

# 经典光照模型实现人脸图像光照方向准确估计

陈晓钢<sup>1</sup>, 陆 玲<sup>1</sup>, 刘向阳<sup>1,2</sup>

CHEN Xiao-gang<sup>1</sup>, LU Ling<sup>1</sup>, LIU Xiang-yang<sup>1,2</sup>

1. 东华理工大学 信息工程学院, 江西 抚州 344000

2. 鄱阳医学院 计算机中心, 湖北 十堰 442000

1. College of Information Engineering, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi 344000, China

2. Computer Center, Yongyang Medical College, Shiyan, Hubei 442000, China

E-mail: jhredblack@yahoo.com.cn

**CHEN Xiao-gang, LU Ling, LIU Xiang-yang. Accurate estimation of face image illuminating direction based on classical lighting model. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(11): 203-205.**

**Abstract:** Illumination analysis plays an important role in face recognition and tracking systems. A new approach is proposed to solve the parameters of the illumination includes energy and direction, which is developed based on the model of diffuse reflection and ambient reflection. A large number of experiments show the algorithm converges quickly, and the light could fit the image precisely, the estimated light direction averagely deviated from the angle of true azimuth is 5.43°. Another advantage of the algorithm is it could cope with the different pose, which means the capability of synthesizing the face image in an arbitrary pose and illuminating condition.

**Key words:** illumination estimation; illumination fitting; image synthesis

**摘 要:** 光照分析对人脸图像的识别与跟踪有重要意义, 提出一种人脸图像光照参数准确估计算法。该算法根据光照模型构造光照参数求解的迭代方程, 光照参数根据不同需要可同时包含光照能量, 光照方向矢量和环境光能量等信息。实验显示迭代过程能迅速收敛, 并且光照角度估计准确, YaleB 实验数据的水平角度估计平均错误率仅为 5.43°。由于算法隐含了人脸姿态描述, 因此其另一优势是可以同时对人脸姿态和光照条件进行综合分析, 大量实验测试说明该算法用于光照估计有效可行。

**关键词:** 光照估计; 光照拟合; 图像合成

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.11.061 **文章编号:** 1002-8331(2009)11-0203-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

## 1 引言

人脸图像的光照运算很早就已经受到研究者充分重视。在人脸识别系统中, 识别的输入特征必须是光照不变的人脸特征, 文献[1]的商图像就是这样的一种近似特征, 类似的又有研究者提出自商图像光照处理等方法。若系统中采用了人脸三维模型, 那么模拟光线的更好方法是根据光线条件用 Phong 光照模型模拟图像的光照。这种方法处理光线非常灵活, 并能用于特定光照环境的图像识别与跟踪系统。为此估计图像光照条件是这类系统的首要环节, 文献[2]提出基于分叉树和 SVM 的方法估计人脸图像光照方向, 将光照方向按水平和垂直转角分为一系列角度空间作为目标分类对输入图像光照分类, 分类准确率达到 89.16%。研究表明一定假设条件下朗伯凸表面图像可表示为该凸表面 9 个球面谐波基图像的线性组合<sup>[3]</sup>, 这 9 个线性组合系数反映了图像光照情况。文献[4]基于该方法估计图像的光照系数, 并将该系数用于光照方向的估计与光照补偿, 其中光照估计也是基于分类器的设计。这两类方法都是基于分类器设

计, 并只计算特定姿态如正面姿态时的光照方向。本文提出新的光照估计算法, 该方法直接运用光照模型快速迭代求解光照参数, YaleB<sup>[5]</sup>正面像的光照检测实验结果显示该算法对水平方向角度检测平均误差仅为 5.43°。算法采用线性方程迭代因此计算速度很快, 此外另一优势是它能根据不同人脸姿态对光照参数求解, 因此它能用于不同姿态和光照条件的人脸图像合成。

## 2 人脸图像映射基本模型

本文的光照分析结合了人脸的三维形状, 因此本章先描述人脸从三维映射到二维图像的基本方程。这里采用正射投影模型, 令三维空间中某一点为  $[x, y, z]'$ , 二维平面中的投影为  $[\tilde{x}, \tilde{y}]'$ , 三维旋转阵为  $R$ , 平面内平移向量为  $t$ , 则映射方程为:

$$[\tilde{x}, \tilde{y}]' = f \cdot P \cdot R \cdot [x, y, z]' + t, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, R \in R^{3 \times 3}, t \in R^{2 \times 1} \quad (1)$$

为了将所有参数描述为一个向量, 将上式变形得到如下形式:

**基金项目:** 江西省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Jiangxi Province of China under Grant No.2007GZS0472)。

**作者简介:** 陈晓钢(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与模式识别; 陆玲(1962), 女, 教授, 主要研究方向为计算机图形图像处理; 刘向阳(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与模式识别。

**收稿日期:** 2008-09-12

**修回日期:** 2008-12-24

$$[\tilde{x}, \tilde{y}]' = X(x, y, z) \cdot M \quad (2)$$

$$X(x, y, z) = \begin{bmatrix} x, y, z, 1, 0, 0, 0 \\ 0, 0, 0, 0, x, y, z, 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$M = [q_{11}, q_{12}, q_{13}, t_x, q_{21}, q_{22}, q_{23}, t_y]' \quad (3)$$

上述公式中上标撇号表示转置。由式(2)可知由四对以上特征点就能用最小二乘法求出参数  $M$  向量, 假定人脸朝前方(即非背对相机拍摄)则  $M$  向量又可以唯一分离出式(1)中的各个未知参数。从而由少数特征点信息, 就可以确定三维人脸所有顶点到二维图像的映射。因此可以用特征点自动检测技术或直接手工标定求  $M$  向量。另外计算过程中还需要根据深度信息对投影结果消隐, 因此引入有效顶点的定义:

**定义 1** 人脸模型中三维顶点是相对参数  $M$  的有效顶点, 当且仅当该顶点经过参数  $M$  投影后, 二维图像上该点可见, 即未被消隐。这类顶点只与姿态有关, 与光照方向无关。

人脸的三维数据采用 BJUT-3D-R1 三维人脸库<sup>[6]</sup>, 该人脸库对采集的人脸三维数据进行了各种去噪和标准化处理。数据库里包含了人脸三维顶点, 纹理以及三角形面片的信息。三维顶点通过式(2)可以映射到图像坐标; 纹理可以用于投影结果的图像显示, 下文计算方程时将纹理 RGB 信息变换为灰度信息处理; 三角形面片信息则可以转化为光照计算模型所必需的顶点法向量信息。预先计算出模型上各顶点法向量, 程序计算时直接从文件读入法向量数据即可。

### 3 光照估计

一般场景中光照往往比较复杂, 比如多光源, 混合的环境光和各种邻近物体的反射光等等。过于复杂的光照拟合计算会使数值计算不稳定, 为此主要考虑光照的主要成分。根据 Phong 光照<sup>[7]</sup>模型, 可以表达出包含环境光, 漫反射光以及镜面反射光的真实感效果。包含环境光和单一平行光的 Phong 模型计算公式可以表述为:

$$I = R \cdot a + R \cdot L \cdot \cos\theta + R_d L \cos^2\varphi \quad (4)$$

上式包含了三个成分, 分别是环境光、漫射光和镜面反射光。其中  $R$  表示人脸表面光照的反射率, 该信息隐含在三维人脸库的纹理信息中;  $R_d$  为镜面光的反射率,  $a$  表示环境光强度,  $L$  为主光源的光照强度,  $n$  体现镜面反射光的会聚系数,  $\theta$  为主光源照射方向和该点表面法向量的夹角,  $\varphi$  为镜面反射方向和视线方向的夹角。上式公式的光源只有两部分即环境光和主光源, 主光源的信息则包含了光源的强度  $L$  和光照方向。本文的目的是分析主光源的光照方向, 因此重点考虑环境光和漫反射光。因为漫反射光照计算中充分包含了光照方向信息, 覆盖了人脸大部分光照, 而环境光一般情况下则是分析中不可缺少的。镜面光相对而言能量要小很多。因此直接考虑环境光和漫射光, 实验显示这种近似已经能够比较准确计算光照角度。同时这种简化极大提高了计算速度。

#### 3.1 只有单一光源的光照估计

实验室的光照分析中常用到单一光源, 本节给出这种情况下的脸图片光照角度估计算法。光源中包含两个成分, 光照强度和方向矢量(单位向量), 将其表述为:  $l = L \cdot l_u$ 。  $l_u$  为光照的方向单位矢量,  $L$  则是式(4)中的光照强度。引入顶点法向量记号  $n$ , 并舍弃环境光和镜面反射光成分, 顶点的亮度可以表示为:

$$I = R \cdot L \cdot \cos\theta = R \cdot L \cdot (l_u \cdot n) = R \cdot l \cdot n \quad (5)$$

为此, 估计出  $l$  就能得到光源方向。结合三维模型到二维图像的映射方程就能定义误差函数。虽然模型的人脸形状和图像中

的人脸形状会有些差异, 如大鼻子小眼睛情况, 但同商图像的分析方法类似, 可以假设人脸形状基本相同, 而且大量的像素信息已经给光照估计问题提供了足够的冗余。对于光照反射系数, 实际上人脸各顶点该值基本相似除了眉毛、眼睛、嘴唇等部位, 表现光照的主要因素是人脸形状。实验显示即使全部有效顶点的反射率设为相同值也能准确的估计出主光源的光照角度。另一种方法则是将均匀光照条件下的人脸纹理作为反射率的近似值, 其中包含了光照能量成分, 但这种方法不容易获取因为数据只能有人脸数据库给出。顶点的法向量我们由数据库人脸模型的三角面片计算得到。

计算光照时必须考虑有效顶点中的两类点, 第一类点是主光源光线可到达的顶点, 记为集合  $V_0$ , 剩下的点则是只受环境光作用的顶点, 记为  $V_1$ 。注意这两类集合随光照向量的调整会改变。令人脸模型中某点的三维坐标为  $X$ , 该点由式(2)映射得到的图像二维坐标为  $\phi(X, M)$ , 将  $X$  点的法向量记为  $n(X)$ , 三维顶点的反射率记为  $G(X)$ , 该点对应的光照检测图像上的灰度为  $F(\phi(X, M))$ 。  $l$  和  $n(X)$  均为三维列向量。定义光照向量  $l$  的增量  $\Delta l$  表示的误差函数:

$$E(\Delta l) = \frac{1}{2} \sum_{x \in V_0} [G(X) \cdot (l + \Delta l)' n(X) - F(\phi(X, M))]^2 \quad (6)$$

注意式(6)中除  $\Delta l$  外的函数或变量都已经确定, 光照向量  $l$  则是当前的迭代解, 首次运算时  $l$  初始化为  $[0, 0, 1]'$  向量, 因此通过迭代求增量  $\Delta l$  就能调整光照向量, 即  $l = l + \Delta l$ 。从式(6)中可以看出求增量  $\Delta l$  的依据是最小化由模型拟合的灰度与该点在测试图像上的灰度差的平方和。为最小化(6)式, 将其对  $\Delta l$  求偏导并令其为零, 就能表达出  $\Delta l$  的计算方程, 为方便下文书写, 将各函数表达成简洁形式:  $G(X) \triangleq G, F(\phi(X, M)) \triangleq F, n(X) \triangleq n$ 。则  $\Delta l$  计算方程如下:

$$\sum_{x \in V_0} (G^2 \cdot nn') \Delta l = \sum_{x \in V_0} (F - G \cdot l' n) G \cdot n \quad (7)$$

上式方程左边为  $3 \times 3$  矩阵与  $\Delta l$  的乘积, 右边则是三维列向量, 因此它是线性方程, 很容易求出  $\Delta l$ 。总结光照向量  $l$  的解法如下:

**算法 1** (1) 由输入图像经过特征点检测得到  $M$  向量。

(2) 由  $M$  向量计算人脸模型中的有效顶点。

(3) 初始化  $l$  向量为  $[0, 1, 1]'$ 。

(4) 由  $l$  向量计算有效顶点中的  $V_0$  顶点集。

(5) 根据式(7)求出增量  $\Delta l$ , 并更新  $l = l + \Delta l$ 。

(6) 若满足退出条件则退出, 否则转入步骤(2)继续迭代。

退出条件可将  $\Delta l$  的范数作为收敛性的判断条件, 并设置最大迭代次数。若输入图像为正面姿态, 则步骤(2)可以忽略, 因为只取脸部区域作为顶点集以提高计算速度。步骤(2)和(4)都可通过消隐方法实现。

像 YaleB 人脸库, 因为环境光很少, 因此上述估计算法已经能较准确计算出光照方向。但很多情况下环境光占据了很大部分的光照能量, 这时该算法就显示出弱点。下文给出带环境光情况下的光照估计, 此时问题的求解变为两个参数, 向量  $l$  和标量  $a$ , 通过这两个参数我们可以基本拟合出人脸图像的光照环境。

#### 3.2 含环境光的光照估计

计算中仍舍弃镜面反射光。含能量为  $a$  的环境光和另一主光源  $l$  的图像光照拟合, 必须分别考虑两类有效顶点集  $V_0$  和  $V_1$ , 因为它们光照能量构成不同。定义误差函数如下:

$$E(\Delta l, a) = \frac{1}{2} \sum_{x \in V_0} [G(X) \cdot (a + (l + \Delta l)' n(X)) - F(\phi(X, M))]^2 +$$

$$\frac{1}{2} \sum_{x \in V_1} [G(X) \cdot a - F(\phi(X, M))]^2 \quad (8)$$

上式中  $V_0$  集合的顶点由两部分能量构成, 因此第一部分同时包含参数  $a$  和  $l$ ; 而  $V_1$  集合则不含光照  $l$  的能量。上式对  $\Delta l$  和  $a$  求偏导并令其为零, 并运用方程式(7)的记号, 得到下列方程:

$$\sum_{x \in V_0} (G^2 \cdot nn') \Delta l = \sum_{x \in V_0} [F - G \cdot (a + l' \cdot n)] G \cdot n \quad (9)$$

$$\left( \sum_{x \in V_0, V_1} G^2 \right) a = \sum_{x \in V_0, V_1} F \cdot G - \sum_{x \in V_0} G^2 \cdot n' l \quad (10)$$

因为计算  $a$  时,  $l = l + \Delta l$  故式(10)未写出  $\Delta l$ 。大量实验发现  $a$  迭代时相邻值会“颠簸”, 为此更新  $a$  时取式(10)解和上次解的平均值, 此时迭代次数基本少于算法一迭代次数的两倍。因为式(9)和式(10)的求解可以在同一个编程的函数中实现因此算法是很高效的, 将这两个式子替换到算法1中的步骤(5)的式(7)就得到含环境光  $a$  和光源  $l$  的估计算法。该算法既可用于估计图像中主光源的光照向量也可用作图像光照拟合。

## 4 光照检测实验

### 4.1 算法1的光照方向检测

该算法迭代的收敛速度很快, 对 YaleB 的人脸光照方向检测平均迭代次数为 8 次, 因此一幅图片的光照检测时间很短。从算法1可以计算得到  $l$  向量, 为了将实验结果与 YaleB 人脸库的标准光照角度, 即水平角度 azimuth 和垂直角度 elevation 作比较, 需要将  $l$  向量转换为这两个角度, 借助简单三角函数转换就能实现。对前 7 个人物正面姿态, 每人 51 个光照图片进行了光照角度检测, 由于 2 号人物有 1 幅图片本身错误, 因此共 356 幅图片进行光照检测统计。51 个光照是指 64 个光照中除了  $|\text{azimuth}| > 100$  的 12 个以及  $\text{elevation}$  为 90 的 1 个。计算每幅图片检测的角度与真实角度的误差, 然后统计每个人物  $\text{azimuth}$  和  $\text{elevation}$  的检测误差的平均值, 统计结果如图1所示。图中水平方向表示 7 个不同个体, 垂直方向表示 51 类光照的角度检测误差平均值。所有图片的水平光照角度检测误差平均值为 5.43, 垂直角度误差平均值为 6.55。

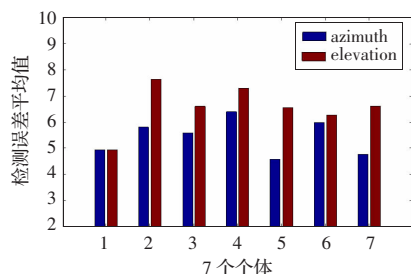


图1 YaleB 人脸库光照角度检测误差统计图

从图1中可以看出水平角度检测普遍比垂直角度检测准确, 由于数据原因我们只有中国人的脸型作为模板。对所有图片光线检测都采用 BJUT-3D-R1 人脸库的女 28 号作为人脸模型。如果可以用外国人的三维人脸模型, 并在光线估计前通过人脸可变形模型拟合人脸形状那么估计值一定会更加准确。但图1统计数据已经说明了本文算法对光照的估计能力。对于不同姿态情况, 本文算法同样可以给出光照估计。从式(6)可以看出估计的光照角度始终相对于人脸法向量的坐标系, 因此求出的光照角度结合人脸姿态的角度就能求出世界坐标系的光照角度。

### 4.2 含环境光人脸图像的光照拟合

实际情况中经常需要拟合含环境光的人脸图像, 图2显示

了含环境光的拟合与单独光源的拟合效果图。图2第二幅图中可以看出由于只有单一光源拟合, 人脸右侧轮廓由于缺少光线已不可见, 而有环境光的第三幅图则克服了该缺点, 模拟更加真实, 光线角度也更准确。由于一般情况都有环境光, 因此用含环境光的光照拟合更能准确模拟图像光照环境。

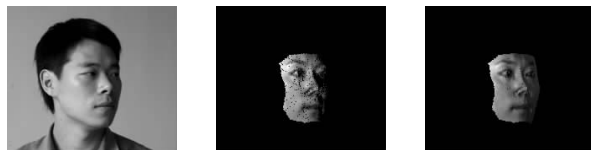


图2 含环境光与不含环境光拟合效果图

有了上述方法, 可以根据拟合的光源求解不同姿态下的人脸图像, 这种方法在含光线分析的人脸图像序列姿态跟踪中很有优势。图3演示了图2人脸姿态从侧面转变到正面, 并以原始姿态估计的光源为光照环境计算得到的人脸图像, 旋转过程为每次左转  $15^\circ$ 。

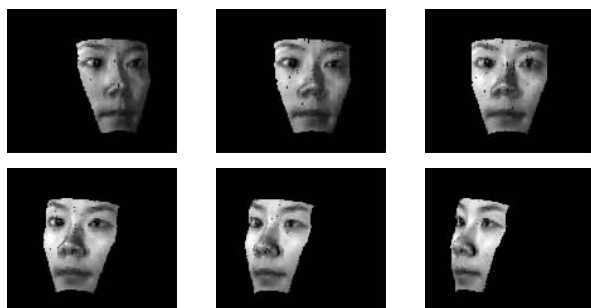


图3 相同光照环境不同姿态的图像生成

## 5 结束语

人脸图像光照分析在人脸识别与跟踪系统中有重要应用, 本文提出基于线性方程的光照估计迭代求解算法, 并通过YaleB人脸库的大量实验验证了算法的估计准确性。由于本文算法中同时隐含了姿态的计算, 因此它能用于姿态和光照的综合分析。三维人脸形状与图像人脸形状的差异是本文估计误差的主要来源, 如何快速有效解决形状差异需要进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] Shashua A, Riklin-Raviv T. The quotient image: class-based re-rendering and recognition with varying illuminations[J]. PAMI, 2001, 23(2): 129-139.
- [2] 孙雪梅, 苏菲, 蔡安妮. 基于分叉树和 SVM 的人脸图像光照方向估计[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1885-1888.
- [3] Basri R, Jacobs D. Lambertian reflectance and linear subspaces[C]// Proceedings of the ICCV'01, Vancouver, Canada, 2001: 383-390.
- [4] 卿来云, 山世光, 陈熙霖, 等. 基于球面谐波基图像的任意光照下的人脸识别[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 760-768.
- [5] Georgiades A S, Belhumeur P N, Kriegman D J. From few to many: illumination cone models for face recognition under differing pose and lighting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 643-660.
- [6] The BJUT-3D large-scale Chinese face database[EB/OL]. (2005-08). <http://www.bjut.edu.cn/sci/multimedia/mul-lab/3dface/face-database.htm>.
- [7] 王汝传, 邹北骥. 计算机图像学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [8] Blanz V, Vetter T. Face recognition based on fitting a 3D morphable model[J]. PAMI, 25(9): 1063-1074.