

# 基于光电混合联合变换相关器的大规模人脸识别

郭锁利<sup>1</sup> 程攀攀<sup>1</sup> 刘延飞<sup>1</sup> 贾辉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>第二炮兵工程大学电工室, 陕西 西安 710025  
<sup>2</sup>国防科学技术大学技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 提出了一种大规模人脸识别的新方法。将人脸识别运算中耗时最大的基于图像的相关运算由光学联合变换相关器完成, 用电学的方法进行功率谱相减, 实现  $1:N$  识别。结合计算机模式识别精度高以及光学模式识别速度快的优点, 有效提高了识别的速度和精度。同时建立评价标准, 对该方法的识别性能进行评价。计算机仿真结果表明, 该方法能消除中央零级衍射, 锐化自相关峰, 能够实现  $1:N$  识别; 当识别阈值在  $[0.61, 0.62]$  之间时, 错误匹配率和错误不匹配率均为 0。

**关键词** 图像处理; 大规模人脸识别; 光电混合联合变换相关器;  $1:N$  识别

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s209004

## Large-Scale Face Recognition Using Optic-Electronic Hybrid Joint Transform Correlator

Guo Suoli<sup>1</sup> Cheng Panpan<sup>1</sup> Liu Yanfei<sup>1</sup> Jia Hui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic, Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China  
<sup>2</sup>Tech-Physical Research Center of Science College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A new method for large-scale face recognition is proposed. In order to realize  $1:N$  identification, optical joint transform correlator is used to complete related calculation which consuming the largest time in image recognition, and electrical method is used to subtract power spectrum. By combining the computer pattern's high accuracy with the optical pattern's high speed, the recognition's speed and accuracy are improved. An evaluation criteria is also established to evaluate the recognition performance of this method. The computer simulation results show that the method can eliminate the central zero-order diffraction and sharp auto-correlation peak. When the recognition threshold value is in  $[0.61, 0.62]$ , both false match rate and false non-match rate are 0.

**Key words** image processing; large-scale face recognition; joint transform correlator;  $1:N$  identification

**OCIS codes** 070.5010; 110.2960; 110.2970

## 1 引言

人脸识别技术是一种基于人的脸部特征信息进行身份认证的生物特征识别技术<sup>[1]</sup>。依据人脸数据库的大小可以分为中小规模人脸识别和大规模人脸识别。中小规模人脸识别主要是利用计算机技术将给定的目标图像和数据库中的模板图像依次进行  $1:1$  图像“匹配”来实现人脸识别。目前, 中小规模人脸识别技术已比较成熟, 但在大规模人脸识别方面存在较大困难。其技术瓶颈在于, 随着数据量增加, 电子计算技术的计算耗时成指数增加, 无法满足实

时识别的要求。因而基于电子计算技术的大规模人脸识别往往需要采用大型服务器、大规模图形工作站等大型计算机, 其成本高昂, 很难得到广泛应用。

光学模式识别具有并行处理、速度快的特点, 因而在大规模人脸识别方面呈现出了巨大的潜力。日本女子大学在光学模式识别方面做了很多的工作。1999 年用二元波带片(BZP)阵列做了 5 通道和 20 通道的基于联合变换相关器人脸识别系统, 其中 5 通道的识别系统能达到  $1.8 \text{ s/face}$  的识别速度<sup>[2,3]</sup>; 此外, 2001 年做的人脸识别系统紧凑平行联合变换

收稿日期: 2012-05-28; 收到修改稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61107005)资助课题。

作者简介: 郭锁利(1966—), 男, 副教授, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: chengpan432500@163.com

(COPaC),大小为 23 cm×15 cm×16.3 cm,重4 kg,具有 0.3%的错误不匹配率(FNMR)<sup>[4,5]</sup>;2003年她们在 COPaC I和II的基础上进行改进,采用多光源,开发出了多光源紧凑光学平行相关器(MLCOPaC),它具有 20 个通道的识别能力,速度达到 30 ms/face<sup>[6,7]</sup>;2005年报道的适用于人脸识别的快速人脸识别选项相关器(FARCO)可完成 1000 frame/s 的相关运算,同时具有 4 通道识别能力,每秒可完成 4000 次识别运算<sup>[8~10]</sup>;2009年报道的利用全息光存储技术,开发出了超高速 FARCO(S-FARCO),光学相关速度可以达到 370,000 frame/s<sup>[10~12]</sup>。国内在这方面的研究起步较晚,苏州大学信息光学工程研究所对计算机处理的光电混合联合变换相关进行了研究,利用计算机模式识别精度高以及处理灵活的优点,对电荷耦合器件(CCD)记录的联合变换功率谱进行拉普拉斯、卷积运算以及傅里叶逆变换,有效地抑制了相关输出的自相关零级衍射,增强了互相关峰值<sup>[13]</sup>;2003年清华大学建立了基于体全息存储的快速人脸识别系统,体积为 400 mm×400 mm×150 mm。采用角度分维复用方式在 Fe:BLiNbO<sub>3</sub>晶体的同一位置存储了 1000 幅经子波变换滤波预处理的人脸图像,得到了较为准确的识别结果<sup>[14]</sup>。以上都是通过光学模式识别的方法来实现图像识别的,虽然有效提高了识别的速度,但是识别精度低和光学系统复杂。基于以上不足,本文提出采用光电混合联合变换的方法来实现大规模人脸识别。将给定的人脸图像与数据库中的  $N$  幅模板图像同时以光速实现图像相关运算,利用电学的方法进行功率谱相减,输出  $N$  幅图像的相识度,实现 1:N 识别。该方法能够方便地对功率谱图像进行处理,具有光学模式识别速度快和计算机模式识别精度高,以及光学系统简单、体积小、成本低的优点。

## 2 理论分析

光电混合联合变换相关器系统如图1所示。其

中 SLM 为电寻址空间光调制器,FTL 为光学傅里叶透镜,P 为 FTL 的像焦点。数据库模板图像经过预处理,事先存在计算机中,用 CCD1 采集目标人脸图像,计算机将人脸图像和数据库中的  $N$  幅模板图像进行合并,然后输出显示在 SLM 上,SLM 位于 FTL 的物焦面上,用平行相干光垂直照射 SLM,在 FTL 的 P 上得到联合变换功率谱。CCD2 采集该功率谱,并输入到计算机中进行功率谱相减,以消除联合变换相关器中央零级条纹和模板图像之间的相关项,处理后的功率谱再一次输出至 SLM 上,经 FTL 进行傅里叶逆变换,便可在 P 面上得到相关输出。根据相关强度的大小和位置就可进行图像识别。

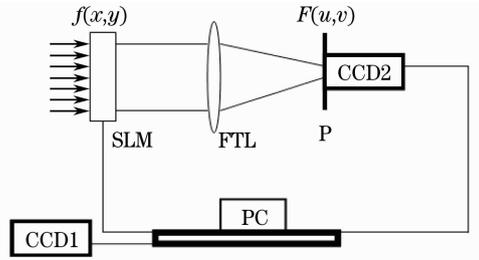


图1 光电混合联合变换相关器系统  
Fig.1 Schematic diagram of opto-electronic hybrid joint transform correlator

设目标人脸图像为  $t(x+x_0, y)$ ,  $N$  幅模板图像依次为  $r_1(x-x_1, y-y_1), r_2(x-x_2, y-y_2) \dots r_n(x-x_n, y-y_n)$ , 则呈现在 SLM 上的输入图像可表示为

$$f(x, y) = t(x+x_0, y) + \sum_{i=1}^n r_i(x-x_i, y-y_i). \quad (1)$$

此输入图像经 FTL 作傅里叶变换,在后焦面上得到的频谱分布为

$$F(u, v) = T(u, v) \exp(jux_0) + \sum_{i=1}^n R_i(u, v) \exp(-jux_i - jvy_i). \quad (2)$$

被 CCD2 记录的联合变换功率谱为

$$\begin{aligned} |F(u, v)|^2 &= |T(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n |R_i(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n T(u, v) R_i^*(u, v) \exp[ju(x_i+x_0) + jvy_i] + \\ &\sum_{i=1}^n T^*(u, v) R_i(u, v) \exp[-ju(x_i+x_0) - jvy_i] + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_i(u, v) R_k^*(u, v) \times \\ &\exp[-ju(x_i-x_k) - jv(y_i-y_k)] + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_i^*(u, v) R_k(u, v) \exp[ju(x_i-x_k) + jv(y_i-y_k)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中的前两项再经一次傅里叶逆变换将产生零级相关项,最后两项再经一次逆傅里叶变换将产生各模板图像之间的互相关项,这些都属于干扰项,只有第三项和第四项再经一次傅里叶逆变换才能识别所需要的相关项。为消去干扰项,用(3)式联合变换功率谱减去参考图像单独输入时的功率谱  $|T(u,v)|^2$  以及减去多目标图像单独输入时的功率谱  $|R(u,v)|^2$ , 则

$$|R(u,v)|^2 = \left| \sum_{i=1}^n R_i(u,v) \exp(-ju x_i - jv y_i) \right|^2 = \sum_{i=1}^n |R_i(u,v)|^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_i(u,v) R_k^*(u,v) \times \\ \exp[-ju(x_i - x_k) - jv(y_i - y_k)] + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n R_i^*(u,v) R_k(u,v) \exp[ju(x_i - x_k) + jv(y_i - y_k)], \quad (4)$$

相减后的功率谱为

$$I(u,v) = |F(u,v)|^2 - |T(u,v)|^2 - |R(u,v)|^2 = \sum_{i=1}^n T(u,v) R_i^*(u,v) \exp[ju(x_i + x_0) + jv y_i] + \\ \sum_{i=1}^n T^*(u,v) R_i(u,v) \exp[-ju(x_i + x_0) - jv y_i]. \quad (5)$$

可见相减后的功率谱中只剩下有用的目标人脸图像和各模板图像间的相关项。将此功率谱再作一次傅里叶逆变换,则得到的相关输出为

$$C(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{I(u,v)\} = \sum_{i=1}^n t(x,y) \otimes r_i(x,y) * \delta[x + (x_i + x_0), y + y_i] + \\ \sum_{i=1}^n r_i(x,y) \otimes t(x,y) * \delta[x - (x_i + x_0), y - y_i], \quad (6)$$

式中的“ $\otimes$ ”和“ $*$ ”分别表示相关和卷积,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示逆傅里叶变换。(6)式中的相关输出消除了中央零级项以及各模板图像之间的相关项,得到的只有目标图像与各模板图像间的相关项。于是根据相关项值的大小和位置便可进行  $N$  幅模板图像的同时识别。该方法与传统的 1:1 图像识别相比,理论上速度可以提高  $N$  倍。目前二元调制的振幅型空间光调制器帧频已经超过  $10^4$  frame/s, CCD 的帧速率也能超过 100 frame/s, 如果进行 1:10 图像识别, 该系统的图像识别能力也在 1000 face/s 左右。这是用电学方法难以实现的。

从(6)式中可以看出自相关峰的位置只和目标图像和模板图像之间的相对位置有关。对于 1: $N$  图像识别, 目标图像和模板图像的相对位置是固定的, 这就决定了相关峰的位置也是固定的。于是在进行识别时, 只需要求出相关峰所在位置的相关峰的强度, 然后依次与识别阈值进行比较就可以进行识别。为了增强系统的稳健性, 对相关峰的强度进行归一化处理。归一化公式为

$$C_i = \frac{\left( \sum_{j=1}^N P_{ij} \right) - 1}{N - 1}, \quad (1)$$

式中  $C_i$  为第  $i$  幅目标图像归一化处理后的相关峰强

度,  $N$  为模板图像的数量,  $P_{ij}$  为第  $i$  幅目标图像与第  $j$  幅模板图像的相关峰强度,  $P_{imax}$  为第  $i$  幅目标图像的最大相关峰强度。因此, 如果相关峰的强度小于识别阈值, 那么目标图像和对应位置的模板图像是匹配的; 反之则是不匹配的。

对于光电混合联合变换的大规模人脸图像识别而言, 基于图像相关运算的繁重计算工作由光学联合变换相关器来完成, 基于图像的识别是用电学方法通过阈值比较来实现的, 识别的精度只和阈值选取有关, 和速度没有直接关系。因此, 为了定量描述该方法的识别性能, 采用错误匹配率 (FMR) 和 FNMR 两个指标来进行评价。FMR 为本应该识别而光电混合联合变换相关器却没有识别的人数与模板图像总数的比值, FNMR 为本不该识别而光电混合联合变换相关器确识别的人数与模板图像总数的比值, 两者都属于错误识别率。

### 3 计算机仿真实验

为了验证该方法的可行性及结论的正确性, 采用计算机仿真的方法进行验证。仿真平台为 Matlab(R2007a), 人脸图像取自国际上人脸识别领域应用最广泛的 FERET 人脸数据库。其图像大小为  $80 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$ , 为 8 位灰度图像, 在仿真时取

正面人脸图像。由于图像相关运算对人脸图像的边缘信息比较敏感,在预处理时提取了人脸图像的边缘信息;为了方便观察相关结果,增加了输入联合图像的像素;同时为了减少运算量,采用二进制的人脸图像进行仿真。仿真流程如图 2 所示。目标人脸图像和模板经边缘提取和二进制化等预处理后进行合并,并将输入联合图像像素扩充至  $240 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ ,然后依次进行傅里叶变换、功率谱相减、傅里叶逆变换,最后将相关结果输出显示。相关输出如图 3 所示。从图 3 中可以看出,相关输出中有很锐的自相关输出,它是由(6)式形成的,从其相关结果的位置分布可计算出输入目标人脸图像和 3 幅模板图像中的第 2 幅是最相近的。按照同样的方法进行仿真,不进行功率谱相减时,得到如图 4 的相关输出。从图 4 仿真结果可以看出,中央有很强的零级衍射,无自相关输出,从而无法进行识别。图 4 中央有很强的零级衍射是因为各图像的自相关  $|R(u, v)|^2$  以及  $|T(u, v)|^2$  叠加造成的;无自相关输出是因为自相关太强淹没了互相关结果,即  $|T(u, v)|^2$  项和  $|R(u, v)|^2$  项太大。从计算机仿真结果可以看出该

方法是可行的。

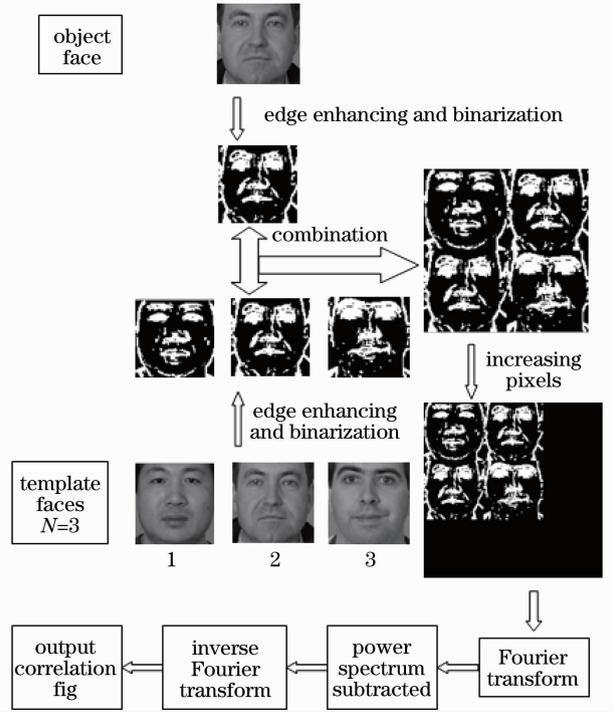


图 2 仿真流程图

Fig. 2 Simulation flow-char

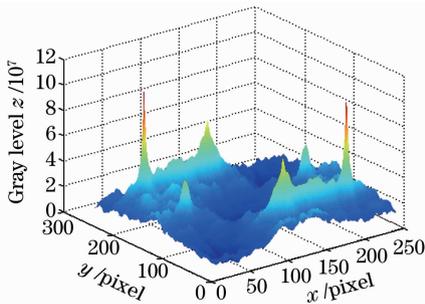


图 3 进行功率谱相减时的相关输出

Fig. 3 Output correlation with power spectrum subtracted

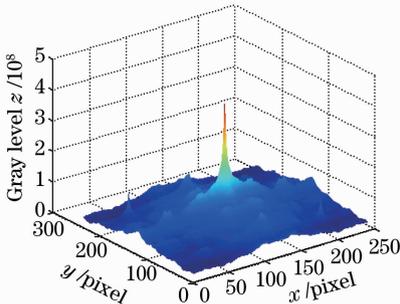
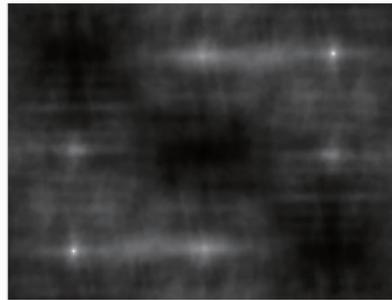
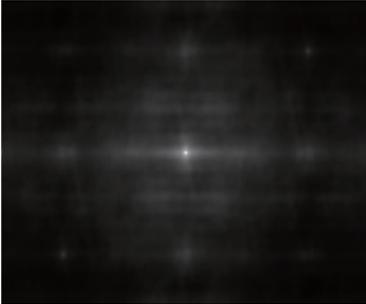


图 4 不进行功率谱相减时的相关输出

Fig. 4 Output correlation without power spectrum subtracted



在评价光电混合联合变换相关器识别性能时,取 FERET 中正面人脸图像 200 张进行仿真(100 张作为模板图像)。按照图 2 所示仿真流程,分别以 100 张为模板图像和另 100 张图像为目标图像,依

次求出各图像之间的相关峰强度,得到如图 5 所示的图像与相关峰强度的关系图。图 5 中“\*”代表两幅相同图像的相关峰强度,“+”代表两幅不同图像的相关峰强度,可以看出相同图像的相关峰强度明

显小于不同图像的相关峰强度,这就是用阈值进行识别的原理。然后取不同的识别阈值进行识别,计算相应的 FMR 和 FNMR。最后得出识别阈值和错误率之间的关系如图 6 所示。图中“\*”代表 FMR,“+”代表 FNMR。从图中可以看出随着比较阈值的增加,FMR 不断减少, FNMR 不断增加,体现了 FMR 和 FNMR 之间的对立统一关系,真实地反映了实际情况。当识别阈值在 $[0.61, 0.62]$ 之间时,能够得到很低的错误识别率,其中 FMR 和 FNMR 均为 0。从而证明了该方法能取得很好的识别结果。而日本女子大学开发的 MLCOPaC, FMR 为 1.7%, FNMR 为 1%<sup>[6,7]</sup>。相比而言,本文的方法有明显的优势。

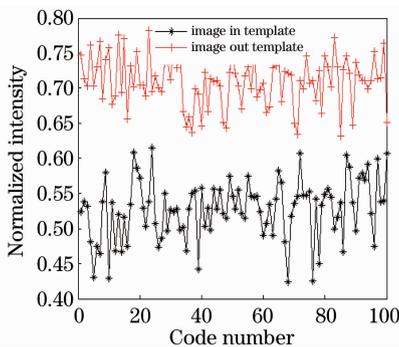


图 5 图像和相关峰强度的关系

Fig. 5 Relation between images and peak intensity

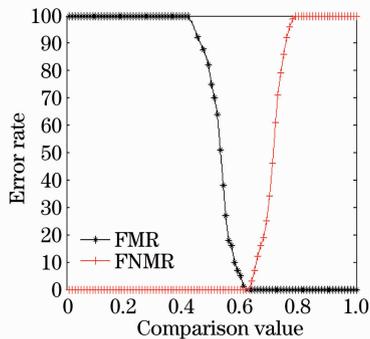


图 6 比较阈值和错误率的关系

Fig. 6 Relation between comparison value and error rate

## 4 结 论

提出了一种用于大规模人脸识别的新方法。将目标图像和  $N$  张模板图像同时进行相关运算,有效提高了空间光调制器的利用率;同时该方法理论上是 1:1 图像识别速度的  $N$  倍,能够有效地提高识别

的速度,可以很好地解决光学模式识别精度低和光学系统复杂的问题。最后通过 Matlab 平台进行仿真,实现了 1: $N$  识别,证明了该方法的可行性。当识别阈值在 $[0.61, 0.62]$ 之间时,可以得到很低的错误识别率,其中 FMR 和 FNMR 均为 0,能够满足安全方面的应用要求。

## 参 考 文 献

- 1 K. Delac, M. Grgic. Face Recognition[M]. I-TECH Education and Publishing, 2007
- 2 R. Inaba, A. Hashimoto, K. Kodate. Discrimination of portraits using hybrid parallel joint transform correlator system [C]. *SPIE*, 1999, **3740**: 529~532
- 3 K. Kodate, A. Hashimoto, R. Thapliya. Binary zone-plate array for a parallel joint transform correlator applied to face recognition[J]. *Opt. Rev.*, 1999, **14**(38): 3060~3067
- 4 E. Watanabe, S. Ishikawa, K. Kodate. A highly accurate face recognition system using filtering correlation [J]. *Opt. Rev.*, 2007, **5**(14): 255~259
- 5 K. Kodate, E. Watanabe, R. Inaba. Opto-electronic face recognition system using diffractive optical elements design and evaluation of compact parallel joint transform correlator [C]. *SPIE*, 2001, **4455**: 42~50
- 6 E. Watanabe, K. Kodate. Multi-light source compact optical parallel correlator (MLCOPaC) for facial recognition using VCSEL array[C]. *SPIE*, 2003, **4829**: 208~209
- 7 E. Watanabe, N. Takeda, K. Kodate. Fabrication and evaluation of facial recognition system based on PJTC using two-dimensional VCSEL array module [C]. *SPIE*, 2003, **5005**: 345~356
- 8 E. Watanabe, K. Kodate. Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter[J]. *Opt. Rev.*, 2005, **12**(6): 460~466
- 9 E. Watanabe, K. Kodate. Implementation of high-speed face recognition system using an optical parallel correlator[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **6**(44): 666~676
- 10 E. Watanabe, K. Kodate. High Speed Holographic Optical Correlator or Face Recognition; State of the Art in Face Recognition[M]. I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2009
- 11 E. Watanabe, K. Kodate. Optical correlator for face recognition using collinear holographic system[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **8B**(45): 6759~6761
- 12 E. Watanabe, K. Kodate. High speed image search engine using collinear holography[C]. *SPIE*, 2006, **6245**: 147~154
- 13 Li Shuguang, Wang Ce. Optic-electronic hybrid joint transform correlation based on computer processing [J]. *Laser Journal*, 2003, **25**(5): 62~64
- 李曙光, 王 策. 基于计算机处理的光电混合联合变换相关[J]. *激光杂志*, 2003, **25**(5): 62~64
- 14 Ouyang Chuan, He Qingsheng, Wang Fengtao *et al.*. Volume holographic correlation system with large capacity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1095~1098
- 欧阳川, 何庆声, 王凤涛等. 大容量体全息相关系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1095~1098