

# Capitolo 8

## Componenti dei Robot

Gianmauro Fontana, Claudia Pagano e Marcello Valori

### 8.1 Introduzione

La disponibilità di tecnologie digitali, sia in termini di hardware (sensori, alte capacità di calcolo, PLC, ecc.) che di software (analisi di grandi quantità di dati, intelligenza artificiale, ecc.), consente la realizzazione di fabbriche intelligenti avanzate, basate sullo sviluppo sinergico e la convergenza delle tecnologie informatiche, dell'informazione e della comunicazione (ICT) e della scienza e delle tecnologie manifatturiere. In una fabbrica intelligente, enormi quantità di informazioni (come ad esempio consumi energetici, parametri di processo, stato delle macchine) vengono raccolte in tempo reale dai diversi processi e dalle diverse macchine operatrici. Successivamente, questi dati vengono integrati nel sistema informativo e analizzati al fine di migliorare la qualità e l'efficienza del sistema produttivo. I sistemi di produzione e di informazione sono costantemente sincronizzati in modo da ridurre al minimo i tempi di risposta agli imprevisti.

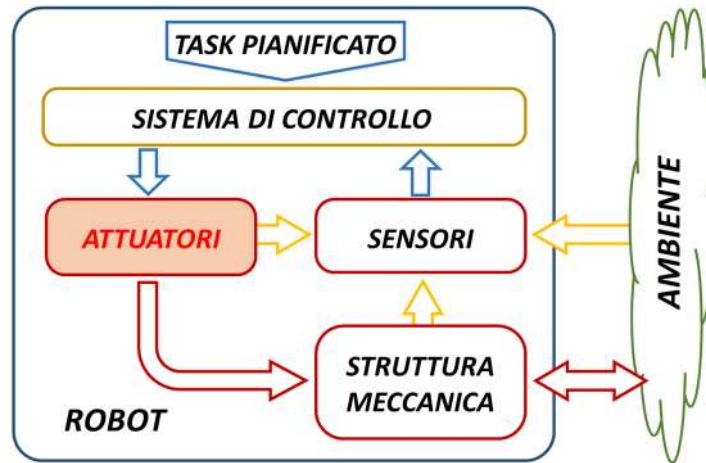
Un robot è una macchina complessa composta da diversi sottosistemi che hanno funzioni differenti, quali la struttura meccanica, gli attuatori, i sensori e il sistema di controllo. Considerando il robot come una scatola nera, l'energia in ingresso, opportunamente modulata dai comandi in input, viene tradotta in un movimento coordinato delle parti meccaniche. Per svolgere questo compito, l'azione dell'attuatore è governata dal sistema di controllo, che può modificare in tempo reale tale azione combinando i segnali provenienti dai sensori con i task pianificati.

Uno schema del processo è illustrato in Figura 8.1-1.

---

G. Fontana, C. Pagano(✉), M. Valori  
Istituto di Tecnologie e Sistemi Industriali Intelligenti per la Produzione Avanzata, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano, Italia  
e-mail: claudia.pagano@stiima.cnr.it

© Gli Autori 2020  
J.C. Chaplin et al. (ed), *Produzione Digitale per PMI*



**Figura 8.1-1** Diagramma a blocchi dei componenti di un robot.

Questo capitolo è incentrato sul principio di base e avanzati dei sistemi di sensorizzazione e attuazione dei robot, che consentono il monitoraggio e il controllo del sistema fisico alla base di una fabbrica intelligente. I sensori sono discussi anche nella sezione 9.2 del capitolo 9 nel contesto delle digital twins; tuttavia, svolgono un ruolo essenziale nei sistemi robotici, quindi una discussione dettagliata nel contesto della robotica è fornita nei prossimi paragrafi.

## 8.2 Sensori

I sensori di un robot sono i componenti incaricati di raccogliere informazioni sullo stato interno del robot e sulle caratteristiche dell'ambiente circostante; la consapevolezza del proprio stato e dell'intorno è fondamentale affinché il robot sia in grado di svolgere i compiti assegnati. I sensori possono essere paragonati ai sensi del robot. Essi possono fornire al robot informazioni diverse in base alle operazioni che deve effettuare; vengono utilizzati diversi tipi di sensori in grado di misurare diverse quantità fisiche. Ogni volta che le informazioni del sensore vengono acquisite, il sistema di controllo del robot le interpreta e agisce di conseguenza per eseguire il suo compito.

I sensori rientrano in due categorie:

- *Sensori Interni*: misurano i valori fisici interni al sistema come la posizione, la velocità, l'accelerazione, le forze, la coppia dei giunti del robot e l'inerzia della struttura cinematica (braccia del robot). Sulla base di queste misurazioni il sistema di controllo controlla gli attuatori dei giunti del robot per fargli eseguire correttamente e con precisione il movimento desiderato.

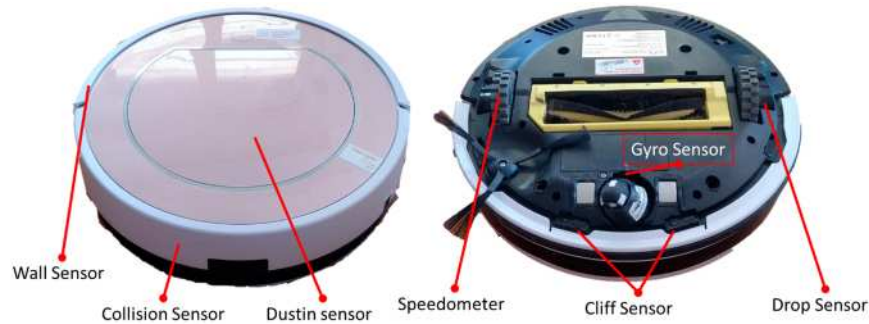


Figura 8.2-1 Vista superiore e inferiore di un'aspirapolvere autonomo con sensori interni (sensore giroscopico, tachimetro, vacuometro) ed esterni (sensore quantità di polvere, rilevatore di presenza gradino, sensore di distanza ad infrarossi, rilevatore di presenza pareti, sensore di collisione, sensore di caduta).

- *Sensori Esterni*: raccolgono informazioni dell'ambiente circostante al robot, come le distanze dagli oggetti manipolati o dal piano di posa o l'intensità della luce, della temperatura o delle forze esercitate durante l'interazione con il mondo esterno.

La Figura 8.2-1 illustra alcuni esempi di entrambe le categorie.

### 8.2.1 Principi di Trasduzione dei Sensori

Ogni sensore si basa su un *principio di trasduzione*; in altre parole la conversione di una determinata forma di energia in un'altra forma di energia. Tipicamente, i sensori convertono l'informazione fisica in elettricità per consentire al robot e al suo sistema di controllo di leggere un segnale elettrico funzione della misurazione di una certa grandezza fisica.

Anche se un sensore potrebbe basarsi su più di un principio di trasduzione, una classificazione basata su questi ultimi [1] può essere utile per identificare i materiali, i costi e il tempo di risposta di un determinato sensore e, quindi, per scegliere il sistema di sensorizzazione più appropriato per l'applicazione in esame.

- *Sensori Meccanici*: funzionano come semplici interruttori: sottoposto ad una certa forza meccanica un contatto chiude il circuito all'interno del sensore e la corrente viene rilevata. Rilasciando il contatto viene aperto il circuito non facendo più passare corrente. Una soglia di forza minima può essere impostata come requisito per la commutazione.
- *Sensori Resistivi*: rilevano cambiamenti di una determinata grandezza fisica misurando i cambiamenti di resistenza del dispositivo. Nella forma più semplice sono costituiti da due elettrodi separati da uno strato di materiale deformabile, la cui resistenza varia a seconda della forma che assume lo strato come reazione a

uno stimolo meccanico. Il sensore resistivo più semplice è il potenziometro che misura la posizione o lo spostamento di un cursore. Altri sensori resistivi includono gli estensimetri (per misurare la forza/coppia, la deformazione o l'accelerazione), fotoresistori (per misurare l'intensità della luce) e termistori/termoresistenze (per misurare la temperatura).

- *Sensori Capacitivi*: sono simili ai resistivi, ma in questo caso il cambiamento, causato da un ingresso esterno, della distanza tra i conduttori (piastre) o, in alternativa, della natura dell'isolante (dielettrico) del sensore (condensatore), ne modifica la capacità. Molti tipi di sensori utilizzano il rilevamento capacitivo, tra cui quelli per rilevare e misurare la prossimità, la pressione, la posizione e lo spostamento, la forza, l'umidità, il livello del fluido e l'accelerazione.
- *Sensori Ottici*: rilevano un cambiamento nell'intensità, nella fase o nella polarizzazione della luce trasmessa o riflessa e la convertono in un segnale elettronico. Non sono influenzati da interferenze elettromagnetiche, sono intrinsecamente sicuri e richiedono meno fili elettrici. Sono per lo più utilizzati come sensori di posizione, che si attivano quando un oggetto interrompe un fascio di luce, come per esempio i sensori fotoelettrici che rilevano la distanza, l'assenza/presenza di un oggetto, oppure come i sensori della fotocamera utilizzati per acquisire immagini dell'ambiente.
- *Sensori a Fibra Ottica*: utilizzano le fibre ottiche non per trasmettere i dati (luce) ma come sensori, per esempio rilevando la deformazione della fibra causata da uno stimolo meccanico esterno e producendo una variazione nell'intensità, fase, polarizzazione, lunghezza d'onda o nel tempo di volo della luce trasmessa. Le fibre ottiche sono per lo più utilizzate come sensori per misurare la deformazione, la temperatura e la pressione.
- *Sensori Piezoelettrici*: si basano sulla proprietà piezoelettrica, ovvero la capacità di alcuni materiali di generare una differenza di potenziale elettrico quando vengono deformati; questi materiali possono essere utilizzati anche come attuatori, ovvero si deformano sottoposti ad un certo potenziale. Sono utilizzati per misurare i cambiamenti di pressione, accelerazione, temperatura e deformazione.

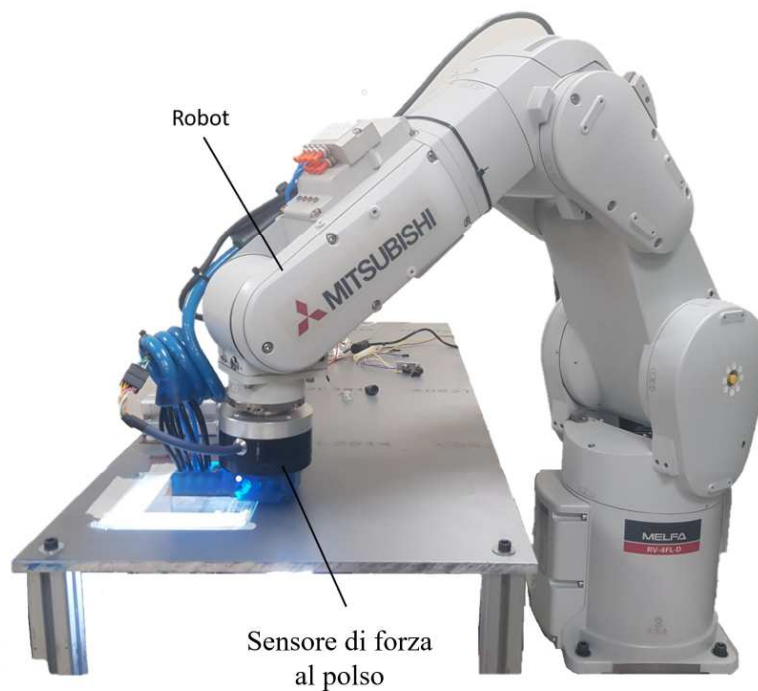
### 8.2.2 Sensori a Contatto

I sensori inoltre possono essere distinti tra quelli *a contatto* e quelli *non a contatto*, a seconda che il sensore debba toccare fisicamente l'oggetto per funzionare, o meno.

I sensori a contatto sono ampiamente utilizzati per evitare gli ostacoli: quando si verifica un contatto fisico tra il robot e l'ambiente esterno il sensore *a contatto* reagisce e attiva il robot per eseguire una determinata operazione, come ad esempio un movimento volto ad evitare il contatto.

I *sensori di forza* possono essere *quantitativi* quando misurano il valore della forza, oppure possono essere *qualitativi* quando il sensore rileva solo se la forza misurata supera un valore di soglia preimpostato.

L'applicazione più comune di questi sensori è quella di valutare le forze o le coppie che vengono applicate durante la manipolazione. Questo obiettivo può essere raggiunto misurando direttamente la forza/coppia sul polso del robot (ovvero il giunto che mantiene l'organo finale) o attraverso i sensori a bordo di tutti i giunti del robot. Nel primo caso (Figura 8.2-2), le forze e le coppie sono misurate mediante l'uso di sensori di forza multi-asse, costituiti principalmente da una struttura meccanica con elementi elastici incorporati, le cui deformazioni vengono misurate. Poiché il comportamento strutturale di questi elementi è ben noto, il carico applicato può essere determinato in funzione della deformazione effettiva. La deformazione può essere quantificata con approcci diversi, ma il più comune si basa sull'utilizzo di *estensimetri*; che, come spiegato nei capitoli precedenti, variano la resistenza elettrica in base alla loro deformazione.



**Figura 8.2-2** Robot antropomorfo con sensore di forza/coppia montato sul polso\*.

I robot più recenti equipaggiano con sensori di forza/coppia le estremità degli organi di presa, al fine di controllare la forza di presa e calcolare i punti di contatto. I sensori utilizzati per raggiungere questo obiettivo includono sensori di forza

---

\* Fonte: <https://eu3a.mitsubishielectric.com/fa/en/products/rbt/robot/items/vertical>

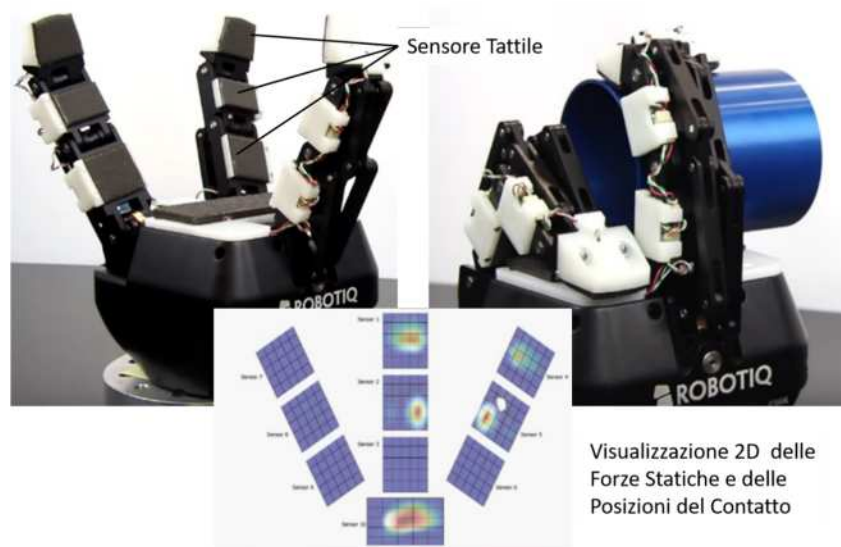
mono-assiali, come estensimetri, sensori piezoelettrici, sensori di pressione, oppure sensori di forza multi-asse come quelli utilizzati sul polso del robot.

I *sensori tattili* consistono in una serie (array) di sensori (e sono quindi a volte denominati sensori array), i cui segnali vengono acquisiti singolarmente per rilevare il contatto fisico, in modo analogo al senso umano del tatto.

Il rilevamento tattile può essere definito come il rilevamento continuo di tutti i vari effetti originati dal contatto tra il robot (di solito l'organo finale oppure l'estremità di quest'ultimo) e un oggetto. Gli effetti più significativi da misurare sono gli sforzi e le forze sulle due superfici a contatto. I sensori tattili sono in grado di misurare le forze variabili di contatto su una certa area con una risoluzione spaziale specifica.

I sensori tattili montati sulle estremità dell'organo di presa permettono al robot di rilevare: la presenza dell'oggetto, la distribuzione della pressione, la forma dell'oggetto, la trama della superficie e la rugosità, la posa dell'oggetto (cioè la posizione e l'orientamento) e le posizioni di contatto e informazioni sullo slittamento dell'oggetto manipolato.

I sensori tattili sono utilizzati sulle estremità dell'organo di presa, come mostrato in Figura 8.2-3, ma possono anche essere montati sulla struttura cinematica del robot.



**Figura 8.2-3** Sensore tattile montato sulle estremità dell'organo di presa dotato di 3 dita Il sensore array è in grado di rilevare la posizione e l'intensità della forza di contatto, come mostrato nella visualizzazione 2D. Elaborazione degli autori da [www.robotiq.com](http://www.robotiq.com).

I sensori tattili tipicamente adottati nella robotica sono sensori array che misurano la pressione del contatto utilizzando la deformazione di un rivestimento (pelle) elastico, montato sulla superficie da sensorizzare. Un esempio di questo tipo di sensore è mostrato in [2]; è un array elastico di sensori di pressione capacitivi basato su una sottile piattaforma interamente elastomerica. In particolare, il sensore è costituito da 16 celle capacitive individuali di misura della pressione per rilevare le informazioni tattili esterne in una configurazione ad array 4x4. Ogni cella capacitiva della pressione è composta da una coppia di elettrodi di CPDMS (Capacitive PolyDiMethylSiloxane - PoliDiMetilSilossano Capacitivo) rivolti uno verso l'altro e divisi da uno strato isolante elastomerico (Ecoflex) per formare un condensatore ad armature parallele. La pressione applicata provoca il cambiamento locale della distanza tra le coppie di CPDMS (dal momento che lo strato Ecoflex è più facilmente deformabile rispetto al CPDMS) e quindi il conseguente cambiamento della capacità, che può essere rilevata per ottenere la pressione e la forza normale applicata.

### 8.2.3 Sensori senza Contatto

I sensori senza contatto sono usati per fornire al robot informazioni sull'ambiente esterno senza la necessità di un contatto fisico.

I *sensori di prossimità* rilevano la presenza di oggetti vicini alla superficie del sensore senza la necessità che ci sia contatto. In robotica questi sensori vengono utilizzati per rilevare e prevenire possibili collisioni tra la struttura cinematica del robot e l'ambiente circostante. Questo tipo di sensore risulta necessario se l'oggetto da manipolare è in avvicinamento oppure può causare una collisione indesiderata, in modo da adottare una strategia per evitare le collisioni oppure per arrestare il movimento del robot.

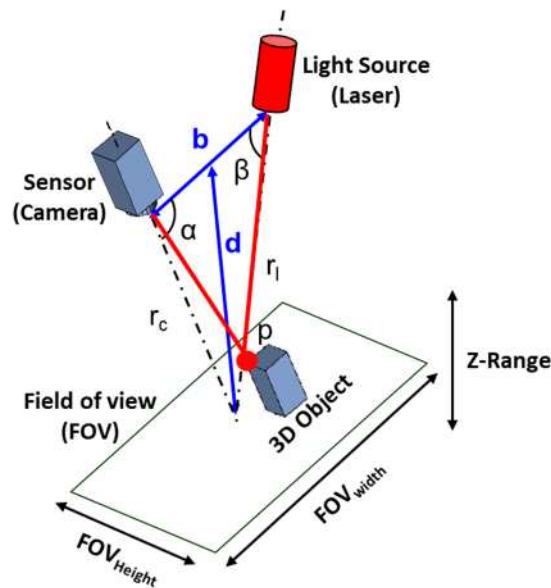
I *sensori range* sono dispositivi in grado di fornire misurazioni precise delle distanze degli oggetti, misurando di solito il divario tra il sensore e la superficie più vicina. Inoltre, consentono la scansione della struttura tridimensionale (3D) dell'ambiente.

In campo robotico, i sensori range sono utili per localizzare gli oggetti all'interno dello spazio di lavoro del robot e spesso forniscono il feedback per lo schema di controllo ad anello chiuso del movimento del robot [3]. Sono utilizzati per la movimentazione del robot, per evitare gli ostacoli e per ricostruire la terza dimensione della scena acquisita con un sistema di visione 2D, come ad esempio una telecamera.

I sensori range più utilizzati si basano su due diversi principi: *triangolazione* o *tempo di volo*.

Il principio di funzionamento della *triangolazione laser* è illustrato in Figura 8.2-4: un raggio laser viene proiettato da una certa posizione sulla superficie da misurare. Il punto di luce (che può essere anche una lama di luce per acquisire contemporaneamente più di un punto) è osservato da un sensore di visione da una seconda posizione. Attraverso le informazioni geometriche della posizione e

dell'orientamenti della sorgente laser rispetto al sensore, è possibile calcolare la posizione 3D del punto illuminato sulla superficie oppure solo la sua distanza dal sensore. Per catturare un'immagine 3D, il sensore di triangolazione laser deve potersi spostare relativamente all'ambiente circostante, eseguendo un processo di scansione della scena. In alternativa, il punto laser può essere rimodellato con lenti o specchi per creare più punti o strisce luminose, permettendo la misurazione contemporaneamente di più punti 3D della scena, senza la necessità di movimentare il sensore.



**Figura 8.2-4** Principio fisico dei sensori a triangolazione: la sorgente laser emette luce, generando un punto illuminato sulla superficie 3D da misurare, e il sensore rileva il punto sul suo piano immagine. Combinando queste informazioni 2D con i parametri geometrici del sistema, è possibile calcolare la posizione 3D del punto illuminato proiettato sulla superficie. Acquisendo tutti i punti della superficie (spostando il sistema di triangolazione) è possibile ricostruire l'intera superficie. I parametri fondamentali del sistema sono la linea di base ( $b$ ) e la distanza di stand-off ( $d$ ). Il primo è la distanza tra i centri ottici della fotocamera e del laser, e influisce sull'intervallo di misura della profondità (asse  $Z$ ), il secondo è la distanza dalla linea di base al piano focale della fotocamera, e influisce sulla risoluzione di misura della profondità.

I sensori range a tempo di volo calcolano la distanza misurando il tempo che un segnale (ad esempio la luce) impiega per compiere il percorso rivelatore - oggetto - sorgente; il rivelatore si trova solitamente vicino alla sorgente. I sensori range laser ed i sonar sono i sensori a tempo di volo più comuni. Il primo

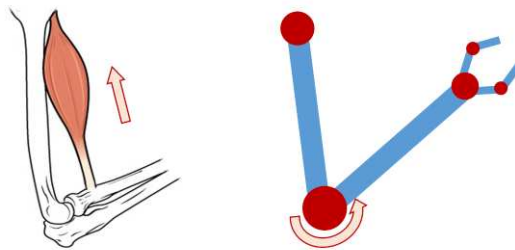


può essere considerato un radar basato sull'emissione e sul rilevamento di luce coerente. Mentre il sonar utilizza impulsi acustici e i loro echi per misurare la distanza di un oggetto e anche la sua posizione 3D. Poiché la velocità della luce e del suono sono costanti note, è possibile misurare la distanza dell'oggetto dal sensore calcolando il tempo di ritardo del segnale da quando è emesso a quando è rilevato.

Anche i sistemi di visione permettono di acquisire informazioni sull'ambiente circostante senza contatto con l'esterno. L'acquisizione di dati basata sulla visione artificiale è un complesso processo di rilevamento costituito dall'estrazione, dalla caratterizzazione e all'interpretazione delle informazioni fornite dalle immagini per identificare gli oggetti nell'ambiente. Un sistema di visione è costituito da una o una serie di lenti (ottica), associate a un sensore di visione che converte le informazioni visive in segnali elettrici. Questi segnali vengono poi analizzati da un digitalizzatore di immagini, chiamato frame grabber, per ottenere un'immagine digitale.

### 8.3 Attuatori

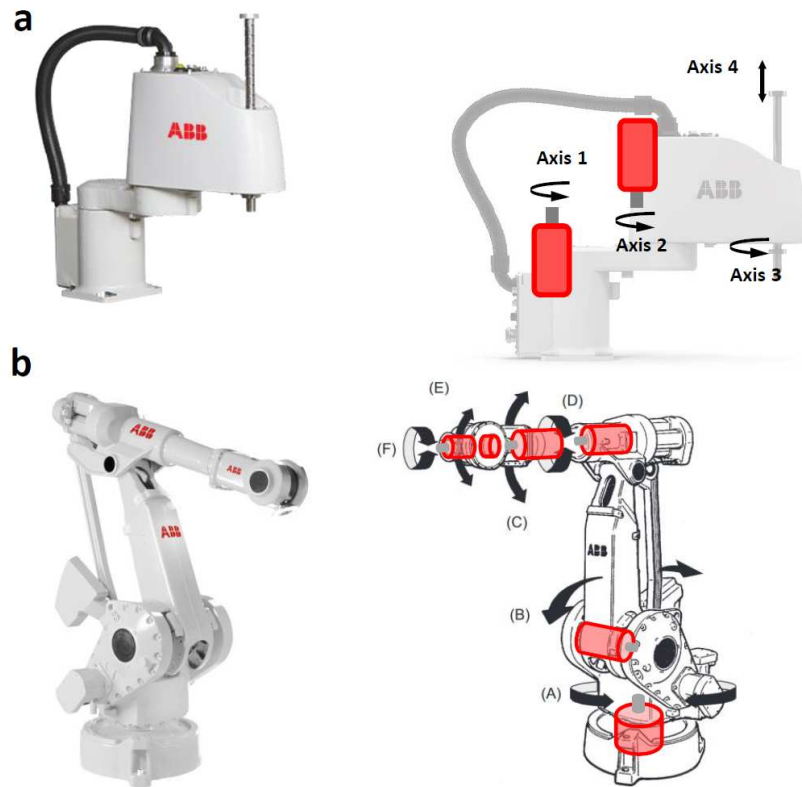
Nel corpo umano, i movimenti sono generati nella corteccia motoria primaria del cervello, tradotti e trasferiti ai muscoli che sono in grado di trasformare l'energia disponibile in movimento meccanico (Figura 8.3-1). Il muscolo appare, quindi, come ciò che contribuisce maggiormente al processo, il "*motore*" che consente il verificarsi del movimento. Ma... qual è il muscolo di un robot?



**Figura 8.3-1** Muscoli umani\* vs attuatori dei robot. Diritti di immagine: OpenStax.

Nei robot questo ruolo è svolto dagli *attuatori*, che sono i componenti responsabili del movimento degli elementi rigidi secondo le traiettorie desiderate. Un attuttore converte una forma primaria di energia disponibile in energia meccanica per far funzionare il robot.

\* [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1015\\_Types\\_of\\_Contraction\\_new.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1015_Types_of_Contraction_new.jpg) (partially reported), <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>



**Figura 8.3-2** I quattro assi dell'ABB IRB 910SC (a) vs. i sei assi dell'ABB IRB 6400 (b), con la posizione di alcuni attuatori evidenziata in rosso\*. Diritti di immagine: ABB

Un robot in grado di muovere l'end-effector in qualsiasi configurazione (con il limite del proprio volume di lavoro) è dotato di almeno sei attuatori, ognuno responsabile del movimento lungo/attorno a un singolo asse. Un esempio è il robot mostrato in Figura 8.3-2.

Un attuttore deve essere dimensionato in modo adeguato a supportare carichi e inerzie, nonché per soddisfare i requisiti di prestazione: la modellazione dinamica dei robot permette di realizzare una valutazione precisa delle prestazioni richieste per ogni singolo attuttore, che può essere rappresentato principalmente come la potenza che esso può esercitare.

La *potenza* è un parametro adatto per confrontare diverse forme di energia: come già spiegato, gli attuatori assorbono la potenza che è messa a disposizione da una

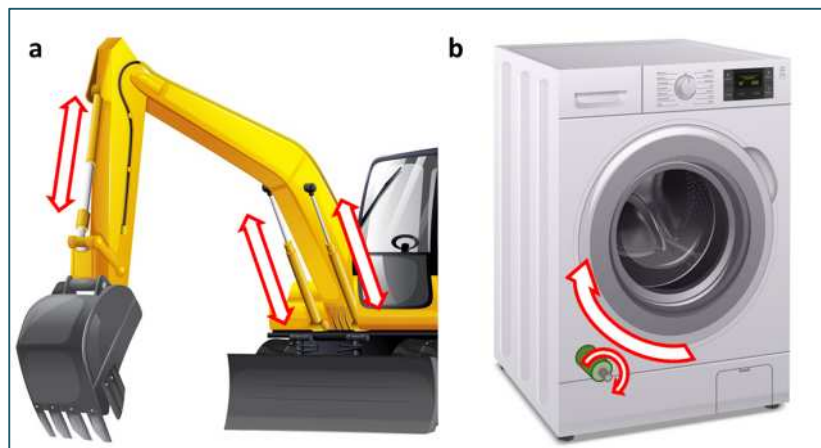
\* <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots>

certa fonte e forniscono potenza meccanica a link e giunti. Anche se la potenza effettiva è il parametro appropriato per identificare la dimensione di un attuatore, essa non è sufficiente per definire completamente un'unità di attuazione. Vi sono, infatti, altre caratteristiche che definiscono le prestazioni richieste per spostare correttamente una struttura meccanica e che identificano accuratamente l'unità di attuazione più appropriata.

### 8.3.1 Tipo di Moto

Una prima classificazione degli attuatori può essere definita sulla base del *tipo di moto generato* dall'azione dell'attuatore:

- *Attuatori Lineari*: forniscono il moto lungo una direzione lineare e la loro geometria limita la corsa; un esempio al di fuori del mondo della robotica è rappresentato dagli attuatori idraulici di macchine operatrici per lavori pesanti (Figura 8.3-3a).
- *Attuatori Rotativi*: possono ruotare, di solito coprendo  $360^\circ$  ed eseguendo più giri; i limiti di posizione sono, invece, imposti dalla struttura del robot. Con le opportune differenze, un esempio tratto dalla nostra esperienza quotidiana è rappresentato dal motore che aziona una lavatrice (Figura 8.3-3b).



**Figura 8.3-3** Esempi di attuatori in altri campi di applicazione: a) cilindri idraulici di un escavatore (lineari) e b) motore elettrico di una lavatrice (rotativo)\*.

La potenza meccanica si ottiene come combinazione di *forza* e *velocità*. Questo vale per tutti i sistemi meccanici, indipendentemente dal tipo di movimento: per gli attuatori lineari, la potenza è espressa come  $P=F \cdot V$ , mentre per gli attuatori rotativi

---

\* Immagini prodotte da Freepik

essa è pari a  $P=T \cdot \omega$ , con la *coppia* ( $T$ ) che rappresenta una forma di “forza di rotazione” e  $\omega$  che è la velocità angolare. Ne consegue che una definizione più dettagliata delle prestazioni dell’attuatore deve includere non solo la potenza, ma anche la forza (o coppia) e la velocità (lineare o angolare) massima. Per questo motivo, specifici riduttori di velocità a ingranaggi vengono solitamente installati in un robot a valle di un attuatore al fine di modulare correttamente forza e velocità e soddisfare i requisiti della specifica implementazione.

I robot industriali hanno talvolta strutture complesse, che sono definite tenendo conto di caratteristiche dinamiche come la destrezza in alcune zone dello spazio di lavoro e la distribuzione di carichi/inerzie. Per questo motivo, gli attuatori, che possono essere pesanti e voluminosi, spesso non possono essere installati nelle immediate vicinanze dei giunti da controllare. Ciò implica la necessità di avere sistemi in grado di trasferire la potenza dagli attuatori ai giunti e porta all’implementazione di diverse strategie di trasmissione del moto, basate su cinghie, ingranaggi e/o altri sistemi meccanici. In base a queste considerazioni, un’unità di attuazione può essere definita in generale come composta da un attuatore (il motore), riduttori a ingranaggi e una trasmissione meccanica, come rappresentato in Figura 8.3-4.



**Figura 8.3-4** Esempi di motore elettrico, riduttore epicicloidale e trasmissione a cinghia di un robot\*. Diritti di immagine: Dr. Arun Dayal Udai.

### 8.3.2 Alimentazione

Una seconda fondamentale classificazione degli attuatori è basata sulla fonte di potenza che viene impiegata per generare il movimento meccanico:

- *Attuatori Elettrici*: rappresentano la scelta più comune per i robot industriali e si basano principalmente sulla corrente continua, sebbene ne siano disponibili anche versioni basate sulla corrente alternata. I più diffusi sono attuatori rotativi ma esistono anche modelli lineari. Gli attuatori elettrici (o motori elettrici) sono caratterizzati da elevata compattezza e affidabilità. Per questa ragione, e considerando la disponibilità di elettricità in tutti gli impianti, questa è

\* <https://www.youtube.com/watch?v=iRKDfknqtbtc> (Proprietà di Dr. Arun Dayal Udai, arun\_udai@yahoo.com)

effettivamente la tipologia di attuatori più diffusa nel settore della robotica. Gli attuatori elettrici generano velocità estremamente elevate e, di conseguenza, sono sempre accoppiati a riduttori specifici.

- **Attuatori Idraulici:** usano l'olio come fluido incompressibile, gli attuatori idraulici di solito forniscono un moto lineare, sebbene siano disponibili modelli rotativi. Questi attuatori sono molto potenti, ma richiedono manutenzione e circuiti dedicati per la circolazione dell'olio. la loro implementazione nei robot è diffusa, specialmente nei modelli "a gambe".
- **Attuatori Pneumatici:** rappresentano la versione azionata da aria compressa degli attuatori idraulici. L'uso di aria compressa non consente di garantire una rigidità sufficiente per carichi utili elevati; tuttavia, gli attuatori pneumatici consentono di eseguire con estrema semplicità una serie di operazioni di fabbricazione (spingere, tirare, sollevare, posizionare, stringere, miscelare, tagliare, punzonare, ecc.), anche se non è possibile avere un controllo di estrema precisione. Sono principalmente lineari e implementati in traiettorie del tipo *stop-to-stop*, come nel caso delle applicazioni *pick-and-place*.

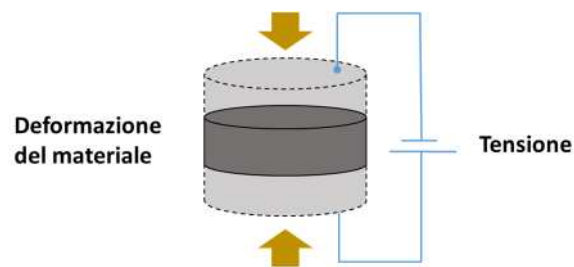
I principali vantaggi e svantaggi dei diversi tipi di alimentazione dell'attuatore sono presentati schematicamente in Figura 8.3-5.

Alimentazione	Vantaggi principali	Svantaggi principali
Attuatori elettrici	Velocità e precisione Controllo semplice e, quindi, possibilità di implementare algoritmi di controllo complessi Basso costo Dimensioni e peso ridotti	I riduttori a ingranaggi sono fonte di perdite meccaniche e imprecisioni Potenza disponibile limitata
Attuatori idraulici	Prestazioni elevate (forza/velocità) Non-reversibilità intrinseca: non richiedono energia per mantenere la posizione	Rapporto costi/prestazioni svantaggioso Rumore e perdite Ingombro elevato
Attuatori pneumatici	Basso costo Alta velocità Nessun problema di tossicità in caso di perdite	Precisione limitata (dovuta alle caratteristiche del fluido) Rumore (minore che nel caso degli attuatori idraulici) Necessità di filtri dell'aria e manutenzione

**Figura 8.3-5** Principali vantaggi e svantaggi dei diversi dei più comuni attuatori.

Sebbene gli attuatori sopra elencati rappresentino i principali attuatori utilizzati nella robotica industriale, vale la pena menzionare altri attuatori che sfruttano particolari principi fisici.

Gli *attuatori piezoelettrici* utilizzano determinati materiali cristallini, come il quarzo, che modificano la loro configurazione e si deformano fisicamente quando viene applicata una tensione al materiale (Figura 8.3-6). Questa deformazione, proporzionale al campo elettrico, è molto piccola ma anche molto precisa, consentendo un posizionamento nell'ordine dei micrometri. Ne consegue che si può prevedere l'applicazione degli attuatori piezoelettrici nell'assemblaggio di prodotti in scala micro. Vale la pena notare che il principio di funzionamento di questi attuatori è reversibile ed essi possono essere utilizzati come sensori di posizionamento, misurando la tensione applicata.



**Figura 8.3-6** Principio di funzionamento di un attuatore piezoelettrico.

Le *leghe a memoria di forma* (*Shape Memory Alloys - SMA*) sono leghe metalliche in grado di "ricordare" la loro posizione originale. Per ripristinare la configurazione iniziale è sufficiente riscaldare il materiale applicando una corrente elettrica (sfruttando l'effetto Joule). Le forze generate sono considerevoli. Attualmente, l'implementazione di queste leghe come attuatori è ancora sperimentale ed è in fase di studio in diversi campi che hanno requisiti geometrici stringenti, grazie al notevole vantaggio di poter esercitare una forza senza utilizzare attuatori voluminosi.

## 8.4 Microrobotica

I risultati della miniaturizzazione si riscontrano in maniera sempre più evidente nella vita di tutti i giorni; dispositivi miniaturizzati sono presenti in un numero crescente di applicazioni, in particolare dispositivi elettronici - smartphone, laptop, sensori nei veicoli e articoli per la casa - ma anche sonde biologiche, sistemi medici e dispositivi militari. Nella robotica questa tendenza porta a soluzioni innovative in un grande varietà di settori applicativi, come la manutenzione e l'ispezione nell'industria, la chirurgia non invasiva in medicina e le micro operazioni in biologia. In virtù delle loro dimensioni ridotte, i robot miniaturizzati possono

eseguire compiti in spazi limitati non accessibili all'uomo. La microrobotica è ancora un argomento di ricerca molto promettente, anche se sono già stati sviluppati diversi prototipi di ricerca [4][5][6][7]. La microrobotica è spesso inclusa come parte del portafoglio tecnologico di Industria 4.0, che include anche sensori, droni, realtà virtuale e aumentata e produzione additiva, in grado di affrontare le sfide degli obiettivi di sviluppo sostenibile istituiti dalle Nazioni Unite [8].

Nella letteratura il termine "*microrobot*" si riferisce a diversi tipi di dispositivi robotici, infatti è usato in maniera molto generica a *tutti i tipi di robot che eseguono compiti nel micromondo*. Tuttavia, il termine *microrobot* è più correttamente utilizzato per *robot in miniatura la cui dimensione complessiva è dell'ordine di pochi centimetri cubi*. La logica alla base di questa ampia definizione del termine è che entrambe le categorie condividono alcune delle principali sfide: fisica non intuitiva, difficoltà nella fabbricazione e nell'osservazione.

Analogamente ai robot convenzionali, i microrobot sono sistemi integrati costituiti da sensori, attuatori e controllore. L'aspetto più problematico nello sviluppo di microrobot è la fabbricazione di microattuatori e microsensori efficienti e stabili. Infatti, i sensori utilizzabili in spazi ridotti spesso non sono molto precisi al punto che la conoscenza dell'ambiente circostante difficilmente è completa rendendo complicato il ruolo del sistema di controllo. L'aspetto più problematico nello sviluppo di microrobot è la fabbricazione di microattuatori e microsensori efficienti e stabili. Infatti, i sensori utilizzabili in spazi ridotti spesso non sono molto precisi al punto che la conoscenza dell'ambiente circostante difficilmente è completa rendendo complicato il ruolo del sistema di controllo. Inoltre, i *microcontrollori* di solito non hanno la potenza di elaborazione e la memoria solitamente disponibili in caso di dimensioni maggiori e si preferiscono metodi di controllo semplificati. La meccanica è intrinsecamente più robusta alla microscala [9]; questo è un vantaggio per i microrobot in cui è possibile risparmiare spazio per componenti più critici.

L'assemblaggio di piccole componenti è un altro problema rilevante per i microrobot. Gli effetti di scala e la conseguente predominanza delle forze superficiali influenzano il funzionamento di un micromanipolatore [10]. In particolare, la fase di rilascio di una manipolazione è molto critica e sono state studiate e testate diverse strategie. Per quanto riguarda la microproduzione, ogni metodo presenta vantaggi e svantaggi che rendono un metodo più adatto in alcune applicazioni rispetto ad altre.

Tutti questi problemi rendono molto complicato non solo la fabbricazione, ma anche il design dei microrobot. C'è una forte dipendenza tra il controllo e il modello e l'intero sistema, le parti cibernetiche e fisiche devono essere concepite allo stesso tempo e qualsiasi cambiamento in una di esse si riflette in una riprogettazione dell'altro. Ciò rende i microrobot complicati sistemi cyber-fisici, discussi più approfonditamente nel prossimo capitolo.

#### **8.4.1 Alimentazione**

Uno dei principali problemi legati alla miniaturizzazione dei robot è l'energia; a causa, non solo della riduzione dello spazio disponibile sul robot, ma anche per l'aumento delle correnti di dispersione. Pertanto, è essenziale ridurre il consumo di energia; la tensione operativa deve essere la più bassa possibile e l'energia richiesta da tutti i componenti ridotta al minimo.

Le soluzioni più comunemente utilizzate sono batterie e supercondensatori. Le batterie soddisfano le richieste in termini di tensione e durata, ma sono difficili da miniaturizzare. I supercondensatori hanno limiti di tensione più bassi e offrono una densità di energia inferiore, ma correnti più elevate. Inoltre, i supercondensatori possono essere ricaricati e quindi combinati con generatori di energia, come le celle solari. In effetti, le fonti di alimentazione wireless, come la radiofrequenza, le radiazioni elettromagnetiche e la raccolta di energia, sono adatte e spesso vantaggiose grazie alla miniaturizzazione.

#### **8.4.2 Controllo**

Il controllore di un robot deve elaborare le informazioni e generare azioni adeguate. I dispositivi piccoli, come i microrobot, tendono a operare in ambienti meno complessi e limitati e a fare movimenti piccoli e lenti, quindi sarebbe plausibile pensare che richiedano un sistema di controllo più semplice e non molto veloce. Tuttavia, a causa delle dimensioni ridotte dei microrobot, sono ancora difficili da realizzare dei processori da poter installare a bordo dei robot con potenza di calcolo sufficiente.

#### **8.4.3 Sensori**

Al fine di svolgere il suo compito un robot dovrebbe essere dotato di tutti i sensori necessari per percepire l'ambiente circostante. I robot mobili devono essere in grado di rilevare gli ostacoli a una distanza sufficientemente piccola da poterli evitare; quindi sono indispensabili sensori tattili, sensori di distanza e/o sensori di prossimità.

I sensori per microrobot devono avere dimensioni ridotte e il loro consumo energetico ridotto al minimo, pertanto, i tipi di sensori più adatti per i microrobot sono i sensori passivi, che non richiedono energia, o sensori attivi molto semplici. Telecamere e microfoni sono, quindi, molto comuni insieme a misuratori di deformazione che possono essere facilmente ridimensionati. Anche i sensori attivi di prossimità a infrarosso sono molto adatti in quanto semplici da usare, economici e compatti

#### **8.4.4 Attuatori**

L'attuazione è uno dei principali problemi nella progettazione di robot in miniatura. Durante la progettazione di un microrobot la scelta dei principi di attuazione deve raggiungere un compromesso tra capacità di movimento, forza,



frequenza di attuazione, consumo di energia, precisione di controllo, affidabilità, robustezza, capacità di carico, ecc. Figura 8.4-1 elencati i tipi più comuni di attuazione e le loro principali caratteristiche. Ogni soluzione offre vantaggi e svantaggi e nessuna è perfettamente adatta a tutte le applicazioni.

Principio fisico	Attuatore	Spostamento	Rendimento	Velocità di risposta	Tensione
Elettrostatico	Motore rototario elettrostatico	Grande	Basso	Media	Alta
	Motore lineare elettrostatico	Piccolo	Medio	Elevata	Alta
Induzione elettromagnetica	Motore ordinario	Grande	Basso - Medio	Media - Elevata	Bassa
Piezoelasticità	Bimorph	Piccolo	Medio - Alto	Elevata	Alta
Calore	Lega a memoria di forma	Grande	Alto	Bassa - Media	Bassa

**Figura 8.4-1** Caratteristiche tipiche dei principi di attuazione più comuni [11].

Le soluzioni più comunemente utilizzate per l'azionamento di micro dispositivi sono di tipo elettrostatico, elettromagnetico e piezoelettrico.

I campi elettrostatici ed elettromagnetici possono essere rapidamente creati e interrotti, consentendo un azionamento molto veloce. Inoltre, i campi elettrostatici permettono di esercitare forze elevate, ma entro una distanza molto breve, a meno che non venga utilizzata una tensione molto alta. Il consumo di corrente estremamente basso dei dispositivi elettrostatici, li rende estremamente efficienti. I campi elettromagnetici offrono il vantaggio di convertire l'energia elettrica in lavoro meccanico ad alta efficienza, con un basso consumo di corrente. Lo svantaggio principale è la scarsa scalabilità.

Anche i materiali piezoelettrici (titanato zirconato di piombo (PZT) quarzo, (SiO<sub>2</sub>), niobato di litio) sono molto diffusi. I loro cristalli molecolari esibiscono un cambiamento dimensionale quando immersi in un campo elettrico e, viceversa, generano una differenza di potenziale se deformati. Essi mostrano una risposta molto rapida, grande ripetibilità e forza, ma offrono deformazioni molto piccole (sotto 1%). Per cui di solito sono utilizzati sovrapponendoli in vari strati per ottenere spostamenti maggiori.

Anche altri materiali intelligenti diventano vantaggiosi alla microscala [12]. Le leghe a memoria di forma (SMA) sono materiali funzionali che hanno due fasi cristallografiche solide stabili e generano lavoro meccanico passando, in modo

reversibilmente, da una struttura cristallina all'altra per effetto del riscaldamento. Offrono grandi forze di spostamento e di azionamento in un volume estremamente piccolo e con basse tensioni operative. Alcuni problemi, come la risposta lenta e l'isteresi, ne limitano l'uso nella macroscala, ma diventano meno problematiche alla microscala.

I polimeri elettroattivi (EAP) sono materiali molto promettenti. Possono offrire deformazioni molto estese (10% - 400%) se si applica una differenza di potenziale tra le loro superfici, rivestite di materiale conduttivo per fungere da elettrodi. Sono leggeri, economici, resistenti alla frattura e rapidi nella risposta, di solito richiedono, però, un'alta tensione ( $>150\text{V/m}$ ) e molto vicino alla tensione di rottura del materiale e offrono basse forze di attuazione.

## 8.5 Conclusioni

Sensori e attuatori sono tra i componenti principali dei robot e in continuo sviluppo per migliorare le prestazioni e affrontare nuove sfide. Nel contesto dell'Industria 4.0 sono necessari ulteriori progressi per costruire fabbriche intelligenti in cui tutti i dispositivi siano integrati in un network e l'intera catena di produzione sia automatizzata. Nelle fabbriche intelligenti, i sensori intelligenti fungono da interfaccia tra il mondo digitale e quello fisico. Consistono nella combinazione di un sensore, un microprocessore e un sistema di comunicazione in modo che i dati ambientali siano monitorati e trasmessi, in tempo reale, al sistema di controllo principale. Questi dati vengono utilizzati per attivare gli attuatori al fine di gestire automaticamente il processo e la manutenzione, migliorando l'efficienza e la qualità della produzione. Viene raccolta un'enorme quantità di dati per monitorare i processi di produzione, l'ambiente e le sue modifiche. Ciò migliora la salute e la sicurezza nello spazio di lavoro, in particolare quando avviene la cooperazione tra robot e esseri umani.

**Accesso Aperto** L'autore(i) ed il detentore(i) dei diritti relativi ai contributi di tale capitolo garantiscono a tutti gli utilizzatori il diritto d'accesso gratuito, irrevocabile ed universale e l'autorizzazione a riprodurlo, utilizzarlo, distribuirlo, trasmetterlo e mostrarlo pubblicamente e a produrre e distribuire lavori da esso derivati in ogni formato digitale per ogni scopo responsabile, soggetto all'attribuzione autentica della paternità, nonché il diritto di riprodurne una quantità limitata di copie stampate per il proprio uso personale.

Se non diversamente indicato le immagini e il materiale di terze persone inclusi in questo capitolo sono sotto la licenza Creative Common. Il materiale con diritti riservati necessita la richiesta di un permesso per poter essere riprodotto, utilizzato o distribuito.

## 8.6 Bibliografia

- [1] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, III Edition, Springer International Publishing, 2016
- [2] S-J. Woo, et al, Thin All-Elastomeric Capacitive Pressure Sensor Array Based on Micro Contact Printed Elastic Conductors, *Journal of Materials Chemistry C* vol2, pp. 4415-4422, 2014
- [3] R. B. Fisher, et al, Range Sensors, *Springer Handbook of Robotics*, II Edition, Ed. Siciliano et Khatib, Springer Berlin Heidelberg, pp 455-476, 2016.
- [4] G. Caprari, T. Estier, and R. Siegwart, "Fascination of down scaling- alice the sugar cube robot," *Journal of Micro-Mechatronics*, vol. 1, no. 3, pp. 177–189, 2002.
- [5] S. Kernbach, R. Thenius, O. Kernbach, and T. Schmickl, "Re-embodiment of Honeybee Aggregation Behavior in an Artificial Micro-Robotic System," *Adaptive Behavior*, vol. 17, no. 3, pp. 237–259, 2009.
- [6] F. Mondada, M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klapcoz, S. Magnenat, J.-C. Zufferey, D. Floreano, and A. Martinoli, "The e- puck, a robot designed for education in engineering," in *Proceedings of the 9th conference on autonomous robot systems and competitions*, vol. 1, no. 1, 2009, pp. 59–65.
- [7] M. Rubenstein, C. Ahler, and R. Nagpal, "Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 3293–3298.
- [8] Kumar A, and Nayyar A, *si3-Industry: A Sustainable, Intelligent, Innovative, Internet of Things Industry*. In: Nayyar A., Kumar A., editors. *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*. Springer; 2020. p. 1-21
- [9] Zhu, TT, Bushby, A.J. and Dunstan, D.J., 2008. Materials mechanical size effects: a review. *Materials Technology*, 23(4), p. 193-209.
- [10] Ghosh, A, 2011. Scaling laws, in *Mechanics over micro and nano scales*, p. 61-94. Springer, New York, NY.
- [11] Dario P. et al., 1992. Microactuators for microrobots: a critical survey, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2(3), pp. 141-57.
- [12] Pagano C, Fassi, I, *Introduction to miniaturisation in Micro-manufacturing technologies and their applications*. In Fassi I, Shipley D., editors. *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications*. Springer Cham; 2017 p. 1-22



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



“Il supporto della Commissione europea per la produzione di questa pubblicazione non costituisce un'approvazione dei contenuti che riflettono solo le opinioni degli autori e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni in essa contenute”

Digital Manufacturing Training System for SMEs (Digit-T)  
Project ref: 2017-1-UK01-KA202-036807