Appunti Sensori per la Robotica ed Automazione (modulo di Controllo dei Processi)

master COPY COPISTERIA

master COPY COPISTERIA

Di Valerio P.

Un **sensore** è definito come *un dispositivo capace di rispondere ad uno stimolo tramite un segnale elettrico*, segnale che può essere successivamente analizzato da un sistema elettronico. Per **stimolo** si intende una proprietà o una quantità che può essere ricevuta e convertita in un segnale elettrico (ad es. luminosità, forza o pressione). L'output del sensore può essere sotto forma di segnale di tensione, corrente o di carica. Tutte le caratteristiche del segnale di output vengono raccolte in un insieme chiamato *Output Signal Format* (OSF). Il processo di misura è un caso particolare di processo di trasmissione di informazione. Esso richiede un trasferimento di energia che può fluire in entrambi i versi (dal sensore all'oggetto o viceversa).

In genere, un **trasduttore** è un dispositivo capace di trasformare una proprietà o quantità in un'altra. Un sensore è un particolare trasduttore che converte le proprietà (stimoli) in segnali elettrici. I trasduttori possono essere anche parte di sensori complessi o ibridi, in cui lo stimolo può essere trasformato più volte prima di essere convertito in un segnale elettrico.

In base al posizionamento, un sensore si può classificare come **intrinseco** o **estrinseco**: è intrinseco quando è posto all'interno del dispositivo di controllo per monitorarne lo stato interno; è estrinseco quando viene posto in corrispondenza dell'input del dispositivo per percepirne gli effetti esterni ed informare il sistema su possibili stimoli.

Una seconda classificazione può essere quella basata sull'alimentazione del sensore. Un sensore si dice **passivo** se genera un segnale elettrico senza richiedere alimentazione esterno, altrimenti si dirà **attivo**. Questi ultimi si chiamano anche parametrici, poiché modulano il segnale di eccitazione tramite dei parametri per trasportare l'informazione dello stimolo in uscita.

In base al loro riferimento i sensori possono essere classificati come **assoluti** o **relativi**: è assoluto quando fa riferimento ad una scala assoluta ed indipendente dalle condizioni di misura (ad es. temperatura misurata in °K), mentre è relativo se fa riferimento a qualche condizione particolare (ad es. la pressione misurata rispetto a quella atmosferica).

Il **modello matematico** di un sensore ha il compito di definire una relazione teorica che lega lo stimolo esterno con il segnale elettrico di output. Se il sensore fosse idealmente fabbricato e progettato con materiali ideali allora l'output rappresenterebbe fedelmente il vero valore dello stimolo, ma così non è. Il modello in questione prende il nome di *funzione di trasferimento* (*f.d.t.*) che può essere statica se risulta tempo invariante. Una tipica rappresentazione può essere:

$$E = f(s)$$

Ogni sensore è connesso ad un sistema di misura che ha il compito di leggere il valore di E per risalire a quello di s. matematicamente vuol dire trovare la funzione inversa $s = f^{-1}(E) = F(E)$. Di norma esiste una legge fisica o chimica dietro alla f.d.t. ma nella pratica non esistono delle formule facilmente risolvibili e, quindi, si è costretti ad usare delle *approssimazioni*. L'approssimazione funzionale è quel processo che prova a trovare una legge matematica capace di "fittare" o interpolare dei dati sperimentali in maniera migliore possibile, seppur mantenendo la funzione approssimante abbastanza semplice da rendere facile la computazione o l'inversione.

Il modello più semplice di tutti è sicuramente quello **lineare**, descritto da una generica equazione:

$$E = A + Bs$$

Rappresentante una retta di pendenza B e di intercetta A, corrispondente all'output del sensore quando lo stimolo è nullo ($s=0$). La pendenza B spesso viene chiamata **sensibilità** e regola quanto è influente lo stimolo sull'uscita. Si noti come l'eq.ne assuma che la f.d.t. passi teoricamente in $s = 0$,

master COPY COPISTERIA

questo non è sempre possibile (ad es. il sensore di temperatura che misura in °K) e quindi si preferisce modificare l'eq.ne impostando il riferimento ad un valore noto s_0 tale che $f(s_0) = E_0$, allora la formula e la sua inversa divengono:

$$E = E_0 + B(s - s_0)$$

$$s = \frac{E - E_0}{B} + s_0$$

N.B. per costruire l'inversa bisogna conoscere tre quantità: le coordinate del riferimento (E_0, s_0) e la sensibilità B.

Nel mondo reale solo pochi sensori sono veramente lineari, spesso sono presenti delle non-linearità che influenzano la formula, soprattutto per un ampio range dello stimolo. Per questo motivo esistono le **approssimazioni non lineari**, come quella logaritmica, esponenziale o di elevazione a potenza. Se le misure degli stimoli non possono essere effettuate con grande precisione in fase di calibrazione, allora ci si aspetta la presenza di grossi errori randomici. Per ridurre al minimo gli errori si potrebbe usare il **metodo dei minimi quadrati** per trovare la pendenza e l'intercetta. Si noti come l'approssimazione sia sempre lineare.

Una seconda tecnica è quella di **approssimazione polinomiale**, ovvero in serie di potenze. In molti casi pratici basta vedere se la risposta del sensore può essere approssimata da un polinomio di II o III grado come, ad esempio:

$$E = a_2 s^2 + a_1 s + a_0$$

Più accuratezza è richiesta, più alto sarà l'ordine del polinomio.

La **linear piecewiece approximation** è una tecnica di approssimazione che può essere sfruttata da un sistema computerizzato. Essa rompe la f.d.t. non lineare in sezioni tramite dei punti (nodi) che poi verranno connessi da segmenti. Questi segmenti approssimeranno la f.d.t. Se la deviazione tra il segmento e la f.d.t. è alta, allora si possono aggiungere più nodi per migliorare l'approssimazione, inoltre essi non devono essere equamente spaziati tra loro ma dovranno essere più vicini tanto quanto è alta la non linearità in quella regione.

La **spline interpolation** è un metodo che approssima la f.d.t. tramite dei polinomi passanti per dei punti presi sulla funzione, chiamati nodi. Oltre al passaggio, la tecnica impone anche nulla la derivata seconda di tali polinomi sui nodi, in modo tale da avere il passaggio da una sezione all'altra nel modo più dolce possibile.

La calibrazione è un processo avente l'obiettivo di trovare la funzione di trasferimento di un sensore, oppure di migliorare l'accuratezza del sensore.
La calibrazione si effettua applicando degli stimoli noti che, in coppia alle risposte attese dal sensore, vengono chiamati punti di calibrazione (E, S) .La sorgente che applica gli stimoli deve essere considerata ''perfetta'' e va controllata periodicamente, la cui qualità è garantita dal NIST. Esistono 4 metodi di calibrazione:

- Una prima tecnica di calibrazione parte da un modello della funzione di trasferimento, avente dei parametri che andranno regolati grazie alle misurazioni effettuate tramite i punti di calibrazione per *fittare* le misurazioni effettuate. In questo modo ciascun sensore avrà una sua precisa funzione di trasferimento.
- Un'altra tecnica consiste nel modificare il guadagno e l'offset del sistema di acquisizione dati in maniera che i dati acquisiti possano *fittare* in un sistema normalizzato.

- Una terza modifica le proprietà del sensore in modo da *fittare* la risposta con una f.d.t. predefinita (si noti come sia il processo opposto rispetto alle tecniche precedenti). Questa tecnica prende il nome di **trimming**.
- L'ultima tecnica prevede l'individuazione di un riferimento specifico del sensore, che dovrebbe possedere delle determinate caratteristiche che il sensore dovrebbe avere.

Quindi data una f.d.t. del tipo $E = f(S)$ si scelgono vari punti di misurazione per il calcolo dei coefficienti. La funzione può anche essere non lineare, e quindi il numero dei punti presi aumenta con l'aumentare del grado della funzione considerata. Ovviamente per definire la forma della funzione (grado, polinomiale o no, ecc..) va trovato un compromesso tra la precisione della funzione sul *fitting* dei punti di calibrazione e tra la complessità derivante dalla forma della funzione stessa.

Per risalire ad uno stimolo sconosciuto, posto tra due punti di calibrazione, è possibile risalire alla funzione inversa $S = f^{-1}(E)$ oppure si può effettuare un'approssimazione lineare della funzione tra i due punti di calibrazione (n_i, s_i) e (n_{i+1}, s_{i+1}) utilizzando una tabella di valori tabulati. Una terza tecnica utilizza l'algoritmo iterativo di **Newton-Raphson**, che inizia da un valore iniziale ipotizzato S_0 chiamato *initial guess*, e si itera il calcolo di $S_{i+1} = S_i - \frac{f(S_i)-E}{f'(S_i)}$ finché non converge ad un valore stimato. L'errore del metodo dipende dalla sensibilità del sensore però: infatti se la sensibilità è piccola il metodo porta a valori erronei e non molto precisi. Per questo motivo, nella pratica si usa un metodo di Newton corretto.

Ciascun sensore è fornito di un particolare documento, chiamato *datasheet*, che fornisce tutte le specifiche utili per determinare una corretta scelta in base al campo di applicazione.
Alcuni campi contenuti nel datasheet sono:

- **Span:** la differenza algebrica tra il valore più alto misurabile ed il valore più basso
- **Fondoscala di ingresso:** l'intervallo massimo misurabile
- **Fondoscala di uscita:** l'ampiezza massima del segnale d'uscita
- **Dynamic range:** il rapporto, in decibel, tra lo stimolo più alto misurabile e quello più basso.
- **Accuratezza:** la più alta deviazione di un valore che può essere rappresentato dal sensore rispetto ad un valore reale, dato dallo stimolo di ingresso.
- **Precisione:** lo scostamento tra il valore reale dello stimolo ed il valore misurato dal sensore.

Con il termine di **accuratezza** si vuole definire la più grande deviazione tra il valore riportato dal sensore ed un valore reale, che può essere ottenuto tramite una metodologia di misurazione "esemplare". Esso, quindi rappresenta un certo errore sistematico tra un valore misurato ed un valore reale, che può essere ottenuto tramite una "funzione di trasferimento ideale" (associata ad un metodo di misurazione esemplare). In tal modo potrebbe essere visto come la differenza tra il valore calcolabile tramite la f.d.t ideale ed il valore dell'uscita attuale del sensore.

Ad esempio, si ipotizzi un sensore di misura di uno spostamento lineare, che produce in uscita un segnale di 1mV in corrispondenza di una distanza di 1mm, si suppone che la f.d.t. del sensore sia lineare (una retta) che può essere scritta, in generale, può essere scritta come $E = A + Bs$, dove il valore $B = 1\ \left[\frac{mV}{mm}\right] \wedge A = 0$. Ora si supponga di fare un esperimento, dove si vuol misurare uno spostamento noto $s = 10\ mm$, e si supponga che l'uscita prodotta dal sensore sia $E_x = 10.5\ mV$. Usando la formula della f.d.t. ideale, con un'uscita simile si otterrebbe uno stimolo ideale $s_x = 10.5\ mm = \frac{E}{B_x}$, ma lo stimolo vero sarebbe di 10 mm.
Calcolando la differenza $s_x - s = 0.5\ mm$ si ottiene la deviazione tra il valore ideale e lo stimolo vero.

Nella determinazione dell'accuratezza intervengono anche altri effetti, come l'isteresi, problemi nella calibrazione e persino errori dovuti alla riproducibilità. Essa è un errore sistematico migliorabile, infatti è possibile ridurla tramite una buona calibrazione del sensore, ottenendo delle curve di calibrazione migliori (f.d.t.). È buona pratica ripetere le calibrazioni periodicamente anche per tenere traccia del cambiamento delle caratteristiche in funzione all'usura. Nei datasheet l'accuratezza viene riportata considerando tutti gli effetti influenzanti ed in corrispondenza del *worst case,* riportandola in percentuale del fondoscala, quindi:

$$\varepsilon_f = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_{FS}}$$

$$X_m \rightarrow valore\ misurato$$

$$X_v \rightarrow valore\ vero$$

$$X_{FS} \rightarrow fondoscala$$

Oppure è possibile misurarla come percentuale della misura:

$$\varepsilon_a = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_v}$$

la percentuale sul fondoscala è utile quando la caratteristica del sensore è lineare, mentre la seconda è utile quando la caratteristica del sensore è altamente non lineare. In generale la percentuale del fondoscala ε_f è poco significativo se l'escursione della misura è ampia.

Di solito i sensori, emanano in uscita dei segnali già convertiti in digitale, quindi, oltre all'accuratezza, va tenuto conto anche **dell'errore di quantizzazione**, causato dal processo di campionamento. Per rappresentarlo nei datasheet si usa un dato chiamato *least significant bit* o LSB, che rappresenta il valore minimo rappresentabile in digitale. Si definisce come:

$$LSB = \frac{Y_s}{2^n}$$

In cui Y_s rappresenta la differenza tra il valore minimo ed il valore massimo del segnale d'uscita, mentre n è sostanzialmente il numero di bit utilizzati nel processo di quantizzazione. L'errore sistematico che si compie nel processo sarà:

$$|e| \leq \frac{1}{2} LSB = \frac{Y_s}{2^{n+1}}$$

Poiché nel processo di quantizzazione la Y deve essere approssimata ad un valore digitale, definito tramite dei livelli di quantizzazione, essa può essere più bassa o più alta rispetto al valore reale e l'errore massimo si ha quando il valore reale è posto proprio in mezzo tra i due.

Con il termine di **precisione** si intende di quanto le misure successive, poste nelle medesime condizioni, si discostano da uno stesso misurando. In generale può essere calcolata come il massimo discostamento tra una misurazione e la miglior stima del misurando stesso, oppure si può anche calcolare considerando la massima differenza tra due uscite diverse del sensore. Anche lei può essere definita come percentuale del fondoscala:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS}\%$$