

单通道光学相关实现击中与否运算

景红梅 程惠全 邵 岚 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 给出一种单通道光学相关实现击中与否运算的算法和光学装置。此法基于形态学中腐蚀运算和光学相关的关系及阈值操作, 在非相干光学相关器中, 将前景结构核元素编码为 1, 背景结构核元素编码为 α (α 满足一定条件), 只需用原图像与前景和背景结构核进行相关, 然后对相关结果取阈值为 K (前景结构核元素的像素数), 即可得到击中与否运算。击中与否运算可以光学并行一步实现。

关键词 击中与否运算, 阈值操作, 光学相关。

1 引 言

数学形态学是图像处理的工具^[1-3], 它已被广泛应用于边缘检测^[4]、结构分析^[5]、噪声抑制^[6]和其它图像处理问题。由于其并行性, 数学形态学的光学处理已经成为人们关注的焦点。在最初阶段, 形态学图像处理只停留在对诸如腐蚀、膨胀等单一算子的光学实现上。这样的光学系统有离焦成像系统^[7]、全息滤波器的相干光相关器^[8]、编码模板的非相干光相关器^[9]、调制光源列阵的阴影投影系统^[10]、声光装置的相干光相关器^[11]、符号替代结构^[12]和 Dammann 光栅等。但是, 实际上一个形态学图像处理函数是由一系列的基本算子按不同排列构成的, 单一算子的形态学处理器不能完成复杂的图像处理函数, 所以, 后来又发展了图像代数和其光学结构来完成此任务。所谓图像代数学, 即用最少的算子实现一般的图像处理函数的形态学集合论方法。其中主要的图像代数有: 二元图像代数(BIA)^[14-16]、图像逻辑代数(ILA)^[17]、单一算子图像代数(OIA)^[18, 19]、形态学击中与否变换代数(HMT)^[20-23]和可变阈值代数(VTA)^[28]。用二元图像代数任何二元图像变换都可用并、补和膨胀三种操作的组合来完成, 因而它需要三个光学硬件进行可重构互连。图像逻辑代数包括三个图像算子、六个图像几何操作和三种邻域结构, 它需要一个光学图像 Crossbar 开关组织九种模式来完成所需图像处理函数。单一算子图像代数只有一个膨胀算子进行一系列不同的逻辑运算, 所有图像变换都可以通过反复反馈使用膨胀算子和逻辑操作完成。在击中与否变换代数中, 一个形态学合成处理函数可以由击中与否操作的求和构成, 它的光学实现只需要反复使用不同的结构核元素进行击中与否操作即可。可变阈值代数包含权重互连块, 在它的光学实现中, 只需要阈值的可编程操作, 但控制卷积权重比较困难。作者认为形态学击中与否变换是一个比较好的图像代数。但是, 由定义可知道该运算是由两个腐蚀和一个交操作完成, 这意味着, 原

图像和它的补需要单独与前景和背景结构元素核进行两次腐蚀。因此,击中与否的装置就比腐蚀和膨胀等基本操作复杂。典型的光学处理器包括光学非相干相关系统并行处理空间双轨编码的正图像和补图像与它们的结构核^[22],其在光学上是单通道实现,但在算法上是取一次阈值实现。另一种方法^[29]在光学上是经编码后的图像及图像的补以列分解交叉组合在一起单通道实现,这种方法是上述方法的推广。总之,现有的并行光学形态学击中与否变换都需要图像及图像的补这两种输入或需对图像及图像的补作某种编码,均需用计算机作预处理。

本文基于击中与否运算的定义发展了单通道击中与否运算,其中只需对原图像进行处理,而前景和背景结构元素合并成一个具有三种水平的灰阶结构核。因此,一个合成处理函数可以由具有不同结构核元素的单通道击中与否运算的和构成,基于此发展了一个光学非相干相关系统并行处理单通道击中与否运算和一步取阈操作。任何合成型态学处理函数都可以在这样的光学击中与否运算处理器中运用单通道击中与否运算完成。

2 形态学和用形态学击中与否变换表示形态学处理函数

在集合论定义中,膨胀、腐蚀、补、并和交分别由 \oplus 、 \ominus 、 $\bar{}$ 、 \cup 和 \cap 表示,图像和结构核元素通常用坐标集合 X 和 S 表示。一个形态学合成处理函数的输出一般表示为

$$Z = F(X, \{S_i\}; \oplus, \ominus, \bar{}, \cup, \cap). \quad (1)$$

传统的击中与否变换定义为

$$X \odot (S_1, S_2) = (X \ominus S_1) \cap (\bar{X} \ominus S_2) \quad (2)$$

式中 X 表示二元图像, \bar{X} 表示图像的补, S_1 和 S_2 分别表示前景和背景结构核元素。

由文献[22]可知,一个在坐标原点邻域的布尔逻辑函数可用来重构给定的形态学函数。用于互连的布尔邻域可用坐标集合 $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 表示,相应的态变量为 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_N$ 。因而在典型的“积之和”形式中,可能存在 $J = 2^N$ 个最小项和 2^J 种可能组合。这时,在坐标原点的像素输出状态可表述成

$$z_0 = F(x_k | x_k \in S) = P_{1z_0,1} + P_{2z_0,2} + \dots + P_{Jz_0,J} = P_{1x_0x_1 \dots x_{N-1}} + P_{2\bar{x}_0\bar{x}_1 \dots \bar{x}_{N-1}} + \dots + P_{J\bar{x}_0\bar{x}_1 \dots \bar{x}_{N-1}}. \quad (3)$$

这里 $P_J \in \{0, 1\}$, $S = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$ 。 $P_J = 1$ 时出现最小项。注意,对于一般的使用,布尔邻域可扩展为任意的邻域 $L = M \times M$,这里 $\{x_0, x_1, x_2, x_N\} \in \{x_0, x_1, x_2, x_{L-1}\}$,方程中的每个最小项 $z_{0,J}$ 可以分为两组变量:一组包括正的变量,另一组包括补变量。它们的邻域分别由 $S_{J,1}$ (S 中所有正的元素)和 $S_{J,2}$ (S 中所有补的元素)表示。等价的结构核元素是 S ,因而 $S = S_{J,1} \cup S_{J,2}$ 和 $S_{J,1} \cap S_{J,2} = \Phi$ 。由于最小项中的逻辑操作是在2维图像定义空间中进行的,所以由逻辑“与”操作连接的正的变量元素导致图像 X 被 $S_{J,1}$ 腐蚀,由逻辑“与”连接的补的变量元素导致图像的补 \bar{X} 被 $S_{J,2}$ 腐蚀。“与”操作连接这两个腐蚀运算就是结构核元素对 $(S_{J,1}, S_{J,2})$ 对图像 X 进行的形态学击中与否变换操作

$$z_J = X \odot (S_{J,1}, S_{J,2}) = (X \ominus S_{J,1}) \cap (\bar{X} \ominus S_{J,2}) \quad (4)$$

3 单通道形态学击中与否变换表示形态学处理函数

3.1 单通道形态学击中与否变换代数

在这部分,由双通道形态学击中与否变换代数和阈值操作出发,推导出单通道形态学击

中与否变换代数。根据腐蚀和相关之间的关系,由方程(4)表达的二元图像 X 由结构核元素对 $(S_{J,1}, S_{J,2})$ 进行的形态学击中与否变换操作可表示为

$$z_J(X) = \text{Th}_K[f(X) * S_{J,1}(X)] \cdot \text{Th}_{N-K}[\bar{f}(X) * S_{J,2}(X)] \quad (5)$$

这里 $z_J(X)$ 为输出函数,它的值是 0 或 1; X 为坐标矢量,它的值趋近于无穷; $f(X)$, $\bar{f}(X)$, $S_{J,1}(X)$ 和 $S_{J,2}(X)$ 分别表示输入二元图像、原图像的补、前景结构核元素和背景结构核元素; $*$ 表示相关; \cdot 表示逻辑“与”操作; K 和 $N - K$ 分别为 $S_{J,1}$ 和 $S_{J,2}$ 中的像素数; $\text{Th}_K(x)$ 表示在 K 水平取阈值,它可以用下面的公式描述:

$$\text{Th}_K(x) = \begin{cases} 1 & x = K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

(5) 式中的第一项和第二项的值都是 1 或 0,“与”操作连接着第一项和第二项。显然,只有当第一项和第二项的值都为 1 时,输出函数 $z_J(X)$ 的值才为 1。(5) 式的第二项还可以表示成

$$\begin{aligned} \text{Th}_{N-K}[\bar{f}(X) * S_{J,2}(X)] &= \text{Th}_{N-K}\{[1 - f(x)] * S_{J,2}(x)\} = \\ &= \text{Th}_{N-K}[N - K - f(X) * S_{J,2}(X)] \end{aligned} \quad (7)$$

只有当 $f(X) * S_{J,2}(X) \rightarrow 0$ 时,(7) 式的值才为 1,因而,方程(7)可写为

$$\text{Th}_{N-K}[\bar{f}(X) * S_{J,2}(X)] = \text{Th}_0[f(X) * S_{J,2}(X)] \quad (8)$$

这里 $\text{Th}_0(X)$ 的定义与 $\text{Th}_K(X)$ 的定义相同。故(5)式可写为

$$z_J(X) = \text{Th}_K[f(X) * S_{J,1}(X)] \cdot \text{Th}_0[f(X) * S_{J,2}(X)] \quad (9)$$

显然,为了得到输出函数 $z_J(X)$,必须进行两次不同水平的取阈操作,如果不作任何限制,将两次取阈操作并为一次是不可能得到输出函数的。因 $f(X) * S_{J,1}(X)$ 的可能取值范围是 $0, 1, 2, \dots, K$,只有当它的值为 K 时,(9) 式的第一项才为 1;同样, $f(X) * S_{J,2}(X)$ 的可能取值范围是 $0, 1, 2, \dots, N - K$,只有当它的值为 0 时,方程(9)的第二项才为 1,即

$$\text{Th}_K\{f(x) * S_{J,1}(x)\} \cdot \text{Th}_0\{f(x) * S_{J,2}(x)\} = \begin{cases} 1 & \text{if } f(X) * S_{J,1}(x) = K \\ & \text{and } f(x) * S_{J,2}(x) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

因为 $f(X)$ 和 $S_{J,2}(X)$ 都是二元变量,所以 $f(X) * S_{J,2}(X)$ 是正整数(和零)。如果引进一个实数 α 使得当 $f(X) * S_{J,2}(X) > 0$ 时

$$\alpha[f(x) * S_{J,2}(x)] = f(x) * [\alpha S_{J,2}(x)] \neq \text{any integer}, \quad (11)$$

则有

$$\text{Th}_{P>0}\{f(x) * [\alpha S_{J,2}(x)]\} = 0. \quad (12)$$

这里 $i + j\alpha \neq K, i = 1, 2, \dots, K; J = 1, 2, \dots, N - K$ 。如果 Q 是一个正整数,依然有

$$\text{Th}_{P>0}\{f(x) * [\alpha S_{J,2}(x)] + Q\} = 0. \quad (13)$$

因为 $f(X)$ 和 $S_{J,2}(X)$ 是二值的,所以 $f(X) * S_{J,2}(X)$ 是正整数(和零)。从上面的性质有

$$\text{Th}_K\{f(x) * S_{J,1}(x) + f(x) * [\alpha S_{J,2}(x)]\} = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x) * S_{J,1}(x) = K \text{ and } f(x) * S_{J,2}(x) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

对比(14)式和(10)式,得到只有一个权重结构核元素的击中与否变换的最后形式:

$$z(x) = \text{Th}_K\{f(x) * S_{J,1}(x) + f(x) * \alpha S_{J,2}(x)\} = \text{Th}_K\{f(x) * [S_{J,1}(x) + \alpha S_{J,2}(x)]\}. \quad (15)$$

(15) 式就是结构核元素对中任意最小项的单通道光学相关形态学击中与否变换的表达式。根据文献[27],输出图像的状态可由下式求得

$$z(x) = \sum_j Z_j(x) \quad (16)$$

其中 $z_j(x) = 1, \quad x \in Z_j; \quad z_j(x) = 0, \quad x \notin Z_j.$

上述算法可理解为下述物理过程: $S_{j,1}$ 和 $S_{j,2}$ 分别被认为是前景和背景结构核元素。只有当图像 X 的一个像素 X_j 击中 $S_{j,1}$ 的每个像素并且击不中 $S_{j,2}$ 的每个像素时, 它才完成一击中与否操作, 此时这个像素 X_j 是所需像素, 其输出为 1; 只要 $S_{j,1}$ 中有一个像素不被击中或 $S_{j,2}$ 有一个像素被击中, X_j 就完成不了一个击中与否操作, 它就不是所需像素, 其输出为 0。这里想做的只是找出所需像素并对其编码为 1 输出, 于是提出利用单通道光学相关和在 K 水平的取阈操作的形态学击中与否变换来完成此项工作。在此方案中, 只需要原图像而不需要补图像。由于形态学邻域操作可由光学相关来完成^[7, 9], X 击中 $S_{j,1}$ 操作可用 X 和 $S_{j,1}$ 之间的相关来完成, X 击不中 $S_{j,2}$ 可用 \bar{X} 和 $S_{j,2}$ 之间的相关来完成。当 X 击中 $S_{j,1}$ 且击不中 $S_{j,2}$ 时, X 和 $S_{j,1}$ 相关的结果为 K , \bar{X} 和 $S_{j,2}$ 相关的结果为 0, 想要得到形态学击中与否变换的输出结果, 可以通过分别对两个相关结果取不同的阈值后进行“与”操作得到。若对前景结构核元素 $S_{j,1}$ 中的像素编码为 1, 对背景结构核元素 $S_{j,2}$ 中的像素编码为 α , 使得 $\alpha \neq 1$, 且 $i + j\alpha \neq K (i = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, N - K)$, 则两个不同水平阈值操作的“与”操作可合并为一个阈值操作完成。其中 $S_{j,1}$ 的像素数为 K , $S_{j,2}$ 的像素数为 $N - K$ 。对 $S_{j,1}$ 中的像素编码为 1 表明 $S_{j,1}$ 中的每个像素的光强透过率为 1, 对 $S_{j,2}$ 中的像素编码为 α 表明 $S_{j,2}$ 中的每个像素的光强透过率为 α 。这样, 击中与否变换就可以通过对图像 X 和结构核元素对 $(S_{j,1}, S_{j,2})$ 的相关结果取 K 水平的阈值得到。

3.2 击中与否运算中结构核元素编码参数 α 的选取

由上面的算法可知击中与否运算是一个比较精确的匹配模式, 它可以由(10)式来表达, 在光学上, 它可由单通道光学相关后取阈值实现。这里关键的问题是选择适当的 α 值。对于一个含有 N 个像素的结构核元素 S , 令 K 为击中结构核元素的像素数, 则击不中结构核元素的像素数为 $N - K$ 。根据上述算法, 作者提出选择适当 α 值的一些原则:

1) $\alpha \neq 1$, α 可以是整数, 也可以是小数。2) $i + j\alpha \neq K, i = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, N - K$ 。3) 如果 α 是小数, 则 $\alpha > \epsilon, \epsilon$ 是可实现的光强透过率最小值; $k + \epsilon < \alpha < k + 1 - \epsilon, k \in Z, \epsilon$ 是可区别的光强差值的最小值。4) 和击中运算相比, $j\alpha$ 必须是可区分的。

值得注意的是, $\alpha = K + 1$ 是符合上述原则的一个特例, 此时, $f(X) * S_{j,1}(X) + f(X) * S_{j,2}(X)$ 的值为整数, $\text{Th}_K(\cdot)$ 在这里就意味着取低阈值, 所以相对来说区分 $f(X) * S_{j,1}(X) + f(X) * \alpha S_{j,2}(X)$ 的值是比较容易的。

3.3 单通道形态学击中与否变换算法在形态学处理中的一个应用

根据上述分析可知, 在数学形态学中, 任何二元图像处理函数都可由布尔逻辑重构为基本形态学算子的并行或串行组合, 它可通过选择适当的 α 值后单通道光学相关形态学击中与否变换实现。为了更好地理解, 给出一形态学边缘检测的例子:

$$Z = (X \oplus S) \cap \bar{X} \quad (17)$$

所给的结构核元素包括原点和它附近的四个邻域(参看图 1), x_0 在原点, x_1 在东边, x_2 在北边, x_3 在西边, x_4 在南边。在布尔重构中, (17) 式可写为

$$\begin{aligned} z_0 &= (x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4)\bar{x}_0 = \\ &\bar{x}_0\bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4 + \bar{x}_0\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4 + \bar{x}_0x_1x_2\bar{x}_3x_4 + \bar{x}_0x_1\bar{x}_2x_3x_4 + \\ &\bar{x}_0x_1x_2x_3\bar{x}_4 + \bar{x}_0\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4 + \bar{x}_0x_1x_2\bar{x}_3x_4 + \bar{x}_0\bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4 + \\ &\bar{x}_0x_1\bar{x}_2x_3x_4 + \bar{x}_0x_1x_2x_3\bar{x}_4 + \bar{x}_0\bar{x}_1x_2x_3x_4 + \bar{x}_0x_1x_2\bar{x}_3x_4 + \end{aligned}$$

$$\bar{x} \alpha x \ 1x \ 2x \ 3x \ 4 + \bar{x} \alpha \bar{x} \ 1x \ 2x \ 3x \ 4 + \bar{x} \alpha x \ 1\bar{x} \ 2x \ 3\bar{x} \ 4 \quad (18)$$

对于这样一个形态学边缘检测函数共有 15 个形态学击中与否变换运算。根据上述原则, 让正像素的透过率为 1, 补像素的透过率为 α , 对不同的形态学击中与否变换运算选择不同的阈值, 阈值大小为最小项所包含的正像素的像素数。因而, 对这个图像处理函数可以分别选取阈值为 1、2、3 和 4。则(18)式可表示为

$$\begin{aligned} z_0 = & \text{Th}_2[f(X) * S_{1,1}(X) + f(x) * \alpha S_{1,2}(X)] + \text{Th}_2[f(X) * S_{2,1}(X) + f(x) * \alpha S_{2,2}(X)] + \\ & \text{Th}_2[f(X) * S_{3,1}(X) + f(x) * \alpha S_{3,2}(X)] + \text{Th}_2[f(X) * S_{4,1}(X) + f(x) * \alpha S_{4,2}(X)] + \\ & \text{Th}_1[f(X) * S_{5,1}(X) + f(x) * \alpha S_{5,2}(X)] + \text{Th}_1[f(X) * S_{6,1}(X) + f(x) * \alpha S_{6,2}(X)] + \\ & \text{Th}_1[f(X) * S_{7,1}(X) + f(x) * \alpha S_{7,2}(X)] + \text{Th}_1[f(X) * S_{8,1}(X) + f(x) * \alpha S_{8,2}(X)] + \\ & \text{Th}_3[f(X) * S_{9,1}(X) + f(x) * \alpha S_{9,2}(X)] + \text{Th}_4[f(X) * S_{10,1}(X) + f(x) * \alpha S_{10,2}(X)] + \\ & \text{Th}_3[f(X) * S_{11,1}(X) + f(x) * \alpha S_{11,2}(X)] + \text{Th}_3[f(X) * S_{12,1}(X) + f(x) * \alpha S_{12,2}(X)] + \\ & \text{Th}_3[f(X) * S_{13,1}(X) + f(x) * \alpha S_{13,2}(X)] + \text{Th}_2[f(X) * S_{14,1}(X) + f(x) * \alpha S_{14,2}(X)] + \\ & \text{Th}_2[f(X) * S_{15,1}(X) + f(x) * \alpha S_{15,2}(X)] \end{aligned} \quad (19)$$

根据参考文献[27], 要处理一个灰值图像, 首先要将灰值图像处理函数通过阈值分解转化为二元图像处理函数的叠加形式, 然后再根据布尔逻辑将二元图像处理函数转化为形态学击中与否变换的叠加。由此可知, 任意形态学图像处理函数都可通过单通道形态学击中与否变换操作的若干输出结果的一次或两次求和来完成。

4 实验装置

基于非相干光单通道相关器和电子取阈的光学并行形态学击中与否变换处理器^[9]如图 2

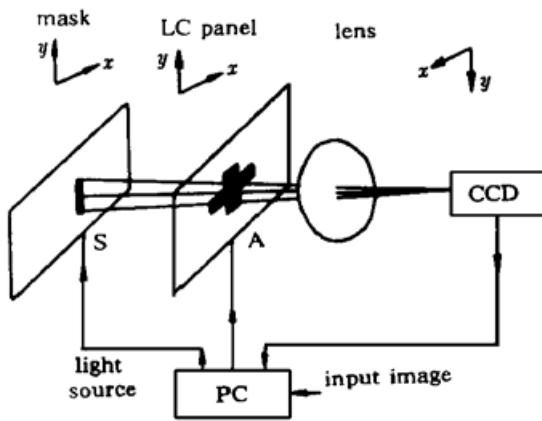


Fig.2 The arrangement of an optical HMT processor

是一个相关:

$$I(x, y) = \iint A(\xi - \frac{d}{f}x, \zeta - \frac{d}{f}y) [S_1(\xi, \zeta) + \alpha S_2(\xi, \zeta)] d\xi d\zeta \quad (20)$$

式中 f 为透镜的焦距, d 为液晶显示屏与结构核元素对所在平面间的距离。不同结构核元素对的形态学击中与否变换操作按时间顺序执行, 最后用 PC 机或监控器上的照相底片求和它们的输出结果以合成最后的输出图像。

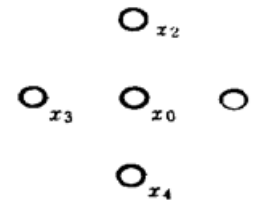


Fig.1 A structuring element of five points

5 实验验证

实验中,用液晶显示屏编码输入有 9×9 个像素的图像,每个像素的尺寸和它们之间的间距是 $1.12 \text{ mm} \times 1.12 \text{ mm}$ 。结构核元素对中每个像素的几何尺寸相同,用第二种方法得到 $S_{j,2}$ 的透过率系数 α 。透镜的焦距为 135 mm ,液晶显示屏与结构核元素平面之间的距离为 450 mm 以保证和CCD的敏感区域匹配。根据上述原则,分别选取 $\alpha = 0.4$ 和 $\alpha = 5$ 。验证了(17)式和(19)式所描述的外边缘检测形态学图像处理函数。图3(a)是输入二元图像。对于这

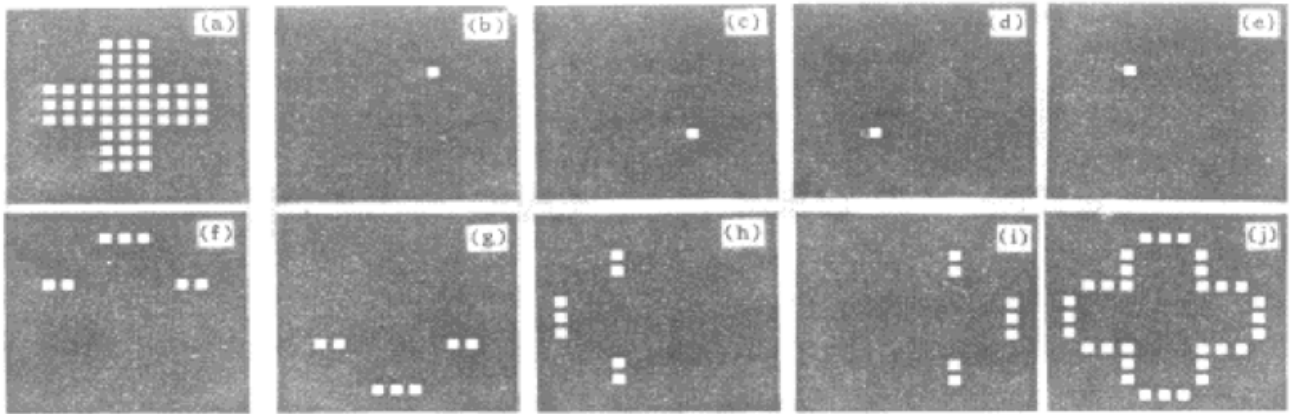


Fig. 3 Experimental demonstration: (a) Input binary image in dual-rail coding, (b) ~ (i) Processed images from eight HMTs, and (j) Resultant edge detection of the input image

个图只有8个形态学击中与否变换输出:

$$\begin{aligned}
 z_0 = & \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \\
 & \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} + \bar{x} \bar{0} \bar{x} \bar{1} \bar{x} \bar{2} \bar{x} \bar{3} \bar{x} \bar{4} = \\
 & \text{Th}_2[f(X) * S_{1,1}(X) + f(X) * \alpha S_{1,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_2[f(X) * S_{2,1}(X) + f(X) * \alpha S_{2,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_2[f(X) * S_{3,1}(X) + f(X) * \alpha S_{3,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_2[f(X) * S_{4,1}(X) + f(X) * \alpha S_{4,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_1[f(X) * S_{5,1}(X) + f(X) * \alpha S_{5,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_1[f(X) * S_{6,1}(X) + f(X) * \alpha S_{6,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_1[f(X) * S_{7,1}(X) + f(X) * \alpha S_{7,2}(X)] + \\
 & \text{Th}_1[f(X) * S_{8,1}(X) + f(X) * \alpha S_{8,2}(X)] \tag{21}
 \end{aligned}$$

这8个结构核元素对的图案如图4所示,亮圈表示前景结构核元素 $SE(S_1)$,暗圈表示背景结构核元素 $SE(S_2)$ 。图3(b)~(i)给出了它们的形态学击中与否变换输出图案,相应的 $\alpha = 0.4$ 和 $\alpha = 5$ 时的数字模拟如图5(a1)~(h2)。在边缘检测中,8个形态学击中与否变换输出结果的叠加的结果如图3(j)所示。对应于图5(e1)和(e2)单通道光学相关结果照片(没有取阈之前)由图6(a)和(b)给出。给出两种不同的

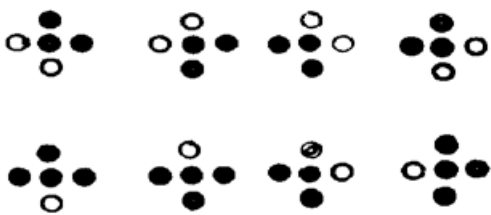


Fig. 4 Pattern of eight structuring element pairs for detecting points on the out-object edges of the input image shown in Fig. 3 (a)

给出两种不同的 α 值的实验,说明 α 值虽然受一定限制,但只要满足限制条件,不同的 α 值可得到相同的结果。

(a1)									
			04	18	28	24	1		
			04	22	32	28	1		
	1	1	34	22	32	28	[2]	1	1
04	18	28	28	32	32	32	28	28	24
04	22	32	32	32	32	32	32	32	28
04	12	22	22	32	32	32	22	22	18
	04	04	14	22	32	28	14	04	04
			04	22	32	28	1		
			04	12	22	18	1		
			04	04	04				

(a2)									
				5	11	12	7	1	
				5	16	17	12	1	
	1	1	1	6	16	17	12	[2]	1
5	11	12	12	17	17	17	17	17	7
5	16	17	17	17	17	17	17	17	12
5	15	16	16	17	17	17	17	16	11
	5	5	6	16	17	12	6	5	5
			5	16	17	12	1		
			5	16	17	12	1		
			5	5	5	5			

(b1)									
			04	12	22	18	1		
			04	22	32	28	1		
	04	04	08	22	32	28	14	04	04
04	12	22	22	32	32	32	22	22	18
04	22	32	32	32	32	32	32	32	28
04	18	28	28	32	32	32	28	28	24
	1	1	14	22	32	28	[2]	1	1
			04	22	32	28	1		
			04	18	28	24	1		
			1	1	1				

(b2)									
				5	15	16	11	1	
				5	16	17	12	1	
	5	5	10	16	17	12	6	5	5
5	15	16	16	17	17	17	16	16	11
5	16	17	17	17	17	17	17	17	12
5	11	12	12	17	17	17	12	12	7
	1	1	6	16	17	12	[2]	1	1
			5	16	17	12	1		
			5	11	12	7	1		
			1	1	1				

(c1)									
			04	04	04				
			1	18	22	12	04		
			1	28	32	22	04		
	04	04	14	28	32	22	08	04	04
1	18	22	22	32	32	32	22	22	12
1	28	32	32	32	32	32	32	32	22
1	14	28	28	32	32	32	28	28	18
	1	1	[2]	28	32	22	14	1	1
			1	28	32	22	04		
			1	24	28	18	04		
			1	1	1				

(c2)									
				5	5	5			
				1	11	16	15	5	
				1	12	17	16	5	
	5	5	6	12	17	16	10	5	5
1	11	16	16	17	17	17	16	16	5
1	12	17	17	17	17	17	17	17	16
1	7	12	12	17	17	17	12	12	11
	1	1	[2]	12	17	16	6	1	1
			1	12	17	16	5		
			1	7	12	11	5		
			1	1	1				

(d1)									
			1	24	28	18	04		
			1	28	32	22	04		
			[2]	28	32	22	14	1	1
1	24	28	28	32	32	32	28	28	28
1	28	32	32	32	32	32	32	32	22
1	18	22	22	32	32	32	22	22	12
	04	04	14	28	32	22	08	04	04
			1	28	32	22	04		
			1	18	22	12	04		
			04	04	04				

(d2)									
				7	1	1			
				1	7	12	11	5	
				1	12	17	16	5	
	1	1	[2]	12	17	16	6	1	1
1	7	12	12	17	17	17	17	12	11
1	12	17	17	17	17	17	17	17	12
1	11	16	16	17	17	17	16	16	15
	5	5	6	12	17	16	16	5	5
			1	12	17	16	5		
			1	11	16	15	5		
			5	5	5	5			

(e1)									
			04	18	22	18	04		
			04	22	26	22	04		
			14	22	26	22	14	[1]	[1]
04	18	22	26	26	26	26	22	22	18
04	22	26	26	26	26	26	26	26	22
04	12	16	16	26	26	26	16	16	12
	04	04	08	22	26	22	08	04	04
			04	22	26	22	04		
			04	12	16	12	04		
			04	04	04				

(e2)									
				5	11	16	11	5	
				5	16	21	16	5	
				[1]	[1]	6	16	21	16
5	11	16	16	21	21	21	16	16	11
5	16	21	21	21	21	21	21	21	16
5	15	20	20	21	21	21	20	20	15
	5	5	10	16	21	16	10	5	5
			5	16	21	16	5		
			5	15	20	15	5		
			5	5	5	5			

(f1)									
			04	12	16	12	04		
			04	22	26	22	04		
			04	04	08	22	26	22	08
04	12	16	16	26	26	26	16	16	12
04	22	26	26	26	26	26	26	26	22
04	18	22	22	26	26	26	22	22	18
	[1]	[1]	14	22	26	22	14	[1]	[1]
			04	22	26	22	04		
			04	18	22	18	04		
			[1]	[1]	[1]				

(f2)									
				5	15	20	15	5	
				5	16	21	16	5	
				5	10	16	21	16	10
5	15	20	20	21	21	21	20	20	15
5	16	21	21	21	21	21	21	21	16
5	11	16	16	21	21	21	16	16	11
	[1]	[1]	6	16	21	16	6	[1]	[1]
			5	16	21	16	5		
			5	11	16	11	5		
			[1]	[1]	[1]				

(g1)									
			04	04	04				
			[1]	18	22	12	04		
			[1]	22	26	16	04		
	04	04	14	22	26	16	08	04	04
[1]	18	22	22	26	26	26	22	22	12
[1]	22	26	26	26	26	26	26	26	16
[1]	18	22	22	26	26	26	22	22	12
	04	04	14	22	26	16	08	04	04
			[1]	22	26	16	04		
			[1]	18	22	12	04		
			04	04	04				

(g2)									
				5	5	5			
				[1]	11	16	15	5	
				[1]	16	21	20	5	
	5	5	6	16	21	20	10	5	5
[1]	11	16	16	21	21	21	16	16	15
[1]	16	21	21	21	21	21	21	21	20
[1]	11	16	16	21	21	21	16	16	15
	5	5	6	16	21	20	10	5	5
			[1]	16	21	20	5		
			[1]	11	16	15	5		
			5	5	5	5			

(h1)									
			04	12	22	18	[1]		
			04	16	26	22	[1]		
	04	04	08	16	26	22	14	04	04
04	12	22	22	26	26	26	22	22	18
04	16	26	26	26	26	26	26	26	22
04	12	22	22	26	26	26	22	22	18
	04	04	08	16	26	22	14	04	04
			04	16	26	22	[1]		
			04	12	22	18	[1]		
			04	04	04				

(h2)									
				5	15	16	11	[1]	
				5	20	21	16	[1]	
	5	5	10	20	21	16	6	5	5
5	15	16	16	21	21	21	16	16	11
5	20	21	21	21	21	21	21	21	16
5	15	16	16	21	21	21	16	16	11
	5	5	10	20	21	16	6	5	5
			5	20	21	16	[1]		
			5	15	16	11	[1]		
			5	5	5	5			

Fig. 5 Numerical stimulation corresponding to Fig. 3 (b)~ (i): (a1)~ (h1) $\alpha = 0.4$, (a2)~ (h2) $\alpha = 1$

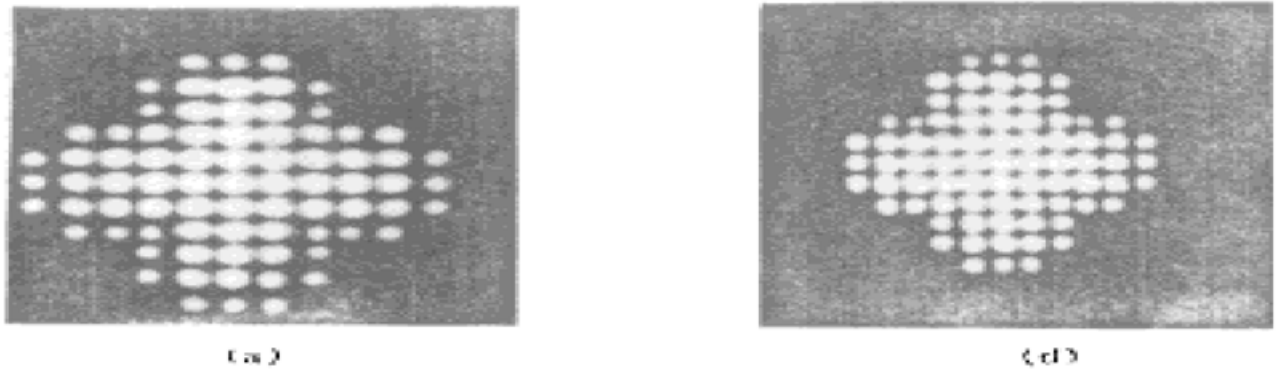


Fig. 6 Correlation patterns related to Fig. 5 (e1) and (e2). (a) $\alpha = 0.4$, (b) $\alpha = 1$

结 论 提出一种基于单通道相关器的光学数学形态学击中与否变换的算法, 并且给出一个简单的光学并行形态学击中与否变换处理器用来执行这种算法。在这个处理器中, 令前、背景结构核元素具有适当的光强透过率, 用原输入图像和前、背景结构核元素进行相关, 然后对相关结果取阈值, 就可以实现单通道光学相关形态学击中与否变换操作。给出一个实验验证了提议的可能性。它表明单通道的光学相关形态学击中与否变换可一步并行实现, 而且根据需要用不同的结构核元素对实现形态学击中与否变换操作即可实现对任意图像处理函数的处理。

参 考 文 献

- [1] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, New York, Academic Press, 1982
- [2] P. Maragos, Tutorial on advances in morphological image processing and analysis. *Opt. Engng.*, 1987, **26**(3) : 623~ 632
- [3] P. Maragos, R. W. Schafer, Morphological systems for multidimensional signal processing. *Proc. IEEE*, 1990, **78**(4) : 690~ 710
- [4] J. Lee, R. Haralick, L. Shapiro, Morphological edge detection. *IEEE Robotics Autom.*, 1987, **RA-3** : 142~ 156
- [5] J. Serra, G. Verchery, Mathematical morphology applied to fiber composite materials. *Fiber Sci. Technol.*, 1973, **6** : 141~ 158
- [6] S. Sternberg, Biomedical image processing. *Computer*, 1983, **16**(1) : 22~ 34
- [7] K. S. O Neil, W. T. Rhodes, Morphological transformations by hybrid optical-electronic methods. *Proc. SPIE.*, 1986, **638** : 41~ 46
- [8] E. Botha, J. Richards, D. P. Casasent, Optical laboratory morphological inspection processor. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(3) : 342~ 350
- [9] L. Liu, Optoelectronic implementation of mathematical morphology. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(10) : 482~ 484
- [10] Y. Li, A. Kostrzewski, D. H. Kim, G. Eichmann, Compact parallel real-time programmable optical morphological image processor. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(14) : 981~ 983
- [11] R. A. Athale, J. N. Mait, D. W. Prather, Optical morphological image processing with acoustooptical devices. *Opt. Commun.*, 1992, **87**(3) : 99~ 104
- [12] S. D. Goodman, W. T. Rhodes, Symbolic substitution applications to image processing. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(9) : 1708~ 1714
- [13] T. H. Chao, W. Stoner, Optical implementation of a feature-based neural network with application to automatic target recognition. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(8) : 1359~ 1369
- [14] K. S. Huang, B. K. Jenkins, A. A. Sawchuk, Binary image algebra and digital optical cellular image processor design. *Computer Vis. Graph. Image Processing*, 1989, **45** : 295~ 345
- [15] M. Wu, S. Zhou, J. Cai *et al.*, Optical binary image algebra processor. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(6) : 454~ 460

- [16] K. S. Huang, A. A. Sawchuk, B. K. Jenkins *et al.*, Digital optical cellular image processor (DOCIP): Experimental implementation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(2) : 166~ 173
- [17] M. Fukui, K. Kitayama, Image logic algebra and its optical implementations. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(5) : 581~ 591
- [18] L. Liu, Z. Zhang, X. Zhang, One-operation image algebra and optoelectronic cellular two-layer logic array. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(6) : 1789~ 1797
- [19] H. Peng, L. Liu, Y. Yin, Solid-state integrated optical cellular two-layer logic image processor: design and demonstration. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(12) : 3508~ 3513
- [20] D. Casasent, R. Schaefer, R. Sturgill, Optical hit-miss morphological transform. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29) : 6255~ 6263
- [21] D. Casasent, R. Schaefer, Multilevel hit-miss transform for object detection. *Proc. SPIE.*, 1994, **2353** : 2~ 11
- [22] L. Liu, Morphological hit-or-miss transform for binary and gray-tone image processing and its optical implementation. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(10) : 3447~ 3454
- [23] L. Liu, Optical parallel rank order hit-miss transform and its applications. *Optik*, 1995, **99**(1) : 13~ 17
- [24] H. T. Nagle Jr., B. D. Carroll, J. D. Irwin, *An Introduction to Computer Logic*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall: (1975)
- [25] L. Liu, X. Liu, Cascadable binary pattern logic processor using multiple imaging. *Opt. Commun.*, 1991, **82**(5,6) : 446~ 452
- [26] J. Knopp, M. F. Becker, Generalized model for noncoherent optical convolvers and correlations. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7) : 984~ 985
- [27] L. Liu, X. Zhang, Z. Zhang, Gray-tone image processing by threshold superposition in an optical cellular-logic binary-image processor. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20) : 4383~ 4391
- [28] L. Liu, G. Li, L. Shao *et al.*, Optical three-dimensional stacked morphological processor module with variable thresholding. *Opt. Rev.*, 1996, **3**(6A) : 406~ 409
- [29] Shifu Yuan, Minxian Wu, Yingbai Yan *et al.*, One-step implementation of the optical hit-miss transform. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(35) : 6881~ 6887

Optical Hit-Miss Transformation for Image Processing Based on Incoherent Single-Channel Correlation

Jing Hongmei Cheng Huiquan Shao Lan Liu Liren

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

(Received 7 August 1997; revised 20 November 1997)

Abstract A simple algorithm of morphological hit-miss transform by single-channel correlation in an incoherent optical correlator is proposed, which is based on Boolean decomposition for morphological function and thresholding operation for correlation. In reported optical hit-miss processor, an original input image correlates with both foreground and background structuring element pair. By properly coding the foreground and background structuring element pair, and then thresholding at the number of foreground SE level, the single-channel correlation for hit-miss transform can be realised. Thus, The hit-miss transform can be realised optically in one parallel step. Any morphological image processing functions can be implemented by repeated use of the optical processor with different structuring elements. Experimental results are given.

Key words morphological hit-miss transform, thresholding operation, optical correlation.