

时间离散细胞神经网络及其光学实现*

邵 岚 刘立人 李国强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 提出一种并行图像处理递归算法——时间离散细胞神经网络, 基于常规微分方程比较法则设计“填空”这一图像处理任务模板参数。利用空间面积码和离焦多重成像的光电混合系统实施此算法。

关键词 时间离散细胞神经网络, 并行处理。

1 引 言

在众多并行图像处理算法中, 细胞神经网络^[1~3](CNN)无疑是一种新颖自然的处理规则几何的非线性动态结构。它本身为一多维列阵单元结构, 其局部间相互关系由描述近邻域互连权重的空不变传播模板决定。没有直接相连的单元可通过动态传播函数而相互影响。它兼具神经网络和细胞自动机的优点: 数字域处理的实时性和局部互连的位不变性。尤其是它的列阵独立性特点——即一种细胞神经网络只被少数几个参数确定而不管实际列阵大小促成它在提取局部几何信息的可编程性和灵活性, 而且全部信息也可通过传播模板操作获得。

与细胞自动机相比, 细胞神经网络中反曲S型函数的选取保证它永远能趋于稳定状态, 而不会出现混沌等复杂现象。而且, 细胞神经网络的连续态较细胞自动机的离散态能更好地描述宏观变化。同时, 它的连续动态函数和实数值而非细胞自动机的时间离散和二值性也增加了硬件实施难度, 电子学固有的问题限制了模板尺寸的大小。

本文采用时间离散的方法分析细胞神经网络, 简化其数学表达, 将之描述为递归反馈型阈值网络, 使其更适于光学实现。由此省却了复杂的积分运算, 简化了实现结构和保证传播速度为常数。为便于完成此算法, 将反馈模板和每次的中间输出结果归一化在 $[0, 1]$ 范围内同时将两极模板分离为正负两部分分别运算, 并设计了基于空间编码和离焦多重成像的两通道光电混合系统。运用常规微分方程的比较方法, 确定了“填空”这一图像处理任务模板的各参数并给出光学演示。

2 时间离散细胞神经网络(DTCNN)

在最简单的情况下, 细胞神经网络是一种均匀分布在二维几何网点上非线性动态回路。

* 国家科委 863 高科技项目及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995年7月18日; 收到修改稿日期: 1995年10月12日

一个单元的状态不仅由它本身的输入 v_{in} 、偏移量 I 和反馈模板 $A(ij;kl)$ 和前馈模板 $B(ij;kl)$ 、本身输出 v_{out} 决定,而且还与邻域单元的输入和输出有关。一个列阵大小为 $M \times N$ 的二维网络用非线性微分方程描述如下:

$$C \frac{dv_{in_j}(t)}{dt} = -\frac{1}{R} v_{in_j}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(ij;kl) v_{in_k}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_f(i,j)} B(ij;kl) v_{out}(t) + I, \quad (1)$$

$$v_{in_j}(t) = f[v_{in_j}(t)] = \frac{1}{2} R_f [|v_{in_j}(t) + 1| - |v_{in_j}(t) - 1|] \quad 1 \leq i \leq M; \quad 1 \leq j \leq N.$$

其初始状态和零时输入限定条件:

$$|v_{in_j}(t)| \leq 1, \quad |v_{in_j}(0)| \leq 1. \quad (2)$$

如果将时间离散, $t = nh$, h 步长时间, 归一化参数 ($C = 1, R_f = 1, R_f = 1$), 得到其差分形式, 例如在第 n 步情况下, 下标为 ij 单元的第 $(n+1)$ 步状态可通过其第 n 步的 $v_{in_j}(n)$, 输出 $v_{out}(n)$ 和邻域单元的值计算得到:

$$v_{in_j}(n+1) = v_{in_j}(n) + h \left[-v_{in_j}(n) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(ij;kl) v_{in_k}(n) + \sum_{C(k,l) \in N_f(i,j)} B(ij;kl) v_{out}(n) + I \right] \quad (3)$$

$$v_{in_j} = f[v_{in_j}(n)] = \frac{1}{2} [|v_{in_j}(n) + 1| - |v_{in_j}(n) - 1|]$$

一般说来, 初始状态 v_{in} 和 I 一旦确定, 在传播过程中不再改变, 由此有

$$v_{in_j}(n+1) = \Phi \left[(1-h)v_{in_j}(n) + h \cdot \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(ij;kl) v_{in_k}(n) + I \right], \quad (4)$$

其中

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} (|x+1| - |x-1|), \quad I' = h \left[\sum_{C(k,l) \in N_f(i,j)} B(ij;kl) v_{out}(n) + I \right]$$

除了实数值和非线性函数外, 上述表达与二维细胞自动机定义类似^[5]:

$$a_{ij}(n+1) = \Phi[a_{ij}(n)], \quad \text{对于所有的 } C(k,l) \in N_r(i,j) \quad (5)$$

整个算法完全是一个递归运算。除了反曲阈值操作外, 其它都为内积、点对卷积和加法运算, 预示光学实现的可能性。

3 时间离散细胞神经网络的光学实现

实数值域和点对卷积是光学实现的两个主要考虑方面, 前者可通过空间面积编码解决^[6], 后者可由离焦多重成像完成^[7]。为保证一次完成运算, 应分别对输出和反馈模板进行数学修订。由于在光学上缺乏能同时表示正负数的手段, 一般说来在光学上有两种解决此类问题的方法: 一种是首先将其加上一偏移量使之转化为正数, 最终结果再减去偏移量带来的影响; 另外一种是将实数分为正负两部分分别进行计算, 两部分结果的算术累加作为最终结果。本文将前一种方法用于输出 $v_{out}(n)$, 后一种方法作用于传播模板。因为方程(1)保证了 $v_{in_k}(n)$ 的取值范围在 $[-1, 1]$ 内, 因此通过将实数值域的 $v_{in_k}(n)$ 加常数 1, 可得到正数值域的 $v_{in_k}(n)^*$, 取值范围限制在 $[0, 2]$, 最后结果通过一负值常数补偿

$$v_{in_j}(n+1) = (1-h)v_{in_j}(n) + h \cdot \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(ij;kl) v_{in_k}(n)^* + I'', \quad (6)$$

$$I'' = I' - h \cdot \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(ij;kl).$$

为便于空间面积编码，应准确归一化 $\{ \min [v_{ij}(n)^*] / 2, \max [v_{ij}(n)^*] / 2 \}$ 。对于反馈模板 $A(ij;kl)$ ，将其分为正 $A^+(ij;kl)$ 和负 $A^-(ij;kl)$ 两部分。选择其绝对值最大值作为归一化标准，即

$$\begin{aligned} A^+(ij;kl) &\rightarrow \{ 0, \max [A^+(ij;kl)] / \max [|A(ij;kl)|] \} \\ A^-(ij;kl) &\rightarrow \{ \min [A^-(ij;kl)] / \max [|A(ij;kl)|], 0 \} \end{aligned} \quad (7)$$

因此，最终结果需通过光学离焦卷积乘上一常数 $C = 2 \times \max [|A(ij;kl)|]$ 来补偿。

图 1 为两通道时间离散细胞神经网络光电混合系统原理图。阈值操作和反馈由微机承担，局部互连由光学完成。修正的输出像和反馈模板采用互相垂直方向编码形式，以实现乘积运算。接收屏上的模板对应各离焦像元的中心位置开窗以滤掉无用信息，其中中心点的光强即为点对卷积值。输出像呈现在液晶屏 1 上，液晶屏 2 显示反馈模板正负两部分。摄像机 CCD₁ 和 CCD₂ 分别接收屏上滤过的两离焦像反馈到微机作算术加和阈值操作。

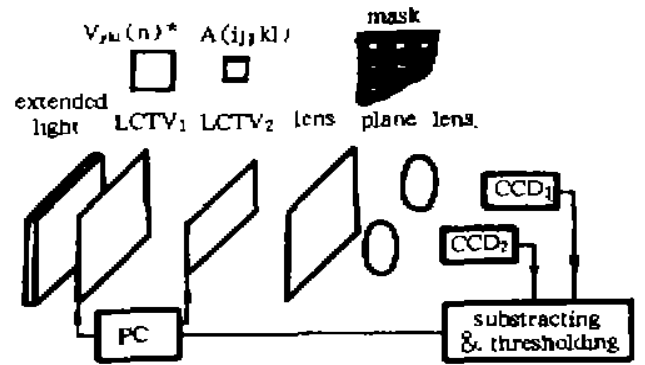


Fig. 1 The schematic diagram of programmable optical DTCNN

4 时间离散细胞神经网络的应用

离散神经网络的基本功能就象二维滤波器一样将输入图像变换为对应的输出图像。决定滤波性质的模板参数原来一般通过计算机模拟确定，而新近由 Chua 提出的基于常规微分的比较法则^[4]为确定参数提供了指导作用。本文例举一个图像处理填空模板的设计过程。不失一般性，把字母 D 型的灰度像作为输入像[图 2(a)]，初始状态 v_{ij} 全为黑。1 代表黑色物体，-1 表示白色背景，两者之间的值为灰度值。对填空问题有两种情况：一是黑色物体嵌在白色背景中，另一情况是或者黑物嵌白景或白物嵌黑景。推论^[4]保证：若 $I = 0$ ，则相同的模板可同时解决两种情况。为使所有的稳定状态值大于或等于 1，即保证：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |v_{ij}(n)| > 1, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} v_{ij}(n) = \pm 1, \quad 1 \leq i \leq M; \quad 1 \leq j \leq N. \quad (8)$$

应满足条件 $A_{0,0} > 1$ ，因要存储每次的输出结果，前馈模板 $B(ij;kl)$ 中至少一个元素不为 0。此例为 4 邻域问题，即在对角线方向上连接的单元不算相连，综上所述模板形式为

$$A = \begin{bmatrix} A_0 & A_s & A_s \\ A_s & A_{0,0} & A_s \\ A_s & A_s & A_s \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{0,0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad I = 0. \quad (9)$$

根据常规微分方程的比较规则^[4]和填空的定义过程，总结如下条件：

$$\begin{aligned} (A_{0,0} - 1) - 3A_s + B_{0,0} &> 0, \\ (A_{0,0} - 1) + 3A_s - B_{0,0} &> 0 \\ (1 - A_{0,0}) + 5A_s - B_{0,0} &> 0, \\ A_{0,0} - 1 &> 0, \quad A_s > 0. \end{aligned} \quad (10)$$

确定一组解为模板的最终参数，步长为 1。经过 5 次循环达到其稳定状态，最后两次的输入和输出结果见图 2。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad I = 0. \quad (11)$$

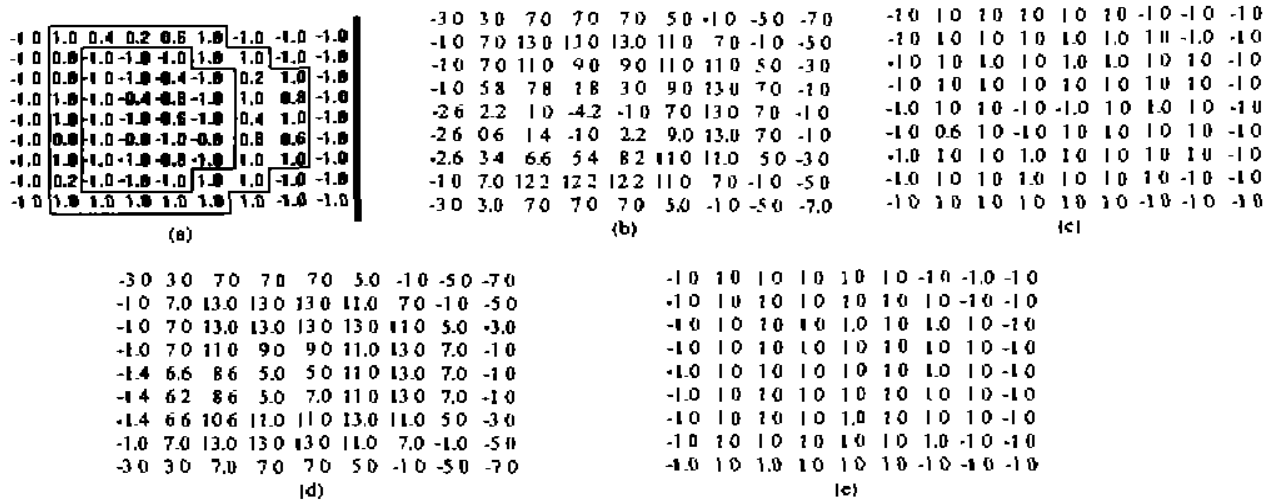


Fig. 2 Computer simulation of hole filing.

(a) Initial input $v_{ij}(1)$; (b) input of the fourth step $v_{ij}(4)$; (c) output of the fourth step $v_{ij}(4)$; (d) input of the fifth step $v_{ij}(5)$; (e) output of the fifth step $v_{ij}(5)$

为验证此光学系统，以上例最后一步为例，归一化的 $A(ij;kl)$ 编码像和倒数第二步的输出编码像分别呈现在液晶屏 1 和屏 2 上，从光学离焦成像结果(图 3)知，第六行、第二列元素值为 3.3，已知

$$I'' = h \left[\sum_{c(i,l) \in N_p(i,j)} B(ij;kl) v_{kl}(n) - \sum_{c(i,l) \in N_p(i,j)} A(ij;kl) + I \right] = 3 - 10 = -7 \quad (12)$$

由模板参数知 $\max [|A(ij;kl)|] = 2$ ，所以补偿参数 $C = 2 \times 2 = 4$ 。基于方程(6)，自然得到 $v_{62}(5)$ ，与模拟计算结果图 2 (d)相同。

$$v_{62}(5) = (1 - h)v_{62}(4) + h \sum_{c(i,l) \in N_p(i,j)} A(ij;kl) v_{kl}(4) + I'' = 3.3 > 4 - 7 = 6.2. \quad (13)$$

结 论 本文提出了一种图像并行处理算法——时间离散细胞神经网络，将复杂的动态系统以递归算法表述，使其适于光学实现。而且由于运用两通道离焦成像系统而突破了对传输模板尺寸的限制，足够大的邻域互连为感知器和 Hopfield 模型网络研究开辟了新途径。

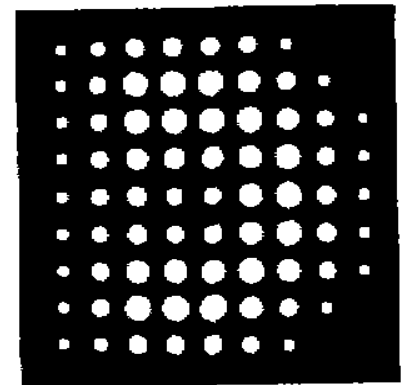


Fig. 3 The optical pairwise convolution between v_{ij} and $A(ij;kl)$ in the last step

参 考 文 献

[1] L. O. Chua, L. Yang, Cellular neural network; theory. *IEEE Trans. Circuits and System*, 1988, 35(10): 1257 ~1272
 [2] L. O. Chua, L. Yang, Cellular neural networks; application. *IEEE Trans. Circuits and System*, 1988, 35(10): 1273~1290
 [3] T. Roska, L. O. Chua Eds. Proc. First IEEE Int. Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications.

CNNA-90, Budapest, 1990, IEEE, New York, 1991

- [4] L. O. Chua, P. Thiran, An analytic method for designing simple cellular neural network. *IEEE Trans. Circuits and System*, 1991, **38**(11): 1332~1341
- [5] S. Wolfram (Eds.), *Theory and Applications of Cellular Automata*. New York, World Scientific, 1986
- [6] L. Liu, Optical implementation of parallel fuzzy logic. *Optics Comm.*, 1989, **173**(2): 183~187
- [7] L. Liu, Optoelectronic implementation of mathematical morphology. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(4): 482~484

Discrete-Time Cellular Neural Networks And Its Optical Implementation

Shao Lan Liu Liren Li Guoqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 July 1995; revised 12 October 1995)

Abstract A parallel recursive algorithm —— discrete — time cellular neural network is proposed. A hole filling template is designed based on comparison principle of ordinary differential equations. An optoelectronic system in terms of spatial area-coding method and defocused multiple image scheme is constructed for execution.

Key words discrete-time cellular neural network, parallel processing.