

4. L'evoluzione delle reti semantiche

Nel capitolo precedente abbiamo visto come la ricerca sui formalismi di rappresentazione della conoscenza svolga un ruolo centrale in IA. Le reti semantiche costituiscono una classe di sistemi di rappresentazione tipici dell'IA, basati sull'idea generale di utilizzare come strumento di rappresentazione un grafo, in cui ad ogni nodo è associata un'entità concettuale di qualche tipo (ad esempio un concetto, il significato di un enunciato, o il significato di un elemento lessicale). Le relazioni, di tipo logico o associativo, fra entità concettuali diverse sono rappresentate mediante gli archi che connettono i nodi. Al di là di questa caratterizzazione generale, i vari tipi di rete semantica sono molto diversi fra loro. I tipi di nodi e di archi che è possibile utilizzare, la loro interpretazione, le regole sintattiche che consentono di comporli in una rete, ed i meccanismi di inferenza che sono definiti sulle reti variano notevolmente nei molteplici sistemi di rappresentazione che sono stati via via elaborati.

Le reti semantiche furono sviluppate originariamente in base a motivazioni di carattere psicologico, e spesso, soprattutto nel corso degli anni settanta, utilizzate dagli oppositori della logica in contrapposizione ai classici formalismi logico matematici. Rispetto a tali formalismi, le reti semantiche infatti avrebbero dovuto consentire di costruire basi di conoscenza con una struttura associativa più simile a quella ipotizzabile per la memoria umana (ad esempio, utilizzando gli archi della rete per rappresentare non soltanto relazioni di tipo puramente logico, ma anche la "distanza concettuale" fra due rappresentazioni). Inoltre, la maggior parte dei sistemi a rete semantica (e più ancora i sistemi a *frame*, che delle reti semantiche sono parenti prossimi) prevedevano la possibilità di rappresentare concetti per mezzo di tratti prototipici anziché esclusivamente mediante condizioni necessarie e/o sufficienti. Questi fattori, e inoltre il fatto che in origine le reti semantiche venissero utilizzate soprattutto come formalismi per la rappresentazione del significato in programmi per la comprensione del linguaggio naturale e come modelli psicologici per la rappresentazione di concetti lessicali¹ hanno fatto sì che *frame* e reti semantiche fossero visti come la proposta sviluppata in IA per rispondere al problema della rappresentazione del significato lessicale. Nei prossimi capitoli vedremo se le reti semantiche possano essere effettivamente considerate un'alternativa rispetto ai classici strumenti della logica, e se esse possano superare in qualche misura i limiti della semantica modellistica nella rappresentazione del lessico.

In questo capitolo passeremo brevemente in rassegna la storia di questi sistemi di rappresentazione, allo scopo di fornire un panorama più vasto in cui inserire le analisi che condurremo nei capitoli successivi. La grande eterogeneità dei sistemi a rete semantica proposti in letteratura fa sì che non sia possibile una trattazione sistematica dell'argomento. Già prima dell'avvento dei calcolatori, in ambito psicologico furono proposti modelli in cui si ipotizzava una struttura a rete della memoria umana, come ad esempio in Selz (1913, 1922). I primi tentativi di utilizzare dei grafi per la rappresentazione di conoscenza in un calcolatore sono precedenti allo sviluppo dell'IA in senso stretto, e risalgono alle ricerche sulla traduzione automatica del linguaggio naturale degli anni cinquanta e dei primi anni sessanta. Il sistema *Nude* (Richens 1956) prevedeva una rete semantica come *interlingua* per la traduzione automatica, ossia come linguaggio intermedio da utilizzare nella traduzione di un testo da una lingua naturale ad un'altra. Margaret Masterman (1962) utilizzò una rete semantica per rappresentare su calcolatore le definizioni di un dizionario. Simili tecniche furono adottate anche da altri ricercatori, ad esempio da Silvio Ceccato (1961). Nell'ambito specifico dell'IA, gli approcci al problema della rappresentazione della conoscenza basati su reti semantiche sono stati sviluppati a partire dal modello computazionale di Quillian sulla struttura della memoria e sulla rappresentazione della conoscenza lessicale, che risale alla seconda metà degli anni sessanta (Quillian 1967, 1968, 1969). Dopo Quillian, gli ultimi venticinque anni hanno visto proliferare centinaia di ricerche incentrate sull'elaborazione e sull'impiego di sistemi a rete semantica nei vari settori dell'intelligenza artificiale, e, in generale, delle scienze cognitive. Un capitolo storico sulle reti semantiche che pretenda di essere esaustivo non è dunque possibile, a meno di non ridurlo ad un inutile elenco di nomi e di riferimenti bibliografici. Abbiamo quindi scelto di mettere particolarmente in luce gli aspetti che più ci saranno utili nel corso del lavoro, senza tuttavia tralasciare i sistemi e le impostazioni più generalmente noti e diffusi².

Il resto del capitolo è organizzato come segue. Il prossimo paragrafo è dedicato ai lavori di Quillian. Il secondo è dedicato ad alcuni degli sviluppi successivi, fra cui la teoria della dipendenza concettuale di Roger Schank e dei suoi collaboratori. Nel terzo si tratta del concetto di *frame* (i *frame*, benché talvolta vengano considerati distinti dalle reti semantiche vere e proprie, gli sono tuttavia strettamente collegati) e, in generale, della rappresentazione di informazioni prototipiche nei sistemi a rete e del problema dell'ereditarietà con eccezioni. Gli ultimi due paragrafi, infine, vertono rispettivamente sulle riflessioni "fondazionali" sul concetto di rete semantica che, a partire dal lavoro di Woods (1975), hanno condotto ad una maggiore chiarezza concettuale nell'elaborazione e nell'uso di questi strumenti di rappresentazione, e sulla proposta di Pat Hayes di ridurre alla logica *frame* e reti semantiche.

¹Si veda ad esempio il modello di Quillian esposto più oltre.

²Rassegne storiche più approfondite si possono trovare in (Brachman 1979), (Johnson-Laird et al. 1984), (Mac Randall 1988), (Lehmann 1992). (Sowa 1991) e (Lehmann 1993) offrono trattazioni generali dei sistemi a rete semantica. Infine, nella antologia di Brachman e Levesque (1985) è riportata la maggior parte degli articoli storici "classici" sull'argomento.

4.1 Il modello di Quillian

I lavori di Quillian sulla memoria associativa (Quillian 1967, 1968) costituiscono il punto di partenza universalmente riconosciuto delle ricerche sulla rappresentazione della conoscenza mediante reti semantiche in IA. Gli interessi di Quillian erano di tipo eminentemente psicologico. Il suo scopo era di fornire un modello dell'organizzazione della memoria semantica di un essere umano, in modo da rappresentare il significato lessicale di termini del linguaggio naturale, e di eseguire vari tipi di inferenza a partire da tali rappresentazioni. Ciò avrebbe dovuto consentire la simulazione di alcune capacità linguistiche umane, quali il confronto del significato di due parole, o la "comprensione" di un testo in linguaggio naturale (dove per comprensione si intende la costruzione automatica di una rappresentazione del significato a partire dal testo assunto in *input*). L'intento era di rappresentare esclusivamente la componente "oggettiva", non emotiva o puramente soggettiva, del significato. I dati di partenza per la costruzione della base di conoscenza erano forniti dalle definizioni di un dizionario. Nonostante i suoi interessi specificamente rivolti al linguaggio naturale, Quillian ipotizzava che il tipo di rappresentazione da lui proposto avesse una validità che andasse oltre l'ambito linguistico, e assumeva che la struttura della memoria semantica fosse la stessa della memoria generale.

Nel modello di Quillian esistono due generi principali di nodi: *nodi tipo* (*type node*) e *nodi esemplare* (*token node*, o, semplicemente, *token*). Il significato lessicale di ogni voce è rappresentato mediante un *type node*. Ad ogni *type node* corrisponde nella rete un *piano* (*plane*), vale a dire una struttura che rappresenta la descrizione del significato corrispondente. Graficamente, i *type node* sono raffigurati mediante ellissi. Ad esempio, nella fig. 4.1 (da Quillian 1967) FOOD è un *type node*, nella fig. 4.2 (da Quillian 1967) sono *type node* PLANT, PLANT2 e PLANT3³. Poiché ad ogni voce lessicale possono corrispondere più significati distinti, a ciascuna voce può corrispondere più di un *type node*. Ad esempio, nella fig. 4.2 il significato della parola "plant" è rappresentato mediante i tre *type node* PLANT, PLANT2 e PLANT3 che corrispondono a tre significati distinti (i quali coincidono rispettivamente con i significati delle parole italiane "pianta", "impianto" e al verbo "piantare"). Il piano corrispondente ad un *type node* è indicato da un rettangolo che circonda la porzione di rete che rappresenta la definizione corrispondente. Come in un dizionario ogni voce è definita utilizzando altre voci definite altrove nel dizionario stesso, così, per definire una voce lessicale in un piano, si fa riferimento alla rappresentazione di altre voci definite nella rete. Ciò avviene mediante nodi *token*, i quali consentono di far riferimento dall'interno di un piano ad altre definizioni presenti nella rete. Nella fig. 4.1, MEAL, THING, KEEP, INTO sono esempi di *token*. Ogni *token* è collegato da un arco di tipo opportuno (raffigurato con una freccia tratteggiata) al *type node* che ne esprime la definizione. Quindi, mentre ad ogni significato di una voce lessicale corrisponde nella rete al più un solo *type node*, non esiste un limite al numero di *token* di una voce presenti nel modello: essi sono tanti quante le volte che la voce viene utilizzata in altre definizioni.

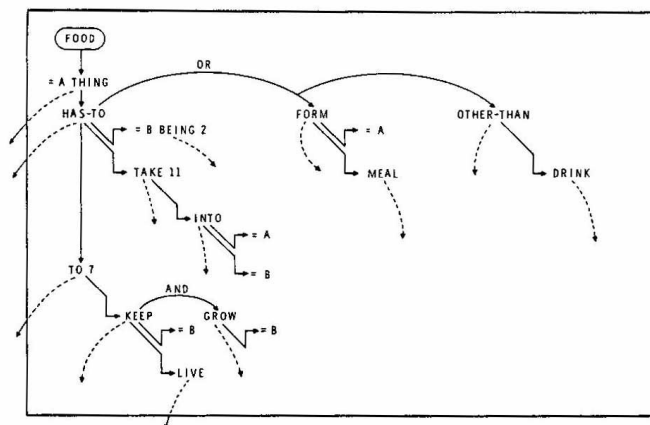


Fig. 4.1 - Food: 1. That which living being has to take in to keep it living and for growth. Things forming meals, especially other than drink

Le relazioni fra i vari nodi *token* che concorrono a una definizione all'interno di un piano sono espresse mediante archi che appartengono ad un insieme predefinito di tipi:

1. archi che rappresentano una relazione di sottoclasse; come ad esempio nella figura 4.1 l'arco fra il nodo FOOD e il nodo THING (che esprime il fatto che il cibo è un tipo particolare di cosa);
2. *modification pointer*: sono archi che consentono di utilizzare un *token* per modificare avverbialmente o come aggettivo un secondo *token*; nella figura, è un *modification pointer* l'arco fra i *token* THING e HAS-

³Nel resto del capitolo e nei capitoli seguenti si è scelto di mantenere in inglese gli esempi tratti dalla letteratura, mentre, per gli esempi da noi formulati, è stato utilizzato l'italiano.

- TO; esso esprime il fatto che FOOD è una THING che ha la proprietà rappresentata dalla parte di rete cui punta il *modification pointer*;
3. archi che esprimono relazioni di *disgiunzione* fra nodi; essi possono essere utilizzati per rappresentare i molteplici significati di una parola oppure per rappresentare espressioni che denotano un insieme ottenuto per disgiunzione (un esempio è l'arco etichettato OR nella figura, che connette il *token* HAS-TO, FORM e OTHER-THAN);
 4. archi che esprimono relazioni di *congiunzione*, di cui un esempio è l'arco etichettato AND che connette KEEP e GROW nella figura;
 5. archi che consentono di rappresentare relazioni arbitrarie fra due *token* utilizzando un terzo *token* per esprimere il tipo di relazione che tra essi sussiste; essi vengono raffigurati con frecce doppie; ad esempio, nella figura, il *token* FORM è utilizzato come una relazione, il cui oggetto è il nodo MEAL e il cui soggetto è indicato dal puntatore =A.

Nodi come =A e =B sono puntatori che vengono utilizzati per fare riferimento a nodi più "in alto" nella rete, in modo da rappresentare pronomi, o, in generale, espressioni linguistiche che si riferiscono a termini citati precedentemente nella definizione che si intende rappresentare. Nella rappresentazione grafica di una rete, il nodo indicato da un puntatore viene identificato premettendo al nodo stesso il simbolo del puntatore. Ad esempio, nella fig. 4.1, il simbolo =A fa riferimento al *token* THING che si trova immediatamente sotto il nodo FOOD.

La definizione di *food* della fig. 4.1 può quindi essere parafrasata come segue: un FOOD è una THING A tale che un BEING 2 B (il *token* BEING 2 fa riferimento al secondo significato della parola *being* rappresentata nel modello - così come TAKE 11 fa riferimento all'undicesimo significato della parola *take*) la ingerisce al fine di mantenersi in vita e di crescere, oppure tale che A forma un MEAL, oppure tale che è OTHER THEN un DRINK.

Il formalismo di Quillian presenta altre caratteristiche, alcune delle quali verranno largamente riprese e sviluppate nelle reti semantiche successive. E' possibile associare ai nodi *token* vari tipi di *specification tag*, vale a dire valori numerici che servono ad indicare, ad esempio, il numero di istanze che deve avere un *token*, o la sua rilevanza nella definizione di un concetto. Secondo Quillian, espressioni come *a, six, much, very, probably, not, perhaps* dovrebbero essere rappresentate non come nodi distinti, ma come *specification tag* associate ai *token* di un piano.

Alla definizione di una parola possono essere associate *clue word*, che indicano con quali altri concetti un concetto deve essere messo in relazione nei casi tipici. Ad esempio, la definizione del verbo *to comb* ha come oggetto la *clue word* *hair*, per indicare che di solito l'oggetto di *to comb* è *hair*. Le *clue word* sono quindi le antesignane dei *default value* dei sistemi di rappresentazione successivi, e in particolare dei *frame* (si veda oltre il par. 4.3); sono cioè valori tipici che si assumono come veri in mancanza di informazioni contrarie più specifiche.

Abbiamo visto che ogni piano contiene la definizione di un concetto lessicale. Tale definizione non è tuttavia completa, in quanto i vari *token* che vi compaiono rimandano a loro volta ad altri piani, cioè ad altre definizioni rappresentate nel modello. La parte della definizione compresa in un singolo piano viene detta da Quillian la *definizione immediata* di una parola. Alla definizione immediata si contrappone il *concetto completo* di una parola (*full word concept*), che comprende tutti i nodi *type* e *token* che contribuiscono, in maniera diretta o indiretta, alla definizione. Il *full word concept* di una parola si ottiene partendo dal nodo *type* della parola stessa (detto nodo "patriarca"), si percorrono quindi tutti gli archi del piano che le corrisponde e, per ogni *token* raggiunto, si visitano tutti i piani dei relativi nodi *type*, ripetendo ricorsivamente l'operazione e visitando, ogni volta che si incontra un *token*, il piano del *type* corrispondente. Un insieme non strutturato di nodi *type* e *token* non costituisce un'adeguata rappresentazione di un *full concept*, poiché mancano completamente le informazioni sulle relazioni fra i nodi. E' quindi necessario, man mano che la ricerca procede, mantenere traccia anche dei vari archi che sono stati percorsi. Così, "nel modello della memoria il concetto completo di una parola è definito come l'insieme di tutti i nodi che possono essere raggiunti tramite un processo esaustivo di percorrimto avente origine nel corrispondente *type node* patriarca, assieme alla somma totale delle relazioni fra questi nodi specificate da archi fra *token* e *token* di uno stesso piano" (Quillian 1968, p. 238).

Si noti che questo processo di ricerca può partire da qualsiasi nodo *type* della rete, poiché a ogni nodo *type* sono associati dei *token* che rimandano a loro volta ad altri *type*. Non ci sono infatti nodi primitivi nelle reti di Quillian, ed ogni voce è definita sempre nei termini di altre definizioni nella rete (così come in un dizionario ogni voce richiama sempre qualche altra voce).

Lo scopo dichiarato del modello di Quillian era quello di simulare la comprensione di enunciati espressi in linguaggio naturale. Fornendogli in *input* un enunciato sconosciuto, il sistema avrebbe dovuto essere in grado di ricavare una rappresentazione del suo significato sulla base delle definizioni presenti nella rete semantica. Le prestazioni effettive del modello sono tuttavia molto più limitate: di fatto, esso è in grado soltanto di confrontare il significato di due voci lessicali. Sottoponendogli due parole la cui definizione è rappresentata nella rete, il programma individua le più importanti somiglianze e differenze fra i loro significati. Dopo di che, una seconda componente del programma genera un enunciato, scritto in un sottoinsieme semplificato dell'inglese, che esprime tali somiglianze e differenze.

Il meccanismo inferenziale utilizzato per confrontare due parole si basa su una forma di *attivazione diffusa* (*spread activation*) dei nodi della rete. Il confronto avviene individuando i punti in cui i *full concept* delle due parole si intersecano. Partendo dai nodi patriarca delle due definizioni da confrontare, il programma procede visitando man mano

i nodi vicini (siano essi *type* o *token*) ai quali può accedere percorrendo i vari tipi di archi associativi. I nodi via via visitati vengono "attivati", etichettandoli per mezzo di una *activation tag*. In questo modo, attorno a ciascun patriarca si crea una zona di nodi attivati che si espande lentamente in tutte le direzioni. Si noti infatti che il processo di attivazione procede alternativamente su ciascuno dei due concetti da confrontare, in modo da simulare un'elaborazione eseguita parallelo. Ogni *activation tag* comprende il nome del nodo patriarca da cui è partito il processo di attivazione. Questo consente di evitare circoli viziosi e di identificare le intersezioni. Ogni volta che un nodo viene raggiunto da un processo di attivazione, il programma controlla se quel nodo era già stato attivato a partire dallo stesso patriarca. In tal caso quel percorso viene abbandonato, in quanto già visitato precedentemente. Se invece quel nodo presenta la *activation tag* col nome di un altro patriarca, allora è stato identificato un punto in cui i due *full concept* si intersecano. Infine, se il nodo non presenta alcuna *activation tag*, allora il nodo viene etichettato, e il processo di attivazione continua. Ogni *activation tag* comprende anche il nome del nodo visitato immediatamente prima durante il processo di attivazione. Questo consente, una volta individuata un'intersezione fra le sfere di attivazione di due concetti, di ricostruire i percorsi (*path*) che dai patriarchi conducono al nodo d'intersezione. Tali percorsi sono necessari al sistema per generare le proprie risposte. I *path* che conducono dai nodi patriarca al nodo intersezione vengono utilizzati per generare le risposte del sistema. Ogni risposta viene costruita sulla base dei nodi del percorso e dei tipi di archi che li collegano (utilizzando talvolta anche le informazioni contenute nelle immediate vicinanze dei nodi percorsi).

4.2 Dopo Quillian

Nel modello di memoria associativa di Quillian erano presenti in nuce molte delle caratteristiche che diventeranno tipiche dei sistemi a rete semantica successivi. Ad esempio, gli archi che rappresentano relazioni di sottoclasse fra concetti diventeranno un costrutto fondamentale di pressoché tutte le reti semantiche. Essi sono gli antesignani di quelli che in seguito verranno chiamati di volta in volta archi *isa* (dove *isa* sta per "*is a*", vale a dire "è un"), archi *ako* ("*a kind of*", cioè: "un tipo di"), o archi *superc*, ossia archi di superconcetto. Nel modello di Quillian è in un certo senso già implicito il principio in base a cui, mediante tali archi, si possa descrivere un concetto facendo riferimento a concetti di portata più generale. Ad esempio, nella rete di fig. 4.2, il concetto PLANT 2 viene introdotto come sottoclasse di APPARATUS, alla cui definizione si fa implicitamente riferimento senza tuttavia riprodurla esplicitamente nella definizione di PLANT 2. Tale meccanismo evolverà in seguito nel principio dell'*ereditarietà* fra concetti, in base al quale i concetti più specifici ereditano le caratteristiche dei loro superconcetti più generali. Tutto ciò tuttavia non è ancora presente, se non in maniera estremamente rudimentale, nel modello di Quillian che abbiamo descritto. In generale, il limite principale di tale modello consiste nel fatto che i meccanismi inferenziali definiti su di esso trattano i vari archi in maniera del tutto uniforme, e non esistono regole di inferenze specifiche relative ad archi di diverso tipo. Ad esempio, non viene introdotta alcuna regola che, dal fatto che un nodo A è sottoclasse di B e dal fatto che B è sottoclasse di C, consenta di dedurre che A è a sua volta sottoclasse di C. Di conseguenza, le informazioni che sono rappresentate nella rete utilizzando archi di diverso tipo non possono essere utilizzate per ottenere inferenze dal sistema. Il comportamento inferenziale del modello di Quillian, basato sul meccanismo della *spread activation*, utilizza la rete ignorando completamente il significato specifico dei vari archi. Il tipo degli archi viene utilizzato dal sistema soltanto per generare risposte in linguaggio "quasi" naturale, una volta che il meccanismo della *spread activation* abbia ottenuto un risultato. Le reti di Quillian con i vari tipi di archi non costituiscono quindi un vero e proprio linguaggio formale di rappresentazione, ma soltanto una sorta di notazione sintetica in cui esprimere enunciati del linguaggio naturale.

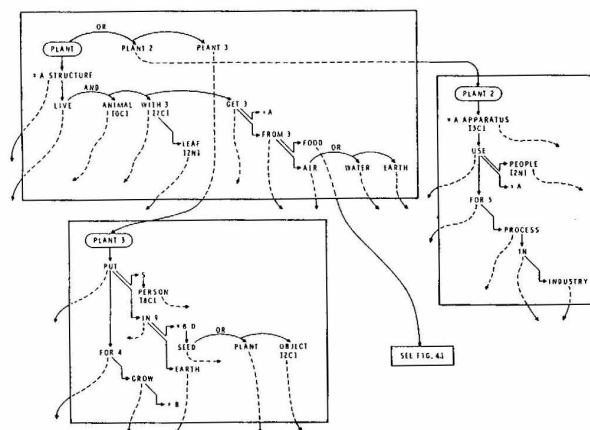


Fig. 4.2 - Plant. 1. Living structure which is not an animal, frequently with leaves, getting its food from air, water, earth.
2. Apparatus used for any process in industry.
3. Put (seed, plant, etc.) in earth for growth.

In vari lavori successivi Quillian ha ulteriormente perfezionato il modello che abbiamo presentato. Ad esempio, in Quillian (1969) scompaiono dalle reti i nodi *token* e, nella definizione dei concetti, vengono utilizzati direttamente puntatori al nodo tipo corrispondente. In Collins e Quillian (1970) viene presentato un tipo di rete che può essere considerato un antesignano diretto di gran parte dei sistemi successivi. In quel lavoro emerge chiaramente il ruolo privilegiato degli archi di tipo *superset*. Essi strutturano la rete come una gerarchia di concetti. Ad ogni nodo è associato un insieme di proprietà che caratterizzano il concetto corrispondente (si veda fig. 4.3 - da Collins e Quillian 1970). Ad esempio, *Bird* è descritto come sottoclasse di *Animal*, e gli sono attribuite le proprietà *Has Wings*, *Can Fly* e *Has Feathers*. Le proprietà più generali sono introdotte ai livelli più alti della tassonomia, e diventa esplicito il meccanismo dell'ereditarietà, in base al quale, di norma, un concetto eredita le proprietà associate ai suoi superconcetti (ad esempio, *Bird*, in quanto sottocconcetto di *Animal*, eredita *Has Skin*, e così via). Viene inoltre introdotto esplicitamente il meccanismo per cui proprietà definite a livelli più specifici possono "cancellare" proprietà incompatibili che dovrebbero essere ereditate dai livelli superiori. Ad esempio, il concetto *Bird* ha associata la proprietà *Fly*, mentre per *Ostrich*, che è sottoclasse di *Bird*, vale invece la proprietà *Can't Fly*. Carbonell (1970) utilizza una rappresentazione a reti semantiche simile a quella di Quillian per la base di conoscenza di SCHOLAR, un programma per la didattica assistita dal calcolatore. Le reti utilizzate da Carbonell presentano alcune importanti innovazioni; ad esempio, compare la distinzione fra *concept units* e *example units*, cioè fra nodi che rappresentano concetti generali e nodi che rappresentano istanze specifiche, ossia singoli individui.

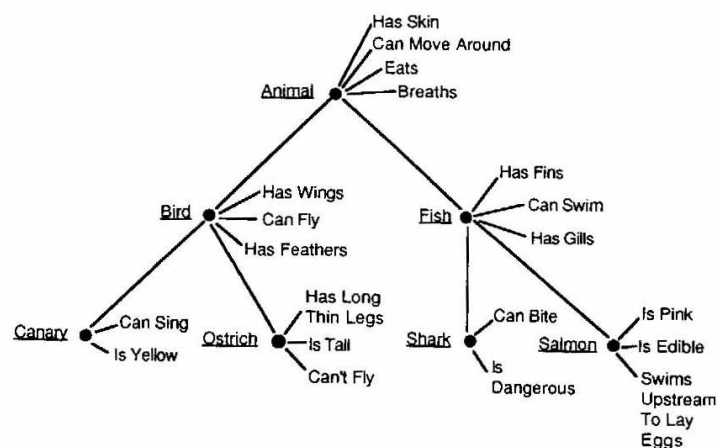


fig. 4.3

Un altro dei primi sistemi a rete semantica è legato alle ricerche di Winston (1970, 1975) sull'apprendimento automatico. Lo scopo di Winston era sviluppare programmi in grado di apprendere in base ad esempi semplici generalizzazioni in un mondo di blocchi. Come strumento di rappresentazione della conoscenza, veniva utilizzato un sistema di rappresentazione a rete che presenta caratteristiche comuni a molti sistemi successivi. Un esempio è in fig. 4.4 (da Winston 1975). Nelle reti di Winston, alcuni nodi rappresentano oggetti, o classi di oggetti (come il nodo *brick* della figura), mentre altri nodi rappresentano relazioni (ad esempio il nodo *left of*). Di conseguenza, anche gli archi hanno funzioni diverse: alcuni rappresentano relazioni fra oggetti (ad esempio, l'arco *one part is*), altri servono semplicemente a collegare nodi che rappresentano oggetti o classi a nodi che rappresentano relazioni. Non sempre la notazione di Winston è del tutto coerente, e può accadere che la stessa relazione compaia talvolta rappresentata come arco, talvolta come nodo. Inoltre, la notazione non distingue tra relazioni di portata logica generale, quale quella di superconcetto, e relazioni specifiche dipendenti dal dominio, rendendo in questo modo impossibile, ad esempio, un trattamento soddisfacente del meccanismo di ereditarietà. In questo, anche il lavoro di Winston è sintomatico dei limiti dei primi sistemi a rete semantica, limiti che verranno in seguito messi in luce da W. Woods (si veda il par. 4.4).

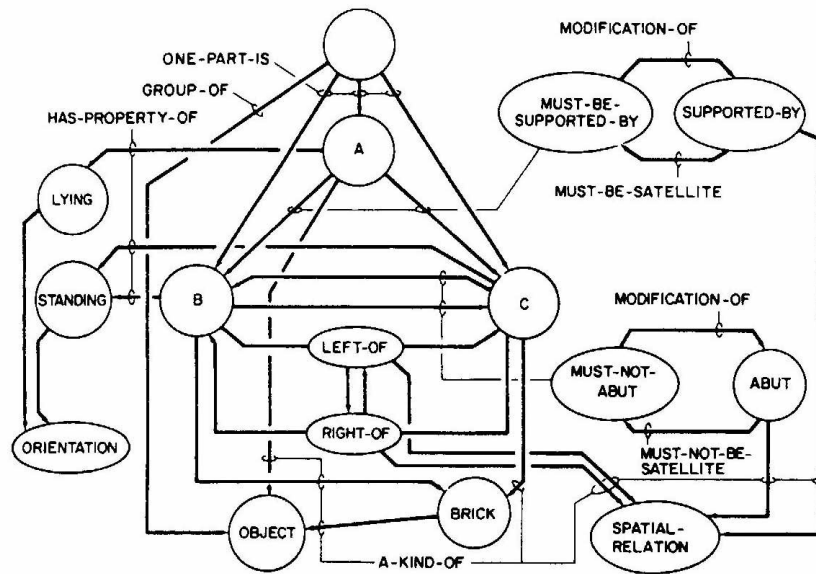


fig. 4.4

Un'ulteriore linea di sviluppo nella storia delle reti semantiche prende l'avvio dal lavoro di Filmore (1968) sulle strutture a casi in linguistica. In questo tipo di sistemi le reti semantiche vengono usate principalmente per rappresentare il significato di verbi e di enunciati linguistici. Al verbo principale di un enunciato viene fatto corrispondere un nodo nella rete, per il quale sono definiti archi che corrispondono ai diversi casi linguistici. Tali archi terminano in nodi che rappresentano i relativi riempitori. Così, ad esempio, dato un nodo che rappresenta una certa azione, per esso sono definiti archi che corrispondono al tipo di azione, al soggetto, all'oggetto, al tempo dell'azione, al suo effetto, e così via. Fra le reti semantiche ispirate a questo principio ricordiamo ad esempio i sistemi di Simmons e dei suoi collaboratori (Simmons et al. 1968; Simmons e Bruce 1971; Simmons e Slocum 1972), i sistemi HAM (Anderson e Bower 1973) e ACT (Anderson 1976). Un ulteriore esempio di questo tipo di modelli è fornito dal lavoro del gruppo di ricerca LNR, composto da Lindsay, Norman e Rumelhart (Rumelhart et al. 1972). In fig. 4.5 è riportato un esempio di rete del sistema LNR, che rappresenta il significato dell'enunciato "In a park a hippie touched a debutante". In LNR sono previsti due tipi di nodi, nodi che rappresentano *concetti* (ad esempio HIPPIE e PARK nella figura) e nodi che rappresentano *eventi* (come TOUCH). I nodi che rappresentano concetti sono definiti sulla base di archi come ISA o HAS (utilizzato per attribuire sottoparti). I nodi che rappresentano eventi sono definiti per mezzo di archi che corrispondono ai vari casi linguistici (ad es. ACTOR, OBJECT, TIME, e così via). L'arco ACT è l'analogo di ISA per gli eventi. I nodi in LNR si distinguono inoltre in nodi *primari* e nodi *secondari*. I nodi *primari* corrispondono ai vari elementi del lessico, e possono avere associata una definizione nella rete. I nodi *secondari* corrispondono a usi specifici di nodi primari, come nella rappresentazione del significato di un singolo enunciato. Ad esempio, nella figura, *TOUCH è un nodo secondario di tipo evento che rimanda, attraverso un arco ACT, al corrispondente nodo primario TOUCH. *TOUCH è collegato mediante un arco ACTOR ad un nodo secondario di tipo concetto, che rimanda, attraverso un arco ISA, al corrispondente nodo primario HIPPIE. Nella definizione dei nodi primari le proprietà di portata più generale di un nodo vengono ereditate dai nodi più specifici. Come nelle reti di Collins e Quillian, sono ammesse eccezioni al meccanismo dell'ereditarietà.

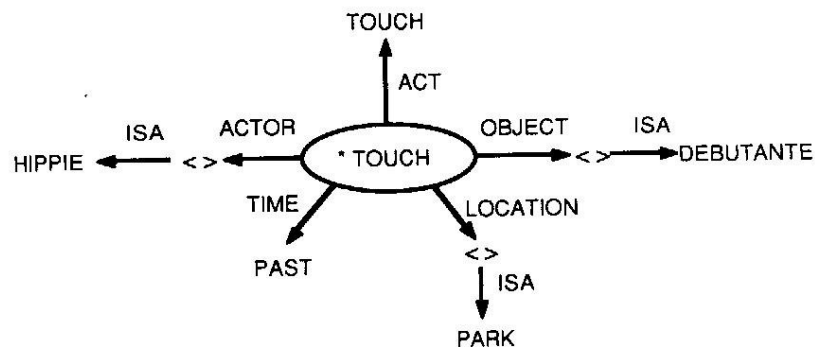


fig. 4.5

Probabilmente il formalismo a rete semantica più noto fra quelli, in senso lato, ispirati alle strutture a casi è la teoria della *dipendenza concettuale* di Roger Schank⁴. Essa merita qualche cenno, oltre che per la notorietà di cui gode, anche perché si tratta di un esempio di sistema in cui viene individuato un insieme finito di "primitive semantiche" che dovrebbero essere sufficienti per la rappresentazione di significati di tipo arbitrario. Un altro esempio di sistema a rete basato su primitive semantiche è la teoria della *Preference semantics* di Wilks (si veda Wilks e Fass 1992). Schank identifica un insieme di *azioni primitive*, circa dodici, che, opportunamente combinate, dovrebbero consentire di costruire la rappresentazione del significato di qualsiasi verbo. Alcuni esempi delle primitive semantiche di Schank sono: ATRANS (che corrisponde al trasferimento di possesso di un oggetto), PTRANS (il trasferimento della collocazione fisica di un oggetto), MTRANS (il trasferimento di informazione mentale fra agenti), MBUILD (la costruzione di un pensiero o di nuova informazione da parte di un agente), PROPEL (l'applicazione di una forza fisica a un oggetto), MOVE (il movimento di una parte del corpo di un agente), INGEST (l'ingerire un oggetto da parte di un essere animato). Inoltre il formalismo prevede un insieme di relazioni di *dipendenza concettuale*, ossia relazioni concettuali che possono sussistere fra azioni primitive e oggetti o situazioni del mondo. Tali relazioni sono in parte analoghe ai casi dei formalismi visti sopra. Fra tali "casi concettuali" si trovano ad esempio la relazione fra l'attore, ossia il soggetto di un'azione, e l'azione da lui compiuta, la relazione fra un'azione e il suo oggetto, e così via. Nelle reti semantiche basate sulla teoria della dipendenza concettuale, i nodi sono costituiti da istanze di azioni primitive, oppure rappresentano oggetti o situazioni. Gli archi rappresentano relazioni di dipendenza concettuale fra i nodi.

Ad ogni azione primitiva è associato un certo numero di *campi (slot)*, ossia di relazioni di dipendenza concettuale, con l'indicazione delle restrizioni che devono essere soddisfatte dagli oggetti che entrano in tale relazione. Ad esempio, l'azione primitiva PTRANS ha i seguenti *slot*: ACTOR, che corrisponde al soggetto dell'azione, che può avere come argomento un essere umano, o comunque un oggetto animato; OBJECT, che corrisponde all'oggetto che viene spostato, che deve essere un oggetto fisico; FROM e TO, che devono avere come argomento una locazione spaziale ciascuno, e che indicano rispettivamente il punto di partenza e il punto di arrivo dell'azione di spostamento.

Graficamente, un'azione viene rappresentata da una rete come quella in fig. 4.6. Questa rete rappresenta un'azione eseguita da Mario, che consiste nello spostare una certa sedia (la sedia SEDIA1) dal punto P1 al punto P2. Le frecce rappresentano le varie relazioni di dipendenza concettuale. Ad esempio, la freccia bidirezionale a doppio tratto rappresenta la relazione fra attore e azione, mentre la freccia a tratto semplice etichettata con *O* rappresenta la relazione fra l'azione e il suo oggetto.

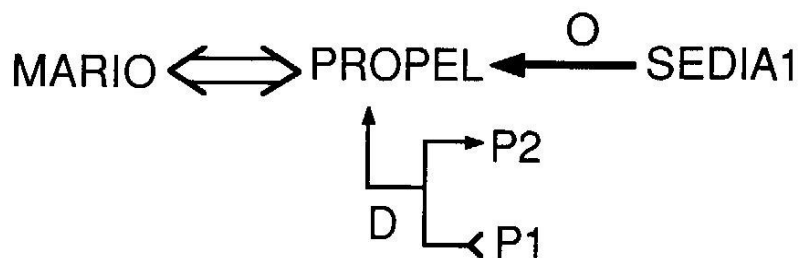


fig. 4.6

Ciascuna azione primitiva può essere specificata in più modi diversi, in maniera da rappresentare il significato di diversi verbi di una lingua. Ad esempio, guidare, volare, camminare, cadere sono tutti esempi di PTRANS. Significati diversi possono essere espressi mediante restrizioni di valore sugli *slot*; inoltre, nella rappresentazione del significato di un verbo, diverse azioni primitive possono essere coinvolte, connesse fra loro mediante opportune relazioni di dipendenza concettuale.

Il sistema prevede inoltre un insieme di *regole di inferenza*. Tali regole possono essere classificate in categorie diverse, come ad esempio regole che stabiliscono come devono essere riempiti gli *slot* di un'azione primitiva in mancanza di informazioni specifiche, regole che inferiscono le possibili cause o precondizioni di un'azione, regole che inferiscono le possibili conseguenze di un'azione, e così via. I vari tipi di azione primitiva sono connessi fra loro in maniera da consentire varie inferenze. Ad esempio, un'azione di tipo PROPEL implica tipicamente un'azione di tipo PTRANS: se si spinge qualcosa, di solito avviene uno spostamento di un oggetto fisico. Tuttavia, Schank e i suoi collaboratori⁵ sottolineano la differenza fra regole di inferenza di questo genere e regole di deduzione logica nel senso classico: inferenze di questo genere non conducono necessariamente da premesse vere a conseguenze vere. Bisogna

⁴ Si veda (Schank 1972, 1975). Per una rassegna recente sulla dipendenza concettuale e sui sistemi che ne sono derivati si veda (Lytinen 1992).

⁵ Si veda ad esempio (Schank e Rieger 1974).

sempre essere disposti a rivedere le conseguenze che sono state tratte. Ad esempio, può accadere di spingere qualcosa senza che esso si muova⁶.

4.3 Prototipi ed eccezioni

In questo paragrafo prenderemo in considerazione formalismi la cui caratteristica principale è costituita dal fatto di rappresentare concetti sulla base di proprietà e di attributi prototipici - attributi cioè che valgono per istanze tipiche di un concetto, ma che possono essere violate da esemplari "anomali". Si tratta di un problema onnipresente nella rappresentazione della conoscenza di senso comune. Ad esempio, fra gli attributi tipici degli uccelli vi è la capacità di volare (o, in altri termini, il *prototipo* di uccello ha la proprietà di poter volare). Tuttavia esistono molti uccelli che non sono in grado di farlo. I cani hanno quattro zampe, ma un cane che abbia perso una zampa è pur sempre un cane. Oppure, i tavoli tipici hanno quattro gambe, ma vi sono tavoli con un numero di gambe diverso, e così via. Nel capitolo precedente abbiamo visto che l'esigenza di rappresentare proprietà prototipiche è stato uno degli argomenti utilizzati dagli oppositori dell'uso della logica in IA. D'altra parte, nel cap. 2 si è visto che dal punto di vista che qui ci interessa, ossia per la rappresentazione del significato lessicale, il problema è certamente centrale, in quanto la maggior parte dei concetti associati ad elementi del lessico del linguaggio naturale è caratterizzabile esclusivamente in termini prototipici. Basti considerare gli ovvi esempi sopra riportati. Intuitivamente, è difficile negare che la proprietà di volare abbia a che fare a qualche titolo con il significato della parola "uccello", anche se non rientra fra le condizioni necessarie né sufficienti della sua definizione. In generale, per molti termini del linguaggio naturale, così come per molti concetti del senso comune, è estremamente difficile individuare condizioni necessarie o sufficienti, e ci si basa piuttosto su insiemi di caratteristiche tipiche.

Già nei sistemi a rete semantica citati nei paragrafi precedenti ci si poneva il problema di descrivere concetti sulla base di proprietà tipiche. Ne sono un esempio le *clue word* di Quillian o le eccezioni all'ereditarietà nelle reti di Collins e Quillian (1970). Anche le inferenze previste dalla teoria della dipendenza concettuale di Schank valgono generalmente per "casi tipici", e devono essere considerate rivedibili. Prenderemo ora in considerazione due classi di formalismi in cui il problema è stato posto in maniera più diretta e sostanziale. Si tratta dei sistemi a *frame* e delle reti tassonomiche con eccezioni, in particolare il sistema NETL di Fahlman.

I *frame* sono un tipo di rappresentazione della conoscenza proposto da Minsky (1975) in aperta polemica con le rappresentazioni basate sulla logica matematica. Secondo Minsky, molte teorie proposte sia in psicologia, sia in IA (e fra esse, appunto, la logica) prevedono rappresentazioni di tipo troppo locale e poco strutturato per risultare adeguate come rappresentazioni della conoscenza di senso comune e per servire da base alla simulazione di comportamenti intelligenti. Per spiegare le capacità di ragionamento e la velocità di accesso alle informazioni memorizzate proprie degli esseri umani (e quindi per poterle simulare mediante programmi) è necessario ipotizzare tipi di rappresentazione più strutturati e complessi. I *frame* dovrebbero servire appunto a questo scopo. L'idea intuitiva è che la memoria umana sia strutturata in un insieme di schemi, di rappresentazioni stereotipiche di oggetti e di situazioni. Posti di fronte a situazioni nuove, gli esseri umani identificano lo schema che meglio si applica ai dati disponibili, e agiscono sulla base delle informazioni che tale schema mette a disposizione o delle aspettative che esso comporta. I *frame* dovrebbero corrispondere appunto a schemi di questo genere: dovrebbero essere strutture per la rappresentazione di situazioni prototipiche come, secondo gli esempi dello stesso Minsky, essere in un soggiorno di un certo tipo o andare a una festa di compleanno di bambini. A un *frame* sono associati diversi tipi di informazioni, relative anche a come adoperare il *frame* stesso, a cosa aspettarsi, a cosa fare se tali aspettative si rivelassero errate.

Va precisato che, nell'articolo di Minsky, il concetto di *frame* viene presentato in maniera intuitiva e del tutto informale, senza che venga definito un formalismo di rappresentazione vero e proprio. Al di là dei concetti principali, che corrispondono grosso modo a quanto esporremo qui di seguito, molte parti risultano poco chiare e di difficile comprensione. Le idee di Minsky, tuttavia, hanno avuto una grande influenza sulla ricerca successiva in rappresentazione della conoscenza, e molti sono i sistemi di rappresentazione che vi si sono ispirati⁷.

I *frame* sono organizzati in basi di conoscenza complesse dette *sistemi di frame (frame system)*. Ciascun *frame* è una struttura di dati costituita da diversi campi (*slot*), ciascuno dei quali rappresenta una delle caratteristiche o delle proprietà del prototipo rappresentato, e le sue possibili relazioni con altre entità. Ad ogni *slot* sono associati dati o informazioni specifiche relative al prototipo. Ad esempio, il seguente potrebbe essere un frammento del *frame* che rappresenta il prototipo di *mammifero*:

nome del frame: mammifero
è un: vertebrato
 ...
tipo riproduzione: viviparo

⁶Questi problemi possono essere ricondotti al *frame problem* e alla non monotonicità del ragionamento di senso comune sulle azioni - si veda il capitolo 6.

⁷Fra essi, ricordiamo ad esempio il sistema KRL di Bobrow e Winograd (1977).

protezione del corpo: pelliccia
arto: zampa (card.:4)

...

Il primo campo indica il nome del *frame*; gli altri campi indicano i vari attributi di mammifero: un mammifero è un vertebrato, in quanto a tipo di riproduzione è viviparo, ha il corpo protetto da una pelliccia, come arti ha delle zampe, e così via. Per ciascuno *slot*, oltre a essere specificato il tipo di riempitori che quello *slot* ammette, possono essere indicate altre informazioni, come la cardinalità, ossia il numero di riempitori che lo *slot* può avere. Ad esempio, per il prototipo di mammifero i riempitori dello *slot arto* sono oggetti di tipo *zampa* e sono in numero di quattro. Lo *slot è un* di un *frame* fa riferimento a uno o più altri *frame* di cui esso è un caso particolare. In questo modo, i *frame* di una base di conoscenza sono organizzati in una tassonomia. Ad esempio, il *frame mammifero* è un caso particolare del *frame vertebrato*. A loro volta, i *frame* seguenti sono casi particolari di *mammifero*:

<i>nome del frame: tigre</i>	<i>nome del frame: cane</i>
<i>è un: mammifero</i>	<i>è un: mammifero</i>
...	...
<i>si nutre di: carne</i>	<i>padrone: persona</i>
<i>habitat: giungla</i>	...
...	...

Ciascuno di essi eredita gli attributi di *mammifero*. Tali attributi possono essere ulteriormente specificati, o ne possono essere aggiunti altri sotto forma di nuovi *slot* (nel nostro esempio, lo *slot padrone* potrebbe ad esempio essere definito localmente per il *frame cane*). I valori dei vari *slot* (come ad esempio *pelliccia*, *zampa*, *giungla*, *persona*, e così via) fanno riferimento, di norma, ad altri *frame* del *frame system*. Ad esempio, *giungla* potrebbe corrispondere ad un *frame* del genere:

nome del frame: giungla
è un: ambiente naturale
 ...
collocazione geografica: regione tropicale
clima: caldo umido
 ...

In questo modo i *frame* di un *frame system* sono organizzati in base a una serie di complesse relazioni reciproche analoghe a quella fra i concetti di una rete semantica. Ai livelli più bassi della tassonomia possono esservi *frame* che descrivono individui specifici. Ad esempio, il seguente *frame* descrive una istanza del *frame cane*:

nome del frame: Pluto
è un: cane
 ...
padrone: Topolino
 ...

Una caratteristica fondamentale del meccanismo di ereditarietà nei *frame* è costituito dai valori di *default*. Poiché i *frame* vanno intesi come rappresentazioni di *prototipi*, le informazioni associate agli *slot* in ciascun *frame* possono risultare false in alcune situazioni specifiche. Ad esempio, i cetacei sono mammiferi, ma non hanno pelliccia e hanno come arti delle pinne; un mammifero può avere meno di quattro zampe; l'ornitorinco è un mammifero oviparo; una tigre può non vivere nella giungla, e così via. In generale, alcuni *slot* hanno come riempitori informazioni necessariamente vere per ciascuna istanza del *frame* (ad esempio, tutti i mammiferi sono necessariamente dei vertebrati). Tali informazioni vengono ereditate da *tutti* i *frame* più specifici. Ad altri *slot* sono associate invece informazioni che valgono esclusivamente per le istanze "tipiche" del *frame*. Tali informazioni vengono dette appunto valori attribuiti per *default*. Ad esempio, *pelliccia* è un valore di *default* dello *slot protezione del corpo* per il *frame mammifero*, così come è un valore di *default* la cardinalità 4 associata allo *slot arto*. Si assume che i valori di *default* valgano ogni qual volta non siano disponibili esplicitamente informazioni incompatibili con essi. Ad esempio, in base al *frame* sopra riportato, se si sa che un animale è un mammifero e non si dispone di nessuna informazione circa i suoi arti, si assume che abbia quattro zampe. I *default* di un *frame* vengono quindi ereditati da tutti i *frame* più specifici, a meno che in essi non sia rappresentata esplicitamente qualche informazione incompatibile con ciò che dovrebbe essere ereditato. Così, il *frame* seguente:

nome del frame: tigre da circo

è un: tigre
 ...
 habitat: circo
 ...

non eredita dal *frame tigre* il valore di *default giungla* dello *slot habitat*.

I *frame* presentano inoltre altre caratteristiche, come ad esempio il *collegamento procedurale* (*procedural attachment*). Ad ogni *frame* possono essere associate procedure specifiche di vario tipo che operano sulla base di conoscenza: regole di inferenza specializzate, procedure per individuare i riempitori di uno *slot*, procedure di ricerca definite sul *frame system*, e così via. Tali procedure possono essere ereditate dai *frame* più specifici in base a un meccanismo simile a quello dei valori di *default*⁸.

Un esempio di collegamento procedurale è fornito dalle procedure di tipo *if needed*. Tali procedure vengono utilizzate qualora le informazioni circa i riempitori di uno *slot* in un *frame* non vengano immagazzinate esplicitamente, ma siano presenti in modo implicito nella base di conoscenza. Le procedure *if needed* hanno la funzione di calcolare i riempitori di uno *slot* nel momento in cui tale informazione venga richiesta. Si supponga ad esempio di avere un *frame persona* definito nel modo seguente.

nome del frame: persona
 ...
 genitore: persona (card.:2)
 antenato: persona
 ...

Non è necessario che le informazioni circa i riempitori dello *slot antenato* siano rappresentate esplicitamente per ciascuna istanza del *frame*. Per individuare gli antenati di una persona è infatti sufficiente individuarne i genitori dei genitori, e quindi, ricorsivamente, gli antenati dei genitori. Una procedura di tipo *if needed* che svolga tale ricerca può quindi essere associata allo *slot antenato* di *persona*. In parte analoghe alle procedure *if needed* sono le procedure di tipo *if added*, le quali provvedono invece a dedurre e ad aggiungere ulteriori informazioni alla base di conoscenza qualora nuove informazioni di un determinato tipo (ad esempio riempitori di un certo *slot*) vengano inserite.

Un'altra classe di sistemi di rappresentazione della conoscenza in cui è centrale il problema delle eccezioni al sistema dell'ereditarietà è costituito dalle reti semantiche basate su di un meccanismo di elaborazione di tipo parallelo. Si tratta nella sostanza di un ulteriore sviluppo del concetto di attivazione diffusa in parallelo che abbiamo già incontrato nel sistema di Quillian. Il capostipite di questo tipo di reti semantiche è il sistema NETL di Scott Fahlman (1979). Si tratta di un formalismo a rete semantica destinato ad essere implementato su opportune macchine ad *hardware* concorrente. In esso, le inferenze avvengono propagando in parallelo lungo gli archi della rete opportuni *marcatori* di diverso tipo. Il linguaggio di NETL prevede diversi tipi di costrutti. Vi sono nodi per rappresentare individui e nodi per rappresentare concetti generali. Fra i diversi tipi di archi, un ruolo centrale è svolto dall'analogo degli archi di tipo *isa* (che raffigureremo con delle frecce a tratto continuo), in base ai quali è organizzato il sistema dell'ereditarietà. Sono previsti inoltre archi di tipo *is not*, che raffiguriamo per mezzo di frecce tratteggiate⁹. Sia gli archi *isa* che gli archi *is not* ammettono possibili eccezioni. Ad esempio, nella fig. 4.7, l'arco *isa* fra *uccello* e *volatile* sta a indicare che gli uccelli tipici sono volatili, ma sono ammesse possibili eccezioni (ad esempio i pinguini). Allo stesso modo, i mammiferi tipicamente non sono volatili (ma i pipistrelli sono mammiferi e volano). NETL prevede numerosi altri tipi di costrutti oltre agli archi *isa* e *is not* (ad esempio archi per esprimere relazioni qualunque tra due concetti), e il trattamento delle eccezioni nell'ereditarietà costituisce soltanto una delle sue caratteristiche. Tuttavia, la linea di ricerca sviluppatasi a partire dal lavoro di Fahlman ha posto l'enfasi essenzialmente su questo tipo di problemi. Ciò è dovuto al fatto che il meccanismo inferenziale basato sulla propagazione in parallelo di marcatori sembrava offrire soluzioni plausibili ad alcuni problemi connessi all'ereditarietà con eccezioni, e in particolare al problema dell'ereditarietà *multipla*. Tutti gli esempi di tassonomie di concetti con eccezioni che abbiamo visto nei paragrafi precedenti hanno la struttura di un albero: ogni concetto sta nella relazione *isa* con al più un altro concetto della rete. E' di questo tipo la rete di Collins e Quillian della fig. 4.3, ed ha questa struttura anche la tassonomia di *frame* dell'esempio sopra riportato. In reti di questo genere il trattamento delle eccezioni è poco problematico. Ogni concetto eredita direttamente al più da un altro concetto. Quindi, per ogni concetto valgono, oltre alle caratteristiche definite localmente, tutte le caratteristiche che valgono per il suo superconcetto immediato e che non sono in conflitto con le prime. Questo criterio può essere applicato ricorsivamente fino alla radice della tassonomia.

⁸ Sul tema del collegamento procedurale si veda anche (Winograd 1975).

⁹ Fahlman non usa questa terminologia, tuttavia questo è l'uso invalso nella letteratura successiva, e noi adotteremo tali denominazioni per uniformità con l'uso generale.

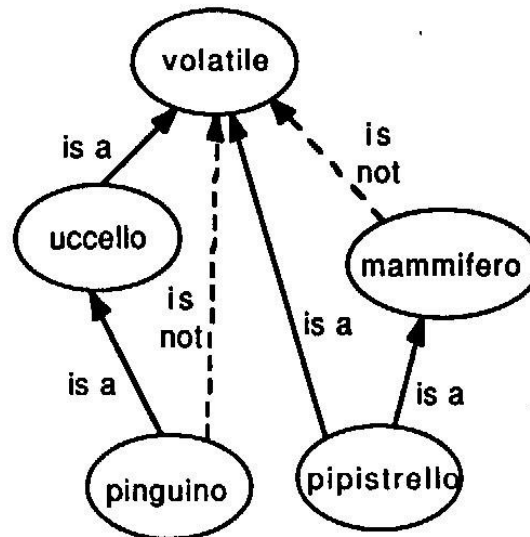


fig. 4.7

La situazione è più complessa se in una rete semantica che prevede eccezioni si ammette l'*eredità multipla*, se cioè si ammette che ciascun concetto possa avere più di un superconcetto. In tal caso un concetto può ereditare da parti diverse caratteristiche fra loro in conflitto. Si considerino ad esempio i concetti *pipistrello* e *pinguino* nella rete di fig. 4.7. *pipistrello* è collegato da un arco *isa* sia a *volatile* che a *mammifero*. I pipistrelli, in quanto mammiferi, dovrebbero ereditare la caratteristica di non essere volatili; tuttavia nella rete si afferma esplicitamente che essi, tipicamente, sono volatili. Intuitivamente, l'idea è che, in casi di questo tipo, le informazioni più specifiche dovrebbero avere la meglio su quelle più generiche. Così, da una rete del genere si vorrebbe poter inferire che tipicamente i pipistrelli volano, in quanto esiste un legame diretto di tipo *isa* fra *pipistrello* e *volatile*, mentre per dedurre che i pipistrelli non volano si dovrebbe passare attraverso il concetto *mammifero*. Il meccanismo inferenziale basato sulla propagazione in parallelo di marcatori sembra mettere a disposizione una soluzione estremamente "naturale" a questo tipo di problemi. Si consideri la rete di fig. 4.8. Essa presenta problemi di eredità multipla molto simili al caso appena esaminato relativo al pipistrello: i molluschi tipici sono animali con una conchiglia, tuttavia i cefalopodi sono molluschi, ma, tipicamente, sono privi di conchiglia. I Nautilus, infine, sono cefalopodi che sono dotati di conchiglia. Vediamo, a grandi linee, come si comporterebbe NETL in un caso del genere. Nel meccanismo di attivazione parallela, i legami *isa* propagano marcatori "positivi", mentre i legami di tipo *is not* propagano marcatori "inibitori". Tali marcatori vengono propagati in parallelo, un passo alla volta. Data la rete della figura, se si chiede a NETL se un cefalopode è un animale con la conchiglia, inizia un processo di attivazione in parallelo a partire dal nodo *cefalopode*. In questo caso, il marcatore che arriva per primo al nodo *animale con conchiglia* è un marcatore di tipo inibitore, e il sistema fornisce quindi una risposta negativa. Qualora invece si chiedesse se un Nautilus ha la conchiglia, arriverebbe per primo un marcatore di tipo positivo (che raggiunge il nodo *animale con conchiglia* in un solo passo, attraverso l'arco *isa* che connette direttamente i due concetti), e il sistema fornirebbe una risposta positiva. In NETL quindi gli eventuali conflitti nell'ereditarietà vengono risolti in base a un'euristica che privilegia il percorso più breve che connette due concetti nella rete (questa forma di ragionamento prende usualmente il nome di *path based reasoning*).

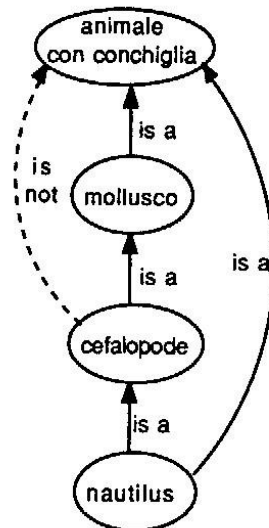


fig. 4.8

4.4 What is in a link

Un articolo di William Woods dal titolo "What's in a link: foundations for semantic networks" pubblicato nel 1975 (Woods 1975) ha costituito, per molti versi, un punto di svolta nella storia di questo tipo di sistemi di rappresentazione della conoscenza. Quando uscì l'articolo di Woods le reti semantiche erano un tipo di rappresentazione molto diffuso in IA, e molti erano i sistemi già proposti ed utilizzati. Woods partiva dalla constatazione che tuttavia "non esiste attualmente alcuna 'teoria' delle reti semantiche" (p. 36). D'altronde, già i pochi esempi brevemente descritti nei paragrafi precedenti possono rendere un'idea di quale fosse lo stato dell'arte. Al di là dell'idea generale di utilizzare una struttura a grafo per la rappresentazione della conoscenza in un programma, i vari sistemi a rete semantica erano quanto di più eterogeneo si possa immaginare. Anche nell'ambito di un singolo formalismo era tutt'altro che impossibile trovare usi incompatibili delle stesse strutture di rappresentazione. I nodi delle reti venivano utilizzati per rappresentare di volta in volta fatti, predicati, classi, eventi, proposizioni, relazioni, singoli individui, senza che per lo più queste differenze d'uso si rispecchiassero in corrispondenti distinzioni sintattiche nel formalismo. Lo stesso valeva per gli archi che connettono i nodi. Molto spesso i diversi costrutti di una rete venivano trattati, a livello computazionale, in modo del tutto uniforme, senza che fossero state elaborate regole di inferenza formali che riflettessero il significato intuitivo attribuito ai diversi costrutti. Il comportamento inferenziale dei vari sistemi poteva essere ricavato esclusivamente in base al comportamento computazionale dei programmi che li implementavano. E il significato da attribuire ai vari costrutti del formalismo si fondava di fatto solo sulle intuizioni di chi utilizzava il sistema di rappresentazione. In sostanza, mancava una *semantica* dei sistemi a rete semantica, in base alla quale si potessero giustificare in maniera precisa le proprietà inferenziali dei sistemi stessi. Il compito che si proponeva Woods era appunto quello di analizzare la semantica delle reti semantiche stesse:

Quando creo un nodo in una rete o quando istituisco un arco di qualche tipo fra due nodi, io costruisco una rappresentazione di qualche cosa in una notazione. La domanda che mi porrò [...] è che cosa io intenda con una tale rappresentazione. Ad esempio, se creo un nodo, e istituisco due archi a partire da esso, uno etichettato SUPERC che termina nel "concetto" telefono, e un altro etichettato MOD che termina nel "concetto" NERO, cosa intendo rappresentare con tale nodo? Intendo che esso stia per il "concetto" telefono nero, o forse intendo asserire una relazione fra i concetti di telefono e di essere nero - cioè che i telefoni sono neri (tutti i telefoni, qualche telefono?). Quando si inventa una notazione a rete semantica, è necessario specificare non solo i tipi di nodi e di archi che possono essere usati, con le regole per la loro possibile combinazione (la sintassi della notazione a rete), ma si deve specificare anche il significato dei vari tipi di archi e di strutture - quello che si intende significare con essi (la semantica della notazione a rete). (Woods 1975, p. 47).

Woods parte con un'analisi del concetto stesso di semantica, individuando diverse accezioni in cui il termine è stato adoperato da filosofi, linguisti e studiosi di linguaggi di programmazione. Secondo lo schema proposto da Woods, i linguisti quando si occupano di semantica sono generalmente interessati a individuare un linguaggio "interno" di rappresentazione mediante il quale sia possibile rappresentare il significato di enunciati del linguaggio naturale. Lo scopo di tale rappresentazione è, ad esempio, quello di risolvere le ambiguità della lingua naturale: ad enunciati

linguistici sintatticamente uguali, ma con significato diverso, devono corrispondere rappresentazioni del significato diverse. Secondo questa accezione, il processo di "interpretazione semantica" corrisponde alla traduzione da un linguaggio (il linguaggio naturale) ad un altro linguaggio, di tipo formale (il linguaggio "interno" di rappresentazione), il quale a sua volta resta non interpretato. Per i filosofi, d'altro canto, scopo della semantica è quello di mettere in relazione le strutture di un linguaggio con oggetti di tipo extra linguistico, in maniera, ad esempio, da specificare le condizioni di verità di un enunciato. Di norma, i filosofi si sono occupati di attribuire una semantica a linguaggi già formalizzati, anziché direttamente al linguaggio naturale. Quindi il compito della semantica filosofica può essere visto come complementare rispetto a quello della semantica linguistica.

L'uso del termine "semantica" nell'espressione "reti semantiche" va inteso secondo l'accezione dei linguisti piuttosto che secondo quella dei filosofi. Le reti semantiche, dice Woods, possono essere considerate, e sono state considerate di fatto, dei candidati a fornire quel linguaggio interno di rappresentazione mediante cui rendere esplicito il significato degli enunciati della lingua naturale. Tuttavia, resta ancora aperto il problema di specificare la semantica delle reti semantiche stesse, e questa volta in un senso più simile a quello adottato dai filosofi, vale a dire specificandone le regole di corrispondenza con entità di natura extra linguistica.

Oltre all'uso filosofico e a quello linguistico del termine "semantica", Woods individua una terza accezione, collegata alla ricerca svolta in teoria dei linguaggi di programmazione e in IA. Il limite della semantica filosofica è, come abbiamo visto, quello di fermarsi al significato dei simboli primitivi, il quale viene assunto come dato, e di assumere come oggetto di studio principalmente il modo in cui viene specificato il significato di espressioni complesse a partire dal significato dei loro componenti. Diversi per Woods sono gli obiettivi dell'intelligenza artificiale. "Le ricerche in intelligenza artificiale - dice Woods - affrontano la necessità di specificare la semantica delle proposizioni elementari così come di quelle complesse [...] Così i ricercatori in intelligenza artificiale devono assumere una visione più globale della semantica del linguaggio di quella che il linguista o il filosofo hanno assunto nel passato" (Woods 1975, p. 41). Lo studio delle condizioni di verità degli enunciati elementari può essere effettuato mediante procedure o funzioni che assegnino loro un determinato valore di verità in una data situazione. Si tratterebbe quindi di una semantica di tipo *procedurale*. Gli strumenti per sviluppare una tale semantica dovrebbero provenire dalla teoria dei linguaggi di programmazione:

i teorici dei linguaggi di programmazione hanno un vantaggio rispetto ai filosofi e ai linguisti, in quanto le loro specificazioni semantiche poggiano su un terreno più saldo, poiché sono definite in termini di procedure che la macchina deve eseguire. E' lo stesso vantaggio che la nozione di semantica procedurale e intelligenza artificiale porta alla specificazione della semantica del linguaggio naturale. Benché nel linguaggio naturale ordinario non ogni enunciato abbia a che fare in modo evidente con l'esecuzione di procedure, è possibile tuttavia usare la nozione di procedura come strumento per specificare sia le condizioni di verità di enunciati dichiarativi, sia il significato inteso di domande e di comandi. In questo modo si raccoglie dai filosofi la catena semantica al livello delle condizioni di verità e la si completa al livello della specifica formale di procedure. Queste possono a loro volta essere caratterizzate dal loro funzionamento su macchine reali, ed essere in questo modo ancorate alla fisica (Woods 1975. p. 43).

La semantica delle rappresentazioni utilizzate in IA dovrebbe quindi, in qualche modo, essere "completata" da una componente procedurale che garantisca una attribuzione di significato ai simboli primitivi. Torneremo su questo punto, che Woods affronta anche in (Woods 1980), nelle conclusioni di questa sezione e nel capitolo finale.

Il seguito dell'articolo di Woods procede, più che nei termini di una proposta organica e unitaria, sviluppando alcuni suggerimenti generali e discutendo alcuni aspetti specifici. Viene perorata la necessità di una interpretazione intensionale dei costrutti delle reti semantiche. Vengono discusse alcune limitazioni nel potere espressivo dei formalismi a rete correnti, ad esempio rispetto alla quantificazione o alla rappresentazione di proposizioni relative. Vengono anche discussi problemi più specifici. Ad esempio, il fatto che nelle reti spesso i nodi vengano utilizzati in maniera del tutto uniforme ed indifferenziata per rappresentare concetti generali (o classi) oppure singole istanze. Dato un nodo che rappresenta un singolo individuo (poniamo John), taluni archi definiti per esso rappresentano attributi dell'individuo rappresentato (altezza, colore dei capelli, e così via). I nodi in cui terminano tali archi di norma corrispondono rispettivamente ai valori degli attributi relativi a John (ad esempio, l'arco *colore dei capelli* può terminare nel nodo *castano*, l'arco *altezza* nel nodo *1.75 m*, eccetera). Vi sono però anche casi in cui, ad esempio, l'arco *altezza* termina in un nodo del tipo di *maggiore di 1.60 m*, il quale non denota il valore dell'attributo *altezza*, bensì una proprietà che tale valore deve soddisfare. Di norma, la notazione dei formalismi a rete semantica maschera completamente questo tipo di differenze.

L'articolo di Woods sollevava una serie di problemi piuttosto che offrire vere e proprie soluzioni. Esso diede tuttavia inizio ad una sorta di "movimento del rigore" nelle reti semantiche. Su questa linea, ad esempio, Ronald Brachman si è interrogato sui vari significati che gli archi di tipo tassonomico (quelli che di volta in volta sono stati chiamati archi *isa*, archi *ako* o archi *superc*) hanno assunto via via nei diversi sistemi a rete semantica (Brachman 1983). Vi è ad esempio un'ambiguità, analoga a quella riscontrata da Woods per le coppie attributo/valore, direttamente

ereditata dall'ambiguità di espressioni come "... è un" del linguaggio naturale, che mettono in relazione talvolta due termini generali, talvolta un termine individuale a un termine generale. Così in una rete semantica si può trovare lo stesso tipo di arco *isa* che connette talvolta due concetti come *città* e *capitale*, oppure che connette il nodo *Genova* al nodo *città*. Un discendente diretto delle riflessioni di Woods sono, nella seconda metà degli anni settanta, le reti semantiche ad ereditarietà strutturata (anch'esse dovute a Brachman) e, in seguito, il sistema KL-ONE, di cui ci occuperemo in dettaglio nel prossimo capitolo.

Oltre che per il significato dei vari costrutti, anche per quanto riguarda i meccanismi di inferenza, come ad esempio l'ereditarietà, i primi sistemi a rete semantica non erano esenti da problemi. Il trattamento dell'ereditarietà nelle reti semantiche con eccezioni mancava in origine di un trattamento formale rigoroso, e il comportamento inferenziale di sistemi come NETL si fondava di fatto sulle prestazioni dei programmi che implementavano il formalismo, i quali, a loro volta, erano stati scritti basandosi esclusivamente su euristiche di tipo intuitivo. Vi sono situazioni in cui questo tipo di trattamento è insufficiente, e pone problemi affrontabili solo su basi formali più rigorose. Questi temi sono stati indagati ad esempio da David Touretzky (1986). Un caso ben noto in letteratura, in cui il semplice meccanismo di attivazione in parallelo di NETL fallisce è il cosiddetto *rombo di Nixon* (*the Nixon's diamond*). Si consideri una rete come quella della fig. 4.9. Essa esprime l'informazione secondo cui i quaccheri, tipicamente, sono dei pacifisti, mentre i repubblicani (cioè i membri del Partito Repubblicano negli Stati Uniti) di solito non lo sono. Poi si asserisce che Nixon è sia un quacchero sia un repubblicano. Cosa è lecito dedurre circa il fatto che Nixon sia un pacifista o meno? Evidentemente, in mancanza di altre informazioni, le conoscenze rappresentate nella rete non consentono di trarre alcuna conclusione, o, in altri termini, entrambe le conclusioni sono ugualmente giustificate. Tuttavia, nel caso di un meccanismo come quello previsto da NETL, non è assolutamente possibile prevedere che tipo di risposta fornirà il sistema. A seconda di come è implementato l'algoritmo di attivazione in parallelo, il programma potrebbe rispondere positivamente, o negativamente, a entrambe le domande. O, peggio ancora, data una certa implementazione del programma, potrebbe rispondere positivamente in un caso e negativamente nell'altro in maniera arbitraria. Il punto è che manca una specificazione formale rigorosa che consenta di stabilire che tipo di risposta si vuole ottenere, in base alla quale costruire l'implementazione del sistema inferenziale.

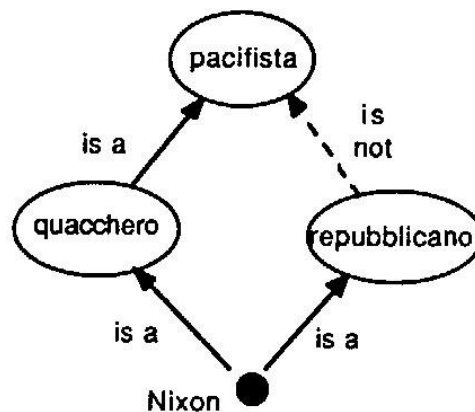


fig. 4.9

Problemi analoghi possono sorgere anche in situazioni di altro tipo. Si supponga di estendere la rete di fig. 4.8 come in fig. 4.10. Rispetto a fig. 4.8, è stata aggiunta un'istanza al concetto *Nautilus*: Nemo è un particolare esemplare di *Nautilus*. Fino a qui, tutto funzionerebbe regolarmente come nell'esempio del paragrafo precedente. Nella nuova rete, però, è presente anche un arco *isa* "ridondante" che collega direttamente il nodo *Nemo* con il concetto *cefalopode*. Si noti che, da un punto di vista intuitivo, la presenza di tale arco è del tutto legittima: anche se l'informazione che esso esprime è già presente nella rete, è certamente vero che Nemo, in quanto *Nautilus*, è a sua volta un cefalopode. Inoltre casi di questo genere sono certamente frequenti nelle basi di conoscenza reali. Tuttavia, in questa rete, il meccanismo di attivazione in parallelo descritto nel paragrafo precedente non fornisce più i risultati voluti. Infatti ora esistono due percorsi "minimi" di uguale lunghezza che connettono il nodo *Nemo* al nodo *animale con conchiglia*, uno dei quali termina con un arco di tipo *isa* e l'altro con un arco di tipo *is not*. Anche qui dunque non si è in grado di prevedere se il sistema fornirebbe una risposta positiva o negativa alla domanda se Nemo è o meno un animale con conchiglia. In questo caso inoltre si vorrebbe che Nemo continuasse a essere un animale con conchiglia, in quanto l'idea intuitiva è che le informazioni relative a concetti più specifici (in questo caso *Nautilus*) siano le più rilevanti per l'ereditarietà. Tuttavia questa inferenza non può essere giustificata sulla base dell'euristica del percorso più breve.

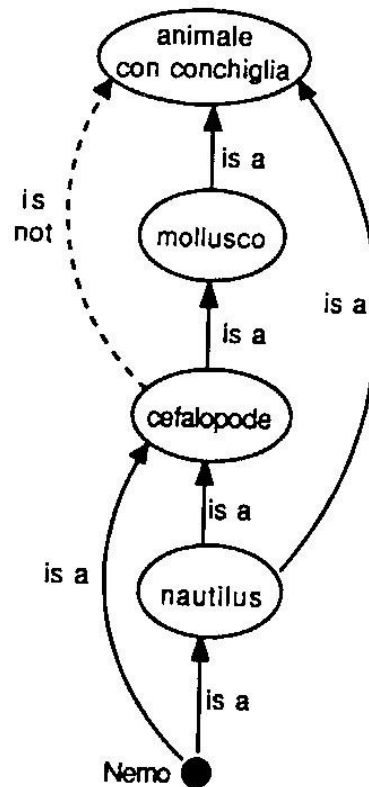


fig. 4.10

4.5 La logica dei *frame*

Una risposta ai problemi di rigore formale posti dai formalismi a *frame* e a rete semantica venne proposta, da parte logicista, da Pat Hayes con un articolo del 1979 (Hayes 1979). Tale articolo è intitolato "The logic of frames" e in esso si affronta il problema dei linguaggi a *frame* piuttosto che delle reti semantiche. Tuttavia, le conclusioni che vengono tratte possono essere applicate senza sostanziali modifiche anche ai sistemi di rappresentazione a rete (di cui, come abbiamo visto, i *frame* sono parenti molto stretti). La tesi di fondo è che i *frame*, seppure inizialmente proposti in alternativa ai calcoli logici, come particolarmente adeguati a caratterizzare alcune caratteristiche tipiche del pensiero umano e del ragionamento di senso comune, non sono sostanzialmente dissimili dai linguaggi formali classici della logica per quanto riguarda la adeguatezza espressiva - essenzialmente perché fanno riferimento alla stessa categorizzazione del reale - diversificandosi da questi ultimi esclusivamente sul terreno della efficacia notazionale - ossia dal punto di vista euristico e della trattabilità computazionale. Citando le parole dello stesso Hayes, "i *frame* sono semplicemente una sintassi alternativa per esprimere relazioni fra individui, cioè per la logica dei predicati" (Hayes 1979, p. 48). O ancora, a proposito delle reti semantiche, in un lavoro precedente: "Se qualcuno sostiene la superiorità delle reti semantiche rispetto alla logica, deve far riferimento a qualche loro proprietà diversa dal loro significato" (Hayes 1977, p. 561).

Secondo Hayes nell'articolo di Minsky (Minsky 1975) e, in generale, nella letteratura successiva, i *frame* vengono motivati sulla base di argomenti che si collocano a livelli differenti. Al *livello metafisico*, i *frame* possono essere considerati un'ipotesi sul tipo di entità esistenti nel dominio, o sul tipo di conoscenza che deve essere rappresentata in un sistema intelligente. Al *livello euristico*, o dell'*implementazione*, essi costituiscono un modo per immagazzinare in maniera adeguata delle rappresentazioni nella memoria di un calcolatore e per implementare procedure e di inferenza e di reperimento dell'informazione. In "The logic of frames" i *frame* sono analizzati al livello della *rappresentazione*, ossia in quanto linguaggio per la rappresentazione della conoscenza. Ciò che fa sì che un linguaggio formale possa essere considerato un linguaggio di rappresentazione è il fatto che le sue espressioni siano dotate di un significato, vale a dire, che al linguaggio sia associata una teoria semantica, una spiegazione di come tali espressioni stiano in relazioni con entità del mondo. E' a questo livello che ha senso ricondurre i *frame* alla logica dei predicati.

Come si è visto, un *frame* è una struttura dati che intende rappresentare una "situazione stereotipica" o un "prototipo". Ad esempio, possiamo immaginare un *frame* che rappresenti una abitazione tipica. Un *frame* comprende

degli *slot* che possono essere riempiti a loro volta con altri *frame* o con valori specifici. Il *frame* che rappresenta una abitazione tipica potrà avere *slot* del tipo *cucina*, *bagno*, *proprietario*, *indirizzo*, e così via. In tal modo, dice Hayes, i *frame* possono essere visti essenzialmente come "fasci di proprietà" (*bundles of properties*), e ciò giustifica il fatto di pensarli nei termini di logica dei predicati.

Più precisamente, dato un *frame* che rappresenta un certo concetto C , possiamo considerare C come un predicato ad un argomento $C(x)$ (nel caso del *frame* per il concetto *abitazione* avremo il predicato *abitazione(x)*). I vari *slot* $R_1 \dots R_n$ possono essere visti come relazioni a due argomenti $R_1(x,y) \dots R_n(x,y)$, in cui il secondo argomento di ciascun predicato indica il riempitore dei vari *slot*. Ad esempio, nel caso di abitazione, avremmo *cucina(x,y)*, *bagno(x,y)*, *proprietario(x,y)*, e così via. Un *frame* equivale allora a una formula del tipo:

$$\forall x(C(x) \rightarrow \exists y_1 R_1(x, y_1) \wedge \dots \wedge \exists y_n R_n(x, y_n)).$$

Tale formula esprime una serie di condizioni necessarie per "essere un C ": se qualcosa è un C , allora è nella relazione R_1 con qualche y_1 , nella relazione R_2 con qualche y_2 , e così via.

"Per riuscire a comprendere meglio cosa si suppone che i *frame* significhino - prosegue Hayes - dobbiamo esaminare i modi in cui si suggerisce che essi vengano usati" (Hayes 1979, p.289). In altri termini, restano da prendere in considerazione le regole di inferenza definite sui *frame*, in maniera da capire se e come tali regole siano riconducibili a inferenze logiche.

Tra le regole di inferenza che Hayes esamina vi è la cosiddetta regola di *criteriality*, in base alla quale se si trovano riempitori per tutti gli *slot* di un *frame*, allora si può inferire che esiste un'istanza appropriata del concetto rappresentato. Tale regola era stata suggerita da Minsky, ed è in genere utilizzata nelle applicazioni concrete. Ad esempio, se una certa entità ha una cucina, un bagno, un proprietario, un indirizzo, eccetera, allora si può inferire che essa sia un'abitazione. La *criteriality* corrisponde di fatto ad assumere che i vari *slot* di un *frame*, oltre ad esprimere condizioni necessarie, esprimano anche, complessivamente, una condizione sufficiente per l'applicazione del concetto rappresentato, e che quindi consentano di riconoscere un dato individuo come istanza del *frame*. La *criteriality* è ridicibile all'implicazione inversa della precedente:

$$\forall x(\exists y_1 R_1(x, y_1) \wedge \dots \wedge \exists y_n R_n(x, y_n) \rightarrow C(x)).$$

Si tratta in effetti di una proprietà molto forte, e non è sempre chiaro nei sistemi a *frame* in quali casi si assume che essa valga. Anzi, in generale la confusione fra condizioni necessarie e condizioni sufficienti è una delle ambiguità più diffuse nei primi sistemi a *frame* e a rete semantica. Rispetto a questo tipo di problemi mettono in guardia anche Israel e Brachman:

Se (si sa che) Clyde è un cammello, allora egli ha tutte le proprietà tipiche del cammello; non il contrario (ossia, il connettivo nella riformulazione logica precedente è il condizionale, non il *bicondizionale* [corsivo nostro]). Sembra che questo sia corretto, perché ci sono proprietà non definitorie per il fatto di essere un cammello - cammello è un 'tipo naturale'. E, si potrebbe aggiungere, sono tali la maggior parte, se non tutti, i concetti con cui deve avere a che fare un sistema di IA; lasciamo i concetti definiti e astratti come ROMBO ai matematici, e lasciamo discutere ai filosofi se "scapolo" possa essere definito. (Israel e Brachman 1981, p.457).

Questo è certamente un punto cruciale in rappresentazione della conoscenza. Tuttavia ciò che qui conta è che il principio di *criterialità* può facilmente essere espresso in logica, indipendentemente dal fatto che esso venga assunto o meno.

Un'altra forma di ragionamento sui *frame* che Hayes prende in considerazione, e che in parte è legata alla *criteriality*, è il principio spesso chiamato *matching*, utilizzato, ad esempio, in KRL (Bobrow e Winograd 1977). Il *matching* consente di stabilire se un'istanza di un concetto può risultare istanza di un altro concetto mettendo in relazione i riempitori degli *slot* di due *frame*. L'esempio di Hayes è il seguente. Supponiamo che *J.S.* sia un'istanza del *frame uomo* (che ha uno *slot nome* riempito in maniera tale che, ad esempio, *nome(J.S., "John Smith")*), e supponiamo di chiederci se *J.S.* sia istanza del *frame padrone_di_cane*, cioè se possiamo trovare un'istanza del *frame padrone_di_cane* che corrisponda a (*matches*) *J.S.*. Se *uomo* ha uno *slot* chiamato *possiede_animale* potremmo dire che una condizione sufficiente affinché *J.S.* sia anche un padrone di cane è che tale *slot* sia riempito da un'istanza del *frame cane*. Supponiamo inoltre che il *frame padrone_di_cane* abbia due soli *slot*: *nome* e *cane_di*. Dal *frame uomo* si ottengono per istanziazione:

$$\begin{aligned} & nome(J.S., "John Smith") \\ & possiede_animale(J.S., Fido) \end{aligned} \quad (1)$$

e supponiamo che Fido sia proprio un'istanza del *frame cane*, per cui vale:

$$\text{cane}(\text{Fido}) \quad (2).$$

Per dedurre *padrone_di_cane(J.S.)* si può ricorrere alla *criteriality* del *frame padrone_di_cane* ricavando, oltre a *nome(J.S., "John Smith")* anche, *cane_di(J.S., Fido)*. Quest'ultima formula è ottenibile da uno schema del tipo:

$$\forall x,y (\text{possiede_animale}(x,y) \wedge \text{cane}(y) \rightarrow \text{cane_di}(x,y)) \quad (3)$$

mediante (1) e (2). La (3) in sostanza esprime il trasferimento di riempitori da *slot* a *slot* che consente il *matching* fra i due *frame*.

Questi esempi mostrano come molte delle proprietà deduttive dei *frame* siano riconducibili a usuali inferenze logiche. Tale traduzione logica presenta il vantaggio di ricondurre i sistemi di rappresentazione a *frame* ad un formalismo ben studiato e con una chiara semantica estensionale, che consente di stabilire cosa *significano* queste strutture.

Hayes prosegue indicando aspetti dei *frame* che creano alcune difficoltà se si vuole esprimerne il comportamento deduttivo in termini logici. Secondo Minsky diversi *frame* avrebbero dovuto poter rappresentare lo stesso oggetto da diversi punti di vista, per cui possono essergli attribuite proprietà apparentemente contraddittorie. La stessa persona, ad esempio, può essere gentile sul posto di lavoro e irascibile quando guida l'automobile. Si può risolvere il problema considerando diverse le relazioni che figurano in *frame* distinti; ad esempio *gentile_sul_lavoro* e *gentile_alla_guida* possono essere predicati distinti. Oppure si può introdurre qualche ulteriore parametro come ad esempio il tempo o il luogo, in modo che un persona risulti al contempo, ad esempio, irascibile *alla guida* e gentile *al lavoro*. Questo comporta ovviamente che venga elaborata una teoria logica adeguata di tempo, spazio, eccetera. Successivamente vengono abbozzati i problemi del ragionamento per analogia e il concetto di valore di *default*. Quest'ultimo concetto, in particolare, risulta trattato in maniera poco approfondita da Hayes. Su esso torneremo tuttavia nel cap. 6, per vedere come anche i *default* e le eccezioni possano rientrare nella proposta di Hayes di riduzione di *frame* e reti semantiche alla logica se si utilizza una logica non monotona.

In conclusione, nella prospettiva di Hayes, i *frame* hanno avuto il pregio di porre l'enfasi su alcuni aspetti interessanti del ragionamento di senso comune non ancora affrontati dai logici (ad esempio i *default*). Tuttavia, "eccetto questo, non c'è nulla di nuovo da capire qui: né nuovi processi di ragionamento, né progressi nel potere espressivo. [...] un suggerimento più serio è che la forza *reale* dell'idea di *frame* non sia al livello rappresentazionale, ma piuttosto al livello dell'implementazione: un suggerimento su come organizzare grandi memorie" (Hayes 1979, p.294).

Come si è visto, in Hayes gli aspetti tecnici della della riduzione dei *frame* alla logica dei predicati sono appena abbozzati e alcuni dei problemi, seppure individuati, sono impostati solo nelle loro linee essenziali. Ad esempio, la complessità del problema dei *default* e delle inferenze non monotone sembra decisamente sottovalutata da Hayes. Tuttavia l'influenza esercitata da "The logic of frames" è stata notevole: molte ricerche sulla rappresentazione della conoscenza si sono ispirate alle indicazioni in esso contenute.

Negli anni successivi sono stati sviluppati formalismi dotati di una sintassi simile alle reti semantiche, ma che presentavano le caratteristiche di una vera e propria logica (ad esempio, una semantica modellistica ben definita). Attardi, Simi e i loro collaboratori (Attardi e Simi 1981, Attardi et al. 1987) hanno proposto il sistema di rappresentazione OMEGA. Si tratta di un formalismo logico che riprende alcuni dei concetti chiave delle reti semantiche, come ad esempio il fatto di essere "centrato ad oggetti", l'organizzazione tassonomica della conoscenza e l'ereditarietà. La componente fondamentale di OMEGA sono le *descrizioni*, assimilabili ai concetti di una rete. *John*, (*a Man*), (*a Man (with friend (a Dog))*) sono esempi di descrizioni. L'operatore *a* sta ad indicare che una descrizione non è una *descrizione individuale*, ma che corrisponde a un termine generale o al nome di una classe. L'operatore *with* serve per specificare gli attributi di una descrizione, l'analogo degli *slot* di un *frame* o dei ruoli di KL-ONE (vedi oltre, nel prossimo capitolo). Le descrizioni sono organizzate tassonomicamente per mezzo della relazione di predicazione *is*. Le proprietà di *is* e degli attributi sono definite da opportuni assiomi. Ad esempio, il seguente è un esempio dell'*assioma di omissione*, che stabilisce che, omettendo una descrizione, si ottiene una descrizione più generale:

$$(\text{a Cat (with name Jerry) is (a Cat)}).$$

OMEGA ha una semantica formale rigorosa, e per esso sono stati dimostrati teoremi di correttezza e di completezza. Questo tipo di formalismi raggiunge il massimo sviluppo con le logiche terminologiche, che descriveremo nel prossimo capitolo.