

灰度图像逻辑或运算 CNN 模板的顽健性设计

张群¹, 闵乐泉^{1,2}

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 数理学院, 北京 100083)

摘要: 通过制定灰度图像的逻辑或运算法则, 提出一类灰度图像逻辑或运算 CNN, 它可以在两幅灰度图像的对
应像素点上执行逻辑或运算。对 GLOGOR CNN 的模板进行顽健性分析, 建立了一个定理, 并给出严格的数学证
明。只要模板参数满足定理中给出的参数不等式, CNN 就能执行逻辑或运算的任务。数值模拟验证了 GLOGOR
CNN 在应用中的有效性及顽健性设计定理的可行性。

关键词: 细胞神经网络; 灰度图像; 逻辑或运算; 顽健性设计

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0088-07

Robustness design of templates for logic OR operation CNN in gray-scale images

ZHANG Qun¹, MIN Le-quan^{1,2}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A kind of gray-scale logic OR operation (GLOGOR) CNN was proposed by formulating the logic OR algo-
rithms for gray-scale images. It could perform a pixel-wise logic OR operation on corresponding elements of two
gray-scale images. A theorem was established to design the robustness template parameters of GLOGOR CNN, and a ri-
gorous mathematical proof was given. The theorem provided parameter inequalities for determining parameter intervals
to implement the corresponding tasks. The simulation results illustrate the effectiveness of the methodology.

Key words: CNN; gray-scale images; logic OR operation; robustness template design

1 引言

1988 年, Chua L O 和 Yang L^[1,2]提出了细胞神经网络 (CNN, cellular neural network), 又称为细胞非线性网络, 由阵列微分方程描述。CNN 最初作为电路上可实现的模型, 其形式不断地得到推广^[3-6]。CNN 已在大型集成电路中实现, 并在图像和电视信号处理^[7,8]、机器人和生物视觉^[9,10]、高级脑功能及指纹识别^[11]、求解偏微分方程^[12,13]、超混沌同步^[14,15]等领域得到应用。

一个标准 $M \times N$ 的细胞神经网络形成一个 $M \times N$ 的二维阵列。第 i 行、第 j 列的细胞用 $C_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$) 表示。每个细胞

的状态方程^[9]如下

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 a_{k,l} y_{i+k,j+l} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 b_{k,l} u_{i+k,j+l} + z \quad (1)$$

$$y_{i,j} = f(x_{i,j}) = \frac{1}{2} (|x_{i,j} + 1| - |x_{i,j} - 1|), \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, $x_{i,j}$ 、 $u_{i,j}$ 和 $y_{i,j}$ 分别为细胞的状态变量、输入和输出; $a_{k,l}$ 、 $b_{k,l}$ 和 z 分别为 A 模板的参数、 B 模板的参数和细胞的阈值。标准 CNN 的输出方程为分段线性函数 (如图 1 所示)。

收稿日期: 2013-10-29; 修回日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61074192); 高等学校博士科研专项基金资助项目 (06108104)

Foundation Items: The National Natural Science Foundations of China(61074192); The Ph.D. Research Funds of the University of Science and Technology (06108104)

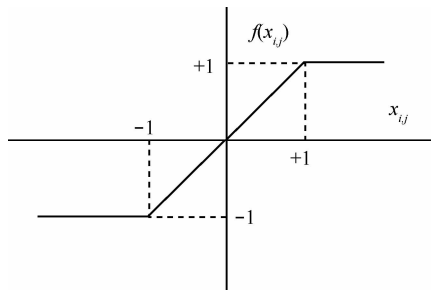


图1 标准 CNN 输出函数

CNN 处理一幅 $M \times N$ 的数字图像时,将图像中第 (i, j) 点的灰度值 $u_{i,j}$ (标准化为 $[1,1]$ 中的值) 代入方程(1), 给定适当的边界条件和初始条件后, 方程(1)的稳态解就是图像的处理结果。选择不同的模板参数得到具有不同图像处理功能的 CNN。由于 CNN 处理器实时高速并行模拟非线性细胞阵列, CNN 通用芯片 (universal chip) 处理图像的理论速度是数字处理器的 1 000 倍^[9]。

CNN 丰富的图像处理功能和动力学行为完全由模板参数决定。但在模拟 CNN 中, CNN 的参数通常有 5%~10% 的扰动^[16]。在满足 CNN 特定功能的前提下确定模板参数的变化范围, 使 CNN 具备抗干扰性 (顽健性)^[17-19] 具有一定的应用价值。根据图像处理的实际需要, 更多用于图像处理的新模板将会出现。提出新的 CNN 模板并进行顽健性设计, 具有重要的理论和应用价值。

逻辑运算是数字图像处理中非常重要的基础运算, 在图像理解与分析领域发挥重要作用, 是实现复杂图像处理必不可少的重要步骤^[20]。逻辑运算常用于二值图像。Chua 讨论了二值图像逻辑或运算 (LOGOR, logic OR operation) CNN^[9], 该 CNN 能够对两幅黑白二值图像执行逻辑或运算。丁蕾提出了一种改进的图像逻辑运算算法^[20], 并详细分析了图像二值化的改进算法, 然后对二值化后的黑白图像进行逻辑运算。

然而, 图像二值化效果的好坏直接影响原图像逻辑运算的结果。另一方面, 在实际工程应用中, 由于受环境和成像系统等因素的影响, 通常得到的图像总是会受到不同程度的噪声污染, 被噪声污染的黑白二值图像变成灰度图像。因此, 有必要设计一类不需要进行图像二值化, 直接适用于灰度图像逻辑运算的算法。将二值图像逻辑运算推广到灰度图像逻辑运算, 能够为基于二值图像逻辑运算的相关研究^[21]推广到灰度图像的研究提供理论依据。

本文在 LOGOR CNN 的基础上, 提出适用于灰度图像的逻辑或运算。根据此运算, 设计了一类灰度图像逻辑或运算 (GLOGOR, gray-scale logic OR operation) CNN。它可以在两幅灰度图像的对应像素点上执行逻辑或运算。本文给出了 GLOGOR CNN 的整体任务、局部规则, 并对其模板进行顽健性设计。通过建立相应的定理, 给出了能够实现此功能的参数区间。数值模拟验证了 GLOGOR CNN 的有效性及其顽健性设计定理的可行性。

灰度图像逻辑或运算 CNN 的提出, 推广了 LOGOR CNN。顽健性设计定理为实现相应的图像处理功能确定了参数区间, 为 CNN 的硬件实现提供了理论依据。

2 灰度逻辑或运算 CNN

设一幅 $M \times N$ 的数字化图像在 (i, j) 点处像素的灰度值为 $g_{i,j}$ 。一般 $g_{i,j} \in [0, 255]$, 其中 0 代表纯黑色, 255 代表纯白色。为了便于 CNN 处理, 需要用式(3)将灰度值 $g_{i,j}$ 映射到 $[-1, 1]$ 区间 (-1 代表纯白色, 1 代表纯黑色), 则 $u_{i,j}$ 对应于 CNN 方程的输入

$$u_{i,j} = 1 - \frac{2g_{i,j}}{255} \quad (3)$$

二值图像逻辑或运算 CNN^[9]就是在两幅黑白二值图像对应像素点上执行逻辑或运算。每个像素点对应的输入和初值为 1 或 -1 , 当对应像素点的输入和初值满足其中只要有一个为 1 时, 输出为 1, 即黑像素; 否则, 输出为 -1 , 即白像素。其模板如式(4)所示

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Z = 2 \quad (4)$$

对于灰度数字图像, 同样可以定义逻辑或运算法则。令 $g_{i,j}$ 为 (i, j) 点的像素, 若 $g_{i,j} \in [-1, g_0)$ ($g_0 \in (-1, 1)$), 则为背景灰度; 若 $g_{i,j} \in [g_0, 1]$, 则为前景灰度。当对应像素点的输入和初值, 满足只要其中有一个为前景灰度时, 输出为 1, 即黑像素; 否则, 输出为 -1 , 即白像素。

2.1 GLOGOR CNN 的整体任务

GLOGOR CNN 的整体任务如下。

1) 给定两幅静态灰度图像 P_1 和 P_2 ;

- 2) 输入图像: $U=P_1$;
- 3) 初始状态图像: $X(0)=P_2$;
- 4) 边界条件: 周期 (toroidal) 边界条件;
- 5) 输出图像: $Y(\infty)$ 为一幅二值图像, 表示灰度图像 P_1 和 P_2 执行逻辑或运算后的结果。逻辑表达为 $Y(\infty)=P_1 \vee P_2$, 即对 (i, j) 点的输入 $g_{i,j}^1$ 和初值 $g_{i,j}^2$, 只要满足 $g_{i,j}^1$ 为前景灰度或 $g_{i,j}^2$ 为前景灰度, 则输出 $y_{i,j}(\infty)=1$ 。否则, 输出 $y_{i,j}(\infty)=-1$ 。其中, 输入 $g_{i,j}^1$ 和初值 $g_{i,j}^2$ 分别为图像 P_1 和 P_2 在 (i, j) 点的像素。

2.2 GLOGOR CNN 的局部规则

由 GLOGOR CNN 的整体任务可知, 其输出结果与输入和初始状态相关。输入和初始状态共有 4 种组合形式: (背景灰度, 背景灰度)、(背景灰度, 前景灰度)、(前景灰度, 背景灰度)、(前景灰度, 前景灰度)。根据这 4 种组合, 把整体任务拆分成 4 个局部规则, 如下:

- 1) $(u_{i,j}, x_{i,j}(0))=(\text{背景灰度, 背景灰度}) \Rightarrow y_{i,j}(\infty)=-1$, 与 $C_{i,j}$ 周围细胞的状态无关;
- 2) $(u_{i,j}, x_{i,j}(0))=(\text{背景灰度, 前景灰度}) \Rightarrow y_{i,j}(\infty)=1$, 与 $C_{i,j}$ 周围细胞的状态无关;
- 3) $(u_{i,j}, x_{i,j}(0))=(\text{前景灰度, 背景灰度}) \Rightarrow y_{i,j}(\infty)=1$, 与 $C_{i,j}$ 周围细胞的状态无关;
- 4) $(u_{i,j}, x_{i,j}(0))=(\text{前景灰度, 前景灰度}) \Rightarrow y_{i,j}(\infty)=1$, 与 $C_{i,j}$ 周围细胞的状态无关。

简化局部规则为

$$y_{i,j}(\infty)=\begin{cases} 1, & \text{当 } u_{i,j}(0) \text{ 为前景灰度或} \\ & x_{i,j}(0) \text{ 为前景灰度} \\ -1, & \text{其他} \end{cases}$$

假设 $g_{i,j}^1$ 和 $g_{i,j}^2$ ($i=1, \dots, M; j=1, \dots, N$) 分别为 $M \times N$ 的灰度图像 P_1 和 P_2 在 (i, j) 点的像素, 则 $g_{i,j}^1$ 和 $g_{i,j}^2$ 被分为如下 2 种情况

$$P_1: g_{i,j}^1 \begin{cases} g_{i,j}^{11} < g_0, & \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{12} \geq g_0, & \text{前景灰度} \end{cases}$$

$$P_2: g_{i,j}^2 \begin{cases} g_{i,j}^{21} < g_0, & \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{22} \geq g_0, & \text{前景灰度} \end{cases}$$

于是, 对于输入的灰度图像 P_1 和初始状态灰度图像 P_2 , GLOGOR CNN 的局部规则可以具体写成表 1 的形式。

表 1 GLOGOR CNN 模拟灰度图像逻辑或运算的局部规则

局部规则	$u_{i,j}(0)$	$x_{i,j}(0)$	\Rightarrow	$y_{i,j}(\infty)$
局部规则 1	$g_{i,j}^{11}$	$g_{i,j}^{21}$	\Rightarrow	-1
局部规则 2	$g_{i,j}^{11}$	$g_{i,j}^{22}$	\Rightarrow	1
局部规则 3	$g_{i,j}^{12}$	$g_{i,j}^{21}$	\Rightarrow	1
局部规则 4	$g_{i,j}^{12}$	$g_{i,j}^{22}$	\Rightarrow	1

2.3 GLOGOR CNN 模板顽健性设计定理及数学证明

LOGOR CNN 的图像处理功能是用线性非耦合模板 (式(4)) 来实现的, 它是 GLOGOR CNN 的一种特殊形式; GLOGOR CNN 是 LOGOR CNN 的一种推广, 两者模板应具有类似相同的形式。因此, 考虑用如下的线性非耦合模板来实现 GLOGOR CNN 的功能。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Z = z \quad (5)$$

其中, a, b, z 为实数, 且 $a > 1, b > 0$ 。

则 GLOGOR CNN 的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,j} &= -x_{i,j} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 a_{k,l} y_{i+k,j+l} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 b_{k,l} u_{i+k,j+l} + z \\ &= -x_{i,j} + ay_{i,j} + bu_{i,j} + z \end{aligned} \quad (6)$$

定理 1 设灰度数字图像逻辑或运算 CNN 的模板为式 (5) 所示形式, 其中, $a > 1$ 且 $b > 0$ 。则 CNN 可以执行灰度图像逻辑或运算的功能当且仅当式 (7) 不等式组成立

$$\begin{cases} \min\{g_{i,j}^{22}\}(1-a) < b \min\{g_{i,j}^{11}\} + z \\ b \max\{g_{i,j}^{11}\} + z < \max\{g_{i,j}^{21}\}(1-a) \\ b \min\{g_{i,j}^{12}\} + z > \min\{g_{i,j}^{21}\}(1-a) \\ g_{i,j}^{11} < g_0 \leq g_{i,j}^{12} \\ g_{i,j}^{21} < g_0 \leq g_{i,j}^{22} \end{cases} \quad (7)$$

证明 将 GLOGOR CNN 的状态方程 (式(6)) 写为

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 a_{k,l} y_{i+k,j+l} + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 b_{k,l} u_{i+k,j+l} + z$$

$$\begin{aligned}
 &= -x_{i,j} + ay_{i,j} + bu_{i,j} + z \\
 &\triangleq -x_{i,j} + ay_{i,j} + w_{i,j}, \\
 &i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N
 \end{aligned} \tag{8}$$

其中, $w_{i,j} = bu_{i,j} + z$ 。

由 $a > 1$ 和 GLOGOR CNN 的状态方程(8), 可得单个细胞 $C_{i,j}$ 在不同的恒定值 $w_{i,j}$ 时的动力学曲线图, 如图 2 所示, 横轴表示状态变量 $x_{i,j}$, 纵轴表示状态变量的导数 $\dot{x}_{i,j}$ 。

1) $u_{i,j}(0) = g_{i,j}^{11}$, 且 $x_{i,j}(0) = g_{i,j}^{21} \Rightarrow y_{i,j}(\infty) = -1$ 。在图 2 中取 $R = g_{i,j}^{21}$, 则细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线低于曲线 $w_{i,j} = R(1-a)$ (即 $w_{i,j} < R(1-a) = g_{i,j}^{21}(1-a)$) 时, 细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线将趋近于 -1。得到

$$w_{i,j} = bu_{i,j} + z = bg_{i,j}^{11} + z < g_{i,j}^{21}(1-a) \tag{9}$$

2) $u_{i,j}(0) = g_{i,j}^{11}$, 且 $x_{i,j}(0) = g_{i,j}^{22} \Rightarrow y_{i,j}(\infty) = 1$ 。在图 2 中取 $R = g_{i,j}^{22}$, 则细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线高于

曲线 $w_{i,j} = R(1-a)$ (即 $w_{i,j} > R(1-a) = g_{i,j}^{22}(1-a)$) 时, 细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线将趋近于 1。得到

$$w_{i,j} = bu_{i,j} + z = bg_{i,j}^{11} + z > g_{i,j}^{22}(1-a) \tag{10}$$

由式(9)和式(10)可得

$$g_{i,j}^{22}(1-a) < w_{i,j} = bg_{i,j}^{11} + z < g_{i,j}^{21}(1-a) \tag{11}$$

3) $u_{i,j}(0) = g_{i,j}^{12}$, 且 $x_{i,j}(0) = g_{i,j}^{21} \Rightarrow y_{i,j}(\infty) = 1$ 。在图 2 中取 $R = g_{i,j}^{21}$, 则细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线高于曲线 $w_{i,j} = R(1-a)$ (即 $w_{i,j} > R(1-a) = g_{i,j}^{21}(1-a)$) 时, 细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线将趋近于 1。得到

$$w_{i,j} = bu_{i,j} + z = bg_{i,j}^{12} + z > g_{i,j}^{21}(1-a) \tag{12}$$

4) $u_{i,j}(0) = g_{i,j}^{12}$, 且 $x_{i,j}(0) = g_{i,j}^{22} \Rightarrow y_{i,j}(\infty) = 1$ 。在图 2 中取 $R = g_{i,j}^{22}$, 则细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线高于曲线 $w_{i,j} = R(1-a)$ (即 $w_{i,j} > R(1-a) = g_{i,j}^{22}(1-a)$) 时, 细胞 $C_{i,j}$ 的动力学曲线将趋近于 1。得到

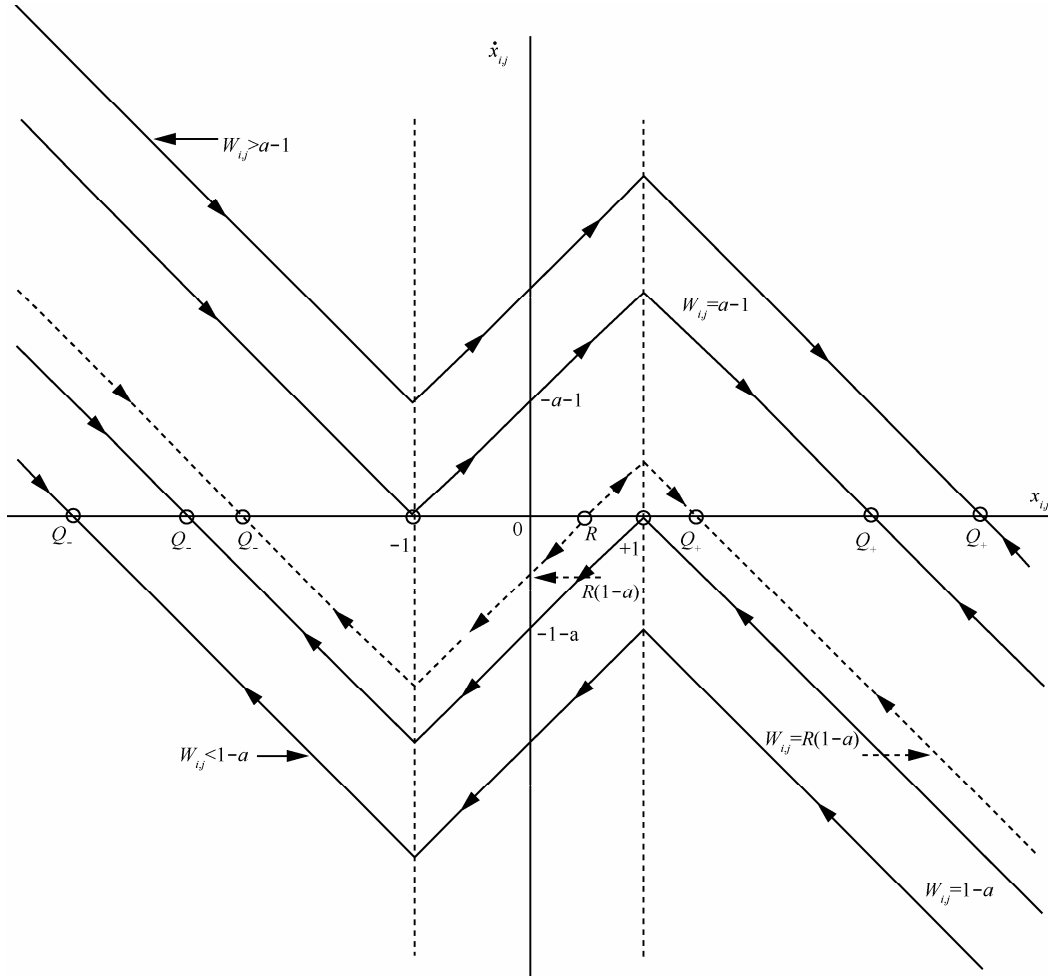


图 2 单个 GLOGOR CNN 细胞的动力学曲线

$$w_{i,j} = bu_{i,j} + z = bg_{i,j}^{12} + z > g_{i,j}^{22}(1-a) \quad (13)$$

因为 $a > 1$ ，且 $g_{i,j}^{21} < g_0 \leq g_{i,j}^{22}$ ，所以由式(12)和式(13)可得

$$w_{i,j} = bg_{i,j}^{12} + z > g_{i,j}^{21}(1-a) \quad (14)$$

综合式(11)和式(14)

$$\begin{cases} g_{i,j}^{22}(1-a) < w_{i,j} = bg_{i,j}^{11} + z < g_{i,j}^{21}(1-a) \\ w_{i,j} = bg_{i,j}^{12} + z > g_{i,j}^{21}(1-a) \\ g_{i,j}^{11} < g_0 \leq g_{i,j}^{12} \\ g_{i,j}^{21} < g_0 \leq g_{i,j}^{22} \end{cases} \quad (15)$$

因为 $i=1,2,\dots,M$ ， $j=1,2,\dots,N$ ，所以不等式组(15)中蕴含 $3MN$ 个不等式，需要对其进行简化，简化结果式(16)与定理 1 中式(7)相同

$$\begin{cases} \min\{g_{i,j}^{22}\}(1-a) < b \min\{g_{i,j}^{11}\} + z \\ b \max\{g_{i,j}^{11}\} + z < \max\{g_{i,j}^{21}\}(1-a) \\ b \min\{g_{i,j}^{12}\} + z > \min\{g_{i,j}^{21}\}(1-a) \\ g_{i,j}^{11} < g_0 \leq g_{i,j}^{12} \\ g_{i,j}^{21} < g_0 \leq g_{i,j}^{22} \end{cases} \quad (16)$$

综上所述，定理 1 给出了 GLOGOR CNN 模板参数一般的约束条件，只要定理 1 中式(7)成立，则 CNN 能够完成 GLOGOR CNN 的局部规则，从而可执行 GLOGOR CNN 的整体任务。定理 1 证明完毕。

3 实验结果

为了更好地展示 CNN 处理图像的效果，CNN

在处理图像时一般采用伪彩色显示。给定两幅静态灰度数字图像 P_1 和 P_2 ，图 3(a)和图 3(b)为 P_1 和 P_2 的伪彩色图像通过 Photoshop (PS) 软件中“图像—调整—黑白”命令得到的两幅图像。令 GLOGOR CNN 的输入图像 $U = P_1 = [g_{i,j}^1]_{M \times N}$ ，初始灰度状态图像 $X(0) = P_2 = [g_{i,j}^2]_{M \times N}$ 。

根据图像 P_1 和 P_2 的灰度值，取 $g_0 = 0$ ，则灰度图像 P_1 和 P_2 可划分成：

$$P_1: g_{i,j}^1 \begin{cases} g_{i,j}^{11} < 0, \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{12} \geq 0, \text{前景灰度} \end{cases}$$

$$P_2: g_{i,j}^2 \begin{cases} g_{i,j}^{21} < 0, \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{22} \geq 0, \text{前景灰度} \end{cases}$$

且

$$\min\{g_{i,j}^{11}\} = -0.9, \max\{g_{i,j}^{11}\} = -0.6, \min\{g_{i,j}^{12}\} = 0.4;$$

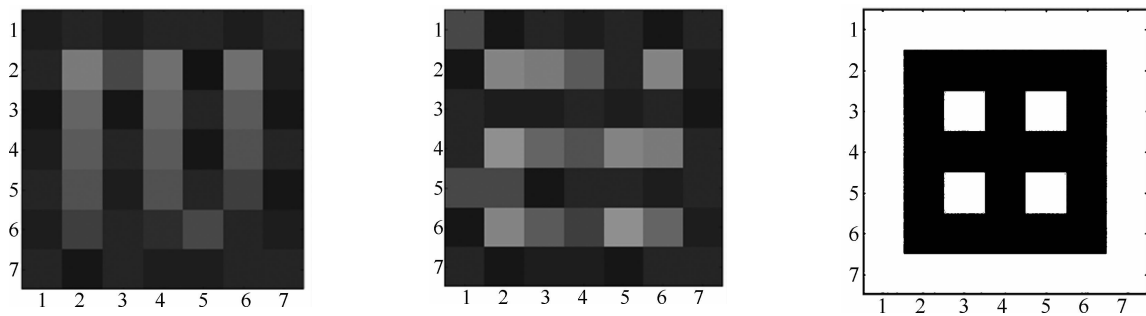
$$\min\{g_{i,j}^{21}\} = -0.9, \max\{g_{i,j}^{21}\} = -0.6, \min\{g_{i,j}^{22}\} = 0.1。$$

选择如下一组满足定理 1 的模板参数：

$$\{a = 3, b = 1, z = 1.5\}$$

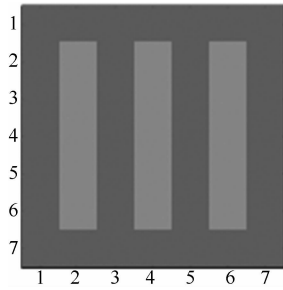
利用上述模板参数，GLOGOR CNN 模拟灰度图像 P_1 和 P_2 的逻辑或运算，结果如图 3(c)所示。

特别地，输入图像和初始状态图像的前景和背景均为单一灰度前景和单一灰度背景。给定两幅前景和背景均为单一灰度前景和单一灰度背景的静态灰度数字图像 P_1 和 P_2 ，图 4(a)和图 4(b)为 P_1 和 P_2 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的两幅图像。同样地，令输入图像 $U = P_1 = [g_{i,j}^1]_{M \times N}$ ，初始状态图像 $X(0) = P_2 = [g_{i,j}^2]_{M \times N}$ 。

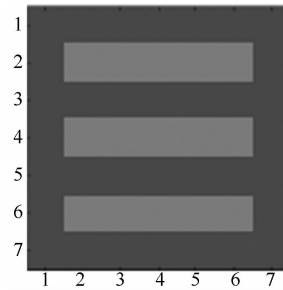


(a) 由灰度图像 P_1 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像 (b) 由灰度图像 P_2 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像 (c) GLOGOR CNN 模拟逻辑或运算的结果

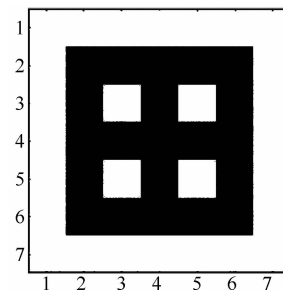
图 3 GLOGOR CNN 模拟灰度图像 P_1 和 P_2 的逻辑或运算



(a) 由灰度图像 P_1 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像



(b) 由灰度图像 P_2 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像



(c) GLOGOR CNN 模拟逻辑或运算的结果

图 4 GLOGOR CNN 模拟单一灰度前景、单一灰度背景图像 P_1 和 P_2 的逻辑或运算

灰度图像 P_1 和 P_2 可划分成

$$P_1: g_{i,j}^1 \begin{cases} g_{i,j}^{11}, & \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{12}, & \text{前景灰度} \end{cases}$$

$$P_2: g_{i,j}^2 \begin{cases} g_{i,j}^{21}, & \text{背景灰度} \\ g_{i,j}^{22}, & \text{前景灰度} \end{cases}$$

且

$$\min\{g_{i,j}^{11}\} = \max\{g_{i,j}^{11}\} = -0.4, \quad \min\{g_{i,j}^{12}\} = 0.3;$$

$$\min\{g_{i,j}^{21}\} = \max\{g_{i,j}^{21}\} = -0.6, \quad \min\{g_{i,j}^{22}\} = 0.4。$$

选择如下一组满足定理 1 的模板参数:

$$\{a=3, b=3, z=1.5\}$$

利用上述模板参数, GLOGOR CNN 模拟灰度图像 P_1 和 P_2 的逻辑或运算, 结果如图 4(c)所示。

图像 P_1 和 P_1 为两幅带有噪声的字母图像, 图

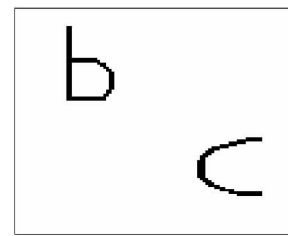
5(a)和图 5(b)为这两幅字母图像的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的两幅图像。令字母图像 P_1 和 P_2 分别作为 GLOGOR CNN 的输入图像 U 和初始状态图像 $X(0)$ 。



(a) 由字母图像 P_1 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像



(b) 由字母图像 P_2 的伪彩色图像通过 PS 软件命令得到的图像



(c) GLOGOR CNN 模拟逻辑或运算的结果

图 5 GLOGOR CNN 模拟两幅字母图像的逻辑或运算

选取 $g_0 = -0.1$, 则根据图像 P_1 和 P_2 可得:

$$\min\{g_{i,j}^{11}\} = -1, \quad \max\{g_{i,j}^{11}\} = -0.55, \quad \min\{g_{i,j}^{12}\} = 0.35$$

$$\min\{g_{i,j}^{21}\} = -0.9, \quad \max\{g_{i,j}^{21}\} = -0.55, \quad \min\{g_{i,j}^{22}\} = 0.1$$

选择一组模板参数满足定理 1, 如下

$$\{a=3, b=1, z=1.5\}$$

利用上述模板参数, GLOGOR CNN 模拟图像 P_1 和 P_2 逻辑或运算的结果如图 5(c)所示。

g_0 的取值不同, 划分图像的前景和背景不同, 选取的模板参数不同。由于 CNN 通用机已经实现它实时高速并行模拟非线性细胞阵列, 并且多款不同用途的 CNN 芯片已经被成功设计并开发出来, 分辨率可达到 520 万像素^[22]。因此, 在实际工程应用中, 可以根据实际需要选择合适的 g_0 和模板参数, 只要满足定理 1 的参数不等式, 就能快速实现

灰度图像的逻辑或运算。

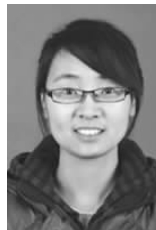
4 结束语

通过制定灰度图像的逻辑或运算,设计了一类灰度逻辑或运算 CNN;并提出了 GLOGOR CNN 的整体任务和局部规则。根据局部规则,对其模板进行顽健性设计,提出了相应的顽健性设计定理,并给出了严格的数学证明。只要 GLOGOR CNN 的模板参数满足定理中提出的参数不等式,就能完成相应的整体任务。实验结果验证了 GLOGOR CNN 的有效性及其顽健性设计定理的可行性。该 GLOGOR CNN 可直接对受噪声污染的黑白图像和灰度图像进行逻辑或运算,而不需要先对其进行二值化,然后对二值化后的黑白图像进行逻辑或运算。将二值图像逻辑或 CNN 推广到了灰度图像逻辑或 CNN。

参考文献:

- [1] CHUA L O, YANG L. Cellular neural networks: theory[J]. IEEE Transactions on Circuits Systems, 1988, 35(10): 1257-1272.
- [2] CHUA L O, YANG L. Cellular neural networks: applications[J]. IEEE Transactions on Circuits Systems, 1988, 35(10): 1273-1290.
- [3] CHUA L O, ROSKA T. The CNN paradigm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 1993, 40(3): 147-156.
- [4] DOGARU R, CHUA L O. Universal CNN cells[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1999, 9(1): 1-48.
- [5] DUDEK P J. An asynchronous cellular logic network for trigger-wave image processing on fine-grain massively parallel arrays[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems- II: Analog and Digital Signal Processing, 2006, 53: 354-358.
- [6] ZARANDY A, REKECZKY C. Low-power processor array design strategy for solving computationally intensive 2D topographic problems[A]. Cellular Nanoscale Sensory Wave Computing[C]. Springer, New York, 2010. 215-245.
- [7] ARUN P V, KATIYAR S K. Cellular neural network-based hybrid approach toward automatic image registration[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, (7): 1-11.
- [8] 张爱华, 雷小亚, 陈晓雷等. 基于细胞神经网络的快速手语视频分割方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(2): 503-506.
ZHANG A H, LEI X Y, CHEN X L, *et al.* Fast segmentation of sign language video based on cellular network[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(2): 503-506.
- [9] CHUA L O. CNN: A vision of complexity[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1997, 7(10): 2219-2425.
- [10] ZANELA A, TARAGLIO S. Sensing the third dimension in stereo vision systems: a cellular neural networks approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 11(2): 203-213.
- [11] ROSKA T, CHUA L O. The CNN universal machine: an analogic array computer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 1993, 40: 163-173.
- [12] SBITNEV V, CHUA L O. Local activity criteria for discrete-map CNN[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2002, 12(6): 1227-1272.
- [13] HADAD K, PIROOZMAND A. Application of cellular neural network (CNN) method to the nuclear reactor dynamics equations[J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34(5): 406-416.
- [14] 涂小辉, 许杰, 张莲. 五阶离散 CNN 超混沌数字化研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(3): 101-103.
TU X H, XU JIE, ZHANG L. Digitization of discrete fifth-order CNN hyper-chaos[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(3): 101-103.
- [15] 任晓霞, 廖晓峰, 熊永红. 基于细胞神经网络超混沌特性的图像加密新算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(6): 1528-1530.
REN X X, LIAO X F, XIONG Y H. new image encryption algorithm based on cellular neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(6): 1528-1530.
- [16] HANGGI M, MOSCHYTZ G S. Genetic optimization of cellular neural networks[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation[C]. Anchorage, AK, 1998. 381-386.
- [17] MIN L Q. Progress in robustness designs for cellular neural network[J]. CCAST-WL Workshop, 2005, 170: 250-260.
- [18] LIU J Z, MIN L Q. Robust designs for templates of directional extraction cellular neural network with applications[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 23(1): 87-100.
- [19] LIU J Z, MIN L Q. Robust design of bipolar wave cellular neural network with applications[J]. International Journal of Modelling[J], Identification and Control, 2010, 11(1/2): 99-106.
- [20] 丁蕾. 快速图像逻辑运算 VC++ 算法[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2011, 28(3): 88-92.
DING L. Fast VC++ algorithm of image logical operation[J]. Journal of Guangxi Teachers Education University(Natural Science Edition), 2011, 28(3): 88-92.
- [21] 刘玉杰, 赵国英, 李宗民等. 基于逻辑运算的二值图像检索[J]. 计算机应用, 2004, 24(10): 72-74.
LIU Y J, ZHAO G Y, LI Z M, *et al.* Logical operation based binary image retrieval[J]. Journal of Computer Applications, 2004, 24(10): 72-74.
- [22] [EB/OL]. <http://www.anafocus.com/>.

作者简介:



张群 (1988-), 女, 山东济南人, 博士, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为细胞神经网络、图像处理。



闵乐泉 (1951-), 男, 北京人, 硕士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为细胞神经网络、图像处理、复杂网络混沌同步理论及其应用、混沌加密、复杂系统建模。