

文章编号:1004-4213(2010)09-1641-4

基于方向滤波和自商图像的人脸光照补偿*

王晶, 苏光大

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要:为了实时处理恶劣光照条件下的人脸图像,在自商图像的基础上,提出了一种新的人脸光照补偿的方法.该方法首先在人脸三维光照简化模型的基础上,利用方向滤波削弱附着阴影.然后结合高低通滤波器,进一步削弱投射阴影.两者非线性结合,显著改善光照图像的质量.利用 Yale B 数据库提供的光照图像,在 10 万人脸数据库系统中进行测试,结果表明在光照条件恶劣的情况下能显著提高识别率.

关键词:光照补偿;人脸识别;方向滤波;三维光照模型;自商图像

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103909.1641

0 引言

光照问题是人脸检测和识别中的一个非常重要和困难的问题之一.近年来对此提出了很多算法,研究思路主要分为两大类,其一是基于变换的方法,它是在空域或频域上进行线性或非线性变换,以达到消除光照影响的目的;其二是基于光照样本合成的方法,它首先对待识别的人脸光照图像进行光照条件估计,然后通过对标标准光照环境的模拟,将其归一化为标准光照环境下的人脸光照图像,是目前研究较多的光照处理方式,典型的方法有商图像法^[1-2]、光锥体法^[3-5]、球谐函数法^[6-9]和 SSFS 方法^[10-11]等.近年来出现了一些新的方法,如独立成分分析法^[12]等.

较其他方法而言,商图像法不需要三维人脸信息,大大降低了计算复杂度,更适合在实际人脸识别系统中应用.商图像成立的前提条件是假设同类物体具有相同的三维形状、不同的纹理,利用纹理信息进行识别.该方法的优点是它是一种基于类的学习方法,只要一张照片就可以得到对应物体的商图像,缺点是要求物体是凸的朗伯表面,没有考虑镜面反射和阴影,而且假设同类的所有物体具有相同的形状信息,光照条件的不同,以及对样本的选取和训练,都限制了商图像的效果和应用.

自商图像^[13]的理论基础是反射-光照模型.该方法的显著优点是:1)只要计算一幅图像;2)不需要预先对训练集进行训练;3)对人脸图像没有附加假

设.在滤波器核足够小的情况下,自商图像可以完全排除光照的影响,理论上通过足够多的滤波器求得自商图像叠加可以无限逼近人脸自商函数.但是低通滤波器的选取缺乏理论根据,需要多个滤波器得到的结果叠加,不当的选取会削弱图像本质特征.滤波器核过小,图像本生的纹理信息也会丢失,给人脸识别带来困难.

本文在自商图像理论上,提出了基于方向滤波和自商图像的新的人脸光照补偿的算法.一方面,创新地提出了人脸三维简化模型,模拟人脸的光照特性,提出方向滤波器,削弱附着阴影;另一方面,结合高低通滤波器,应用自商图像的方法削弱投射阴影.两者结合,可以取得比较理想的结果.实验结果表明,该方法能够明显的改善人脸的光照特性,显著地提高识别率.

1 人脸的光照三维模型

1.1 朗伯反射模型

朗伯反射模型^[14]假设物体表面具有朗伯表面反射特性,当光照射到这样的物体表面上时,沿各方向都有相同的散射,亦即它的漫反射分量与观察者的位置无关,只与物体表面特性以及光源的入射角有关.朗伯漫反射模型表达式为

$$I(x, y) = \rho(x, y) n^T(x, y) s_j \quad (1)$$

式中 (x, y) 表示物体图像中的一个像素点; $I(x, y)$ 是物体的亮度; $\rho(x, y)$ 是该点的表面反射率,反映了人脸的纹理信息; $n^T(x, y)$ 表示物体的表面法向量,反映了人脸的形状; s_j 是点光源的方向,它可以任意地改变.

由于人脸表面是一个三维结构,对于一定方向

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAK08B07)资助
Tel:010-62781434 Email:jwang08@mails.tsinghua.edu.cn
收稿日期:2008-12-02 修回日期:2009-01-16

的点光源,由于各部分之间的遮挡关系,在其后面的部分区域不能被光照射到,从而产生阴影.

根据 shashua^[15]的分类,将阴影分为两种类型,分别是附着阴影和投射阴影,如图 1 所示.如果物体表面上的某个点 P 的法向量与光源的入射方向的夹角为钝角,则称点 P 是位于附着阴影中的一个点.如果物体表面上的某个点 P 位于光源被其它物体或物体本身的其它部分遮挡处,称 P 点位于投射阴影中的一个点.

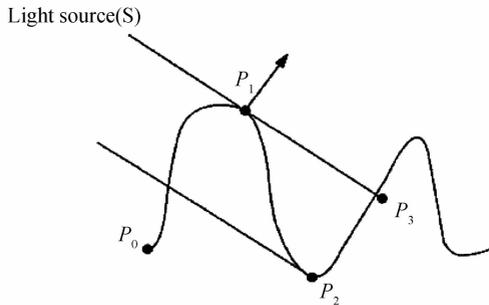


图 1 阴影的分类
Fig. 1 Classification of shadows

图 1 中,从 P_0 到 P_1 区域内由于光线与物体表面法向量的夹角小于 90° ,这一部分的区域可以用朗伯模型公式表示;在 P_1 到 P_2 区域内由于光线与物体表面法向量的夹角为钝角,这一部分属于附着阴影.

区域 P_2 到 P_3 物体表面法向量与光线的夹角小于 90° ,但是由于自身形状的遮挡,如鼻部的遮挡,而产生阴影,这一部分属于投射阴影.

1.2 人脸三维建模

当忽略由于遮挡而产生的投射阴影,仅考虑附着阴影时,可以将人脸简化为一个立体几何模型.如图 2(a).

虚线区域表示的是 2 个圆锥相对组成的立体图形,其中实线区域为正面可见人脸区域.圆锥顶角分别都小于 5° , $\beta=120^\circ$.入射光线可以看成平行光,入射角与水平面的夹角为 δ ,与垂直的对称平面的夹角位 ϕ ,其中 $-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$, $-\frac{\pi}{3} \leq \beta \leq \frac{\pi}{3}$.由于圆锥顶角很小,人脸模型可简化为圆柱体面的一部分,如图 2(b), $-\frac{\pi}{3} \leq \beta \leq \frac{\pi}{3}$.

在 β 处,入射光与表面法向量 n 的夹角 γ 为 $\gamma = \arccos(\sin(\delta) \cos(\phi - \beta))$ (2)

由式(2)知,在已知入射角 δ, ϕ 的前提下, γ 只与 β 有关.将朗伯漫反射模型变形为 I 与 γ 的关系

$$I(\alpha, \beta, R) = \rho(\alpha, \beta, R) \cos(\lambda) = \rho(\alpha, \beta, R) \sin(\delta) \cos(\phi - \beta) \quad (3)$$

可见光强同样仅与 β 有关,图像亮度随 x 变化呈现

明显的带式分布.

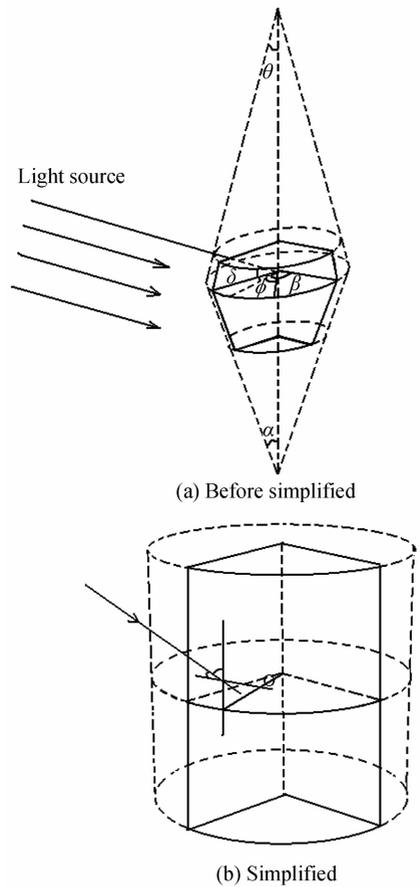


图 2 人脸的简化立体模型
Fig. 2 Simplified 3D model of human face

2 算法实现

2.1 附着阴影光照补偿

由式(3),将圆柱侧面投影到平面上,光强为 $I(x, y) = KI(\alpha, \beta, R) \sin(\beta) =$

$$K\rho(\alpha, \beta, R) \sin(\delta) \cos(\phi - \beta) \sin(\beta) = \frac{K}{4} \rho(\alpha, \beta, R) \sin(\delta) [\sin \phi + \sin(2\beta - \phi)] = C + A\rho(\alpha, \beta, R) \sin 2\beta \quad (4)$$

式中 $x = f(\beta), y = g(\alpha)$, 由于 $-\frac{\pi}{3} \leq \beta \leq \frac{\pi}{3}$, 所以图像 x 轴对应了 $4/3$ 个周期.

对图像进行离散余弦变换

$$C(u, v) = \alpha(u) \alpha(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2M} \right] \cos \left[\frac{\pi(2y+1)v}{2N} \right] \quad (5)$$

$u=1, 2$ 的两个向量,对应了图像沿着 x 轴的周期.取之进行 DCT 反变换

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \alpha(u) C(u, v) \cdot \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2M} \right] \cos \left[\frac{\pi(2y+1)v}{2N} \right] \quad (6)$$

根据自商图像理论

$$R_1 = I/f \quad (7)$$

2.2 投射阴影光照补偿

选取 7×7 尺寸的高斯低通滤波模板 F , 对图像 I 进行卷积. 根据自商理论,

$$R_2 = I/(F * I) \quad (8)$$

2.3 组合

为了降低噪声, 提高信噪比, 对 R 进行非线性变换

$$D = T(R) \quad (9)$$

式中, T 为非线性变换函数.

对数函数能够近似模拟人眼的视觉特性^[16-17], 一定程度上改善信噪比, 所以对 R 分别进行对数变换.

最后将变换后的数据进行线性叠加, 得到改进的商图像:

$$R = c_1 D_1 + c_2 D_2 \quad (10)$$

3 实验分析

3.1 人脸数据库

Yale B 人脸数据库^[18] 提供了不同光照条件下的人脸图像. 它由 5 760 幅人脸图像组成, 10 个人每人分别在 576 种条件 (9 种姿态 \times 64 种光照条件) 下拍摄的人脸图像. 为了专门研究光照情况, 仅选取其正面光照图像作为研究对象. 其点光源的位置由一对经纬值唯一确定, 其经度的变化范围是 $(-130, +130)$, 纬度的变化范围是 $(-40, +90)$. 依照光照角度的不同, 人脸图像被分为 6 类, 如表 1. 将第一类样本加入数据库用来识别.

3.2 光照补偿效果比较

表 1 光照图像分类

Types	1	2	3	4	5	6
Angel/(°)	0	1~12	13~25	26~50	51~77	>77
Samples	10	60	110	130	150	190

由图 3 知, 自商图像能够消除光照造成的投射阴影和附着阴影, 同时也消除原有图像大量信息. 本

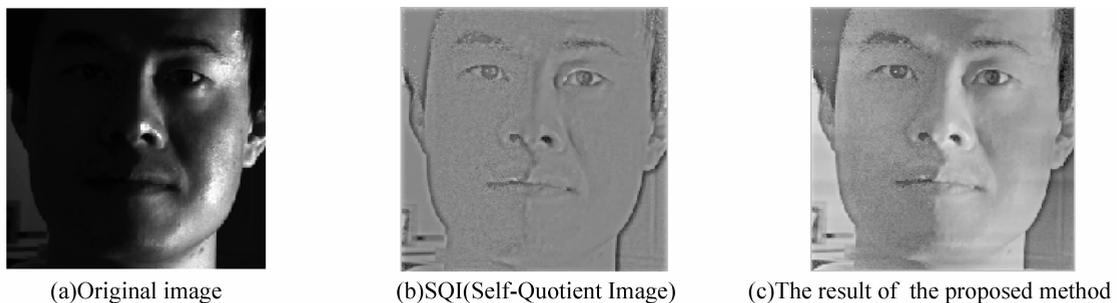


图 3 光照补偿结果
Fig. 3 Illumination compensation results

实验方法的处理结果在保留了原有图像信息的基础上, 较好地进行了光照补偿, 结果比较理想.

3.3 识别实验

首先将原始标准图像加入 10 万数据库系统, 检测识别率; 接着分别将自商图像处理的标准图像以及本实验方法处理的标准图像分别入库, 进行测试. 实验结果 (前 50 名识别率) 如图 4.

在光照条件较好的情况下 (第 2 类, 第 3 类), 原始图像的识别率比较理想, 但当光照条件恶劣时 (第 5 类, 第 6 类), 其识别率急剧下降. 自商图像的方法虽然在光照条件恶劣的情况下改善了识别率, 但是当光照条件较好时, 却大大降低了识别率. 这是因为自商图像的方法在光照补偿的同时削弱了图像的本质属性. 而本实验的方法不仅在光照条件恶劣时改善了识别率, 在光照条件较好时, 也取得较高的识别率. 可见, 基于方向滤波和自商图像的方法有效地改善了光照图像的质量.

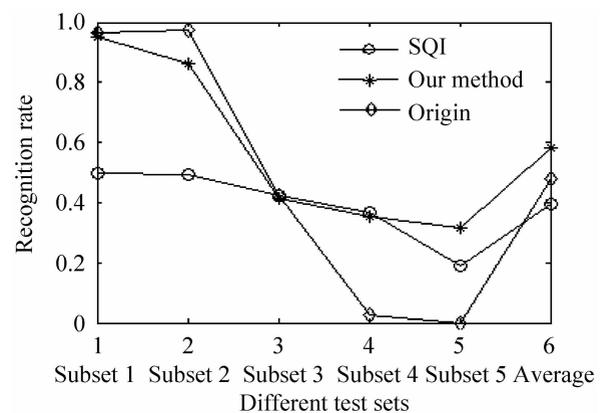


图 4 识别率结果
Fig. 4 Recognition rate results

4 结论

本文为了实时解决恶劣调节光照问题提出了一种新的人脸光照补偿的方法. 实验表明, 基于方向滤波和自商图像理论的方法能够有效地补偿光照造成

的影响,削弱投射阴影和附着阴影.此方法具有3个显著优点:1)不需要训练样本集,不需要附加模板;2)速度快,可以应用于实时识别系统;3)效果好,尤其在光照条件恶劣时能显著提高识别率.不可否认的是,光照造成的影响不能完全消除,识别率还有待进一步提高.

参考文献

- [1] SHASHUA A. On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **21**(1-2):99-122.
- [2] NAYAR S K, BOLLE R. Computing reflectance ratios from an image[J]. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(10):1529-1542.
- [3] GEORGHIADES A S, BELHUMEUR P N, KRIEGMAN D J. from few to many: illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, **23**(6):643-660.
- [4] GEORGHIADES A S, KRIEGMAN D J, BELHUMEUR P N. Illumination cones for recognition under variable lighting: faces [C]. *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1998:52-58.
- [5] BELHUMEUR P, KRIEGMAN D. What is the set of images of an object under all possible illumination conditions[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, **28**(3):245-260.
- [6] WEN Z, LIU Z, HUANG T. Face relighting with radiance environment maps [C]. *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, **2**:158-165.
- [7] RAMAMOORTHI R, HANRAHAN P. On the relationship between radiance and irradiance: determining the illumination from images of a convex lambertian object[J]. *JOSA A*, 2001, **18**(10):2448-2459.
- [8] QING L, SHAN S, CHEN X. Face relighting for face recognition under generic illumination[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004:733-736.
- [9] ZHANG L, SAMARAS D. Face recognition under variable lighting using harmonic image exemplars[C]. *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, **1**:19-25.
- [10] ZHAO W, CHELLAPPA R. SFS based view synthesis for robust face recognition [C]. *Proceedings of the 4th International Conference on Face and Gesture Recognition*, 2000:285-292.
- [11] ZHAO W, CHELLAPPA R. Illumination-insensitive face recognition using symmetric Shape-from-Shading [C]. *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000:1286-1293.
- [12] ZHENG Zhen, ZHANG Yan-xin, HU Ying-xin, et al. Distribution of images of same face under variant light conditions in independent component analysis subspace[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):1067-1070.
- 郑震,张延妍,胡颖新,等.照明变化人脸图像在独立成份分析空间中的分布[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5):1067-1070.
- [13] WANG H, LI S, WANG Y. Face recognition under varying lighting conditions using self quotient image [C]. *Proceedings, Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2004:819-824.
- [14] GUO Dong-ming, NIAO Xiu-chun, WANG Xiao-ming, et al. Illumination model for fast measurement of free-form surface[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, **38**(51):7-11.
- 郭东明,鸟秀春,王小明,等.一种适合于自由曲面快速测量的光照模型[J]. *机械工程学报*, 2002, **38**(51):7-11.
- [15] SHASHUA A. Geometry and photometry in 3D visual recognition [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [16] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(3):451-462.
- [17] JOBSON D D, RAHMAN Z U, WOODDELL 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.
- [18] The Yale face database B and The extended yale face database B[DB/OL]. [2008-11-20]. <http://cvc.yale.edu/projects/yalefaces>.

Illumination Compensation Based on Direction Filter and Self Quotient Image

WANG Jing, SU Guang-da

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new method is proposed to process facial image in bad lighting condition instantly. Based on simplified 3-D face illumination model, direction filter is used to weaken the attached shadow, and gaussian low pass filter is used to weaken the casted shadow. Image quality is greatly improved by the non-linear combination of the two methods. Experiment results demonstrate that the robust face recognition rate can be improved effectively by the proposed method under bad lighting conditions.

Key words: Illumination compensation; Face recognition; Direction filter; 3D illumination model; Self quotient image



WANG Jing was born in 1986. Now she is a Ph. D. degree candidate at Department of Electronic Engineering at Tsinghua University. Her research interests focus on image processing.



SU Guang-da was born in 1948. Now he is a professor at Tsinghua University and his research interests focus on pattern recognition and high-speed image processing.