Metodi bayesiani per il trattamento dell'incertezza in problemi di decisione: un'applicazione antropologica

Monica Chiogna*, Mario Gambera*, Aldopaolo Palareti†

* Dipartimento di Scienze Statistiche dell'Università di Bologna
† Istituto di Informatica dell'Università di Ancona

Sommario

In molti sistemi esperti vi è il problema della gestione dell'incertezza della conoscenza. L'incertezza può essere relativa alla conoscenza dei fatti oppure alla consequenzialità delle conclusioni vista l'evidenza (cioè alle regole). Preso atto della difficoltà di applicare il metodo bayesiano ed altri metodi alternativi alla generalità dei problemi reali, in questo lavoro viene caratterizzata una classe di problemi per i quali l'applicazione del metodo bayesiano è praticabile e conveniente.

Il modello proposto è stato applicato al problema antropologico della determinazione del sesso dai reperti ossei. Per questo è stato costruito un sistema *rule based* implementato in Prolog. Tale sistema è stato sperimentato su circa cento casi catalogati presso l'Istituto di Antropologia dell'Università di Bologna.

I metodi semicoerenti con la statistica

Per la gestione dell'incertezza la prima ipotesi di lavoro consiste nell'uso dei cosidetti metodi non numerici in cui la manipolazione dei livelli di certezza non avviene per mezzo di funzioni numeriche. In questi metodi si definisce una scala ordinale per stabilire l'imprecisione delle regole o dei fatti; questa scala consiste spesso nell'uso di parole del

linguaggio naturale che semanticamente ricordino il livello di certezza che si vuole rappresentare.

La manipolazione può avvenire sostanzialmente con due metodi: si possono utilizzare funzioni che fanno riferimento alla scala ordinale per scegliere per esempio il massimo o il minimo di due livelli di certezza, oppure si possono costruire delle tabelle che, dati i livelli di certezza di più regole applicate, definiscano il livello di certezza della loro composizione.

I metodi non numerici hanno il pregio di essere facilmente utilizzabili dall'esperto che non deve tradurre le parole che utilizza per l'incertezza in numeri che rappresentino una stima della probabilità che certi eventi o certe regole siano veri. Questo è utile particolarmente nei casi in cui si ritiene che la valutazione dell'esperto dell'incertezza sia oggettivamente vera.

La gestione dei dati risulta quindi particolarmente semplice; tutto ciò è legato però all'uso di funzioni o tabelle di operazioni sui livelli di certezza che utilizzano implicitamente quei metodi soggettivi, che si voleva evitare a priori. Inoltre la grossolanità dei dati porta a una crescente perdita di precisione quando le inferenze vengono fatte a cascata, restringendo l'uso di questi metodi a casi semplici in cui le regole utilizzate per una inferenza siano generalmente molto poche.

Una possibilità di utilizzare metodi quantitativi consiste nella definizione di scale numeriche *ad hoc*, nelle quali l'incertezza viene espressa mediante numeri variabili in intervalli predeterminati; in effetti ogni fatto viene accompagnato da un numero in una scala predefinita che ne definisce l'incertezza, mentre ogni regola viene accompagnata da uno o più numeri che indicano la forza del legame tra premesse e conclusione.

Il significato di queste quantificazioni *ad hoc* è spesso differente nelle particolari applicazioni e dipende dal modo in cui queste vengono costruite e dal modo in cui viene effettuata la propagazione dell'incertezza fra le varie regole. Di fondamentale importanza è anche il tipo di informazioni utilizzate per la costruzione dei valori di queste misure *ad hoc*. Vi sono esempi tipici, come *Prospector*, in cui ad ogni regola vengono associati due numeri che indicano rispettivamente la sufficienza e la necessarietà dell'evidenza nei confronti dell'ipotesi, o come *Mycin*, in cui, con l'uso dei fattori di certezza si vuole mettere in risalto quanto l'evidenza sia a favore o contro una ipotesi. Spesso inoltre il contenuto dei fattori di certezza è volto a quantificare l'importanza che un'ipotesi può avere nell'ambito di una diagnosi, introducendo in maniera nascosta delle funzioni di utilità che vengono combinate con la probabilità soggettiva. Viene in altre parole fuso in un unico momento investigativo l'aspetto probabilistico e l'aspetto decisionale della diagnosi.

La gestione di questi valori di incertezza viene fatta per mezzo di funzioni *ad hoc* che dipendono non da una conoscenza della statistica ma dal tentativo di riprodurre i metodi empirici di trattamento dell'incertezza che sembrano essere utilizzati dagli esperti del campo per il quale il sistema viene realizzato e dal tentativo di dare, come

evidenziato prima, un contenuto semantico alle quantificazioni riprodotte.

Anche in questo caso, come in quello dei metodi non numerici, si tenta di costruire un sistema che possa essere utilizzato in maniera semplice dall'esperto. D'altra parte, pur essendo meno rozzo dei metodi non numerici, anche nei metodi *ad hoc* l'utilizzo di strumenti che non sono statistico-probabilistici porta alla degradazione delle conclusioni raggiunte mano mano che nuove regole vengono aggiunte alla catena di deduzioni: in altri termini questi metodi diventano sempre più inaffidabili quando aumentano le regole utilizzate per raggiungere una data conclusione.

La maggior parte dei sistemi attualmente in uso sono basati su questi metodi, che rispecchiano un approccio pragmatico alla gestione dell'incertezza. Rispetto ai metodi non numerici sono più precisi e permettono l'utilizzo di catene di inferenze complesse.

L'aspetto critico dal punto di vista teorico dei metodi ad hoc consiste nel fatto che tali metodi presuppongono implicitamente l'indipendenza delle regole e non gestiscono le evidenze dipendenti se non in casi particolari e in maniera del tutto approssimata. Le procedure di combinazione dei fattori di certezza delle regole di *Mycin*, ad esempio, prevedono solo il caso in cui le evidenze siano indipendenti ovvero siano in relazione di equivalenza logica, vale a dire nel caso in cui l'averne osservata una implichi il verificarsi della seconda e viceversa.

Nell'uso di tali metodi non si può peraltro garantire che tutte le regole definite dall'esperto rispettino le condizioni sopra viste: è quindi necessario analizzarle una ad una ed introdurre le necessarie limitazioni alla applicazione di ogni regola. Questo metodo di lavoro non dà comunque garanzie assolute che le regole introdotte nel data base siano effettivamente indipendenti, e quindi catene di inferenze complesse che utilizzano le regole possono portare a conclusioni erronee.

La motivazione fondamentale che rende difficoltosa la manipolazione di incertezza per evidenze indipendenti risiede comunque nel fatto che mentre le regole di deduzione (rules) usate nei sistemi esperti e nei sistemi di deduzione vengono sostanzialmente implementate secondo criteri di modularità, la dipendenza statistica richiede al contrario la costruzione di una rete di probabilità condizionate fra ogni evidenza e ogni ipotesi, non realizzabile, appunto, in un ambiente modulare.

Rimane il problema di descrivere in termini quantitativi la conoscenza dell'esperto: a tale scopo si è tentato anche di introdurre delle scale che mettono in relazione parole del linguaggio esprimenti l'incertezza con valori numerici (si veda Spiegelhalter).

In conclusione ci sembra utile sottolineare se e in quale misura questi metodi di propagazione dell'incertezza siano "semicoerenti" con l'approccio statistico o in quale misura si cerchi di avvicinarsi ad esso. Esaminando le realizzazioni più famose è possibile identificare tre approcci principali.

Nel primo si evita completamente ed intenzionalmente qualsiasi riferimento sintattico e semantico all'approccio probabilistico, esaltando

in tal modo l'aspetto operativo del meccanismo di propagazione dell'incertezza e la sua efficacia dal punto di vista pragmatico. L'approccio opposto è quello di costruire un meccanismo quanto più conforme possibile alla teoria probabilistica. Semplificazioni e deroghe a questo metodo di lavoro vengono introdotte ove necessario per superare le difficoltà dei problemi concreti, altrimenti insormontabili. Vi è poi stato un terzo tentativo, con lo sviluppo delle *Belief-Function* di Shafer, di inquadrare la propagazione dell'incertezza in una teoria che si basi su un certo numero di assiomi e regole di inferenza, che abbiano una certa consistenza teorica e un certo contenuto concettuale.

I metodi bayesiani

Un'ipotesi che cerchi di superare i limiti dei metodi non numerici e dei metodi *ad hoc* consiste nell'uso di metodi bayesiani. In questi metodi assume un ruolo fondamentale il teorema di Bayes, che costituisce la base per un uso corretto dei metodi probabilistici in catene di inferenze complesse. Viene identificata la probabilità a posteriori di uno spazio di ipotesi, una volta che si venga a conoscenza di una qualche evidenza, se si è in grado di conoscere le verosimiglianze costituenti il legame fra le ipotesi e le evidenze. L'iterattività del metodo permette di aggiornare la distribuzione di probabilità sulle ipotesi mano a mano che nuove evidenze vengono osservate. Le ipotesi dedotte possono a loro volta costituire l'evidenza di base per un ulteriore procedimento di inferenza in cui nuove conclusioni vengano prodotte.

Mentre nei metodi *ad hoc* si riconduce l'arbitrarietà dell'interpretazione statistica alla definizione delle funzioni utilizzate per la composizione delle incertezze (e di conseguenza non si rendeno evidente all'utilizzatore del sistema l'opinabilità delle conclusioni raggiunte), nei metodi bayesiani si evidenziano gli elementi soggettivi già al momento di tradurre in termini numerici l'incertezza dell'esperto, che quindi è in grado di valutare meglio le conclusioni raggiunte.

I vantaggi di un metodo statistico probabilistico (in particolare di un metodo bayesiano) nei confronti di un metodo *ad hoc* consistono nel fatto che la probabilità è uno strumento per il trattamento dell'incertezza riconosciuto storicamente e ben fondato dal punto di vista teorico. Il risultato è inoltre dato direttamente in termini di probabilità, permettendo un interscambio più semplice delle informazioni tra il sistema ed altri strumenti disponibili.

E' inoltre possibile realizzare un sistema che aggiorni la propria conoscenza sulla base di nuove informazioni eventualmente acquisite realizzando un vero e proprio apprendimento dall'esperienza. Per fare ciò si richiede la modifica delle verosimiglianze ed eventualmente delle probabilità a priori ogni volta che si renda possibile l'osservazione di

nuovi casi che consentano di ampliare la dimensione del campione dal quale dette probabilità sono state tratte.

D'altra parte il trattamento sistematico di dati probabilistici con metodi bayesiani richiede il rispetto, complesso nell'uso pratico, di vincoli matematici sulle probabilità a priori e condizionate dovuti alla necessità di rispettare l'impostazione assiomatica di Kolmogorov. Il soddisfacimento di tali vincoli può porre dei problemi nell'individuazione in fase di progettazione e costruzione di tutte le ipotesi possibili rendendo quindi estremamente complesso l'eventuale aggiornamento del sistema in presenza di nuove ipotesi. Il metodo bayesiano è inoltre inadeguato nei casi in cui possono coesistere più soluzioni al problema posto, in quanto considera le ipotesi mutualmente esclusive, e può porre dei problemi per l'interpretazione dei risultati e la ricostruzione del percorso deduttivo compiuto per effettuare la diagnosi.

Un ulteriore problema è dovuto alla necessità teorica di dover individuare tutte le possibili probabilità condizionate, cioè quelle che identificano relazioni tra evidenze dipendenti; dal punto di vista pratico tale necessità richiede la determinazione di una quantità di dati a priori spesso troppo grande in rapporto al tempo disponibile all'esperto.

I metodi bayesiani sono d'altra parte utilizzabili correttamente nei casi in cui il problema soddisfi alcune condizioni.

La prima condizione che deve essere soddisfatta è che le alternative che si possono verificare siano vicendevolmente escludentesi ed esaustive. La seconda condizione è che non siano necessari troppi salti inferenziali per raggiungere le conclusioni: infatti ognuno di tali salti richiede la gestione di nuove probabilità a priori, rendendo rapidamente ingestibile la determinazione dei dati richiesti all'esperto per il corretto funzionamento del sistema. Inoltre le evidenze osservate devono, per quanto è possibile, essere indipendenti, ciò sempre allo scopo di consentire la gestione di un numero non eccessivo di probabilità a priori.

Descrizione del problema della determinazione del sesso

Il problema della determinazione del sesso di un individuo da un reperto scheletrico è un tipico problema di diagnosi in cui il processo decisionale si sviluppa a partire dall'osservazione di determinate caratteristiche morfologiche e morfometriche rilevabili su di esso. La decisione finale è presa osservando la concordanza delle informazioni rilevate a favore di una delle due ipotesi, quella maschile o quella femminile, da verificare.

Tale concordanza non è spesso evidente per la presenza di una notevole variabilità naturale (entro le razze, tra le razze e tra età differenti) che rende difficile una sicura attribuzione all'uno o all'altro sesso. All'interno di ogni razza agisce infatti il dimorfismo sessuale, che

non determina una netta separazione tra i sessi, ma individua regioni in cui sono classificabili reperti tanto maschili che femminili, dando luogo alla possibilità di interpretazioni errate. Un reperto maschile può essere classificato femminile se di aspetto gracile ed un reperto femminile può essere classificato maschile se, per esempio si presenta strutturalmente robusto.

Il dimorfismo sessuale esercita un'azione discriminatoria differenziata anche tra età differenti: se si accetta l'ipotesi che i caratteri definitivi dello scheletro si evidenziano dopo l'acquisizione dei caratteri sessuali secondari, risulta di particolare interesse, al fine del problema di attribuzione del sesso, l'età all'istante della morte dell'individuo cui il reperto apparteneva, dal momento che non è corretto applicare gli stessi parametri discriminatori a reperti non adulti. La mancanza, del resto quasi scontata, di tale informazione costituisce un ulteriore fattore di disturbo.

Le differenze sessuali non si manifestano secondo le stesse modalità e con la medesima intensità nelle differenti razze: la presenza di un notevole politipismo anche all'interno dei gruppi umani con le medesime origini rende difficile l'estensione ad altre popolazioni dei parametri di riferimento stabiliti su un gruppo limitato. Il politipismo fa sì che in differenti gruppi i caratteri abbiano rilevanza diversa. Si presenta quindi la necessità di costruire un programma che evidenzi, per ogni caso studiato, quali sono stati i caratteri discriminatori più importanti ai fini della determinazione finale.

Un'ulteriore difficoltà è data dall'intervento di fattori accidentali, come ad esempio la frequente frammentarietà dei ritrovamenti ossei, che limitano le informazioni potenzialmente utilizzabili analizzando un reperto completo ed integro.

Tutti questi fattori caratterizzano il riconoscimento del sesso come un procedimento estremamente complicato ed il risultato dell'analisi condotta non può essere che probabilistico.

Generalmente l'analisi è condotta utilizzando i caratteri di un solo tipo. Si utilizzano di solito i caratteri qualitativi perchè risentono poco della variabilità intrarazziale, sono scarsamente legati ad un fattore dimensionale ma dipendono da valutazioni soggettive di forma, rugosità od altro. Vengono utilizzati invece caratteri metrici nel caso in cui si voglia, per contro, sostituire alla soggettività di un giudizio qualitativo una presunta oggettività numerica.

Qualora si propenda per questa seconda soluzione si pone necessariamente il problema della standardizzazione dei caratteri metrici stessi che consiste nell'individuazione di una tecnica che consenta di depurare il dato dalla variabilità politipica, cioè fra le diverse razze, ma permetta nello stesso tempo alla variabile standardizzata di mantenere per quanto possibile la stessa capacità di discriminazione tra i sessi.

In quest'ottica potrebbe essere utilizzata una standardizzazione per rapporto: si tratta di creare una variabile standardizzata di cui è possibile conoscere la distribuzione, rapportando il carattere che si vuole

depurare ad un carattere la cui distribuzione sia estremamente simile nei sessi, ma molto differente fra popolazioni diverse, rispettandone il differente andamento strutturale.

Mantenendo in questo modo pressochè inalterato il potere discriminante tra i sessi, si attenua l'influenza del politipismo e si prospetta l'utilizzo del sistema per reperti non appartenenti ai gruppi umani su cui sono stati definiti i parametri delle distribuzioni dei caratteri utilizzati.

L'uso dei metodi bayesiani nella determinazione del sesso

Il problema della determinazione del sesso è stato inquadrato nell'ambito di un problema di decisione fra due possibili alternative escludentesi. Per l'aspetto particolare di questo problema, l'utilizzo dei metodi bayesiani è risultato possibile e convincente. Infatti molte delle obiezioni sollevate circa l'utilizzo di tali metodi nei Sistemi Esperti perdono in questo contesto di efficacia.

Anzitutto lo spazio delle ipotesi è delineato stabilmente e senza possibilità di modificazione nel tempo: le ipotesi sono due, mutualmente escludentisi ed esaustive, il che consente tanto il rispetto dei vincoli matematici sulle probabilità su di esse definibili, quanto l'identificazione di una sola ipotesi finale. Sono eliminati quindi i problemi di aggiornamento delle probabilità a priori dello spazio delle ipotesi (che in alcuni settori estremamente mutevoli di applicazione dei sistemi esperti sono difficilmente gestibili) e di identificazione di una soluzione finale caratterizzata dalla validità di più ipotesi.

Le relazioni coinvolte nella diagnosi sono quelle esistenti fra caratteri (metrici e qualitativi) e sesso, secondo le quali, a determinate modalità di caratteri si associano le probabilità che siano dovute al sesso maschile o femminile.

Le relazioni di tipo ipotetico deduttivo legano una premessa (o evidenza, nel caso specifico la modalità del carattere) E ad una ipotesi H (maschio o femmina) secondo una probabilità P esprimente la strettezza del legame esistente tra evidenza ed ipotesi, ossia la frequenza dei casi (nel campione osservato) che presentano associate l'evidenza E e l'ipotesi H. In questo caso, quindi, P rappresenta una verosimiglianza, una frequenza relativa, più che una misura della "ragionevolezza" della conclusione H data la presenza di E.

Come evidenziato nella prima parte, molte delle discussioni circa la gestione dell'incertezza nei Sistemi Esperti riguardano proprio il significato da attribuire al valore numerico esprimente l'incertezza. Riteniamo che l'uso dei dati di frequenza relativa sia necessario, all'interno di un approccio bayesiano, per portare alla convergenza di opinioni di osservatori che hanno differenti opinioni iniziali (e che quindi hanno fissato soggettivamente diverse probabilità a priori sulle ipotesi da valutare). In quest'ottica è lasciata all'utente la possibilità di fissare le probabilità a priori delle ipotesi, che può stabilire i valori iniziali basandosi su informazioni disponibili prima dell'analisi del reperto, quali ad esempio sul tipo di necropoli di provenienza, sul corredo

funerario o altri dati che possano far propendere prima dell'analisi di qualsiasi carattere metrico o qualitativo, verso l'una o l'altra ipotesi.

Per quanto riguarda invece il calcolo delle verosimiglianze $p(E/H)$, sono stati indicati i valori ed i metodi per il loro calcolo basandosi su una collezione di 400 reperti di sesso noto provenienti dalla popolazione bolognese e sarda. Le due popolazioni possono considerarsi sufficientemente distanti per quanto riguarda le caratteristiche antropofisiche, tanto da garantire una mediazione tra gruppi razziali diversi presenti sul territorio italiano e da costituire un campione "rappresentativo" della variabilità della popolazione italiana nel suo insieme.

In quest'ottica è anche facile pensare ad un apprendimento del sistema alla luce di nuovi casi. Per ogni nuovo reperto di sesso noto con certezza, è possibile modificare la conoscenza del sistema circa le relazioni esistenti tra caratteri, modalità dei caratteri e sesso aggiornando le verosimiglianze del data base.

Dal momento che l'attribuzione del sesso è basata sul concordare di più caratteri osservati, è necessario trattare evidenze multiple utilizzando l'appropriata estensione della formula di Bayes, che consente il calcolo della probabilità a posteriori in situazione di congiunzione di evidenze ed è data da:

$$p(H \mid E_1 \& E_2) = \frac{p(H)\, p(E_1 \& E_2 \mid H)}{p(E_1)\, p(E_2)}$$

Supposta L'indipendenza delle evidenze la precedente si trasforma in:

$$p(H \mid E_1 \& E_2) = \frac{p(H)\, p(E_1 \mid H)\, p(E_2 \mid H)}{p(E_1)\, p(E_2)}$$

che risulta notevolmente semplificata per l'eliminazione delle probabilità condizionate.

Attraverso queste assunzioni, lo strumento bayesiano diventa uno strumento estremamente utile per la gestione dell'incertezza. L'ipotesi di indipendenza è tuttavia criticabile nel caso in cui venga applicata a situazioni dove le evidenze considerate siano, al contrario, correlate fra loro in misura più o meno accentuata. In tal caso, accettare quest'ipotesi significa accettare possibili sottostime o sovrastime delle probabilità a posteriori calcolate.

La perdita di informazione che l'ipotesi comporta nel caso di evidenze multiple è comunque controllabile se si selezionano le evidenze utilizzabili in maniera da scegliere le meno correlate, od eventualmente, nel caso in cui ciò non fosse possibile, fornendo per quelle più significative una misura di correlazione con gli altri caratteri. In questo caso l'ipotesi di indipendenza sull'insieme delle evidenze selezionate è solo parziale.

Rimane da affrontare la questione relativa alla "imprecisione" ed alla "ignoranza" del sistema esperto. Col primo termine si designa di

solito il fatto che le evidenze osservate non sono classificabili o misurabili con assoluta certezza: si può non conoscere l'esatta misura di un carattere metrico a causa della frammentarietà del reperto; si può essere incerti nell'identificare la classe di appartenenza di un carattere qualitativo. Per ovviare al primo inconveniente si è lasciata l'opportunità di fissare un intervallo di confidenza attorno alla misura specificata che si ipotizza distribuirsi normalmente. I caratteri qualitativi, dal canto loro, sono stati classificati in classi abbastanza ampie in modo da lasciar adito ad un margine di errore molto piccolo nell'identificazione della corretta classe di appartenenza. Questa possibilità di errore è comunque influenzata in maniera determinante dalla competenza dell'esperto utilizzatore del programma che dovrebbe in ogni caso possedere una certa esperienza nella capacità di riconoscere e classificare questi caratteri in maniera quanto più possibilmente corretta.

L'ignoranza di un'analisi concerne invece l'utilizzo di dati incompleti o comunque nell'avere a disposizione poche informazioni rispetto a quelle potenzialmente utilizzabili in caso più favorevoli. Attraverso l'analisi di un parco numero di evidenze è comunque necessario tentare di proporre in ogni caso un risultato diagnostico.

La teoria bayesiana risponde automaticamente a domande di questo tipo, nel senso che, il risultato di un'analisi condotta sulla base di una scarsa evidenza, darà più facilmente una probabilità bassa all'ipotesi prescelta come la più probabile. Volendo, è comunque possibile costruire un'indice che esprima quanta parte dell'evidenza teoricamente disponibile all'interno del sistema è stata effettivamente utilizzata, (indice che risponde dal punto di vista semantico alla definizione di ignoranza sopra vista), rapportando il numero di regole utilizzate a quelle disponibili all'interno del database.

Il funzionamento del sistema esperto

Con riferimento alla architettura tipica di un sistema esperto, è stata affrontata la costruzione dei tre moduli principali che lo compongono.

La conoscenza è stata strutturata secondo un formalismo *rule based*. Le informazioni riguardanti i caratteri metrici e qualitativi osservabili sui vari reperti che il sistema è abilitato a trattare sono state strutturate in modo diverso, soprattutto per quanto riguarda i dati probabilistici ad essi collegati. Per ogni tipo di carettere sono stati predisposti due differenti fatti nel database: il primo contiene le informazioni probabilistiche necessarie per la propagazione dell'incertezza, il secondo le domande da porre all'utente per permetterne l'iterazione col programma.

Per ogni carattere qualitativo, risulta necessario associare ad ogni modalità che il carattere può assumere, le verosimiglianze relative alle due ipotesi possibili, cioè $p(E_i \mid MASCHIO)$ e $p(E_i \mid FEMMINA)$.

Per quanto riguarda i caratteri metrici, è stato necessario implementare, supposta l'ipotesi di normalità distributiva, i valori medi e le varianze relativi alle distribuzioni maschili e femminili, consentendo di calcolare le verosimiglianze a seconda del livello del carattere stabilito dall'utente. Con riferimento a quanto detto prima circa l'imprecisione dei dati, viene chiesto di specificare un intervallo di confidenza in cui la vera misura del carattere può trovarsi (per default viene assegnato il valore unitario).

All'inizio dell'iterazione all'utente viene chiesto di scegliere fra i vari archivi a disposizione, ciascuno dei quali identifica una delle regioni scheletriche utilizzabili (osso coxale, cranio, ossa lunghe) su cui viene solitamente effettuata l'analisi del sesso. All'interno di ciascun archivio, le informazioni sono inerenti sia ai caratteri metrici che qualitativi e sono contenute in ordine di significatività ai fini della discriminazione sessuale. In questo modo l'utente ha l'opportunità di utilizzare i caratteri di un tipo o dell'altro ed in entrambi i casi gli saranno verrà chiesto di indicare per primi i caratteri che porteranno più rapidamente ad una diangosi definitiva.

La significatività dei dati è stata stabilita sul medesimo campione di reperti bolognesi e sardi e l'indagine effettuata ha consentito di ottenere risultati molto simili a quelli ottenuti in studi effettuati su campioni totalmente diversi. I caratteri qualitativi più significativi sono stati determinati col test χ^2, quelli quantitativi tramite il test t di Student.

Essendo lo scopo del sistema fornire la soluzione più probabile utilizzando il minor numero di evidenze possibile, all'utente è chiesto di specificare il livello di certezza (il livello cioè di probabilità a posteriori) che intende raggiungere: quando tale livello è raggiunto il sistema permette all'utente, se lo desidera, di interrompere l'analisi senza ricorrere ad ulteriori evidenze.

L'analisi su un unico segmento scheletrico è di tipo sequenziale, viene cioè condotta aggiornando di volta in volta la probabilità a posteriori identificata. Quando si prendono in considerazione più regioni scheletriche, è possibile invece, oltre ad un'unica analisi sequenziale in cui non viene fatta nessun tipo di differenziazione a seconda della regione scheletrica esaminata, anche uno studio indipendente di ogni regione scheletrica, in modo da scoprire quale di esse sia maggiormente foriera di informazioni sul dimorfismo tra i sessi.

L'iterazione è predisposta in modo tale che l'utente sia in grado di sapere in ogni momento in che direzione si stia muovendo il sistema, e sia inoltre in grado di verificare al termine dell'analisi quanto ciascun carattere (e ciascun segmento scheletrico) abbia contribuito alla decisione finale.

Questo è ottenuto registrando di volta in volta i caratteri esaminati e assegnando ad ogni carattere esaminato un valore proporzionale alla sua importanza. Tale valore è determinato calcolando rapportando il valore della verosimiglianza del carattere alla somma delle verosimiglianze utilizzate e standardizzando a 100 il risultato.

I possibili sviluppi

Uno dei problemi da affrontare riguarda l'utilizzo di metodi bayesiani in altri sistemi che siano più complessi di quello affrontato, soprattutto quando sia necessario definire molte probabilità a priori condizionate o quando l'assunzione di indipendenza non sia giustificabile.

Per affrontare questo problema si richiede uno studio teorico dei metodi probabilistici: si vorrebbe avere cioè un metodo col quale non fosse necessario richiedere all'esperto l'indicazione di tutte le probabilità a priori condizionate.

Analogamente bisogna rendere praticabile l'uso di sistemi esperti che richiedano, per la soluzione dei problemi, la costruzione di catene di inferenze: anche in questi casi all'esperto è attualmente richiesto dal modello bayesiano una quantità di informazioni a priori troppo grande per essere gestibile nei casi concreti.

Bibliografia

Charniak E., McDermot D., "Abduction in Expert Systems",*Introduction to Artificial Intelligence*, pp. 453-484, Addison-Wesley 1985

Fox J., "Knowledge, Decision Making and Uncertainty", *A.I. and Statistics*, Gale A. (editor), pp. 57-76, Addison-Wesley 1986

Spiegelhalter D.J., "A Statistical View of Uncertainty in Expert Systems", *A.I. and Statistics*, Gale A. (editor), pp. 17-56, Addison-Wesley 1986

Torre S., *Modelli probabilistico-induttivi ed ipotetico-deduttivi nei procedimenti di simulazione delle decisioni*, tesi di laurea, Bologna 1985-1986

Savorelli L., *Caratteri metrici dell'osso coxale nella determinazione del sesso: un'applicazione di metodi di analisi multivariata*, tesi di laurea, Bologna 1982-1983

Bratko I., *Prolog Programming for AI*, Addison-Wesley 1986

Casadei G., Teolis A.G.B., *Prolog: dalla programmazione all'intelligenza artificiale*, Zanichelli, Bologna 1986

Rich E., *Intelligenza artificiale*, MacGraw-Hill 1986

Clocksin W.F. Mellish C.S. *Programming in Prolog*, Springer Verlag 1984

Michie D., Hayes J. E., *Intelligent Systems: The Unprecedent Opportunity*, Chichester 1984

Negoita C. V., Expert Systems and Fuzzy Systems, Benjamin 1980

Gruppioni G., "Sulle differenze sessuali nell'osso coxale; I. I caratteri morfologici", *Rivista di Antropologia* **61**, 1980-1981.

Gruppioni G., Pettener D., "Sulle differenze sessuali nell'osso coxale; II. I caratteri metrici", *Rivista di Antropologia* **61**, 1980-1981.

Ferembach D., Schwidetzky I., Sloukal M., "Raccomandazioni per la determinazione dell'età e del sesso sullo scheletro", *Rivista di Antropologia* **60**, 1977-1979.

Hassan F.A., *Demographic Archaeology*,, pagg. 1-22 Academic Press 1981

UN FORMALISMO LOGICO PER LA RAPPRESENTAZIONE DELLA SEMANTICA DEL LINGUAGGIO NATURALE[1]

P. Terenziani, L. Lesmo, P. Torasso

Dipartimento di Informatica - Universita' di Torino
C.so Svizzera 185 - 10149 Torino

SOMMARIO

Nel presente articolo verra' proposto un nuovo formalismo di tipo logico che, considerando i vincoli semantici imposti dal mondo reale e legando strettamente il linguaggio al mondo, permette di ottenere una rappresentazione semantica "profonda" per le espressioni linguistiche.
Tale rappresentazione e' ottenuta mediante la definizione di un numero limitato di predicati indipendenti dal modello e rifiutando ogni "promiscuita' ontologica" (vedi [Hobbs, 85]).
Il formalismo proposto permette di rappresentare le ambiguita' semantiche del linguaggio in modo sintetico e di ottenere la rappresentazione finale delle espressioni in modo composizionale e mediante successivi affinamenti che portano ad eliminare, quando possibile, le ambiguita' semantiche presenti nei costituenti.

INTRODUZIONE

Il problema di come rappresentare la semantica del linguaggio naturale e' stato a lungo studiato e dibattuto (vedi [Allwood et al, 77], [Barwise e Perry, 83], [Hirst, 83], [Hobbs, 86], [Montague, 75], [Schubert e Pelletier, 82], [Woods, 78]) ma non ha ancora trovato una soluzione pienamente soddisfacente. Uno dei maggiori problemi e' costituito dal fatto che, a causa delle ambiguita' in esse contenute, le espressioni linguistiche non possono essere direttamente riferite al mondo ma devono prima essere tradotte in formalismi non ambigui.
I formalismi di tipo logico sono ampiamente utilizzati per rappresentare la semantica delle espressioni linguistiche in quanto permettono successive deduzioni logiche (vedi, ad esempio, [Hobbs, 86]) e forniscono una notazione esplicita e rigorosa in grado di cogliere e rappresentare senza ambiguita' il significato di tali espressioni.
In particolare i formalismi logici forniscono uno strumento adatto a descrivere con chiarezza quei tipici problemi di ambiguita' semantica del linguaggio naturale individuati da linguisti e filosofi nel corso dei secoli (quali ad esempio le ambiguita' dovute al campo d'azione dei quantificatori, le ambiguita' de-re de-dicto, l'intensione, l'opacita' ...). Dal punto di vista

[1]Questa ricerca e' stata parzialmente finanziata da MPI 40% (Architetture Software per Sistemi Intelligenti).