

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0279-05

# 高准确度实时指纹识别系统

陈怀新<sup>1</sup> 陈晓伟<sup>1</sup> 陈祯培<sup>1</sup> 洪汝桐<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系 成都 610064; <sup>2</sup> 西南技术物理研究所 成都 610041)

**摘要** 利用二值化联合变换相关技术成功地设计了一个单空间光调制器、单 CCD 的光电混合实时指纹识别系统。通过对空间光调制器在傅氏谱平面的灰度动态范围进行调节,控制了通过整个系统的光能量,使得系统能够实时运行。利用离散余弦变换算法对联合变换功率谱进行数字处理,增强傅里叶面的互相关项,消除自相关项,提高了系统的识别能力。采用一种新的双参数判别方法对相关信号进行判别,提高了判别的准确度。实际测试结果表明,该识别系统的错误拒绝率为 0.47%,错误接受率为 0。

**关键词** 指纹识别, 二值化联合变换相关器, 傅里叶面处理

中图分类号 O 436 文献标识码 A

## Real-time Fingerprint Identification System with High Discriminability

CHEN Huai-xin<sup>1</sup> CHEN Xiao-wei<sup>1</sup> CHEN Zhen-pei<sup>1</sup> HONG Ru-tong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Opto-electrical Department, Sichuan University, Chengdu 610064)  
(<sup>2</sup> Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

**Abstract** A real-time fingerprint identification system using binary joint transform correlator with a single space light modulator and a single CCD has been developed successfully. A discrete cosine transform algorithm was used to process the joint power spectrum in order to enhance the cross-correlator term and eliminate the auto-correlator term in the joint power spectrum and improve the discriminability of the system. The light energy passing through the system was controlled by adjusting the gray-value range of the space light modulator at Fourier plane, as a result the system could execute real-time fingerprint identification. A new two-parameter decision method was used to decide the correlator signal, and the deciding veracity was improved. Real-time tests yielded a false rejection rate of 0.47% and a false acceptance rate of zero.

**Key words** fingerprint identification, binary joint transform correlator, Fourier plane processing

## 1 引言

数字处理的指纹识别系统主要是基于指纹最小特征<sup>[1]</sup>的识别,即找出指纹脊的末梢与分叉的位置与方向,然后再跟储存在参考库中的指纹特征进行比较。这类识别系统的错误接受率一般比较低,但其最大缺点是对获取指纹的质量要求很高。实际测试中,许多最小特征识别算法的错误拒绝率很高,能达到几个百分点。并且,有的人可能永远也不能被识别,因为他们的错误拒绝率几乎为百分之百<sup>[2]</sup>。

光学处理的指纹识别系统是利用光学相关器<sup>[2-5]</sup>(Vander Lugt 相关器或联合变换相关器)进行指纹比较。由于光学系统同时对整个指纹进行并行

处理,故光学处理的指纹识别依赖于指纹的整体特征而不是图像的质量,因而这种系统的错误拒绝率比较低。1998 年,加拿大的 Mytec 技术公司开发了第一个可投入商业应用的基于 Vander Lugt 相关器的指纹识别系统,通过优化滤波器设计和在相关输出面采用一种投影判别边界的判别方法,该系统能达到很高的识别准确度,错误拒绝率为 1%,错误接受率为 0.2%。本文利用二值化联合变换相关技术设计的实时指纹识别系统,通过在傅氏谱平面采用离散余弦变换技术处理联合功率谱,并在相关输出面采用双参数判别方法对相关信号进行判别,使系统具有很高的识别准确度。实际测试的结果表明,该系统的识别准确度要比加拿大 Mytec 技术公司开发的指纹识别系统的识别准确度高。

## 2 基于余弦变换的联合变换相关识别原理

联合变换相关器的原理如图 1 所示。

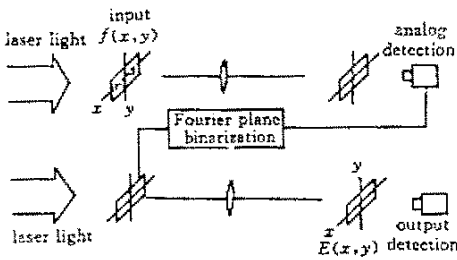


图 1 联合变换相关器原理图

Fig.1 Schematic diagram of joint transform correlator

用联合变换相关器实现指纹识别有两个步骤：第一步，将参考指纹同待识别指纹送到输入面上，用一个傅氏透镜对输入进行傅氏变换，在透镜的后焦面上用 CCD 记录联合变换功率谱。第二步，将得到的联合变换功率谱反馈输入到输入面上，再对其进行一次傅氏变换，用 CCD 记录相关输出，最后用计算机对相关结果进行分析。

输入面的参考指纹同待识别指纹分别用  $r(x - x_i, y - y_i)$  和  $s(x, y)$  表示。系统的输入为

$$t(x, y) = r(x - x_i, y - y_i) + s(x, y) \quad (1)$$

对其进行一次傅里叶变换得到的联合变换功率谱为

$$E(\alpha, \beta) = R^2(\alpha, \beta) + S^2(\alpha, \beta) + 2R(\alpha, \beta)S(\alpha, \beta) \times \cos[x_i\alpha + y_i\beta + \phi_s(\alpha, \beta) - \phi_r(\alpha, \beta)] \quad (2)$$

上式中  $(\alpha, \beta)$  为角空间坐标， $R(\alpha, \beta)$  和  $S(\alpha, \beta)$  分别为  $r(x, y)$  和  $s(x, y)$  的傅里叶变换振幅， $\phi_r(\alpha, \beta)$  和  $\phi_s(\alpha, \beta)$  分别为  $r(x, y)$  和  $s(x, y)$  的傅里叶变换位相。在经典的联合变换相关器中，直接对 (2) 式进行一次逆傅里叶变换便可得到最后的相关输出

$$C(x', y') = R_{11}(x', y') + R_{22}(x', y') + R_{12}(x' - x_i, y' - y_i) + R_{21}(x' + x_i, y' + y_i) \quad (3)$$

(2) 式中前两项分别产生  $r(x - x_i, y - y_i)$  和  $s(x, y)$  的自相关信号  $R_{11}(x', y')$  和  $R_{22}(x', y')$ ，此两项为相关输出面的零衍射级，后面一项(余弦调制项)产生  $r(x - x_i, y - y_i)$  和  $s(x, y)$  的互相关信号  $R_{12}(x' - x_i, y' - y_i)$  和  $R_{21}(x' + x_i, y' + y_i)$ 。由于自相关信号强，易湮没作为指纹识别的互相关信号。对此，我们提出基于余弦变换的联合变换相关识别，即采用余弦变换来处理联合变换功率谱，将联合变换功率谱中互相关余弦调制项检出来，以提高相关输

出。假定参考指纹  $r(x - x_i, y - y_i)$  同待识别指纹有相同的位相信息，这时 (2) 式变为

$$E(\alpha, \beta) = 2R^2(\alpha, \beta) + 2R^2(\alpha, \beta) \cos(x_i\alpha + y_i\beta) \quad (4)$$

若利用  $\cos(x_i\alpha)$  同 (4) 式进行卷积，则得到

$$E'(\alpha, \beta) = [2R^2(\alpha, \beta) + 2R^2(\alpha, \beta) \cos(x_i\alpha + y_i\beta)] * \cos(x_i\alpha) = \frac{2}{2\pi} E_{r_i} \cos(x_i\alpha + y_i\beta) \quad (5)$$

式中  $E_{r_i}$  为  $r(x - x_i, y - y_i)$  的能量  $E_{r_i} = \iint r_i^2 \backslash X(x, y) dx dy$ ，\* 表示卷积运算。从 (5) 式可以看出，这种处理技术实际上是利用一个带通滤波器滤除联合功率谱中的自相关项，只剩下参考指纹和待识别指纹间的互相关项。由于二元联合相关器比经典联合相关器有更强、更尖锐的相关峰输出<sup>[6]</sup>，故将 (5) 式处理的结果二值化(取零为门限)，就得到基于余弦变换处理的二值化联合变换功率谱。将 (5) 式离散化得

$$E'(u, j) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} E(u - i, j) \cos(\omega_i) \begin{cases} u = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (6)$$

上式中  $\omega = 2\pi/T$ ， $T$  为联合变换功率谱中余弦条纹在  $\alpha$  方向的周期， $N, M$  分别为离散化的联合功率谱在  $\alpha$  和  $\beta$  方向的尺寸。为提高处理速度，仅取  $\cos(x_i\alpha)$  的一个周期对联合功率谱进行处理。这时 (6) 式变为

$$E'(u, j) = \sum_{i=-T/2}^{T/2-1} E(u - i, j) \cos(\omega_i) \begin{cases} u = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (7)$$

最后，将处理的功率谱再作逆傅里叶变换，根据输出的相关峰值即可进行指纹的识别判断。

## 3 实时光电混合指纹识别系统

### 3.1 指纹的获取与指纹库建立

利用全反射原理的直角棱镜取指器的示意图如图 2 所示。

照明光线从直角棱镜的一直角面垂直入射，在棱镜的斜面发生全反射，最后从棱镜的另一直角面射出，用 CCD 便能摄取高对比度的指纹图。图 3

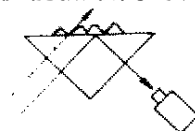


图 2 直角棱镜取指器原理图

Fig.2 Exaggerated view of fingerprint with prism

(a) 给出用该取指器得到的一个灰度指纹图。实际实验中仅使用了图 3(a) 中黑框中的那一部分指纹,其大小为  $176 \times 200$  像素。对于这部分指纹,经抽样、高通滤波及二值化处理,得到特征强的指纹图像。图 3(b) 为对应图 3(a) 处理后的指纹图。图 4 给出这个高通滤波器的冲击响应算子。

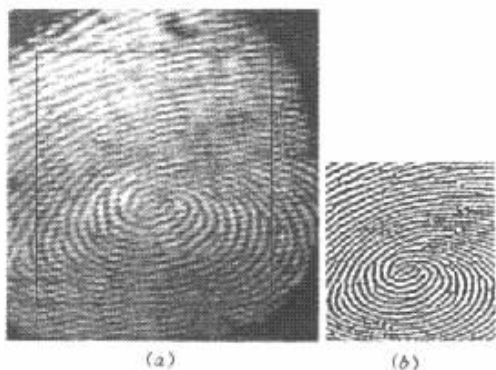


图 3 取指器得到的指纹图及微分二值化的指纹图

(a) 指纹灰度图 (b) 二值化指纹图

Fig.3 Fingerprint for (a) gray-level 's ;

(b) binarization-level 's

$$\begin{matrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{matrix}$$

图 4 高通滤波器的冲击响应算子

Fig.4 Pulse operator with high-pass filter

为提高识别的准确度,取指器对手指所放的位置及方位需加以限制。(1)在取指纹的方位上,理论和实验研究表明<sup>[7]</sup>输入图像在  $\pm 5^\circ$  内旋转,光学联合相关器仍有较高的相关输出,故所取指纹的方位限制于  $\pm 5^\circ$ 。(2)在取指纹的位置上,由于联合功率谱中余弦型调制条纹的周期随着输入指纹图像中参考指纹和待识别指纹的相对位置变化而变化,通过计算机模拟研究,余弦变换函数周期与联合功率谱中余弦型调制条纹的周期的相对差  $< 10\%$ ,两者的不匹配性对实验结果影响小,即不影响指纹识别结果的判断,故根据联合相关器输入图像的特点和取指器的设计,可限制指纹在水平方向的位置误差  $\leq \pm 20$  个像素,经过 1:1 抽样后在水平方向的位置误差  $\leq \pm 10$  个像素,而指纹在垂直方向的位置误差无特别限制,其位置误差  $\leq \pm 20$  个像素即可。

利用这个取指器建了一个指纹库。指纹库中共有 500 个指纹,其中用于识别系统自相关识别实验的有 200 个指纹(称相同指纹),它们取自 20 人,每

人取两个手指的指纹,每个指纹重复取 5 次;用于识别系统互相关鉴别实验的有 300 个指纹(称不相同指纹),它们取自 50 人,每人取六个手指的指纹,每个手指只取 1 次。

### 3.2 系统装置

实时指纹识别系统的装置图如图 5 所示,其核心部件为一 EPSON640  $\times$  480 液晶电视。该系统利用此液晶电视作为空间光调制器,用以输入指纹和联合变换功率谱。

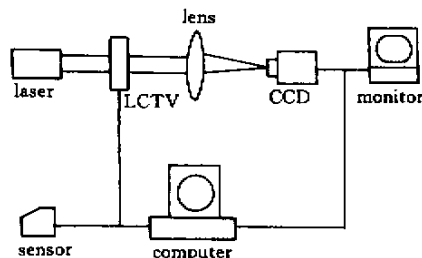


图 5 指纹识别系统实验装置图

Fig.5 Experimental setup for fingerprint

recognition system

通过调节偏振片,使液晶电视工作于振幅模式。傅氏变换透镜的焦距为 36 mm,光源为一半导体激光器。用一 JVC TK-S2100 CCD 摄像机摄取联合功率谱和最后的相关结果。

### 3.3 识别程序

我们用 C++ 语言开发了一个 Windows 应用程序来控制整个系统进行指纹识别,该程序运行于一台内存为 96M 的 P200 计算机上。

系统的一个典型输入如图 6 所示,图中指纹的大小为  $88 \times 100$  个像素,右边的指纹为用取指器实时获取的待识别指纹,左边的指纹为参考指纹,两指纹上下错开 25 个像素。

识别过程如下:



图 6 实验输入指纹

Fig.6 Input fingerprint in the experiment

利用取指器输入待识别指纹,并将其二值化—→将二值化后的待识别指纹和指纹库中的参考指纹输出到液晶电视上,利用傅氏透镜对其进行傅里叶变换—→利用 CCD 摄取联合功率谱,并将其二值化—→将二值化后的联合功率谱再输出到液晶电视上,利用傅氏透镜对其进行傅里叶变换—→用 CCD 摄取相关输出,用计算机对其进行分析,判断其中有无相关信号,如果无,即返回第二程序,如果有,即进入下一程序—→中断搜索程序,输出同待识别指纹相匹配的参考指纹的名字

由 3.1 已知取指器获取的指纹在水平方向的位置误差  $\leq \pm 10$  个像素,因此,待识别指纹同与其相匹配的参考指纹的最大中心距为 108 个像素,最小中心距为 68 个像素。利用 CCD 摄像机摄取的联合变换功率谱中余弦条纹在水平方向的周期介于 4.3 ~ 6.2 个像素之间。对获取的联合功率谱用离散余弦变换技术对其进行处理,离散余弦变换技术中所使用的余弦函数的周期为 5 个像素。

### 3.4 傅氏谱平面能量控制

实验中首先将激光器的输出调到一固定值,使得用 CCD 摄像机摄得的联合功率谱效果最好。图 7 给出了一个典型的联合功率谱及相应的二值化处理结果。

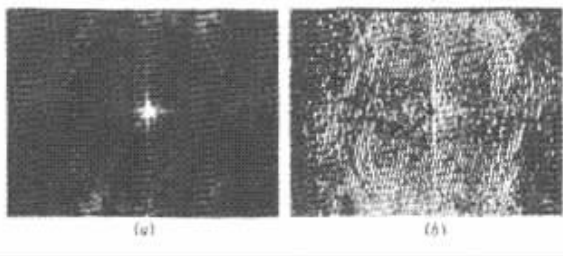


图 7 指纹的联合功率谱

(a) 灰度联合功率谱 (b) 二值化联合功率谱

Fig.7 Joint power spectrum of fingerprints for

(a) gray-level's ;(b) binarization-level's

对于二值化的联合功率谱,一般将它的最小值设为 0,最大值设为 255,以保证液晶电视有最大的对比度。图 8 给出了在固定激光器输出功率的情况下,系统的相关输出结果。

由于二值化联合功率谱透过光的能量比输入指纹透过光的能量要大得多,CCD 摄像机的动态范围有限,在固定激光器输出功率的情况下,CCD 在很

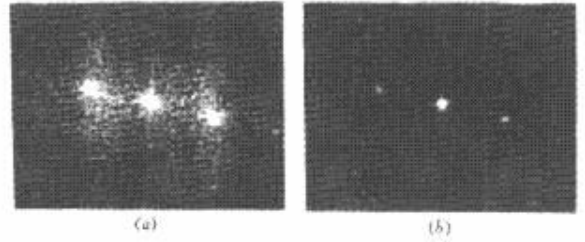


图 8 系统的相关输出结果,当二值化联合功率谱的最大值为:(a)255 灰度;(b)100 灰度

Fig.8 Correlation output of the system while the maximum scale of binarization joint power spectrum is (a) 255 level ;( b ) 100 level

多地方都饱和了,信号淹没在噪声中。这时候一个可行的方法就是调节激光器的输出功率来改善系统的输出。但由于激光器的能量不能实时调节,若要对激光的能量进行实时调节,就必须添加新的硬件,这样就必然增加系统的复杂度。由于实验中用的液晶电视有一定的灰度动态范围,当输入图像的灰度值不同时,相对应的透过激光的强度也不一样。因此,可以将二值化联合功率谱的最小值设为 0,而最大值设为 1 ~ 255 之间的一个值,通过改变二值化联合功率谱的灰度动态范围可以改变其对激光的透过率,这样就能在固定激光器输出功率的情况下,在系统的相关输出面得到一个好的输出结果。在实验中发现将二值化联合功率谱的最大值设为 100 时,系统输出的效果最好。

## 4 实验结果

### 4.1 双参数相关峰检测方法

对于每一个相关平面都计算出两个参数:相关峰的强度  $I_{peak}$  和相关峰的能量  $E_{peak}$ 。相关峰的强度是判断有无相关信号的重要依据,而利用相关峰的能量作为辅助的判据能给出更好的判断。这是因为在一般情况下,由噪声引起的伪相关峰的范围比较小,因而能量也比较小,而信号的范围比较大,能量也相应的大一些。实际中,我们首先找到相关输出区域的一个最大值,然后将这个点周围一个  $5 \times 5$  区域内的点值求和作为相关峰的能量。对于每一个指纹识别系统都给出三个门限值  $T_u, T_d$  和  $E_T$ , 分别代表相关峰的上门限、下门限和相关峰能量的门限值。若  $I_{peak} > T_u$ , 则认为有相关信号输出,若  $T_u > I_{peak} > T_d$ , 再比较  $E_{peak}$  和  $E_T$ , 若  $E_{peak} > E_T$ , 则认为有相

关信号输出,反之,则认为没有相关信号输出;若  $I_{\text{peak}} < T_d$ ,则认为没有相关信号输出。光电混合实验结果表明,该方法比仅利用相关峰的强度作参数进行判别的效果要好,双参数判别方法能提高系统的判别准确度。

#### 4.2 光电混合实验结果

利用指纹库中的指纹,我们设计了相同输入指

纹和不相同输入指纹的实验。对于相同指纹的实验共做了 640 组,每次都调取自同一个人的两个相同指纹进行比较。对于不相同指纹的比较,共做了 1800 组,每次调两个不相同的指纹进行比较。表 1 给出了利用本文设计的识别系统进行指纹识别的一些统计结果。可以看出,本文设计指纹识别系统的错误拒绝率仅为 0.47%,错误接受率为 0。

表 1 实验结果统计表

Table 1 Statistical results in the experiment

Method	$T_u$	$T_d$	$E_T$	Comparison		Wrong-refuse	Wrong-accept	Execution/ $f \cdot s^{-1}$
				Same	Difference			
Two-parameter decision	95	85	900	640	1800	3	0	5
Method	$T$			Comparison		Wrong-refuse	Wrong-accept	Execution/ $f \cdot s^{-1}$
				Same	Difference			
Correlation-peak and energy	90			640	1800	15	0	5

该光电混合指纹识别系统的误识别率要远小于基于数字处理的指纹识别系统的误识别率。同加拿大 Mytec 技术公司开发的第一个可投入商业应用的光学相关指纹识别系统相比,本文设计的系统有更好的识别准确度。表 1 中还给出了仅利用相关峰能量为依据进行判别时系统的判别结果。可以看出,采用双参数判别与仅采用相关峰为依据进行判别相比,系统的误识别率降低了 80%。

## 5 结 论

本文利用二值化联合变换相关技术设计构成了一个光电混合实时指纹识别系统,建立了一个有 500 个指纹的指纹库,并利用库中的指纹对系统的性能进行了检验。利用离散余弦变换技术对联合功率谱进行处理,以增强傅里叶面的互相关项,消除其中的自相关项,提高了系统的识别能力。在单 CCD 及单空间光调制器的二值化联合变换相关器上,通过改变二值化功率谱的灰度动态范围对通过空间光调制器的光能量进行控制,在不对激光器的能量进行实时调节的情况下,系统也能实时地进行指纹识

别。利用相关峰强度和能量这两个参数对相关输出面进行判别,提高了判别的准确度。光学实验统计结果表明,该系统具有很高的识别准确率。若将其小型化、紧凑化,有潜力应用到实际中去。

## 参 考 文 献

- 1 A. K. Jain, L. Hong, S. Pankatti *et al.*. An identity-authentication system using fingerprints. *Proc. IEEE*, 1997, **85**: 1365 ~ 1388
- 2 Alex Stoianov, Colin Soutar, Al Graham. High speed fingerprint verification using an optical correlator. *Proc. SPIE*, 1998, **3386**: 242 ~ 252
- 3 K. H. Fielding, J. L. Horner, C. K. Makekau. optical fingerprint identification by binary joint transform correlation. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(12): 1958 ~ 1961
- 4 T. J. Grycewicz, B. Javidi. Experimental comparison of binary joint transform correlators used for fingerprint identification. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(9): 2519 ~ 2525
- 5 T. J. Grycewicz. Fingerprint identification with joint transform correlator using multiple reference fingerprints. *Proc. SPIE*, 1995, **2490**: 249 ~ 254
- 6 B. Javidi. Nonlinear joint power spectrum based optical correlation. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2358 ~ 2367
- 7 M. G. Roe, K. L. Schehrer, R. Dobson *et al.*. Distortion invariant optical pattern recognition using composite binary filters. *Proc. SPIE*, 1993, **1959**: 203 ~ 213