

# 基于 Fechner 定律和梯度特征的人脸识别算法及实现

杨超<sup>1</sup> 伍世虔<sup>1,2</sup> 方红萍<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(武汉科技大学机械自动化学院 湖北 武汉 430081)

<sup>2</sup>(湖北省先进钢铁材料协同创新中心 湖北 武汉 430081)

<sup>3</sup>(武汉科技大学信息科学与工程学院 湖北 武汉 430081)

**摘要** 光照一直是人脸识别中的一项热点问题。为了消除光照影响,提高人脸识别率,基于 Fechner 定律和梯度特征提出一种新的人脸识别方法。该方法在对数域内进行图像增强,并基于 Fechner 定律得到光照分量。通过消除光照,获得对光照不敏感的反射人脸,并且梯度特征完整地提取局部人脸信息。在 CMU-PIE 数据库上的实验数据表明,该方法平均识别率高达 97.86%,明显优于其他几种方法,并且对光照更加鲁棒。

**关键词** 光照归一化 Fechner 定律 梯度特征 人脸识别 特征提取

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.01.041

## FACE RECOGNITION METHOD BASED ON FECHNER'S LAW AND GRADIENT FEATURE AND ITS IMPLEMENTATION

Yang Chao<sup>1</sup> Wu Shiqian<sup>1,2</sup> Fang Hongping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

<sup>2</sup>(Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan 430081, Hubei, China)

<sup>3</sup>(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract** Illumination has always been a hot issue in face recognition. In order to eliminate the influence of illumination and improve the face recognition rate, a new face recognition method based on Fechner's law and gradient feature was proposed in this paper. The method enhanced the image in the logarithmic domain and obtained the illumination component based on Fechner's law to eliminate illumination and get the reflective face which was insensitive to illumination. And the gradient feature was used to extract the local face information completely. The experimental data on CMU-PIE database show that the average recognition rate of this method is 97.86%, which is obviously better than other methods and more robust to illumination.

**Keywords** Illumination normalization Fechner's law Gradient feature Face recognition Feature extraction

## 0 引言

人脸识别在身份识别、视频监控和公共安全中被广泛应用<sup>[1]</sup>。但是,光照问题一直是制约人脸识别的一项重要因素,特别是在室外光照不可控的情况下,白天与黑夜所拍摄的图像有着巨大差别。如何有效地克服人脸识别中的光照问题,提高人脸识别率是本文要

研究的内容。

一些学者提出了提取图像的光照不变性的特征,如局部二值模式(LBP)<sup>[3]</sup>、局部三值模式(LTP)<sup>[4]</sup>、拓展局部三值模式(ELTP)<sup>[5]</sup>、梯度人脸(GF)<sup>[6]</sup>等。这些方法都取得了不错的效果,但是还略微有些不足。LBP、LTP、ELTP等方法提取了人脸的局部特征,但是都只利用了符号信息,而GF特征通过假设局部光照相同,消除了光照,提取了x、y方向的梯度信息。

有些学者提出了传统的图像预处理方法,提高原始人脸图像的质量,再进行特征提取和识别,例如直方图均衡(HE)<sup>[7]</sup>、伽马图像校正(GIC)<sup>[8]</sup>、同态滤波(HOMO)<sup>[7]</sup>。

那么,如何有效地衡量人脸图像的光照,并去除图像中的光照是许多国内外研究学者一直在研究的问题。例如,Jobson等提出了Retinex方法<sup>[9]</sup>,认为光照主要处于人脸图像中的低频部分,因此设计了一个高斯型的全局中心环绕函数并在对数域内来滤除图像的低频光照部分,但是该方法是一种全局算法,对于极端光照条件,在去除光照时的效果不够明显,识别结果也难稳定;文献[10]基于商图提出了自商图(SQI)概念,以加权高斯内核函数卷积求得光照,并以自商的形式滤除光照;文献[11]基于韦伯局部描述子(WLD)<sup>[12]</sup>提出的韦伯人脸(WF)方法,假设了局部邻域内的光照不变,并利用韦伯定律消除了局部光照。这些SQI、WF方法结合LBP或GF特征取得了较好的效果。

近年来,有许多学者提出了许多基于光照不变性和光照归一化的算法研究,甚至将这些方法融合在一起进行研究。首先对人脸图像进行预处理或光照归一化,再提取它们的特征,同时还有在分类方法上进行了加权改进的算法,以便于识别<sup>[4,13-14]</sup>,本文基于Fechner定律<sup>[15]</sup>,并结合梯度特征,提出了一种新的人脸识别算法。在该方法中,Fechner定律能够有效去除光照影响,梯度特征可以完整地提取人脸的局部特征信息,提高人脸识别率。在CMU-PIE数据库<sup>[16]</sup>上进行实验的实验数据显示,所提出的方法在大部分光照条件下的识别率都明显提高了,其平均识别率为97.86%,优于SQI+LBP、WF+LBP、GF等方法,并且对光照变化更加的鲁棒。

## 1 算法设计

根据朗伯特反射模型<sup>[17]</sup>,人脸图像上坐标 $(x, y)$ 点的像素 $I$ 可以表示为:

$$I(x, y) = R(x, y)L(x, y) \quad (1)$$

式中: $R$ 代表反射分量, $L$ 代表光照分量。光照归一化的目的是将光照分量 $L$ 去除,或者使得 $L=1$ 进而图像 $I=R$ 。这样就可以消除光照对人脸图像的影响,使得人脸识别率得以提高。

文献[9]提出了Retinex算法理论,指出了反射分量 $R$ 由中心像素及其周围像素的加权平均值的比值决定,而邻域像素加权平均值是通过图像进行高斯滤波函数 $G_s$ 卷积得到的,如下式所示:

$$\ln R(x, y) = \ln I(x, y) - [\ln I(x, y) * G_s(x, y)] \quad (2)$$

式中: $*$ 表示卷积操作, $G_s$ 表示为尺度为 $s$ 的高斯滤波函数。对于单一尺度Retinex算法来说, $s=1$ ,因此,它是一个整体的方法。

同样,文献[10]基于商图提出了自商图方法SQI(Self-Quotient Image),认为自商图是人脸图像的固有性质。自商图的定义为:

$$Q = \frac{I}{\hat{I}} = \frac{I}{F * I} \quad (3)$$

式中: $F$ 表示加权的局部高斯滤波函数。由此可以得到光照不变分量 $Q$ ,并可结合LBP、GF特征进行人脸识别。

### 1.1 Fechner方法

由上可以看出,Retinex和SQI方法都认为光照大多处于低频阶段,都是通过低通滤波的方法去除光照。而Fechner定律可以直接在对数域内量化光照。本文将基于Fechner定律直接在对数域内求得光照以进行去除。

在文献[15,18]中,根据Fechner定律,可以计算出局部内的光照亮度 $B$ 。Fechner提出的像素和亮度之间的关系为:

$$B(x, y) = k \ln \frac{I(x, y)}{I_{\max}(x, y)} + k \ln \frac{I_{\max}(x, y)}{I_{\min}(x, y)} \quad (4)$$

式中: $k$ 是一个常数, $I_{\max}(x, y)$ 和 $I_{\min}(x, y)$ 分别代表在中心像素坐标 $(x, y)$ 的一个小窗口邻域 $\Omega$ 内的最大和最小像素。

通过简化,可以将亮度 $B$ 转化成下面的形式:

$$B(x, y) = k \ln \frac{I(x, y)}{I_{\min}(x, y)} = \ln \left( \frac{I(x, y)}{I_{\min}(x, y)} \right)^k \quad (5)$$

式(5)可以解读为原图像 $I$ 首先经过伽马系数为 $k$ 的伽马变换,再对图像取对数求得亮度 $B$ 。

从式(5)中可以明显看出,亮度 $B$ 是在对数域内的,因此 $B$ 与光照 $L$ 的关系为: $\ln L = B$ 。因此对数域的反射人脸 $r$ 满足下面的关系:

$$r = \ln R = \ln I - \ln L = \ln I - B \quad (6)$$

由(6)可知, $r$ 是一个与光照无关的、独立的人脸反射分量。因此,Fechner方法可以去除光照,获得真实的反射人脸。使用独立的人脸反射分量 $r$ ,可以很好地避免光照变化对识别效果的影响。

### 1.2 梯度特征GF

文献[6]中通过假设局部光照相同,并证明了 $y$ 方向的梯度 $\partial I / \partial y$ 和 $x$ 方向的梯度 $\partial I / \partial x$ 的比值是不受光照影响的,以此来求得人脸梯度特征,取得了较好的效果。

由 1.1 节可知,在去除亮度之后得到的对数域内的反射人脸  $r = \ln R$ 。因此,可以直接对  $r$  提取梯度特征,而不需要进行假设。梯度的比值定义为:

$$\frac{\frac{\partial I}{\partial y}}{\frac{\partial I}{\partial x}} = \frac{\frac{\partial r}{\partial y}}{\frac{\partial r}{\partial x}} \quad (7)$$

从式(7)可以很明显地看出,去除光照之后的反射人脸的梯度特征是不受光照影响的,可以作为光照不变性的测量方式。

为了防止两个方向的梯度比值过大,甚至无穷大,使用 arctangent 函数对比值进行归一化,来提取梯度特征作为光照不变性的测量方式。梯度特征可以定义为:

$$G_{rad} = \arctan\left(\frac{r_{y-gradient}}{r_{x-gradient}}\right) \quad (8)$$

式中: $r_{y-gradient}$ 和 $r_{x-gradient}$ 分别是反射人脸图像  $r$  在  $y$  和  $x$  方向的梯度。

在本文的实验中,首先使用标准差为  $\sigma = 1$  的高斯低通滤波器去除噪声和残留下的阴影的影响,再分别用  $y$  和  $x$  方向的标准差为  $\sigma$  的高斯函数求取梯度  $r_{y-gradient}$  和  $r_{x-gradient}$ ,然后利用式(8)获得梯度特征  $G_{rad}$ 。

### 1.3 识别方法

文献[6]定义了两个梯度向量新的  $L1$  距离作为相似性测量方式,考虑了梯度向量的正负性。为了更加严格地测量两个向量的相似性,本文直接使用  $L1$  距离作为相似性测量方法。对大小为  $m \times n$  的两幅图像的梯度特征  $G_{rad1}$  和  $G_{rad2}$  的距离计算方式定义如下:

$$D = \sum_1^m \sum_1^n |G_{rad1}(x,y) - G_{rad2}(x,y)| \quad (9)$$

式中: $G_{rad1}(x,y)$ 和 $G_{rad2}(x,y)$ 分别表示为训练图像和测试图像在坐标  $(x,y)$  上的梯度特征。值得注意的是,式(9)求得的是距离  $D$ ,距离越小,那么两幅图像梯度特征的相似性就越大,则该测试图像极有可能和训练图像是同一个人,这说明识别成功。最后本文采用最近邻分类方法进行分类。

## 2 算法实现

以训练图像  $I_1$ 、测试图像  $I_2$  为例,图 1 描述了本文算法的流程图。对输入图像通过 Fechner 方法去了光照,得到对数域内的反射人脸  $r_1, r_2$ ; 然后对反射人脸  $r_1, r_2$  提取梯度特征得到  $G_{rad1}$  和  $G_{rad2}$ ; 最后计算得到距离  $D$ ; 以此类推,每两幅图像计算得到一个距离  $D$ , 根据最近邻分类距离最小的两幅图像被认为是同一个人,进而得到识别结果。算法 1 和算法 2 分别给出了

Fechner 算法和梯度特征提取的实现方法。

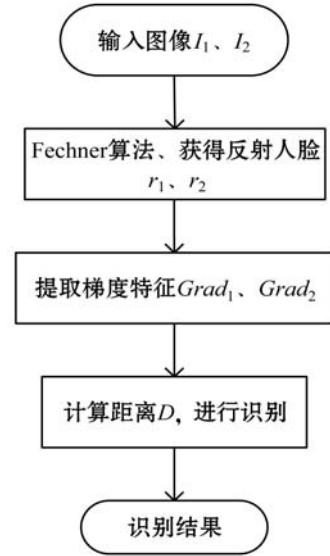


图 1 本文算法流程图

### 算法 1 Fechner 算法

输入:图像  $I$

输出:对数域反射人脸  $r$

1. 对中心像素坐标  $(x, y)$  的半径  $R_0$  的邻域  $\Omega$  内,

$$\text{计算 } B(x,y) = k \ln \frac{I(x,y)}{I_{\min}(x,y)};$$

2. 对图像  $I$  取对数,计算  $r = \ln I - B$

### 算法 2 梯度特征提取算法

输入:反射人脸  $r$

输出:梯度特征  $G_{rad}$

1. 对  $r$  进行高斯卷积,得到光滑的反射人脸  $r'$ ,

$$r' = r * G(x,y,\sigma);$$

2. 利用  $y$  和  $x$  方向的高斯函数  $G_y(x,y,\sigma)$  和  $G_x(x,y,\sigma)$ , 对  $r'$  进行卷积,求取梯度  $r_{y-gradient}$  和  $r_{x-gradient}$ ,

$$r_{y-gradient} = r' * G_y(x,y,\sigma),$$

$$r_{x-gradient} = r' * G_x(x,y,\sigma);$$

3. 对梯度  $r_{y-gradient}$  和  $r_{x-gradient}$ , 计算

$$G_{rad} = \arctan\left(\frac{r_{y-gradient}}{r_{x-gradient}}\right)$$

## 3 实验

为了更好地验证本文所提方法的有效性,本文在公共人脸 CMU-PIE 数据库<sup>[16]</sup>上进行了实验。CMU-PIE 数据库含有 68 个对象在不同光照、姿势和表情的 41 368 张人脸图像。本文讨论重点光照问题,因此选取了 21 种光照条件的 1 428 张人脸图像作为实验数据库,并将图像大小调整为  $64 \times 64$ ,水平和垂直分辨率都为 96 dpi。在本文的实验中,每次从 21 种光照条件中选取一种光照条件下的 68 个目标作为训练集,轮流进行实验。本文所有实验都是在戴尔工作站 Core

i7-6700(3.4 GHz,8 GB)的 MATLAB 上进行的。

图2显示了一个目标在21种光照条件下的原始人脸图像。图3显示了通过本文的Fechner方法进行光照处理后的结果图像。从图2和图3对比中可以很明显地看出,本文的方法改善了原本的人脸图像的细节,将人脸中比较暗的区域进行了增强,图像整体更加清晰,并且使得整体人脸图像更加均匀光滑。



图2 21种光照条件下的原始人脸图像



图3 Fechner方法处理后的人脸图像

为了更好地发挥本文所提方法的性能,实验设置了Fechner方法的两个参数:小窗口邻域 $\Omega$ 半径的大小 $R_a$ 以及 $k$ 值的大小。图4显示了这两个参数取不同的值时,在CMU-PIE数据库上得到的平均识别率。

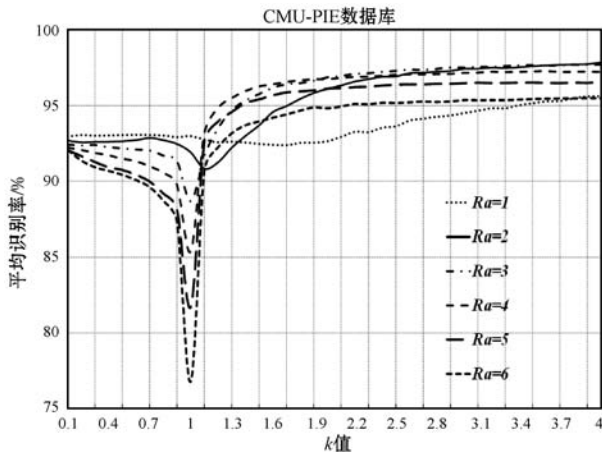


图4 不同 $R_a$ 和 $k$ 值在CMU-PIE上的平均识别率

从图4中可以看出,当 $k$ 从0.1增加到1时, $R_a$ 为4、5、6的识别率是逐渐降低的, $k$ 值越接近1下降得越快,在 $k=1$ 时识别率下降到最低,而 $R_a$ 为1和2的识别率保持得比较稳定。但是,当 $k$ 从1增加到4时, $R_a$

为4、5、6的识别率立刻上升,在 $k$ 值接近1时上升得最快,而后缓步上升,最后保持稳定。而 $R_a$ 为1和2的识别率先缓步下降到最低,再缓步上升。但是 $R_a=2$ 的识别率比 $R_a=1$ 上升得更快,在 $k=4$ 时, $R_a=2$ 取得最高识别率97.86%。因此,在对比实验中,本文将涉及到的参数设置为 $R_a=2$ 且 $k=4$ 。并且,为了更加体现本文所提方法的有效性,本文将几种经典的光照处理方法和特征提取方法进行结合:LBP, GIC + LBP, SQI + LBP, WF + LBP, GF, SSR + GF, SQI + GF。将这些结合的方法进行识别效果的比较,并且这些方法的参数都设置文献的推荐值,最后的对比结果显示在了图5和表1中。

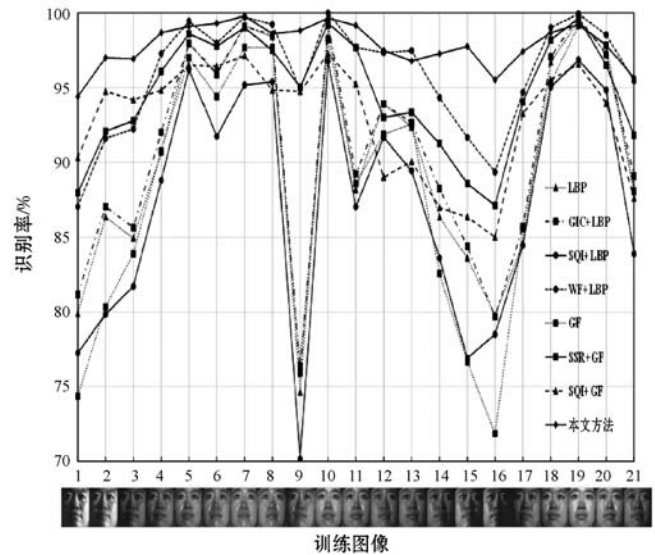


图5 各种方法在CMU-PIE数据库上以不同光照条件作为训练集的结果

表1 各种方法的平均识别率及其标准差

方法	平均识别率/%	标准差
LBP	90.35	7.47
GIC + LBP	90.92	7.10
SQI + LBP	87.39	7.91
WF + LBP	95.95	3.73
GF	90.32	8.79
SSR + GF	94.63	3.87
SQI + GF	92.88	3.90
本文方法	97.86	1.46

图5展示了各种方法在CMU-PIE数据库上以不同的光照条件作为训练集的结果。而表1展示了各种方法的平均识别率以及标准差。

从表1中可以看出,本文方法的平均识别率最高,达到97.86%,在GF的90.32%基础上提高了7.54%;并且比WF + LBP的95.95%高出1.91%。而本文方法的标准差最小,只有1.46,小于WF + LBP的标准差

3.73,说明本文方法具有很好的鲁棒性。从图5中可以看出,本文所提方法在大多数光照条件下的识别效果比其他几种方法更好。尤其是在 No. 1、No. 9、No. 14、No. 15、No. 16 的光照条件下,识别率明显提高了,远高于其他方法。同时可以很明显地看出,本文方法波动较小,对光照变化更加鲁棒。因此,本文所提方法的效果优于其他几种方法。

## 4 结 语

针对人脸识别中复杂的光照问题,本文基于 Fechner 定律和梯度特征,提出了一种新的人脸识别方法。根据 Fechner 定律,该方法直接在对数域内去除了光照,并增强了人脸图像,得到真实的反射人脸,并结合梯度特征进行识别。在 CMU-PIE 公共数据库上进行的实验数据表明,本文所提方法的识别率为 97.86%,明显高于 LBP、SQI + LBP、WF + LBP、GF、SQI + GF 等其他几种方法,并且在光照变化条件下识别效果更加鲁棒。

## 参 考 文 献

- [1] 郑方,艾斯卡尔·肉孜,王仁宇,等.生物特征识别技术综述[J].信息安全研究,2016,2(1):12-26.
- [2] Zou X, Kittler J, Messer K. Illumination invariant face recognition: a survey [C]//IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems, 2007: 1-8.
- [3] Ahonen T, Hadid T, Pietikäinen M. Face description with local binary patterns: application to face recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(12):2037-2041.
- [4] Tan X, Triggs B. Enhanced local texture feature sets for face recognition under difficult lighting conditions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6):1635-1650.
- [5] Liao H. Region description using extended local ternary patterns [C]//IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2010: 1003-1006.
- [6] Zhang T, Tang YY, Fang B, et al. Face recognition under varying illumination using gradient-faces [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(11):2599-2606.
- [7] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. Prentice Hall, 2008.
- [8] Shan S, Gao W, Cao B, et al. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [C]//IEEE Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures. 2003:157-164.
- [9] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3):451-462.
- [10] Wang H, Li S Z, Wang Y, et al. Self-quotient image for face recognition [C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2004: 1397-1400.
- [11] Wang B, Li W, Yang W, et al. Illumination normalization based on Weber's Law with application to face recognition [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(8):462-465.
- [12] Chen J, Shan S G, He C, et al. WLD: a robust local image descriptor [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(9):1705-1720.
- [13] Biglari M, Mirzaei F, Ebrahimpour-Komeh H. illumination invariant face recognition using SQI and weighted LBP histogram [C]//IEEE Pattern Recognition and Image Analysis. 2013:1-7.
- [14] 王刘涛,李肖立.自商图像优化加权 LBP 直方图的光照变化人脸识别[J].科学技术与工程,2014,14(28):98-103.
- [15] Fechner G T, Adler H E, Howes D H, et al. Elements of psychophysics [M]. Psychological Bulletin, 1966.
- [16] Sim T, Baker S, Bsat M. The CMU Pose, illumination, and expression (PIE) database [C]//IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, IEEE, 2002:46-51.
- [17] Basri R, Jacobs D W. Lambertian reflectance and linear subspaces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2):218-233.
- [18] Grigoryan A M, Agaian S S. Tensor form of image representation: enhancement by image-signals [J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2003(5014):221-231.

### (上接第 219 页)

- [13] 肖安邦.基于机器视觉的锂电池检测系统开发[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [14] Sato M, Horie K, Hara A, et al. Application of deep learning to the classification of images from colposcopy: [J]. Oncology Letters, 2018, 15(3):3518-3523.
- [15] Li B, Hu X. Effective vehicle logo recognition in real-world application using mapreduce based convolutional neural networks with a pre-training strategy [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 34(3):1985-1994.
- [16] 邓红莉,杨韬.一种基于深度学习的异常检测方法[J].信息通信,2015(3):3-4.
- [17] 韩洪伟,赵晓云.基于机器视觉的高速切片机锂电池极片在线检测系统设计[J].电源世界,2017(5):34-36.
- [18] 杨保亮,杨守良.基于 STM32 和 PWM 的锂离子电池检测系统设计和研究[J].现代电子技术,2018,41(12):120-123.