

# 模糊小脑模型神经网络

周旭东 王国栋

(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 沈阳 110006)

**摘要** 提出输入层具有一定隶属度的模糊小脑模型神经网络(Fuzzy CMAC),它比小脑模型CMAC(Cerebellar Model Articulation Controller)能更真实地描述客观世界. 给出 $n$ 维Fuzzy CMAC算法,仿真结果表明Fuzzy CMAC比小脑模型CMAC具有如下优点:学习收敛速度快得多,可以学习模糊规则. Fuzzy CMAC比CMAC优越,使CMAC成为Fuzzy CMAC的特例.

**关键词** 模糊小脑模型,模糊小脑模型算法,小脑模型,小脑模型算法

## 1 引言

小脑模型神经网络(Cerebellar Model Articulation Controller-CMAC)自1972年由J. S. Albus提出之后<sup>[1]</sup>,从八十年代以来W. T. Miller等人把它成功地应用到机器人控制<sup>[2]</sup>等方面. 因为它是基于局部学习的神经网络,所以学习速度快,适合作实时控制用,是控制上应用得最多的神经网络之一. 但其输入层的权值为1,是一种确定型神经网络. 本文将模糊概念引入改善CMAC,提出模糊小脑模型(Fuzzy CMAC)神经网络. 至今为止尚属首次.

## 2 模糊小脑模型神经网络(Fuzzy CMAC)的结构

Fuzzy CMAC的结构如图1所示,基本结构与CMAC相同. Fuzzy CMAC同样具有综合能力(Generalization). 作者在其输入层引入模糊集合的隶属度的概念,其作用有两个:一、更真实地描述客观世界,采用模糊方法描述客观对象更具一般性,从而使确定性的CMAC成为Fuzzy CMAC的特例;二、将CMAC与模糊控制和模糊推理有机地结合在一起,大大简化了模糊控制和模糊推理映射的计算,更重要的还是增添了模糊控制和模糊推量的学习功能,使模糊控制和推理具有更为方便和更为广泛的应用前景. 同时,这种方法保持了CMAC的全部功能和优点.

### 2.1 Fuzzy CMAC的概念映射算法

与CMAC相似,Fuzzy CMAC本质上是一种带隶属度的查表(Table Look)方法,而映射和存储与小脑模型相同. 本文推导了Fuzzy CMAC的一种概念映射算法,该算法可以保证感受野(Receptive Field)大小与输入变量维数无关. 这为Fuzzy CMAC的应用提

供了方便.

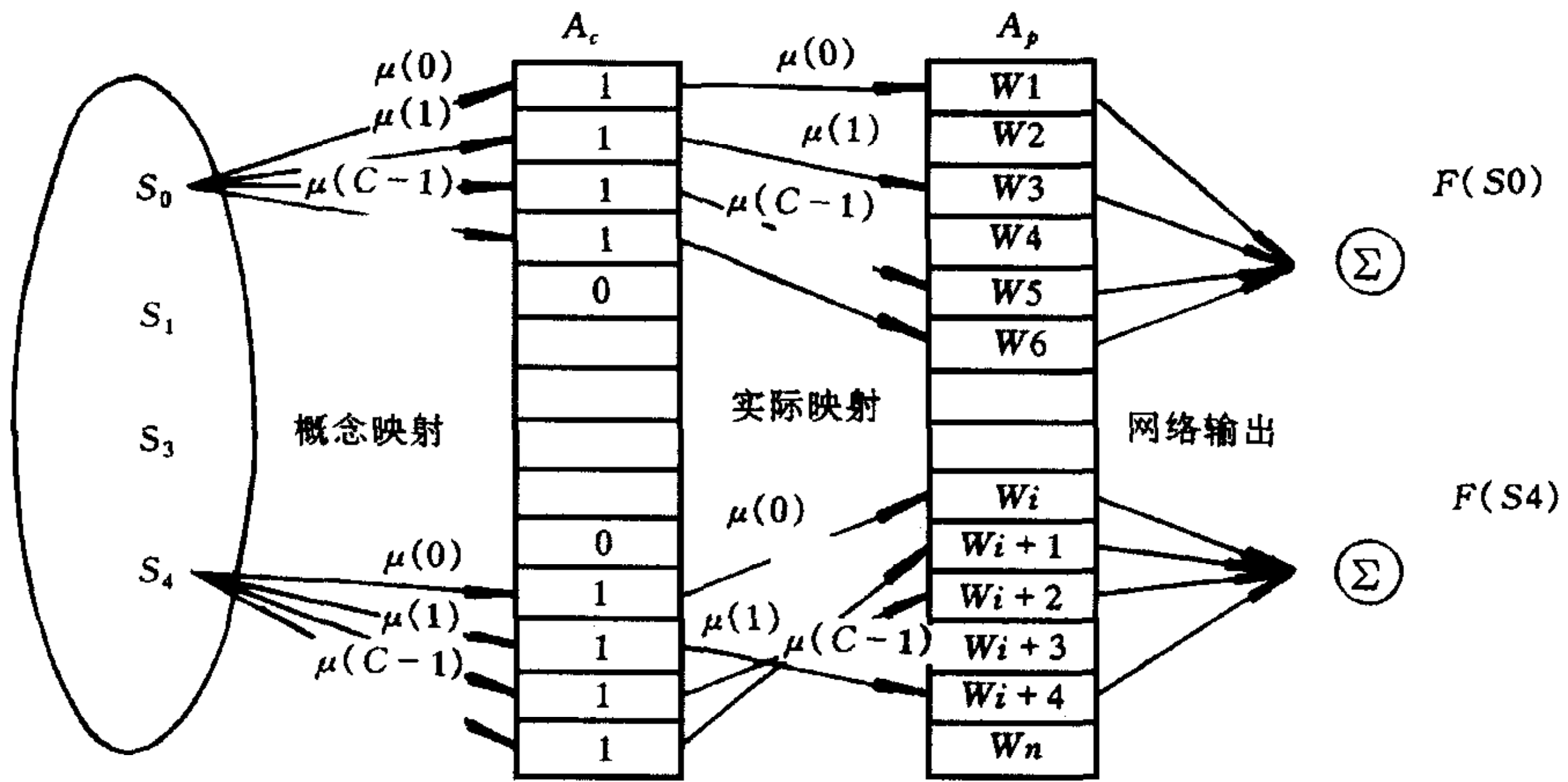


图 1 模糊小脑模型(Fuzzy CMAC)的拓朴结构

2.1.1 一维输入量的模糊隶属度描述与概念映射算法

映射为  $S(S_1) \rightarrow A_c(x_k)$ ,

其中  $S_1$  为输入量的量化值,  $S_1 \in [0, q_1]$ ;  $x$  为  $S_1$  在  $A_c$  中的序号,  $k$  为  $S_1$  在感受野中的序号.

模糊隶属函数如图 2 所示. 模糊隶属度  $\mu(k)$  值取  $\mu(0)=0.3, \mu(1)=0.7, \mu(2)=1.0, \mu(3)=0.7, \mu(4)=0.3. k=0, 1, \dots, C-1$ .

根据 CMAC 基本思想给出其算法为

$$x_k = \frac{S_1 - k + C - 1}{C} C + k, x_k \in [0, q_1 + C],$$

$$k = 0, 1, \dots, C - 1, \tag{1}$$

$$x_{kmax} = q_1 + C, \tag{2}$$

式中  $x_k$  为输入量  $S_1$  在  $A_c$  中的地址,  $C$  为感受野大小.

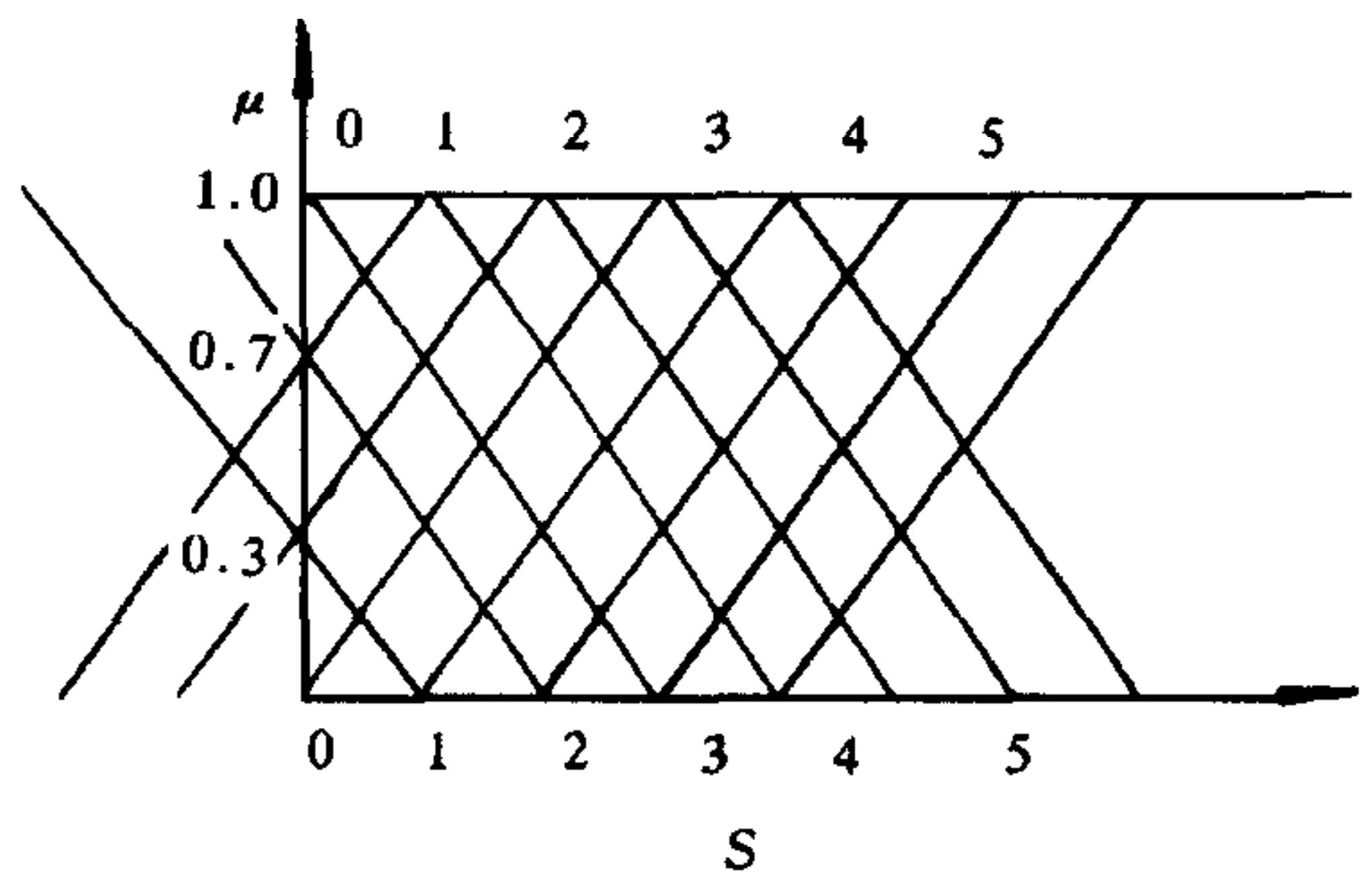


图 2 输入量 S 对应的隶属函数

2.1.2 二维输入量的模糊隶属函数描述与概念映射算法

映射为  $s(S_1, S_2) \rightarrow A_c(x_k)$ .

假设  $\bullet S_1 \in [0, q_1], S_2 \in [0, q_2];$

- $\bullet$  一般变量  $i \in [0, X_1], j \in [0, X_2]; X_1 = q_1 + C, X_2 = q_2 + C;$
- $\bullet$  令  $X_1/C, X_2/C$  分别都能整除;
- $\bullet$  中间变量  $i_0 = S_1, j_0 = S_2.$

与一维 Fuzzy CMAC 不同, 二维的模型隶属度, 以图形表示不直观, 它是以“对角线”元素来编码和处理感受野及其模糊隶属度的. 以  $C=5$  为例, 模糊隶属度  $\mu(k)$  值为:  $\mu$

$(0)=0,3, \mu(1)=0.7, \mu(2)=1.0, \mu(3)=0.7, \mu(4)=0.3. k=0,1,\dots,C-1.$

二维 Fuzzy CMAC 的概念映射编码参见图 3.

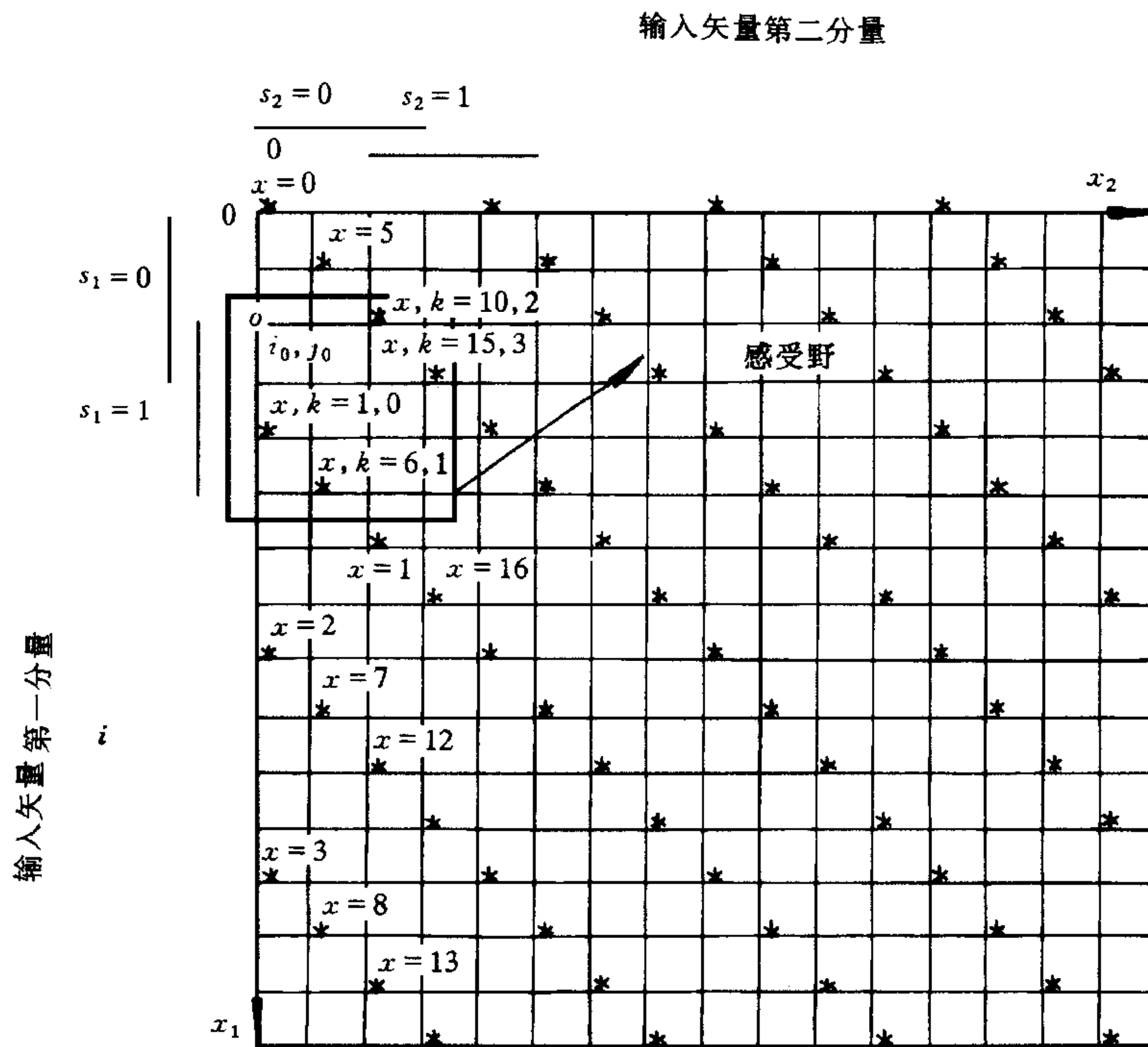


图 3 FCMAC 二维变量概念映射星“\*”图

可归纳出算法为

$$x = j \frac{X_1}{C} + \frac{i - f_{\text{mod}}(j, C)}{C}, \tag{3}$$

式中  $x$  为输入矢量在  $A_c$  中的地址,  $f \text{ mod}(a, b)$  为  $a$  对  $b$  的模运算.

图 3 中“\*”点的坐标方程为

$$i_0 - j_x = nC, n \text{ 为整数}. \tag{4}$$

由式(4)可得

$$n = \begin{cases} \frac{(i_0 - j_0)}{C} - 1, & \text{if}(i_0 < j_0) \\ \frac{(i_0 - j_0)}{C}, & \text{else} \end{cases}. \tag{5}$$

把式(5)代入式(4)得

$$j_x = \begin{cases} i_0 - (\frac{i_0 - j_0}{C} - 1)C, & \text{if}(i_0 < j_0) \\ i_0 - \frac{i_0 - j_0}{C}C, & \text{else} \end{cases}. \tag{6}$$

参照“\*”图 3 得

$$i_k = i_0 + k, k = 0, 1, \dots, C - 1, \tag{7}$$

$$j_k = i_k + k - \frac{i_k - j_0 + k}{C}C, k = 0, 1, \dots, C-1. \quad (8)$$

将式(7,8)代入式(5)得

$$x_k = j_k \frac{X_1}{C} + \frac{i_k - f_{\text{mod}}(j_k, C)}{C}, k = 0, 1, \dots, C-1, \quad (9)$$

### 2.1.3 $n$ 维输入量模糊隶属函数的描述与的概念映射算法

映射为  $s(S_1, \dots, S_n) \rightarrow A_c(x_k)$ ,

其中  $S_1, \dots, S_n$  分别为输入矢量  $s$  的量化值.

假设  $\cdot S_1 \in [0, q_1], \dots, S_n \in [0, q_n]$ ;

$\cdot$  一般变量:  $i_1 \in [0, X_1], \dots, i_n \in [0, X_n]$ ;  $X_1 = q_1 + C, X_n = q_n + C$ ;

$\cdot$  令  $X_1/C, \dots, X_n/C$  分别都能整除.

$\cdot$  中间变量:  $i_{10} = S_1, \dots, i_{n0} = S_n$ .

$n$  维的模糊隶属度与二维的编码相似. 它以欧氏空间的“对角线”元素来编码和处理感受野及其模糊隶属度的. 以  $C=5$  为例, 模糊隶属度  $\mu(k)$  值为  $\mu(0)=0.3, \mu(1)=0.7, \mu(2)=1.0, \mu(3)=0.7, \mu(4)=0.3. k=0, 1, \dots, C-1$ .

与二维相似,  $n$  维概念映射的“\*”图变为  $n$  维空间“\*”图, 据此可归纳出算法为

$$x_n = i_n \prod_{t=1}^{n-1} \frac{X_t}{C} + \sum_{p=2}^{n-1} \left( \frac{i_p - f_{\text{mod}}(i_n, C)}{C} * \prod_{s=1}^{p-1} \frac{X_s}{C} \right) + \frac{i_1 - f_{\text{mod}}(i_n, C)}{C},$$

$$k = 0, 1, \dots, C-1, \quad n = 1, \dots, N, \quad (10)$$

和

$$i_{n0} + C > i_{nk} = nC + k \geq i_{n0}, \quad k = 0, 1, \dots, C-1, \quad n = 1, \dots, N. \quad (11)$$

由式(11)可得

$$i_{n0} + C - k > i_{nk} - k = nC \geq i_{n0} - k, \quad k = 0, 1, \dots, C-1, \quad n = 1, \dots, N. \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\begin{cases} \frac{i_{n0} + C - k}{C} > n \geq \frac{i_{n0} - k}{C}, \text{ if } \{f_{\text{mod}}(i_{n0} - k, C) = 0\} \\ \frac{i_{n0} + C - k}{C} \geq n > \frac{i_{n0} - k}{C}, \text{ if } \{f_{\text{mod}}(i_{n0} - k, C) \neq 0\} \end{cases}. \quad (13)$$

把式(13)代入式(11)得

$$i_{nk} = nC + k. \quad (14)$$

把式(14)代入式(10)得

$$x_{nk} = i_{nk} \prod_{t=1}^{n-1} \frac{X_t}{C} + \sum_{p=2}^{n-1} \left( \frac{i_{p,k} - f_{\text{mod}}(i_{nk}, C)}{C} * \prod_{s=1}^{p-1} \frac{X_s}{C} \right) + \frac{i_{1k} - f_{\text{mod}}(i_{nk}, C)}{C}. \quad (15)$$

## 3 Fuzzy CMAC 的输出算法和学习算法

Fuzzy CMAC 的输出算法为

$$F(S) = \sum_{k=0}^{C-1} w(x_k) \mu(k). \quad (16)$$

Fuzzy CMAC 的学习算法为

$$\Delta w(x_k) = \beta(fd - F(S))\mu(k)/C . \tag{17}$$

### 4 仿真实验研究

一维 Fuzzy CMAC 学习函数:  $f(S) = \sin(\frac{2\pi}{360}S)$ ,  $S \in [0, 180]$ , FCMAC 的基本参数为:  $C=5$ ,  $\mu(0)=0.3$ ,  $\mu(1)=0.7$ ,  $\mu(2)=1.0$ ,  $\mu(3)=0.7$ ,  $\mu(4)=0.3$ ,  $\beta=0.7$ ,  $A_p=1024$ , 学习次数为 2, CMAC 的基本参数为  $\beta=0.7$ ,  $A_p=1024$ , 学习次数为 2. 仿真结果 FCMAC 的累积误差平方和为 0.01665; 而 CMAC 为 3.9739(参见图 4). 可见 FCMAC 学习收敛速度比 CMAC 快, 对参考值的逼近精度比 CMAC 的好.

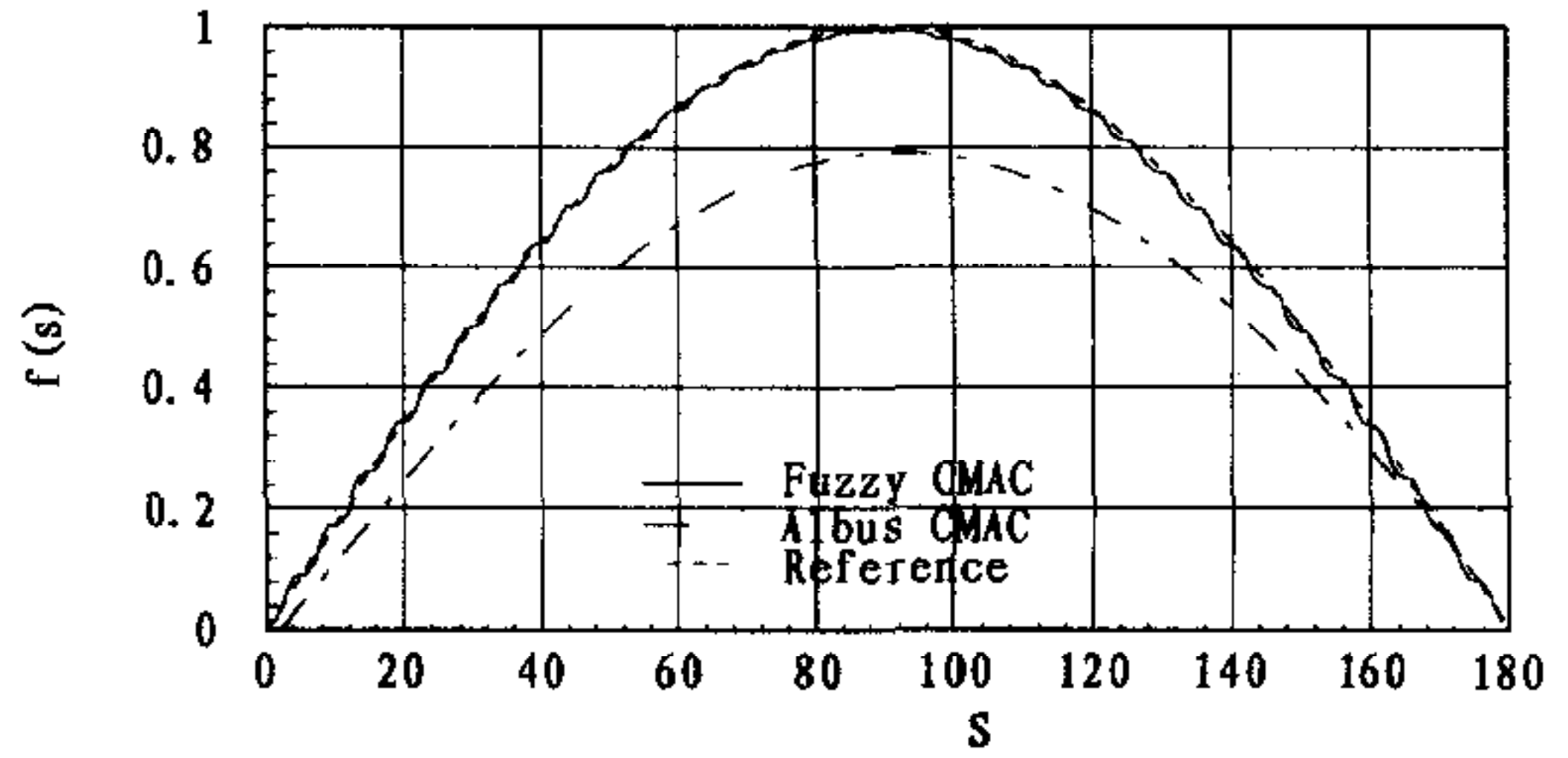


图 4 Fuzzy CMAC 和 CMAC 学习结果比较

学习模糊推理规则(模糊控制)见表 1.

FCMAC 基本参数为:  $C=5$ ,  $\mu(0)=0.3$ ,  $\mu(1)=0.7$ ,  $\mu(2)=1.0$ ,  $\mu(3)=0.7$ ,  $\mu(4)=0.3$ ,  $\beta=0.7$ ,  $A_p=1024$ , 学习次数为 1000, 仿真结果见表 1. FCMAC 的累积误差平方和为  $8.7e-07$ , 进行归类处理, 可达到满意效果.

表 1 模糊规则及其为 FCMAC 数据化规则表及学习结果

序号	模糊规则	数值化规则	学习结果
R1	if $x_1$ is $A_1$ , $y$ is $B_1$	if $s$ is 0, $f$ is 0	0.0004
R2	if $x_1$ is $A_2$ , $y$ is $B_2$	if $s$ is 1, $f$ is 1	1.0000
	...	...	
R10	if $x_1$ is $A_{10}$ , $y$ is $B_{10}$	if $s$ is 9, $f$ is 9	9.0000

### 5 结论

提出输入层具有一定隶属度的模糊小脑模型神经网络(Fuzzy CMAC), 它能更真实地描述客观世界. 给出了  $n$  维 Fuzzy CMAC 的算法. 仿真结果表明 Fuzzy CMAC 比 CMAC 具有如下优点: 学习收敛速度快得多, 还可以学习各种模糊规则, Fuzzy CMAC 比 AMAC 神经网络优越使 CMAC 成为它的特例.

### 参 考 文 献

- 1 Albus J S. A new approach to manipulator control, the cerebellar model articulation controller (CMAC). *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic System Measurement and Control*, 1975, **97**:220-227
- 2 Miller W T et al. CMAC: An associative neural networks alternative to back propagation. In: Proc. of IEEE, 1990, **78**(10):1560-1567

## FUZZY CMAC NEURAL NETWORK

ZHOU XUDONG WANG GUODONG

(Rolling Tech. & Tandem Automation state Key Laboratory, Northeastern University, Shenyang 110006)

**Abstract** A Fuzzy Cerebellar Model Articulation Controller (FCMAC) is proposed in this paper. A fuzzy membership function  $\mu(k)$  is introduced into the FCMAC's input layer. The FCMAC can describe the world more really than the CMAC can. The FCMAC algorithms for  $n$  dimensional problem are given. Simulation results show that the FCMAC has a faster convergence speed than CMAC. The FCMAC can also learn fuzzy reasoning rules (for fuzzy control). In a word, the FCMAC is a better neural network than CMAC, and it makes CMAC as the special case of FCMAC.

**Key words** Fuzzy cerebellar model articulation controller (Fuzzy CMAC), fuzzy CMAC algorithm, cerebellar mode articulation controller(CMAC), CMAC algorithm

**周旭东** 1963年生. 副教授. 1995年获北京科技大学工学博士学位. 现在东北大学从事博士后研究, 已发表学术论文十多篇. 目前主要研究领域为神经网络控制, 神经网络模式识别和遗传算法的理论与应用研究等.

**王国栋** 1942年生. 东北大学教授、博士生导师, 中国金属学会轧钢分会理事. 有著作《板形控制与板形理论》、《现代塑性加工力学》等, 译著《板带轧制理论和实践》等. 目前主要研究领域为轧制理论, 工艺和自动化, 人工智能在轧制过程中的应用等.

第 28 届面向对象语言与系统技术国际会议 (TOOLS Asia' 98)  
暨第 2 届中国面向对象技术及应用学术会议 (OOT China' 98)  
(1998 年 9 月 22~25 日, 中国北京)

### 征 文 通 知

TOOLS (Technology of Object-Oriented Languages and Systems) 是面向对象技术及应用方面的主要系列国际会议, 过去每年 3 次分别在澳大利亚、欧洲及美洲召开. 1997 年 9 月成功举办的 TOOLS Asia' 97 & OOT China' 97, 得到了国际上的广泛认可, 亚洲 TOOLS 已成为该系列会议的重要成员. 今年将继续由国家自然科学基金委员会协同国内外有关单位共同主办. 会议录用论文将收录在正式出版的论文集中.

#### 重要日期

征文截止日期: 1998 年 4 月 24 日 (收到日期) 录用通知日期: 1998 年 6 月 8 日 (发出日期)

提交正式论文截止日期: 1998 年 7 月 14 日 (收到日期)

#### 投稿地址

100080 北京 8718 信箱中国科学院软件研究所 TOOLS Asia' 98 程序委员会 李明树 博士

联系电话: (010)62635241 62561239 传真: (010)62562533

电子邮件: asia98@ox.ios.ac.cn