

Appunti di intelligenza artificiale

Guida ad una antica questione e ad una nuova disciplina.

Quando considero il mio spirito, cioè me stesso in quanto sono solamente una cosa che pensa, io non posso distinguere parti, ma mi concepisco come una cosa sola e intera. E le facoltà di volere, di sentire, di concepire, ecc. non possono propriamente essere dette sue parti: perché lo stesso spirito s'impiega tutto intero a volere, ed egualmente tutto intero a sentire, concepire ecc. (Cartesio, Meditazioni metafisiche, VI)

La prospettiva cognitivista dell'intelligenza è indubbiamente ricca di suggestioni e di implicazioni interdisciplinari, ma sembra in difficoltà proprio di fronte alle attività mentali di basso livello, come l'interpretazione delle immagini, il controllo del movimento o la percezione sensoriale. Man mano che la ricerca procede e la conoscenza si approfondisce, gli obiettivi prefissati paiono allontanarsi sempre più. «La scienza della visione — sostiene per esempio Thomas Binford, uno dei massimi esponenti mondiali nella progettazione di sistemi visivi per computer — è più profonda e più difficile di quanto ci si immaginasse. Quello che ebbe inizio come un progetto estivo per un gruppetto di diplomati impegnati a preparare il dottorato di ricerca è diventato una scienza a sé, richiedendo l'attenzione a tempo pieno di squadre di ricercatori nelle migliori università di tutto il mondo. Quanto più studiamo la visione, tanto più scopriamo che, quando vediamo, facciamo più di quanto ci rendiamo conto di fare» (La Robotica, a cura di M.Minsky, Longanesi 1987 pagg.102 e 105).

Cibernetica: omeostati e perceptroni

Per contro, il terreno della percezione sensoriale parrebbe alla portata di un diverso approccio che ultimamente sta tornando alla ribalta: il connessionismo. Fin dalle prime riflessioni sul parallelo tra macchina elettronica e cervello biologico era emersa una insospettata similitudine tra il comportamento dell'unità elementare del cervel-

Il connessionismo

lo, il neurone, e certe caratteristiche dei circuiti e degli elementi elettronici del computer. Due articoli apparsi indipendentemente nel 1943 (rispettivamente ad opera di McCulloch e Pitts, e di Rosenblueth, Wiener e Bigelow) si proponevano di utilizzare il carattere «tutto o niente» dell'attività nervosa per trattare gli eventi neurali mediante la logica proposizionale e simularli attraverso la logica binaria dei dispositivi elettronici. Ne derivò una nuova prospettiva scientifica, che Wiener battezzò «cibernetica», nella speranza di affrontare in modo unitario il tema dell'autoregolazione e del controllo adattativo nelle macchine e negli organismi biologici. Per quanto in effetti il concetto di retroazione abbia trovato larga applicazione sia in campo tecnologico che in fisiologia, in neurologia e persino in psicologia, il grande entusiasmo per le analogie non ha potuto evitare che ben presto le difficoltà prendessero il sopravvento. Per un verso, la riproduzione artificiale di complesse funzioni di controllo era troppo grossolana per risultare una vera e propria simulazione. Certo, era sorprendente verificare come meccanismi in sé banali come l'omeostato di Ashby potessero generare comportamenti e reazioni molto sofisticate, fino a cercare nuovi livelli di equilibrio a fronte di situazioni impreviste; eppure, in senso più profondo, il sistema rimaneva del tutto statico, non riusciva ad adattare i propri schemi di risposta a fronte di radicali modifiche ambientali, né a simulare qualche forma di apprendimento logico o di soluzione di problemi. Il concetto stesso di «omeostasi» come stato ottimale del sistema, come punto di equilibrio da mantenere a dispetto delle perturbazio-

ni esterne, segna una separatezza non colmabile tra il sistema stesso, totalmente passivo e rinchiuso nelle proprie immutabili finalità interne, e l'ambiente in continua evoluzione. D'altro canto, la tecnologia dell'epoca non permetteva una piena sperimentazione di quei complessi a maggiore plasticità strutturale che pure si potevano prefigurare. Per esempio, l'idea di una rete neurale artificiale dotata di sufficiente adattabilità, sulla base delle nuove teorie sulle sinapsi cerebrali, non trovava un supporto realizzativo sufficientemente pratico. Il «perceptrone» costruito da Frank Rosenblatt alla fine degli anni '50 era composto da migliaia di elementi non solo elettronici, ma a base anche di reazioni chimiche e fisico-chimiche. Alcune parti andavano continuamente rinnovate, altre finivano facilmente fuori uso; è vero che il perceptrone continuava a funzionare anche se qualcosa si guastava e persino durante le operazioni di manutenzione, ma la provvisorietà delle prestazioni e dello stesso disegno d'insieme impediva di conseguire un livello sperimentale accettabilmente «scientifico». Quando infine, nonostante la brillante campagna promozionale di Rosenblatt, fu chiaro che i risultati pratici non potevano essere costanti né affidabili, l'intero progetto dovette essere abbandonato. Minsky e Papert riuscirono a dimostrare l'effettiva possibilità di risultati quali quelli che Rosenblatt aveva cercato di perseguire, ma le loro conclusioni (nel libro «Perceptrons», del 1968) erano piuttosto critiche: il perceptrone manca di ogni capacità simbolica e non può «ragionare» o trarre deduzioni da ciò che gli accade, ma può soltanto esibire il proprio comportamento, sia pure adattato e modificato in seguito al successo o all'insuccesso delle associazioni compiute. Di conseguenza, venuto a mancare Rosenblatt, la linea di ricerca fu decisamente messa da parte.

Andare al bar a farsi un panino

Negli anni ottanta il panorama cominciò a mutare. Rispetto all'ottimismo della prima ora, le scommesse dell'Intelligenza classica erano state notevolmente ridimensionate: l'automazione dell'intelligenza, quando il compito non è puramente astratto e formale, richiede una buona visione del quadro d'insieme, una padronanza concettuale, linguistica e sensoriale ancora inattuabile da parte di qualsiasi congegno artificiale. Per l'abitudine a ritenere che l'intelligenza sia cruciale di fronte ai compiti più difficili e di più alto livello, si è dimenticato quanto siano comunque rilevanti le capacità più ordinarie, il buon senso mediante il quale si individuano e definiscono i problemi di più particolare impegno. Si giunge così al paradosso per cui l'intelligenza artificiale affronta con un certo successo la gestione di sistemi complessi o la risoluzione di problemi che richiedono competenze specialistiche e professionalità elevate, mentre è del tutto sprovvista nei confronti di situazioni banali e non strutturate che qualsiasi bambino supera senza difficoltà. «Sarebbe probabilmente più facile — scrive Heppenheimer — sviluppare un sistema esperto capace di rispondere a domande sulla progettazione di reattori nucleari che non escogitare un sistema per mandare il robot prototipo Shakey in panetteria a comprare un panino» (La Robotica, pag. 67). Gli antichi Greci — osserva Heppenheimer — collocavano al primo posto delle attività dell'uomo l'attività filosofica; poi quella del matematico, e

via via quella del medico, dell'esperto in giochi paragonabili a quello degli scacchi; e molto più in basso, la capacità del tecnico o dell'artigiano, mentre «le attività della vita ordinaria, compresi linguaggio e visione, erano addirittura indegne di essere menzionate». «Dall'angolo visuale dell'intelligenza artificiale — ritiene di poter concludere Heppenheimer — oggi possiamo dire però che questa filosofia è del tutto sbagliata, contraria all'ordine naturale delle cose. Per il computer il compito più facile è quello di dimostrare teoremi e trovare soluzioni di matematica superiore. Un po' più difficile è giocare giochi a livello di campionato. Ancora un po' più difficile è uguagliare la perizia specialistica di un internista, di un geologo o di un chimico, oppure — anche questa conoscenza è stata inclusa in un sistema esperto — l'esperienza di un riparatore di locomotive diesel. Ancora più difficile è la capacità di usare la lingua comune. Più difficili di tutto sono cose come la comprensione del mondo propria del buon senso, e la capacità di dare un senso a ciò che si vede» (pagg. 67-68). È a questo punto che i suggerimenti e le modalità ispirate al modello biologico e neuronale riprendono quota, questa volta su supporti elaborativi e programmi di simulazione ben più capaci ed efficienti. Dopo tutto, è ragionevole supporre che proprio la natura non simbolica dei processi neuronali elementari permetta l'esecuzione irreflessa delle operazioni di base dell'agire comune, dell'operare secondo «buon senso».

te; in secondo luogo, il flusso di informazione non procede in modo lineare, ma si propaga lungo infinite ramificazioni e connessioni, in modo relativamente indipendente e senza un preciso controllo centralizzato. Parallelismo ed estrema ramificazione dei collegamenti sono aspetti in relazione reciproca, ma possono essere diversamente esaltati. La «connection machine» di Hillis è composta da 64.000 processori fittamente comunicanti ed appare particolarmente indicata per il trattamento e la classificazione delle immagini.

Dopo una ragionevole fase di istruzione tramite esempi, è in grado di riconoscere visi umani e di discriminare, ad esempio, tra volti femminili e volti maschili. Poiché parti di immagine o singoli pixel possono essere esaminati e confrontati in parallelo, contemporaneamente, per poi raccogliere gerarchicamente le «votazioni» attribuite localmente alle varie interpretazioni possibili, il vantaggio consiste principalmente nel grande aumento di velocità elaborativa complessiva.

I supercalcolatori attuali, mentre sono ormai arrivati ai limiti delle possibilità della piastrina di silicio e puntano su materiali come l'arseniuro di gallio, che consente una rapidissima commutazione, possono incrementare le loro prestazioni soltanto sfruttando il parallelismo.

Il Cray X-MP dell'82, costituito di due Cray 1 che condividono la memoria centrale, è più veloce del modello Cray 2, che pure raggiunge i due gigaflop, ovvero i due miliardi di operazioni in



Elaborazione parallela

Due sono i punti di forza di una logica «reticolare» rispetto allo schema di elaborazione classico, alla von Neumann. Le risposte agli stimoli e il trattamento degli impulsi avvengono virtualmente in parallelo, su tutte le unità elaborative della re-



virgola mobile al secondo. Ma per conseguire l'obiettivo del teraflop (mille miliardi di operazioni al secondo), che è ormai indispensabile per rappresentare l'evoluzione di modelli grafici di fenomeni fisici complessi, come le perturbazioni atmosferiche, le turbolenze sulle ali degli aerei o le tensioni superficiali di una molecola organica, occorre un parallelismo molto più spinto.

Occorrono algoritmi più raffinati del semplice calcolo vettoriale per poter spezzare il problema in più parti e ricomporre poi i risultati separatamente raggiunti, sfruttando architetture molto composite. «Negli ultimi due anni è diventato quasi un dogma che solo macchine massicciamente parallele, dotate di parecchie centinaia o migliaia di unità di elaborazione, potranno arrivare al teraflop», riporta Elisabeth Corcoran nella sua panoramica molto documentata sullo stato del problema («Calcolatori superveloci», *Le Scienze*, marzo 1991 pag.88).

Indubbiamente un vantaggio quantitativo di tale portata si tramuta in un vero e proprio salto di qualità. L'elaborazione in tempo reale è necessaria nel controllo del movimento di un robot o nella semplice interpretazione di una scena in svolgimento, che non può essere rallentata o ripetuta a beneficio di un programma di analisi che non riesce a tenere il passo. Ma sarebbe riduttivo pensare che l'architettura parallela sia solo un espediente per diminuire i tempi di esecuzione. Trasportare un algoritmo sequenziale su una macchina parallela richiede un'accurata gestione degli effetti collaterali, delle biforcazioni e degli scambi tra processi, tanto che la riduzione dei tempi non è mai direttamente proporzionale al numero di processori impiegati; e viceversa, un processo autenticamente parallelo si assesta anche in base ad eventi «casuali», priorità nascoste ed effetti reciproci che è quasi impossibile individuare e calcolare. Anche ciò che in linea di principio può essere trasformato in un algoritmo lineare tradizionale finisce per presentare all'atto pratico problemi di tale complessità da non poter trovare una soluzione ragionevole.

Reti che apprendono

L'aspetto più specifico di un sistema connessionista è comunque la ramificazione dei collegamenti e del flusso di informazione. Pur non implicando una elaborazione realmente parallela (tanto che praticamente tutti i sistemi reticolari sono simulati su elaboratori sequenziali classici), la rete può essere ragionevolmente descritta soltanto a livello delle singole unità che la compongono e delle loro immediate vicinanze, considerate indipendentemente dal disegno d'insieme. Tipicamente, una «rete» è composta di «connessioni» tra più «nodi»; a ciascuna connessione è associato un «peso» numerico che determina sia l'efficacia o meno del collegamento (valore di soglia), sia il contributo che essa apporta alla determinazione del valore netto del nodo

di arrivo. Ad ogni ciclo di attivazione, a partire dai nodi convenzionalmente considerati di input (dati di ingresso) viene calcolato il valore di ciascun nodo successivo, utilizzando il peso di ciascuna possibile connessione. Pur consentendo retroazioni e ricicli, in generale i nodi sono distribuiti su più livelli: un livello prevalentemente di input, i cui ingressi costituiscono i «sensori» o i dati di partenza del processo; un livello di output, i cui valori rappresentano le risposte del sistema alla configurazione in ingresso; e uno o più livelli «nascosti», che consentono le più varie combinazioni di schemi e collegamenti.

In genere, si attribuisce una interpretazione alla configurazione di input e di output; la rete deve «imparare» la giusta associazione, per esempio ad emet-

Il problema pedagogico e il connessionismo neurale

Dal momento che una macchina connessionista consegue le proprie prestazioni cognitive attraverso un processo di apprendimento, ci si può attendere che i ricercatori del settore prestino una certa attenzione alle sollecitazioni che possono giungere dal lavoro condotto sul terreno più propriamente pedagogico. In effetti, un autore sempre più citato nella letteratura connessionista è lo psicologo e biologo Jean Piaget (1896-1980), la cui «psicogenetica» si fonda interamente sull'osservazione di come apprendono i bambini. L'assunto caratteristico è che la conoscenza si struttura a partire dai primi momenti della vita nell'interazione tra il bambino e l'ambiente materiale, sociale e culturale con il quale entra in contatto; essa non è giustificata tramite innatismi, se non per le potenzialità insite nel sistema neurale trasmesso geneticamente, e si sviluppa secondo fasi o stadi ben individuabili. Soprattutto dopo gli anni '50, Piaget ha dovuto subire aspri attacchi dalla scuola cognitivista americana la quale ancora oggi opera considerando le capacità superiori dell'intelligenza come espressioni di facoltà innate, o comunque

date e stabili nell'individuo adulto.

Nella prospettiva di Piaget, l'intelligenza umana si forma attraverso il rapporto che il bambino intrattiene col mondo esterno: le azioni sugli oggetti e sulle persone lo portano a costruire schemi senso motori via via più complessi e adattivi; passa poi per la fase delle operazioni concrete, in cui riesce a confrontarsi con situazioni tali da generare schemi mentali che approdano all'emergenza di invarianti spaziali, logiche e temporali. Successivamente, il bambino opera in modo consapevole con tali categorie fino a giungere verso gli 11-12 anni al pensiero logico-deduttivo tipico dell'intelligenza adulta. Questo percorso si compie attraverso le modalità dell'«assimilazione» e dell'«accomodamento», termini mediante i quali Piaget caratterizza il costante rapporto del soggetto con l'ambiente fisico, sociale e culturale in direzione di una perenne plasticità evolutiva, pur nella tensione a conseguire un equilibrio più organico. Forse l'opera più vicina al neo connessionismo è «L'equilibratura delle strutture cognitive» (1975), dove il processo di continua rielaborazione delle strutture conoscitive (per cui la mente può inserire il nuovo negli schemi preesistenti ma anche accomodare queste strutture quando esse non sono adeguate a maneggiare le nuove informazioni) è giustificato con il postulato che la mente è un sistema caratterizzato da disequilibrio, con la necessità di trovare momenti

tere il nome dell'oggetto a fronte della sua immagine. All'inizio il comportamento della rete è praticamente casuale; l'insegnamento procede premiando le risposte corrette (o vicine alla soluzione) e penalizzando quelle sbagliate. L'apprendimento è affidato ad un algoritmo di «propagazione all'indietro» dei rinforzi e delle penalità, lungo i principali nodi interessati. Dalla bontà dell'algoritmo di propagazione dipende la rapidità con cui la rete raggiunge la giusta associazione, possibilmente con pochi ricicli sull'insieme di esempi da analizzare. È invece meno importante il metodo di inizializzazione dei pesi, dato che questi comunque vengono variati dall'algoritmo di back propagation in modo localmente imprevedibile. Anche se inizializzazioni differenti possono comportare una diversa distri-

buzione finale dei pesi, il comportamento della rete converge comunque verso una reattività funzionalmente simile.

A questo punto, abbiamo per ipotesi una rete che risolve il problema iniziale di associare le immagini ai nomi. Se ora sottoponiamo ai sensori una nuova immagine di un oggetto «noto», possiamo sperimentare come la rete lo classificherà: non solo la risposta non è più casualmente distribuita, ma non è raro che venga fornita subito la risposta corretta, od una abbastanza vicina. Addirittura, la rete può essere usata per classificare nuove immagini di oggetti nuovi, che tendono ad essere assimilati all'oggetto noto più «somigliante». A differenza di un programma tradizionale, nel quale una situazione imprevista può portare a risposte del tutto in-

sensate o persino al crash del sistema, uno schema di questo tipo è evidentemente molto più «robusto» e continuerà in qualche modo a «funzionare» più o meno plausibilmente anche in condizioni estreme.

Si può inoltre riprendere l'addestramento e, se i nodi e le connessioni sono abbastanza numerosi, ampliare indefinitamente la competenza classificatoria della rete fino al necessario grado di affidabilità, soprattutto se si riesce a standardizzare e delimitare l'ambiente di operatività (nel nostro esempio, il tipo di immagini da classificare). La nuova configurazione dei pesi ricavata dopo ogni ciclo di addestramento può essere memorizzata e duplicata a piacere, riproducendo in tal modo la competenza in essa «sedimentata».

di equilibrio (equilibrio adattativo tra categorie e ambiente, e equilibrio interno alle strutture conoscitive medesime).

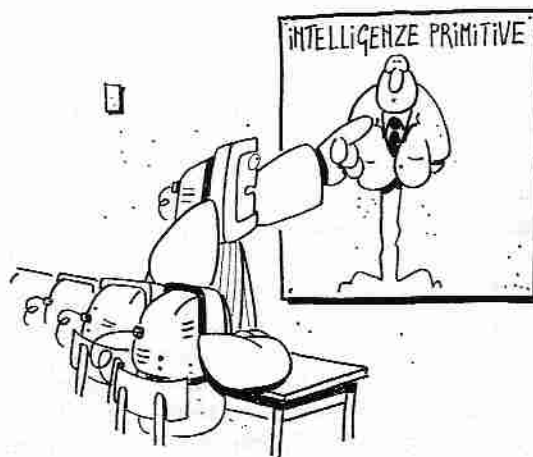
Questi pochi cenni lasciano immaginare quanto profondi possano essere i riferimenti alla problematica del connessionismo, come per esempio riconosce Domenico Parisi nel suo bel saggio «Connessionismo: origine e sviluppo al centro dello studio dell'intelligenza», in «Sistemi Intelligenti», dicembre 1990, pagg. 365-426. In opposizione al cognitivismo e alla sua interpretazione estrema nell'ambito dell'intelligenza artificiale, Parisi intende riprendere alcuni orientamenti di base di Piaget, e specificatamente «la concezione della cognizione come un tipo di adattamento biologico, come il prolungarsi a livelli più elevati di meccanismi e processi che sono in comune con tutta la vita biologica»; «il ruolo centrale che Piaget assegna allo sviluppo, ai processi evolutivi, dinamici, di cambiamento, per la comprensione stessa della natura dell'intelligenza»; l'evitare di fare del linguaggio e dei modelli di tipo simbolico il cardine della ricerca dell'intelligenza, in quanto «il linguaggio è centrale nel cognitivismo, mentre Piaget lo considera esplicitamente come qualcosa di derivato da processi e capacità più fondamentali» (ivi, pag.376).

Nel seguito, Parisi sviluppa in modo puntuale alcuni assunti piagetiani, sia di tipo metodologico (Piaget: «nello stato non vi è nulla di chiaro. Considerando il proces-

so, le cose si chiariscono»), sia di preciso contenuto sperimentale e teorico (compresa la discussa questione della possibile ereditarietà di caratteri acquisiti). Le interessanti osservazioni di Parisi sembrano convincenti anche se non possono concludere ad un rafforzamento del programma connessionistico in virtù dell'autorità delle ricerche di Piaget. Piaget usa infatti concetti riferiti alla realtà psichica, che prescindono in genere dallo stesso substrato nervoso e cerebrale: in che misura allora, al di là di evidenti isomorfismi funzionali, i meccanismi e il comportamento di unità e nodi 'neuronic' esemplificano i fenomeni di alto livello di cui in realtà Piaget parla, e fino a che punto ha senso applicare alla oscillazione di pesi, sinapsi e propagazioni di valori ciò che riguardava sensazioni, pensieri e stati coscienti? Allo stesso modo, l'assimilazione e l'accomodamento, ma anche lo stesso feed-back dai risultati ai meccanismi predittivi implicati, non paiono aver nulla in comune con la backpropagation e i suoi espedienti di calcolo e di temporizzazione. Una maggior attenzione potrebbe ricevere invece il processo di «equilibrato» (che è una azione e-

quilibrante piuttosto che un semplice equilibrio), il cui principio regolatore Piaget individua nella sussistenza della totalità del sistema conoscitivo; probabilmente questo aspetto è più vicino ai principi delle reti associative di Hopfield che non all'ultimo connessionismo neurale. La teoria dell'equilibrato è l'approdo della prospettiva piagetiana della psicogenesi della conoscenza e rappresenta la sfida più forte alla emulazione tramite reti connessionistiche: potranno queste ultime essere nella loro essenza caratterizzate «da una ragione sistematica di disequilibrio» ed essere tanto auto-consapevoli da trovare in se stesse il principio di regolazione?

Alessandra Venturi



Rappresentazione sub-simbolica. Lesioni e amnesie

Come il perceptrone di Rosenblatt, una rete connessionista non tratta simboli e significati né li rappresenta in modo localizzato (se si fa eccezione per i canali di input e di output, nei quali d'altra parte l'associazione ad un significato è del tutto convenzionale e irrilevante per l'elaborazione da parte della rete). Un sistema che distingue, poniamo, i triangoli dalle altre figure geometriche non ha in nessun luogo in particolare il concetto di «triangolarità» — concetto che se mai si può considerare distribuito su tutti i pesi della rete (nel senso che il riconoscimento dei triangoli individuali avviene in virtù dei pesi definiti dalla back propagation). «Se guardiamo alla struttura interna della rete, alle sue unità nascoste, osserviamo che quando attiviamo una determinata unità di ingresso (per esempio, corrispondente al concetto di cane, di cui individuare gli attributi) si ottiene uno specifico pattern di attivazione sulle unità nascoste, cioè ciascuna delle unità nascoste ha un determinato livello di attivazione. Questo pattern è specifico per ciascun concetto e varia da concetto a concetto.

Questo pattern di attivazione sulle unità nascoste è una rappresentazione distribuita, cioè sub simbolica, del concetto di cane nella rete. Infatti, ... in primo luogo il concetto di cane è rappresentato da diverse unità (le diverse unità nascoste) e in secondo luogo — che è la cosa più importante — queste unità non hanno alcun significato simbolico per noi» (Domenico Parisi, *La mente come cervello*, in «Sistemi intelligenti», agosto 1989, pag. 228).

Provando ad eliminare a caso alcune porzioni di rete, non si riesce a disorientarla bruscamente, ma si ha piuttosto un lento e progressivo degrado delle prestazioni, che può anche non essere rilevabile se i livelli nascosti sono sufficientemente ricchi di elementi e connessioni. Anche menomata, la rete può riprendere l'addestramento e recuperare le capacità eventualmente indebolite. Un altro fenomeno curioso è la

possibilità che la rete finisca per «dimenticare», se sottoposta massicciamente a nuove associazioni, una relazione che nel frattempo non venga più rinforzata; ma in questo caso la «rieducazione» è molto più rapida e con pochi esempi il «ricordo» riemerge stabilmente.

La natura non simbolica della elaborazione reticolare e l'assenza di «significati» localizzabili o attribuibili a qualche cella di memoria può essere considerata un punto di forza del connessionismo nel simulare le funzioni cerebrali, se è vero che «i modi di rappresentazione e di computazione che sono tipici del cervello sembrano essere molto diversi dalle espressioni simboliche e dalle inferenze logiche che vengono usate nei modelli logico-proposizionali delle capacità cognitive» (Chuchland e Sejnowski, in «Sistemi intelligenti», agosto '89, pag.177).

Neuronica

Il comportamento di una rete connessionista suscita grande interesse nell'ambito delle neuroscienze sperimentali; in particolare, sembra aprire nuove possibilità di realizzare «esperimenti» largamente riproducibili. Mentre aumenta la conoscenza dei meccanismi locali delle cellule cerebrali, la decifrazione delle strutture superiori del cervello biologico resta infatti molto problematica. Lo sperimentalismo esasperato che caratterizza questo genere di indagine si arena non tanto di fronte a problemi etici (la vivisezione e la mutilazione in vivo sono pratiche ampiamente abusate), ma per la impossibilità di ripetere, magari apportando piccole variazioni, le stesse classi di esperienze. Il motivo sembra risiedere nella estrema delicatezza delle strutture interessate e nella scarsa precisione della microchirurgia disponibile; inoltre, e soprattutto, ogni individuo sviluppa connessioni sinaptiche e circuiti neurali differenti e personali, per cui anche le capacità funzionali comuni a tutti trovano una realizzazione neurale ogni volta specifica e unica. Un modello artificiale che realizzasse funzionalità dello stesso genere, ma riproducibili su larga scala

(e che per di più non presenta problemi di «approvvigionamento» né costringe alla semi-clandestinità rispetto ad una opinione pubblica che potrebbe ostacolare le «ricerche» più crudeli) offre evidentemente un terreno molto propizio.

La speranza è che i neurobiologi, sfogate senza più remore le proprie istanze sperimentalistiche, finiscano per scoprire che il vero problema sta altrove. La tecnica di registrare i comportamenti più svariati nelle diverse condizioni di laboratorio non porta da nessuna parte se non si dispone di ipotesi teoriche di una qualche consistenza. Senza un tentativo globale di interpretare il funzionamento del cervello, a partire dai livelli superiori, il «dato» sperimentale non ha alcun valore probatorio. Per il carattere intimamente interconnesso delle funzionalità cerebrali, non è la quantità di osservazioni in situazioni di «isolamento scientifico» a significare qualcosa; forse soltanto la capacità di correlare una teoria della plasticità evolutiva dell'apparato neuronico con l'osservazione di un comportamento naturale, nell'ambiente reale, potrà colmare la distanza tra livello sinaptico dello stimolo e funzione biologicamente significativa.

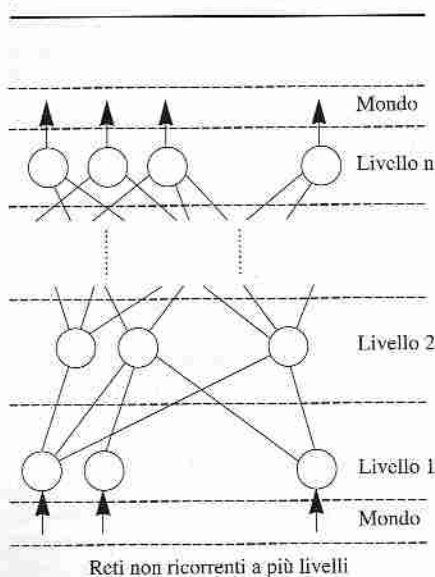
Il modello connessionista ha qui soltanto un uso metaforico, come possibile controprova che la strada della moltiplicazione reticolare per selezione e rinforzo è quella giusta: ma si tratta del resto di una petizione di principio. Il modello reticolare a sua volta assume dichiaratamente come modello la struttura biologica e rischia quindi di diventare un criterio di «rinforzo» teorico del tutto a priori. La riproduzione artificiale della rete neurale biologica risponde all'istanza costruttivista e costituisce un reale incremento della conoscenza soltanto se non si trincerava programmaticamente nel suo «sub-simbolismo» e nella sua a teoricità. In effetti la neuronica, cioè lo studio delle reti connessionistiche «elettroniche», è costretta a proporre ipotesi esplicative «di alto livello» su come la rete si auto-organizza, su come «rappresenta» i concetti e le discriminazioni, e forse, prima o poi, su come la rete artificiale «sen-

Meccanismi di pensiero sub-simbolico

Una rete neurale è costituita da «nodi», simulati ad esempio da variabili W_i a cui assegnare un valore numerico, e da «connessioni» tra nodi, ovvero altre variabili numeriche W_{ij} , una per ogni legame che si vuol instaurare. Nelle reti forward, senza retroazioni, i valori dei nodi di primo livello sono determinati dall'input fornito al sistema; ciascun nodo successivo è calcolato secondo un algoritmo opportuno, in base al valore dei nodi «afferenti» e al peso della relativa connessione. In genere, prodotti al di sotto di una soglia prefissata non vengono presi in considerazione; in alcuni casi, il valore di soglia può variare nodo per nodo o connessione per connessione. Il valore risultante dei nodi dell'ultimo livello rappresenta la risposta della rete allo «stimolo» introdotto. All'inizio, la distribuzione dei pesi sinaptici (ovvero, il contenuto delle variabili W_{ij}) può essere casuale, il che determina un comportamento altrettanto casuale; si tratta allora di correggere i pesi, incrementando per esempio il valore delle connessioni che hanno contribuito ad attivare un nodo di output «giusto» e/o decrementando i pesi che hanno contribuito a un valore di uscita «sbagliato». Nel loro insieme, i valori delle connessioni costituiscono la memoria a lungo termine; dopo un certo numero di tentativi e aggiustamenti, le risposte diventano più soddisfacenti, gli interventi correttivi si riducono e il «ricordo» tende a stabilizzarsi. I valori dei nodi costituiscono la memoria a breve termine, rappresentano cioè l'ultimo esempio sottoposto ad esame; di solito, vengono azzerati e ricalcolati ad ogni input successivo. La configurazione della rete è perciò interamente determinata dalla distribuzione dei pesi, dato l'algoritmo di propagazione e eventuali convenzioni interpretative (per esempio, si può assumere che una connessione di peso nullo equivalga alla definitiva interruzione della sinapsi tra i relativi «neuroni»).

I perceptron di Rosenblatt (anni '60) hanno un ampio numero di connessioni, ma due soli livelli di nodi; l'algoritmo di correzione dei pesi («regola delta») ha precise proprietà matematiche e garantisce che il processo di assestamento converge verso la soluzione del problema, purché una soluzione sia possibile. La regola delta non può però essere applicata

se i livelli sono più di due; d'altra parte il perceptrone, e ogni rete a due livelli, non può rappresentare predicati di ordine superiore ad 1, come hanno dimostrato nel 1969 Minsky e Papert: per esempio, non può essere realizzato l'equivalente di un OR esclusivo. Sono quindi necessarie reti con livelli intermedi, o «nascosti», che non hanno una interpretazione in termini di input o di output; algoritmi alternativi alla regola delta, come la legge di Hebb (1949) o le strategie inibitorie nelle memorie associative di Hopfield (1982), sono tecniche puramente locali che producono comportamenti globalmente interessanti ma che non si prestano a correzioni precise e mirate. La cosiddetta «macchina di Boltzman» di Hinton e Sejnowski (1986) introduce una componente stocastica nell'algoritmo di propagazione dei valori, per cui i pesi determinano una «tendenza» ma non forzano la risposta in modo algoritmico; è così possibile risalire da «minimi locali» in cui a volte l'assestamento della rete può imprigionare nascondendo la soluzione otti-



male. Inoltre, per combattere l'eventualità di valori via via crescenti che finiscono per canalizzare in modo non modificabile le connessioni principali, occorre introdurre algoritmi di levellazione dei pesi «troppo grandi»: una tecnica per «dimenticare» alternata a quella per imparare, che gli autori paragonano alla funzione del sonno Rem di eliminare

associazioni parassita troppo rafforzate. La struttura connessionistica più promettente è comunque la rete non ricorrente a più livelli, per la quale Rumelhart, Hinton e Williams hanno proposto nel 1986 una «legge delta generalizzata». Al processo di mapping (associazione) in cui un pattern di ingresso viene propagato in avanti fino al livello di output, viene alternata una propagazione all'indietro dell'errore stimato (back-propagation). In pratica, le connessioni che hanno condotto ad un output errato vengono incrementate o diminuite in proporzione all'errore, alla attività del nodo di partenza e alla velocità di assestamento del singolo peso nei cicli precedenti, riducendo la possibilità di alterare drammaticamente connessioni che vanno convergendo verso un valore complessivamente ottimale. La propagazione all'indietro della stima di errore si arresta quando la correzione richiesta scende sotto un certo valore di soglia. La legge delta generalizzata opera sia con neuroni classici tutto-o-niente, per esempio per rappresentare le funzioni booleane, sia con valori continui più adatti a simulare eventi percettivi o cinematici. L'applicazione più nota è forse il Nettalk di Sejnowski e Rosenberg (1986), dove l'addestramento tramite lettura di un testo inglese (associando il testo scritto all'input e i corrispondenti fonemi all'output) mette in grado la rete di fornire la corretta pronuncia di parole e frasi non appartenenti all'insieme sperimentato.

Per lo più le reti neurali sono tuttora simulate su macchine sequenziali, per esempio calcolando in successione tutti i valori di una rete non ricorrente, a partire dai nodi di input (modo sincrono), oppure scegliendo casualmente i nodi da sottoporre a valutazione locale, come nelle reti associative di Hopfield (campionamento stocastico). Insieme però a macchine parallele generiche, come gli «iper cubi» che anche in Italia qualche geniale progettista sta producendo, si sta iniziando a realizzare chip «neuronal» da dedicare a singole attività associative o da collegare in serie, fino ad ottenere strutture via via più complesse e versatili, in particolare per intere funzioni percettive o di controllo motorio. Un pioniere di tale produzione su scala ormai industriale è Federico Faggin, italiano trapiantato negli Stati Uniti; all'ultimo congresso della Aixa (Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale), tenuto a Palermo lo scorso ottobre, Faggin ha illustrato in modo convincente le promettenti capacità del nuovo e rivoluzionario prodotto.

Un po' di fantascienza: cervelli «positronici»

Allo stato attuale della ricerca, connessionismo e reti neuroniche sembrano rappresentare la via più praticabile per raggiungere prestazioni assimilabili al «buon senso» e ai modi di apprendimento tipicamente umani. È possibile che per lungo tempo ancora ci si limiti a perseguire obiettivi specifici e parziali, quali il riconoscimento di immagini e suoni, l'apprendimento per esempi, la manipolazione di micromondi delimitati, lasciando a procedure meglio controllabili l'eventuale coordinamento «esperto» tra le varie capacità così acquisite. Ma per superare pienamente un test di Turing, cioè per mostrare piena padronanza del linguaggio naturale e dell'universo concettuale sottostante, può darsi che non ci siano alternative ad un unico complesso «reticolare» totalmente affidato all'autoapprendimento retroattivo.

Vi sono qui due considerazioni fondamentali. La prima è che, per quel principio di economia e di minima azione sempre presente in natura, si può scommettere che il cervello umano sia la struttura minima (e ottimizzata) per le funzioni superiori che possiamo attribuire a una mente che operi secondo gli stessi principi. È improbabile che per quella stessa via si possano trovare scorciatoie o sottoinsiemi funzionalmente equivalenti all'intero: questo significa che una macchina dotata di buon senso dovrà essere complessa e capace (almeno) come il cervello umano. Può darsi che il cervello rappresenti anche il limite superiore di sviluppo, nel senso che una maggiore complessità o ridondanza porti al collasso o comunque ad uno snaturamento delle funzioni per noi più significative.

In secondo luogo, nella migliore delle ipotesi tale macchina sarà altrettanto misteriosa e «inspiegabile» che la nostra mente stessa. Anche se le sue parti e gli algoritmi locali presumibilmente saranno artificiali, nessuno avrà programmato i suoi schemi di comportamento, il suo mondo concettuale, la sua rete semantica. Da nessuna parte, se non nelle prestazioni complessive della «rete», risiederanno significati, scopi o intenzioni: dovremo forse inventare, per meglio conoscerla, qualcosa come la «psicorobotica» dei romanzi di Asimov. Non è nemmeno certo che potremo assicurarci l'obbedienza, la condivisione degli scopi di fondo, o il rispetto di alcune regole formali del tipo delle «tre leggi della robotica»

(la prima legge dei robot di Asimov è, naturalmente: un robot non potrà mai nuocere ad un essere umano...). Potremo solo cercare di convincerla, o di educarla a certe norme morali; è difficile immaginare come poter programmare esplicitamente alcuni aspetti specifici, e magari collocare tali norme nell'intimo del cervello artificiale, come una specie di super-io controllato dall'esterno. In ogni caso l'interpretazione e il giudizio di applicabilità sarà a carico di una «mente» che inevitabilmente sarà in grado di mentire e di sbagliare, di ingannare e di ingannarsi. In altre parole, sotto l'aspetto dell'efficienza e del controllo una rete «connessionistica» sarà difficilmente vantaggiosa rispetto ad una normale mente biologica, e forse non comporterà minori problemi etici e di valore. Anche se una rete neurale non è programmabile in senso stretto, è però riproducibile a piacere, in qualunque fase del suo sviluppo. Dato un supporto fisico (o un programma di simulazione) adeguato, si può pensare di addestrare un certo numero di «reti», scegliere la più riuscita, clonarla in più esemplari e proseguire su ciascuno con successive fasi di addestramento. Per quanto ogni linea evolutiva sia in pratica unica, si potrà selezionare l'individuo più «adatto» e continuare ad esercitare sul nuovo prototipo la «pressione selettiva» desiderata (od anche ripartire da esemplari precedenti se la linea evolutiva si rivela poco indovinata e meritevole di estinzione). È difficile immaginare che tale processo, in larga parte affidato alle autonome capacità percettive e motorie di cui si dovrà dotare la mente neuronica artificiale, sia meno lungo e faticoso dell'educazione ed istruzione di un essere umano. La caratteristica della riproducibilità eviterebbe però di ripartire dall'inizio con ciascun individuo e consentirebbe di far tesoro di tutta l'esperienza della «generazione» precedente; anzi, virtualmente ciascuna rete sarebbe «immortale» e potrebbe accumulare esperienza per un tempo indefinito. In questo modo l'eredità culturale, al pari di quella genetica, sarebbe trasmessa e duplicata interamente fin dall'inizio di ogni nuovo esemplare, semplificandone l'addestramento di base. Può darsi però che nemmeno questa scorciatoia rappresenti un vero vantaggio. Ogni clone infatti nascerebbe non solo con le capacità, ma anche con in pregiudizi, le abitudini e le convinzioni del modello originario, senza la freschezza e la temerarietà che caratterizza il salto generazionale biologico. Il processo di apprendimento è anche scelta,

interpretazione, rinnovamento: lo sforzo di adattamento comprende la rielaborazione originale di schemi e concezioni «personali» e non si può evitare senza pagare un certo scotto. La conoscenza e la scienza stessa non procedono in modo cumulativo; si può sostenere che le rivoluzioni scientifiche più determinanti non si sarebbero imposte senza un ricambio generazionale, ovvero, in parole crude, senza la morte dei vecchi scienziati e il sopravvento di uomini nuovi. Sarebbe amaro scoprire che anche in ciò l'evoluzione culturale «naturale» risulti ottimizzata, costituendo la maniera più semplice e efficace per generare quella molteplicità prospettica e quella variabilità individuale che consentono di estrarre ogni volta dal cappello della storia un nuovo espediente e una nuova parola d'ordine.

D'altra parte, non sembri azzardato ritenere che la manipolazione di menti artificiali dotate di buon senso, e dunque con rilevanti capacità di interpretare gli eventi che la riguardano, ponga concretamente problemi etici insormontabili, rispetto ai quali le questioni sulla vivisezione e l'ingegneria genetica sono appena sgradevoli anticipazioni. La selezione artificiale richiede, oltre al potere di vita e di morte sui soggetti degli esperimenti, una ideologia assoluta sugli scopi e sui criteri selettivi non dissimile dalle più assurde ideologie totalitarie della nostra storia. È riconosciuto che i tentativi di imporre una selezione su basi razziali o eugenetiche sono, oltre che inammissibili sul piano della coscienza civile, sostanzialmente fallimentari sul piano dei «risultati» conseguibili. Inoltre il diffondersi dell'illusione di possedere un modello ideale di intelligenza e di umanità comporta contaminazioni ideologiche pericolose non solo per le vittime dirette di tali teorie, ma per tutta la società nel suo complesso. Il programma ottimista delineato dal connessionismo neurale non può eludere queste perplessità di fondo, nel momento in cui vorrebbe proporsi come unica possibile strada per la ricerca in fa.



te» la propria esperienza. La semplice riproduzione funzionale è solo un criterio tecnologico; la scienza non si fa col sub-simbolico, allo stesso modo in cui chi costruisce ottimi areoplanini di carta non contribuisce alla teoria dei fluidi o all'analisi delle turbolenze e delle tensioni sulle superfici alari.

Spontaneità

Un ultimo aspetto del connessionismo accentua questo suo carattere molto «tecnologico» e poco teoretico: la possibilità di lasciare indeterminata la struttura di partenza della rete, affidandola a meccanismi selettori a posteriori. Uno degli indizi più classici del comportamento intelligente è il «fai da te», la autonomia dell'organismo da un punto di vista biologico e, soprattutto, logico-decisionale. Dalla interpretazione della frase di Lady Lovelace («La macchina analitica di Babbage non ha alcuna pretesa di creare alcunché; può eseguire qualsiasi cosa si sia in grado di ordinarle di fare») alla discussione su come un programma di Ia, in quanto appunto «programmato», possa «decidere» in modo originale, il tema è sempre stato al centro dell'attenzione. Non sarebbe inopportuno un richiamo al dibattito settecentesco tra necessità e libero arbitrio, tra determinismo e libertà di azione: i concetti in gioco non sono così ovvi come possono sembrare e richiederebbero un esame filosoficamente più attento. È per esempio ingenuo addebitare all'intelligenza artificiale classica uno status irrimediabilmente deterministico e predefinito, mentre l'indeterminatezza iniziale delle connessioni, per il solo fatto di essere casuale, garantirebbe la capacità di scelta delle reti. «La strada da percorrere — sostiene Parisi nell'articolo citato — non è quella che il ricercatore decida lui come sono fatte le reti, qual è la loro architettura, quali sono le connessioni esistenti, quali le relazioni tra le sotto-reti, e così via. ...

La logica del connessionismo comporta piuttosto che vengano trovati metodi con cui le reti possano decidere da sole, spontaneamente, come risultato del loro apprendimento e del loro sviluppo

adattativo, quale deve essere la loro architettura, quali unità debbono essere unite da connessioni e quali no, come debbono emergere sotto-reti specializzate, ecc., cioè tutta quella strutturazione complessiva che noi sappiamo essere propria dei sistemi nervosi reali».

Ora, per quanto interessante e suggestiva essa sia, la possibilità di lasciare al caso la determinazione della struttura e forse anche dei modi della sua formazione non è in sé né più vicina né più propizia al sorgere di qualsivoglia capacità «intelligente». Il fatto anzi che l'insieme finale risulti sconosciuto allo stesso progettista aggiunge un problema ulteriore, perché non sappiamo più, quando la rete funziona, perché funzioni; a meno che non si definisca processo decisionale tanto più intelligente quanto meno sappiamo come opera.

Sistemi ibridi

In conclusione, le reti connessionistiche promettono di riprodurre più da vicino ciò che sappiamo delle relazioni sinaptiche e neuronali, ma a crescenti livelli di complessità diventano altrettanto problematiche del loro omologo biologico. Può darsi che per questa via «dal basso» il sistema biologico costituisca una soluzione ottimale non superabile, anche qualora potesse essere riprodotta. Una direzione più pratica potrebbe risultare quella di sommare alle capacità di alto livello dell'Ia classica l'attitudine discriminatoria «corticale» del connessionismo. Un sistema di guida automatica potrebbe lasciare ad una rete neurale l'individuazione di un pedone, e poi mettere in atto una opportuna strategia «esperta» per evitare di investirlo — piuttosto che mandare in giro un complesso «autopoietico» a fare esperienza sul campo. Questa divisione del lavoro corrisponde ai differenti punti di forza (e ai relativi punti di debolezza) dei due approcci, e non è detto che si collochi secondo una gerarchia di basso e di alto. In termini antropomorfi, si può immaginare che i sistemi connessionistici si facciano carico dell'apparato sensitivo, mentre sistemi logico-deduttivi potrebbero rappresentare l'elemento razionale.

Anche compiti altamente teoretici sembrano richiedere un momento di correlazione intuitiva e un momento di controllo e di consequenzialità deduttiva.

Il modello ibrido di K.Lamberts, Hshsp (Hybrid System for High School Physics), che risolve problemi di cinematica, utilizza appunto strategie induttive connessionistiche che suggeriscono al sistema esperto solutore i sotto-obiettivi più promettenti per conseguire il fine richiesto.

Tutto va bene?

L'insofferenza del connessionismo verso eventuali tutori «esperti» è ovviamente comprensibile, e non è male che ciascuno, pur collaborando fin dove è possibile, vada poi per la propria strada. Altrettanto prevedibile è l'avvicinarsi di tendenze opposte e complementari: dopo un periodo di eccessivo razionalismo e di cieca fiducia nel riduzionismo e nella scomposizione logica dei problemi, si assiste ora ad una fase più incline a valorizzare l'intuizione, l'esperienza storica e l'olistico tutto. Il processo dialettico della scienza opera spesso per opposizione frontale; è probabile però che nel medio periodo i risultati migliori arridano alle posizioni più tolleranti ed aperte. L'ampliamento del problema dal tema dell'intelligenza (e dell'intelletto) a quello del razionale (o della ragione) trova illustri precedenti nella storia delle idee; lo scivolone nell'irrazionale e nel mistico ha invece, sul terreno scientifico, conseguenze autoritarie e improduttive. ■

(3 - continua)

Luciano Bazzocchi

BIBLIOGRAFIA

V. Somenzi e R. Cordeschi, *La Filosofia degli Automi*, Boringhieri 1986.

D.W. Tank e J.L. Hopfield, *Circuiti elettronici basati su modelli biologici*, in «Le Scienze», febbraio 1988, pagg. 50-58.

D. Parisi, *Intervista sulle Reti Neurali*, Il Mulino 1989.

P.S. Churchland e T.J. Sejnowski, *Rappresentazione neurale e computazione neurale*; D. Parisi, *La mente come cervello*; P. Morasso, *Reti neurali e intelligenza*, in «Sistemi Intelligenti», agosto 1989. In generale questa rivista, diretta da Domenico Parisi, è molto attenta al tema del connessionismo.

A. Mazzotti, *Reti neurali artificiali*, Apogeo 1991.

Case? Parliamone... (2ª parte)
Inchiesta
Ultime novità dalle Lan

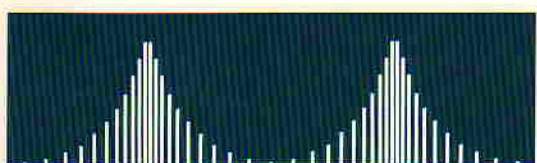
l'organizzazione

l'automazione e le comunicazioni dell'ufficio

office[®] automation

SOIEL INTERNATIONAL - 20124 MILANO, VIA SETTALA 8 - MENSILE - ANNO UNDICESIMO - N. 12, DICEMBRE 1991 - SPED. IN ABB. POST. GR. III/76

UN RAPPORTO COLLAUDATO



CISCO SYSTEMS



Anni di esperienza e di successi comuni sono il risultato del rapporto consolidato tra Cisco Systems e TCS. E ora Cisco Systems, sempre il numero uno con più di 10.000 unità installate nel mondo, completa la propria gamma di Router multiprotocollo con ulteriori funzionalità innovative per ogni applicazione di internetworking.

- opera contemporaneamente in ambiente ETHERNET™, TOKEN RING™ e FDDI
- gestisce indifferentemente fino a 16 protocolli, tra cui TCP/IP, DECNET™ Phase IV e V, IPX™, XNS™, OSI CLNS, Appletalk™ I e II
- connessioni su linee dedicate fino a 34 Mbps e reti a commutazione di pacchetto X.25/Frame Relay
- trasporto SDLC/SNA™
- throughput fino a 74.000 pps
- software di gestione di rete basato su SNMP



TELE
COMMUNICATION
SYSTEMS S.p.A.

PICCOLE GRANDI SOLUZIONI

La natura lo insegna: a volte una soluzione semplice ma geniale può risolvere un grande problema. Per questo TCS dal 1979 Vi offre prodotti innovativi per rispondere, con semplicità, a tutte le Vostre esigenze di data communication.

20138 MILANO
Via Mecenate, 84/a
Tel. (02) 58011005 (4 linee r.a.)
(02) 5061296 - 5064493
Fax (02) 5062452 - Tlx 315697 TCSADM I

41100 MODENA
Via Magellano, 1
Tel. (059) 333302 (7 linee r.a.)
Fax (059) 330337

10146 TORINO
Via Gianfrancesco Re, 82
Tel. (011) 790966 - 793035
Fax (011) 790966

00155 ROMA
Viale P. Togliatti, 1463
Tel. (06) 4063824 - 4066787
Fax (06) 4066397 - Tlx 620156 TCSRDI I