

利用不确定性提高击中击不中变换 的抗畸变能力*

成 罡 金国藩 邬敏贤 何庆生 刘海松 严瑛白

(清华大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要 对用于目标识别技术的形态学击中击不中变换进行了分析, 引入不确定点和模式的概念使得容易受到畸变干扰的像素点对判别结果的作用降低, 得到联合排序多值击中击不中变换, 从而在不损失图像信息的前提下, 提高了目标识别的抗畸变能力, 并且具有在输入图像和参考模板之间进行精确匹配的能力。基于非相干光相关器, 利用新颖的多值互补编码方法, 实现了二值图像的联合排序多值击中击不中变换, 达到了较好的实验结果。

关键词 光学模式识别, 击中击不中变换, 多值互补编码方法。

1 引 言

模式识别是对分析对象进行分类、描述、判断、识别和理解, 目前主要利用计算机来实现。但是计算机在对数字图像进行分析和识别处理时, 存在一些根本性缺陷, 如需要大量的存储空间, 并且串行处理方式极大地影响了速度。光学模式(图像)识别在图像处理方面具有一定的优越性, 如并行性、速度快和容量大等, 可以直接对图像进行采集、处理、存储和显示等, 从而成为当前的研究热点。研究内容大体上包括: 文字和字符识别、图形识别、生物医学应用、工业应用和军事应用等等领域^[1]。因为光学相关器的结构可以用于执行模式识别, 最近的几年人们提出了许多用于模式识别的实时光学相关器^[2, 3]。

通常输入图像与参考图像的直接相关就可以找出相匹配的模式, 但是在某些特定的情况下, 这种方法存在着误识别的问题^[1, 4-6]。形态学的击中击不中变换已被用于光学模式识别的领域^[4]。Casasent^[8, 9]、刘立人^[7]、以及作者^[5, 6, 10]分别使用了相干和非相干的光学相关器来实现形态学击中击不中变换。二值图像击中击不中变换的光学处理方法, 其技术基础依然是“相关”技术, 对输入图像的尺度、旋转、位移及照度等方面的抗畸变能力不强, 运算结果的准确性随着输入图像 X 和匹配模板 R 之间的差异的增大而迅速下降, 所以在后来采用的排序击中击不中变换运算中通过调节阈值 T 的大小来提高抗畸变的能力^[6]。但是这种处理方法没有针对性, 只是对输出结果作一个笼统的处理, 并不具有深刻的物理意义。

* 本课题得到国家自然科学基金(69775008)、863 高科技研究和发展计划(863-307-07-02), 以及曹光彪高技术发展基金的资助。

收稿日期: 1997-11-28; 收到修改稿日期: 1998-02-16

Casasent 通过将识别目标中容易受到畸变干扰的区域除去,减少了输出判别结果受到干扰的机会,提高了抗畸变的能力。这种处理方法简单,并且易于在二值光路中实现,但要损失部分信息。这些丢失的信息主要包括图像边缘,反映了物体的轮廓,因此简单地将它们略去就失去了在输入图像和参考模式之间进行精确匹配的能力,产生误判现象。最重要的是关于 H 和 M 的正确选择很困难, Casasent 采用的实验方法处理起来很麻烦,特别是对形体比较复杂的物体更是不容易进行。

本文引入不确定点的概念对击中击不中变换运算方法进行优化,实现了二值图像的联合排序多值击中击不中变换,使得容易受到畸变干扰的对判别结果的作用降低,从而在不损失图像信息的前提下,提高了目标识别的抗畸变能力,同时还具有输入图像和参考模板之间进行精确匹配的能力。文中针对旋转和尺度畸变,将处于目标边缘上的点定为不确定点,根据点到边缘的距离定义不确定度,从而使得抗旋转和尺度畸变的能力有了很大提高。

2 联合排序多值击中击不中变换

2.1 击中击不中变换的回顾

首先回顾一下用于二值目标识别的图像形态学击中击不中变换,定义如下:

$$X \odot R = X \ominus R_f \cap \bar{X} \ominus R_b \quad (1)$$

其中 \odot 表示击中击不中变换运算, \ominus 表示腐蚀操作, X 为待识别图像, R_f 和 R_b 分别为前景和后景匹配模板,通常令后景图像 R_b 为前景图像 R_f 的补集。利用卷积取阈和腐蚀运算之间的关系,得到了光学实现击中击不中变换运算的简单方法:

$$X \odot R = (X \star R_f)|_{T=N_1} + (\bar{X} \star R_b)|_{T=N_2} \quad (2)$$

其中 \star 为相关运算, $()|_T$ 为阈值操作, N_1 和 N_2 为前景模板和后景模板中有效点的数目。Casasent 已经证明了排序击中击不中变换有较好的抗干扰和噪声的特性^[7],用阈值 p 或 q 来代替(2)式中的阈值 N_1 和 N_2 ,那么 R 对 X 的 (p, q) 排序击中击不中变换的结果为

$$X \odot_{p, q} R = (X \square_p R_f) \cap (\bar{X} \square_q R_b) \quad (3)$$

式中 \square 指二值排序滤波器。作者曾经给出了联合排序击中击不中变换来一步实现排序击中击不中变换运算^[6],其定义为

$$X \odot_j R = [(X \star R_f) + (\bar{X} \star R_b)]|_{T=j} \quad (4)$$

其中 j 是前景图像和后景图像的联合排序。

2.2 模式的定义

模板中点的隶属关系存在三种情况: 1) 前景点“1”的集合 S_1 ; 2) 背景点“0”的集合 S_2 ; 3) 不确定像素点“T”的集合 S_3 。匹配算法是一个以与模板的相似度作为依据,对整幅输入图像进行搜索处理的过程,即匹配算法在搜索过程中一直在搜索输入图像不同位置上与参考模板相关的结构相似性。因此本文引入一个新概念——相似模板,又称为模式。

[定义 1] 基于三值字符集 $\{0, 1, T\}$ 所产生的能描述具有某些结构相似性的 0、1 点集的模板称为模式。

模式是一个描述点集的模板,该点集中“0”和“1”像素点的分布位置存在结构相似性。图 1 中给出了三种模板图像(3×3 大小),那么它们之间的结构相似性,即模式如图 2 所示。模式可以简洁地描述结构具有相似性的图像,而匹配运算实际上是指模式的匹配运算。众所周

知，一个点集中隐含着多个不同的模式。确切地讲，大小为 k 的二值点集，隐含着 2^k 个不同的模式，而不同的模式所匹配的点集(称为模式的样本)的个数是不同的。为了反映这种确定性的差异，本文引入模式阶的概念。

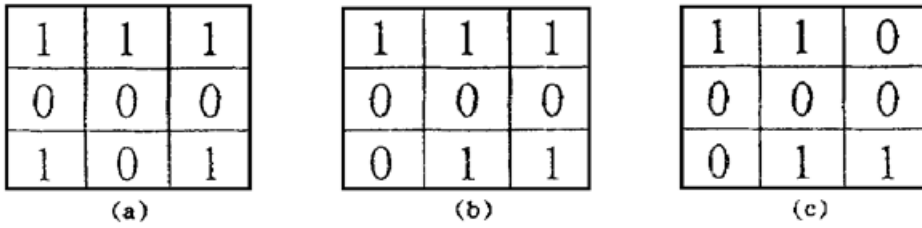


Fig. 1 Three pictures: (a) Picture A, (b) Picture B, (c) Picture C

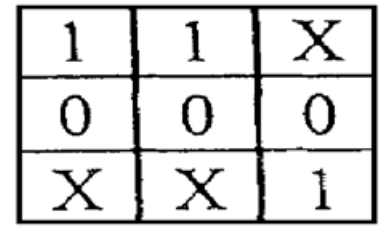


Fig. 2 The pattern of three pictures in Fig. 1

[定义 2] 模式 H 中确定点(0 和 1) 的个数称为该模式的模式阶，记作 $O(H)$ 。这里 $O(H) = N_1 + N_2$ ， N_1 、 N_2 和 N_3 分别表示集合 S_1 、 S_2 和 S_3 中的点数。

模式的定义扩充了图像模板的表现形式，从而使得匹配具有了更大的灵活性，并且模式阶可以用来定量地评价模板的匹配程度和识别准确度。显然，一个模式的阶数越高，其样本数就越少，确定性越高，容错能力就越差；阶数越低，其样本数就越多，确定性越低，容错能力就越高。

[定义 3] 模式 H 的确定性常数 C 定义为 $C = O(H)/(N_1 + N_2 + N_3)$ ，容错能力 D 定义为 $D = 1 - C = N_3/(N_1 + N_2 + N_3)$ 。

所谓不确定点是指对于图像中的点依据其容易受到噪声干扰的程度来确定它的归属情况。简单地讲，比如对于目标边缘上的点，容易受到尺度畸变和旋转畸变的影响，因此当处理目的要求提高抗尺度和旋转畸变的能力时，就需要降低边缘上点的不确定性，来实现这个目标。关于不确定点“ T ”的取值可以依据点“ T ”与集合“1”和“0”的近似关系来定义，本文采用定义 4 中的定义方法。

[定义 4] 不确定点“ T ”的取值 t 表示点“ T ”与集合“1”的近似程度， $0 \leq t \leq 1$ 。点“ T ”隶属与集合“1”的几率越大，则 t 越靠近 1。

2.3 联合排序多值击中击不中变换

选择合适的不确定点是处理方法中的关键问题，与处理目标所处的环境以及处理目的有很大的关系。对于旋转和尺度上的畸变，处于目标边缘上的点受到干扰的几率要大于目标内部的点，因此本文考虑将处于边缘上的点归为不确定点，来提高击中击不中变换运算抗旋转和尺度畸变的能力。

对于一幅二值图像，其中的点“1”和“0”或点“0”到“1”的跃变，就认为存在一个边缘，称之为硬边缘。从图像处理的角度来讲，二值图像来源于灰阶图像的分割处理，二值边缘的位置取决于灰阶图像分割中阈值的大小。本文采用软边缘的概念，即将原来的硬边缘拓宽为一个宽度为 $2\Delta b$ 的边缘带，带中点属于“0”或“1”的几率为一个与位置有关的线性变化值，如图 3 中所示。图 3 中的 T_0 为硬边缘的分割点，并且设定向量 T 的方向由前景区域指向背景区域，则软边缘的取值为

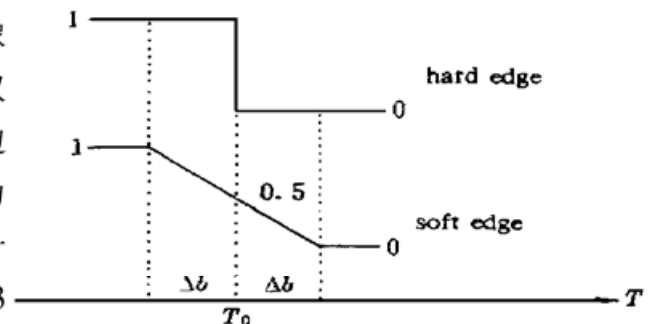


Fig. 3 The comparison of hard edge and soft edge

$p(t) = (1/2) - (t - t_0)/2\Delta b$, 这样原来的(0, 1) 取值的二值图像就演化为一个取值为 $p \rightarrow [0, 1]$ 的多值图像。设 r 为前景点 p 到分界线的距离, 那么如果 $r > \Delta b$, 则 $p = 1$; 如果 $-\Delta b \leq r \leq \Delta b$, 则 $p = (\Delta b + r)/2\Delta b$ 。其中 Δb 的取值是由主观设定的, 当 Δb 增大时, 识别的抗畸变能力强, 但是识别的不确定性大; 当 Δb 减小时, 识别的抗畸变能力弱, 但是识别的准确程度高; 特别当 $\Delta b = 0$ 时, 得到 $R_f = \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算。将二值模板图像 R 进行边缘软化处理后得到 \tilde{R} , 代入击中击不中变换运算关系式, 得到

$$X \odot \tilde{R} = X \odot \tilde{R}_f \cap X \odot \tilde{R}_b \tag{5}$$

其中 \tilde{R}_f 和 \tilde{R}_b 分别为经过边缘软化处理后得到的多值前景和背景匹配模板, 并且背景图像 \tilde{R}_b 为前景图像 \tilde{R}_f 的补集。利用卷积取阈实现击中击不中变换运算的简单方法, 得到

$$X \odot \tilde{R} = (X \star \tilde{R}_f + \bar{X} \star \bar{\tilde{R}}_f) |_{\tau = \tilde{N}_1 + \tilde{N}_2} \tag{6}$$

其中 \tilde{N}_1 、 \tilde{N}_2 分别为前景和背景点的取值之和。为了进一步提高抗畸变能力, 本文提出联合排序多值击中击不中变换(joint rank-order multi-value hit-or-miss transformation, 简称 JR-MVHMT)

$$X \odot_j \tilde{R} = (X \star \tilde{R}_f + \bar{X} \star \bar{\tilde{R}}_f) |_{\tau = j} \tag{7}$$

其中 j 是联合排序序号。联合排序多值击中击不中变换可以通过选取正确的阈值来实现在非完整信息下模式的识别。因此联合排序多值击中击不中变换所具有的良好容错能力使得其可以在噪声、变形的干扰下有很好的处理性能。在序号 j 下, 联合排序多值击中击不中变换可以识别具有 $e\%$ 错误的模式, 其中

$$e\% = \frac{\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 - j}{\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2} \times 100\% \tag{8}$$

3 抗畸变能力对比实验的模拟计算

3.1 理论分析

下面以一个圆形目标的抗尺度畸变为例子, 分析联合排序多值击中击不中变换与击中击不中变换在抗噪声干扰方面的差异, 如图 4 所示。

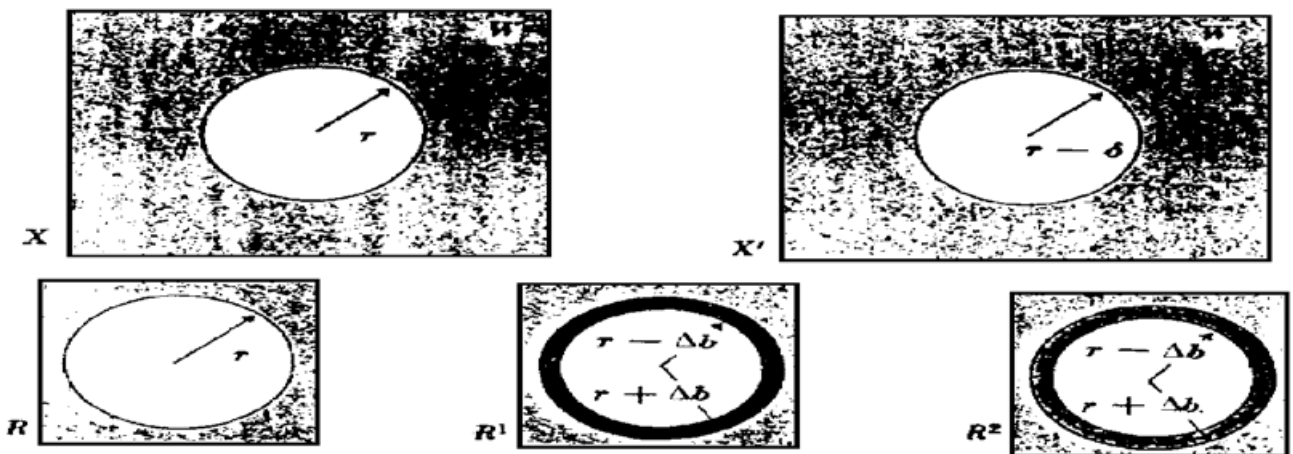


Fig. 4 Input images and three masks: X , X' , R , R^1 and R^2

3.1.1 首先计算在没有尺度畸变时, 相关峰的大小

1) $R_f = \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算:

$$X \odot R = R_N \tag{9}$$

其中 R_N 为模板 R 的大小。

2) Casasent 采用的 $R_f \neq \overline{R_b}$ 的击中击不中变换运算:

$$X \odot R^1 = R_N - S_{2\Delta b} = R_N - [\pi(r + \Delta b)^2 - \pi(r - \Delta b)^2] = R_N - 4\pi r \Delta b \quad (10)$$

3) 联合排序多值击中击不中变换运算:

$$\begin{aligned} X \odot \tilde{R} &= R_N - S_{2\Delta b} + S_{2\Delta b}^1 = \\ &R_N - 4\pi r \Delta b + \left[\int_0^{2\pi} \int_{r-\Delta b}^{r+\Delta b} \frac{\rho}{2\Delta b} \rho d\rho d\theta + \int_0^{2\pi} \int_r^{r+\Delta b} \frac{\rho - r + \Delta b}{2\Delta b} \rho d\rho d\theta \right] = \\ &R_N - 4\pi r \Delta b + 3\pi r \Delta b = R_N - \pi r \Delta b \end{aligned} \quad (11)$$

从上面三式中可以看出, 新方法相关峰的高度处于原来两种方法之间, 对于探测很有利。

3.1.2 计算在有尺度畸变时, 相关峰的大小和变化量

假设输入图像 X 的半径 r 有一个尺度畸变 δ , 得到图像 X' 。计算一下三种方法在这时的输出相关峰:

1) $R_f = \overline{R_b}$ 的击中击不中变换运算:

$$X' \odot R = R_N - \int_0^{2\pi} \int_{r-\delta}^r \rho d\rho d\theta = R_N - (2\pi r \delta - \pi \delta^2) \quad (12)$$

所以得到相关峰的变化

$$X \odot R - X' \odot R = 2\pi r \delta - \pi \delta^2 \quad (13)$$

当 $0 \leq \delta \leq \Delta b$ 时, 相关峰的变化范围

$$0 \leq X \odot R - X' \odot R \leq 2\pi r \Delta b - \pi \Delta b^2 < 2\pi r \Delta b \quad (14)$$

2) Casasent 采用的 $R_f \neq \overline{R_b}$ 的击中击不中变换运算:

$$X' \odot R^1 = R_N - 4\pi r \Delta b \quad (15)$$

当 $0 \leq \delta \leq \Delta b$ 时, 相关峰的变化

$$X \odot R^1 - X' \odot R^1 = 0 \quad (16)$$

3) 联合排序多值击中击不中变换运算:

$$\begin{aligned} X' \odot \tilde{R} &= R_N - S_{2\Delta b} + S_{2\Delta b}^2 = \\ &R_N - 4\pi r \Delta b + \left[\int_0^{2\pi} \int_{r-\Delta b}^{r+\Delta b} \frac{\rho}{2\Delta b} \rho d\rho d\theta + \int_0^{2\pi} \int_{r-\delta}^{r+\Delta b} \frac{\rho - r + \Delta b}{2\Delta b} \rho d\rho d\theta \right] = \\ &R_N - \pi r \Delta b - \frac{\pi r \delta^2}{\Delta b} + \frac{\pi \delta^3}{3\Delta b} \end{aligned} \quad (17)$$

所以得到相关峰的变化

$$X \odot \tilde{R} - X' \odot \tilde{R} = \frac{\pi r \delta^2}{\Delta b} - \frac{\pi \delta^3}{3\Delta b} \quad (18)$$

当 $0 \leq \delta \leq \Delta b$ 时, 相关峰的变化范围

$$0 \leq X \odot \tilde{R} - X' \odot \tilde{R} \leq \pi r \Delta b - \frac{\pi \Delta b^2}{3} < \pi r \Delta b \quad (19)$$

从(19)式中可以看出, 新方法相关峰受到尺度畸变干扰时, 变化范围处于原来两种方法之间。所以新方法综合了原来两种方法的优点: 既具有精确匹配的能力, 又降低了相关峰随畸变的下降速率, 提高了抗畸变能力。

3.2 模拟计算结果

举例说明 $R_f = \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算、 $R_f \neq \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算和联合排序多值击中击不中变换运算，对它们的识别能力和抗畸变干扰的能力进行对比评价。

图 5 中为待识别的飞机图像和 $R_f = \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算、 $R_f \neq \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算和联合排序多值击中击不中变换运算分别采用的模板方式。 $R_f \neq \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算将一定宽度内的边缘作为无关量，而联合排序多值击中击不中变换将一定宽度内的边缘进行软化处理。本文对三种方法的抗旋转和尺度畸变的能力对比测试，得到如下数据：图 6 中描述了三种方法在输入图像具有从 0° 到 15° 旋转畸变时相关峰的高度曲线，图 7 描述了三种方法在输入图像具有从 87.5% 到 112.5% 的尺度畸变时相关峰的高度曲线。从图 6 和图 7 中看出， $R_f \neq \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算比 $R_f = \bar{R}_b$ 的击中击不中变换运算的抗噪声能力强，其峰值变化要小的多，从而对与后续的分割处理有很大的好处，但是相关峰的值较低，并且对比度不好。而联合排序多值击中击不中变换运算的处理结果处于两者之间，兼具两者的优点，即具有较高的相关峰，不损失图像的有用信息，又具有很好的抗畸变能力，从综合能力来考虑，是最佳方法。

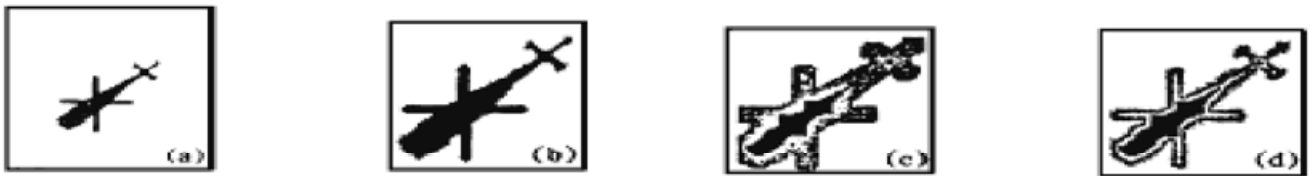


Fig. 5 Input image and different masks for three kinds of HMT: (a) Input image; (b) Mask for $R_f = \bar{R}_b$ HMT; (c) Mask for $R_f \neq \bar{R}_b$ HMT; (d) Mask for JRMVHMT

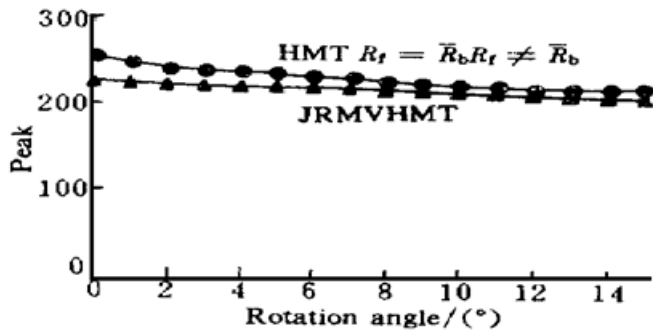


Fig. 6 Comparison of the robustness for rotation of three methods

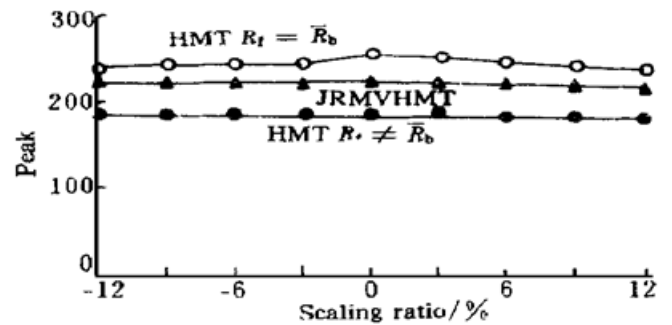


Fig. 7 Comparison of the robustness for scaling of three methods

3.3 光学实现方法

光学中相关的实现可用相干光相关系统或非相干光相关系统。相干光的相关器基于傅里叶变换和频域处理，系统构成比较复杂庞大；为了实现系统的简化和包装，文中采用了非相干光相干系统来实现联合排序多值击中击不中变换。在(7)式中包含两个相关运算和一个加法取阈处理，为了通过光学相关器一步实现(7)式中的运算发展出多值互补编码方法：

[定义 5] 图像中一个像素点采用两个模拟量 $(\alpha, 1 - \alpha)$ 来同时表示，其中 $\alpha \in [0, 1]$ ，称为多值互补编码方法。

因此前景点“1”的 $\alpha = 1$ ，表示为 $(1, 0)$ ；背景点“0”的 $\alpha = 0$ ，表示为 $(0, 1)$ ；不确定点“X”的隶属度函数 $\alpha \in (0, 1)$ ，表示为 $(\alpha, 1 - \alpha)$ 。对于比较靠近“1”的点，存在 $\alpha > 1/2$ ；对于比较靠近“0”的点，存在 $\alpha < 1/2$ ；具有 $\alpha = 1/2$ 的点表示处于边缘带中心。每个像素点用两

个单元来表示, 图 8 中分别给出了 0、0.25、0.5、0.75、1 五种取值像素点的表示方法, 图 9 为图 5(d) 模板进行多值互补编码后的结果。

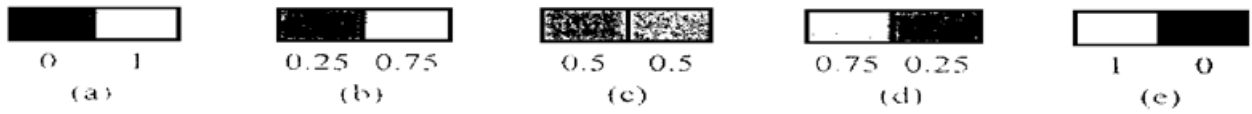


Fig. 8 Multi-value complementary encoding method: (a) 0, (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 0.75, (e) 1

按照(7)式, 采用多值互补编码方法将输入图像 X 和软化模板 \tilde{R} 变为编码图像 X_e 和 \tilde{R}_e , 那么联合排序多值击中击不中变换表示如下:

$$X \odot_j \tilde{R} = (X_e \star \tilde{R}_e) |_{T=j} \quad (20)$$

实际的光学系统结构见图 10, 关于它的说明请参考文献 [10]。在光学实验中, 图 5(a) 中的飞机图像 X 进行二值互补编码处理作为待识别图像 X_e , 选择图 9 中的编码参考图像 \tilde{R}_e 作为待识别的目标, 在非相干光相关器的输出面上得到了输入 X_e 和 \tilde{R}_e 的相关图像, 并通过一个 CCD 摄像机和图像采集卡输入到计算机中。图 11(a) 中为光学相关结果, 图 11(b) 为对(a) 进行阈值分割处理后的结果, 中心亮点表示识别出的飞机位置。

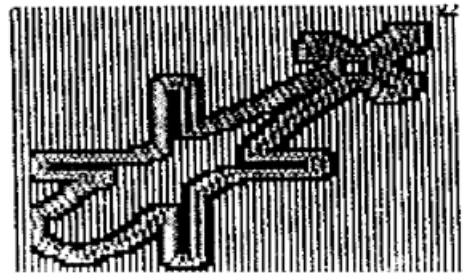


Fig. 9 Encoding results of the mask in Fig. 5(d)

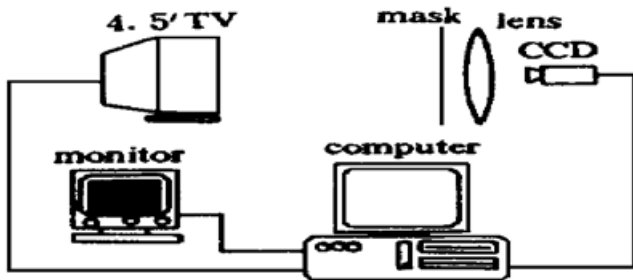


Fig. 10 The incoherent correlator for the implementation of JRMVHMT

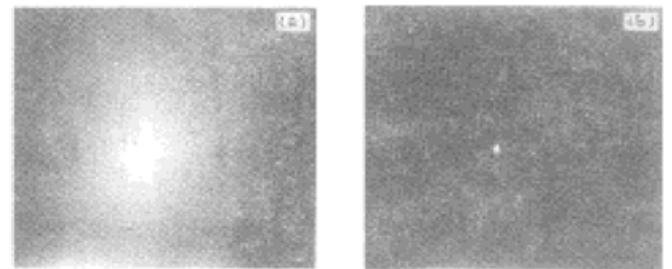


Fig. 11 Optical experimental result of JRMVHMT: (a) Correlation; (b) Thresholding result

结 论 本文中提出的联合排序多值击中击不中变换引入不确定点的概念对击中击不中变换运算进行优化, 提高了目标识别的抗畸变能力, 并且还同时具有输入图像和参考模板之间进行精确匹配的能力。多值互补编码方法引入了多值逻辑, 从实现的角度来讲增加了难度, 但是从抗旋转和尺度畸变上的能力有了很大提高。文中采用简单的非相干光相关器, 实现了联合排序多值击中击不中变换, 达到了较好的实验结果。

参 考 文 献

[1] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. New York: McGraw-Hill, 1968

[2] F. T. S. Yu, X. J. Lu. A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, 52(1) : 10~ 16

[3] B. Javidi, J. L. Horner, J. F. Walkup. Optical pattern recognition system for validation & security verification. *Opt. Engng.*, 1994, 33(6) : 1752~ 1756

[4] F. M. Dickey, L. A. Romero. Normalization correlation for pattern recognitions. *Opt. Lett.*, 1991,

16(15) : 1186~ 1189

- [5] S. Yuan, M. Wu, G. Jin *et al.*. Optical implementation of morphological hit-miss transform using complementary-encoding. *Proc. SPIE*, 1995, **2564** : 336~ 342
- [6] 成 罡, 袁石夫, 邬敏贤等. 联合击中击不中变换相关器. *光学学报*, 1997, **17**(3) : 318~ 324
- [7] L. Liu. Morphological hit-or-miss transform for binary and gray-tone image processing and its optical implementation. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(10) : 3447~ 3455
- [8] D. Casasent, R. Sturgill. Optical hit-or-miss. morphological transforms for ATR. *Proc. SPIE*, 1989, **1153** : 500~ 510
- [9] D. Casasent, R. Schaefer, R. Sturgill. Optical hit-miss morphological transform. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29) : 6255~ 6263
- [10] 成 罡, 金国藩, 邬敏贤等. 用于人脸识别的非相干光形态学处理器. *高技术通讯*, 1997, **7**(4) : 41~ 44

Improvement of the Distortion-Invariant Ability of Hit-or-Miss Transformation by Using Uncertain Pixels

Cheng Gang Jin Guofan Wu Minxian He Qingsheng
Liu Haisong Yan Yingbai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 28 December 1997; revised 16 February 1998)

Abstract The concepts of uncertain pixel and pattern are used to improve the distortion-invariant ability of morphological hit-or-miss transformation (HMT). A method called joint rank-order multi-value hit-or-miss transformation (JRMVHMT) is introduced, which reduces the decision effect of the pixels that is easily disturbed by rotation and scaling distortion. Because of not losing information of the input images, JRMVHMT can realize the precision recognition between two images and has a better distortion-invariant ability for scaling and rotation than the ordinary HMT. The comparison of JRMVHMT with the ordinary HMT in theoretic analysis and experiments is given. Based on an incoherent correlator and multi-value complementary encoding, JRMVHMT is realized for binary image recognition and gets satisfying results.

Key words optical pattern recognition, hit-or-miss transformation, multi-value complementary encoding.