

文章编号: 1000-8152(2002)01-0065-03

具有内连接的指数多值双向联想记忆模型*

陈松灿 刘 征

(南京航空航天大学计算机科学及工程系·南京·210016)

摘要: C-C Wang 的多值指数双向联想记忆模型(MVeBAM)是一种高存储容量的联想神经网络. 本文在 MVeBAM 的基础上通过引入自相关项(或内连接)提出了一个新的具有内连接的多值指数双向联想记忆模型, 推广了 MVeBAM. 通过定义简单的能量函数证明了其同、异步方式下的稳定性, 从而保证了所学模式对成为被推广的 MVeBAM(EMVeBAM)的稳定点. 最后, 计算机模拟证实了 EMVeBAM 比 MVeBAM 具有更高的存储容量和更好的纠错性能.

关键词: (多值)双向联想记忆; 指数; 神经网络; 稳定性; 内连接

文献标识码: A

Exponential Bidirectional Associative Memory Model with Intraconnection

CHEN Songcan and LIU Zheng

(Department of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics · Nanjing, 210016, P. R. China)

Abstract: C-C Wang's multi-valued exponential bidirectional associative memory model (MVeBAM) is a neural network with higher storage capacity. In this paper, based on the MVeBAM, we propose a new multi-valued exponential bidirectional associative memory model with intraconnection (EMVeBAM) by adding an auto-correlation term (or an intraconnection) to the exponents, extending the MVeBAM. The stability of the proposed model is proven in synchronous and asynchronous update modes with a defined energy function, which ensures that the learnt patterns become stable points of the EMVeBAM. Finally, the computer simulation results verify that the EMVeBAM has higher storage capacity and better error-correcting capability than those of MVeBAM.

Key words: (multi-valued) bidirectional associative memory; exponent; neural networks; stability; intraconnection

1 引言(Introduction)

自从 Kosko^[1]提出双向联想记忆(BAM)模型以来, 众多研究人员研究了 BAM 的存储和纠错特性. 但采用相关存储规则的 BAM 的存储容量极为有限^[2,3], 因此研究人员(如 Y-F Wang et al^[4], Simpson^[5]和 Tai et al^[6])提出了许多方法来提高其存储容量和纠错性能, 并将其应用于故障隔离诊断等方面, 其中比较著名的是 Chieuh 和 Goodman^[7]提出的指数 Hopfield 联想记忆(exponential Hopfield associative memory). Chieuh^[8]还将上述模型推广到指数型相关联想模型(exponential correlation associative memory, 简称 ECAM), 它是一个利用指数函数扩大模式之间相关性的自相关器. 在此基础上 C-C Wang et al^[9]提出了多值指数双向联想记忆模型(MVeBAM), 并分

析了 MVeBAM 的存储容量及纠错性能. 但其对稳定性的证明仅适用于异步更新方式.

在本文中, 我们在考察了上述模型的基础上利用文[10, 11]的思想, 通过在指数项中引入自相关项(或内连接)提出了 MVeBAM 的一个扩展模型, 称为扩展的多值指数联想记忆模型(EMVeBAM). 进一步通过能量函数的引入证明了 EMVeBAM 在同、异步方式下的稳定性, 弥补了文[9]中缺乏同步更新下的稳定性证明的不足.

2 扩展的多值指数联想记忆模型(EMVeBAM)

在介绍所提出的 EMVeBAM 的联想规则和证明稳定性之前, 我们首先介绍 C-C Wang et al^[9]提出的多值指数联想记忆模型(MVeBAM), 以便更好的诠释我们提出的模型. 进而给出 EMVeBAM 的联想规

* 基金项目: 国家自然科学基金(69701004)和教育部青年骨干教师资助计划资助项目.
收稿日期: 2000-03-13; 收修改稿日期: 2000-09-11.

则和能量函数并讨论 EMVeBAM 的稳定性及其它特性.

2.1 多值指数联想记忆模型(MVeBAM)

假设我们有 M 个模式对或输入-输出对

$$\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_M, Y_M)\}, \quad (1)$$

其中

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in \{1, 2, \dots, L\}^n,$$

$$Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ip}) \in \{1, 2, \dots, L\}^p.$$

不失一般性,我们假定 n 等于或小于 p . MVeBAM 的联想规则是

$$y_k = H \left(\frac{\sum_{i=1}^M y_{ik} b^{-\|X_i - X\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|X_i - X\|^2}} \right), \quad (2a)$$

$$x_k = H \left(\frac{\sum_{i=1}^M x_{ik} b^{-\|Y_i - Y\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|Y_i - Y\|^2}} \right). \quad (2b)$$

其中 X 和 Y 是输入的模式, b 是一个正数; x_k 和 x_{ik} 分别是 X 和 X_i 的第 k 个分量; 相应的 y_i 和 y_{ik} 分别是 Y 和 Y_i 的第 k 个分量; $\|\cdot\|$ 为欧氏距离度量; $H(\cdot)$ 是如下的阶梯函数

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x < 1, \\ L, & x > D, \\ \left[\frac{L}{D} \cdot x + 0.5 \right], & \text{其它.} \end{cases} \quad (3)$$

这里 L 是阶梯函数级数, D 是阶梯函数间隔. 当 $D \rightarrow \infty$, 并且 $L \rightarrow \infty$ 时, $H(x) \approx x, x > 0$. 之所以使用阶梯函数是因为 (3) 式中的 x 可能不是正整数, 因此我们要将这个参数转换成距离最近的正整数.

对于联想记忆模型, 其稳定性证明是通过定义能量函数来进行的. 为了与我们所提模型稳定性证明方法的比较, 在此亦给出 MVeBAM 的能量函数及其稳定性证明, 证明分 X 到 Y 方向及 Y 到 X 方向. 对于 X 到 Y 方向定义能量函数 E_1 如下

$$E_1(X, Y) = \sum_{i=1}^M \|X - X_i\|^2 b^{-\|Y - Y_i\|^2}. \quad (4a)$$

Y 到 X 方向定义能量函数 E_2 如下

$$E_2(X, Y) = \sum_{i=1}^M \|Y - Y_i\|^2 b^{-\|X - X_i\|^2}. \quad (4b)$$

可以证明, 如果 b 足够大, 上面的能量函数能够保证将每一个存储的模式对保存到它的局部最小点^[9]. 在运算过程中 (4a) 和 (4b) 将被交替的重复调用, 直到 $E(X, Y)$ 收敛到其它的局部最小点.

2.2 扩展的多值指数双向联想记忆模型(EMVeBAM)

同样对于给出的 M 个模式对 $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_M, Y_M)\}$ 定义 EMVeBAM 的联想规则如下

$$y_k = H \left(\frac{\sum_{i=1}^M y_{ik} b^{-\|X_i - X\|^2 - \|Y_i - Y\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|X_i - X\|^2 - \|Y_i - Y\|^2}} \right), \quad (5a)$$

$$x_k = H \left(\frac{\sum_{i=1}^M x_{ik} b^{-\|X_i - X\|^2 - \|Y_i - Y\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|X_i - X\|^2 - \|Y_i - Y\|^2}} \right). \quad (5b)$$

其中 X 和 Y 是输入的模式. 事实上, (5) 式的导出是在指数项中增添了一自相关项, 相当于增加了内连接, 这种增加如同文 [10] 一样, 期望会增加存储能量及改进纠错性能. 在实际的运算中, 在初始时忽略在公式 (5a) 中的 Y 项可回忆得到 Y' . 然后将 X 和 Y' 联合代入 (5b), 回忆得到 X' . 此过程终止于最后的稳定状态.

下面给出 EMVeBAM 的稳定性证明, 与 C-C Wang et al^[9] 对 MVeBAM 的证明不同的是, 我们无须构造两个方向的能量函数, 仅需定义一个即可完成稳定性证明. 现定义其能量函数为

$$E(X, Y) = - \sum_{i=1}^M b^{-\|X - X_i\|^2 - \|Y - Y_i\|^2}. \quad (6)$$

为证 $E(X, Y)$ 在状态改变下是减少的, 设 (X, Y) 与 (X', Y) 分别是当前和下一个状态, 定义两者的能量差为 $\Delta_X E(X, Y)$

$$\begin{aligned} \Delta_X E(X, Y) &= E(X', Y) - E(X, Y) = \\ &= - \sum_{i=1}^M b^{-\|X' - X_i\|^2 - \|Y - Y_i\|^2} + \sum_{i=1}^M b^{-\|X - X_i\|^2 - \|Y - Y_i\|^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

由不等式 $b^y - b^x \geq (\ln b) \cdot b^x \cdot (y - x), \forall x, y \in \mathbb{R}$ 可知

$$\begin{aligned} \Delta_X E(X, Y) &\leq \\ &\ln b \sum_{i=1}^M b^{-\|X - X_i\|^2 - \|Y - Y_i\|^2} (\|X' - X_i\|^2 - \|X - X_i\|^2). \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} &\|X' - X_i\|^2 - \|X - X_i\|^2 = \\ &(X' - X_i)^T (X' - X_i) - (X - X_i)^T (X - X_i) = \\ &\sum_{k=1}^n [(x'_k - x_{ik})^2 - (x_k - x_{ik})^2] = \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^n [(x'_k - x_k)(x'_k - x_{ik}) + (x'_k - x_k)(x_k - x_{ik})].$$

代入到(8)式,得

$$\begin{aligned} \Delta_Y E(X, Y) &\leq \\ \ln b \sum_{k=1}^M & \left[\sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2} (x'_k - x_k)(x'_k - x_{ik}) + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2} (x'_k - x_k)(x_k - x_{ik}) \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2} (x'_k - x_{ik})(x'_k - x_k) =$$

$$(x'_k - x_k) \sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2}.$$

$$\left[x'_k - \frac{\sum_{i=1}^M x_{ik} b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2}} \right].$$

设 $\sigma = \frac{\sum_{i=1}^M x_{ik} b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2}}{\sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2}}$, 则 $x'_k = H(\sigma)$, 代

入(9)式得

$$\Delta_X E(X, Y) \leq$$

$$\ln b \sum_{k=1}^M (x'_k - x_k) \sum_{i=1}^M b^{-\|X-X_i\|^2 - \|Y-Y_i\|^2} [(x'_k - \sigma) + (x_k - \sigma)]. \quad (10)$$

我们对上式分三种情况讨论:

情形 1 $-\frac{1}{2} < x_k - \sigma \leq \frac{1}{2}$.

根据(5)式,此时 $x'_k = x_k$,所以 $\Delta_X E(X, Y) = 0$.

情形 2 $x_k - \sigma > \frac{1}{2}$.

根据(5)式,此时 $x'_k < x_k$,而根据 $H(\cdot)$ 函数的定义有 $-\frac{1}{2} < H(\sigma) - \sigma \leq \frac{1}{2}$,所以 $x'_k - \sigma > \frac{1}{2}$, $\Delta_X E(X, Y) < 0$.

情形 3 $x_k - \sigma \leq -\frac{1}{2}$.

根据(5)式,此时 $x'_k \geq x_k$,而 $x'_k - \sigma \leq \frac{1}{2}$,所以 $\Delta_X E(X, Y) \leq 0$.

3 模拟实验及结果分析 (Simulation experiment and result analysis)

为了比较 MVeBAM 和 EMVeBAM 的存储容量和纠错性能,我们进行了如下模拟实验.

实验 1 存储容量比较.设置网络参数: $b = 2$, $n = p = 8, L = D = 8$,模式数 $M = 300, 400, 500, 600, 800, 1000$.比较正确回忆率,所得结果示于图 1.

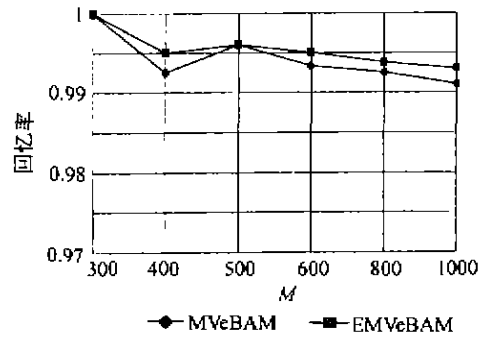


图 1 回忆率与M的关系

Fig. 1 Relation between recall probability and M

从图中可以看出 EMVeBAM 优于 MVeBAM.

实验 2 纠错性能比较.对输入向量的某一位添加随机噪声. $n = p = 8, L = D = 8, b = 2.0$.

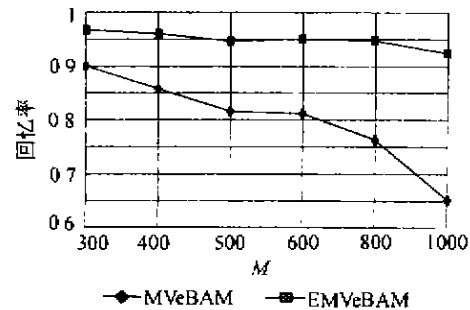


图 2 有一位噪声数据时回忆率与M的关系

Fig. 2 Relation between recall probability and M while there is one-bit noise data

实验 3 b 对纠错性能的影响.对输入向量的某一位添加随机噪声. $n = p = 8, L = D = 8, M = 1000$.

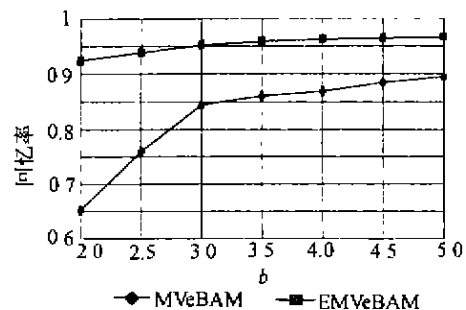


图 3 有一位噪声数据回忆率与b的关系

Fig. 3 Relation between recall probability and b while there is one-bit noise data

从以上的实验结果可以看出,我们提出的 EMVeBAM 比 C-C Wang et al^[9]提出的 MVeBAM 有更大的存储容量和更强的纠错能力.而且我们给出的 EMVeBAM 稳定性的证明方法具有一定的通用性,可以在此基础上做进一步推广,从而得出一系列类似的双向联想记忆模型.

(下转第 72 页)

- [7] Piel-Lahanier H and Walter E. Bounded-error tracking of time-varying parameters [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1994, 39(8): 1661 - 1664
- [8] Wen Changyun. A robust adaptive controller with minimal modifications for discrete time-varying systems [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1994, 39(5): 987 - 991
- [9] Tsu-Tian Lee and Yuh-Feng Tsay. Analysis and optimal control of discrete linear time-varying system via discrete general orthogonal polynomials [J]. Int. J. Control, 1986, 44(5): 1427 - 1436
- [10] Chang Rong-Yeu, Yang Shwu-Yien and Wang Maw-Ling. A new approach for identification of time varying systems via generalized orthogonal polynomials [J]. Int. J. Control, 1986, 44(6): 1747 - 1755
- [11] Department of Computer Mathematics of Nanjing University. Method for Numerical Approximation [M]. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
- [12] Wang Deren and Yang Zhonghua. Introduction of Numerical Approx-

imation [M]. Beijing: High Education Press, 1978 (in Chinese)

本文作者简介

郭健 1974年生, 1997年在南京理工大学自动化系获学士学位, 目前在南京理工大学自动化系攻读博士学位, 主要研究领域: 预测控制, 小波神经网络等. Email: g jg j @ 263.net

陈庆伟 1963年生, 高级工程师, 1988年于南京理工大学自动化系获硕士学位, 目前在南京理工大学自动化系攻读博士学位, 主要研究方向为智能控制系统及数字交流伺服系统的设计

朱瑞军 1968年生, 副教授, 1994年在东北师范大学获硕士学位, 1998年在东北大学获博士学位, 1998年~2000年在南京理工大学从事博士后研究工作, 主要研究领域为: 非线性系统的状态估计, 智能控制等.

胡维礼 1941年生, 教授, 博士生导师, 1965年毕业于清华大学自动控制系, 主要研究方向为: 鲁棒自适应控制, 非线性控制及智能控制理论在伺服系统中的应用等

(上接第 67 页)

参考文献(References)

- [1] Kosko B. Bidirectional associative memory [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1998, 18(1): 49 - 60
- [2] Hecht-Nielsen R. Neurocomputing [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990
- [3] Haines K and Hecht-Nielsen R. A BAM with increased information storage capacity [A]. In Proc. International Joint Conference on Neural Networks[C], San Diego, CA, USA, 1988, 1: 181 - 191
- [4] Wang Y F, Cruz Jr J B and Mulligan Jr J H. Two coding strategies for bidirectional associative memory [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1990, 1(1): 81 - 91
- [5] Simpson P K. Higher-ordered and intraconnected bidirectional associative memory [J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(3): 637 - 653
- [6] Tai H M, Wu C H and Jong T L. Higher-order bidirectional associative memory [J]. Electron. Lett., 1989, 25(21): 1424 - 1425
- [7] Chueh T D and Goodman R M. High-capacity exponential associative memory [A]. In Proc. International Joint Conference on Neural

Networks [C], San Diego, CA, USA, 1988, 1: 153 - 160

- [8] Chueh T D. Recurrent correlation associative memories [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1991, 2(2): 275 - 284
- [9] Wang C C, Hwang S M and Lee J P. Capacity analysis of the asymptotically stable multivalued exponential bidirectional associative memory [J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(3): 733 - 743
- [10] Chen Songcan, Gao Hang and Yan Wei. Improved eBAM [J]. Electron. Lett., 1997, 33(3): 223 - 224
- [11] Chen Songcan, Gao Hang. Improved exponential bidirectional associative memory and its performance evaluation [J]. J. of Software, 1999, 10(4): 415 - 420

本文作者简介

陈松灿 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究兴趣: 图象处理, 模式识别及智能系统. Email: cansc@nuaa.edu.cn

刘征 1975年生, 硕士, 主要研究方向: 图象处理, 模式识别. Email: mgsk@263.net