Le variazioni della resistenza in funzione della compressione del materiale sono misurate pilotando elettricamente gli elettrodi di un gruppo e misurando la corrente che scorre negli elementi dell'altro gruppo. Il valore della corrente in ciascuno di questi elementi è proporzionale alla compressione del materiale tra quell'elemento e l'elemento che è pilotato esternamente.

Infine, la situazione mostrata nella Figura 6.20d richiede l'uso di materiale anisotropicamente conduttore. Questi materiali hanno la proprietà di essere elettricamente conduttori in una sola direzione. Il sensore è costruito utilizzando una serie di elettrodi sottili e piatti sulla base. Il materiale conduttore è posto sulla superficie della base, con l'asse di conduzione perpendicolare agli elettrodi e separato da essi da una grata isolante cosicché non esiste contatto tra materiale ed elettrodi in assenza di forza. L'applicazione di una forza sufficientemente alta provoca il contatto tra il materiale e gli elettrodi. Quando aumenta la forza, lo stesso fa l'area di contatto e ne risulta una resistenza più bassa. Come col metodo della Figura 6.20c, un gruppo è pilotato esternamente e la corrente risultante è misurata nell'altro. Va notato che la sensibilità tattile dipende dallo spessore del separatore.

I metodi illustrati nella Figura 6.20c e d sono basati sul pilotaggio sequenziale degli elementi di uno dei gruppi. Ciò conduce spesso a difficoltà nell'interpretazione dei segnali risultanti da complessi campioni tattili a causa delle induzioni del "punto di incrocio" causate da percorsi elettrici alternativi. Una soluzione è mettere un diodo a ogni intersezione per eliminare il flusso di corrente attraverso i percorsi alternativi. Un altro metodo è mettere a terra tutti i percorsi, eccetto quello che si sta pilotando. Esaminando il gruppo ricevente, un percorso alla volta, siamo fondamentalmente in grado di "osservare" il contributo delle intersezioni dei singoli elementi. Tutti i sensori tattili sin qui trattati permettono la misura di forze normali alla superficie dei sensori. La misurazione del moto tangenziale per la determinazione dello scivolamento è un altro importante aspetto della percezione tattile. Prima di abbandonare questo paragrafo, spieghiamo questa modalità di percezione descrivendo brevemente un metodo proposto da Bejczy [1980] per la percezione sia della direzione sia dello scivolamento. Il dispositivo, illustrato nella Figura 6.21, consiste in una sfera ondulata libera di muoversi che deflette un'asta sottile montata sull'asse di un disco conduttore. Un certo numero di contatti elettrici è disposto uniformemente

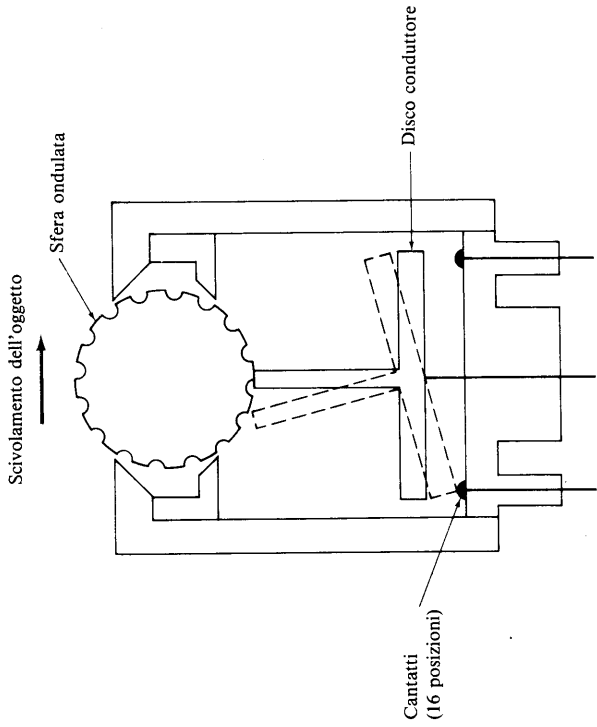


Figura 6.21 Dispositivo per la percezione dell'entità e della direzione dello scivolamento. (Adattata da Bejczy [1980], © AAAS).

sotto il disco. La rotazione della sfera conseguente allo scivolamento di un oggetto appoggiato a essa fa sì che l'asta e il disco vibrino a una frequenza proporzionale alla velocità della sfera. La direzione della rotazione della sfera determina quali contatti toccano il disco quando vibra, dando impulsi ai circuiti elettrici corrispondenti e fornisce in tal modo segnali che possono essere analizzati per determinare la direzione media dello scorrimento.

6.5 PERCEZIONE DELLA FORZA E DEL MOMENTO

I sensori di forza e del momento sono usati principalmente per misurare le forze di reazione sviluppate a livello dell'interfaccia tra strutture meccaniche. I metodi principali atti a questo scopo sono la percezione a livello del giunto e del polso*. Un sensore del giunto misura le componenti carte-

* Un'altra categoria è la percezione a livello del basamento, in cui sensori di deformazione vengono montati tra la base del robot e la superficie di supporto per misurare le componenti della forza e del momento che agiscono sulla base. Nella maggior parte delle applicazioni, comunque, la base è montata saldamente su una superficie solida e non

3. *Linearità.* Una buona linearità tra la risposta degli elementi di percezione della forza e le forze/momenti applicati permette la risoluzione delle forze e dei momenti con operazioni matriciali semplici. Inoltre, è semplificata la taratura del sensore di forza. Ciò verrà trattato nel Paragrafo 6.5.2.

4. *Bassa isteresi e attrito interno.* L'attrito interno riduce la sensibilità degli elementi di percezione della forza perché le forze devono superare questo attrito prima che possa essere prodotta una deflessione misurabile. Essa dà luogo inoltre agli effetti di isteresi che non riportano i dispositivi di misurazione della posizione alle loro letture originali.

Il sensore di forza del polso osservabile nella Figura 6.22 è stato progettato prendendo in considerazione questi criteri.

6.5.2 RISOLUZIONE DELLE FORZE E DEI MOMENTI

Consideriamo che gli effetti di accoppiamento tra i misuratori siano trascurabili, che il sensore di forza del polso operi all'interno del campo elastico del suo materiale e che la deformazione dei misuratori dia luogo a letture che variano linearmente rispetto ai cambiamenti nel loro allungamento. Allora il sensore mostrato nella Figura 6.22 dà adito a otto letture grezze che possono essere risolte con un programma per calcolatore, usando una semplice tecnica di bilanciamento forza/momento, in tre componenti ortogonali di forza e momento in relazione al sistema di coordinate del sensore di forza. Questa trasformazione può essere attuata determinando una matrice 6×8 , detta matrice di risoluzione della forza \mathbf{R}_F (o matrice di calibrazione del sensore), che viene postmoltiplicata con le misurazioni della forza per produrre le tre componenti ortogonali richieste della forza e le tre del momento. Facendo riferimento alla Figura 6.22, il vettore della forza risolta diretto lungo le coordinate del sensore di forza può essere ottenuto matematicamente come:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}_F \mathbf{W} \quad (6.5.1)$$

dove

$$\mathbf{F} \equiv (\text{forze, momenti})^T = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$$

$$\mathbf{W} \equiv \text{letture originali} = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_8)^T$$

$$\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{61} & \dots & r_{68} \end{bmatrix} \quad (6.5.2)$$

Nella (6.5.2), $r_{ij} \neq 0$ sono i fattori richiesti per la conversione dalla lettura originale \mathbf{W} (in volt) alla forza/momento (in newton · metro). Se gli effetti di accoppiamento tra i misuratori sono trascurabili, allora osservando la Figura 6.22 e sommando le forze e i momenti intorno all'origine del sistema di coordinate del sensore situato al centro del sensore di forza, possiamo ottenere l'equazione precedente con alcune delle r_{ij} uguali a zero. Facendo riferimento alla Figura 6.22, la matrice della forza risolta nella (6.5.2) diventa:

$$\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} & 0 & 0 & 0 & r_{17} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 & r_{34} & 0 & r_{36} & 0 & r_{38} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 & 0 & r_{48} \\ 0 & r_{52} & 0 & 0 & 0 & r_{56} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} & 0 & r_{65} & 0 & r_{67} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5.3)$$

Molto spesso, questa considerazione non è valida ed esistono alcuni accoppiamenti. Per alcuni sensori di forza, questo può provocare fino al 5% di errore nel calcolo della forza risolta. Così, in pratica, è solitamente necessario sostituire la matrice della forza risolta \mathbf{R}_F con una matrice contenente 48 elementi diversi da zero. Questa matrice "piena" viene usata per calibrare il sensore di forza, come trattato nel Paragrafo 6.5.3. Il vettore della forza risolta \mathbf{F} viene usato per produrre il segnale di controllo dell'attuazione dovuto all'errore necessario per il manipolatore. Lo svantaggio nell'uso di un sensore di forza del polso è che esso fornisce soltanto vettori forza risolti all'interfaccia di assemblaggio per un singolo contatto.

6.5.3 CALIBRAZIONE DEL SENSORE

L'obiettivo della taratura del sensore di forza del polso è determinare tutti i 48 elementi incogniti della matrice della forza risolta [(6.5.2)], basandosi su dati sperimentali. A causa degli effetti di accoppiamento, dobbiamo trovare tutti i 48 elementi diversi da zero della matrice \mathbf{R}_F . La taratura del sensore di forza del polso viene effettuata trovando una matrice di calibrazione pseudoinversa \mathbf{R}_F^* che soddisfi:

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_F^* \mathbf{F} \quad (6.5.4)$$

$$\mathbf{R}_F^* \mathbf{R}_F \equiv \mathbf{I}_{8 \times 8} \quad (6.5.5)$$

dove \mathbf{R}_F^* è una matrice 8×6 e $\mathbf{I}_{8 \times 8}$ è una matrice identità 8×8 . Allora la matrice di calibrazione \mathbf{R}_F^* della (6.5.1) può essere trovata dalla pseudoinversa di \mathbf{R}_F^* nella (6.5.4) utilizzando una tecnica dei minimi quadrati. Pre-moltiplicando la (6.5.4) per $(\mathbf{R}_F^*)^T$, abbiamo:

$$(\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{W} = [(\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{R}_F^*] \mathbf{F} \quad (6.5.6)$$

Invertendo la matrice $[(\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{R}_F^*]$ si ottiene:

$$\mathbf{F} = [(\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{R}_F^*]^{-1} (\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{W} \quad (6.5.7)$$

Quindi, confrontando la (6.5.1) e la (6.5.7), abbiamo:

$$\mathbf{R}_F \equiv [(\mathbf{R}_F^*)^T \mathbf{R}_F^*]^{-1} (\mathbf{R}_F^*)^T \quad (6.5.8)$$

La matrice \mathbf{R}_F^* può essere determinata applicando pesi noti lungo gli assi del sistema di coordinate del sensore. In un articolo di Shimano e Roth [1979] si possono trovare maggiori spiegazioni sul procedimento sperimentale per la calibrazione della matrice della forza risolta.

6.6 CONCLUSIONI

Il materiale presentato in questo paragrafo rappresenta lo stato dell'arte per quanto riguarda i sensori esterni dei robot. Va comunque considerato che le prestazioni di questi sensori sono ancora piuttosto primitive se paragonate alle capacità umane.

Come indicato all'inizio di questo capitolo, la maggior parte degli attuali robot industriali svolge il suo compito utilizzando tecniche preprogram-

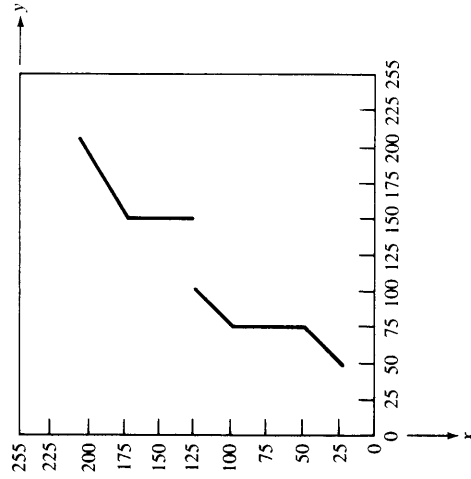
mate e senza l'aiuto di una reazione sensoriale. L'interesse diffusosi relativamente di recente nell'automazione flessibile, però, ha portato a crescenti sforzi nell'area dei sistemi robotici guidati dai sensori come mezzo per aumentare la possibilità di applicazione di tali macchine. Così, lo sviluppo dei sensori è in verità un campo dinamico in cui si trovano comunemente nella letteratura nuove tecniche e applicazioni. Per questa ragione i temi compresi nel presente paragrafo sono selezionati principalmente per il loro valore come materiale fondamentale che potrebbe servire da base per ulteriori studi su tale argomento e nelle branche relative.

BIBLIOGRAFIA

Come articoli generali sulla percezione robotica citiamo Rosen e Nitzan [1977], Bejczy [1980], Galey e Hsia [1980], McDermott [1980] e Merritt [1982]. Ulteriori letture sui misuratori di distanza a laser si possono trovare in Duda et al. [1979] e Jarvis [1983a, 1983b]. Per altre informazioni sull'argomento del Paragrafo 6.3 vedi Spencer [1980], Catros e Espiau [1980] e Canali et al. [1981a, 1981b]. Letture aggiuntive riguardanti temi esposti nel Paragrafo 6.4 possono essere trovate in Harmon [1982], Hillis [1982], Marck [1981] e Raibert e Tanner [1982]. Si vedano anche gli articoli di Beni et al. [1983], McDermott [1980] e Hackwood et al. [1983]. I sensori del basamento (Paragrafo 6.5) sono trattati da Drake [1977]. Ulteriori informazioni sulla percezione di forza e momento si possono ricercare in Nevins e Whitney [1978], Shimano e Roth [1979] Meindl e Wise [1979] e Wise [1982].

ESERCIZI

1. Dimostrare la validità della (6.2.8).
2. Un sensore di distanza a lama di luce che illumina uno spazio di lavoro con due oggetti produce la seguente uscita sullo schermo di un televisore:



Ammettendo che il sistema di misura sia disposto come nella Figura 6.3b con $M = 256$, $D_0 = 1$ m, $D_c = 2$ m, $B = 3$ m, $\lambda = 35$ mm, si trovi la distanza tra gli oggetti nella direzione della lama di luce.

3. (a) Un misuratore di distanza a laser elio-neon (lunghezza d'onda 632.8 nm) a raggio continuo è modulato con un'onda sinusoidale di frequenza 30 MHz. Qual è la distanza da un oggetto che produce uno slittamento di fase di 180° ?
(b) Qual è il limite superiore di distanza per cui questo dispositivo produrrebbe una lettura univoca?
4. Calcolare il limite superiore della frequenza di un'onda sinusoidale modulante per raggiungere una distanza di lavoro fino a 5 m (limite escluso) utilizzando un misuratore di distanza a laser a raggio continuo.
5. (a) Supponiamo che la precisione di un misuratore di distanza a laser sia alterata da rumore con una distribuzione gaussiana di valor medio 0 e una deviazione standard di 100 cm. Di quante misurazioni si deve calcolare la media per ottenere una precisione di ± 0.5 cm con un 0.95 di probabilità?
(b) Se, invece di essere 0, il valor medio del rumore fosse 5 cm, come ne compenserebbe l'effetto nelle misurazioni di distanza?

6. Facendo riferimento alla Figura 6.15, fornite un insieme di forme d'onda per un sensore ultrasonico in grado di misurare la distanza invece di ottenere soltanto un'uscita binaria associata alla prossimità.
7. Supponiamo che un sensore ultrasonico di distanza sia usato per ricercare la presenza di oggetti entro 0.5 m dal dispositivo. Al tempo $t = 0$ il trasduttore emette impulsi per 0.1 ms. Consideriamo che occorrono 0.4 ms perché si smorzino le risonanze all'interno del trasduttore e 20 ms perché finiscano gli echi nell'ambiente. Dato che il suono viaggia a 344 m/s:
(a) Quale gamma di tempi dovrebbe essere usata come finestra?
(b) A quale istante il dispositivo può nuovamente emettere un impulso?
(c) Qual è la distanza minima rivelabile?
8. Un sensore ottico di distanza (Figura 6.16) ha un volume sensibile costituito dall'intersezione di due raggi identici. Il cono formato da ogni raggio ha origine al vertice delle lenti e ha un vertice situato 4 cm davanti al centro della lente opposta. Dato che ogni lente ha un diametro di 4 mm e che i centri delle lenti distano 6 mm, in quale intervallo approssimato questo sensore segnalerà un oggetto? Si supponga che gli oggetti vengano rivelati in qualunque punto del volume sensibile.
9. Una matrice tattile 3×3 è scandita pilotando le righe (una alla volta) con 5 V. Una colonna viene letta tenendola a terra e misurando la corrente. Consideriamo che le righe non pilotate e le colonne non lette siano lasciate ad alta impedenza. Un dato pattern di forza applicato al sensore provoca le seguenti resistenze a ogni intersezione degli elettrodi (riga, colonna): 100 Ω a (1, 1), (1, 3), (3, 1) e (3, 3); e 50 Ω a (2, 2) e (3, 2). Tutte le altre intersezioni hanno resistenza infinita. Calcolare la corrente misurata a ogni intersezione riga-colonna nel gruppo, prendendo in considerazione il problema degli incroci.
10. Ripetere l'Esercizio 6.9 considerando:
(a) che tutte le righe non pilotate e tutte le colonne siano messe a terra; e
(b) che un diodo (0.6 V di caduta di tensione) sia posto in serie alla resistenza in ogni giunzione.
11. Un sensore di forza del polso è montato su un robot PUMA dotato di una pinza a scorrimento parallelo ed è stato effettuato un procedimento di calibrazione del sensore per ottenere la matrice di calibrazione R_F . Sfortunatamente, dopo che avete effettuato tutte le misurazioni, qualcuno monta una pinza differente sul robot. Dovete ritrarre il sensore di forza del polso? Motivate la risposta.