

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

- 中国图像工程:2011 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5月16日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京9718信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第0346号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0676-06

论文引用格式: 范春年, 张福炎. Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 676-681

Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取

范春年^{1,2}, 张福炎¹

1. 南京大学计算机系, 南京 210092;
2. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 南京 210044

摘要: 为了消除光照变化对人脸识别的影响, 提出一种基于 Gabor 相位特征的光照不变量提取算法。该算法首先对图像进行光照归一化, 一定程度上减弱了不同光照条件的影响; 然后利用一组不同方向的 2 维实 Gabor 小波对图像进行变换, 在兼顾频谱与相位信息的情况下组合变换后的 Gabor 系数, 提取其相位特征, 得到光照不变量。在 Yale B 和 CMU PIE 人脸库上的实验结果表明, 该算法能够有效消除光照变化对人脸识别的影响, 提取的光照不变量具有一定的鲁棒性。

关键词: Gabor 小波; 相位特征; 光照变化; 人脸识别

Illumination invariant extraction on Gabor phase

Fan Chunian^{1,2}, Zhang Fuyan¹

1. Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210092, China;
2. Computer and Software Institute, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: In order to eliminate the effect of varying illumination on face recognition, a novel illumination invariant method based on the Gabor phase-frequency feature is proposed. The method first performs illumination normalization on image under various lighting conditions, which can reduce the effect of varying illumination to some extent. Secondly, a set of 2D real Gabor wavelets with different directions are used for image transformation, and multiple Gabor coefficients are combined into one whole in considering spectrum and phase. Lastly, the illumination invariant is obtained by extracting the phase feature from the combined coefficients. Experimental results on the Yale face database B and on the CMU PIE database show that the proposed method can effectively eliminate the effect of varying illumination on face recognition, and that extracted illumination invariant is robust.

Key words: Gabor filter; phase-frequency feature; illumination; face recognition

0 引言

近年来, 人脸识别领域取得了很大进展^[1], 在 2006 年的 FRVT (Face recognition vendor test)^[2] 测试中, 许多人脸识别系统表现优异。但人脸识别仍是一个没有彻底解决的难题, 光照变化是其中关键

问题之一^[2-3]。现有解决光照变化问题的方法可分为 3 类: 1) 光照归一化, 使用图像处理技术对人脸图像进行预处理以归一化光照, 如直方图均衡化、Gamma 校正、对数变换^[4] 及同态滤波^[5] 等; 2) 人脸建模方法, 构建一个通用的 3 维人脸模型以合成不同姿态和不同光照条件的人脸图像。该方法能同时解决光照和姿态问题, 缺陷在于: 需要充足的训练样

收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(60723003)

第一作者简介: 范春年(1979—), 女, 讲师, 南京大学计算机应用技术专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理与模式识别。E-mail:

fcn@nuist.edu.cn

本、需要假设人脸图像是凸结构、算法的复杂度较高,不适用于实际的人脸识别系统^[6-7];3)提取光照不变量,试图提取对光照变化具有鲁棒性的人脸特征的方法。如边缘图、灰度导数^[3]、SQI^[8]、MSR^[9]、LTV^[10]、GB^[11]和梯度脸^[12]方法等。

人类视觉系统中视觉皮层可接受域具有局域性、方向性和带通特性,研究也表明有效的图像表示方法应建立在局部、方向和多分辨率的基础上^[13]。此外,相位信息包含了许多有效的图像特征,研究表明它是一种光照不敏感的特征。本文从提取光照不变量入手,试图提取一种有效的对光照变化具有不变性的图像特征。鉴于 Gabor 小波特征自身良好的生物学背景和光照不敏感性^[14],提出一种基于 Gabor 相位特征的光照不变量提取方法。首先对人脸图像进行光照归一化,在一定程度上减弱光照变化的不利影响;然后利用一组不同方向的 2 维实 Gabor 小波对图像进行 Gabor 变换,在兼顾频谱与相位信息的情况下组合变换后的多个 Gabor 系数,提取其相位特征,得到光照不变量。

为了验证提取的光照不变量的性能,在 Yale B 和 CMU PIE 人脸库上做了对比实验,结果表明,本文算法能够有效消除光照变化对人脸识别的影响,提取的光照不变量具有一定的鲁棒性。

1 算法描述

1.1 光照归一化

光照归一化采用了文献[5]中同态滤波结合直方图均衡化的方法。同态滤波基于朗伯光照模型,是一种在频域中压缩图像亮度范围的同时增强图像对比度的增强方法^[15]。同态滤波的算法流程如图 1 所示。

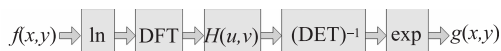
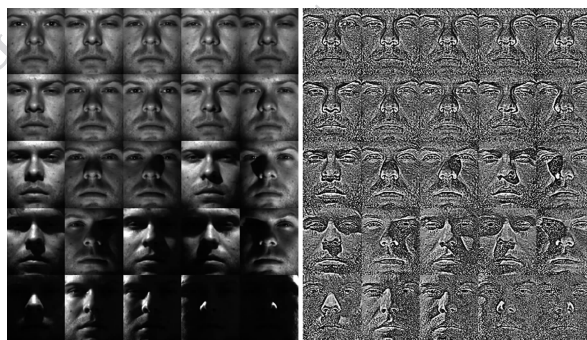


图 1 同态滤波流程图

Fig. 1 The flow chart of homomorphic filtering

根据朗伯光照模型,一幅灰度图像 $f(x, y)$ 可表示为照度分量和反射分量的乘积,即 $f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$,其中 $i(x, y)$ 为照度分量,对应图像的低频部分,而 $r(x, y)$ 为反射分量,表示图像的内在特征,代表图像的光照不变量,它取决于物体的反射率和表面法向量,对应图像的高频部分。为了在去除

光照变化的影响的同时增强图像的细节信息,文献[5]同态滤波中的滤波器 $H(u, v)$ 选用一种能抑制照度分量同时增强反射分量的高斯差分滤波器(DoG)。同态滤波后,减弱了光照变化的影响,也增强了细节,但图像灰度集中在低灰度值区域,图像之间的整体亮度差异较大。为此,文献[5]又使用了直方图均衡化来解决这个问题。光照归一化后的图像如图 2 所示。



(a) 原图 (b) 光照归一化后的图像

图 2 光照归一化前后人脸图像

Fig. 2 Original and the illumination normalized images

1.2 Gabor 小波变换

Gabor 小波变换属于加窗傅里叶变换,可在频域不同尺度、不同方向上提取相关特征。它与人眼的生物作用相仿,即机理类似人类视觉系统中简单细胞的视觉刺激响应,在提取目标的局部空间和频率域信息方面具有良好的特性。此外,它对光照变化不敏感,能够提供对光照变化的良好的适应性。

Gabor 小波实质上是一个被高斯(Gauss)函数窗口所限制的波函数,通过不同的 Gabor 函数核,可得到一组 Gabor 小波。实际中一般根据需要构造不同的 Gabor 小波。利用一组 2 维 Gabor 小波可将图像分解为一系列频率带。为避免复杂的复数计算,且因为人脸图像本身具有对称性,选择 2 维对称实 Gabor 小波,其核函数形式如下:

$$G(x, y, \theta_k, f) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{x'}{s_x}\right)^2 + \left(\frac{y'}{s_y}\right)^2\right)\right) \cos(2\pi f x') \quad (1)$$

$$x' = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k \quad (2)$$

$$y' = y \cos \theta_k - x \sin \theta_k \quad (3)$$

式中, f 和 θ_k 分别为正弦波的中心频率和方向角, θ_k 定义为

$$\theta_k = \frac{\pi}{n}(k - 1), k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

这里, n 定义了滤波器的方向个数, 本文中取值为 8。常规 $f=0, 2, 4, 8, 16, 32$ 。 s_x 和 s_y 分别是 x 和 y 方向的空间放缩系数, 控制滤波器脉冲响应的宽度。

确定参数 s_x, s_y 后, 一幅灰度图像 $f(x, y)$ 进行 Gabor 小波变换后得到

$$C(x, y, \theta_k, f) = f(x, y) * G(x, y, \theta_k, f) \quad (5)$$

后续部分将 $C(x, y, \theta_k, f)$ 简写为 $C_{\theta_k, f}$ 。所有的 Gabor 小波系数表示为

$$\{C_{\theta_k, f} \mid f = 0, 2, 4, 8, 16, 32; k = 1, 2, \dots, 8\} \quad (6)$$

1.3 相位特征提取

进行 2 维实 Gabor 小波变换后, Gabor 系数 $\{C_{\theta_k, f}\}$ 仅仅包含了频谱信息, 为了兼顾频谱和相位信息, 定义复平面 Gabor 小波系数为

$$\dot{C}_{\theta_k, f} = C_{\theta_k, f} e^{i\theta_k} \quad (7)$$

组合同一个中心频率 f 下的多个复 Gabor 小波系数作为 Gabor 特征 S_f , 即

$$S_f = \sum_{\theta_k = \pi/8}^{7\pi/8} \dot{C}_{\theta_k, f} \quad (8)$$

最终提取的相位特征表示为

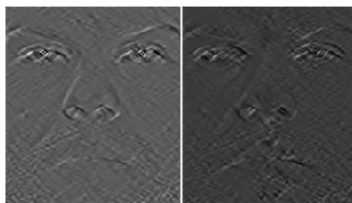
$$\Lambda_f(x, y) = \arctan \left| \frac{\text{Im}(S_f(x, y))}{\text{Re}(S_f(x, y))} \right|$$

式中, $\text{Im}(S_f(x, y))$ 和 $\text{Re}(S_f(x, y))$ 分别是 $S_f(x, y)$ 的虚部和实部。

同一个人 2 种不同光照的原始图像及提取的光照不变量(中心频率 $f=0$) 如图 3 所示。



(a) 原图



(b) 提取的光照不变量

图 3 人脸图像及其光照不变量

Fig. 3 Original images and their illumination invariant

从式(6)中可以看出, 中心频率不同, 提取的边缘特征也有差异。目前, 中心频率的选择仍然是一个开放性的问题, 本文通过实验来选择最合适的中心频率。实验在 Yale B 数据库上进行, 实验中在进行 2 维 Gabor 小波变换时, 中心频率分别设置为 0、2、4、8、16、32, 接着分别提取相位信息, 获取光照不变量。在识别阶段, 先用 PCA 方法降维后提取整体特征, 接着使用基于欧氏距离的最近邻分类器对人脸图像进行分类, 计算各自的首次识别率。在 64 类光照条件下, 随机选择 10 种光照条件下的图片组成 1 个子集作为训练集, 其他子集作为测试集。为了得到可信的实验数据, 重复该操作 50 次求取平均值, 图 4 给出了实验结果。实验结果表明, 在本文算法中, 当中心频率为 0、4 或 16 时, 识别效果最好。这里最终选取中心频率为 16。

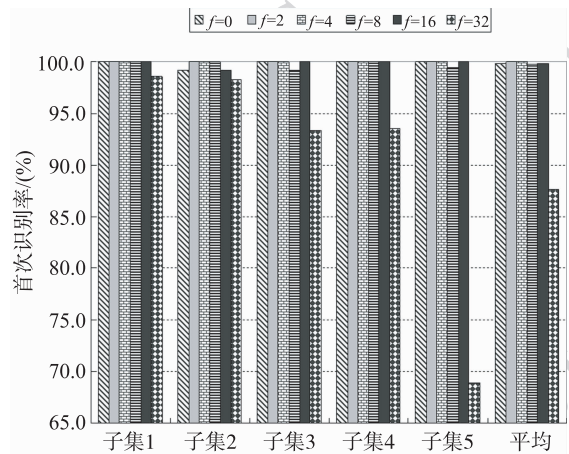


图 4 不同 f 取值的首次识别率

Fig. 4 Top 1 recognition rates versus parameter f

2 实验及结果

为了验证算法的有效性, 我们选择两个著名的光照人脸库: Yale B 和 CMU PIE 进行对比实验。实验中本文算法与 MSR、GB、LTV 等方法进行了比较, 给出了相应的实验结果。不同方法提取的光照不变量如图 5 所示。实验中, 在特征提取阶段, 采用对光照变化敏感的 PCA 方法对光照不变量进行降维, 提取整体特征; 在识别阶段, 使用基于欧氏距离的最近邻分类器对人脸图像进行分类。

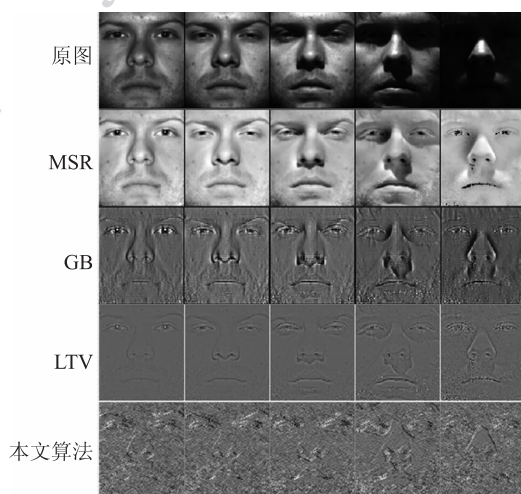
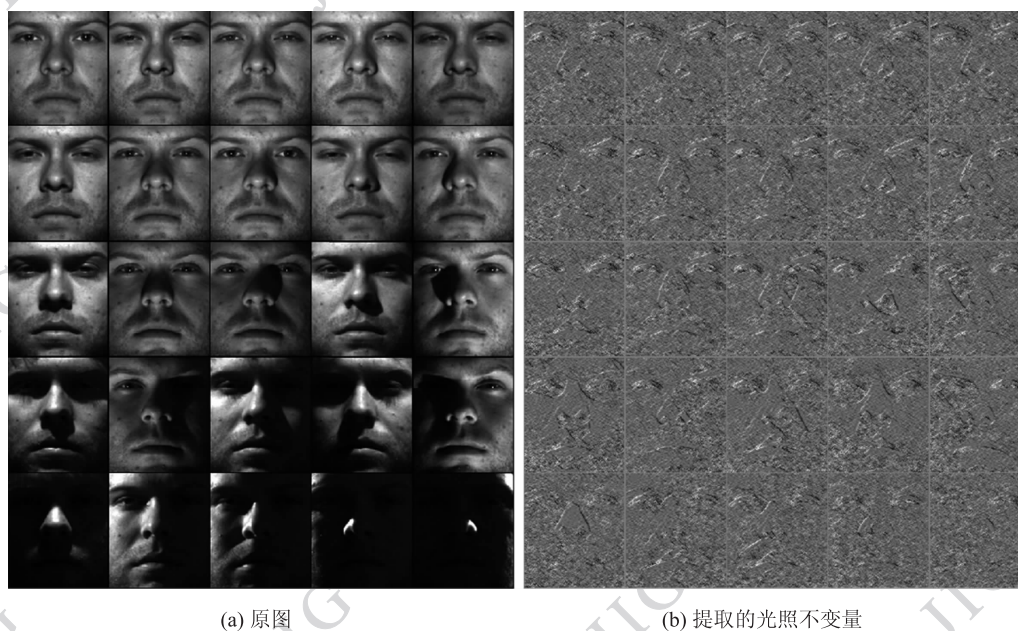


图5 不同方法提取的光照不变量

Fig.5 Illumination invariants of different methods

2.1 Yale B 人脸库的实验结果

Yale B^[6] 人脸库由 Yale 大学计算视觉与控制中心建立,它包含了 10 个人的 5 760 幅点光源图像。每人具有 9 种头部姿态,每种姿态下均有 64 种不同光照条件的图像,原始图像大小为 640 × 480。所有图像都进行了手工对齐并进行了人工裁剪仅保留面部区域,图像大小被调整为 192 × 168。本文重点在消除光照的影响,因此实验中仅使用正面图像,共计 640 幅进行实验。依据光源方向(方位角和仰角)将这 640 幅图像分为 5 个子集:子集 1(角度 < 12°),子集 2(20° < 角度 < 25°),子集 3(35° < 角度 < 50°),子集 4(60° < 角度 < 77°)和子集 5(其他)。图 6 展示了其中一个人各子集的 5 幅图像及本文算法提取的光照不变量。



(a) 原图

(b) 提取的光照不变量

图6 Yale B 人脸库的光照不变量

Fig.6 Original and their illumination invariants on Yale B

实验分 3 组进行,每组训练集不同。分别选择光照变化较小的子集 1、光照变化大的子集 4 以及随机选取 10 幅图像作为训练集,其余图像作为测试集。在随机选取 10 幅图像作为训练集的实验中,为了得到可信的实验数据,重复该操作 50 次求取平均值。实验结果如表 1—表 3 所示。注意,计算平均识别率时采用了加权平均,权重为各个子集所包含的图像比率。

表 1 子集 1 作为训练集不同方法的识别率
Table 1 Recognition rates of various methods when using images of subset 1 as training set

方法	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
原图	89.17	40.83	16.43	11.05	35.09
MSR	97.50	64.17	40.00	58.95	63.51
GB	95.00	98.33	61.43	28.95	65.44
LTV	85.00	100.00	89.29	98.42	93.68
本文算法	98.33	100.00	97.86	99.47	98.95

表 2 子集 4 作为训练集不同方法的识别率

Table 2 Recognition rates of various methods when using images of subset 4 as training set

方法	子集 1	子集 2	子集 3	子集 5	平均
原图	15.71	22.50	42.50	25.26	27.40
MSR	72.86	70.00	50.83	81.05	70.00
GB	74.29	56.67	75.00	68.95	68.20
LTV	94.29	95.00	100.00	99.47	97.80
本文算法	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 3 随机选择 10 幅图像作为训练集不同方法的识别率

Table 3 Recognition rates of various methods when randomly choosing ten images per person as training set

方法	子集 1	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
原图	20.00	26.67	50.00	39.29	20.53	31.25
MSR	94.29	91.67	56.67	71.43	90.00	80.47
GB	84.29	70.00	86.67	88.57	75.79	80.47
LTV	100.00	99.17	100.00	100.00	99.47	99.69
本文算法	100.00	99.20	100.00	100.00	100.00	99.84

从表 1 可以看出,当选择光照变化较小的子集 1 作为训练集时,对光照变化大的子集 4 和 5 的识别率差别非常大,尤其是 GB 算法,识别率仅为 28.95%,这说明 GB 算法仅能在一定程度上减弱光照变化对识别的影响,在光照变化比较大时,性能会

急剧下降。相比之下,本文方法对各个子集的识别率差别不大,均保持在较高的水准。这进一步说明了本文算法的鲁棒性。从表 2 中可以看出,在选择光照变化大的子集 4 作为训练集时,本文算法的识别率均达到了 100%,这从另一个侧面说明该方法对处理极端光照条件下的人脸图像具有独到的优势。如表 3 所示,当随机选择 10 幅图像作为训练集时,LTV 和本文算法均取得了不错的识别效果,平均识别率均在 99.69% 以上。以上 3 组实验分别选择了不同的训练集(包括光照变化较小的图像,光照变化大的图像以及随机光照变化的图像),从实验结果中可以看到,本文算法的识别率均高于其他方法,在光照变化大的情况下优势更明显,这表明本方法对光照变化具有鲁棒性,是一种有效的任意光照下的人脸特征表示方法。

2.2 CMU PIE 人脸库的实验结果

CMU PIE^[16]人脸库由美国卡耐基梅隆大学创建,该人脸库包含 68 位志愿者的 41 368 幅多种姿态、多种光照情况和不同表情的面部图像。库中的姿态和光照变化图像是在严格的控制条件下采集的。原始图像大小为 640 × 480,所有图像都进行了手工对齐并进行了人工裁剪仅保留面部区域,图像大小被调整为 64 × 64。本文选择正面、无表情、不同光照情况的人脸图像作为实验对象(C27)。图 7 展示了一个人所有不同光照图像及本文算法提取的光照不变量。

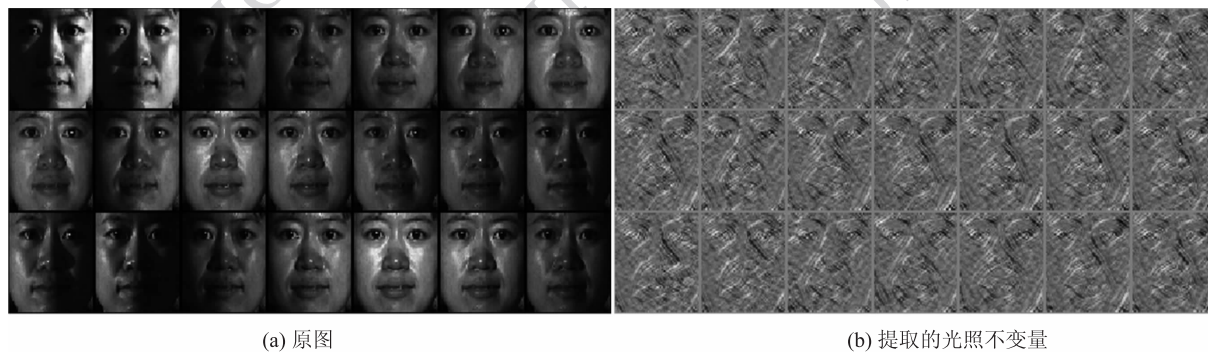


图 7 CMU PIE 人脸库的光照不变量

Fig. 7 Original images and their illumination invariants on CMU PIE

实验中随机选取 4 幅图像作为训练集,其余图像作为测试集,重复 50 次这样的操作,求取平均识别率,实验结果如表 4 所示。实验结果表明本文算法在 CMU PIE 人脸库上的性能依然优于其他算法。

表 4 随机选择 4 幅图像作为训练集的平均识别率

Table 4 Average recognition rates of various methods when randomly choosing 4 images per person as training set

算法	原图	MSR	GB	LTV	本文算法
平均识别率/%	42.17	84.50	92.02	99.37	99.84

3 结 论

基于 Gabor 相位特征的光照不变量提取算法,很大程度上消除了光照变化对人脸识别的影响。相比于其他方法,该算法不需要 3 维形状和光源等先验信息,训练时也不需要大量的训练样本,可直接应用于单训练样本的人脸识别;此外,在进行 Gabor 小波变换时选择了 2 维实 Gabor 核函数,避免了复杂的复数计算,相比与其他基于 Gabor 特征的方法,其计算复杂度大大降低,可应用于实际的人脸识别系统。

参考文献 (References)

- [1] Zhao W, Chellappa R, Phillips P J, et al. Face recognition: a literature survey [J]. ACM Computing Surveys, 2003, 35(4):399-458.
- [2] Phillips P J, Scruggs W T, O'Toole A J, et al. Fvt 2006 and ice 2006 large-scale experimental results [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(5):831-846.
- [3] Adini Y, Moses Y, Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7):721-732.
- [4] Shan S, Gao W, Cao B, et al. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [C]// Proceedings of the IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures (AMFG'03). Nice, France: IEEE Computer Society, 2003:57-164.
- [5] Fan C N, Zhang F Y. Homomorphic filtering based illumination normalization method for face recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(10):1468-1479.
- [6] Georghiades A S, Belhumeur P N. From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6):643-660.
- [7] Basri R, Jacobs D W. Lambertian reflectance and linear subspaces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2):218-233.
- [8] Wang H T, Li S Z, Wang Y S. Face recognition under varying lighting conditions using self quotient image [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Seoul, Korea: IEEE Computer Society, 2004:819-824.
- [9] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7):965-976.
- [10] Chen T, Yin W T, Zhou X S, et al. Total variation models for variable lighting face recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9):1519-1524.
- [11] Gross R, Brajovic V. An image preprocessing algorithm for illumination invariant face recognition [C]// Proceedings of Audio- and video-based biometric person authentication (AVBPA'03). Guildford, UK: Springer, 2003: 10-18.
- [12] Zhang T P, Tang Y Y, Fang B, et al. Face recognition under varying illumination using gradientfaces [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(11):2599-2606.
- [13] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12):2091-2106.
- [14] Xie X, Lam K-M. An efficient illumination normalization method for face recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 27(2006) 609-617.
- [15] Zhang Y J. Image Engineering(1)[M]// Image Processing. 2th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 151-153. [章毓晋. 图像工程(上册)[M]图像处理. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2006:151-153.]
- [16] Sim T, Baker S, Bsat M. The cmu pose, illumination, and expression database [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12):1615-1618.