

多状态、多阈值神经网络模型的光电混合实现*

黄达诠 黄海云

(浙江大学电子物理技术研究所, 杭州 310008)

摘 要 提出了一种采用高分辨率液晶电视(LCTV)实现 Hopfield 神经网络多值算法的光电系统。文章给出了平面多状态、多阈值的全互连 Hopfield^[1] 神经网络模型, 并采用该系统对颜色进行了联想和记忆的实验。初步的实验结果可以证实: 此种高分辨率液晶电视神经网络系统是可行的。

关键词 神经网络, 光互连, 多值, 权重, 阈值。

1 引 言

众所周知, 任何导线都不可避免地存在一定的电阻和电容。电子电路的这一固有局限性极大地限制了电子互连带宽的提高, 并引起时钟扭歪(clock skew), 这是超大规模集成电路(VLSI)技术和电子并行处理系统难以逾越的障碍。而另一方面, 巨量并行性(massive parallelism)和高度互连则是光子系统固有的突出优点。这使得光子系统具有极大的空间和时间带宽乘积, 易于实现具有高度互连的并行系统。本文介绍一种具有新系统结构的模拟光计算处理系统, 它包含有巨量并行的算术运算和互连, 亦即光学神经网络(Optical Neural Network)。

本文提出一种多状态、多阈值全互连神经网络模型。用神经元的每种状态表示一种颜色, 并根据三基色原理, 将任意颜色分解为三种基色的组合。从而大大提高了网络识别颜色的能力。网络由 18×18 个全互连神经元组成, 其中每个神经元有多种状态。用平面微透镜阵列(PMLS)实现光学互连。这种组合的光学神经网络具有很强的颜色识别能力, 对于自然景物识别等彩色图象处理是十分有益的。

2 多值 Hopfield 神经网络

2.1 多值 Hopfield 神经网络模型

假设一 N 值 M 值神经网络, 共有 N^2 个神经元(本文 $N = 18 \times 18$), 每个神经元可取 M 种状态(本文 $M = 16$) a_1, a_2, \dots, a_m , 这里 $a_k = (2k - M - 1)/2$, ($k = 1, 2, \dots, M$)。在全互连系统中, N 个神经元就有 N 个互连。假设有 P 个 N 元素 M 种状态的模式存储在这样的神经

* 国家自然科学基金资助的课题。

收稿日期: 1994年12月3日; 收到修改稿日期: 1995年7月9日

网络中，其中每个模式记为 $s^u, u = 1, 2, \dots, P$ 。根据 Hopfield 模型，其互连权重 T_{ij} 为

$$T_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^P s_i^u s_j^u, \quad T_{ij} = 0 \tag{1}$$

这里要求 P 种模式是独立的，非相关的，亦即

$$P\{s_j^u = a_k\} = 1/m \tag{2}$$

若选取 P 模式之一并在其上加入噪声作为输入模式，则神经网络中每个神经元状态按下式变化：

$$u_i(t + 1) = \sum_{j=1}^N T_{ij} s_j(t), \tag{3}$$

$$s_i(t + 1) = h[u_i(t + 1)] \tag{4}$$

这里 $h[\]$ 为阶梯函数，用作多状态阈值过程。Bijiani^[3] 证明了只要输入模式与理想模式之间不同状态的神经元个数小于 $(M - 1)N/M$ ，就可恢复出原来的理想模式。

2.2 二维多值 Hopfield 神经网络模型^[2]

显然，对于一个二维 $M \times N$ 神经网络，其神经元状态之变化可按下式表示为

$$s_{ik}(t + 1) = h\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ikij} s_{ij}(t)\right), \tag{5}$$

其中，

$$T_{ikij} = \begin{cases} 1/N \sum_{u=1}^P s_{ik}^u s_{ij}^u & l \neq i \text{ 或 } k \neq j \\ 0 & l = i \text{ 且 } k = j \end{cases}$$

式中 s_{ij} 代表 $N \times N$ 神经网络中第 ij 个神经元的状态。 T_{ikij} 为一四维互连权矩阵，为了光学上的实现，需将其分解为二维矩阵阵列 $T_{11ij}, T_{12ij}, \dots, T_{NNij}$ ，其中每一个子矩阵为一二维 $N \times N$ 矩阵，如图 1 所示。由此，一个四维矩阵表示成了一个 $N^2 \times N^2$ 的二维矩阵。

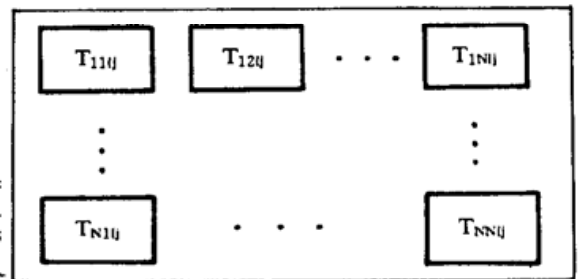


Fig. 1 From 4D matrix transfer to matrix

2.3 计算机模拟

为了验证上述算法的可行性，首先用 3 状态和 5 状态进行了计算机模拟。为了方便，输入模式为 50 个元素的一维向量，采用一维多状态神经网络算法((3)和(4)式)。模拟结果表明：对于 3 状态或 5 状态神经网络只要输入模式和理想模式的海明距离小于 33 或 40 就可恢复出原来的理想模式，容错率分别达到 66.7% 和 80%，表明其容错率随神经元状态数的增加而增加。其收敛速度也较快，一般只需 3 至 5 个循环。给出 5 状态，5 阈值神经网络计算机模拟结果如下，其中中心阈值 $u_0 = 0$ 不变，正向阈值 u_1 和 u_2 及负向阈值 v_1 和 v_2 的值一并给出。5 状态网络存储的理想模式为：

- { -1, 0, 1, 1, 1, 0, -1, -2, 1, 0, 0, -1, -1, -2, -2, -1, 0, 0, 0, -1 },
- { 1, 2, 1, 0, 0, -1, -2, -1, 0, -1, -2, -1, 0, 1, 2, 1, 0, -1, 0, -1 },
- { 0, 1, 0, 0, -1, -2, -2, -1, 0, 1, 2, 1, 1, 0, -1, -2, -1, 0, 0, -1 },
- { 0, 1, -2, -1, -2, -2, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 2, 2, 1, 0, 0, -1, 0 },

输入的噪声模式为 {0, 1, -2, -1, -2, -2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0} 在不同阈值下的检索结果如下：

$u_1 = 13$	$u_2 = 26$	$v_1 = -14$	$v_2 = -29$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	0	0	0	1	2	2	0	0	0	-1	0

$u_1 = 30$	$u_2 = 60$	$v_1 = -23$	$v_2 = -47$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

$u_1 = 34$	$u_2 = 68$	$v_1 = -24$	$v_2 = -48$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

$u_1 = 34$	$u_2 = 68$	$v_1 = -24$	$v_2 = -48$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

$u_1 = 34$	$u_2 = 68$	$v_1 = -24$	$v_2 = -48$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

$u_1 = 34$	$u_2 = 68$	$v_1 = -24$	$v_2 = -48$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

$u_1 = 34$	$u_2 = 68$	$v_1 = -24$	$v_2 = -48$																
0	1	-2	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	0	0	1	2	2	1	0	0	-1	0

3 高分辨率液晶电视神经网络

本实验系统为一18×18的16值Hopfield光学神经网络系统，其中神经元的状态分别以

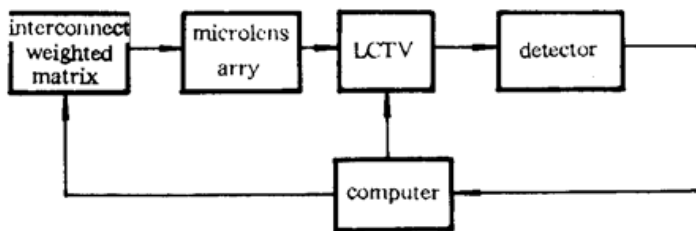


Fig. 2 Chart of colors optical neural network

16种颜色来表示。颜色具有稳定性好，可分辨性强及可运算的特点，实验证明，用颜色来代表神经元的状态对实现多状态、多阈值的光学神经网络不失为一种可行和有效的方法。考虑到液晶显示技术的最新进展，其分辨率和颜色的解析度都有大幅度的提高，例如内置薄膜式液晶显示器(TFT)，可显示真彩色图案，对比度高达30:1，并且具有连续可调的16级灰度。本系统采用CASIO 12.7 cm 高分辨率液晶电视显示输入模式。系统框图如下图2所示。其中，互连权矩阵(IWM)由计算机显示器(CRT)来显示。由于学习过程是在计算机上进行并显示在显示器上，因此可以很方便地增加、删减或改变存储模式，或者改变网络学习算法而不影响光路系统。因此本系统为自组神经网络系统。输入的带有噪声的图象显示在高分辨率液晶电视上，中间一个18×18的微透镜阵列以产生互连权矩阵和输入模式间的全互连，微透镜阵列将每一个互连权矩阵的子矩阵成象在高分辨率液晶电视的输入模式上，这样就可实现^[4]

度的提高，例如内置薄膜式液晶显示器(TFT)，可显示真彩色图案，对比度高达30:1，并且具有连续可调的16级灰度。本系统采用CASIO 12.7 cm 高分辨率液晶电视显示输入模式。系统框图如下图2所示。其中，互连权矩阵(IWM)由计算机显示器(CRT)来显示。由于学习过程是在计算机上进行并显示在显示器上，因此可以很方便地增加、删减或改变存储模式，或者改变网络学习算法而不影响光路系统。因此本系统为自组神经网络系统。输入的带有噪声的图象显示在高分辨率液晶电视上，中间一个18×18的微透镜阵列以产生互连权矩阵和输入模式间的全互连，微透镜阵列将每一个互连权矩阵的子矩阵成象在高分辨率液晶电视的输入模式上，这样就可实现^[4]

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ikij} s_{ij}(t)$$

微透镜光路系统原理如图3所示：高分辨率液晶电视的输入图象紧接着由一透镜成象在彩色CCD上。CCD采集到的图象信号送入计算机进行阈值(阶梯)处理，再将结果送至高分辨率液

晶电视,此过程循环往复,直到检索出原来的理想模式。

因为互连权矩阵和输入模式都由计算机产生并控制,而且当互连改变时调整光路一般来说是很困难的,而调整互连权矩阵却相对容易得多,这实际上也就改变了神经元之间的互连,可见本系统确为可编程、自适应的神经网络系统。

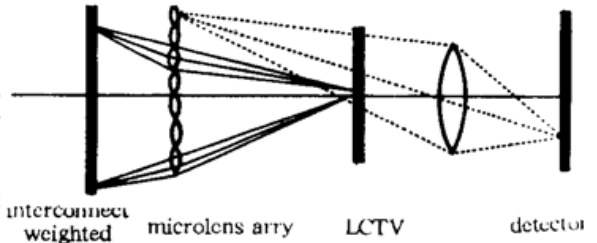


Fig. 3 Design for optical system of neural network interconnect weighting

由前所述, $a_k = (2k - M - 1)/2, k = 1, 2, \dots, M$ 。显然,这些状态中有 $M/2$ 种负值状态。如何用光学方法实现这些负值状态的关键是设置一系列颜色与这些状态一一对应。注意到网络正、负状态的对称性或互补性,为了方便颜色间的运算正确反应神经元状态值之间的运算关系,各颜色之间也必须具有互补性。以 16 状态神经网络为例,其状态的集合表示为:

$$a = \left\{ -\frac{15}{2}, -\frac{13}{2}, -\frac{11}{2}, \dots, \frac{13}{2}, \frac{15}{2} \right\}$$

另一方面,在计算机视频图形阵列图形显示模式 12 下调色板红(R)、绿(G)、蓝(B)的缺省设置中,若在 16 种颜色中选择两种颜色,将其 R、G、B 的值相加,可以发现:

	R	G	B	
Color(0) + Color(15) =	2A	2A	3F	= P
Color(1) + Color(14) =	2A	2A	3F	= P
.....				
Color(7) + Color(8) =	2A	2A	3F	= P

上式中右边为常量 P,在颜色表中代表白色。因此有

$$\text{Color}(m) = P - \text{Color}(n), \quad m + n = 15$$

利用这种互补关系,可以得到神经网络状态值与颜色之间映射关系为:

$$a_k = \text{Color}(k - 1), \quad k = 1, 2, \dots, 16$$

由于计算机中的调色板可以通过编程加以调整,因此上述映射方法也适用于一般的多状态值的光学实现。

本文在实验中对计算机显示卡在图形模式 12 下产生的 16 种颜色进行了联想和识别。先将由这 16 种颜色所组成的模式由(1)式存入计算机中,然后输入加有噪声的模式。结果表明:对于那些亮度强的颜色,如黄色、青色、绿色等识别效果很好,循环速度快,一般 3 至 5 次即可完成,而且容错率也很高,与理论模型和计算机模拟结果基本相符。但对那些亮度较小的颜色,如灰色、红色等结果不太理想,原因是显示器的亮度低,这些颜色不足以透过高分辨率液晶电视、透镜等组成的光路系统。拟解决的办法是用另一块高分辨率液晶电视来显示互连权矩阵,并在背后用强的平行光源照射,预计会解决这个问题。

结 论 本文提出了平面多状态、多阈值的 Hopfield 神经网络模型,并在此基础上提出了可对颜色进行联想、记忆的可编程、自适应的彩色光学神经网络。实验结果与理论分析和计算机模拟结果符合得较好。随着高分辨率液晶电视显示分辨率的提高,完全可将本系统推广为具有更多的神经元和状态的神经网络系统。例如,256 状态的神经网络就可识别 256 种颜色,这已基本上可满足人眼对颜色的要求。由于网络的训练和学习采用的 Hebb 学习规则对存储模式和互连权矩阵有较严格的要求,例如,为使网络可靠地收敛于稳定状态要求互连权矩阵是实对称矩阵,存储模式之间要求独立、正交。这就大大增加了实现的能度。因此还有必要

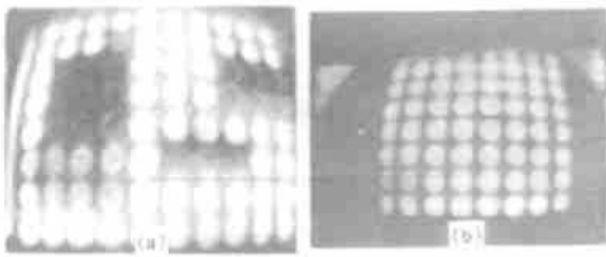


Fig. 4 (a) Input mode of the yellow with noise, (b) Recovery result of Fig. 4(a)

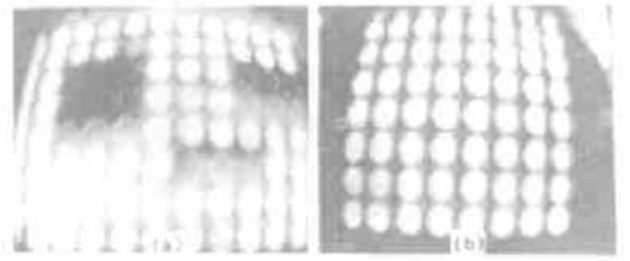


Fig. 5 (a) Input mode of the blue-green with noise, (b) Recovery result of Fig. 5(a)

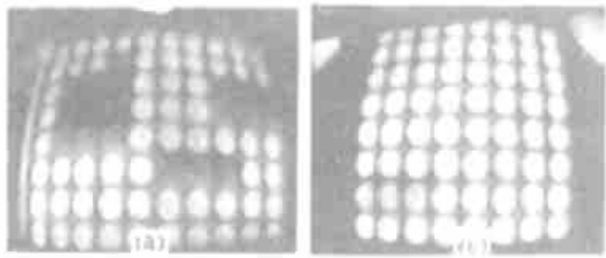


Fig. 6 (a) Input mode of the green with noise, (b) Recovery result of Fig. 6(a)

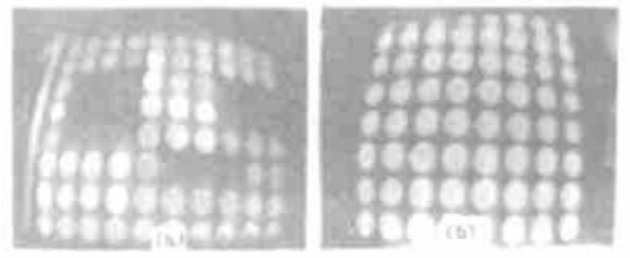


Fig. 7 (a) Input mode of the blue with noise, (b) Recovery result of Fig. 6(a)

进一步研究新的更为有效的多状态、多阈值神经网络模型。

本系统是进行神经网络算法研究的一个很好的实验系统。当改变神经网络学习算法或神经元之间的互连时不用改变光路系统即可进行。这对研究更为有效的多值神经网络算法提供了必须的实验条件和手段。

参 考 文 献

- [1] J. J. Hopfield, Neural network and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Nat. Acad. (USA)*, 1982, 79(8): 2554~2558
- [2] Tzi-Dar Chiueh, Hung-Kai Tsai, Multivalued associative memories based on recurrent networks. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1993, NN-4(2): 364~366
- [3] R. Bijjani, P. Das, An M-ary neural network model. *Neural Computation*, 1990, 2: 532~551
- [4] Kenjiro Hamanaka, Takashi Kishimoto, Microclones for optical neural network. *Optoelectronics-Devices and Technologies*, 1993, 8(1): 111~1123

Opto-Electronics Hybrid Implementation of a Multi-State and Multi-Threshold Neural Network Model

Huang Daquan Huang Haiyun

(*Electrophysics Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310008*)

(Received 3 December 1994; revised 9 July 1995)

Abstract A new kind of optical neural network for associative colors using high resolution liquid crystal televisions (LCTV) is proposed and constructed. This new model adopts the multivalued neural algorithm based Hopfield feedback associative memory model. The system design consideration and an experimental demonstration of the LCTV neural network are provided.

Key words neural network, optical interconnections, multivalued, interconnection weight matrix, threshold.