

Controlli intelligenti

Sistemi ibridi

Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse nei confronti dei sistemi ibridi (HS-Hybrid System), nei quali le dinamiche tempo-continue, descritte da equazioni differenziali, interagiscono con le dinamiche discrete e le regole logiche, descritte da macchine a stati finiti, eventi discreti e costrutti condizionali. Per esempio, un tipico processo produttivo industriale è composto dagli eventi discreti corrispondenti al passaggio delle parti da una macchina all'altra e dalla dinamica continua dei processi di lavorazione in ciascuna macchina. I sistemi ibridi permettono di affrontare in maniera sistematica l'analisi, la simulazione, la sintesi e l'ottimizzazione di sistemi fisici regolati da controllori digitali. In un sistema ibrido di controllo a reazione, il controllore è un algoritmo di pianificazione discreta che osserva il sistema continuo e, in linea e in maniera automatica, prende le decisioni necessarie a far rispettare le specifiche e i vincoli.

Proprio perché nascono dall'interazione tra processi continui e algoritmi discreti di pianificazione, i sistemi ibridi forniscono l'infrastruttura necessaria per analizzare e progettare i sistemi intelligenti. Per comprendere appieno il comportamento di un sistema ibrido è neces-



Quella del 'controllo intelligente' è una delle metodologie di controllo di più recente introduzione in ambito industriale

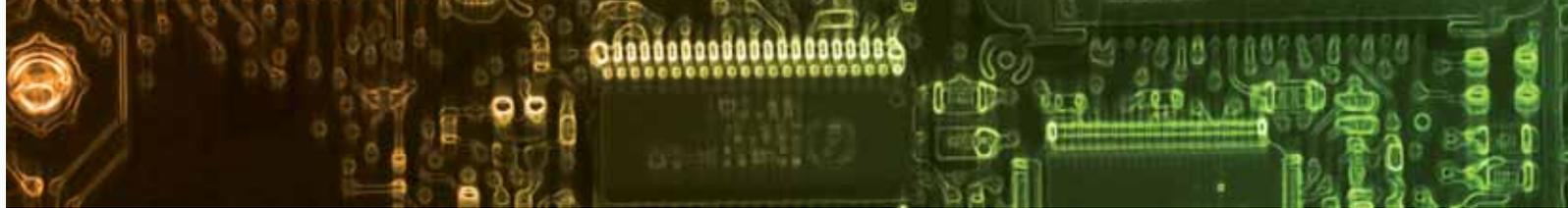
Fonte: www.freight-calculator.com

I sistemi di controllo industriale hanno subito negli anni un'evoluzione parallela a quella degli impianti produttivi che sono chiamati a governare. La richiesta di crescente competitività dettata da esigenze di mercato ha motivato lo sviluppo di metodologie di controllo, che si sono spinte ben oltre i limiti di controllo classico. I controllori di nuova generazione devono gestire applicazioni sempre più complesse, facendo fronte a richieste pressanti di ottimizzazione delle risorse e garantendo un'elevata flessibilità di riconfigurazione. Per migliorare le prestazioni e la stabilità sono stati proposti nel corso degli anni diversi approcci, tra cui il controllo ottimo lineare quadratico, il controllo robusto e diverse tecniche predittive e adattative. Nonostante molte di queste tecniche abbiano raggiunto la maturità da anni, quantomeno per le applicazioni più comuni che si riscontrano nell'industria, esistono svariati ambiti in cui è necessario ricorrere a soluzioni di nuovo tipo. Quella del controllo 'intelligente' è una delle metodologie di più recente applicazione in campo industriale. I sistemi intelligenti utilizzano agenti razionali e metodi euristici per simulare il ragionamento umano e aggirare il problema della complessità computazionale che affligge i sistemi più complessi.

sario considerare l'interazione tra le sue due 'anime' e non limitarsi, come in passato, a studiarle separatamente. Il problema è che le dinamiche ibride sono spesso così complesse che un controllore in retroazione soddisfacente non può essere sintetizzato usando strumenti analitici, come accade per i sistemi lineari o per certe classi di sistemi non lineari. È tuttavia spesso possibile simularne numericamente il comportamento al calcolatore ricorrendo a opportuni applicativi software: i moduli Statchart e Control Design and Simulation di Labview, per esempio, permettono di rappresentare i sistemi discreti e i sistemi fisici di un sistema ibrido.

Sistemi intelligenti

Il controllo classico e il controllo cosiddetto 'moderno' (nome oggi fuorviante, dato che fa capo a tecniche sviluppate e consolidate decenni or sono) offrono un'ampia scelta di tecniche di analisi e sintesi di provata efficacia. La maggior parte di questi potenti strumenti, tuttavia, si applica a sistemi lineari e lineari a tratti, oppure a sistemi non lineari per i quali il modello del sistema sia noto a priori. Tuttavia, per i sistemi dotati di forti non linearità, non è sempre possibile ottenere a priori un modello



accurato del processo da controllare utilizzando tecniche tradizionali, men che meno è fattibile ricavarlo direttamente in linea. È il caso dei processi chimici e fisici che intervengono in numerose applicazioni industriali, in particolare nel settore chimico. Quello che succede nei reattori, nelle colonne di distillazione e nelle torri di essiccazione, quando si utilizzano miscele non ideali, è difficilmente esprimibile ricorrendo a un modello analitico. Quando è impossibile o impraticabile ottenere modelli accurati partendo da principi primi, il ricorso ai cosiddetti sistemi di controllo intelligenti (IC - Intelligent Control) permette di affrontare il problema sotto un'altra luce. Basato su una combinazione di ricerca operativa, teoria del controllo e intelligenza artificiale, il controllo intelligente gestisce il sistema prendendo autonomamente decisioni basate sull'esperienza che ha maturato nei confronti del processo da controllare. In maniera analoga a quanto fa un essere umano, il controllore intelligente è in grado di imparare dall'esperienza, per migliorare le proprie prestazioni. I processi cognitivi vengono implementati con diverse metodologie di 'soft computing', che si differenziano dalle tradizionali tecniche del controllo analitico per la capacità di imparare dall'esperienza, la facoltà di estendere le deduzioni anche a domini nei quali non si ha esperienza diretta e la propensione a essere implementati su architetture di calcolo parallelo, che simulano i processi biologici e permettono di effettuare associazioni più rapide delle tradizionali architetture di elaborazione. Le principali tecniche di IC per la simulazione di comportamenti biologici volti alla risoluzione di problemi sono tre: sistemi in logica fuzzy (logica 'sfumata'), reti neurali artificiali (ANN - Artificial Neural Network) e metodi evolutivi.

Logica fuzzy

I sistemi di controllo in logica fuzzy (FLC - Fuzzy Logic Control) sono basati su regole esprimibili in termini linguistici, che non richiedono la conoscenza precisa della dinamica del sistema da controllare. La strategia di controllo, frutto dell'esperienza dell'operatore o di altro opportuno sistema automatico, è implementata sotto forma di regole espresse in costrutti condizionali del tipo 'if...then...;', applicate a variabili linguistiche che esprimono in maniera qualitativa le grandezze in gioco. L'obiettivo di un controllore fuzzy è quello di emulare il comportamento di un esperto umano, che, basandosi sulla percezione qualitativa delle variabili del processo e sulla propria esperienza, produce una decisione approssimata, che si traduce in un'azione definita (chiudere un interruttore o aprire una valvola). L'azione del controllo in logica sfumata si può ricondurre

a tre operazioni: fuzzificazione, inferenza in logica fuzzy (che si può appoggiare a una 'knowledge base') e defuzzificazione. I segnali d'ingresso provenienti dal sistema vengono convertiti in formato digitale e dati in pasto al modulo di fuzzificazione, che provvede a tradurli nelle rispettive variabili linguistiche 'approssimate' (come 'caldo', 'tiepido', 'freddo'). Si tratta di sottoinsiemi fuzzy descritti per mezzo di funzioni caratteristiche che esprimono il grado di appartenenza di una data misura a tale varia-

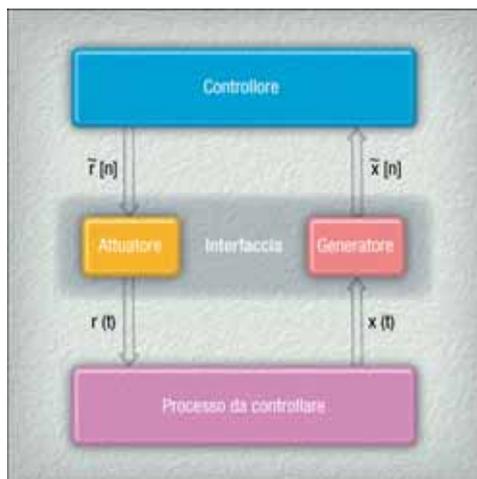


Fig. 1: Struttura gerarchica di un sistema ibrido in cui un'unità logica di controllo prende decisioni logiche per la regolazione di un processo sottostante. Il livello superiore, che rappresenta il sistema a eventi discreti, può utilizzare linguaggi descrittivi di diverso tipo, come reti di Petri, macchine agli stati finiti, logica fuzzy ecc.; il livello inferiore rappresenta il sistema fisico di tipo tempo-continuo; a collegarli è uno strato d'interfaccia che provvede a tradurre i segnali tra i due

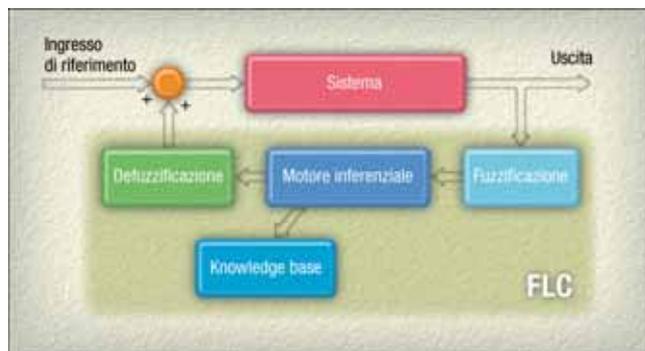


Fig. 2: I sistemi di controllo in logica fuzzy sono costituiti da un modulo di fuzzificazione, un motore inferenziale, che accetta regole fuzzy basate su variabili linguistiche, un modulo di defuzzificazione

bile. Le varie operazioni effettuate sulle variabili linguistiche corrispondono di fatto a ben precisi calcoli matematici con le corrispondenti funzioni di appartenenza. Il motore inferenziale accetta come antecedenti le variabili linguistiche degli ingressi e produce un'uscita fuzzy, che viene poi tradotta dal defuzzificatore in un valore numerico ben definito, che rappresenta il valore (dedotto con regole approssimative) dell'azione di controllo. La logica fuzzy può essere impiegata in tipologie di controllo evolute, come quello adattativo. In questo caso, il motore inferenziale in logica fuzzy può utilizzare la knowledge base per decidere in che modo alterare i parametri di un controllore classico. Il vantaggio di questo approccio è che permette di gestire sistemi con dinamiche non modellate, alterazioni dei parametri dell'impianto o disturbi, senza dover ricorrere a una trattazione analitica che, ammesso che sia disponibile, comporterebbe un'eccessiva complessità computazionale.

Reti neurali

Le reti neurali artificiali (ANN - Artificial Neural Networks) cercano di simulare il comportamento del cervello umano emu-

lando le reti neurali biologiche, viste come l'interconnessione di un gran numero di semplici elementi computazionali (i neuroni).

La rete risponde agli stimoli alterando le interconnessioni tra i neuroni che la costituiscono, in modo da stabilire associazioni tra i neuroni dello strato d'ingresso e dello strato di uscita. Nella modellazione matematica dei neuroni, il grado di connessione con gli altri neuroni è rappresentato da un coefficiente numerico (il peso sinaptico), che è tanto più elevato quanto maggiore è l'importanza di quello specifico collegamento. Un opportuno algoritmo di 'addestramento' fa sì che i pesi delle diverse connessioni sinaptiche siano scelti in maniera da raggiungere un determinato obiettivo, per esempio la minimizzazione di una particolare funzione. Una volta 'addestrata', la rete si comporta come un veloce calcolatore parallelo, in grado di rispondere in maniera 'appropriata' agli stimoli ricevuti durante l'addestramento e a stimoli analoghi. Le reti neurali artificiali sono in grado di riconoscere schemi, generalizzare informazioni, approssimare funzioni, filtrare segnali e classificare dati. La parallelizzazione che le caratterizza conferisce loro robustezza, resilienza e adattabilità a nuove condizioni ambientali. La flessibilità con cui le ANN si adattano a nuovi stimoli e a condizioni di forte incertezza, rende queste soluzioni molto appetibili nell'ottica del controllo intelligente, in particolare nel caso di impianti complessi o con dinamiche non modellate. L'applicazione tipica è quella in cui si conosce il comportamento desiderato dell'uscita dell'impianto e si desidera determinare la corrispondente uscita del controllore. L'addestramento può essere fatto semplicemente 'copiando' il comportamento di un

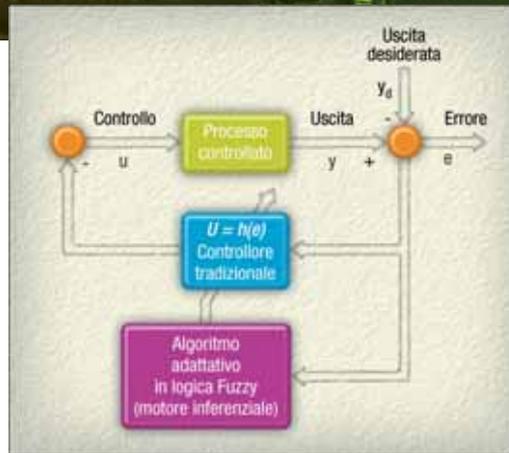


Fig. 3: La logica fuzzy può essere impiegata per realizzare sistemi di controllo adattativo, in cui i parametri di un controllore tradizionale vengono variati sulla base di regole espresse in forma approssimata, senza dover disporre di una modellizzazione esatta del sistema

Metodi evolutivi e algoritmi genetici

I metodi evolutivi sono sostanzialmente procedure di ottimizzazione che si basano su processi di tipo evolutivo, come la selezione naturale. Gli algoritmi genetici sono stati proposti per la prima volta negli anni '60 e sono rimasti a lungo in gestazione nel mondo della ricerca. Nell'ambito del controllo intelligente trovano applicazione come tecniche di ottimizzazione per la ricerca rapida di minimi e massimi di equazioni complesse o di soluzioni quasi-ottimali. L'idea di fondo è relativamente semplice: si generano nuove potenziali soluzioni al problema di ottimizzazione; si scelgono le migliori; le si riutilizzano per creare una nuova generazione di potenziali soluzioni, ripetendo il processo fino a raggiungere l'obiettivo prefissato.

Sistemi intelligenti ibridi

Le tecniche di controllo intelligente descritte in precedenza sono spesso utilizzate in congiunzione tra loro e con altre tecniche di controllo moderno, per ovviare alle limitazioni che affliggono le singole soluzioni separate. Nei sistemi intelligenti ibridi la logica

fuzzy è unita alle reti neurali, ai sistemi esperti o ai filtri di Kalman e le diverse componenti del sistema eterogeneo comunicano tra loro per produrre il risultato finale. Si trovano così sistemi intelligenti costituiti da sistemi fuzzy e reti neurali, sistemi fuzzy uniti ad algoritmi genetici e reti neurali unite ad algoritmi ge-

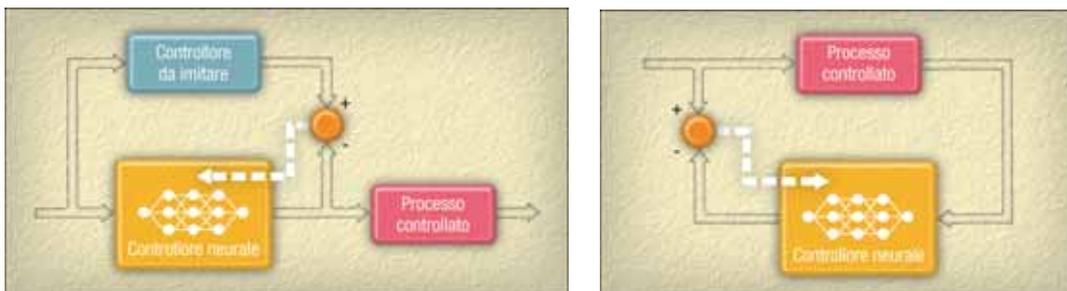


Fig. 4: Le reti neurali di un sistema di controllo intelligente possono essere addestrate in diversi modi, in particolare 'copiando' le uscite di un controllore esistente o utilizzando un modello inverso dell'impianto da controllare

controllore esistente, che potrebbe essere troppo poco efficiente rispetto a una ANN per svolgere correttamente il compito in tempo reale. Se si dispone di un modello inverso dell'impianto, è possibile addestrare la rete neurale artificiale in maniera tale che associ alla risposta desiderata dell'impianto il segnale di controllo che lo ha prodotto. In entrambi i casi, la scelta delle condizioni operative da usare per l'addestramento è un compito tutt'altro che banale, che viene spesso fatto per tentativi. Uno dei principali svantaggi delle reti neurali è rappresentato dalla durata dell'addestramento necessario a raggiungere un prefissato livello di prestazioni.

netici. Nel caso dei sistemi neuro-fuzzy, l'autoapprendimento delle reti neurali viene impiegato per trovare le funzioni caratteristiche e le regole fuzzy più appropriate da usare nel motore inferenziale del sistema di controllo in logica sfumata.

Si riesce così a ovviare a un problema comune dei sistemi di controllo fuzzy: non sempre l'operatore umano che dovrebbe 'istruire' il sistema può, o vuole fornire le regole adatte a gestire il processo. Per contro, le reti neurali, che hanno nell'autoapprendimento il loro punto forte, sono ostiche da decifrare e non offrono la chiarezza condivisa dai predicati linguistici della logica fuzzy.