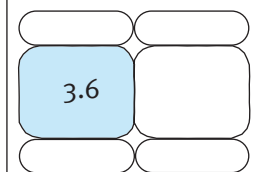


SISTEMI FUZZY



Andrea Bonarini

I sistemi fuzzy sfruttano la possibilità offerta dagli insiemi fuzzy e dalla logica fuzzy di rappresentare modelli in termini simbolici che abbiano uno stretto legame con le realtà misurate. Sono, quindi, modelli di facile comprensione e di progettazione relativamente immediata. Vengono sempre più spesso adottati per applicazioni che spaziano dal controllo di impianti industriali all'interpretazione delle immagini, dalla classificazione dei dati all'analisi del segnale, dal controllo di elettrodomestici alle applicazioni spaziali.



1. FUZZY?

Quando introdusse il concetto di *fuzzy set* 33 anni fa [4], Lofti Zadeh, iraniano emigrato a Berkeley, poté cogliere solo in parte l'impatto che questo avrebbe avuto sui settori più disparati, dal controllo, alle basi di dati, dalla modellistica, alla programmazione dei calcolatori, alla realizzazione di oggetti di consumo appetibili e affidabili. Le applicazioni fuzzy nel mondo sono ormai milioni e ne vengono realizzate di nuove in numero sempre crescente. Controllori fuzzy fanno parte dei sistemi ABS (*Antilock Braking System*) delle automobili, nelle lavatrici, aspirapolvere e videocamere, nei robot che giocano a calcio e in quelli industriali, nei treni della metropolitana e nelle sonde spaziali. Sistemi fuzzy supportano decisioni economiche e sistemi di controllo di qualità, permettono di trovare informazioni in rete e in basi documentali, supportano nella selezione del personale e nell'interpretazione di immagini.

Da dove viene questo successo?

Zadeh, uno dei ricercatori che negli anni '60 aveva contribuito allo sviluppo delle teorie

dell'automazione, a un certo punto si accorse che i modelli matematici che venivano utilizzati in quell'ambito non erano adeguati a rappresentare semplici concetti di uso comune, come "caldo" o "alto". Avrebbe voluto includere della conoscenza comune nei suoi modelli, ma i concetti qualitativi che venivano usati dagli esperti mal si adattavano alla forma matematica fino ad allora disponibile per rappresentare modelli. Erano anche gli anni in cui venivano sviluppati i primi sistemi esperti e in cui si cominciava a formalizzare la conoscenza. Era chiaro da secoli come i concetti in questione potessero essere rappresentati con classi; ad esempio, il concetto di "caldo" può essere definito elencando degli oggetti caldi, i quali costituiscono un insieme definito proprio dal fatto che i suoi membri hanno quella proprietà. La teoria degli insiemi è alla base della matematica e della rappresentazione della conoscenza e Zadeh propose un'estensione del concetto di insieme, l'insieme fuzzy, dalla quale si è poi giunti a estendere l'aritmetica, la logica, le misure, costruendo gli strumenti per infinite

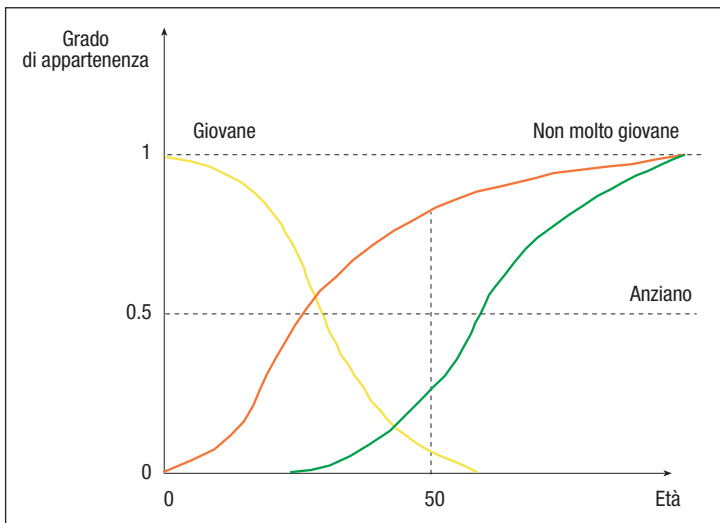


FIGURA 1 Alcune funzioni di appartenenza applicazioni, tutte in grado di rappresentare concetti in modo analogo a quanto fanno gli esseri umani.

2. COS'È UN INSIEME FUZZY?

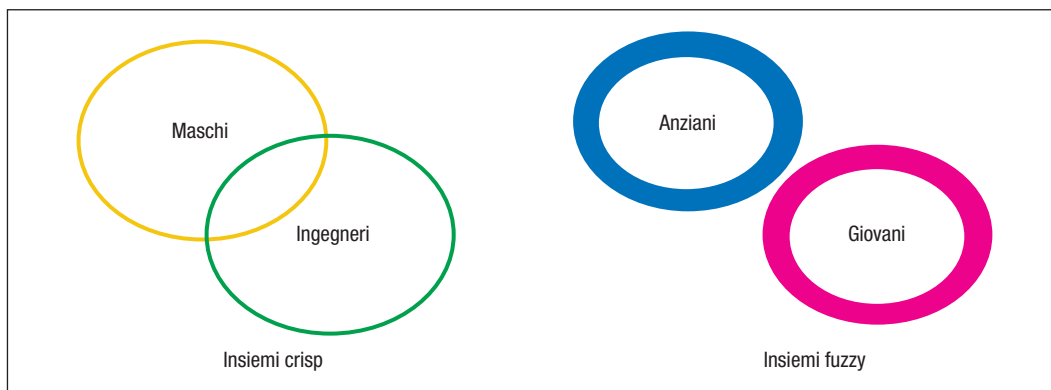
Per capire cos'è un insieme fuzzy si consideri dapprima il concetto di insieme tradizionale, che nel seguito verrà chiamato insieme *crisp*, per contraddistinguerlo dagli insiemi fuzzy. Un insieme è composto da tutti gli elementi dell'universo del discorso (l'ambito che interessa al modellista) che soddisfano una data funzione di appartenenza. Per un insieme *crisp*, la funzione di appartenenza è booleana, cioè associa ad ogni elemento x dell'universo del discorso un valore "vero" o "falso" a seconda che x appartenga o non appartenga all'insieme. La funzione di appartenenza definisce, quindi, l'insieme e può avere diverse forme. Per esempio, l'insieme dei laureati è definito da una funzione di appartenenza che ritorna "vero" se e solo se la persona x ha conseguito una laurea. Esistono però concetti più qualitativi. Per esempio, a che età una persona è considerata come "giovane"? Fino a 20 anni? A 30? A 50? Certamente, una persona di 20 anni è considerata come "giovane" più di una persona di 40... Diviene, allora, importante poter definire quanto un elemento dell'universo del discorso possieda una certa proprietà, o, in altri termini, quanto possa appartenere all'insieme degli elementi che posseggono quella proprietà. È possibile,

dunque, definire una funzione di appartenenza per un insieme, che ritorni un valore nell'intervallo da 0 "falso" a 1 "vero". Questo permette di definire "quanto" si ritiene che un elemento dell'universo del discorso appartenga all'insieme, cioè permette di dare un grado di appartenenza all'insieme non necessariamente booleano.

Nella figura 1, è riportato un esempio di alcune funzioni di appartenenza definite sulla variabile età che caratterizza gli elementi dell'universo del discorso. Si noti la funzione che definisce l'insieme delle persone giovani, quella relativa alle persone anziane, e quella relativa all'insieme delle persone non molto giovani che, come si vedrà, si può ricavare dalla prima applicando opportuni operatori.

È possibile vedere che una persona di 50 anni, secondo le definizioni date da chi ha definito queste funzioni di appartenenza, appartiene sia all'insieme delle persone non molto giovani, con un grado di appartenenza relativamente elevato, sia all'insieme delle persone giovani con grado basso, sia all'insieme delle persone anziane, pure con grado basso. L'appartenenza a entrambi questi ultimi due insiemi potrebbe sembrare una contraddizione (come può una persona essere allo stesso tempo giovane e vecchia?), ma non lo è per la definizione che è stata data dei due insiemi, che hanno le funzioni di appartenenza parzialmente sovrapposte. Questa possibilità permette di utilizzare insiemi fuzzy per rappresentare concetti in ambienti in cui la rilevazione degli stessi può essere approssimata o incerta, e dà un grande potere descrittivo.

La definizione di insieme fuzzy non è che un'estensione della definizione classica di insieme. L'insieme fuzzy ha una frontiera che non è più una linea netta di demarcazione tra gli elementi che appartengono all'insieme e quelli che non vi appartengono, ma un'area in cui si trovano elementi classificabili come appartenenti all'insieme con un certo grado. Per questo l'insieme è detto "fuzzy", cioè "sfumato". In figura 2, è possibile notare alcuni esempi di insiemi *crisp* e di insiemi fuzzy. Si noti che in linea di principio insiemi *crisp* e insiemi fuzzy si possono intersecare, in quanto entrambi operano nello stesso universo del discorso e possono esistere elementi che appartengono a entrambi.

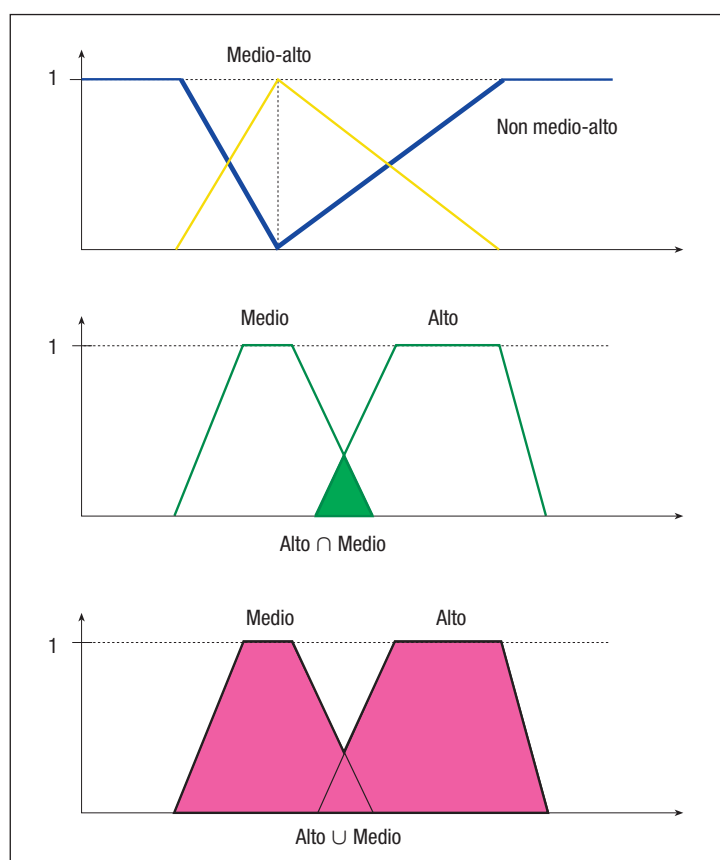
**FIGURA 2**

Due insiemi crisp e due insiemi fuzzy. In linea di principio insiemi crisp e insiemi fuzzy si possono intersecare, in quanto entrambi operano nello stesso universo del discorso

Il termine scelto da Zadeh per denominare i nuovi insiemi da lui definiti, rendeva conto della loro peculiare caratteristica, ma costituì uno dei primi ostacoli alla diffusione di queste idee: chi avrebbe voluto usare delle cose “sfuocate” quando c’erano tanti modelli matematici a disposizione, precisi e ben definiti? Nonostante questo, il messaggio fu colto, dapprima, in Europa, dove nel 1974 Ebrahim Mamdani definì delle regole basate sugli insiemi fuzzy per poter realizzare il controllore del reattore di un cementificio [3]. Questo è un impianto di difficile modellizzazione matematica, che veniva controllato manualmente con successo da operatori che ragionavano in termini di “temperatura alta” e “poca acqua”, reagendo a una situazione descritta in termini qualitativi con azioni del tipo “aggiungere poco cemento” o “aumentare la portata dell’acqua di molto”. Mamdani codificò queste regole in termini fuzzy, che permettevano di interpretare i numeri forniti dai sensori (o forniti agli attuatori) con i termini linguistici usati dagli operatori: era nato il controllo in linguaggio naturale.

3. COSA SONO LE REGOLE FUZZY?

Le regole proposte da Mamdani, e da allora largamente usate, non sono altro che un modo per mettere in relazione una descrizione di una situazione in termini linguistici con un’azione da svolgere, espressa anch’essa a parole. Sono basate su un’altra estensione di un concetto matematico che segue immediatamente dall’estensione degli insiemi: la logica fuzzy. I valori di verità di una proposizione non sono più solamente “vero” o “falso”,

**FIGURA 3**

Composizione di funzioni di appartenenza per gli operatori insiemistici

ma possono variare in un insieme ordinale, normalmente nell’insieme dei numeri reali da 0 a 1. Analogamente, si estendono tutti i concetti caratteristici della logica. Gli operatori logici, negazione (not), disgiunzione (or) e congiunzione (and) vengono ridefiniti in modo da poter fornire valori coerenti con il loro significato anche per operandi con valori non booleani, ma reali. L’estensione segue, immediatamente, la definizione dei loro corrispondenti nella teoria degli insiemi (complemento, unione, intersezione (Figura 3)).

Per esempio, la negazione viene definita semplicemente come il complemento a 1 della funzione di appartenenza all'insieme complementare. Indicando con $\mu_A(x)$ la funzione di appartenenza di un elemento x all'insieme fuzzy A e con \bar{A} il complementare di A , si ha che $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

In logica fuzzy sono poi stati definiti tutti gli altri elementi della logica, quali quantificatori, modificatori, meccanismi inferenziali, sui quali non è il caso di dilungarsi in questo contesto, rimandando i lettori interessati alla letteratura specifica [1]. Per dare un'idea della potenzialità di queste estensioni si può citare il fatto che i modificatori, che hanno il ruolo di modificare il valore di verità di una proposizione, in logica fuzzy sono in linea di principio infiniti, mentre in logica booleana si ha la sola negazione, dato che la modifica di un valore booleano (per esempio, "vero") può solo essere l'altro "falso". Per esempio, "molto" è un modificatore che deforma la funzione di appartenenza, e di cui si è vista un'applicazione nella definizione dell'insieme "non molto giovane" in figura 1. I quantificatori, che in logica classica sono il quantificatore esistenziale (Esiste un x tale che...) e il quantificatore universale (Per ogni x ...) in logica fuzzy possono essere infiniti, come ad esempio: "Esistono molti x tali che...", "Per quasi tutti gli x ...", "Per qualche x ...". In queste frasi, tutti i termini ("molti", "quasi tutti", "qualche") possono essere definiti da altrettanti insiemi fuzzy che ne rappresentano il significato in maniera ben definita. Anche i meccanismi inferenziali sono stati fuzzyficati, introducendone le versioni valide per una logica con valori di verità continui. Per esempio, il fuzzy *modus ponens* è una versione del classico meccanismo usato per dedurre informazione da informazione nota, in cui gli elementi coinvolti possono avere valori di verità compresi tra 1 e 0. Se ne vedranno degli esempi qui di seguito.

A questo punto, è possibile rispondere alla domanda: "Cosa sono le regole fuzzy?"

Sono rappresentazioni di inferenze logiche fatte su composizioni di proposizioni fuzzy, nella forma $(X \text{ è } LX)$, dove X è una variabile detta "variabile linguistica" in quanto assume come valori i nomi di insiemi fuzzy, e LX è l'etichetta che denota un insieme fuzzy

definito per quella variabile. Sono costituite da un antecedente, da cui viene ricavato, per inferenza fuzzy, il valore di verità di un conseguente. Anche se antecedenti e conseguenti, in linea di principio, possono essere composti da una qualunque combinazione di proposizioni fuzzy, nella stragrande maggioranza delle applicazioni ci si limita ad avere regole in cui gli antecedenti sono in congiunzione tra di loro e i conseguenti pure. Si avranno, quindi, delle regole nella forma:

if (X is LX) **and** (Y is LY) **and** ... **and** (Z is LZ)
then (U is LU) **and** ... **and** (V is LV)

Per esempio, si può avere una regola che dice che "se la temperatura è alta e la pressione è alta, allora la quantità di gasolio da fornire al bruciatore dell'impianto deve essere ridotta di molto". Questo permetterà di ricavare il valore dell'uscita a partire dai valori degli ingressi rilevati, cioè di effettuare un'inferenza fuzzy, come si vedrà nell'esempio presentato nella prossima sezione.

4. UN ESEMPIO DI FUNZIONAMENTO DELLE REGOLE FUZZY

Nella figura 4, sono rappresentate due variabili linguistiche A e B , definite su un insieme di sette valori ciascuna. I valori sono insiemi fuzzy, definiti da funzioni di appartenenza le cui etichette indicano rispettivamente Negativo grande, Negativo medio, Negativo piccolo, Zero, Positivo piccolo, Positivo medio e Positivo grande. Si noti che questi insiemi sono definiti su un asse di valori reali corrispondenti a due variabili reali associate alle variabili linguistiche: grazie all'interpretazione dei valori reali in termini di insiemi fuzzy si potrà usare l'insieme di regole fuzzy per mappare valori reali su valori reali, attraverso un modello espresso in termini linguistici. Si noti, inoltre, che le funzioni di appartenenza hanno tutte la stessa forma e che si distribuiscono uniformemente sull'intervallo di definizione delle variabili reali associate. Questa è una scelta di progetto comune, che tra l'altro ottimizza la resistenza del modello al rumore, ma non è affatto obbligato-

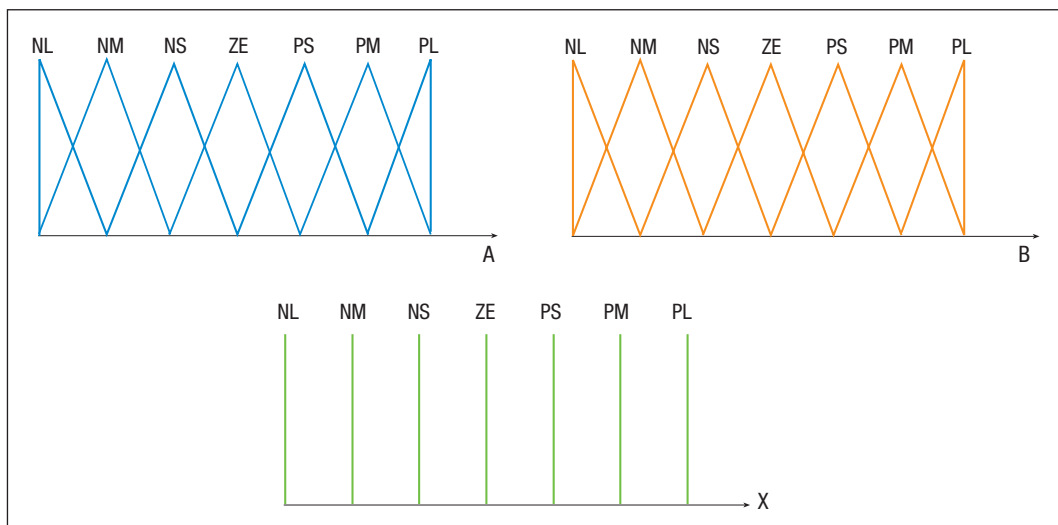


FIGURA 4
Le variabili nelle regole fuzzy dell'esempio

ria: il progettista può definire le forme che più sono adatte a rappresentare i concetti coinvolti e distribuirle a piacere sull'intervallo di definizione. Esistono anche molti strumenti di ottimizzazione o di apprendimento automatico del numero, della forma e della distribuzione delle funzioni di appartenenza, che si occupano di ottenere prestazioni ottimali lavorando sui dati a disposizione e sollevando il progettista da un compito altrimenti oneroso.

Nella figura 4, si ha anche un'altra variabile linguistica, usata per l'uscita, che assume valori su un insieme di insiemi fuzzy con una forma particolare. Si tratta di insiemi fuzzy contenenti un solo elemento ciascuno, senza ulteriori frontiere ("singleton" o "singoletti"). L'uso di questo tipo di valori fuzzy per i conseguenti di regole fuzzy è pratica comune nel controllo fuzzy e non inficia particolarmente la qualità del modello, semplificandone, invece, la computazione che, spesso, nel caso del controllo, è fatta su *microchip* di bassissimo costo e complessità.

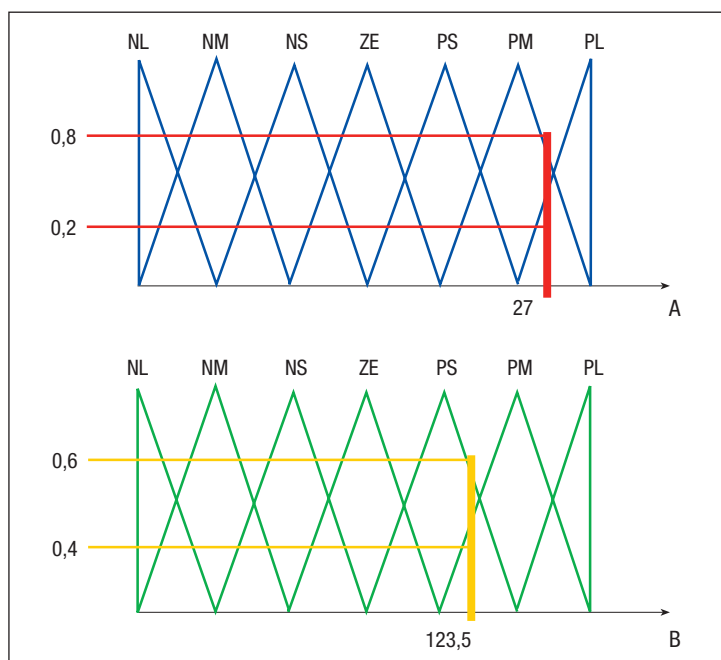
Le regole che sono considerate nell'esempio che segue sono:

R1: **if** (A is PL) **and** (B is PS) **then** (X is PM)

R2: **if** (A is PM) **and** (B is PS) **then** (X is PS)

R3: **if** (A is PL) **and** (B is PM) **then** (X is PM)

Si noti come vengono usate queste regole in una tipica applicazione di controllo in cui gli ingressi numerici vengono interpretati in ter-



mini fuzzy, attivano le regole fuzzy che generano uscite fuzzy che vengono alla fine riportate in termini numerici per essere trasmesse agli attuatori. In altri termini, il controllore fuzzy mappa ingressi reali in uscite reali attraverso un modello linguistico.

FIGURA 5
Passo 1:
fuzzyficazione

PASSO 1 FUZZYFICAZIONE (MATCHING)

I valori reali in ingresso vengono interpretati in termini di fuzzy set (Figura 5). Per la variabile A, il valore in ingresso è appartenente all'insieme PL con grado 0,2 e all'insieme PM con grado 0,8. Per la variabile B, il valore in ingresso è PM con grado 0,4 e PS con grado 0,6.

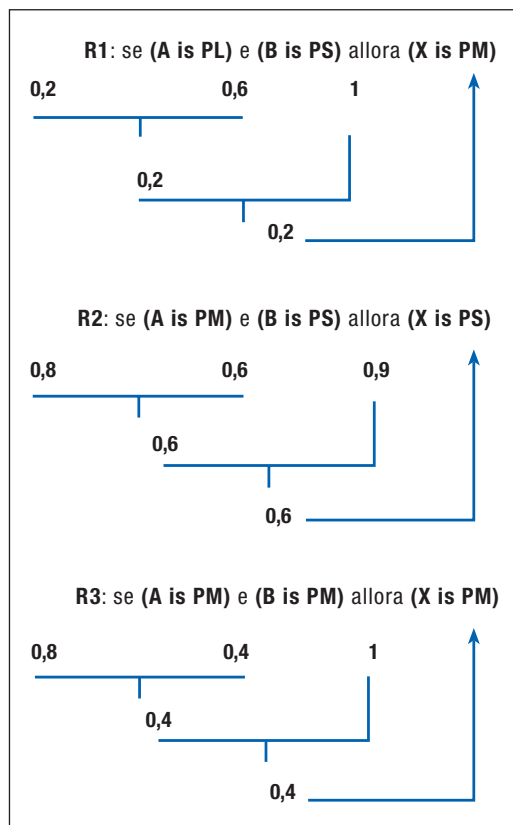


FIGURA 6
Passi 2 e 3:
combinazione
dei valori
nell'antecedente
e trasmissione
del valore
al conseguente

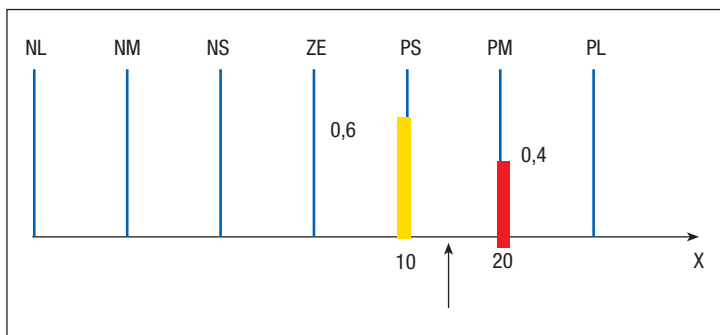


FIGURA 7 **PASSO 2 COMBINAZIONE DEI VALORI NELL'ANTECEDENTE**
Defuzzyficazione

I valori delle diverse clausole nell'antecedente vengono combinati con l'operatore "and" (congiunzione) per ottenere il valore complessivo dell'antecedente, che indica in sostanza quanto le condizioni di attivazione della regola sono ben rappresentative dei valori di ingresso al sistema. L'operatore utilizzato è qui il minimo e i risultati sono riportati in figura 6.

PASSO 3 TRASMISSIONE DEL VALORE AL CONSEGUENTE

Ottenuto il valore dell'antecedente, occorre trasmetterlo al conseguente. In generale, è possibile associare un valore alle regole che ne indichi l'importanza. È il numero che in fi-

gura 6 è riportato sotto al termine "then". Questo viene combinato con il valore dell'antecedente, ancora una volta con un operatore che, anche qui, sarà il minimo. Il valore così ottenuto passa al conseguente. Il significato dell'operazione è il seguente: il conseguente ha un peso che dipende da quanto la regola è adeguata per rappresentare una certa situazione definita dagli ingressi e da quanto è importante in generale. Nell'esempio in questione, pur essendo presente una regola con valore di importanza diverso da 1, questo non ha avuto alcun effetto in quanto la combinazione degli antecedenti era già più piccola, e l'operatore utilizzato (il minimo) seleziona il valore più piccolo.

PASSO 4 COMBINAZIONE DEI VALORI DEI CONSEGUENTI

Come si può notare anche in questo semplice esempio, può darsi che ci siano diverse regole che hanno lo stesso conseguente ma antecedenti diversi. Questo può provocare il fatto che i conseguenti siano associati a pesi diversi. Occorre aggregare i diversi pesi calcolati ottenuti per ogni conseguente e questo viene fatto con un operatore, nell'esempio, il massimo. Il risultato finale dell'inferenza fuzzy risulta così essere:

(X is PM) con grado 0,4

(X is PS) con grado 0,6

PASSO 5 DEFUZZYFICAZIONE

Il processo inferenziale è terminato, ma ci si può riportare a un valore numerico per la variabile di uscita associata alla variabile linguistica presente nel conseguente. Questo è quanto fatto, ad esempio, nel controllo fuzzy. L'operazione si chiama *defuzzyficazione* ed è effettuata con un operatore scelto in una vasta classe. In questo esempio, viene scelta la semplice media pesata, o baricentro, ottenendo il valore riportato nella figura 7 e calcolato come:

$$(10 \cdot 0,6 + 20 \cdot 0,4) / (0,6 + 0,4) = 14$$

Per riassumere e focalizzare quanto presentato nell'esempio, si può supporre che A rappresenti un errore di temperatura e B un errore di pressione in un processo industriale e che X sia una variabile di controllo, per esem-

pio la quantità di acqua di raffreddamento per il processo, rispetto a un riferimento. Sono state utilizzate delle regole che stabilivano relazioni tra queste grandezze, ad esempio R1: “Se l’errore di temperatura è positivo ed elevato, e l’errore di pressione è positivo e piccolo, allora la quantità di acqua di raffreddamento è positiva e media rispetto al valore di riferimento”. Applicando queste regole agli errori di temperatura e pressione introdotti nel sistema come numeri reali, si è ottenuto un valore finale della portata che è a sua volta scelto nell’insieme dei reali. È stato, cioè, utilizzato un modello simbolico, costituito da termini linguistici e regole per calcolare una relazione tra ingressi e uscite reali.

5. I MODELLI FUZZY

Un insieme di regole fuzzy costituisce un modello, espresso in termini linguistici, che mette in relazione ingressi e uscite. Si è appena visto che ingressi e uscite possono essere numeri reali e che, quindi, il modello è, in linea di principio, applicabile anche laddove vengono applicati modelli matematici. Inoltre, come si è visto, il modello esprime in maniera precisa dei concetti qualitativi. Non si tratta, quindi, come a volte capita di sentire da chi non conosce questi sistemi, di un modello “raffazzonato” o “definito malamente”; si tratta, invece, di un modello definito in maniera formale, precisa, in termini di relazioni matematiche tra funzioni matematiche, le funzioni di appartenenza. In generale, è un modello non lineare, che ha numerose proprietà interessanti, tra cui una buona robustezza al rumore, e la possibilità di definire l’uscita desiderata in maniera ottimale per ogni valore degli ingressi. Si veda, per esempio, una tipica superficie di controllo in figura 8: in ascisse e ordinate rispettivamente errore e derivata dell’errore di uno degli assi del braccio e sull’asse z l’azione di controllo. Si vedrà più avanti come queste proprietà ne facciano un ottimo strumento per controllare sistemi complessi, difficilmente identificabili in modo sufficientemente preciso in termini matematici.

Proprio queste proprietà hanno portato al successo il controllo fuzzy, che ha conosciuto negli anni ’80 un vero *boom* in Giap-

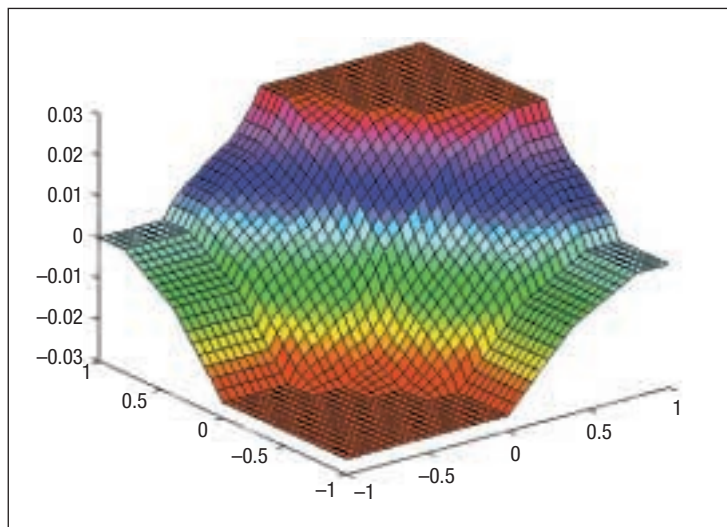


FIGURA 8

Una superficie di controllo fuzzy per un braccio robotizzato

pone, si dice per la maggior similitudine del modello con il modo di pensare dei giapponesi, rispetto ai modelli matematici. In quegli anni, furono realizzati controlli fuzzy di treni, di elicotteri, di impianti industriali e anche di oggetti di uso comune come aspirapolvere, macchine fotografiche, lavatrici e perfino mini-forni a vapore per cuocere il riso (*rice-cookies*).

Negli anni ’80 un altro pioniere dei sistemi fuzzy, il giapponese Michio Sugeno, aveva definito un nuovo tipo di regole fuzzy aprendo ulteriori possibilità di modellizzazione [4]. Queste regole hanno antecedenti del tutto analoghi a quelli delle regole di Mamdani, permettendo di definire con termini linguistici le situazioni in cui vengono attivate. Il conseguente è, invece, un modello, espresso in termini dei valori (crisp) degli ingressi. Per esempio:

if (A is LA) and (B is LB) and... then U is f (A, B)

con $f(A, B) = a + bA + cB$

dove a, b e c sono costanti, mentre A e B sono i valori numerici delle variabili associate ad A e B all’ingresso. In questo esempio, il modello che compare nel conseguente della regola è un semplice modello lineare, ma negli anni successivi sono stati introdotti come conseguenti modelli di ogni tipo, da polinomi a reti neurali. Questo tipo di regole, in altri termini, permette di definire in termini linguistici le condizioni in cui appli-

care un modello. Inoltre, dato che le condizioni sono fuzzy, è possibile combinare le uscite dei modelli presenti nelle diverse regole con gli operatori di combinazione visti sopra, ottenendo così una variazione graduale (*smooth*) nell'intervallo tra l'applicazione di un modello e l'applicazione di un altro. L'utilizzo di queste regole non solo ha introdotto nuove possibilità di modellizzazione, ma ha anche permesso di provare delle proprietà importanti per sistemi fuzzy, quali, ad esempio, la stabilità del controllore.

Il boom del controllo fuzzy in Giappone ha portato questa tecnologia all'attenzione di tutto il mondo e le applicazioni sviluppate sono aumentate enormemente negli anni facendo entrare di forza la tecnologia fuzzy nel bagaglio di base dell'ingegnere e del modellista.

6. NON SOLO CONTROLLO

Modelli fuzzy sono usati non solo per il controllo, ma anche in tutti quei settori dove è necessario definire modelli robusti sia a partire da informazioni qualitative, sia a partire da dati, utilizzando magari sistemi di sintesi automatica del modello.

Tra i molteplici settori applicativi se ne citano, nel seguito, solo alcuni.

Rappresentazione dell'incertezza e modelli di conoscenza. Le teorie fuzzy sono state usate per definire una pletora di modelli e misure per la rappresentazione dell'incertezza [1] (possibilità e necessità, plausibilità e credenza e molte altre), usati nei settori più disparati, anche laddove le teorie probabilistiche non possono essere applicate. Basandosi su misure di incertezza si possono, inoltre, definire modelli di conoscenza in cui si tenga conto dell'incertezza nei dati e nel modello stesso. Questo permette di presentare come uscita del modello risultati con pesi diversi, invece di dover per forza giungere a un unico risultato nel tentativo di eliminare ogni contraddizione. Si pensi, ad esempio, a un sistema di diagnosi, in cui i dati siano affetti da incertezza o anche solo approssimati, come potrebbe essere nella diagnosi medica, ma anche nella diagnosi industriale di sistemi

in condizione critica (come un impianto in fase di avviamento). È certamente preferibile ottenere una serie di possibili diagnosi pesate da un opportuno indicatore di plausibilità, piuttosto che una sola diagnosi che potrebbe non essere quella corretta a causa di errori nelle rilevazioni.

Sistemi di supporto alle decisioni. Spesso un decisore deve prendere decisioni basandosi su informazioni qualitative derivate da osservazioni personali. In altri casi, si basa su valutazioni sintetiche ricavate da masse di dati, magari con un processo automatico di data *mining*. Gli insiemi fuzzy ben si prestano a caratterizzare entrambi i tipi di informazione, permettendo di esplicitare modelli altrimenti taciti. Si pensi, per esempio, a una decisione di marketing strategico in cui il decisore pensa in termini di alta o bassa ricettività del mercato, alto o basso rapporto prezzo/costo di produzione ecc. In questi casi, i dati numerici possono essere interpretati e aggregati in maniera fuzzy e un sistema di supporto alle decisioni può presentare risultati emulando il ragionamento del decisore, opportunamente codificato in un sistema fuzzy.

Sistemi di information retrieval. Nella ricerca di informazioni in documenti e in rete è interessante poter esprimere richieste "soft", magari associate a indicatori linguistici o numerici relativi all'importanza data ai vari termini. I motori di ricerca combinano con operatori fuzzy questi indicatori e le caratterizzazioni fuzzy delle richieste, con altri indicatori risultanti dall'operazione di ricerca e possono così fornire delle risposte che soddisfano l'utente. Si possono, così, esprimere richieste del tipo: "Vorrei indicazioni sui prezzi delle auto veloci e con bassi consumi apparse sul mercato negli ultimi tempi". Un'analoga richiesta trattata con sistemi basati sul concetto di intervallo richiede una definizione rigida dei concetti "veloce", "basso" "ultimi tempi", introducendo la possibilità di esclusione di risultati interessanti che con un sistema fuzzy sarebbero, comunque, tenuti in considerazione, con gli opportuni pesi.

Sistemi di interpretazione del segnale. Anche in questo caso, si tratta di modelli che permettono di valutare caratteristiche del



segnale. Ad esempio, si può avere un sistema di visione in cui vengono riconosciuti oggetti per il loro colore. Il colore è, generalmente, rappresentato da una tripletta di valori numerici. Anche qui, è possibile definire gli insiemi fuzzy su queste variabili che identificano il colore desiderato. Altre caratteristiche di segnali possono essere identificate in termini fuzzy per portare a una classificazione degli stessi. Ad esempio, si potrebbe dire che “se la frequenza del segnale è alta, e i picchi sono elevati, ma irregolari, allora il segnale corrisponde a una situazione non critica”.

Sistemi di previsione di serie storiche. In questo caso, una delle modalità di applicazione di sistemi fuzzy consiste nel rappresentare in termini fuzzy particolari caratteristiche degli andamenti della serie storica (per esempio, l'andamento delle quotazioni di mercato di un bene) e nell'associarvi dei modelli previsionali, magari ricavati con sistemi automatici quali reti neurali.

7. APPLICAZIONI FUZZY

Vengono presentate, ora, più in dettaglio, alcune applicazioni paradigmatiche che permetteranno di capire le potenzialità di questa tecnologia, non solo nel settore del controllo, ma anche in quello dell'*information retrieval*, dei sistemi di supporto alle decisioni e nella modellistica in generale.

7.1. Controllo della frenata di un treno di una metropolitana e del volo di un elicottero: un'azione di controllo per ogni situazione

Esistono situazioni in cui il sistema da controllare ha configurazioni e caratteristiche diverse nel tempo. È, quindi, necessario definire un sistema di controllo per ogni condizione di esercizio. Se queste cambiano continuamente e se il cambiamento non è direttamente misurabile, è possibile definire un insieme di regole fuzzy, ognuna in grado di coprire una particolare situazione. La combinazione delle regole fuzzy permette di avere un controllo che varia in continuità al variare delle variabili di ingresso. Per questi motivi, il controllo della frenata del treno della metropolitana di Sendai, in Giappone, fu realizzato negli anni '80 con tecniche

fuzzy. Il treno era in grado di frenare in maniera precisa e molto morbida qualunque fosse il carico di passeggeri. Ne risultò un maggior *comfort* per i passeggeri e un risparmio notevole di energia, rispetto alla frenata realizzata da operatori umani.

Un altro esempio è il controllo di un mini elicottero, effettuato da Sugeno sempre negli anni '80. L'elicottero era in grado di eseguire comandi vocali con buona precisione, pur sottoposto a raffiche di vento non costanti, che cambiavano di continuo le condizioni operative.

7.2. Controllo di una lavabiancheria: controllo efficace a basso costo su beni di largo consumo

Grazie alla possibilità di realizzare controllori fuzzy su *chip* a bassissimo costo e alla loro buona robustezza nei confronti di segnali di cattiva qualità provenienti da sensori a basso costo, sistemi fuzzy sono stati usati per rendere più semplice l'utilizzo di beni di consumo quali lavatrici, aspirapolvere, condizionatori, telecamere, automobili, frullini ecc. Così, si hanno sul mercato lavatrici (anche di produttori italiani, divenuti *leader* di questa tecnologia) in grado di capire autonomamente che tipo di panni stanno lavando e di adeguare di conseguenza il ciclo di lavaggio, tra l'altro sciacquando solo finché è necessario, con notevoli risparmi di acqua ed energia. Si hanno aspirapolvere in grado di ridurre la potenza del motore quando sono puntate contro delle tende, e aumentarla sul pavimento. Si hanno telecamere in grado di mantenere a fuoco oggetti in movimento e di ridurre le accidentali vibrazioni della mano.

A titolo d'esempio, si veda come una lavatrice, a un costo bassissimo e compatibile con le esigenze di mercato, può capire che tipo di panni deve lavare. Ogni lavatrice carica acqua finché un semplice interruttore pneumatico (pressostato) non viene attivato dalla pressione stessa dell'acqua nella vasca. Quando l'acqua entra nella vasca viene assorbita dai panni con un tempo di solito superiore a quello di attivazione del pressostato, e diverso a seconda del tipo di tessuto usato. Dopo un certo tempo, si ha, quindi, una diminuzione della quantità d'acqua

nella vasca a spese dell'acqua assorbita dal tessuto. Il pressostato scatta e l'acqua riprende a entrare. Misurando i tempi e la quantità di attivazioni del pressostato si può ottenere, senza sensori aggiuntivi, una caratterizzazione del tipo di panni immesso, che viene usata per adattare il programma di lavaggio, ottimizzandolo e risparmiando all'operatore umano l'onere della scelta del programma.

Anche la regolazione della quantità di risciacqui può essere fatta a costo bassissimo. L'acqua nella vasca costituisce un dielettrico per un condensatore le cui armature sono la vasca e un elemento metallico isolato da essa. L'acqua ha caratteristiche dielettriche diverse a seconda che contenga o meno sapone. Viene così misurato il tempo di carica del condensatore-lavatrice con l'acqua al termine del lavaggio e si continua a sciacquare fino a quando questo tempo non è qualitativamente vicino al tempo di carica misurato all'entrata dell'acqua fresca all'inizio del lavaggio.

In entrambi questi casi, il modello è qualitativo e affetto da rumore: si presta, dunque, bene a essere realizzato con regole fuzzy.

FIGURA 9

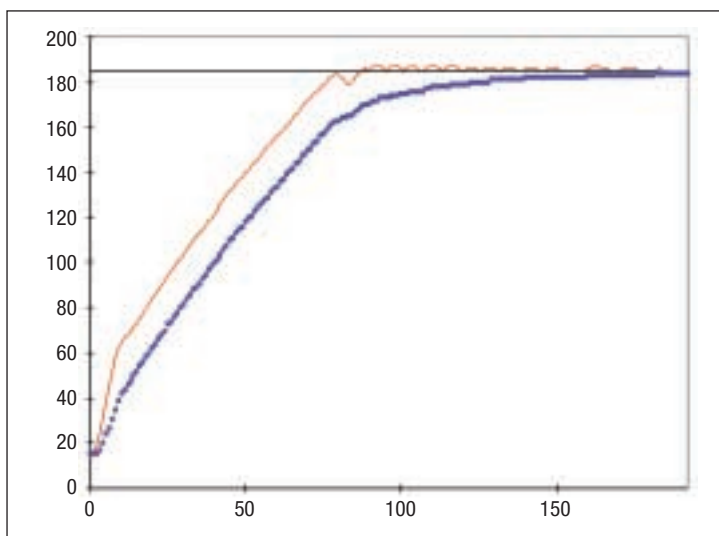
Andamento delle curve di riscaldamento per il forno di invecchiamento di trafilati di alluminio

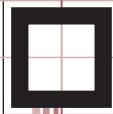
7.3. Controllo di un impianto industriale: modello matematico difficile da identificare

Esistono impianti industriali il cui modello matematico è difficile da definire o da identificare con precisione, come per esempio, reattori chimici come quello oggetto del primo controllo fuzzy industriale citato all'ini-

zio, laminatoi, forni ecc. In questi casi, in genere, ci sono operatori umani in grado di governare l'impianto manualmente utilizzando regole qualitative basate sull'esperienza. Il controllore fuzzy può sostituirli, o affiancarli, catturandone e rendendone esplicita l'esperienza.

Anche qui si veda un esempio in dettaglio. Si tratta di un forno per l'invecchiamento di alluminio, in cui bisogna portare un carico di trafilati di alluminio a una temperatura di stabilizzazione, possibilmente senza introdurre gradienti termici tra i due estremi dei trafilati, e senza produrre sovrariscaldamenti eccessivi. Il tutto nel più breve tempo possibile. In questa applicazione, il forno ad aria forzata era controllato considerando le temperature dell'aria all'ingresso e all'uscita del carico. Nell'azienda si avevano più di 10.000 tipi diversi di trafilati con diverse caratteristiche di assorbimento termico e non si voleva appesantire le operazioni di carico e scarico con procedure che indicassero il tipo di carico effettuato. In questo caso, è stato realizzato un controllo fuzzy che cattura una logica semplice e applicabile a qualunque tipo di carico, al quale il comportamento del controllore si adatta naturalmente. Espressa a parole la logica suona così: "Finché la differenza di temperatura tra ingresso e uscita dell'aria (ΔT) è contenuta entro i limiti desiderati, si scaldi con la massima intensità. Se il limite di ΔT è raggiunto si tenga quell'intensità nel riscaldamento. Se la temperatura in ingresso è vicina alla temperatura obiettivo si mantenga la temperatura obiettivo". Con un insieme di meno di 10 regole si è così ottenuto un controllo efficace, in grado di rispondere, come desiderato, ai diversi carichi. Un esempio di andamento del riscaldamento è riportato in figura 9, dove si ha la curva rappresentante la temperatura dell'aria calda in ingresso, sempre superiore a quella rappresentante la temperatura dell'aria in uscita dai trafilati. Si noti come si tratti di curve che sarebbero difficilmente rappresentabili con una funzione matematica, la quale eventualmente avrebbe un'espressività molto minore delle poche regole linguistiche menzionate, e una difficoltà di identificazione e manutenzione molto maggiori. Inoltre, la curva dovrebbe essere diversa per





ogni tipo di carico e questo richiederebbe l'identificazione di parametri in linea di principio difficili da identificare.

7.4. Sistema di controllo di qualità: dati rilevati da operatori in modo qualitativo

Nel controllo di qualità il prodotto viene sottoposto a un'analisi per verificarne caratteristiche salienti ed eventualmente intervenire sulla regolazione dell'impianto per ottenere il prodotto con la qualità desiderata. In molti casi, le misure sono fatte da operatori che danno delle valutazioni qualitative delle caratteristiche in gioco. Si pensi, ad esempio, alla valutazione della birra (colore, tipo e quantità di bolle, amarezza ecc.). Questi operatori possono fornire un'indicazione fuzzy a un sistema esperto basato su regole fuzzy che possa suggerire il tipo di intervento da fare sull'impianto.

In altri casi, giudizi qualitativi su aspetti specifici possono essere aggregati con operatori fuzzy per fornire indicazioni globali in maniera formalmente corretta. Per esempio, sono stati proposti dei sistemi di valutazione semi-automatica di siti *web*, in cui i criteri di valutazione si basano in parte su misure obiettive rilevate automaticamente (lunghezza della pagina, numero di *link* ecc.) e in parte su valutazioni fornite da operatori. Le caratteristiche considerate vengono poi composte con operatori fuzzy e generano indicatori globali di valutazione.

Un caso che rientra ancora in questa categoria è quello del sistema di valutazione del personale all'assunzione, sviluppato per una delle più grandi aziende italiane. Anche qui, le valutazioni qualitative vengono aggregate con operatori fuzzy a informazioni numeriche fuzzyficate. Uno dei maggiori ritorni rilevati con l'adozione di questo sistema è la possibilità di rendere esplicito, uniforme e obiettivo il processo di valutazione.

7.5. Controllo di una squadra di robot autonomi: modello linguistico dell'ambiente ottenuto da dati sensoriali imprecisi e affetti da incertezza

In questo caso, si ha una squadra di robot autonomi che deve svolgere un compito, ad esempio giocare una partita di calcio robotico, come avviene, dal 1997, nella competi-

zione internazionale *Robocup*. Ogni robot si costruisce un modello del mondo sulla base dei dati sensoriali che riceve. Il sistema di controllo comportamentale del robot è in grado di scegliere tra diversi comportamenti ("porta la palla in porta", "passa", "chiudi l'avversario" ecc.) basandosi su una valutazione in termini di predicati fuzzy della situazione in cui si trova ("palla avanti", "avversario lontano" ecc.). Anche il meccanismo di coordinamento della squadra e di scelta delle strategie è basato su analoghi strumenti, e può essere realizzato da strategie umani con relativa facilità. L'applicazione può sembrare ludica, ma è di notevolissima complessità, e l'adozione di modelli fuzzy permette di affrontarla con regole di buon senso.

8. COME SI FANNO I SISTEMI FUZZY?

La realizzazione di sistemi fuzzy è supportata da strumenti a diversi livelli.

Esistono numerosi sistemi di sviluppo per sistemi di controllo fuzzy, caratterizzati da regole che classificano un ingresso numerico e forniscono un'uscita fuzzy tradotta poi in termini numerici. Il supporto consiste nella possibilità di utilizzare forme predefinite e parametrizzate di funzioni di appartenenza, nella definizione di regole e nella visualizzazione dei valori ottenuti dal sistema fuzzy in tutto l'intervallo dei valori di ingresso. Alcuni di questi sistemi di supporto forniscono anche un'interfaccia di ottimizzazione che, tramite l'applicazione di reti neurali ai dati del problema, è in grado di suggerire la posizione e il numero ottimale di funzioni di appartenenza, cioè di effettuare autonomamente la parametrizzazione del sistema.

Controllori fuzzy vengono realizzati sia su PC (*Personal Computer*), sia sui microcontrollori usati per applicazioni tradizionali, sia su microcontrollori progettati e prodotti per ottimizzare le operazioni fuzzy necessarie a ottenere l'uscita. Il costo di questi chip è compatibile con i costi sopportabili per la loro adozione in prodotti normalmente con bassi margini di guadagno, quali i beni di consumo.

Sistemi di supporto alle decisioni e modelli più articolati possono essere invece realizzati con sistemi di sviluppo *ad hoc*, facilmente integrabili nei sistemi informativi in cui devono operare.

9. CONCLUSIONI

In conclusione, è possibile affermare che i sistemi fuzzy hanno ormai da tempo raggiunto una maturità tale che li rende un ottimo strumento per una larga quantità di applicazioni. La loro diffusione è ancora, in parte, ostacolata da una loro scarsa conoscenza e da una ingiustificata diffidenza nei confronti di uno strumento così semplice e potente. Con la diffusione della conoscenza sulla loro struttura e funzionamento, un nu-

mero sempre maggiore di applicazioni viene affrontato, in un numero sempre più grande di settori applicativi.

Bibliografia

- [1] Klir GJ, Yuan B: *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.
- [2] Mamdani EH, Assilian S: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-machine Studies*, Vol. 7, 1975, p. 1-13.
- [3] Sugeno M: *Industrial Applications of Fuzzy Control*. Elsevier, Amsterdam, NL, 1985.
- [4] Zadeh LA: Fuzzy sets. *Information and Control*, Vol. 8, 1965, p. 338-353.

ANDREA BONARINI è professore associato presso il Politecnico di Milano e coordina dal 1984 il locale Laboratorio di Intelligenza Artificiale e Robotica. I suoi interessi di ricerca riguardano: sistemi fuzzy, sistemi di apprendimento per rinforzo e sviluppo di robot mobili autonomi di servizio, e di intrattenimento (Robocup – calcio robotico).
Andrea.Bonarini@polimi.it