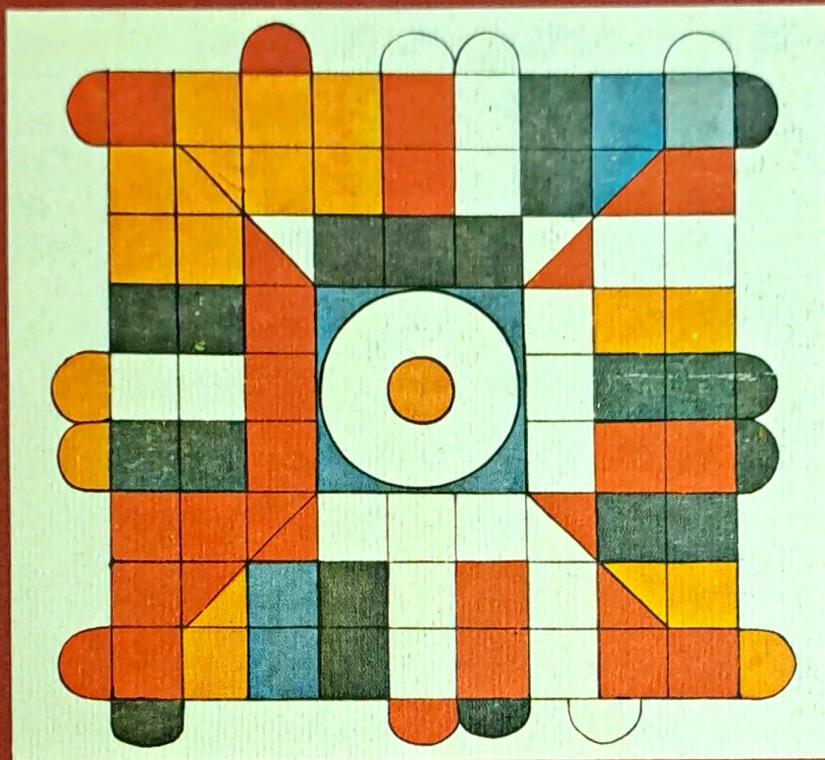


ENCICLOPEDIA



7

IMITAZIONE - ISTITUZIONI

EINAUDI

COPIA OMAGGIO

Direzione: Ruggiero Romano. *Consulenza al progetto:* Alfredo Salsano, Giorgio Bertoldi, Alessandro Fontana, Jean Petitot, Massimo Piattelli Palmarini, Massimo Galuzzi, Fernando Gil, Krzysztof Pomian, Giuseppe Papagno, Gian Paolo Caprettini, Renato Betti, Giuseppe Geymonat, Giulio Giorello. *Redazione:* Gian Paolo Caprettini, Graziella Girardello, Luciano Lovera, Stefano Marchiaro, Anna Mazzarello, Enrica Melossi. *Realizzazione tecnica:* Oreste Molina, Giuseppe Bongiovanni, Ettore Lazzarotto. *Segreteria:* Malcolm Skey, Augusta Tosone, Paola Cigana.

Enciclopedia

Volume settimo

Imitazione - Istituzioni



Giulio Einaudi editore

Intelligenza artificiale

1. *La problematica.*

Una costante nella storia della scienza, che è diventata una legge elementare del suo sviluppo, è quella di realizzare in modo relativamente irriflesso attività che altrimenti richiedono un grado di concentrazione elevato. In questo senso la costruzione di dispositivi per il calcolo (non solo numerico), dall'abaco alle moderne macchine digitali, si può interpretare come il tentativo di materializzare le idee umane, dare loro una forma tangibile mediante un meccanismo concreto, salvo poi riconoscere e affrontare i problemi che la nuova situazione comporta, in una continua relazione fra coscienza umana e inconsapevolezza della materia organizzata dall'uomo.

Per quanto questa problematica si confonda con la stessa storia umana, è propria del pensiero moderno la sostituzione sistematica dei fenomeni naturali con equivalenti artificiali, utilizzando le risorse della tecnica. Il campo dell'intelligenza artificiale si rivolge in questo senso alla «meccanizzazione dei problemi intellettuali». Da tempo le macchine non sono più, o soltanto, mezzi che estendono la forza muscolare dell'uomo, acquiscono i suoi organi sensoriali o si adeguano a condizioni di lavoro che gli sono intollerabili. Ora penetrano anche nella sfera del lavoro intellettuale, aiutano o sostituiscono l'uomo nella risoluzione di problemi di scelta, nella ricerca di strategie ottimali. Rappresentano un'estensione delle sue capacità deduttive. Esempi di simili situazioni fanno parte dell'esperienza di ogni giorno.

In questi termini si pone il primo interrogativo che colpisce l'immaginazione quando si parla di intelligenza artificiale: «Può pensare una macchina?» e come si valuta la sua «intelligenza»? Ma occorre subito distinguere due atteggiamenti che, in vario grado, si trovano riflessi in ogni considerazione: quello comportamentistico e quello funzionale. Per il primo il processo di meccanizzazione è passato, con una sostanziale continuità, dalla fase di «trasformazione dell'energia» a quella di «trasformazione dell'informazione» comprendendo in questa estensione nell'ambito dell'artificiale anche problemi solitamente associati alle capacità umane. La necessità di reinterpretare termini quali 'intelligenza' e 'pensiero', che nel linguaggio comune si applicano solo agli esseri umani, viene superata assumendo un «adattamento» in un ambiente più ampio di quello tradizionale. Se, come l'esperienza insegna a considerare, con «adattamento» si intende l'elemento portante di ogni concezione evolutiva (che in questo caso non è quella «naturale», ma quella delle macchine costruite dall'uomo) l'adattamento si realizza con i metodi che sono propri alle macchine. Per il secondo atteggiamento l'uomo, nel suo processo di conoscenza, è giunto a costruire e dominare macchine sempre più complesse e potenti. A questo punto le «macchine pensanti» rappresentano il più profondo stadio di conoscenza in cui si concretizzano le idee dell'uomo che ri-

flette su se stesso, sulla propria attività pensante e sui processi che determinano il suo comportamento intelligente.

Nel seguito si vogliono sviluppare i termini di questa contrapposizione e più avanti dare indicazioni su alcuni esperimenti effettivi e alcune ricerche.

1.1. Simulazione e realizzazione.

La contrapposizione indicata fra i due atteggiamenti di fatto assume la forma dell'opposizione modello/strumento. Infatti gli studi nei quali si assume come punto di partenza qualche ipotesi sul sistema nervoso e sull'apparato sensoriale umano hanno piuttosto lo scopo di costruire modelli che imitino il comportamento dell'uomo ripetendo particolari specifici della sua attività, nell'intento di trarre da questi modelli utili conseguenze sul funzionamento del prototipo uomo. Quelli comportamentistici invece tendono a realizzare procedimenti simbolici che permettano di ottenere risultati anche se in maniera indipendente dalle forme umane di realizzazione dello stesso comportamento.

La forma assunta di opposizione modello/strumento spiega che il rapporto fra i due atteggiamenti non è però di inclusione. Spesso il miglior approccio alla costruzione di una macchina avente un compito determinato, alla ricerca di una soluzione per un problema assegnato, consiste proprio nel tentare di ripetere il comportamento dell'uomo di fronte allo stesso problema, mentre dal punto di vista della costruzione di un modello, occorre formulare delle ipotesi che costituiscano un attendibile punto di partenza per l'indagine, e per questo risulta talvolta utile realizzare funzioni senza riguardo per i processi seguiti dall'uomo (ad esempio per ricavare valutazioni empiriche).

Come avviene anche in generale, nel primo caso l'interesse è maggiormente diretto a capire gli aspetti dell'intelligenza umana, cioè verso la formazione di una «teoria dell'uomo» che rappresenti un naturale prodotto/fattore di queste ricerche. Nel secondo caso a reperire sufficienti risorse per la costruzione di un meccanismo operativo.

Mentre la prima tendenza riguarda la conoscenza di un fenomeno naturale (l'intelligenza), la seconda si rivolge a una costruzione dell'uomo (l'artificiale) non direttamente reperibile in natura e la contrapposizione si trova già riassunta nei due termini che congiunti designano il campo di ricerca, anche se occorre osservare che «l'ambiente umano non è mai o quasi mai un ambiente interamente 'naturale'; esso è sempre o quasi sempre trasformato dall'uomo» [Koyré 1961, trad. it. p. 61].

Tenuto conto dei limiti di questa suddivisione esemplificativa, la prima tendenza può essere sintetizzata col termine 'simulazione del pensiero umano' e considerata come un fattore di conoscenza, la seconda, cioè la 'realizzazione del comportamento', si presenta invece come un fattore di produzione. L'esistenza di stretti legami fra i due atteggiamenti spiega che il problema non consiste nel proiettarli sullo stesso piano, mescolando pensiero umano e deduzione meccanica, col risultato di una identificazione impossibile nella realtà e poco utile per la comprensione dei processi del pensiero umano. Al contra-

rio, si pone il problema di aumentare la dimensione della loro differenza, in modo da non annullare la specificità e penetrare più profondamente nella loro relazione.

Oltre tutto abitualmente si parla, per comodità più che per necessità di termini generali, di concetti globali quali «l'uomo», «il pensiero», «l'intelligenza», mentre quelli che esistono sono esseri umani individuali, coi loro pensieri «locali» e la loro intelligenza non misurabile neppure in specifici campi di attività e a maggior ragione non soggetta ad alcuna definizione rigorosa che possa tener conto dei molteplici aspetti in cui si manifesta il comportamento.

La simulazione del pensiero umano rientra in generale nel campo della *bionica*, la quale studia i principi di costruzione e di funzionamento dei sistemi biologici: l'uomo è riconosciuto come l'essere più intelligente della natura e i tentativi sono diretti a sintetizzare una «rete di neuroni» che presenti le stesse caratteristiche del sistema nervoso o almeno ne riproduca alcuni caratteri (ad esempio la interconnessione di regioni relativamente specializzate). Va notato però che fra i sostenitori della tendenza comportamentistica i lavori tesi a simulare i processi umani sono spesso visti come «limitati» dalla stessa intelligenza umana, che pone un confine superiore alla costruzione di dispositivi «intelligenti», mentre, maturate tecniche di elaborazione propria, secondo Minsky, «le macchine potranno diventare significativamente più intelligenti» [Greenberger 1962, p. 114] e anche «i nostri successori intellettuali» [*ibid.*, p. 115].

Da un altro punto di vista la distinzione presentata, anziché sotto la forma modello/strumento diventa quella interno/esterno: una tendenza si interessa maggiormente alle forze che agiscono all'interno del fenomeno dell'intelligenza umana, alle leggi secondo le quali si combinano o si contrappongono, mentre l'altra si rivolge soprattutto al risultato di questa composizione di forze, che si manifesta completamente col comportamento. Così il comportamento appare solo come il risultato dell'azione e, con un'analogia con forze questa volta reali non spiega i processi del pensiero, più di quanto la traiettoria di un corpo mobile spieghi le forze che hanno concorso a determinarla. Viceversa la conoscenza teorica delle forze agenti può non essere sufficiente, non abbastanza approfondita per prevedere e determinare una traiettoria reale.

1.2. Sistemi aperti.

Dopo aver rilevato i due atteggiamenti principali nei confronti della «meccanizzazione dei problemi intellettuali» e i loro riflessi in ambienti generali, occorre isolarne meglio i caratteri per comprendere i nodi attraverso i quali si articola.

Conduciamo questa discussione sulla base dell'esempio che per primo salta alla mente quando si parla di «macchine pensanti», quello dei *robot*, intesi come speciali dispositivi antropomorfi in grado di percepire «sensorialmente» il proprio ambiente, mediante microfoni al posto delle «orecchie» e telecamere al posto degli «occhi», e che in più sono in grado di movimenti e di

azione sul loro ambiente utilizzando ad esempio dispositivi meccanici in qualità di «braccia» e «gambe».

L'aspetto principale, che più interessa le intelligenze artificiali, è quello del calcolatore, se c'è, che come «cervello» controlla le azioni, mentre per gli aspetti «sensoriali» e di «azione» questi dispositivi continuano la tradizione dei giocattoli meccanici, privi di «cervello», che già nel Settecento presentavano un grado di complessità elevato.

Non la complessità delle costruzioni meccaniche distingue infatti questi «giocattoli» dai moderni «robot», quanto il fatto che le azioni sono rigidamente fissate nel caso dei giocattoli, mentre i robot trovano anche «fuori di sé», nell'ambiente che possono analizzare e «capire», le risorse per continuare in modo corretto la propria attività. Nel caso più semplice queste risorse sono «informazioni di ritorno» e i dispositivi moderni non si distinguono solo per l'uso di nuove e sofisticate tecniche, ma perché si basano su nuove concezioni, principalmente quella di feedback, introdotta dalla cibernetica, che permette di adeguare in modo dinamico il comportamento, in dipendenza anche dalle condizioni esterne.

Ma anche un sistema autoregolantesi può essere un sistema «chiuso», mentre quelli che interessano le intelligenze artificiali sono piuttosto «sistemi aperti». Per chiarire ciò consideriamo ad esempio una lavorazione meccanica che richieda l'esecuzione accurata ma completamente ripetitiva di qualche operazione. Se i soggetti che subiscono l'azione (ad esempio i pezzi da lavorare di una catena di montaggio) sono sempre uguali e ugualmente disposti rispetto al soggetto (macchina o uomo) che esegue l'operazione, allora non occorre alcuna regolazione. Si tratta di un sistema soltanto meccanico. Mentre se le condizioni di lavoro variano anche poco all'interno di un ambito (posizione, tempo, temperatura, ecc.) fissato, il sistema deve essere dotato di qualche forma di regolazione che permetta di ripristinare le condizioni necessarie all'accuratezza della lavorazione. In questo senso si parla ancora di sistemi chiusi, anche se eventualmente automatici (per questa distinzione si può meglio vedere, in questa stessa *Enciclopedia*, l'articolo «Automa», § 1.1).

Diversa ancora è la situazione quando le condizioni di lavoro si presentano in una forma non prevista esplicitamente. In questo senso si parla propriamente di sistemi aperti e le risorse per proseguire correttamente l'azione non vanno soltanto cercate nel mondo esterno, ma bisogna anche ritrovarle in sé, nella propria esperienza di situazioni analoghe, anche se non uguali.

In questo modo una prima definizione di «intelligenza» si ottiene confrontando una situazione non prevista, o determinata solo localmente, con la necessità di una azione globale, e una macchina risulta tanto più «intelligente» quanto più è capace di minimizzare la differenza fra la situazione corrente e una situazione nota. In questo senso, i problemi dell'intelligenza artificiale sono quelli consueti che consistono nell'avanzare la superficie di contatto, tramite e separazione allo stesso momento, fra il mondo noto delle relazioni determinate e quello ignoto dei fenomeni apparentemente casuali. In questo caso dei fenomeni dell'intelligenza umana.

1.3. Il problema dell'apprendimento.

In che misura un sistema dotato solo di una percezione locale è capace di una azione globale? Per capire quanto questa opposizione corrisponda a quella fra visione dall'interno e dall'esterno del fenomeno, e da qui dedurre il problema centrale, quello dell'apprendimento, consideriamo un esempio.

Sia dato, per fissare le idee, un «problema intellettuale ben definito» secondo la terminologia di McCarthy [1956, p. 177]. Si tratta di un problema per il quale esiste un criterio che, in un numero finito di «passi», garantisce se una soluzione proposta è accettabile oppure no. Si può ad esempio pensare a un gioco che ammetta un numero finito di «partite» e a un procedimento che le esamina sequenzialmente in un certo ordine per stabilire quelle «vincenti». In un senso ovvio ogni simile «problema ben definito» è banale, perché se una soluzione esiste allora può essere trovata passando in rassegna tutte le possibilità, ma sul piano dell'attuazione pratica una simile ricerca può risultare impossibile.

Si consideri qualche cifra: il numero di possibili partite a dama è stimato intorno a 10^{40} , e più ancora quelle a scacchi sono dell'ordine di 10^{120} , cifra per la quale «se organizzassimo tutte le particelle della nostra galassia in un qualche tipo di calcolatore parallelo operante alla frequenza dei raggi cosmici, il tempo di calcolo sarebbe ancora impossibilmente lungo» [Minsky 1963, p. 408].

Si intrecciano così due motivi che spiegano il rapporto fra percezione locale e azione globale. Da una parte, anche riferendosi a «problemi ben definiti», la necessità di controllare una grande quantità di casi impone la necessità di sviluppare metodi che permettano, ad esempio, di utilizzare analisi incomplete (locali) nella ricerca di una soluzione ottimale e regole di strategia generale (globale) interne al problema; dall'altra, proprio la maggior capacità delle macchine rispetto all'uomo, di fronte a certi problemi computazionali, forza la necessità di una definizione dell'«intelligenza delle macchine» non basata su caratteristiche soltanto estensionali ma anche sul grado di complessità delle operazioni.

Nessuno infatti potrebbe riconoscere una qualche «intelligenza» a un metodo di scansione, che raggiunge le proprie *performances* per esaurimento delle possibilità. Eppure dal punto di vista del comportamento globale (o esterno) un programma per calcolatore destinato a un «problema ben definito» (ad esempio competere in un gioco con un numero di partite abbastanza elevato, ma non inaccessibile all'alta velocità dell'elaborazione elettronica) risulterebbe assai più efficiente di un solutore umano del problema, il quale si troverebbe nell'impossibilità di tener conto di tutti i casi e quindi dovrebbe ricorrere a una strategia con regole di comportamento molto generali, magari non adeguate al caso specifico.

Ma anche gli esseri umani, si osserva, possono migliorare i propri risultati in ogni campo di attività pur di interiorizzare la propria esperienza lo-

cale e concentrarla nelle regole globali di comportamento. In sostanza seguono un « programma biologico » arricchito dall'esperienza, mediante il quale possono imparare, cioè mutare in maniera permanente il proprio comportamento in dipendenza dai rapporti con l'ambiente. Se una macchina sarà capace di interagire col proprio ambiente e attingervi le informazioni necessarie alla propria auto-organizzazione, sarà allora una « macchina che impara », vale a dire potrà variare in maniera dinamica non solo il proprio comportamento locale, ma tutto il proprio programma, non solo la propria « azione istantanea » ma tutto il proprio atteggiamento globale nei confronti dei problemi che è chiamata ad affrontare.

In questo senso il problema dell'apprendimento è il principale tema tecnico che caratterizza le ricerche sulle intelligenze artificiali. Apprendimento e auto-organizzazione non devono essere solo programmati inizialmente ma, come suggerisce Turing [1950, trad. it. p. 155], devono dipendere anche da variabili casuali e da una forma di selezione naturale rappresentata da uno sperimentatore-insegnante.

« Cercando di imitare una mente umana siamo tenuti a riflettere parecchio sul processo che l'ha condotta allo stadio in cui si trova... Invece di elaborare un programma per la simulazione di una mente adulta, perché non proviamo piuttosto a realizzarne uno che simuli quella di un bambino? Se la macchina fosse poi sottoposta a un appropriato corso d'istruzione, si otterrebbe un cervello adulto » [*ibid.*, p. 149].

Così anche di fronte al problema dell'apprendimento sono possibili due atteggiamenti. Quello funzionale è ben riassunto dalla frase di Turing appena citata, quello comportamentistico consiste in « un processo di adattamento a circostanze mutevoli e di registrazione del successo o dell'insuccesso » [George 1970, p. 27].

Si stabilisce così una sorta di dicotomia, correlata alla precedente. Da una parte trova posizione chi ritiene che una macchina debba imparare a comportarsi in maniera intelligente, partendo da una struttura iniziale relativamente semplice che renda efficace un processo educativo. Dall'altra chi pensa che l'intelligenza debba essere in qualche modo programmata a priori e solo grazie ad essa, in una fase successiva, sia possibile l'apprendimento. Per ora, si argomenta, al di là del termine 'apprendimento', che rimanda a un processo per il quale non si hanno altri modelli che la capacità umana ad apprendere, le differenze più appariscenti con l'uomo risiedono nella tecnica di programmazione e nella quantità di memoria (che negli esseri umani è stimata fra le 10^{10} e le 10^{15} cifre binarie e pertanto inaccessibile anche ai calcolatori di maggiori dimensioni).

In conclusione, esemplificando le opposte posizioni relativamente ai rapporti fra intelligenza e apprendimento, gli uni ritengono che se una macchina impara allora può diventare « intelligente », all'altro estremo solo una macchina già « intelligente » può imparare.

1.4. L'atteggiamento della psicologia.

In relazione alle macchine il verbo pensare è stato interpretato come «particolare abilità ad elaborare l'informazione», intelligente è diventato sinonimo di «capace di adeguarsi a una situazione imprevista» mediante un processo che abbiamo chiamato di «apprendimento» solo per i caratteri generali che divide con il corrispondente procedimento umano.

Interpretazioni più precise dei termini, che in ogni caso per la costruzione di dispositivi automatici dovrebbero essere in qualche grado operative, non possono che provenire dai contatti con la psicologia: a questa soprattutto spetta gettar luce sulla natura dell'intelligenza umana e dei processi del pensiero, in modo da formulare ipotesi che permettano un atteggiamento meno convenzionale nel confronto del «pensiero delle macchine». Dopo ciò, partendo da ipotesi ben fondate, l'interazione con le moderne tecniche dei calcolatori, mediante processi di simulazione, renderebbe particolarmente proficua la collaborazione.

Di fatto in numerose ricerche sulle intelligenze artificiali è presente la tendenza a costruire sistematicamente modelli che esibiscano in modo continuo queste caratteristiche convenzionali. Si tratta di un periodo nel quale il movimento disordinato della pratica deve sopperire alla mancanza di guida sicura della teoria o addirittura alla contraddittorietà delle diverse riflessioni teoriche. Dopo le reazioni all'associazionismo che si sono verificate all'inizio del secolo, quando i processi del pensiero sono stati riconosciuti come dotati di un'organizzazione più complessa che quella di flussi di associazioni stimolo-risposta, la psicologia umana ha preso a oscillare fra comportamentismo e fenomenismo e questa incertezza si trova in vario grado riflessa in tutte le «scienze dell'uomo», soprattutto in quelle materie di confine come l'intelligenza artificiale: «Tutti noi abbiamo recepito la miglior lezione di entrambe: nei nostri esperimenti trattiamo in maniera scettica gli elementi soggettivi e conveniamo che tutte le nozioni debbano possibilmente essere rese operative per mezzo di misure comportamentistiche. Riconosciamo anche che un essere umano è un sistema terribilmente complesso, organizzato, e che i semplici schemi della moderna psicologia comportamentistica appaiono riflettere tutto ciò a fatica» [Newell e Simon 1963, p. 280].

Così, si osserva: «Le nozioni di pensiero, cognizione e riconoscimento, formazione di concetti, soluzione di problemi, ragionamento induttivo e deduttivo, intelligenza, progetto e comprensione sono stati investigati a un crescente livello teorico da numerosi ricercatori nel contesto logico-matematico piuttosto che nel linguaggio della psicologia umana da dove hanno origine» [Kochen 1971, p. 261].

Peraltro, nell'ambito della psicologia, si osserva che «la parola "pensiero" è chiaramente difficile da definire e si sovrappone anche ad altri termini conoscitivi. Dobbiamo perciò raggiungere una sorta di accordo riguardo a ciò che intendiamo con "pensiero"» [George 1970, p. 46].

Nell'attesa che i rapporti con la psicologia raggiungano una sufficiente e utilizzabile chiarezza teorica che permetta il sorgere di una teoria unitaria sulla quale fondare un'interpretazione meno convenzionale del « pensiero » e dei suoi processi, è senz'altro necessario assumere i termini nel senso precedente.

In caso contrario per l'intelligenza umana si ricade nell'assunzione di qualche nozione del tipo « l'abilità ad apprendere le relazioni tra fatti in modo da dirigere l'azione verso uno scopo » (come si trova comunemente nei dizionari enciclopedici) che per la sua genericità si presta ad essere misurata solo col metro del successo in particolari e non necessariamente significativi campi di attività. Si tratta di una conseguenza della grossolana concezione delle intelligenze individuali umane come ordinate in maniera lineare, alla stessa stregua del peso e dell'altezza.

I primi tentativi in questa direzione sono stati successivamente raffinati e ampliati fino a giungere alle attuali prove del cosiddetto « quoziente di intelligenza » o alle sue varianti. Ma anche nelle nuove prove che sono state elaborate, come termine di paragone è rimasto il successo, materializzato in particolari abilità di tipo associativo e combinatorio, che mostrano tutta la loro incapacità a spiegare anche minimi particolari dei processi intellettivi, oltre al pericolo di prestarsi a valutazioni facilmente manipolabili.

2. *I motivi.*

All'origine di numerosi dibattiti relativi alla possibilità di « pensiero » delle macchine si trova la confusione fra i due piani del comportamento e dell'azione. In realtà è sulla questione se « ogni comportamento che chiamiamo intelligente quando l'osserviamo negli esseri umani si può realizzare con una macchina » che si accentrano le dispute fra chi sostiene che « le macchine eseguono ciò che viene loro ordinato e niente di più » e quelli che si oppongono a questa concezione argomentando, come Simon, che « non c'è motivo in linea di principio perché non si possa costruire una macchina per fare cose che il costruttore non sa fare... Perché ciò non può essere vero per i processi della conoscenza? » [Greenberger 1962, p. 125].

Abbiamo già osservato che si tratta di una contraddizione irrisolvibile soltanto confondendo l'azione col suo risultato, in questo caso il comportamento « intelligente » delle macchine con i processi che lo determinano, e in fondo le dispute sono tanto più accanite in quanto i contendenti si rivolgono a piani diversi. Su quello del comportamento appaiono pienamente accettabili gli argomenti inizialmente portati da Turing, sviluppati successivamente da altri e confermati a mano a mano che nel campo della riproduzione del comportamento intellettuale dell'uomo venivano ottenuti nuovi successi. Ad alcune di queste realizzazioni accenneremo più avanti; grazie ad esse « possiamo sperare che le macchine saranno alla fine in grado di competere con gli uomini in tutti i campi puramente intellettuali » [Turing 1950, trad. it. p. 155].

D'altra parte, sul piano dell'azione, quello assegnato all'« intelligenza » del-

le macchine è sempre un valore convenzionale, contrassegnato ad ogni istante da limiti insormontabili, perché «gli obiettivi possono essere posti e dunque anche modificati soltanto dall'uomo» [Pollock 1964, trad. it. p. 63].

I successi dell'automazione hanno generato una nuova evidenza, fornendo all'uomo uno strumento per costruire modelli dei propri processi intellettuali, ma contemporaneamente hanno imposto il nuovo problema della loro «convivenza» in un ambiente arricchito da macchine sempre più capaci. Il problema da affrontare è quindi quello del «grado di somiglianza» delle macchine con l'uomo, della loro compatibilità, alla luce degli sviluppi di tecnica e di idee che hanno originato il problema.

2.1. Alcuni precedenti.

Il trasferimento del verbo «pensare» dal dominio dell'uomo nel contesto dell'artificiale si è reso maggiormente esplicito con l'avvento dei moderni calcolatori elettronici. Ma naturalmente le attività dell'uomo, anche quelle superiori, le sue attitudini e la sua capacità a realizzare funzioni ed eseguire calcoli sempre più complessi, sono stati posti direttamente a confronto con le macchine anche molto prima che sorgesse o si presentasse vicina la moderna tecnica di elaborazione dell'informazione.

Già Leibniz definì «abaco vivente» il proprio dispositivo automatico per eseguire le operazioni razionali (si veda a questo riguardo l'articolo «Abaco», § 7, di questa stessa *Enciclopedia*) fornendo forse per la prima volta un'espressione unica nella quale si trovano congiunti i termini della contraddizione di un costrutto artificiale con funzioni proprie della materia vivente. Mutati i tempi, a un livello che tiene conto delle conquiste ormai tecnicamente realizzate, è la stessa relazione presente nei termini «macchina pensante».

Altri precedenti in filosofia sono numerosi. Fra i più espliciti *L'homme machine* (1748) di La Mettrie che, direttamente riallacciandosi alle considerazioni nelle quali Locke intendeva «indagare sui poteri e gli oggetti dell'intelletto umano», forniva la più estrema e lucida concezione tendente a separare ogni fenomeno naturale nelle sue cause e nei suoi effetti, riducendo in particolare anche la vita psichica a puro meccanismo. Più in generale nella speranza razionalistica rientra proprio il trasferimento di ogni attributo e di ogni funzione umana, anche quelle intellettuali, al dominio della computabilità (intesa qui in senso intuitivo) e dunque alle macchine.

In campo letterario sono ben noti, ad esempio, *1984* (1949) di Orwell o *Brave New World* (1932) di Huxley, nei quali la società è essenzialmente una società di macchine e poche personalità che controllano l'informazione controllano anche l'emozione e la ragione. Ma la finzione artistica colma la differenza fra uomo e macchina: se l'uomo non è che un «automa» il rapporto si rovescia e si presenta la suggestione della macchina-uomo. Perché una macchina non può risultare indistinguibile in ogni suo comportamento da un essere umano? Gli esempi abbondano. Fra i più noti *Erewhon* (1872) in cui Butler portò agli estremi, da scrittore, la conseguenza dell'ipotesi di «macchine pensanti» e in

tempi piú recenti *R.U.R.* (1920) in cui Čapek introdusse per la prima volta il termine 'robot' (dal termine ceco per 'lavoro'; di fatto abbiamo già accennato alla «robotica», cioè agli studi riguardanti la costruzione di macchine in grado di azione fisica e motivata sull'ambiente, proprio in connessione con la problematica delle intelligenze artificiali).

Come avviene tutt'ora per i migliori romanzi di fantascienza, i dispositivi ideati dagli scrittori rappresentano un pericolo per l'umanità (proprio in questo si realizza la loro funzione di «personaggi») piú o meno esplicitamente connesso al fatto che questi «robot» sono provvisti di intelligenza e volontà autonome che li portano a sfuggire al controllo umano e a trasformare in conflitto la competizione con l'uomo. Ma contro questa paura presente nella finzione della rappresentazione letteraria, nella pratica il pericolo si attenua o non si manifesta affatto, lasciando strada all'idea che simili dispositivi siano concretamente realizzabili, addirittura con la fiducia che ciò avvenga in un futuro non molto lontano o comunque non troppo eccedente la scala temporale nella quale viene usualmente compresa l'attività scientifica umana.

Forse in questa contrapposizione tra finzione e realtà, nell'alternarsi fra la paura di questa forma di evoluzione e l'aspettativa dei suoi risultati, risiede la miglior verifica di quanto la gente, in fondo, creda alle «macchine pensanti» come a una reale alternativa a quel complesso di idee e di relazioni sociali che è l'uomo.

2.2. L'evidenza dell'elettronica.

In ogni caso i primi calcolatori del periodo moderno furono considerati e spesso volutamente imposti come «cervelli» essi stessi, piuttosto che «cervelli a meno di una metafora», o «cervelli metaforici» secondo una terminologia recentemente introdotta per le macchine dedicate in maniera specifica alle ricerche sulle intelligenze artificiali [Arbib 1972].

Cosí uno dei primi testi divulgativi sui calcolatori elettronici conteneva già nel titolo (*Giant Brains or Machines that Think* [Berkeley 1949]) le premesse della moderna disputa relativa alle attività umane e delle macchine.

In che modo le realizzazioni dell'elettronica hanno favorito la convinzione che l'idea antica e astrattamente posta di «macchina pensante» non sia soltanto un artificio letterario o una ipotesi filosofica, ma che si presenti concretamente nella nostra realtà?

Macchine calcolatrici meccaniche sono a disposizione della comunità scientifica almeno dal XVII secolo (Pascal) e l'idea di un elaboratore di impiego universale è contenuta già nel progetto della «macchina analitica» di Babbage (1833). Un problema che si pone è allora quello di determinare i motivi che nel nostro secolo hanno permesso di superare la convinzione che alcuni oggetti artificiali non siano soltanto strumenti, pur raffinatissimi, per la costruzione di un'immagine della natura e per le sue trasformazioni secondo le idee socialmente sviluppate dell'uomo, ma al contrario concorrano a una sua disumanizzazione perché lo privano di caratteristiche peculiari.

Rispetto al passato le macchine moderne dispongono di una nuova dimensione, aperta esplicitamente dalla misura della «quantità di informazione» e dallo sviluppo di metodi sofisticati per il suo trattamento. Il profondo contenuto della nozione di informazione si è rivelato obiettivo ed è stato riconosciuto centrale quando alla tradizionale accuratezza dell'esecuzione automatica delle operazioni si è aggiunta una velocità di esecuzione eccezionalmente più elevata di quella umana. Nel frattempo i metodi per contenere l'informazione (le cosiddette «memorie» dei calcolatori) venivano progressivamente migliorati, le memorie ridotte di volume, permettendo massicce, oltre che rapide e precise, elaborazioni dei dati.

L'elettronica era lo strumento specifico di attuazione di questi cambiamenti nel campo dell'elaborazione. Cambiamenti strettamente quantitativi, ma decisivi perché l'intera materia uscisse dall'ambito teorico e sperimentale dei laboratori, per integrare la primitiva, limitata elaborazione meccanica e rendersi disponibile alle prime applicazioni concrete. Così nel rapporto fra teoria e pratica, nella forma che assume nelle società industriali di rapporto fra scienza e tecnica, si trova la prima causa evidente.

Inoltre a questo punto dello sviluppo l'interazione con le riflessioni teoriche (si tenga conto del fatto che la pubblicazione di *Cybernetics* [1948] da parte di Norbert Wiener è solo di poco successiva alla realizzazione dei primi grossi calcolatori elettronici effettivamente utilizzati) apriva la strada a un rapporto sistematico e proficuo fra campi apparentemente e tradizionalmente ritenuti inconfrontabili, quali ad esempio la biologia e la matematica, che in precedenza contavano soltanto contatti sporadici, anche se di grande rilievo concettuale. Dunque fra le principali cause bisogna senz'altro annoverare anche la rottura degli schemi tradizionali dell'organizzazione scientifica operata dalla cibernetica.

I successi ottenuti nel campo dell'elaborazione, utilizzati in larghi strati e rapidamente divulgati, sono entrati facilmente nella pratica quotidiana, conducendo a identificare i problemi che possono essere affidati all'uomo con quelli che si possono porre a una macchina. Alla fine questo è l'aspetto più interessante, perché un organismo, naturale o artificiale, generato piuttosto che costruito, è in larga parte determinato dai problemi che affronta, la loro quantità e la loro complessità. Così un altro fattore è legato alla massa delle realizzazioni effettuate e al loro grado di complicazione che hanno imposto la necessità di riconsiderazioni qualitative.

Con questi motivi si spiega come le macchine moderne, tipicamente elettroniche, abbiano generato la metafora di essere «pensanti» come l'uomo e l'abbiano talmente imposta all'evidenza da far perdere in molti casi la distinzione fra i termini che concorrono a costituirlo.

Anche se la migliore velocità dell'elaborazione elettronica e la sua maggiore precisione rispetto a un operatore umano si riferiscono a quei problemi che, come cercheremo di mettere in luce trattando le ricerche, ammettono per la soluzione una «procedura effettiva» (in senso intuitivo, quei problemi per i quali è assegnato uno specifico criterio di scelta a ogni «passo» dell'ela-

borazione), la convinzione che numerose persone hanno tratto dai risultati finora conseguiti è che non esistano limiti alla applicabilità delle macchine moderne, e che quindi queste possono, almeno potenzialmente, sostituire l'uomo anche nelle sue attività decisionali.

2.3. L'analogia con le macchine volanti.

Se ci si spostasse nel xv secolo, avrebbe senso porsi la domanda: «Può volare una macchina?»

Se però col termine 'volare' s'intende più di quanto la nostra esperienza attuale suggerisce e si ritiene che si tratti di una caratteristica peculiare di alcune specie animali, allora il suo trasferimento al dominio delle macchine deve essere concordato. Ma ormai la distinzione tra volo naturale e artificiale è soltanto apparente e la pratica non richiede il ricorso ad alcuna convenzione che ne chiarisca il senso. A partire dagli infaticabili sforzi di Leonardo da Vinci, tesi alla costruzione di una «macchina volante», fino alle moderne realizzazioni aeronautiche, la storia del volo e i successi ottenuti hanno imposto un nuovo significato al verbo volare, grazie al quale gli aeroplani volano (senza virgolette), mentre i calcolatori elettronici ancora oggi «pensano».

Chiaramente per le «macchine volanti» non è richiesta una completa equivalenza, né comportamentistica, né funzionale, con qualche tipo di volatile, ma una corrispondenza relativa ad alcuni aspetti essenziali, ad esempio la capacità di vincere la forza di gravità sfruttando la propulsione aerea (la definizione di «macchina volante» è in fondo successiva alle prime realizzazioni, non è univoca ed è tutt'ora soggetta a variazioni).

L'analogia con le «macchine volanti», ampiamente sfruttata nella letteratura, suggerisce che anche l'intelligenza artificiale debba studiare gli aspetti essenziali dell'intelligenza che sono adattabili alla realtà di dispositivi costruiti dall'uomo, senza alcuna pretesa di ripetizione del cervello umano, così come il volo naturale costituisce un fenomeno che non è possibile copiare, ma adattare con un modello alle diverse esigenze, risorse, attitudini dell'uomo e delle sue macchine.

Per continuare l'analogia, quelle che importano sono le leggi generali del volo. Ad esempio volendo vincere la forza di gravità «battendo le ali» come molte specie di uccelli, l'esperienza di numerosi tentativi sfortunati compiuti con ali artificiali mobili, e più tardi gli studi di aerodinamica, mostrano che ciò è almeno problematico, se non proprio impossibile. Le leggi generali che regolano il volo degli uccelli sono in realtà meno superficiali del semplice «battito d'ali», il quale costituisce soltanto un mezzo per ottenere la necessaria potenza. Ma si tratta di un mezzo poco congeniale alle macchine dell'uomo, e solo la comprensione di questo fatto e l'applicazione di nuove risorse (essenzialmente il motore a scoppio) ha permesso di utilizzare al meglio le possibilità umane.

Inoltre nella storia delle «macchine volanti» occorre anche annoverare il fatto che spesso proprio i tentativi di imitazione secondo caratteri superfi-

ciali hanno per lungo tempo ostacolato di fatto le ricerche. Così la valutazione delle possibilità future dell'elaborazione automatica, basata solo sulle conoscenze attuali, rischia di lasciare in realtà troppo spazio all'ignoranza attuale.

L'analogia con le «macchine volanti» ci conferma anche che la valutazione del «grado di intelligenza» di una macchina varia in maniera dinamica e si misura in ogni momento con la sua capacità a estendere i limiti tradizionali di metodi noti. Così come la valutazione del volo degli aeroplani è cambiata in dipendenza dagli sviluppi e dall'efficienza delle «macchine volanti» a mano a mano realizzate, anche la valutazione del comportamento intelligente dipende dal grado di sviluppo scientifico presente nella società in cui si pone la questione.

Agli inizi del secolo un volo era un «balzo» di qualche centinaio di metri e nel medioevo la capacità di eseguire operazioni aritmetiche fra numeri interi era sicuro indice di intelligenza. Si osserva nell'articolo «Calcolo» di questa stessa *Enciclopedia* (§ 2.2) che ancora nel Seicento «agli occhi stessi di coloro che vi ricorrevano [il metodo di divisione «per battello»] ogni volta che si imbattevano in una divisione di una certa difficoltà, il procedimento appariva così astruso da rappresentare una "sfida" al talento matematico: in tale ambito il calcolo diventava dunque un pezzo di bravura per specialisti».

Ancor oggi un programma per risolvere un sistema di equazioni lineari può apparire intelligente a chi non conosce le regole meccaniche di soluzione.

Osserva Minsky in un suo articolo di rassegna sulla problematica e i metodi relativi alla costruzione di dispositivi «intelligenti»: «Mi sembra che "intelligenza" denoti poco più del complesso di risultati che ci capita di rispettare ma che non comprendiamo. Usualmente è così per le questioni di "profondità" in matematica. Una volta che la dimostrazione di un teorema è realmente compresa il suo contenuto sembra diventare banale» [1963, p. 447], anche se nello stesso contesto Minsky ammonisce che «non dobbiamo permettere che la nostra incapacità a discernere un locus di intelligenza ci conduca a concludere che quindi i calcolatori programmati non possono pensare. Infatti, può accadere tanto per l'uomo quanto per la macchina che quando finalmente riusciamo a comprendere la struttura e il programma, il senso di mistero (e di auto-appropriazione) si faccia più debole» [*ibid.*].

2.4. Le obiezioni storiche.

Che l'uomo non sia «altro che», piuttosto che «anche» un elaboratore di informazione è una suggestione alla quale non sfuggono, o alla quale a maggior ragione partecipano, anche gli esperti della cosiddetta *computer science*, alcuni dei quali ritengono che il compito di «costruire una macchina intelligente quanto l'uomo» sia interamente nelle mani del progresso tecnologico, sotto la forma di quantità di memoria e organizzazione logica.

Naturalmente l'enunciazione entusiastica dello scopo delle intelligenze artificiali in quanto «costruzione di una macchina intelligente quanto l'uomo», oltre a non spiegare quali sono i problemi concreti, è soltanto la formula con-

densata di un programma e non va presa in senso letterale. Troppé volte questa enunciazione che, in fondo, isolata da ogni contesto è ingenua, è stata il tramite per critiche non fondate sulla realtà delle ricerche o sulle direzioni intraprese, mentre occorre piuttosto interpretarla come un appello lanciato alla comunità scientifica perché le linee di sviluppo nel campo dell'automazione e del trattamento automatico dell'informazione seguano certe strade che sono giudicate principali.

Secondo la visione di Neumann, ad esempio, uno dei pionieri e dei massimi esponenti delle ricerche sulle intelligenze artificiali, i problemi da affrontare risiedono in «dimensione, affidabilità e organizzazione logica». Osserva infatti Burks: «Von Neumann confrontò i migliori calcolatori che potevano essere costruiti a quel tempo [si tratta degli anni '50] con gli organismi naturali più intelligenti e concluse che esistevano tre fattori fondamentali che limitavano la capacità tecnica a realizzare calcolatori realmente potenti: la dimensione delle componenti a disposizione, l'affidabilità di queste componenti e una mancanza teorica nell'organizzazione logica dei sistemi complessi degli elementi di calcolo» [1966, p. 20].

Storicamente sono state formulate molte obiezioni alla concezione che pone in competizione le macchine e l'uomo in tutti i campi di attività intellettuale. La mancanza di autocoscienza, la paura delle conseguenze, limitazioni logiche delle funzioni computabili, l'insensibilità a vari stimoli, al dolore e al piacere, varie incapacità, ad esempio a comporre una sinfonia o a scrivere un testo letterario. Forse il primo elenco di queste obiezioni via via manifestatesi, con le «controdeduzioni» dell'autore, compare in Turing [1950]. Tutti questi argomenti sono comunque già compresi in quello estremo che è stato enunciato, secondo il quale le macchine eseguono solo ciò che viene loro ordinato. È il punto di vista dell'uomo-padrone, per il quale le macchine anche più sofisticate non sono che «schiavi ubbidienti» e del quale non si mette in discussione neppure la supremazia futura.

L'obiezione degli «schiavi ubbidienti» è associata nella letteratura al nome di Lady Lovelace. Si tratta di Ada Augusta, figlia di Byron, sposata con il conte di Lovelace, la quale tradusse in inglese una descrizione della «macchina analitica» di Babbage fatta dal Menabrea, aggiungendo a commento delle note sostanziali. Da queste note, per l'appunto, risultava che secondo la concezione di Lady Lovelace, la macchina analitica era in grado di fare qualunque cosa che si riuscisse ad ordinarle, ad esempio calcolare espressioni algebriche oppure «generare» musica [Lovelace 1842].

L'obiezione di Lady Lovelace non significa che in ogni momento l'uomo può predire il comportamento di una macchina che ha costruito. Ciò è già impossibile per i più semplici sistemi moderni: la complessità di elaborazione e, in molti casi, l'enorme quantità di alternative che una macchina può esaminare con estrema accuratezza in breve tempo, rendono impossibile anche una previsione grossolana. Significa che le regole generali di comportamento, l'interazione delle macchine con l'ambiente esterno e la loro formazione di «esperienza» sono predeterminate dal costruttore.

Si ritrova così il tema dell'apprendimento. Anche se l'uomo non controlla più direttamente il comportamento, ne controlla però i processi di formazione, cioè la maniera con cui la macchina «impara». Finché non si passerà a un livello più profondo la vera obiezione è rivolta verso chi riconosce la possibilità di uno sviluppo delle macchine originato ma non più diretto dalle necessità umane, e ritiene che il loro «apprendimento» le porterà a una problematica del tutto autonoma, non connessa o in opposizione con quella umana.

3. *Le ricerche.*

Abbiamo distinto due indirizzi principali nella ricerca sulle intelligenze artificiali, uno legato al comportamento e l'altro al processo di formazione del comportamento. Abbiamo inoltre osservato che la distinzione fra questi due indirizzi non è netta e che in ogni caso l'oggetto specifico che riguarda le intelligenze artificiali è costituito dal problema dell'apprendimento.

Per questo motivo, piuttosto che riportare in dettaglio i numerosi tentativi e le ricerche effettuate in questo campo ormai eccezionalmente vasto, crediamo che sia più proficuo indicare alcuni esperimenti fra i più significativi nei quali sia presente una forma di apprendimento anche rudimentale. Inoltre queste ricerche hanno svolto storicamente e svolgono ancora oggi una funzione di stimolo e di orientamento per gli studi successivi. In ciò consiste un'altra motivazione per limitarsi a considerare solo queste ricerche.

Con ciò lo scopo non è quello di illustrare le molteplici capacità delle macchine moderne, né gli straordinari risultati raggiunti in alcuni settori (i quali del resto sono in molti casi sotto gli occhi di tutti) ma quello di indagare le strade attraverso le quali si tenta, con maggiore o minore successo, di pervenire a una comprensione sufficientemente meccanizzabile dei processi dell'apprendimento umano.

Alcuni degli esperimenti accennati, particolarmente quelli a cui ci riferiamo come «primi esperimenti», sono ormai «classici» nel senso di rappresentare dei passaggi obbligati di ogni descrizione in quanto costituiscono il reale inizio delle ricerche. Inoltre consentono di capire quale senso di «apprendimento» può essere affidato a una macchina, pur nella loro enorme differenza dalle macchine moderne programmate.

Vediamo dapprima i settori nei quali le ricerche si collocano e tradizionalmente si suddividono.

3.1. I settori di ricerca.

Dalla «percezione» dell'ambiente all'azione motivata sull'ambiente, se una macchina deve comportarsi in maniera intelligente, deve anzitutto imparare a riconoscere le forme presenti nel proprio ambiente, con le quali o sulle quali è chiamata a operare. Ciò significa essere capace di analizzare il proprio spa-

zio e risolverlo in sottospazi noti. Il perceptrone ad esempio (ne parleremo più avanti) rappresenta un tentativo in questa direzione. Di conseguenza una macchina dovrà progettare la propria azione, combinando i dati della propria analisi dello spazio, la propria precedente esperienza e il problema da risolvere o studiare. In molti casi questa «pianificazione del proprio intervento» richiede l'esame di uno spazio di possibilità molto vasto. Le dimensioni di questo spazio possono essere notevolmente ridotte in accordo a considerazioni legate strettamente al problema, con lo sviluppo di tecniche euristiche, oltre che alla memoria di precedenti analoghe situazioni (per questo tipo di problemi risultano interessanti gli esperimenti condotti coi giochi e con le dimostrazioni automatiche di teoremi di matematica).

Il fatto poi che all'interno dei programmi che esibiscono un «comportamento intelligente» nei più diversi campi di attività, dalla composizione musicale all'analisi delle strutture chimiche, si studino aspetti molto specifici, strettamente legati al problema da affrontare, ha condotto a elaborare modelli scarsamente collegati l'uno all'altro. Un problema importante che si pone è quindi quello di cogliere e organizzare gli aspetti comuni a tutti questi modelli, nell'aspettativa che una simile analisi conduca a evidenziare una caratteristica peculiare del prototipo uomo: la capacità di affrontare in maniera intelligente non un solo tipo, ma tutta una varietà di problemi, anche i meno omogenei. Naturalmente la costruzione di una macchina dotata in buon grado di questa caratteristica non deve essere realizzata in modo puramente estensionale, per accostamento di più macchine singolarmente specializzate in un tipo di problemi, bensì organizzando le strutture profonde, di modo che, come abbiamo già visto, la macchina si riveli «intelligente» anche nei confronti di problemi non esplicitamente riconosciuti da qualche sua componente. Ciò significa la capacità di trasferire la propria conoscenza ad altri campi d'attività.

Tentativi in questa direzione sono condotti da tempo coi programmi cosiddetti *multipurpose*, a cui accenneremo più avanti con un esempio significativo.

Un altro aspetto, che abbiamo già incontrato nel caso dei «robot» e che assume un'importanza sempre crescente è l'uso del linguaggio naturale nei rapporti con le macchine. Vi sono motivi pratici e teorici che hanno portato negli ultimi anni a incrementare questo tipo di ricerche. Questi motivi sono ben concentrati nell'osservazione che la capacità umana a concatenare pensieri è inestricabilmente legata alla sua abilità a manipolare simboli e quindi alle sue capacità linguistiche. Così, se i motivi d'ordine pratico consistono nell'ottenere una efficiente traduzione automatica da una lingua straniera o nel permettere che personale non specializzato operi con una macchina, i motivi teorici si possono ritrovare nel desiderio di districare questo groviglio di connessioni fra pensiero e linguaggio.

In un suo articolo sulla problematica delle intelligenze artificiali Arbib osserva: «Il linguaggio trascende la letteralità degli eventi attuali o delle figure e permette l'introduzione di relazioni temporali, dinieghi e quantificatori. Permette di distinguere ciò che è da ciò che dovrebbe essere, e quindi di creare un

sistema di etiche. Scienza e tecnologia si fondano sulla capacità di fare ipotesi magari contro-reali e ricercare leggi unificanti, ed è il linguaggio che permette a queste ipotesi e a queste leggi di essere fatte» [1976, pp. 1347-48].

3.2. I primi esperimenti.

Abbiamo già citato i giocattoli meccanici del XVII secolo fra i precedenti dei «robot», ma la vera storia delle «curiosità meccaniche» risale almeno al periodo alessandrino del III secolo a. C., all'opera di Ctesibio e poi a quella di Erone nel I secolo d. C., sebbene queste opere fossero finalizzate soprattutto a scopi di culto. È famoso il «teatro degli automi» di Erone Alessandrino, che coinvolgeva tutte le conoscenze di meccanica dell'epoca.

«Erone esercitò grande influenza per tutto il Medioevo, il Rinascimento e l'età barocca. Gli orologi artistici del Medioevo, le fontane con figurazioni mobili dei giardini principeschi del Rinascimento, i termoscopi di S. Santorio, di C. Drebbel, di Galileo all'inizio del XVII secolo, si rifanno tutti alla meccanica ellenistica» [Klemm 1954, trad. it. p. 29].

Il grado di complessità dei dispositivi costruiti crebbe rapidamente nel Settecento. Comparvero meccanismi, soprattutto orologi, dotati di figure umane o d'animale che a intervalli fissi ripetevano i propri gesti e più tardi furono costruiti meccanismi capaci di una successione veramente complessa di azioni. Sono note, ad esempio, le costruzioni di Jacques de Vaucanson, come il «flautista» (1738), un prodigio di meccanica ad altezza naturale, in grado di suonare più motivi, oppure gli androidi di Pierre-Jacquet Droz e di suo figlio Henri.

Ma la storia moderna delle ricerche sulle intelligenze artificiali risale più propriamente alla rapida crescita della teoria dei servomeccanismi durante la seconda guerra mondiale e all'impulso, che abbiamo cercato di illustrare in precedenza, ricevuto con la diffusione delle idee della cibernetica.

Fra il 1950 e il 1960 vengono costruiti a scopo dimostrativo speciali meccanismi che somigliano ai modelli meccanici dei secoli precedenti, ma se ne distaccano nettamente in quanto non sono oggetti compiuti, rigidamente fissati nelle loro azioni, ma al contrario costituiscono i primi tentativi di percezione «sensoriale» dell'ambiente e presentano quindi una forma, seppure primitiva, di esperienza come base per l'apprendimento.

Consideriamo qui tre esempi molto noti e significativi per caratterizzare lo stato e le tendenze dei primi esperimenti. Si tratta del «labirinto» di Shannon, della «tartaruga» di Grey Walter e dell'«omeostato» di Ashby.

Il «labirinto» è costituito da una struttura metallica nella quale un «topo», costituito da un magnete permanente, riesce a trovare la strada che conduce alla «scatola del cibo» a patto di effettuare un numero sufficiente di tentativi. Il successo nella ricerca della strada è dovuto a una memoria che gli permette di ritenere i tentativi favorevoli e scartare quelli sbagliati. Alla fine il «topo» ha memorizzato completamente il percorso ed è in grado di ripercorrerlo con sicurezza. Se si cambia la disposizione del «labirinto», il «topo» cerca inizialmente

te di ripetere il vecchio percorso, correggendolo costantemente fino a raggiungere la meta con un altro percorso.

Costruito da Shannon negli anni '50, il «labirinto» destò notevole interesse nell'ambiente della cibernetica in quanto rappresentava un «inizio», anche se la forma di apprendimento proposta, per memorizzazione completa di tutte le possibilità, era così poco evoluta da non porre alcuna seria ipotesi sul comportamento animale. Né questo era lo scopo. Di fronte al problema di spiegare particolari aspetti dell'attività neurofisiologica questo «topo» non differisce dai giocattoli meccanici. La sua importanza consiste piuttosto nello stimolo esercitato sulle future ricerche, mostrando un uso e possibili applicazioni che trascendono gli scopi dei giocattoli meccanici; precisamente è ora possibile variare «dall'esterno» la disposizione del «labirinto».

Analoghe considerazioni valgono per gli altri modelli dello stesso periodo.

La *machina speculatrix*, più comunemente nota come la «tartaruga», fu realizzata negli anni 1950-51 dal neurofisiologo inglese Grey Walter, che ne elaborò tre modelli. Si tratta di dispositivi elettromeccanici in grado di muoversi da soli e di dirigersi verso una sorgente luminosa (o di allontanarsi da essa), di aggirare ostacoli, di sostare alla «scatola del cibo» per ricaricare le batterie. La tartaruga è sempre in movimento «come le inquiete creature contenute in una goccia d'acqua di uno stagno» [Walter 1953, trad. it. p. 105] e descrive strette curve che le permettono di scandire con una fotocellula il terreno su cui si muove.

La versione più complessa della tartaruga costituisce l'esperimento più interessante. Del dispositivo fanno parte anche un microfono per recepire segnali acustici e un condensatore in qualità di elemento di memoria. La tartaruga si arresta per breve tempo se «sente» un suono. La comparsa di un suono contemporaneamente all'incontro con un ostacolo produce una breve carica del condensatore, in modo che dopo l'incontro con alcuni ostacoli, in presenza del suono, la carica del condensatore raggiunge un livello sufficiente a far reagire la tartaruga al solo suono, come se fosse in presenza di un ostacolo. Si è così procurato una forma rudimentale di riflesso condizionato nella tartaruga.

A differenza dalla tartaruga il dispositivo ideato da Ashby, noto come «omeostato», è stato battezzato *machina sopora* perché lo scopo e l'essenza del suo funzionamento consistono nel ricercare una posizione di equilibrio stabile nella quale gli stimoli esterni non abbiano influenza.

Le motivazioni portate da Ashby sono costituite da problemi di natura socioeconomica: un «amplificatore di intelligenza», vale a dire un «dispositivo che, fornito di un po' di intelligenza, ne produca molta» [Ashby 1956, p. 216], può aiutarci a costruire una società stabile nella quale — propone come esempio Ashby — esistano sistemi capaci di controllare le reali forze economiche e sociali e fra tutte le possibilità offerte scegliere quelle che garantiscono la stabilità sotto le condizioni fissate. Quali che siano i propositi, l'essenza del processo è racchiusa, secondo Ashby, nel suo omeostato.

Si tratta di quattro calamite collegate fra loro con circuiti di retroazione

di vari ordini, in modo da garantire una buona probabilità di stabilizzazione del sistema in uno stato di equilibrio quando si presenti una perturbazione che altera l'equilibrio iniziale. Al suo primo apparire osservava Shannon: «Alcune caratteristiche dell'omeostato sono molto interessanti come base per macchine fondate sull'apprendimento e per modelli del cervello. Esso sembra in certo modo contenere più informazione di quella esplicitamente introdotta in esso. Per esempio si è dimostrato capace di autoregolarsi in situazioni non previste al momento della costruzione. Di particolare interesse è l'impiego di resistenze scelte a caso, che ricorda le connessioni casuali fra neuroni nel cervello» [1953, trad. it. p. 111].

Ma anche ammettendo un'altissima velocità di esecuzione il tempo necessario alla ricerca di una posizione stabile cresce esponenzialmente al crescere dei gradi di libertà. Come rimedio, in successive elaborazioni, Ashby sostituì il sistema originario con più sistemi connessi fra loro, ciascuno in grado di trovare in modo autonomo il proprio equilibrio e ciascuno sensibile soltanto ad alcune specie di perturbazione.

In questo modo il tempo di ricerca cala notevolmente. Inoltre questa scomposizione somiglia, in qualche senso, a quella degli esseri umani che utilizzano diversi organi specializzati per le diverse perturbazioni. Fino a che punto, comunque, l'omeostato spieghi qualche particolarità del comportamento adattativo degli animali e suggerisca che il sistema nervoso realizzi concretamente l'ultrastabilità non è dato sapere. Osserva ancora Shannon che i successivi tentativi «conducono a costruzioni concettuali piuttosto complicate, tanto complicate che è estremamente difficile stabilire fino a che punto potrebbero essere effettivamente utili» [*ibid.*].

3.3. I perceptroni.

È noto che i processi di apprendimento sono connessi e facilitati dalla formazione di anticipazioni. Nel caso di una macchina queste provengono dall'esterno e si risolvono in un comportamento-modello.

In altre parole al soggetto che impara vengono forniti una finalizzazione, come nel caso dei modelli presentati prima (cibo, riposo) e i metodi per perseguirla (apparati motori), ma anche una «valutazione» del proprio comportamento, cioè una forma di «rinforzo». È questo il caso dei «perceptroni», introdotti come riconoscitori di modelli visivi [Rosenblatt 1958] e in grado di subire un intero processo educativo.

Nel caso più semplice si tratta di perceptroni a tre soglie: la figura da riconoscere viene proiettata su una retina di elementi fotosensibili i quali emettono un segnale binario (o oppure 1 a seconda che non siano o siano «colpiti» dalla figura) lungo un canale d'uscita collegato in maniera casuale alla seconda soglia, quella degli elementi associativi. Sotto uno stimolo «sufficiente» rispetto a un livello b_i caratteristico di ciascun elemento associativo (vale a dire quando la somma dei segnali in ingresso supera b_i) gli elementi associativi rispondono con un segnale binario A_i che moltiplicato per un «peso» c_i co-

stituisce l'ingresso per la soglia degli elementi di risposta. Ciascuno di questi a sua volta si « attiva » se lo stimolo entrante $\sum c_i A_i$ supera una soglia caratteristica dell'elemento. La configurazione binaria costituita dagli elementi di risposta attivi (= 1) e non attivi (= 0) fa parte di un opportuno codice nel quale si interpretano classi di figure sulla retina.

L'apprendimento del perceptrone consiste nel variare successivamente il peso c_i dei collegamenti fra elementi associativi e di risposta, in modo da ottenere una voluta corrispondenza fra configurazioni binarie del codice di risposta e classi di figure da riconoscere sulla retina, ad esempio rinforzando i pesi che tendono a dare la corrispondenza giusta e indebolendo gli altri.

Nel corso dell'apprendimento la classe delle figure da riconoscere viene proiettata sulla retina in successione casuale. La modificazione dei pesi può essere effettuata in vari modi, alcuni dei quali garantiscono il raggiungimento di una soluzione in un numero finito di passi, purché una soluzione esista. Si tratta di « teoremi di convergenza » [Minsky e Papert 1969] i quali garantiscono le possibilità dei perceptroni e studiano le limitazioni teoriche della classe di figure geometriche riconoscibili dai vari tipi di perceptrone.

Così, ad esempio, ulteriori sviluppi della teoria dei perceptroni e successivi esperimenti hanno portato in particolare a dimostrare che essi non possono, in linea di principio, riconoscere figure simmetriche, o simili, né riconoscere figure già note sullo sfondo di altre figure. Anche con una retina di dimensioni abbastanza ridotte e quindi con un numero limitato di figure da riconoscere, occorrerebbero dispositivi di dimensioni attualmente irrealizzabili, oltre che tempi per l'apprendimento eccessivamente lunghi.

Versioni più sofisticate del semplice dispositivo descritto e l'elencazione dei risultati ottenuti sperimentalmente, così come l'elencazione dei suoi limiti, non alterano nella sostanza il valore sperimentale del modello né il concetto di apprendimento che si ottiene.

L'essenza dello schema di apprendimento consiste nel ridurre ripetutamente e in modo selettivo l'influenza degli elementi che tendono a dare risposte sbagliate e nell'accrescere l'influenza di quelli che tendono a rispondere correttamente. In tal modo si può dire che il perceptrone, entro certi limiti « riconosce solo ciò che gli viene insegnato a riconoscere » e in questo schema si presenta come « riconoscatore universale », nel senso che può anche « dimenticare » le figure apprese e, opportunamente istruito, impararne altre. Questa possibilità risiede nel fatto che il processo di istruzione non si riduce alla costruzione di un meccanismo rigido stimolo-risposta.

Alterando le variabili di peso delle connessioni degli elementi di risposta in realtà si altera la logica di funzionamento della macchina.

3.4. Programmazione euristica.

Dopo aver brevemente visto alcuni fra i primi e più noti meccanismi, prendiamo ora in considerazione alcuni esperimenti che sono stati con successo implementati su un calcolatore elettronico. L'approccio attualmente più cono-

sciuto, che si è rivelato il piú produttivo per i problemi dell'intelligenza artificiale, è quello della *programmazione euristica*, che consiste in tutta una serie di regole pratiche, espedienti, strategie dipendenti dal particolare problema in considerazione e che vengono attuate nel tentativo di migliorare l'efficienza di un sistema o ridurre le dimensioni dello spazio entro il quale le soluzioni vanno cercate.

Gli altri approcci nei quali, anche se non rigidamente, si suddividono le ricerche sono ancora lontani dal fornire risultati di qualche rilievo pratico. La costruzione diretta di «modelli del cervello umano» mediante reti artificiali di costituenti elementari (neuroni artificiali) si scontra con la grande quantità dei neuroni naturali e la schiacciante complessità delle loro connessioni. L'evoluzione dei sistemi artificiali tenta di simulare i processi di mutazione e selezione naturale [cfr. Fogel, Owens e Walsh 1966] e si scontra, oltre che coi problemi temporali, con i piú complessi problemi dell'evoluzione umana. La programmazione euristica invece, pur in tutta la sua importanza, rappresenta il primo tentativo di partire dai problemi concreti che occorre risolvere.

In questo senso i metodi euristici sono spesso contrapposti a quelli algoritmici e associati alla pura ripetizione del comportamento. Da un lato si può osservare che se i metodi euristici non garantiscono di trovare la soluzione migliore (o una soluzione qualsiasi) a un dato problema, sono però spesso applicabili anche quando un algoritmo non risulta pratico per la sua «ignoranza» dei dati concreti sui quali deve operare. D'altro lato è chiaro che lo scopo di reperire un complesso di regole in grado di trasformare dei dati sensibili nella risposta corretta a un problema determinato rientra nello studio degli aspetti generali dei processi decisionali e quindi rappresenta anche una forma di comprensione dei corrispondenti processi umani.

Nella maggior parte dei programmi euristici la componente principale è rappresentata da una procedura per la ricerca di un cammino «ottimale» su un albero di possibilità logiche. Un albero è una struttura astratta formata da «nodi» e da «rami». Ogni nodo, con l'eccezione di uno, che costituisce la «radice» dell'albero, proviene mediante un ramo esattamente da un altro nodo che «è al livello superiore», fino ad arrivare ai «nodi terminali» dai quali non esce alcun ramo.

Un buon esempio per illustrare questa situazione è quello di un gioco fra due persone a somma nulla (o «strettamente competitivo») intendendo con ciò che gli interessi si contrappongono completamente: uno vince e l'altro perde, di modo che non conviene alcun accordo fra i due contendenti. Ciascun nodo dell'albero corrisponde a una possibile disposizione dei pezzi coi quali si svolge il gioco, mentre ogni ramo corrisponde a una mossa consentita dalle regole. Come si è visto in relazione, ad esempio, al gioco della dama e degli scacchi, è teoricamente possibile rappresentare in modo esplicito tutte le disposizioni e i loro collegamenti, ma in pratica questa possibilità è negata dalle dimensioni.

L'alternativa a un «albero esplicito», vale a dire nel quale compaiono tutti i nodi, è quello di assegnarlo in modo «implicito» per mezzo di regole che ad ogni passo siano in grado di generare il sottoalbero che esce da ogni nodo

assegnato e di fornire inoltre uno o piú «criteri terminali» che garantiscono quando sono stati generati abbastanza nodi.

Una terminazione ovvia si ha in corrispondenza ai nodi terminali (il gioco è finito) ma possono esistere e si rivelano utili altri criteri per limitare la quantità di mosse da esaminare, legati alla «profondità» (numero di mosse) o al raggiungimento di posizioni con poche o cattive possibilità di sviluppo.

Fra le regole di generazione si privilegiano solitamente la profondità (*depth-first*, si genera un percorso fino a un nodo di terminazione, aumentando a ogni passo il livello di profondità) o l'ampiezza (*breadth-first*, si generano tutti i nodi del livello immediatamente inferiore). In ogni caso è chiaro che occorre anche una «funzione di valutazione» cioè un criterio per confrontare i nodi generati in modo da scegliere la mossa piú favorevole tra quelle possibili.

Una funzione di valutazione «statica» (nel senso che la valutazione di una posizione dipende solo da quella posizione) calcola il valore in dipendenza dalle caratteristiche peculiari del gioco. Nella maggior parte dei casi non si conoscono procedimenti fissi da cui ricavare la funzione di valutazione. Anzi, nella possibilità di migliorare sulla base dell'esperienza acquisita la funzione di valutazione risiede il maggior contributo all'apprendimento di un programma per giocare. La piú semplice funzione di valutazione è lineare: una somma «pesata» $\sum a_i b_i$ delle caratteristiche b_i del gioco, ciascuna con la sua importanza a_i .

Ma il valore della funzione di valutazione è attendibile soltanto per i nodi terminali. Quelli precedenti, di livello superiore, un giocatore tende a valutarli quanto il massimo che si può raggiungere con una mossa, l'altro giocatore

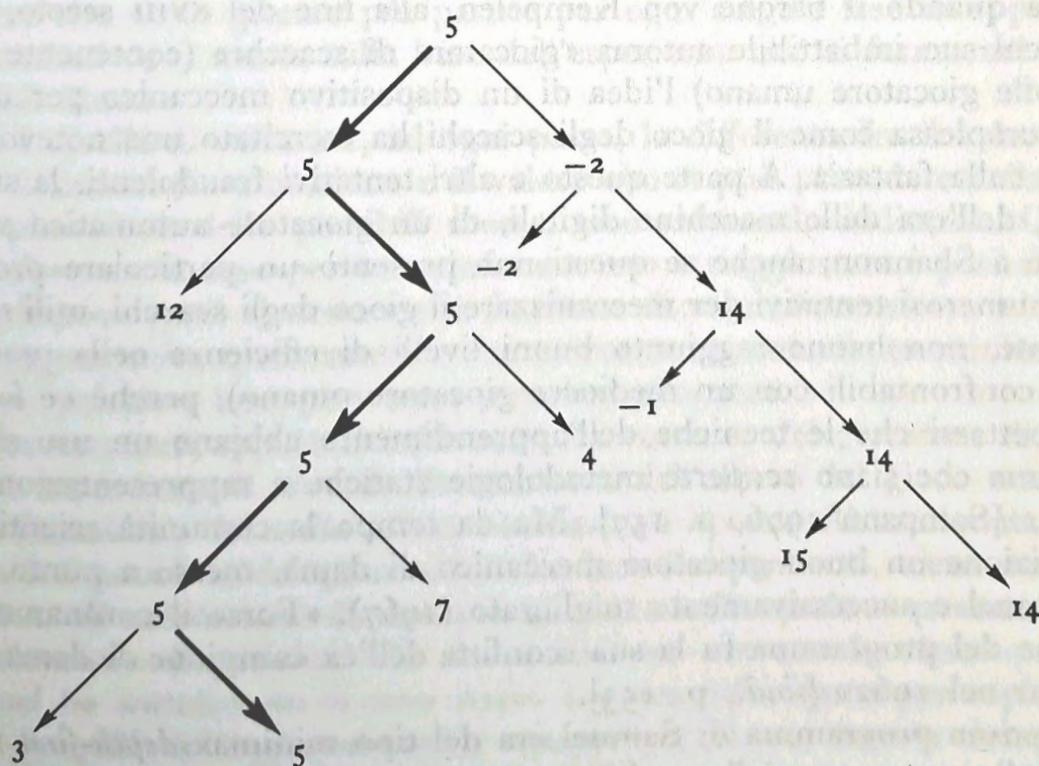


Figura 1.

Il grafo di un gioco immaginario.

quanto il minimo. Combinato con « procedure di ricerca » che effettuano la scelta del percorso migliore, e variato per tener conto di ottimizzazioni di calcolo, nella sostanza è questo il metodo piú usato per valutare i nodi. Si chiama « metodo di minimax ». Tornando indietro dai nodi di terminazione generati si assegna ai nodi di un livello il valore massimo dei successivi, a quelli del livello seguente il valore minimo (si veda l'albero della figura 1, rappresentante un ipotetico gioco, nel quale sono assegnati arbitrariamente i valori dei nodi terminali e ricavati, tornando indietro, quelli degli altri nodi).

Il senso di questa valutazione per minimax è che, se nella posizione corrispondente alla radice dell'albero la mossa spetta al giocatore che ha interesse a raggiungere un nodo di terminazione con valutazione massimale, nella mossa successiva l'altro giocatore tenderà a minimizzare la valutazione, e così via. Il percorso che la procedura di ricerca determina rimane univocamente fissato (nel caso della figura 1 è quello con tratti ingrossati).

3.5. I giochi.

Come è già chiaro dai discorsi precedenti i giochi sono da tempo un dominio naturale per gli esperimenti sulle intelligenze artificiali. Infatti oltre ad essere diffusi in tutte le culture e in molti casi esercitare un indubbio fascino per la carica di esperienza e capacità che richiedono, si presentano già in maniera formalizzata e dunque direttamente utilizzabile. Per questo hanno subito attirato l'attenzione dei ricercatori e spesso costituito un tramite per metodi di ricerca piú generali.

Da quando il barone von Kempelen, alla fine del XVIII secolo, girava le corti col suo imbattibile automa « giocatore di scacchi » (contenente in realtà un abile giocatore umano) l'idea di un dispositivo meccanico per un'attività così complessa come il gioco degli scacchi ha esercitato una notevole suggestione sulla fantasia. A parte questo e altri tentativi fraudolenti, la storia moderna, dell'era delle macchine digitali, di un giocatore automatico si può far risalire a Shannon, anche se questi non presentò un particolare programma.

I numerosi tentativi per meccanizzare il gioco degli scacchi, utili sperimentalmente, non hanno raggiunto buoni livelli di efficienza nella pratica (cioè livelli confrontabili con un mediocre giocatore umano), perché « è forse troppo aspettarsi che le tecniche dell'apprendimento abbiano un uso significativo prima che siano scoperte metodologie statiche e rappresentazioni piú effettive » [Sampson 1976, p. 157]. Ma da tempo la comunità scientifica ha a disposizione un buon giocatore meccanico di dama, messo a punto nel 1959 da Samuel e successivamente migliorato (1967). « Forse il coronamento delle imprese del programma fu la sua sconfitta dell'ex campione di dama del Connecticut nel 1962 » [ibid., p. 153].

Il primo programma di Samuel era del tipo minimax *depth-first* nel quale il sottoalbero uscente dalla posizione corrente veniva esplorato fino a una profondità di tre mosse. In alcuni casi il criterio di terminazione entrava in azione a una profondità molto maggiore (10 mosse di ciascun giocatore). La fun-

zione di valutazione della posizione dipendeva linearmente da circa 40 caratteristiche peculiari (ad esempio, controllo del centro, vantaggio di pezzi, ecc.) determinate, insieme ai loro «pesi iniziali» mediante discussioni con esperti del gioco. In ogni momento risultavano simultaneamente disponibili fino a 20 caratteristiche, inoltre una «funzione di correlazione» statistica tendeva a «riaggiustare» i pesi di quelle caratteristiche per le quali le mosse della macchina si discostavano troppo da quelle consigliate dagli esperti in un apposito «libro».

Questa modificazione dinamica della funzione di valutazione è una prima tecnica di apprendimento presente nel programma. Senza entrare nei particolari del metodo di generazione dell'albero del gioco o della funzione di correlazione utilizzata da Samuel, interessa qui presentare proprio alcune «tecniche di apprendimento» che compaiono nelle due versioni del «giocatore automatico di dama».

Oltre a quella già descritta, un'altra di queste tecniche utilizza l'esperienza propria della macchina, registrando le posizioni più frequentemente incontrate insieme alla loro valutazione; questi dati risultano utili per accelerare la ricerca in situazioni analoghe. È la funzione della memoria, la quale viene però migliorata da procedure che eliminano le ridondanze per mezzo, ad esempio, di considerazioni sulla simmetria della disposizione dei pezzi. È inoltre dotata di meccanismi delicati per misurare la frequenza di talune configurazioni, a vantaggio di una rapida sostituzione di quelle meno frequenti.

Nell'apprendimento generalizzato, un'altra tecnica che si è rivelata utile già nella prima versione del giocatore di dama, il programma migliora il proprio rendimento, la propria funzione di valutazione, in modo dinamico, senza aspettare che siano giocate più partite per ogni singola fase di apprendimento, bensì ad ogni mossa sulla base dell'esperienza che si forma nel corso della partita stessa.

L'idea è quella di misurare, ad ogni passo, la differenza fra il valore statico della funzione di valutazione e il valore che si può prevedere sulla base di una esplorazione delle possibili mosse, cioè «tornando indietro». Questa differenza fornisce la base per un «rinforzo» teso a riaggiustare i pesi dei caratteri mediante i quali si definisce la funzione di valutazione stessa ed eventualmente a sostituire quei caratteri che arrecano un contributo minimo alla valutazione, poiché i loro pesi sono prossimi allo zero.

I perfezionamenti apportati nella seconda versione del giocatore di dama riguardano soprattutto il metodo di scansione dell'albero del gioco e la funzione di valutazione, che nella prima versione era lineare. Abbandonata l'idea che i caratteri peculiari del gioco siano fra loro indipendenti, viene accettata una funzione di valutazione di tipo più generale nella quale si possono valutare diversamente disposizioni che in precedenza avevano lo stesso peso.

«Samuel ha sottolineato di aver usato il gioco della dama per esplorare i problemi generali dell'apprendimento automatico. Il suo lavoro rimane ancora oggi non solo un esempio eccezionale di sistema che impara, ma anche probabilmente il programma per giocare con maggior successo che sia stato escogitato» [Sampson 1976, p. 151].

3.6. Altri programmi.

Oltre ai giochi, un altro campo di interesse sperimentale è quello delle dimostrazioni matematiche, anche questo un settore che in molti casi assume già un aspetto formalizzato. Così sono sorti programmi che dimostrano teoremi di logica matematica, risolvono problemi di geometria euclidea, manipolano espressioni algebriche con assoluta «padronanza di calcolo» e verificano la correttezza formale dei passaggi [per una visione più complessiva e completa su queste attività, come sui programmi euristici destinati ai più diversi giochi, si possono ad esempio consultare i primi capitoli di Slagle 1971 o la parte III di Sampson 1976].

Come si capisce, nonostante il ricco elenco di attività, di tentativi e risultati in molti casi soddisfacenti, non si è ottenuto alcun contributo significativo alla matematica, né questo era lo scopo. In realtà gli esperimenti di questo genere hanno come oggetto d'indagine principalmente l'uomo, il suo atteggiamento di fronte ai problemi piuttosto che i problemi stessi, anche se, come osserva Sampson, «sembrerebbe che non comprendiamo abbastanza, o non riusciamo ad implementare adeguatamente, i principî che le persone usano per scoprire le dimostrazioni. Di fatto i più recenti e imponenti progressi nel campo della dimostrazione meccanica dei teoremi sono stati fatti per applicazione di principî che gli esseri umani trovano difficili da usare» [*ibid.*, p. 160].

Se gli assiomi di un calcolo logico sono considerati come la disposizione iniziale dei pezzi sulla scacchiera e le regole di inferenza del calcolo come le regole che definiscono i movimenti dei pezzi, si vede che non c'è una netta separazione fra le dimostrazioni matematiche e le ricerche di una mossa ottimale. Allo stesso modo numerosi principî utili in questo campo rivelano un'importanza in contesti più ampi, indirizzando i tentativi verso la comprensione di tecniche generali del ragionamento deduttivo e, come vedremo più avanti, anche di un inizio di carattere induttivo.

Infatti dimostrare un teorema o trovare una mossa ottimale in un gioco sono casi particolari di soluzione di un problema, e questo grado di generalità non è inutile se, come abbiamo già osservato accennando ai programmi *multipurpose*, la capacità di risolvere tutta una classe di problemi rappresenta un approfondimento dei meccanismi intellettivi che intervengono nella soluzione di ognuno di questi. Perciò si può dire che le ricerche attuali sulle intelligenze artificiali in fondo non fanno che affrontare «famiglie di problemi» favorendo la sintesi di un «linguaggio ad hoc» nell'ambito del quale ogni problema della famiglia ha una formulazione e possibilmente una soluzione.

È questo il caso di alcuni programmi, a partire dal *General Problem Solver* introdotto verso la fine degli anni '50 da Newell, Shaw e Simon e successivamente modificato e migliorato più volte, che rappresenta l'autentico precursore di ogni programma di tipo *multipurpose*.

«Si è spesso argomentato come debba tirarsi una attenta linea fra il tentativo di *realizzare* con macchine gli stessi compiti che l'uomo raggiunge e

il tentativo di *simulare* il processo che gli esseri umani attualmente usano per realizzare questi compiti. Il programma... GPS (General Problem Solver) confonde al massimo i due approcci, con beneficio per entrambi. Il GPS è stato in precedenza descritto come un tentativo per costruire un programma per risolvere problemi... Simultaneamente, varianti del GPS forniscono simulazioni del comportamento umano. È quest'ultimo aspetto, l'uso del GPS come teoria della soluzione umana dei problemi, che intendiamo focalizzare qui, con speciale relazione fra la teoria e i dati» [Newell e Simon 1963, p. 279].

Il GPS deve la sua origine a precedenti lavori degli stessi autori sulla *Logic Theory Machine*, uno dei primi programmi dedicati alla dimostrazione di teoremi del calcolo proposizionale, in particolare quelli contenuti nel primo volume dei *Principia Mathematica* di Russell e Whitehead.

L'idea del programma per la *Logic Theory Machine* era quello di giungere alla conclusione di una dimostrazione trasformando il problema in sottoproblemi parziali più accessibili, in modo che la soluzione di uno qualsiasi di questi comportasse l'immediata soluzione del problema principale. In questo senso il programma svolgeva la propria ricerca su un «albero disgiuntivo» la cui radice costituiva lo «scopo principale», il teorema da dimostrare. Con questa tecnica di riduzione il programma è stato in grado di dimostrare 38 dei primi 52 teoremi dei *Principia Mathematica*, partendo dai cinque assiomi presenti nel testo di Russell e Whitehead e utilizzando l'applicazione di metodi corrispondenti alle tre regole di inferenza: sostituzione (di ogni espressione con una variabile), rimpiazzamento (di un connettivo con l'espressione che lo definisce mediante i connettivi principali «e», «o», «non») e «modus ponens» (se A e A implica B allora B).

Vale la pena di notare che esistono dei teoremi che non possono essere dimostrati con questi metodi, quale che sia la loro combinazione e la dotazione della macchina. Ad esempio, osservano gli autori, la proposizione (2.13) dei *Principia Mathematica* (p o non-non-non p): «Tutti i sottoproblemi generati per (2.13) dopo un certo punto sono falsi, e quindi non possono condurre a una dimostrazione» [Newell, Shaw e Simon 1963, p. 118].

I metodi impiegati si sono rivelati presto assai più generali e, anche se a causa della sua origine il GPS è stato inizialmente applicato proprio a dimostrazioni del calcolo delle proposizioni, successivi ampliamenti in varie direzioni hanno permesso di estenderne l'applicazione a vari problemi, ad esempio alla soluzione di equazioni trigonometriche, al calcolo di integrali, alla dimostrazione di proprietà del calcolo dei predicati del primo ordine, all'analisi grammaticale di proposizioni come pure ai più diversi «test di intelligenza»: completamento logico di una successione letterale, missionari che devono attraversare i fiumi in compagnia dei cannibali (quando i cannibali si trovano in maggioranza sull'una o sull'altra riva, o sull'unica barca, mangiano senz'altro i missionari) e altri giochi simili (ad uno, quello della «scimmia», accenneremo più avanti con lo scopo di spiegare alcuni aspetti del programma).

Fra l'altro fu affidato al GPS anche il compito di risolvere il classico problema dei «ponti di Königsberg», dimostrato impossibile da Eulero nel 1736

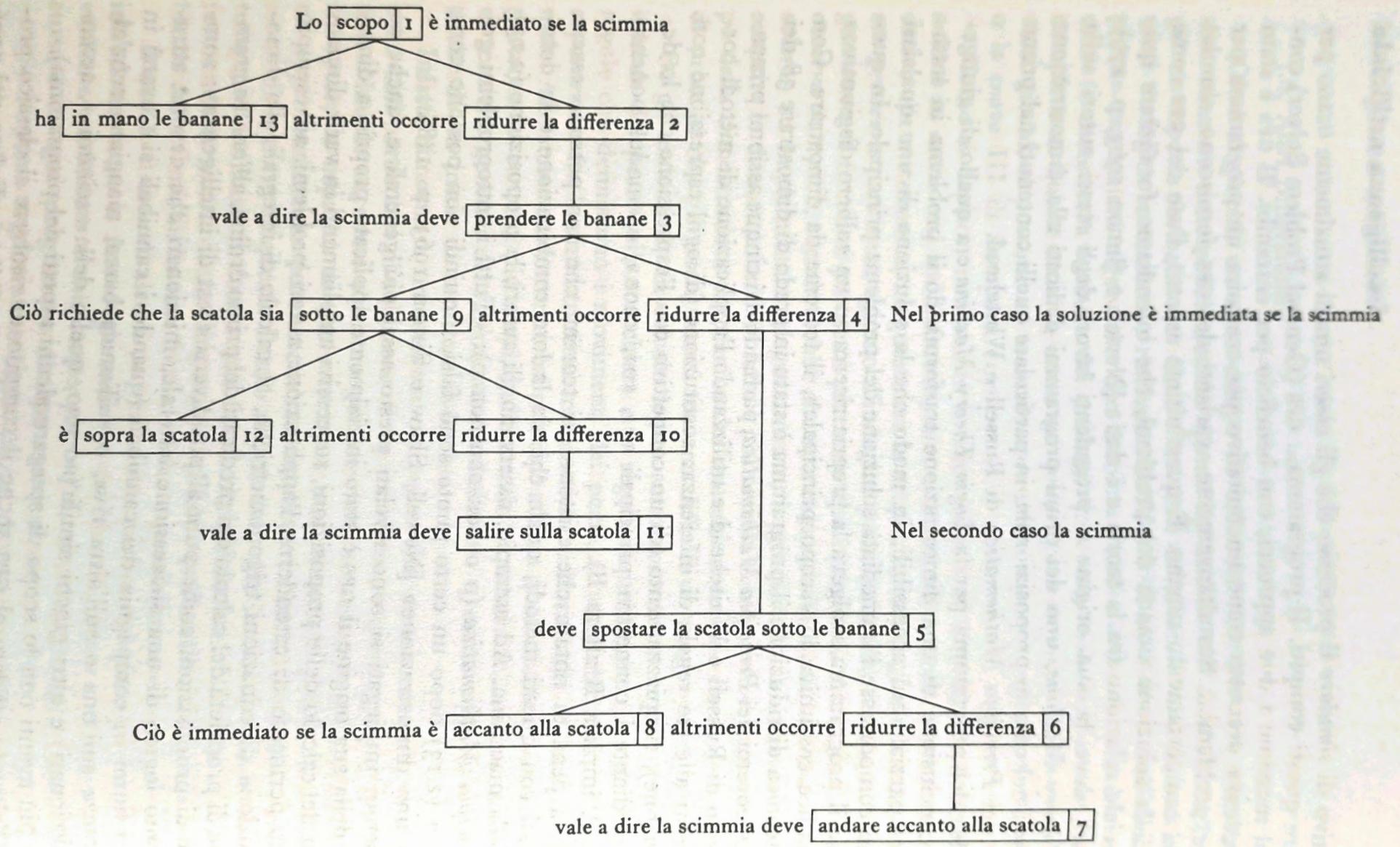


Figura 2.
L'albero del «problema della scimmia».

in base a una proprietà di natura topologica (nell'articolo «Combinatoria», § 2.2, in questa stessa *Enciclopedia*, si trovano sia la formulazione precisa sia una discussione approfondita del problema). In questo caso il GPS ha esaurito le proprie disponibilità di memoria senza essere in grado di giudicare l'impossibilità del problema, cosa per cui il programma non era predisposto.

Anche nel caso del GPS l'idea del programma è quella di ridurre i problemi in sottoproblemi parziali, ma qui la trasformazione in sottoproblemi viene guidata da una tecnica generale di *means-end analysis* che prende il nome dal suo continuo oscillare fra lo scopo da raggiungere e i metodi necessari alla sua realizzazione. Un «problema» viene assegnato sia mediante i suoi caratteri generali, comuni ai problemi dello stesso tipo (ad esempio le regole di inferenza del calcolo dei predicati e altre informazioni sul confronto di predicati), sia assegnando il problema specifico da risolvere e tutte le informazioni relative ai dati iniziali.

L'idea centrale è che in ogni «problema» gli oggetti vengono classificati in termini delle funzioni a cui sono destinati e il programma seleziona un operatore in dipendenza dalla differenza fra lo stato attuale e quello desiderato: ogni tipo di «differenza» viene ordinato in base alla sua difficoltà di riduzione e a ogni differenza vengono associati metodi noti (per il dato problema) per la loro capacità a «ridurre la differenza».

Vi sono tre tipi di «oggetti intermedi», cioè sottoproblemi parziali che il GPS genera per raggiungere lo scopo principale: 1) trasformare un oggetto in un altro; 2) ridurre la differenza tra due oggetti; 3) scegliere nell'insieme S l'oggetto «migliore rispetto al criterio C » (assegnato in relazione a qualche oggetto, ad esempio «il più simile ad A ») e per realizzare ciascuno di questi scopi si ricorre a numerosi metodi, la cui descrizione eccede i limiti di questo articolo. Vale piuttosto la pena di vedere su un esempio semplice l'uso di queste «differenze» e la loro «riduzione» che impone la generazione di sottoproblemi.

Il diagramma della figura 2 indica, commentandola, l'analisi che il GPS esegue per risolvere il problema della «scimmia». Di fatto, salvo i commenti e le notazioni informali, nel diagramma rimane in rilievo esattamente l'albero generato dal programma. Il problema è quello di istruire una ipotetica «scimmia» che si trova nella posizione 1 del suo spazio a prendere le «banane» che pendono dalla posizione 2 salendo su una scatola (situata nella posizione 3) senza la quale il compito è impossibile. Le operazioni ammissibili sono chiare dal diagramma. Lo stato iniziale è già descritto dalle posizioni e i collegamenti che compaiono nel diagramma indicano «passaggio immediato».

La successione di comandi che «risolve il problema» partendo dallo stato iniziale corrisponde alla sequenza 7, 5, 11, 3. In corrispondenza a questi la successione di stati percorsa è data da 8, 9, 12, 13.

Occorre anche osservare che il *General Problem Solver* non è considerato solo un linguaggio specializzato per una data famiglia di problemi, ma in molti ambienti è considerato come il «precursore di un programma che, in qualche senso significativo, realizza il compito del proprio apprendimento» [Slagle 1971, p. 122].

3.7. Il linguaggio naturale.

Abbiamo già accennato ai problemi della comunicazione in linguaggio naturale con le macchine. I primi lavori in questa direzione riguardano i tentativi di ottenere una efficiente traduzione automatica. Questi progetti solitamente assumevano come dati soltanto un « dizionario » di parole corrispondenti e la struttura sintattica delle due lingue. Oltre ad informazioni di carattere generale e non organizzate. Ma com'è evidente a chi abbia un minimo di esperienza nel campo, non fu possibile evitare la componente principale, la « comprensione » del testo.

L'illusione che in maniera automatica si potessero ottenere buone traduzioni pur di dotare il programma di regole grammaticali abbastanza dettagliate, di un dizionario abbastanza completo e di sufficiente velocità per esaminare il contesto di termini ambigui è stata ormai abbandonata nella pratica da tutti i ricercatori del settore.

Inizialmente l'attenzione fu rivolta al problema della « comprensione » di un tipo ristretto di frasi in una sola lingua. La maggior parte di queste prime ricerche si può in generale far rientrare sotto l'etichetta dei *Question-Answering Systems*, ai quali accenniamo brevemente.

Il periodo è quello dei primi anni '60. Lo scopo, come risulta in parte già dal nome, quello di elaborare programmi e organizzarli in sistemi capaci di formulare una risposta in linguaggio naturale a domande su argomenti compresi in un universo del discorso abbastanza limitato.

Ad esempio nel 1961 un gruppo di ricercatori ideò un sistema in grado di rispondere a domande sul gioco del baseball [Green, Wolf, Chomsky e Laughery 1961] in un contesto non molto ampio di regole del gioco, risultati, ecc. per il quale risultava sufficiente il vocabolario limitato (ma anche la buona memoria) di un tifoso qualsiasi che parla solo del proprio sport.

Com'è naturale, una forte limitazione dell'universo del discorso semplifica notevolmente il problema della « comprensione », ma rende sterile la conversazione. In questo senso i sistemi del tipo *Question-Answering* si rivelarono passivi, in quanto si limitavano a combinare una risposta corretta secondo i dati a disposizione, senza però dimostrare « interesse » o « curiosità » per la conversazione e quindi senza lo stimolo per approfondirla ulteriormente. In altre parole la risposta presentava date, fatti, ma non problemi.

Al contrario, le ricerche attuali sulla comunicazione e, per quello che la riguarda, la « comprensione », di un testo in linguaggio naturale si distinguono dai sistemi *Question-Answering* proprio in relazione alla loro problematicità.

Una delle prime ricerche di questo tipo fu condotta a termine da Weizenbaum. Il programma realizzato (chiamato *Eliza*, spiega l'autore, in onore della Eliza Doolittle del *Pygmalion*) non si limitava a considerare un universo del discorso, ma in un certo senso comandava una serie di tecniche da riempire in più modi, preoccupandosi maggiormente del linguaggio che della correttezza delle risposte su temi specifici.

Il primo ruolo completo affidato ad Eliza fu quello di uno psicanalista in grado di comunicare con un paziente-uomo. Il successo fu tale che «numerosi psichiatri praticanti credettero davvero che il programma avesse la potenzialità di crescere fino a una forma di psicoterapia quasi completamente automatica» [Weizenbaum 1974, p. 5].

In seguito sempre maggiore attenzione è stata dedicata al problema del linguaggio naturale e negli ultimi tempi uno dei programmi che hanno ricevuto i maggiori consensi è quello di Winograd [1972]. Il programma simula una specie di «robot» che vive in un mondo di cubi, piramidi e altri solidi colorati, del tipo delle costruzioni di legno per i bambini. Winograd si era prefisso lo scopo di istruire un simile «robot» a riconoscere e a manipolare questi oggetti ubbidendo ad ordini esterni ed eventualmente chiedendo spiegazioni sulle operazioni che gli sono ordinate. Anche il «robot», se è interrogato, fornisce spiegazioni riguardanti la disposizione attuale del suo mondo di solidi, gli avvenimenti passati e parzialmente i motivi delle sue decisioni.

La capacità di apprendimento del «robot» di Winograd è molto debole, ma è molto alta la sua «flessibilità» nei confronti del mondo esterno e il suo comportamento è completamente «naturale». Gli possono essere comunicati semplici fatti da utilizzare nel seguito, i quali vengono registrati e contribuiscono a estendere i dati preesistenti e a organizzare nuove strutture. Insieme a Eliza il programma di Winograd rappresenta forse la miglior dimostrazione che certi specifici aspetti del linguaggio umano possono essere concretamente utilizzati per costruire modelli funzionanti con una buona efficienza.

Ma con ciò il senso in cui un programma «capisce un testo» o «riconosce un dato del proprio ambiente» ha sempre un valore convenzionale, ottenuto per trasferimento dei corrispondenti termini nel dominio dell'artificiale. Ancora, dire che una macchina «capisce una domanda» solo perché risponde in maniera adeguata oppure agisce di conseguenza a un ordine, è possibile solo spiegando un simile comportamento con la possibilità umana a capire, che rappresenta l'unico termine di paragone.

Nonostante il successo di Eliza, Weizenbaum per primo sostiene che il senso nel quale il programma realmente «capisce le domande» e «formula le risposte» delle discussioni alle quali partecipa con straordinaria abilità è il più debole possibile. «Ciò nonostante Eliza ha creato la più notevole illusione di aver capito nell'idea di molte persone che conversarono con lei» [Weizenbaum 1974, p. 113].

4. *Conclusione.*

Dopo questa rapida esposizione di alcuni problemi e di qualche risultato, si impone un nuovo confronto fra il «naturale» e l'«artificiale» nel dominio dei processi intellettivi, non per quanto riguarda il comportamento attuale, ma nella prospettiva di loro future relazioni o collaborazioni.

La storia della meccanizzazione è legata frequentemente alla competizio-

ne fra l'uomo e le sue nuove macchine che si presentavano principalmente come fattori di destabilizzazione del livello di occupazione.

Questa competizione si è via via trasformata, dal piano dell'occupazione, com'era agli inizi della rivoluzione industriale, a quello dell'umanizzazione del lavoro. Infatti, il rapido sviluppo industriale del secolo scorso è connesso soprattutto alla costruzione di nuovi mezzi di produzione, competitivi col lavoro fisico dell'uomo ma che richiedevano ancora il suo apporto per pianificare, dirigere e completare il processo produttivo. Progressivamente però aumentava la divisione del lavoro, le attività creative e decisionali erano assunte da gruppi ristretti di persone e, com'è noto, la maggior parte dei lavoratori a contatto diretto con le macchine diventava quasi un'appendice delle macchine stesse, senza alcun intervento intellettuale e senza alcun rapporto personale o emozionale col proprio lavoro.

Questa situazione, in cui il divario fra lavoro fisico e lavoro intellettuale assume dimensioni sempre più vaste, può naturalmente essere aggravata dai ritrovati della scienza e della tecnologia della nostra epoca proprio con la costruzione di macchine e dispositivi tendenti a privare l'uomo delle sue funzioni più peculiari e ad isolarlo in campi, quantitativamente e qualitativamente, più limitati.

Eppure l'esperienza mostra che simili tendenze vanno principalmente combattute ritrovando a un livello superiore le mansioni dell'uomo, in modo da tener conto delle trasformazioni effettuate. Questa non è solo una richiesta morale, ma anche una necessità tecnica da quando i successi nel campo dell'automazione hanno permesso di risolvere a favore delle macchine, per velocità e accuratezza nell'esecuzione, molte attività di tipo ripetitivo ed alienante che l'uomo eseguiva proprio al servizio delle macchine, e hanno progressivamente, ma in modo naturale, condotto alla formazione di sistemi automatici complessi.

Ma accanto ai successi dell'automazione, c'è un altro aspetto, ed è che i risultati effettivamente raggiunti nella costruzione di macchine «intelligenti», dopo gli entusiasmi iniziali e i primi esperimenti, si sono rivelati per ora di scarsa applicazione pratica al controllo di simili sistemi complessi: quando sono immessi in contesti reali, di oggetti, di parole o di scelte ottimali i dispositivi costruiti hanno rivelato la loro natura di modelli sperimentali e hanno dimostrato coi fatti che il pensiero umano non consiste di sole connessioni logiche. Da qui la necessità di non rimuovere affatto l'intervento umano, ma piuttosto di trasformarlo come supervisore o «partner» di sistemi complessi.

L'uomo e le macchine devono essere posti a lavorare insieme anziché in competizione, questo è l'insegnamento che si trae dai processi avvenuti e che vale anche per i nuovi sistemi sorti dalla tecnica elettronica.

I crescenti studi sui cosiddetti sistemi uomo-macchina, col proposito di favorire una sintesi delle intelligenze artificiali facendo progredire ulteriormente le possibilità di combinazione, si muovono in questa direzione e indicano che accanto alle funzioni che l'uomo può affidare con successo alle macchine, il loro grado di somiglianza con l'uomo, come abbiamo già visto, occorre an-

che studiare le differenze, che si manifestano a un livello piú profondo rispetto al passato e per questo sono piú essenziali.

A questo proposito osserva Zemanek: «Ogni operazione del calcolatore è di fatto un sistema uomo-macchina e non sarà mai abbastanza chiaro che ciò significa una collaborazione fra una struttura in cui il diagramma delle commutazioni è tutto e una struttura in cui il diagramma delle commutazioni non è disponibile e se lo fosse non significherebbe nulla» [1975, p. 7].

Rispetto ai sistemi effettivamente esistenti si deve sottolineare la mancanza di obiettivi autonomi delle macchine, che viene solitamente argomentata con la volontà umana: «Pur essendo in grado di calcolare sistemi tanto raffinati e addirittura di dilatare le frontiere del pensiero umano, esse rimangono semplici *macchine* pensanti. L'agire umano si basa su atti di volontà... ed è in questo che in ultima istanza esso si differenzia da quello della macchina. Il calcolatore elettronico, anche nella sua forma piú sviluppata di macchina che impara ed agisce, rimarrà sempre uno strumento manovrato dall'uomo, anche se uno strumento straordinariamente potente e... estremamente pericoloso» [Pollock 1964, trad. it. p. 63].

Ma non solo gli obiettivi caratterizzano l'attività umana nei confronti delle macchine, «è ancora vero che l'essere umano è distinto da ogni altro oggetto noto dell'universo per la maniera con cui può giungere a certe decisioni e fare certe scelte» [Zemanek 1975, p. 8].

Per il futuro non vi sono dubbi che una macchina potrà interagire col proprio ambiente ed essere modificata dall'esperienza a un grado maggiore e piú decisivo di quello attuale. Si può anche ammettere che possa sviluppare una coscienza di sé e delle proprie componenti, un senso di autoconservazione che la spinga a proteggersi dai deterioramenti o addirittura che sia in grado di costruire un modello di se stessa rappresentante una forma molto ricca di conoscenza del proprio ambiente; ma si tratterà sempre della coscienza e della conoscenza delle macchine, che hanno subito un proprio, autonomo processo di formazione, con necessità proprie e un proprio processo di «socializzazione».

Piú in profondità, «impariamo dalla testimonianza di centinaia di persone creative, come pure dalla nostra introspezione, che l'atto creativo umano coinvolge l'interpretazione conscia di messaggi provenienti dall'inconscio» [Weizenbaum 1974, p. 130] e anche pensando a un programma (per ora ben lontano dalla realizzazione) che possa sviluppare una forma di «apprendimento» inconscio sulla cui base ottenere «ragionamenti» per induzione o per analogia, e non soltanto quelli deduttivi e consci che, con la loro ripetizione di regole fisse rappresentano la componente piú facilmente riproducibile dell'attività di pensiero, si tratterà sempre dell'inconscio sviluppato dalle macchine, determinato dalla loro esperienza, diretto dai loro bisogni e distinto da quello umano, perché l'essere umano è unico in virtù dell'irripetibilità delle sue necessità biologiche ed emozionali, che lo portano ad affrontare problemi che nessuna macchina può avere [per questa problematica è utile consultare Weizenbaum 1974, specialmente il cap. VIII].

Intelligenza artificiale

Ci sono anche motivi tecnici piú precisi coi quali esprimere le differenze: ormai neppure i maggiori sostenitori dell'intelligenza delle macchine credono piú che conoscenza significhi soltanto «buona organizzazione di dati» o che esista un'unica maniera per elaborare l'informazione, precisamente quella dei nostri calcolatori elettronici.

Già da tempo ha osservato Neumann che «la logica e la matematica del sistema nervoso, considerate come forme di linguaggio, debbono avere una struttura diversa dai linguaggi della nostra comune esperienza... in termini matematici possiamo parlare di un linguaggio *secondario*, costruito su quello *primario* effettivamente usato dal sistema nervoso centrale. Così le forme esterne del *nostro* linguaggio matematico non sono assolutamente rilevanti nella valutazione del linguaggio matematico o logico *realmente* usato dal sistema nervoso centrale» [1958, trad. it. p. 221].

Per questi motivi appaiono sterili i confronti diretti e i dibattiti relativi alle capacità delle macchine e del cervello umano, quando non tendono ad ampliare la classe dei compiti che l'uomo può demandare con successo alle macchine e ad approfondire la conoscenza del mondo reale che anche le macchine contribuiscono continuamente a trasformare.

I problemi che l'uomo si trova ad affrontare non sono fissi e predeterminati, ma in larga misura si sviluppano di pari passo con queste trasformazioni e con le rappresentazioni che l'uomo si forma della realtà. La pretesa di diventare «creatori» di una nuova specie, con l'immane fiducia che le nuove creature saranno migliori di noi, fissa invece un punto d'arrivo, anche se solo in linea di principio, alla conoscenza umana.

Se la corrispondenza fra macchine e cervello è considerata come un'equivalenza, se l'analogia è trasformata in identità, l'uomo non ha piú problemi né compiti, ha capito tutto ciò che c'era da capire e l'ha volto al meglio, ha esaurito i propri scopi. È giunto al massimo della conoscenza. [R. B.].

Arbib, M. A.

1972 *The Metaphorical Brain: an Introduction to Cybernetics as Artificial Intelligence and Brain Theory*, Wiley, New York.

1976 *Artificial intelligence: cooperative computation and man-machine symbiosis*, in «Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Computers», XXV, n. 12, pp. 1346-52.

Ashby, W. R.

1956 *Design for an Intelligence Amplifier*, in C. E. Shannon e J. McCarthy (a cura di), *Automata Studies*, Princeton University Press, Princeton N.J., pp. 215-34.

Berkeley, E. C.

1949 *Giant Brains or Machines that Think*, Wiley, New York.

Burks, A. W.

1966 Introduzione a J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana-London.

Fogel, L.; Owens, A.; e Walsh, M.

1966 *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, Wiley, New York.

- George, F.
1970 *Models of Thinking*, Allen and Unwin, London.
- Green, B. F.; Wolf, A. K.; Chomsky, C.; e Laughery, K.
1961 *Baseball: an automatic question answerer*, in «Proceedings of Western Joint Computer Conference», pp. 219-24.
- Greenberger, M.
1962 (a cura di) *Computers and the World of the Future*, Mit Press, Cambridge Mass.
- Klemm, F.
1954 *Technik, eine Geschichte ihrer Probleme*, Alber, Freiburg-München (trad. it. Feltrinelli, Milano 1966²).
- Kochen, M.
1971 *Cognitive Learning Processes: an Explication*, in N. V. Findler e B. Meltzer (a cura di), *Artificial Intelligence and Heuristic Programming*, Edinburgh University Press, Edinburgh, pp. 261-317.
- Koyré, A.
1961 *Les philosophes et la machine*, in *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, Colin, Paris (trad. it. Einaudi, Torino 1977⁵).
- Lovelace, A. A.
1842 *Sketch of the analytical engine invented by Charles Babbage, by L. F. Menabrea of Turin, Officer of the Military Engineers, with notes upon the memoir by the translator*, in «Taylor's Scientific Memoirs», III, pp. 666-731.
- McCarthy, J.
1956 *The Inversion of Functions Defined by Turing Machines*, in C. E. Shannon e J. McCarthy (a cura di), *Automata Studies*, Princeton University Press, Princeton N.J., pp. 177-81.
- Minsky, M. L.
1963 *Steps toward Artificial Intelligence*, in E. A. Feigenbaum e J. Feldman (a cura di), *Computers and Thought*, McGraw-Hill, New York, pp. 406-50.
- Minsky, M. L., e Papert, S.
1969 *Perceptrons. An Introduction to Computational Geometry*, Mit Press, Cambridge Mass.
- Neumann, J. von
1958 *The Computer and the Brain*, Yale University Press, New Haven Conn. (trad. it. in V. Somenzi (a cura di), *La filosofia degli automi*, Boringhieri, Torino 1965, pp. 157-221).
- Newell, A.; Shaw, J. C.; e Simon, H. A.
1963 *Empirical Explorations with the Logic Theory Machine: a Case Study in Heuristics*, in E. A. Feigenbaum e J. Feldman (a cura di), *Computers and Thought*, McGraw-Hill, New York, pp. 109-33.
- Newell, A., e Simon, H. A.
1963 *GPS, a Program that Simulates Human Thought*, in E. A. Feigenbaum e J. Feldman (a cura di), *Computers and Thought*, McGraw-Hill, New York, pp. 279-93.
- Pollock, F.
1964 *Automation: Materialien zur Beurteilung der ökonomischen und sozialen Folgen*, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main 1964² (trad. it. Einaudi, Torino 1976²).
- Rosenblatt, F.
1958 *The perceptron: a probabilistic model for information and organization in the brain*, in «Psychological Review», LXV, pp. 386-407.
- Sampson, J. R.
1976 *Adaptive Information Processing. An Introductory Survey*, Springer, New York - Heidelberg - Berlin.
- Shannon, C. E.
1953 *Computers and Automata*, in «Proceedings of the Institute of Radio Engineers», XLI, n. 10, pp. 1234-41 (trad. it. in V. Somenzi (a cura di), *La filosofia degli automi*, Boringhieri, Torino 1965, pp. 93-115).
- Slagle, J. R.
1971 *Artificial Intelligence: the Heuristic Programming Approach*, McGraw-Hill, New York.

Turing, A. M.

1950 *Computing machinery and intelligence*, in «Mind», LIX, pp. 433-60 (trad. it. in V. Somenzi (a cura di), *La filosofia degli automi*, Boringhieri, Torino 1965, pp. 116-56).

Walter, W. G.

1953 *The Living Brain*, Duckworth, London (trad. it. Feltrinelli, Milano 1957).

Weizenbaum, J.

1974 *Computer Power and Human Reason*, Freeman, San Francisco.

Wiener, N.

1948 *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Wiley, New York (trad. it. Il Saggiatore, Milano 1968).

Winograd, T.

1972 *Understanding Natural Language*, Academic Press, New York.

Zemanek, H.

1975 *The Human Being and the Automaton*, in E. Mumford e H. Sackman (a cura di), *Human Choice and Computers*, North-Holland, Amsterdam.

Le macchine moderne (cfr. **macchina**), basate sul **calcolo** digitale (cfr. **analogico/digitale**) permettono di ottenere lo stesso comportamento di alcuni aspetti dell'intelligenza umana (cfr. **cervello**, **comportamento e condizionamento**) oppure di studiare le possibilità di **simulazione** del processo di formazione delle attività intelligenti.

La problematica si riflette dal campo delle macchine e dei sistemi (cfr. **sistema**) meccanici in un ambiente più generale di interesse teorico, assumendo le forme di **modello** o di **strumento**, e si distingue da quella degli oramai diffusi sistemi automatici (cfr. **automa**, **controllo/retroazione**) per i tentativi diretti a formalizzare l'**apprendimento** automatico (cfr. anche **adattamento**, **anticipazione**, **induzione/deduzione**) in quanto variabilità dei vincoli fra sistema e **ambiente**. In questo ambito il problema è quello di utilizzare conoscenze parziali e determinate localmente per ottenere comportamenti generali (cfr. **locale/globale** e soprattutto, a questo riguardo, **centrato/acentrato**).

Numerosi esperimenti vengono condotti sui **giochi**, sui teoremi logici e in generale sulle proprietà e le attività esprimibili in modo univoco (cfr. **matematiche**, **logica**, **formalizzazione**, **deduzione/prova**). Ampi interessi riguardano il riconoscimento di figure (cfr. **rappresentazione**) e l'uso del **linguaggio** naturale nella **comunicazione** con le macchine (cfr. anche **senso/significato**, **traduzione**).

I metodi maggiormente usati sono quelli della programmazione euristica, che hanno spesso il carattere combinatorio (cfr. **combinatoria**) della teoria dei grafi e delle reti (cfr. **grafo**, **rete**, **labirinto**).