

INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Marco Somalvico

con il contributo di Francesco Amigoni e Viola Schiaffonati

Progetto di Intelligenza Artificiale e Robotica
Dipartimento di Elettronica e Informazione
Politecnico di Milano
Milano

1. INTRODUZIONE

In questa trattazione viene presentata l'Intelligenza Artificiale (nel seguito indicata con IA), ponendo particolare enfasi sui sistemi inferenziali, dei quali i sistemi esperti rappresentano un caso particolarmente significativo, e sulla robotica intelligente, che tratta i robot dotati di sensori e di capacità inferenziali proprie.

Nella presente introduzione la trattazione sarà limitata all'illustrazione generale dell'IA, per poi passare, nelle sezioni che seguono, all'illustrazione degli aspetti storici, epistemologici e scientifici inerenti il problema del rapporto tra la macchina e l'uomo, ancorando tali considerazioni ad alcuni importanti ambiti applicativi dell'IA.

Il primo passo è quello in direzione di una definizione non ambigua dell'IA che, per sua natura, si presta a svariate interpretazioni e a qualche fraintendimento. L'IA è una moderna disciplina che negli anni recenti ha fornito un'importante contributo al progresso dell'intera informatica. Per questo motivo riveste un indubbio interesse per coloro che siano interessati alla valutazione delle potenzialità dell'informatica e degli effetti che il progresso di questa disciplina ha nei confronti dell'uomo. Inoltre l'IA è stata influenzata da numerose discipline fra le quali, oltre ovviamente all'informatica, la filosofia, la matematica, l'economia, le neuroscienze, la psicologia, la cibernetica, le scienze cognitive e la linguistica.

L'IA è quella disciplina, appartenente all'informatica, che studia i fondamenti teorici, le metodologie e le tecniche che permettono di progettare sistemi hardware e sistemi di programmi software capaci di fornire all'elaboratore elettronico delle prestazioni che, a un osservatore comune, sembrerebbero essere di pertinenza esclusiva dell'intelligenza umana [Somalvico 1987]. E' questa la definizione, accettata a livello internazionale, di un'area scientifica di notevole importanza strategica che si propone di superare, in talune zone, le attuali frontiere dell'informatica, ponendosi come obiettivo scientifico quello di migliorare ed estendere le prestazioni offerte dall'elaboratore elettronico. Si osservi che l'IA è una disciplina sperimentale, nel senso che un sistema di IA soddisfa gli obiettivi richiesti solamente quando le prestazioni desiderate sono effettivamente misurabili.

Inoltre, obiettivo di questa disciplina non è quello di replicare o simulare l'intelligenza umana, obiettivo la cui ponibilità è, per taluni scienziati, addirittura non ammissibile per motivi epistemologici laddove venga postulata una distinzione tra la realtà e la conoscenza della realtà. Al contrario l'IA ha come obiettivo quello di riprodurre o emulare l'intelligenza umana, in quanto non vi è alcun motivo a priori che impedisca che talune (ma non tutte!) prestazioni dell'intelligenza umana (per esempio la capacità di risolvere problemi risolubili con procedimenti inferenziali) possano anche essere fornite da una macchina. Nel caso dell'emulazione le prestazioni intelligenti sono ottenute utilizzando dei meccanismi propri della macchina, eventualmente differenti da quelli ipotizzati per l'uomo, ma tali da fornire prestazioni qualitativamente equivalenti e quantitativamente superiori a quelle umane. Considerando attentamente la storia e la natura dei risultati ottenuti dalle ricerche scientifiche in IA si può dire che gli studiosi hanno valutato, volta per volta, diversi modelli

della razionalità umana, tra i quali hanno scelto il migliore al fine di procedere alla concezione di una nuova tecnica o di un nuovo sistema di IA. Ebbene, tali modelli sono stati sia di tipo antropomorfo (dove per antropomorfo si intendono modelli che permettono non solo di ottenere prestazioni analoghe a quelle dell'uomo, ma anche di farlo con gli stessi metodi usati dall'uomo) sia di tipo non antropomorfo con l'obiettivo di garantire i migliori risultati possibili. In generale i modelli non antropomorfi hanno dimostrato caratteristiche di maggiore adattamento e integrazione con i modelli, con le tecniche e con i sistemi di IA che erano già disponibili in seguito ai precedenti risultati delle ricerche. Non esiste quindi in IA un'ideologia che porti a preferire a priori l'adozione di modelli antropomorfi, anche se tali modelli non sono peraltro esclusi a priori dalla possibilità di essere scelti. Esiste, invece, la constatazione che, sulla base della valutazione dell'esperienza passata, i modelli utilizzati sono spesso stati dei modelli non antropomorfi.

Un altro punto importante da considerare per caratterizzare l'IA è che essa non è basata su un elenco completo di tematiche di cui è composta, ma al contrario si occupa di problemi di ricerca aperti, di frontiera, estendendo costantemente i limiti del suo interesse e della sua azione. Pertanto, una prestazione che oggi potrebbe apparire essere esclusiva dell'intelligenza umana e quindi, secondo la definizione data, essere di pertinenza dell'IA, domani potrebbe non creare più questa impressione, lasciando l'osservatore perfettamente convinto della possibilità che la prestazione possa essere fornita da un sistema artificiale e quindi possa non rientrare nell'IA.

E' bene osservare inoltre che l'IA è al tempo stesso una scienza e un'ingegneria [Nilsson 1998]. E' una scienza perché, nel momento in cui vengono emulati, con determinati sistemi artificiali, alcuni dei comportamenti intelligenti (dove intelligente, qui e nel seguito, va inteso nell'accezione facente riferimento alla ritenuta esclusività di tali comportamenti all'uomo, come si è detto in precedenza), l'uomo realizza l'obiettivo di modellizzazione oggettiva e rigorosa e di sperimentabilità futura di promettenti risultati. Ciò permette di ottenere un indiscutibile progresso nello studio, con metodi scientifici, dell'intelligenza nell'uomo. E' un'ingegneria perché, nel momento in cui vengono ottenute dalle macchine prestazioni che emulano taluni comportamenti, erroneamente ritenuti inaccessibili all'artificiale, si fornisce un oggettivo progresso al contributo che l'ingegneria (e le macchine che nel suo ambito vengono progettate) offre al miglioramento della vita dell'uomo.

2. STORIA DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'IA ha una data di nascita ufficiale, il 1956, che segna l'anno del famoso seminario estivo di Dartmouth durante il quale viene fondata programmaticamente la nuova disciplina a partire dalla raccolta dei contributi sviluppati negli anni precedenti e in direzione delle potenzialità future. Questa data di nascita convenzionale, sulla quale vi è accordo unanime nella comunità scientifica, potrebbe far pensare che la questione delle origini possa essere definitivamente risolta. Tuttavia, quando si parla di storia dell'IA non si comincia descrivendo quanto è avvenuto dal 1956 in poi, ma si fa riferimento anche alla cibernetica e all'avvento dei primi calcolatori elettronici. Solitamente poi si citano anche Charles Babbage (1791-1871) e la sua macchina analitica, Gottfried Leibniz (1646-1716) e il suo progetto di meccanizzare la ragione, arrivando fino alla macchina logica di Raimondo Lullo (1235-1315) e agli automi semoventi di Erone di Alessandria (I sec. d.C.). Sarebbe però fuorviante tentare di risolvere la questione considerando tutto ciò che è avvenuto prima del 1956 come appartenente alla categoria dei precursori. In primo luogo perché parte della ricerca informatica degli anni '50 dello scorso secolo è, a buon diritto, aspetto essenziale e fondante dell'IA. In secondo luogo perché considerare Lullo o Leibniz precursori dell'IA e Babbage padre dell'informatica significherebbe attualizzare impropriamente alcune figure.

In questo contesto appare utile parlare invece di tradizione di ricerca [McCorduck 1979] per smorzare l'eterogeneità culturale, concettuale e soprattutto di intenti di coloro che possono essere citati nell'ambito della storia dell'IA. Ricorrendo a quella tradizione che è stata chiamata tradizione formalistica di indagine sulla mente emerge un'idea importante, ossia che la prestazione artificiale faccia parte della pratica dell'uomo come ne fa parte la prestazione naturale, nella direzione di un

continuo tentativo dell'uomo nell'imitare e riprodurre se stesso e la natura. In questo senso la ricerca della delineazione temporale di una disciplina, che nel caso dell'IA appare particolarmente problematica, rappresenta il punto di avvio per un'analisi più ampia, nella quale aprire a questioni più profonde legate alla determinazione dello statuto ontologico di una disciplina che possiede caratteristiche particolari.

Una prima caratterizzazione interessante dell'impulso di autoimitazione dell'uomo appare già nella mitologia greca con gli dei che simboleggiano in massimo grado vizi e virtù umane. E' però con Erone di Alessandria, meccanico alessandrino del I secolo d.C., che vedono la luce i primi automi semoventi basati su meccanismi idraulici e pneumatici con lo scopo di destare meraviglia nell'osservatore (da cui il nome *thaumata* dal verbo greco *thaumazo* "mi meraviglio").

Nel periodo medievale questa tendenza è ben esemplificata da Raimondo Lullo, filosofo e teologo catalano, che all'istanza dell'imitazione delle caratteristiche visibili dell'uomo sostituisce il tentativo di imitarne le facoltà di pensiero. A partire dall'idea di una sorta di macchina pensante di origine araba, Lullo progetta l'*ars magna* che, secondo le descrizioni pervenute, avrebbe dovuto essere un vero e proprio artefatto composto da cerchi concentrici realizzati con dischi di metallo o gesso. L'idea era quella di ridurre tutte le scienze a dei principi fondamentali, degli elementi primi rappresentati da numeri e simboli che, disposti in archi di cerchi concentrici combinabili tra loro, dessero luogo ai ragionamenti tipici per risolvere problemi.

Questa ricerca di un modo meccanico per determinare la verità (di una *ars inveniendi veritate*) si osserva chiaramente, facendo un salto temporale e concettuale di ampia portata, anche nel caso di Leibniz. Prima della sua *ars combinatoria*, si assiste però alla rivoluzione scientifica e alla nuova tradizione di indagine sulla mente e sui rapporti mente-corpo inaugurata da Cartesio (1596-1650). Tutto ciò contribuisce a promuovere un approccio più rigoroso al problema. Secondo Leibniz la logica, in quanto sistematizzazione del ragionamento, deve essere padroneggiata e poi meccanizzata per comporre il *calculus ratiocinator*, in grado di ridurre il ragionamento a una sorta di algebra del pensiero. L'immagazzinamento di tutta la conoscenza in un adeguato linguaggio renderebbe possibile trattare meccanicamente le dispute intellettuali di qualsiasi natura secondo l'invito espresso da Leibniz di "prendere le penne e calcolare".

La tradizione formalistica di indagine sulla mente, la nascita delle prime macchine calcolatrici e la tendenza dell'uomo ad autoimitarsi: tutti questi elementi trovano posto nel progetto di Babbage della macchina alle differenze e della macchina analitica. L'esigenza primaria in questo caso risiede nella necessità di calcolare automaticamente le tavole dei logaritmi evitando gli errori umani tipici. Nella macchina alle differenze si possono rappresentare fino a 20 numeri di 18 cifre ciascuno. Le cifre sono rappresentate da ruote e le ruote per le cifre di uno stesso numero sono incolonnate in modo tale che ogni colonna possa essere alta fino a diciotto ruote. Il progetto successivo della macchina analitica, che non fu effettivamente mai realizzata per una serie di problemi di ordine economico, nasce dall'idea che i numeri risultanti come uscita della macchina alle differenze potessero essere utilizzati come dati in ingresso per un calcolo successivo. La parte centrale avrebbe dovuto essere la macina, una sorta di processore che elabora i numeri che gli vengono inviati per produrre i risultati richiesti. Inoltre, la macchina analitica avrebbe dovuto possedere un magazzino (memoria) contenente sia i numeri non ancora elaborati dalla macina, sia quelli conseguiti dalle operazioni della macchina stessa. Questa avrebbe dovuto essere composta anche da un sistema di controllo in grado di porre automaticamente in sequenza le operazioni della macchina secondo il meccanismo delle schede perforate utilizzato nei telai.

Accanto alla considerazione di quest'ampia tradizione di ricerca, un altro passaggio importante nel delineare criticamente la storia dell'IA è rappresentato dalla considerazione di come l'IA abbia ereditato molte idee, punti di vista e tecniche da altre discipline, in particolare da filosofia, matematica e psicologia. Più precisamente, dalla filosofia i risultati relativi al dibattito sulla natura dell'intelligenza e sulle relazioni fra conoscenza e azione, dalla matematica l'approccio formale basato sulla logica e dalla psicologia le relazioni fra conoscenza e azioni. Tuttavia, è senza dubbio

con la cibernetica e con l'informatica che queste influenze si fanno più manifeste e aprono la strada alla vera e propria nascita ufficiale dell'IA.

All'inizio degli anni '40 dello scorso secolo [Cordeschi 1996] si comincia a indicare con il termine cibernetica lo studio sistematico dei processi riguardanti la comunicazione e il controllo sia negli animali sia nelle macchine. Warren McCulloch e Walter Pitts propongono nel 1943 il primo modello di neuroni artificiali, attingendo alla conoscenza della fisiologia e della funzione di base dei neuroni, alla logica proposizionale e alla teoria della computabilità di Turing. L'idea alla base del progetto cibernetico è quella di studiare i meccanismi dell'autoregolazione e del controllo presenti sia negli organismi viventi sia nelle macchine con retroazione, in grado cioè di rispondere in modo adattativo alle sollecitazioni dell'ambiente modificando il proprio comportamento. Uno dei risultati è quello di mostrare come ogni funzione calcolabile possa essere calcolata da una qualche rete di neuroni connessi. A partire da ciò nel 1949 Donald Hebb dimostra come una semplice regola di aggiornamento per modificare le forze di connessione fra i neuroni possa dare luogo a processi di apprendimento. Nonostante questi significativi successi iniziali il destino della cibernetica è segnato: dopo solo pochi anni (circa alla metà degli anni '50 dello scorso secolo) l'interesse e le risorse sono ormai quasi completamente convogliate sull'IA, causa il disinteresse della cibernetica per le crescenti prestazioni dell'informatica e una limitazione degli obiettivi iniziali. Come si vedrà in seguito, questa tradizione risorgerà verso la metà degli anni '80 dello scorso secolo con il riemergere, in seno all'IA, del paradigma delle reti neurali.

Poichè per avere successo l'IA deve disporre di un sistema artificiale nel quale riprodurre, emulandoli, i fenomeni dell'intelligenza, l'elaboratore è stato considerato fin dall'inizio come il miglior candidato per questo ruolo. Alla base dell'invenzione dell'elaboratore vi è il concetto di macchina universale di Turing, che è una macchina concettuale in grado di trovarsi in un numero finito di stati diversi e di eseguire un numero limitato di azioni, al fine di poter esprimere qualsiasi tipo di procedura definita. La macchina di Turing è composta da un nastro di lunghezza infinita, suddiviso in celle che possono essere lette da una testina che può spostarsi di una cella avanti o indietro, e da un organo di controllo capace di leggere il simbolo che si trova nella cella sotto la testina. A un dato istante, l'azione che la macchina intraprende è determinata dal simbolo letto e dalla configurazione in cui la macchina si trova in quell'istante. Dopo avere letto il simbolo stampato sulla cella, la testina può compiere due operazioni alternative: lasciare il simbolo così com'è oppure cancellarlo e stamparne un altro. Sulla base della macchina universale di Turing, il concetto di algoritmo può essere ricondotto alla sequenza di operazioni svolte dalla macchina universale.

Se nel XVIII, XIX e XX secolo con la formalizzazione delle scienze e della matematica si erano create le condizioni per lo studio dell'intelligenza e delle sue possibili artificializzazioni, è solo con l'avvento dei primi elaboratori elettronici a cavallo della seconda guerra mondiale che tale interesse può imboccare una strada concreta arrivando alla definizione del programma di ricerca espresso dal seminario di Dartmouth nel 1956. Nell'estate del 1956 un gruppo di studiosi si riunisce al Dartmouth College con lo scopo di "esaminare la congettura che ogni aspetto dell'apprendimento o ogni altra caratteristica dell'intelligenza possa essere, in linea di principio, descritto in modo tanto preciso che si possa far sì che una macchina lo simuli". Questa data segna l'inizio ufficiale di una nuova disciplina che il matematico John McCarthy, *assistant professor* a Dartmouth e uno degli organizzatori del seminario, propose di chiamare intelligenza artificiale. Gli altri organizzatori erano Marvin Minsky, *junior fellow* di matematica e neurologia ad Harvard, Nathaniel Rochester, direttore della ricerca sull'informazione in un centro ricerche dell'IBM, e Claude Shannon, il matematico già famoso per la teoria dell'informazione, allora ai Bell Telephone Laboratories. Il seminario aveva le caratteristiche del *brainstorming*, ossia di un dibattito aperto e poco strutturato dal quale emerse, attraverso le discussioni comuni, un nuovo approccio teoretico teso a definire la possibilità della riproduzione parziale dell'intelligenza da parte di un elaboratore elettronico. Il seminario si proponeva di raccogliere e analizzare i programmi caratterizzati da prestazioni definibili come intelligenti, come il *Logic Theorist* (LT) di Newell, Shaw e Simon in grado di

dimostrare teoremi della logica del primo ordine, e di proporre una serie di obiettivi ambiziosi che avrebbero dovuto essere verificati dieci anni dopo in un nuovo incontro.

Gli anni che seguono il seminario di Dartmouth possono essere caratterizzati come gli anni delle grandi aspettative, perchè pieni di speranze alimentate dai successi dovuti anche alla crescita vertiginosa dei supporti informatici utilizzati. Indicativamente possono essere rilevate due tendenze ben distinte: da una parte il gruppo guidato da Newell, Shaw e Simon interessato alla simulazione dei processi cognitivi umani per mezzo dell'elaboratore, che con il GPS (*General Problem Solver*) del 1958 intendeva estendere l'ambito delle applicazioni del programma al di fuori delle applicazioni puramente logiche (paradigma della simulazione). Dall'altra tutti coloro i quali dedicavano le loro forze al raggiungimento della migliore prestazione possibile per i programmi, indipendentemente dal fatto che questa potesse essere realizzata seguendo procedure più o meno imitative dei procedimenti seguiti dall'uomo (paradigma della prestazione o dell'emulazione).

In questo periodo si assiste al temporaneo declino dei modelli a reti neurali (risorti, come detto, circa trent'anni dopo), affondati in maniera decisiva dalla critica di Minsky al *Perceptron* di Frank Rosenblatt incapace di riconoscere stimoli visivi anche molto semplici. Parallelamente, il paradigma della prestazione produceva risultati di successo, come i primi programmi per il gioco della dama e degli scacchi e i programmi basati sul tipo di rappresentazione della conoscenza introdotta dall'*Advice Taker* di McCarthy: la descrizione di un programma (che non fu mai effettivamente realizzato) che può essere visto come il primo sistema completo dell'IA capace di esprimere in maniera semplice modifiche complesse e di possedere un concetto solo parziale di successo, derivante dalla constatazione delle difficoltà incontrate nel raggiungere successi totali per i problemi più complessi. L'enfasi di questo primo periodo si pone quindi sui meccanismi generali di ricerca e su una concezione limitata della nozione di intelligenza, quale l'abilità di giocare a scacchi o la capacità di risolvere problemi matematici.

Ben presto però i ricercatori in IA cominciano a scontrarsi con i primi insuccessi: metodi adeguati per esempi semplici si rivelano totalmente inadeguati in casi più complessi e ampi. Le grandi aspettative iniziali si scontrano con il fallimento dei progetti di traduzione automatica fra linguaggi naturali: i programmi che agiscono al livello della semplice manipolazione sintattica si rivelano totalmente inadeguati, causando il ritiro delle ingenti sovvenzioni dei governi americano e inglese. A tutto ciò si aggiunge l'incapacità di trattare l'esplosione combinatoria: l'estensione a problemi più ampi non si affronta semplicemente con hardware più veloce e memorie più grandi, ma esistono insormontabili limitazioni insite nella natura stessa dei problemi.

Questa "dose di realtà" porta, a partire dal 1970, a concentrarsi su aree più ristrette di competenza, con la realizzazione dei primi sistemi esperti dove l'importanza di una conoscenza estesa e dettagliata dello specifico dominio in esame gioca un ruolo fondamentale. La conoscenza non è più soltanto quella legata alla comprensione teorica del problema, ma anche quella legata a specifiche regole euristiche convalidate dall'esperienza. In un sistema esperto, il complesso di queste due conoscenze presente in un esperto umano di uno specifico settore è codificato e rappresentato in una forma che l'elaboratore utilizza per risolvere problemi simili a quelli affrontati dall'esperto umano. Il primo sistema esperto, DENDRAL, viene programmato per inferire la struttura delle molecole organiche in base alle loro formule chimiche; MYCIN, forse il più conosciuto tra i sistemi esperti, usa la conoscenza medica specifica che incorpora per diagnosticare e prescrivere trattamenti per le infezioni batteriche del sangue a partire da una conoscenza incompleta e incerta. L'importanza della conoscenza del dominio risulta evidente anche nell'area della comprensione del linguaggio naturale: in questi anni si assiste al passaggio dall'attenzione per la sintassi a quella per la semantica che promuove risultati interessanti.

A partire da questo ridimensionamento delle aspettative si assiste all'inizio degli anni '80 dello scorso secolo alla nascita dell'IA come industria. Nel 1982 viene progettato il primo sistema esperto commerciale di successo che supporta le configurazioni di ordini per nuovi sistemi di elaboratori in un'azienda produttrice. L'IA viene a far parte di un ampio sforzo che include la progettazione di *chip* e la ricerca relativa alle interfacce uomo-macchina. Parallelamente, come già

anticipato, si assiste al ritorno dell'approccio basato sulle reti neurali: intorno al 1985 quattro differenti gruppi di ricerca inventano nuovamente un algoritmo di apprendimento, basato sulla retropropagazione dell'errore, già scoperto quindici anni prima, e lo applicano con successo in molti problemi di apprendimento in informatica e ingegneria. Il ritorno di questo approccio viene promosso anche dalla nascita di una nuova disciplina, le scienze cognitive che, nel 1979, si consacrano ufficialmente come disciplina autonoma in cui confluiscono molte delle ambizioni di una parte della psicologia e di quella parte dell'IA che aveva sempre considerato la macchina come strumento privilegiato per lo studio della mente.

Negli ultimi anni l'IA è stata caratterizzata da una grande quantità di cambiamenti sia a livello metodologico sia a livello contenutistico. Attualmente la tendenza comune è quella di partire da teorie già esistenti piuttosto che inventarne di nuove, basando le asserzioni o su teoremi rigorosamente dimostrati o su evidenze sperimentali. Accanto a ciò l'attenzione è stata rivolta a problemi reali, come il riconoscimento del parlato o la pianificazione delle attività di una fabbrica. Ciò che resta oggi della caratterizzazione dell'IA delle origini è la pluralità di approcci: accanto al tradizionale approccio logico della rappresentazione della conoscenza, ha acquistato peso crescente l'approccio subsimbolico, inventato per dotare i sistemi di IA di prestazioni intelligenti anche senza una rappresentazione dettagliata della conoscenza. Vasta attenzione è stata inoltre dedicata negli ultimi anni ai metodi probabilistici utilizzati per permettere un ragionamento efficiente sulla base di evidenze incerte. Si delinea così l'estensione pragmatica dei confini della disciplina ogniqualvolta si raggiungano nuovi risultati e si progettino nuove applicazioni nella direzione di una visione dell'intelligenza non limitata al solo "pensare razionalmente" ma, sempre più spesso, estesa all'"agire razionalmente".

3. L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE E L'INFORMATICA IN UNA STRUTTURA CULTURALE UNITARIA

Come è stato messo in luce anche nella disamina sulla sua storia, un corretto inquadramento dell'IA richiede di valutare l'opportuna collocazione di questa disciplina all'interno della più ampia disciplina, l'informatica, della quale l'IA è una parte e con cui è in relazione sia a livello dei fondamenti sia a livello delle applicazioni. Nel campo dei fondamenti dell'informatica l'IA tende a ricercare e a sviluppare le teorie di base, sia già esistenti (per esempio, la logica matematica), sia del tutto nuove (per esempio, la teoria dei problemi). Nel campo delle applicazioni dell'informatica, l'IA rappresenta una disciplina sperimentale che si propone di ampliarne le applicazioni, specialmente quelle non numeriche. Un completo inquadramento dell'IA, oltre che nell'ambito dell'informatica, è bene affrontarlo estendendo talune considerazioni anche alla robotica, in modo da pervenire ad alcune osservazioni di natura generale.

E' interessante vedere come questo progressivo inquadramento porti alla considerazione di una struttura generale che meglio può aiutare a comprendere tutto il quadro teorico cui si fa riferimento. Partendo da una visione che potremmo definire ontologica, possiamo distinguere il reale nelle due componenti del naturale e dell'artificiale (Fig. 1).

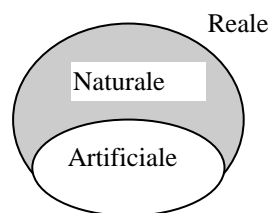


Figura 1 - Articolazione del reale in naturale e artificiale

Il naturale è a sua volta costituito da due componenti: l'uomo ed il mondo (inteso come il naturale esterno all'uomo), mentre l'artificiale è riferito alla nozione di macchina che, nel caso

dell'informatica, consiste nell'elaboratore e, nel caso della robotica, consiste nel robot (che, più opportunamente, potrebbe essere denominato interelaboratore). Pertanto, sempre da un punto di vista molto astratto, si può considerare l'intero scenario del reale come articolato nelle tre entità di uomo, mondo e macchina che possono essere rappresentate (Fig. 2) in un diagramma tripolare del reale.

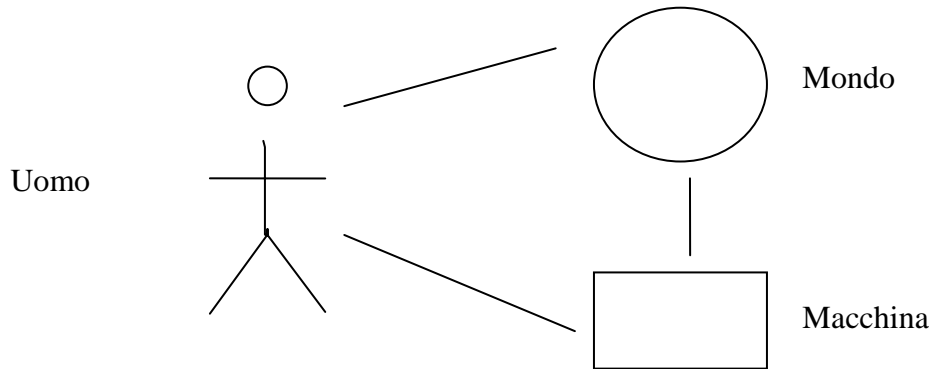


Figura 2 - Diagramma tripolare del reale

Con l'informatica, l'uomo concepisce la realizzazione di una macchina, l'elaboratore, che rozzamente riproduce talune facoltà dell'intelligenza dell'uomo che riflette sul reale e che, inoltre, risolve alcuni dei problemi causati da tale riflessione. Pertanto l'uomo, progettando l'elaboratore, sostituisce se stesso con l'elaboratore nell'intelligere senza coinvolgere l'interagire con il mondo. Inoltre con la robotica l'uomo concepisce la realizzazione di una macchina, il robot (l'interelaboratore), che rozzamente riproduce sia talune facoltà dell'intelligenza dell'uomo che riflette sul reale sia talune facoltà dell'interazione dell'uomo che agisce e percepisce (cioè interagisce) nel reale e che, inoltre, risolve alcuni dei problemi causati da tale riflessione e da tale azione e percezione. L'uomo quindi, progettando il robot (l'interelaboratore), sostituisce se stesso con il robot nell'intelligere e nell'interagire con il mondo.

Si noti inoltre che, mentre la problematica dell'interazione della macchina con il mondo è di rilevanza solo per la robotica, la problematica dell'interazione della macchina con l'uomo è di profonda importanza non solo nell'ambito della robotica, ma anche nell'ambito dell'informatica. Il motivo di ciò dipende dal fatto che l'informatica è legata alla macchina elaboratore e che la robotica è legata alla macchina robot (la macchina che ha la capacità di interagire con il mondo) e che ogni macchina (elaboratore e robot) è dotata della capacità di interagire con l'uomo. In questo contesto la robotica viene considerata non come una disciplina contenente l'informatica come sua sottodisciplina, ma come una disciplina distinta dall'informatica. In linea di principio, tutte le attività di elaborazione dell'informazione, che nell'ambito dell'informatica sono considerate come disponibili all'elaboratore, possono, nell'ambito della robotica, essere considerate come disponibili al robot in modo integrato con le altre attività di interazione con il mondo, peculiari della robotica.

E' in questo quadro di riferimento concettuale che è opportuno inquadrare brevemente gli aspetti scientifici dell'IA dal punto di vista della loro natura e delle loro potenzialità. A tale fine, è necessario esaminare la natura dell'elaborazione dell'informazione, sia nell'elaboratore sia nel robot. Si osservi, innanzitutto, che per informazione, intesa come oggetto dell'attività di elaborazione esplicita dall'elaboratore e dal robot, si intende quella classe di modelli del reale che hanno la proprietà di essere sottoposti, come operandi, alle attività di elaborazione e di interelaborazione svolte da quegli operatori che sono le macchine (elaboratori nel caso dell'informatica e robot nel caso della robotica).

Quando si esamina il caso dell'elaborazione dell'informazione, si possono sommariamente identificare tre tipi di informazione:

1. l'algoritmo;
2. il dato;
3. il problema (concetto che sarà ripreso più avanti); si noti che quando in informatica si utilizza il termine tecnico informazione per indicare solamente il modello di un problema, allora si utilizza anche il più specifico termine tecnico conoscenza.

Conseguentemente si possono identificare sommariamente anche tre tipi di elaborazione dell'informazione:

1. l'esecuzione di algoritmi (si può parlare in tal caso di elaboratore esecutorio);
2. la gestione (termine composito che include la scrittura, la memorizzazione, la modifica e la lettura) di dati (si può parlare in tal caso di elaboratore gestionale);
3. la risoluzione di problemi (si può parlare in tal caso di elaboratore risolutorio); una dizione equivalente a risoluzione di un problema è quella di inferenza sulla conoscenza (si può parlare in tal caso di elaboratore inferenziale).

Quando si esamina il caso della robotica, cioè il caso dell'interelaborazione dell'informazione, vengono aggiunti ai tre precedenti tipi di informazione (algoritmo, dato, problema) coinvolti nei corrispondenti tre tipi di elaborazione (esecutoria, gestionale, risolutoria o inferenziale), due ulteriori tipi di informazione:

1. il modello dei fenomeni prodotti dal robot;
2. il modello dei fenomeni percepiti dal robot.

Conseguentemente vengono identificati due tipi di interazione con il mondo:

1. la produzione di fenomeni conformi a un loro opportuno modello (l'informazione) posseduto dal robot che esplica tale attività tramite il sistema degli attuatori (cioè un'interfaccia di interazione in uscita dal robot verso il mondo);
2. la percezione di fenomeni descritti da un loro opportuno modello (l'informazione) formulato dal robot che esplica tale attività tramite il sistema dei sensori (cioè un'interfaccia di interazione in entrata nel robot dal mondo).

A questo punto è possibile affermare che l'IA studia gli elaboratori e i robot nei quali viene svolta elaborazione risolutoria o inferenziale [Somalvico 1991]. Sottolineiamo che la parte della robotica di interesse per l'IA prende il nome di robotica intelligente. Oggigiorno è usuale chiamare l'elaboratore o il robot che svolge elaborazione risolutoria o inferenziale con il termine agente intelligente o sistema intelligente. Le proprietà che si associano a un agente intelligente sono quelle relative allo svolgere alcune attività intellettive tipicamente umane, all'offrire delle prestazioni di livello umano, allo svolgere attività inferenziali e all'agire razionalmente [Russell 2002]. Si ricordi anche che l'IA, accanto agli agenti intelligenti, si dedica allo studio dei sistemi di agenti intelligenti, chiamati anche sistemi multiagente [Wooldridge 2002], che coniugano, accanto all'elaborazione risolutoria o inferenziale e all'eventuale interazione con il mondo, anche l'interazione fra gli agenti (per esempio la cooperazione), in modo da rozzamente riprodurre, in modo astratto, il comportamento intelligente delle società umane.

4. INTELLIGENZA ARTIFICIALE E RISOLUZIONE DI PROBLEMI

Uno dei contributi fondamentali che l'IA ha fornito all'informatica è stato quello di porre l'accento sulla nozione fondamentale di problema, affiancandolo alla nozione di algoritmo, studiando ed evidenziando le varie modalità per la sua modellizzazione.

L'attività di modellizzazione di un problema prende il nome, in IA, di rappresentazione del problema o rappresentazione della conoscenza. Sotto questo punto di vista, particolare rilevanza ha acquistato il tema specifico della risoluzione automatica dei problemi. Con questo termine si intende l'obiettivo di dotare l'elaboratore di metodi generali e di programmi efficienti che gli permettano di costruire, secondo processi completamente automatici o interattivi, l'algoritmo risolvente un problema ottenendo quindi, dopo l'esecuzione di tale algoritmo costruito, la soluzione

del problema stesso. Si noti come tale moderna filosofia di utilizzo dell'elaboratore richieda che l'uomo sia in grado di fornire alla macchina un algoritmo capace di costruire un algoritmo. In IA tali algoritmi, che sono in effetti dei metaalgoritmi, vengono chiamati algoritmi inferenziali. L'impiego di tali algoritmi inferenziali consiste nel fornire, come dato di ingresso, la rappresentazione del problema che si chiede alla macchina di risolvere automaticamente. Con la risoluzione automatica dei problemi, si concepisce la macchina come dotata della capacità non solo di essere abile e veloce nell'esecuzione di algoritmi costruiti dall'uomo, ma anche di costruire autonomamente gli algoritmi necessari per risolvere problemi [Nilsson 1971]. Tali algoritmi costruiti dalla macchina possono essere eseguiti o dalla macchina stessa in alcune situazioni o, in altre situazioni, dall'uomo che si appoggia alla macchina.

Per analizzare gli aspetti concettuali e funzionali della risoluzione di un problema e per chiarire l'affermazione precedente per cui l'IA studia gli elaboratori e i robot nei quali viene svolta elaborazione risolutiva o inferenziale è molto utile (Fig. 3) partire da un parallelo con il mondo della fisica.

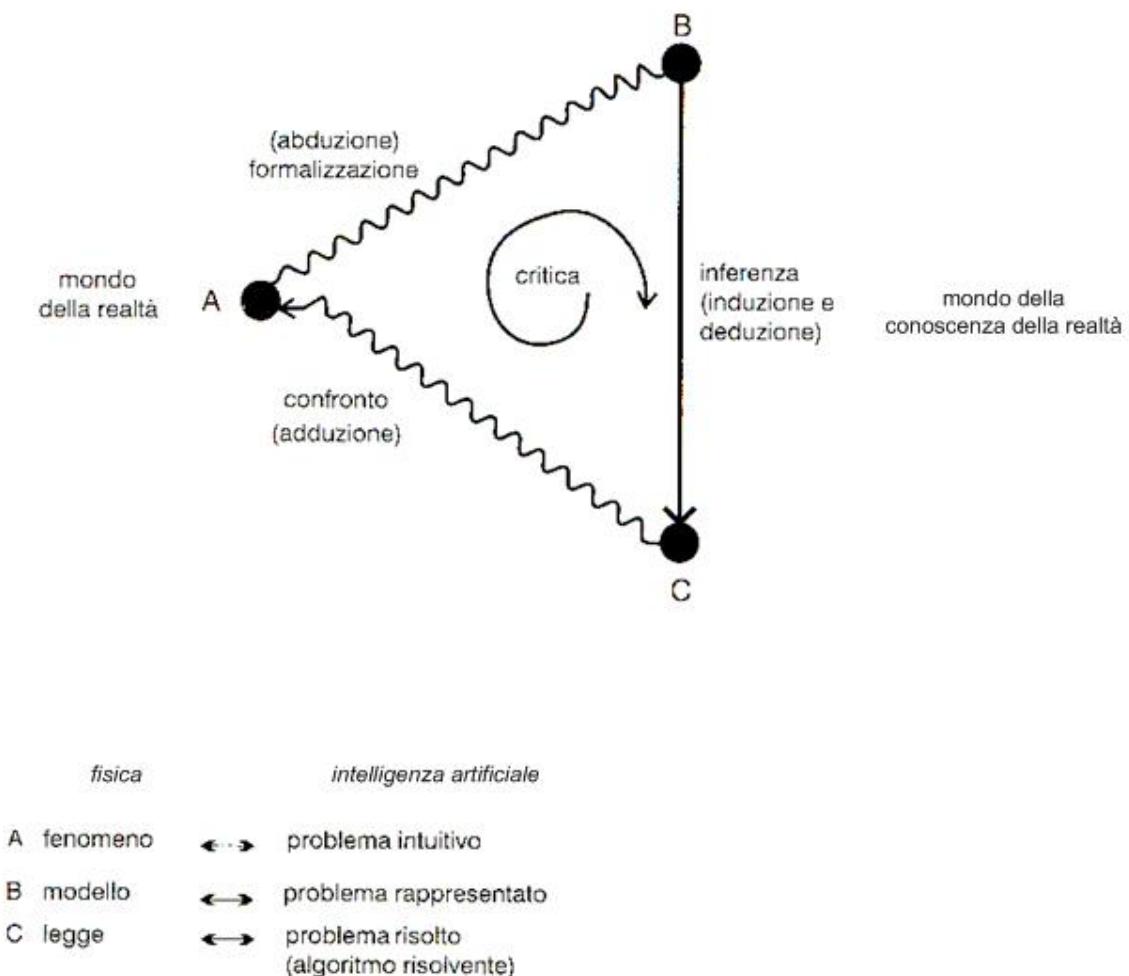


Figura 3 - Risoluzione dei problemi

In fisica esiste una differenza tra l'occorrenza di un "fenomeno" percepito dall'uomo e la formalizzazione di un "modello", che interpreta in modo esatto taluni parametri fisici che

definiscono il fenomeno e che quindi fornisce una descrizione del fenomeno stesso. Analogamente, in IA esiste una differenza tra un “problema intuitivo”, cioè un’esigenza avvertita dall’uomo di un problema da risolvere e la formalizzazione di tale problema, che in IA viene denominata “problema rappresentato”.

Inoltre, il fisico utilizza il modello di un fenomeno al fine di derivarne, mediante un’attività inferenziale, una “legge” che permetta di caratterizzare proprietà del fenomeno e di prevedere nuovi fenomeni. Analogamente, il risolutore automatico di problemi è in grado di operare un’elaborazione sul problema rappresentato che permette di costruire il “problema risolto”, espresso sia dall’“algoritmo risolvete” il problema rappresentato sia dall’“esecuzione” dell’algoritmo risolvete, che produce la soluzione del problema (in questo caso si fa riferimento alla soluzione algoritmica del problema).

Quindi ai tre concetti, nella fisica, di fenomeno, di modello e di legge, corrispondono, nell’IA, i tre concetti di problema intuitivo, di problema rappresentato e di problema risolto.

E’ interessante a questo proposito analizzare con attenzione il ruolo dell’uomo e della macchina algoritmica (l’elaboratore) nel complesso processo della risoluzione di un problema. Mentre nel caso della fisica le attività sono compiute solamente dall’uomo, nel caso dell’IA le attività sono compiute tanto dall’uomo quanto dalla macchina algoritmica. In particolare, l’IA si pone nell’ambiziosa ipotesi di fornire alla macchina la capacità di effettuare la risoluzione automatica dei problemi, ossia il passaggio dal problema rappresentato al problema risolto. Vengono invece mantenuti come esclusiva prerogativa dell’attività umana tanto il passaggio dal problema intuitivo al problema rappresentato, ossia la capacità di “formalizzazione” di un problema, quanto il passaggio dal problema risolto al problema intuitivo, ossia la capacità di “confronto” della soluzione ottenuta con l’esigenza da soddisfare, che ha rappresentato l’inizio del procedimento di risoluzione.

Considerando da un punto di vista gnoseologico tanto il caso della fisica quanto il caso dell’IA, appare chiaro che le attività in gioco possono essere articolate nel modo seguente.

1. Passaggio dal mondo della realtà (fenomeno, problema intuitivo) al mondo della conoscenza della realtà (modello, problema rappresentato). Questo passaggio, oltre che formalizzazione (in fisica) e rappresentazione (in IA), in filosofia può essere chiamato “abduzione”.
2. Passaggio all’interno della conoscenza della realtà (dal modello alla legge, dal problema rappresentato al problema risolto). Questo passaggio, oltre che derivazione e formulazione (in fisica) e risoluzione ed esecuzione (in IA), in filosofia può essere chiamato “inferenza”.
3. Passaggio dal mondo della conoscenza della realtà (legge, problema risolto) al mondo della realtà (fenomeno, problema intuitivo). Questo passaggio, oltre che aspettazione e previsione (in fisica) e confronto e soddisfacimento (in IA), in filosofia può essere chiamato “adduzione”.

Le attività dell’abduzione e dell’adduzione possono essere chiamate con il termine complessivo di afferenza, che si contrappone all’inferenza che opera all’interno della conoscenza della realtà. Ed è relativamente all’attività inferenziale che l’IA si concentra nell’emulazione delle attività intellettuali dell’uomo con alcune differenze da caso a caso.

Infatti, anticipando in parte alcuni concetti che saranno più compiutamente sviluppati nel seguito, possiamo affermare che, in talune situazioni, per esempio nel caso dell’applicazione della risoluzione automatica di problemi ai giochi (come nel caso in cui la macchina gioca a scacchi), la macchina, dopo avere costruito l’algoritmo risolvete, lo utilizza eseguendolo. Più precisamente la macchina:

1. esegue l’algoritmo inferenziale che nel caso del gioco degli scacchi è l’algoritmo che esplora, costruendolo fino ad una certa profondità, il cosiddetto albero del gioco, ossia l’articolata espressione gerarchica delle sequenze di tutte le convenienti mosse, contromosse, controcontromosse, ...;
2. costruisce l’algoritmo risolvete il problema che nel caso del gioco degli scacchi è il cammino nell’albero del gioco che partendo dalla radice dell’albero, caratterizzante la posizione attuale sulla scacchiera, raggiunge la foglia dell’albero del gioco che caratterizza la posizione di scacco matto,

oppure la posizione che viene valutata come la più vantaggiosa tra le posizioni corrispondenti a tutte le foglie dell'albero del gioco;

3. esegue l'algoritmo risolvete il problema e ottiene la soluzione del problema che nel caso del gioco degli scacchi è la mossa corrispondente al primo elemento del cammino nell'albero del gioco che è stato adottato.

Si noti però che in altre situazioni, per esempio nel caso dei sistemi esperti di diagnosi delle malattie nell'uomo (come nel caso del sistema esperto MYCIN dedicato alla diagnosi delle malattie del sangue), la macchina costruisce l'algoritmo risolvete, mentre l'uomo lo utilizza eseguendolo. Più precisamente la macchina:

1. esegue l'algoritmo inferenziale che nel caso del sistema esperto MYCIN è l'algoritmo che esplora, costruendolo fino ad una certa profondità, il cosiddetto albero delle concatenazioni (costituite da coppie causa - effetto) che arrivano alla diagnosi di una malattia e alle correlate prognosi e terapie, partendo e valutando i sintomi che si possono rilevare;

2. costruisce l'algoritmo risolvete il problema che nel caso del sistema esperto MYCIN è il cammino nell'albero delle concatenazioni causa - effetto che partendo dalla radice dell'albero, caratterizzante i sintomi iniziali, si articola in modo consequenziale fino a raggiungere l'identificazione diagnostica della malattia.

A questo punto l'uomo e non più la macchina, come accadeva nella precedente situazione del gioco degli scacchi:

3. esegue l'algoritmo risolvete il problema e ottiene la soluzione del problema che nel caso del sistema esperto MYCIN è la prima domanda formulata al medico o il primo esame diretto o di laboratorio che è indicato dall'albero delle concatenazioni; la risposta alla domanda o l'esito dell'esame viene inserito nella macchina che continua nella costruzione del cammino, coerentemente alle risposte e agli esiti che sono stati ottenuti dal medico.

E' opportuno quindi notare che nel caso del sistema MYCIN (e dei sistemi esperti in generale) è la macchina che costruisce l'algoritmo risolvete il problema, mentre è l'uomo che è invitato a eseguirlo.

Per meglio comprendere la natura dei sistemi esperti nel loro ruolo di paradigma storicamente importante per la risoluzione dei problemi e, come vedremo in seguito, di area significativa delle applicazioni dell'IA, è opportuno considerare più in dettaglio la loro struttura (Fig. 4) nella quale sono chiaramente distinte due componenti.

1. La componente algoritmica, di natura procedurale, del sistema esperto data dalla definizione dei diversi metaalgoritmi (algoritmi inferenziali chiamati anche motore inferenziale) che svolgono l'attività di risoluzione automatica di problemi posti al sistema esperto, insieme alla definizione degli algoritmi funzionali di supporto e di interfaccia, che rendono possibile l'impiego del sistema esperto nella formulazione del problema rappresentato e nella comunicazione dell'algoritmo risolvete il problema formulato. Questa prima componente può essere chiamata guscio di sistema esperto.

2. La componente rappresentativa, di natura dichiarativa (ovvero formalizzativa), del sistema esperto costituita dalla descrizione del problema rappresentato che il sistema esperto deve risolvere. Questa seconda componente è articolata, a sua volta, in due sottocomponenti.

a) La prima, denominata base di conoscenza, è formata dalla rappresentazione di una serie di conoscenze elementari composte da fatti, o conoscenza statica (per descrivere concetti, proprietà, relazioni, ...), e regole, o conoscenza dinamica (per modificare la base di conoscenza stessa), formalizzate con delle opportune tecniche descrittive, che configurano un'area applicativa nel cui ambito saranno formulati diversi problemi da risolvere. La base di conoscenza individua quindi una classe di problemi che il sistema esperto è in grado di risolvere.

b) La seconda, denominata condizione di obiettivo, è la specifica di un particolare problema, appartenente alla classe di problemi implicati dalla base di conoscenza, che si desidera che il sistema esperto risolva come compito particolare.

Il sistema esperto coinvolge pertanto l'attività di tre attori umani, ciascuno dei quali è responsabile della formulazione di una delle tre parti costitutive ora indicate. Due attori umani sono i coprogettisti del sistema esperto che collaborano alla sua realizzazione. Questi due coprogettisti sono descrivibili nel modo seguente.

1. L'ingegnere della conoscenza che sviluppa gli strumenti informatici, ossia il guscio di sistema esperto, fornendo le prestazioni tecniche richieste ai metaalgoritmi e agli algoritmi funzionali di supporto e interfaccia.
2. L'esperto di problema che descrive la base di conoscenza che esprime la sua professionalità utilizzabile nel risolvere una classe di problemi.

Un terzo attore umano è considerabile come colui che utilizza il sistema esperto ed è descrivibile nel modo seguente.

3. L'utente di sistema che fornisce al sistema esperto la particolare condizione di obiettivo, intesa come condizione che individua il problema da risolvere e che riceve dal sistema esperto la descrizione dell'algoritmo risolvete il problema specificato.

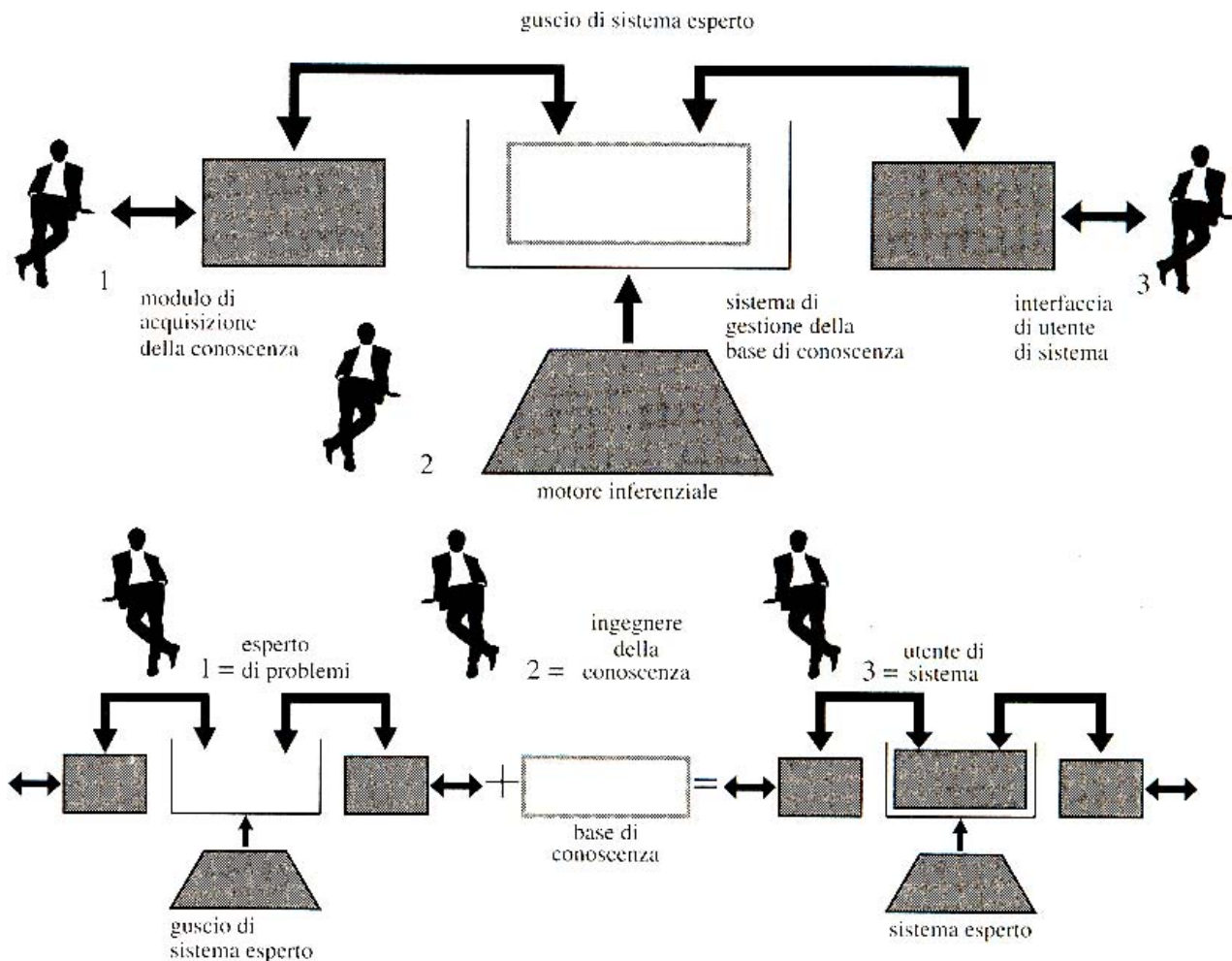


Figura 4 – Architettura di un sistema esperto

Il funzionamento di un sistema esperto parte da una base di conoscenza iniziale per arrivare a quelle basi di conoscenza che soddisfano le particolari condizioni di obiettivo attraverso reiterate esecuzioni di transizioni (il reiterato processo di applicazione delle regole alla base di conoscenza). L'algoritmo risolvete il problema posto viene infine espresso mediante la sequenza delle transizioni che, a partire dalla base di conoscenza iniziale, permette di giungere alla base di

conoscenza finale. Come chiariremo più avanti nella trattazione, il funzionamento di un sistema esperto è riconducibile alla tecnica della ricerca nello spazio degli stati.

5. APPROCCI SCIENTIFICI ALL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

La definizione di IA data inizialmente risulta ora ulteriormente precisata alla luce dell'illustrazione della risoluzione di problemi. Come abbiamo visto, un sistema di IA deve essere in grado di acquisire, rappresentare, elaborare conoscenza (non semplicemente dati simbolici separati dal loro significato) relativa al compito da eseguire e di applicare su di essa meccanismi di elaborazione intelligenti, al fine di fornire le prestazioni richieste. I sistemi di IA sono dunque caratterizzati non solo dalla capacità di fornire prestazioni esterne, che si potrebbero considerare esclusive dell'uomo intelligente, ma anche dalla capacità di sapere gestire, elaborare e scambiare conoscenza mediante meccanismi tipici dell'intelligenza dell'uomo quali (ma non solo):

1. l'inferenza,
2. la deduzione,
3. il ragionamento con incertezza,
4. il ragionamento analogico,
5. la generalizzazione,
6. la particolarizzazione,
7. la generazione e la valutazione di ipotesi,
8. l'apprendimento.

L'IA può anche essere definita come la scienza che affronta il problema di come rappresentare, manipolare e costruire conoscenza circa fatti, azioni e leggi di causalità. Da un punto di vista metodologico i ricercatori di IA hanno l'obiettivo di costruire programmi per l'elaboratore che realizzino alcune attività intellettuali che l'uomo può compiere, in combinazione con il tentativo di spiegare i principi basilari dell'intelligenza. Da un punto di vista pratico, diverse sono le aree di ricerca che hanno fornito e che forniscono le tecniche e i metodi per realizzare tali programmi, fra le quali possono essere indicate:

1. la ricerca nello spazio degli stati che permette la realizzazione di programmi che automaticamente determinano una sequenza di azioni per risolvere un problema;
2. il soddisfacimento di vincoli che permette la realizzazione di programmi che automaticamente individuano un insieme di valori che soddisfano un dato insieme di vincoli;
3. la formalizzazione e il ragionamento basati sulla logica che permettono la realizzazione di programmi che agiscono su rappresentazioni del mondo basate su insiemi di espressioni logiche per derivare proprietà del mondo (implicitamente contenute nella rappresentazione iniziale);
4. la formalizzazione e il ragionamento probabilistico e fuzzy che permettono la realizzazione di programmi che agiscono in condizioni di incertezza riguardo all'ambiente esterno al programma;
5. la pianificazione che permette la realizzazione di programmi che automaticamente determinano una sequenza di azioni per raggiungere un obiettivo;
6. l'apprendimento automatico che permette la realizzazione di programmi che migliorano le loro prestazioni in base all'esperienza;
7. le reti neurali che permettono la realizzazione di programmi basati su complesse funzioni non lineari apprese automaticamente dai dati;
8. gli algoritmi genetici che permettono la realizzazione di programmi che ottimizzano una funzione basandosi su una metafora evolutiva;
9. i sistemi di programmazione e linguaggi dell'IA che supportano lo sviluppo dei programmi che incorporano le tecniche precedenti.

Analizziamo ora più in dettaglio, a titolo di esempio illustrativo del funzionamento di alcuni sistemi di IA, il metodo della ricerca nello spazio degli stati che è stato storicamente rilevante nello sviluppo dell'IA. Tale metodo e gli algoritmi inferenziali da esso derivati permettono di situare il fondamento teorico dell'IA nella branca della matematica rappresentata dall'algebra astratta.

L'approccio formale alla risoluzione di problemi presentato qui di seguito ha il pregio di illustrare le abilità metaalgoritmiche o inferenziali che l'IA ha fornito alla macchina e riveste notevole importanza in IA, sia dal punto di vista teorico, sia dal punto di vista applicativo. Basta, a tale proposito, ricordare i risultati eccellenti che l'IA ha ottenuto nel gioco degli scacchi.

Questo approccio formale è denominato metodo dello spazio degli stati. Esso rappresenta un modello molto utile per potere concepire e realizzare non solo la formalizzazione dei metaalgoritmi, ma anche la loro programmazione e, in tal modo, potere costruire quel complesso sistema di programmi denominato risolutore automatico di problemi.

Lo spazio degli stati può essere pensato come un modo di rappresentare un problema P attraverso una quadrupla:

$$P = (S, G, i, F)$$

dove:

S è un insieme, denominato spazio degli stati, non necessariamente finito, di elementi detti stati;

G è un insieme finito di funzioni g definite su S, detti operatori, $g : S \rightarrow S$;

i è uno stato appartenente a S, detto stato iniziale, $i \in S$;

F è un sottoinsieme di S, detto insieme degli stati finali, $F \subseteq S$.

Esistono due modi possibili per rappresentare l'insieme S. Uno esplicito, ossia indicando tutti gli stati possibili: $S = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$. Uno implicito, ossia fornendo un algoritmo E di enumerazione dei possibili stati candidati ad appartenere a un dato spazio degli stati e un algoritmo A di accettazione, in grado di decidere sull'appartenenza o meno di uno stato candidato allo spazio degli stati. Analogamente si può ragionare per l'insieme degli stati finali, fornendo un algoritmo AF, in grado di decidere sull'appartenenza o meno di uno stato candidato all'insieme degli stati finali.

Applicando un operatore a uno stato si ottiene un nuovo stato e, se l'operatore applicato è legale e se lo stato iniziale appartiene a S, anche lo stato ottenuto apparterrà a S.

Si definisce soluzione del problema P un cammino X[P] dallo stato iniziale i ad uno degli stati finali f appartenenti a F. X[P] è pertanto una sequenza finita di operatori legali:

$$\langle g_1, g_2, \dots, g_k \rangle$$

tale che:

$$i = s_0 \rightarrow g_1 \rightarrow s_1 \rightarrow g_2 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots \rightarrow g_k \rightarrow s_k = f$$

L'attività di generazione di tutti i nuovi stati ottenibili a partire da un vecchio stato, mediante l'applicazione di tutti gli operatori applicabili a tale vecchio stato, è detta espansione del vecchio stato. Il vecchio stato si dice il predecessore del nuovo stato, mentre il nuovo stato si dice il successore del vecchio stato.

Questo metodo di formalizzazione permette di associare alla rappresentazione di un problema l'isomorfa descrizione di un grafo orientato ed etichettato dove i vertici corrispondono agli stati, gli archi corrispondono agli operatori, la soluzione corrisponde a un cammino, appartenente al grafo, che unisce lo stato iniziale i a uno degli stati finali f appartenenti a F.

E' pertanto evidente che i metaalgoritmi necessari per costruire la soluzione di un problema così formalizzato coincidono con gli algoritmi necessari per espandere un grafo al fine di costruire il cammino che unisce un vertice detto iniziale con un altro vertice detto finale, appartenente a un insieme di vertici finali.

Si chiama spazio di ricerca un sottoinsieme dello spazio degli stati che deve essere effettivamente esplicitato al fine di cercare un cammino (solitamente di costo minimo, se si associa a ogni operatore un costo) che costituisca una soluzione (possibilmente la soluzione ottima) del problema.

6. LE APPLICAZIONI DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Le applicazioni dei sistemi di IA sono innumerevoli e una loro completa catalogazione risulta molto difficile a causa della quantità ed eterogeneità dei settori interessati. Come chiaramente emerge dalle applicazioni sommariamente tratteggiate nel seguito, la concezione attualmente dominante nello sviluppo dei sistemi di IA è quella dell'"agire razionalmente" che individua una visione più ampia e più complessa di intelligenza legata non solo alle capacità intellettuali, ma anche all'abilità

di saper interagire in generale con il mondo. Un'imprecisa, incompleta, ma utile approssimazione tassonomica prevede le seguenti aree di applicazione per i sistemi di IA.

- La pianificazione autonoma di attività e operazioni: è l'area che maggiormente interessa la produzione industriale, anche se sistemi di pianificazione autonoma sono utilizzati in applicazioni di ricerca come, per esempio, a bordo di sonde spaziali. I sistemi che operano in questa area sono in grado di ricevere un obiettivo di alto livello, di generare un piano composto da una sequenza di operazioni semplici che raggiunge l'obiettivo assegnato e, infine, di monitorare l'esecuzione del piano.

- I giochi: una delle aree storiche dell'IA da un punto di vista metodologico; lo studio dei giochi ha determinato lo sviluppo e la messa a punto di numerose tecniche, soprattutto quelle della ricerca nello spazio degli stati. Nel 1997, per la prima volta nella storia, un programma sviluppato dalla IBM e chiamato Deep Blue ha sconfitto il campione del mondo umano, Garry Kasparov, con il punteggio di 3.5 a 2.5.

- Il controllo autonomo: nell'ambito del controllo di sistemi complessi, alcuni sistemi di IA si sono dimostrati molto efficaci, come nel caso del controllo di veicoli in movimento quali, per esempio, un'automobile.

- Dimostrazione di teoremi matematici: una delle aree classiche e fondamentali dell'IA da un punto di vista metodologico. In passato la ricerca in quest'area era volta a scoprire e provare nuovi teoremi nell'aritmetica, nella geometria, nella logica e nella meccanica. Recentemente, invece, i ricercatori si sono interessati prevalentemente allo sviluppo di tecniche inferenziali generali che permettono di dedurre da un dato un insieme di fatti, nuovi fatti o loro proprietà e relazioni. Ciò influisce sul progetto di diversi sistemi di IA quali, per esempio, i sistemi esperti e i sistemi domanda e risposta.

- Programmazione automatica: questo tipo di ricerca ha come obiettivo la costruzione di sistemi che, partendo da specifiche ad alto livello delle funzioni che un programma deve eseguire, siano in grado di generare automaticamente il programma desiderato, corretto ed efficiente. Quest'area ha molti aspetti in comune con la dimostrazione automatica dei teoremi e comporta spesso ricerche di natura molto teorica. I risultati ottenuti, sebbene non ancora concretamente utilizzabili nella costruzione di sistemi reali, permettono di ipotizzare un notevole impatto sulle tecniche di produzione di software.

- La robotica e la visione: l'area della robotica intelligente (cioè quell'area della robotica di interesse per l'IA) si articola nelle sottoaree della manipolazione e della navigazione. In generale, le aree di ricerca della manipolazione e della navigazione si estendono a un contesto multidisciplinare che va oltre il contributo fornito dall'IA per comprendere anche la meccanica, la sistemistica e l'elettronica; l'obiettivo è il progetto e la costruzione di macchine autonome, capaci di sostituirsi all'uomo nell'esecuzione di attività manuali, ripetitive, pesanti e nocive. La manipolazione e la navigazione si occupano dei problemi geometrici e di movimento connessi con la realizzazione di robot intelligenti e hanno raggiunto da tempo risultati concreti e rilevanti anche dal punto di vista applicativo. L'area di ricerca della visione riguarda il problema dell'elaborazione dell'informazione raccolta dai sensori visivi, per esempio da una telecamera, al fine di riconoscere e classificare forme, oggetti, scene bidimensionali e tridimensionali. I risultati teorici e sperimentali della visione sono assai brillanti e significative applicazioni sono attualmente disponibili sul mercato.

- La comprensione del linguaggio naturale: i problemi affrontati in quest'area di ricerca sono estremamente complessi in quanto riguardano alcuni dei meccanismi meno noti e più sfuggenti del

comportamento umano. La comunicazione, infatti, presenta ancora molti problemi aperti, sia dal punto di vista linguistico sia da quello psicologico; la realizzazione di funzioni per la comprensione e per la generazione di espressioni linguistiche per mezzo dell'elaboratore non hanno ancora raggiunto risultati tecnologicamente assestati. Vi sono parecchi sistemi funzionanti che permettono di risolvere in modo soddisfacente solo problemi limitati, quali: dialogare con banche dati, impartire ordini a un robot, consultare sistemi esperti, tradurre approssimativamente semplici frasi da una lingua a un'altra. Collegata alla comprensione del linguaggio naturale è l'area dell'elaborazione del linguaggio vocale: il riconoscimento e la sintesi del linguaggio vocale dell'uomo richiedono l'elaborazione di informazioni complesse di natura fonetica, morfologica, sintattica, semantica e pragmatica, e rappresentano un obiettivo molto ambizioso. I risultati delle ricerche teoriche e sperimentali svolte hanno permesso di costruire sistemi dotati di capacità limitate di riconoscimento e comprensione (parole pronunciate in modo staccato, vocabolario limitato), nonché sistemi di sintesi in grado di produrre artificialmente il linguaggio parlato, leggendo un testo scritto. Il potenziale applicativo di tali ricerche è senz'altro molto rilevante.

- I sistemi esperti: il mondo industriale si riconosce intorno all'ingegneria della conoscenza, termine che individua gli aspetti ingegneristici dell'IA e che pone in primo piano la tecnologia dei sistemi esperti impiegata, per esempio, in compiti di diagnosi. Come abbiamo già visto, i sistemi esperti rivoluzionano l'approccio all'impiego dell'elaboratore, poiché non richiedono più di programmare algoritmi per la macchina algoritmica, al fine di risolvere problemi applicativi, ma richiedono solamente di rappresentare conoscenza che la macchina algoritmica utilizza per costruire inferenzialmente la soluzione dei problemi applicativi posti (purché inerenti la conoscenza posseduta dal sistema esperto). L'interesse per i sistemi esperti è accresciuto dall'accento sul modellizzare conoscenza e non sul meccanizzare algoritmi risolutivi, estendendo l'interazione con la macchina direttamente a coloro che possiedono tale conoscenza. I sistemi esperti rappresentano quindi un notevole cambiamento concettuale nell'impiego della macchina algoritmica. La rivoluzione consiste nel fatto che la macchina algoritmica è sede della particolare esecuzione di algoritmi costruttori di algoritmi, cioè di metaalgoritmi, che considerano la macchina algoritmica come la sede per l'effettuazione della risoluzione automatica di problemi. In altri termini, la macchina diventa inferenziale o metaalgoritmica (nel senso di evidenziarne la natura meta, legata cioè all'esecuzione di algoritmi che costruiscono algoritmi).

Ribadiamo, in conclusione, che gli ambiti di applicazione dell'IA non si esauriscono in quelli citati sopra, ma sono in continua espansione alla frontiera della ricerca interessando anche ambiti quali l'elaborazione dei segnali e l'analisi dei dati e contribuendo a caratterizzare l'IA come una disciplina moderna, dinamica, aperta e ricca di promettenti prospettive.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano, per la collaborazione prestata, tutti i ricercatori attuali del Progetto di Intelligenza Artificiale del Politecnico di Milano: Andrea Bonarini, Vincenzo Caglioti, Marco Colombetti, Francesco Di Giunta, Michele Folgheraiter, Nicola Gatti, Giuseppina Gini, Pier Luca Lanzi, Matteo Matteucci, Rosamaria Morpurgo, Marcello Restelli, Piera Sassaroli, Mario Verdicchio.

BIBLIOGRAFIA

[Cordeschi 1996]

Cordeschi, R. (1996). L'Intelligenza Artificiale. In Geymonat, L. (a cura di) Storia del pensiero filosofico e scientifico, vol. 8, Garzanti.

[McCorduck 1979]

McCorduck, P. (1979). Machines who Think. W. H. Freeman, San Francisco, USA.

[Nilsson 1971]

Nilsson, N. J. (1971). Problem-solving methods in artificial intelligence, McGraw-Hill, New York, USA.

[Nilsson 1998]

Nilsson, N. J. (1998). Artificial Intelligence: A New Synthesis. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.

[Russell 2002]

Russell, S. and Norvig, P. (2002). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall.

[Somalvico 1987]

Somalvico, M. (1987). L'Intelligenza Artificiale. Rusconi Editore, Milano.

[Somalvico 1991]

Somalvico, M. (1991). Intelligenza Artificiale. Enciclopedia Treccani. Aggiornamento. Roma.

[Wooldridge 2002]

Wooldridge, M. (2002). An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons. Chichester, Inghilterra.