

用联合变换相关器实现灰阶图像 绝对差度量光学匹配*

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 将绝对差度量(ADM)引入联合变换相关器(JTC), 实现了灰阶图像光学匹配的计算机模拟实验。利用循环编码方法, 通过联合变换相关器一步实现绝对差度量, 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。针对高斯噪声干扰情况, 分析了阈值选择问题, 提高了灰阶目标识别抵抗噪声畸变干扰的能力。

关键词 绝对差度量, 联合变换相关器, 循环编码方法, 光学模式识别, 灰阶图像。

1 引 言

图像识别是对图像进行分类、描述、判断、识别和理解。实现快速准确的图像识别一直是人工智能所追求的目标。基于特征的识别技术、神经网络技术和相关模式匹配是图像识别的三种主要方法。基于特征的识别技术和神经网络技术的匹配效率高, 稳定性好, 对图像的各种非本质变化(旋转、缩放和光照强度变化等等)不敏感, 是计算机采用的主要方法。但是计算机在图像识别方面存在一些根本性的缺陷, 如需要大量的存储空间, 并且处理方法是串行方式。相关模式匹配方法能利用图像中的所有信息, 所以区分不同对象的能力强, 精度高, 特别是它能在十分复杂的图像环境下有效地工作, 而这时很难甚至不可能使用基于特征的匹配方法。光学相关器可以很容易地实现相关模式匹配方法, 并且在图像处理方面具有很大的优越性, 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, 无须一些中间光电、电光转换处理过程。光学图像识别具有广泛的研究内容: 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]。最近几年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有着较大的优越性^[2-10]。

以往在很多光学图像识别的文献中, 往往把相关与匹配相等同, 但实际上“相关运算”和“匹配识别”是两个概念。在某些特定情况下, 输入图像与参考图像进行相关就可以找出相匹配的模式; 但是在大多数情况下, 相关运算无法给出正确的判别结果。例如, 在图 1(a)中为联合变换相关器的输入图像, 左上角为灰阶匹配模板 R , 左下角为输入图像 X (这里 $X = R$), 右上角为另一幅灰阶图像 X' 。联合变换相关器的模拟结果在图 1(b)中给出(为了能够清楚地

* 国家自然科学基金(69775008)、国家科委 863 高科技项目及曹光彪高技术发展基金资助。

收稿日期: 1998-01-12; 收到修改稿日期: 1998-07-02

观察结果, 将联合变换相关器的主瓣和另外三个关于中心对称的相关峰消去), 从中可以看到自相关峰与互相关峰的高度基本相同, 为后续的认识带来了很大困难。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^[1, 10], 但是归一化是一项耗时的工作, 并且难以用于多目标识别。Chen 等人和作者都曾提出互补参考联合相关变换器(CRJTC)和联合击中击不中变换相关器(JHMTTC)来改善联合变换相关器的性能^[9, 11]。但是这两种改进方法不适用于灰阶图像处理。

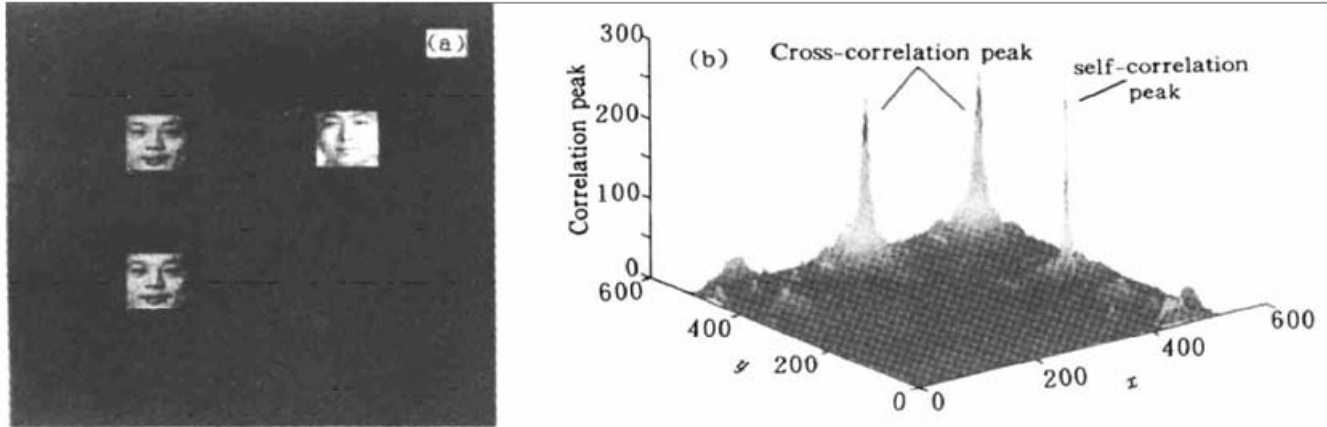


Fig. 1 (a) The input image of JTC, including two same gray-scale human-faces and a different human-face; (b) The result of JTC, including one self-correlation peak and two cross-correlation peaks

本文提出了实现灰阶图像匹配处理的绝对差度量的概念。利用循环编码方法, 将绝对差度量引入联合变换相关器, 一步实现灰阶图像的光学匹配识别处理。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。文中分析了针对畸变干扰情况下, 降低阈值可以提高系统的抗畸变能力。

2 基于绝对差度量的模板匹配技术和相关运算

2.1 基于绝对差度量的模板匹配技术

图像匹配的最关键技术是对两幅图像 f 和 g 之间的差异给出一个度量, 根据此度量值来判断图像 f 和 g 之间相匹配的程度。经典的匹配度量常用的有两个, 即互相关度量 $CLM(f, g)$ 和绝对差度量 $ADM(f, g)$, 其定义如下:

$$CLM(f, g) = \frac{E\{[f - E(f)][g - E(g)]\}}{\sqrt{s(f)s(g)}} = \frac{E(fg) - E(f)E(g)}{\sqrt{s(f)s(g)}} \quad (1)$$

$$ADM(f, g) = \int |f(x) - g(x)| dx \quad (2)$$

其中 $E(\cdot)$ 和 $s(\cdot)$ 分别表示图像信号的均值和方差。在绝对差度量中, 用绝对差度量值度量 f 和 g 之间的差异, 绝对差度量越小, f 和 g 就越相近; 而在互相关度量中, 互相关度量则是度量 f 和 g 之间的相同性, 因此互相关度量越大就意味着 f 和 g 越相近, 实际上这种相同性度量与差异度量本质上是一样的, 只要令

$$CLM'(f, g) = 1 - CLM(f, g) \quad (3)$$

则 CLM' 就是基于互相关的差异度量。

用 $X \Delta R$ 来表示输入图像 X 和模板 R 之间进行匹配搜索运算。 $X \Delta R$ 实际上是一种符号代换操作过程。通常输入图像 X 的尺寸大于模板图像 R 的尺寸, 将模板 R 在输入图像 X 中进行全方位的平移。当模板 R 处于某一位置时, 即和相应的 X 窗口图像进行绝对差度量, 输出值

就反映了当前位置上的匹配关系。当模板 R 在整幅图像 X 上搜索一遍后, 输出图像就标明了输入图像的不同位置与模板匹配的情况。模板 R 对输入图像 X 的匹配搜索运算 $X \Delta R$ 采用如下方程式表示:

$$[X \Delta R](m, n) = \text{ADM}[W(X, m, n, P, Q), R] \quad (4)$$

式中 $[X \Delta R](m, n)$ 为匹配输出矩阵中坐标为 (m, n) 点的值; P 和 Q 分别为模板 R 的宽度和高度; $W(x, m, n, P, Q)$ 表示在图像 X 上取窗口图像, 中心点位置为 (m, n) , 图像的宽度和高度为 P 和 Q , 即等同于模板 R 的宽度和高度。

2.2 光学相关运算

二维相关技术是在二维方向上进行平移和积分,

$$C_{PQ}(\tau, v) = \int \int (x, y) Q(x - \tau, y - v) d\tau dv \quad (5)$$

设数字图像 X 的矩阵表达形式为 $[X]_{MN}$ (M 和 N 分别表示图像 X 的宽高), 目标 R 的矩阵表达形式为 $[R]_{PQ}$ (P 和 Q 分别表示图像 R 的宽高), 那么光学相关操作 $[X \star R]_{MN}$ 的离散表示形式为

$$[X \star R]_{MN}(m, n) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q X(m+i, n+j) \times R(i, j) \quad (6)$$

式中 $[X \star R]_{MN}(m, n)$ 为相关结果矩阵中坐标为 (m, n) 点的值, \times 为乘法运算。因此利用光学相关器实现图像匹配识别的关键在于: 如何利用(6)式中乘法和叠加运算实现绝对差度量。

2.3 循环编码方法

本文给出一种特定的循环编码方法(cycle-encoding)。循环编码方法实际上是一种空间编码方法, 像素的灰阶值用码字中的亮区域来表示, 从而将灰阶图像编码成一幅适合光学处理的二值图像:

设数字图像 I 的灰阶级次为 L , 其中灰阶值为 i ($0 \leq i \leq L-1$) 的像素点 g 可以用编码长度为 $2L-1$ 的循环编码方法 $[b_{L+L-2} \ b_{L+L-3} \ \cdots \ b_1 \ b_0]$ 来表示, 其中从第 i 位到第 $i+L-1$ 位为 1, 其余的码位上都是 0, 即 $b_i = \cdots = b_{i+L-1} = 1, b_j = 0 (j \neq i)$ 。

例如, 灰阶级次为 8 的图像中灰度值为 0 和 6 的像素点的循环编码长度为 $2 \times 8 - 1 = 15$, 编码表示分别为 $[000000011111111]$ 和 $[011111111000000]$ 。编码方法中的 “0” 和 “1” 表示光线通过调制模板时, 分别为 “断” 和 “通” 状态。由循环编码方法的特性, 可以得到如下推论:

设灰阶级次为 L 的像素点 x 和 y 分别采用循环编码方法表示, 得到编码向量 x_e 和 y_e , 则它们之间的按位相乘和叠加运算满足如下关系:

$$[x_e] \times [y_e]^T = \begin{cases} L - |x - y|, & |x - y| \leq L \\ 0, & |x - y| \geq L \end{cases} \quad (7)$$

从上式, 可以看到采用循环编码表示方法, 不同取值的灰阶像素点之间的按位相乘和叠加运算满足绝对差度量关系, 实际上按位相乘和叠加运算就是(6)式中相关运算。式(7)中用 $L - |x - y|$ 来代替 $|x - y|$, 相当于将绝对值进行关于值 L 的求补运算, 并不改变匹配的实质。因此当两个像素点相同时, 输出值不是 0, 而为 0 的补值 L 。

3 灰阶图像匹配处理

3.1 相关匹配处理

从(2)式和(7)式可以看到, 将待处理的灰阶图像采用循环编码表示, 则利用光学相关即可以方便地实现基于绝对差度量的灰阶图像匹配识别。

设灰阶图像 X 和灰阶模板 R 分别采用循环编码方法表示, 得到编码图像 X_e 和 R_e , 则 X 和 R 之间基于绝对差度量的灰阶图像匹配识别操作可以表示如下:

$$X \Delta R = (X_e \star R_e) \cap M_d \tag{8}$$

其中 Δ 表示基于绝对差度量的灰阶图像匹配识别操作, M_d 为取决于编码格式的解码模板。

图 2 中给出了一个基于绝对差度量的灰阶图像匹配识别操作的例子。图 2(a)和(b)分别给出输入的灰阶图像 X 和灰阶模板 R , 其中的灰阶层次为 6(0~5)。图 2(c)给出了对具有 6 层次的灰阶图像点的循环编码方法。图 2(d)和(e)分别表示基于循环编码后得到的图像 X_e 和 R_e 。图 2(f)为解码模板 M_d 。图 2(g)给出了匹配识别结果 $(X_e \star R_e) \cap M_d$ 。在一般情况下, 解码处理过程 M_d 是不需要的, 因为在匹配图像中只在完全匹配的地方出现最高相关峰, 标志着匹配的位置。因此将(8)式简化为:

0	1	3	4	5
3	4	2	0	2
1	5	2	3	1
3	2	4	4	0
3	5	1	2	4

4	2	0
5	2	3
2	4	4

00000111111	00001111110	00011111100	00111111000	01111110000	11111100000	cycle code
0	1	2	3	4	5	gray-scale value

00000111111	00001111110	00111111000	01111110000	11111100000
00111111000	01111110000	00011111100	00000111111	00011111100
00001111110	11111100000	00011111100	00111111000	00001111110
00111111000	00011111100	01111110000	01111110000	00000111111
00111111000	11111100000	00001111110	00011111100	01111110000

01111110000	00011111100	00000111111
11111100000	00011111100	00111111000
00011111100	01111110000	01111110000

00000100000	00000100000	00000100000	00000100000	00000100000
00000100000	00000100000	00000100000	00000100000	00000100000
00000100000	00000100000	00000100000	00000100000	00000100000
00000100000	00000100000	00000100000	00000100000	00000100000
00000100000	00000100000	00000100000	00000100000	00000100000

	17	18	18	
	15	0	16	
	16	18	13	

Fig. 2 Example of image matching based on absolute difference measurement: (a) Input gray-scale image X ; (b) Gray-scale reference image R ; (c) Cycle-encoding method; (d) The coded image X_e after cycle-encoding to image X ; (e) The coded image R_e after cycle-encoding to image R ; (f) Decoding mask M_d ; (g) The result of $(X_e \star R_e) \cap M_d$

$$X \Delta R = X_e \star R_e \tag{9}$$

匹配输出结果 $X \Delta R$ 表示了 R 相应于 X 的相对位置上匹配性，对于相似性强的位置，得到的匹配值就较大，反之亦然。对匹配结果 $X \Delta R$ 进行阈值处理，就可以反映图像中具有不同匹配程度的特征点位置分布情况，表示如下：

$$(X \Delta R)|_T = \{(m, n) | (X \Delta R) \geq T\} \tag{10}$$

显然， $(X \Delta R)|_{T=P \times Q \times L}$ 反映了图像 R 和 X 的完全匹配情况。

对于灰阶图像来说，匹配输出结果受到匹配像素数目和像素匹配灰度值两个变量的影响，那么当图像和模板之间图像亮度的动态范围有很小程度的变化，即受到噪声等畸变干扰时，图像和模板之间相应像素点的灰度值可能会有小的差异，采用 $T < P \times Q \times L$ 来改善系统的抗畸变能力。假定灰阶参考图像 R 有 $P \times Q$ 个像素，并且有 L 个灰阶层次，那么编码图像 R_e 有 $P \times Q \times (2L - 1)$ 个像素，其中 $P \times Q \times L$ 个像素具有值 1。当对(10)式中的阈值选定合适的值时，就可以获得具有不同相似程度的匹配情况，从而可以获得较好的抗噪声、旋转和尺度等畸变干扰的性能。若 $T < P \times Q \times L$ 时，阈值处理 $(X \Delta R)|_T$ 可以对具有 $e\%$ 差异的图像进行匹配处理，其中

$$e = \frac{T}{P \times Q \times L} \times 100\% \tag{11}$$

3.2 基于绝对差度量的联合变换相关器

图 3 给出实验系统的光路结构图。图像通过傅里叶透镜 FTL_1 ，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 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_2 ，在输出面 P_2 上得到的相关函数就是最后的联合变换相关器的结果。

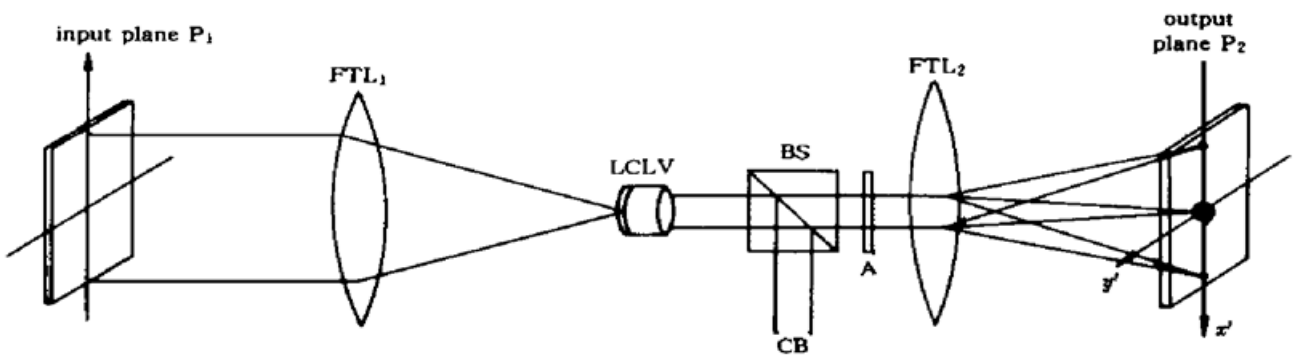


Fig. 3 JTC processor that uses a liquid crystal light valve in the Fourier plane. FTL: Fourier transform lens; LCLV: liquid crystal light valve; CB: collimated beam; BS: beam splitter

本文对输入图像 X 和参考图像 R 进行循环编码处理，得到编码图像 X_e 和 R_e 。在联合变换相关器的输入面上的光强分布函数为

$$g_i(x, y) = X_e(x, y - a) + R_e(x, y + a) \tag{12}$$

相关的联合傅里叶变换频谱为

$$G_i(f_x, f_y) = \mathcal{F}X_e \exp(-j2\pi a f_y) + \mathcal{F}R_e \exp(j2\pi a f_y) \tag{13}$$

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

$$|G_i(f_x, f_y)|^2 = G_i(f_x, f_y) G_i^*(f_x, f_y) =$$

$$|\mathcal{F}X_c|^2 + |\mathcal{F}R_c|^2 + \mathcal{F}X_c\mathcal{F}R_c^* \exp(-j4\pi a f_y) + \mathcal{F}R_c\mathcal{F}X_c^* \exp(j4\pi a f_y) \tag{14}$$

因此联合变换相关器的输出相关信号为

$$g_0(x, y) = X_c \star X_c + R_c \star R_c + (X_c \star R_c)\delta(x, y - 2a) + (R_c \star X_c)\delta(x, y + 2a) \tag{15}$$

式(15)式中, 可以看到在坐标(0, 2a)和(0, -2a)上相关结果为(Xc★Rc)。用正确的阈值来对相关结果进行二值化, 就可以从联合变换相关器的结果中得到灰阶图像匹配识别的结果。

本文采用计算机模拟的方法来测试采用绝对差测量的联合变换相关器的模式识别能力, 运算基于512×512的快速二维傅里叶变换。为了分析新方法的识别能力和抗畸变能力, 进行了对比实验。图4中分别给出三组灰阶人脸图像; 图4(a)中的两幅人脸是一样的, 尺寸为64×64, 具有8个灰阶; 图4(b)将图4(a)中的参照图像加入了25%的高斯噪声; 图4(c)中的两幅人脸是不同的。



Fig. 4 Three groups of human-faces for testing: (a) The input image is the same as the conference image; (b) The conference image is the input image adding 25% Gauss noise; (c) The input image is different from the conference image

对这三组人脸图像进行匹配识别实验。

首先将三组图像进行循环编码处理, 然后作为联合变换相关器的输入图像, 得到图5(a)、(c)和(e)。其联合变换相关器的模拟结果分别在图5(b)、(d)和(f)中给出(为了能够清楚地观察结果, 将联合变换相关器的主瓣消去)。从中可以看到相同图像的自相关峰比不同图像之间的互相关峰要强得多, 互相关峰实际上并不明显。当受到噪声干扰后, 相关峰有一定程度的下降, 但是锐度和强度仍然很大, 只需降低后续的阈值分割操作的阈值, 就不会影响判断决策的正确性。

与图1中所给出的例子相对比, 可以清楚地看到采用绝对差度量可有效地在联合变换相关器上实现灰阶图像匹配识别处理。

结 论 本文提出了绝对差度量的概念用于灰阶目标准确识别的联合变换相关器。利用循环编码方法, 在联合变换相关器的一步操作内实现灰阶图像的绝对差度量处理, 可以有效地提高常用联合变换相关器的模式识别能力, 并且只需检测一个相关结果。本方法需要对输入图像作预处理编码, 可以通过计算机硬件很容易快速实现。但是作为编码的结果, 图像的处理区域变大了, 因此所需光学系统的空量也增加了。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。在畸变干扰情况下, 降低阈值可以提高系统的抗畸变能力。

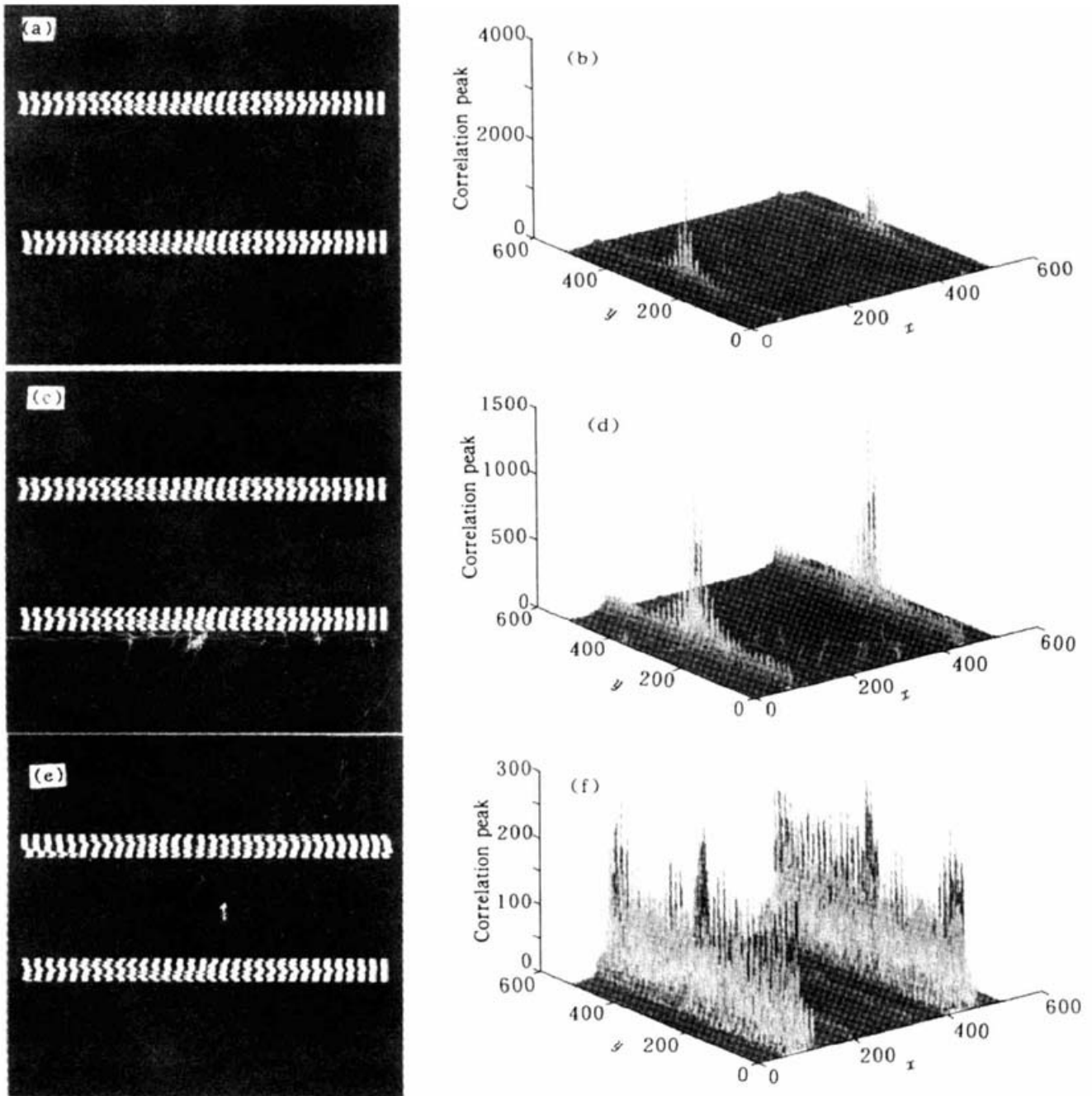


Fig. 5 (a), (c) and (e) are the encoding results of Fig. 4(a), Fig. 4(b) and Fig. 4(c); (b), (d) and (f) are the corresponding JTC results of (a), (c) and (e)

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. *Introduction of Fourier Optics*. New York: McGraw-Hill, 1968
- [2] Yu F T S, Lu X J. A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52** (1) : 10~ 16
- [3] Javidi B, Odeh S F. Multiple object identification by bipolar joint transform correlation. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(4) : 295~ 300
- [4] Javidi B. Nonlinear joint transform spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12) : 2358~ 2367
- [5] Fielding K H, Horner J L. 1-f binary joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(9) : 1081~ 1087

- [6] Feng D, Zhao H, Xia S. Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3, 4, 15) : 260~ 264
- [7] Tang Q, Javidi B. Chirp-encoded joint transform correlators with a single input plane. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2) : 227~ 230
- [8] Javidi B, Horner J L, Walkup J F. Optical pattern recognition system for Calibration and security verification. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(6) : 1752~ 1756
- [9] Chen Z, Zhang Y, Mu G. Complementary-reference joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(32) : 7622~ 7626
- [10] Dickey F M, Romero L A. Normalization correlation for pattern recognitions. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(15) : 1186~ 1189
- [11] 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

Joint Transform Correlator for Optical Gray-Scale Image Matching

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 12 January 1998; revised 2 July 1998)

Abstract Absolute difference measurement (ADM) is introduced into joint transform correlator (JTC) for optical gray-scale image matching. Using a novel cycle encoding method, ADM 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 value of thresholding should be changed according to the different situation of noise disturbing so that it can improve the distortion-invariant ability of the JTC system. The simulation results are given.

Key words absolute difference measurement, joint transform correlator, cycle-encoding method, optical pattern recognition, gray-scale image.