

## 1 Controle Fuzzy

- Um controlador fuzzy compreende quatro componentes principais:
  1. interface escalar-fuzzy,
  2. base de conhecimento,
  3. lógica de tomada de decisões,
  4. e interface fuzzy-escalar.

2

**Controle Fuzzy**

- A interface escalar-fuzzy envolve as seguintes funções:
  - medição dos valores das variáveis de entrada.
  - mapeamento que transfere o intervalo dos valores das variáveis de entrada nos correspondentes universos de discurso.
  - transformação dos valores escalares das variáveis de entrada em valores linguísticos que correspondem a rótulos de conjuntos fuzzy <sup>a</sup>.

---

<sup>a</sup>fuzzification

A figura 1 ilustra a configuração básica de um controlador fuzzy.

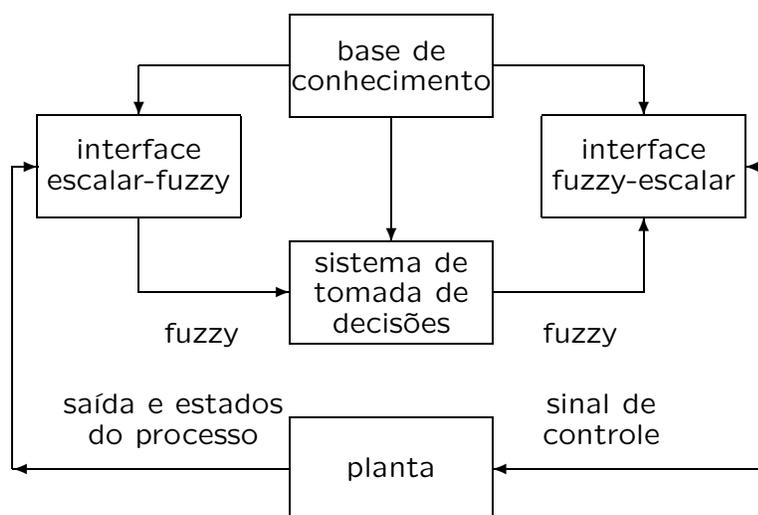


Figura 1: Controlador Fuzzy

- O sistema de tomada de decisões é o núcleo de um controlador fuzzy, possui a capacidade de simular a habilidade humana de tomada de decisões baseada em conceitos fuzzy, inferindo ações de controle através do emprego de implicações fuzzy e regras de inferência em lógica fuzzy.

6

- A base de conhecimento compreende o conhecimento do projetista a respeito do processo. Consiste de uma base de dados e um conjunto de regras de controle fuzzy:
  - a base de dados provê as definições necessárias para estabelecer as regras fuzzy e para a manipulação das informações do controlador.
  - o conjunto de regras caracteriza os objetivos de controle e a política de controle.

5

## 2 Declarações Condicionais Fuzzy e Regras de Controle Fuzzy

- Em um controlador fuzzy o comportamento dinâmico de um sistema é caracterizado através de um conjunto de regras de descrição linguísticas usualmente baseadas num conhecimento especialista. O conhecimento especialista é usualmente expresso sob a forma:
  - se** (um conjunto de condições são satisfeitas) **então** (um conjunto de conseqüências pode ser inferido).
- Os antecedentes e consequentes de tais regras **se-então** estão associados a conceitos fuzzy, desta forma costuma-se denominá-las de declarações condicionais fuzzy.

- A interface fuzzy-escalar realiza as seguintes funções:
  - mapeamento que converte valores relativos aos universos de discurso nos intervalos correspondentes aos intervalos das variáveis de saída.
  - transformação fuzzy-escalar, que transforma uma ação de controle fuzzy numa ação de controle escalar.

- Uma regra de controle fuzzy, como por exemplo, “**se** ( $x = A_i$  **e**  $y = B_i$ ) **então** ( $z = C_i$ )” é implementado através de uma implicação (relação) fuzzy  $R_i$  que é definida como se segue:

$$\mu_{R_i}(u, v, w) \triangleq [\mu_{A_i}(u) \mathbf{e} \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w), \quad (1)$$

- onde  $(A_i \mathbf{e} B_i)$  é um conjunto fuzzy em  $A_i \times B_i$  no domínio  $U \times V$ ;
- $R_i \triangleq (A_i \mathbf{e} B_i) \rightarrow C_i$  é uma implicação (relação) fuzzy em  $U \times V \times W$ ;
- e  $\rightarrow$  indica uma função de implicação fuzzy.

10

- Basicamente, regras de controle fuzzy permitem expressar políticas de controle e conhecimento a respeito do processo.
- Por exemplo, no caso de um sistema de duas entradas e uma saída, as regras de controle fuzzy assumem a seguinte forma:

$$R_1 : \mathbf{se} \ x = A_1 \ \mathbf{e} \ y = B_1 \ \mathbf{então} \ z = C_1,$$

$$R_2 : \mathbf{se} \ x = A_2 \ \mathbf{e} \ y = B_2 \ \mathbf{então} \ z = C_2,$$

...

$$R_n : \mathbf{se} \ x = A_n \ \mathbf{e} \ y = B_n \ \mathbf{então} \ z = C_n,$$

onde  $x$ ,  $y$ , e  $z$  são variáveis linguísticas representando duas variáveis de estado e uma variável de controle;  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  são valores linguísticos das variáveis  $x$ ,  $y$ , e  $z$  no universo de discurso  $U$ ,  $V$  e  $W$ , respectivamente, com  $i = 1, 2, \dots, n$ . Um conectivo de sentenças liga implicitamente todas as regras de controle.

#### 4 Operadores de Conectivos de Sentença

- Um controlador fuzzy consiste de um conjunto de regras de controle que estão relacionadas através dos conceitos de implicação fuzzy e regra de inferência composicional sup-star.
- As regras são combinadas através de conectivos **e** e **também**. Já que cada regra de controle é representada através de uma relação fuzzy, o comportamento global de um sistema fuzzy é caracterizado através dessas relações.

12

#### 3 Operador de Transformação Escalar-Fuzzy

- Um operador de transformação escalar-fuzzy tem o efeito de transformar dados escalares em conjuntos fuzzy. Simbolicamente, podemos expressar,

$$x = \mathbf{tef}(x_0),$$

onde  $x_0$  é um valor escalar de uma variável do processo;  $x$  é um conjunto fuzzy, e **tef** representa um operador de transformação escalar-fuzzy.

11

## 5 Operador Composicional

- Para inferir a saída  $z$  para um dado estado do processo representado por  $x$  e  $y$  e pela relação fuzzy  $R$ , a regra de inferência composicional é aplicada,

$$z = y \circ (x \circ R). \quad (2)$$

14

- Ou seja, um sistema fuzzy pode ser caracterizado por uma única relação fuzzy que representa a combinação de todas as regras. A combinação em questão envolve o conectivo de sentenças **também**.
- Simbolicamente podemos representar,

$$R = \mathbf{também}(R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n),$$

onde **também** representa um conectivo de sentenças.

13

## 7 Parâmetros de Projeto para um Controlador Fuzzy

- Os principais parâmetros para um projeto de um controlador fuzzy são os seguintes:
  1. estratégias de transformação escalar-fuzzy e a interpretação do operador **tfe**;
  2. base de dados:
    - discretização/normalização dos universos de discurso,
    - partição dos espaços de entrada e saída através de conjuntos fuzzy,
    - completeza,
    - escolha da função de pertinência para os conjuntos fuzzy;
  3. base de regras:
    - escolha das variáveis de estado (entrada) e variáveis de controle (saída),
    - fonte e derivação de regras de controle fuzzy,

16

## 6 Operador de Transformação Fuzzy-Escalar

- A saída de qualquer processo de inferência é um conjunto fuzzy, especificando a distribuição de possibilidade da ação de controle.
- Na prática, entretanto, para a utilização em controle de processos, uma ação de controle escalar é requerida.
- Consequentemente torna-se necessário transformar o conjunto fuzzy inferido num valor escalar, através da utilização de um operador de transformação fuzzy-escalar, denotado por,

$$z_0 = \mathbf{tfe}(z).$$

Onde  $z_0$  é a ação de controle escalar e **tfe** é o operador de transformação fuzzy-escalar.

15

## 7.1 Estratégias de Transformação Escalar-Fuzzy

- A transformação escalar-fuzzy está relacionada com o conceito de imprecisão em linguagens naturais.
- Trata-se de uma avaliação subjetiva que transforma uma medida num valor linguístico, e portanto, pode ser definida como um mapeamento entre um espaço observado de entrada e conjuntos fuzzy definidos sobre o mesmo espaço (universo de discurso).
- Em aplicações de controle fuzzy os dados observados são usualmente escalares.
- Em sistemas de controle e muitas outras aplicações utiliza-se um operador que converte um valor escalar num fuzzy singleton.
- Basicamente um fuzzy singleton é um valor preciso e portanto nenhuma imprecisão é introduzido nesse caso.

18

– tipo de regras de controle fuzzy,

4. lógica de tomada de decisões:

- definição de uma implicação fuzzy,
- interpretação do conectivo de sentenças **e**,
- interpretação do conectivo de sentenças **também**,
- definição de um operador composicional,
- mecanismo de inferência;

5. estratégias de transformação fuzzy-escalar e interpretação do operador **tfe**.

## 7.2 Base de Dados

- A base de conhecimento de um controlador fuzzy compreende duas componentes, uma base de dados e uma base de regras de controle.
- Os conceitos associados à base de dados são utilizados para caracterizar as regras de controle e a manipulação de dados fuzzy. Tais conceitos são definidos subjetivamente e baseados na experiência.

20

- Essa estratégia tem sido largamente utilizada em aplicações de controle devido a sua facilidade de implementação. Uma entrada  $x_0$  é interpretada como um conjunto fuzzy  $A$  com uma função de pertinência  $\mu_A(x)$  igual a zero, exceto no ponto  $x_0$ , onde  $\mu_A(x_0) = 1$ .

- Por exemplo num sistema fuzzy com 3 variáveis de entrada e uma variável de saída pode-se utilizar regras de controle do seguinte tipo:

$$K_4[u(k)] = F[K_1.e(k), K_2.ie(k), K_3.ce(k)],$$

onde  $F$  denota a relação fuzzy definida pela base de regras,  $e(k)$  representa o erro do processo,  $ie(k)$  representa a integral do erro,  $ce(k)$  representa a variação do erro e  $(K_1, K_2, K_3, K_4)$  representam mapeamentos adequados.

- Um exemplo de discretização é mostrado na tabela 1, onde um universo de discurso é discretizado em 13 níveis  $(-6, -5, \dots, 0, \dots, +6)$  com sete conjuntos fuzzy definidos sobre ele:  $NB$  (*Negative-Big*),  $NM$  (*Negative-Medium*),  $NS$  (*Negative-Small*),  $ZE$  (*Zero*),  $PS$  (*Positive-Small*),  $PM$  (*Positive-Medium*),  $PB$  (*Positive-Big*).

22

### Discretização de Um Universo de Discurso

- a discretização de um universo é freqüentemente referida como uma quantização.
- Uma quantização discretiza um universo em um determinado número de segmentos (níveis de quantização).
- Cada segmento é rotulado como um elemento genérico. Um conjunto fuzzy é então definido assinalando um valor do grau de pertinência a cada elemento do universo discreto.
- Para o propósito de discretização, um mapeamento é requerido, para a transformação das variáveis medidas em valores do universo discreto.
- O mapeamento pode ser uniforme (linear) ou não uniforme, ou ambos. A escolha dos níveis de quantização reflete obviamente um conhecimento *a priori*.

21

## Normalização de Universos de Discurso

- a normalização de um universo de discurso requer a discretização do mesmo num número finito de segmentos, onde cada segmento é mapeado num outro segmento correspondente no universo normalizado.
- Nesse caso, um conjunto fuzzy é então definido assinalando-se uma função explícita para a sua função de pertinência.
- A normalização de um universo contínuo também envolve um conhecimento *a priori* a respeito do intervalo de valores ocupados pela variáveis de estado e de controle.
- O mapeamento pode ser uniforme, não uniforme ou ambos. Um exemplo é mostrado na tabela 2 onde o universo de discurso  $[-6.9, +4.5]$ , é transformado no intervalo normalizado  $[-1.0, +1.0]$ . Os parâmetros  $u_f$  e  $\sigma_f$  se referem a definição de funções gaussianas.

24

Tabela 1: Quantização

nível	intervalo	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
-6	$x_0 \leq -3.2$	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-5	$-3.2 < x_0 \leq -1.6$	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-4	$-1.6 < x_0 \leq -0.8$	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
-3	$-0.8 < x_0 \leq -0.4$	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
-2	$-0.4 < x_0 \leq -0.2$	0.0	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0
-1	$-0.2 < x_0 \leq -0.1$	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0
0	$-0.1 < x_0 \leq +0.1$	0.0	0.0	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0
+1	$+0.1 < x_0 \leq +0.2$	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0
+2	$+0.2 < x_0 \leq +0.4$	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.3	0.0
+3	$+0.4 < x_0 \leq +0.8$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0
+4	$+0.8 < x_0 \leq +1.6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.3
+5	$+1.6 < x_0 \leq +3.2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7
+6	$+3.2 \leq x_0$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0

## Partição Fuzzy de Universos de Discurso

- Uma variável linguística no antecedente de uma regra de controle fuzzy forma um espaço fuzzy de entrada com respeito a um determinado universo de discurso, enquanto que uma variável no consequente de uma regra forma um espaço fuzzy de saída.
- Em geral uma variável linguística está associada com um conjunto de termos, onde cada termo é definido sobre o mesmo universo de discurso.
- Uma partição fuzzy, então, determina quantos termos poderiam existir em um dado universo de discurso.

26

Tabela 2: Normalização e Conjuntos Fuzzy Primários Utilizando Definição Funcional

Universo	Segmentos				
Normalizado	Normalizados	Intervalo	$u_f$	$\sigma_f$	Conjuntos fuzzy primários
	[-1.0, -0.5]	[-6.9, -4.1]	-1.0	0.4	<i>NB</i>
	[-0.5, -0.3]	[-4.1, -2.2]	-0.5	0.2	<i>NM</i>
	[-0.3, 0.0]	[-2.2, 0.0]	-0.2	0.2	<i>NS</i>
[-1.0, +1.0]	[0.0, +0.2]	[0.0, +1.0]	0.0	0.2	<i>ZE</i>
	[+0.2, +0.6]	[+1.0, +2.5]	0.2	0.2	<i>PS</i>
	[+0.6, +1.0]	[+2.5, +4.5]	0.5	0.2	<i>PM</i>
				1.0	0.2

25

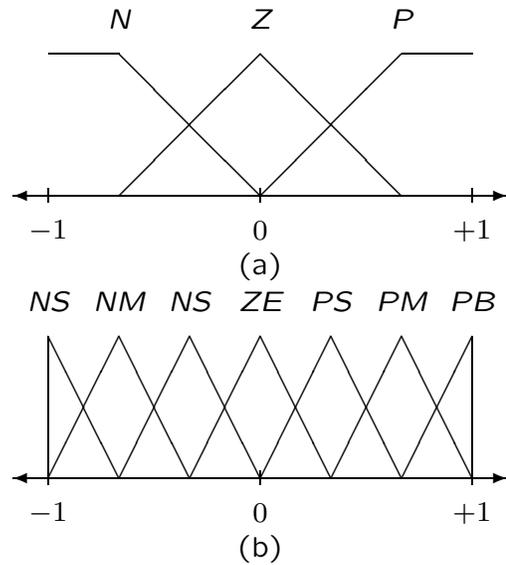


Figura 2: representação gráfica de partições fuzzy.

28

- O número de conjuntos fuzzy determina a granularidade do controle obtido com um controlador fuzzy.
- Os conjuntos fuzzy primários usualmente possuem um significado, tal como *NB*: *Negative-Big*; *NM*: *Negative-Medium*; *NS*: *Negative-Small*; *ZE*: *Zero*; *PS*: *Positive-Small*; *PM*: *Positive-Medium*; *PB*: *Positive-Big*; *N*: *Negative*; *Z*: *Zero*; *P*: *Positive*.

27

crossover como mostrado na figura 2.

- Nesse sentido, uma regra dominante sempre existe e está associada com um grau de certeza maior do que 0.5. Num caso extremo, duas regras dominantes são ativadas com um grau de certeza igual a 0.5.

## 2. Base de Regras

- a estratégia relativa a base de regras está relacionada com as próprias regras de controle. A propriedade de completeza deve ser observada.
- Uma regra é adicionada sempre que uma determinada condição não está incluída na base de regras, ou sempre que o grau de certeza para alguma condição de entrada é menor que algum nível por exemplo 0.5.

30

### Completeza

- Intuitivamente, um algoritmo de controle fuzzy deve sempre ser capaz de inferir uma ação de controle apropriada para cada estado do processo.
- Essa propriedade é denominada de *completeza*. A completeza de um controlador fuzzy está relacionada a base de dados, base de regras ou ambas.

#### 1. Base de Dados

- a estratégia relativa a base de dados está relacionada com os suportes nos quais os conjuntos fuzzy primários são definidos.
- A união desses suportes deve cobrir o universo de discurso em relação a algum nível  $\epsilon$  de certeza .
- Essa propriedade de um controlador fuzzy é denominada completeza- $\epsilon$ . Em geral, escolhe-se o nível  $\epsilon$  no ponto de

29

## 7.3 Base de Regras

### Escolha das Variáveis de Estado e Variáveis de Controle

- A escolha apropriada das variáveis de estado do processo e das variáveis de controle é essencial para a caracterização da operação de um sistema fuzzy.
- Como já foi enfatizado, a experiência desempenha um papel importante nesse processo de escolha. Tipicamente as variáveis de estado são: o erro, a derivada do erro, a integral do erro, etc.

32

### Função de Pertinência para um Conjunto Fuzzy

- Existem dois métodos para se definir conjuntos fuzzy dependendo do tipo de universo de discurso utilizado:
  - Universo discreto: definição numérica,
  - Universo contínuo: definição funcional.

31

## Tipos de Regras de Controle

Basicamente, podemos considerar dois tipos de regras de controle fuzzy:

### 1. Regras de Controle Fuzzy de Avaliação de Estado:

- no caso de sistemas MISO são caracterizados por uma coleção de regras do seguinte tipo:

$$R_1 : \text{se } x = A_1, \dots, \text{e } y = B_1 \text{ então } z = C_1$$

$$R_2 : \text{se } x = A_2, \dots, \text{e } y = B_2 \text{ então } z = C_2$$

...

$$R_n : \text{se } x = A_n, \dots, \text{e } y = B_n \text{ então } z = C_n$$

onde  $x, \dots, y$  e  $z$  são variáveis linguísticas representando as variáveis de estado do processo e a variável de controle;  $A_i, \dots, B_i$  e  $C_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são valores linguísticos das

34

## Fonte e Derivação de Regras de Controle

Em geral, considera-se quatro modos de derivação de regras de controle fuzzy. Esses quatro modos de derivação não podem ser considerados como mutuamente exclusivos.

1. *Experiência de Especialistas*
2. *Modelagem das Ações do Operador*
3. *Modelo Fuzzy do Processo*
4. *Aprendizagem*

- Esse método foi aplicado com sucesso no sistema de operação automático de trens, desenvolvido pela Hitachi Corporation para o metrô da cidade de Sendai (Japão) e se consagrou como uma das primeiras aplicações comerciais de controladores fuzzy.

36

variáveis  $x, \dots, y$  e  $z$  nos universos de discurso  $U, \dots, V$  e  $W$ , respectivamente.

- O conseqüente pode assumir uma forma mais genérica se for representado como uma função das variáveis de estado,  $R_i : \mathbf{se } x = A_i, \dots, \mathbf{e } y = B_i \mathbf{ então } z = f_i(x, \dots, y)$ .

## 2. Regras de Controle para Avaliação de Objetivos:

- Yasunobu, Miyamoto e Ihara (1985) propuseram um novo algoritmo onde a ação de controle  $u$  no instante  $k$  é decidida avaliando-se qual será o seu efeito sobre os estados e os objetivos de controle no instante  $k + 1$ .
- Tal técnica é denominada *Controle Fuzzy com Avaliação de Objetivos* ou *Controle Fuzzy Preditivo*.

$$R_i : \mathbf{se } (u = C_i \rightarrow (x = A_i \mathbf{ e } y = B_i)) \mathbf{ então } u = C_i.$$

35