

La base della conoscenza per l'intelligenza artificiale applicata in nefrologia

G.P. Sancipriano

Nefrologia e Dialisi dell'Ospedale di Ciriè (TO)

Artificial intelligence: The knowledge base

The idea that efficacy efficiency, and quality in medicine could not be reached without sorting the huge knowledge of medical and nursing science is very common. Engineers and computer scientists have developed medical software with great prospects for success, but currently these software applications are not so useful in clinical practice. The medical doctor and the trained nurse live the "information age" in many daily activities, but the main benefits are not so widespread in working activities. Artificial intelligence and, particularly, expert systems charm health staff because of their potential. The first part of this paper summarizes the characteristics of "weak artificial intelligence" and of expert systems important in clinical practice. The second part discusses medical doctors' requirements and the current nephrologic knowledge bases available for artificial intelligence development. (G Ital Nefrol 2005; 22: 47-62)

KEY WORDS: Artificial intelligence, Semantic, Expert system, Nephrology, Elicitation, Knowledge

PAROLE CHIAVE: Intelligenza artificiale, Semantica, Sistemi esperti, Nefrologia, Elicitazione, Conoscenza

L'intelligenza naturale

L'Uomo è l'essere più intelligente presente in natura.

Definizione

L'intelligenza naturale è la capacità di intendere, di pensare, di giudicare, di interpretare con abilità e prontezza; di evolvere e di cambiare le proprie abitudini in relazione alle modificazioni dell'ambiente.

L'intelligenza artificiale

La locuzione *intelligenza artificiale* riunisce due termini contraddittori, perché non può essere *artificiale* l'intelligenza prerogativa *naturale* dell'uomo; tuttavia la locuzione è divenuta di uso abituale.

Definizione

L'intelligenza artificiale è l'insieme di studi e tecniche che tendono alla realizzazione di macchine, in grado di risolvere problemi complessi in modo automatico, simulando o emulando attività proprie dell'intelligenza umana.

È rappresentata da una gran quantità di persone che cer-

cano di realizzare prestazioni tecnologiche più intelligenti e di formulare teorie sul funzionamento della mente umana; si avvicina molto alla psicologia e impiega i *computer* per la sperimentazione.

Gli scettici dell'intelligenza artificiale avevano affermato che il *computer* non avrebbe mai imparato a giocare a scacchi; poiché, invece, l'ha fatto molto bene, ora gli stessi scettici richiedono di comporre una sinfonia. Se accadrà, pretenderanno sappia deriderli e beffarsi di loro con umorismo e allegria?

Di fatto, il *computer* ha raggiunto traguardi giudicati impensabili e non vi sono motivi per immaginare risultati ancora più lontani, perché sono sconosciute le future possibilità tecnologiche e le reali necessità.

I primi scienziati di intelligenza artificiale avevano ingenuamente creduto che l'intelligenza umana avesse *regole matematiche* semplici o complesse, ma tutte risolvibili con calcolatori sempre più potenti.

Questo è errato.

Il pensiero umano è fondato su relazioni filosofiche, psicologiche, sociali, pratiche e sensitive ora molto complesse quali i *simboli*, ora molto semplici quali il buon senso. Queste restano attualmente inaccessibili ad un elaboratore (1).

L'uomo, normalmente, svolge semplici azioni come camminare, parlare, interpretare una scena visiva, comprendere una frase, ragionare su eventi di senso comune, trattare situazioni incerte, in modo molto più brillante ed efficiente

dei più raffinati e costosi programmi di intelligenza artificiale risultanti dall'approccio simbolico e funzionale.

Certamente permane la ricerca di creare una macchina ad immagine e somiglianza dell'uomo, ma le ultime ricerche hanno più semplicemente cercato di aumentare enormemente le capacità del *computer*, strumento "prodotto" dall'intelligenza naturale, attribuendogli il comportamento esperto, pensante e parzialmente intelligente.

Semantica e competenze linguistiche

Definizione

La *semantica* è lo studio del significato delle parole (2).

La capacità dell'uomo di capire e produrre parole, frasi e discorsi nella sua lingua è dovuta ad un insieme di implicite conoscenze definite *competenze linguistiche*.

Tali competenze sono, almeno in parte inconsapevoli; la maggioranza delle persone è in grado di produrre e capire le frasi corrette o scorrette senza sapere il modo in cui questo avviene.

Le conoscenze sono collegate all'ambiente di vita fin dalla nascita.

Le competenze linguistiche si suddividono in: 1) competenza fonologica o capacità di produrre e capire i suoni della lingua parlata; 2) competenza sintattica o capacità di produrre o riconoscere frasi grammaticalmente corrette; 3) competenza semantica o capacità di assegnare o di estrarre significato dalle parole, dalle proposizioni, dai simboli e dalle frasi.

Tutte queste capacità derivano dalla presenza nella mente di un insieme di regole ben precise, che secondo alcuni Autori sono solo simili alle regole di un sistema formale, quindi elaborabile (3).

Secondo altri Autori la semantica è espressione dell'*intelligenza naturale*, quindi non elaborabile, infatti, il medesimo tema di una discussione può essere da più oratori condotto in modi totalmente diversi secondo cultura, conoscenze, esperienza, semplicità di esposizione dell'oratore.

Alle diversità dell'interpretazione della sintassi logica si associano le interpretazioni dei *simboli*, processi che attribuiscono alla singola parola l'estensione delle prerogative della parola stessa, con una modificazione successiva che deriva dall'ampliamento.

Un *simbolo* racchiude storie intere, vicende tra loro correlate a moltissimi fattori o eventi, riassume intere e significative esperienze comuni o personali e ha in sé stesso una grande quantità di dettagli e particolari.

Potrà mai un *computer* comprendere un simbolo? (4).

La semantica in sanità

Alle problematiche dei linguaggi naturali, dei linguaggi sintattici in informatica si è aggiunta l'esigenza di definire la *semantica nella sanità* per parole, frasi, proposizioni, concetti e simboli.

Il superamento dei problemi di semantica, rappresenta il più grande ostacolo nell'informatizzazione in medicina; non è sufficiente conoscere e classificare la struttura di una frase, ma è necessario comprendere ciò che essa vuol dire.

La costituzione di librerie, l'attenzione al cambiamento dei significati, la minimizzazione dell'impatto del cambiamento, la conservazione, la conversione, l'omissione e la mutazione dei codici saranno fondamentali nelle proposte di applicativi informatici futuri.

Gli ostacoli che si sono presentati nell'applicazione dell'intelligenza artificiale, paiono essere la rivincita della filosofia sulla tecnologia più avanzata a tutela della libertà di pensiero e di vita dell'uomo.

L'intelligenza artificiale

L'intelligenza artificiale ha seguito due diversi percorsi e sviluppi ed è attualmente classificata in:

- 1) Intelligenza artificiale simulazionistica o intelligenza artificiale forte
- 2) Intelligenza artificiale emulazionistica o intelligenza artificiale debole (5).

1) L'intelligenza artificiale simulazione o forte

L'*intelligenza artificiale simulazionistica* o *intelligenza artificiale forte* è basata sulla ricerca nel riprodurre il più fedelmente possibile la fisiologia del cervello, per ottenere prestazioni ad esso paragonabili. La macchina che agisce in modo intelligente deve avere una intelligenza cosciente indistinguibile dalla mente umana (6, 7).

Le reti neurali

L'idea di costruire una macchina intelligente a partire da una rete di neuroni artificiali risale alla nascita dell'intelligenza artificiale.

I calcolatori possono memorizzare con facilità enormi quantità di informazioni, operano in nanosecondi e possono svolgere enorme mole di calcoli aritmetici senza errore, gli uomini non sono in grado di avvicinarsi a tali prestazioni.

Nel 1943 McCulloch e Pitts proposero il primo modello di *rete neurale* (8).

Il sistema a rete neurale, a somiglianza della mente umana, è in grado di elaborare grandi quantità di dati d'ingresso apparentemente tra loro non correlati e di produrre in uscita una decisione utilizzabile.

Nel 1962 Rosenblatt, Papert e Minsky proposero il *perceptrone*, modello di neurone capace di apprendere mediante esempi (9).

Un perceptrone descrive il funzionamento di un neurone eseguendo una somma pesata dei suoi segnali di ingresso.

L'apprendimento, così inteso, è un processo di modifica dei valori dei pesi.

Il grande entusiasmo verso questo approccio subì una brusca riduzione pochi anni dopo, quando Minsky e Papert evidenziarono i grandi limiti di apprendimento del perceptrone.

Quando si vogliono rilevare con sensori grandezze intangibili, queste vanno scomposte in grandezze tangibili e cioè rilevabili con i sensori esistenti.

I dati forniti da questi sensori debbono essere opportunamente correlati e calcolati fra loro; il numero di dati è enorme, certamente in continuo aumento o forse infinito.

La correlazione esistente tra le grandezze rilevate è spesso ignota a priori, il che rende la rilevazione di una grandezza intangibile un problema generalmente difficile.

La capacità di apprendimento è la caratteristica fondamentale che rende possibile scoprire nella massa dei dati la correlazione cercata entro la raccolta di tutti i dati necessari.

L'apprendimento e la correlazione sono certamente le fasi che richiedono più tempo perché debbono esplorare tutte le possibilità e tutte le possibilità necessitano di aggiornamento nel tempo.

Recentemente sono state proposte nuove architetture di reti neurali non più soggette alle limitazioni teoriche dei perceptroni, dette *reti neurali connessionistiche* (10).

Le reti connessionistiche utilizzano algoritmi di ottimizzazione e apprendimento basati su complessi calcoli derivati dalla teoria delle probabilità e delle decisioni; tuttavia tale apprendimento, nascosto in variazioni di valori numerici reali, rimane cablato all'interno della rete e non è esplicitato in forma simbolica.

Le reti neurali sono più adatte a compiti di classificazione e di percezione di basso livello anche se tecnicamente più ardui, quali il riconoscimento del parlato, il controllo di processi o il riconoscimento di immagini.

Il cervello è costituito da un numero di neuroni che varia tra 10 e 100 bilioni, ciascuno di essi è connesso a un numero variabile tra 10 e 10.000 altri neuroni attraverso sinapsi. Secondo i teorici del connessionismo è necessario ricostruire con strumenti informatici la fitta rete di connessioni che legano tra loro le cellule neuronali per riuscire a creare una macchina realmente pensante.

Lo scienziato Rodney Brooks afferma che *“Il punto di non ritorno è già stato oltrepassato. Indietro non si può più andare: la robotizzazione degli umani e l'umanizzazione delle macchine è solo questione di tempo. Poco tempo”* (11).

Secondo lo scienziato Daniel Golden nel 2005 il *super-computer Blue Gene* dell'IBM eseguirà un milione di miliardi di operazioni al secondo; nel 2010, gli scienziati sperano di creare *computer* con le stesse capacità intellettive dell'uomo; nel 2020, le prestazioni di un cervello saranno contenute in un PC; nel 2030, un PC da mille euro avrà l'intelligenza dei residenti di una piccola cittadina di mille abitanti e nel 2050, i PC avranno le conoscenze di tutti i cervelli del mondo (12).

2) L'intelligenza artificiale emulazionistica o debole

L'intelligenza artificiale emulazionistica o intelligenza artificiale debole, è basata sul principio che l'essenza del funzionamento del cervello non risiede nella sua struttura, ma nelle sue prestazioni ottenibili da strutture completamente diverse (13).

L'intelligenza artificiale debole costruisce macchine intelligenti e capaci di risolvere tutti i problemi che l'intelligenza umana sa risolvere; si occupa della concreta costruzione di macchine pensanti ove il pensare è *“possesso e utilizzo di precise facoltà mentali”* anche limitate e non intelligenti.

È possibile un pensiero logicamente corretto, ma non intelligente talora stupido perché anche la stupidità è del genere umano.

Lo sforzo dell'intelligenza artificiale consiste nel fatto che l'intelligenza naturale e la scienza reale hanno capacità di connettere livelli logici, sintattici e semantici diversi e di metterli continuamente in discussione su basi filosofiche, fisiche, chimiche, biologiche e artificiali come nessun *computer* è o appare in grado di fare.

Le simulazioni dei processi cerebrali al calcolatore forniscono modelli degli aspetti formali di questi processi, ma *emulazione* non va confusa con *produzione* o *riproduzione*.

Il modello computazionale dei processi mentali non è più reale di quello di qualsiasi altro fenomeno naturale.

Immaginiamo un'ipotetica e possibile precisa simulazione al calcolatore di una funzione del sistema nervoso centrale quale un ragionamento, confrontata con la digestione in un cioccolatino.

Il caso del ragionamento del sistema nervoso centrale l'emulazione non è più reale che nel caso il cioccolatino da digerire, tuttavia mai potremmo digerire il cioccolatino, eseguendo il programma che simula la digestione.

In conclusione, l'emulazione di un processo cognitivo non produce gli stessi effetti della neurobiologia di quel processo cognitivo.

L'intelligenza artificiale debole è soltanto un modello di emulazione di alcuni aspetti dell'intelligenza naturale, utilissimo ai fini pratici come tutti i modelli di simulazione, ma nulla di più.

Se dovesse dar segno di qualcosa di simile alla coscienza o all'intenzionalità, dovremmo dire che si tratta soltanto di *“un'emulazione di attività dell'intelletto umano”*.

L'intelligenza artificiale dovrà essere valutata semplicemente per le sue capacità e prestazioni, indipendentemente dai metodi e meccanismi che sono utilizzati per realizzarla.

Il punto di vista è, pertanto, *emulazionistico* e non *simulazionistico*: l'idea che sta alla base è quella di costruire macchine che non necessariamente simulino riproducendo il comportamento del cervello umano, ma siano più semplicemente in grado di emularlo, selettivamente, nel risultato finale di alcune operazioni, fra cui il calcolare o il pensare in modo corretto, non necessariamente in modo intelligente (14).

Questa impostazione è stata sicuramente dominante nella

storia dell'intelligenza artificiale e ha portato alla costruzione di programmi che raggiungono un sufficiente livello di competenza nella conoscenza e nella risoluzione di problemi ritenuti complessi.

L'applicazione *software* alla base di un sistema di intelligenza artificiale non deve essere un insieme di istruzioni immutabili che rappresentano la soluzione di un problema, ma un ambiente in cui rappresentare, utilizzare e modificare una base di conoscenza e, se possibile, capace di auto-apprendere.

Test di verifica

1) Quale scienza si avvicina maggiormente all'intelligenza artificiale?

- a. Informatica
- b. Psicologia
- c. Ingegneria elettronica
- d. Filosofia
- e. Robotica.

2) Quale è la definizione corretta di semantica?

- a. Studio del significato delle parole
- b. Studio della traduzione delle parole
- c. Studio della costruzione sintattica delle parole
- d. Studio della logica del linguaggio
- e. Studio dell'origine delle parole.

3) L'intelligenza artificiale debole è anche definita:

- a. Intelligenza artificiale emulazionistica
- b. Intelligenza artificiale simulazionistica
- c. Intelligenza sviluppata da personal computer a bassa memoria
- d. Nessuna delle due risposte indicate.

La risposta corretta alle domande sarà disponibile sul sito internet www.sin-italy.org/gin e in questo numero del giornale cartaceo dopo il Notiziario SIN

Architettura tipica dei sistemi convenzionali ed esperti

Sistemi convenzionali

Definizione

Il sistema convenzionale elabora dati e sequenze di simboli alfanumerici a cui non è stato dato significato; risolve problemi usando *algoritmi esatti* in quanto effettua una ricerca esaustiva, senza essere influenzati da informazioni errate e non competenti.

Sistemi esperti

Definizione

Il sistema esperto è un programma che tenta di riprodurre il comportamento dell'uomo intelligente ed esperto in uno

specifico dominio; risolve problemi complessi la cui risoluzione dinamica richiede considerevole capacità, memorizza l'esperienza opportunamente codificata; giustifica la propria risposta e auto-apprende generando nuova conoscenza (15).

Il programma può essere scritto in qualsiasi linguaggio informatico, può risiedere su qualsiasi supporto di memoria ed essere eseguito da un qualsiasi calcolatore.

Il sistema esperto opera in un dominio composto di parole e frasi derivate dall'esperienza, ove i dati trasformati sulla base dell'esperienza in informazioni, elaborano conoscenza e generano altra informazione.

Il sistema esperto nasce per fornire le stesse opinioni, risposte e conclusioni, gli stessi consigli e giudizi, che fornirebbe l'esperto umano specialista interrogato nel settore.

Questo significa che il compito fondamentale di un sistema esperto è quello di coadiuvare l'attività di utenze professionali, laddove è usualmente richiesta la consulenza di uno specialista umano dotato di competenza e capacità di giudizio o dove la ricerca di soluzioni è nascosta in mole ingenti di dati o informazioni.

Le ricerche d'intelligenza artificiale hanno evidenziato le necessità di restringere e limitare il campo di applicazione; questi applicativi si rivelano significativamente più limitati, non disponendo di quella completezza che costituisce la conoscenza culturale della persona competente, capace di giungere a conclusioni in maniera intuitiva o saltando alcuni passaggi logici, affidandosi al buon senso o al meccanismo dell'analogia.

In definitiva, è simulato un esperto umano con tratti più o meno abbozzati e lo si fornisce della capacità di risolvere rapidissimamente compiti ristretti, temporanei o secondari, ma certamente complessi per volume di dati o di archivi (16).

È possibile che nell'ambito di un medesimo dominio vi siano sistemi esperti più o meno intelligenti con differenze simili alle diverse intelligenze naturali dell'uomo.

Il sistema esperto (17)

Il sistema esperto è strutturato in:

- Interfaccia
- Base di conoscenza
- Motore inferenziale
- Modulo spiegazione
- Modulo aggiornamento.

L'interfaccia

L'uso di un sistema esperto consiste nella possibilità di dialogo fra l'uomo e la macchina attraverso una interfaccia senza l'aiuto di specialisti ingegneri o informatici.

Il compito dell'*interfaccia* è quello di rendere il dialogo tra l'utente e il sistema esperto il più naturale possibile con l'impiego di immagini, di suoni, di linguaggi naturali, di display e di grafici.

La conoscenza e la base della conoscenza

Definizione

La *conoscenza* è la facoltà, l'atto, il modo e l'effetto del prendere possesso intellettualmente o psicologicamente con attività sistematica di qualunque aspetto di quella che è considerata la realtà.

La *conoscenza* è informazione in grado di generare altra informazione sulla base dei diversi tipi di esperienza.

Definizione

La *base della conoscenza* è il modulo del sistema esperto che raccoglie la conoscenza dello specialista competente sul dominio/problema o sul sottodominio/sottoproblema.

Le informazioni possono derivare da: 1) conoscenza di scienza certa; 2) conoscenza empirica, non formalizzata, fondata esclusivamente sulla pratica e sull'esperienza, senza cognizioni teoriche e scientifiche.

Per costruire una base di conoscenza è sufficiente inserire regole con senso compiuto e significato nell'ambito del programma in questione, con o senza specifica analisi del problema o correlazione tra regole introdotte.

È solitamente possibile dettagliare la base di conoscenza suddividendola in due aree:

- Area delle asserzioni o fatti costituenti la memoria a breve termine
- Area delle relazioni e regole costituenti la memoria a lungo termine

La *memoria a breve termine* contiene la conoscenza *dichiarativa* del problema da risolvere; è costituita da fatti e regole vere introdotte all'inizio della consultazione o dimostrate vere dal sistema nel corso della sessione di lavoro.

La *memoria a lungo termine* contiene le regole che forniscono l'insieme di percorsi, di raccomandazioni, di consigli, di direttive, di programmazioni e di strategie atte a costruire il patrimonio della *conoscenza disponibile* per risolvere il problema.

Lo sviluppo di una base di conoscenza rimane sempre il punto critico per la buona riuscita del sistema esperto.

Per sviluppare una base di conoscenza l'esperto del dominio deve essere affiancato all'*ingegnere della conoscenza*, studioso del linguaggio di sviluppo formalizzato. Questi è capace di modellare la realtà, le associazioni mentali, i processi deduttivi e induttivi, emersi dal confronto, in termini di regole con produzione automatica.

La base di conoscenza è successivamente costruita in modo incrementale e modulare, aggiungendo o modificando di volta in volta le regole di produzione. In una base di conoscenza è possibile modificare una regola o aggiungerne altre senza dover conoscere le restanti, perché le regole sono indipendenti una dall'altra.

La figura dell'ingegnere della conoscenza differisce sia

da quella dell'analista, sia da quella del programmatore.

Non sarà infatti necessario conoscere i linguaggi di programmazione, né tanto meno le problematiche *hardware* e *software* del sistema. È sufficiente avere pratica del linguaggio di sviluppo e della funzionalità del sistema esperto.

Sono strumenti ausiliari per lo sviluppo incrementale della base di conoscenza i compilatori, le interfacce e i programmi di verifica della costruzione.

In definitiva, è emulato un esperto umano con tratti più o meno abbozzati capace di risolvere compiti ristretti, temporanei o secondari, ma complicati per numero di dati, necessità di velocità di calcoli, applicazione di regole complesse o esame di numero ingente di casi.

I principali metodi per rappresentare la conoscenza sono:

- Dati
- Informazioni
- Conoscenze
- Regole
- Logica delle proposizioni
- Logica dei predicati
- Reti semantiche
- Frames
- Algoritmi genetici.

Dati

I *dati* sono sequenze di segni alfanumerici a cui non è attribuito alcun significato.

Informazioni

Le *informazioni* derivano dai *dati* a cui è stato aggiunto il significato.

Conoscenze

Le *conoscenze* sono informazioni in grado di generare altra informazione sulla base dell'esperienza.

Regole di produzione o regole

La selezione di una *regola* dalla base di conoscenza avviene in seguito a un'analisi dei *dati informati* e fatti noti.

Le regole sono costituite attraverso dichiarazioni composte di due unità: 1) *unità antecedente*: esprime una situazione od una premessa; 2) *unità conseguente*: azione da applicarsi in caso di riscontro di verità nella premessa.

La sintassi generale è pertanto: se *antecedente*, allora *conseguente*.

Vantaggi delle regole: 1) semplicità: riproducono esattamente il ragionamento umano; 2) modularità: ogni regola può essere scritta, inserita nella base di conoscenza e testata indipendentemente dalle altre.

Svantaggi delle regole: alcune forme di conoscenza non sono facilmente esprimibili sotto forma di regole.

Di solito il sistema esperto a regole si interfaccia con un data base che mantiene le informazioni sottoposte alle regole stesse.

Reti semantiche

Le *reti semantiche* rappresentano la conoscenza in forma grafica.

Una rete semantica è un insieme di nodi e archi orientati.

I *nodi* rappresentano *oggetti* o *concetti* mentre gli *archi* rappresentano *relazioni* unidirezionali.

Le reti semantiche possono utilizzare *l'eredità*, cioè un oggetto eredita le proprietà delle sue classi antenate.

Il processo di ragionamento basato sulle reti semantiche usa la tecnica dell'*inferenza per confronto*.

La domanda da porre al sistema è rappresentata mediante un frammento di rete contenente nodi con valore definito e nodi con valore da calcolare.

La procedura di *confronto* cerca nella base di conoscenza una rete avente la stessa struttura del frammento, lega le variabili nel frammento ai valori corrispondenti nella rete semantica.

Vantaggi reti semantiche: usano l'ereditarietà sfruttando le connessioni tra i nodi, questo permette: 1) risparmio di memoria in quanto molte relazioni non hanno bisogno di essere definite esplicitamente o singolarmente; 2) rappresentazione unica di oggetti simili.

Svantaggi reti semantiche: rappresentano solo conoscenza dichiarativa e non possono rappresentare conoscenza cognitiva e procedurale se non controllate.

Logica delle proposizioni

Il livello più elementare di logica è la *logica delle proposizioni*, basata sul concetto di proposizione o *unità elementare con cui si esprime un pensiero comune*.

È possibile costruire relazioni tra proposizioni attraverso i connettivi logici sotto indicati:

- Negazione
- Implicazione
- Equivalenza
- Congiunzione
- Disgiunzione.

Una *proposizione* caratterizza una frase unita da connettivi logici ed è vera o falsa.

Le relazioni tra proposizioni sono dette *formule logiche* e sono di solito espresse in *forma simbolica*.

Il significato dei connettivi logici può essere definito mediante *tabelle di verità*.

La logica delle proposizioni fa uso di *regole di inferenza* per ricavare da proposizioni vere altre proposizioni vere.

La logica delle proposizioni è inadeguata a risolvere molti problemi, perché una proposizione è considerata come unica entità che è vera o falsa.

La logica dei predicati e degli argomenti

La logica dei predicati risolve individuando all'interno di una proposizione due tipi di componenti: *argomenti* e *predicati*.

Il *predicato* è una relazione tra argomenti, cioè funzione che restituisce un valore di verità.

Il predicato non è sempre vero o sempre falso, il valore può dipendere dagli argomenti che lo compongono; consente maggiore potenzialità conoscitiva ed espressiva rispetto alla logica delle proposizioni.

L'*argomento* è una costante o una variabile o una funzione.

La *funzione* che lega due o più argomenti produce un nuovo *argomento*.

Nella logica dei predicati si usano gli stessi operatori della logica delle proposizioni, con l'aggiunta di due quantificatori *universale* ed *esistenziale*.

Frames

Un *frame* rappresenta un *oggetto* composto da *attributi* e *proprietà*.

Ogni attributo è identificato dal nome corrispondente e contiene in sé il valore dell'attributo.

I valori degli attributi possono essere: valori interi, valori reali, stringhe, valori booleani, relazioni e calcoli mediante procedure.

Vantaggi frames: 1) usano l'ereditarietà sfruttando la gerarchia dei *frames*; 2) usano le *procedure attaccate*; 3) è possibile l'ereditarietà *multipla*; 4) è possibile gestire *eccezioni*.

Algoritmi genetici

Gli algoritmi genetici rappresentano il metodo di ottimizzazione degli algoritmi usati nel calcolo di alcune funzioni.

L'inventore Holland si è rifatto al meccanismo della selezione naturale: si generano in modo casuale alcuni algoritmi genitori, dotati di un certo "patrimonio genetico digitale" a cui sono applicati due tipi di processi evolutivi: la *mutazione* casuale di uno o più bit del patrimonio genetico originale e il *crossing-over*, ovvero la generazione di un individuo figlio il cui patrimonio genetico è costituito da parte del patrimonio di due algoritmi "genitori".

Attraverso una funzione di decodifica e una di valutazione adattiva si selezionano gli individui più adatti alla risoluzione del problema affidato loro, mentre gli altri sono eliminati.

Il processo continua finché non si generano algoritmi in grado di giungere alla soluzione (18). L'evoluzione genetica è intesa quindi come un processo di ottimizzazione.

Elicitazione e acquisizione della conoscenza

Lo sviluppo di un sistema esperto procede in maniera evolutiva, cioè acquisisce conoscenza non solo all'ini-

zio del progetto, ma anche durante la vita del sistema stesso.

L'ingegnere della conoscenza costruisce un prototipo, che è corretto, verificato e validato dall'esperto per la correttezza delle risposte e del ragionamento.

Il processo di aggiornamento della conoscenza è realizzato dall'ingegnere della conoscenza che interpreta le informazioni fornite dall'esperto e le inserisce nella base di conoscenza, utilizzando un sistema automatico.

In alcuni casi può essere valutata la possibilità che l'esperto stesso aggiorni direttamente la base di conoscenza, avendo a disposizione un sistema di aggiornamento dotato di interfaccia amichevole e potente.

Pertanto l'*ingegneria della conoscenza* è l'insieme delle seguenti attività:

- Elicitazione della conoscenza
- Acquisizione della conoscenza
- Validazione e verifica della conoscenza
- Rappresentazione della conoscenza
- Validazione della conoscenza
- Inferenza
- Spiegazione e giustificazione dell'inferenza.

Elicitazione della conoscenza

Elicitazione della conoscenza è il processo attraverso il quale l'ingegnere ottiene dall'esperto la conoscenza relativa al dominio.

I tempi di elicitazione possono variare significativamente in relazione alla complessità del dominio, all'assenza di *standard*, al numero di variabili e alla complessità delle regole; l'elicitazione sovente deve essere periodica o continuativa.

L'acquisizione della conoscenza

L'acquisizione della conoscenza è l'intero processo di estrazione e conversione della conoscenza dell'esperto in una forma adatta ad essere elaborata in modo automatico.

La sorgente di conoscenza è l'*esperto umano del settore*; è indicato che questi sia anche un utilizzatore del sistema esperto, mentre non è necessario che tutti gli utilizzatori del sistema siano esperti del settore.

La persona che ha il compito di acquisire la conoscenza e trasferirla nella base di conoscenza è l'*ingegnere della conoscenza*, questi intervista l'esperto dopo aver stabilito un dizionario di parole chiave che costituiscono la base per lo scambio di informazioni tra i due professionisti.

L'acquisizione della base della conoscenza è processo fondamentale del sistema esperto, sia per lo sviluppo delle possibilità di risoluzione dei problemi, sia per la strutturazione delle ricerche nel dominio, sia per la correttezza delle risposte. Il tempo richiesto può essere molto lungo, protratto o continuativo.

La tecnologia delle informazioni è in grado solitamente di soddisfare le esigenze degli utilizzatori del sistema esperto.

Diverse difficoltà sono tuttora presenti nell'elicitazione e nell'acquisizione della base della conoscenza fra cui:

- L'esperto conosce il dominio o problema, ma non utilizza il sistema
- L'esperto non è correttamente informato sulle necessità degli utenti del sistema esperto
- L'esperto ha difficoltà ad esprimere in modo sintetico e comprensibile le conoscenze, i dati, le informazioni, i calcoli o le logiche
- L'esperto non ha alcuna conoscenza informatica
- Le regole generate dall'esperto sono troppo semplici e inadeguate a fornire l'accuratezza richiesta per gestire situazioni complesse
- Tra esperto e ingegnere il tempo di trasmissione della conoscenza è insufficiente
- L'esperto e l'ingegnere non sono disponibili alla collaborazione
- L'esperto ha diffidenza e scetticismo nei confronti dell'ingegnere dell'informatica
- L'ingegnere della conoscenza deve interagire con troppi esperti
- Mancanza di standard nell'elaborazione del dominio in esame
- Lo sviluppo del sistema necessita di molti esperti di cui alcuni non reperibili
- I dati di base non sono facilmente reperibili
- I dati di base sono numerosi
- La base della conoscenza è molto estesa
- Il sistema necessita di frequenti aggiornamenti della base di conoscenza
- L'interfaccia con l'utente è inadeguata
- Lo sviluppo del sistema ha significativi problemi semantici.

Rappresentazione della conoscenza

Tutta la base della conoscenza raccolta deve essere visibile all'esperto, all'ingegnere, agli utilizzatori e al responsabile del sistema esperto. La rappresentazione deve essere proposta in videate su applicativi di uso corrente nella sede in cui è collocato il sistema esperto.

Validazione e verifica della conoscenza

La base di conoscenza raccolta dall'ingegnere deve essere verificata sia dall'esperto, sia dall'utente del sistema nelle specifiche competenze.

È frequente che al corretto *funzionamento tecnico - informatico* non corrisponda il pieno soddisfacimento nell'uso pratico, per cui sia necessaria in fasi di collaudo implementazione delle domande e delle risposte.

È opportuno estendere il numero dei soggetti verificatori a più di uno.

L'uso della base della conoscenza è subordinato al parere favorevole dell'utente finale e di tutti coloro i quali hanno responsabilità civili e penali del prodotto finale del sistema.

Il sistema esperto deve essere interfacciato agli applicativi informatici utilizzati di routine nelle singole attività.

I sistemi complessi necessitano di lunghi tempi di ideazione, di verifica e di molti aggiornamenti.

Inferenza

Definizione

L'*inferenza* è la generazione di conoscenza attraverso il ragionamento.

Esistono diverse strategie di inferenza:

- Inferenza logica
- Inferenza deduttiva
- Inferenza induttiva
- Inferenza abduttiva
- Inferenza ibrida.

Inferenza logica

L'*inferenza logica* è la generazione di conoscenza con ragionamenti desunti da forme sintattiche, regole e formule di certa interpretazione.

Una *regola di inferenza logica* consente di derivare da un insieme di formule *assunte vere* ulteriori *risultati conclusi veri*. L'inferenza logica permette di scrivere programmi in forma *dichiarativa*.

Il principale vantaggio della logica è la *precisione*: è infatti, garantito che, partendo da premesse corrette, si arriva a conclusioni corrette.

Inferenza deduttiva

L'*inferenza deduttiva* è la generazione di conoscenza che parte dal generale per giungere allo specifico secondo il concetto di *implicazione*.

È una forma di ragionamento matematicamente esatto, per cui, se le premesse sono vere, anche la conclusione è garantita vera.

Inferenza induttiva

L'*inferenza induttiva* è la generazione di conoscenza che parte dallo *specifico* per giungere al *generale*; è carente dell'esattezza matematica, ma è comunemente utilizzata nei sistemi esperti, perché riproduce l'abituale processo di generazione di conoscenza della mente umana.

Inferenza abduttiva

L'*inferenza abduttiva* è la generazione di conoscenza che spiega gli effetti in termini delle loro cause secondo il *principio di causa ed effetto*.

La verità della premessa assicura la verità della conclu-

sione. Questa regola è generalmente accettata anche se non è garantita l'esattezza, è carente della correttezza matematica del ragionamento deduttivo.

Gli esperti umani applicano nel ragionamento frequentemente l'inferenza abduttiva.

Inferenza ibrida

L'*inferenza ibrida* è la generazione di conoscenza del dominio rappresentata dalle diverse tecniche di inferenza sopra descritte ovviando alle carenze di una con i vantaggi dell'altra.

Le inferenze ibride integrano, tipicamente, dati, informazioni, regole, logiche e *frames*.

La *conoscenza clinica* è solitamente espressione di inferenza ibrida.

Motore inferenziale

Definizione

Il *motore inferenziale* è il componente dei sistemi esperti responsabile della inferenza.

Il motore inferenziale è quella parte di programma, separato dalla base di conoscenza, che:

- Scandisce in ordine opportuno la base di conoscenza al fine di reperire documentazione
- Estrae le regole utili alla soluzione secondo meccanismi di riconoscimento e attivazione
- Seleziona ipotesi
- Seleziona la regola più appropriata
- Esegue la regola
- Effettua delle riduzioni e rende possibile un dialogo
- Ripete il ragionamento fino alla possibile soluzione
- Costruisce la soluzione del problema proposto
- Fornisce spiegazioni sul percorso di ragionamento
- Utilizza l'esperienza contenuta nella base di conoscenza
- Aggiunge alla base di conoscenza la conclusione se vera
- Registra nella memoria di lavoro l'azione

Esso è organizzato in parti:

- *Lavagna*: memoria di lavoro sede della memoria del piano generale di soluzione
- *Agenda*: sede della attività da fare
- *Area risoluzione*: descrizione della soluzione o delle soluzioni ipotizzate.

Spiegazione e giustificazione della inferenza

Nei *sistemi a regole*, il motore inferenziale seleziona una regola tra quelle che hanno le condizioni vere.

Ciascuna regola dell'insieme che rappresenta il dominio della conoscenza, per risultare valida in una particolare istanza, deve essere confrontata con un insieme di fatti che rappresentano la conoscenza attuale sul caso corrente.

Una condizione può diventare vera in funzione sia di

risposte a domande poste all'utente, sia di fatti già noti durante la consultazione del sistema.

Quando la condizione di una *regola* diventa vera, anche la conclusione della regola è vera secondo un'operazione di *confronto*, in cui si tenta di accostare l'*antecedente* della regola con i vari fatti presenti nella memoria temporanea.

Se il *confronto* ha successo, si procede all'esecuzione delle azioni elencate nel *conseguente*.

Nel caso quest'ultimo contenga invece una conclusione, il soddisfacimento dell'antecedente consente la possibilità di omologare tale asserzione come nuovo fatto della *memoria a breve termine*.

L'operazione di *confronto* genera delle *catene inferenziali*, che indicano il modo in cui il sistema utilizza le regole per effettuare nuove inferenze.

I metodi adoperati per generare inferenza sono solitamente due:

1) *Concatenamento in avanti*: tecnica di ricerca di una conclusione partendo dai fatti presenti all'inizio nella memoria temporanea e applicando in avanti le regole di produzione. L'inferenza è condotta dall'antecedente, in quanto la ricerca delle regole da applicare si basa sul confronto tra i vari fatti in memoria e quelli conosciuti logicamente

2) *Concatenamento all'indietro o ragionamento guidato dall'obiettivo*: tecnica di ricerca che parte dallo stato finale e si procede verso quello iniziale. La concatenazione all'indietro parte da una conclusione e cerca di dimostrare le condizioni che portano a tale conclusione

Il fondamento della risoluzione automatica dei teoremi è il *principio di risoluzione di Robinson* che è una regola di inferenza.

Secondo Robinson l'induzione può essere vista come il processo inverso alla deduzione. La deduzione permette infatti di derivare conclusioni specifiche da premesse generali, mentre l'induzione cerca di risalire alle premesse, partendo dall'osservazione di casi speciali (esempi). Questo ha condotto a tentativi di inversione del procedimento di risoluzione, alla base dei sistemi di deduzione automatica.

Il sistema esperto si definisce *sistema esperto trasparente* quando rende visibile in videata il suo funzionamento logico di risposte a domande e giustifica perché ha prodotto il risultato.

Il sistema consente all'utente di chiedere giustificazione e spiegazione del lavoro svolto dopo avere dialogato tramite interfaccia su una particolare inferenza.

Modulo aggiornamento

Il sistema esperto ha un modulo di aggiornamento che permette all'esperto di modificare la base di conoscenza e all'ingegnere della conoscenza di aggiornare il motore inferenziale.

La base di conoscenza di un sistema esperto può venire ampliata e modificata in sessioni separate dal dialogo con l'utente, è redatta a mano dall'*ingegnere della conoscenza*.

Test di verifica

4) Quale finalità ha il sistema esperto?

- Riprodurre il comportamento della mente umana
- Risolvere problemi complessi la cui risoluzione richiede capacità
- Memorizzare esperienze codificate
- Giustificare le proprie risposte ed autoapprendere
- Tutte le precedenti.

5) Quale è la definizione di elicitazione:

- Legittimazione di percorso clinico elettronico
- Percorso che conduce alla diagnosi nell'intelligenza artificiale
- Processo attraverso il quale si ottiene dall'esperto la conoscenza relativa al dominio
- Elaborazione di calcoli complessi.

6) Quale è la definizione esatta di inferenza:

- Generazione di conoscenza attraverso il ragionamento
- Generazione di conoscenza attraverso l'esperienza
- Generazione di conoscenza attraverso il calcolo
- Generazione di conoscenza attraverso i fatti
- Nessuna delle risposte elencate.

La risposta corretta alle domande sarà disponibile sul sito internet www.sin-italy.org/gin e in questo numero del giornale cartaceo dopo il Notiziario SIN

Tecniche di ricerca

La ricerca della soluzione in un problema d'intelligenza artificiale avviene in una porzione limitata dello spazio degli stati del sistema, detta *spazio di ricerca*.

Tuttavia, all'aumentare del numero dei nodi dell'albero cresce lo spazio della ricerca della soluzione con possibilità dell'effetto di *esplosione combinatoria* o di *ridondanza dei dati*.

Per ovviare ed evitare l'esplosione combinatoria si usano due tecniche di ricerca:

- La ricerca cieca con procedura in profondità o in ampiezza
- La ricerca euristica.

La ricerca cieca

Il termine *ricerca cieca* si riferisce al fatto che la ricerca esamina in modo *completo* gli stati, ma non discrimina quali spazi, basandosi sulla probabilità di successo tra un percorso e l'altro.

Esistono due procedure di ricerca cieca:

- Ricerca in profondità
- Ricerca in ampiezza.

Ricerca in profondità: percorso attraverso livelli di profondità fino alla soluzione o alla fine del percorso per esempio il percorso ad albero.

Ricerca in ampiezza: percorso dallo stato iniziale attraverso tutti i possibili stati successivi; se nessuno di essi è uno stato finale, si genera il livello successivo creando tutti i possibili successori dei nodi del livello esaminato. Il processo si arresta quando si raggiunge uno stato finale.

Applicando la ricerca in ampiezza, tutti i nodi di un livello sono esaminati prima di passare ai nodi del livello successivo. Nel caso di uno spazio degli stati finito, la ricerca in ampiezza trova sempre una soluzione, se presente, e individua il cammino più breve.

Applicando tale tecnica, il tempo di ricerca e il numero dei nodi generati per ciascun livello cresce esponenzialmente all'aumentare dei nodi esaminati.

La ricerca in profondità e la ricerca in ampiezza utilizzate nella pratica per la risoluzione di molti problemi sono attualmente limitate da *restrizione di tempo e di memoria*.

La ricerca euristica

Definizione

La ricerca euristica è il metodo di ricerca della verità basato sulla documentazione dei fatti.

La ricerca euristica in contrapposizione a quella algoritmica consiste nel trovare una soluzione ipotizzando tutte le soluzioni possibili verosimili e cercando di verificarle attraverso una documentazione di cause e di fonti.

I metodi euristici sono efficienti e simili al pensare dell'uomo, ma più rischiosi nell'esattezza della risposta; talora la soluzione non è trovata semplicemente perché non è tentata o è trovata solo in parte a causa di documentazione insufficienti o male interpretate.

La ricerca euristica: 1) sfrutta la conoscenza del problema e la documentazione del sistema per guidare la ricerca; 2) è utilizzata per scegliere il nodo successivo da visitare; 3) è utilizzata per escludere dalla ricerca interi sottoalberi; 4) non ha regole di controllo preciso, ma porta a soluzioni accettate; 5) risolve in modo soddisfacente problemi considerati insolubili per complessità o numero di dati.

Apprendimento

È universalmente riconosciuto che le macchine non potranno dirsi intelligenti fino a quando non saranno in grado di accrescere le proprie conoscenze e di migliorare le proprie abilità spontaneamente.

Simon nel 1981 affermava che *"l'apprendimento consiste in cambiamenti del sistema che siano adattativi, nel senso che mettono in grado il sistema di svolgere la prossima volta lo stesso compito in modo più efficiente ed effettivo"*.

Un metodo per risolvere parzialmente il problema è dotare le macchine simboliche di *capacità di ragionamento induttivo oltre che deduttivo*.

Mentre *l'inferenza deduttiva* preserva la verità nel senso

di correttezza logica, *l'inferenza induttiva* può tendere ad un'eccessiva generalizzazione e produrre errori.

Si tratta sempre di un approccio teorico in quanto i risultati di tale procedimento sono una nuova teoria, nuove regole e, in generale, una base di conoscenza nuova o aggiornata.

Attualmente i *programmi di apprendimento* sono ampiamente utilizzati dal punto di vista pratico per far fronte all'esigenza di sfruttare il patrimonio informativo contenuto nelle grandi raccolte di dati accessibili su rete, o nelle basi di dati aziendali, per estrarre regolarità fra i dati, informazioni e *conoscenze nascoste*.

Lo studio della *conoscenza nascosta* potrebbe rappresentare la soluzione proposta dall'intelligenza artificiale e dal settore delle basi di dati a questi problemi e sta dimostrando ampi margini di espansione.

Il suo obiettivo è la ricerca di modelli all'interno delle basi di dati, in modo da permettere un supporto alle decisioni.

Alcuni obiettivi della ricerca in questo settore sono:

- Studio e sperimentazione di tecniche di conoscenze nascoste su dati di tipo clinico
- Studio di strumenti e tecniche di filtraggio intelligente
- Studio e realizzazione di sistemi esperti capaci di essere un valido supporto al personale sanitario nello svolgimento delle attività che coinvolgono i dati analizzati.

L'apprendimento è riconosciuto come uno degli aspetti fondamentali dell'intelligenza artificiale, perché è grazie ad esso che la conoscenza e le capacità possono essere acquisite e migliorate.

I tempi di apprendimento possono essere molto brevi se i docenti sono numerosi, coordinati, coerenti, educati, collegati e ordinati.

L'interesse per l'apprendimento è andato crescendo notevolmente in questi ultimi tempi.

È utile distinguere vari metodi di apprendimento: 1) meccanico o ripetitivo; 2) per modifica dei parametri; 3) per istruzione; 4) per esempi; 5) per analogia; 6) per esperienza di osservazioni e segnalazioni.

Nella forma meccanica, la conoscenza è messa a disposizione esattamente nella forma in cui è direttamente utilizzabile dal programma e cioè come *conoscenza di fatti*.

Poiché la conoscenza è sovente incompleta, in particolare se riferita a scienze in evoluzione rapida, i programmi devono comprendere ipotesi su come le conoscenze di dettaglio possono essere integrate, specializzate o generalizzate tramite omissioni o cancellazioni.

Solitamente i programmi intelligenti presentano una struttura complessa di apprendimento e debbono essere dotati di una conoscenza di base profonda ed estesa, perché possano apprendere in modo significativo e automatico.

L'intelligenza artificiale e la medicina

L'assistenza sanitaria in tutti i paesi del mondo ha risorse limitate.

La moderna tecnologia informatica certamente offre la reale possibilità di contenere i costi e di razionalizzare le risorse umane ed economiche destinate all'assistenza sanitaria.

È necessario unire l'era dell'informazione globale all'era del diritto della salute, attribuendo all'accesso e alla gestione delle informazioni il reale valore scientifico, economico e umano che hanno dimostrando di avere.

È nell'interesse dei sistemi sanitari comprendere e abbracciare la tecnologia per assicurare che i futuri cambiamenti avvengano in favore della medicina e non solamente per la frenesia di dotarsi di tecnologia.

Lo staff dirigenziale delle organizzazioni sanitarie gestisce il budget, le risorse materiali e le risorse umane; deve gestire correttamente le risorse più preziose del prossimo secolo: l'intelligenza, la conoscenza, le informazioni e tutti i dati di ritorno.

Le applicazioni dell'intelligenza artificiale proposte in campo sanitario sono risultate sovente non applicabili, non redditizie e inutili per rapporto costo/beneficio sfavorevole per:

1. Limiti della tecnologia a disposizione degli esperti
2. Caratteristiche peculiari della scienza medica
3. Problematiche correlate all'organizzazione del sistema sanitario
4. Errori degli ingegneri e degli informatici
5. Errori dei medici.

1) Limiti della tecnologia a disposizione degli esperti

L'informatizzazione nella sanità ha certamente ritardi nella dotazione di hardware e nella formazione del personale.

La mole di dati che caratterizzano questo dominio ha causato la ridondanza dei dati e l'esplosione combinatoria.

Per ovviare la ridondanza e le esplosioni ripetute, il processo di informatizzazione nella sanità si è polverizzato in programmi con software proprietari di aziende, senza utilizzo di standard di legge o di fatto.

Il risultato finale è l'anarchia dei dati intesa come mancanza di governo dei dati e disordine fondato sull'autonomia e la libertà degli utilizzatori e il caos informatico inteso come impossibilità di trasferire dati informatizzati a sistemi informatizzati in modo automatico.

Tuttavia, l'attuale utilizzo di questi applicativi anarchici e caotici nel lavoro quotidiano dei medici e infermieri impedisce la loro sostituzione, impegnando sovente risorse in interfacciamenti necessitanti di continui aggiornamenti informatici.

Gli informatici hanno creduto che la possibilità di raccolta, di trattamento di dati e informazioni in medicina fosse sufficiente a garantire il processo d'informatizzazione del servizio sanitario.

Questo si è dimostrato falso.

L'elaboratore elabora soltanto legami alfanumerici e sintattici e non la logica ed i contenuti semantici, ossia il significato delle variabili sulle quali sta operando.

Nella metodologia clinica i contenuti semantici sono fondamentali.

Infine, esistono problematiche non risolte in merito ai lunghi tempi di consultazione improponibili nell'attività di routine del medico e dell'infermiere.

Risparmio di tempo nei compiti amministrativi e burocratici nelle elaborazioni dei dati di ritorno, nelle indagini trasversali, nelle stime economiche, nelle connessioni in rete, nei consulti telematici, nell'aggiornamento sono state promesse non mantenute.

2) Caratteristiche peculiari della scienza medica

La medicina è scienza complessa, utilizza nelle sue diverse specializzazioni dati alfanumerici, parole, immagini, suoni e simboli; pertanto, l'intelligenza artificiale in medicina dovrebbe trattare dati alfanumerici, parole, immagini, suoni e simboli.

L'elicitazione e l'acquisizione della conoscenza è estremamente difficile per quantità e complessità dei temi trattati, la conoscenza degli esperti è sovente di tipo empirico; le proposizioni non sono facilmente formalizzabili, le frasi sono complesse.

Fino ad oggi, la difficoltà di pervenire ad una condivisione di informatizzazione clinica attraverso basi di dati eterogenee è stata grande a causa della diversità di piattaforme software, delle diversità nelle connessioni fra i vari luoghi di deposito dei dati e della mancanza di standard nella sanità.

I risultati dei gruppi di lavoro sugli standard nella sanità, in particolare Health Level 7 specifica per lo scambio di dati elettronici fra istituti di cura e fra differenti sistemi informativi, non ha trovato dopo oltre 10 anni pratico uso.

La cultura del personale sanitario nel rispetto degli standard nella sanità è insufficiente, soffocata dagli interessi legittimi dell'industria biomedica o farmaceutica.

Le linee guida sono diverse tra di loro, costantemente in fase di mutazione o aggiornamento, vincolate dalle risorse economiche nazionali o locali, sovente non applicabili al caso clinico nella sua globalità; utilizzabili per la formazione e riqualificazione del personale addetto alla sanità, hanno complessità tale da non potere essere facilmente memorizzate, sviluppandosi in algoritmi che contrastano con il ragionamento del clinico e con la pratica assistenziale.

Medesimo ragionamento deve essere fatto in merito alla Evidence Based Medicine EBM.

Le linee guida applicate alla EBM certamente potranno essere uno strumento di guida più facile, ma deve essere garantita la consultazione in tempo breve, risultato che può essere raggiunto solo con elaboratori dati molto potenti e collegati per gli aggiornamenti.

La base della conoscenza in medicina è immensa, ha velocità di generazione non raggiungibile dalle capacità intellettive umane, interpreta medesimo dato con significato diverso ed è soggetta ad errori.

Il medico non aggiornato cade in errore; l'elaboratore non aggiornato cade in errore.

Il medico tradizionalmente opera con l'intelligenza natu-

rale per la prevenzione, l'anamnesi, l'esame obiettivo, la diagnosi, la diagnosi differenziale, la prescrizione della terapia, il controllo degli effetti collaterali dei farmaci.

Il medico verifica i risultati e matura la personale esperienza su cui fonda la *conoscenza individuale*.

Il medico non ha la *possibilità umana* di accedere a tutte le conoscenze necessarie per una ipotetica *completa, informata e documentata prestazione* clinica nei tempi di produzione dati dalle singole amministrazioni.

Per tale motivo il medico solitamente opera sull'esperienza con procedimento empirico, ma la probabilità di errore o di prestazione incompleta o di mancata risposta è altissima.

Pertanto, è certo che la moderna medicina e la corretta pratica assistenziale dovranno utilizzare anche dati, memorie artificiali, pensiero artificiale, basi di conoscenza, algoritmi, sistemi esperti, pena la diagnosi e la terapia generiche o errate (19).

È, infatti, vero che se il medico non conosce la risposta a qualunque quesito clinico, è possibile sapere con certezza dove possiamo trovare la risposta esatta alla nostra domanda: il problema non è nell'assenza di risposta, ma in quanto tempo la risposta è visibile e dove è in memoria.

I medici hanno negli anni riconosciuto che non esiste solo la diagnosi clinica e hanno sperimentato la correttezza della diagnosi per immagine, la diagnosi di laboratorio, la diagnosi citologica, la diagnosi istologica, la diagnosi strumentale, la diagnosi genetica e altre; è opportuno riconoscere e abituarsi alla *diagnosi informatica da sistema esperto*.

La *cartella clinica cartacea* è per legge *atto pubblico*, deve avere le caratteristiche di *chiarezza, trasparenza, completezza, integrità*. L'attuale materiale cartaceo sanitario è consegnato direttamente all'interessato; la conservazione della documentazione clinica è per tutta la vita di competenza delle Aziende sanitarie.

Qualsiasi sistema artificiale o *cartella clinica elettronica* deve mantenere queste caratteristiche; la valutazione dei costi deve comprendere il mantenimento, l'aggiornamento, il riconoscimento, l'accesso ai sistemi informativi precedentemente adottati.

Il personale sanitario ha obbligo di legge di osservare le normative sulla privacy e ogni atto medico comporta responsabilità amministrative, civili, penali, dirigenziali e di risultato. I processi d'informatizzazione debbono tenere in dovuta considerazione queste caratteristiche di responsabilità individuale che sono peculiari del dirigente medico o dell'infermiere.

È, inoltre, necessario che il percorso stato salute sia tracciato in *cartella clinica elettronica unica*, che dovrà avere una memoria intelligente, un'interfaccia trasparente al paziente e a tutti gli operatori sanitari di tutto il territorio nazionale per tutta la vita, solitamente superiore a 75 anni.

Il problema dell'archiviazione dei dati e del loro accesso negli anni non ha mai avuto la dignità di sviluppo coordinato.

Qualsiasi sforzo per creare sistemi di raccolta di documenti è vano, se non prevediamo la possibilità di conservare l'archivio e la storia del paziente.

Deve infine essere ammesso che l'ultraspecializzazione del medico in diversi settori ha reso ormai il linguaggio tecnico di lavoro incomprensibile tra gli stessi medici, pertanto se il paziente è unico la semantica sarà diversa per ogni organo, specialità o patologia.

Le anamnesi e gli esami obiettivi clinico medico, neonatale, nefrologico, urologico, dermatologico, ortopedico, neurologico, vascolare, oculistico, genetico, così fino al oltre mille, sono tutti diversi tra di loro, pur avendo tutti in comune il dato unico: "il paziente".

Tale difficoltà è superabile se i dati sono classificati correttamente fin dalla prima immissione, insormontabile se i dati debbono essere ricercati secondo parola chiave per problemi di riconoscimento e di semantica.

3) *Problematiche correlate all'organizzazione del sistema sanitario*

Indagini di mercato sull'utilizzo degli elaboratori come strumento di lavoro collocano l'Italia fra le ultime nazioni in Europa.

In ambito sanitario l'utilizzo di elaboratori è limitato ad alcuni aspetti amministrativi di rilevazione delle prestazioni, di prenotazione e di valutazione dei costi.

Le applicazioni in telemedicina sono esperienze isolate, sovente ostacolate.

Il mancato sviluppo riconosce molte cause, fra cui la mancata sensibilità della classe politica, la mancanza di fondi dedicati, la frammentazione della programmazione, la mancanza di sistemi di controllo sui progetti.

La prossima prevista scomparsa del sistema sanitario nazionale e l'istituzione di sistemi sanitari regionali aggraverà l'anarchia e il caos dei dati.

È presente una significativa differenza di risorse informatiche tra Regione e Regione e nell'ambito di questo tra Azienda sanitaria e Azienda sanitaria e tra reparto e reparto.

La classificazione dei DRG, richiesta ai medici quale strumento di rilevazione di costi, non può essere imposta agli stessi quale strumento di epidemiologica o di ricerca. La *diagnosi clinica* sovente non corrisponde alla *diagnosi per costi a DRG*.

Gli applicativi *Microsoft* occupano il mercato a costi elevati con evidenti segni di non utilizzo, disutilizzo e sottoutilizzo.

È augurabile che anche in tema di informatizzazione i governi dei popoli siano promotori di leggi e regole in merito agli *standard* da utilizzare, in assenza è prevedibile una dispersione delle risorse e insuccesso negli obiettivi prefissati per la tutela della salute di tutti i cittadini secondo criteri di uguaglianza.

È necessario che politici, amministratori, personale sanitario, ingegneri e informatici trovino una reale collaborazione e integrazione delle conoscenze con applicativi tra-

sparenti e collaudati nella pratica, ove le caratteristiche del programma non sono le possibili enormi potenzialità, ma la capacità di risolvere con intelligenza i semplici problemi di rapido accesso alle informazioni dell'operare quotidiano di tutti gli operatori della sanità.

È necessario il cambiamento della mentalità degli Amministratori che debbono essere propositori di una metodologia di lavoro e di ricerca che non deve essere esclusivamente mirata alla ultraspecialità, ma alla multispecialità o alla integrazione e collaborazione tra professionalità diverse.

Il lavoro multidisciplinare è condizione fondamentale e irrinunciabile per il raggiungimento di risultati.

4) Errori degli ingegneri e degli informatici

Ingenti risorse economiche e umane sono state elargite per l'informatizzazione nella sanità in particolare per la elaborazione della cartella clinica elettronica, strumento base di lavoro.

I risultati sono giudicati totalmente insufficienti e lo spreco di finanziamenti è enorme e continuato.

Qualsiasi applicativo non troverà mai applicazione se non ha origine ed esamina tutte le esigenze dei pazienti e la realtà di lavoro dei medici e infermieri.

Errano gli ingegneri che ritengono che la scienza medica sia una scienza basata sui dati alfanumerici.

Trattare numeri è divenuto estremamente semplice, ma poco utile alla sanità.

La scienza medica non è *scienza esatta* basata sui numeri, ma può essere *scienza certa* se basata sulle proposizioni, sui *frames*, sulle frasi, sulle immagini, sui suoni e sulla rilevazione di tutti i processi fisiopatologici, comunque siano tecnicamente registrati ed analizzati.

È necessario che esperti dell'informazione illustrino ai medici e infermieri gli sviluppi della scienza con le reali applicazioni, affinché il percorso parallelo abbia punti di contatto.

L'interfaccia utente deve essere la migliore possibile, la risoluzione di problemi semplici operativi, deve essere immediata.

La ridondanza e l'inutilità dei dati rendono tutto il personale sanitario diffidente alla ricerca di informazioni, la fiducia nell'informatizzazione deve essere recuperata con i fatti.

È vero che sono in corso studi applicativi di selezione, filtraggio, pulizia, accorpamento, ma resta difficilmente comprensibile la motivazione per cui siano stati raccolti dati per poi dovere essere modificati.

È necessario nella sanità attivare una selezionata e corretta raccolta di dati per evitare perdite di tempo nella pulizia e nel filtraggio, tale procedura impegna l'ingegnere a tenere nella dovuta considerazione le esigenze del paziente in *primis* e degli operatori sanitari in *secundis*.

Le problematiche per l'assenza di standard di legge e le problematiche di semantica in sanità precedentemente enunciate, rendono gli applicativi informatici non utilizza-

bili in quanto non interfacciabili tra di loro; questi programmi sono destinati a scomparire di *fatto o di legge*, trascinando con sé i dati di memoria.

Informatici e ingegneri debbono accettare che buon senso, fantasia, intuito, diligenza e prudenza restino caratteristiche dell'animo umano necessarie agli operatori dell'assistenza sanitaria.

5) Errori dei medici

Il medico ha diretta responsabilità di ogni suo atto e deve operare secondo scienza e coscienza in piena libertà con autonomia nell'interesse del paziente e della comunità.

La difficoltà da parte dei medici nell'accettazione della diagnosi informatica basata su sistemi esperti, deriva dalle mancate conoscenze, dall'ignoranza delle soluzioni che l'elaboratore fornisce, dalla presenza di fenomeni di ridondanza dati e dalla mancanza di tempo nella raccolta dati.

È necessario che i medici con conoscenze informatiche, anche approfondite, cessino di elaborare applicativi proprietari privi di *standard*, senza aggiornamento e a valenza locale, ma offrano la disponibilità alla collaborazione agli ingegneri e informatici, riconoscendo pari dignità professionale a questi e a tutte le figure professionali che operano nella sanità, in particolare alle infermiere.

Il processo nella informatizzazione non deve mai escludere il personale infermieristico, reale motore di assistenza, a cui debbono essere riconosciute responsabilità individuali e autonomia professionale, rimuovendo l'isolamento operativo e favorendo l'*assistenza globale* al paziente.

La trasmissione della conoscenza medica e infermieristica agli ingegneri, infine, non può essere delegata ai medici e infermieri simpatizzanti dell'informatica, ma deve essere espressione di riconosciuto lavoro da parte delle amministrazioni degli ospedali.

L'informatizzazione porterà vantaggi indiscutibili in termini di accuratezza, precisione, completezza, verifica e qualità della prestazione a vantaggio del paziente.

I medici non debbono temere sistemi esperti con possibilità di autoapprendimento se a loro è garantito il controllo, la spiegazione e l'accettazione finale.

La memoria di un medico o infermiere è limitatissima, diminuisce con l'età ed è soggetta ad errore, pertanto, non vi sono razionali motivi per non utilizzare la memoria artificiale.

Il lavoro del medico ambulatorio è il lavoro di un professionista sovente privato della possibilità al confronto, del dialogo e della discussione con altri, pertanto, non vi sono razionali motivi per non utilizzare il pensiero artificiale.

La lettura durante la visita della conoscenza clinica elettronica introdotta nell'elaboratore migliorerà la precisione e il dettaglio della diagnosi e della terapia, permettendo educazione sanitaria e aggiornamento continuo.

Gli errori del medico sovente non derivano dall'ignoranza, ma dalla incompleta conoscenza, dalla mancata disponibilità e immediatezza dei dati che accompagnano il percorso salute del cittadino e dalla difficoltà di raggiungere la

sede della risposta al quesito.

Esisterà sempre una intelligenza artificiale più intelligente di un'altra intelligenza artificiale, finché sarà l'intelligenza naturale a crearla.

Nessun sistema esperto potrà emulare il rapporto medico e paziente o trasformare il paziente uomo in un *numero* o un *dato*.

Risoluzione ai problemi

La rivoluzione tecnologica ha concesso alla società dell'informazione la possibilità di accedere ad un'enorme mole di materiale informativo, che deve essere gestito e interpretato in maniera corretta.

Le società mediche non debbono attendere altri anni per avere nel lavoro quotidiano i benefici di questa rivoluzione, in particolare debbono potere disporre di:

- Memoria artificiale con possibilità di accesso durante tutti gli atti del medico
- Conoscenza di base con caratteristiche della disponibilità, trasparenza, archiviazione, aggiornamento, spiegazione e implementazione assistite
- Accessibilità dei dati su sistemi informatici aperti su tutto il territorio nazionale
- Archiviazione del dato in modo automatico
- Aggiornamento in automatico del dato mutato
- Verifica dell'operato con la visualizzazione non solo dei dati input ma *output*
- Collegamenti a distanza
- L'integrazione di dati di suoni, immagini e parole
- Utilizzo di *standard* di legge o di fatto
- Verifica della qualità dei dati raccolti con sistemi concertati
- Utilizzo di sintassi comuni tali da rendere automatico il trasferimento dei dati
- Sistemi esperti.

La valutazione dei processi d'informatizzazione per costi/beneficio deve avere prospettiva di visione distribuita negli anni essendo processo di risparmio a lunga distanza.

Il collegamento tra Università e l'industria informatica e biomedica deve essere stretto, rendendo facili finanziamenti per le ricerche e le prime applicazioni.

Le Università interessate debbono essere strettamente collegate agli utilizzatori sul campo e il prodotto della ricerca deve essere validato dall'esperto e dall'utente finale.

Il lavoro svolto dagli esperti deve essere riconosciuto dalle Amministrazioni degli ospedali come attività lavorativa ed essere retribuito con la partecipazione ai guadagni della vendita dei sistemi intelligenti secondo normative di legge.

La produzione scientifica e l'introduzione delle metodologie di lavoro immesse sulle reti debbono avere garantito il *copyright* con possibilità di consulto diretto con l'Autore.

I sistemi esperti attendono solamente i suggerimenti e sollecitazioni degli operatori della sanità; in campo tecnologi-

co si suole dire che basta una idea o un progetto dell'*utilizzatore per una realizzazione più o meno immediata*.

È verosimile che nei prossimi anni il personale sanitario e gli ingegneri, trovata l'auspicata collaborazione, debbano affrontare la scelta tra due strategie:

- Utilizzo dei motori di ricerca specialistici disponibili su Internet in grado di recuperare da un *data base* enorme con sistemi di ricerca intelligenti i percorsi clinici applicati
- Nuova costruzione della conoscenza specialistica di base, confermata dalla medicina dell'evidenza applicata in sistemi d'intelligenza artificiale.

La seconda scelta comporterà una nuova modalità di comunicazione degli aggiornamenti della base della conoscenza con trasmissione degli *abstract* costruiti non solo in parole chiave, ma in tabelle, algoritmi, frasi e reti semantiche utilizzabili in sistemi esperti.

È probabile l'abbandono della *parola chiave* con la nuova introduzione di frasi libere o in tabelle rese codificabili per elicitazione e acquisizione della conoscenza da parte degli ingegneri.

Questa ultima strategia è possibile e auspicabile, ma nuova al mondo scientifico.

L'intelligenza artificiale e la nefrologia

La *nefrologia* è la specialità medica che si occupa della prevenzione, diagnosi e terapia delle malattie del rene.

Nell'ambito della terapia delle nefropatie l'emodialisi, la dialisi peritoneale e il trapianto renale occupano molto tempo del lavoro del nefrologo.

L'assistenza a questi tipi di malati è caratterizzata da:

- I pazienti sono assistiti direttamente dal nefrologo dell'Ospedale in tutti gli aspetti clinici
- La durata di vita e di conseguenza di assistenza è molto lunga
- La necessità di controlli clinici è frequentissima
- L'accesso alla dialisi ha frequenza trisettimanale
- Molti dati clinici, per molti anni, in medesimo paziente sono archiviati e necessitano di continua consultazione
- La terapia dell'insufficienza renale cronica potrà avvalersi con enorme vantaggi delle conoscenze della nanomedicina.

Per tali motivi, i nefrologi ed il personale infermieristico sono stati sempre sensibili ai processi di informatizzazione nella sanità.

Le unità operative di nefrologia sono le unità operative sanitarie in Italia in cui il processo di informatizzazione clinica è più avanzato.

Due ditte hanno sviluppato sistemi operativi in nefrologia coprendo il mercato italiano: La Traccia di Matera con l'applicativo *Gepadial* (20) e la ditta SINED di Bologna con l'applicativo *Medware* (21).

Ambedue gli applicativi raccolgono dati con sistemi convenzionali in cartelle cliniche elettroniche, senza avere svi-

luppato sistemi esperti.

Il desiderato sviluppo di *sistemi esperti* deve avere come presupposto l'inserimento dei dati non in campo testo, ma in campi numerici, campi data, campi tabellari a selezione singola o multiselezione. Ogni risposta tabellare dovrà essere collegata al numero di riconoscimento; il numero in quanto tale è elaborabile, pertanto trasformerà il contenuto formale della tabella con annessa la sua semantica in dato testo elaborabile, quindi espressione di *logica matematica*.

La *logica matematica* applicata alla *conoscenza di base* conduce alla possibilità di applicare i sistemi esperti e l'intelligenza artificiale attraverso l'utilizzo di sistemi di programmazione logica quali il *Prolog* (22). Il *Prolog* permette, infatti, di formalizzare, secondo le regole di una sintassi stabilita, un sistema formale permettendone la scrittura, la validazione e la consultazione in base ai principi di coerenza, completezza e decidibilità (23).

La base della conoscenza in nefrologia

La possibilità di elaborare numeri in nefrologia, esempio dati di esami ematochimici è già possibile nelle cartelle cliniche elettroniche presenti nel mercato. La possibilità di elaborare tabelle o frasi o proposizioni non è disponibile.

È, infatti, necessario costruire la *base della conoscenza*.

L'Autore ha costruito la base della conoscenza in nefrologia, elaborando campi tabellare contati all'aprile 2004 come:

- 3.369 esami di laboratorio
- 1.887 esami strumentali e prestazioni
- 13.842 diagnosi DRG
- 15.230 diagnosi cliniche
- 24.200 farmaci
- 4.140 interventi chirurgici
- 4.236 risposte a domande di 28 tipi di anamnesi diverse
- 24.200 risposte a domande di 40 esami obiettivi diversi.

Il lavoro ha permesso di costruire un prototipo di *base della conoscenza nefrologica* da sottoporre ad elicitazione per un sistema esperto per la diagnosi di patologie del paziente in trattamento emodialitico, con possibile estensione successiva a tutta la patologia nefrologica.

L'insieme della stesura di frasi e simboli è fondato sul ragionamento clinico con visualizzazione dei dati in modelli o gruppi selezionabili.

Il sistema garantisce la possibilità di immediato e facile accesso alla *memoria artificiale* in nefrologia e al *pensiero artificiale* a cui manca tuttora l'intelligenza.

L'obiettivo è di trasformare la ricerca da logica con algoritmo a sistema esperto con l'utilizzo di:

- **Applicazione dell'intelligenza artificiale debole:** formata da sistema esperto
- **Interfaccia:** amichevole separata dall'implementazione
- **Modulo spiegazione:** trasparente
- **Modulo aggiornamento:** automatico per dati, informazioni e regole

- **Reti semantiche:** derivati dalla base di conoscenza
- **Frames:** derivati dalla base di conoscenza
- **Logica delle proposizioni:** derivati dalla base di conoscenza
- **Inferenza:** ibrida
- **Motore inferenziale:** concatenamento in avanti e all'indietro
- **Ricerca cieca:** in ampiezza
- **Apprendimento:** meccanico, per modifica dei parametri e per istruzioni.

Test di verifica

7) Quale tipo di inferenza è necessaria in medicina

- a. Inferenza logica
- b. Inferenza deduttiva
- c. Inferenza induttiva
- d. Inferenza abduttiva
- e. Inferenza ibrida.

8) Quale è la definizione di ricerca euristica?

- a. Metodo di ricerca della verità basato sulla documentazione dei fatti
- b. Metodo di ricerca della verità basato su calcoli statistici
- c. Metodo di ricerca della verità basato su esperienza empirica
- d. Metodo di ricerca della verità basato su calcoli matematici
- e. Nessuna delle risposte sopra indicate.

9) Quali sono le caratteristiche di una cartella clinica cartacea?

- a. Chiarezza
- b. Trasparenza
- c. Completezza
- d. Integrità
- e. Tutte le precedenti risposte.

La risposta corretta alle domande sarà disponibile sul sito internet www.sin-italy.org/gin e in questo numero del giornale cartaceo dopo il Notiziario SIN

Conclusioni

È interesse dei pazienti e del servizio sanitario la sperimentazione di sistemi esperti nella sanità.

Il lavoro presenta lo stato di due esperienze:

1. Le possibili applicazioni dei sistemi esperti in medicina
2. La gestione clinica dei pazienti nefropatici da parte dei medici nefrologi su cartella clinica elettronica con raccolta dati in sistemi tabellare.

Le caratteristiche dei pazienti nefropatici in emodialisi e l'attuale libello di informatizzazione in nefrologia suggeriscono essere favorevole la sperimentazione e l'utilizzo di prototipi dei sistemi esperti.

È intendimento unire tutte le professionalità interessate per trasformare la *cartella clinica elettronica* da semplice *data base* utilizzata nella pratica clinica e validata da decenni di utilizzo a *cartella clinica elettronica intelligente* con utilizzo di sistemi esperti.

Il lavoro presenta lo stato dell'arte delle diverse scienze in attesa di integrazione e collaborazione.

Riassunto

L'intelligenza artificiale è l'insieme di studi e tecniche che tendono alla realizzazione di computer, in grado di risolvere problemi complessi in modo automatico, simulando o emulando attività proprie dell'intelligenza umana.

Il pensiero umano è fondato su relazioni filosofiche, psicologiche, sociali, pratiche e sensitive ora molto complesse quali i *simboli*, ora molto semplici quali il *buon senso*. Queste restano attualmente inaccessibili ad un elaboratore. Alle problematiche dei linguaggi naturali, dei linguaggi sintattici in informatica si è aggiunta l'esigenza di definire la *semantica nella sanità* per parole, frasi, proposizioni, concetti e simboli. Il superamento dei problemi di semantica rappresenta il più grande ostacolo nell'informatizzazione in medicina. Il *sistema esperto* è un programma che tenta di riprodurre il comportamento dell'uomo intelligente ed esperto in uno specifico dominio; risolve problemi complessi la cui risoluzione dinamica richiede considerevole capacità, memorizza l'esperienza opportunamente codificata; giustifica la propria risposta e auto-apprende, generando nuova conoscenza. La *conoscenza* è la facoltà, l'atto, il modo e l'effetto del prendere possesso intellettualmente o psicologicamente con attività sistematica di qualunque aspetto di quella

che è considerata la realtà. Lo sviluppo di un sistema esperto procede in maniera evolutiva, cioè acquisisce conoscenza non solo all'inizio del progetto, ma anche durante la vita del sistema stesso. Il desiderato sviluppo di *sistemi esperti* deve avere come presupposto l'inserimento dei dati non in campo testo, ma in campi numerici, campi data, campi tabellari a selezione singola o multiselezione. Ogni dato diviene così elaborabile. Il lavoro ha permesso di costruire un prototipo di *base della conoscenza nefrologica* da porre in un sistema esperto per la diagnosi di patologie del paziente in trattamento emodialitico. L'obiettivo è di trasformare la ricerca da logica con algoritmo a sistema esperto.

Ringraziamenti

L'Autore ringrazia la Professoressa Paola Mello del Dipartimento di Elettronica, Università di Bologna per la disponibilità alla lettura delle lezioni sull'intelligenza artificiale; e la Professoressa Beatrice Lazzarini del Dipartimento di Ingegneria elettronica - Università di Pisa per le nozioni sui sistemi esperti.

Un riconoscimento particolare a mio padre Professor Mario Sancipriano (1919-2004) Cattedra di Filosofia Morale Università degli studi di Siena per gli insegnamenti di tutta una vita.

Indirizzo degli Autori:

Dr. Gian Piero Sancipriano

UOA Nefrologia ASL 6 Ciriè

Via Battitore, 7/9

10073 Ciriè (TO)

e-mail: cirie.dialisi@asl6.piemonte.it

Bibliografia

1. Piaget J. La psychologie de l'intelligence. Paris Colin, 1947.
2. Ulmann S. La semantica. Introduzione alla scienza del significato. Il mulino Bologna, 1962.
3. Cordeschi R. La teoria dell'elaborazione umana dell'informazione. Aspetti critici e problemi metodologici. Evoluzione e modelli. Editori riuniti Roma, 1984; 321-422.
4. Buttazzo G. Coscienza artificiale, missione impossibile. Mondo digitale I, 2002; 1: 16-25.
5. Charniac E, Mcdermott D. Introduzione all'Intelligenza Artificiale. Masson Addison-Wesley, Milano, 1988.
6. Nilsson M. Principles of Artificial Intelligence. Springer-Verlag, Berlin, 1980.
7. Russel S, Norvig P. Intelligenza Artificiale. UTET Libreria, 1998. Capitoli 1, 2, 6, 18, 22.
8. McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. Math. Biophysics, 1943; 5: 115-33.
9. Minsky ML, Papert S. Perceptrons. Cambridge, MA: MIT Press, 1969.
10. Gori M. Introduzione alle reti neurali artificiali. Mondo artificiale II, 2003; 8: 4-20.
11. Rodney Brooks. Home page. Rodney Brooks <http://www.ai.mit.edu/people/brooks/index.shtml>
12. Ricerca IBM. <http://www.research.ibm/blugene/>
13. Rich E, Knight K. Artificial intelligence. Mc Graw-Hill, 1991.
14. Geneseret MR, Nilsson NJ. Logical foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988.
15. Stefanelli M. Sistemi esperti in medicina. La Nuova Italia Scientifica, 1998.
16. Grassi E. Le macchine pesanti, intelligenza artificiale e sistemi esperti. UTET, 1989.
17. Lazzarini B. Introduzione ai sistemi esperti. www.iet.unipi.it/lazzarini, 2004.
18. Holland JH. Algoritmi genetici. Le scienze, 1992.
19. Rossi Mori A. Manuale informatica medica, 2002, Capitolo 16.
20. La Traccia. Matera. Applicativo Gestione Pazienti Dialisi GEPADIAL. <http://www.gepadial.net>
21. Sined Medical computers systems. Bologna. Applicativo MedWare. <http://www.sined.net>
22. Clocksin WF, Mellish CS. Programmare in Prolog. Franco Angeli Libri, Milano, 1986.
23. Console L, Lamma E, Mello P, Milano M. Programmazione Logica e Prolog. UTET Torino, 1.