

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Rilevamento di esseri umani – Sensori tattili

In generale, i sensori tattili appartengono alla classe dei trasduttori di forza o pressione che sono caratterizzati da piccoli spessori o alla classe dei sensori di prossimità che rispondono a una presenza molto vicina ($< 1 \text{ mm}$) o a un contatto effettuato mediante digitazione (umana o meccanica). Esempi di applicazioni dei sensori tattili sono:

- Robotica: il sensore può essere posizionato sui «polpastrelli» di un attuatore meccanico allo scopo di generare un feedback in seguito al contatto con un oggetto (molto simile al funzionamento dei sensori tattili della pelle umana).
- Dispositivi: essi vengono utilizzati per la costruzione dei display «touchscreen», delle tastiere e di altri dispositivi in cui deve essere percepito un contatto fisico.
- Bioingegneria: i sensori tattili possono essere utilizzati in odontoiatria per l'indagine sull'occlusione di ponti e corone e negli studi sulle forze sviluppate dal piede umano durante la locomozione. Essi possono anche essere installati in ginocchia artificiali per il bilanciamento delle protesi.
- Identificazione degli umani mediante impronte digitali.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Rilevamento di esseri umani – Sensori tattili

I sensori tattili possono essere classificati in:

- *Touch Sensors*: essi rilevano e/o misurano le forze di contatto in punti definiti. Un *touch sensor* può essere analogico (in grado di misurare la forza di contatto) o binario (a soglia: *touch-no touch*).
- *Contact Sensors*: essi rilevano l'accoppiamento fisico tra due oggetti, indipendentemente dalle forze. Un tocco di un dito può essere rilevato attraverso il monitoraggio dell'area di contatto tra il dito e il pannello. Un esempio è un touchscreen capacitivo su un monitor touch-sensitive (esempio: smartphone).
- *Spatial Sensors*: essi rilevano e misurano la distribuzione spaziale di forze perpendicolari a un'area predeterminata.
- *Slip Sensors*: essi rilevano e misurano il movimento relativo di un oggetto rispetto al sensore. Ciò può essere ottenuto con un sensore di scivolamento appositamente progettato o con l'interpretazione dei dati di un *touch sensor*, di un *contact sensor* o di uno *spatial sensor*.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Introduzione

I sensori di forza possono essere quantitativi o qualitativi. Un sensore quantitativo misura la forza e rappresenta il suo valore come segnale elettrico. Esempi di tali sensori sono gli estensimetri e le celle di carico, i quali vengono utilizzati con opportuni circuiti di interfaccia. I sensori qualitativi sono dispositivi *a soglia*; il loro scopo non è quello di fornire una misura del valore della forza. La loro funzione è quella di indicare se è stata applicata una forza sufficientemente intensa o meno. In tale caso, il segnale di uscita indica quando l'entità della forza supera un livello di soglia predefinito. Un esempio di questi rilevatori è la tastiera di un computer, dove un tasto genera un contatto solo quando viene premuto con forza sufficiente. I sensori di forza qualitativi vengono usati frequentemente per il rilevamento del movimento e della posizione. Un pressostato di un sistema di sicurezza installato nel pavimento e un cavo piezoelettrico installato nel pavimento sono esempi di sensori di forza qualitativi.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Introduzione

I vari metodi per misurare la forza possono essere classificati come segue:

- 1) Bilanciando la forza sconosciuta contro la forza gravitazionale di una massa standard.
- 2) Misurando l'accelerazione di una massa nota a cui viene applicata la forza.
- 3) Bilanciando la forza con una forza sviluppata elettromagneticamente.
- 4) Convertendo la forza in pressione del fluido e misurando tale pressione.
- 5) Misurando la deformazione prodotta in un elemento elastico dalla forza sconosciuta.

Il metodo 1 è una classica bilancia a trave per la pesatura di merci. Essa è costituita da un fulcro o perno, da una leva (il peso sconosciuto è posto a un'estremità della leva) e da un contrappeso (applicato all'altra estremità della leva). Tuttavia, tale bilancia non si può definire «dispositivo di misura» poiché non emette segnali elettrici. Nei sensori moderni, il metodo più comunemente usato è il metodo 5 (i metodi 3 e 4 vengono usati raramente).

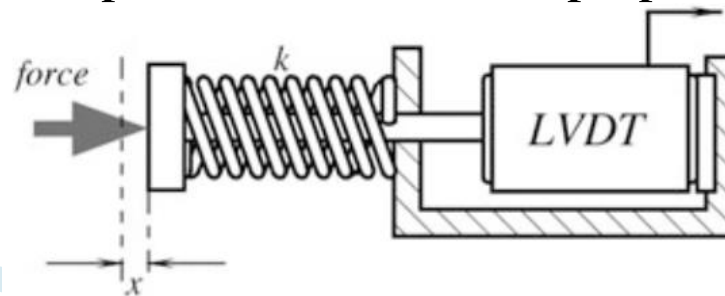
ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Introduzione

In molti sensori, la forza è sviluppata in risposta ad alcuni stimoli (esempio: accelerometro). Tale forza non viene direttamente convertita in un segnale elettrico, quindi sono necessari alcuni step aggiuntivi. Un tipico sensore di forza è una combinazione di un trasduttore forza-deformazione e di un trasduttore deformazione-segnale elettrico. Il primo può essere una semplice molla elicoidale, la cui deformazione per compressione x può essere definita attraverso la costante elastica della molla e la forza di compressione F come

$$x = kF$$

In un sensore, alla molla viene aggiunto un trasduttore deformazione-segnale elettrico. Il sensore mostrato nella figura include una molla e un LVDT (Linear Variable Differential Transformer). All'interno di un range di funzionamento lineare della molla, il trasduttore LVDT produce una tensione proporzionale alla forza applicata.



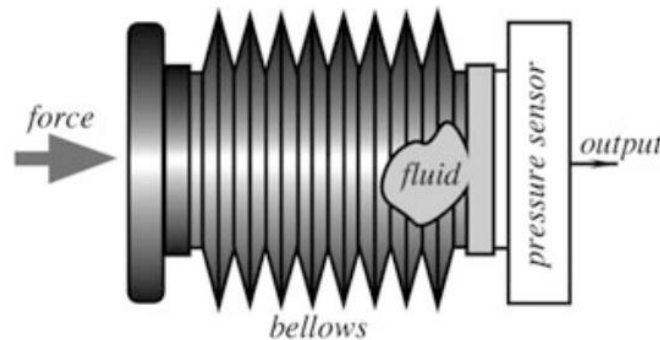
Sensore di forza con molla e LVDT.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Introduzione

Un sensore simile a quello riportato nella figura della slide precedente può essere costruito con altri tipi di molle e sensori di pressione (si veda la figura riportata in questa slide). Nella figura, un sensore di pressione è combinato con un soffietto riempito di fluido sul quale viene applicata una forza. Il soffietto funziona da trasduttore forza-pressione distribuendo una forza localizzata al suo ingresso sulla membrana di un sensore di pressione che, a sua volta, include un trasduttore deformazione-segnale elettrico. Il trasduttore deformazione-segnale elettrico converte il movimento della membrana in un'uscita elettrica.

In sintesi, un tipico sensore di forza combina un elemento elastico (esempio: molla) e un trasduttore per misurare il grado di compressione o di deformazione dell'elemento, allo scopo di convertirlo in un segnale elettrico di uscita. I sensori di forza sono tra le parti cruciali di alcuni sensori di pressione, sensori tattili e sensori di accelerazione.



Sensore di forza con soffietto e sensore di pressione.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Estensimetri

Quando una forza viene applicata a un elemento elastico comprimibile, l'elemento si deforma o si estende. Il grado di deformazione o estensione può essere utilizzato come misura di spostamento causato da una forza. Quindi, un estensimetro è un trasduttore che misura lo spostamento di una sezione di un elemento deformabile rispetto alle sue altre parti.

Un estensimetro può essere installato direttamente in una componente resiliente (esempio: molla) o in modo che sia strettamente aderente a una o più delle sue superfici esterne; quindi l'estensimetro si deforma insieme alla componente quando la forza agisce.

L'estensione è la deformazione di un corpo fisico sotto l'azione di una forza applicata. Diversi principi fisici possono essere utilizzati per misurare l'estensione (esempi: ottico, piezoelettrico, capacitivo, piezoresistivo).

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Estensimetri

Gli estensimetri (strain gauge) sono costituiti da fili o lamine conduttrici metalliche. La resistenza di un conduttore metallico è proporzionale alla sua lunghezza l_0 ed inversamente proporzionale alla sua sezione trasversale A_0 :

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0}$$

essendo ρ la resistività del metallo.

Se il conduttore è sottoposto a trazione elastica la sua lunghezza aumenta in misura proporzionale alla forza di trazione. Chiamando Δl la variazione di lunghezza, nell'ipotesi che rimanga costante il volume del conduttore, la sezione subirà una contrazione ΔA tale che:

$$V = A_0 l_0 = (l_0 + \Delta l)(A_0 - \Delta A) \quad (1)$$

La resistenza del conduttore di conseguenza diventa:

$$R = \rho \frac{l_0 + \Delta l}{A_0 - \Delta A} \quad (2)$$

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di forza e deformazione – Estensimetri

Ricavando $A_0 - \Delta A$ dalla (1) e sostituendola nella (2) si ottiene approssimativamente:

$$R = \rho \frac{l_0}{A_0} \left(1 + 2 \frac{\Delta l}{l_0}\right)$$

e quindi il legame, in prima approssimazione lineare, tra variazione di resistenza ΔR e variazione di lunghezza Δl :

$$\Delta R = R - R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0} \left(1 + 2 \frac{\Delta l}{l_0}\right) - \rho \frac{l_0}{A_0} = 2\rho \frac{\Delta l}{A_0} = 2R_0 \frac{\Delta l}{l_0}$$

Il legame resistenza-lunghezza nella documentazione degli estensimetri è espresso dal *gain factor* GF:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

Nella maggior parte dei casi GF vale circa 2, tuttavia esistono estensimetri realizzati con apposite leghe metalliche per i quali può essere anche significativamente maggiore. Valori più elevati di GF consentono di ottenere maggiore sensibilità della catena di misura. Gli estensimetri possono essere applicati in vari modi all'elemento deformabile; usualmente sono fissati direttamente alla sua superficie mediante appositi mastici che assicurano la stabilità del contatto.

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di accelerazione

Gli accelerometri in commercio sono costruiti sulla base di diversi principi fisici di misura; molti di essi sono costituiti da un contenitore, che viene fissato all'elemento meccanico di cui si vuole misurare l'accelerazione. All'interno di tale contenitore è presente una massa, detta massa sismica, collegata allo stesso contenitore mediante una molla. La posizione della massa relativamente al contenitore è, in un'opportuna banda di frequenze, proporzionale all'accelerazione del contenitore. La misura dell'accelerazione si ottiene quindi attraverso la misura della posizione relativa della massa rispetto al contenitore. Gli accelerometri a massa sismica sono classificati in base al metodo di misura della posizione relativa della massa. Gli accelerometri, inclusa l'elettronica di condizionamento, sono di solito oggetti di piccole dimensioni, facilmente fissabili alle parti meccaniche sottoposte alla misura.

Grande importanza e diffusione hanno acquisito gli accelerometri MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), in cui la struttura meccanica, costituita dalla massa sismica, dal suo ancoraggio elastico e dal dispositivo di misura della posizione relativa massa-contenitore sono realizzati in scala micrometrica in cristalli di silicio. Il dispositivo di misura è di tipo capacitivo: è realizzato mediante una o più capacità i cui valori dipendono dalla posizione della massa. Gli accelerometri

ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di accelerazione

MEMS a uno, due e tre assi, cioè che rilevano rispettivamente uno, due o tre componenti dell'accelerazione rispetto ad assi ortogonali, hanno l'aspetto e le dimensioni di un piccolo circuito integrato. Essi includono l'elettronica di condizionamento necessaria a fornire in uscita segnali analogici di alto livello proporzionali all'accelerazione, o addirittura i campioni di accelerazione su una porta seriale ad alta velocità.

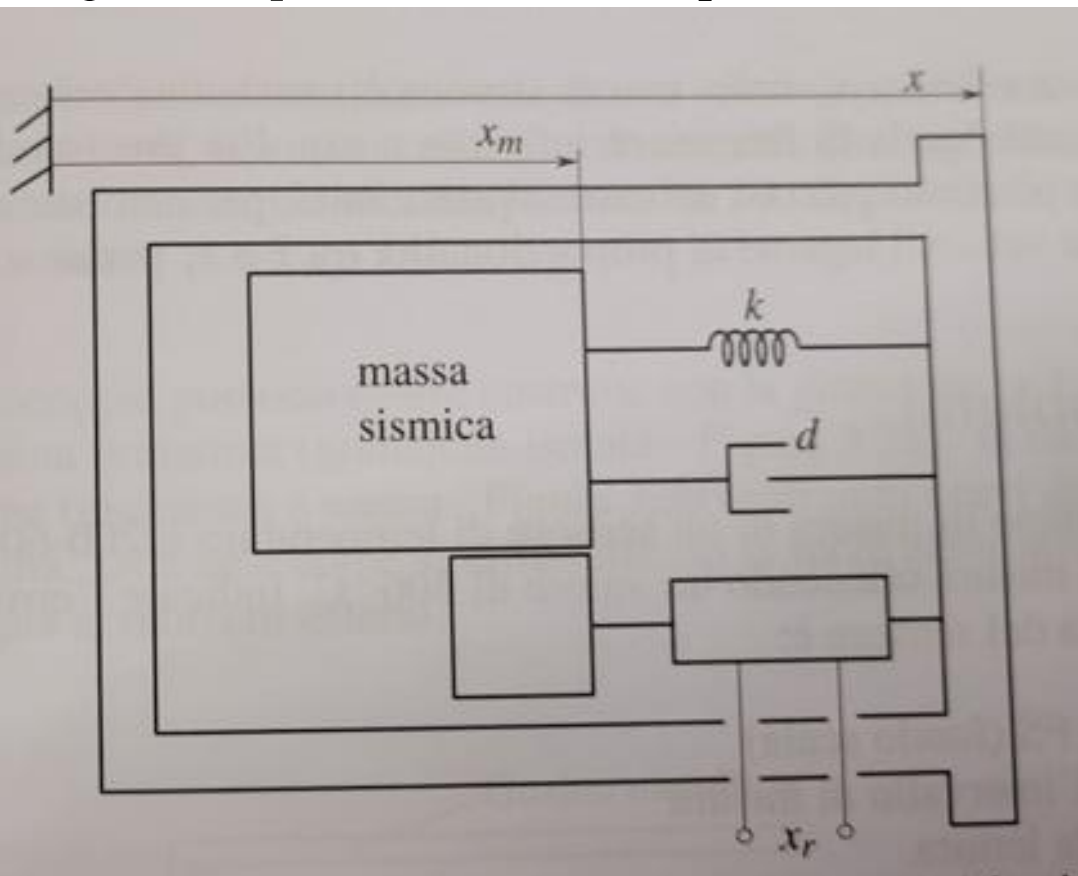
ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di accelerazione

Il legame tra l'accelerazione del contenitore e la posizione relativa della massa si può ricavare utilizzando la legge di Newton ed esprimendo il legame forza deformazione sulla molla con la legge lineare di Hooke. Se si schematizza l'accelerometro come nella figura, l'equazione di Newton per la massa sismica è la seguente:

$$m\ddot{x}_m(t) = f_s(t) + f_d(t)$$

dove m è la massa e x_m è la posizione assoluta, da intendersi come la posizione relativa ad un riferimento esterno fisso, della massa sismica.



ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di accelerazione

f_s e f_d sono le forze che esprimono l'azione della molla e dello smorzatore viscoso sulla massa, rispettivamente:

$$f_s(t) = k(x(t) - x_m(t))$$

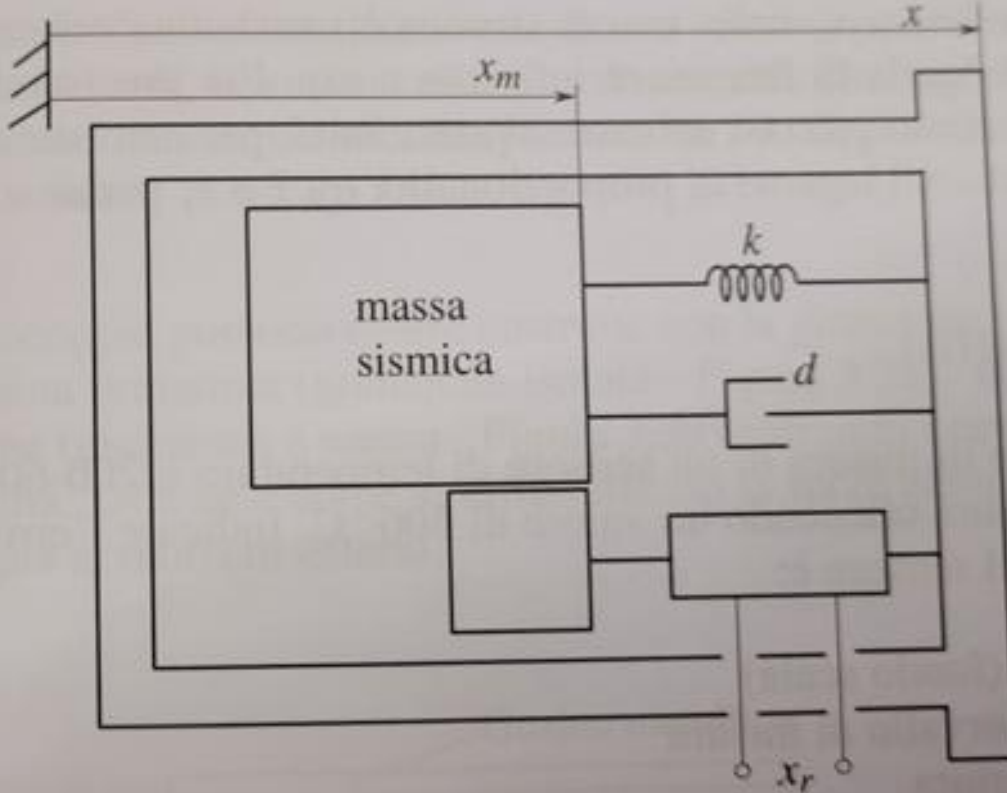
$$f_d(t) = d(\dot{x}(t) - \dot{x}_m(t))$$

dove k è la costante elastica della molla, d è il coefficiente di attrito viscoso e x è la posizione assoluta del contenitore. Definendo

$$x_r(t) = x(t) - x_m(t)$$

e sostituendo nell'equazione della slide precedente si ottiene:

$$m\ddot{x}_m(t) = kx_r(t) + d\dot{x}_r(t)$$



ELEMENTI DI SENSORISTICA E ATTUAZIONE

Sensori di accelerazione

da cui, aggiungendo e sottraendo il termine $m\ddot{x}(t)$, si ottiene:

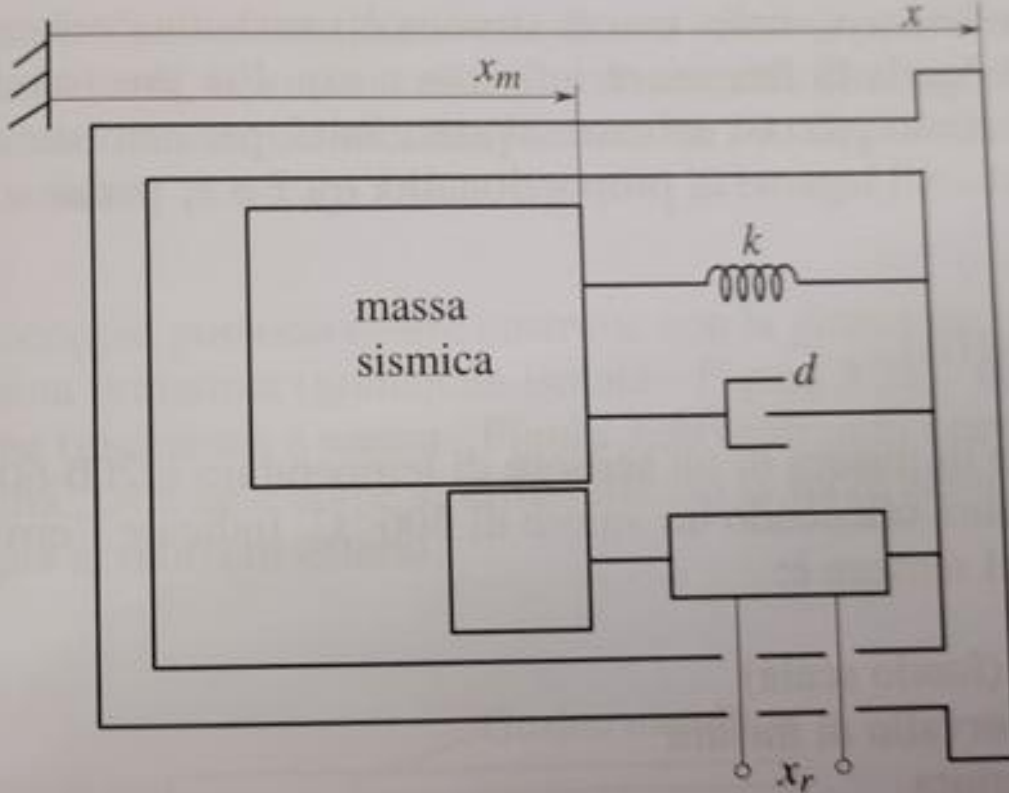
$$m\ddot{x}_r(t) + d\dot{x}_r(t) + kx_r(t) = m\ddot{x}(t)$$

Si può concludere che il legame dinamico tra l'accelerazione oggetto di misura e la posizione relativa della massa sismica è del secondo ordine ed è esprimibile dalla

funzione di trasferimento:

$$\frac{X_r(s)}{\ddot{X}(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{d}{m}s + \frac{k}{m}}$$

Tale funzione di trasferimento mostra che la posizione relativa x_r della massa sismica è una misura dell'accelerazione \ddot{x} .



Riferimenti Bibliografici

- [1] Fraden, J. (2016). Handbook of Modern Sensors. Springer Cham. ISBN: 978-3-319-19302-1
- [2] Magnani, G., Ferretti, G., Rocco, P. (2007). Tecnologie dei sistemi di controllo. McGraw-Hill Education. ISBN-10: 8838663211