TECNICHE DI CONTROLLO E DIAGNOSI

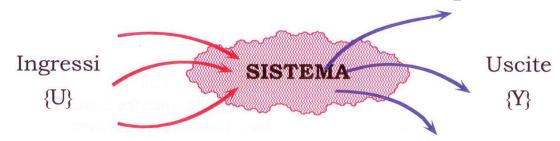
Modellistica e Controllo Fuzzy

Presenter: Silvio Simani
Col supporto del Dott. Ing. Marcello Bonfè

Ringraziamenti

Le dispense si ispirano al corso del Prof. Stefano Marsili-Libelli: "Introduzione ai Fuzzy Sets". Dipartimento di Sistemi e Informatica Facoltà di Ingegneria. Via S.Marta, 3. 50139 Firenze. Home page: http://dsi.ing.unifi.it/~marsili/

Modellistica Fuzzy



Un modello fuzzy consiste in un insieme di regole deduttive che legano gli ingressi e le uscite basandosi su predicati e connessioni "vaghi" (fuzzy) di tipo IF - THEN

IF {Ingressi} THEN {Uscite}

Tipi di Modelli Fuzzy

1) Modelli Linguistici (Mamdani): Si basano sulle classiche regole di inferenza fuzzy fra antecedente e conseguente, ambedue descritti con dei fuzzy sets che rappresentano dei concetti linguistici

IF {Antecedente} THEN {Consequente}

2) Modelli di Sugeno: gli antecedenti fuzzy (linguistici) implicano dei conseguenti funzionali (deterministici

IF {Antecedente} THEN {y = f(y,u)}

3 Modellistica Fuzzy

Modelli Dinamici Fuzzy

Mamdani: Modello fuzzy come insieme di regole inferenziali

Modelli linguistici (Mamdani) IF u_k is B_o AND u_{k-1} is B_1 ... AND u_{k-n} is B_n AND y_{k-1} is A_1 AND ... AND y_{k-n} is A_n THEN y_k is A_o

Sugeno: Modello fuzzy come insieme di relazioni funzionali

Modelli di Sugeno IF u_k is B_o AND u_{k-1} is B_1 ... AND u_{k-n} is B_n AND y_{k-1} is A_1 AND ... AND y_{k-n} is A_n THEN $y_k = f(y_{k-1}, y_{k-2}, ..., y_{k-n}, u_{k-1}, u_{k-2}, ..., u_{k-n})$

Modelli del Tipo di Mamdani

- Si compongono di un insieme di regole fuzzy che hanno lo scopo di riprodurre il comportamento osservato
- L'inclusione fra gli antecedenti di ingressi ed uscite passati è limitata solo dalla causalità (non si possono usare elementi futuri...)
- Esempio: si voglia modellare un sistema dinamico alle differenze con la seguente struttura $y_t = f(y_{t-1}, u_{t-1}, u_{t-2})$

Si può utilizzare una struttura fuzzy, ad es. con due regole, del tipo

$$R_1$$
: IF y_{t-1} is A_{11} AND u_{t-1} is B_{11} AND u_{t-2} is B_{12} THEN y_t is C_1 ELSE

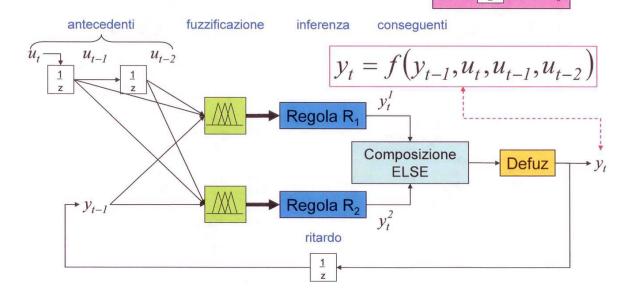
$$R_2$$
: IF y_{t-1} is A_{21} AND u_{t-1} is B_{21} AND u_{t-2} is B_{22} THEN y_t is C_2

Il successo del modello consisterà nell'abilità di includere nelle regole tutti i comportamenti del sistema e scegliere in modo efficace i rappresentatori A, B e C, basandosi sui dati osservati.

5 Modellistica Fuzzy

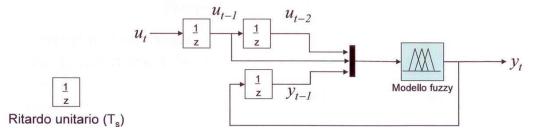
Modello Fuzzy a Regole (Mamdani)

L'uso di ritardi unitari (pari a T_s) è indispensabile per creare gli antecedenti passati, sia per gli ingressi che per le uscite



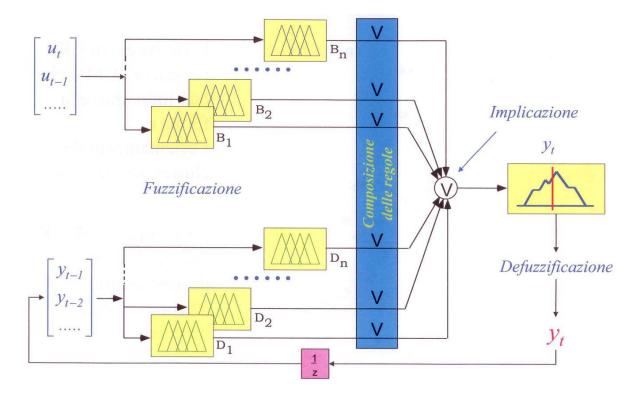
La Struttura Fuzzy in "Simulazione Completa"

- Il calcolo dell'uscita attuale y_t utilizza uscite passate $(y_{t-1}, y_{t-2},...)$ ed ingressi passati $(u_{t-1}, u_{t-2},...)$. Perciò
 - Nel modello dovranno essere previsti dei ritardi unitari (di un passo) per conservare memoria degli elementi passati
 - Eventuali errori di modello nei passi precedenti si rifletteranno nel valore attuale (propagazione dell'errore)
- Dato che il modello fuzzy è naturalmente tempo-discreto, si dovrà scegliere con cura l'intervallo di tempo T_s fra campioni successivi dell'ingresso e dell'uscita
 - Un T_s troppo piccolo non farebbe risaltare le variazioni, rendendo inefficaci le regole
 - Un T_s troppo lungo farebbe perdere risoluzione al modello, non osservando variazioni rapide ma significative.



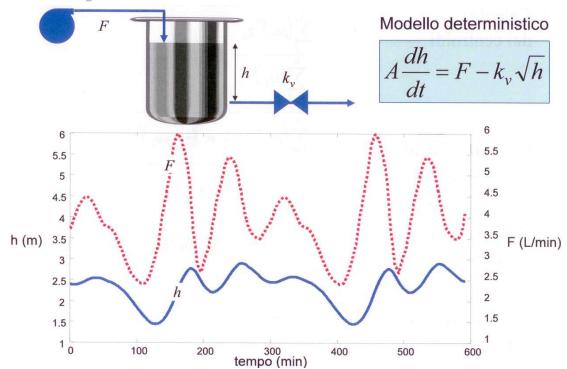
7 Modellistica Fuzzy

Struttura Generale del Modello di Mamdani



8 Modellistica Fuzzy

Esempio di Serbatoio con Deflusso



Modellistica Fuzzy

Costruzione del Modello

- Definire le fasce di valori "significativi" per le variabili per costruire i rappresentatori fuzzy
 - Numero di rappresentatori
 - Forma dei rappresentatori
- Definire matematicamente le funzioni di appartenenza
 - Espressione matematica (triangolare, gaussiano, etc.)
 - Parametri che ne determinano la forma rispetto ai dati
- Definire la struttura del modello e le regole di inferenza
 - Per semplicità conviene scegliere un modello ingresso/uscita tempo-discreto del tipo

$$y_t = f(y_{t-1},...,y_{t-n},u_{t-k},...,u_{t-n})$$

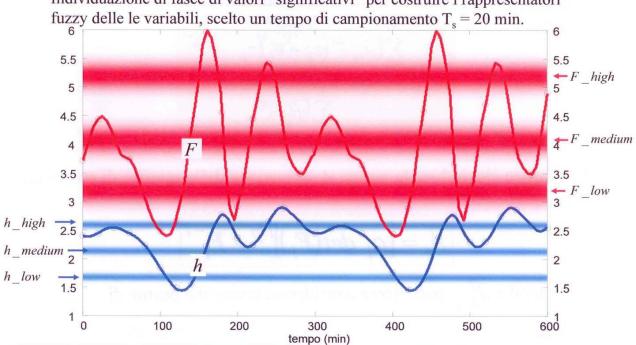
con k ritardo ingresso-uscita

- In generale le regole possibili saranno $n \times n-k$, perciò è bene tenere basso l'ordine del modello.
- Ad es. $y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, u_{t-1}, u_{t-2})$
- Comporre le regole sulla base del comportamento osservato

10

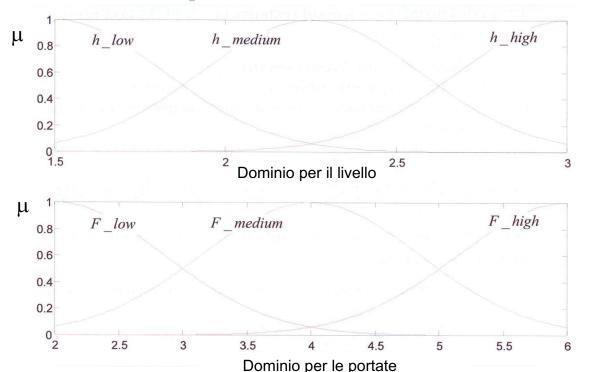
Pre-trattamento dei Dati

Individuazione di fasce di valori "significativi" per costruire i rappresentatori



11 **Modellistica Fuzzy**

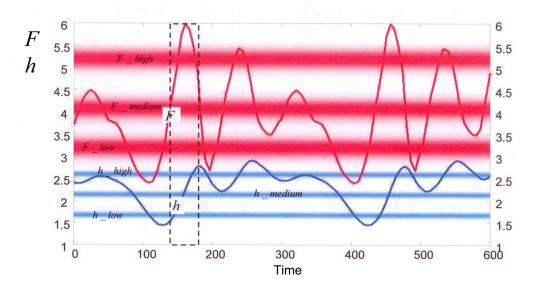
Membership Functions: Definizione



Regole: Definizione

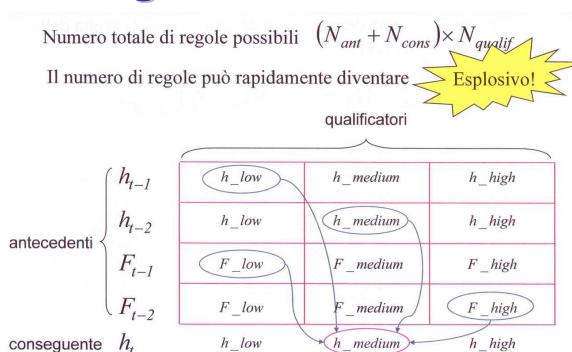
Usando una finestra mobile che copre l'intervallo di tempo pari alle variabili incluse nel modello, si cerca di inferire le regole di variazione. Ad es. nel rettangolo tratteggiato:

IF h_{t-1} is h medium AND h_{t-2} is h low AND F_{t-1} is F high AND F_{t-2} is F medium THEN h_t is h high



13 Modellistica Fuzzy

Regole: Combinazione



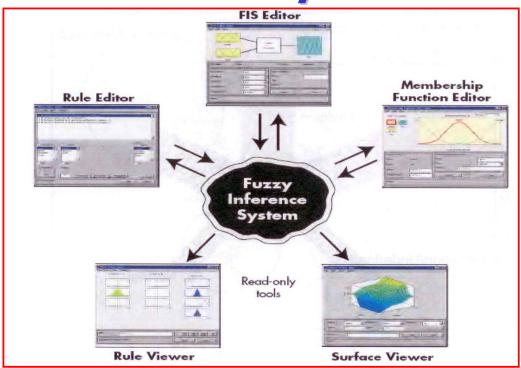
Regole per l'Esempio del Serbatoio

Numero totale di regole possibili: $N_{variabili} \times N_{qualificatori}$ In questo caso 5 x 3 = 15. Ne sono state utilizzate solo 8!

```
IF (h_{t-1} is \ h\_high) AND (h_{t-2} is \ h\_low) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_medium) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_low) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_low) AND (h_{t-2} is \ h\_low) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_low) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_low) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_medium) AND (F_{t-1} is \ F\_medium) AND (F_{t-2} is \ F\_high) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_high) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_medium) AND (F_{t-2} is \ F\_high) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_high) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_high) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_high) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_low) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_low) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_low) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_low) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_low) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_low) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_low) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_low) \\ IF (h_{t-1} is \ h\_medium) AND (h_{t-2} is \ h\_high) AND (F_{t-1} is \ F\_low) AND (F_{t-2} is \ F\_medium) THEN (h_t is \ h\_low)
```

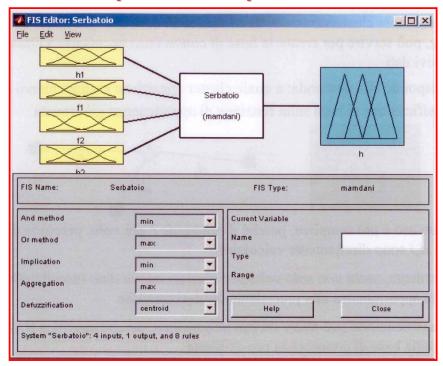
15 Modellistica Fuzzy

Matlab® Fuzzy Toolbox™



Matlab® Fuzzy Toolbox™

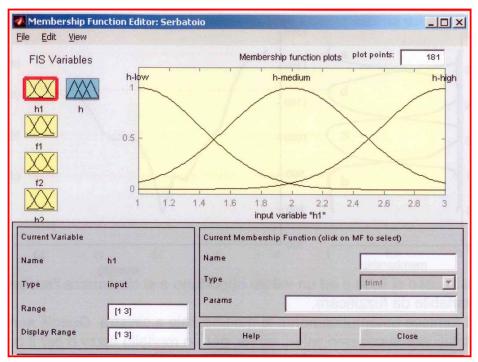
FIS Editor per l'Esempio del Serbatoio



17 Modellistica Fuzzy

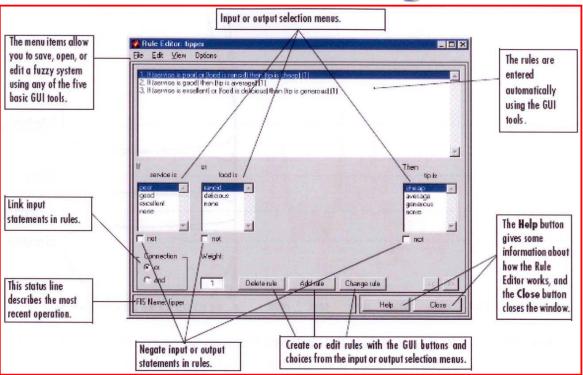
Matlab® Fuzzy Toolbox™

MF Editor per l'Esempio del Serbatoio



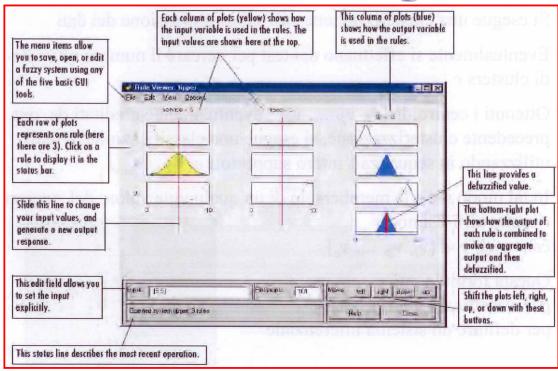
18 Modellistica Fuzzy

Editor delle Regole



19 Modellistica Fuzzy

Viewer delle Regole



20 Modellistica Fuzzy

Vantaggi e Svantaggi del Modello di *Mamdani*

Wantaggi Vantaggi

- Non è necessario conoscere la struttura del sistema né il suo funzionamento
- Il modello è stato ricavato dall'osservazione diretta dei dati

Svantaggi

- Nessuna guida nella definizione delle caratteristiche del modello
 - Ordine
 - Numero e forma dei qualificatori
 - Numero e contenuto delle regole
- Il modello ha validità limitata agli intervalli dei dati utilizzati per la sua definizione
 - \bullet Es. se arrivasse un ingresso di portata F = 10?
 - Il modello non potrebbe applicarvi nessuna regola perché questo valore è esterno agli intervalli entro cui sono definite le sue variabili.
- **Domanda:** esistono metodi più sistematici?
 - Risposta: Si

21 **Modellistica Fuzzy**

Modelli del Tipo di *Sugeno*

Nella generica regola il conseguente è un singleton

IF x is
$$A_i$$
 THEN $y = b_i$

Ciò implica che ogni regola produce un'uscita pari al valore del singleton (b_i) moltiplicato per il grado di verità dell'antecedente u, perciò

IF x is
$$A_i$$
 THEN $y = b_i \implies \mu_i b_i$

La composizione delle regole e la defuzzificazione diventano un'unica operazione che di fatto è la media pesata dei singleton mediante i rispettivi gradi di verità

$$y_{defuz} = rac{\displaystyle\sum_{i=1}^{N} b_i \mu_i}{\displaystyle\sum_{i=1}^{N} \mu_i}$$

al posto dei singleton si possono usare delle funzioni, aumentando le capacità

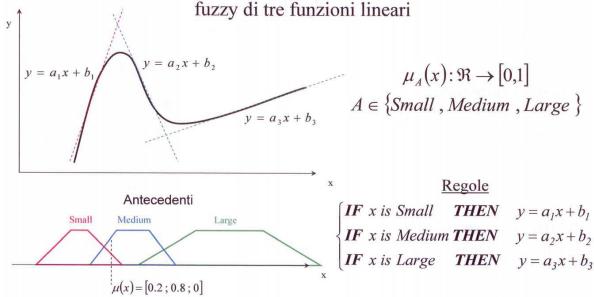
Estensione:

approssimanti del modello

$$y_{defuz} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Phi_{i}(x)\mu_{i}}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{i}}$$

Modello di Sugeno come Approssimatore "Universale"

Modello di Sugeno come linearizzazione locale La funzione viene approssimata mediante combinazione



23 Modellistica Fuzzy

Modellazione del Serbatoio con Sugeno

- 1. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-low) and (f1 is f-high) and (f2 is f-medium) then $h = b_1$
- 2. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-medium) and (f1 is f-high) and (f2 is f-low) then $h = b_2$
- 3. If (h1 is h-low) and (h2 is h-low) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-low) then $h = b_3$
- 4. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-low) and (f1 is f-high) and (f2 is f-medium) then h = b₄
- 5. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-medium) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-low) then $h = b_s$
- 6. If (h1 is h-high) and (h2 is h-high) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-high) then $h = b_6$
- 7. If (h1 is h-high) and (h2 is h-high) and (f1 is f-high) and (f2 is f-medium) then $h = b_{-}$
- 8. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-high) and (f1 is f-low) and (f2 is f-medium) then $h = b_8$
- 9. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-medium) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-medium) then h = b_q
- 10. If (h1 is h-low) and (h2 is h-low) and (f1 is f-low) and (f2 is f-low) then $h = b_{10}$
- 11. If (h1 is h-high) and (h2 is h-high) and (f1 is f-high) and (f2 is f-high) then $h = b_{44}$
- 12. If (h1 is h-medium) and (h2 is h-medium) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-low) then $h = b_{12}$
- 13. If (h1 is h-high) and (h2 is h-medium) and (f1 is f-medium) and (f2 is f-high) then $h = b_{13}$

Conclusioni

- L'approccio alla Mamdani è "rassicurante" perché
 - Permette di usare il normale buonsenso per costruire modelli
 - E' intuitivo
 - Permette di inserire nel modello nozioni non quantitative, ma di tipo linguistico
 - Adatto per piccole semplici applicazioni
 - Non è facilmente calibrabile in modo rigoroso
 - La sua limitazione sta nel suo approccio empirico
- L'approccio alla Sugeno è più impegnativo, ma performante perché
 - Offre una grande flessibilità nella definizione dei conseguenti
 - Permette l'uso degli strumenti classici della teoria dei sistemi per imporre proprietà desiderabili (stabilità, raggiungibilità, etc.) ai conseguenti
 - Apre un collegamento con la teoria classica della modellistica e del controllo
 - Permette l'uso di strumenti sofisticati per la calibrazione sistematica del modello contro i dati (ANFIS, Babuska, etc....)
 - Adatto ad applicazioni complesse

25 Modellistica Fuzzy

Parte 2

- □ Caratteristiche del Controllo Fuzzy
- □ Struttura del controllo fuzzy
 - Controllore fuzzy a regole
 - Costruzione delle regole
- □ Controllo fuzzy alla Sugeno
- □ Regolatori Fuzzy e PID Standard
 - Confronti
- □ Esempio di regolatore fuzzy

Applicazioni di Successo

□ Messa a fuoco automatica per videocamera (Canon e Sanyo) □ Compensazione di instabilita' di immagine in videocamere (Panasonic) □ Scelta del tipo di lavaggio per lavatrici domestiche (Matsushita) □ Pilotaggio di condizionatori d'aria e scaldabagni (Mitsubishi) □ Selezione del rapporto in cambi automatici automobilistici (Subaru) □ Regolazione luminosita' in televisori (Sony) □ Modulazione di potenza di motori di aspirapolveri (Matsushita) □ Interpretazione caratteri manoscritti (Sony) Controllo di fornace di cementifici

□ Supporto alle decisioni in campo medico

□ Pilotaggio dei freni nella metropolitana di Sendai

Caratteristiche del Controllo Fuzzy

Pregi

Non è necessario un modello matematico dettagliato

□ Controllo di ascensori

- 2 -*Può incorporare facilmente* esperienza umana espressa in termini "qualitativi"
- 3 -E' robusto
- E' adattabile alle modifiche del processo
- E' "economico" perché con poche regole si può descrivere un processo di grande complessità

Difetti

- 1 Non fornisce una descrizione dettagliata del processo
- 2 Non è possibile usare tutte le tecniche "classiche" di progettazione, almeno nella versione "a regole" (Mamdani)
- 3 E' euristico (almeno nella forma più semplice)
- 4 Non garantisce alcuna ottimalità (però funziona...)

27

Modellistica Fuzzy

Sistema di Controllo in Generale

Errore di Segnale di regolazione controllo $y_{set-point} \xrightarrow{e}$ REGOLATORE uPROCESSO y

- Il regolatore è in genere un sistema dinamico che produce un segnale di controllo *u* in grado di portare l'uscita del processo *y* al valore voluto *y*_{set-point}
- Per fare questo, il regolatore usa generalmente l'errore di regolazione (e) e la sua derivata (r)
- La struttura del regolatore fuzzy è composta di regole del tipo:

IF e is E AND $\frac{de}{dt}$ is DE THEN u is U

29 Modellistica Fuzzy

Struttura del Controllo Fuzzy

- Il regolatore fuzzy è basato sulla definizione delle seguenti quantità:
- Un insieme di qualificatori, sia per gli ingressi che per le uscite
- Una procedura di fuzzificazione
- 🔍 Un insieme di regole che legano gli antecedenti ai conseguenti
- Dei connettivi che realizzano le implicazioni ed i loro collegamenti
- Una procedura di defuzzificazione
- Dei guadagni di normalizzazione/denormalizzazione

Controllore Fuzzy Basato su Regole

Un regolatore fuzzy è organizzato come una serie di implicazioni logiche dalle quali si ricava in modo deduttivo l'azione di controllo

Utilizzando la logica fuzzy ciò equivale a:

IF
$$(e \text{ is } A_1) \text{ AND } (\dot{e} \text{ is } A_2) \text{ THEN } (u \text{ is } B)$$

L'affermazione fuzzy e is A è da intendersi come il **grado di appartenzenza** di e al qualificatore fuzzy A_1 .

Ugualmente per il conseguente.

Più deduzioni fuzzy, si collegano usando il connettivo *ELSE*

$$R_1$$
: IF (e is $A_{1,1}$) AND (è is $A_{1,2}$) THEN (u is B_1)

ELSE

 R_2 : IF (e is $A_{2,1}$) AND (è is $A_{2,2}$) THEN (u is B_2)

ELSE

......

 R_m : IF (e is $A_{m,1}$) AND (è is $A_{m,2}$) THEN (u is B_m)

31 Modellistica Fuzzy

Inferenza Fuzzy e Controllo

$$R_1:$$
 IF $(e ext{ is } A_{1,1}) ext{ AND } (e ext{ is } A_{1,2}) ext{ THEN } (u ext{ is } B_1)$ $e ext{ is } A_{1,1} o \mu_1(e) ext{ } e ext{ is } A_{1,2} o \mu_2(e)$ $e ext{ is } A_{2,1} o \mu_3(e) ext{ } e ext{ is } A_{2,2} o \mu_4(e)$ $u ext{ is } B_2 o u ext{ is } B_1 o \mu_{b_1}(u) ext{ } u ext{ is } B_2 o \mu_{b_2}(u)$

Questo blocco di implicazioni viene risolto utilizzando gli operatori che si ritengono più opportuni. Ad esempio:

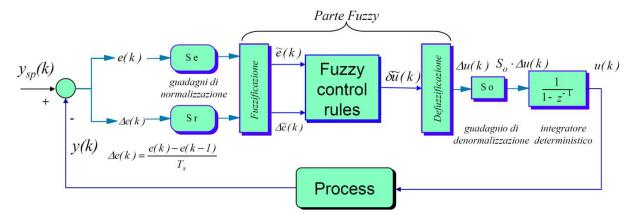
$$AND = min \quad THEN = min \quad ELSE = max$$

$$\mu(u|e^*, \dot{e}^*) = max \begin{cases} \left[min\left(min\left(\mu_1(e^*), \mu_2(\dot{e}^*)\right), \mu_{b_1}(u)\right)\right], \\ \left[min\left(min\left(\mu_3(e^*), \mu_4(\dot{e}^*)\right), \mu_{b_2}(u)\right)\right] \end{cases}$$

$$AND = prod \quad THEN = prod \quad ELSE = max$$

$$\mu(u|e^*, \dot{e}^*) = max \begin{cases} \left[\mu_1(e^*) \times \mu_2(\dot{e}^*) \times \mu_{b_1}(u)\right], \\ \left[\mu_3(e^*) \times \mu_4(\dot{e}^*) \times \mu_{b_2}(u)\right] \end{cases}$$

Regolatore Fuzzy: Struttura



La regolazione è basata sull'errore e(t) e sulla sua derivata $\Delta e(t)$. Generalmente si inserisce un'azione integrale (deterministica) all'uscita del regolatore fuzzy, perché questo non dà garanzie di inseguimento

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t)$$

Le regole di controllo vengono specificate in modo euristico

33 Modellistica Fuzzy

Generazione delle Regole

Originariamente le regole venivano specificate su base euristica, spesso facendo riferimento ad esperienze di operatori umani. In questo modo si possono introdurre caratteristiche non descrivibili in termini numerici precisi.

Si possono definire delle meta-regole generali, del tipo

MR1 Se l'errore e(t) ed il suo incremento Δe(t) sono circa zero, mantieni il controllo attuale
MR2 Se l'errore e(t) tende a zero con un rateo soddisfacente, mantieni il controllo attuale
MR3 Se l'errore e(t) non è auto-correttivo, allora l'azione di controllo Δu(t) dipende dal segno e grandezza di e(t) ed Δe(t)

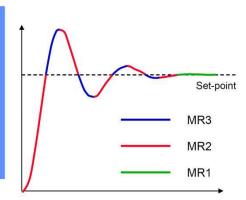
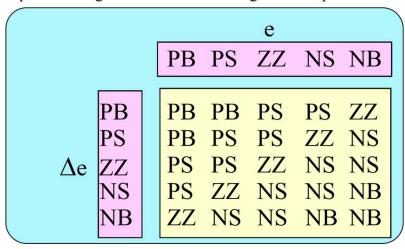


Tabella delle Regole di Controllo

- Se si usano come antecedenti l'errore e(t) e la sua variazione $\Delta e(t)$ l'implicazione fuzzy fra queste ed il segnale di controllo si può rappresentare sotto forma di tabella
- Arr L'incrocio di ogni valore di e(t) e di $\Delta e(t)$ dà la regola da attivare.
- Il grado di attivazione della regola di controllo dipende dal grado di verità complessivo degli antecedenti nella regola corrispondente.



Etichette "linguistiche" delle regole

PB = Positive Big

PS = Positive Small

ZZ = Zero

NS = Negative Small

NB = Negative Big

Modellistica Fuzzy

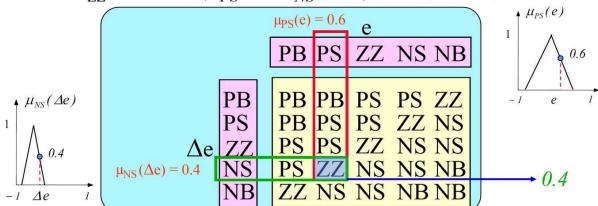
Tabella delle Regole: Esempio

Esempio: se il grado di appartenenza di e(t) al rappresentatore PS è 0.6: $\mu_{PS}(e) = 0.6$ e il grado di appartenenza di Δe al rappresentatore NS è 0.4: $\mu_{NS}(\Delta e) = 0.4$, il grado di attivazione della corrispondente regola ZZ è 0.4 nel caso che si sia usato l'operatore MIN

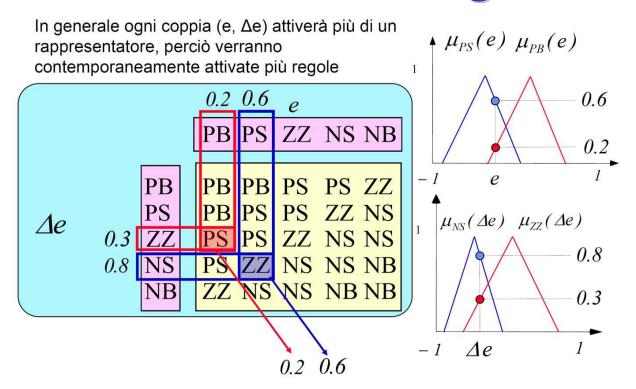
IF
$$(e ext{ is } PS) ext{ AND } (\Delta e ext{ is } NS) ext{ THEN } (u ext{ is } ZZ)$$

$$\mu_{PS}(e) \wedge \mu_{NS}(\Delta e) \wedge \mu_{ZZ}(\Delta u)$$

$$\mu_{ZZ}(u) = \min(\mu_{PS}(e), \mu_{NS}(\Delta e)) = \min(0.6, 0.4) = 0.4$$



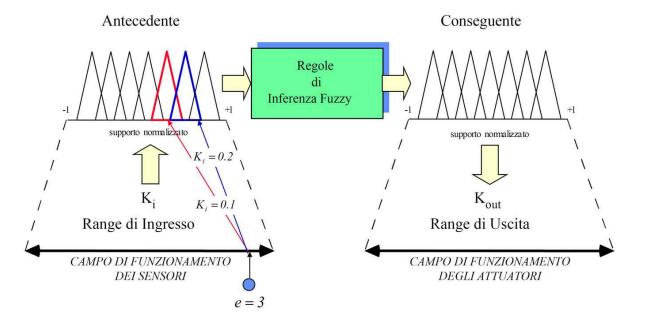
Attivazione delle Regole



37 Modellistica Fuzzy

Normalizzazione dei Segnali

I guadagni di Normalizzazione/Denormalizzazione sono necessari per riportare i range delle variabili entro i limiti normalizzati



Controllo Fuzzy alla Sugeno

Usa il medesimo metodo di inferenza in cui però il conseguente è un singolo valore deterministico (*singleton*)

$$R_i: IF\ e_t\ is\ A_j\ AND\ \Delta e_t\ is\ A_k\ THEN\ u_i=k_i$$

$$Valore\ assunto\ dall'uscita\ in\ funzione\ del\ grado\ di\ verità\ dell'antecedente$$

- Viene eliminato il problema della defuzzificazione: basterà effettuare la media dei vari singleton pesata con i gradi di verità degli antecedenti;
- Si può facilmente estendere l'espressione del controllo da valori costanti (u = k) ad una combinazione lineare di errore e sua derivata.

$$R_i : IF \ e_t \ is \ A_j \ AND \ \Delta e_t \ is \ A_k \ THEN$$

$$u_t^i = a_t^i e_t + a_t^i \Delta e_t + b_i$$

39 Modellistica Fuzzy

Regolatori Fuzzy e PID Standard

a) Proporzionale-Integrale (PI)

$$PI_{fuzzy}$$
: $\Delta u_{fuzzy} = f(e, \Delta e) = f(e(t), e(t-1))$
 $PI_{det\ erm.}$: $\Delta u_{PI} = K_p \cdot \Delta e(t) + K_I \cdot e(t)$

b) Proporzionale-Derivativo (PD)

$$PD_{fuzzy}$$
: $u_{fuzzy} = f(e, \Delta e) = f(e(t), e(t-1))$
 $PD_{det\,erm.}$: $u_{PD} = K_P \cdot e(t) + K_d \cdot \Delta e(t)$

c) PID completo

$$PID_{fuzzy}$$
: $\Delta u_{fuzzy} = f(e(t), e(t-1), e(t-2))$
 $PID_{det erm.}$: $\Delta u_{PID} = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot e(t-1) + K_3 \cdot e(t-2)$

Progetto con Matlab® Fuzzy Toolbox

- ™ Nella Fuzzy Toolbox (Matlab)
 - Definire il tipo di inferenza (Mamdani o Sugeno)
 - Definire li operatori per i connettivi delle impicazioni (AND, THEN, ELSE)
 - Definire le membership di ingressi e uscita
 - Definire le regole
 - verificare l'attivazione delle regole (rule viewer)
 - Salvare la FIS
- In Simulink
 - Definire il modello del processo
 - \blacksquare costruire l'errore di regolazione (e) e il suo incremento (Δ e)
 - Inserire il blocco **Fuzzy Logic Controller** (dalla palette Fuzzy Logic Toolbox)
 - Inserire il nome della FIS nella maschera dei parametri di questo blocco



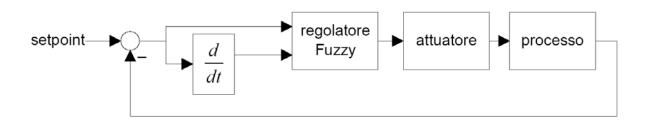
- Nel programma di lancio
 - caricare la FIS Nota il nome nei parametri Simulink deve essere uguale al nome assegnato con readfis
 - effettuare la chiamata al Simulink

41 Modellistica Fuzzy

Esempi di Regolatori Standard

- ➤ Si basano sulla struttura dei PID
- Usano la logica fuzzy
- Osservazioni
- ➤ Esempio pratico

Controllori Fuzzy PD-like

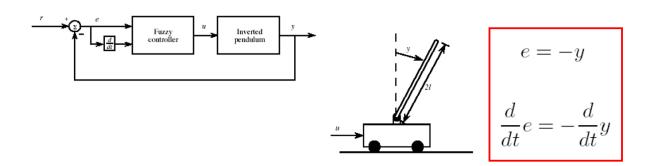


Struttura di regolatore fuzzy simile al PD

43 Modellistica Fuzzy

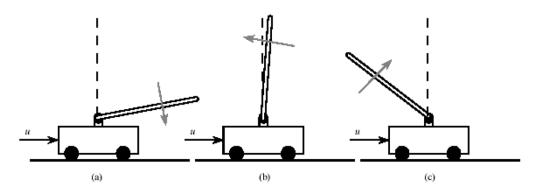
Descrizione Linguistica

- ➤ Errore, e(t)
- \triangleright Variazione dell'errore, de(t)/dt, \triangle e(t)
- ➤ Forza, u(t)



Base delle Regole: Idea

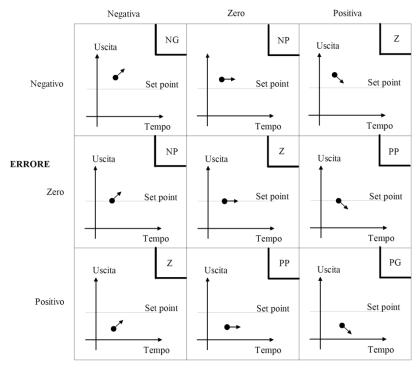
- Se l'errore è NG e la variazione dell'errore è NG allora la forza è NG
- b) Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è PP allora la forza è PP
- c) Se l'errore è PG e la variazione dell'errore è NP allora la forza è PP



45 Modellistica Fuzzy

Tabella delle Regole

DERIVATA DELL'ERRORE



- In termini qualitativi
- Esempio di costruzione della tabella delle regole: uscita in funzione del valore di e e di Δe

Tabella delle Regole – 2

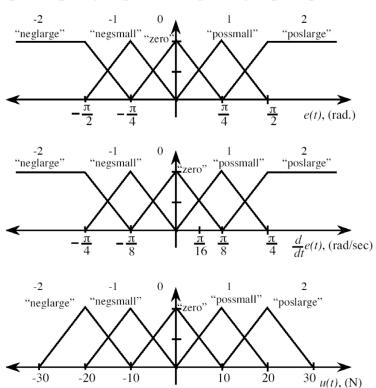
NB NS e Z PS PB

		$\Delta \mathbf{e}$		
NB	NS	Z	PS	PB
NVB	NB	NM	NS	Z
NB	NM	NS	Z	PS
NM	NS	Z	PS	PM
NS	Z	PS	PM	PB
Z	PS	PM	PB	PVB

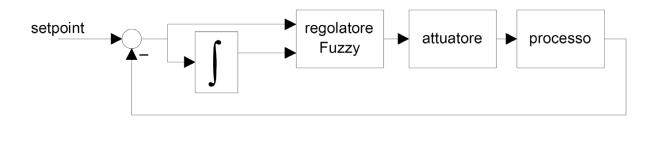
- ➤ Numero di regole
- ➤ Verso il progetto pratico
- ➤ Uscita del regolatore

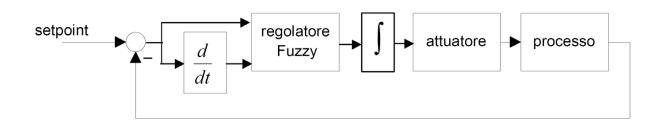
47 Modellistica Fuzzy

Controllo del Pendolo Inverso



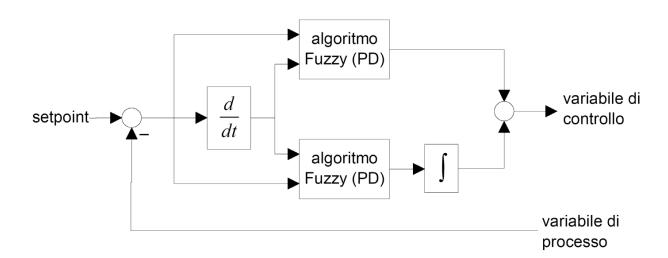
Fuzzy PI-like





49 Modellistica Fuzzy

Fuzzy PID-like



> Viene ridotto il numero delle regole!

50 Modellistica Fuzzy

Esempio di Fuzzyficazione

Associazione del valore assunto da una variabile linguistica al valore della corrispondente membership function

$$e(t) = \pi/4 \qquad \frac{d}{dt}e(t) = \pi/16$$

$$\mu_{possmall}(e(t)) = 1 \qquad \mu_{zero}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = \mu_{possmall}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0.5$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = \pi/16$$

$$\frac{d}{d$$

51 Modellistica Fuzzy

Esempio di Inferenza

Quantificazione dell'Antecedente

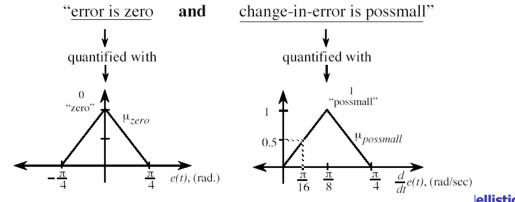
Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è PP allora la forza è PP

$$e(t) = \pi/8$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = \pi/32,$$

$$\mu_{zero}(e(t)) = 0.5$$

$$\mu_{possmall}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0.25$$



Inferenza: Esempio Quantificazione dell'Antecedente

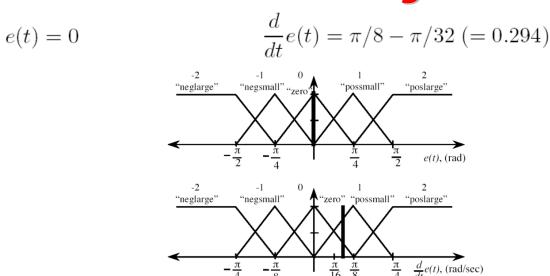
μ_{premise}, denota il grado di certezza dell'affermazione:

l'errore è Z e la variazione dell'errore è PP

- Metodi per calcolare il grado di certezza di un'affermazione:
- ► Minimo: $\mu_{premise} = \min\{0.5, 0.25\} = 0.25,$
- **Prodotto:** $\mu_{premise} = (0.5)(0.25) = 0.125$

53 Modellistica Fuzzy

Inferenza: EsempioAttivazione delle Regole



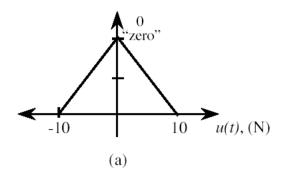
- Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è Z allora la forza è Z
- Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è PP allora la forza è PP

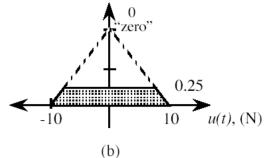
Inferenza: Esempio Attivazione delle Regole –2

Regola 1: Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è Z allora la forza è Z

$$\mu_{premise_{(1)}} = \min\{0.25, 1\} = 0.25$$

$$\mu_{(1)}(u) = \min\{0.25, \mu_{zero}(u)\}\$$





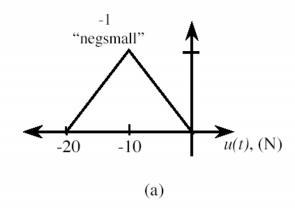
55 Modellistica Fuzzy

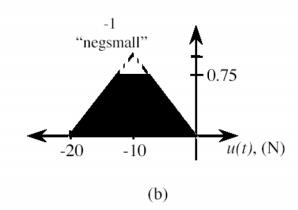
Inferenza: Esempio Attivazione delle Regole -3

Regola 2: Se l'errore è Z e la variazione dell'errore è PP allora la forza è NP

$$\mu_{premise_{(2)}} = \min\{0.75, 1\} = 0.75$$

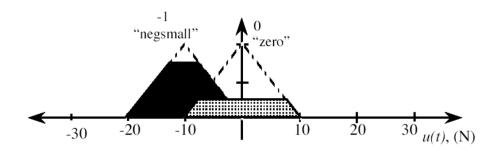
$$\mu_{(2)}(u) = \min\{0.75, \mu_{negsmall}(u)\}$$





Defuzzificazione

Metodo del COG (Centro di gravità)



$$u^{crisp} = \frac{\sum_{i} b_{i} \int \mu_{(i)}}{\sum_{i} \int \mu_{(i)}}$$

 b_i denotano i centri delle membership functions

57 **Modellistica Fuzzy**

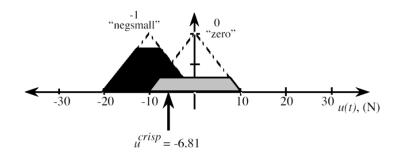
Defuzzificazione – 2

Metodo del COG (Centro di gravità)

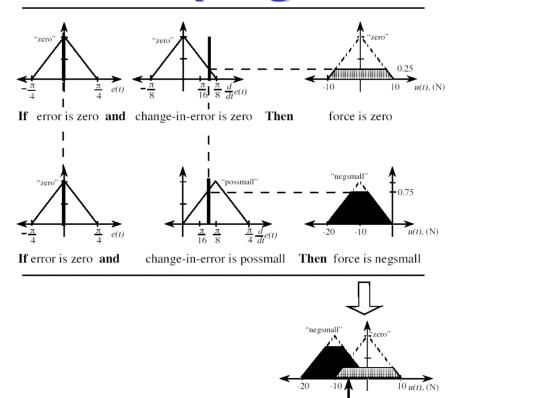
$$u^{crisp} = \frac{\sum_{i} b_{i} \int \mu_{(i)}}{\sum_{i} \int \mu_{(i)}}$$

$$b_1 = 0.0 b_2 = -10$$

$$u^{crisp} = \frac{(0)(4.375) + (-10)(9.375)}{4.375 + 9.375} = -6.81$$



Riepilogo



 $u^{crisp} = -6.81$

59

Riferimenti Bibliografici

- Yager R.R. e Filev D.P. (1994) Essentials of Fuzzy Modelling and Control, Wiley.
- Klir. G.J. e T.A. Folger (1988) Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice-Hall.
- Ross T.J. (1995) Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill.
- Driankov D, Hellendoorn H., Reinfrank M. (1993) *An introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag.
- Patyra M.J. e Mlynek D.M. (editors) (1996) *Fuzzy Logic, Implementation and Applications*, Wiley Teubner.
- Nguyen H.T., Sugeno M., Tong R. Yager R.R. (editors) (1995) *Theoretical Aspects of Fuzzy Control*, Wiley.
- Yager R.R. e Zadeh L.A. (editors) (1994) Fuzzy Sets, Neural Networks, and Soft Computing, Van Nostrand Reinhold.
- wang, L. X. (1994) Adaptive Fuzzy Systems and Control. PTR Prentice Hall.

....dellistica Fuzzy