

# **Euristica e intelligenza artificiale: un contributo alla personalizzazione degli apprendimenti**

di Lucio VARAGNOLO

Sommario:

Una breve premessa  
Informatica e intelligenza artificiale  
Intelligenza artificiale: breve excursus  
Qualcosa che sorprende: un prodotto del "Trio Dartmouth"  
General Problem Solver al lavoro  
Un prodotto interessante dell'IA "dura": i sistemi esperti  
Base di conoscenza  
Motore inferenziale  
Componente esplicativa  
Interfaccia utente  
Sintassi e semantica  
Rappresentazioni formali di LN  
Ambiguità  
Autoreferenza  
Risoluzione di problemi  
Rappresentazioni della conoscenza con sistemi di regole  
Rappresentazioni strutturate della conoscenza

Una breve premessa

Intendiamo esplorare, in questa sezione, ciò che l'informatica può offrire per imparare meglio non, naturalmente, l'informatica ma altre discipline ritenute, tradizionalmente, piuttosto lontane dall'informatica. Intendiamo analizzare, in modo particolare, le impostazioni di ricerca ancorate a quell'aspetto avanzato dell'informatica teorica denominato intelligenza artificiale (d'ora in avanti IA). Siamo più interessati, naturalmente, ad alcuni approcci, metodologie e strumenti utilizzati dagli esperti di IA nella soluzione di questioni inerenti problematiche relative al loro dominio disciplinare, e cercheremo di dimostrare come alcuni di questi strumenti e alcuni di questi approcci metodologici abbiano un inaspettato valore di innovazione educativa. Il nostro lavoro si articolerà nell'ambito di tre paradigmi di particolare interesse pedagogico costituenti altrettanti temi di ricerca in IA:

- a) La struttura formale dei Linguaggi Naturali e dei Linguaggi Artificiali e la loro traduzione.
- b) La rappresentazione della conoscenza e la sua importanza nell'ambito del processo di "problem-solving".
- c) I modelli di apprendimento.

Nel nostro paese (sembra un fatale destino), il dibattito inerente i rapporti fra informatica e apprendimento sembra oramai radicalizzato intorno a due poli ben precisi anche se talora guarniti da sofisticati "distinguo" quello dei sostenitori entusiastici (e, spesso acritici) e quello degli irriducibili contrari. Non si vuole qui sostenere la comoda tesi che "la verità sta nel mezzo" ma tentare di esplorare una prospettiva (forse) più flessibile e, sicuramente, più difficile. Tale prospettiva consiste nel tentare di mostrare come alcuni approcci metodologici, alcuni strumenti (linguistici) alcuni fatti, concetti, principi, alcune istanze procedurali abitualmente manipolati e rappresentati da chi si occupa professionalmente di informatica hanno un valore formativo che travalica l'interpretazione che ne danno gli stessi informatici, per assumere (e trasformarsi) in valenze ed obiettivi più generali riconoscibili senza esitazione come "formativi". "Effetto collaterale" (per usare una espressione tipica dell'informatica) indotto da tale prospettiva di ricerca, potrebbe essere la constatazione (sotto certi punti di vista "ovvia" ma per alcuni operatori specifici "sorprendente") di assonanze concettuali con altre discipline ritenute lontane dall'informatica in termini di fatti, concetti, principi e procedure che superano di gran lunga le (inevitabili) dissonanze concettuali individuabili tra esse. Cercheremo anche di mostrare come anche le dissonanze appena accennate possano, teoricamente, essere sfruttate in positivo per conseguire obiettivi cognitivi di sicuro rilievo.

E' noto che per anni non solo la gente comune ma anche autorevoli rappresentanti della comunità scientifica hanno propugnato l'idea che se un problema può essere enunciato in modo preciso, con uno sforzo che può essere più o meno grande, alla fine, una qualche soluzione si trova ( o almeno si riesce a fornire una prova convincente che una soluzione non esiste ed è questa la soluzione del problema).

Come non citare, ad esempio, la celebre utopia dovuta a David Hilbert (1862 - 1943) secondo cui i matematici erano sempre in grado di risolvere i loro problemi associando alle loro idee simboli, formule o segni e operando con essi secondo regole fissate dallo strumento assiomatico "imbrigliano" l'intuizione in rigorose catene deduttive.

"Ogni determinato problema matematico" egli sosteneva, "deve essere suscettibile d'una definizione rigorosa, sia mediante una risposta diretta alla questione posta, sia con la dimostrazione dell'impossibilità della risoluzione"

Egli lanciava dunque alla comunità dei ricercatori una sorta di appello: "Ecco un problema, cercane la soluzione. Essa è reperibile col ragionamento puro. Mai, in effetti, il matematico si ridurrà a dire: ignorabimus"

E' su questo versante la "dissonanza" cui accennavamo sopra, e che è indotta dall'avvento, nel rapporto "risolutore - risoluzione", di un esecutore formalizzato. Per il matematico puro gli oggetti esistono se sono definibili :

Ogni problema matematico definito (ogni funzionedefinita) deve per forza essere suscettibile di una soluzione esatta (può essere perfettamente calcolata)".

L'esecutore formalizzato induce nuove esigenze inerenti la "calcolabilità" effettiva delle funzioni "ben" definite (la risolubilità algoritmica dei problemi "ben" definiti). Fra trama concettuale della matematica e trama concettuale della informatica sono molto forti gli elementi di "assonanza" (che riguardano elementi isomorfi, che matematici e informatici maneggiano) e "dissonanze" come quella che abbiamo appena citato a titolo di esempio. La riflessione su tali connessioni è un terreno di lavoro didattico particolarmente importante e crediamo costituisca anche un apprezzabile stimolo di riflessione pedagogica.

## Informatica e intelligenza artificiale

«Risolubilità» e «risolubilità algoritmica» sono dunque cose fondamentalmente diverse. Lasciamo a matematici, informatici e filosofi dibattere le differenze tra risolubilità e risolubilità algoritmica (per noi, risolubilità algoritmica significa risolubilità legata ad una procedura eseguibile meccanicamente senza intuito e fantasia) qui constatiamo il contributo determinante e originale del pensiero informatico, soprattutto di quello di Alan Turing (1912-1954) che riusciva in un suo celebre saggio del 1936 a definire con rigore il concetto di procedura meccanica e a delineare con precisione, quindi ciò che si può "calcolare" senza necessità di intuito o creatività e come conseguenza ciò che non è computabile meccanicamente. Il binomio INFORMATICA - CALCOLATORI è qualcosa di difficile da intaccare. Associare questi due termini è qualcosa che spesso è naturale nei così detti "non esperti" ma che, almeno nei primi tempi, era abituale anche nel mondo della ricerca (una prova di questa preoccupante confusione è offerta, ad esempio, dalla stessa denominazione "computer science" che si attribuisce all'informatica nei paesi di lingua anglosassone).

Eppure questa associazione di idee non descrive completamente la realtà, ed è proprio per inquadrare senza equivoci i rapporti fra informatica e scienza cognitiva che riteniamo necessario qualificare la prima in modo forte come disciplina concettualmente autonoma dai calcolatori e dalla stessa programmazione. Fare ciò significa non solo dominare con maggiore generalità ciò che un calcolatore può fare e potrà mai fare, ma anche concepire modi razionali di "agire", "risolvere" e "calcolare" in ambienti (o, addirittura, mondi) possibili privi di calcolatori. Un esame (anche superficiale) della metodologia fondamentale di lavoro di un informatico, evidenzia con chiarezza che gran parte del suo talento e della sua energia sono dedicati allo sviluppo di formalismi descrittivi efficaci.

Un informatico chiede problemi e, concepitane la soluzione, cerca lo strumento migliore con cui descriverla a qualcuno (spesso il destinatario di questa comunicazione è un "calcolatore") servendosi di formalismi di comunicazione che questo qualcuno possa interpretare, con l'obiettivo che egli (o esso) intraprenda ordinatamente le azioni necessarie all'ottenimento di qualcosa che si denomina

risultato Se questa analisi è corretta, l'informatica più che "computer science" è scienza delle descrizioni e dei linguaggi descrittivi. Ciò, a detta di molti, la rende fonte inaspettata di innovazione educativa. Descrivere, dunque, è una delle preoccupazioni fondamentali di chi si occupa di informatica. La stimolazione delle capacità di descrizione è qualcosa che è rilevante sia per quelli che vengono definiti "programmatori" che per la comunità degli educatori in generale: la circostanza che si verifica è dunque quella di due comunità intellettuali che nelle società pre-informatiche si erano viste erigere muri invalicabili (come non ricordare il celebre "nessuno entri se non è geometra" attribuito a Platone ed esposto come cartello programmatico all'ingresso della sua scuola) hanno cominciato a trovare un terreno comune di ricerca e ad avere una visione meno dissociata del processo di formazione culturale e della distinzione fra cultura umanistica e cultura scientifica; questo terreno comune di ricerca è proprio il linguaggio che è lo strumento descrittivo per eccellenza.

Questo primo esempio di campo comune di ricerca fra le due comunità di studiosi si traduce in modo naturale in spunti didattici interdisciplinari di estremo interesse; il suo aspetto più appariscente è costituito dall'analisi inerente il problema della comprensione del linguaggio naturale. Certo, per l'informatico di professione il linguaggio è uno strumento, qualcosa che si "progetta", si utilizza e si dimentica per progettarne qualche altro che meglio si adatta al nuovo problema nel frattempo presentatosi. Ma già questa necessità di manipolazione linguistica è una chiara indicazione di "originalità pedagogica": l'avvento delle "macchine sintattiche" denominate calcolatori ha certamente enfatizzato i problemi concernenti la comunicazione, attraverso opportuni formalismi, delle strategie risolutive di situazioni problematiche.

La riflessione sul linguaggio come strumento di comunicazione, da questo punto di vista, cessa dunque di essere solo uno strumento dell'informatico per divenire stimolo di riflessione pedagogica sull'importanza nei processi cognitivi della capacità di formalizzazione, simbolizzazione e rappresentazione con linguaggi formali.

Dietro questa articolazione per ora piuttosto grossolana del lavoro informatico, si riesce ad intravedere un primo grande obiettivo educativo di natura generale riguardante la capacità del comunicare: saper valutare pregnanza, efficienza e limiti dei formalismi comunicativi (siano essi naturali o artificiali) e usare rappresentazioni formali o semiformali per la comunicazione inter-personale. Quale può essere la ragione dell'interesse degli informatici e dei ricercatori di intelligenza artificiale nei confronti dei linguaggi naturali?

I linguaggi di programmazione sino ad oggi proposti sono stati progettati per favorire il processo di comunicazione con gli esecutori artificiali che denominiamo computers e sono formalismi artificiali modificabili ed espandibili secondo le necessità dei progettisti ogni qualvolta essi immaginino qualche nuova caratteristica o possibilità

utile per semplificare particolari problemi inerenti la programmazione. E' ovvio che queste operazioni non sono possibili con LN.

D'altro canto non sono pochi gli indirizzi di ricerca tendenti a rendere i linguaggi di programmazione meno artificiali e più vicini quindi al LN. Tutto ciò nel tentativo di mettere le macchine programmabili a disposizione di sempre più vaste categorie di utenti. L'ideale, per questi ricercatori, sarebbe la produzione di qualcosa di simile ad un compilatore per il linguaggio naturale. Questo metterebbe l'utente in grado di "programmare" il computer usando la lingua di tutti i giorni. A questo riguardo i ricercatori stanno cercando di sviluppare teorie unificate della computazione che abbraccino sia i LN che quelli artificiali. La gamma dei prodotti software che, sino ad oggi, è stato il prodotto fondamentale di queste teorie è tanto vasto da rendere impossibile una rassegna esaustiva in questa sede. Ci limiteremo pertanto a proporre un primo tentativo di classificazione di tale gamma in quattro blocchi:

- programmi di traduzione automatica
- elaborazione dei testi
- risposta a interrogazioni (ad es. di basi di dati)
- sistemi di coordinamento complementari alla posta elettronica.

### Intelligenza artificiale un breve excursus

Nel titolo di questo saggio compare una espressione che a qualcuno potrebbe sembrare oscura o, addirittura, fuorviante: «Intelligenza Artificiale», non è, presumibilmente, lontano dalla realtà pensare che chi si accinge alla lettura di queste note abbia già un'idea di ciò di cui si occupa l'IA, tuttavia, per rispettare una prassi scientifica ormai consolidata tenteremo di sottoporre al lettore un certo numero di definizioni di IA per permettergli di farsi un'idea il più possibile precisa del campo di ricerca di questa disciplina che si è presentata alla ribalta dei tardi anni '50 come segno di contraddizione fra filosofi, matematici, logici, antropologi, linguisti, neuroscienziati e psicologi oltre che, naturalmente, informatici, scatenando entusiasmi e repulsioni vivacissimi, spesso non suffragati da adeguata scientificità. Una accettabile definizione di partenza potrebbe essere quella che vede l'IA come "lo studio delle facoltà mentali attraverso l'uso di modelli computazionali".

Chiariremo fra breve il significato dell'espressione "modelli computazionali" che compare in questa prima definizione dovuta a E. Charniak, avvisando subito il lettore che l'aggettivo "computazionale" ha, ovviamente, a che fare con quegli oggetti che "computano" (calcolano) e che noi chiamiamo computers. Si può dunque cominciare, almeno secondo questa impostazione, a congetturare l'esistenza di un binomio che, per molti, è quanto meno provocatorio: mente - computer. In effetti, i propositori dell'ormai mitico seminario del Dartmouth College di Hanover (1) ritennero doveroso evidenziare subito l'"idea forte" che li spingeva a riunire ricercatori di discipline così disparate (parteciparono infatti psicologi, matematici, ingegneri, logici, neurologi

ecc.); si legge infatti, nelle note organizzative del seminario: "Lo studio (si fa riferimento ai contenuti del seminario, naturalmente) deve svolgersi sulla base della congettura che ogni aspetto dell'apprendimento o qualsiasi altro carattere dell'intelligenza possa essere descritto in linea di principio con tanta precisione che si possa far sì che una macchina lo simuli".

Un primo risultato, non trascurabile, del seminario, fu una fertile idea di uno dei partecipanti, Marvin Minsky (del MIT), che riuscì a proporre, per la IA, una definizione di sintesi che raggiunse il non facile obiettivo di mettere d'accordo la maggior parte dei ricercatori presenti. In quella sede così prestigiosa egli sostenne che: «scopo delle IA è quello di produrre in un computer risposte che sarebbero considerate intelligenti se venissero fornite da un essere umano»

Anche questa impostazione, comunque, non era in grado di sopire le dure polemiche che subito si scatenarono e che videro i ricercatori schierati su due fronti: quello i cui principali esponenti furono John McCarthy (della Stanford University) e Marvin Minsky e che fu definita IA "dura" (hard) e quello i cui esponenti più significativi furono A. Newell e H. Simon (della Carnegie-Mellon University CMU) e che venne definito IA "debole" (soft).

Secondo l'impostazione "debole" la progettazione di programmi "intelligenti" è solo un mezzo per verificare teorie sul modo in cui esseri umani potrebbero eseguire operazioni cognitive. Ricaduta finale di questa teorie è la costruzione, appunto, di quelle "macchine" capaci di esibire comportamenti che sarebbero considerati intelligenti se fossero esibiti da esseri umani. Ma non ci si lasci ingannare, l'IA non è qualcosa che tenta di scimmiettare l'ingegneria, né ingegneria applicata, "perché", come sostiene Seymour Papert (MIT): "Per costruire tali macchine è necessario riflettere non solo sulla natura delle macchine ma sulla natura delle funzioni intelligenti che dovrebbero essere svolte. Per esempio, per creare una macchina che possa ricevere istruzioni in linguaggio naturale, bisogna esaminare a fondo la natura del linguaggio. Per creare una macchina capace d'imparare, si deve studiare a fondo la natura dell'apprendimento".

Secondo l'impostazione "forte" l'IA è un campo di ricerca nuovo che ha l'obiettivo di far sì che i calcolatori possano pensare, non semplicemente imitare l'intelligenza o di produrne una copia simile a essa solo in apparenza.

"L'IA vuole solo originali" sostiene John Haugeland, "macchine dotate di mente in senso pieno e letterale". Secondo questa concezione, il computer opportunamente programmato è davvero una mente, nel senso che si può dire che i computers nei quali sono stati introdotti programmi adeguati capiscano e abbiano veri e propri stati cognitivi. I programmi "adeguati" (come li abbiamo appena chiamati) non sono dunque, come dice John Searle, "semplici strumenti che consentono di verificare spiegazioni psicologiche ma sono essi stessi le spiegazioni". Anche la definizione

dovuta a Minsky, che abbiamo appena proposto, pur essendo, come dicevamo, condivisa dalla maggior parte degli "addetti ai lavori", purtroppo contribuisce a risolvere la disputa che è evidentemente centrata sul concetto di intelligenza, e la definizione di Minsky non aggiunge nulla a quanto già sappiamo (o crediamo di sapere) su cosa sia l'intelligenza umana.

Lo stesso ricercatore del MIT, conscio del limite della sua asserzione si "giustificava" così: "non ritengo utile dare una definizione assoluta di intelligenza e di comportamento intelligente, poiché i nostri obiettivi nel cercare di progettare "macchine pensanti" cambiano di continuo, in relazione al crescere delle conoscenze in quest'area particolare che è in costante sviluppo" .

Dietro il ragionamento apparentemente brutale di Minsky, c'è una acuta osservazione che occorre esplicitare: ogni volta che i ricercatori riescono a costruire un sistema che fornisce prestazioni sino ad allora fornite solo da soggetti umani grazie alla loro intelligenza, si comincia subito a dubitare che tali prestazioni fossero davvero intelligenti ("se ci riesce anche una macchina ...") e quindi, il sistema appena costruito non costituisce più un esempio credibile di applicazione di IA. "Molti", sostiene Minsky, "contrari a tale indagine, affermano che la creatività (o l'intelligenza) è una sorta di "dote" che, semplicemente, non è suscettibile di essere spiegata o meccanizzata". "Non appena un processo o un'attività specifica" continua il ricercatore americano, "sono meccanizzati o in qualche modo spiegati, essi devono essere tolti -con giustificazioni e scuse- dall'elenco dei comportamenti creativi. E su questo non ci possono essere dubbi, poiché quando un processo è meccanizzato non c'è più bisogno di termini come "creativo" per descriverlo e anche noi lo togliamo dalla lista delle prestazioni intelligenti". In questo ambito si distingue abbastanza facilmente il programma di lavoro dei fautori della IA "dura" in una sorta di proverbio: "non cerchiamo alcuna risposta definitiva a domande come che cos'è l'intelligenza, e come può essere meccanizzata. Il giudizio su cosa sia intelligente e cosa non lo sia, rispecchia ciò che comprendiamo, e non ciò che noi, o le macchine, possiamo fare. Cerchiamo, invece, modi nuovi e migliori per conseguire prestazioni che, al momento, rientrino nella lista dei comportamenti intelligenti".

Crediamo non sia scorretto (anche se, forse, un po' riduttivo) affermare che nella IA "hard" prevale una certa attenzione alla componente tecnologica: progettare, cioè, macchine che facciano certe cose più velocemente e con maggior precisione di quanto non facciano gli stessi uomini. Nella IA "soft" si ha, invece, più interesse per gli aspetti cognitivi per la loro simulazione e, in particolare, per la simulazione dei comportamenti intelligenti. Esistono, per la verità, altre due impostazioni interessanti del problema di cui stiamo occupando. Una, a nostro parere in equilibrio fra la concezione "hard" e quella "soft" è espressa da questo pensiero di D. Michie: "se possiamo formulare una teoria sufficientemente completa e precisa di ogni aspetto dell'intelligenza, allora possiamo anche convertirla in un programma per computer. Il programma stesso costituisce un'espressione della teoria, ma dovrebbe anche, se la

teoria è valida, avere il potere di far manifestare al computer un comportamento interamente simile a quel che la teoria pretende di saper descrivere".

L'altra è rappresentata dal concetto di mente e di comportamento intelligente espresso dai ricercatori che si ispirano al modello connessionista secondo il quale non si può capire (né tanto meno simulare) la mente e la intelligenza (prescindendo dall'organo che le supporta, dalla sua costituzione, dalla sua architettura e dal suo modo di funzionare. Primi risultati. Potrà sembrare improbabile, ma nonostante le accese opposizioni sin qui raccontate, i primi anni di lavoro dei ricercatori furono coronati da successi notevoli e, per certi aspetti, sorprendenti.

Due dei partecipanti al seminario di Dartmouth, Allen Newell e Herbert Simon stupirono (e inquietarono) l'opinione pubblica col loro programma chiamato Logic Theorist (d'ora in avanti LT). LT è un prodotto estremamente interessante perché nasce come risultato del forte interesse dei due ricercatori per il modo con cui gli esseri umani affrontano i problemi. LT era un "dimostratore di teoremi", il suo campo specifico era la logica simbolica. Il programma conteneva:

- una lista di assiomi;
- un elenco di teoremi già dimostrati in precedenza;
- un insieme di regole di operazioni basilari.

LT riceveva in ingresso una espressione logica a lui sconosciuta e l'ordine di scoprirne una dimostrazione. Messo di fronte al ponderoso capitolo 2 dei Principia Matematica di Russel e Whitehead riuscì a dimostrare 38 dei primi 52 teoremi ivi contenuti; Russel stesso rimase "deliziato" dal modo di procedere di LT. L'interesse da parte degli scienziati interessati al modo di operare della mente umana fu ulteriormente stimolato dal fatto che Newell e Simon (insieme e a Cliff Shaw della Rand Corporation) riuscirono a far concentrare l'attenzione degli studiosi sul fatto che il modo di "ragionare" della macchina non era solo pensiero di tipo generico, bensì, piuttosto, il tipo di pensiero in cui si impegnano gli esseri umani. LT lavorava infatti, per mezzo di procedure che secondo i suoi propositori erano analoghe a quelle usate dai risolutori umani di problemi simili. I pilastri di questa analogia, come vedremo, sono corrispondenti a 3 capacità possedute da LT:

- sostituzione di un tipo di espressione a un'altra;
- modo di procedere a ritroso da qualcosa che è già stato dimostrato a qualcosa che si deve dimostrare;
- una forma sillogistica di ragionamento in virtù della quale se "a implica b" è vera e "b implica c" è vera allora è vera anche "a implica c".

In ogni caso, la valenza concettuale di LT non sta tanto nelle dimostrazioni che esso è in grado di produrre quanto nel come il programma le produce e si colloca quindi come un vero e proprio programma di simulazione del comportamento umano

(sarebbe interessante, da questo punto di vista, esaminare alcuni lavori successivi del "trio" di Dartmouth che delineano con maggiore precisione l'idea dell'uomo come "elaboratore di informazioni") interessante quindi sia per gli scienziati dell'uomo che per quelli del computer. Una possibile strategia risolutiva potrebbe essere quella che Newell e Simon chiamarono Algoritmo del British Museum (BMA = British Museum Algorithm) (2) un metodo, cioè, secondo il quale si dimostrano teoremi esaurendo tutte le possibilità combinatoriche dei simboli dati. Il problema principale, secondo questa strategia, è il tempo, che potrebbe essere anche di lunghezza impensabile. LT adotta, invece, una semplice regola euristica: "applicare un operatore se il risultato della sua applicazione equivale a produrre una nuova espressione che assomiglia alla espressione finale più della precedente".

Qualcosa che sorprende: un prodotto del "trio di Dartmouth"

GPS sta per "General Problem Solver" (risolutore generale di problemi) e fu, nei primi anni '60 un paradigma leggendario, frutto, ancora una volta, dell'interesse del "trio" di Dartmouth per il modo con cui gli esseri umani si atteggiavano di fronte ai problemi. GPS fu, infatti, il risultato di una ricerca avente due obiettivi fondamentali: allestire macchine capaci di risolvere problemi richiedenti intelligenza; sviluppare una teoria di come gli esseri umani risolvono tali tipi di problemi. Non si può certo dire che i due obiettivi siano stati raggiunti tanto che nella versione definitiva di Ernst e Newell nel 1969, si cercò di orientare la ricerca sbilanciandola verso il primo dei due obiettivi. Per poter lavorare con GPS era necessario fornirgli: le descrizioni degli stati iniziali del mondo da cui il problema era estratto; le descrizioni degli stati finali dello stesso mondo; gli operatori che consentono di trasformare gli oggetti precedenti. GPS fu il primo paradigma di Problem-Solving in cui si assisteva a una netta separazione fra metodi generali di risoluzione di problemi e conoscenze specifiche sul tipo di compito cui si deve assolvere.

Questo significa che la così detta parte di "Problem-Solving" del sistema non forniva alcuna informazione sul tipo di compito sul quale stava lavorando, ciò significava proporre la possibilità di usare uno stesso meccanismo per lo svolgimento di una quantità di compiti diversi con uno sforzo di ristrutturazione minimo. La concorrenza inerente il compito da assolvere era "accumulata" in strutture di dati "costituenti un ambiente di lavoro". Fra le strutture dati si trovano fondamentalmente: oggetti e operatori per modificare gli oggetti. Il problema da risolvere veniva fornito a GPS sotto forma di un oggetto iniziale e di un oggetto desiderato (obiettivo da raggiungere, soluzione). Contributo fondamentale di GPS nell'area dei modelli metodologici di risoluzione di problemi è stato, di certo, la tecnica in esso utilizzata e denominata "analisi mezzi-fini" (means-end analysis); essa assume che le differenze fra l'oggetto corrente e l'oggetto desiderato possano essere definite e classificate in "tipi" e che gli operatori possano essere classificati in accordo ai tipi di differenze che essi possono ridurre. La metodologia denominata "analisi mezzi-fini" si esplicita

attraverso una serie di procedure che, in gergo, sono chiamate "metodi". Per ogni tipo di obiettivo c'è un metodo. Questi metodi generano sotto-obiettivi e richiedono sistemi appropriati per produrre questi sotto-obiettivi. Così, ciascun metodo può richiamare se stesso e gli altri secondo livelli progressivi di ricorsività. Se si vuole operare nel senso di trasformare un oggetto in un altro applicando certi operatori, avremo anche bisogno di un metodo per riconoscere se due oggetti sono identici o, se non lo sono, per capire in che modo differiscono.

Sostanzialmente GPS fornisce, a fronte di ogni problema di ragionamento informale una struttura che contenga i seguenti elementi: una classe di oggetti; una lista di operatori; un processo che consenta di identificare le principali differenze fra due oggetti o due gruppi di oggetti; una "tabella di collegamenti" che indichi quali differenze ogni operatore possa modificare (eventualmente "ridurre"). Lo specifico oggetto o gruppo di oggetti che rappresenta la situazione iniziale e lo specifico oggetto o gruppo di oggetti che rappresenta ciò che vogliamo ricavare. GPS nella sua prima versione consisteva, fondamentalmente di due procedure strettamente collegate:

1. Per trasformare l'oggetto A nell'oggetto B:
  - a. identifica la differenza principale tra i due oggetti (se non esiste differenza, la trasformazione è completata).
  - b. scegli l'operatore più adeguato nella tabella dei collegamenti.
  - c. applica l'operatore dell'oggetto A. Chiama C l'oggetto risultante.
  - d. trasforma l'oggetto C nell'oggetto B.
  
2. Per applicare un operatore ad un oggetto:
  - a. trasforma l'oggetto in un oggetto a cui possa essere applicato l'operatore.
  - b. svolgi l'operazione, producendo un nuovo oggetto.

### General Problem Solver al lavoro

L'aspetto fondamentale di GPS, come abbiamo visto, è la valutazione delle differenze fra stati-correnti e stato-obiettivo e la conseguente scelta di operatori che possano ridurre tale differenza. Può, naturalmente, succedere che riconosciuta una differenza fra Stato Corrente ( $S_c$ ) e Stato Obiettivo ( $S_o$ ) e individuato un possibile operatore di riduzione di tale differenza ( $S_c, S_o$ ), questo operatore può non essere applicabile direttamente ma, ad esempio, può essere applicabile ad uno stato diverso da  $S_c$  ma un po' più da vicino a  $S_o$  (lo chiameremo stato adiacente  $S_a$ ).

Questo stato adiacente si dice che soddisfa la situazione di prerequisito per l'applicazione della procedura. Il raggiungimento di  $S_a$ , rappresenta un nuovo problema del tutto analogo a quello di raggiungere  $S_o$  da uno stato iniziale. Il nuovo problema viene risolto servendosi di GPS, naturalmente. Questa nuova applicazione

di GPS considera lo stato corrente come stato iniziale e lo stato adiacente come stato obiettivo.

Un esempio: supponiamo che zia Amelia che vive a Reggio Calabria abbia invitato Nestor, il robot cameriere della nostra casa di Venezia, a trascorrere qualche giorno con lei. I modi per raggiungere Reggio da Venezia sono numerosi e così Nestor deve disporre di un metodo per selezionarne uno in ogni momento del viaggio. Nestor decide di servirsi di un approccio GPS e deve così disporre di una procedura che lo informi circa le differenze fra stati e di procedure che consentono di ridurre le differenze fra stati. Le differenze di Stato sono espresse in termini di distanze geografiche; le procedure di riduzione possibili sono:

- volare
- prendere il treno
- guidare l'auto
- prendere il taxi
- camminare.

Si serve di una tabella di collegamenti per decidere quale procedura usare. Esaminando la tabella Nestor si accorge che, essendo delta  $>800$  km il mezzo suggerito è l'aereo, l'operatore suggerito è dunque volare. L'uso dell'operatore "volare" ha però un prerequisito: trovarsi all'aeroporto. Trovarsi all'aeroporto può essere considerato stato adiacente. Ora "trovarsi all'aeroporto" diviene lo stato obiettivo dell'applicazione di una nuova procedura GPS. La distanza fra Nestor e l'aeroporto è 15 km così la tabella suggerisce l'uso dell'automobile. Questa scelta ha un altro prerequisito "essere alla macchina", la distanza fra Nestor e la macchina è minore di 2 km quindi ci suggerisce l'uso dell'operatore: "camminare", "camminare" non ha prerequisiti per cui Nestor cammina fino al garage e guida fino all'aeroporto.

Il processo di risoluzione del problema seguito da Nestor è denominato forward chaining (concatenazione in avanti). Connessa con questa strategia vi è quella di ricerca degli stati per esplorare le differenze. Crediamo "autoesplicativa" la denominazione della metodologia di GPS e l'abbiamo anche sperimentata nei due esempi precedenti; in pratica, essa si esplica attraverso quella serie di procedure che, come dicevamo, in gergo, si chiamano metodi.

Per ogni tipo di obiettivo c'è un metodo. Questi metodi generano sotto-obiettivi e richiedono sistemi appropriati per produrre questi sotto-obiettivi. Così ciascun metodo può richiamare se stesso e gli altri secondo livelli progressivi di ricorsività. Quando GPS viene utilizzato per risolvere un problema si comincia a generare una serie piuttosto complicata di chiamate ricursive ai metodi che abbiamo prima delineato. Naturalmente è necessario disporre di un metodo chiaro per descrivere l'andamento della ricerca degli operatori per modificare gli stati del mondo problematico sottoposto a GPS. La strategia di ricerca di GPS può essere classificata

senza timore di errori, come strategia di riduzione a sottoproblemi; abbiamo visto che tale strategia consiste nel sostituire l'obiettivo principale con una serie di sotto-obiettivi ancora più semplici, finché non si arriva ad avere solo sotto-obiettivi banali. Abbiamo già visto come una strategia di riduzione a sotto-problemi possa essere sempre rappresentata con alberi di ricerca "and" "or".

Nel proporre GPS come paradigma, si è anche avanzata, nella comunità dei ricercatori, l'idea che esso abbia anche una certa validità come teoria psicologica alla risoluzione di problemi nell'uomo. C'è da domandarsi se sia possibile verificare questa ipotesi. Noi crediamo che l'unica verifica credibile possa essere individuata dopo aver chiaramente individuato il livello a cui si considera, esplicita la teoria supportata da GPS. Crediamo che il livello più serio (forse è l'unico livello) a cui si possa effettuare il confronto è quello del livello di elaborazione dell'informazione. Si può verificare questa affermazione confrontando i "protocolli risolutivi" di GPS e di un risolutore umano alle prese con la stessa situazione; risulta con una certa evidenza che, sostanzialmente, entrambi abbiano condotto una ricerca su uno stesso albero and - or Per tranquillizzare gli ammalati di "complesso di Frankenstein", sottolineeremo come GPS non abbia avuto successo pratico. Il prodotto soffre, infatti, di alcuni gravi difetti:

- l'immensa quantità di informazioni che doveva essere fornita per ogni specifico problema.
- ruolo limitato che GPS svolge attivamente

La tendenza della ricerca attuale in IA è quella di costruire sistemi che siano "esperti" in aree di ragionamento di senso comune.

Un prodotto interessante della IA "dura": i sistemi esperti

Non è possibile, neppure al livello in cui ci collochiamo in questo saggio, trascurare il prodotto più significativo della IA "hard": i così detti sistemi esperti (d'ora in avanti "SE". Una locuzione più corretta e forse più significativa potrebbe, in realtà, e per ragioni che vedremo più avanti, essere "sistemi basati sulla conoscenza"); i SE, infatti, hanno avuto un impatto sociale così importante da non poter essere trascurati neppure da quei ricercatori interessati solo all'uomo e minimamente al computer; d'altronde, assodato che i SE sono progettati con il preciso obiettivo di sostituire gli esseri umani in determinati compiti, è importante ribadire che essi appartengono alla scienza del calcolatore, non a quella della mente.

I SE sono il risultato più notevole di 30 anni di ricerca; solo negli ultimi anni, comunque, questi prodotti sono usciti dall'ambito prettamente sperimentale per proporsi come prodotti commerciali diffondendosi a partire dall'iniziale gruppo di utenti specialisti ristretti verso strati sempre maggiori di utilizzatori meno

alfabetizzati dal punto di vista informatico. Non è facile dare una definizione di SE. Il compito generalmente attribuito a questo tipo di prodotti è quello di coadiuvare utenti professionali nella soluzione di questioni che, usualmente, richiedono la consulenza di una persona con esperienza in una particolare e ristretta area applicativa; tali sistemi, almeno da un punto di vista teorico, mettono a disposizione la loro "competenza" consentendo di lavorare nel modo più soddisfacente possibile per la soluzione di problemi particolari e limitando così l'importanza della presenza specifica dello specialista.

Tutti sanno che qualunque programma per computer incorpora in sé un certo tipo di conoscenza inerente l'applicazione per la quale è stato costruito; i sistemi basati sulla conoscenza, utilizzano invece, la conoscenza in modo certamente più attivo di quanto non succeda nei programmi così detti convenzionali. La differenza fra i sistemi tradizionali e quelli basati sulla conoscenza ripercorre un po' la differenza proposta da KSeneca nelle sue "lettere a Lucillo" fra ricordare e conoscere: "ricordare è prelevare qualcosa di affidato alla memoria conoscere, invece, è costruire da sé ogni elemento indipendentemente da un modello e con l'occhio costantemente rivolto all'insegnante".

L'opinione di Seneca è certamente un autorevole contributo che caratterizza con una certa chiarezza i sistemi basati sulla conoscenza:

- la conoscenza è dunque qualcosa di più attivo del semplice "ricordare"
- la conoscenza non dipende da un modello prefissato ma può essere applicata in modi nuovi a situazioni nuove;
- per trasferire conoscenza è necessario un "docente", ma chi "conosce" dovrebbe possedere la capacità di usare la conoscenza senza una guida esterna.

Un programma convenzionale segue "ciecamente" un insieme fissato di istruzioni e non ha alcuna possibilità di adattarsi ad eventuali cambiamenti di situazioni circostanti. I SE hanno invece la capacità di acquisire conoscenze degli esperti e applicarle dinamicamente in circostanze diverse. Un SE simula dunque il comportamento di un esperto umano; la simulazione è, generalmente, piuttosto grossolana ma comunque accettabile nell'assolvimento di compiti ristretti per i quali un professionista potrebbe impiegare tempi talora notevoli. In un programma convenzionale la conoscenza non è rappresentata in modo esplicito e non è mai separata dalle procedure dettagliate che controllano ingressi, uscite e computazioni; ogni atto nuovo realizzatosi nella realtà controllata dal programma obbliga, in pratica, alla riscrittura del programma stesso.

In un sistema basato sulla conoscenza si ha una netta separazione, come dicevamo, fra i passi computazionali, il flusso del controllo e il loro inserimento in tabelle di regole non procedurali. Esso è, generalmente, in grado di fornire all'utente una giustificazione delle conclusioni raggiunte consentendogli così un controllo della

logica interna del sistema. L'utente ha dunque la possibilità di chiedere al sistema "perché" è stata fatta una certa deduzione. La costruzione di un SE è, tipicamente, un lavoro di équipe nella quale spiccano, in modo particolare, due professionalità ben definite:

[1] l'ingegnere della conoscenza che ha il compito di raccogliere e formalizzare l'expertise dell'esperto del settore specifico e organizza la conoscenza secondo particolari schemi di rappresentazione.

[2] l'esperto disciplinare è uno specialista nella risoluzione di problemi nell'ambito di un particolare settore applicativo; egli ottiene la soluzione di problemi specifici della disciplina in base alle sue conoscenze ed esperienze ma anche in base ad euristiche e (a volte personalissime) che facilitano e rendono più efficiente la strategia risolutiva.

Non bisogna dimenticare, naturalmente, la figura dell'utente; di colui, cioè, che introduce nel SE fatti e ipotesi con gradi diversi di certezza allo scopo di ricevere consigli ma anche di porre domande inerenti il particolare problema e ottenere risposte con un certo grado di affidabilità. Il mezzo di comunicazione fra utente e SE è costituito da vari tipi di "interfacce" costruiti grazie all'uso di strumenti e ambienti di programmazione e linguaggi formali, quasi sempre sottoinsiemi del linguaggio naturale, utilizzando grafica, generazione e riconoscimento del LN tendenti a consentire all'utente una comunicazione agevole e amichevole col SE. Possiamo ora tentare di delineare, seppure per sommi capi, l'architettura di un SE. Quello che delineeremo ha come scopo fondamentale convincere ulteriormente chi legge della evidente separazione nel SE, fra conoscenza (fatti, concetti regole ed euristiche) e meccanismi utilizzati per elaborarla.

Fanno parte dell'architettura di un sistema esperto:

- la base di conoscenza: un insieme di fatti, concetti, regole ed euristiche, inerenti il campo disciplinare specifico;
- il motore inferenziale: l'oggetto capace di imitare in maniera più o meno efficiente la strategia con la quale l'esperto si accinge alla risoluzione di un problema;
- la componente esplicativa: spiega all'utente la strategia di risoluzione intrapresa;
- l'interfaccia utente: consente all'utente la possibilità di consultare SE con un formalismo molto vicino al linguaggio naturale;
- il modulo (o i moduli) di acquisizione della conoscenza: l'oggetto che assiste nella strutturazione e nell'inserimento della conoscenza nella base di conoscenza.

Base di conoscenza

Crediamo utile delineare le caratteristiche salienti degli elementi costituenti, la "base di conoscenza"; in ogni caso, il discorso sarà approfondito nel corso del capitolo. Gli psicologi hanno strutturato la "conoscenza" in livelli: fatti che sono il livello più

basso della conoscenza; concetti che sono costituiti da una maggiore quantità di dettagli rispetto ai fatti; regole: che sono costituite da insiemi di passi e operazioni usati per raggiungere un obiettivo. La base di conoscenza contiene tutti i fatti, le regole, le procedure specifici del settore applicativo importanti per la risoluzione del problema. I fatti sono asserzioni del tipo: "la maxima torneo pesa 630 grammi" La rappresentazione di questa conoscenza (inerente, nel caso specifico, una racchetta da tennis) è possibile, ad esempio, tramite l'utilizzo di oggetti. Gli oggetti appartenenti a una base di conoscenza potrebbero essere:

- racchetta da tennis
- mazza da baseball
- bastone da golf
- bastone da hockey
- racchetta da badminton
- racchetta da squash
- altro...

fra questi oggetti esistono delle relazioni che denotano, ad esempio, che una racchetta da badminton possiede tutte le proprietà di un oggetto per colpire (di un bastone da golf, di una racchetta da tennis ecc.) ma ha in più le peculiarità di una racchetta da badminton (ad esempio il peso di 140 grammi, le corde di un certo materiale e in un certo numero ecc.).

Tutte le proprietà di una racchetta da badminton, come, ad esempio, quella di essere usata per colpire una palla, vengono descritte dall'oggetto "oggetto\_per\_colpire" tramite la relazione di appartenenza della racchetta da badminton alla classe oggetto\_per\_colpire. Tramite questa relazione di appartenenza, le proprietà della classe vengono "ereditate", come vedremo meglio fra breve, dall'oggetto specifico. Oltre che degli oggetti, la base di conoscenza dispone, come abbiamo poco fa sottolineato, di un insieme di regole del tipo:

se <Kpremissa> allora<Kazione>

nella <premissa> vengono esaminate le connessioni logiche relative alle proprietà degli oggetti. Nella <azione> vengono inseriti nuovi fatti e nuove proprietà nella base di conoscenza o, semplicemente, vengono eseguite delle azioni.

## Motore inferenziale

E l'oggetto costruito per simulare la strategia risolutiva dell'esperto umano; è, sostanzialmente, l'unità logica tramite la quale si estraggono conclusioni dalla base di conoscenza. Le conclusioni vengono tratte, dove possibile, applicando ai fatti qualche regola possibile. Una regola è applicabile ad un fatto quando la sua premessa

coincide con quel fatto. Una possibile regola potrebbe essere: se ( p e q ) allora r. Supponiamo che si siano verificati i fatti p e q, in questo caso la premessa della regola fa proprio riferimento ai fatti che si sono verificati. La regola può dunque essere applicata, e la sua applicazione consente di dedurre il nuovo fatto r che va ad arricchire la base di conoscenza. In questo caso la sinergia di motore inferenziale e base di conoscenza:

- confronta regole con fatti RX: se p e g allora r
- decide di applicare Rx e la attiva attiva Rx pq
- aggiunge r alla base di conoscenza r (nuovo) non è difficile delineare i compiti del motore inferenziale:
- stabilisce quali azioni devono essere eseguite coinvolgendo ordinatamente le singole componenti del SE;
- stabilisce il momento e il modo di applicazione delle regole;
- gestisce l'interfaccia con gli utenti

Il motore inferenziale seleziona le regole applicabili ed effettua le deduzioni servendosi di un certo numero di strategie alcune delle quali saranno esaminate più avanti quando considereremo le metodologie di ragionamento usate nel processo di risoluzione di problemi.

### Componente esplicativa

E' la possibilità, offerta all'utente, di porre domande al SE sulle fasi di elaborazione della soluzione del problema; ad esempio l'utente può avere interesse a sapere:

- la ragione per la quale il sistema pone certe domande
- com'è pervenuto il sistema a una certa soluzione parziale
- quali sono le proprietà possedute dai singoli oggetti
- ecc.

### Interfaccia utente

Determina i protocolli con cui il sistema interagisce con l'utente; con quale sintassi l'utente deve formulare le risposte; in quale forma le risposte del sistema alle domande dell'utente vengono fornite all'utente stesso; con quale strumentazione grafica vengono espresse le informazioni. E' innegabile che gran parte dell'eventuale successo di un SE dipende dal livello di amichevolezza e semplicità d'uso da parte dell'utente. Per il tipo di considerazioni didattiche che vogliamo operare in questo lavoro ci occuperemo di quello, fra i quattro blocchi, che sembra il più tecnico: la traduzione automatica da una lingua all'altra, tema nel quale rientra di certo la traduzione da LN a linguaggio dell'elaboratore.

## Sintassi e semantica

C'è qualcosa di comune nello studio dei linguaggi (siano essi naturali o artificiali); la suddivisione di esso in due aree principali: la sintassi e la semantica. La sintassi, come noto, tratta della struttura formale delle stringhe di simboli che costituiscono le frasi del linguaggio indipendentemente dal loro significato. Gli elementi atomici elementari del linguaggio possono venir combinati solo in certi modi, seguendo le prescrizioni di un insieme di regole dette grammatica del linguaggio. Compito essenziale della analisi sintattica è quello di decidere se una certa frase appartiene al linguaggio descritto da una certa grammatica. C'è un primo, interessante, tema didattico in questa frase: la percezione della possibilità di descrivere con uno strumento finito come una grammatica, un insieme costituito da infiniti elementi come è il linguaggio. "Ogni LN ha un numero di frasi potenzialmente illimitato" sostiene KN.Chomsky [Chomsky, '57] "anche se il numero dei suoni e delle parole è finito il numero dei modi in cui possono essere posti assieme è infinito". Non è difficile convincere chiunque di questa proprietà di LN; gli esempi di taglio didattico non mancano di certo e hanno un rango di variabilità che va da quelli che denotano la sua creatività

Gigi lancia una palla  
Gigi lancia due palle  
Gigi lancia tre palle

e si potrebbe continuare, ben al di là della resistenza di Gigi, all'infinito; ma anche così l'elenco costituirebbe una piccolissima frazione delle frasi possibili in italiano ...a quelli (come certe filastrocche popolari sull'esempio di quella che ha come tema conduttore "alla fiera dell'est") che mostrano come da certe frasi se ne possano creare altre nuove aggiungendo parole, sintagmi, subordinate ecc.

La grammatica è l'insieme delle regole che descrive il processo di generazione delle frasi della lingua. Anche in questo caso non è difficile convincere che le frasi non vengono create riunendo casualmente delle parole. Consideriamo, ad esempio, la frase:"basta con i botti di fine anno" costituita da 7 parole; ci sono  $7! = 5040$  modi diversi di riordinare 7 parole. Di questi possibili 5040 modi la stragrande maggioranza non costituisce delle frasi; ad esempio, non lo è la "con i basta di botti anno fine" Ogni lingua possiede un insieme di regole che limita i modi con cui le parole stesse possono essere disposte, determinando così quelle che possono essere ritenute frasi.

Le regole linguistiche sono descrittive, non prescrittive; allo stesso modo con cui le leggi del moto dei corpi celesti sono regole che descrivono i moti dei pianeti, le regole del linguaggio descrivono gli schemi seguiti dai parlanti quel linguaggio. Per la maggior parte di noi, l'uso di queste regole è automatico e inconscio, come le regole che usiamo per camminare. Riconoscere e far riconoscere il ruolo di una

grammatica nel realizzarsi dei processi di comunicazione linguistica è un obiettivo didattico certamente non trascurabile. Per raggiungere tale obiettivo si può guidare l'attenzione dell'allievo verso i linguaggi che egli di certo manipola e che sono diversi da LN e far risaltare le regole grammaticali sottostanti.

### Rappresentazioni formali di (LN)

La più semplice forma di grammatica per un linguaggio (sia esso naturale o artificiale), consiste nell'elenco esaustivo di tutte le frasi consentite in esso. Possedendo un elenco di questo genere, il lavoro di analisi sintattica sarebbe enormemente agevolato: decidere se una certa frase appartiene, o meno, al linguaggio descritto da una certa grammatica significherebbe semplicemente consultare l'elenco degli enunciati ammessi, confrontandoli ordinatamente con quello da analizzare, rispondendo "s" se esso coincide con qualcuno di essi, "no" altrimenti. Sfortunatamente i linguaggi ai quali siamo interessati comprendono un numero talmente elevato di enunciati da rendere il lavoro precedentemente delineato praticamente improponibile. Il modo più comune di rappresentare un numero infinito di enunciati per mezzo di un numero finito di regole consiste nell'utilizzare una grammatica a struttura di frase. In essa ogni regola ha una struttura formale ben definita:  $A \rightarrow \hat{\alpha}$ , dove A è un simbolo e  $\hat{\alpha}$  è una stringa di simboli, e significa che la stringa di simboli alla destra della freccia può sostituire il simbolo alla sua sinistra. Alcuni simboli, denominati terminali non appaiono mai alla sinistra di una freccia.

Lo schema che segue mostra una semplice grammatica a struttura di frase che è una grossolana approssimazione di un limitatissimo sottoinsieme della lingua italiana. Nello schema, i numeri che etichettano le regole hanno, naturalmente, funzione puramente indicativa. L'uso di una tale grammatica può essere paragonato ad una specie di gioco: si inizia col simbolo di partenza (usualmente F dove F sta per "frase") sostituendolo con una qualunque delle stringhe consentite dalle regole.

Ad F, nel nostro caso, si può applicare solo la regola 1:  $F \rightarrow S P$  (S = soggetto; P = predicato). Il significato della regola 1) può essere espresso così: "una frase (F) può essere costituita con un soggetto (S) seguito da un predicato (P)".

Si può, naturalmente, proseguire sostituendo ogni simbolo nella stringa così ricavata seguendo una delle regole applicabili per produrre una nuova stringa. Il gioco continua (esercitando il diritto di scelta fra più alternative) fino a quando si arriva ad avere una stringa che contenga solo simboli terminali. Saranno considerate frasi appartenenti al linguaggio descritto dalla precedente grammatica L solo quelle prodotte seguendo le regole del gioco prima delineate. Per mostrare, ad esempio, che la stringa "bimbo mangia le fragole in giardino" è ammessa da L esibiamo la seguente derivazione, secondo la quale ogni riga è derivata da quella precedente impiegando la regola indicata:

F -> S P (1)  
 ---> A SO P (2)  
 ---> il SO P (9)  
 ---> il bimbo P (42)  
 ---> il bimbo V S GA (7) (GA = gruppo avverbiale)  
 ---> il bimbo mangia A SO GA (3)  
 ---> il bimbo mangia le SO GA (13)  
 ---> il bimbo mangia le fragole GA (40)  
 ---> il bimbo mangia le fragole PRE S (8)  
 ---> il bimbo mangia le fragole in S (50)  
 ---> il bimbo mangia le fragole in SO (4)  
 ---> il bimbo mangia le fragole in giardino (41)

Si è giunti ad una stringa che contiene solo simboli terminali; il processo di generazione è terminato. Si osservi, comunque, che è possibile generare anche frasi scorrette come: "la bimba mangia i fragole", ad ulteriore conferma della approssimatività di L.. Invece di scrivere ognuno di questi passaggi, di solito, si riassume una derivazione di questo genere usando un diagramma ad albero.

Una macchina chiamata ad effettuare l'analisi sintattica di una frase deve, in pratica, cercare di costruire un albero sintattico la cui frontiera contenga solo i simboli terminali della frase da analizzare e i cui nodi intermedi sono simboli (per la verità "meta" simboli) con funzione di "categorie sintattiche". E' chiaro che questo lavoro può esibire, in funzione della complessità della grammatica, una complessità notevole, ai limiti della impraticabilità (nel senso che i tentativi di scelta di una regola possono essere più volte modificati nel caso che non si riesca a collocare correttamente il simbolo terminale in esame) in termini di tempo di generazione dell'albero sintattico. Lo strumento formale che abbiamo appena presentato è retto su un importante meccanismo cognitivo: il concetto di regola di sostituzione. Questo concetto consente un importante tipo di esperienze di apprendimento che hanno come "idea portante" quella di capire e maneggiare strutture e relazioni all'interno di domini diversi.

Non è difficile notare l'equivalenza strutturale di un tale lavoro col calcolo aritmetico, la struttura frasale del linguaggio, le formule logiche, le strutture anatomiche ecc. Proprio per valutare in modo ulteriore la validità generale, come strumento cognitivo, del concetto di regola di sostituzione, esaminiamone l'utilizzazione proposta da Frey (Frey '70) che mostra un sistema (semplificato) di regole di sostituzione che descrivono lo sviluppo di foglie del muschio denominato "phascum cuspidatum" dove I, II e III sono simboli che rappresentano cellule primarie, secondarie e terziarie nella foglia (le cellule primarie hanno forma di diamante e si collocano all'estremità della foglia, una cellula secondaria si trova sul margine della stessa e quella terziaria all'interno. L'osservazione di Frey mostrava come la cellula primaria si divide

alternativamente obliquamente a sinistra e a destra in una nuova cellula primaria e in una secondaria. Una cellula secondaria si può dividere in due nuove cellule secondarie o in una cellula secondaria e una terziaria. Lo sviluppo di queste foglie può essere approssimativamente descritto con regole che specificano le suddivisioni ripetute di rettangoli in due nuovi rettangoli.

Un'altra sorprendente applicazione del concetto di sistema di regole ancora in linea con l'esempio appena considerato è rappresentato dai così detti "sistemi L" proposti dal biologo danese A. Lindenmeyer. Ancora una volta, un sistema L è un insieme di regole per derivare nuove stringhe di simboli da vecchie stringhe.

Occorre, naturalmente, proporre un sistema di interpretazione per le stringhe generabili a partire da quella costituita dal solo 0: trattiamo ogni numero ( 0 o 1 ) come un segmento e ogni parentesi come un punto di ramificazione.

I segmenti 0 e i segmenti 1 sono di uguale lunghezza e si distinguono purché si lasciano "spogli" tutti i segmenti 1 mentre si pone una "foglia" alla estremità esterna di ogni segmento 0.

Il lavoro di analisi sintattica è preliminare a quello di traduzione. Il punto essenziale è ora il seguente: "È possibile produrre una grammatica a struttura di frase che accetti un linguaggio sufficientemente simile all'italiano da poter essere utilizzato in applicazioni pratiche come la traduzione automatica?". Per quanto concerne i linguaggi artificiali la risposta è sicuramente sì; per quei particolari linguaggi artificiali che sono i linguaggi di programmazione sono disponibili le relative grammatiche a strutture di frase. L'insieme delle considerazioni in base alle quali si è giunti ad abbandonare l'idea di descrivere i LN utilizzando grammatiche a struttura di frase è, crediamo, un notevole contributo alla riflessione sull'importante tema didattico "analisi e confronti fra LN e LA".

## Ambiguità

Ogni tentativo di migliorare l'efficienza di una grammatica a struttura di frase (per far sì che ammetta una parte più estesa di LN) o a restringerne il campo d'azione (escludendo un numero maggiore di enunciati privi di senso) comporta, come è ovvio intuire, un aumento delle regole di produzione che lo costituiscono. Queste nuove regole esercitano spesso interazioni con quelle viste in precedenza; succede spesso, ad esempio che grammatiche complesse esibiscano più modi diversi di ammettere lo stesso enunciato. Questo significa la possibilità che allo stesso enunciato sia associato più di un albero sintattico. Si consideri, ad esempio, la classica frase "una vecchia porta la sbarra" sul cui significato reale vi sono notevoli dubbi: "porta" può essere pensata come voce del verbo portare e "la" come articolo; oppure, "porta" può pensarsi un sostantivo e "la" un pronome relativo e, in questo caso, si pensa ad una

vecchia porta che sbarrava una certa uscita. Dovendo tradurre questa frase in un'altra lingua, per quale interpretazione si opta? L'ambiguità in cui ci siamo imbattuti è di tipo strutturale; la frase in questione può essere strutturata secondo due alberi sintattici distinti: Il problema interpretativo nasce per il fatto che il LN non incorpora il significato nello stesso modo in cui un codice cifrato incorpora un messaggio. Il significato di una frase in una lingua naturale dipende non soltanto dalla forma della frase stessa, ma anche dal contesto. Di norma, nei linguaggi artificiali (LA) l'ambiguità è un fenomeno da evitare; pure esso si presenta con notevole frequenza; si consideri la seguente grammatica che descrive il linguaggio delle espressioni algebriche ben parentesizzate che consentono l'uso degli operatori  $+$  e  $*$ .

Il frutto dell'ambiguità, in questo caso, è meno pesante, l'espressione generata è corretta e lo sarebbe anche la traduzione nel linguaggio dell'esecutore (naturalmente esistono casi in cui, anche nei LA, l'ambiguità ha effetti disastrosi) esistono comunque semplici algoritmi che consentono di "disambiguare" una certa grammatica ottenendone una equivalente ma non ambigua.

L'ambiguità strutturale non è l'unico tipo di ambiguità che "affligge" certi linguaggi (particolarmente LN); esiste la così detta ambiguità lessicale in cui una singola parola può avere più significati possibili: "la vostra esposizione è stata meravigliosa" è una frase la cui ambiguità è giocata sul significato che si può attribuire alla parola "esposizione" (che può essere pensata come un "discorso" o come una "collezione di quadri"). Altre forme di ambiguità sono più sottili, si consideri la seguente frase: "i polli sono pronti per il pranzo" che è costruita su una ambiguità di "struttura profonda" in quanto essa presenta un'unica struttura grammaticale ma, ciononostante, il suo significato è dubbio; essa, infatti, implica che qualcosa stia per mangiare qualcosa, si tratta di determinare da che parte stanno i polli!. Nei formalismi artificiali, tali forme di ambiguità devono essere abolite o, per lo meno, fortemente ridotte.

L'ambiguità semantica (un sintagma può svolgere diversi ruoli nel significato complessivo della frase) e l'ambiguità pragmatica (derivata dall'uso di pronomi e nomi particolari come, ad esempio, "lo": si pensi alla frase "lasciò cadere il piatto sul tavolo e lo ruppe" sono ulteriori esempi di forme linguistiche sulle quali LN si regge e che ne fanno qualcosa di unico. Le varie forme di ambiguità cui possono essere soggette le frasi di LN non sono, naturalmente, l'unico problema che rende la sua interpretazione e quindi la traduzione automatica e quindi l'uso di LN per programmare i computer un grosso problema per la IA. La stessa "ricchezza" di LN può produrre effetti così pericolosi dal nostro punto di vista, da costituire, a loro volta, un interessante tema di riflessione didattica. La riflessione dovrebbe contribuire a chiarire, nell'alunno, l'importanza dello scopo del processo comunicativo; tale importanza introduce in modo massiccio il tema delle capacità possedute dal destinatario dell'atto comunicativo. Se il destinatario di tale atto è un esecutore di capacità limitate il fenomeno che abbiamo chiamato ambiguità è da evitare e da

ridimensionare. Lo sforzo di progettare linguaggi che ne siano esenti si paga con la nascita di linguaggi "poveri" di contenuti comunicativi, dotati di sintassi rigorosa e utilizzabili in maniera assolutamente poco creativa. Una ulteriore conferma di tale constatazione si può avere, nell'allievo, facendo vedere, ad esempio, l'uso che certi autori fanno di strutture ambigue per raggiungere effetti artistici. Non mancano autorevoli esempi sia in letteratura che nelle arti figurative.

### Autoreferenza

Abbiamo già sottolineato più volte che LN è lo strumento descrittivo di cui ci serviamo per le nostre necessità comunicative. Usando LN possiamo descrivere praticamente tutto ciò che conosciamo. E se l'oggetto da descrivere è LN stesso? Apparentemente non ci sono grossi problemi; del resto, le grammatiche della lingua italiana son proprio scritte in italiano e questo non sembra per nulla pericoloso. Possiamo dunque passare come innocua l'asserzione che per descrivere un linguaggio L si debba usare un linguaggio e che questo linguaggio possa essere L stesso.

In realtà, la dimostrazione che l'asserzione precedente non è per nulla innocua e che nella possibilità di autoreferenza si cela un'altra delle ragioni che rendono praticamente improponibile l'uso di LN come strumento descrittivo di soluzioni di problemi a esecutori formalizzati, è un altro dei temi pertinenti il dominio di indagine della IA che possono essere proposti all'educatore come esempio di contenuto formativo di natura interdisciplinare.

Possiamo cominciare con una proposta didattica che può essere pensata come una provocazione (il suo vero scopo è, comunque, quello di evidenziare l'importanza di distinguere il linguaggio (ciò di cui si parla, il linguaggio L) dal metalinguaggio (il linguaggio in cui si sta parlando). Si può cominciare col chiedersi se le due frasi che seguono sono vere o false:

tutto comincia con t e finisce per f "  
tutto comincia con t e finisce per o "

per decidere della verità o della falsità dei due enunciati precedenti bisogna, chiaramente, decidere se "tutto" e "finisce" sono variabili linguistiche o variabili metalinguistiche. Questo tipo di riflessione è usuale per chi discute di strumenti per descrivere perché è importante, come dicevamo, distinguere il linguaggio con cui poniamo e risolviamo problemi rispetto al sistema considerato (il metalinguaggio) dai costrutti inerenti il sistema stesso che chiameremo linguaggio - oggetto). Dietro l'autoreferenza, come vedremo, c'è un conflitto fra finito e infinito e quindi un forte senso di paradosso. Dietro i paradossi ci sono importanti considerazioni teoretiche che hanno la loro radice sulla constata possibilità di costruire ragionamenti circolari o autoreferenziali.

I logici (e non solo loro) sanno bene che tale possibilità può distruggere una teoria o renderla ricca, creativa e interessante. Bisogna dunque, costruire teorie che escludano autocontraddizioni e sono proprio i paradossi che consentono di metterle alla prova. Per quelle particolari teorie formali che sono i linguaggi naturali, la possibilità di autoreferenza e quindi di autocontraddizione sono state completamente esplorate. Il contributo degli informatici in questa esplorazione è stato piuttosto importante perché la loro analisi si è orientata ad una particolare situazione comunicativa: quella che vede come elemento destinatario della comunicazione una "macchina sintattica". In questa particolare situazione comunicativa l'autoreferenzialità del LN assume un ruolo che solo Kurt Gödel ha delineato con chiarezza nella sua pericolosità.

Vediamo di apprezzare questa pericolosità partendo dalla constatazione banale di come un suo primo effetto sia la messa in discussione del "tertium non datur" degli scolastici secondo i quali un predicato o è vero o è falso, non ci sono, appunto, vie di mezzo. L'analisi di Gödel cui abbiamo accennato, parte dalla traduzione in termini matematici di un antico paradosso della filosofia noto come "paradosso di Epimenide". A Epimenide, poeta cretese del VI secolo a. C. viene attribuito un enunciato logicamente contraddittorio (ammesso che chi è mentitore lo sia, stolidamente, sempre e chi non lo sia sia sempre sincero); egli è infatti ricordato per aver pronunciato l'immortale enunciato "tutti i cretesi sono bugiardi".

Questo enunciato, apparentemente innocuo, ha varie versioni: "io sto mentendo" oppure "questa frase è falsa" ne sono altrettanti esempi; resta il fatto che, in base alle nostre assunzioni l'enunciato di Epimenide (e tutti i suoi isomorfi) non può essere vero, perché, in tal caso, Epimenide sarebbe un mentitore e quindi, ciò che dice sarebbe falso, e non può neppure essere falso perché da ciò conseguirebbe che i cretesi sono sinceri e, di conseguenza, ciò che dice Epimenide sarebbe vero. Siamo dunque di fronte ad un enunciato perfettamente sensato che non può essere vero senza contraddirsi e non può essere falso senza contraddirsi. Questo enunciato "dà fastidio" perché viola pesantemente l'assunzione consueta che vuole gli enunciati suddivisi in veri o falsi: se si prova a pensare che sia vero, immediatamente esso si rovescia forzandoci a pensare che sia falso. Ma una volta che si sia deciso che è falso, si viene inevitabilmente riportati all'idea che sia vero.

Prima di vedere la ragione profonda che genera la situazione paradossale, vediamo altre versioni "sottili" di essa; si consideri il seguente problema: la frase scritta sul recto del foglio è vera o falsa?. Un breve ragionamento mostra la contraddizione cui il problema conduce:

"supponiamo che la frase A (quella scritta sul recto) sia vera. Cosa dice questa frase vera? che la frase B (quella scritta sul retro) è falsa.

A questo punto abbiamo appurato che la frase B è falsa. Ma cosa sostiene questa frase falsa? che la frase A è vera, di conseguenza si conclude che la frase A è falsa!" e ciò contraddice l'assunzione di partenza.

A questo punto è palese la contraddizione: la frase A se è vera allora è falsa. Non si ottiene alcun miglioramento rovesciando il ragionamento, partendo, cioè, dall'ipotesi che la frase A sia falsa perché la conclusione cui si perviene è che se essa è falsa allora è vera!. La ragione che genera la situazione paradossale è, in tutti i casi la stessa: ognuna delle frasi in questione fa riferimento, indirettamente, a se stessa, è cioè, autoreferente. Ciascuna di queste frasi, presa individualmente, è innocua; il problema nasce quando esse vengono considerate globalmente.

Pensando all'uso che, del linguaggio, stiamo studiando, l'autoreferenza è un fenomeno pericoloso: come reagirebbe un esecutore automatico davanti alla valutazione del seguente predicato? Forse sembrerà paradossale, ma il tentativo è stato fatto da due studenti della università di Harvard W. Burkhart e T. Kalin (si era verso la fine degli anni '40) che sottoposero alla loro macchina la valutazione della verità o della falsità del paradosso del mentitore constatando, divertiti, che essa entrava in una fase di oscillazione, facendo, come disse Kalin, "un fracasso d'inferno".

LN può dunque dare origine a "pericolose" autoreferenze, ma abbiamo già visto che il pericolo è circoscritto agli esecutori formalizzati. In altri ambiti l'autoreferenza è qualcosa che ha stimolato il genio di artisti come C. Escher (chi non conosce le celebri litografie "mani che disegnano" o "mano con sfera riflettente"?), Bach ( gli stupendi canoni autoreferenziali che compongono vari pezzi ne "l'arte della fuga" o ne "l'offerta musicale") Laing (chi non si è stupito leggendo alcuni suoi componimenti poetici originali e autoreferenti?) consentendo loro il raggiungimento di effetti estetici inimitabili.

Fu, come dicevamo Kurt Gödel in un suo scritto del 1931 a individuare il "cemento concettuale" che rende le questioni sinora sottolineate un'unica grande critica alle capacità descrittive attribuite ai sistemi formali. Egli infatti pensò di utilizzare il ragionamento matematico per esplorare il ragionamento matematico stesso, scrivendo un enunciato matematico autoreferenziale nella stessa maniera in cui il paradosso di Epimenide è un enunciato autoreferenziale del LN. Le considerazioni di Gödel sono troppo profonde e troppo eleganti per banalizzarle in poche righe; ma non possiamo esimerci dall'evidenziarne almeno i risultati più stimolanti culturalmente: egli mostrava, infatti, che in ogni sistema assiomatico esistono enunciati veri che non si possono dimostrare tali e, analogamente, enunciati falsi che non si possono dimostrare tali. Egli dimostrò, sostanzialmente, che la dimostrabilità è una nozione più debole della verità e ciò indipendentemente dal sistema assiomatico considerato.

Le conseguenze pratiche di una tale scoperta sullo stesso lavoro matematico sono facilmente intuibili: si supponga di applicare una procedura di dimostrazione ad un teorema vero ma non dimostrabile. Chiaramente, la procedura continuerebbe a lavorare all'infinito ma chi l'avesse attivata, non potrebbe mai concludere che, a causa della non apparizione del risultato, il teorema non sia vero. Molti ricercatori hanno visto in queste considerazioni grossi limiti delle idee della IA e delle capacità descrittive dei sistemi formali. In realtà, con questo problema (come sottolinea B. Raphael nel suo "il computer che pensa" ed. Muzzio) si può convivere con esse senza eccessivi danni. Dal principio di indecidibilità, infatti, secondo Raphael si possono trarre alcune conclusioni false. Tale principio mostra che i sistemi formali e, conseguentemente i computers che sono (come osserva intelligentemente J. Haugeland ) sistemi formali interpretati non possono arrivare a ragionare in modo logico altrettanto bene quanto gli esseri umani. "Ciò lascerebbe indurre che gli esseri umani dispongano di sistemi di ragionamento logico" sostiene Raphael "che non usino un sistema formale e quindi esenti da indecidibilità". Quali possano essere tali sistemi è un problema che lasciamo risolvere a psicologi e filosofi.

Qui e dal nostro punto di vista, osserveremo che, a differenza delle macchine, gli esseri umani hanno la capacità di usare la loro conoscenza globale di un certo dominio disciplinare per "uscire" dal sistema di ragionamento in esame per poter accedere ad un meta-sistema in cui si può ragionare "sul" sistema con spazi di ricerca più adeguati. Le brevi considerazioni precedenti possono, a nostro avviso, considerarsi come un prima proposta di costruzione di un itinerario didattico avente per oggetto quelle "riflessioni sulla lingua" auspicate in tutte le premesse ai programmi di educazione linguistica suggeriti, ad esempio, per i bienni della scuola secondaria superiore.

### Risoluzione di problemi

Il secondo paradigma della IA in didattica che intendiamo accingerci ad esaminare riguarda la risoluzione dei problemi. Si tratta di un argomento di indubbio interesse che ha stimolato psicologi, pedagogisti, psicopedagogisti e neurologi oltre che esperti in scienza cognitiva. Non intendiamo presentare, in questa sede, la descrizione dei "metodi per risolvere problemi" che fanno oramai parte di un repertorio di metodiche consolidate costituenti un "corpus" didattico che sta facendosi strada (anche se faticosamente) persino nelle nostre scuole primarie. Preferiamo rinviare il lettore a bibliografie più approfondite.

Intendiamo occuparci di un aspetto delle ricerche di IA che ha cominciato a richiamare l'attenzione dei ricercatori solo all'inizio degli anni '80: l'importanza, nel processo di problem solving (PS) della rappresentazione della conoscenza.

Questo aumento di interesse ha, da un lato, riqualificato interi settori di ricerca (basti pensare all'importanza assunta, in questo contesto, dei problemi connessi con la

comprensione del LN che abbiamo già preso in considerazione o quelli connessi alla visione e al riconoscimento di forme) e, dall'altro, evidenziato problemi nuovi come, ad esempio, quelli inerenti l'importanza fondamentale della conoscenza per dominare spazi di rappresentazione complessi come quelli dei problemi della vita reale.

Questi orientamenti di ricerca hanno significativamente influenzato l'IA sin dai suoi inizi e ben oltre gli anni '80. Le parole con le quali Newell illustra il suo modello sono estremamente significative dal punto di vista di chi intende proporre una prima distinzione fra "approccio informatico classico" alla risoluzione dei problemi e "proposte della IA". "tutte le metodiche tradizionali interpretano il problema come un fatto combinatorio [ ... ] tutti i programmi generano qualche tipo di albero delle alternative al fine di esplorare gradualmente le sequenze possibili. l'insieme di tutte le sequenze è troppo grande per poter essere generato ed esaminato in toto: si usano quindi vari espedienti (euristiche) al fine di restringere lo spazio delle alternative a un insieme che possa essere affrontato entro limiti accettabili di sforzo di elaborazione."

Crediamo utile, prima di proseguire, illustrare questo pensiero di Newell servendoci di un esempio emblematico: il problema del commesso viaggiatore: "un commesso viaggiatore deve visitare un certo numero di città per compiere il suo giro di vendite. Ogni città è collegata ad ogni altra da strade di cui conosciamo la lunghezza. Il commesso deve visitare ogni città almeno una volta. Come è possibile determinare il percorso più breve che lo porti a passare da ogni città per ritornare a quella di partenza?" Il problema sembra banale e c'è, addirittura da pensare come mai esso sia considerato un problema "emblematico". Esiste una tecnica piuttosto "brutale" per affrontare e risolvere il problema:

- 1) elencare tutti i possibili percorsi
- 2) calcolare la lunghezza di ciascuno
- 3) selezionare il percorso più breve.

Poche considerazioni convincono della validità della considerazione di Newell: per queste cinque città i possibili percorsi sono 24 ((5 - 1)!); per sei città i percorsi salgono a 120; con sette città divengono 720 e così via (questo stupefacente ritmo di crescita viene denominato "esplosione combinatorica"). Pensando ad un risolutore ultra-veloce (ad esempio un computer in grado di valutare il "peso" di un percorso in 10<sup>-5</sup> secondi) se le città sono in numero elevato (anche se non enorme) come 20 il tempo necessario sarebbe:

$19 * 18 * 17 * \dots * 2 * 1 * 10^{-5} = 38573$  anni ! L'aggiunta di una sola città moltiplica il tempo precedentemente calcolato per 20. Il tempo richiesto per la ricerca della soluzione è quindi proporzionale a  $(n - 1)!$ . Una semplice regola euristica consente una drastica riduzione di questo tempo:

- 1) parti dalla città A

- 2) vai alla città più vicina ad A
- 3) dal posto ove sei giunto vai alla città più vicina non ancora visitata.
- 4) continua questo processo finché non si sono visitate tutte le città
- 5) ritorna ad A.

Non è difficile valutare l'efficienza" di questo algoritmo: in ogni città cui si è pervenuti bisogna confrontare 4 percorsi possibili per raggiungere la successiva più vicina e non ancora toccata; i confronti sono quindi  $5 * 4 = 20$ . Se ogni controllo richiede 10-5 secondi il tempo richiesto è  $20 * 0-5$  secondi.

Se le città sono 20 i confronti sono  $20 * 19 = 380$  e il tempo è di  $380 * 10-5$  secondi.

Il tempo richiesto è dunque proporzionale a  $n * (n - 1)$ . Il progresso è decisamente significativo (anche se l'algoritmo non fornisce la soluzione ottima ma una che vi si avvicina). Molto tempo dei ricercatori è stato dedicato allo sviluppo di euristiche via via più sofisticate per semplificare la soluzione di classi di problemi sempre più ampie. Ma non sono mancati studiosi che hanno affrontato il problema da un punto di vista diverso, quello che tende a valorizzare esplicitamente il ruolo della conoscenza nei processi di pianificazione della risoluzione dei problemi individuando nella capacità di scegliere la rappresentazione più adatta e in quella di modificarla in funzione del dominio problematico considerato uno degli aspetti più significativi del risolutore intelligente. Il problema è comunque di più ampia portata e riguarda l'affinamento di una capacità più generale: quella di rappresentare.

L'esperienza quotidiana di risoluzione di problemi mostra con evidenza che la capacità di individuare una buona rappresentazione è spesso la chiave per trasformare problemi complessi in problemi analoghi ma più semplici. Prima di proporre semplici testimoni della validità di tale asserzione, è necessario chiarire il significato che qui attribuiamo alla parola rappresentazione.

Una rappresentazione è un insieme di convenzioni sintattiche e semantiche che rendono possibile la descrizione degli oggetti.

In sintonia con quanto detto in precedenza sulla sintassi, diremo che la sintassi di una rappresentazione specifica e qualifica i simboli che possono essere usati e il modo con cui essi possono essere combinati e concatenati mentre la semantica di una rappresentazione specifica come i simboli e le loro concatenazioni (consentite dalla sintassi) incorporano il significato stesso. Il già citato B. Raphael, per sottolineare l'importanza della scelta di una buona rappresentazione nel processo di problem solving propone il seguente gioco per due persone: "prendete nove foglietti di carta, segnatele con un numero da 1 a 9 e metteteli scoperti sul piano del tavolo". Il primo giocatore deve prendere un foglietto a sua scelta, poi ne prenderà uno il secondo giocatore, e così via. Quando uno dei giocatori si trova in mano tre foglietti i cui

valori sommati danno 15, ha vinto. E` meglio, ad ogni mano, che i giocatori si alternino nel giocare la prima mossa."

Giocare non è difficile come non è difficile capire che, invece, non è facile giocare da esperti. "Ora copiate la figura che segue", continua Raphael "e pensate di giocare usando la figura. Il primo giocatore deve segnare una "X" sopra il numero che ha scelto, e il secondo deve mettere un cerchietto intorno al numero preso. Riconoscete il gioco è veramente così difficile? che cosa lo ha reso così differente?". Si cerca, secondo questa accezione, di selezionare i candidati alla "dignità di soluzione non con modi combinatorici, ma sulla costruzione di modelli o rappresentazioni semantiche che, tendenzialmente, semplifichino la ricerca in modo da controllare adeguatamente il fenomeno che prima abbiamo chiamato esplosione combinatorica.

Egli osserva infatti: "scopo prioritario della soluzione dei problemi dovrebbe essere la comprensione dello spazio del problema, la scoperta di rappresentazioni entro le quali sia più facile risolvere problemi. Scopo della ricerca è di ricavare informazioni per tale riformulazione, non, come abitualmente si ritiene, per scoprire soluzioni; una volta adeguatamente compreso lo spazio del problema, le soluzioni si scopriranno con maggiore facilità."

L'interesse del ricercatore americano era dunque chiaramente focalizzato verso la ricerca di strumenti per poter rappresentare e conservare adeguate quantità di conoscenza e dei meccanismi per manipolarla onde individuare le strategie risolutive di problemi nuovi. Ma quali sono questi strumenti?. Possiamo dire, innanzi tutto, che essi sono piuttosto numerosi e che non li descriveremo tutti. Non possiamo, tuttavia, esimerci dal sottolineare che tutti consentono di manipolare i "Fatti": cioè le cose significative in qualche ambiente che sono gli oggetti che vogliamo rappresentare "rappresentazioni dei fatti" secondo le convenzioni di un certo formalismo. E` abbastanza naturale pensare che affinché una rappresentazione abbia un qualche interesse, in essa debba essere disponibile una funzione biunivoca dal dominio dei fatti a quello delle loro rappresentazioni.

Una delle rappresentazioni più usate è stata certamente la logica simbolica. Non intendiamo approfondire questo strumento in questa sede ma solo ricordarne alcuni aspetti significativi: Da Aristotele fino all' '800 lo scopo dei logici è stato considerato quello di caratterizzare le forme di ragionamento utilizzate nel pensiero e nel linguaggio quotidiani. Non a caso nel fondamentale lavoro sulla logica simbolica dovuto a George Boole (1854) le sue regole sono chiamate "leggi del pensiero". Lo stesso G. Frege che per primo propose la teoria denominata "logica del primo ordine" (1879) denominò la notazione usata in logica "begriffsschrift" cioè "scrittura dei concetti". Il formalismo logico è suggestivo perché rende disponibile in maniera abbastanza naturale un modo potente per derivare nuova conoscenza da vecchia conoscenza: la deduzione matematica. Secondo questo formalismo, infatti, si può

concludere la verità di un fatto o di una asserzione nuovi, mostrando che essi derivano da fatti o da asserzioni che si sono già provate vere.

## Rappresentazione della conoscenza con sistemi di regole

Ogni applicazione di una strategia intelligente per risolvere problemi richiede una ricerca. Per questa ragione, nel mondo della IA si sono spese molte energie per cercare metodi e strumenti per semplificare le tecniche di ricerca. I così detti sistemi di regole sono stati, storicamente, i primi tentativi di formalizzare con chiarezza un modo per rappresentare ciò che si sa di un certo dominio problematico e per descrivere semplici meccanismi di ricerca e di inferenza.

Nel gergo della IA la parola regola o produzione (i sistemi di regole sono anche denominati sistemi di produzioni) ha un significato più specifico di quello attribuito nel linguaggio naturale; le regole, secondo questa accezione consentono di rappresentare formalmente raccomandazioni, direttive, strategie, regole euristiche ecc.. Si tratta quindi di uno strumento appropriato per situazioni (estremamente frequenti) in cui la conoscenza da rappresentare è costituita da associazioni empiriche nascenti da esperienza nella risoluzione di problemi appartenenti ad una certa area. Un sistema di regole è così articolato:

- un insieme di regole costituite da una parte sinistra (che rappresenta una situazione o uno stato del problema) che determina l'applicabilità della regola e da una parte destra che descrive l'azione da realizzare se si applica la regola. Generalmente le regole sono espresse sotto forma di costrutti if- then o con una freccia (---->) che ne indica le parti if e then.
- una o più basi dati contenenti qualunque informazione sia ritenuta utile nella risoluzione del problema. Alcune parti di questa base di dati possono essere pertinenti solo alla soluzione di uno specifico problema.
- una strategia di controllo che specifica l'ordine con cui consultare le regole e la maniera di risolvere i conflitti derivanti dalla possibilità di poter applicare più regole ad una stessa situazione.

Non sfugge a nessuno, crediamo, l'estrema generalità di questa definizione che si può utilizzare per formalizzare il comportamento del giocatore di scacchi o del risolutore di problemi di travaso di liquidi o quello del commesso viaggiatore.

D. Waterman propone (Waterman '86) un interessante frammento di descrizione di una conoscenza relativa all'area problematica della "sicurezza antincendio" che usa, appunto, un sistema di regole. Intorno a quale esempio costruiremo le considerazioni descrittive sul linguaggio dei sistemi di regole.

- 1) if è fuoriuscito un liquido infiammabile then chiama i vigili del fuoco.
- 2) if il ph del liquido fuoriuscito è  $< 6$  then il materiale fuoriuscito è un acido
- 3) if il materiale fuoriuscito è un acido and il materiale fuoriuscito ha odore di aceto then il materiale fuoriuscito è acido acetico.

Le regole precedenti possono essere, forse più suggestivamente, rappresentate usando la freccia ( $\rightarrow$ )

- 2) if il ph del liquido  $< 6$   $\rightarrow$  il materiale fuoriuscito è un acido.

La strategia di controllo attiva qualcosa di simile ad un interprete delle regole che confronta la parte IF delle regole con i fatti rilevati per eseguire, fra le regole, quella la cui parte IF coincide col fatto in oggetto.

L'esecuzione delle azioni contenute nella parte then delle regole può modificare la base di dati (che contiene i fatti) facendola divenire una base di conoscenza. Crediamo che la seguente figura descriva suggestivamente ciò che andiamo affermando I "nuovi fatti" aggiunti alla Base di conoscenza possono, naturalmente, essi stessi essere creati per confrontarli con le parti IF delle regole, come evidenzia la figura successiva: L'insieme delle coincidenze fra le parti IF di una o più regole con un insieme di Fatti può produrre ciò che si chiama una catena inferenziale.

Vediamo ora come sia possibile servirsi di un Sistema di regole per costruire i ragionamenti che conducono alla soluzione di problemi. Le tecniche utilizzate sono fondamentalmente due, denominate inferenza in avanti (Forward chaining) e inferenza all'indietro (Backward chaining). Questa tecnica di "Ragionamento" è denominata inferenza in avanti a causa del fatto che la ricerca di nuove informazioni sembra procedere seguendo la direzione delle frecce che separano le parti sinistre da quelle destre nelle regole. Con la tecnica denominata inferenza all'indietro invece l'agente risolutore parte da ciò che vuole trovare (ad esempio che "sussiste la situazione Z") ed esegue le sole regole rilevanti per provare tale asserzione.

## Rappresentazioni strutturate della conoscenza

Tale rappresentazione può avvenire attraverso: grafi concettuali e reti semantiche.

Grafi concettuali. L'interesse di linguisti, psicologi, logici, filosofi e informatici verso gli strumenti di rappresentazione della conoscenza ha dato origine al linguaggio di rappresentazione della stessa denominato Grafi concettuali. In questo tipo di grafi si individuano due tipi di nodi: Nodi - concetto che rappresentano entità, stati, attributi ed eventi e Nodi - relazione che mostrano le relazioni fra nodi interconnessi. P. Winston (Winston'75) scrisse qualche anno fa un famoso risolutore di problemi nel

mondo degli archi e dei piedistalli - il programma di Winston rappresentava la conoscenza relativa a tali strutture architettoniche per mezzo di grafi concettuali ed era in grado di analizzarli per determinare se una struttura qualunque verificava, o meno, le condizioni per essere chiamata arco o piedistallo.

Reti semantiche. Il linguaggio delle reti semantiche è basato su una assunzione di principio: "la memoria umana è un enorme contenitore di concetti che possono essere recuperati ed utilizzati quando si desidera; un concetto non viene rappresentato in essa atomisticamente ma nelle relazioni con gli altri concetti."

L'idea di rete mette in evidenza in modo particolare il fatto che i nodi sono costituiti dai concetti e dai fatti fra di loro interconnessi da una trama di relazioni ad istituire una struttura di significato. Chiedendo, ad esempio, a qualcuno il significato di "automobile", si otterranno, inevitabilmente, risposte facenti riferimento ad altri concetti ("veicolo a motore", "quattro ruote", ecc.) e ciò è abbastanza prevedibile dato che la conoscenza di un argomento è, naturalmente, in relazione con la conoscenza di altri. Lindsay e Norman (Lindsay & Norman '83) sottolineano che l'esame del formato di tipiche definizioni come la precedente ha rilevato l'esistenza, in esse, di un numero piuttosto limitato di relazioni:

- la classe dei concetti alla quale il concetto in questione appartiene (cioè una relazione di inclusione rappresentata dalla relazione "è\_un" ).
- le proprietà che rendono unico e particolare quel concetto (una sorta di relazione espressa da locuzioni come "ha", "è")
- testimoni (o esempi) del concetto, ossia la relazione di subordinazione inversa a quella denominata "è\_un".

Anche nelle reti semantiche le informazioni sono rappresentate come insiemi di nodi connessi da insiemi di archi etichettati che rappresentano le relazioni fra i nodi. Si configura dunque, con questo strumento, la notevole possibilità descrittiva che consiste nel congegnare delle tassonomie. Questo ci consentirà interessanti possibilità deduttive. Possiamo, ad esempio, rappresentare il fatto che Silvestro è un gatto in due modi:

Possiamo dedurre fatti su Silvestro partendo dalla conoscenza che esso è un gatto, in quanto gatto è un felino, ha canini sviluppati ecc..

Questa possibilità deduttiva è denominata Ereditarietà delle proprietà e la si può osservare all'opera nella rete che segue nella quale si osserva facilmente come Silvestro e Joshi "ereditano" le proprietà dei gatti: Ma possiamo arricchire ulteriormente la conoscenza fornita dalla rete: conosciamo le proprietà dei gatti in virtù del fatto che essi sono degli animali evoluti (ad esempio hanno testa, orecchie, un cuore ecc. )inoltre gli animali evoluti ereditano le proprietà degli animali in generale. Vogliamo dunque che anche Silvestro erediti le proprietà non solo dei gatti

ma anche degli animali evoluti e degli animali in generale. La struttura che segue è, invece, un esempio di rete semantica che rappresenta un frammento di conoscenza sulla mia scrivania: La struttura può, senz'altro, suggerire al lettore l'idea della immediata traducibilità della rete semantica nel formalismo rappresentativo che è la logica dei predicati. Il frammento che segue potrebbe essere benissimo parte di una base di dati descritta in Prolog:

è\_un (lucio, persona).  
è\_un (scrivania, mobile).  
è\_un (mia\_scrivania, scrivania).  
è\_un (bruno, colore\_scuero).  
è\_parte (scrivania, tavoli).  
è\_parte (tavoli, strumenti\_di\_supporto).  
è\_fatto\_di (mia\_scrivania, legno).  
possiede (mia\_scrivania, lucio).

Al di là dei limiti imposti dalla (modesta) "rigidità sintattica" di prolog, la descrizione è facilmente comprensibile, gestibile e inseribile in un programma per computer. La rete semantica si presta con facilità anche alla rappresentazione di predicati di arità N. E', d'altro canto, nota una semplice tecnica che consente di convertire un predicato n-ario in una sequenza di predicati binari. Questo processo di conversione si mostra particolarmente utile per rappresentare i contenuti di tipiche frasi dichiarative che descrivono particolari aspetti di eventi particolari come mostra la figura seguente:

Come si verifica per gli altri strumenti di rappresentazione della conoscenza sin qui presi in esame, anche la potenza espressiva delle reti semantiche si osserva nella facilità con la quale esse possono essere manipolate nelle descrizioni formali di soluzioni di problemi. Esse sono particolarmente utili in quegli ambiti problematici in cui è indispensabile per la soluzione una esplicitazione dei legami relazionali fra gli oggetti rappresentati come nodi della rete.

C'è un altro aspetto interessante che le reti semantiche consentono di mettere in evidenza: la differenza fra un concetto (ad esempio quello di competizione\_sportiva) e una particolare istanza (come, ad esempio, Tennis). La mia partita di tennis contro Ivan Lendl può concludersi 6-0 6-0 cosa che non può sicuramente attribuirsi al concetto competizione-sportiva. Se le informazioni relative a particolari istanze relative ad un certo concetto fossero memorizzate nel nodo che rappresenta tale concetto non ci sarebbe possibile distinguere istanze multiple di quel certo concetto.

Un semplice esempio chiarirà questo concetto: con una rete semantica potremmo facilmente rappresentare il fatto che la mia racchetta è di grafite: ma troveremo di certo qualche difficoltà nel rappresentare come ulteriore fatto quello che "la racchetta di Enrico è di ceramica". Questo problema si aggira facilmente. E' sufficiente usare dei collegamenti che descrivono le proprietà di tutte (o quasi tutte) le istanze del

concetto mentre i collegamenti originanti da nodi-istanza descrivono proprietà delle istanze individuali.

E' estremamente importante esplicitare anche da un punto di vista "topologico" le differenze fra nodi che rappresentano classi di oggetti e nodi che rappresentano istanze di una classe di oggetti. Abbiamo già avuto modo di usare collegamenti relazionali di tipo "è-un" per rappresentare relazioni di tipo gerarchico fra nodi-concetto e nodi-istanza. Per rendere ancora più espressivo il formalismo delle reti semantiche possiamo, per raggiungere anche quest'ultimo obiettivo introdurre un altro tipo di relazione che chiameremo istanza-di che correla nodi-istanza con i concetti che li descrivono.