

用光电混合方法实现 Ritter 图像代数的模板操作

梁 丰* 刘立人 王斌泉 彭海峰

(中国科学院上海光学与精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 Ritter 的图像代数定义的三种基本的图像与模板间操作可以表达多种图像变换。本文通过加权、位移和叠加等三层图像操作统一实现这三种模板操作, 并设计了一个双层光电混合结构: 在多重成像-阈值操作层中, 采用一种空间线性光强编码方法编码输入图像, 以实现两种加权计算; 在相关操作层中实现图像的位移和叠加, 相关结果由 CCD 接收, 通过电子计算机辅助处理。文中对一维图像进行了实验验证。

关键词 图像处理, 图像代数, 并行处理。

1 引 言

Ritter 的图像代数是用于图像处理的一种强有力的代数语言, 它能够表达所有图像到图像的变换^[1~3]。图像代数主要有两类操作: 图像间的操作和图像与模板间的操作(模板操作)。图像代数的模板在数学上统一和推广了通常的模板, 窗口、掩膜、结构元素和邻域函数的概念。对图像处理应用而言, 模板操作是最重要的, 可以表达多种图像变换, 例如离散傅里叶变换, 线性卷积, 和数学形态学操作等。所有的模板操作都可由三种基本模板操作表示: 广义卷积 (generalized convolution) \oplus , 加法最大值 (additive maximum) \square 和乘法最大值 (multiplicative maximum) \odot 。

设 $a \in R^X$ 是点集 $X \subset R^n$ 上的图像, $c \in R^Y$ 是点集 $Y \subset R^m$ 上的图像, R^n 表示 n 维实数空间。模板 $t \in (R^X)^Y$ 定义为 Y 上的广义图像, 其像素值为 X 上的图像。广义卷积定义为:

$$a \oplus t \equiv c \in R^Y, \quad c = \{(y, c(y)) : c(y) = \sum_{x \in X} a(x) \cdot t_y(x), y \in Y\}. \quad (1)$$

设 $a \in R^X, t \in (R^X - \infty)^Y$, 加法最大值定义为:

$$a \square t \equiv c \in R^Y, \quad c = \{(y, c(y)) : c(y) = \text{Max}_{x \in X} a(x) + t_y(x), y \in Y\}. \quad (2)$$

设 $a \in (R_{\neq 0}^{\geq 0})^X, t \in ((R_{\neq 0}^{\geq 0})^X)^Y$, 乘法最大值定义为:

$$a \odot t \equiv c \in R^Y, \quad c = \{(y, c(y)) : c(y) = \text{Max}_{x \in X} a(x) \cdot t_y(x), y \in Y\}. \quad (3)$$

三种模板操作可以统一看作加权的邻域操作, 利用电子处理器的多种计算功能, 可以用

* 现在地址: 浙江工业大学电子工程系, 杭州 310014。

收稿日期: 1994年10月31日; 收到修改稿日期: 1995年1月17日

多处理器的电子并行结构实现图像代数操作^[4]，但是由于电子互连能力的限制，对模板尺寸较大的情况不能完全并行处理。通常在图像处理中，采用具有位移不变性的模板。这类图像变换往往可以用光学方法并行实现^[5~7]，但是用一个光学结构来实现三种基本模板操作却是相当困难的，因为涉及到不同的实数加权计算和线性与非线性两种邻域操作。

本文对位移不变模板操作给出了一个邻域操作表达式，并提出了通过加权、位移和叠加等三层图像操作统一实现三种模板操作的方案。算法的实现采用一个双层光电混合结构：在多重成像-阈值操作层中，采用一种空间线性光强编码方法编码输入图像，通过阈值控制实现两种加权计算；在相关操作层中通过相关核图案控制实现图像的位移和叠加，相关结果由 CCD 接收，通过电子计算机辅助处理输出最终数据。文中对一维图像进行了实验验证。

2 实现模板操作的原理

根据(1)式、(2)式和(3)式，实值图像和实值模板间的操作不难分解为正实值图像与正实值模板间的操作和图像间加减操作。因此本文主要研究正实值模板操作。设图像 $a \in (R_{\geq 0}^{\infty})^X$ ，位移不变模板 $t \in ((R_{\geq 0}^{\infty})^X)^X$ ，则三种模板操作可以由对函数 $g: W \rightarrow R$ 的邻域操作统一表示：

$$c(y) = (a \otimes t)(y) = \Gamma_{x \in W} a(y+x) o g(x), \tag{4}$$

其中图像 $c \subset R^X$ ；对应(1)式、(2)式和(3)式， \otimes 分别是 \oplus 、 \square 或 \odot ； $W \subset X$ 为 $g(x)$ 的支持点集； Γ 是 Σ 或 Max ， o 是加法或乘法。邻域函数 g 与模板 t 的关系是： $g(x-y) = t_y(x)$ 。

输入图像的像素值的值域可能是各种各样的，因此首先须做规一化处理，使之在 $[0, +1]$ 的范围内。设 a' 是图像 a 的规一化， $c_i = \text{Max}\{a(x), x \in X\}$ ，那么有：

$$a' = \{(x, a'(x)) : a'(x) = a(x)/c_i, x \in X\}. \tag{5}$$

为了使输出图像 c 也是规一化的， g 的值也应做相应调整。设 g' 是 g 的调整， $c_i = \text{Max}\{g(x), x \in W\}$ ，对 \oplus ，或 \odot 操作，那么有：

$$g' = \{(x, g'(x)) : g'(x) = g(x)/c_i, x \in W\}; \tag{6}$$

对 \square 操作，那么有：

$$g' = \{(x, g'(x)) : g'(x) = (g(x) - c_i)/c_i, x \in W\}. \tag{7}$$

前一情况下， $g'(x) \in [0, +1]$ ；后一情况下， $g'(x) \in (-\infty, 0]$ ，且 $\text{Max}\{g'(x)\} = 0$ 。由(2)式，(4)式易推知 $g'(x)$ 中像素值小于等于 -1 的对 $a' \square t'$ 的结果无影响，因此将这些点从 W 中删除，用 W' 表示新的支持点集， $g'(x) \in (-1, 0)$ ， $x \in W'$ 。对规一化图像操作后的结果可以由下列各式推到原结果：

$$a \oplus t(x) = a' \oplus t'(x) \cdot c_i \cdot c_i, \tag{8}$$

$$a \square t(x) = a' \square t'(x) \cdot c_i \cdot c_i, \tag{9}$$

$$a \odot t(x) = a' \odot t'(x) \cdot c_i + c_i, \tag{10}$$

(4)式可以由以下三个步骤的图像操作实现：

- 1) 对应 W 中的每一点 X 生成一幅加权图像：

$$a^x = \{(y, a^x(y)) : a^x(y) = a(y) o g(x), y \in X\}; \tag{11}$$

- 2) 平移每幅加权图像：

$$a_i^x = \{(y, a_i^x(y)) : a_i^x(y) = a^x(y+x), y+x \in X\}; \tag{12}$$

3) 叠加所有的平移图像:

$$c = a \otimes t = \{(y, c(y)) : o(y) = \int_{x \in W} a_x^2(y)\}. \quad (13)$$

为了通过光学方法求权重 w 的乘法加权图像, 将图像 a 用空间光强编码。图 1 是一个灰值为 p 的像素的编码图形, 其一维光强分布为:

$$I(x) = 1 - x/p. \quad (14)$$

若对这个矩形图案取高通阈值 $h = 1 - w$ (图 2a),

$$I_{out} = \begin{cases} 1, & I_{in} > h; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad (15)$$

就可得到一个长度为 $l_1 = pw$ 的二值光强的矩形图案[图 2(b)]. 若求加法加权, 可取阈值 $h = 0$, 则 $l_1 = p$, 沿 x 方向移动一个距离 $s = -w$, 并将 $x < -1$ 的部分屏蔽掉, 所得图案的长度为 $l_2 = p + w$ [图 2(c)]. 可以看到这是一种有界加法, 当 $s > l_1$ 时 $l_2 = 0$ 。因为如前述规一化后, \square 操作的结果为正值, 此有界加法对最终结果不会造成误差。

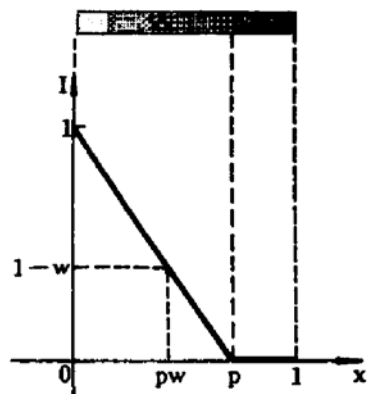


Fig. 1 Space intensity encoding pattern and its intensity distribution curve

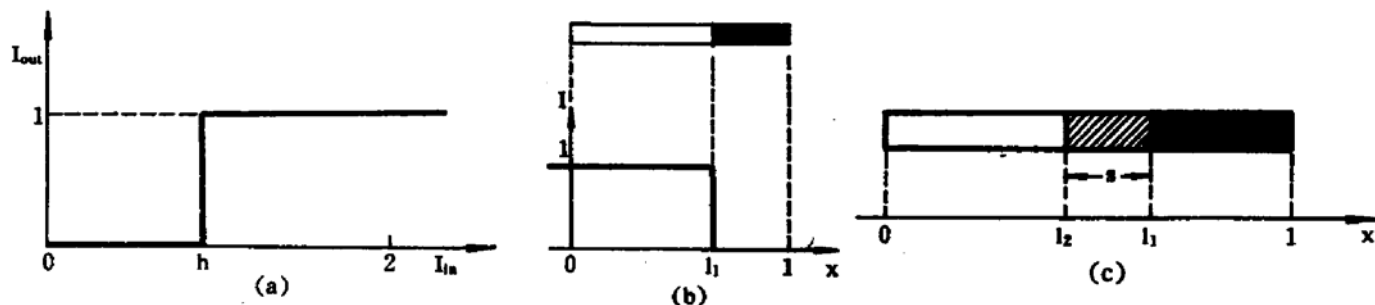


Fig. 2 Implementation of two kinds of weighting operation with threshold and shifting; (a) threshold curve; (b) output after threshold; (c) shift for addition

这样对每个权重都可得到一个面积编码的权重图像, 其任一像素由一个长度等于像素值的等光强矩形表示(光强为 1)。如果根据式(12) 平移各编码权重图像, 再将位移后的图像叠加在一起, 如图 3 所示, m 个像素的编码图案叠加的矩形的长度就是最大的像素值。若将叠加的矩形的光强积分, 则可以得到各像素值的和。

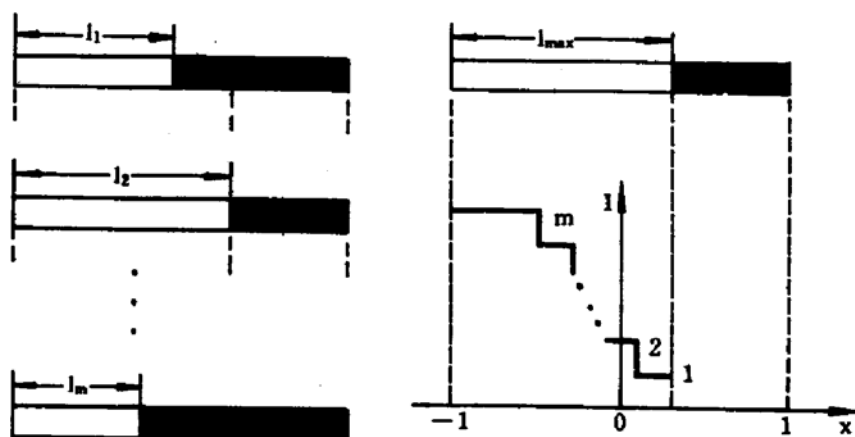


Fig. 3 Superposition of area-coding pattern, and its intensity distribution

3 光学实现系统和实验验证

图 4 是光学实现系统的原理图。这是一个双层并行结构: 包括一个多重成像-阈值操作层和一个相关操作层。第一层中 SLM_1 是 LED 列阵, 其中输入灰值图像的空间光强编码图案, 一个编码矩形根据灰值分辨率的要求划分为一系列离散的像素, 每个像素由一个 LED 显示。通

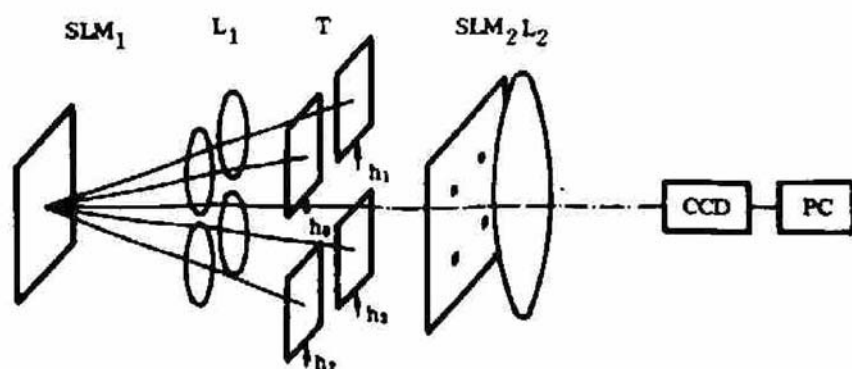


Fig. 4 Scheme of the optoelectronic implementation architecture

过透镜列阵 L_1 ，输入图像成 m 个像分别在阈值器件阵列 T 的 m 个单元上，每个单元分别对应一个权重。由阈值控制权重大小和做乘法加权还是加法加权。加法加权的位移操作由第二层完成。第二层中 T 输出的面积编码图像列阵做为一幅图像来对 SLM_2 (液晶屏) 上的核图案通过透镜 L_2 做相关，相关图像由 CCD 摄像机接收，传到计算机上做进一步处理。由相关核的图案来控制实现几个编码矩形的位移和叠加。若通过相关将几个矩形的全部编码像素都叠加在一起，就完成了这几个矩形的光强积分求和。由于采用相关叠加的方法，对模板上具有相同权重的不同像素，只需求一个权重图像。

图 5 中用一维图像 $a(x)$ [图 5(a)] 对模板函数 $g(x)$ [图 5(b)] 的模板操作的实验说明实现过程。图 5(c) 是空间线性光强编码图像的照片，是模拟式显示器模拟 LED 列阵的离散灰值图像。图 5(d) 是由 T 输出的乘法加权面积编码图像列阵的照片 (有两个权重是相同的)。图 5(e) 和图 5(f) 分别是实现 Max 和 \sum 操作的 SLM_2 上的相关核图案。图 5(g) 是 Max 操作后的相关图像的照片，可与图 5(a) 中 $a \odot g(x)$ 进行比较。这里省略了其他两种操作的实验数据。

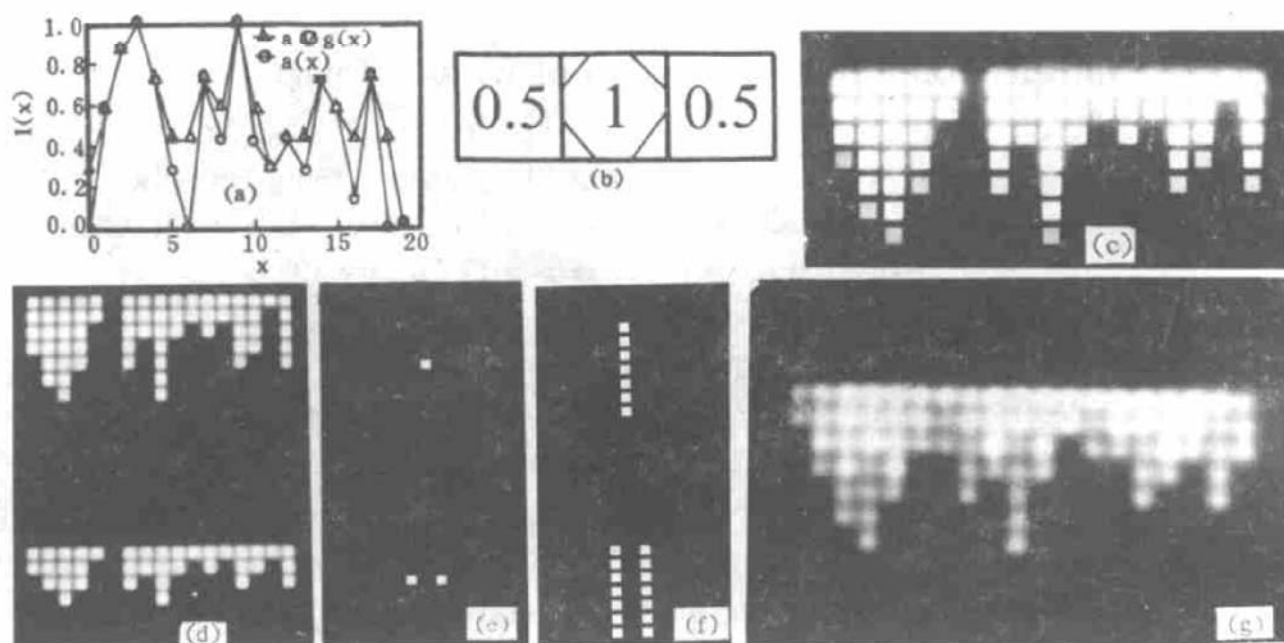


Fig. 5 Experimental data and photographs; (a) an 1-D image $a(x)$; (b) an 1-D template $g(x)$; (c) photograph of the coding pattern of a ; (d) array of multiplicative weighted images output from T ; (e) and (f) Pattern of the kernel of the correlating layer for Max and \sum operation; (g) photograph of the correlated image for $a \odot g(x)$ operation

结 论 本文提出了一种光学实现图像代数中的图像-模板操作的一种方案。主要特点之一是使用一种空间线性光强编码技术,通过阈值操作来得到乘法加权像素值,同时结合平移,也可求得加法加权像素值。另一特点是利用相关操作同时实现位移、叠加和积分操作。这样解决了实现大多数图像处理模板操作的难题。具体解决了操作线性和非线性操作混杂带来的实现困难,改善了操作的普通光学相关实现因透射式灰值 SLM 难以满足要求和价格昂贵带来的不足。

空间线性光强编码图案由电子系统提供,研究一种简单的实现方法是进一步工作的目标。

本工作由国家自然科学基金和国家高技术办公室资助。

参 考 文 献

- [1] G. Ritter, J. Wilson, J. Davidson. Image algebra: An overview. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1990, CVGIP-49, 297~331
- [2] G. Ritter, P. Gader, Image algebra techniques for parallel image processing. *J. Parallel Distrib. Comput.*, 1987, 4 (5): 7~44
- [3] G. Ritter, M. Shrader-Rrechette, J. Davidson, Image algebra: A rigorous and translucent way of expressing all image processing operations. *Proc. SPIE*, 1987, 781: 117~121
- [4] P. Coffield, Architecture for processing Image algebra operations. *Proc. SPIE*, 1992, 1769: 178~189
- [5] L. Liu, Optoelectronic implementation of mathematical morphology. *Opt. Lett.*, 1989, 14(10): 482~484
- [6] S. Lee. Ed, *Optical Information Processing*, Springer-Verlag, 1981, New York, 6~40
- [7] B. S. Wherrett, Architectural Aspects of Optical Computing. *Proc. SPIE*, 1986, 789: 7~26

Optoelectronic Implementation of Ritter's Image Algebra

Liang Fen Liu Liren Wang Binqun Peng Haifeng

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

(Received 31 October 1994; revised 17 January 1995)

Abstract The three basic image-template operations, which are defined in Ritter's image algebra, can describe many image transforms. In this paper, three operations are implemented with three step of image operations including: weighting, shifting and superposition. A two-layer optoelectronic architecture is provided; in the multi-imaging-threshold layer, two kinds of weighting are done with an space linear intensity coding methods; in the correlating layer, the images are shifted and superposed. The correlated result is detected by a CCD, and further processed by an computer. Experiments on 1D images are demonstrated.

Key words image processing, image algebra, parallel processing.