

基于图像子空间的改进商图像方法

刘俊 黄向生 王阳生

(中国科学院自动化研究所-韩国三星综合技术院人机交互联合实验室 北京 100080)

摘要 光线变化将显著降低人脸识别系统的性能。Shashua et al.^[4]提出了一种处理人脸识别中的光线变化问题的简便方法——商图像方法。在本文中,我们从图像子空间的角度对商图像方法进行了分析,理论分析和实验表明,这种方法存在的主要缺点有:1) 不准确的理想类假设;2) 简单的三维点光源模型无法很好地近似任意光照情况。针对这些不足,我们提出了一种基于图像 PCA 子空间的改进商图像方法,以克服这些缺点。我们的方法能够较好地满足商图像方法的理论前提,从而达到更好的图像合成效果和人脸识别性能。

关键词 光线变化,人脸识别,商图像,主元分析(PCA),图像子空间

An Improved Quotient Image Method Based on Image Subspace

LIU Jun HUANG Xiang-Sheng WANG Yang-Sheng

(CASIA-SAIT HCI Joint Lab., Beijing 100080)

Abstract Illumination changes can significantly decrease the performance of face recognition systems. In this paper, we present an analysis of quotient image method^[4] from the view of image linear subspace, and point out its main deficiencies: 1) inaccurate assumption of ideal class of object, 2) 3-d subspace doesn't suffice to represent all images of an object under varying illuminations. An improved method based on image subspace constructed using principal component analysis (PCA) is presented to overcome these deficiencies. Our method can meet the theoretical prerequisites of quotient image method, and achieve better image synthesis and face recognition results.

Keywords Illumination changes, Face recognition, Quotient image, Image subspace

1 引言

人脸识别在商用、民用和军用等众多领域都有着广泛的应用前景。近些年来,人脸识别技术得到了长足的发展。但目前人脸识别仍面临着众多难题,其中光线变化是限制人脸识别系统的性能的一个主要因素。光线变化将使人脸的外观发生很大的改变,同一人在不同光照条件下的人脸图像之间的差异甚至会大于不同人的脸图像之间的差异^[7]。近些年来出现的处理光线问题的几种主要的方法有:光照锥方法^[1~3]、球谐函数子空间方法^[5,6]、商图像方法^[4]。

P. N. Belhumeur 提出的光照锥理论^[1~3]指出一个符合漫反射模型的凸物体在任意点光源组合下的所有图像的集合在图像空间中组成一个凸锥体。基于这一理论的人脸识别算法^[3]达到了优于其它方法的识别效果,但这种方法计算量非常大,并且每个人需要多幅图像。

一个人在同一姿态任意光照条件下形成的人脸图像集合能否用一个低维子空间来近似是很多研究人员关心的问题^[8,9]。Ramamoorthi^[5]和 Basri^[6]分别利用球谐函数理论对此进行了分析,解释了前人的一些经验发现,并得出一个共同的结论,一个 9 维的线性子空间能够用来表示一个物体在所有光照条件下的图像。但要利用球谐函数建立这种子空间,必须知道人脸的表面反射率和三维信息,但现有的三维采集硬件设备过于昂贵,而利用现有的三维重建算法很难准确地获得这些信息。

Shashua et al.^[4]提出了用来处理人脸识别中的光照变化问题的商图像方法,通过图像比可以获得人脸图像的一种不

随光照变化的表示方法。商图像方法抓住了不同人脸的反射率之比这个光照不变量,并且具有需要样本数少、算法实现简单等优点。但它较强的理论假设限制了它的应用(在下文中,我们将对此作详细说明)。

在本文中,我们从图像子空间的角度对商图像方法进行了全新的理解和分析,从理论和实验上指出了商图像的不足之处,并从建立更完备的光照子空间入手提出了一种改进的商图像方法,我们的方法很好地满足了商图像的理论假设前提,从而实现了更好的图像合成和人脸识别效果。

本文第 2 节简要介绍了商图像方法并从图像子空间的角度分析了其局限,第 3 节提出了我们的改进商图像方法,第 4 节给出了实验结果和讨论,最后进行总结。

2 商图像方法及其局限

2.1 商图像方法

我们首先简要介绍一下 Shashua et al. 提出的商图像方法。

人脸可近似看作漫反射表面,也就是说人脸图像 $I(x, y)$ 可以表示为:

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

其中, (x, y) 表示图像中的一个点, $\rho(x, y)$ 是该点的表面反射率, $n(x, y)^T$ 是该点的表面法向量, s 代表光源。在此基础上, Shashua 进一步提出了理想类 (Ideal Class of Object) 的概念,他假设同一类物体拥有相同的三维外形(即 $n(x, y)^T$) 和不同的表面反射率(即 $\rho(x, y)$)。

给定 N 个人在相同的三种不共线光线方向下的 $3 \times N$

幅图像作为样本集 $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, 其中 $A_i = [I_i^1, I_i^2, I_i^3]$, 并有 $\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i = [\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3]$ 。因此, 人脸图像 I_y 对应人脸图像 I_a 的商图像定义为(这里的除法是对应像素点相除):

$$Q_y(u, v) = \frac{\rho_y(u, v)}{\rho_a(u, v)} = \frac{\rho_y(u, v)n(u, v)^T s_y}{\rho_a(u, v)n(u, v)^T s_y} = \frac{I_y}{\rho_a(u, v)n(u, v)^T \sum_{i=1}^3 x_i s_i} = \frac{I_y}{\sum_{i=1}^3 x_i I_i} \quad (2)$$

其中, x_i 是根据样本集 $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 通过最小二乘方法估计得到的, 在计算商图像时选取 $\{\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3\}$ 作为式中的 I_i 。从式(2)中可以看出, 商图像只与反射率信息有关, 而与光照无关。

商图像方法最突出的应用之一是可以用来合成新的光照条件下的人脸图像:

$$I_{\text{new}} = \sum_{i=1}^3 x_i I_i \otimes Q \quad (3)$$

在已知 Q 的情况下, 通过改变系数 x_i , 可以得到新的光照条件下的人脸图像 I_{new} 。这在进行光照归一化时非常有用。

2.2 商图像方法的局限

首先我们通过一个实验来看看商图像方法的不足之处, 我们利用图 1(a) 中的原始图像, 通过它们的商图像(图 1(b))根据式(3)来合成新的光照条件下的图像。从图中可以看出, 当原始图像中存在阴影时, 在商图像中也会有阴影, 这样在合成的图像中也会始终存在阴影, 而当原始图像中没有阴影时, 也无法合成出有阴影的图像。这说明原来的商图像方法无法处理复杂光照特别是带阴影的图像。

商图像方法的局限主要是其过多的假设前提造成的。我们把在商图像方法中所作的假设总结如下: (a) 人脸表面符合

漫反射模型; (b) 所有人脸的三维外形相同; (c) 人脸图像已对齐; (d) 光源为点光源, 三个非共线点光源的线性组合可以用来近似任意光源; (e) 人脸图像中没有阴影。

在许多研究中表明假设(a)是合理的; 由于人脸的三维外形的确各不相同, 假设(b)当然是影响商图像方法的性能的一个因素; 对于假设(c), 现有的人脸对齐方法(如 ASM 等)已能达到比较好的效果。而真正给商图像方法带来很大局限的是假设(d)和(e)。

我们再对式(2)作进一步的分析, 其中, 我们可以把商图像中作为除数的图像 $\sum_{i=1}^3 x_i I_i$ 看作是一幅与 I_y 的光照情况一致(但不同人)的图像, 这样在假设所有人脸外形相同的前提下, 这两者之比才能得到一个只与反射率相关的光照不变量。所以, 原来的商图像方法效果不理想的一个重要的原因是假设(d)

$$s_y = \sum_{i=1}^3 x_i s_i \quad (4)$$

也就是说, 三个非共线点光源的线性组合可以用来近似任意光源。从图像子空间的角度来理解, 对于任意系数 x_i , $\sum_{i=1}^3 x_i I_i$ 构成了这个人的一个 3 维的人脸图像子空间, I_1, I_2, I_3 构成了这个子空间的三个基向量。根据上述分析, 商图像方法成立的前提是这个子空间中包含了这个人在任意光照条件下的图像。但根据文[5, 6]中的球谱分析理论, 我们知道一个人脸在同一姿态任意光照条件下形成的人脸图像集合要用一个 9 维的线性子空间来近似。所以可以判断, 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。

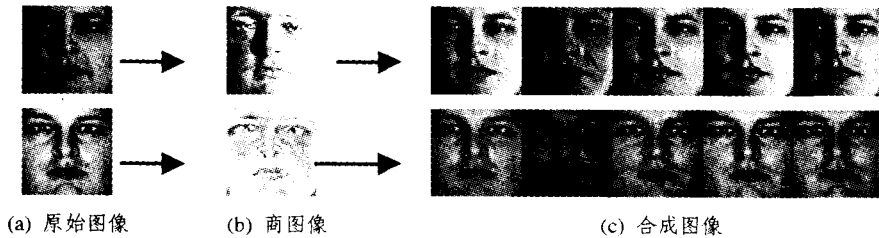


图 1 商图像方法的局限

3 基于图像子空间的商图像方法

根据上一节的分析, 我们知道了商图像方法在实际应用中效果不佳的原因, 下面我们将提出一种改进的算法来解决这个问题。

如上所述, 提高商图像方法性能的一个关键是建立一个能够表示同一人脸在固定姿态任意光线情况下的图像集合的低维线性子空间。文[5, 6]中显示, 可以把 9 个球谱函数图像作为基向量来建立这样一个光照子空间, 但前提是要给定这个人面的表面反射率和法向量, 在实际中这个条件难以满足。此外, 还有方法提出用一个人在不同光照条件下的多幅实际人脸图像作为基来构建这种光照子空间^[12]。而文[8, 9]中的分析指出, 用特征脸作为基构建的光照子空间效果要优于使用实际图像作为基构建的光照子空间。所以, 我们决定选用多个人多种光照条件下的人脸图像作为训练集, 并利用经验学习中得到一个能够近似各种光照情况下的人脸图像

的 PCA 子空间。由于样本有限, 这个子空间不足于用来进行识别, 但它能够近似各种光照条件下的人脸图像。

给定各种光照条件下的人脸图像的一个训练集 $\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n]$, Γ 是一个 $m \times n$ 的矩阵, 其中 m 是图像中像素点的个数, n 是样本个数。首先我们建立光照子空间矩阵

$$P = [\Gamma_1 - \bar{\Gamma}, \Gamma_2 - \bar{\Gamma}, \dots, \Gamma_n - \bar{\Gamma}] \quad (5)$$

其中, $\bar{\Gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Gamma_i$ 。 P 的协方差矩阵

$$Q = PP^T \quad (6)$$

Q 的特征向量 e_i 和对应的特征值 λ_i 由下式决定

$$\lambda_i e_i = Q e_i \quad (7)$$

然后我们利用 Turk 和 Pentland 的主元分析方法^[11]进行降维处理, 并按特征值由大到小排列, 选取对应的前 M 个特征向量 ($M \ll m$) 组成特征脸矩阵, 这样我们可以用这个以 $e_1, e_2, \dots, e_M$ 作为基的 PCA 子空间来估计除训练集中的人脸之外的任意人脸图像 y_i 的光照情况。设计能量函数如

下:

$$f(x) = (y_s - Ex)^T (y_s - Ex) \quad (8)$$

$E^T E$ 是非奇异的, 所以方程(8) 的最小二乘解为:

$$x = (E^T E)^{-1} E^T y_s \quad (9)$$

因为 y_s 不是训练集中的人, 所以 $f(x)$ 不会接近 0。此外, 考虑到商图像中的理想类的假设, 我们选取了多个人的样本, 因此使 $f(x)$ 最小化不仅将使 Ex 近似 y_s 的光照情况, 还将使 Ex 的外形与 y_s 近似, 也就是说, Ex 是样本空间中光照情况和外形都与 y_s 最接近的人脸图像。因此, 我们的方法很好地满足了商图像的前提条件。这样, 类似原来的商图像的方法, 我们有

$$Q_s = \frac{y_s}{Ex} \quad (10)$$

这里不同的是, 我们并不是直接用 $s_y = \sum_{i=1}^3 x_i s_i$ 来近似光源, 而是用 Ex 来合成一幅与 y_s 的光照情况一致、并且外形相似的人脸图像(如图 2(c))。图 2 给出了我们的方法图示, 商图像等于原始图像(b)除以中间图像(c), 从图中可以看出我们的中间图像与原始图像光照情况一致且外形相似, 从而最好地满足了商图像的理论假设前提: 作为除数的人脸图像和作为被除数的人脸图像外形相同。图 3 给出与原来的商图像方法的结果比较。图 3(a) 是原始图像, 图 3(b) 是用基于点光源模型的商图像方法得到的结果, 从图中可以看出, 同一人脸在不同光照条件下的图像的商图像明显不是与光照无关的, 而我们的改进商图像的结果(图 3(c))已基本与光照无关。

类似(3), 我们可以用

$$I_{new} = \sum_{i=1}^M x_i E_i \otimes Q_i \quad (11)$$



(a) 部分训练集



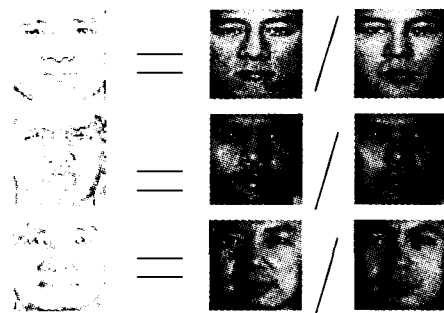
(b) 前 10 个特征脸

图 4 部分训练集和前 10 个特征脸

4 实验和讨论

我们的实验在 CMU PIE 人脸数据库^[10]上进行, 我们选取了数据库中的前 10 个人在 20 种光照条件下的图像作为训练集, 图 4 给出了部分训练集和从训练集中学习得到的前 10 个特征脸。我们利用得到的特征脸矩阵建立了一个图像子空间, 用它来近似任意光照条件下的人脸图像, 得到了较好的效果, 为了说明这一点, 我们进行了图 5 中的光照归一化对比实验。图中(a) 和 (b) 是原始图像(为了说明问题, 我们选取了一些有较大阴影的图像), 我们希望通过 (a) 的商图像合成出新的与 (b) 的光照情况近似的图像。(c) 是利用点光源模型的商图像方法得到的商图像, (d) 是利用 (c) 合成的新图像。(e) 是利用我们的方法得到的商图像, (f) 是利用 (e) 合成的新图像。由对比结果可以看出, Shashua et al. 提出的基于点光源模型的商图像方法几乎不能处理有阴影的情况, 合成的图像与基准图像差异很大。而我们提出的基于

来合成新的光照条件下的图像。



(a) 商图像 (b) 原始图像 (c) 中间图像

图 2 方法图示



(a) 原始图像



(b) 基于点光源模型的商图像结果



(c) 改进商图像方法得到的结果

图 3 改进的商图像方法结果对比

PCA 子空间的改进商图像方法已经能够很好地近似基准图像中的光照情况, 得到的合成图像已基本与基准图像的光照情况吻合。这说明我们的方法很好地弥补了原来的商图像方法不能处理带阴影图像的局限。

最后, 我们在 CMU PIE 库上进行了识别率测试, CMU PIE 人脸数据库共有 70 人, 我们选取每个人在 20 种光照条件下的 20 幅图像, 除去作为训练集的 10 个人, 我们取出剩下的 60 个人的 1 幅正面光照图像作为基准集, 用剩下的 60×19 幅图像作为测试集。为了进一步说明问题, 我们又把测试集分为两个子集, 子集 1 中的 60×7 幅图像不含阴影, 子集 2 中的 60×12 幅图像含有阴影(如图 4(a))。我们在这两个子集上分别测试了直接相关性方法(即不作预处理直接比较两幅图像的相关系数)、基于点光源模型的商图像方法和我们的改进商图像方法——后两种方法都利用基准图像的商图像合成与测试图像的光照情况一致的新图像, 然后再对新图像和测试图像进行相关性分析。得到实验结果见表 1。

结果表明,我们的方法能够大大提高对复杂光照和带阴影人脸图像的识别性能。识别结果要远远优于原来的商图像

方法。

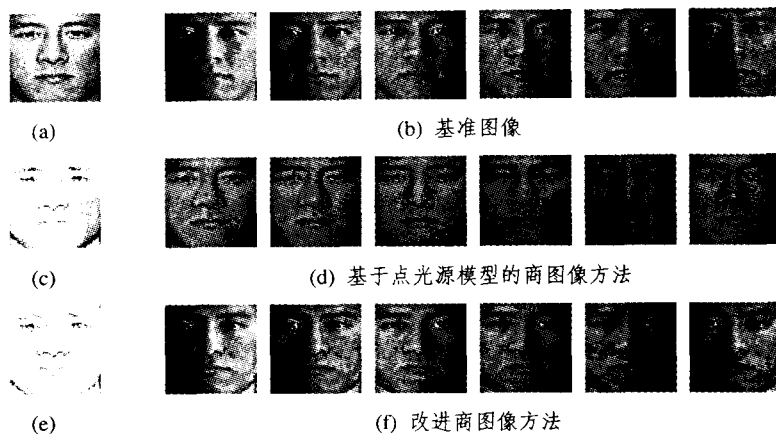


图5 光照归一化实验结果对比

表1 CMU PIE 库上的人脸识别率测试结果

	直接相关性方法	商图像方法	改进商图像方法
子集1	97%	91.4%	100%
子集2	57%	45.8%	92%

结论 在本文中,我们从理论和实验上分析了 Shashua et al. 提出的商图像方法的主要不足之处:不准确的理想类假设和过于简单的三维点光源模型。并针对性地提出了一种基于图像子空间的改进商图像方法,这种方法较好地满足了商图像的理论假设前提,从而克服了原来的商图像方法的局限。图像合成实验表明我们的方法能够合成更复杂光照情况下的人脸图像。人脸识别实验表明,我们的方法能够大大提高人脸识别系统在光线变化条件下的识别性能。

参考文献

- 1 Belhumeur P N, Kriegman D J. What is the set of Images of an Object Under All possible Lighting Conditions?. IEEE conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1996
- 2 Georgiades A S, Belhumeur P N. Illumination cone models for recognition under variable lighting. Faces, CVPR, 1998
- 3 Georgiades A S, Belhumeur P N. From Few to many: Illumina-

tion cone models for face recognition under variable lighting and pose. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 643~660

- 4 Shashua A, Riklin-Raviv T. The quotient image: Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(2): 129~139
- 5 Ramanamirthi R, Hanrahan P. On the relationship between radiance and irradiance: determining the illumination from images of a convex Lambertian object. J. Opt. Soc. Am., 2001, 18(10)
- 6 Basri R, Jacobs D. Lambertian Reflectance and Linear Subspaces. [NEC Research Institute Technical Report, 2000-172]
- 7 Adnin Y, Moses Y, Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7)
- 8 Hallan P. A Low-Dimensional Representation of Human Faces for Arbitrary Lighting Conditions. IEEE Conf. On Computer Vision and Pattern Recognition, 1994, 995~999
- 9 Epstein R, Hallan P, Yuille A L. 5 ± 2 Eigenimages Suffice: An Empirical Investigation of Low-Dimensional Lighting Models. IEEE Conf. Workshop on Physics-Based Vision, 1995, 108~116
- 10 Sim T, Baker S, Bsat M. The CMU Pose, Illumination, and Expression (PIE) Database. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, May, 2002
- 11 Turk M A, Pentland A P. Eigenfaces for recognition. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71~86
- 12 Wang Haitao, Li Stan, Wang Yangsheng, Zhang Weiwei. illumination Analysis and Modeling of Faces. J. ICCV 2003 Workshop, IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures, 2003, 104~111

(上接第178页)

协作的总体效益消失甚至产生负效益,即协作后的最终网络延迟比初始延迟还要大。值得注意的是,为了简化,本实验实际考虑的是一次性增加某些协作结点而不是每次增加某一个特定协作结点后的效益分析。

结束语 本文针对网络中心战环境下的信息协作提出了一种协作效益的综合衡量方法,其中所构建的协作效益和协作惩罚等定量分析模型及其思想不仅可用于网络中心战网络结点互连的参考,而且也适用于其它信息组织网络的类似分析。

另外,由于信息网络的不同性质或不同结构,因而其定量分析模型中的参数确定也将各不相同;而且为了简化分析,协作结点的可用知识分析中,协作结点时间 t 内完成所有任务的概率分布采取了统一的指数形,并且知识的定义也简单地用最大不确定和当前不确定二者的差表示;最后,本文对信息协作效益和惩罚的分析都是基于网络时间延迟的,并没有从多个衡量角度去同时考虑。这些都有待于今后研究的进一步

完善与提高。

参考文献

- 1 黄志澄. 信息优势与决策优势. 电子展望与决策, 2000(5)
- 2 史越东 编译. 网络中心战面临的技术挑战. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2001(6)
- 3 Gachet A. A Framework for Developing Distributed Cooperative Decision Support Systems-Inception Phase. Informing Science, Challenges to Informing Clients: A Transdisciplinary Approach, 2001, 6
- 4 Kettani D, Roy J. A qualitative spatial model for information fusion and situation analysis. In: Proc. 3rd Int. Conf. Information Fusion (FUSION2000) Paris, 2000, 7
- 5 James R H. The Synthetic Environment. Orion Development Group, 1997, 8
- 6 Moffat J. Complexity theory and network centric warfare. Information age transformation series. London, UK, 2003, 9
- 7 Moffat J. Command and Control in the Information Age: Representing its Impact. The Stationery Office. London, UK, 2002
- 8 范金城, 梅长林, 编著. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002
- 9 余寅. 高等工程数学(第三版). 武汉: 华中科技大学出版社, 2001