

光学神经网络研究及其在 模式识别中的应用

母国光 张延炘

(南开大学现代光学研究所)

[摘要] 本文简要介绍国家自然科学基金委员会“七五”重大项目“光学神经网络的研究及其在模式识别中的应用”的研究意义、研究内容和研究进展,着重介绍了在适于模式识别和光学实现的神经网络模型研究、光学神经网络中的基础技术与关键器件研制等方面所得到的主要进展。

一、研究意义

神经网络的研究是一个新的热点,正受到世界各国和不同学科学者的广泛重视。其目标,除了揭示智能的本质和思维的机制之外,主要是实现具有大脑的某些类似功能的人工装置,更好地解决日益增多且迫切需要的人工智能课题。

大家知道,现代电子计算机在运算速度和精度上都大大超过了人类的平均生理极限。但是,对于解决那些难以用数学公式描述的人工智能问题,如模式识别、自然语言理解、学习、推理及决策等等,计算机仍然无法与大脑相比。

对大脑的神经生理学研究已初步证实,大脑神经细胞对其输入刺激的响应速度(每秒千次)远低于现代电子计算机的单元翻转速度(每秒千兆次以上),其运算功能也非常简单。但是,大脑中神经细胞的数目极大(约 10^{12} 个),它们之间的相互作用也极其复杂。这种由大量简单运算单元通过其中错综复杂的相互作用(互连)而构成的非线性巨系统——神经网络,很可能就是人类智能的物质基础。

计算机与大脑在构造上的明显差异使人们相信,为了实现具有智能的人工装置(或称智能计算机),单靠现行数值计算机速度的提高及其构造和算法的完善是不够的。事实上,少数有远见的科学家早就开始了对如何实现智能机的探索。这一研究曾几经波折,直到 80 年代初期,以 Hopfield 神经网络模型的提出为转机,而迅速在世界范围形成新的高潮。

光学神经网络是指用光学或光电子学方法实现的人工神经网络。由于神经网络的大量具有简单非线性运算功能的神经元之间的复杂互连为其主要特点,而光学互连是高度并行的,光束可以在空间交叉而(在光强不太高时)不会发生串扰,光的传播速度极快;其延时和色散可忽略不计,加之光学元件的扇入和扇出都很高,这些特点使光学神经网络的研究一开始就成为人工神经网络研究中最有希望的分支之一。如 1985 年美国的 Psaltis 和 Farhat 首先报道了基于光学矢量——矩阵相乘的 Hopfield 神经网络。随后,日本的 Ohta 等人完成了这种光学神经网络的微型化集成芯片。这些都是人工神经网络研究中令人瞩目的进展。

当然,光学神经网络的研究即使在发达国家也仅仅是开始。从目前的原理研究到日后走向实用,从模型、构造、器件、系统和应用都有很多研究工作要做。可以预期,光学神经网络将在智能计算机、空间预警、跟踪和制导、自主机器人视觉及控制、自动驾驶、在线监测、语音识别、专家系统及自适应信息处理等许多方面得到应用。

二、课题分解及研究内容

“光学神经网络的研究及其在模式识别中的应用”是国家自然科学基金委员会“七五”重大项目之一,承担单位有南开大学、天津大学和中科院西安光学精密机械研究所,研究期限自1989年7月至1993年6月。

该项目的研究目标,是将光学信息处理及光学模式识别技术与神经网络的概念结合起来,产生新的适于光学实现的神经网络模型,研制用于光学神经网络的新型空间光调制器,并完成用于模式识别的神经网络实验系统。

为实现上述研究目标,根据研究内容的不同,划分为三个子课题:

(1) 光学/计算机混合型神经网络系统的研究。侧重于研究混合型神经网络的新模型、新构造、新器件及其特性。研制两种用于实时光电并行接口的新型空间光调制器并建立光学/计算机混合型神经网络模式识别实验系统。

(2) 有源光学神经网络系统的研究。主要研究有源光学神经网络的系统构造、模型和应用,探索实时存储新方案、新材料、有增益的取阈和反馈器件等。

(3) 用于三维物体识别的新型光学神经网络系统的研究。将光学模式识别技术(包括串码滤波器、多通道费涅尔全息滤波器等)与神经网络(包括光学/计算机混合网络及有源光学神经网络)结合起来,构成新型光学神经网络模式识别实验系统。寻找解决既有空间不变性又有联想及容错能力的三维物体模式识别问题的可行方案。

三个子课题的研究内容各有侧重又密切相关,每一子课题都着重于以下几个方面结合:

- (1) 模型研究(软件)与系统构造(硬件)的结合;
- (2) 系统构造与关键器件的结合;
- (3) 光学与计算机或电子学的结合;
- (4) 模式识别与神经网络的结合。

从该课题开展两年以来的研究进展,可以更具体地看到这些结合的特点。

三、研究进展

1. 适于模式识别及光学实现的神经网络模型的研究

随着神经网络研究的蓬勃发展,已提出的神经网络模型很多,其中较为流行的就有十几种之多。这些模型大多数没有考虑硬件实现中的困难和可行性。我们从光学神经网络的特点和模式识别的要求出发,提出了几种新模型和学习算法:

(1) 适于光学实现的一种非线性神经网络模型及其 Monte Carlo 学习算法^[1,2]。前面提到光学互连有许多长处,但是光学所能实现的互连权重的数值精度是非常有限的。许多神经网络模型的互连权重和取值范围随着存储信息的增加而增大。因此,当存储量较大时,其互连权重将难以用光学方法实现。我们所提出的模型,其互连权重经非线性压缩后仅取值+1, -1

及0。同时,采用 Monte Carlo 算法,使模型的性能不因互连权重的压缩而过多下降。该学习算法亦可推广应用于其他适于光学实现的神经网络模型,如 IPA (Inter-Pattern-Association) 模型^[3]等。

(2) WTA 三层神经网络模型^[4]。WTA (Winner-Take-All) 意指“胜者全取”。WTA 网络在输入初始状态后,将快速并行迭代达到仅使初始值最大的神经元有非零输出的稳定状态。可以证明,三层神经网络可以任意精度逼近平方可积的任意函数^[5]。而以 WTA 为中间层所构成的三层神经网络——称之为 WTA 三层神经网络,理论上可区分其输入层神经元所能产生的全部组态,因而它是已知模型中存储容量最大的模型^[6]。该模型的学习规则简单,易于光学实现,既可完成自联想 (Auto-association), 又能完成异联想 (Hetero-association), 对照明光强的变化不敏感,是用于模式识别的较理想的一种网络构造。

(3) 具有旋转不变性的三层神经网络模型。光学模式识别中的综合判别函数 (SDF) 方法是实现具有空间旋转不变性图象编码与识别的较好方法之一。但是, SDF 方法对噪声和图象遮挡的容错能力较差。另一方面,神经网络具有联想和容错能力,但常用的模型(如 Hopfield 模型)不具有空间旋转的不变性,难以直接用于实际的模式识别。我们提出的三层神经网络模型是 SDF 图象编码与 Hopfield 模型的级联,因而既有空间旋转不变性,又有联想和容错能力。它和广泛流行的 BP 模型相比,学习算法简单,有确切解,不存在陷入局域极小的问题。由于图象的特征码是选定的,因此可避免 Hopfield 模型由存储模式之间的交迭而产生的假态和误判。对四种飞行器进行计算机仿真的模式识别表明。本模型对物体在平面内及平面外的任意旋转皆有良好的联想识别能力^[7]。

2. 光学神经网络中的基础技术的研究

除了模型研究外,光学神经网络中要经常用到若干重要基础技术。对这些技术的研究和完善,将是实现性能优良的光学神经网络的基本条件。我们在这方面的研究主要有:

(1) 在单一光学通道中实现双极性互连和双极神经光态的研究。光学互连的正负和光学神经元状态的正负,通常是用两套系统或在同一系统中采用正交偏振光实现复用而实现的,这将使系统复杂化。若要同时实现互连和神经光态的双极性,则系统将更加复杂。我们提出引用分布式背景和动态阈值,在单一通道中同时实现了双极互连与双极神经光态^[8]。现已证实,这一技术可改善 Hopfield 模型光学系统的存储容量,并可推广用于其他光学神经网络系统。

(2) 实时全息存储及 PCM 技术的研究。在我们已有的工作中已经证实,光学全息联想存储和共轭反射镜 (PCM) 取阈反馈系统,不仅可实现复杂二维图象(神经元数目较多)的联想存储,而且在采用实时全息记录材料时,还可具有自学习、自适应能力,其并行性和迭代速度之高也是其他光电混合式神经网络所难以比拟的。但是,这一技术在存储容量、响应速度、存储时间和体系结构等方面还存在诸多不适合实用需要的地方。对这一技术的研究,结合各种新型非线性晶体材料的使用,已获得进展^[9]。

(3) 可编程光学互连技术的研究。如何实现可编程的互连,是研制通用型和自学习的神经网络计算机的基础。特别是二维神经网络,由于其互连权重构成四维张量,实现可编程将更加困难。

我们研究并建立了一种由高分辨微机终端显示器、小透镜阵列、CCD 摄像机及图象采集接口构成的二维可编程神经网络系统^[3]。该系统可实现多种神经网络模型,其张量互连权重

以平面形式按子矩阵排列,可显示于微机显示器上,通过小透镜阵列的成象与 CCD 数据采集,完成二维图象与互连张量的相乘,并在微机内进行取阈处理和返回光学系统进行迭代。不同模型和不同的处理任务,要求不同的互连张量,可通过计算机的内存或光学方式存储,按照微机的指令调出。实验演示证明,这种系统可实现有较大数量神经元的二维可编程神经网络处理器,并具有较广泛的应用。

3. 光学神经网络中的关键器件的研制

为实现性能优良的光学神经网络并获得实用,若干关键器件的研制是不可避免的。根据课题目标,我们着重研制了以下几种新型光电子器件,它们都是目前市场上买不到的:

(1) 电寻址液晶光阀(E-LCLV)。普通液晶光阀是光寻址的,即写入信息通过光学成象来完成(O-LCLV)。这种器件国外已有商品,国内亦有研制成功。而 E-LCLV 目前尚处于研制阶段。我们研制 E-LCLV 有两种方案:即由光纤面板 CRT 驱动 LCLV,和逆 CCD 驱动的 Si-LCLV。为实现上述方案,我们已首先自己研制成 O-LCLV,同时对方案中的关键器件和工艺进行设计和实验探索,如硅衬底液晶光阀中的高阻 x 型硅层的制备,光纤面板的耦合工艺等,现已取得初步进展^[10]。

(2) 共轭读出液晶光阀(PCR-LCLV)。有源光学神经网络中的 PCM 是一个关键器件,其增益、灵敏度和响应速度对整个系统的性能有决定性的影响。目前国内外的 PCM 皆采用不同的非线性光学晶体材料制成,但已有晶体材料都难以满足系统的全部要求。我们研制的 PCR-LCLV 与普通 LCLV 的最大不同是它的介质隔离层上刻有光栅,因而写入光和参考光之间产生混波,使输出光获得增益并与写入光有共轭关系。研制该器件所需的 a-Si 薄膜和介质层刻蚀技术已获成功,这是完成器件研制的良好基础。

(3) 串码滤波器(SCF)。SCF 是我们提出的图象编码滤波器,也是旋转不变神经网络模式识别系统中的关键器件。对单一目标的 SCF ($M=4$) 已研制成功,目前正研制对四种目标空间任意取向模式识别的 SCF ($M=16$)。计算机仿真试验已证明^[7],将这种 SCF 与自联想神经网络存储器相级联,可实现既有空间旋转不变性,又有联想和容错能力的三维物体的模式识别

(4) WTA 滤波器。如前所述,在 WTA 三层神经网络模型中,WTA 网络是必不可少的中间层。由于大脑神经网络中可能存在这种机制,因此研制 WTA 滤波器是有重要意义的。我们提出并研制了一种光电混合的 WTA 滤波器。它可对多个输入光束进行光强比较而实时给出指示最强输入光位置的输出光,因而可看作是一个具有浮动阈值的多通道光门。该器件亦可推广应用于其他光计算和光学信息处理系统之中。

(5) 二维光学阈值器件。这实际是一个二维光学双稳器件,是光学神经网络中最基本的器件之一,由非晶硅和液晶层组成,用非晶硅的光电流去控制液晶层的透光率,实现双稳操作。已完成实验器件样品。

参 考 文 献

- [1] 黄五群等,适于光学实现的一种非线性神经网络模型及其蒙特卡洛学习算法,光学学报,第10卷,第5期,(1990)446。
- [2] Huang Wuqun and Zhang Yanxin, Monte Carlo learning algorithm for clipped neural networks, Proc. SPIE, Vol.1294, (1990) 561.

- [3] 张延炘,王冬学,母国光,二维可编程张量互连及其光学实现,光电子与集成技术学术年会论文集,(1991,北京),待出版。
- [4] Zhang Yanxin and Shen Jinyuan, Optical/ electronic hybrid three-layer neural network for pattern recognition, Proc. SPIE, Vol. 1469, (1991), to be published.
- [5] Arai, Masahiko, Mapping abilities of three-layer neural networks, Proc. IJCNN '89, (1989, Washington D. C.) 1-419.
- [6] 张延炘,申金媛,黄五群,三种WTA神经网络模型的模拟与分析,中国首届神经网络学术大会论文集(上),(1990,北京),268。
- [7] 高成群等,具有转动不变性模式识别能力的三层神经网络模型,中国首届神经网络学术大会文集(下),(1990,北京)784。
- [8] Wang, X.M.and Mu,G.G., Optical neural networks with bipolar neuron states and a nonzero threshold, Proc.SPIE, (1991, San Deago) to be published.
- [9] 张以谟等,光电混合实时联想存储器,光电子与集成技术年会论文集,(1991,北京)待出版。
- [10] Li Yulin et al., Two types of real time spatial light modulators and their application to dynamic image processing, *The Review of Laser Engineering*, Vol.18, (1990) 83.

STUDY ON OPTICAL NEURAL NETWORKS AND THEIR APPLICATIONS IN PATTERN RECOGNITIONS

Mu Guoguang Zhang Yanxin

(Institute of Modern Optics, Nankai University)

Abstract

A brief description of the major project, "Study on optical neural networks and their applications in pattern recognition", supported by the National Natural Science Foundation of China, is presented in this paper. It includes the background and significance of, the contents covered by, and the branches divided from the project, the recent results of modelling for neural networks that are suitable for pattern recognitions and optical implementations, as well as the progress in developments of the essential techniques and the key devices for optical neural networks.