

光电混合匹配滤波相关器的大规模人脸识别研究

郭广明

(广东科学技术职业学院广州学院, 广东 广州 510640)

摘要 针对大规模人脸识别的特殊性,提出了一种光电混合匹配滤波相关器 and 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电混合匹配滤波相关器完成,实现 1:N 识别,有效地提高了识别的速度和精度。同时利用计算机仿真和实验的方法进行验证,计算机仿真结果表明,该相关器输出锐的相关峰,具有很好的识别能力;当取 200 幅人脸图像,识别阈值为 0.6,进行实验验证时,错误匹配率为 0%,错误不匹配率为 1%。

关键词 光学器件;大规模人脸识别;1:N 识别;光学相关器;图像处理

中图分类号 TP212; O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0809003

Research on Large-Scale Face Recognition Using Opto-Electronic Hybrid Matched Filtering Correlator

Guo Guangming

(Guangzhou Department, Guangdong Institute of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract According to the particularity of large scale face recognition, an opto-electronic hybrid matched filtering correlator and a new method for large scale face recognition are proposed. In order to achieve 1:N identification and effectively improve the speed and accuracy of the identification, opto-electronic hybrid matched filtering correlator is used to complete related calculation which consumes the most time in image recognition. At the same time, computer simulation and experiment test are used to verify this method. The computer simulation results show that the correlator can output sharp correlation peak, and has a very good recognition ability. When testing in 200 persons, the recognition threshold value is 0.6, false match rate is 0%, and false non-match rate is 1%.

Key words optical devices; large-scale face recognition; 1:N identification; optical correlator; image processing

OCIS codes 070.4340; 070.5010; 110.2960; 110.2970

1 引 言

传统的人脸识别是采用电学的方法来完成,但是随着人脸数据库的增加,电子计算耗时成指数增加,传统的人脸识别方法无法满足实时识别的要求。光学相关器具有并行处理、速度快的特点,因而在人脸识别方面呈现出了巨大的潜力。2005 年报道的用光学相关器实现的人脸识别系统(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^[1-3],清华大学 2003 年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:BLiNbO₃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^[4],但是体全息存储技术的局限仍没解决^[5-6]。对于大规模人脸识别等模板图像数量巨大的情况,需要不断地将模板图像上传至空间光调制器,因而图像上传至空间光调制器的时间、空间光调制器的刷新率、CCD 的帧速率等因素不得不考虑,它们限制了光学相关器图像识别的速度。因此,传统的光学相关器不能满足大规模人脸识别的要求,需要设计出新的相关器来完成大规模人脸识别。本文提出了一种适用于大规模人脸识别

收稿日期: 2013-02-28; 收到修改稿日期: 2013-04-01

基金项目: 广东省科技计划(2012B031500016)

作者简介: 郭广明(1980-),女,硕士,副教授,主要从事计算机应用技术、嵌入式应用与开发等方面的研究。

E-mail: gdit2010@126.com

的光电混合匹配滤波相关器,它利用空间匹配滤波的思想,提前利用计算机制作二值匹配滤波器,用电学的方法直接计算识别所需要的功率谱,然后利用 $2f$ 系统完成傅里叶运算,实现 $1:N$ 识别,减少了图像上传至空间光调制器的次数,提高了识别的速度和精度,从而能够满足大规模人脸识别的要求。

2 理论分析

光电混合匹配滤波相关器总体结构如图1所示。图中 SLM 为振幅型空间光调制器, laser 为激光(通过固体激光器经过扩束准直系统得到), FTL 为傅里叶透镜, photodiode 为光电管阵列, object image 为目标图像(由 CCD 采集得到), template filters 为匹配滤波器, MCU/FPGA 为嵌入式处理器/现场可编程门阵列, Correlation result 为输出的相关结果。计算机提前根据 $1:N$ 识别的模板图像数 $N(N \geq 1)$,选择 N 幅参考图像(要求 N 幅模板图像的中心不能重合),然后求 N 幅图像和的频谱,最后进行二值化,依次选取直到取完所有模板图像,制作完滤波器。光电混合匹配滤波相关器工作后,MCU/FPGA 将匹配滤波器读入内存。在进行 $1:N$ 识别时,CCD 采集目标图像,MCU/FPGA 对其进行预处理后求频谱并进行二值化,其次再从内存中读出相应的匹配滤波器,计算识别所需功率谱,最后将其结果送入 SLM,在准直激光束的调制下,通过 FTL 进行逆傅里叶运算,在其焦平面上得到相关输出,根据相关项强度的大小便可进行识别,然后换一组匹配滤波器依次进行以上操作。

联合变换相关器是一种典型的光学相关器,原

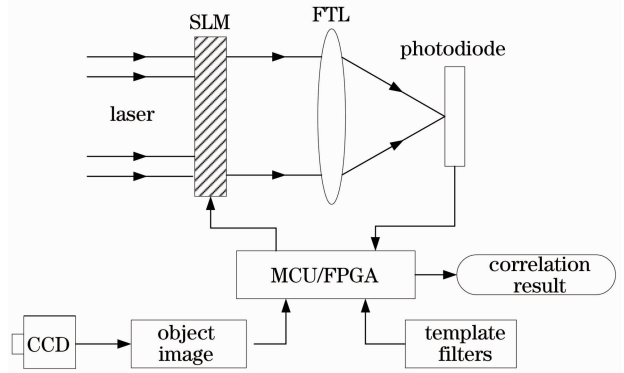


图1 光电混合匹配滤波相关器总体结构图
Fig.1 Overall structure of opto-electronic hybrid matched filtering correlator

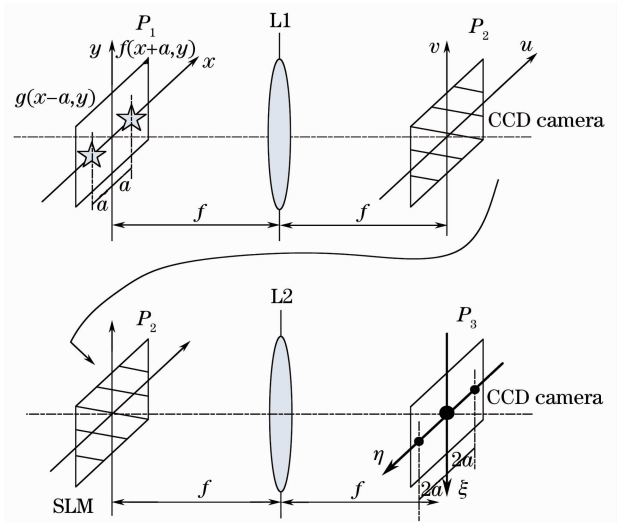


图2 联合变换相关器原理图

Fig.2 Joint transform correlator schematic
理如图2所示。

在输出平面 P_3 上得到输出函数为

$$o(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S(u, v)|^2 \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (\xi u + \eta v)\right] dudv =$$

$$f(\xi, \eta) \otimes g(\xi, \eta) + g(\xi, \eta) \otimes f(\xi, \eta) + f(\xi, \eta) \otimes g(\xi, \eta) * \delta(\xi + 2a, \eta) +$$

$$g(\xi, \eta) \otimes f(\xi, \eta) * \delta(\xi - 2a, \eta), \quad (1)$$

式中 $*$ 为卷积运算符, \otimes 为相关运算符。前两项分别表示 $f(\xi, \eta)$ 和 $g(\xi, \eta)$ 的自相关,构成0级项,后两项表示 $f(\xi, \eta)$ 和 $g(\xi, \eta)$ 的互相关,构成1级项,其中心位于 $(\xi = \pm 2a, \eta = 0)$ 处,为识别所需要的相关项。

$$F(u, v)G^*(u, v) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda f} 2au\right) + F^*(u, v)G(u, v) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda f} 2au\right) =$$

$$2\text{Re}\left[F^*(u, v) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda f} 2au\right) G(u, v)\right] = 2\text{Re}[F^*(u, v)] \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda f} 2au\right) \text{Re}[G(u, v)] -$$

$$2\text{Im}\{F^*(u, v) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda f} 2au\right) \text{Im}[G(u, v)]\}, \quad (2)$$

式中 Re 表示取实部, Im 表示取虚部,上标 $*$ 表示复共轭。相关项是由(2)式经过傅里叶变换得到的。进一

步分析可知,互相关峰的有无是由(2)式决定的,其位置是由偏移因子 $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda f}2au\right)$ 决定的。因此,(2)式是所需要的功率谱,于是可以用电学的方法直接求功率谱。

设参考图像依次为 $f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_n(x,y)$, 对应的偏移因子依次为 $\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right]$, $\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right]$, $\dots, \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right]$ 。依次求取参考图像频谱的复共轭为 $F_1^*(u,v), F_2^*(u,v), \dots, F_n^*(u,v)$ 。

将图像频谱的复共轭与相应偏移因子依次相乘,然后求和得到的匹配滤波器为

$$S^*(u,v) = F_1^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] + F_2^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] + \dots + F_n^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right]. \quad (3)$$

计算目标图像频谱为

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [g(x,y)] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xu + yv)\right] dx dy. \quad (4)$$

将匹配滤波器和目标频谱点乘得

$$\begin{aligned} m(u,v) &= S^*(u,v)G(u,v) = \left\{ F_1^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] + F_2^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] + \dots + \right. \\ & \left. F_n^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right] \right\} G(u,v) = \\ & F_1^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] G(u,v) + F_2^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] \times \\ & G(u,v) + \dots + F_n^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right] G(u,v). \end{aligned} \quad (5)$$

取(5)式实部,得到识别所需功率谱为

$$\begin{aligned} n(u,v) &= \text{Re}[m(u,v)] = \text{Re}\left\{ F_1^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] G(u,v) \right\} + \\ & \text{Re}\left\{ F_2^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] G(u,v) \right\} + \dots + \text{Re}\left\{ F_n^*(u,v)\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right] G(u,v) \right\} = \\ & \frac{1}{2} \left\{ F_1^*(u,v)G(u,v)\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] + F_1(u,v)G^*(u,v)\exp\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_1u + b_1v)\right] + \right. \\ & F_2^*(u,v)G(u,v)\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] + F_2(u,v)G^*(u,v)\exp\left[\frac{2\pi}{\lambda f}(a_2u + b_2v)\right] + \dots + \\ & \left. F_n^*(u,v)G(u,v)\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right] + F_n(u,v)G^*(u,v)\exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda f}(a_nu + b_nv)\right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

将(6)式所示的功率谱输入至振幅型空间光调制器,利用光学傅里叶透镜完成逆傅里叶运算,输出相关结果

$$\begin{aligned} o(\xi,\eta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n(u,v)\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi u + \eta v)\right] dudv = \\ & \frac{1}{2} \left\{ g(\xi,\eta) \otimes f_1(\xi,\eta) * \delta(\xi + a_1, \eta + b_1) + g(\xi,\eta) \otimes f_2(\xi,\eta) * \right. \\ & \left. \delta(\xi + a_2, \eta + b_2) + \dots + g(\xi,\eta) \otimes f_n(\xi,\eta) * \delta(\xi + a_n, \eta + b_n) \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,输出结果中只有目标图像和模板图像之间的相关项,只要模板图像中有与目标图像相同的图像,就会在匹配因子所对应的位置出现明亮的光斑,于是在进行识别时,只要求取相应位置的相关峰强度,然后依次与识别阈值进行比较就可以进行1:N识别。为了增强系统的稳健性,需要对相关峰的强度进行归一化处理^[7]。

为了提高系统的速度,在光电混合匹配滤波相关器中,所用的匹配滤波器为二值匹配滤波器,它由实部二值匹配滤波器和虚部二值匹配滤波器组成,是由(3)式的实部和虚部分别二值化后得到的。与之相应,嵌入式计算机计算的目标图像频谱也按照实部和虚部分别进行二值化,这样就将(6)式通过乘法计算识别所需的功率谱分解为二进制图像的“与”运算和“减”运算,从而减少了运算量,达到提高速度的目的。目前美国德州仪器公司(TI)生产的数字微镜器件(DMD)空间光调制器帧频已经超过10000 frame/s,扣除读取图像及目标图像预处理的时间,即使按照5000 frame/s的图像上传速度计算,在1:4识别时,该系统的识别速度也将为20000 face/s,远大于采用传统电学方法的识别速度。

3 计算机仿真分析

为了验证该方法的可行性,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人脸识别技术(FERET)人脸数据库。其图像大小为80 pixel×80 pixel,为8位灰度图像,在仿真时取正面人脸图像^[7]。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;取模板图像数量 N 为4,即进行1:4识别。仿真流程如图3所示。目标人脸图像和模板图像分别经边缘提取和二值化等预处理后,首先计算目标图像频谱,并按实部和虚部分别进行二值化,然后选择合适的偏移因子,依据4幅模板图像计算匹配滤波器。同理,按照实部和虚部分别二值化,最后计算功率谱,傅里叶变换并取模,得到相关输出。模版中有目标图像时相关峰和相关结果分别如图4和5所示,无目标图像时相关峰和相关结果分别如图6和7所示。从图4中可以看出,两相关峰值明显高于其他值,从图5中可以看出,相关输出中有很锐的相关输出,而图6、7中无相关输出,这是由(7)式决定的。从仿真结果可以分析出,光电混合匹配滤波

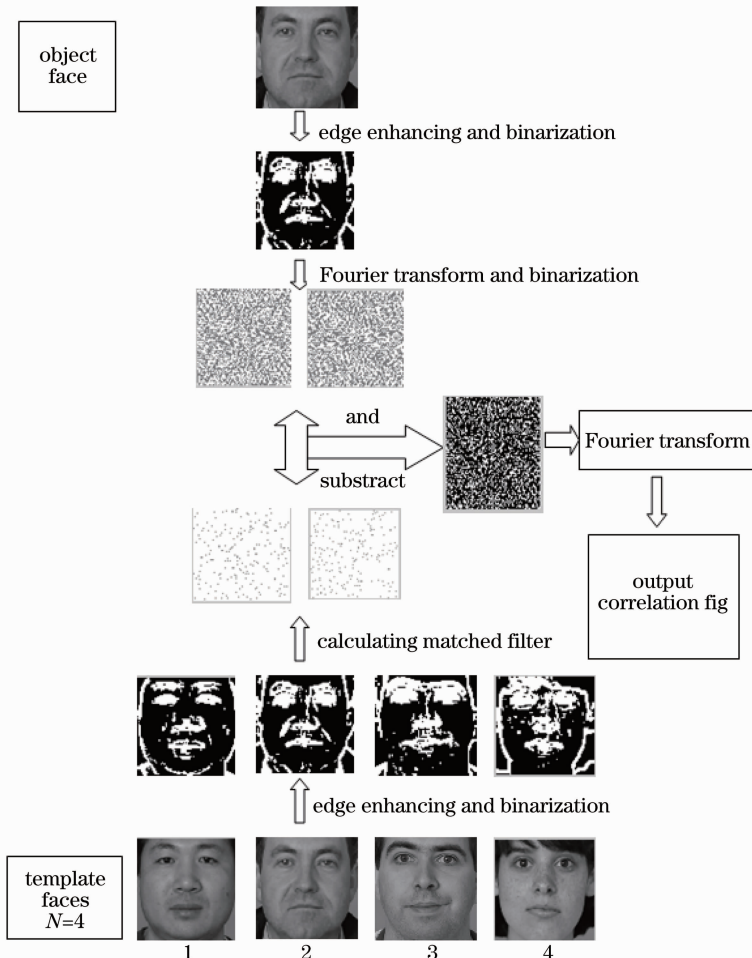


图3 仿真流程图

Fig. 3 Simulation flow-char

相关器能够进行 1:4 识别。需要说明的是,对匹配滤波器和目标图像频谱二值化后容易形成较强的 0 级衍射,为了便于观察相关峰以及相关输出结果,对中央 0 级衍射进行了相应处理,即让中央 0 级衍射区域显示全黑。在实际的光电混合匹配滤波相关器中,只需用光电管阵列探测相关输出,中央 0 级衍射不用关心。

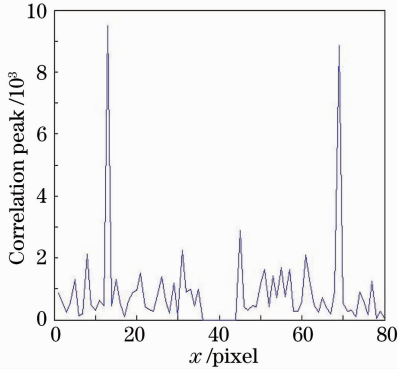


图 4 有目标时相关峰输出图

Fig. 4 Correlation peak output with object

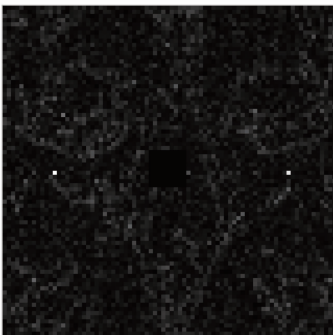


图 5 有目标时相关输出图

Fig. 5 Correlation output with object

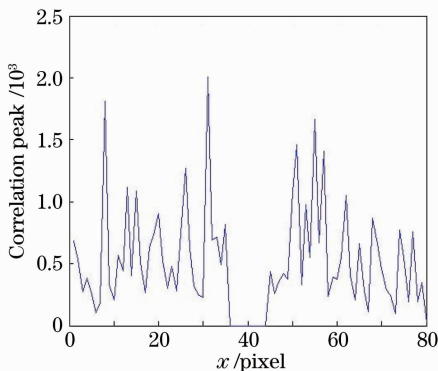


图 6 无目标时相关峰输出图

Fig. 6 Correlation peak output without object

采用错误率来定量描述该方法的识别性能。错误率可分为错误匹配率(FMR)和错误不匹配率(FNMR),其中 FMR 为应该识别而光电混合联合

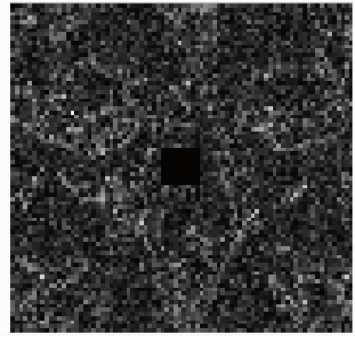


图 7 无目标时相关输出图

Fig. 7 Correlation output without object

变换相关器却没有识别的人脸数与模板图像总数的比值, FNMR 为不该识别而光电混合联合变换相关器却识别的人脸数与模板图像总数的比值^[7]。在仿真时,取 FERET 中正面人脸图像 200 张,取其中 100 张为模板图像,分别以 200 张图像为目标图像,按照图 3 所示仿真流程,依次求出各图像之间的相关强度,得到如图 8 所示图像与相关峰强度的关系图。图 8 中黑“*”代表两幅相同图像的相关峰强度,红“+”代表两幅不同图像相关峰强度。取不同的识别阈值进行识别,计算相应的错误匹配率和错误不匹配率,最后得出识别阈值和错误率之间的关系如图 9 所示。图中黑“*”代表错误匹配率,红“+”代表错误不匹配率。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。当识别阈值在 $[0.48, 0.50]$ 之间时,能够得到很低的错误识别率,其中 FMR 和 FNMR 均为 0%,该方法能取得很好的识别结果。

在实际的系统中,互相关峰用光电管阵列来探测,识别阈值通过 FMR 和 FNMR 来确定,也就是说可以根据不同的应用场合来选择不同的识别阈值。为了获得错误率的真实值,利用图 10 所示的大规模人脸识别系统(图中 1 为光电二极管阵列,2 为

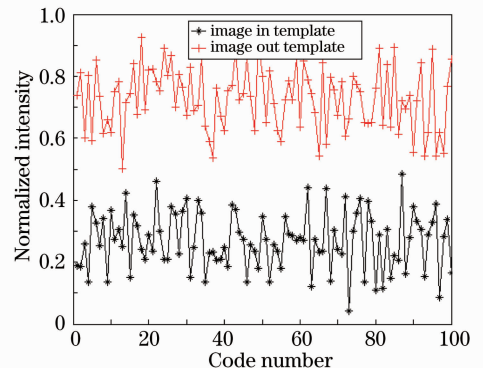


图 8 图像和相关峰强度的关系

Fig. 8 Relationship between images and peak intensities

固体激光器, 3 为傅里叶透镜, 4 为反射镜, 5 为 DMD, 6 为 D4100 控制板, 7 为计算机), 取识别阈值为 0.6 时, 按照图 3 所示流程, 同样地, 依次输入目标图像, 让大规模人脸识别系统进行识别, 最后计算得到错误匹配率为 0%, 错误不匹配率为 1%, 从而说明该系统有较好的识别性能。而日本女子大学开发的 MLCOPaC, 错误匹配率为 1.7%, 错误不匹配率为 1%^[8-9]。相比之下, 本文的方法有明显的优势。

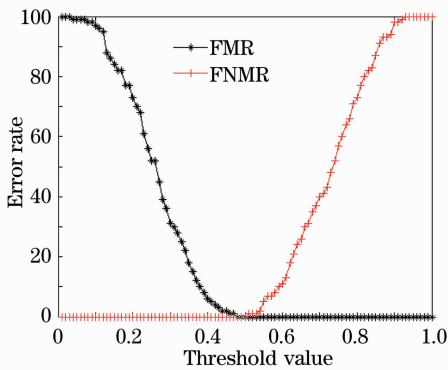


图 9 比较阈值和错误率的关系

Fig. 9 Relationship between threshold value and error rate

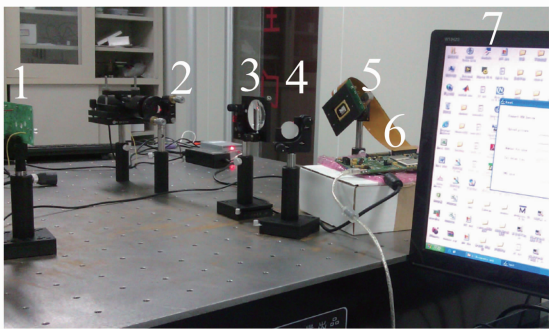


图 10 大规模人脸识别系统

Fig. 10 System of large-scale face recognition

4 结 论

针对大规模人脸识别的难题, 提出了光电混合

匹配滤波相关器的大规模人脸识别方法, 然后从理论上进行了详细的推导, 并用计算机仿真和实验的方法进行验证。仿真和实验的结果表明: 该相关器能够输出锐的相关峰, 具有很好的识别性能, 当识别阈值为 0.6 时, 能够得到很小的错误识别率, 其中错误匹配率为 0%, 错误不匹配率为 1%。由此可见, 该方法能够满足大规模人脸识别的要求。

参 考 文 献

- 1 Eriko Watanabe, Kashiko Kodate. Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter[J]. Opt Rev, 2005, 12(6): 460-466.
- 2 E Watanabe, K Kodate. Implementation of high-speed face recognition system using an optical parallel correlator[J]. Appl Opt, 2005, 6(44): 666-676.
- 3 Eriko Watanabe, Kashiko Kodate. High speed holographic optical correlator or face recognition//Mario I, Chacon M. State of the Art in Face Recognition [M]. Vienna: I-Tech, 2009. 109-130.
- 4 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.
- 5 Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi, et al.. Transimmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO₃ crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409001.
李建华, 曹良才, 谭小地, 等. 基于 LiNbO₃ 晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409001.
- 6 Wan Yuhong, Tao Shiquan. Micro-holographic data storage technology and its research progress[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100004.
万玉红, 陶世荃. 微全息存储技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100004.
- 7 Guo Suoli, Cheng Panpan, Liu Yanfei, et al.. Large-scale face recognition using optic-electronic hybrid joint transform correlator [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s2): s209004.
郭锁利, 程攀攀, 刘延飞, 等. 基于光电混合联合变换相关器的大规模人脸识别研究[J]. 中国激光, 2012, 39(s2): s209004.
- 8 Eriko Watanabe, Kashiko Kodate. Multi-light source compact optical parallel correlator (MLCOPaC) for facial recognition using VCSEL array[C]. SPIE, 2003, 4829: 208-209.
- 9 Eriko Watanabe, Noriko Takeda, Kashiko Kodate. Fabrication and evaluation of facial recognition system based on PJTC using two-dimensional VCSEL array module[C]. SPIE, 2003, 5005: 345-356.

栏目编辑: 何卓铭