

LA ROBOTICA*

CARLO ALBERTO AVIZZANO

Scuola Superiore di Studi Universitari Sant'Anna, Pisa

Introduzione

'Robot' è una parola coniata dallo drammaturgo ceco Karel Capek per indicare il lavoro non volontario. La parola è stata introdotta nella sua opera teatrale "R.U.R. (Rossum's Universal Robots)" messa in scena nel Gennaio 1921. Tuttavia, a differenza del concetto moderno, i robot di Capek erano dei servitori creati mediante procedimenti chimico/biologici e non erano meccanici. L'etimologia della parola 'Robot' è comunque da ricondursi al ceco *robota* che significa *schiavo*.



Oggi, con il termine 'Robotica' ci si riferisce allo studio e all'uso dei robot intesi come dispositivi elettromeccanici il cui comportamento viene controllato da opportuni comandi impartiti dall'uomo. Il termine 'Robot', nella sua accezione moderna, è stato utilizzato per la prima volta dallo scienziato e scrittore Isaac Asimov. Detto termine venne utilizzato nella pubblicazione *Runaround*, una storia pubblicata nel 1942, in cui Asimov riportò per la prima volta le ormai famose Leggi della Robotica. La storia fu poi ripresa nel successivo romanzo *Io, Robot*, dove fu introdotta l'idea del cervello positronico.

1. Le leggi della robotica

Le leggi della robotica sono successivamente state rielaborate e codificate dallo stesso scrittore, quindi pubblicate in un testo *Handbook of Robotics*. Le leggi, inizialmente

tre, sono poi state completate in quattro con l'aggiunta di una legge 0, aggiunta in seguito. Dette leggi codificano le norme etico/comportamentali che un qualsiasi robot deve rispettare. L'organizzazione delle leggi, piuttosto che identificare compiti specifici che un robot deve assolvere, si limita a definire il ruolo che questi strumenti possono assumere all'interno della società, vincolandone la propria autonomia di comportamento, rispettivamente alla sicurezza dell'uomo e dell'umanità, quindi alla sua manifestazione di volontà¹:

0. Un robot non deve provocare danno all'umanità sia tramite la sua azione che tramite un comportamento passivo [*Questa legge è stata aggiunta in seguito.*]
1. Un robot non deve ferire esseri umani o tramite la sua non azione consentire un danno agli stessi.
2. Un robot deve obbedire agli ordini degli esseri umani eccetto quando questi siano in contrasto con la prima legge.
3. Un robot deve agire per proteggere la sua stessa esistenza fintanto che tali azioni non siano in contrasto con le prime due leggi.

2. Definizione di robot

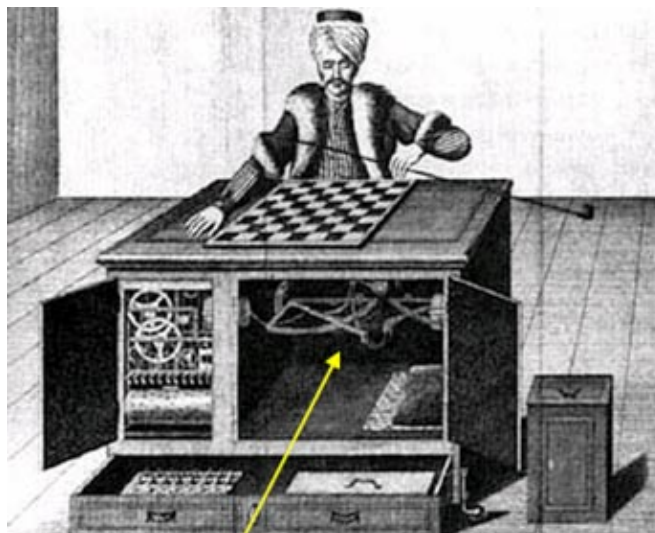
Un Robot è «un manipolatore riprogrammabile e multifunzionale progettato per spostare materiali, componenti, attrezzi o dispositivi specializzati attraverso vari movimenti programmati per la realizzazione di vari compiti» (Robot Institute of America, 1979). Il dizionario Garzanti invece riporta il termine 'Robot' come una «macchina automatica capace di svolgere, con opportuni comandi, alcune funzioni o attività proprie dell'uomo; automa meccanico».

In entrambi i casi ci si rende conto che la definizione di robot che possiamo trovare sulle fonti ufficiali, non risulta al passo con i tempi. In molti casi, mentre la visione di Isaac Asimov era oltremodo futuristica, queste definizioni si limitano ad un concetto di sistema robotico, limitato agli aspetti di automazione industriale tipici degli anni settanta. Gli sviluppi concorrenti delle tecnologie robotiche avuti nel corso degli anni ottanta/novanta hanno tuttavia rivoluzionato il concetto di robot, trasformandolo da strumento di servizio in ambienti industriali di tipo strutturato, in sistema di utilità e collaboratore dell'uomo nel suo stesso ambiente. Come vedremo, intelligenza artificiale, optoelettronica, microelettronica e mecatronica hanno concorrentemente contribuito ad eseguire questa trasformazione.

Ad oggi potremo definire 'Robot' un sistema elettromeccanico riprogrammabile, dotato di capacità di percezione e di un'intelligenza propria, predisposto per compiere un ampio numero di compiti diversi. I Robot si differenziano per applicazione, struttura ed attuazione in diverse categorie: da robot mobili a manipolatori industriali, da robot chirurgici a sistemi di addestramento.

3. Cenni storici

L'idea di realizzare dei sistemi meccanici autonomi ed intelligenti è abbastanza antica. Esempi di automatismi meccanici possono essere ricondotti all'antichità: la clessidra ad acqua ad esempio fu creata nel 250 a.c. da un fisico greco Ctesibius di Alessandria.



Il giocatore di scacchi, Wolfgang De Kempelen, 1769

1769

Wolfgang De Kempelen, un inventore Ungherese al servizio della imperatrice Maria Teresa di Vienna, sviluppò il giocatore di scacchi, un meccanismo apparentemente in grado di giocare automaticamente a scacchi, ma in realtà animato tramite un sistema di leveraggi interni, da un giocatore umano nascosto all'interno del congegno. A Kempelen si possono ricondurre numerosi contributi in termini della ricerca in robotica compresa la macchina parlante. Famosa è la sua pubblicazione al riguardo: *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine* (1791).

1921

Lo scrittore cecoslovacco Karel Capek introduce per la prima volta la parola Robot nel R.U.R. – Rossum's Universal Robots. La parola viene dal cecoslovacco 'robota', che significa lavoratore.

1938.

Il primo meccanismo programmabile per dipingere viene progettato da Willard Pollard e Harold Roselund (DeVilbiss Company).

1942.

Isaac Asimov pubblica *Runaround*, in cui definisce le tre leggi fondamentali della robotica.

1946.

Nasce l'elaborazione elettronica: George Devol brevetta un dispositivo di replicazione per il controllo di macchine che utilizza la registrazione magnetica; J. Presper Eckert

e John Mauchly costruiscono l' ENIAC all' università della Pennsylvania: il primo calcolatore elettronico.

Già nei primi anni '40, Grey realizza la sua "Machina speculatrix", un veicolo su ruote in grado di implementare un comportamento simile a quelli degli esseri viventi. Il veicolo, era infatti in grado di inseguire sorgenti luminose (Walter, W. Grey, "An Imitation of Life," Scientific American, May 1950, p42-45).

1948.

Norbert Wiener pubblica un libro (*Cybernetics or Control and Communication in the Animal*) che descrive i concetti di comunicazione e controllo in sistemi elettronici, meccanici e biologici. La Robotica 'vera', ovvero quella realizzata con sistemi e teorie scientifiche come noi oggi siamo abituati a vederla, nasce qualche anno più tardi.

1951.

In Francia presso la CEA (Commissione dell'Energia Atomica), Raymond Goertz progetta il primo sistema robotico teleroperato. Si tratta di un prototipo di pantografo meccanico, dotato di controlli e di pinze per realizzare la manipolazione a distanza sostanze radioattive. Uno spesso vetro, posizionato tra operatore e materiale contaminante, provvede a isolare l'uomo, mentre il meccanismo, sfruttando opportune proprietà cinematiche, riproduce fedelmente i movimenti del soggetto nell'ambiente ostile. Qualche anno più tardi sarà lo stesso Goertz a ripresentare il concetto di teleoperazione basato su un'architettura di controllo elettromeccanica e non più soltanto elettrica. È il primo passo verso l'automazione industriale, l'uomo mette le intenzioni e la macchina le esegue a distanza.

1954.

George Devol progetta il primo robot programmabile e conia il termine 'Automazione Universale' (che poi sarà usato per la compagnia UNIMATION) la prima compagnia di robotica al mondo.

1959.

Marvin Minsky e John McCarthy fondano il laboratorio di intelligenza artificiale al Massachusetts Institute of Technology (MIT). L'Istituto Tecnologico del Massachusetts, svolgerà successivamente un ruolo fondamentale sia come 'fabbrica di cervelli' nel campo della robotica, che come soggetto promotore di attività di ricerca e industriali.

1960.

La Unimation viene acquisita dalla Condec Corporation e inizia la produzione dell' Unimate Robot Systems. Quindi nel 1962 la General Motors acquista il primo robot industriale dalla Unimation per le sue linee di produzione.

1963.

John McCarthy fuoriuscito dal MIT, fonda il laboratorio di intelligenza artificiale alla Stanford University. Nel 1964 anche il Giappone fonda i suoi primi laboratori basati sulla teleoperazione elettrica.

1965.

La teoria delle trasformazioni omogenee rivoluziona la cinematica dei robot fornendo dei modelli analitici esatti per la pianificazione dei movimenti ed il calcolo delle leggi di controllo. Da questo punto in poi, le novità in campo scientifico e industriale si susseguono rapidamente. Solo per citarne alcune: nel 1967 il Giappone importa il suo primo robot (il Versatran) prodotto dalla AMF; nel 1968 La Kawasaki acquista la licenza di un progetto per robot idraulici ed inizia la sua prima produzione in Giappone.

1970.

Victor Scheinman (alla Stanford University) progetta lo Standard Arm²; viene progettato a Waseda il primo Humanoid Robot; è di questo periodo anche l'invenzione e l'introduzione commerciale dei primi microcomputer.

1973.

La Cincinnati Milacron commercia il T3, il primo robot industriale controllato da un minicomputer.

1976.

Braccia robotiche sono usate sulle missioni spaziali Viking 1 e 2.

4. La robotica umanoide

Sin dall'inizio della coniazione del vocabolo, il termine robot è stato strettamente associato a caratteristiche di sistemi elettromeccanici di tipo antropomorfi. La stessa rappresentazione del R.U.R. raffigurava un manichino dalla forma umana. Durante gli ultimi 50 anni, narrativa e cinematografia hanno prevalentemente immaginato la figura del robot come un essere meccanico dalle sembianze umane.



L'idea di ricostruire un robot dalle forme umane, è oggi solo una delle linee di ricerca della robotica moderna, la robotica umanoide, ma ciononostante costituisce tuttoggi una delle sfide più ambiziose sia per le complessità di percezione e meccaniche

insite, sia per la difficoltà di ricreare il coordinamento motorio che per l'intelligenza propria dell'azione di esseri umani.

I primi esperimenti di progettazione di robot dalle forme umane risalgono alle ricerche della Waseda university dei primi anni '70. Nonostante un trentennio abbondante di ricerca nel settore, tuttavia la realizzazione di un sistema che si avvicini alle prestazioni umane è ancora lontana. I due risultati più di successo nel settore sono il robot umanoide realizzato dalla Honda e presentato nel 1998 e il Sony Dreaming Robot, oggi alla sua 4 versione. Entrambi hanno capacità di locomozione e equilibrio, e sono in grado di eseguire dei compiti elementari in accordo a traiettorie e movimenti preimpostati.



5. Linee di sviluppo della robotica

La robotica prende piede nella società negli anni '70 come supporto alla produzione industriale. In quel periodo, l'ambiente in cui opera il robot e l'ambiente in cui opera l'uomo sono completamente separati al fine di garantire i margini di sicurezza agli operatori necessari. I primi robot inoltre operavano in ambienti completamente strutturati, ovvero dove le posizioni di tutti gli elementi con cui il robot doveva interagire erano note a priori. Successivi sviluppi della robotica, come la visione artificiale, hanno poi consentito di ridurre i vincoli imposti nell'ambiente.

Successivamente la robustezza e i fattori di sicurezza per gli operatori collegati all'impiego dei robot hanno indotto i ricercatori a progettare nuovi sistemi, detti di teleoperazione, in cui i robot siano capaci di trasportare in ambienti remoti e/o ostili le capacità di azione e destrezza di un operatore umano. L'avvento della teleoperazione ha introdotto nel paradigma di azione dei robot una profonda trasformazione dal momento in cui l'operatore doveva operare nello stesso spazio fisico del robot con cui interagisce.

Negli anni '90, gli ambienti virtuali hanno ulteriormente ridotto questa distanza tra operatore e robot, immaginando e realizzando una serie di dispositivi robotici (dette 'interfacce afferenti') tramite i quali l'operatore risulta in grado di interagire con l'ambiente virtuale e percepirne stimoli fisici. L'uso di questi dispositivi (aptici, tattili, termici) richiede che l'operatore indossi fisicamente una componente o tutto il meccanismo, in grado di trasmettere percezioni tramite aree di contatto. Gli ambienti

virtuali arricchiscono quindi la capacità di condividere l'ambiente tra sistema robotico e uomo, con la capacità di condividere le esperienze.



Un ulteriore sviluppo di questi sistemi viene dall'intelligenza artificiale, ad oggi infatti, un'ampia serie di sistemi robotici (quali gli ausili tecnologici, i robot reattivi, i cobot), consentono di condividere con l'operatore non solo l'interazione in termini di esperienza, ma anche in termini di intenzione.

È possibile suddividere le aree di ricerca ed applicazione della robotica in quattro grandi categorie:

- I robot industriali, i primi in ordine di applicazione, hanno oggi un vastissimo impiego in tutti i settori della produzione. Essi infatti consentono di ridurre costi e tempi di produzione e di poter modulare i costi in base ai volumi di produzione necessari. In aggiunta miglioramenti qualitativi dei prodotti, e la maggior sicurezza per il personale danno forti motivazioni a questo tipo di produzione. Nel campo della robotica industriale esistono manipolatori per decine di applicazioni differenti, solo per citarne alcune: verniciatura, assemblaggio, pulizia, ispezione, saldatura, montaggio, movimentazione, taglio, controllo qualità, rilevamento,... ed il numero di applicazioni sembra destinato ad aumentare con il tempo e l'autonomia raggiunta da questi dispositivi.



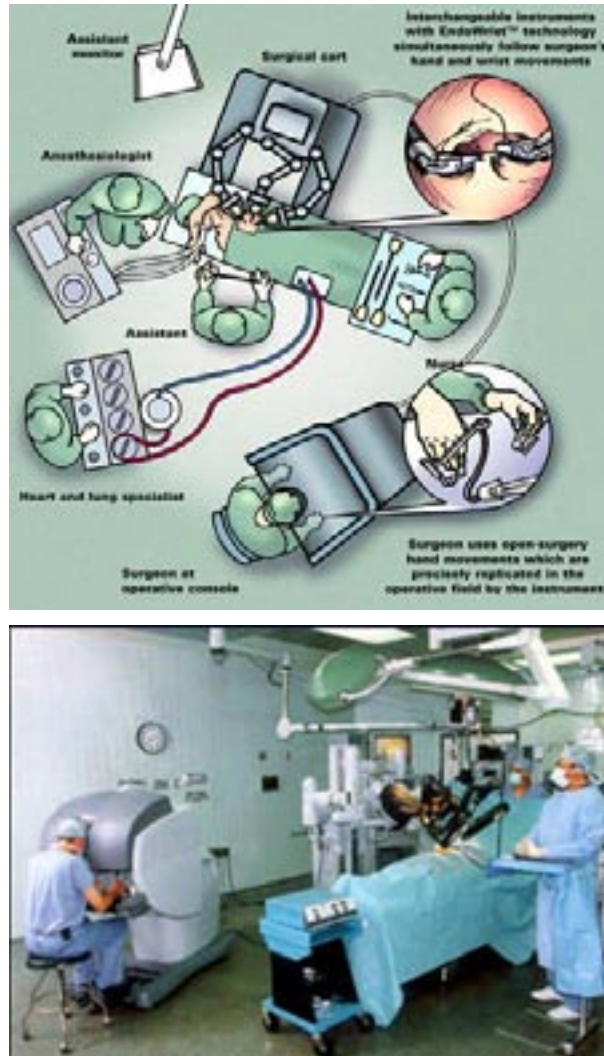


- I robot sociali, individuano una nuova applicazione della robotica destinata ad essere nel futuro uno strumento di interazione sociale. Eliminata la barriera della sicurezza, tramite una serie accurata di norme e di certificazioni, i robot possono entrare a far parte, come già i computer hanno fatto 20 anni fa, della vita sociale. Rispetto ai computer questi ultimi sembrano avere maggiori potenzialità espressive nel fatto che possono integrare le capacità multimodali con movimento e gestualità ai primi negati. Ad oggi lo sviluppo dei robot sociali è ancora limitato, si va da alcuni esempi commerciali a risultati perlopiù sperimentali.
- Robot per il gioco (il Sony Aibò, Mitsubishi Wakamaru, i Lego Mindstorm), per il cinema (l'animatronica) e l'assistenza agli anziani (domotica), sono ormai diffusi.
- Di più recente ricerca invece sono i robot per l'interazione artistica, lo sport e la musica.

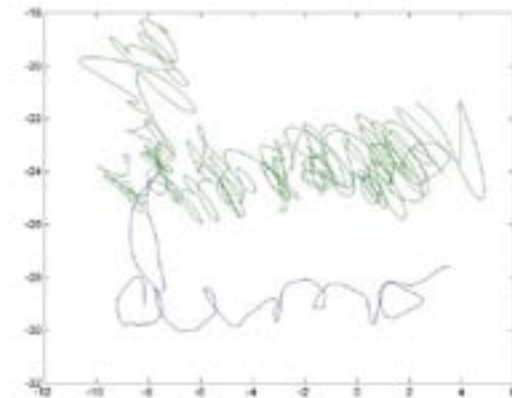
In ambito medico, l'impiego della robotica sta rivoluzionando sia la pratica chirurgica (Computer Aided Surgery) che quella di clinica (fisioterapia, assistenza tecnologica). Nel corso degli ultimi sette anni, diversi sistemi robotici sono stati progettati e commercializzati per completare gli apparati di chirurgia mini-invasiva, con strumentazione robotica in grado di rendere naturale ed intuitivo il processo di intervento.

Il sistema Da Vinci (Intuitive Surgical) ad esempio unisce un sistema di 'cardioscopia' ad un sistema di teleoperazione. Il sistema consente a un chirurgo seduto in una postazione prossima al paziente di operare tramite le dita come se le sue mani fossero realmente delle pinze all'interno del corpo del paziente. Un complesso sistema robotico provvede a raccogliere i movimenti delle dita del chirurgo e a trasmettere ad un sistema robotico di chirurgia mini-invasiva che l'*équipe* avrà collocato all'interno del corpo del paziente. Un sistema di camere stereoscopico consentirà inoltre al chirurgo di vedere direttamente all'interno del corpo del paziente come se le sue dita fossero ivi presenti. Il sistema produce notevoli effetti positivi con un conseguente risparmio sociale ed

economico: riduce tempi di recupero, riduce complicazioni dovute a infezioni post-operatorie, limita lo stress fisico. Tuttavia richiede una squadra medica altamente specializzata.



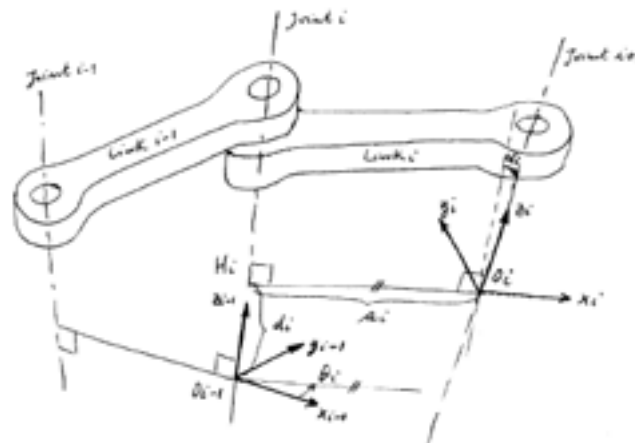
In ambito terapeutico esistono ad oggi diversi sistemi di riabilitazione neuro-motoria basati su interfacce robotiche controllate al computer. Questi sistemi possono essere applicati in diversi ambiti a seconda della patologia clinica. Ad esempio, smorzatori attivi del tremore possono essere impiegati in caso di sclerosi multipla o Parkinson; sistemi di registrazione ed ausilio motorio possono essere impiegati per esercizi post-traumatici o per particolari patologie che danneggiano le capacità motorie.



Per robot operativi, si intendono tutti quei robot con una specifica applicazione nell'esecuzione di un task. Questi robot solitamente presentano un elevato grado di autonomia e sono impiegati in condizioni critiche e/o pericolose. Alcuni robot operativi sono impiegati per il trasporto di materiali, il pattugliamento, la simulazione, l'aumentazione della capacità fisico-percettive (*body-extender*), lo sminamento, la coltivazione, veicoli autonomi (aerei, marini, terrestri).

6. Componenti di un robot

La realizzazione ed il funzionamento vengono ottenuti tramite l'integrazione di una serie di componenti diverse così definite: parti meccaniche, sistema di trasmissione, sistema di attuazione, elettronica di controllo e rilevazione, sistema di calcolo e controllo, software comportamentale.



- Le componenti meccaniche individuano le parti strutturali del manipolatore. Le parti strutturali vengono a loro volta suddivise in due categorie: i *link* ed i giunti. I primi costituiscono il corpo del manipolatore, i secondi le articolazioni mobili. Due sono i tipi di giunti base (rotativo e lineare) anche se sono d'uso giunti più complessi: *screw*, giunti sferici... Alla progettazione della meccanica di un manipolatore contribuiscono specifiche prestazionali ed operative determinate dalla specifica applicazione cui il manipolatore è destinato. A seconda della combinazione di giunti e di *link*, un manipolatore potrà appartenere a diverse categorie: seriale, seriale diramato, parallelo, ibrido.
- La trasmissione si occupa di trasmettere l'energia prodotta da un sistema di attuazione alle articolazioni del robot. Esistono diverse tecnologie tramite le quali tale trasmissione può essere determinata: diretta (il motore è sull'asse del giunto), a cinghia, a cavi ...
- L'attuazione invece è la sorgente di energia che fornisce movimento al robot. Gli attuatori si distinguono in due classi: lineari e rotativi. I primi possono agire in senso alternato lungo una linea di movimento, i secondi ruotare attorno un asse. Inoltre l'attuazione si distingue sia per classificazione fisica del mezzo di trasmissione dell'energia (elettrica, idraulica, pneumatica) che per specifico principio di trasduzione (piezoelettrica, a induzione)
- L'elettronica di un robot è forse la componente con maggiori varianti possibili. Essa si distingue in due parti: la componente di acquisizione e quella di attuazione. La prima serve a raccogliere informazioni ambientali (quali la posizione del robot, forze di contatto, accelerazioni, visione, temperatura,...) la seconda a trasformare le indicazioni del sistema di controllo in segnali elettrici idonei a pilotare i motori. I sistemi di attuazione (*driver*) sfruttano una relazione diretta tra una variabile elettrica controllabile e l'azione meccanica da esercitare. Nel caso dei motori elettrici generalmente si controlla la relazione

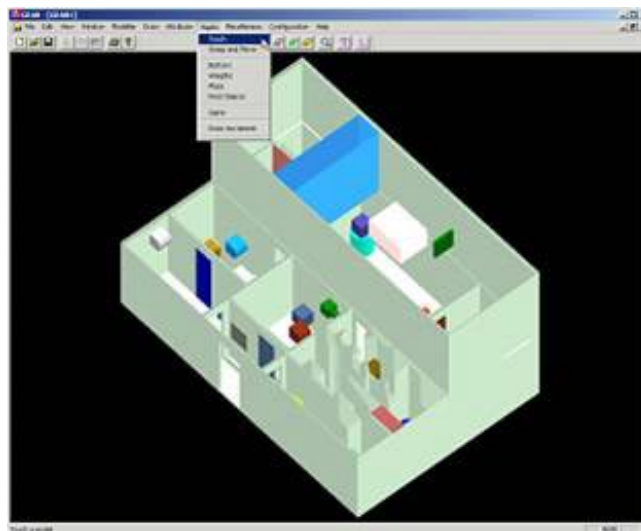
tra la tensione-corrente presentata al motore e la coppia/velocità di esercizio.

- Il controllo di un robot si occupa di coordinare i segnali elettronici rilevati dal sistema di percezione per produrre segnali di movimento da trasdurre in opportuni comandi elettrici per i motori. Sebbene originariamente siano stati creati anche meccanismi di controllo meccanici, due categorie di controlli sono attualmente in uso: controlli elettronici e controlli digitali. La tendenza, sia per questioni di costo che di affidabilità è comunque nel digitalizzare tutti i controlli.
- Il software comportamentale definisce infine il compito e le relazioni del robot con l'ambiente circostante. Diverse famiglie di software comportamentali sono disponibili e si differenziano prevalentemente in base al campo di applicazione. Alcuni esempi includono: inseguimento di traiettorie preimpostate (automazione industriale) ovvero fornite in tempo reale (teleguida, teleoperazione), rilevazione di parametri (controllo qualità, ispezione), analisi semantica dei dati rilevati (sorveglianza, navigazione autonoma), inseguimento di fattori di merito (ausili tecnologici, extender,...). Inoltre il software comportamentale include un'ampia famiglia di soluzioni analitiche/numeriche per risolvere specifici problemi di movimentazione: cinematica diretta, cinematica inversa, pianificazione di traiettorie.

7. Alcuni esempi

Il sistema GRAB è un ausilio tecnologico per non vedenti. Il soggetto può inserire l'indice e il pollice in due ditali controllati da dispositivi elettromeccanici e diventa in grado di percepire, mediante il tatto, forme ed informazioni collegate all'ambiente virtuale. Tramite comandi vocali altre informazioni possono essere scambiate con il sistema. Applicazioni tipiche riguardano giochi, esplorazione di mappe di città, l'uso di grafici e la matematica.





Il Museo Delle Forme Pure (www.pureform.org) è un sistema in cui un dispositivo robotico viene integrato con un ambiente virtuale. Un Museo, composto di sale e statue, esatte copie digitali dei relativi originali, viene materializzato alla vista del visitatore e alla percezione delle sue mani. Una vera e propria esperienza artistica virtuale che, grazie alla possibilità di toccare le opere, offerta dalla tecnologia aptica, si apre a nuove esperienze e nuove utenze come quella dei non vedenti.



La scrivania aptica è un sistema per integrare le classiche interfacce grafiche al calcolatore con strumenti di interazione robotica. L'uso della robotica e della percezione fisica in questo caso può essere veicolo di trasmissione di informazione utile per la messa a punto di software formativi in grado di insegnare particolari abilità motorie al suo utilizzatore (scrivere, disegnare, etc.).



Il Body Extender è un particolare dispositivo robotico antropomorfo in grado di essere indossato dal suo manovratore. Il sistema robotico prevede strutture in grado di assistere il movimento delle gambe e delle braccia dell'operatore nella manovra di grossi carichi (in termini di peso) e di 'alleggerirli' fisicamente tramite un sistema di controllo in tempo reale.



NOTE

* Il presente contributo è la trascrizione della lezione introduttiva alle tecnologie robotiche tenutasi a Pontedera (Pisa) il 19 ottobre 2005, presso l'Istituto Fermi. Obiettivo della lezione è stato quello di presentare agli studenti una panoramica delle tecnologie robotiche, dei loro impieghi e dei *trend* di ricerca.

¹ Le leggi di Asimov, pur avendo costituito un caposaldo della narrativa e della cinematografia robotica, sono solo marginalmente state applicate nel corso della ricerca e dello sviluppo di tecnologie robotiche. Ad esempio, le tecnologie militari, e la robotica associata, hanno da sempre concepito il robot come uno strumento di aggressione in chiara violazione delle norme etiche comportamentali fissate da Asimov. In campo medico, robot automatici e/o semiautomatici possono recare offesa ai pazienti al fine di portare a termine l'operazione secondo le volontà di un chirurgo. In campo formativo, dei robot possono opporsi alla volontà dei discenti al fine di mostrare forme e gesti di un comportamento corretto. Pertanto è sbagliato pensare che tali leggi debbano sempre e comunque essere un punto di riferimento per lo sviluppo di sistemi robotici.

² La cinematica di questo robot rimane oggi la più usata per robot industriali.