

Capitolo 9

Industria 4.0 nella Robotica

Irene Fassi, Claudia Pagano e Serena Ruggeri

9.1 Introduzione

La cosiddetta 4^a rivoluzione industriale sta per cambiare radicalmente l'idea comune di fabbrica, e un grande sforzo di ricerca industriale è dedicato alla definizione dei modelli di "Fabbrica del futuro".

La quarta rivoluzione industriale è caratterizzata dalla parola *automazione*, che si realizza nella produzione industriale affrontando quattro sfide:

1. Le macchine intelligenti controllano la produzione in fabbriche intelligenti in cui la presenza di esseri umani è enormemente ridotta.
2. Le macchine intelligenti ottimizzano la capacità dell'impianto produttivo, coordinando il movimento del materiale, analizzando lo stato della catena di produzione e dello stock e azzerando i tempi di fermo.
3. Le macchine intelligenti sono essenzialmente auto-organizzate; la pianificazione dei materiali e la gestione degli ordini sono completamente automatizzate.
4. Le macchine intelligenti possono riconfigurare autonomamente la linea di produzione per rispondere in brevissimo tempo alla richiesta personalizzata del cliente.

Le macchine intelligenti si basano su una parte cibernetica complessa e algoritmi di intelligenza artificiale. Infatti, l'Industria 4.0 ha principalmente due basi: il livello hardware, che include tutti gli elementi fisici, e un livello software, la parte

I. Fassi, C. Pagano(✉), S. Ruggeri

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*

informatica. Nel capitolo precedente sono stati discussi la sensoristica e l'attuazione dei robot, che appartengono al livello hardware; in questo capitolo viene discussa la parte cibernetica incentrata sulla programmazione, il controllo e l'intelligenza artificiale. Inoltre, viene presentata, alla fine del capitolo, una breve panoramica delle questioni etiche relative all'intelligenza artificiale implementata nelle macchine.

9.2 Sistemi ciberfisici



Figura 9.2-1 Vista olistica dei CPS

Le fabbriche intelligenti richiedono l'implementazione sinergica di diverse tecnologie, e tra queste il *Cyber Physical System* (CPS – sistema ciberfisico) è essenziale.

L'elemento chiave dei CPS è l'*interazione* tra elementi fisici (mondo reale) e cibernetici (mondo virtuale), che sono sistemi cooperanti con comportamenti autonomi, consapevolezza del contesto attraverso capacità di rilevamento avanzate e capacità di archiviazione ed elaborazione dei dati provenienti dai sensori del network (Figura 9.2-1).

Alcuni degli esempi pratici già diffusi includono la robotica avanzata (ad esempio automobili autonomi, avionica con pilota automatica, micro-robotica, chirurgia assistita da robot, dispositivi medici impiantati), edifici intelligenti e reti elettriche intelligenti (smart electric grid).

I sistemi ciberfisici (CPS) creano un collegamento tra *sistemi fisici e digitali* al fine di generare un'infrastruttura comune con capacità avanzate; consentono l'integrazione delle dinamiche dei processi fisici con quelle software e di rete, in modo che possano essere gestite come un'unica entità.

Un CPS esegue due attività principali:

- *Connessione intensa*: per garantire l'acquisizione continua di dati dal mondo fisico e il feedback di informazioni dal cibernazio;
- *Gestione, analisi e calcolo dei dati*: per creare lo spazio cibernetico.

Per adempiere a questi compiti un CPS è composto da "entità computazionali che collaborano per collegare il mondo cibernetico con gli ambienti fisici circostanti o processi in un ambiente internet" [1]. Un CPS include "sistemi integrati (come attrezzature, edifici, mezzi di trasporto e dispositivi medici), servizi Internet, logistica, coordinamento e processi di gestione" [2]. Un'ampia gamma di sensori e attuatori viene utilizzata per collegare gli elementi del CPS e consentire la comunicazione uomo-macchina. Il CPS memorizza ed elabora tutti i dati ricevuti dai sensori e dai sistemi di comunicazione e controlla i sistemi fisici tramite gli attuatori.

La ricerca in questo settore sta affrontando numerosi temi, tra cui l'inferenza da dati empirici (cioè l'elaborazione di dati empirici al fine di trarre conclusioni), raccolta dati e sensorizzazione, l'apprendimento motorio e lo sviluppo di sistemi di controllo e supervisione in grado di adattarsi a diversi contesti, e la progettazione, implementazione e verifica di CPS sicuri e ben funzionanti.

Uno schema semplificato di un CPS e l'interazione tra esseri umani e macchine è mostrato in Figura 9.2-2.

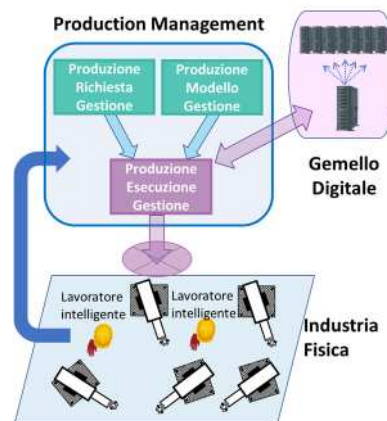


Figura 9.2-2 CPS Schema CPS con connessioni di interazione.

I sistemi di produzione ciberfisici (CPPS) sono sistemi ciberfisici per la produzione; consentono e supportano la comunicazione tra esseri umani, macchine e prodotti. I CPPS sono costituiti da elementi autonomi e cooperativi - relativi a processi, macchine, produzione e logistica - collegati a tutti i livelli di produzione da un sistema informativo in modo da poter modellare le loro attività operative e di

cooperazione. Grazie al continuo scambio di dati tra e all'interno dei sistemi, la loro memorizzazione e analisi in tempo reale, il modello è sempre sincronizzato con lo stato della fabbrica e il comportamento dell'intero sistema può essere previsto in base a situazioni passate e presenti. Questo può aiutare in vari processi decisionali in modo che possano essere rapidamente implementate le azioni più appropriate, migliorando la produttività della fabbrica intelligente [3].

Le principali caratteristiche di un CPPS sono:

- *Intelligenza*: i componenti del sistema sono in grado di acquisire informazioni dall'ambiente e agire in modo autonomo;
- *Connessione*: gli elementi del sistema sono in grado di cooperare e collaborare tra loro e sono connessi alle conoscenze e ai servizi su Internet;
- *Reattività*: il sistema è in grado di reagire ai cambiamenti interni ed esterni.

Il concetto di CPPS è fortemente legato ad altri concetti innovativi come Internet delle cose (IoT - Internet of Things), big data (grandi quantità di dati) e digital twin (gemello digitale). L'*internet delle cose* si riferisce a una capacità di comunicazione wireless integrata con sensori e calcolo per la raccolta di dati relativi a oggetti identificabili in modo univoco attraverso Internet. *Big data* si riferisce a un nuovo paradigma di calcolo che consente la raccolta, l'elaborazione e l'analisi di enormi quantità di dati [4].

Il Digital Twin (DT) è un'altra tecnologia strettamente correlata all'Industria 4.0 e alla produzione intelligente. Come per CPS, il digital twin è associato all'integrazione tra il mondo cibernetico e quello fisico. Per definizione un DT crea un modello virtuale di un sistema fisico al fine di prevedere il comportamento reale sulla base della simulazione in tempo reale del sistema. Pertanto, i due concetti hanno obiettivi e approcci simili. Tuttavia, mentre il CPS è implementato con sensori e attuatori, che consentono l'interazione tra mondo fisico e cibernetico, il DT si basa su modelli e dati. I digital twin sono repliche digitali di sistemi fisici; rappresentano profili digitali in evoluzione progettati utilizzando i dati raccolti dal passato e presente di un oggetto fisico o di un processo. Sono implementati principalmente in compiti come il monitoraggio, la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione delle loro controparti fisiche.

9.2.1 CPS Collaborativi

I CPS di robotica collaborativa (CCPS) sono sistemi di produzione ancora più complessi rispetto ad altri CPS: il concetto di "integralità" rappresenta il livello di integrazione dei diversi moduli, mirando a proprietà di autoapprendimento e riconfigurazione. Per migliorare questa integrazione, che riguarda anche l'interfaccia uomo-macchina o *Human-machine interface* (HMI), i CRCPS devono presentare un alto livello di "socievolezza", ovvero le capacità di comunicazione con l'ambiente, compresi altri CPS [5].

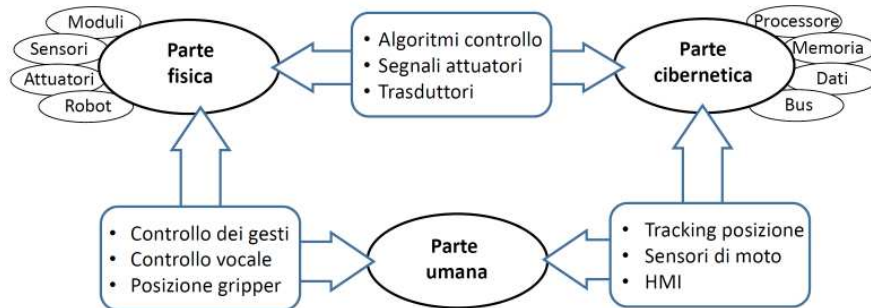


Figura 9.2-3 Struttura di un CPS di robotica collaborativa.

I CCPS comprendono tre entità principali: la componente umana (HC), la componente fisica (PC) e la componente computazionale (CC), interconnesse attraverso una varietà di tecnologie (Figura 9.2-3). Facendo parte di un sistema ciberfisico, un essere umano e un robot possono interagire ed eseguire compiti auto-organizzanti. In uno scenario futuro, la rete di sensori integrata e le tecnologie di comunicazione dei CPS rendono l'interazione affidabile, sicura e protetta. Diversi sensori consentono al robot di essere consapevole della presenza umana e reagire consequenzialmente, sulla base dello schema implementato che prevede di evitare l'uomo. Affinché l'interazione sia sicura, è essenziale un sistema di tracciamento della posizione umana accurato e in tempo reale. Un sistema di visione collegato al robot che monitora l'ambiente circostante fornisce informazioni sulla posizione del lavoratore, utilizzate come input per la riduzione della velocità del robot. Allo stesso tempo il sistema di monitoraggio integrato con un sistema di riconoscimento gestuale può essere utilizzato dal lavoratore per controllare il robot, insieme a un controllo vocale. Inoltre, i sensori di forza possono essere integrati nel sistema per migliorare il livello di interazione tra uomo e robot. Combinando i dati dei sensori di forza e del sistema di visione, la velocità e l'accelerazione del robot possono essere modulate in base alla parte del corpo del lavoratore in prossimità dell'end-effector. I sensori di forza possono fornire una funzione aggiuntiva che consente un contatto tra l'uomo e il robot in modo che il lavoratore possa addestrare il robot utilizzando le mani.

9.2.2 Robotica degli Sciami e CPS

Una prima applicazione del concetto di CPS può essere trovata nella robotica degli sciame, un argomento ampiamente studiato negli ultimi 20 anni. La robotica degli sciame prende ispirazione dalla natura e in particolare dal comportamento degli sciame, in grado di svolgere compiti che vanno oltre le capacità dei singoli individui. Si tratta del coordinamento di gruppi robotici distribuiti, interconnessi, che possono quindi essere considerati come CPS semplificati.

Diversi lavori [5], sono incentrati sulla comunicazione tra i robot e l'algoritmo che gestisce la strategia di gruppo. Sia per ragioni pratiche (lo spazio disponibile) e analogia con la natura (sciame di insetti), ma anche ragioni tecniche, questo approccio è ampiamente studiato su un gran numero di robot miniaturizzati; infatti, a causa della limitazione dello spazio e del consumo energetico, i robot miniaturizzati hanno tipicamente un grado ridotto di complessità; pertanto, si prestano a studi di strategia di gruppo.

Un esempio di robotica degli sciame di grande successo è stato sviluppato intorno all'e-puck, un minirobot mobile sviluppato principalmente per scopi educativi [6], con una varietà di lavori per studiare la coordinazione e la sincronizzazione del gruppo [7][8][9].

L'e-puck [10] ha una sezione circolare di 75 mm di diametro e altezza variabile, a seconda delle estensioni di cui è equipaggiato (Figura 9.2-4).

Tra questi lavori alcuni sono stati focalizzati sulla strategia necessaria per rendere un numero adeguato di e-puck in grado di spostare una scatola e posizionarla in una posizione scelta. Sebbene il design del robot ne consenta la personalizzazione fornendo i sensori e le caratteristiche più adatti necessari per l'attività (Figura 9.2-5), uno degli obiettivi è quello di testare diversi algoritmi, non solo per raggiungere l'obiettivo, ma anche per farlo con la configurazione più semplice.

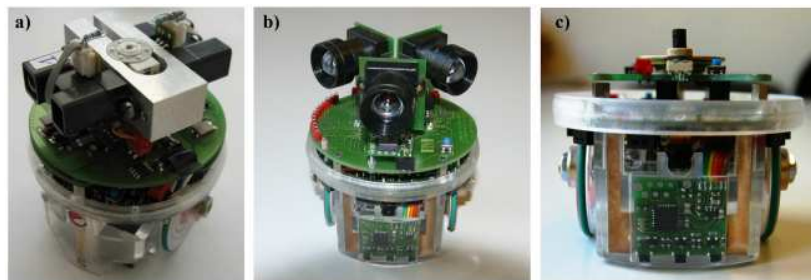


Figura 9.2-4 Configurazione del robot e-puck con: a) uno scanner IR a distanza, b) telecamera lineare ad ampio campo visivo e c) sensore di misurazione del colore del suolo [6].

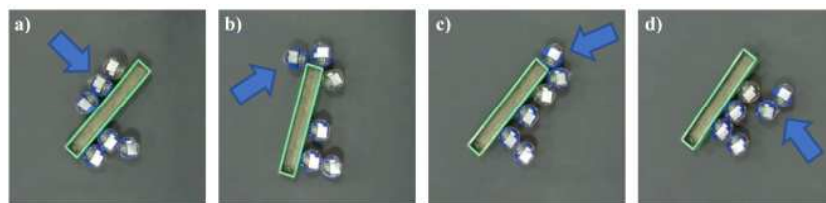


Figura 9.2-5 Allineamento dei robot e-puck per trasportare l'oggetto [11].

Gli oggetti da trasportare sono stati scelti per essere abbastanza pesanti da richiedere lo sforzo di tutto il gruppo, per cui la cooperazione è essenziale. I robot sono dotati di diversi sensori IR per rilevare gli ostacoli e trovare la posizione di destinazione, una telecamera per identificare gli ostacoli (gli oggetti e gli altri robot) e una fotocamera ottica con bassa risoluzione dell'immagine sotto il robot. Questa telecamera dà ai singoli robot la percezione della direzione di movimento dell'oggetto, in base alla quale i robot cambiano il punto di applicazione della loro spinta, evitando di neutralizzare la forza di un altro robot. Alla fine sono tutti allineati per trasportare con successo l'oggetto [7].

Un'applicazione più pratica degli algoritmi tipici della robotica degli sciame, e in particolare la pianificazione del percorso e il coordinamento dei team robotici distribuiti in un CPS, è rappresentata dai magazzini automatizzati. Ad esempio, nei magazzini di Amazon e Ocado, l'intero sistema, dall'ordine alla consegna, è automatizzato. Un gran numero di robot mobili autonomi (Figura 9.2-6) sono collegati tra loro e con il sistema in cui vengono effettuati gli ordini e un algoritmo ottimizza il percorso dei robot in base alle posizioni della merce ordinata in modo che lo spostamento dei robot sia programmato per spostare la merce e imballare l'ordine. Il collegamento e il coordinamento tra i robot sono essenziali per evitare possibili incidenti.

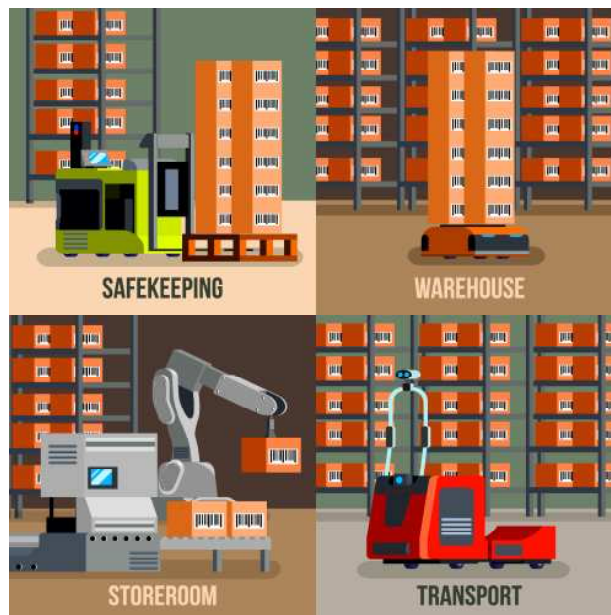


Figura 9.2-6 Magazzini automatizzati*.

* Image designed by Freepik

Nei magazzini Amazon warehouse [12] i robot movimentano gli scaffali contenenti la merce richiesta verso un lavoratore, che sceglie la merce corretta senza doversi faticosamente spostare tra gli scaffali.

Nel magazzino di Ocado warehouse [13] i robot si spostano lungo un sistema di guide su dei contenitori da cui prendono i prodotti necessari per confezionare l'ordine.

9.3 Pianificazione e Programmazione del Movimento dei Robot

L'esecuzione di un compito completo in un'applicazione robotica richiede l'esecuzione di una o più operazioni da parte del robot. Il robot deve muoversi secondo un movimento specifico che è completamente o parzialmente definito dalla legge di movimento imposta al suo dispositivo d'estremità. Il movimento desiderato deriva da una *pianificazione del movimento* e dalla *programmazione del compito del robot* adeguate e si ottiene con una serie di comandi inviati agli attuatori del robot in conformità con una strategia di controllo predefinita. Per la corretta esecuzione del compito, è importante conoscere la struttura cinematica del robot, compreso il tipo e la posizione degli attuatori (i motori), i giunti, le trasmissioni e le dimensioni della struttura meccanica. Tale conoscenza è completata da quella dell'elettronica che controlla gli attuatori e dei limiti elettrici e meccanici dei componenti.

9.3.1 Pianificazione del Movimento del Robot

La posizione e il movimento del dispositivo d'estremità o la forza che esercita dipendono dalla posizione, dal movimento e dalle azioni che le diverse parti del robot esercitano per mezzo dei suoi attuatori. Pertanto, l'analisi del robot e la sua modellazione sono passaggi preliminari nello sviluppo di un'applicazione robotica.

Il problema con la pianificazione di una traiettoria per un robot può essere suddiviso nel trovare un *percorso* e definire una *legge oraria di moto* sul percorso. Infatti, il percorso identifica il luogo dei punti che il robot deve descrivere per eseguire il movimento desiderato (Figura 9.3-1), mentre la "*traiettoria è un percorso su cui è specificata una legge oraria di moto*" [14], ad esempio in termini di velocità in ogni punto.

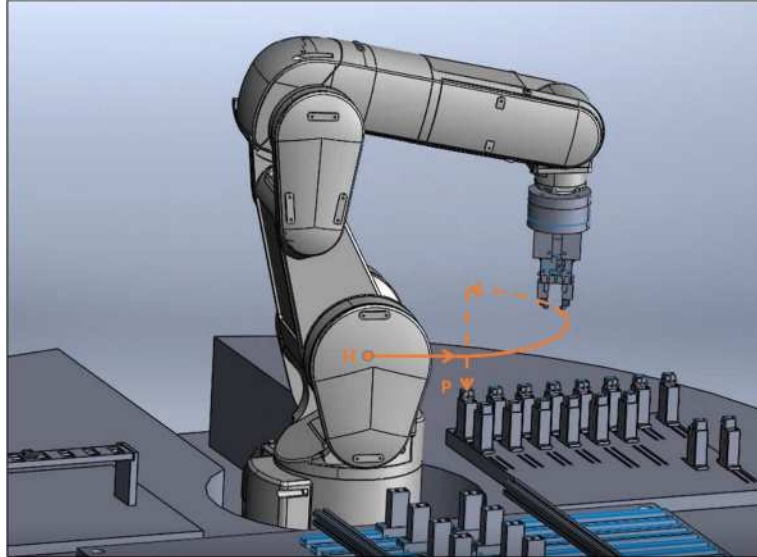


Figura 9.3-1 Esempio di robot in movimento simulato, che si sposta da un punto iniziale (H – posizione di homing) verso il punto P per prelevare un componente sul tavolo. Diritti di immagine: gli autori.

Pertanto, la *pianificazione del movimento* riguarda la generazione delle leggi orarie di moto per le coordinate (ai giunti o al dispositivo d'estremità), quindi gli ingressi al sistema di controllo del movimento [14].

A seconda delle operazioni che il robot deve eseguire, il robot può adottare una delle seguenti strategie di movimento [15]: da un punto iniziale ad un punto finale (*movimento punto-punto*) con una traiettoria arbitraria; attraverso una sequenza finita di punti assegnati lungo il percorso (*movimento attraverso punti intermedi*); secondo una *traiettoria specifica*.

Nel definire la legge orario di moto, dovrebbero essere considerati diversi aspetti, tra cui [14][15]:

- I *vincoli* derivanti dal tipo di applicazione.
- La struttura meccanica del robot.
- Le *forze e le coppie ai giunti* devono rispettare i limiti degli attuatori, degli azionamenti e del controllore.
- Le *traiettorie* che interpolano i punti del percorso devono essere dolci per ridurre al minimo effetti indesiderati come le vibrazioni, le traiettorie non devono implicare un *carico computazionale* molto elevato
- Le *posizioni e le velocità ai giunti* dovrebbero essere funzioni continue del tempo (la continuità delle accelerazioni non è obbligatoria anche se generalmente gradita)

9.3.2 Programmazione dei Robot

Programmare un robot significa istruirlo sui compiti che deve eseguire. È necessario definire un ambiente di programmazione e un linguaggio di programmazione adatto.

I *metodi di programmazione* esistenti includono [16][17][18] differenti approcci:

- *Guidare il robot nelle posizioni di interesse* o lungo i percorsi desiderati (programmazione per apprendimento) utilizzando un dispositivo portatile di programmazione (teach pendant), tenendo manualmente il dispositivo d'estremità, o in tele-operazione (utilizzando un sistema master-slave, in modo che l'operatore muove il robot master e il robot "slave" effettivo si muove di conseguenza).
- *Scrivere un programma* in un linguaggio che il robot può interpretare ed eseguire (linguaggio proprietario o librerie robotiche che supportano linguaggi di programmazione standard).
- *Utilizzare interfacce grafiche interattive*, ovvero strumenti di modellazione CAD (Computer Aided Design) e di simulazione del sistema per definire l'attività e generare automaticamente il programma.
- *Programmazione a livello di attività*: l'utente dice al robot cosa dovrebbe essere fatto e il robot sa come farlo. Ciò necessita di una modellazione e di una sensorizzazione dell'ambiente approfondite e intelligenza artificiale. Pertanto, la programmazione a livello di attività è difficile da realizzare attualmente, ma future applicazioni innovative potrebbero eventualmente essere sviluppate.

La generazione di programmi robot da software CAD/CAM è usata frequentemente, dal momento che questi pacchetti sono molto comuni tra le aziende manifatturiere [16]. Nel contesto della fabbrica digitale, le soluzioni digitali per la rappresentazione e la simulazione 3D di un singolo robot o di linee robotiche supportano efficacemente la progettazione e la validazione del processo di produzione. Altri approcci per istruire un robot includono, ad esempio, l'utilizzo di dispositivi di puntamento o di coreografare i movimenti del compito [16][18].

I metodi di programmazione dei robot possono essere suddivisi in *programmazione online* e *programmazione offline*.

Con la *programmazione online*, viene utilizzato il robot reale e l'operatore agisce direttamente sul controllore del robot. La programmazione mediante apprendimento appartiene a questa categoria. Il robot viene istruito o guidato in base alle esigenze e le azioni vengono registrate nella memoria del controllore del robot. Il robot esegue quindi i movimenti in modo ripetitivo.

La programmazione online è piuttosto facile e non richiede particolari abilità dell'operatore. Non è sensibile agli errori di accuratezza. Tuttavia, richiede l'accesso al robot, il che significa che la produzione viene arrestata durante la fase di programmazione. Inoltre, la modifica del programma (ad esempio per aggiungere alcuni parametri, correggere una linea o aggiungere interazioni con altri dispositivi)

può essere limitata, il che significa che le attività complesse possono essere difficili da configurare. Infine, i programmi robot sono memorizzati solo nella memoria del robot, quindi può essere difficile accedervi. Questo metodo può essere utile se al robot è richiesto di eseguire ripetutamente un'attività per un lungo periodo di produzione. È anche possibile programmare online tramite linguaggio: in questo caso l'operatore scrive i comandi direttamente sul teach pendant, ma può essere difficile in quel momento comprenderne tutti gli effetti, quali possibili collisioni.

Nella *programmazione offline*, gli strumenti software (programmazione per linguaggio o interfacce grafiche interattive) vengono utilizzati per generare il programma (senza il coinvolgimento fisico del robot) che viene poi scaricato sul controllore del robot. Con la programmazione offline, le possibilità di modificare e correggere aumentano, il vero robot può lavorare durante la fase di programmazione in modo che la produzione non venga arrestata e l'avvio e il cambio prodotto siano più veloci. Tuttavia, il robot deve essere preciso (necessità di calibrazione del robot) ed è necessaria una formazione specialistica dell'operatore.

È anche possibile una combinazione di programmazione online e offline.

9.3.3 Linguaggi e Ambienti di Programmazione

Ci sono molti *linguaggi di programmazione* utilizzati in robotica che sono stati adottati nel corso degli anni. Alcuni esempi dei primi linguaggi di programmazione utilizzati sono stati BASIC, Pascal e LISP. Sebbene questi linguaggi siano ormai obsoleti, hanno fornito la base per linguaggi robotici industriali più recenti. Altri linguaggi di scrittura comuni includono C, C++, C#, .NET, Python, Matlab e Java, mentre un esempio di un linguaggio di programmazione grafica è Labview.

Inoltre, esistono *molti linguaggi proprietari* sviluppati da diversi produttori e anche per robot simili possono essere molto diversi. Attualmente, quasi tutti i produttori di robot hanno un linguaggio di programmazione proprietario. Alcuni esempi sono: RAPID di ABB, MELFA-BASIC di Mitsubishi, KRL di Kuka, AS di Kawasaki, VAL3 di Stäubli, PDL2 di Comau, Karel di Fanuc, Inform di Yaskawa e URScript di Universal Robots

I produttori forniscono anche ambienti di *programmazione per la simulazione e la programmazione offline*. Il robot e l'intera cella di lavoro possono essere rappresentati come un modello CAD 3D. Possono essere simulati i movimenti del robot, eventuali collisioni e le azioni dell'utensile, e il compito può essere definito e ottimizzato. Alcuni esempi di ambienti di programmazione dei produttori sono RobotStudio [19] di ABB e RT Toolbox3 Pro [20] di Mitsubishi.

Sarebbe chiaramente auspicabile “*sviluppare librerie robotiche da utilizzare nel contesto di standard consolidati o nuovi linguaggi generici per applicazioni di automazione industriale*” [17]. Infatti, una delle attuali attività di ricerca e sviluppo volte a sostenere l'Industria 4.0 è lo sviluppo o l'uso di standard relativi agli strumenti di programmazione, alla modellazione e alla simulazione, ai protocolli di comunicazione e alle interfacce.

Negli ultimi anni, è stato sviluppato un software di programmazione offline di terze parti che supporta tutti i principali marchi robotici per fornire un quadro comune utile per la simulazione e la programmazione di diversi robot in molte applicazioni con un unico strumento. Alcuni esempi includono RoboDK [21], Robotmaster [22], Delfoi Robotics [23], FASTSUITE [24] and OCTOPUZ [25].

Oltre ai prodotti commerciali, esistono alcune soluzioni open source. Tra queste, ROS sta diventando molto comune. ROS (Robot Operating System) fornisce un framework comune per le applicazioni robotiche. Si tratta di un sistema meta-operativo che fornisce i servizi attesi da un sistema operativo, “*tra cui l’astrazione hardware, il controllo dei dispositivi di basso livello, l’implementazione delle funzionalità di uso comune, il passaggio dei messaggi tra i processi e la gestione dei pacchetti. Fornisce inoltre pacchetti di strumenti e librerie per ottenere, compilare, scrivere ed eseguire codice su più computer* [26].”

“ROS-Industrial è un modulo ROS open source che estende le funzionalità avanzate di ROS all’automazione della produzione e alla robotica. Il repository ROS-Industrial include interfacce per robot industriali comuni, pinze, sensori e reti di dispositivi [27].” Fornisce librerie software ad esempio per la calibrazione automatica di sensori 2D/3D e la pianificazione del moto.

9.4 Controllo dei Robot

A livello di robot, è necessaria un’architettura di controllo e supervisione in grado di interagire con l’ambiente esterno all’interno del CPPS e trasformare gli stimoli esterni in comandi attuatori. Inoltre, è necessario un dispositivo per regolare le azioni generate dagli attuatori affinché il robot abbia il comportamento desiderato: questo dispositivo è chiamato *controllore*. Riceve in ingresso il comportamento desiderato del robot e, al fine di determinare le azioni richieste agli attuatori, spesso richiede informazioni sullo stato del robot (posizione, velocità, forza scambiata, ecc.) che si ottengono leggendo i dati forniti da appositi sensori (o trasduttori). Quando è presente questa funzione di monitoraggio dei sensori, questo tipo di controllo viene chiamato *controllo in anello chiuso*, altrimenti si parla di *controllo in anello aperto*.

Il sistema di controllo è necessario per determinare l’andamento temporale delle forze o delle coppie che devono essere sviluppate dagli attuatori ai giunti per garantire l’esecuzione del compito comandato [28]. In parole povere, se y è la posizione effettiva del robot, y_0 la posizione desiderata del robot, e u la forza o la coppia generata dal motore del robot, il controllore deve determinare u per far muovere il robot in modo che y corrisponda a y_0 .

Per comprendere meglio l’argomento, si possono innanzitutto identificare gli elementi principali di uno schema di controllo: il “sistema” da controllare e il “controllore” che fornisce un’azione di controllo sul sistema. Il sistema da controllare può essere visto come una scatola che risponde ad un ingresso $u(t)$ e produce un’uscita $y(t)$. L’obiettivo è quello di far produrre al sistema un’uscita

uguale all'ingresso desiderato del controllore $y_0(t)$ (ad esempio per far muovere un asse di un robot nel modo desiderato).

Una delle basi della teoria del controllo è che si può distinguere tra controllo in anello aperto e controllo in anello chiuso (controllo retroazionato). Nel controllo in anello aperto (Figura 9.4-1), il controllore calcola l'azione di controllo appropriata $u(t)$ per produrre un output $y(t)$ uguale a $y_0(t)$ sulla base della nota relazione tra l'ingresso e l'uscita del sistema.

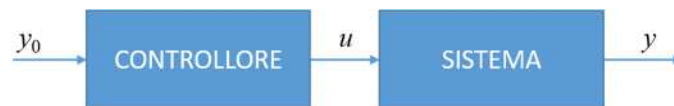


Figura 9.4-1 Schema generale di controllo in anello aperto.

Tuttavia, spesso non si dispone di un'adeguata conoscenza del sistema e sul sistema possono agire disturbi imprevedibili o parzialmente noti (ad esempio effetti di accoppiamento tra i giunti). Pertanto, un approccio comune consiste nel chiudere l'anello di controllo con le informazioni sul valore effettivo dell'uscita proveniente dai sensori (Figura 9.4-2). In questo modo, il controllore calcola l'ingresso al sistema per ridurre il più possibile l'errore tra l'uscita desiderata e quella effettiva (ad esempio la posizione desiderata e la posizione effettiva del motore).

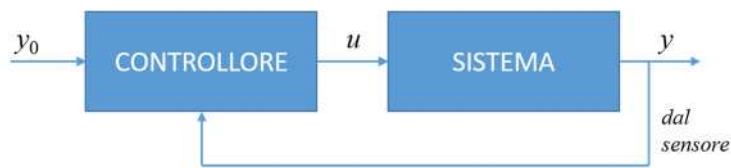


Figura 9.4-2 Schema generale di controllo in anello chiuso.

In altre parole, l'uscita desiderata viene confrontata con l'uscita misurata da un apposito sensore (ad esempio un encoder), quindi il controllore definisce l'azione sulla base dell'errore tra loro. La chiusura dell'anello consente una migliore azione, ad esempio maggiore robustezza e riduzione dei disturbi.

Per muovere un robot è necessario il controllo di diversi motori (un robot di solito ha più di un grado di libertà), quindi servono metodi di controllo multi-asse. A seconda del modo in cui i diversi assi vengono considerati e controllati, le strategie di controllo possono essere suddivise in [28][29]:

- *Controllo decentralizzato*: ogni giunto è considerato indipendente dagli altri giunti e controllato da un anello di controllo indipendente (Figura 9.4-3).
- *Controllo centralizzato*: in questo caso il robot è considerato come un sistema multi-variabile. Spesso si considera il modello dinamico del robot (Figura 9.4-4).

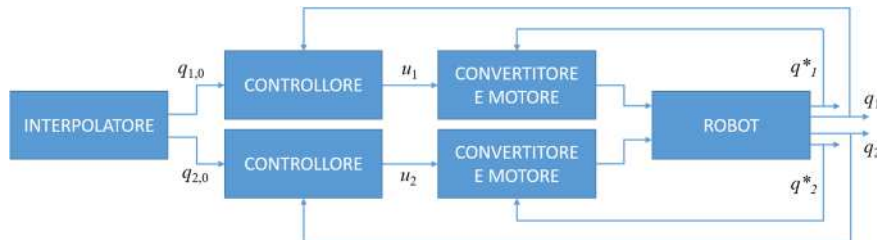


Figura 9.4-3 Schema di controllo decentralizzato: esempio con 2 assi, dove q_i ($i = 1, 2$) rappresenta la posizione del giunto e q^*_i la velocità del giunto. Il blocco interpolatore calcola i movimenti desiderati per ogni asse.

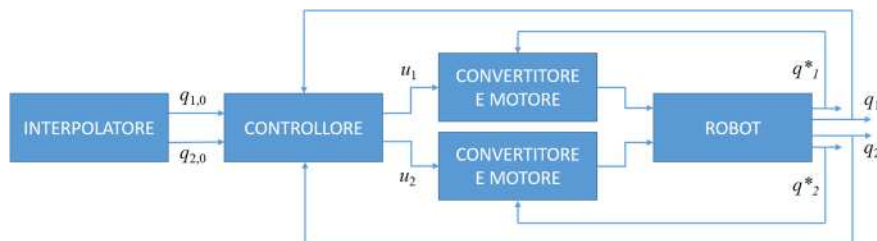


Figura 9.4-4 Schema di controllo centralizzato: esempio con 2 assi, dove q_i ($i = 1, 2$) rappresenta la posizione del giunto e q^*_i la velocità del giunto. Il blocco interpolatore calcola i movimenti desiderati per ogni asse.

Nel primo caso, le azioni di ciascun attuatore dipendono solo dal movimento effettivo e desiderato di quell'attuatore, mentre nel caso di controllo centralizzato le azioni di ogni attuatore dipendono dal movimento desiderato ed effettivo di tutti gli attuatori.

Questo distingue anche il modo in cui vengono considerati gli effetti di interazione dinamica e di accoppiamento tra i giunti. Nel primo caso, le interazioni dinamiche sono trattate come disturbi, mentre nel secondo caso gli effetti di accoppiamento possono essere effettivamente presi in considerazione.

I metodi di controllo a più assi spesso si basano su controllori a singolo asse che controllano un motore ciascuno, che consentono buone prestazioni in molte applicazioni. Le strategie di controllo centralizzato sono generalmente implementate quando gli effetti mutui tra i giunti sono significativi e devono essere considerati.

Tra i controllori centralizzati è possibile considerare diversi approcci, come il *controllo a coppia precalcolata* e il *controllo a dinamica inversa*. Questi controllori si basano sul modello dinamico del robot. Se questo modello non è ben noto, le prestazioni del controllo non migliorano molto. Per questo motivo, è necessaria una buona stima dei valori dei parametri dinamici del sistema (ad esempio masse,

inerzia, ecc.). Tale stima può essere ottenuta mediante una calibrazione dinamica del robot

Inoltre, è importante notare che i robot reali differiscono dai robot ideali a causa della presenza di diversi fenomeni tra cui l'inerzia variabile, l'attrito statico e la cedevolezza, che devono essere tenuti in considerazione durante la progettazione dello schema di controllo.

9.4.1 Controllo di Forza e Controllo Basato su Visione Artificiale

Ci sono casi in cui ad un robot viene richiesto di scambiare delle forze con l'ambiente, ad esempio per mantenere premuto un pezzo, per inserire un perno in un foro, o per sbavare un pezzo. In questi casi, controllare la forza di contatto è più conveniente che controllare il movimento del robot. Un altro ramo del controllo dei robot è quindi costituito dal *controllo di forza* [30][31].

Il controllo di forza può essere diviso in:

- *Controllo diretto*: la forza è controllata chiudendo l'anello di retroazione di forza. Lo schema generale di un controllore di forza è illustrato in Figura 9.4-5.
- *Controllo indiretto*: il controllo della forza si ottiene mediante il controllo del movimento (controllo di una deformazione). Il controllo di impedenza appartiene a questa categoria.

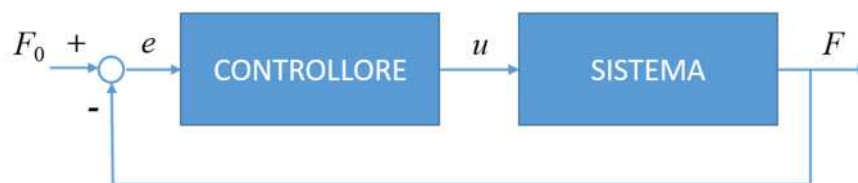


Figura 9.4-5 Schema generale di controllo diretto di forza.

Nel controllo diretto, il valore effettivo della forza è fornito da un trasduttore di forza al dispositivo d'estremità, ai giunti o alle dita della mano del robot quando è necessaria una certa forza per afferrare e manipolare un oggetto.

È importante notare che non è possibile controllare sia il movimento che la forza nella stessa direzione. Quando il compito di interazione identifica delle direzioni lungo le quali deve essere controllato il movimento e altre direzioni in cui la forza è la variabile controllata, vengono utilizzati *schemi di controllo ibridi forza/moto* [31][32].

A causa della loro complessità, a volte i più semplici controllori di posizione sono combinati con una cedevolezza passiva sul dispositivo d'estremità, in modo che piccoli errori di posizionamento possano essere compensati da elementi elastici. Un esempio è il compensatore RCC (Remote Center of Compliance), ovvero un dispositivo meccanico comunemente montato tra la pinza e il polso del robot (Figura 9.4-6).

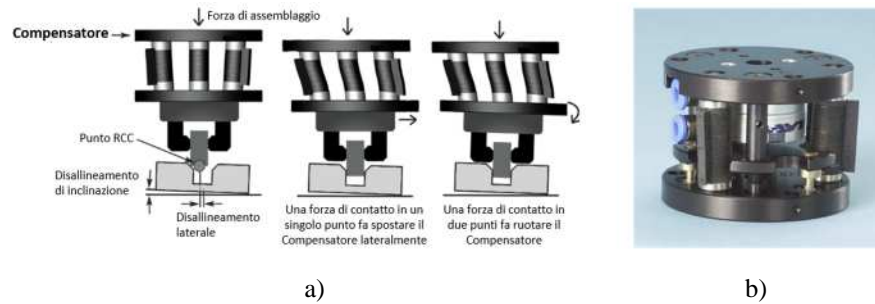


Figura 9.4-6 Un compensatore RCC di ATI Industrial Automation: a) Schema concettuale[†]; b) Immagine del dispositivo[‡]. Diritti di immagine: ATI Industrial Automation.

Il feedback di forza è utile anche per la *teleoperazione* del robot. In modalità teleoperata, il robot è comandato a distanza dall'operatore utilizzando un approccio master/slave. L'idea è che l'operatore muova un dispositivo (il master, ad esempio un joystick) e il robot (slave) agisca allo stesso modo. In questo caso, le *interfacce aptiche* possono essere utilizzate per fornire all'operatore il feedback di forza/coppia [33][34].

Al giorno d'oggi, in una cella di lavoro robotizzata sono spesso integrate delle capacità visive. Uno o più sensori di visione (telecamere) possono essere montati sul robot (*configurazione eye-in-hand*) o nella cella di lavoro (*configurazione eye-to-hand*) per effettuare misurazioni e supervisionare la scena (Figura 9.4-7). Pertanto, essi possono fornire informazioni sugli oggetti da processare e sui dispositivi e l'ambiente circostanti.

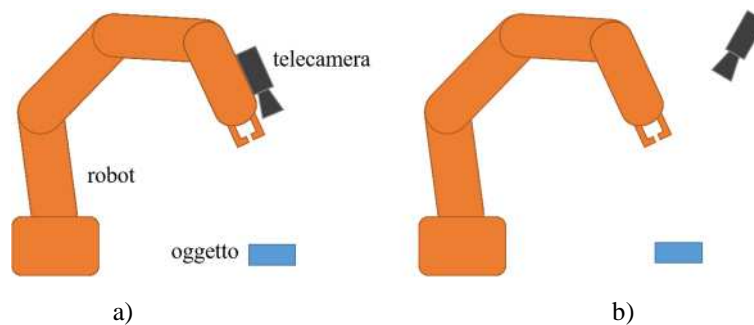


Figura 9.4-7 Configurazioni del sistema di visione (caso semplice di una singola telecamera): a) eye-in-hand; b) eye-to-hand. Diritti di immagine: gli autori

[†] Fonte: https://www.ati-ia.com/Products/Compliance/Compensator_product_desc.aspx

[‡] Fonte: https://www.ati-ia.com/products/compliance/Compensator_ModelDetails.aspx?id=91116-001-A

Nell'approccio più semplice, il robot è comandato in controllo del movimento ma sfrutta le informazioni fornite dalla telecamera, implementando la cosiddetta strategia *look-and-move*. A titolo di esempio, si consideri un robot che deve afferrare un oggetto nell'area di lavoro la cui vista è fornita da una telecamera. La telecamera identifica l'oggetto e rileva la sua posa che, mediante una corretta calibrazione, può essere espressa nel sistema di coordinate del robot. Queste informazioni vengono quindi inviate al controllore del robot che ordina al robot di muoversi e prelevare l'oggetto.

Quando le informazioni visive vengono utilizzate per chiudere l'anello di controllo, un controllo di questo tipo basato sul feedback visivo è detto *visual servoing* (*asservimento visivo*) [35][36]. In altre parole, "*il controllo con asservimento visivo si riferisce all'uso di dati di visione artificiale per controllare il movimento di un robot*" [35]

I due approcci principali all'asservimento visivo sono *l'asservimento visivo basato sulla posizione* e *l'asservimento visivo basato sull'immagine* (o approcci ibridi). In entrambi i casi la sfida è quella di spostare l'estremità del robot in una posa specifica rispetto all'oggetto obiettivo. Con l'asservimento visivo basato sulla posizione, le misurazioni visive vengono utilizzate per ricostruire la posa relativa dell'oggetto rispetto al robot, mentre l'asservimento visivo basato sull'immagine si basa sul confronto dei parametri caratteristici dell'immagine dell'oggetto tra la posa corrente e quella desiderata [36].

I due approcci principali all'asservimento visivo sono l'asservimento visivo basato sulla posizione e l'asservimento visivo basato sull'immagine (o approcci ibridi). In entrambi i casi la sfida è quella di spostare l'estremità del robot in una posa specifica rispetto all'oggetto obiettivo. Con l'asservimento visivo basato sulla posizione, le misurazioni visive vengono utilizzate per ricostruire la posa relativa dell'oggetto rispetto al robot, mentre l'asservimento visivo basato sull'immagine si basa sul confronto dei parametri caratteristici dell'immagine dell'oggetto tra la posa corrente e quella desiderata.

Nell'asservimento visivo basato sull'immagine non è necessario un modello dell'oggetto, ma è necessario rilevare delle caratteristiche specifiche (ad esempio le coordinate di certi punti) nell'immagine dell'oggetto acquisita dalla telecamera. La posizione dei punti nell'immagine dipende dalla posa della telecamera rispetto all'oggetto, in modo che se la telecamera viene spostata, i punti si spostano nell'immagine. Quando la telecamera si trova nella posa desiderata, i punti appaiono in posizioni note nell'immagine, altrimenti appaiono in posizioni diverse. L'asservimento visivo basato sull'immagine confronta le caratteristiche dei punti desiderate e attuali e calcola la velocità della telecamera per spostare i punti dove richiesto nell'immagine, quindi la telecamera nella posa desiderata.

Gli algoritmi di elaborazione delle immagini sono quindi essenziali per estrarre le caratteristiche dell'immagine necessarie per controllare il robot.

9.5 Intelligenza Artificiale

La robotica è uno dei mercati ad alta tecnologia in più rapida crescita, principalmente a causa dell'introduzione pervasiva di robot nella produzione e dei settori dei servizi e dell'assistenza. I dispositivi robotici hanno già raggiunto un alto livello di maturità e affidabilità in termini di strutture meccaniche, sensori e attuatori e tecniche di controllo per risolvere le attività di percezione, navigazione e manipolazione di base quando si lavora in ambienti strutturati e ben definiti.

Tuttavia per soddisfare i paradigmi di I4.0 i robot devono essere sempre più versatili e in grado di operare in contesti poco o non strutturati. Quindi dovranno essere dotati di maggiori abilità cognitive, quali ad esempio la capacità di adattamento a contesti non codificati a priori, apprendimento e interazione naturale con l'essere umano. L'intelligenza artificiale è una branca dell'informatica legata alla programmazione e alla progettazione di sistemi hardware e software che consentono alle macchine di avere abilità simili a quelle degli esseri umani e degli animali, come ad esempio capacità visuo-percettive, spazio-temporali e decisionali.

Il concetto di intelligenza è quindi definito in senso lato non più solo come la capacità di calcolare dati astratti e di implementare sequenze logico matematiche, ma come insieme sinergico di diverse forme di intelligenza, quali l'intelligenza visuo-spaziale, sociale, cinestetica, introspettiva, musicale, in accordo con la teoria di Gardner [37][36].

Un sistema intelligente artificiale cerca di ricreare una o più di queste diverse forme di intelligenza. Alcuni di questi comportamenti più prettamente umani possono essere semplificati in modo da essere in parte riproducibili da alcune macchine.

Tecniche di intelligenza artificiale sono già presenti nella vita di tutti i giorni. Ad esempio, gli strumenti di riconoscimento vocale utilizzati in molte applicazioni, dagli smartphone ai navigatori, ai sistemi di sorveglianza si basano su algoritmi di apprendimento automatico, sviluppati nell'ambito dell'IA.

Altre applicazioni abbastanza consolidate dell'apprendimento automatico basato su tecniche di intelligenza artificiale si possono trovare nel settore automobilistico; ad esempio, nelle auto a guida semi-autonoma, i sistemi avanzati di cambio di velocità utilizzano algoritmi di intelligenza artificiale basati su logica fuzzy [38]. Inoltre, l'IA sta svolgendo un ruolo chiave nello sviluppo delle auto a guida autonoma, anche se per avere un veicolo a guida autonoma affidabile e sicuro restano da affrontare molte sfide sia sul piano tecnico che su quello etico e della responsabilità civile.

In campo medico, tecniche di intelligenza artificiale basate su reti neurali sono applicate per esempio all'analisi del battito cardiaco, nella diagnosi di alcune forme tumorali e nella creazione di nuovi farmaci terapeutici. Tecniche di intelligenza artificiale sono state recentemente proposte anche per sviluppare strumenti in grado di analizzare una grande quantità di dati eterogenei per fare previsioni sull'evoluzione della pandemia di coronavirus, e la diagnosi precoce dell'infezione [39].

Altri settori in cui l'intelligenza artificiale viene utilizzata regolarmente sono il mondo finanziario, ad esempio per costruire modelli predittivi dell'andamento del mercato azionario, il settore della sorveglianza e del controllo qualità, per esempio nell'analisi e il riconoscimento delle immagini, compreso il riconoscimento facciale, il social media marketing, i servizi online di assistenza clienti (le chatbot!) e il settore della robotica. Inoltre, i sistemi di intelligenza artificiale vengono utilizzati anche per migliorare ulteriormente molti settori della tecnologia dell'informazione stessa, tra cui la prova della correttezza degli algoritmi e la creazione di nuovi metodi di apprendimento.

9.5.1 Cenni Storici

Nel 1954, l'americano George Devol costruì il primo robot programmabile, chiamato Unimate, un manipolatore ad attuazione idraulica in grado di eseguire compiti ripetitivi. Venne acquistato dalla General Motors nel 1961 per essere usato nelle linee di assemblaggio delle automobili, per automatizzare i processi di lavorazione dei metalli e di saldatura. Anche se, alla luce degli attuali progressi tecnologici, il suo grado di intelligenza è molto rudimentale, al momento della sua invenzione ed introduzione nel mercato venne considerato da molti uno dei pochi prodotti con valore commerciale risultanti dall'applicazione di tecniche di intelligenza artificiale.

A partire da questi primi sviluppi, sono stati realizzati molti sistemi robotici innovativi, migliorando in particolare le capacità di rilevamento e percezione del contesto (principalmente attraverso la visione artificiale, ma anche aggiungendo feedback di forza, capacità tattili, sensori di prossimità e così via) e aumentando così le capacità delle macchine di interagire con l'ambiente circostante. Già alla fine degli anni '70 vennero sviluppati robot umanoidi in grado di svolgere operazioni relativamente complesse, quali ad esempio impilare dei blocchi. Gli ulteriori miglioramenti negli hardware e nell'algoritmica hanno stimolato lo sviluppo di sistemi robotici sempre più avanzati.

A partire dalla da quanto fu coniato il termine AI nel 1956 fino ai primi anni '70, l'entusiasmo per l'intelligenza artificiale ha dato vita a diversi sottocampi di ricerca che costituiscono le basi delle moderne teorie: sistemi basati su regole, apprendimento automatico, elaborazione del linguaggio naturale (Natural Language Processing, NLP), reti neurali superficiali e profonde, elaborazione delle immagini e visione artificiale, riconoscimento delle parole e elaborazione del testo. A partire dalla sua nascita fino ai primi anni '70, l'entusiasmo per l'intelligenza artificiale ha dato vita a diversi sottocampi di ricerca che costituiscono le basi delle moderne teorie: sistemi basati su regole, apprendimento automatico, elaborazione del linguaggio naturale (Natural Language Processing, NLP), reti neurali superficiali e profonde, elaborazione delle immagini e visione artificiale, riconoscimento delle parole e elaborazione del testo.

A partire dalla sua nascita fino ai primi anni '70, l'entusiasmo per l'intelligenza artificiale ha dato vita a diversi sottocampi di ricerca che costituiscono le basi delle

moderne teorie: sistemi basati su regole, apprendimento automatico, elaborazione del linguaggio naturale (Natural Language Processing, NLP), reti neurali superficiali e profonde, elaborazione delle immagini e visione artificiale, riconoscimento delle parole e elaborazione del testo.

I recenti progressi nelle tecnologie della comunicazione e dell'informazione hanno dato nuovo respiro alla ricerca nell'IA, poiché l'hardware e la connettività di rete sono diventati più economici e veloci; i sistemi paralleli e distribuiti sono diventati accessibili, favorendo la possibilità di archiviare facilmente enormi quantità di dati ("Big Data") disponibili poi per il training dei sistemi di intelligenza artificiale.

9.5.2 Tecniche

L'uso di algoritmi in grado di riprodurre il ragionamento di esseri umani o animali in diverse situazioni ha permesso ai sistemi intelligenti di migliorare ulteriormente le loro competenze comportamentali. Le ricerche si sono concentrate sullo sviluppo di algoritmi che potrebbero imitare comportamenti diversi a seconda degli stimoli ambientali (abilità spesso chiamata consapevolezza del contesto).

Questi complessi algoritmi implementati all'interno di sistemi intelligenti sono quindi in grado di prendere decisioni o scelte in base al contesto in cui vengono applicati. Nel caso di sistemi di veicoli intelligenti, ad esempio, un'auto senza conducente può decidere in caso di pericolo, se sterzare per evitare l'ostacolo oppure frenare, in base al contesto esterno. Ad esempio, il veicolo, sulla base delle informazioni ricevute dai vari sensori, come velocità e direzione dell'auto, le dimensioni e la posizione di altri oggetti e le condizioni del terreno e del meteo, può calcolare se la frenata o la sterzata hanno una percentuale più alta di sicurezza per il conducente, i passeggeri e i pedoni. La conoscenza di base originariamente incorporata nel sistema viene ampliata attraverso l'esperienza.

Negli ultimi anni è cresciuto un settore specifico, focalizzato sulla rappresentazione della conoscenza, che studia tutti i meccanismi del ragionamento umano e definisce i metodi per rendere questa conoscenza comprensibile alle macchine, attraverso il linguaggio e controlli sempre più precisi e dettagliati. Trasferire le conoscenze umane esistenti alle macchine richiede il trasferimento non solo delle conoscenze, ma anche delle esperienze. Ciò aggiunge la possibilità di comprendere nuove informazioni sfruttando le conoscenze già presenti nel sistema di partenza.

Queste informazioni vengono fornite alla macchina in vari modi, i più importanti dei quali sono quelli basati sulla *teoria dei linguaggi formali* (che studia gli aspetti sintattici dei linguaggi strutturati), e la *teoria delle decisioni*, per identificare decisioni ottimali in circostanze specifiche.

Uno dei principali passi avanti nello sviluppo dell'IA è stato fatto quando sono stati creati algoritmi in grado di imparare attraverso l'esperienza in modo analogo agli esseri umani. L'apprendimento rende il sistema in grado di migliorare la capacità della macchina di agire e prendere decisioni.

Lo sviluppo di algoritmi in grado di imparare dalle loro esperienze ed errori è essenziale per creare sistemi intelligenti che operino in contesti per i quali i programmatori non possono prevedere tutte le possibilità future.

Attraverso l'*apprendimento automatico*, discusso anche nel Capitolo 5, una macchina può imparare a eseguire una determinata azione anche se questa azione non è presente tra le possibili già programmate. Ad esempio, un robot può eseguire un'operazione di assemblaggio anche se la forma e la posizione del foro differiscono da quelle con cui è stato addestrato o può riconoscere un oggetto in un contenitore anche se l'immagine esatta non è stata precedentemente memorizzata nella sua memoria.

L'apprendimento automatico ha fatto grandi progressi grazie allo sviluppo di *reti neurali artificiali*, cioè un particolare modello matematico ispirato dal funzionamento del cervello e delle connessioni tra i neuroni. Il termine *rete neurale* deriva dal fatto che questo modello matematico è caratterizzato da una serie di interconnessioni tra neuroni artificiali, e queste connessioni sono necessarie per i diversi calcoli. Proprio come le reti neurali biologiche, una rete neurale artificiale ha anche la caratteristica di essere adattata alle diverse esigenze derivanti dalle informazioni ottenute nelle varie fasi di apprendimento.

9.6 Etica

Poiché il grado di autonomia e capacità decisionale dei sistemi automatici aumenta, è essenziale definire un codice di condotta, un elenco di regole da rispettare al fine di evitare imprevisti. Un caso tipico è quello dei veicoli a guida automatizzata (AVG da Automatic Guided Vehicle), come gli AGV industriali utilizzati per applicazioni logistiche, droni e auto autonome. È molto probabile che, in un prossimo futuro, questi concetti saranno estesi anche ai robot che agiscono nell'ambiente industriale.

L'*etica dei robot* è definita come l'insieme di regole e il codice di condotta che è incorporato nel sistema di controllo robot dai progettisti.

La prima serie di regole (le ben note *tre leggi della robotica*) è stata definita dallo scrittore di fantascienza Isaac Asimov [40] e la comunità scientifica ritiene che siano ancora valide oggi:

1. Un robot non può ferire un essere umano o, per inazione, permettere a un essere umano di venire ferito.
2. Un robot deve obbedire agli ordini dati dagli esseri umani, tranne quando tali ordini sarebbero in conflitto con la Prima Legge.
3. Un robot deve proteggere la propria esistenza finché tale protezione non è in conflitto con la Prima o la Seconda Legge

In seguito aggiunse anche una *Legge Zero*: Nessun robot può danneggiare l'umanità o, attraverso l'inazione, permettere che sia recato danno all'umanità.

Tuttavia, queste leggi non sono sufficienti e ci potrebbero essere scenari in cui non possono essere pienamente rispettate.

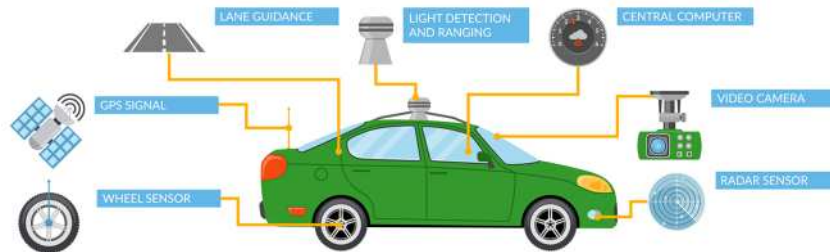


Figura 9.6-1 Configurazione di auto autonome[§].

Le tre leggi implicano il fatto che un robot abbia sufficiente intelligenza (in termini di percezione e capacità cognitive) per prendere anche decisioni morali in situazioni complesse, ma ciò non è ancora il caso. Pertanto, non possono fornire una base pratica per la scrittura di un codice di condotta del robot. Un esempio di una serie di regole facilmente identificabili in un sistema robotico potrebbe essere:

1. Non uccidere
2. Non causare dolore
3. Non disabilitare
4. Non privare della libertà
5. Non ingannare
6. Mantieni la tua promessa
7. Non imbrogliare
8. Rispetta le leggi
9. Fai il tuo dovere

Per quanto riguarda l'etica, è necessario affrontare diversi dilemmi morali.

[§] Image design by Freepik.

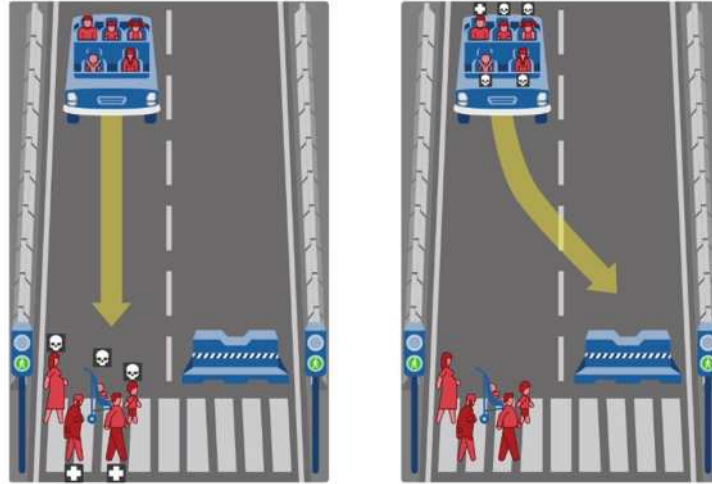


Figura 9.6-2 Dilemma morale di un'auto senza conducente [41].

Figura 9.6-2 mostra un tipico dilemma morale, che potrebbe essere difficilmente incorporato nel codice software della macchina: sapendo che ci sono solo due eventi possibili - investire le persone che attraversano la strada uccidendone tre di loro e ferendone due o schiantarsi l'auto contro la barriera uccidendo quattro passeggeri - quale alternativa dovrebbe essere scelta? Ovviamente, questa sarebbe una decisione difficile anche per un conducente umano, con fattori diversi da considerare.

Diversi progetti di ricerca sono in corso sul campo e molti altri esempi di dilemmi morali si possono trovare in una piattaforma sperimentale online (<http://moralmachine.mit.edu/>), progettata per esplorare i dilemmi morali affrontati dai veicoli autonomi e per raccogliere opinioni su come le macchine dovrebbero prendere decisioni di fronte a questi dilemmi morali.

Questi temi sono stati utilizzati anche come principio di base nel contesto dello studio commissionato dalla commissione giuridica del Parlamento europeo “*per valutare e analizzare, da un punto di vista giuridico ed etico, le future norme di diritto civile europeo in materia di robotica*”. Nel febbraio 2017 è stata adottata la risoluzione del Parlamento europeo “Le leggi civili nella robotica”, che copre un'ampia gamma di settori diversi, tra cui le norme sulla responsabilità, le questioni etiche, la standardizzazione, la sicurezza, la protezione dei dati e i diritti di proprietà intellettuale, i veicoli autonomi, i droni, i robot assistivi, i robot medici, la valorizzazione umana e l'istruzione, l'occupazione, un codice di condotta etica per gli ingegneri della robotica e un codice per i comitati di etica della ricerca. Inoltre, propone la costituzione di un'Agenzia Europea per la robotica e l'intelligenza artificiale.

La reazione delle aziende produttrici di robot è stata immediata, mostrando preoccupazione che nuovi regolamenti possano ostacolare i progressi e la

competitività dell'intera industria manifatturiera. Sono stati inoltre condotti diversi studi sociali per valutare l'impatto di queste tecnologie in rapida evoluzione sul mercato del lavoro e un forte dibattito è ancora in corso sui giornali, i social media e presso le organizzazioni internazionali.

Il 22 maggio 2019 l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico ha adottato la Raccomandazione del Consiglio dell'OECD sull'intelligenza artificiale [42], che stabilisce i principi per la gestione responsabile dei sistemi di intelligenza artificiale affidabili e raccomandazioni ai fondi nazionali per le politiche nazionali e la cooperazione internazionale. Questi principi si basano su: crescita inclusiva; sviluppo sostenibile e benessere; valori e equità centrati sull'uomo; trasparenza e chiarezza, solidità, sicurezza e sicurezza; responsabilità.

9.7 Conclusioni

Le tecnologie innovative dell'Industria 4.0 consentono una nuova generazione di fabbriche in cui i robot industriali svolgono autonomamente tutti i compiti mentre i lavoratori hanno principalmente un ruolo di supervisione. Grazie alla migliore capacità di rilevamento e al controllo in tempo reale, la cooperazione tra uomo e robot diventa più facile e sicura, migliorando la produttività, la qualità della produzione e la flessibilità. I sistemi ciber fisici dotati di intelligenza artificiale non solo monitorano l'intero processo produttivo, ma sono in grado di fare previsioni e prendere decisioni al fine di migliorare l'efficienza della produzione.

Molti progressi sono stati fatti negli ultimi decenni, ma devono essere affrontate ancora molte sfide, sia nel mondo fisico (hardware) che in quello cibernetico (software), migliorando sensori, attuatori, controllori, archiviazione e analisi dei dati, algoritmi di intelligenza artificiale al fine di raggiungere la nuova generazione di fabbriche figurate dal paradigma Industry 4.0.

L'interconnessione richiede un *sistema di comunicazione standard*, pertanto i linguaggi proprietari devono essere sostituiti da una soluzione open source; la collaborazione uomo-robot ha bisogno di *capacità di percezione avanzate* per lavorare in sicurezza in spazi non strutturati e gli *aspetti psico-sociali* di questa collaborazione dal punto di vista dei lavoratori devono essere oculatamente considerati; le macchine intelligenti, in grado di prendere decisioni, introducono seri *problemi etici*, per delle leggi appropriate devono essere definite e implementate nei robot; la sicurezza dei CPS è esposta a nuove minacce e la trasmissione e la condivisione dei dati richiedono un nuovo livello di *sicurezza informatica e privacy*; la modularità e configurabilità necessarie per realizzare prodotti completamente personalizzati richiedono un *nuovo modello di business*; tutti i cambiamenti inclusi nei nuovi paradigmi richiedono corrispondenti trasformazioni nelle competenze e nelle strutture organizzative della forza lavoro, che possono essere raggiunti con una trasformazione del *sistema educativo* che offra non solo nuovi contenuti, ma anche nuove metodologie per la nuova generazione di dipendenti.

Industria 4.0 è una rivoluzione industriale che si evolve a ritmo esponenziale con un impatto enorme sulla qualità della vita delle popolazioni di tutto il mondo. La consapevolezza consapevole di tale impatto è essenziale per trarre il massimo beneficio da questa svolta, poiché potrebbe anche portare a una maggiore disuguaglianza. I benefici immediati saranno principalmente per gli innovatori e gli investitori, il mercato del lavoro sarà fortemente influenzato dall'aumento della richiesta di lavoratori altamente qualificati e diminuzione dell'offerta per i lavoratori con meno istruzione e competenze inferiori.

Le interconnessioni digitali ridurranno inoltre le distanze tra le persone offrendo nuove opportunità di scambi interculturali, migliorando la comprensione e la coesione. Tuttavia, si diffonderanno più velocemente e senza alcun controllo anche aspettative irrealistiche e ideologie estreme raggiungendo persone vulnerabili, più facilmente vittime impotenti di violazioni della privacy e furto di dati.

Pertanto, l'opportunità offerta dalla quarta rivoluzione industriale deve essere condivisa e modellata a livello globale verso un futuro con obiettivi e valori comuni, a beneficio delle persone meno potenti cercando di non aumentare il divario tra le classi sociali.

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 riprodurre 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.

9.8 Bibliografia

- [1] N. Jazdi, "Cyber physical systems in the context of Industry 4.0", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, Romania, 22–24 May, pp. 1- 4, 2014.
- [2] E. Geisberger, & M. Broy, (Eds.). *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems Vol. 1*. Springer-Verlag.; ISBN 978-3-642-29098-5, 2012.
- [3] D. Zuehlke, "SmartFactory Towards a factory-of-things", *Annual Reviews in Control*, vol.34, pp.129-138, 2010.
- [4] A. Khalid et al. "A methodology to develop collaborative robotic cyber-physical systems for production environments", *Logistic Research* 9:23, 2016.

- [5] I. Navarro and F. Matía, “An introduction to swarm robotics”. *International Scholarly Research Notices*, 2013.
- [6] F. Mondada, M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klaptocz, 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. CONF, pp. 59-65, IPCB: Instituto Politécnico de Castelo Branco, 2009.
- [7] M.H.M. Alkilabi, A. Narayan, C. Lu, and E. Tuci, Evolving group transport strategies for e-puck robots: moving objects towards a target area. In Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 503-516 Springer, Cham. 2018.
- [8] M.H.M. Alkilabi, A. Narayan, and E. Tuci, “Cooperative object transport with a swarm of e-puck robots: robustness and scalability of evolved collective strategies”, *Swarm intelligence*, 11(3-4), pp.185-209, 2017.
- [9] F. Perez-Diaz, R. Zillmer, and R. Groß, “Control of synchronization regimes in networks of mobile interacting agents”,. *Physical Review Applied*, 7(5), p.054002, 2017.
- [10] <http://www.e-puck.org/>
- [11] <https://www.youtube.com/watch?v=t8wbicHdRFk>
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=E7jRYvEFytE>
- [13] https://www.youtube.com/watch?v=4DKrcpa8Z_E
- [14] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics - Modelling, Planning and Control, Chapter 4, Springer-Verlag London Limited DOI 10.1007/978-1-84628-642-1, 2010.
- [15] G. Legnani, I. Fassi, Robotica Industriale, Chapter 9, CittàStudi, 2019.
- [16] M. Hägele, K. Nilsson, J.N. Pires, R. Bishoff, Industrial Robotics, in Springer Handbook of Robotics, Chapters 54, Siciliano, B. Khatib, O. (Eds.), 2nd edition, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [17] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics - Modelling, Planning and Control, Chapter 6, Springer-Verlag London Limited DOI 10.1007/978-1-84628-642-1, 2010.
- [18] G. Legnani, I. Fassi, Robotica Industriale, Chapter 11, CittàStudi, 2019.
- [19] <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>
- [20] <https://us.mitsubishielectric.com/fa/en/products/industrial-robots-melfa/engineering-software/rt-toolbox3-pro/rt-toolbox3#>
- [21] <https://robodk.com/>
- [22] <https://www.robotmaster.com/en/>
- [23] https://www.delfoi.com/web/products/delfoirobotics/en_GB/off-line_ENG/
- [24] http://www.fastsuite.com/en_EN/fastsuite/why-fastsuite.html
- [25] <http://octopuz.com/>
- [26] <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>
- [27] <https://rosindustrial.org/about/description/>
- [28] B. Siciliano, et al. *Robotics - Modelling, Planning and Control*, Chapter 8, Springer-Verlag London Limited 2010. DOI 10.1007/978-1-84628-642-1

- [29] G. Legnani, I. Fassi, *Robotica Industriale*, Chapter 10, CittàStudi, 2019.
- [30] L. Villani, et al. *Force Control*, Chapter 9, in *Springer Handbook of Robotics*, Siciliano, B. Khatib, O. (Eds.), 2nd edition, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [31] B. Siciliano, et al., *Robotics - Modelling, Planning and Control*, Chapter 9, Springer-Verlag London Limited DOI 10.1007/978-1-84628-642-1, 2010.
- [32] Kevin M. Lynch and Frank C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*, Chapter 11, Cambridge University Press, ISBN 9781107156302, 2017.
- [33] B. Hannaford et al., *Haptics*, Chapter 42, in *Springer Handbook of Robotics*, Siciliano, B. Khatib, O. (Eds.), 2nd edition, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [34] G. Niemeyer et al. *Telerobotics*, Chapter 43, in *Springer Handbook of Robotics*, Siciliano, B. Khatib, O. (Eds.), 2nd edition, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [35] F. Chaumette et al. *Visual Servoing*, Chapter 34, in *Springer Handbook of Robotics*, Siciliano, B. Khatib, O. (Eds.), 2nd edition, DOI 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [36] B. Siciliano, et al. *Robotics - Modelling, Planning and Control*, Chapter 10, Springer-Verlag London Limited DOI 10.1007/978-1-84628-642-1, 2010.
- [37] H. Gardner, *Frames of mind: The Theory of Multiple Intelligences*, 1983.
- [38] Fuzzy Logic (FL) is a method of reasoning that resembles human decision making process, working on the levels of possibilities of input to achieve the definite output, helping to deal with uncertainties in engineering. It can be implemented at both hardware and software level.
- [39] C. Menni, et al., “Real-time tracking of self-reported symptoms to predict potential COVID-19”, *Nature medicine*, 26(7), 1037-1040. doi.org/10.1038/s41591-020-0916-2, 2020.
- [40] I. Asimov, *Runaround*, 1942.
- [41] E. Awad, S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, J.-F. Bonnefon, I. Rahwan, “The Moral Machine experiment”, *Nature*, 563, pp.59–64, 2018.
- [42] OECD, *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence*, OECD/LEGAL/0449



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