

# Le strutture dell'artificiale

Francesco Ricci

I.R.S.T.  
38050 Povo (TN)  
e.mail: ricci@irst.uucp

The hardest thing to understand is why we can understand anything at all.

*A. Einstein*

Il mondo delle macchine sta prendendo il sopravvento, e questo mi tormenta e mi spaventa; si addensa come un temporale, lentamente, lentamente, ma ha preso questa direzione, arriverà e colpirà.

*J. W. Goethe*

## Le basi dell'artificiale

Parlare di Intelligenza Artificiale (IA) è diventato molto difficile. Oltre ad interferire con la nostra comune idea dell'intelligenza nell'uomo, oggi dobbiamo anche fare i conti con lo sterminato numero di miti e leggende che circondano, come in un racconto di fantascienza, il mondo delle macchine pensanti. Così appellandomi ad una affermazione di M. Minsky, uno dei padri di questa disciplina, secondo cui l'IA è uno dei problemi più ardui che la scienza abbia mai affrontato, aggiungerò che parlarne non è poi da meno.

L'intelligenza artificiale è quell'impresa scientifica e tecnologica che anima da circa trent'anni laboratori di ricerca in tutto il mondo, ed è volta allo studio ed alla realizzazione di idee che permettano ai calcolatori di essere intelligenti. L'obiettivo principale di questa presentazione è quello di dare maggiore spessore a questa affermazione, illustrando alcune delle basi largamente condivise e soffermandosi anche su altri punti più controversi. Da un punto di vista sociologico la comunità di IA è popolata da almeno due tipi di seguaci: i "fondamentalisti", alla ricerca dei fondamenti concettuali e fisici dell'intelligenza; ed i "miglioristi", i quali non si danno troppa cura di sapere se le loro macchine sono "realmente" intelligenti e se questa domanda abbia senso di per se', ma si limitano a lavorare affinché i calcolatori diventino sempre più utili e siano in grado di svolgere quelle funzioni in cui ora sono ampiamente superati dagli uomini. Queste correnti, a volte antagoniste a volte confluenti, hanno posto, come è logico aspettarsi, degli obiettivi molto diversificati dando spesso la sensazione che l'IA sia una scienza con poca chiarezza sulle basi metodologiche e sugli scopi, alimentando accese polemiche ed infinite discussioni. Ritourneremo più tardi sulle alcune delle critiche che vengono mosse all'IA

cercando di porre l'accento sui alcuni fra i numerosi problemi ancora aperti che questa scienza presenta, ma incominciamo ora con le convinzioni.

## Il sistema simbolico fisico

Alle basi della nostra ricostruzione dell'IA, vi è una congettura formulata nella sua forma definitiva da Newell e Simon nel 1975, allorchè venne loro riconosciuto il "Turing Award", uno fra i premi più prestigiosi in *computer science* [9]. Questa congettura pone i confini all'interno dei quali artifatti umani e menti naturali possono produrre comportamenti intelligenti.

**Ipotesi del sistema simbolico fisico.** *Un sistema simbolico fisico (SSF) possiede gli strumenti necessari e sufficienti per produrre azioni intelligenti.*

Si tratta di una congettura non di una legge scientifica e da un punto di vista epistemologico può essere solo confutata, ma forse, per la sua generalità non lo sarà mai. L'ipotesi del sistema simbolico fisico (ISSF) è stata ed è tuttora per molti il dogma principale dell'IA, almeno per quelli che non possono fare a meno dei dogmi. Cerchiamo di capire meglio il significato di questa ipotesi. Un sistema simbolico fisico è costituito da un insieme di entità fisiche chiamati *simboli* che possono essere aggregati per formare *espressioni* più complesse. Queste espressioni hanno la proprietà fondamentale di poter designare oggetti. Inoltre un SSF contiene una collezione di processi che operano su espressioni per creare altre espressioni.

Ma allora un sistema simbolico fisico è qualcosa che noi conosciamo abbastanza bene: un calcolatore, magari con un linguaggio di programmazione simbolica come il LISP, è un esempio ben noto di sistema simbolico fisico. Letta in questo modo l'ipotesi di Newell e Simon ci assicura che il nostro PC ha in sé tutti gli ingredienti necessari per essere fonte di comportamenti intelligenti. Beh ma allora perchè è ancora così ottuso? Un paragone aiuterà a capire in che situazione ci troviamo. Il nostro PC non assomiglia per nulla ad *HAL* il famoso calcolatore del film "2001 odissea nello spazio" perchè tra l'ipotesi del sistema simbolico fisico a *HAL* passa la stessa distanza che corre tra la concezione atomista della materia ed una centrale nucleare. La teoria atomista e l'ISSF pongono le condizioni di base e affermano la possibilità di sviluppare, una teoria scientifica ed una tecnologia. L'ISSF non dice in nessun modo come costruire *HAL*, ci assicura che siamo sulla buona strada, che la nostra impostazione non preclude la realizzazione di una macchina di quel tipo e la verifica di questa assunzione non può che essere sperimentale.

Torniamo ora a Newell e Simon, la loro posizione è radicale: sia i computer sia la mente sono SSF. Per quanto diversi nella sostanza, nella struttura e nel meccanismo *ad un certo livello di astrazione* essi dimostrano una sorprendente somiglianza la quale può essere indicata come la fonte dell'intelligenza: entrambi manipolano simboli che rappresentano fatti del mondo. Un SSF rappresenta una porzione di mondo ed ogni cosa può essere rappresentata con un simbolo che il computer può utilizzare.

In realtà, come vedremo meglio in seguito, determinare una buona rappresentazione è spesso la parte più ardua nel processo di soluzione. Molte critiche all'IA sottolineano questa fondamentale difficoltà dei sistemi attuali, vale a dire il fatto che essi hanno sempre

bisogno di bravo *ingegnere della conoscenza* per trasferire fatti del mondo esterno nella memoria della macchina. Molte proposte sono state avanzate per affrontare questo problema, esse danno corpo ad uno dei settori più interessanti nel panorama della odierna ricerca in IA.

## Lo spazio del problema

L'ipotesi SSF è una congettura generale ed astratta e come abbiamo osservato non è di grande ausilio nell'individuare le caratteristiche che meglio si adattano alla realizzazione di sistemi intelligenti. Questa analisi naturalmente costituisce il corpo della ricerca in IA. Essa tende presto a divergere, nel senso che nei diversi settori di applicazione i sistemi di IA hanno utilizzato metodologie molto differenti e spesso strettamente vincolate al problema affrontato. Non possiamo certamente passare in rassegna i contributi originali di ogni area dell'IA, cercheremo piuttosto di elaborare ulteriormente sulle conseguenze della posizione di Newell e Simon.

Un ulteriore passo avanti rispetto alla ISSF è rappresentato dalla convinzione che in un sistema simbolico la cognizione sia essenzialmente un'attività di "problem solving" e venga realizzata esplorando uno spazio di stati possibili. Lo spazio degli stati è come un grande recipiente in cui trovano posto tutte le configurazioni possibili degli oggetti rilevanti al problema; da questo recipiente il solutore estrae uno stato per volta, lo esamina, e se questo fornisce una soluzione termina il processo.

Cerchiamo di illustrare questi concetti con un esempio ben noto. Consideriamo un celebre problema di IA, quello di interpretare correttamente delle figure bidimensionali, immagini di oggetti nello spazio, ad esempio come quella mostrata in Figura 1(a). Interpretare quella figura significa assegnare ad ogni segmento (spigolo nello spazio) un valore nell'insieme formato dai simboli:  $\rightarrow$ ,  $+$ ,  $-$ . Brevemente,  $\rightarrow$  significa che lo spigolo è visto come bordo dell'oggetto, mentre  $+$  e  $-$  significano rispettivamente che lo spigolo è una piega convessa o concava.

Un'interpretazione è corretta se assegna ad ogni tratto della figura il suo corretto significato come spigolo di un oggetto tridimensionale <sup>1</sup>. In Figura 1(b) è riportata una interpretazione corretta di (a). In questo esempio lo spazio degli stati è formato da tutte le interpretazioni, anche parziali, dell'immagine, vale a dire tutte le *5-uple* del tipo  $(r = x_1, s = x_2, t = x_3, u = x_4, v = x_5)$ , dove  $x_i$  è uno dei simboli  $\rightarrow, +, -, ?$  (? significa che il segmento non è stato interpretato).

Nello spazio degli stati è possibile muoversi con delle transizioni da un stato ad un altro. Queste transizioni sono realizzate per mezzo di operatori o regole che modificano alcune espressioni del sistema. Nell'esempio citato vi è un unico (tipo di) operatore, quello che sceglie una linea e le assegna un valore tra:  $\rightarrow, +, -, ?$ . Alcuni stati sono definiti iniziali, e sono quelli da cui parte il processo di soluzione, altri sono riconosciuti come stati finali o soluzioni del problema e nel nostro esempio corrispondono ad una interpretazione corretta dell'immagine. Per completare il quadro dobbiamo aggiungere che in ogni problema esistono delle specifiche funzioni di valutazione le quali controllano

---

<sup>1</sup>La descrizione del problema che riportiamo qui è una semplificazione estrema del problema originale [13].

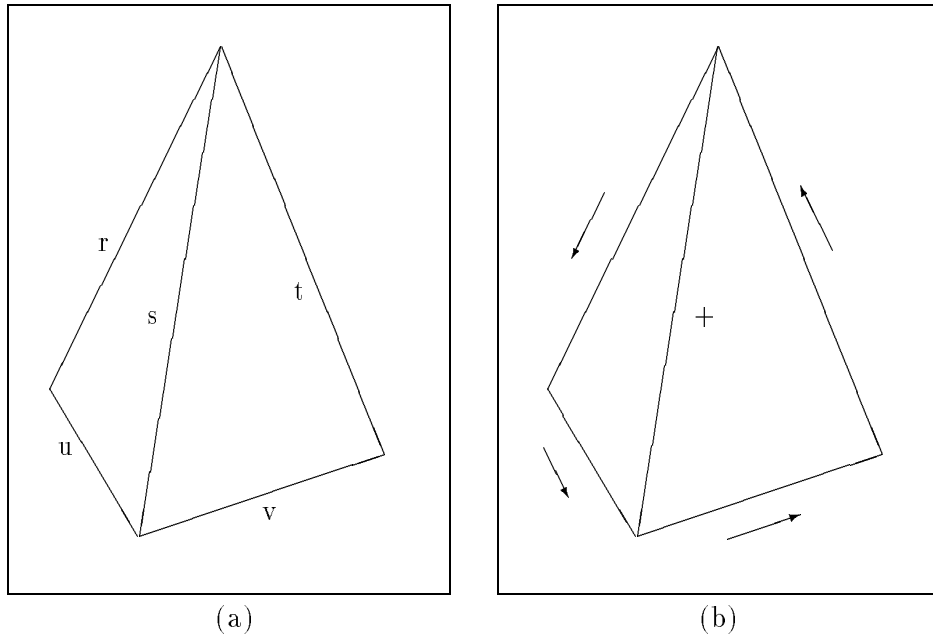


Figure 1: (a) Un disegno da interpretare. (b) Una interpretazione corretta del disegno in (a).

se uno stato è finale e danno informazioni sulla correttezza degli stati rispetto ai vincoli imposti.

L'insieme degli stati possibili del sistema simbolico viene chiamato anche lo spazio di ricerca del problema in considerazione. Lo spazio di ricerca può essere pensato come il risultato dell'applicazione ripetuta di operatori a partire dallo stato iniziale. Spesso viene visualizzato come un albero con le radici in alto, in cui ogni ramo corrisponde ad uno stato ed ogni diramazione ad una scelta (vedi Figura 2).

La ricerca procede sondando man mano un numero crescente di rami. Ad ogni passo del processo un nuovo stato viene generato dall'applicazione di un operatore estendendo un nodo dell'albero costruito fino a quel momento. Il nuovo stato viene poi valutato per verificare se esso rappresenta uno stato terminale o se il processo deve essere iterato.

In questo "algoritmo" c'è però un punto in cui abbiamo barato, non abbiamo detto come si sceglie il nodo da estendere, cioè dove l'albero cresce. Le tecniche di ricerca tendono tutte a rispondere ad questa domanda: quale nodo deve essere espanso prima, quale ramo deve essere costruito prima affinché si arrivi ad una soluzione nel minor tempo possibile?

### Ricerca guidata da euristica

La risposta alla domanda posta nella precedente sezione è l'euristica. L'euristica è la somma di tutte quelle regole che permettono di sondare prima quei rami che con maggiore probabilità porteranno ad una soluzione. Lo scopo dell'euristica è dunque quello di rendere

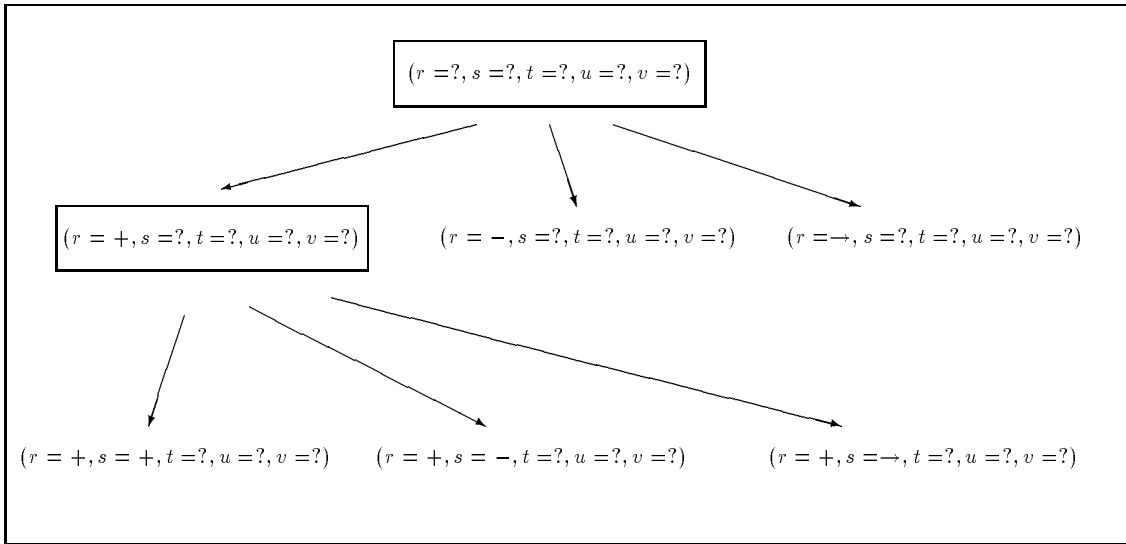


Figure 2: Un' esplosione parziale dell' albero di ricerca del problema di interpretazione di Figura 1.

efficiente il modello della cognizione come ricerca su uno spazio di stati. L'euristica si basa su quello che viene chiamato il "Principio del Progresso": ogni processo di ricerca può essere reso efficace se siamo in grado di sapere quando stiamo compiendo dei progressi. Esistono varie forme di euristiche, alcune generali, altre più specifiche, cioè adatte ad uno specifico problema, ma tutte assolvono il medesimo scopo, rendere minimo il numero degli stati esplorati.

Lo studio di tecniche di ricerca e la visione dell'intelligenza come capacità di ricercare efficacemente nello spazio del problema ha caratterizzato il primo periodo dell'IA. La preminenza del paradigma della ricerca nel periodo della nascita dell'IA riflette anche l'influenza della ricerca in psicologia negli anni '50. Gli psicologi a quel tempo si interessavano di "protocol analysis", una metodologia che consiste nell'osservare il comportamento di soggetti i quali forniscono resoconti delle loro esperienze mentali durante il processo di soluzione di qualche problema. Questi studi vennero interpretati come una evidenza che il meccanismo umano è quello che procede per tentativi ed errori [14].

L'euristica è quell'abilità che qualche volta chiamiamo anche furbizia, quella capacità di essere efficaci anche in un campo dove non siamo preparati. E' noto ad esempio che esistono degli stratagemmi per fare domande intelligenti anche dopo aver assistito ad una presentazione in cui non si è capito un gran che' o addirittura che non è stata ascoltata neppure. Oppure ancora, una persona in gamba riesce ad individuare un semplice malfunzionamento della propria macchina senza avere una conoscenza approfondita del motore a scoppio e senza aver risolto prima problemi del genere. Ma come questi esempi fanno capire esiste un modo migliore per affrontare i problemi, avere conoscenza della materia.

## La conoscenza

Il modo più efficiente di risolvere un problema è quello di sapere già come risolverlo.

Questa affermazione sembra una tautologia ma in realtà è il vero significato dell'uso della conoscenza nei sistemi esperti. La forza con cui un programma dimostra elevati livelli di competenza deriva dalla conoscenza di cui dispone. Questa affermazione viene anche detta il "Principio della conoscenza". I *weak methods*, cioè quell'insieme di euristiche indipendenti dal problema, utilizzati nei primi programmi di ricerca, hanno prodotto risultati incisivi solo in semplici puzzle. E' un dato di fatto, dimostrato dai successi dei sistemi esperti dagli anni 70 in poi, che la generalità non basta, occorrono conoscenze *specifiche*. Senza l'utilizzo della conoscenza non possono essere neppure formulati i problemi affrontati dai moderni sistemi esperti.

La conoscenza viene utilizzata in due momenti: quando il problema viene strutturato, quando se ne individuano gli oggetti rilevanti e si mettono in evidenza le relazioni tra gli oggetti; ed in un secondo momento quando si devono sondare stati nello spazio del problema alla ricerca di una soluzione.

C'è un altro elemento che deve essere sottolineato. I primi esaltanti successi dell'IA sono stati presto ridimensionati da una temibile malattia dei programmi che compiono ricerca: l'esplosione combinatoria. Con questo termine si intende il rapido incremento nel numero degli stati che il programma deve in linea di principio sondare per ottenere una soluzione al crescere delle dimensioni del problema. Per la quasi totalità dei tipici problemi di AI questa caratteristica li rende praticamente intrattabili se affrontati con semplici tecniche di ricerca. L'uso di conoscenze specifiche permette in molti casi di superare questa difficoltà e di generare solo un numero ragionevole di stati candidati. Nella Figura 3 (da [7]) si vede come in Dendral [1] (un sistema che è in grado di determinare la struttura chimica di una sostanza analizzando i dati forniti da uno spettroscopio di massa) l'uso progressivo di conoscenza chimica riduca drasticamente l'insieme dei candidati.

Information Source	# of structures generated
Topology (limits of 3D Space)	42.867.912
Chemical Topology (valences)	14.715.814
Mass Spectrography (heuristics)	1.284.792
Chemistry (first principles)	1.074.648
NMR (interpretation rules)	1

Figure 3: Successiva raffinazione delle strutture generate da Dendral nella ricerca di tutti gli isomeri che possono avere la formula  $C_{20}H_{43}N$ .

Conoscenza e ricerca sono due grandezze che competono tra di loro in ogni problema di IA. Maggiore conoscenza si ha a disposizione minore ricerca si deve compiere. Per illustrare questo principio si usa spesso il grafico delle curve di equicompetenza (vedi Figura 4 da [10]). In questo grafico si possono osservare le posizioni in cui si collocano i

primi sistemi di IA, i sistemi esperti e una stima della conoscenza usata dall'uomo nei suoi tipici compiti. Abbiamo sottolineato che la conoscenza riduce la necessità di ricorrere alla ricerca, ma non dobbiamo dimenticare che vale anche un principio duale, la ricerca può sopperire la mancanza di conoscenza. Questo, ad esempio, è quanto viene ancora sfruttato nei programmi che giocano a scacchi che con l'ausilio di sofisticate tecniche di ricerca e della microelettronica sono in grado di competere con i migliori giocatori umani

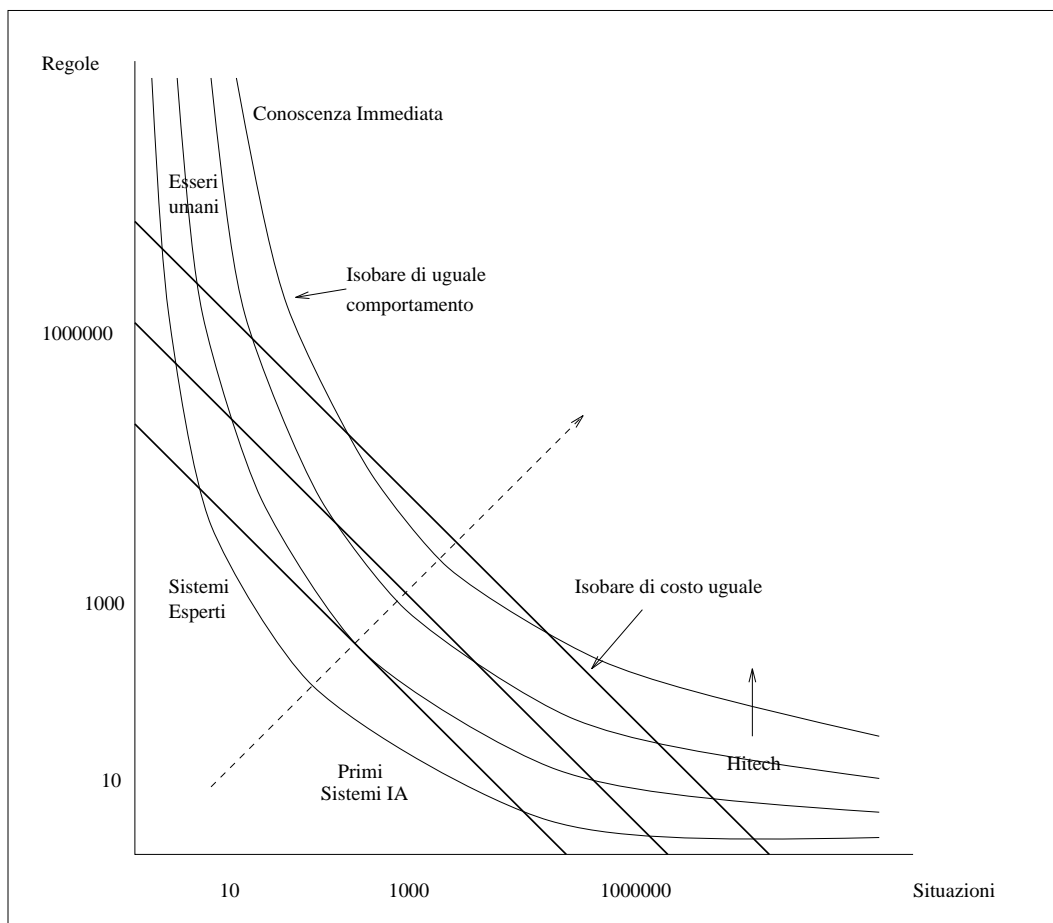


Figure 4: Il grafico delle curve di equicompetenza.

## I Sistemi Esperti

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci stà aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne

umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto [5].

*G. Galilei*

La ISSF sta ai SE come l'ipotesi di Galileo sul linguaggio della natura sta alla lampadina ad incandescenza. Galileo ha sostenuto che il mondo fisico può essere compreso e descritto in termini semplici astraendo dalla materia, usando il linguaggio della matematica e lo straordinario sviluppo delle scienze e della tecnologia sin dal XVII sec. ha dimostrato la fondatezza della sua visione. Le idee rivoluzionarie di Galileo e Bacone hanno posto le basi scientifiche e filosofiche della successiva rivoluzione industriale la quale ha dato l'avvio alla società post-industriale, la società dell'informazione. L'uomo ha applicato il metodo scientifico ottenendo risultati formidabili nella comprensione delle leggi che regolano il mondo fisico ed ha imparato a sfruttare l'energia fornita dalla natura, anche se forse deve ancora imparare a farlo con la necessaria saggezza. Oggi assistiamo ad un fenomeno che da alcuni è stato definito una seconda rivoluzione industriale. Lo studio dei fondamenti dell'intelligenza e le macchine calcolatrici hanno aperto una strada che solo 30 anni fa era impensabile: la realizzazione e lo sfruttamento di menti artificiali. Nello stesso modo in cui con la prima rivoluzione industriale l'uomo ha liberato se stesso da alcuni pesanti questa nuova rivoluzione può scrollarci di dosso una serie di lavori routinari e affaticanti.

I sistemi esperti rappresentano l'ingegnerizzazione delle idee espone nelle sezioni precedenti. La maggior parte dei sistemi di IA chiamati sistemi esperti implementano il paradigma della ricerca in uno spazio di stati così come è stata descritta. L'aspetto che li caratterizza e li distingue da altri sistemi di problem solving è che la ricerca avviene emulando il tipico comportamento dell'esperto di dominio. Il sistema artificiale mima il comportamento dell'esperto che formula congetture, le valuta ed eventualmente le modifica o le rigetta, iterando questo processo fino a quando non giunge ad una soluzione. Questa metodologia generale è stata applicata in un vasto raggio di domini e compiti applicativi riportando un gran numero di successi, sui quali torneremo in una sezione successiva.

## **La carrozza e la macchina**

Nel caso di ogni nuova tecnologia, il nuovo è all'inizio compreso all'interno degli orizzonti posti dal vecchio e le analogie con i modelli di cui abbiamo conoscenza giocano un ruolo preminente nella realizzazione dei nuovi sistemi. Ad esempio, per questo motivo le prime automobili assomigliavano tanto a delle carrozze, e dopo cento anni ben poco apparenta quei primi modelli a una Ferrari "testarossa". La stessa sorte attende i SE. I primi SE hanno riprodotto elevati gradi di competenza nel dominio specifico emulando il più possibile il comportamento umano. L'analogia con l'uomo, con la mente umana, gli studi di psicologia cognitiva, hanno indirizzato la sperimentazione verso modelli direttamente confrontabili con quelli naturali. Questo atteggiamento "descrittivo" è stato presto affiancato da uno studio "prescrittivo" dell'intelligenza. Vale a dire, dato un compito preciso i ricercatori si sono detti, cerchiamo di progettare il sistema che meglio affronta il compito dato, e soddisfa tutte le limitazioni ingegneristiche. Nei sistemi esperti attuali, anche chiamati più genericamente sistemi basati sulla conoscenza, si può fare molta fatica a ritrovare gli schemi descritti. In molti casi ad esempio si riescono ad implementare

modelli profondi della struttura e del comportamento delle entità che costituiscono il dominio. Modelli che se anche sono conosciuti dall'esperto umano sono spesso utilizzati solo nella fase di apprendistato, e vengono sostituiti o affiancati dalle euristiche maturate con l'esperienza. Molti altri sistemi esperti sono il frutto di una sperimentazione ingegneristica e sono costruiti fondendo in maniera opportunistica conoscenze tecniche tra le più svariate, alcune "tradizionali" altre di IA e altre ancora di statistica o di ricerca operativa. Il risultato è spesso pregevole, il "migliorista" lo indica come il più completo, il più potente, insomma l'ultimo anello della catena, ma nella stanza accanto il "fondamentalista" sorride scettico all'ultima fatica del collega.

A questo punto dobbiamo sottolineare un aspetto che forse è sfuggito nella discussione sin qui svolta ed è una lancia spezzata a favore del "migliorista". *L'IA è una scienza empirica* [9]. L'IA usa il calcolatore come il chimico usa il laboratorio, per compiere esperimenti e per validare modelli astratti del funzionamento del comportamento intelligente. Ed in questa duplice attività di formalizzazione e di verifica sperimentale l'IA trova il metodo e la forza per attaccare il mistero dell'intelligenza. Per questo motivo il "migliorista" ed il "fondamentalista" sono due componenti della stessa famiglia ed entrambi concorrono con funzioni diverse al progresso della ricerca.

## I successi

La tecnologia dei sistemi esperti ha riscosso un enorme successo soprattutto in quei settori dell'attività umana in cui vengono usate vaste basi di conoscenza unitamente a processi di deduzione meccanici. Newell nell'85 sosteneva che senza dubbio lo sviluppo di sistemi esperti è stato il risultato migliore dell'IA negli ultimi 10 anni.

Dai primi esperimenti pionieristici compiuti su Dendral negli anni 60 la tecnologia dei sistemi esperti ha fatto enormi passi avanti in estensione ed in profondità. A riprova di ciò, oggi le maggiori compagnie americane, quali Kodak, HP, NASA, NCR, American Express, AT&T, DEC, Xerox, IBM, per citarne solo alcune, utilizzano sistemi esperti nei settori più disparati. In IBM vengono utilizzati all'interno più di 100 sistemi esperti e a fronte di un investimento fatto per alcuni sistemi di 2.5 milioni di dollari si stima che sia stato ottenuto un ritorno di 37.5 milioni di dollari. DEC impiega più di 700 dipendenti nel settore IA [10]. Inoltre quello che forse non viene sottolineato spesso, non abbiamo più a che fare con dei giocattoli, prototipi sviluppati sullo stimolo di un'intuizione. XCON, il famoso sistema di configurazione della Digital è un programma di ben 50.000 linee di codice e di 10.000 regole. TEMPLAR (Tactical Expert Mission Planner) è un sistema che richiede 200MB di memoria di massa ed ha più di 300.000 linee di codice LISP [12].

E' stato realizzato un ritorno economico considerevole da ogni punto di vista: risparmio dei costi; rientro degli investimenti per lo sviluppo; incremento della produttività individuale di *professionals*; miglioramenti della qualità del lavoro [4].

## Problemi aperti

Naturalmente accanto ai successi elencati trovano posto angoli ancora oscuri, perplessità, critiche all'impostazione del lavoro sin qui svolto. Concludiamo questa presentazione con

una rapida carrellata su alcuni di questi problemi.

## La qualità e la quantità

I successi dei primi sistemi esperti tendevano ad oscurare un fatto semplicissimo ma basilare. Potrebbe sembrare paradossale ma come ha osservato M.Minsky [8] il ragionamento di un esperto procede in maniera più semplice di quella seguita da un bambino che gioca con i blocchi di legno. Un esperto ha bisogno di un'ingente quantità di conoscenza ma specializzata. Al contrario, una persona nello svolgimento delle attività quotidiane usa una varietà di differenti tipi di conoscenza, e per far questo necessita di un sofisticato sistema di gestione. Come abbiamo visto la forza di un sistema esperto sta nella conoscenza di dominio in esso rappresentata. Bene, la conoscenza ha bisogno di essere rappresentata nel sistema ed una volta che sia stata individuata una buona rappresentazione diventa relativamente semplice "ingrossare" la base di conoscenza con nuovi fatti sempre che questi siano congruenti alla rappresentazione scelta. Ma i linguaggi di rappresentazione che l'IA ha sviluppato sono adatti a descrivere forme di conoscenza predefinite e ristrette. Siamo ancora lontani dall'aver trovato i "triangoli" e i "cerchi" del pensiero. Allo stesso tempo la visione logicista dell'intelligenza secondo cui le leggi del pensiero sono esprimibili con il linguaggio della logica, che si può far risalire almeno alle idee di Boole, ha mostrato in successive riprese tutte le sue limitazioni. Ed infine se anche alcuni linguaggi sembrano dotati di un sufficiente potere espressivo, tale potenza si riflette poi in una intrattabilità computazionale e quindi di fatto in una inapplicabilità del sistema.

Questa critica mette in evidenza alcune delle difficoltà da cui prende le mosse la ricerca nei linguaggi ibridi di rappresentazione, cioè quei sistemi che usano in parallelo varie forme di rappresentazione e di ragionamento. Gli obiettivi principali di questa ricerca sono appunto: 1) aumentare il potere espressivo del linguaggio; 2) aumentare il potere deduttivo; 3) aumentare l'efficienza utilizzando ragionatori specializzati in grado di compiere delle ottimizzazioni che sono impossibili con un ragionatore di tipo generale. E' naturale aspettarsi un impatto considerevole della ricerca in questo settore nella prossima generazione di software per lo sviluppo di sistemi esperti.

## La competenza non basta

Molte critiche all'IA e soprattutto ai SE mettono in risalto il fatto che l'intelligenza non può essere misurata solo dal livello di competenza (performance) del sistema esperto, e che la conoscenza del mondo non può esaurire l'estensione del concetto di intelligenza. In un'analisi del comportamento intelligente deve essere preso in considerazione un vasto spettro di ulteriori caratteristiche quali: l'apprendimento; la generalizzazione; il common sense; la creatività; la capacità di comunicazione (linguaggio); la conoscenza di se'; la capacità di operare in tempo reale. La ricerca in IA ha sottolineato spesso l'importanza di questi obiettivi paralleli [11].

Per quanto riguarda ad esempio il *common sense* l'ipotesi SSF non è stata certamente provata dai fatti. E' molto forte la convinzione che talune funzioni intelligenti, soprattutto quelle legate al mondo fisico, siano svolte ad un livello che viene definito subsimbolico, in

quanto non interverrebbero esplicite rappresentazioni degli oggetti del mondo reale. Nella stessa direzione, alcuni sostengono che è illusorio aspettarsi che ogni dominio possieda una teoria adeguata [3]. Al di là della verità o della falsità di queste congetture, resta direi il dato di fatto che le architetture odierne forniscono delle risposte ancora molto parziali in questi domini. Da queste difficoltà, dalle scoperte della cibernetica e dai primi studi di neurofisiologia è rinato in questi ultimi anni un forte interesse per le reti neuronali. Le reti neuronali modellano (con poca fedeltà) il comportamento elettrofisiologico dei neuroni del cervello e sono in grado di compiere importanti funzioni di riconoscimento, di memoria e di apprendimento. Anche queste architetture però sembrano ancora adatte ad affrontare solo compiti particolari, piuttosto che a fornire un nuovo paradigma per l'IA.

## La biologia della conoscenza

Lo sviluppo dell'IA è stato condotto quasi esclusivamente *sinteticamente*, in maniera spesso indipendente dall'approccio complementare allo studio *analitico* della biologia dell'intelligenza naturale rappresentato dalla psicologia e dalle neuroscienze [6].

Questa critica è fondamentalmente corretta ed acquisterebbe ancora maggior peso se ci si accorgesse che la visione dell'intelligenza come capacità di manipolare simboli si rivelasse empiricamente inadeguata. Ma è anche vero che tutti i ricercatori che hanno guardato all'IA come quella disciplina che fornisce metodologie per lo sviluppo di sistemi intelligenti, cioè quanti hanno posto l'accento sul risultato più che sul mezzo con cui questo risultato è ottenuto, non sono impensieriti da questa osservazione. In fondo sostengono questi una lampadina fornisce luce (artificiale) senza fondere atomi di idrogeno, non abbiamo bisogno cioè di "duplicare" il sole per ottenere la luce che produce. Per quale motivo dobbiamo imitare i processi chimici che avvengono nel cervello per produrre un comportamento intelligente, se possiamo realizzare con maggiore facilità altri processi che conducono allo "stesso" risultato.

Vi è poi un altro aspetto che non deve essere trascurato. Non è detto che le analogie con l'intelligenza umana, lo studio dell'uomo, siano sempre gli strumenti più potenti per indagare il mistero dell'intelligenza. Alle volte l'approccio sintetico può essere anche più efficace. Un esempio aiuterà a chiarire questa idea. Il sonar ed il radar sono stati inventati da ricercatori che in quel momento non sospettavano neppure che i pipistrelli usassero durante il volo un sistema di localizzazione del tutto analogo al sonar. Anzi, come riporta R. Dawkins [2], quando Donald Griffin e Robert Galambos riferirono in una conferenza nel 1940 la loro scoperta dell'uso dell'eco nei pipistrelli, il radar ed il sonar erano ancora delle invenzioni coperte da segreto militare; molti provarono non solo incredulità ma anche ripugnanza per questa analogia. Questa idea può essere ulteriormente elaborata. I pipistrelli usando le informazioni che ottengono dal sistema sonar, sono in grado di costruire una rappresentazione del mondo esterno che è adeguata ai loro scopi. Questo processo di sintesi e rappresentazione avviene molto probabilmente in maniera simile a quanto viene fatto da altri animali, compreso l'uomo, che usano invece principalmente la vista per elaborare una rappresentazione del mondo. Lo studio di questo processo, nei modi in cui è possibile, diviene allora una fonte di analogie e di suggestioni per lo studio del processo di formazione dei concetti nell'uomo. Ma allora, spingendo l'analogia un passo avanti ancora,

perchè una telecamera ed un calcolatore non possono essere utilizzati, come strumenti di laboratorio, generatori di analogie per una comprensione delle relazioni tra l'occhio e il cervello umano?

## **Tabula rasa**

Un'altra critica che viene comunemente fatta all'IA è che nel processo di comprensione e duplicazione della realtà essa salta un aspetto fondamentale il quale richiede intelligenza per essere affrontato: la rappresentazione. Winston ad esempio afferma che se si è in grado di fornire una rappresentazione che esplicita gli elementi corretti e mette in chiaro i vincoli naturali allora risulta di gran lunga semplificato il compito di progettare delle procedure computazionali che manipolano le informazioni per ottenere la soluzione desiderata [15]. Ma chi fornisce la rappresentazione corretta? Spostare il problema a livello dello sviluppatore del sistema piuttosto che al livello del sistema stesso significa in realtà occultare la questione e ridurre l'intelligenza a semplice manipolazione di simboli.

Questa critica è rilevante ed infatti molti si sono accorti di questa deficienza degli attuali sistemi. I sistemi esperti vanno programmati, e per assolvere questo compito sono necessari *ingegneri della conoscenza* i quali sviluppano questa competenza solo dopo anni di attività. Non esistono ancora macchine che, a partire da una struttura data iniziale (nessuno crede che la mente umana sia alla nascita dell'individuo una *tabula rasa*) possano evolvere producendo strutture di rappresentazione e procedure deduttive significative. E la risposta dei sostenitori del "principio di conoscenza" parte proprio da questa osservazione: "nulla di nuovo può essere appreso se non è messo in relazione con quanto è già conosciuto". Per cui, non ci possiamo aspettare di apprendere velocemente se non partiamo da una base di conoscenze sufficientemente estese. L'aspettativa è quindi quella che si debba ancora superare una soglia di conoscenze al di là della quale i sistemi possano incominciare ad apprendere, a modificare la propria struttura a costruire nuove strutture di rappresentazione [7].

## **Conclusioni**

In questa presentazione abbiamo illustrato alcune delle tesi su cui si fonda la ricerca in Intelligenza Artificiale e da cui ha preso le mosse il successivo impressionante sviluppo della tecnologia dei sistemi esperti. L'ipotesi del sistema simbolico fisico, il paradigma della cognizione come attività di ricerca, il principio della conoscenza, sono i pilastri su cui è stata costruita una seconda rivoluzione industriale, la rivoluzione delle menti artificiali. I sistemi esperti hanno dimostrato che è possibile riprodurre elevati livelli di competenza degli esperti umani con programmi in cui la conoscenza di dominio è esplicitamente rappresentata ed è utilizzata pesantemente per sviluppare i processi di inferenza. Abbiamo anche passato in rassegna alcune fra le tante critiche che sono state mosse all'IA ed abbiamo illustrato in taluni casi come possano essere superate. Resta ancora una mole enorme di lavoro da fare per vincere una scommessa che è scientifica, tecnologica e commerciale al tempo stesso: realizzare una mente artificiale.

## References

- [1] Bruce G. Buchanan and Edward A. Feigenbaum. Dendral and meta-dendral: their applications dimension. *Artificial Intelligence*, 11:5–24, 1978.
- [2] Richard Dawkins. *The Blind Watchmaker*. Penguin, London, 1988.
- [3] Hubert L. Dreyfus and Stuart E. Dreyfus. Making a mind versus modeling the brain: artificial intelligence back at a branchpoint. In Stephen R. Graubard, editor, *The Artificial Intelligence Debate*, pages 15–43. The MIT Press, 1988.
- [4] E. A. Feigenbaum, P. McCorduck, and H. P. Nii. *The rise of the expert company*. Times Books, New York, 1988.
- [5] Galileo Galilei. *Il saggiatore*. Feltrinelli, Milano, 1965.
- [6] George N. Reeke Jr. and Gerald M. Edelman. Real brains and artificial intelligence. In Stephen R. Graubard, editor, *The Artificial Intelligence Debate*, pages 143–173. The MIT Press, 1988.
- [7] Douglas B. Lenat and Edward A. Feigenbaum. On the thresholds of knowledge. In *Proceedings of the Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1173–1182, 1987.
- [8] Marvin Minsky. *The Society of Mind*. Simon and Schuster, New York, 1986.
- [9] Allen Newell and Herbert A. Simon. Computer science as empirical inquiry: symbols and search. *Communication of ACM*, 19(3):113–126, March 1976.
- [10] Ray Reddy. Foundations and grand challenges of artificial intelligence. *The AI Magazine*, 9(4):9–21, 1988.
- [11] Roger C. Shank. What is ai, anyway? *The AI Magazine*, 8(4):59–65, 1987.
- [12] Barry G. Silverman and Arthur J. Murray. Full-sized knowledge-based systems research workshop. *The AI Magazine*, 11(5), 1991.
- [13] David L. Waltz. Understanding line drawings of scenes with shadows. In *The Psychology of Computer Vision*, pages 19–91. McGraw-Hill, New York, 1975.
- [14] David. L Waltz. The prospect for building truly intelligent machines. In Stephen R. Graubard, editor, *The Artificial Intelligence Debate*, pages 191–212. The MIT Press, 1988.
- [15] Patrick Winston. *Artificial intelligence*. Addison-Wesley, Reading, 1984.