

# 基于模糊逻辑的抗畸变光学模式识别\*

成 罡 金国藩 邬敏贤 何庆声 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)

**提要** 将多值击中击不中变换(MVHMT)引入用于二值图像识别的联合变换相关器(JTC)。MVHMT对形态学击中击不中变换(HMT)的性能进行了改善,基于模糊的概念,引入不确定点的定义,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,具有输入图像和参考模板之间进行精确匹配的能力,同时还提高了目标识别的抗畸变能力。利用新颖的多值互补编码方法,通过JTC一步实现MVHMT,相关后的图像通过取高阈值的分割方法来实现对目标的准确判断。

**关键词** 联合变换相关器,多值互补编码,多值击中击不中变换,模糊逻辑,光学模式识别

## 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。光学模式(图像)识别对图像进行处理具有一定优越性,如并行性、速度快、容量大,可以直接对图像进行采集、处理、存储和显示等,无需一些中间光电、电光转换处理过程。光学图像识别作为当前的研究热点,具有广泛的研究内容:文字识别、图形识别、生物医学诊断、工业检测和军事侦察等等多种应用领域<sup>[1]</sup>。因为光学相关器的结构可以执行模式识别,近年来人们提出了许多种用于模式识别的实时光学相关器。其中联合变换相关器(JTC)有着较大的优越性<sup>[2~10]</sup>。

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,但是在某些特定情况下,这种方法存在着误识别的问题。例如,因为字符F的所有信息都包括在字符E中,所以常规相关方法是不能将F从F和E中识别出来的。这种问题的解决方法之一是通过归一化,使得只有目标图像与参考图像达到最近匹配时相关峰才达到最大值<sup>[1,10]</sup>。另外,Z. Chen等提出互补参考联合相关变换器(CRJTC)来改善JTC的性能<sup>[9]</sup>。我们已将形态学的击中击不中变换(Hit-or-miss transformation,简称HMT)应用于提高JTC的识别能力<sup>[11]</sup>。

原有的HMT方法,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,运算结果随着输入图像和匹配模板之间的差异而迅速下降<sup>[12]</sup>。后来采用的排序HMT运算中通过调节阈值来提高抗畸变能力<sup>[13~15]</sup>,但是这种方法只对整个输出结果做笼统处理,没有针对性。Casasent通过将识别目标中容易受到畸变干扰的区域除去,减少了判别结果受到干扰的机会,

\* 国家自然科学基金(69775008),863高科技研究和发展计划(863-307-14-04)以及曹光彪高技术发展基金资助项目。

提高了抗畸变的能力<sup>[16]</sup>。但是这种方法损失了图像中的信息,失去了在输入图像和匹配模板之间进行精确匹配的能力,产生误判现象。并且击中操作 Hit 和击不中操作 Miss 的正确选择很困难,特别对形体复杂的物体更不容易进行处理。

本文基于模糊的概念对 HMT 运算方法进行优化,引入不确定点的定义使得容易受到畸变干扰的对判别结果的作用降低,实现了二值图像的多值击中击不中变换(MVHMT),不仅具有输入图像和匹配模板之间进行精确匹配识别的能力,而且提高了抗畸变能力。文中将处于目标边缘上的点定为不确定点,使得抗旋转和尺度畸变的能力有了很大提高。利用新颖的多值互补编码方法,通过 JTC 来一步实现 MVHMT,相关后的图像通过取高阈值的分割方法来实现对目标的准确判断,克服了误报警现象。

## 2 多值击中击不中变换

### 2.1 不确定点的概念

模板  $R$  中的点可以分成以下两类:(1) 不容易受到畸变干扰的像素点;(2) 容易受到畸变干扰的像素点,在归属于前景点或背景点的集合判断上具有一定的模糊性,简称为不确定点。选择合适的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。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:

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“ $T$ ”隶属于集合“1”的几率越大,则  $t$  越靠近 1。特别是,当点“ $T$ ”确定地属于集合“1”,则  $t = 1$ ;当点“ $T$ ”确定地不属于集合“1”,则  $t = 0$ 。

对于一幅二值图像,其中的前景点“1”指背景点“0”或点“0”到“1”的跃变,就认为存在一个边缘,称之为矩形边缘。本文引入“三角边缘”的概念。三角边缘是指将原来的矩形边缘拓宽为一个宽度为  $2\Delta b$  的线性变化边缘带,带中点的取值为一个与位置有关的线性变化量,反映了该点属于“0”或“1”的几率。设  $E_0$  为边缘的分割点,并且设定向量  $E$  的方向由背景区域指向前景区域,则三角边缘的不确定性取值为  $p(E) = \frac{1}{2} + \frac{E - E_0}{2\Delta b}$ ,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。 $\Delta b$  的取值是由主观设定的,当  $\Delta b$  增大时,识别的抗畸变能力强,但是识别的不确定性也增大;当  $\Delta b$  减小时,识别的抗畸变能力变弱,但是识别的准确程度提高。在实际的算法处理中,如果点  $p(x, y)$  为  $R$  中的前景点,设  $r$  为  $p(x, y)$  到  $R$  的边缘分界线的最短距离,那么如果  $r > \Delta b$ ,则  $p = 1$ ;如果  $0 \leq r \leq \Delta b$ ,则  $p = \frac{\Delta b + r}{2\Delta b}$ 。如果点  $q(x, y)$  为  $R$  中的背景点,设  $r'$  为  $q(x, y)$  到边缘分界线的最短距离,那么如果  $r' > \Delta b$ ,则  $q = 0$ ;如果  $0 \leq r' \leq \Delta b$ ,则  $q = \frac{\Delta b - r'}{2\Delta b}$ 。

### 2.2 多值击中击不中变换

用于二值目标识别的 HMT 定义为

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

其中,  $\otimes$  表示 HMT 运算,  $\ominus$  表示腐蚀操作,  $X$  为输入图像,  $R_f$  和  $R_b$  分别为前景和后景匹配模板。将二值模板图像  $R$  进行三角形边缘处理后得到多值图像  $\tilde{R}$ , 代入 HMT 运算的关系式,得

到 MVHMT 运算的表示式

$$X \odot \tilde{R} = X \odot \tilde{R}_f \cap X \odot \tilde{R}_b \quad (2)$$

其中  $\tilde{R}_f$  和  $\tilde{R}_b$  分别为经过软化边缘处理后得到的多值前景和后景匹配模板, 并且后景图像  $\tilde{R}_b$  为前景图像  $\tilde{R}_f$  的补集。利用卷积取阈实现 HMT 运算的简单方法, 得到

$$\begin{aligned} X \odot \tilde{R} &= (X \star \tilde{R}_f) |_{T=\tilde{N}_1} + (X \star \tilde{R}_b) |_{T=\tilde{N}_2} = \\ &= (X \star \tilde{R}_f) |_{T=\tilde{N}_1} + \overline{(X \star \tilde{R}_f) |_{T=\tilde{N}_2}} = \\ &= (X \star \tilde{R}_f + \overline{X \star \tilde{R}_f}) |_{T=\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\tilde{N}_1, \tilde{N}_2$  分别为前景点和后景点的取值之和。

我们曾经给出了联合排序 HMT 来一步实现排序 HMT 运算<sup>[11]</sup>, 其定义为

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

其中  $j$  为前景图像和后景图像的联合排序的序号。同理, 为了进一步提高抗畸变能力, 给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 JRMVHMT), 如下式所示

$$X \odot_j \tilde{R} = (X \star \tilde{R}_f + \overline{X \star \tilde{R}_f}) |_{T=j} \quad (5)$$

其中  $j$  为联合排序序号。JRMVHMT 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, JRMVHMT 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, JRMVHMT 可以识别具有  $e\%$  错误的模式, 其中

$$e = \frac{\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 - j}{\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2} \times 100\% \quad (6)$$

本节中采用  $R_f = \overline{R_b}$  HMT 运算, Casasent 采用的  $R_f \neq \overline{R_b}$  HMT 运算和 JRMVHMT 运算等三种方法对二值图像进行识别处理, 对它们的识别能力和抗畸变干扰的能力进行对比评价。图 1 中分别给出了用于测试的输入飞机图像和相应的参考模板。我们对图 1(a) 中的飞机图像进行  $0 \sim 15^\circ$  旋转畸变和  $87.5 \sim 112.5\%$  的尺度畸变, 然后对三种方法的抗旋转和尺度畸变能力对比测试, 得到如下数据。图 2(a) 中描述了三种方法在对输入图像具有从  $0^\circ$  到  $15^\circ$  旋转畸变时相关峰的高度曲线, 图 2(b) 描述了三种方法在对输入图像具有从  $87.5\%$  到  $112.5\%$  的尺度畸变时相关峰的高度曲线。我们知道相关峰的锐度和识别的抗畸变能力是一对矛盾。从图 2(a) 和 (b) 中看出,  $R_f \neq \overline{R_b}$  HMT 运算比  $R_f = \overline{R_b}$  HMT 运算的抗噪声能力强, 其峰值变化要小得多, 但是相关峰的值较低, 并且锐度不好。而 MVHMT 运算的处理结果处于两者之间, 兼具两者的优点, 并且处理结果略接近  $R_f = \overline{R_b}$  HMT 运算结果, 既具有较高和锐度较大的相关峰, 又不损失图像的有效信息, 具有很好的抗畸变能力, 从综合能力来考虑是最佳方法。

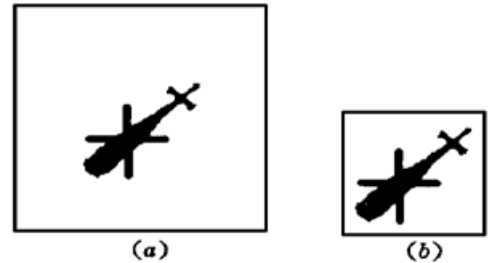


图 1 (a) 待匹配飞机图像;  
(b) 用于匹配运算的模板

Fig. 1 (a) input plane image;  
(b) mask for template matching

基于模糊概念, 引入不确定点的概念, 由于并没有损失原始图像的信息, 所以并没有扩大识别的容错度, 即不会产生误识别现象。针对实际应用中的问题, 不确定点的选择有很大的针对性, 并没有特定的要求。本文针对尺度畸变和旋转畸变, 提出了一种边缘三角化处理的不确定点的选择方法。当然可以有很多其他的选择方法, 但是从光学实现的角度来看, 这是最容易

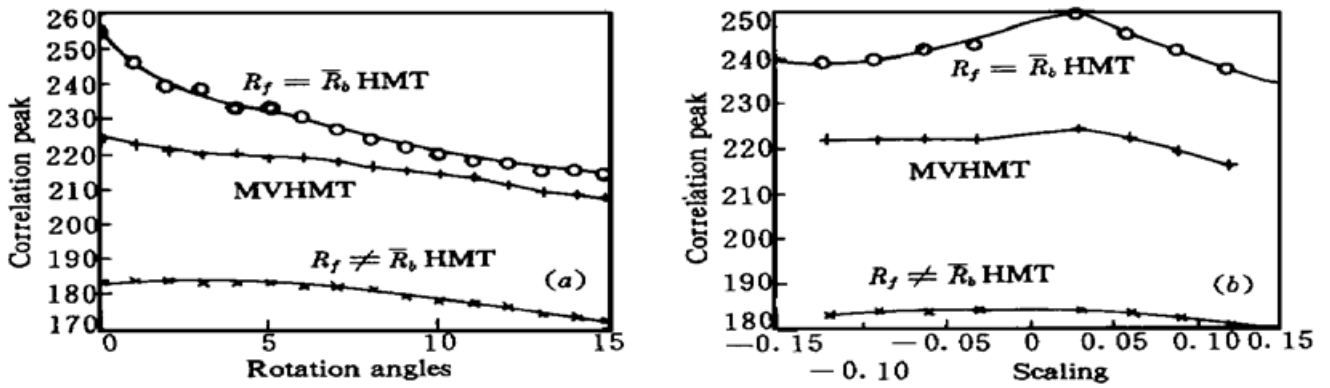


图 2 三种 HMT 运算的抗畸变能力对比

(a) 旋转畸变; (b) 尺度畸变

Fig. 2 Comparison of the robustness for rotation of three kinds of HMT

(a) rotation; (b) scaling

的。本文中采用的三角化边缘方法,其抗畸变能力受到边缘宽度的限制,但是对于多目标和不同复杂度的目标来讲,处理结果是稳定可靠的。

### 3 基于多值击中击不中变换的联合变换相关器

图 3 给出实验系统的光路结构图。图像通过傅里叶透镜(FTL1),其变换结果作用到液晶光阀(LCLV)的写入面上。LCLV 用准直的光束(CB)来照明并且从 LCLV 的输出面读出傅里叶变换谱的强度分布。输出的傅里叶变换谱的强度分布通过另一个傅里叶透镜 FTL2,在输出

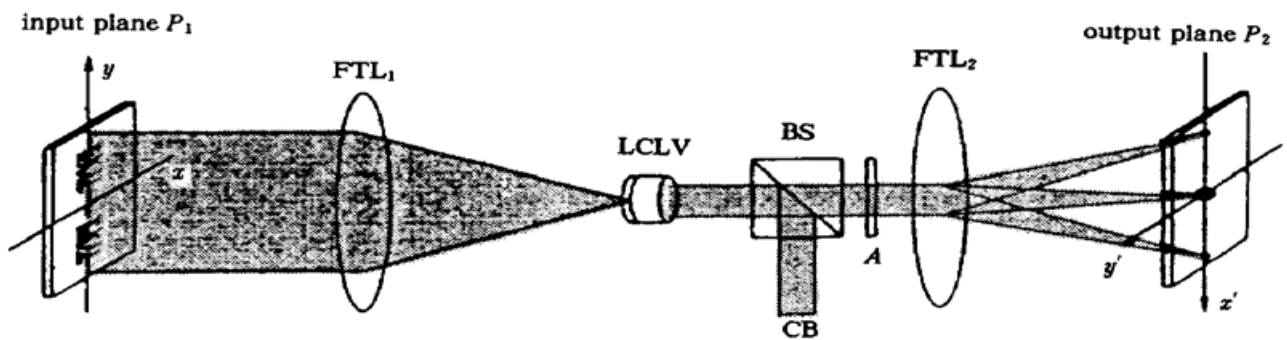


图 3 JTC 的光路结构图

FTL: 傅氏透镜; LCLV: 液晶光阀; CB: 准直光束; BS: 分束器

Fig. 3 JTC processor that uses a liquid crystal light valve in the Fourier plane

FTL: Fourier transform lens; LCLV: liquid crystal light valve; CB: collimated beam; BS: beam splitter

面  $P_2$  上得到的相关函数就是最后的 JTC 的结果。JTC 的输入面上有输入图像  $s(x - a, y)$  和参考图像  $r(x + a, y)$ 。那么在 JTC 输出面上, 计算结果为

$$g_c'(x, y) = s(x, y) \star s(x, y) + r(x, y) \star r(x, y) + s(x, y) \star r(x, y) * \delta(x - 2a, y) + r(x, y) \star s(x, y) * \delta(x + 2a, y) \quad (7)$$

其中  $*$  为卷积符号,  $\delta()$  为单位冲击响应函数。式中包含两个相关运算和一个加法取阈处理, 为了通过 JTC 一步实现式(7)中的计算, 本文发展出多值互补编码方法: 图像中取值为  $\alpha$  的像

素点用两个模拟量( $\alpha, 1 - \alpha$ ) 分别表示, 其中  $\alpha \in [0, 1]$ 。因此前景点“1”的  $\alpha = 1$ , 表示方法为  $(1, 0)$ ; 背景点“0”的  $\alpha = 0$ , 表示方法为  $(0, 1)$ ; 不确定点“ $X$ ”的表示方法为  $(\alpha, 1 - \alpha)$ 。图 4 中分别给出 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 五种像素点的表示方法, 每个像素点用两个单元来表示。图 5 为图 1 中参考模板进行边缘三角化处理和多值互补编码后的结果。

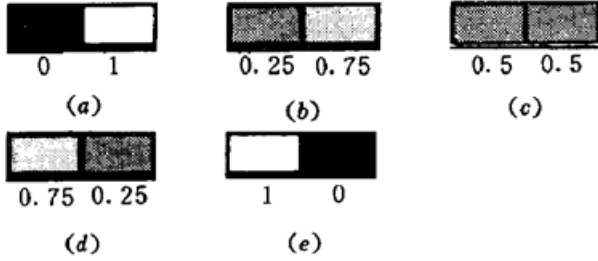


图 4 多值互补编码方法图示

Fig. 4 Multi-valued complementary encoding method

(a) 0; (b) 0.25; (c) 0.5; (d) 0.75; (e) 1

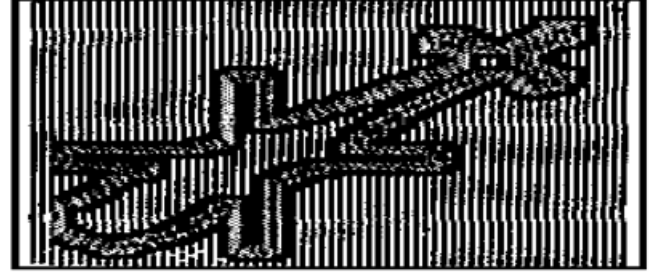


图 5 图 1 中模板进行边缘三角化处理和多值互补编码后的结果

Fig. 5 Encoding results for the mask used for MVHMT in figure 1

对输入图像和参考图像  $\tilde{R}$  进行多值互补编码处理, 得到编码图像  $X_e$  和  $\tilde{R}_e$ 。

$$X_e = X_{fe} + X_{be} * \delta(x, y - 1) \quad \tilde{R}_e = \tilde{R}_{fe} + \tilde{R}_{be} * \delta(x, y - 1) \quad (8)$$

其中“1”表示图像中相邻像素点的单位距离。 $X_{fe}$  和  $X_{be}$  分别为图像  $X$  的前景和背景编码图像,  $\tilde{R}_{fe}$  和  $\tilde{R}_{be}$  分别为图像  $\tilde{R}$  的前景和背景编码图像。其表达形式为

$$\begin{aligned} X_{fe}(m, n) &= \begin{cases} X_{fe}(m, 2h) = X_f(m, h) \\ X_{fe}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} & X_{be}(m, n) &= \begin{cases} X_{be}(m, 2h) = X_b(m, h) \\ X_{be}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} \\ \tilde{R}_{fe}(m, n) &= \begin{cases} \tilde{R}_{fe}(m, 2h) = \tilde{R}_f(m, h) \\ \tilde{R}_{fe}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} & \tilde{R}_{be}(m, n) &= \begin{cases} \tilde{R}_{be}(m, 2h) = \tilde{R}_b(m, h) \\ \tilde{R}_{be}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

按照方程(7)和(8), JTC 输入面上的幅度函数为

$$g_i(x, y) = X_e(x - a, y) + \tilde{R}_e(x + a, y) = X_{fe}(x - a, y) + X_{be}(x - a, y - 1) + \tilde{R}_{fe}(x + a, y) + \tilde{R}_{be}(x + a, y - 1) \quad (10)$$

相关的联合傅里叶变换频谱为

$$G_i(f_x, f_y) = FX_{fe} \exp(-j2\pi a f_x) + FX_{be} \exp(-j2\pi a f_x - j2\pi f_y) + F\tilde{R}_{fe} \exp(j2\pi a f_x) + F\tilde{R}_{be} \exp(j2\pi a f_x - j2\pi f_y) \quad (11)$$

其中,  $f_x$  和  $f_y$  为频谱坐标,  $G, FX$  和  $F\tilde{R}$  为  $g, X$  和  $\tilde{R}$  的傅里叶变换。因此联合变换功率谱的密度分布如下

$$\begin{aligned} |G_i(f_x, f_y)|^2 &= G_i(f_x, f_y) G_i^*(f_x, f_y) = \\ &|FX_{fe}|^2 + |FX_{be}|^2 + |F\tilde{R}_{fe}|^2 + |F\tilde{R}_{be}|^2 + \\ &FX_{fe}FX_{be}^* \exp(j2\pi f_y) + FX_{fe}F\tilde{R}_{fe}^* \exp(-j4\pi a f_x) + FX_{fe}F\tilde{R}_{be}^* \exp(-j4\pi a f_x + j2\pi f_y) + \\ &FX_{be}FX_{fe}^* \exp(-j2\pi f_y) + FX_{be}F\tilde{R}_{fe}^* \exp(-j4\pi a f_x - j2\pi f_y) + F\tilde{R}_{be}FX_{be}^* \exp(-j4\pi a f_x) + \\ &F\tilde{R}_{fe}FX_{fe}^* \exp(j4\pi a f_x) + F\tilde{R}_{fe}FX_{be}^* \exp(j4\pi a f_x + j2\pi f_y) + F\tilde{R}_{fe}F\tilde{R}_{be}^* \exp(j2\pi f_y) + \\ &F\tilde{R}_{be}FX_{fe}^* \exp(j4\pi a f_x - j2\pi f_y) + F\tilde{R}_{be}FX_{be}^* \exp(j4\pi a f_x) + F\tilde{R}_{be}F\tilde{R}_{fe}^* \exp(-j2\pi f_y) \end{aligned} \quad (12)$$

因此 JMVHMT 的输出相关信号为

$$g_o(x, y) = X_{fe} \star X_{fe} + X_{be} \star X_{be} + \tilde{R}_{fe} \star \tilde{R}_{fe} + \tilde{R}_{be} \star \tilde{R}_{be} +$$

$$\begin{aligned}
& (X_{fe} \star X_{be} + \tilde{R}_{fe} \star \tilde{R}_{be}) * \delta(x, y + 1) + (X_{be} \star X_{fe} + \tilde{R}_{be} \star \tilde{R}_{fe}) * \delta(x, y - 1) + \\
& (X_{fe} \star \tilde{R}_{fe} + X_{be} \star \tilde{R}_{be}) * \delta(x - 2a, y) + (\tilde{R}_{fe} \star X_{fe} + \tilde{R}_{be} \star X_{be}) * \delta(x + 2a, y) + \\
& (X_{fe} \star \tilde{R}_{be}) * \delta(x - 2a, y + 1) + (X_{be} \star \tilde{R}_{fe}) * \delta(x - 2a, y - 1) + \\
& (\tilde{R}_{fe} \star X_{be}) * \delta(x + 2a, y + 1) + (\tilde{R}_{be} \star X_{fe}) * \delta(x + 2a, y - 1)
\end{aligned} \quad (13)$$

方程(13)中坐标 $(2a, 0)$ 上的相关结果为 $(X_{fe} \star \tilde{R}_{fe} + X_{be} \star \tilde{R}_{be})$ , 其相应于方程(5)中的 $(X \star \tilde{R}_f + \bar{X} \star \tilde{R}_f)$ 项。对相关结果进行阈值分割, 就得到 MVHMT 的结果。

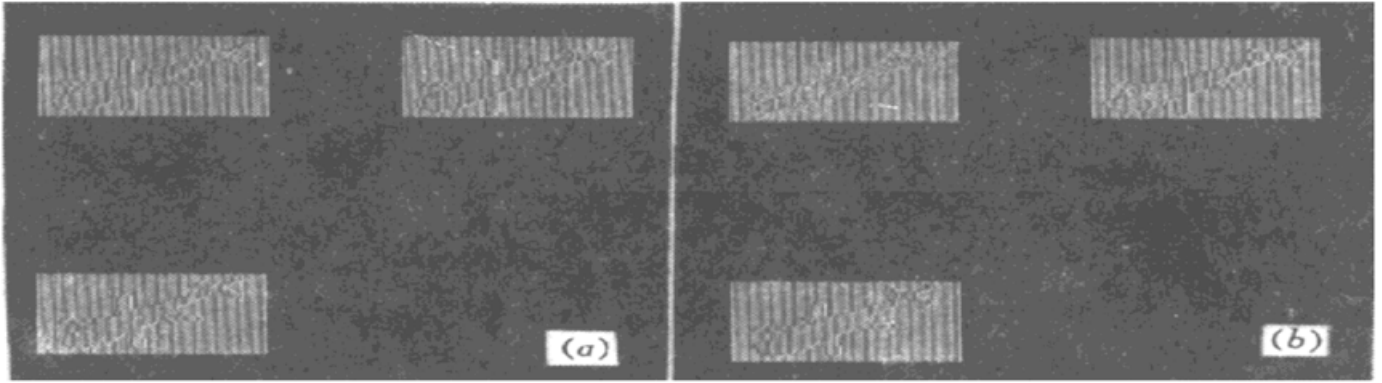


图 6 抗旋转畸变对比实验的输入图像

(a) HMT 运算; (b) MVHMT 运算

Fig. 6 The input images of JTC

(a) HMT; (b) MVHMT

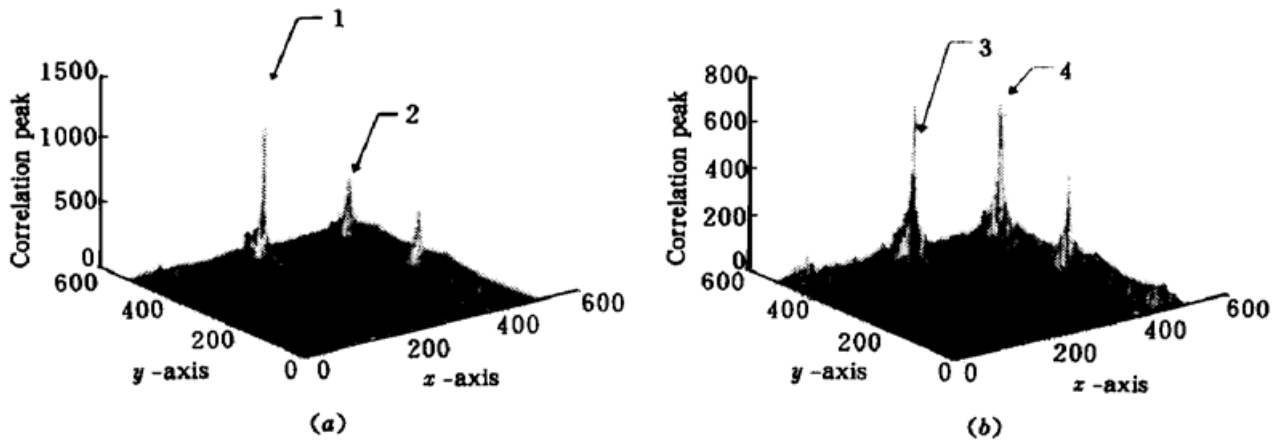


图 7 抗旋转畸变对比实验的 JTC 结果

(a) HMT 运算(①为模板  $R$  与原始图像  $X$  的相关峰, ②为  $R$  与畸变图像  $X'$  的相关峰);

(b) MVHMT 运算(③为模板  $\tilde{R}$  与原始图像  $X$  的相关峰, ④为  $\tilde{R}$  与畸变图像  $X'$  的相关峰)

Fig. 7 The experimental results of JTC

(a) HMT (① is the correlation peak of  $R$  and  $X$ , ② is the correlation peak of  $R$  and  $X'$ );

(b) MVHMT (③ is the correlation peak of  $\tilde{R}$  and  $X$ , ④ is the correlation peak of  $\tilde{R}$  and  $X'$ )

本文采用计算机模拟的方法来测试采用 MVHMT 的 JTC 的模式识别能力, 运算基于  $512 \times 512$  的快速二维傅里叶变换。为了清楚地看到 MVHMT 运算与 HMT 运算的优缺点, 我们进行对比实验。图 6(a) 给出采用 HMT 运算 JTC 的输入图像, 左上角为匹配模板  $R$ , 右上角为标准输入图像  $X$  (这里  $X = R$ ), 左下角为受到  $10^\circ$  旋转畸变干扰的图像  $X'$  ( $R$ ,  $X$  和  $X'$  都经过二值互补编码, 参考文献[11])。其 JTC 的模拟结果在图 8(a) 中给出(为了能够清楚地观



察结果, 将 JTC 的主瓣和另外三个关于中心对称的相关峰消去), 从中可以看到当受到干扰后, 相关峰迅速地下降, 为后续的阈值操作带来了很大困难。图 6 (b) 给出采用 MVHMT 运算 JTC 的输入图像, 将图 6 (a) 的左上角换为经过多值互补编码处理的匹配模板  $\tilde{R}$ 。相应的 JTC 模拟结果在图 7 (b) 中给出, 从中可以看到新方法的抗畸变能力有很大提高, 相关峰的高度基本不受旋转畸变的影响, 方便了后续的阈值操作。模拟结果证明了采用 MVHMT 运算可以有效地提高 JTC 的运算性能。图 8 (a) 为图 6 (b) 中输入图像的实际光学 JTC 处理结果, 图 8 (b) 为对图 8 (a) 进行阈值分割的结果。光学实验的结果与计算机模拟结果相吻合, 从而证明了 MVHMT 运算的有效性。

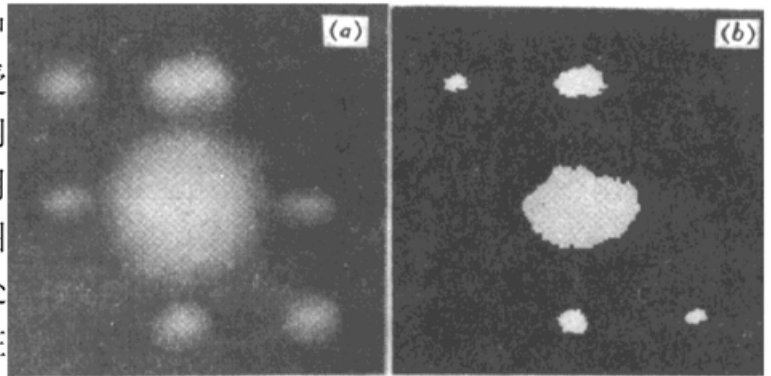


图 8 MVHMT 的光学 JTC 实验结果

(a) 图 6 (b) 的 JTC 结果; (b) 对 (a) 进行阈值分割结果

Fig. 8 The optical JTC experimental results of MVHMT

(a) the JTC correlation of figure 6 (b);

(b) the thresholding result of figure 8 (a)

## 4 结 论

本文提出了 MVHMT 用于二值物体识别的 JTC 处理器, 有效地提高了常用 JTC 的模式识别能力。MVHMT 对 HMT 的性能进行了改善, 基于模糊的概念, 引入不确定点的定义, 这样一幅值域为  $\{0, 1\}$  的二值图像, 当考虑到容易受到畸变干扰的不确定点时, 就扩展为一个取值分布为  $[0, 1]$  之间的模糊集合。这种模糊化的处理过程, 带来的不确定性, 具有较强的适应能力<sup>[17]</sup>。使得容易受到畸变干扰的对判别结果的作用降低, 提高了目标识别的抗畸变能力, 并且不损失图像信息, 具有输入图像和模板之间进行精确匹配的能力。通过采用多值互补编码在 JTC 的一步操作内实现 MVHMT 运算, 并且只需检测一个相关结果。MVHMT 需要对输入图像做预处理编码, 可以通过计算机硬件很容易地快速实现。但是作为编码的结果, 图像的处理区域加倍了, 因此所需光学系统的容量也加倍了。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-Hill, 1968. 1~ 115
- 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, S. F. Odeh. Multiple object identification by bipolar joint transform correlation. *Opt. Eng.*, 1988, **27**(4): 295~ 300
- 4 B. Javidi. Nonlinear joint power spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2358~ 2367
- 5 K. H. Fielding, J. L. Horner. 1-f binary joint transform correlator. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(9): 1081~ 1087
- 6 D. Feng, H. Zhao, S. Xia. Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3, 4): 260~ 264
- 7 B. Javidi, Q. Tang. Chirp-encoded joint transform correlators with a single input plane. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 227~ 230
- 8 B. Javidi, J. L. Horner. Optical pattern recognition system for validation and security verification. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(6): 1752~ 1756

- 9 Z. Chen, Y. Zhang, G. Mu. Complementary-reference joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(32): 7622~ 7626
- 10 F. M. Dickey, L. A. Romero. Normalized correlation for pattern recognition. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(15): 1186~ 1188
- 11 G. Cheng, S. Yuan, M. Wu *et al.*. Joint hit-or-miss transform correlator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(3): 318~ 324 (in Chinese)
- 12 L. Liu. Morphological hit-or-miss transform for binary and gray-tone image processing and its optical implementation. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(10): 3447~ 3455
- 13 D. Casasent, R. Sturgill. Optical hit-or-miss morphological transforms for ATR. *Proc. SPIE*, 1989, **1153**: 500~ 510
- 14 S. Yuan, L. Chen, J. Hong. Pattern recognition based on morphological transforms and its optical implementation. *Proc. SPIE*, 1992, **1822**: 50~ 58
- 15 S. Yuan, M. Wu, G. Jin *et al.*. Optical implementation of morphological hit-miss transform using complementary-encoding. *Proc. SPIE*, 1995, **2564**: 336~ 342
- 16 D. Casasent, R. Schaefer, R. Sturgill. Optical hit-miss morphological transform. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29): 6255~ 6263
- 17 Guirong Guo. Fuzzy Pattern Recognition. Changsha: National Defense Science and Technology Press, 1993. 101~ 132 (in Chinese)

## **Distortion-invariant Optical Pattern Recognition Based on the Fuzzy Logic**

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)

**Abstract** In this paper, multi-value hit-or-miss transformation (MVHMT) is introduced into a joint transform correlator (JTC) for binary image recognition. Considering fuzzy concepts are lost MVHMT improves the ability of the ordinary morphological hit-or-miss transformation (HMT) because it reduces the decision effect of the pixels that is easily disturbed by rotation and scaling distortion. Not only MVHMT can realize the precision recognition between two images because no information of the input images is lost, but also it has a better distortion-invariant ability for scaling and rotation than the ordinary HMT. Using a novel multi-value complementary encoding method, MVHMT is performed on a JTC in one step. With a high-level thresholding value, the correct justification can be achieved from the correlated resultant image. The simulation results are given.

**Key words** multi-value hit-or-miss transformation, fuzzy logic, optical pattern recognition, multi-value complementary encoding, joint transform correlator