

# 联合击中击不中变换相关器\*

成 罡 袁石夫 邬敏贤 金国藩

(清华大学精密仪器系光学教研组, 北京 100084)

**摘 要** 将联合击中击不中变换相关器(JHMTTC)用于二值图像的目标识别。与常用的联合变换相关器(JTC)相比,联合击中击不中变换相关器对联合变换相关器的输入图像和参考图像进行互补编码。编码的目的在于通过联合变换相关器来一步实现形态学中的击中击不中变换。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。文中给出了模拟结果和实验数据。

**关键词** 联合相关变换, 互补编码, 击中击不中变换, 光学模式识别。

## 1 引 言

光学模式识别是光学信息处理中的一个重要的应用领域<sup>[1]</sup>。因为光学相关器的结构可以用于执行模式识别<sup>[1, 2]</sup>,近年人们提出了许多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>[2~11]</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,但是在某些特定的情况下,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, 12]</sup>。但是归一化是一项耗时的工作,并且难以用于多目标识别。最近,Chen 等提出互补参考联合相关变换器(CRJTC)来改善联合变换相关器的性能<sup>[11]</sup>。

形态学的击中击不中变换已被用于光学模式识别的领域<sup>[14~17]</sup>。Casasent 等人<sup>[14]</sup>以及作者<sup>[15, 17]</sup>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。这两种击中击不中变换的实现方法都至少需要顺序执行三个操作。为了一步实现击中击不中变换,人们已提出了几个建议<sup>[15~17]</sup>。

本文提出联合击中击不中变换相关器(JHMTTC)。为了方便起见,本文中所指的图像均为二值图像。联合击中击不中变换相关器把击中击不中变换与联合变换相关器结合起来。通过在输入面上对参考和目标图像进行互补编码,因此联合击中击不中变换相关器可以一步实现击中击不中变换,克服了联合变换相关器中的误报警现象,从而实现了准确的判断。

\* 国家科委 863 高科技项目及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期:1996 年 1 月 4 日;收到修改稿日期:1996 年 4 月 26 日

## 2 联合击中击不中变换相关器

### 2.1 形态学击中击不中变换及击中击不中变换与相关的关系

在形态学中, 图像  $X$  与参考图像对的击中击不中变换定义为

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

其中  $\odot$  为击中击不中变换,  $\ominus$  为腐蚀,  $\bar{X}$  为图像  $X$  的补操作,  $\cap$  为交操作。参考图像对  $R(R_f, R_b)$  通常定义为

$$R_f = R, \quad R_b = \bar{R}, \quad (2)$$

其中  $R_f$  和  $R_b$  分别为参考图像  $R$  的前景与背景。在方程(1)中, 第一个腐蚀操作  $X \ominus R_f$  得到目标在  $X$  的前景图像中的输出峰; 第二个腐蚀操作  $\bar{X} \ominus R_b$  得到在目标的补集在  $X$  的背景图像中的输出峰。两个腐蚀结果的交集输出峰值点只在图像的前景和背景都完全匹配的情况下出现。

按照方程(1), 腐蚀是实现击中击不中变换的基本操作, 其可以通过两个图像的相关来实现。存在两种基本的腐蚀方法

$$X \ominus R = (X * R) |_{T=N} = (X \star R) |_{T=N} \quad (3)$$

和

$$X \ominus R = \bar{X} \oplus R = \bar{X} * R |_{T=N-1} = (\bar{X} \star R) |_{T=N-1} \quad (4)$$

其中  $R$  为  $R$  的镜向图像,  $*$  为卷积,  $\star$  为相关,  $T$  为阈值,  $N$  是结构元  $R$  中的前景点的总数。

按照方程(3), 击中击不中变换可以表示为

$$X \odot R = (X \star R_f) |_{T=N_1} \cap (\bar{X} \star R_b) |_{T=N_2}, \quad (5)$$

其中  $N_1$  和  $N_2$  分别为前景参考图像  $R_f$  和背景参考图像  $R_b$  的前景点的总数。

### 2.2 联合排序击中击不中变换

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。用阈值  $p$  和  $q$  来代替方程(5)中的阈值  $N_1$  和  $N_2$ , 那么  $R(R_f, R_b)$  对  $X$  的  $(p, q)$  排序击中击不中变换的结果为

$$X \odot_{p, q} R = (X \square_p R_f) \cap (\bar{X} \square_q R_b) \quad (6)$$

其中  $p$  和  $q$  为前景和背景滤波器的序号,  $\square$  指二值排序滤波器<sup>[14]</sup>。

为了一步实现排序击中击不中变换, 本文中给出了联合排序击中击不中变换, 其定义为

$$X \odot_j R = [(X \star R_f) + (\bar{X} \star R_b)] |_{T=j} \quad (7)$$

其中  $j$  是前景图像和后景图像的联合排序,  $X \odot_j R$  是联合排序击中击不中变换。

联合排序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, 联合排序击中击不中变换可以识别具有  $e\%$  错误的模式, 其中

$$e = \frac{M-j}{M} \times 100\%. \quad (8)$$

### 2.3 基于互补编码的联合击中击不中变换相关器

在常用的联合变换相关器中, 输入面上有输入图像  $s(x-a, y)$  和参考图像  $r(x+a, y)$ 。那么在联合变换相关器输出面上, 计算结果为

$$g'_c(x, y) = s(x, y) \star s(x, y) + r(x, y) \star r(x, y) + s(x, y) \star r(x, y) * \delta(x - 2a, y) + r(x, y) \star s(x, y) * \delta(x + 2a, y) \quad (9)$$

在本文的联合击中击不中变换相关器中对输入图像和参考图像进行互补编码。每个像素点用两个单元来表示,如图 1 中所示。数值为 0 的像素点用如图 1(a)所示的编码表示,其中上单元为亮度 1,下单元为亮度 0。值为 1 的像素点用如图 1(b)所示的编码表示,其中上单元为亮度 0,下单元为亮度 1。图 1(c)和图 1(d)中分别给出二值图像  $X(F)$  和其互补编码的图像  $X_e$ 。

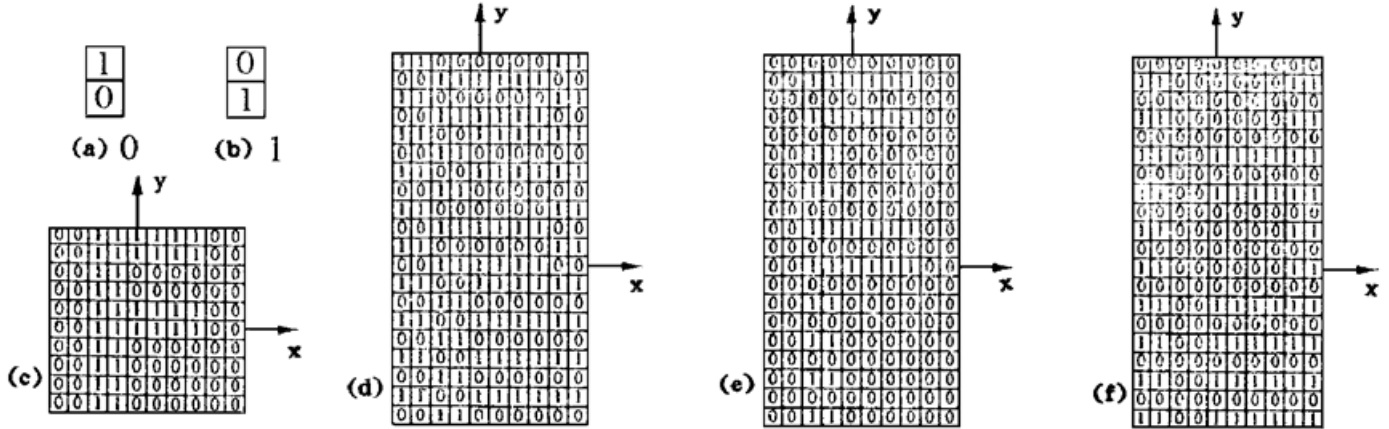


Fig. 1 Complementary-encoding representative method: (a) pixel 0, (b) pixel 1, (c) binary image  $X$ , (d) encoded image  $X_e$ , (e) foreground encoded image  $X_{fe}$ , (f) background encoded image  $X_{be}$

图像  $X_e$  可以表达为

$$X_e = X_{fe} + X_{be} * \delta(x, y - 1) \quad (10)$$

其中“1”表示图像  $X$  中的相邻像素点的单位距离。 $X_{fe}$  和  $X_{be}$  分别是图像  $X$  的前景编码图像[图 1(e)]和后景编码图像[图 1(f)]。图像  $X_{fe}$  和  $X_{be}$  有如下表达形式

$$X_{fe}(m, n) = \begin{cases} X_{fe}(m, 2h) = X_f(m, h) \\ X_{fe}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{be}(m, n) = \begin{cases} X_{be}(m, 2h) = X_b(m, h) \\ X_{be}(m, 2h + 1) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

按照方程(11)和(12),在联合击中击不中变换相关器中,输入面上的幅度函数为

$$g_i(x, y) = s_e(x - a, y) + r_e(x + a, y) = s_{fe}(x - a, y) + s_{be}(x - a, y - 1) + r_{fe}(x + a, y) + r_{be}(x + a, y - 1) \quad (13)$$

相关的联合傅里叶变换频谱为

$$G_i(f_x, f_y) = S_{fe} \exp(-j2\pi a f_x) + S_{be} \exp(-j2\pi a f_x - j2\pi f_y) + R_{fe} \exp(j2\pi a f_x) + R_{be} \exp(j2\pi a f_x - j2\pi f_y) \quad (14)$$

其中  $f_x$  和  $f_y$  为频谱坐标,  $G$ 、 $S$  和  $R$  为  $g$ 、 $s$  和  $r$  的傅里叶变换。因此联合变换功率谱的密度分布如下

$$\begin{aligned} |G_i(f_x, f_y)|^2 &= G_i(f_x, f_y) G_i^*(f_x, f_y) \\ &= |S_{fe}|^2 + |S_{be}|^2 + |R_{fe}|^2 + |R_{be}|^2 \\ &\quad + S_{fe} S_{be}^* \exp(j2\pi f_y) + S_{fe} R_{fe}^* \exp(-j4\pi a f_x) \\ &\quad + S_{fe} R_{be}^* \exp(-j4\pi a f_x + j2\pi f_y) + S_{be} S_{fe}^* \exp(-j2\pi f_y) \\ &\quad + S_{be} R_{fe}^* \exp(-j4\pi a f_x - j2\pi f_y) + S_{be} R_{be}^* \exp(-j4\pi a f_x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + R_{fe}S_{fe}^* \exp(j4\pi af_x) + R_{fe}S_{be}^* \exp(j4\pi af_x + j2\pi f_y) \\
& + R_{fe}R_{be}^* \exp(j2\pi f_y) + R_{be}S_{fe}^* \exp(j4\pi af_x - j2\pi f_y) \\
& + R_{be}S_{be}^* \exp(j4\pi af_x) + R_{be}R_{fe}^* \exp(-j2\pi f_y)
\end{aligned} \quad (15)$$

因此联合击中击不中变换相关器的输出相关信号为

$$\begin{aligned}
g_0(x, y) = & s_{fe} \star s_{fe} + s_{be} \star s_{be} + r_{fe} \star r_{fe} + r_{be} \star r_{be} \\
& + (s_{fe} \star s_{be} + r_{fe} \star r_{be}) * \delta(x, y + 1) + (s_{be} \star s_{fe} + r_{be} \star r_{fe}) * \delta(x, y - 1) \\
& + (s_{fe} \star r_{fe} + s_{be} \star r_{be}) * \delta(x - 2a, y) + (r_{fe} \star s_{fe} + r_{be} \star s_{be}) * \delta(x + 2a, y) \\
& (s_{fe} \star r_{be}) * \delta(x - 2a, y + 1) + (s_{be} \star r_{fe}) * \delta(x - 2a, y - 1) \\
& + (r_{fe} \star s_{be}) * \delta(x + 2a, y + 1) + (r_{be} \star s_{fe}) * \delta(x + 2a, y - 1)
\end{aligned} \quad (16)$$

从方程(16)中, 可以看到在坐标  $(2a, 0)$  上相关结果为  $s_{fe} \star r_{fe} + s_{be} \star r_{be}$ , 其相应于方程(9)中  $(X \star R_f) + (\bar{X} \star R_b)$  项。用正确的阈值来对相关结果进行二值化, 就可以从联合击中击不中变换相关器的结果中得到联合排序击中击不中变换的结果。因为图像的前景和背景的信息都对相关峰有贡献, 所以可以从联合击中击不中变换相关器中得到正确的判断。

### 3 计算机模拟结果

首先采用计算机模拟的方法来测试联合击中击不中变换相关器的模式识别能力。相关运算基于  $128 \times 128$  的快速二维傅里叶变换。字符 F 和 E 作为用于识别的参考图像。字符的尺寸为  $10 \times 10$  个像素。

图 2 给出含有两个 F 和一个 E 的联合变换相关器输入图像 FFE。其联合变换相关器的模拟结果如图 3 所示。从图 3 中可以看到字符 F 和 E 的互相关峰与字符 F 的自相关峰一样大小, 导致无法判断哪个字符为 F。

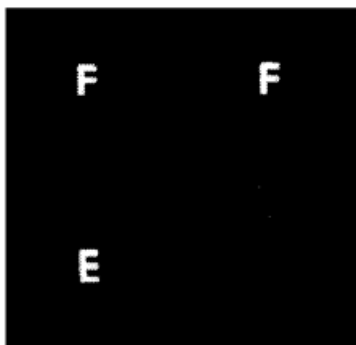


Fig. 2 Input image FFE

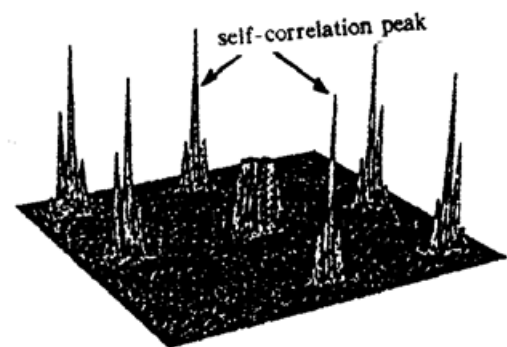


Fig. 3 Simulated correlation outputs of common JTC using FFE as input image

图 4 给出了采用互补编码的联合变换相关器输入图像 FFE<sub>e</sub>。其联合击中击不中变换相关器的模拟结果在图 5 中给出。从图 5 中可以清晰的看到自相关峰总是保持最大的亮度值。模拟结果证明了采用互补编码可以有效地提高联合变换相关器的运算性能。

### 4 实验结果

联合击中击不中变换相关器可以通过把参考图像和输入图像进行互补编码后直接送入普通的联合变换相关器处理系统来实现。作者采用在傅利叶平面上用一个空间光调制器(SLM)来读出联合功率变换谱的处理方式。图6为实验系统的光路结构图。图像通过傅里叶透镜

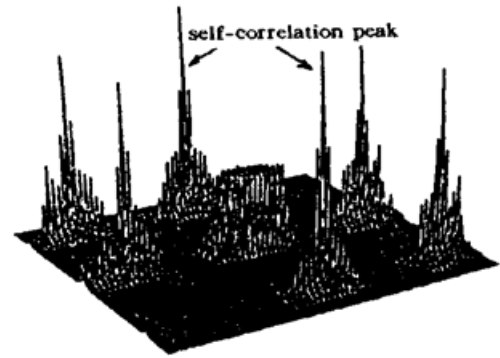
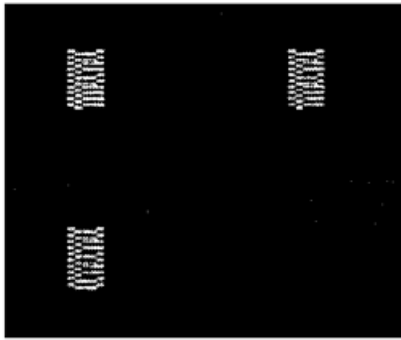


Fig. 4 Combined JHMTTC input image after complementary-encoding FFEe

Fig. 5 Simulated correlation outputs of JHMTTC using FFEe as input image

(FTL<sub>1</sub>), 其变换结果作用到液晶光阀(LCLV)的写入面上。液晶光阀用准直的光束(CB)来照明并且从液晶光阀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 FTL<sub>2</sub>, 在输出面 P<sub>2</sub> 上得到所求的相关函数。二值化的相关结果就是最后的联合击中击不中变换相关器的结果。在实验中, 采用 He-Ne 激光器作为相关光源。傅里叶透镜 FTL<sub>1</sub> 和 FTL<sub>2</sub> 的焦距均为 800 mm。

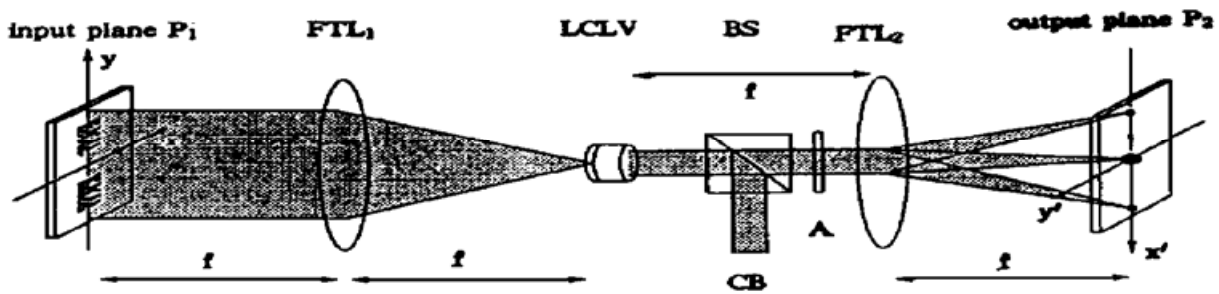


Fig. 6 JHMTTC processor that uses a liquid crystal light valve in the Fourier plane: FTL-Fourier transform lens; LCLV-liquid crystal light valve; CB-collimated beam; BS-beam splitter

图 7 输入图像为图 2 中的 FFE 时的相关结果。从图 7 中很难区分自相关峰和互相关峰。即使采用取阈值的方法, 也无法得到正确的判断结果。

图 8(a) 为输入图像为采用互补编码的 FFE 时的相关结果。相关结果通过 AFG 图像卡获取, 量化级数为 256 级, 并且取阈值  $T = 110$ 。图 8(a) 的二值化相关结果在图 8(b) 中给出,

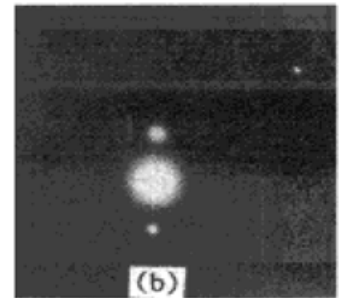
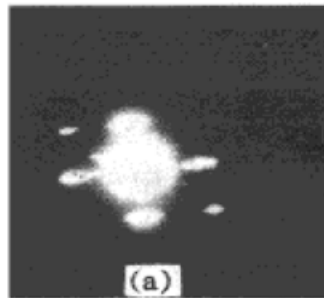
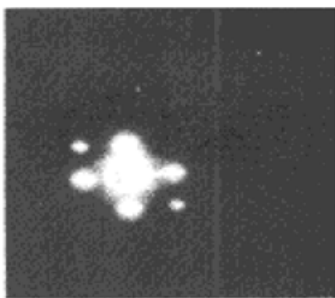


Fig. 7 Experimental results of common JTC using FFE as input image

Fig. 8 (a) Experimental correlation outputs of JHMTTC using FFEe as input image, (b) Experimental results using the threshold  $T = 110$  to (a)

即为基于联合击中击不中变换相关器的排序击中击不中变换的最后结果。从中可以得到正确的判断结果。试验证明了联合击中击不中变换相关器有较好的模式判断能力。

## 5 讨 论

与其它已经使用的击中击不中变换的实现方法对比, 联合击中击不中变换相关器有一些明显的优势, 可以通过一个光学相关器在一步操作内实现击中击不中变换运算, 适用于多目标识别, 并且只需检测一个相关结果。

联合击中击不中变换相关器需要对输入图像做预处理编码, 其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。

联合击中击不中变换相关器是通过模拟光学相关方法来实现的离散数字相关处理方法。因为灰度图像可以用编码的二值图像来表示, 所以联合击中击不中变换相关器也可以用于灰度目标的识别。

**结 论** 本文提出了将联合击中击不中变换相关器用于二值物体的准确识别, 研究了该相关器的处理特性, 证明了联合击中击不中变换相关器通过采用互补编码, 可以有效的提高常用联合变换相关器的模式识别能力。文中给出了计算机模拟结果和实验结论。

## 参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. New York, McGraw-Hill, 1968
- [2] C. S. Weaver, J. W. Goodman, A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1248~ 1249
- [3] F. T. S. Yu, X. J. Lu, A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52**(1): 10~ 16
- [4] B. Javidi, S. F. Odeh, Multiple object identification by bipolar joint transform correlation. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(4): 295~ 300
- [5] B. Javidi, Nonlinear joint transform spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2358~ 2367
- [6] K. H. Fielding, J. L. Horner, 1-f binary joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(9): 1081~ 1087
- [7] B. Javidi, J. Wang, Q. Tang, Multiple-object binary joint transform correlation using multiple level thresholding crossing. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(29): 4234~ 4244
- [8] D. Feng, H. Zhao, S. Xia, Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3, 4): 260~ 264
- [9] Q. Tang, B. Javidi, Chirp-encoded joint transform correlators with a single input plane. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 227~ 230
- [10] B. Javidi, J. L. Horner, J. F. Walkup, Optical pattern recognition system for validation and security verification. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(6): 1752~ 1756
- [11] Z. Chen, Y. Zhang, G. Mu, Complementary-reference joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(32): 7622~ 7626
- [12] F. M. Dickey, L. A. Romero, Normalization correlation for pattern recognitions. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(15): 1186~ 1189
- [13] D. Casasent, R. Sturgill, Optical hit-or-miss. morphological transforms for ATR. *Proc. SPIE*,

1989, **1153** : 500~ 510

- [14] D. Casasent, R. Schaefer, R. Sturgill, Optical hit-miss morphological transform. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29) : 6255~ 6263
- [15] S. Yuan, L. Chen, J. Hong, Pattern recognition based on morphological transform and its optical implementation. *Proc. SPIE*, 1992, **1822** : 50~ 58
- [16] 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
- [17] S. Yuan, M. Wu, G. Jin *et al.*, Optical implementation of morphological hit-miss transform using complementary-encoding. *Proc. SPIE*, 1995, **2564** : 336~ 342
- [18] S. Yuan, S. Zhao, X. Zhang *et al.*, Optical parallel logic gates with a liquid crystal light valve and their applications. *Optik*, 1994, **97**(4) : 149~ 159

## Joint Hit-or-Miss Transform Correlator

**Cheng Gang    Yuan Shifu    Wu Minxian    Jin Guofan**

(*Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 4 January 1996; revised 26 April 1996)

**Abstract** We present a new joint transform correlation scheme for the accurate recognition of binary objects, which uses complementary-encoding method to code the reference and target images in the input plane. The aim of such encoding is to perform joint rank-order hit-or-miss transform in one step. With a high-level thresholding value, the correct justification can be achieved from the correlated resultant image. The simulation results and experimental demonstrations are listed.

**Key words** joint transform correlation, complementary-encoding, hit-or-miss transform, optical pattern recognition.