

基于线性子空间和商图像理论的人脸光照补偿

刘丽华

LIU Li-hua

陕西理工学院 数学系, 陕西 汉中 723000

Department of Mathematics, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China

E-mail: liulihua75@126.com

LIU Li-hua. Facial illumination compensation based on linear subspaces and quotient image theory. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(25): 189-192.

Abstract: Illumination is a pivotal factor in the ratio of face recognition. It is still one bottleneck preventing development of face recognition technique. Based on quotient image theory, the illumination condition is estimated on facial de-dimension illumination training set. The aim of facial illumination compensation is implemented by two basic strategies of adding light and reducing light. And the results show that this improved facial illumination compensation method is effective.

Key words: face recognition; quotient image; illumination compensation; linear subspaces

摘要: 光照是影响人脸识别率的主要因素, 它已成为人脸识别技术发展的瓶颈。根据商图像理论, 在所构造的低维训练集上对待识别的图像进行光照条件估计, 通过加光和去光两种方法, 实现了光照补偿的目的, 并通过识别实验验证了其补偿效果。

关键词: 人脸识别; 商图像; 光照补偿; 线性子空间

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.25.057 文章编号: 1002-8331(2008)25-0189-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391.41

1 引言

光照变化的问题是基于灰度图像的三维目标识别中最困难的问题之一。众所周知, 在很多情况下因光照变化引起的图像变化要比因不同人的身份引起的变化更显著。近年来对此提出了很多算法^[1-5, 6-8], 目前主要研究思路可分为两大类, 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(如直方图变换、log 变换、Exp 变换、二维 Gabor 函数滤波、同态滤波等); 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。

基于变换的思想是把人脸的不同光照图像看作基本信号, 进行去光照的处理, 它是较早的一种对光照问题的处理方式, 有其局限性, 主要是对极端光照条件下(如高光、全黑等情况)的人脸图像处理效果差。基于样本合成的思想是待识别人脸图像添加光照处理, 通过对自然环境光照条件的模拟, 将其转化到标准光照条件下进行识别, 它是目前研究较多的光照处理方式, 代表性的方法有商图像法^[9-11]、光锥体法^[12]、球谐函数法^[13]和 SFSS 方法^[14-15]等。虽然光照锥法在理论上能达到几乎完美的识别结果, 但是它至少需要目标的 9 幅不同光照图像来构造其在任意光照条件下的人脸光照锥, 这对于大多数应用系统来说都太过苛刻。另外, 球谐函数法和对称的 SFS 法都需要较精确的三维人脸深度信息, 而从二维图像恢复其三维结构信息是一

个很复杂的过程, 这就增加了它们在实用上的困难。

商图像概念最早是由 Nayer 等在文献[16]中提出的, 它是两个亮度图像的比值, 代表了图像不随光照变化的物理特性。Nayer 把它作为人脸的不变特征应用于人脸识别中。Shashua 等人^[9-11]把商图像的概念和线性光度学合成理论相结合, 提出了一种由商图像合成不同光照样本的方法。它利用最小能量方程把光照方向估计问题转化为求一组线性方程的近似解问题, 避免了对人脸的精确三维建模, 执行效率较高。但它仅利用三种不同的光照条件来估计所有光照情况, 不能很好地对极端光照条件进行处理; 另外它忽略了人脸自身阴影的存在, 合成样本受阴影影响较明显。本文在商图像理论基础上, 对人脸光照子空间进行详细分析, 利用 9 维线性子空间来模拟自然光照条件, 从而对原商图像方法进行了改进。同时, 给出了两种光照补偿策略, 并进行了光照补偿效果验证。

2 商图像理论

商图像理论须满足的约束条件:

第一, 任何人脸都是凸表面, Belbumeur 在文献[17]中进行了证明, 这表明一个较实际的建立人脸光照子空间的方法就是从整体光照空间均匀、稀疏的采样相对应的图像, 而其它未采样的图像的光照可以由采样图像插值得到, 它为后面的光照样本合成奠定了理论基础;

第二, 人脸表面满足朗伯表面成像公式。这样的人脸图像可

基金项目: 陕西理工学院科研基金项目(No.SLG0630)。

作者简介: 刘丽华(1975-), 女, 讲师, 主要研究领域为模式识别, 图像处理。

收稿日期: 2007-11-29

修回日期: 2008-08-13

以由人脸表面反射率和人脸表面法向量及点光源之间的余弦夹角的乘积表示,即

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

其中 $\rho(x, y)$ 是物体的表面反射率 ($0 \leq \rho(x, y) \leq 1$), 它反映了人脸的纹理信息, 对于不同的人脸存在不同的 ρ , 这里点 (x, y) 是光照灰度图像中的点坐标; $n(x, y)$ 是点 (x, y) 的表面法向量; s 描述点光源方向, 其数值表示光源强度。

第三, 不同人脸满足结构相似性。把不同的人脸当作 3D 形状一致, 仅存在纹理差异的“理想类”来考虑。从后面的实验效果来看, 这样的假设是合理的, 不过这就需要选择经过基本对齐处理后的人脸图像来构成。对于“理性类”中物体的反射率函数满足以下命题成立(具体证明见参考文献[9]):

命题 1 设 ρ_1, \dots, ρ_N 是该理想类中所有物体表面的反射率函数的一组基, 那么这个理想类中任意物体的反射率函数都可以用这组基的线性组合来表示:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \alpha_k \rho_k \quad (2)$$

其中 $\alpha_1, \dots, \alpha_N$ 是和相应基函数关联的一组系数。考虑物体表面形状一致的假设, 在式(2)两端同时乘以 $n^T s_i$

$$\rho n^T s_i = \sum_{k=1}^N \alpha_k \rho_k n^T s_i \quad (3)$$

其中 $\rho_k n^T s_i$ 是反射率为 ρ_k 的物体在点光源 s_i 下所成图像。用 I_k^j 表示 $\rho_k n^T s_i$, I^j 表示 $\rho n^T s_i$, 式(3)可以写成:

$$I^j = \sum_{k=1}^N \alpha_k I_k^j \quad (4)$$

这说明“理想类”中任意一个物体在光照 s_i 下所成的图像可以用同一类物体在相同光照条件下所有图像的线性组合来表示。Shashua 等在文献[9]中给出了 3 维线性重构理论, 即用三幅线性无关光线条件下的人脸图像就能重构出任意光照图像样本。

定义 1 对于待识别目标 y 在点光源 S_0 条件下的人脸图像, 与对应光照条件下的标准目标 a 的商图像定义如下:

$$Q_y = \frac{I_y}{I_a} = \frac{\rho_y(x, y)n^T s_0}{\rho_a(x, y)n^T s_0} = \frac{\rho_y(x, y)}{\rho_a(x, y)} \quad (5)$$

根据命题 1, 根据给定已知目标 a 的三幅不共面光线的图像 (I_1, I_2, I_3), 就能够重构出待识别目标 y 的任意光照条件图像, 公式表示为:

$$I_y = \sum_{i=1}^3 (I_i^* x_i) \otimes Q_y \quad (6)$$

其中 \otimes 表示笛卡儿乘积。

从上面的推导过程可以看出, 要想得到待识别目标的任意光照图像, 必须先求得其商图像。为了避免直接计算目标的商图像, 可以根据已知信息来构造一个训练集, 把问题转化为训练集上的最小能量函数问题来解决。

把训练样本集中的所有人脸光照图像的平均图像作为标准目标, 通过它计算与待识别目标对应的通用商图像, 其定义如下:

$$Q_y = \frac{y}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i\right)_x} = \frac{y}{\bar{A}x} \quad (7)$$

其中, N 为训练集中所有人脸图像的个数, \bar{A} 为 A_1, \dots, A_N 的平均值 $\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$, x 为待识别目标 y 对于平均人脸图像的最小

能量函数系数。构造最小能量函数, 且有下面两个命题成立(具体证明见参考文献[11])。

命题 2 如果目标 y 的反射率系数 ρ_y 可以通过训练集求得, 也就是说, 如果存在系数 $\alpha_1, \dots, \alpha_N$, 使得 $\frac{\rho_y}{\rho_y} = \alpha_1 \rho_1 + \dots + \alpha_N \rho_N$ 成立, 则能量函数

$$f(\hat{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |A_i \hat{x} - \alpha_i y_s|^2 \quad (8)$$

必存在一个最小值 $\hat{x} = x$ 。

命题 3 能量函数 $f(\hat{x})$ 的最小值 x_0 可以表示为 $x_0 = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i$, 当

$$v_i = \left(\sum_{r=1}^N A_r^T A_r \right)^{-1} A_i^T y_s$$

且系数 α_i 是对称齐次方程组

$$\alpha_i y_s^T y_s - \left(\sum_{r=1}^N \alpha_r v_r \right)^T A_i^T y_s = 0, \text{ 其中 } i=1, \dots, N \quad (9)$$

的解。

3 人脸光照子空间分析

虽然 Shashua 等在文献[9-10]中证明了, 在理想朗伯反射模型上, 利用基本的 3 幅线性无关人脸光照图像就能合成所有可能的实际人脸光照图像, 即 3 维人脸光照子空间的概念; 但是它没有考虑到人脸自身阴影问题, 如果原图像有明显的阴影区域, 由其新合成的图像也存在明显的阴影。同时, Basri 等在文献[18]中证明了人脸的前 9 个球谐函数占据了其总能量的 99% 以上, 即用前 9 个人脸球谐函数就能表示所有人脸光照情况; 但这 9 个球谐函数并不是真正的人脸图像, 计算它们需要人脸的三维几何信息, 它只是“抽象的人脸图像”, 无法直接应用于人脸识别。另外, 王海涛在文献[19]中, 对 Yale B 人脸数据库中的同一对象的 64 幅相同姿态不同光照图像进行分析, 通过前 32 幅图像的 PCA 能量和所有图像的 PCA 能量进行对比, 得出了实际的人脸光照子空间维数要远远大于 3 维的结论。因此可以判断, 商图像方法的三维点光源模型过于简单, 无法有效地近似各种光照情况, 这也是原来的商图像方法无法处理复杂光照情况和带阴影图像的原因。

但是为了降低算法复杂度, 在实际的人脸光照补偿算法中不可能去合成太多的光照样本, 我们所期望的最终目的是尽可能地用较低维数的光照子空间来表示所有可能的人脸光照情况。因此, 尽可能降低人脸光照子空间维数而又不影响光照处理效果是光照补偿方法的关键。

Lee 等^[20-21]从人脸识别的角度出发, 在朗伯反射模型和线性光照子空间理论的基础上, 推导出了用 5~9 个实际的人脸光照图像就能够较好的表示人脸光照空间, 满足人脸识别的需要。他们还给出了各个图像的精确点光源在球面坐标系下的位置, 对球面坐标系的定义是以人脸中心为坐标原点, 鼻子正对的方向为 z 轴, x 轴平行与人脸平面, y 轴垂直与人脸平面, 用仰角 ϕ 和方位角 θ 表示该球面坐标下的点光源位置, 其中仰角 ϕ 的变换范围为 $0 \leq \phi \leq 180$, 方位角度 θ 的变化范围为 $-180 \leq \theta \leq 180$ 。其中用 5 个典型人脸光照图像来表示人脸光照空间时, 其点光源位置的球面坐标为 $(\phi, \theta): \{(0, 0), (90, -60), (90, -120), (90, 120), (90, 60)\}$; 用 9 个典型人脸光照条件表示人脸光照空间时, 其点光源位置的球面坐标为 $(\phi, \theta): \{(0, 0), (68,$

-90),(74,108),(80,52),(85,-42),(85,-137),(85,146),(85,-4),(51,67)},其图像如图5所示,其识别率如图6所示。



图1 9种典型光照图像图

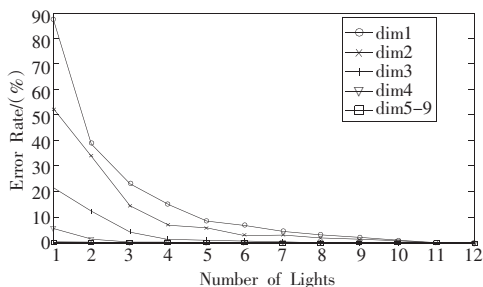


图2 不同子空间维数下的人脸错误识别率

Lee 等为在有限的人脸光照子空间上表示所有可能的人脸光照情况提供了理论依据,因此我们可以仅选择有代表性的9种人脸光照图像来进行任意对象的光照补偿。相对于其他方法而言, Lee 等提出的9种典型光照人脸图像是实际的人脸图像,可以直接应用于人脸检测和识别阶段,为最终的识别提供了直接有效的支持。

4 改进的光照补偿方法

对光照进行处理的一般有两个基本思路,其一是进行不同光照条件下的光照样本合成,得到较丰富的光照样本集,来弥补人脸识别算法中由于光照样本单一的问题;其二是进行去光处理,以消除光照不均匀现象,特别是对极端光照条件下的人脸图像进行校正(如高光、全黑等情况),期望得到在标准光照条件下的人脸图像。下面将给出加光和去光的两种光照补偿策略。

4.1 基于PCA的灰度图像商

商图像是与光照无关的,它是合成新光照样本的基础,因此先给出对商图像的计算方法。由于原始训练样本集空间较大,我们用主成份分析法(PCA)进行降维处理。具体实现步骤:

(1)计算待识别图像 y 在 PCA 子空间上的投影系数

$$f(x) = \min \|y - P \cdot \alpha\| \quad (10)$$

其中, P 是前 k 维特征向量构成的特征子空间 $\{P_1, P_2, \dots, P_k\}$, α 是通过最小能量方程估计出来的待识别图像在特征空间上的投影系数;

(2)根据商图像公式 $Q_y = \frac{y}{P \cdot \alpha}$,求得待识别图像 y 在子空间 P 上的商图像 Q_y 。

4.2 加光补偿算法

根据 Lee 提出的用于人脸识别的最小光照样本理论,只需要合成典型的9种不同光照样本图像就能满足任意光照条件

下的人脸识别要求。在上面得到的待识别目标在训练样本集上的商图像基础上,利用下面公式(11)进行光照样本合成

$$I_k = (A_k \cdot x) \otimes \bar{Q}_y, \quad k=1, \dots, 9 \quad (11)$$

其中, A_k 分别为训练集中9种典型光照图像的平均图像, x 为其在训练样本集上的投影系数。具体步骤总结如下:

- (1)在降维后的训练集上计算待识别人脸商图像;
- (2)求9种典型光照图像的平均图像在降维训练集上的投影系数 x ;
- (3)结合上面求得的商图像,利用公式 $I_k = (A_k \cdot x) \otimes \bar{Q}_y$, 其中 $k=1, \dots, 9$, 合成降维条件下的9种光照合成图像;
- (4)对在降维条件下得到的9种合成图像进行重构,得到原始空间上的9种光照合成图像。

4.3 去光补偿算法

在人脸识别中,需要对极端光照条件(如高光、全黑等情况)下的人脸图像进行校正,以消除光照不均匀现象;也就是说,对人脸图像进行去光处理,得到标准光照条件下的人脸图像。结合上面合成新光照样本的思想,通过合成出标准光照条件下的新人脸光照图像达到去光的目的。一般的标准光照条件指的是光照较均匀的情况,在这里我们把正面光照条件作为标准光照条件。

与前面合成思想相同,利用下面公式12进行标准光照样本重构

$$I_0 = (A_0 \cdot x) \otimes Q_y \quad (12)$$

其中, A_0 为训练集中正面人脸光照图像的平均图像, x 为其在训练样本集上的投影系数。具体步骤总结如下:

- (1)在降维后的训练集上计算待识别人脸商图像 Q_y ;
- (2)正面光照图像的平均图像在降维训练集上的投影系数 x ;
- (3)利用公式 $I_0 = (A_0 \cdot x) \otimes Q_y$, 合成降维条件下的标准光照图像;
- (4)对在降维条件下得到的标准光照图像进行重构,得到原始空间上的标准光照图像。

5 实验结果分析

为了研究专门对人脸光照情况进行研究, Yale B 人脸数据库^[2]提供了不同光照条件下的人脸图像。它由5760幅人脸图像组成,10个人每人分别在576种条件(9种姿态×64种光照条件)下拍摄的人脸图像。为了研究专门光照情况,我们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)。

(1)光照条件提取

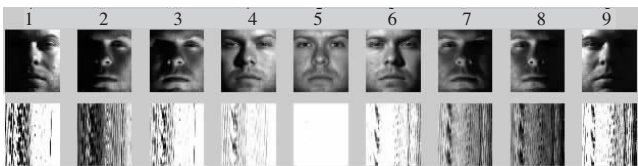


图3 原始图像的光照条件估计

注:第一行是原始训练集上同一人的9种不同光照图像;第二行是相应图像的光照条件估计。

说明,图3是利用PCA变换得到的对训练集中人脸的九种光照条件的估计,其估计效果与原图像光照条件基本吻合。

(2) 商图像



图4 商图像结果对比

需要说明的是,在选取降维 PCA 特征子空间时,用判断条件 $\lambda/\lambda_{i+1} \leq 0.5$ 来选择特征向量(即相邻两个特征值的比值小于 0.5)。从图中可以看出,由原商图像方法计算的商图像明显包含光照条件的影响,而改进图像的结果已基本与光照无关。

(3) 加光效果图

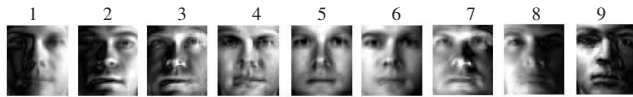


图5 光照样本合成

从图 3 和图 5 的对比可以看出,新合成的同一人的 9 种不同光照图像能很好地近似基准图像中的光照条件,得到的合成图像已基本与基准图像的光照情况吻合。这说明改进的方法能很好的弥补原商图像方法不能处理带阴影图像的缺陷。

(4) 去光效果图



图6 去光效果图

从图 6 可以看出,极端光线条件下的图像受光照影响较大,原始图像上存在较大阴影区域,严重改变了人脸图像区域的灰度分布,这就是导致不能识别的主要原因。虽然直接用它求得的商图像包含噪声,使最终合成的标准光照图像也受到一定程度的影响,但是基本上能达到消除光照影响的目的。下面将在识别过程中对其效果进行验证。

(5) 识别实验

在 Yale B 和扩充 Yale B^[23] 上设计 5 个测试集,每个测试集包含 32 幅人脸图像。第 1 个测试集为正面光照条件下的人脸图像;第 2 个测试集光线角度变化在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 之间的人脸图像;第 3 个测试集光线角度变化在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 之间的人脸图像;第 4 个测试集光线角度变化在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间的人脸图像;第 5 个测试集为光线角度变化大于 75° 的人脸图像。此外,选取 38 幅正面光照人脸图像作为训练集。

分别在上面设计的测试集上进行了实验,在表 1 中给出了在不同情况下的人脸识别率统计。在测试集 1 和测试集 2 上的识别率可达到 100%,这说明光线角度变化较小(小于 15°)的情况下,正面灰度人脸识别精度较高;在测试集 3, 4, 5 上,人脸识别率不同程度有所下降,特别是,在光线角度大于 75° 的情况下人脸识别率下降到 31.2%,可见光照角度的变化对人脸识别率的影响是严重的。然后对原始图像进行光照补偿处理,在补偿图像集合上进行相同的实验,在测试集 3, 4, 5 上的人脸识别率均有了提高,其中对于光线较大变化 75° 的情况补偿效果最好,人脸识别率从 31.2% 提高到 84.3%。总的平均识别率从 70% 左右提高到 90% 左右。

表 1 不同测试集上的人脸识别率

图像	人脸识别率/(%)					平均
	测试集 1	测试集 2	测试集 3	测试集 4	测试集 5	
原图像	100	100	71.86	56.25	31.25	71.87
补偿图像	100	100	93.75	90.63	84.37	93.75

6 结论

人脸识别难度较大,主要受到姿态、表情、光照、年龄、化妆等诸多方面的影响,其中光照是影响人脸识别率的关键因素。传统的光照处理方法比较简单,主要是通过一些基本的图像变换和滤波处理来实现,其效果并不理想。在人脸识别技术从二维发展到三维以后,一些新的思想和方法被提出^[23-25]。从实现方式角度可分为基于线性子空间合成和基于精确三维建模的方法。线性子空间方法利用少量典型人脸光照图像来模拟环境光变化效果,一张人脸光照图像可以利用一到两个主光和 5 到 7 个侧光图像来合成,其中侧光对人脸成像的影响较小,识别时主要依赖其主光源,它可以避免较复杂的三维人脸建模;基于三维建模的光照估计和重构方法相对比较精确,因为它有确定的人脸法向量,不像线性子空间方法完全忽略了人脸的形状信息,但由于需要人脸三维信息,其执行效率较低。在基于线性子空间合成方法中,寻求其主光源图像是关键;而基于精确三维模型方法中,建立相对精确而有效的三维人脸模型是其关键。此外,光照和姿态与表情是密切相关的影响人脸识别的三个主要方面,把它们结合起来考虑是人脸识别的实际要求。因此,进一步的研究工作有以下几个方面:

(1) 基于线性子空间的方法:寻求恰当的人脸光照子空间表示;

(2) 基于精确三维建模的方法:进行较精确光照条件估计;

(3) 光照问题和其它问题相结合的识别模型建立:特别是与姿态和表情估计结合获得真正通用的人脸模型。

参考文献:

- [1] Adini Y, Moses Y, Ullman S. Face recognition: the problem of compensating for illumination changes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7): 721-732.
- [2] Jacobs D W, Belhumeur P N, Basri R. Comparing images under variable illumination[C]// Proceedings Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, 1998: 610-617.
- [3] Zhao W, Chellappa R. SFS based view synthesis for robust face recognition[C]// Proceedings of the Face and Gesture Recognition 2000. Washington: IEEE Computer Society, 2000: 258-292.
- [4] Qing L Y, Shan S G, Gao W, et al. Face recognition under generic illumination based on harmonic relighting[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2005, 19(4): 513-531.
- [5] Diu D H, Lam K M, Shen L S. Illumination invariant face recognition[J]. The Journal of the Pattern Recognition Society, 2005, 38: 1905-1716.
- [6] 刘宏, 李锦涛, 苗军. 多方法融合来解决人脸检测中的光照补偿[J]. 系统仿真学报, 2001(13): 486-489.
- [7] 郑军, 徐春广, 肖定国, 等. 数字图像中照度不均匀校正技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 284-289.
- [8] 张忠波, 马驹良, 马捷. 小波和神经网络在人脸光照校正中的应用[J]. 吉林大学学报, 2005, 43(2): 162-166.

(下转 218 页)