

# 中华博士 园地

这是本刊特为海内外正在就读和学成立业的博士、博士后青年学者们开辟的一片科普园地。深学浅著是一门德识、慧学、素质修养的学问。你们的新知识、新调研、新观察、新目光、新展望,能够用尽可能深入浅出、通俗流畅的语言,汇报给祖国人民、家乡父老子弟乡亲们吗?中华博士园地,乃耕耘忠孝之地,科教兴国、民族昌盛之地。要用慈母听得懂的语言,写出你们的心声!

## 光学神经网络的现状与进展

许 锐 黄达诠 李志能

(浙江大学信电系电子信息技术研究, 杭州 310027)

**摘 要** 通过介绍两种典型的光学神经网络 ONN(Optical Neural Network)——透镜阵列互连网络和全息互连网络,讨论了当前 ONN 的现状、存在问题及发展趋势。还介绍了图样间联想和洗牌网等 ONN 模型中的新算法和新拓扑结构。

**关键词** 光学神经网络 神经网络 光互连 光计算

### 0 引 言

人工神经网络凭借大量的简单信息处理单元——神经元及其巨量互连,实现高速、并行运算。自本世纪 40 年代神经网络概念面世以来,人们提出了上百种模型,其中一些成熟可行的方案,已广泛应用于军事、商业、管理、科教等领域中的模式识别、信号分析、机器人控制及优化和规划等。光学以其高时空

带宽积和高度并行、快速处理大量信息的特点与神经网络的机理有着内在的一致性<sup>[1]</sup>,成为实现神经网络的理想选择;但光学系统演绎双极性权和阈值处理等非线性操作较电子系统困难。另一方面,纯电子系统由于 VLSI 低的抗电磁干扰造成“时钟扭曲”,难以实现具有 1000 个以上神经元的网络,大规模神经网络的实现更多地依赖于与光学方法的结合。因而当前大多数的 ONN 采用光电混合系统<sup>[2]</sup>。80 年代中期至今,这一领域的研究者们一直致力于实现大规模、自适应 ONN,并取得了长足的进展。下面将简要介绍当前 ONN 系统的主要结构、存在问题及发展趋势。

### 1 光学神经网络系统的构造

虽然一维神经元交叉互连的结构一直有人采



许 锐 1994 年毕业于西安交通大学物理系应用物理专业,获理学学士学位。1997 年获西安交通大学电信学院物理电子与光电子学专业硕士学位。现于浙江大学信电系电子信息技术研究攻读博士学位。研究方向为神经网络、光计算与光学神经网络。

用,但二维神经元阵列间自由空间光互连结构才是 ONN 的主流,它充分利用了光束各通道间无干扰及大规模高速并行的优越性。图 1 和图 2 所示是这一类 ONN 系统中具代表性的两种模型。

图 1 所示的系统中光源发出的光首先照射作为网络互连权矩阵  $IWM\{t_{mij}\}$  的液晶显示器 LCTV1,经散射体 D、透镜阵列及显示网络输入  $\{x_{ij}\}$  的 LCTV2,实现光学加权求和。其结果  $\{r_{mn}\}$  由成像透镜送 CCD 光电探测器接收,最后送入计算机做阈值处理。处理结果通过计算机再次显示于输入屏构成反馈;同时系统输出反馈至 LCTV 1 以调整互连权矩阵进行下一步训练或处理。也有在 CCD 探测器与 PC 机间另设阈值电路<sup>[3]</sup>。这类模型的主要特点是用透镜阵列完成光学互连。

图 2 所示的 ONN 模型采用全息元件实现光互连:输入样本成象于液晶光阀 LCLV,读出激光束经

该空间光调制器编码后由偏振分束器(PBS)投射到互连权矩阵全息片实现加权求和,经傅氏透镜及滤波片滤波后成象于 CCD 象面,将光信号转化为电信号后送入计算机处理,结果反馈给 CRT。

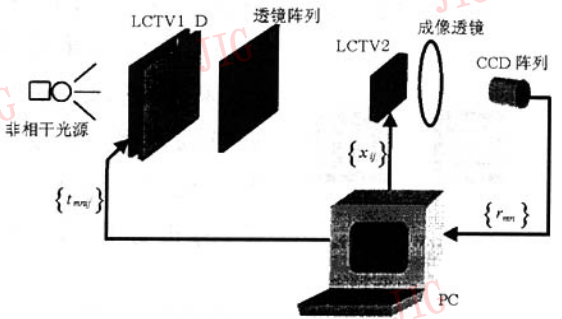


图 1 2-D 混合型 ONN 模型 I:用液晶显示器与透镜阵列实现

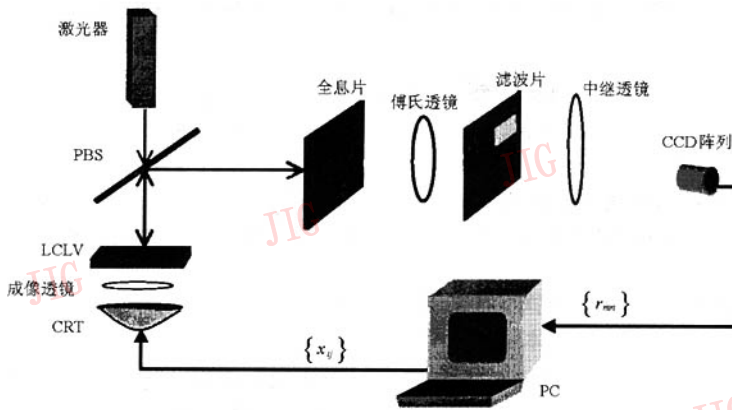


图 2 2-D 混合型 ONN 模型 II:用全息元件与 LCLV 空间光调制器实现

## 2 光学神经网络的器件实现

ONN 系统实现中的关键器件包括:输入、输出器件,光互连器件,神经网络权矩阵及取阈器件等。以下结合所提供的两种典型结构逐一介绍。

### 2.1 编码与互连器件

传统的空间光调制器(SLM),如 LCLV 和 90 年代以来采用较多的可编程液晶显示器是编码神经元阵列和 IWM 的两类主要器件。实现互连的器件也主要有两种:全息元件和透镜阵列,全息元件同时具有编码 IWM 的功能。

图 2 所用的 LCLV 是常见的记录神经元阵列的空间光调制器,在相干光系统中对光学图象做偏振调制。全息元件作为实现光互连的重要手段,通过微光栅衍射控制光路,完成预定连接,多采用计算机产生的全息图(CGH)。CGH 诞生于 1965 年<sup>[4]</sup>,原理是根据光波的数学描述,由计算机设计并控制绘图仪等记录模拟的干涉图样,理论上可以实现任意波前的变换。由于其方便灵活、空间带宽积大并易于复制,实现互连有一定优越性。但一般的平面全息图件生高阶衍射,衍射效率不高,而且互连度大时存在严重的串扰。相息图由于只记录光波位相,照明后产生单一的波面,无共轭象或多余的衍射级次,衍射效率很高且避免了串扰,但制造也相对复杂(高质的相息

图要求高速、大容量的计算机和高分辨率的电子束、离子束刻蚀成图设备)。目前为止,相息图只能由计算机控制产生。通过改进编码方法提高全息互连的精确度和效率的研究已有不少,如 Gerchberg-Saxton、模拟退火、自由搜索算法等<sup>[5]</sup>。图 2 中互连的具体实现是:输入阵列的每一元素照射全息面中相应的一块子全息图(Subhologram),出射到输出平面中所有与该输入元有连接的点。所有输入点的衍射光迭加获得加权和,再在频域中滤掉低频信息,取出所需的衍射级次,由延迟透镜重新转换为加权和输出的空间分布。设  $\{u_{ij}\}$ 、 $\{v_{mn}\}$  ( $i, j, m, n = 1-N$ ) 分别代表  $N \times N$  阵列输入输出向量,  $\{t_{mij}\}$  代表四维的互连矩阵;全息片由二维  $N \times N$  个子全息图组成,每一子全息图为  $N \times N$  阵列,其分布如图 3 所示。这种模型的不足是通常全息片只能记录固定的 IWM,不便调整;全息互连必须用相干光源。

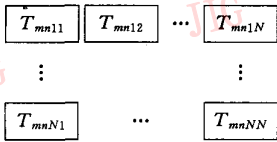


图 3 全息面上 4-D IWM 的分布示意

透镜阵列互连模型的结构有多种,如图 5 所示系统中,层叠的液晶显示器 1、2 分别显示输入图象与 IWM,非相干光照射下形成加权的光场,由透镜阵列完成各子互连权矩阵输出的叠加并成像到探测器<sup>[8]</sup>;由于不必使用大孔径成像透镜,系统结构紧凑化,光能利用率和输出象差得到改善。这里权平面分布同图 3。高胜全等<sup>[7]</sup>用与图 1 相似的结构,用液晶光阀阵列(LCSA)记录输入向量,采用同轴光成像技术,有效减少了离轴偏差,进一步提高了光能利用率,但需在透镜阵列与输入平面间再放置一大孔径成像透镜。还有采用相位阵列分束器代替透镜阵列做互连元件<sup>[9]</sup>,克服了透镜阵列加工和装校的困难,同时解决了子透镜象差和通光孔的衍射限制空间信道容量密度提高的问题,使系统具有增大信道容量的潜力,但目前相位分束器产品的阵列规模较小。新近提出的光栅-透镜组合阵列的设计<sup>[10]</sup>,利用自变换函数的放大 Talbot 自成像效应实现光互连,系统简单、易于调整。在微光学元件制造领域,液晶微透镜阵列的发展对光互连机制具有突破性意义<sup>[11]</sup>;传统元件采用固态或聚合物通过精密的离子交换技术制成;用向列型液晶材料制作的光学元件具有高的

图 1 的系统用视频显示器或液晶电视屏(LCTV)记录 IWM 和神经元阵列,配合透镜阵列完成加权互连。这一模型于 90 年代初提出<sup>[6]</sup>,由于液晶显示器动态范围大(256 灰度级)且连续可调,连于计算机后可随时任意调整更换显示内容,而且经济方便,是较为理想的可编程空间光调制器,其缺点是分辨率不如全息元件高。显示器 1 上 IWM 的编码与全息片相仿,只是每一子互连阵描述的是对应于一固定输出元的所有连接,其分布如图 4 所示。 $N \times N$  个互连阵散射后由对应的  $N \times N$  个子透镜成像于输入屏,在成像透镜后生成  $N \times N$  个输出加权和。液晶显示和透镜阵列都可在白光下工作;微光学方法一般设计简单,光能利用率高,缺点是难于实现大规模 ONN。国内已有报道  $32 \times 32$  可并行工作的透镜阵列<sup>[7]</sup>,而全息片可存储的权数相对大得多。

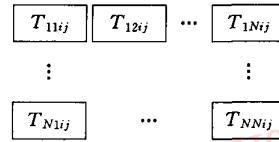


图 4 LCTV 1 上 4-D IWM 的分布示意

双折射,平行板电极结构中,利用液晶分子重取向产生的光电效应控制入射光强及相位;孔式电极的电场作用下折射率梯度可连续变化,因而液晶微透镜阵列具可变焦性能,包括在光轴和焦平面上取焦点<sup>[12]</sup>。从而使实现大规模、自适应 ONN 成为可能。

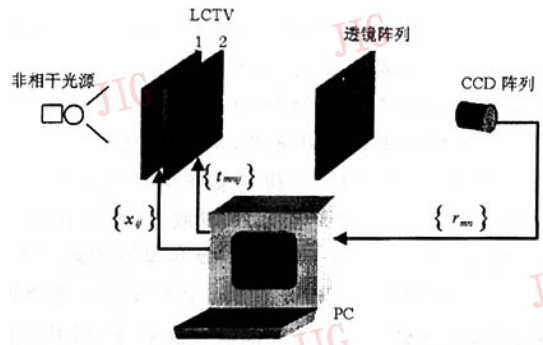


图 5 模型 I 的改进结构

## 2.2 双极性权的实现与非线性取阈

互连和矩阵、向量求积是光学实现神经网络的主要优点之一,但对加权输出的处理不及电子系统方便。上述模型中将光学矩阵运算后的处理工作统

统送计算机完成,实际系统有多种光电混合或光学方法实现正、负权相减及非线性取阈操作。

双极性权和光学相减的实现,使相干光系统中可以采用相编码或偏振编码技术<sup>[13,14]</sup>,还可与振幅调制结合使用<sup>[15]</sup>,但都不可避免会使系统复杂化。非相干的光电混合 ONN 系统中,常用的方法是依次使用正、负权矩阵分别得到正、负加权,再通过电子线路或计算机做减法操作<sup>[16]</sup>,其缺点是增加了系统处理过程,损害了系统的并行性。也有对波长和光束方向编码的方法<sup>[17]</sup>,加入相关的偏置光并通过 LCLV 实现光的正、负态,再用光栅或微透镜阵列将同组的正负光叠加在一起实现光学并行相减。多灰度权可以采用大动态范围的液晶显示器。此外也有人提出利用波长特性做彩色编码<sup>[18]</sup>,作者用 In-Tl-Na 荧光灯光源,用楔形体散射三原色到彩色胶卷记录多灰度 IWM,通过彩色编码的权矩阵得到的输出单元是由 3 个波长参数分别表征各级正、负权的 6 个光斑,由计算机做统计相减。应该说,光学或光电混合实现双极加权还没有很理想的方案,除了不得不借助计算机或电子线路,光学方法往往使系统更加复杂,加大了实用难度。

ONN 的非线性取阈手段一般有以下几种:类似于光学相减,直接把加权求和的结果通过探测器送入计算机处理是常规方法之一,但由于光路必须被截断,容易引发瓶颈问题,这在权平面固定的多层网中尤为突出,同时还需要补充光源与其他光学元件,加大了系统规模。用液晶光阀实现光取阈摆脱了电子学手段<sup>[19]</sup>,但也要中断光路并需要各层增设激光光源来读取取阈结果,加之 LCLV 本身比较昂贵,还难以广泛应用。电子阱技术可实现快速取阈<sup>[20]</sup>,但网络每层都需要红外光源,离实用较远;1994 年 Alain 等用 LCTV、CCD 和光束采样器制成的光电取阈集成元件<sup>[21]</sup>,通过反馈完成取阈,构造相对简单,且不阻断光路、不需附加光源并保持传输不变,具有一定实用价值。作者用这一器件实现了竞争算法的取阈。文献<sup>[22]</sup>采用非晶硅液晶光阀,利用非晶硅的光电导特性和液晶的光电特性,通过新型控制电极,实现纵向控制的透射型取阈操作,具有分辨率高(45lp/mm 以上)、并行处理信息量大等特点,且适于各种光源系统、使用简便,是较好的光学阈值处理元件。

近年来灵巧象素器件 (SPD) 逐渐成熟<sup>[23,24]</sup>,愈来愈受到重视。其核心是利用 VLSI 技术在传统的

Si、GaAs 或 InGaAs 芯片上,键合表面发射激光光源、光调制器和接收器,将光子探测器、非线性取阈等内部逻辑控制单元、发光阵列以及空间光调制器有机地集成在一起,构成可编程灵巧象素器件,以完成一个神经元的全部功能<sup>[25]</sup>。由此构造的可编程灵巧点阵 (SPA) 表征的神经元向量直接接收光学输入,在内部逻辑控制单元实现双极性求和、取阈、放大等操作,再转换为光学状态输出,即为网络的终端输出。高度集成的 SPA 可以独立完成 ONN 加权互连的全部后处理,是当前 ONN 发展的主要方向。目前光电子技术已可以提供  $128 \times 256$  点阵的 SPA,可以胜任近距离和中等距离的并行光互连和光计算,但实现更大规模的 ONN 系统尚有困难。

多量子阱器件垂直腔表面发射激光 (VCSEL) 是半导体与光电子技术的最新成果<sup>[26-28]</sup>。VCSEL 器件能产生单模、高功率、低阈值的棉阵激光阵列,不需预偏置即可获得高调制速率且驱动电压低,通过芯片键合技术与大数值孔径微透镜阵列实现短距离光互连,在光通信、数字光计算与光互连等领域有着广泛的应用前景<sup>[29,30]</sup>。国外许多相关机构都在进行或准备开展 VCSEL 的研究制造。

### 3 光学神经网络的新模型

ONN 的研究者们不断改进系统器件,已可以较好地实现某些典型的神经网络模型,如 Hopfield<sup>[31]</sup>、多层联想存储<sup>[32]</sup>、自组织无教训练<sup>[33]</sup>、多层自适应网络<sup>[34]</sup>等;也尝试着完成一些较复杂网络及某些改进模型以提高光学系统的工作性能,如多种可学习网络<sup>[35-39]</sup>、双向联想网络<sup>[40]</sup>、竞争网<sup>[21,41]</sup>、哈明网<sup>[42]</sup>、模糊神经网络<sup>[43]</sup>、主元投影模型<sup>[44]</sup>、终端吸引子识别技术<sup>[45]</sup>、分维傅立叶变换 (FRT) 模型<sup>[46]</sup>等。对光学神经网络的学习能力、光学实现引入的限制与误差及光网络的动力学行为,在实验和理论两方面已有专门的研究<sup>[47-49]</sup>。此外,与完善光学系统使其适应已有的神经网络模式不同,不少人更多地考虑改进已有的或创建新的网络结构或算法,使其适合光学实现,在现有的光电子技术水平和硬件规模下即可实现大规模、自适应 ONN。

#### 3.1 ONN 算法的改进与创新

光学神经网络出现不久,H. J. White 等便在使用全息互连实现离散 Hopfield 模型的设计中提

出<sup>[34]</sup>,在互连权矩阵  $T$  上加一偏置常数使全部互连为正,同时抬高阈值使等效于原模型,从而避免了负权的编码与求和,方便光学实现。延续这一思路,在一维神经元网中,利用偏置项使互连权具有依赖输入的分布式背景,结合依赖输入的动态取阈值,一定程度上提高了网络性能<sup>[50]</sup>。I. Shariv 对离散 Hopfield 模型进行优化<sup>[51]</sup>,去掉了所有正权,改造为只含有抑制性权即全负权的网络,经证明识别率有所提高。为了解决多灰度权实现的不便,有研究者将 Hopfield 模型的 IWM 压缩到 0、1、2 或 -1、0、1 三态<sup>[52]</sup>。还有人采用非对称截值点的截值模型,使 IWM 成为二值化 (1, 0, -1) 的矩阵<sup>[53]</sup>。但众所周知,传统 Hopfield 联想用向量自身外积构造的 IWM,本身识别、联想能力和存储容量都非常有限,样本间非线性独立时更是如此,它的光学网络也存在这个问题;而神经网络领域对 Hopfield 模型的各种改进方案往往导致光学实现复杂化或难于实施。

1990 年, Taiwei Lu 等提出了图样间联想方法 (IPA)<sup>[16]</sup>。与 Hopfield 型样本自身的联想方式不同, IPA 方法强调各样本之间的联想。它根据图样的独有与共同特征部分的关系构造权矩阵,用图 6 中的 3 个互相重叠的样本演示它的学习逻辑: A、B、C 3 个样本的公共部分(图 6 中的区域 7)将受到所有区域中活性输入的激励作用;样本 B 与 C 并排除 A 之后的交集(区域 6)将受到区域 1、3 中活性元素的激励及区域 2 中活性元素的抑制,并与其它区域中元素无关,区域 5、4 中情况类推;样本 C 的独有区域 3,只接受来自本区域中活性元素的激励和区域 2、1、4 中活性元素的抑制,并与其它区域中元素无关,区域 1、2 中情况类推。IPA 采用二值样本 (1, 0) 和三态权 (1, 0, -1), IWM 分布稀疏,存储容量和识别准确率较传统联想有很大提高,而且易于光学实现。随后他们将 IPA 运用于傅立叶变换展开后的潜样本,构造了旋转和平移不变的光学识别模型<sup>[54,55]</sup>,并已研制成便携式全息光学神经网络识别

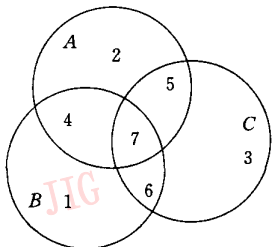


图 6 3 个相互重叠样本的 IPA 逻辑分析示意

系统运用于军事目标探测<sup>[56]</sup>。Chii-Maw 等于 1994 年将 IPA 权矩阵改造为单极性 (1, 0), 进一步优化了网络性能并更易于光学实现<sup>[57]</sup>。

### 3.2 ONN 的新拓扑

为了实现大规模的光学神经处理系统,也有人在神经网络的拓扑结构方面进行研究<sup>[58-60]</sup>。如 Jiajun Zhang 等构造的 Hopfield 一维局部互连网络,依靠多次反馈逐步实现与全互连等价的连接<sup>[61]</sup>。黄达论提出的洗牌型神经网络模型,用少的权重数完成全互连功能,使在目前技术条件下实现更大规模的 ONN 成为可能<sup>[62]</sup>。图 7 以一维 8 个节点的阵列为例演示洗牌网络结构:具有  $N=2^m$  ( $m$  为正整数) 个输入节点的网络经  $m=\log_2 N$  次层间局部互连和洗牌级联,所有节点恢复原位且达成了输入与输出层之间的全互连。该模型具有很高的神经元/权重比,有望利用现有光电子技术实现  $10^4$  量级的全互连 ONN,是实现与人脑具有相当规模的人工神经网络系统的重要途径。该网络的 BP 算法模拟已获成功,显示了很高的抗噪能力和鲁棒性<sup>[63]</sup>。

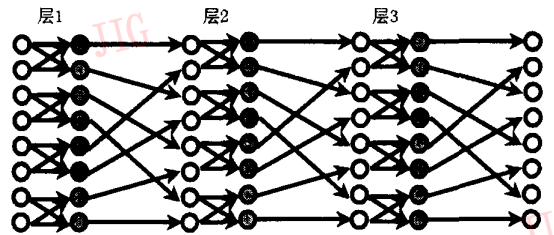


图 7 8 个节点的 1-D 洗牌型神经网络模型

总的来说,这些新模型一般都更简单,性能也更好,同时促进和发展了光学与神经网络技术。应该看到,现有光学神经网络的规模——无论神经元数目还是互连度都远低于人脑神经系统的量级,光电子灵巧点阵 SPA (Smart Pixel Array) 仅为  $100 \times 200$  量级,由此可制作的最大的全互连光学神经网络为 100—200 量级。因而在发展光电神经网络器件的同时,充分发挥光电子技术的优势,建立新的 ONN 结构模型、发展新的神经网络算法对促成更大规模 ONN 的早日实现具有重要的研究和应用价值。

## 4 结束语

本文回顾了光学神经网络系统的主要结构,讨论了其中加权互连、双极求和、非线性取阈的多种实

现手法,指出各自的特点和不足。目前 ONN 发展的最大障碍是受光电子技术发展水平所限,神经网络系统的规模和功能难以在短期内有大的提高。全光学神经网络并不是 ONN 的理想模式,充分发挥光子系统的高度互连性和巨量并行性以及电子系统的灵活性和可编程性,是光电子神经网络的最佳方式和今后发展的主要趋势。另外在现有光电子技术水平下,如何提高 ONN 的规模和自适应性也是当前的重要研究课题。90 年代以来,不少工作者为 ONN 模型提出改进算法、新算法及新网络拓扑,降低了实现难度,为推动 ONN 走向大规模、高效和实用化做了有益的尝试。

### 参 考 文 献

- 张延焯. 人工智能、神经网络与光学. 物理, 1995, 23(10): 585~590.
- 王勇竞, 张延焯, 郭转运. 人工神经网络的光学实现. 光子学报, 1997, 26(4): 289~297.
- Yu F T S. Pattern recognition with optics. Optics for Information Infrastructure, 1998, 9(Supp): 12~14.
- 苏显渝, 李继陶. 信息光学. 四川大学出版社, 1995.
- Keller Paul E, Gmitro Arthur F. Design and analysis of fixed planar holographic interconnects for optical neural networks. Appl Opt, 1992, 31(26): 5517~5526.
- Yu F T S, Lu Taiwei, Yang Xiangyang. Optical neural network with pocket-sized liquid-crystal televisions. Opt Lett, 1990, 15(15): 863~865.
- Gao Shengquan, Yang Jianwei, Feng Zhanbing *et al.* Implementation of a large-scale optical neural network by use of a coaxial lenslet array for interconnection. Appl Opt, 1997, 36(20): 4779~4783.
- Yang X, Lu T, Yu F T S. Compact optical neural network using cascaded liquid crystal televisions. Appl Opt, 1990, 29(35): 5223~5225.
- 康 辉, 翟宏琛. 使用相位型阵列分束器作为互连元件的可编程光学神经网络. 南开大学学报, 1996, 29(3): 80~83, 88.
- Hua J, Liu L, Li G. Optical interconnection for neural networks by use of a self-imaging function. Appl Opt, 1998, 37(2): 308~314.
- Shin M, Nose T, Sato S. Optical properties of an UV-cured liquid-crystal microlens array. Appl Opt, 1998, 37(11): 2067~2073.
- Shin M, Nose T, Takahashi S. Liquid-crystal microlenses with a beam-steering function. Appl Opt, 1997, 36: 4772~4778.
- Kranzendorf M, Bigner B J, Zgang L *et al.* Optical connectionist machine with polarization-based bipolar weight values. Opt Eng, 1989, 28: 844~888.
- Ittycheriah A P, Walkup J F, Krile T F *et al.* Outer product processor using polarization encoding. Appl Opt, 1990, 29: 275~283.
- Yue Z, Gong J, Chen J. Implementation of a bipolar neural network using a single optical channel. Opt Eng, 1995, 34(2): 619~621.
- Lu Taiwei, Xu Xin, Wu Sudong *et al.* Neural network model using interpattern association. Appl Opt, 1990, 29(2): 284~288.
- Wang Bin, Yang Jianwen, Liu Xu *et al.* Realization of parallel subtraction using LCLV in optical neural network. In: Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1996, 2897: 89~94.
- Yang J, Gao S, Zhang Y. Optical neural network with bipolar multi-greylevel weights using color encoding. Optik, 1995, 101(1): 7~9.
- Indu Saxena, Emile Flesler. Adaptive multilayer optical neural network with optical thresholding. Opt Eng, 1995, 34(8): 2435~2440.
- Mcaulay A D, Wang J, Xu X. Optical adder that uses spatial light rebroadcasters. Appl Opt, 1992, 31(26): 5584~5591.
- Alain B, Henri H A, Erik E *et al.* Optoelectronic thresholding module for winner-take-all operations in optical neural networks. Appl Opt, 1994, 33(8): 1463~1468.
- 王勇竞, 郭转运, 刘德明等. 二维并行取阀液晶光阀的研制. 光学学报, 1997, 17(1): 69~73.
- Desmulliez M P Y, Wherrett B S, Waddie A J *et al.* Performance analysis of self-electro-optic-effect-device-based (seed-based) smart-pixel arrays used in data sorting. Appl Opt, 1996, 35: 6397~6416.
- Andrew C W, Yang T Y, Gourlay J *et al.* Optoelectronic systems based on InGaAs-complementary-metal-oxide-semiconductor smart-pixel arrays and free-space optical interconnects. Appl Opt, 1998, 37(14): 2822~2830.
- Tana I B, Sharpe J P, Mcknight D J *et al.* Smart-pixel spatial light modulator for incorporation in an optoelectronic neural network. Opt Lett, 1995, 20(3): 303~305.
- Li Y, Wang T, Linke R A. VCSEL-array-based angle-multiplexed optoelectronics crossbar interconnects. Appl Opt, 1996, 35: 1282~1295.
- Plant D V, Robertson B, Hinton H S *et al.* 4×4 vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) and metal-semiconductor-metal (MSM) optical backplane demonstrator system. Appl Opt, 1996, 35: 6365~6368.
- Weigl B, Grabherr M, Jung C *et al.* High-performance oxide-confined GaAs VCSELs. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1997, 3: 409~415.
- Thibeault B J, Bertilsson K, Hegblom E R *et al.* High-speed characteristics of low-optical loss oxide-apertured vertical-cavity lasers. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9: 11~13.
- Eva M S, Duane A L, Brian J T *et al.* Parallel free-space optical interconnect based on arrays of vertical-cavity lasers and detectors with monolithic microlenses. Appl Opt, 1998, 37(14): 2811~2821.
- Lu Taiwei, Wu Shudong, Xu Xin *et al.* Two-dimensional programmable optical neural network. Appl Opt, 1989, 28(22): 4908~4913.
- Lu Guowen, Lu Mingzhe, Yu F T S. Multilayer association memory and its hybrid optical implementation. Appl Opt, 1995, 34(23): 5109~5117.
- Lu Taiwei, Yu F T S, Gregory D A. Self-organizing optical neural network for unsupervised learning. Opt Eng, 1990, 29(9): 1107~1113.
- White H J, Wright W A. Holographic implementation of a Hopfield model with discrete weightings. Appl Opt, 1988, 27(2): 331~338.
- Nitta Y, Ohta J, Tai S *et al.* Optical learning neurochip with in-

- ternal analog memory. *Appl Opt*, 1993, 32(8): 1264~1274.
- 36 Alastair D M, Wang J, Xu X. Optical perceptron learning for binary classification with spatial light rebroadcasters. *Appl Opt*, 1993, 32(8): 1346~1353.
- 37 Arsenaault H H, Macukow B. Neural network model for fast learning and retrieval. *SPIE Milestone Series*, 1994, 96: 289.
- 38 Mori M, Kondo M, Hayasaki Y *et al.* Optical learning neural network with a reversal-input superposing technique. *Institute of Physics Conference Series*, 1995, 139: 443.
- 39 Mori M, Yagai Y, Yatagai T *et al.* Optical learning neural network with a pocket readout optical modulator. *Appl Opt*, 1998, 37(14): 2852~2857.
- 40 Pavlov A V. Two-layer two-directional optical neural network on the basis of the Van der Lugt correlator. *Optics and Spectroscopy*, 1994, 76(5): 706.
- 41 Shen J Y, Zhang Y X, Mu G G. Optical pattern recognition system based on a winner-take-all model of a neural network. *Opt Eng*, 1993, 32(5): 1053~1055.
- 42 Wen Z, Yeh P, Yang X. Modified two-dimensional Hamming neural network and its optical implementation using Dammann gratings. *Opt Eng*, 1996, 35(8): 2136~2144.
- 43 Wen Z, Yeh P, Yang X. Fuzzy neural network for invariant optical pattern recognition. *Opt Eng*, 1996, 35(8): 2188~2195.
- 44 Soriano M, Saloma C. Improved classification robustness for noisy cell images represented as principal-component projections in a hybrid recognition system. *App Opt*, 1998, 37(17): 3628~3638.
- 45 Lin X, Ohtsubo J. Optical neural networks with terminal attractors for pattern recognition. *Opt Eng*, 1996, 35(8): 2145~2152.
- 46 Shin S G, Jin S I, Shin S Y *et al.* Optical neural network using fractional Fourier transform, log-likelihood, and parallelism. *Opt Comm*, 1998, 153: 218~222.
- 47 Ishikawa M, Mukozhaka N, Toyoda H *et al.* Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory. *Appl Opt*, 1990, 29(2): 289~295.
- 48 Sakano T, Noguchi K, Matsumoto T. Optical limits for spatial interconnection networks using 2-D optical array devices. *Appl Opt*, 1990, 29(8): 1094~1100.
- 49 薛 唯. 光学神经网络动力学行为的实验观察. *中国激光*, 1997, 24(1): 71~74.
- 50 Wang X M, Mu G G. Optical neural network with bipolar neural states. *Appl Opt*, 1992, 31(23): 4712~4719.
- 51 Sharif I, Friesem A A. All-optical neural network with inhibitory neurons. *Opt Lett*, 1989, 14(10): 485~487.
- 52 David A J, Saleh B E A. Optical implementation of the Hopfield algorithm using correlations. *Appl Opt*, 1990, 29(8): 1063~1064.
- 53 常盛江, 刘 玥, 张文伟等. 适用于神经元状态非等概率分布的神经网络模型及其光学实现. *物理学报*, 1998, 47(7): 1101~1109.
- 54 Uang C M, Yin S, Andres P *et al.* Shift-invariant interpattern association neural network. *Appl Opt*, 1994, 33(11): 2147~2151.
- 55 Uang C M, Yin S, Lu S, Yu F T S. Shift- and rotation- invariant interpattern heteroassociation (IHA) model. *Opt Commu*, 1994, 104(4, 5, 6): 285~292.
- 56 Lu T W, Mintzer D, Kostrzewski A, Lin F. Compact holographic optical neural network system for real-time pattern recognition. *Opt Eng*, 1996, 35(8): 2122~2131.
- 57 Uang C M, Lu G, Yu F T S. Unipolar interpattern association neural networks. *Opt Lett*, 1994, 19(1): 52~54.
- 58 Jay B, David W. On setting unit thresholds in an incompletely connected associative net. *Network*, 1993, 4: 441~459.
- 59 Desmulliez M P Y, Tooley F A P, Dines J A B *et al.* Perfect-shuffle interconnected bitonic sorter; Optoelectronic design. *Appl Opt*, 1995, 34(23): 5077~5090.
- 60 Bosch H, Kurfess F J. Information storage capacity of incompletely connected associative memories. *Neural Networks*, 1998, 11: 869~876.
- 61 Zhang J, Zhang L, Yan D *et al.* Local interconnection neural network and its optical implementation. *Opt Comm*, 1993, 102: 13~20.
- 62 黄达诠. 自由空间光互连洗牌型神经网络模型. *光电子技术*, 1999, 19(4). (待发表)
- 63 黄达诠, 许 锐. 适合于光学实现的洗牌型 2D 全互连多层神经网络模型. *光电子技术*, 2000, 20. (待发表)

## The State of Art of the Optical Neural Networks

Xu Rui, Huang Daquan and Li Zhineng

(Department of Information & Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** The development and problems as well as perspective of optical neural networks (ONN) are discussed in this reviewing paper, along with the presentation of two typical 2-D hybrid ONN models interconnected with lenslet array and hologram elements respectively. Novel algorithms and topologies of ONN are also introduced.

**Keywords** Optical neural network, Neural network, Optical interconnection, Optical computing