

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0062-05

洗牌型光电混合神经网络实验系统*

许 锐 黄达谗 李志能

(浙江大学信息与电子工程系 , 杭州 310027)

摘要 : 在研究洗牌网局部互连光学实现问题的基础上 , 采用洗牌型图样间联想模型建立了具有完整的加权互连、求和、非线性处理及反馈功能的光电混合神经网络实验系统 , 进行了 8×8 数字样本的光学联想识别。实验结果证实了洗牌网理论的可行性和洗牌型图样间联想模型光学实现的优越性。

关键词 : 光学神经网络 ; 洗牌 ; 图样间联想 ; 光电混合神经网络

中图分类号 : TP183 文献标识码 : A

1 引 言

受超大规划集成电路 (VLSI) 技术固有的时钟扭曲限制 , 大规模的电子神经网络系统目前还难以实现。光学神经网络 (ONN) 以其高度并行、快速处理大量信息和空间自由互连的特点 , 有望突破这一限制 , 从而愈来愈受到重视^[1~4]。但光学技术完成减法和取阈等操作较电子学方法困难 , 目前光电子技术所能提供的可编程灵巧点阵 (SPA) 最大为约 100×200 , 由此可制作的最大的全互连光学神经网络仅为 $100 \sim 200$ 个神经元量级 , 远低于人脑神经系统的水平。黄达谗^[5]提出了洗牌型光学神经网络模型 , 旨在通过改进网络拓扑结构以得到较大的规模。虽然牺牲了网络的全局并行性 , 但由于采用了层内局部互连和层间非局部互连的级联构成等效全互连 , 从而将可实现的光学神经网络规模极限扩大到 104 神经元量级。图 1 示出了具有 8 个神经元的一维洗牌型神经网络的构造 , 图中为三层结构。具有 N 个神经元的一维洗牌网一般为 $m = \log_2 N$ 层。我们先后创建了洗牌型反向传播 (Back Propagation) 网络^[6]和洗牌型图样间联想 (PS-IPA) 网络模型^[7] , 都获得了很好的模拟结果 , 并将洗牌网推广为 α -洗牌型神经网络 , 进一步优化了其应用。本文建立了洗牌型神经网络的光电混合实验系统 , 并采用洗牌型图样间联想模型进行光学联想识别 , 以验证洗牌网的可行性 , 探讨光学实现的技术问题、探索实现大规模光学神经网络的新途径。

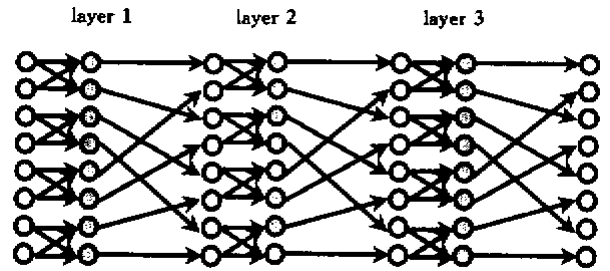


Fig.1 1-D perfect shuffle type of neural network with 8 nodes

2 洗牌型图样间联想神经网络模型

洗牌型图样间联想是将图样间联想算法 (IPA)^[8]改造并应用于洗牌网结构而建立的。下面介绍用于二维 2-洗牌型神经网络的改造后的图样间联想算法。

设共有 M 个样本存入网络 , 第 m ($m = 1, 2, \dots, M$) 个样本第 i 行、第 j 列元素为 a_{ij}^m , T_{ijkl} 表示输入节点 x_{kl} 到输出节点 y_{ij} 的连接权 , 令

$$A_{ij} = \sum_{m=1}^M a_{ij}^m, \quad B_{ijkl} = \sum_{m=1}^M a_{ij}^m a_{kl}^m, \quad (1)$$

则

$$\left. \begin{aligned} T_{I+i, J+j, I+k, J+l} &= 1, \\ B_{I+i, J+j, I+k, J+l} &= A_{I+k, J+l} \text{ 且 } A_{I+k, J+l} \neq 0; \\ T_{I+i, J+j, I+k, J+l} &= -1, \\ B_{I+i, J+j, I+k, J+l} &= 0 \text{ 且 } A_{I+i, J+j} \neq 0 \text{ 且 } \\ &A_{I+k, J+l} \neq 0; \\ T_{I+i, J+j, I+k, J+l} &= 0, \text{ other.} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里 $I, J = 0, 2, 4, 6, \dots, N-2$; $i, j, k, l = 0, 1$ 。

洗牌型图样间联想模型采用 $-1, 0, 1$ 值的三态

* 教育部骨干教师资助计划及浙江省自然科学基金资助课题。

权,且互连权矩阵(IWM)分布稀疏,对互连权矩阵实现器件的动态范围和分辨率的要求都很低。此外,模拟识别显示,洗牌型图样间联想具有良好的联想计算能力,较传统的霍普菲尔德(Hopfield)联想和单层全互连的图样间联想算法网络功能都有改善,是较理想的光学神经网络联想模型;其构型简洁,易于实验实现。这方面的讨论详见文献[7]。

3 洗牌型神经网络局部互连的光学实现

局部互连是在每个局部互连单元中实施全互连,各单元间无连接,其光学互连结构与全互连大不相同。依照局部互连原理,四节点输入、四节点输出、两两局部互连(即2节点的互连单元)的一维网络的透镜实现的紧凑式光路如图2(a)所示:各互连

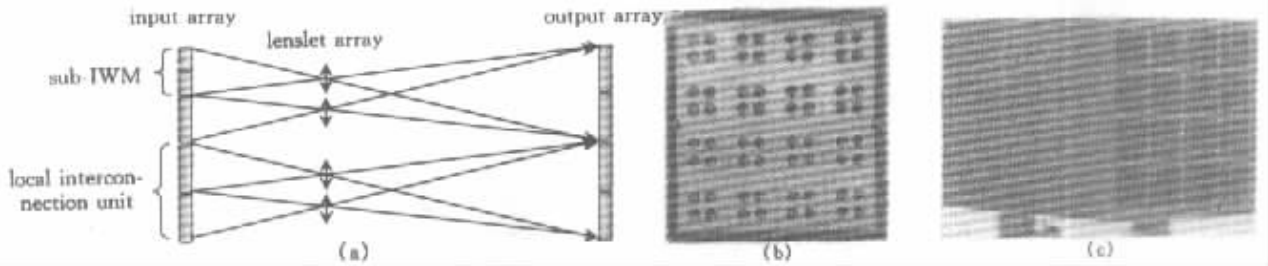
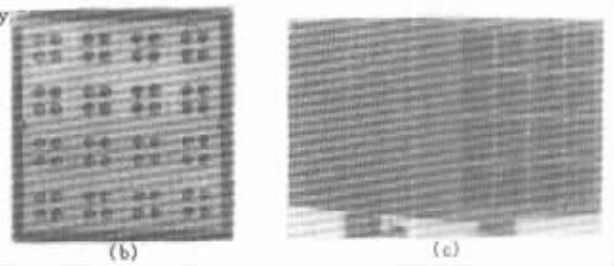


Fig. 2 (a) Optical local interconnection of 1-D network ;(b) 2×2 local interconnected lenslet with 8×8 array ;
(c) The baffle grid body used in the experiment

现实中的图像是连续的,因此希望尽量采用连续的输入。如图2(a), 2×2 局部互连网络中,系统成像放大率 β 取为2时,连续输入通过透镜阵列获得大小不变的连续的输出。若 β 取大于2,单元间成像输出将发生混叠;若 β 取小于2,输出像离散而不再均匀、连续。实验中,取 $\beta = 2$,所用透镜焦距为 $f = 50 \text{ mm}$,计算得系统物距 $U = -75 \text{ mm}$,像距 $V = 150 \text{ mm}$ 。实验所用透镜直径为6 mm,单元内透镜中心距7 mm,据此从光路推算得单个输入节点尺度为 $10.5 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$ 。实际的 8×8 阵列二维系统中,输入、输出阵列均为 $84 \text{ mm} \times 84 \text{ mm}$;为方便实验校准,透镜阵列也制成相同尺度[见图2(b)]。

局部互连时,各节点通过非对应透镜成的像大部分落在其它单元的输出域上,干扰输出。理论上可以通过计算成像角、焦距和景深设计选用特定的透镜和光学结构,使由输入节点发出的光线主要通过对应透镜成像。但这样的设计比较难,为了保证足够的光强(即输入节点光斑不可过小),不得不采

用大的像距。考虑到选用透镜的光学参数和输入屏的最大显示、以及实验用光学平台的面积,我们采用了较简单的做法,即在透镜阵列后端各局部互连单元间设置挡光板,二维的互连网络中形成挡光格栅。格栅或挡光板的最短长度可计算求得。实验中为了避免像差的影响,互连权矩阵各权之间都彼此分隔,因而多数相邻输出节点之间也存在间隙,呈均匀的、近似而非严格的连续。实验中为了接收的方便,将格栅四周封闭并定制为像距长,同时限制格栅挡板厚度不超过像点间距;如图2(c)为实验拍摄的格栅装置实物。经互连系统成像、叠加而得的输出,互连单元内与输入子矩阵排序呈中心对称反转。



用大的像距。考虑到选用透镜的光学参数和输入屏的最大显示、以及实验用光学平台的面积,我们采用了较简单的做法,即在透镜阵列后端各局部互连单元间设置挡光板,二维的互连网络中形成挡光格栅。格栅或挡光板的最短长度可计算求得。

实验中为了避免像差的影响,互连权矩阵各权之间都彼此分隔,因而多数相邻输出节点之间也存在间隙,呈均匀的、近似而非严格的连续。实验中为了接收的方便,将格栅四周封闭并定制为像距长,同时限制格栅挡板厚度不超过像点间距;如图2(c)为实验拍摄的格栅装置实物。经互连系统成像、叠加而得的输出,互连单元内与输入子矩阵排序呈中心对称反转。

全互连系统中,常在输出之后用单透镜或电子器件再作一次反转。这样,局部互连中则另需一个透镜阵列,因为局部互连输出是局部反转而整体正序的。因此,我们采用了更为简便、精确的预先将所有子矩阵反序的方法。对二维的 2×2 单元输出的局部互连结构,子权矩阵调整以输入第1行、第1列

的节点(0,0)所对应的子互连矩阵为例,如图3(a)所示为对角置换。每个子矩阵都做相同的调整,透镜阵列所成像即为与输入阵列同序的加权和输出。

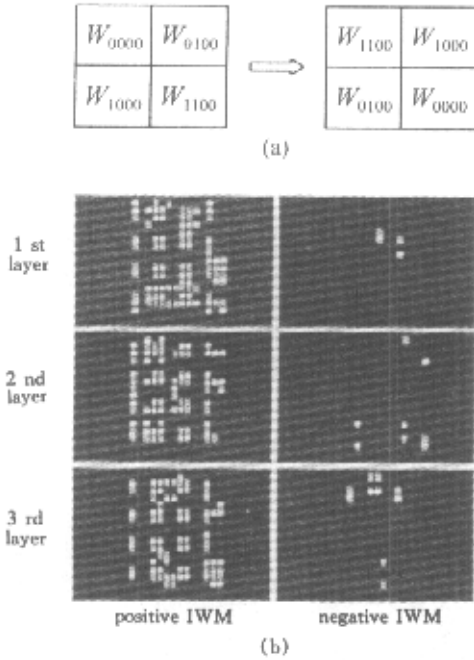


Fig.3 (a) Rearrangement of sub-IWM ;(b) IWMs of the multi-layer PS-IPA model presenting in experiment

对网络的 1、0、-1 三态的权,我们采用分时赋予正、负权矩阵得到正、负加权和,再由计算机执行相减得出总加权和的办法。实验以 8×8 点阵“0”~“9”10 个数字样本的洗牌型图样间联想存贮识别为例,图 3(b)为实验拍摄的由电脑屏显示网络调整后的三层正、负权矩阵。三层的总非零权数目为 266 个, 8×8 点阵的单层全互连图样间联想则需非零权 779 个,而 Hopfield 联想约需 4096 个。可见由于图样间联想算法和洗牌网结构的引入,提高了神经元/权重比,网络的权数大为减少,使其易于光学实现。

4 系统构造与实验

图 4(a)为实验系统装置示意图。先将输入图像与互连矩阵作与运算,将结果直接显示于一普通计算机 PC_1 的显示屏作为网络输入, PC_1 同时用作系统光源。与传统的空间光调制器相比,电脑显示器分辨率高(一般不低于 800×600 像素),动态范围大(至少 256 个灰度阶)且连续可调,与 PC 机相连后可随时调整更换输入阵列和互连矩阵,是理想经济的可编程空间光调制器,联机方式下不需外加光源。原计划用层叠的一普通电脑阴极射线示波

管屏与一手提电脑液晶屏分别显示输入阵列和互连矩阵,阴极射线示波管屏同时用作系统光源,为进一步简化系统和提高光能利用率,实验中将这两层编码合并为一层,直接显示加权输入。

我们实验的规模不大(8×8),预处理所需计算量非常小。即使对较大的规模,预处理都为换位、取阈或矩阵间元素对元素的简单代数运算,所需计算量与实现神经网络功能核心的加权互连的矩阵相乘运算相比仍为小量,而后者是通过光学并行运算来完成的。

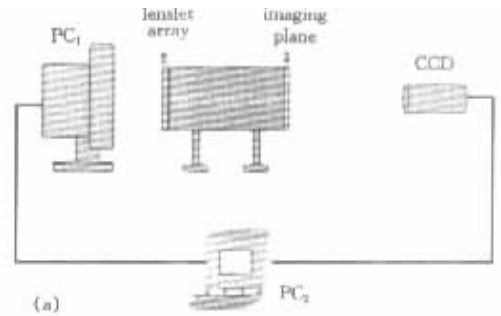


Fig.4 (a) Schematic diagram of optoelectronic implementation of perfect shuffle type of neural networks ;(b) Experiment of the first layer's interconnecting by the positive IWM with standard sample "0" as input

与输入屏相隔物距处为透镜阵列,栅体固定于透镜阵列之后并于栅体另一端固定像面,像面后方置电荷耦合接收器件,接收器件与 PC_2 、 PC_2 与 PC_1 都相互连通。这样,输入样本图像加权后经透镜阵列在栅体内完成互连,叠加成像于像面,再由 CCD 摄像机接收送入 PC_2 进行相减、取阈等处理,处理结果反馈至 PC_1 作为下一层输入,结合下一层权矩阵,开始新一层神经计算。

对 8×8 阵列的 10 个数字样本进行实验联想识别,采用三层的洗牌型图样间联想网络为演示模型。又分时进行正、负权互连,一次完整的识别共需在上述互连体系中运行 6 次。同层的正、负互连完成后,

由 PC_2 作整合、取阈(阈值恒为零)工作,并执行一次二维的洗牌操作;变换结果即是下一层的样本输入送入 PC_1 形成反馈。网络最后一层互连整合、洗牌后的结果就是最终的识别输出。

依照以上实验方案,我们对“0”~“9”10个数字的所有标准样本和一些噪声样本作了光学识别,实验结果良好。图 4(b)为标准样本“0”作输入第一层正权互连的实验实况,照片右方的 PC_2 显示的是 CCD 此刻的探测结果。整个实验在暗室中进行。

图 5 给出了几组实验结果及其对应的计算机模

拟结果:图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)中分别给出了标准样本“8”输入的第一层加权和输出、5%噪声样本“0”输入的第二层加权和输出、15%噪声样本“5”输入的第三层加权和输出以及它们的最终识别结果;图 5(d)图给出实验与模拟的灰度阶参照, 2×2 局部互连的洗牌型图样间联想网络中,单向加权和共 5 个灰度等级(0~4)。由图可见,实验与模拟情况完全吻合:各节点加权和的大小以输出光斑的灰度深浅得到了准确的表达,整合、取阈后即得到与模拟结果相同的判断输出。

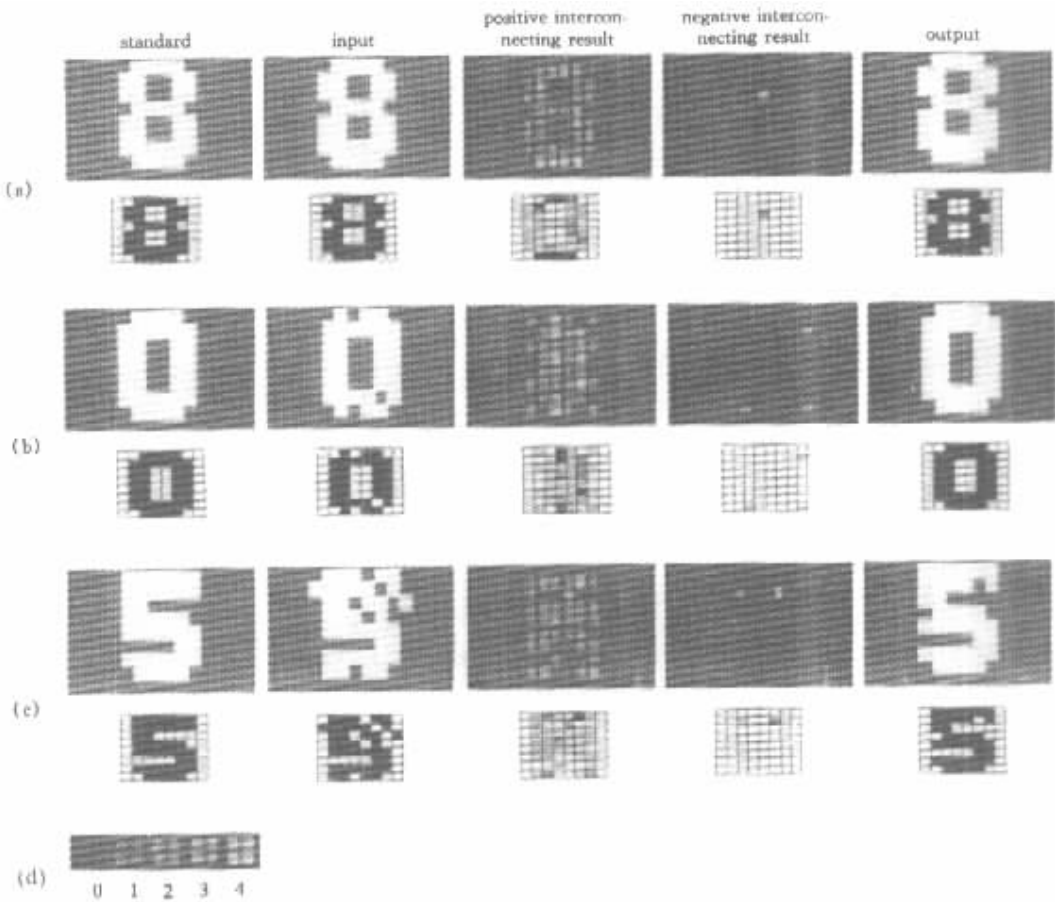


Fig.5 Comparison between experimental results(upper) and computer simulations(lower). (a) First layer's interconnecting results and the final output with standard "8" as input;(b) Second layer's interconnecting results and the final output with 5% noised "0" as input;(c) Third layer's interconnecting results and the final output with 15% noise "5" as input;(d) Grey level references

实验成功地肯定了洗牌网理论的可行性。同时,实验结果表明洗牌型图样间联想神经网络模型具有较强的计算能力和抑制噪声的能力,是一种利用较少的互连和权重实现大规模多层光学神经网络的有效途径。由于网络采用了局部互连和洗牌结构,其扇入/扇出数小,极大地降低了如能量传递、成像均匀性及像差等网络对硬件实现的要求。

实验系统中洗牌过程是在计算机内完成的。洗牌术是对阵列整体的操作,但仅限于点到点的一一置换,不是神经网络意义上的互连也不存在加权问题,无论用光学还是电子学方法较全互连都更容易实现。洗牌与局部互相结合,只要光源功率足够大或直接用电子方法洗牌,可以换取简单全互连难以实现的大规模互连。

除洗牌交换之外,实验中正、负加权求和的整合与非线性取阈操作都是由计算机来完成,而非光学实现的。如采用灵巧像素阵列(SPA)器件,以上神经元功能都可由灵巧像素执行,即构成所谓“光电子神经网络”。1993年Hinton等已经报道了具有 128×256 单元的灵巧像素阵列阵列^[9]。由此可以制作的最大的普通全互连神经网络仅为 11×16 ,而可实现的最大洗牌型全互连神经网络可达 64×128 。从而使实现 10^4 量级的实用化光电子全互连神经网络成为可能。关于洗牌型神经网络的数字光电实现,文献[5]中作了详细的介绍。

结论 在研究光学局部互连原理、抑制串扰技术及成像设计的基础上,建立了具有完整的加权互连、求和、非线性处理及反馈机制的洗牌型光电混合神经网络实验系统,并采用洗牌型图样间联想模型进行了数字图像的联想识别实验。实验与计算机模拟结果很好地吻合,充分证实了洗牌网的可行性和优越性,以及洗牌型图样间联想模型优良的光学神经网络性能。

参 考 文 献

- [1] Wang Yongjing, Zhang Yanxin, Guo Zhuanyun. Optical implementations of neural networks: A review. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 1997, **26**(4): 289 ~ 297 (in Chinese)
- [2] Huang Daquan, Huang Haiyun. Opto-electronics hybrid implementation of a multi-state and multi-threshold neural network mode. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1996, **16**(6): 772 ~ 776 (in Chinese)
- [3] Zhang Yanxin, Chang Shengjiang, Shen Jinyuan *et al.*. Reconfiguration of topology in an opto-electronic neural system. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1998, **18**(10): 1306 ~ 1310 (in Chinese)
- [4] Cheng Huiquan, Liu Liren, Li Guoqing *et al.*. Optical pattern recognition based on hybrid interpattern associative neural network. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1998, **18**(10): 1311 ~ 1316 (in Chinese)
- [5] Huang Daquan. Free space optical interconnected perfect shuffle type of neural network module. *Optoelectronic Technol.*(光电子技术), 2000, **20**(1): 21 ~ 26 (in Chinese)
- [6] Huang Daquan, Xu Rui. A 2-D perfect shuffle type of neural network module suitable for optical implementation. *Optoelectronic Technol.*(光电子技术), 1999, **19**(4): 243 ~ 252 (in Chinese)
- [7] Xu Rui, Huang Daquan, Li Zhineng. A perfect shuffle type of interpattern association optical neural network model. *Acta Photonica Sinica*(光学学报), 2000, **29**(1): 27 ~ 33 (in Chinese)
- [8] Lu Taiwei, Xu Xin, Wu Sudong *et al.*. Neural network model using interpattern association. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(2): 284 ~ 288
- [9] Hinton H S, Lentine L A. Multiple quantum well technology takes SEED. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1993, **9**(2): 12 ~ 18

The Implementation of a Perfect Shuffle Type of Optoelectronic Neural Network System

Xu Rui Huang Daquan Li Zhineng

(Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 29 September 2000; revised 8 January 2001)

Abstract: Based on the study of optical implementation of the perfect shuffle local interconnecting, a hybrid opto-electrical perfect shuffle type of neural network experiment system is constructed with full functions of weighted interconnecting and summing, nonlinear processing and feeding back. Optical associative recognizing experiments for numeral patterns in 8×8 pixels are proceeded employing the PS-IPA algorithm. The experimental results show a good agreement with theoretical simulations and the feasibility and superiority of the shuffle network theory is then confirmed. And large-scale perfect shuffle type of practical ONNs with 10^4 neurons are expected utilizing smart pixel array device.

Key words: optical neural networks; perfect shuffle; interpattern association; hybrid opto-electrical neural network