

Hartline 侧抑制神经网络模型 的光学实现

周常河 刘立人 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

Hartline 模型是从神经生理实验得出的普遍适用于神经系统对信息处理的一种方式模型。本文提出了一种光电混合结构实现 Hartline 模型的方法: 其中非相干光学卷积器实现所要求的卷积运算, 用偏振编码的方法实现权重系数的编码, 而减法运算仍由电子学完成。最后用二维图象边缘增强的光学实验验证了该方法的有效性。

关键词: 光学神经网络; Hartline 模型; 边缘增强。

一、引 言

神经网络最近几年受到了人们充分地重视和研究。而光学由于具有并行运算、易实现高互连等特点, 所以光学神经网络也得到了人们的重视和研究^[1~4]。

光学神经网络目前研究的一个重要方面就是现有神经网络模型的光学实现。象著名的神经网络模型 Perceptron^[5], Adaline^[6], Hopfield^[7], Backpropagation^[8] 等, 这类模型并不是严格地建立在生物学基础上的, 但它们具有类似大脑工作的一部分性质, 这些模型都有人用光学方法实现之^[1~4]。但从神经生理实验的角度也可以提出神经网络模型, 其中最著名的一个模型就是 Hartline 侧抑制神经网络模型^[9]。

Hartline 模型既不是 Hopfield 模型之类的记忆与存储模型, 也不是 Backpropagation 模型之类的学习模型, 而是对输入信息进行加工处理的一种模型。Hartline 模型的神经元之间的互连权重系数主要是从神经生理实验得到的^[10], 而实验结果与 Hartline 方程的计算机模拟和数学分析结果^[11] 完美地结合在一起, 实现了神经生理实验结果与数学分析的统一。该模型其中一个突出的成果就是从神经生理角度成功地解释了视觉中著名的“马赫带”现象。侧抑制概念的提出和其它研究成果使 Hartline 获得了 1967 年度诺贝尔医学与生理学奖金。增强反差和边缘增强是 Hartline 侧抑制模型最显著的特征。

本文就是考虑利用光学的并行性和互连等特点用光电混合装置来实现 Hartline 侧抑制模型。Kawakami^[12] 等人用光学装置实现过另一种侧抑制神经网络模型^[13]。他们所用的模型描述了大脑皮层内二维处理单元(细胞或细胞模块)通过侧抑制而广泛互连这一现象, 其功能类似于 Hartline 模型。他们利用微通道空间光调制器(Microchannel Spatial Light Modulator)的反转部分线性和偏振器件相结合产生所需要的光学减法运算, 先用一维图象

然后发展到用二维图象边缘增强的光学实验验证了该网络的有效性^[14]。本文则提出了一种光学实现 Hartline 模型的方法,能直接实现对二维图象的处理。

二、Hartline 侧抑制网络的数学模型

1. 一维 Hartline 模型的形式

Hartline 在研究鲨鱼复眼时发现,只有当光照在某一根视神经上时,才会在与这根视神经直接相连的纤维中产生脉冲发放,如果此时附近的视神经受到光照的话,那么附近的视神经对这根视神经产生的脉冲发放的影响就是抑制性的。并且这种抑制性影响存在着简单的空间迭代总和的结果。为此,他给出了下面的侧抑制方程^[9]:

$$r_p = e_p + \sum_{j=1}^n K_{p,j}(r_j - r_{p,j}^0), \tag{1}$$

式中 r_p 为 p 单元的反应, e_p 为仅仅光照 p 单元时的反应, $K_{p,j}$ 为 j 感受单元对 p 单元的抑制作用系数^[15] 如图 1(a) 所示, Ratliff^[10] 等人从神经生理实验得到了有关权重系数的较详细的数据,本文在计算机模拟和光学实现的实验中,权重系数的具体数值取为表 1 所示。 $r_{p,j}^0$ 为 $K_{p,j}$ 起作用的阈值,一般不考虑自抑制效应,即 $j \neq p$ 括号中的负数应由 0 代替(因为没有负输出的抑制效应),当然实际情况也不可能产生负的输出值,即

$$r_p = \theta \left[e_p + \sum_{j=1}^n K_{p,j}(r_j - r_{p,j}^0) \right], \tag{2}$$

$$\theta(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \tag{3}$$

事实上,有许多研究人员根据不同对象研究得出了各自描述侧抑制现象的模型。Ratliff^[15] 总结了六种不同的侧抑制模型,其中 Talor 提出的模型和公式(1)数字形式上一样,仅仅是权重系数不一样,如图 1(b) 所示。从本质上讲这两种模型功能上是一样的。所以可在一种基本的光学结构中实现这两种模型。



Fig. 1 The weighting function of Hartline model (a) and the Talor model (b). (from ref. 15)

Table 1

-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027
-0.027	-0.015	-0.015	-0.015	-0.027
-0.027	-0.015	0.000	-0.015	-0.027
-0.027	-0.015	-0.015	-0.015	-0.027
-0.027	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027

2. 二维 Hartline 模型的形式

光学系数具有对二维图象进行处理的特点,因此需要把一维 Hartline 模型的形式写成二维形式,并且考虑到循环次数(为简化起见,所有的阈值 $r_{p,j}^0$ 都假定为 0)

$$r(x, y; t) = \theta [e(x, y) + \sum_{x', y'} K(x, y; x', y') r(x', y'; t-1)]. \quad (4)$$

权重系数为空间不变的 Hartline 模型将大大简化讨论,便于计算模拟和光学实现,即可写为下面的形式

$$r(x, y; t) = \theta [e(x, y) + \sum_{u, v} K(u, v) r(x-u, y-v; t-1)], \quad (5)$$

(5)式就是本文进行计算机模拟和光学实现所依据的公式。在具体进行计算机模拟和光学实现时,权重系数的取值可以表 1、表 2 所示为据,表 1 为 Hartline 模型的权重系数的取值,表 2 为 Talor 模型的权重系数的取值。

Table 2

-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040
-0.040	0.012	0.012	0.012	-0.040
-0.040	0.012	0.012	0.012	-0.040
-0.040	0.012	0.012	0.012	-0.040
-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040

三、光电混合实现结构

由(5)式可以看出,该算法由三个运算组成:卷积运算,减法运算和循环反馈运算。故该算法的光学实现结构图如图 2 所示,光学部分完成卷积运算,电子学部分完成减法和反馈运算。

输入图象在 P_1 平面上,以间隔 d_1 抽样,并被透镜 1 以放大率 M 成象于光电探测器平面 P_4 上。 P_2 平面上为反馈图象 $r(x, y; t)$ 的发光阵列,在透镜 2 和 P_2 平面之间放一模板(或空间光调制器),其可调透射率孔可用于实现离散权重系数。由 P_2 平面上发出的光将穿过该模板并最终在透镜 2 的焦平面上形成反馈图象 $r(x, y; t)$ 和权重函数的卷积。假定 d_2 是 P_2 平面上发光阵列的间距,也等于模板透射率孔之间的间距, d_4 为最后卷积象之间的距离,则如果模板和透镜 2 之间的距离较小,则有^[10]

$$d_4 = d_2 f_2 / D, \quad (6)$$

式中 f_2 为透镜 2 的焦距、 D 为模板和 P_2 平面之间的距离。为了能够实现权重系数 $K(u, v)$ 的正、负值,可以使用偏振编码技术,权重系数中的正值用水平偏振方向表示, $K(u, v)$ 的负值可以由垂直偏振方向来完成(图 3),这可以在模板的相应孔上贴上相应的偏振片来做到。为实现权重系数 $K_{x,j}$ 的不同值,可以在这一偏振片之前(模板的前侧)贴上一个不同偏振角的偏振片,这样就可以得到透过率为

$$K(u, v) = [I(u, v) / I_0] = \cos[\alpha(u, v)]. \quad (7)$$

然后,一个渥拉斯顿(Wollaston)棱镜放在权重函数模板的后面,通过棱镜的二支正交

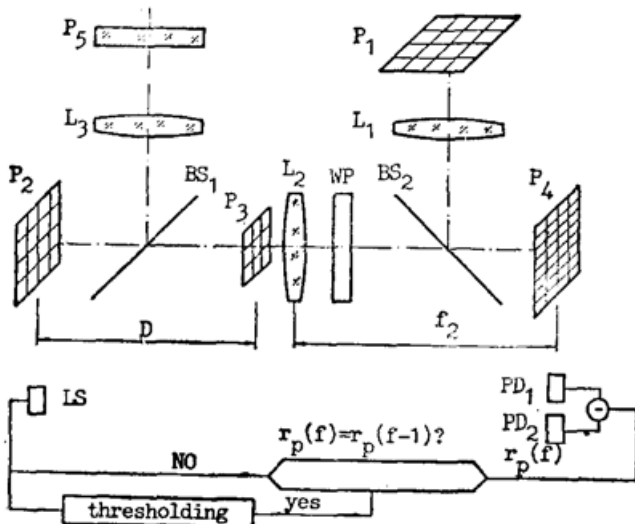


Fig. 2 The schematic diagram of the experiment set up

WP: Wollaston Prism, BS₁, BS₂: Beam splitter, L₁, L₂, L₃: Lens, P₁, P₂, P₃, P₄, P₅: Plane

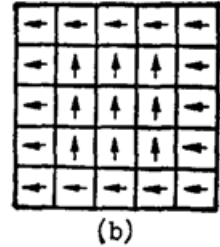
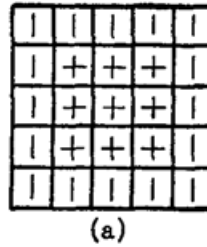


Fig. 3

(a) The symbols (+) for the positive and (-) for the negative value of the discrete weighting function; (b) The transmittance directions of the polarizers correspond to the representation (+) and (-) in (a)

的 *o* 光和 *e* 光就会在空间上分开, 它在透镜 2 的焦平面上分开的距离可以由 d_{Δ} 表示。

由上面的讨论可以看出, 在光电探测器平面 P_4 上的光点有二个来源: 一个来源是输入图象 $e(x, y)$, (在 P_1 平面上), 另一个来源就是循环图象 $r(x, y; t)$, 它形成了空间分离的二类光点: 一类是由“正卷积”点组成, 另一类是由“负卷积”点组成。其“正卷积”点应和输入平面象的成像点相重合, 这可由下述条件来满足:

$$d_4 = M d_1, \quad d_{\Delta} = d_4 / 2. \tag{8}$$

然后就可以使用光电探测器来检测这样的“正”、“负”光点, 经过电子学相减后, 就可以得到 $r(x, y; t+1)$ 的值*, 如果有

$$|r(x, y; t+1) - r(x, y; t)| > \delta, \tag{9}$$

式中 δ 为预先设置在比较器中的控制精度, $r(x, y; t+1)$ 就代替 $r(x, y; t)$ 并存起来, 驱动在 P_2 平面上的发光阵列, 上面的运算就再重复一次。如果对所有 x, y 均满足

$$|r(x, y; t+1) - r(x, y; t)| < \delta. \tag{11}$$

就说明已达到稳定态, 为突出边缘增强的效果, 将收敛到稳态解的 $r(x, y; t)$ 进行阈值处理, 并使用阈值处理过的 $r(x, y; t)$ 驱动在 P_2 平面上的发光源, 这样就可以在 P_5 平面上得到边缘增强后的二值图象。到此, 就完成了 Hartline 模型光学实现的全过程。作者通过计算机模拟已经知道, 至少在权重系数取为表 1, 表 2 的情况下, 该算法可以得到唯一收敛稳定解。

四、实 验

实验结构图如图 2 所示, 具体参数为: 焦距 $f_1 = f_2 = f_3 = 135 \text{ mm}$, 相对孔径为 $d/f = 1:2$ 模板上透光孔的直径为 1 mm , 孔间距为 2 mm , 模板到平面 2 的距离为 135 mm , 即 $D = 135$

* 其值小于 0, 用 0 代替。

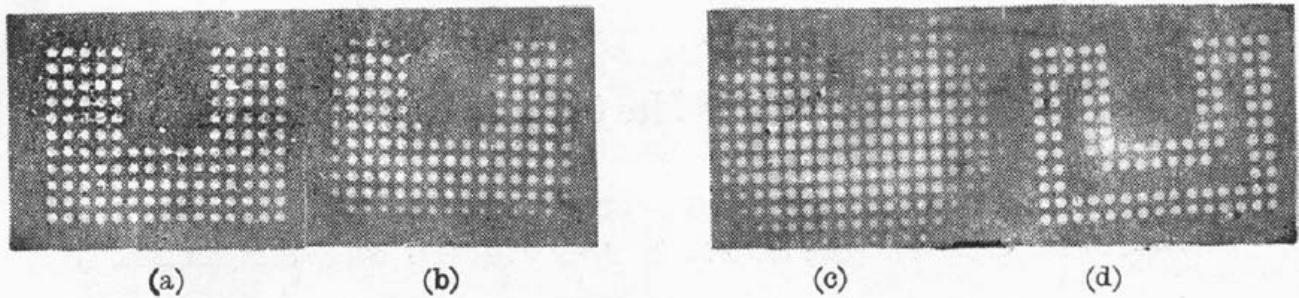


Fig. 4

(a) Input image; (b), (c) are respectively the photographs of optical "positive" and "negative" convolution; (d) The final binary edge enhanced output image after thresholding

mm。

图 4(a)为输入图像,图 4(b)、(c)分别是“正卷积”和“负卷积”的照片、图 4(d)是在输出面上经阈值化的二值边缘增强图像。

参 考 文 献

- [1] D. Psaltis *et al.*; *Opt. Lett.*, 1985, **10**, No. 2 (Feb), 98~100.
- [2] A. D. Fisher *et al.*; *App. Opt.*, 1987, **26**, No. 23 (Dec), 5039~5054.
- [3] K. Wagner *et al.*; *App. Opt.*, 1987, **26**, No. 23 (Dec), 5061~5076.
- [4] E. G Paek *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 23 (Dec), 1303~1305.
- [5] R. Rosenblatt; «Principles of Neurodynamics», Spartan Books, Washington, D. C., 1962.
- [6] B. Widrow; «Generalization and Information Storage in Networks of Adaline Neurons», in *Self-organizing Systems 1962*, M. Yovitz, et al., Eds, Spartan Books, Washington, D. C., 1962, 435~461.
- [7] J. J. Hopfield; *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, 1982, **79** (Apr), 2554~2558.
- [8] D. E. Rumelhart and J. L. McClelland, Eds; *Parallel Distributed Processing*, Vol. 1, ch. 7, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [9] H. K. Hartline; *Rev. Modern Physics*, 1959, **31**, No. 2 (Apr), 515~523.
- [10] F. Ratliff *et al.*; *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1969, **62**, 733~740.
- [11] K. P. Haderler; *Kybernetik*, 1974, **14**, Heft 3, 161~165.
- [12] W. Kawakami *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 18 (Sep), 984~986.
- [13] T. Kohonen; «Self-organization and Associative Memory» (Springerverlag, Berlin, 2nd ed, 1987), 84.
- [14] W. Kawakami *et al.*; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1357, 313~314.
- [15] F. Ratliff; Mach Bands: «Quantitative Studies on Neural Networks in the Retina», Holden-Day, Inc., 1965, 122.
- [16] L. Liu; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 10 (May), 482~484.

Optical implementation of Hartline lateral inhibition model

ZHOU CHANGHE, LIU LIREN AND WANG ZHIJIANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica Shanghai 201800)

(Received 10 April 1991; revised 3 June 1991)

Abstract

Hartline model, discovered from neurophysiological experiments, reveals the principle of lateral inhibition which generally exists in neural system. In this paper we propose an optoelectronic architecture for implementation of Hartline model in which incoherent optical convolutor and polarization encoding method used to realize the convolution operation and the representation of weight function, while subtraction operation is still performed by electronic part. Preliminary optical 2-D image edge-enhancement experiment demonstrates the versatility of the network.

Key words: optical neural network, Hartline model, edge enhancement.