

一个新的实时光学图像识别系统

洛阳光电技术研究所 石友成

摘 要

本文描述了一个新的实时光学图像识别系统。该系统主要是激光二极管、多换能器声光器件、电荷耦合器件以及光学透镜组成的。这个系统既不需要相干光输入图像,也不需要基准图像的付氏变换全息图。不同波段成像系统输出的实时视频图像信号和事先记录的或实时截获的基准图像均可施加给本系统。文中给出了理论分析以说明工作原理。实验结果证实这种非相干光相关器具有完成实时图像识别的能力。事实上,某些图像识别任务碰到的图像位移、尺寸、旋转不变性问题,本系统可容易地予以解决。

一、引 言

随着工业生产和国防科学技术的现代化,图像识别技术的应用越来越广泛。例如战略、战术导弹的图像制导,空中、地面、海上目标的图像跟踪,图像引信,安全警卫系统以及机器人视觉智能等等都迫切需要这项高级技术。

最近二十多年来,人们围绕图像识别问题作了大量的卓有成效的研究工作,并且得到了许多实际应用。不过,多数工作都是利用电子计算机或微处理机进行图像识别的。然而,还有许多场合,单纯利用电子计算机进行图像识别往往不能满足实际要求,原因是实时识别能力差,或者是体积庞大不能为航空或宇航部门所接受。

事实上,光学图像识别,特别是光学图像相关识别技术也相应地得到了极为迅速的发展。由于光学信息处理的快速性,这种图像识别技术具有解决复杂图像快速实时识别问题的能力,并且在体积方面也优越得多。

下面将扼要地介绍一下光学图像相关识别技术的一般情况,以说明该项研究的目的和必要性。

我们知道,当输入图像 $f(x, y)$ 和基准图像 $h(x, y)$ 均为实函数时,它们的相关函数可表示为

$$C(u, v) = \iint f(x, y) h(x-u, y-v) dx dy \quad (1)$$

根据匹配滤波理论可知:在可加的、平稳的、白噪声存在的情况下,如果 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 一致,由式(1)可得到最佳的相关峰值与旁瓣噪音比。相关峰值与旁瓣噪音比可定义为

1986年7月8日收到。

$$S/N = \frac{E\{C(0, 0)\}}{\sqrt{\text{Var}\{C(u, v)\}|_{u, v \gg 0}}} \quad (2)$$

这里 $E\{C(0, 0)\}$ 表示相关峰值的数学期望; $\text{Var}\{C(u, v)\}|_{u, v \gg 0}$ 是相关函数旁瓣噪音的数学方差。我们正是基于匹配滤波理论进行光学图像相关识别的。(当然, 光学图像识别还有许多不同的理论依据。例如 Hopfield 模型就是刚兴起的识别理论, 可用光学的方法加以实现^[11, 12])。只要 S/N 大于一定的阈值, 我们便可以认为 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 相一致或 $f(x, y)$ 包括有 $h(x, y)$ 。否则, 就认为两个图像函数是不相关的或者说 $f(x, y)$ 不包括要识别的目标 $h(x, y)$ 。

就光学图像识别而言、相干光图像相关识别是研究得较早、较多的一种^[1~3]。众所周知, 这种相关识别所需要的相关运算是在空间频率域完成的。光学相关器首先对式(1)完成付氏变换

$$F\{C\} = F\{f\}F\{h\}^* \quad (3)$$

通过两个付氏变换的相乘, 得到相关函数的付氏变换 $F\{C\}$ 。此处 * 号表示复数共轭。而后再对 $F\{C\}$ 进行一次付氏反变换, 便可最后得到相关函数 $C(u, v)$ 。式(3)指出, 为了实现空间频率域的相关函数运算, 要求系统内始终有一个 $F\{f\}$ 存在。利用付氏透镜对图像函数 $f(x, y)$ 进行付氏变换是很容易的^[16]。但只有当 $f(x, y)$ 是相干光图像函数时才是可能的。因为实际工程中的图像函数多是非相干光的, 所以便有一个非相干光至相干光图像的转换问题。如果 $f(x, y)$ 是一个非时变函数, 实现其转换及付氏变换并不困难。然而, 如果 $f(x, y)$ 是时变的, 困难就很大。因而不得不围绕非相干光至相干光输入图像的实时转换问题进行大量的研究工作^[4, 6]。目前这个问题尚未得到满意的解决。此外, 式(3)还告诉我们, 系统内还应当有一个匹配滤波器模板, 其透过率与 $F\{h\}^*$ 成正比。这里除了同样存在着非相干光基准图像 $h(x, y)$ 转换成相干光的困难之外, 还增加一个记录复变函数 $F\{h\}^*$ 的困难。为此, 不得不利用全息技术。如果 $h(x, y)$ 是时变的, 或者是瞬时截获的, 这种实时付氏基准全息图的实现问题就会变得十分困难。

相干光图像相关识别在实际工程中所遇到的困难除了上述两点之外, 还有图像尺寸、位移和旋转不变性问题。尽管图像函数的付氏变换和梅林变换曾被用来解决图像的旋转不变性和尺寸不变性问题, 但是却不能使识别系统同时具有尺寸、位移、旋转三个不变特性^[8~9]。

相干光图像相关识别技术最近几年取得了不少有意义的进展^[6, 10]。在某些场合下已经得以应用。但总的说来, 上述几个实质性问题还有待进一步解决。

本文将介绍一个新的非相干光图像实时识别系统。在实际应用中它不会遇到相干光图像相关识别所遇到的那些困难。它将直接按照式(1)执行相关函数的积分运算。该系统既不需要相干光输入图像, 也不需要基准图像的付氏全息图作匹配滤波模板。非负的实函数 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$, 无论是时变的或时不变的, 均可参加相关识别运算。 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 所含像素的数目以及识别速度等于成像系统的像素个数和成像速度。这个系统的相关识别本领除了具有天然的位移不变性外, 可以较方便地获得对图像尺寸、旋转变化的自适应能力。

二、非相干光实时图像识别系统

图 1 是本文要描述的非相干光实时图像识别系统的结构示意图。它包括激光二极管 (LD)、具有线列换能器的声光器件 (AOD) 和电荷耦合器件 (CCD)。置于激光光源与声光器件之间的柱面透镜 L_x 、 L_y 是为了得到矩形截面的平面波光束。电荷耦合器件前面的柱面镜 L_u 、 L_v 将保证在 CCD 平面上形成一定尺寸的图像。成像系统输出的视频信号用以调制激光二极管。预先贮存的或实时截获的基准图像用来驱动声光器件。声光器件作为空间光调制器，同时还提供相关函数积分式 (1) 中的水平位移。垂直位移则由电荷耦合器件的时间延迟积分模式 (TDI) 来提供。成像系统每给出一场视频图像信号，电荷耦合器件便同时输出一场两维相关函数。

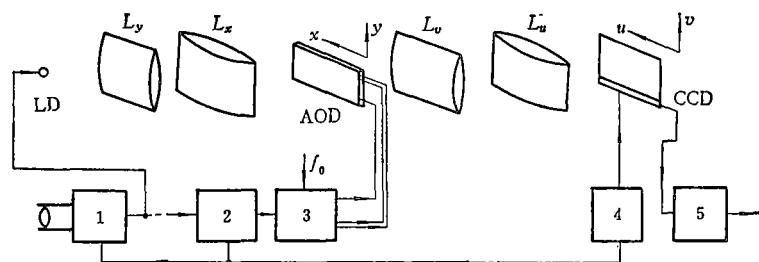


图 1 非相干光实时图像识别系统

1—成像系统；2—基准图象贮存；3—声光器件驱动电路；4—CCD 时钟及同步信号产生器；5—识别判决电路。

为了实现式 (1) 所示的相关函数积分，在 xy 平面上的声光媒质里，应当有一个二维的，受基准图像函数 $h(x, y)$ 调制的声波行波信号 $S(x, y, \tau)$

$$S(x, y, \tau) = \eta(x - v_a \tau, y) \exp \left[j 2 \pi f_0 \left(\tau - \frac{x}{v_a} \right) \right] \quad (4)$$

振幅 $\eta(\cdot)$ 与基准图像信号 $h(\cdot)$ 满足关系式

$$\eta^2(x - v_a \tau, y) = h(x - v_a \tau, y) \quad (5)$$

其中 v_a 是声波在声光器件媒质中的速度， f_0 是声光器件驱动信号的载波频率。根据声光器件的理论^[13~16]，来自激光二极管的入射波满足布拉格 (Bragg) 条件时，一级衍射波的振幅将正比于 $S(x, y, \tau)$ 。因为入射的激光光束的辐射能量受输入图像 $f(x, y)$ 的行扫描视频信号 $f(\tau, iT)$ 的调制， T 表示行扫描周期， i 表示第 i 行视频信号，如记照射声光器件的入射波的振幅为 $\varphi(\tau, iT)$ ，则

$$\varphi^2(\tau, iT) = f(\tau, iT) \quad (6)$$

这样，刚要离开声光器件 xy 平面上的二级衍射场的振幅可写成

$$\varphi(\tau, iT) S(x, y, \tau) = \varphi(\tau, iT) \eta(x - v_a \tau, y) \exp \left[j 2 \pi f_0 \left(\tau - \frac{x}{v_a} \right) \right] \quad (7)$$

在声光器件之后，由于 L_u 、 L_v 柱面透镜的成像作用，落在 CCD 光敏面上衍射场的振幅变为

$$\varphi(\tau, iT) \eta(a\tau - u, -v) \exp \left[j 2 \pi f_0 \left(\tau - \frac{u}{a} \right) \right] \quad (8)$$

其中 $u = xM_x$, $v = yM_y$, $a = v_a M_x$. M_x , M_y 分别是 xy 与 uv 两平面物像之间在两个轴向上的放大系数。电荷耦合器件是光子探测器, 也就是说它瞬时探测到的信号电荷是与落到光敏面上衍射场的光子能量成正比的。即正比于

$$\left| \left(\varphi(\tau, iT) h(a\tau - u, -v) \exp \left[j2\pi f_0 \left(\tau - \frac{u}{a} \right) \right] \right) \right|^2$$

由于电荷耦合器件在一行视频信号调制激光二极管期间一直在进行光子探测, 所以当第 i 行视频信号结束时 (持续时间为 τ_i), 电荷耦合器件势阱内积累的信号电荷将正比于

$$\begin{aligned} & \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left| \varphi(\tau, iT) \eta(a\tau - u, -v) \exp \left[j2\pi f_0 \left(\tau - \frac{u}{a} \right) \right] \right|^2 d\tau \\ & = \int_0^{\tau_i} f(\tau, iT) h(a\tau - u, -v) d\tau \end{aligned} \quad (9)$$

$\tau_2 - \tau_1 = \tau_i$ 。我们曾说过, 电荷耦合器件是工作在 TDI 模式的。TDI 模式的特点是: 每行视频信号 $f(\tau, iT)$ 结束后, 电荷耦合器件要将这一行光学积分期间所探测到的两维分布的信号电荷在 $-v$ 方向上移动一个像素的距离 Δ , 并且与下一行视频信号期间所探测到的信号电荷相叠加。这样, 经过 M 行视频信号, 电荷耦合器件探测到的信号电荷将为

$$\begin{aligned} C(u, v) &= \int_0^{\tau_i} f(\tau, T) h(a\tau - u, \Delta - v) d\tau \\ &+ \int_0^{\tau_i} f(\tau, 2T) h(a\tau - u, 2\Delta - v) d\tau + \dots \\ &+ \int_0^{\tau_i} f(\tau, iT) h(a\tau - u, i\Delta - v) d\tau + \dots \\ &+ \int_0^{\tau_i} f(\tau, MT) h(a\tau - u, M\Delta - v) d\tau \\ &= \sum_{i=1}^M \int_0^{\tau_i} f(\tau, iT) h(a\tau - u, i\Delta - v) d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

这正是我们需要的相关函数。令 $iT = t$, 引入电荷耦合器件在 v 向上电荷位移的速度 $V_s = \Delta/T$, $i\Delta = V_s t$, 式 (10) 可改写为

$$C(u, v) = \int_T^{MT} \int_0^{\tau_i} f(\tau, t) h(a\tau - u, V_s t - v) d\tau dt \quad (11)$$

由于视频信号 $f(\tau, t)$ 是两维空间输入图像函数 $f(x, y)$ 引入扫描速度后的形式, 所以上式不难转化成它的标准形式 (1)。

至此, 我们可以看出, 本系统用时间域积分实现了空间图像函数的相关积分, 从而赋予系统以实时识别特性。一旦空间图像的视频信号 $f(\tau, t)$ 输入完毕, 相关函数的计算即告完成, 并且由电荷耦合器件输出给识别判决电路。因而, 系统的识别速度便自然地决定于成像系统的成像速度。

由式 (10) 或 (11) 还可以看出, 一般的图像信号, 无论是预先贮存的或实时截获的, 均可作为基准图像信号参与本系统的相关运算, 无须转换成付氏全息模板的形式。这较相干光图像相关识别的情况要便利得多。

按照式 (11) 进行相关运算, 一般地说, 得到的是全尺寸的二维相关函数。如果 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 包括的像素分别为 $M \times N$ 和 $M' \times N'$, 全尺寸的相关函数 $C(u, v)$ 应当包括 $(M + M' - 1) \times (N + N' - 1)$ 个像素。事实上相关函数的边缘

部份往往是多余的。所以一般都根据需要采取一定的截短措施来精简相关函数的像素个数, 只留下相关函数的主要部份。如果 $M' \leq M/2$, $N' \leq N/2$, 相关函数保持有 $M \times N$ 个像素便足够了。

图 2 表示输入图像与基准图像函数馈入系统的时间关系。图 2(a) 是一种馈入方式。基准图像函数全部进入声光器件的有效孔径之后, 输入视频信号 $f(\tau, iT)$ 即开始调制激光二极管。按照这样的馈电关系, 且声光器件的有效孔径 L_a 满足关系式

$$L_a \geq (\tau_s + \tau_r)v_a \tag{12}$$

将会得到全尺寸的相关函数。 τ_r 是基准图像 N' 个像素占据的持续时间。

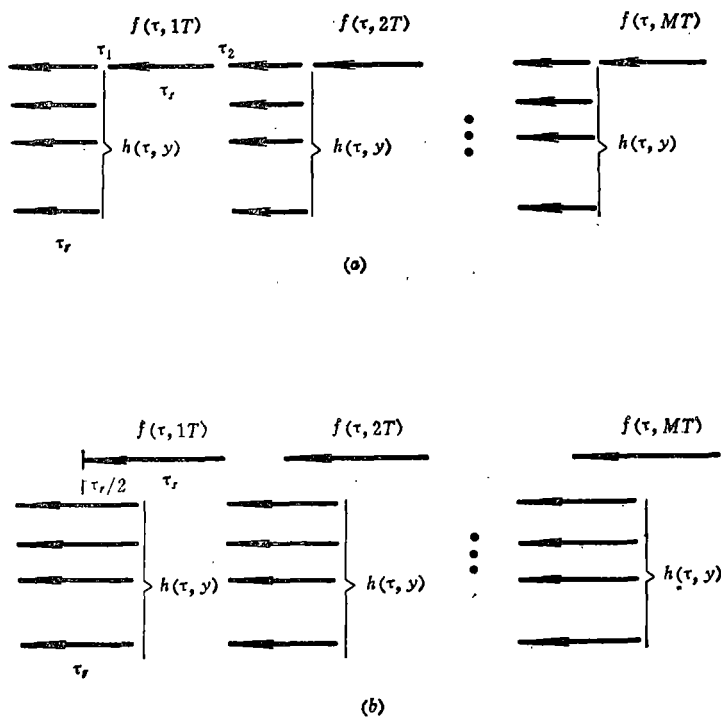


图 2 图像函数馈入系统的时间关系

截短的情况决定于式 (9) 中 $f(\tau, iT)$ 开始调制激光二极管或电荷耦合器件开始光学积分探测的时刻 τ_1 。我们推荐图 2(b) 的馈电关系, 一旦基准图像的一半进入声光器件的有效孔径, 就开始馈入 $f(\tau, iT)$ 。如果

$$L_a = \tau_s v_a \tag{13}$$

则可保证相关函数在水平方向上只有 N 个像素。在垂直方向上的截短情况也可采取相应的措施加以实现。

为了正确执行式 (11) 所表达的相关运算, 应当保证输入图像函数与基准图像函数空间尺寸的同—性。这是靠调整 M_x 、 M_y 、 V_a 以及成像系统的视频扫描速度 V_x 、 V_y 等参数来保证的。任何一个参数的失调都会破坏相关运算的正确进行。然而, 利用图像函数尺寸同一性的关系, 人为地控制上述有关参数, 系统却可以获得十分重要的对图像尺寸变化的自适应能力。

顺便说明, 由于 $f(x, y)$ 及 $h(x, y)$ 都是非负的实函数, 它们总会包含一定的直流分量。直流分量参加相关运算, 将使需要的相关函数叠加在直流分量导致的塔形基座上。这将降低相关函数的峰值与旁瓣噪音比 S/N 。在某些情况下, 为了保证得到足够的 S/N , $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 在参加相关运算前经过实时预处理常常是必要的。

三、实验结果

我们已经看到, 本文介绍的非相干光图像识别系统具有快速实时图像识别的能力。因为识别原理来源于匹配滤波理论, 系统给出的是最佳的相关峰值与旁瓣噪音比。这样就使识别判决更加可靠。

实验结果表明系统可以实时识别“点”以外的任何图像目标。例如各种军事设施, 飞机, 军舰, 车辆以及复杂的地形地物。系统还可以识别文字资料、人物、天空星群等等。上述各种图像可以是可见光的, 红外的, 或微波波段的。只要经过相应波段的成像系统转换成视频信号, 均可为该识别系统所接受。

在实验过程中, 我们对图 1 所示的原理结构作了一些改动, 原因是线列换能器的声光器件价格比较昂贵。改动以后的结构, 只采用具有单个换能器的声光器件, 用以提供相关积分所需要的水平位移。不过基准图像仍需以二维空间的形式置于系统之中。为此, 可采用图像胶片, 也可以采用磁光器件以贮存实时截获的基准图像。本实验采用的是图像胶片。

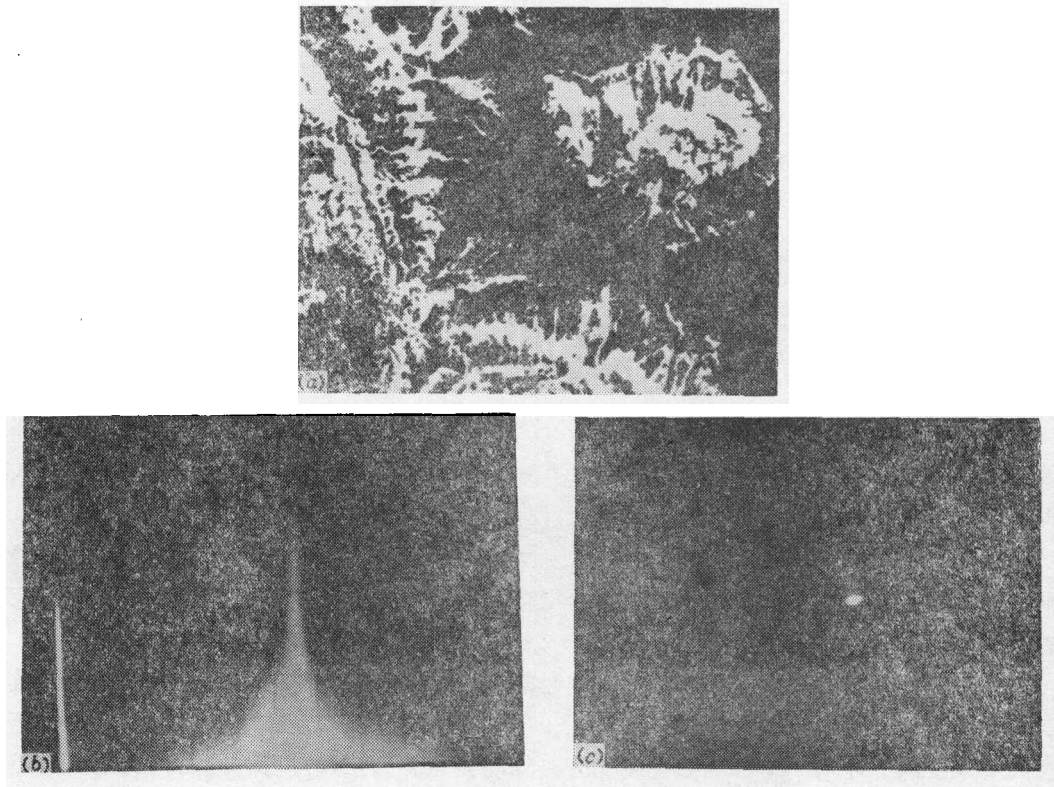


图 3 实时图像识别系统实验结果
(a) 基准图像; (b) 相关函数的示波器显示; (c) 二维相关函数。

图 3 是对复杂地面图像的识别结果。基准图像示于图 3 (a), 上面有海岸线和岛屿。这是一幅雷达图像。实验时成像系统对准包括基准图像的景物。图 3 (b) 是电荷耦合器件输出的相关函数的示波器显示结果。系统输出的二维相关函数示于图 3 (c)。图 3 (b) 实际上是图 3 (c) 的截面图。由于阈值调整的过高, 在拍摄二维相关函数时, 旁瓣未能在图 3 (c) 中显示出来, 只留下了相关函数的峰值部份。尖锐的相关函数峰值表明系统具有可靠的识别能力。如果移动成像系统, 使输入图像不包含基准图像部份, 电荷耦合器件便无相关峰值输出。

在实验过程中, 我们注意到: 输入图像的任何位移, 都会导致相关函数的相应的位移。这说明, 正如期望的那样, 系统具有内在的位移不变性。这正是图像制导和跟踪技术所需要的。

在上述实验中, 成像系统的成像速度及系统的识别速度均为每秒 60 场。每场输入图像及基准图像均包括 512×380 个像素。这时候, 该识别系统实际上具有的模拟量运算能力为: 乘法每秒 1232 亿次及加法每秒 860 万次。

参 考 文 献

- [1] Vander Lugt, A., Signal detection by complex spatial filtering, IEEE Trans. Vol. IT-10, No. 2 (1964).
- [2] Vander Lugt, A., Coherent optical processing, IEEE Proc., Vol. 62, No. 10(1974).
- [3] Psaltis, D., Paek, E. G. and Venkatesh, S., Optical image correlator with a binary spatial light modulator, Opt. Eng., Vol. 23, No. 6 (1984).
- [4] Shi, Y., Psaltis, D., Marrakchi, A. and Tanguay, A. R., Jr., Photorefractive incoherent-to-coherent optical converter, Applied optics, Vol. 22, No. 23(1983).
- [5] Duthie, J. G. and Uptonieks, J. Compact real-time coherent optical correlator, Opt. Eng., Vol. 23, No. 1(1984).
- [6] Casacent, D. and Psaltis, D., New optical transforms for pattern recognition, IEEE Proc., Vol. 65, No. 1 (1977).
- [7] Casacent, D. and Psaltis, D., Scale invariant optical transform, Opt. Eng., Vol. 15, No. 3 (1976).
- [8] Hsu, Y. N., Arsenault, A. and April, G., Rotation invariant digital pattern recognition using circular harmonic expansion, Applied Optics, Vol. 21, No. 22 (1982).
- [9] Yuzan, Y., Hsu, Y. N. and Arsenault, A., Optimum circular symmetrical filters and their uses in optical pattern recognition, Optica Acta, Vol. 29, No. 5 (1982)
- [10] Gregory, D. A. and Liu, H. K., Large-memory real-time multichannel multiplexed pattern recognition, Applied Optics, Vol. 23, No. 24(1984)
- [11] Hopfield, J., Brain, computer, and memory, Engineering and science, Sept., (1982).
- [12] Psaltis, D. and Farhat, N., Optical information processing based on an associative memory model of neural nets with thresholding and feedback, Optical letters, Vol. 10, Jan. (1985).
- [13] Korpel, A., Acousto-optics, A review of fundamentals, IEEE Proc., Vol. 69, No. 1 (1981).
- [14] Young, E. H., Jr. and Shi, K. Y., Design considerations for acousto-optic devices, IEEE Proc., Vol. 69, No. 1 (1981).
- [15] Rhodes, W. T., Acousto-optic signal processing, Convolution and correlation, IEEE Proc., Vol. 69, No. 1 (1981).
- [16] 黄婉云, 傅立叶光学教程, 北京师范大学出版社出版, (1985)。

**A NEW OPTICAL SYSTEM
FOR REAL-TIME PATTERN RECOGNITION**

Shi Youcheng

(Luoyang optoelectronics Research Institute)

Abstract

A new optical system for real-time pattern recognition is presented, which mainly consists of a laser diode, an acoustooptic device with multi-transducer, a charge-coupled device and optical lenses. Neither the coherent optical input image nor the Fourier transform hologram of the reference image is required by this system. Real-time video signals from imaging system operating in different spectrum and the reference images either pre-recorded or acquired in real-time can be applied to the present system. Theoretical analysis is given to describe the system operation. Experimental results have confirmed that this incoherent optical correlator system possesses the capability of performing real-time pattern recognition. In fact, the image shift, scale, rotation invariance problems encountered in some pattern recognition tasks can easily be solved in this system.