

Il tocco delicato

I robot industriali sono convenienti per l'assemblaggio di precisione e per le attività di prelievo/imballaggio ad alta velocità. Con miglioramenti nelle funzionalità, come per esempio la visione artificiale, ogni nuova generazione offre capacità di manipolazione e flessibilità sempre più simili a quelle umane. Un senso del tatto affidabile ed economico ora consente a questi robot di maneggiare oggetti fragili per svolgere una varietà ancora più ampia di compiti e per interagire in modo più sicuro con gli esseri umani



Foto fonte Shutterstock

Questa tecnologia è disponibile in commercio ed è già utilizzata nelle pinze robotizzate multimodali intelligenti. Tuttavia, la telecamera necessita di una matrice di pixel di dimensioni considerevoli e la trasmissione dati alla velocità video, necessaria per l'analisi, richiede una larghezza di banda e una potenza significativa per la comunicazione. Una soluzione diversa di tipo ottico ovvia ad alcune di queste criticità utilizzando un quadrante di fotodiodi rilevatori al posto di un'intera fotocamera. Una sorgente luminosa proietta una luce in una cupola elastica dall'interno e i rivelatori misurano la deformazione della cupola provocata dalle forze di contatto. Tuttavia, il consumo energetico è di parecchie volte superiore rispetto a quello dei tipici magnetometri 3D, che possono ancora fornire un'alternativa più semplice ed efficiente. In tali sensori magnetici, un magnete è incorporato in un materiale elastomerico simile a quello utilizzato nel sistema basato su fotocamera. Un magnetometro montato posteriormente fornisce il rilevamento della forza 3D misurando la variazione del campo magnetico generata dallo spostamento del magnete quando l'elastomero si deforma. Molti di questi sensori sono stati provati utilizzando un magnetometro a singola uscita, che può essere immaginato come un pixel tattile, o 'taxel'. I ricercatori hanno realizzato diverse configurazioni, che vanno da quelle semplici a singolo pixel e dalle matrici 2x2, a una pelle magnetica continua di 15 mm² composta da microparticelle magnetiche. I sensori di forza magnetica su singolo pixel di questo tipo hanno raggiunto una risoluzione al di sotto di 1 mm combinando il sensore con la magnetizzazione sinusoidale di una pellicola

flessibile e tecniche di apprendimento approfondito. I sensori magnetici qui citati hanno utilizzato il magnetometro su singolo pixel MLX90393 di Melexis. Mentre i vantaggi del rilevamento magnetico includono un consumo di potenza relativamente basso e un sovraccarico minimo di elaborazione e comunicazione, il rilevamento su singolo pixel è vulnerabile alle interferenze dei campi magnetici esterni. L'uscita del magnetometro può essere distorta da effetti non correlati nelle vicinanze, come l'attivazione di un motore elettrico, la presenza di altri magneti o variazioni del campo magnetico terrestre. Un sensore di forza magnetica con più pixel vicini all'interno dello stesso package di circuiti integrati (IC) (figura 1) è in grado di assicurare l'immunità ai campi parassiti consentendo la misura differenziale.

Un prototipo di sensore

Il sensore di spostamento lineare MLX90372 fornisce una comoda piattaforma per provare il principio di rilevamento gradiometrico. Questo sensore di solito fornisce lo spostamento angolare lungo un arco. Tuttavia, la configurazione del dispositivo in modalità test consente l'accesso diretto alle letture magnetiche grezze dei singoli pixel dalla memoria. Il sensore è alloggiato in un package TSSOP standard da 5x4,3x0,9 mm e contiene due die Cmos affiancati, con due pixel per die. Di conseguenza, questo singolo componente compatto contiene quattro pixel magnetici posti a circa 2 mm di distanza che consentono di misurare il gradiente del campo magnetico. Ogni pixel rileva la componente normale del campo Bz e la componente Bx nel piano.

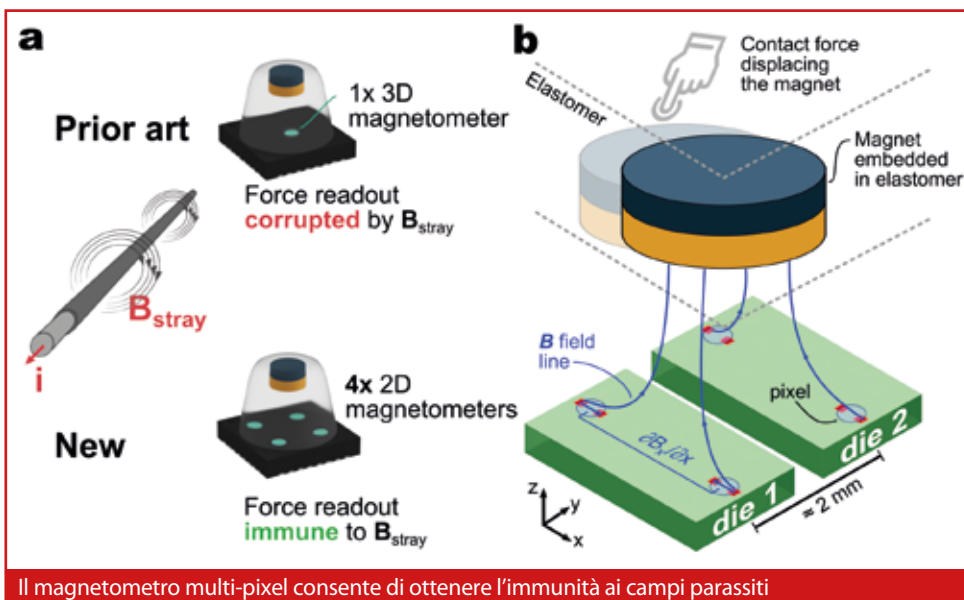
Sono state considerate diverse tecniche per introdurre il rilevamento tattile nei robot. Queste ultime includono sensori a metallo liquido, che misurano la resistenza di un metallo liquido che scorre nei canali microfluidici, la quale è modulata da forze esterne. Sebbene questo tipo di sensore possa essere incorporato tutto intorno alla punta delle dita del robot, esso non misura la forza 3D localizzata. Per contro, le forze distribuite sono mappate in base a una variazione di resistenza. Un gruppo di sensori di questo tipo è in grado di rilevare una sagoma. Di conseguenza questa tecnica viene utilizzata principalmente in attività di classificazione specializzate dopo una fase di apprendimento dedicata. Un altro approccio utilizza una fotocamera ottica di fascia alta per misurare la deformazione di un materiale elastomerico incorporato o che ricopre le superfici di presa.

Sulla parte superiore del package del circuito integrato è fissato un elastomero morbido che contiene un disco magnetico incorporato con magnetizzazione assiale. L'uso di un campione di elastomero di forma cilindrica minimizza l'inclinazione del magnete e presenta una superficie conforme. L'applicazione della forza di contatto all'elastomero sposta il magnete, il quale modula la disposizione del campo magnetico. Ciascuno dei quattro pixel magnetici percepisce questo spostamento e quindi è in grado di rilevare gli effetti delle forze normali e laterali. Per uno spostamento normale del magnete la componente gradiometrica $\partial B_x/\partial x$ è la più influenzata. Per contro, per uno spostamento laterale, l'impatto è principalmente sulla componente gradiometrica $\partial B_z/\partial x$.

Si noti che il sensore misura solo lo spostamento del magnete. La connessione tra spostamento e forza applicata dipende da altri fattori e richiede ulteriori calibrazioni e calcoli. La dimensione del magnete, la durezza dell'elastomero e il diametro del cilindro dell'elastomero influenzano tutti l'ampiezza dell'uscita del sensore quando viene applicata una forza. Un magnete più grande e più potente incrementa il rapporto segnale-rumore (SNR) con un impatto minimo sulla forza a fondo scala. Un elastomero più duro consente di ottenere una forza a fondo scala maggiore. Tuttavia, a parità di forza applicata, lo spostamento del magnete sarà minore rispetto a un materiale più 'morbido'. Quindi, aumentando la durezza si riduce anche la variazione del segnale magnetico, e di conseguenza il rapporto segnale rumore. Infine, il diametro dell'elastomero funge da fattore di scala tra la forza complessiva e la pressione localizzata appena al di sopra del magnete. Un diametro maggiore distribuisce la forza su un'area più estesa riducendo così il rapporto segnale rumore, supportando al contempo una forza a fondo scala maggiore.

Elaborazione e inferenza di segnale

La figura 2 mostra lo schema a blocchi funzionale della catena di segnale. L'elaborazione del segnale viene eseguita fuori dal chip e ha inizio ridimensionando gli otto segnali di uscita digitali del chip per correggere la perdita di sensibilità dell'effetto Hall con l'aumento della temperatura ($-0,5\%/^{\circ}\text{C}$). I campi magnetici parassiti vengono quindi rimossi utilizzando combinazioni di componenti di campo. Innanzitutto viene sottratta la media del campo B_x e del



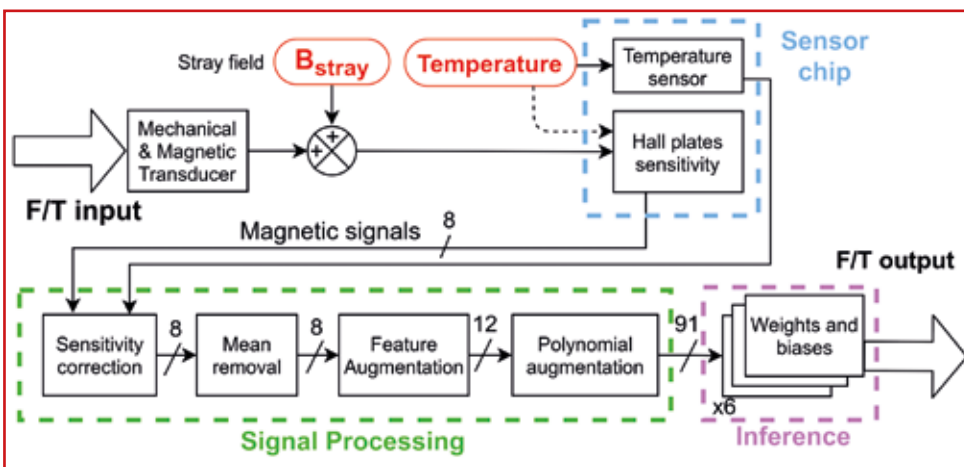
Il magnetometro multi-pixel consente di ottenere l'immunità ai campi parassiti

campo B_z , lasciando i termini che sono correlati al gradiente del campo magnetico. Nel concreto, l'algoritmo del sensore di forza elabora le differenze di campo magnetico all'interno dei due die. Il blocco di miglioramento delle funzionalità calcola il modulo di $\sqrt{(B_x^2 + B_z^2)}$ in ciascun pixel di misura, e produce un segnale vettoriale a 12 dimensioni ($B_x, B_z, B_{\text{norm}}$) per ciascun pixel. L'ultima fase genera un nuovo vettore contenente tutte le combinazioni polinomiali del secondo ordine del vettore a 12 dimensioni, inclusi i termini di interazione. Questo produce un segnale vettoriale di dimensione 91. Infine, la fase di inferenza calcola i valori di forza e coppia planare a partire dal segnale vettoriale utilizzando una matrice di peso 91×5 . I pesi sono stati ottenuti attraverso una procedura di addestramento che utilizza una

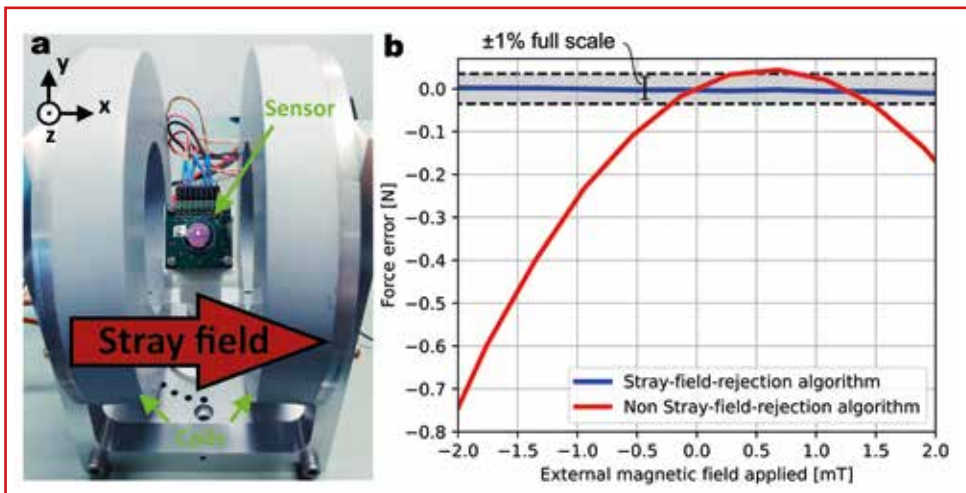
cella di carico di riferimento montata su una piattaforma mobile a 3 assi per sollecitare l'elastomero attraverso l'applicazione di uno spostamento noto. La forza rilevata dalla cella di carico e i corrispondenti segnali magnetici del sensore sono stati misurati e salvati in 13.000 posizioni in un intervallo di spostamento di 1,5 mm di profondità e 1,1 mm di raggio.

Immunità ai campi parassiti (SFI)

Per mostrare come vengono eliminati gli effetti dei campi esterni, il sensore è stato posizionato tra due bobine di Helmholtz che generano $\pm 2\text{ mT}$ (figura 3a). Un campo di forza equivalente può essere rilevato a circa 3 cm di distanza dai comuni elettrodomestici. La forza misurata dal sensore utilizzando il concetto gradiometrico è mostrata nella figura 3b (curva blu), ed evidenzia



Sensore multi-pixel ed elaborazione del segnale off-chip



In figura a: impostazione sperimentale. In figura b: risultati che confermano l'immunità ai campi parassiti

che l'errore prodotto dal campo parassita è limitato allo 0,3% del fondo scala. Il sensore prototipo è stato quindi riconfigurato per funzionare come un semplice magnetometro senza reiezione del campo parassita, emulando il comportamento dei precedenti sensori su singolo pixel. Il campo parassita si disperde direttamente nel percorso del segnale senza reiezione, producendo errori anche del 20% a -2mT (curva rossa). Quest'ultimo è quasi due ordini di grandezza più grande di quello del sensore gradiometrico.

Integrazione nella mano robotica

Il prototipo del sensore Tactaxis è stato montato su una mano robotica disponibile in commercio. È stato messo a punto un algoritmo di

base per il controllo della forza per permettere alla mano di afferrare delicatamente un palloncino. La figura 4 mostra la configurazione

Il sensore gradiometrico rispetto ad altri sensori magnetici, ottici e piezoelettrici

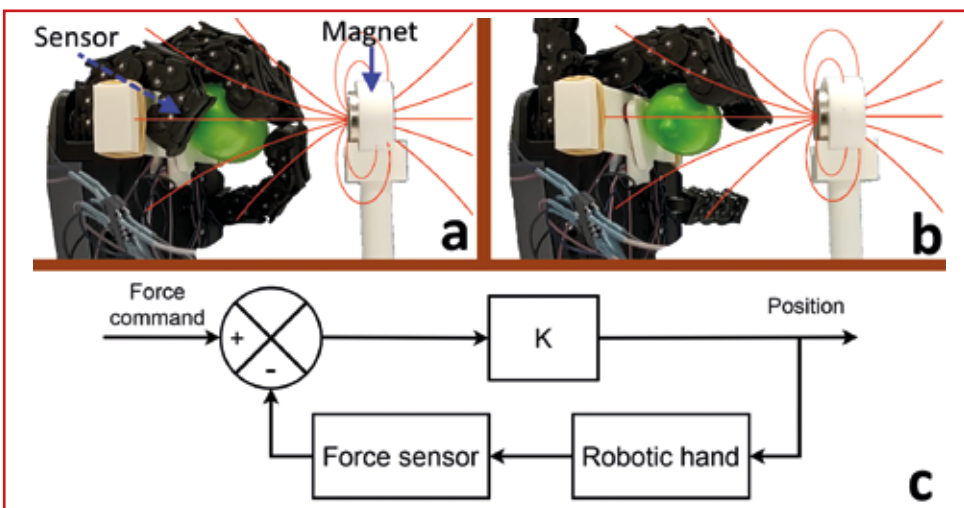
| Tecnologia | Magnetometro gradiometrico multipixel | Magnetico su singolo pixel | Ottica | Piezo-elettrica |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------|-----------------|
| Misura della forza | 3D | 3D | 3D | 1D |
| Fz fondo scala | 3,5 N | 3,5 N | 10N | 5N |
| Risoluzione Fz | 2,7 mN | 2,5 mN | 2,5 mN | n/a |
| Immunità ai campi parassiti | Si | No | Si | Si |

dimostrativa. Utilizzando il sensore come un magnetometro semplice su singolo pixel, la forza è inizialmente ben regolata in assenza di

disturbi prodotti dal campo parassita. L'introduzione di un campo parassita utilizzando un magnete ha danneggiato il sensore di forza, provocando il rilascio o lo schiacciamento del palloncino da parte della mano a seconda della polarità. Quando si utilizza il sensore Tactaxis nella sua modalità multi-pixel corretta, la forza rimane per tutto il tempo regolata perfettamente, e inalterata dal magnete in avvicinamento fino a una distanza di pochi centimetri.

Riepilogo

La tabella confronta le proprietà del sensore multi-pixel Tactaxis con i sensori di forza magnetici, ottici e piezoelettrici su singolo pixel disponibili in commercio. Il sensore magnetico su singolo pixel è compatto ed è in grado di effettuare la misura vettoriale della forza 3D con una risoluzione senza precedenti, in particolare nelle configurazioni multi-sensore. Tuttavia, la sensibilità ai campi parassiti rimane un limite fondamentale. Il sensore ottico è per sua natura



Test del sensore in modalità gradiometrica e su singolo pixel

completamente immune ai campi magnetici parassiti e offre prestazioni simili di misura della forza 3D. Sebbene si adattino perfettamente dal punto di vista funzionale, per l'integrazione nella mano robotica, i componenti ottici discreti ne fanno aumentare il costo. I sensori piezoresistivi hanno il vantaggio di un fattore di forma ridotto, all'incirca delle dimensioni di un package di circuito integrato, e raggiungono prestazioni competitive in termini di risoluzione della forza, ma sono in grado di percepire la forza solo in direzione normale. Per contro, il prototipo del sensore multi-pixel Tactaxis offre le caratteristiche ben note dei sensori magnetici, vale a dire il rilevamento della forza in 3D, la configurabilità, l'economia e la compattezza, con un'immunità superiore ai campi parassiti del mondo reale. Quindi questo concetto di rilevamento gradiometrico ha migliorato la robustezza dei sistemi di misura della forza per le applicazioni robotiche.