
文章编号 1004-924X(2008)08-1459-06

基于多级小波分解的人脸图像光照补偿方法

龚卫国, 杨利平, 辜小花, 李伟红

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 为提高不同光照条件下的人脸识别精度, 提出了一种利用多级小波分解和样条插值进行光照补偿的方法。一般认为, 光照变化会给图像中混入两种噪声: 背景噪声和增益噪声。背景噪声是加性噪声, 可以通过直接对图像进行多级小波分解和样条插值来估计并去除; 增益噪声是乘性噪声, 可以对去除了背景噪声的图像进行对数变换后, 再利用多级小波分解和样条插值来估计并去除。在 Yale B 人脸数据库上的实验结果表明: 本方法的识别率比其它方法高 2%~11%, 可以有效地对不同光照条件下的人脸图像进行调整, 提高不同光照条件下人脸识别的精度和稳定性。

关键词: 人脸识别; 光照补偿; 多级小波分解; 样条插值

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Illumination compensation based on multi-level wavelet decomposition for face recognition

GONG Wei-guo, YANG Li-ping, GU Xiao-hua, LI Wei-hong

(Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The appearance of face will vary dramatically when the illumination changes, which makes face recognition even more challengeable. In this paper, an illumination compensation method by means of multi-level wavelet decomposition and spline interpolation is proposed to reduce the effect of illumination variation on face recognition. The light variation in an image can be modeled as additive noise and multiplicative noise. The additive noise, called background, can be estimated and eliminated by multi-level wavelet decomposition followed by spline interpolation; the multiplicative one, called gain, can be done in the similar way in the logarithm domain. Experimental results on Yale B face database show that the proposed method achieves 2%~11% recognition rate, higher than that of the others. It can effectively adjust the facial images under varying illumination conditions, as well as improve the recognition rate and robustness of face recognition.

Key words: face recognition; illumination compensation; multi-level wavelet decomposition; spline interpolation

收稿日期: 2008-03-19; **修订日期:** 2008-04-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA01Z423); 国防“十一五”基础科研基金资助项目 (No. C10020060355); 教育部科学技术重点资助项目 (No. 02057); 重庆市自然科学基金重点资助项目 (No. CSTC2005BA2002, No. CSTC2007AC2018)

1 引言

人脸识别作为一种非接触式的、友好的生物特征识别方法,在保密场所的用户认证、银行和住宅小区安防监控、公安刑侦、人机交互等领域都有着极大的应用潜力。但正是由于人脸识别非接触式这一特点,使得同一个人的人脸图像极易受到周围环境的影响,尤其是光照变化的影响。研究表明^[1-2],由于光照影响带来的人脸图像的变化甚至比由个体差异带来的人脸图像的变化都大,这使得人脸识别系统的性能急剧下降,因此消除光照变化的影响已成为现在人脸识别亟待解决的问题之一。

目前,在人脸识别中解决光照问题的方法主要有三大类:第一类方法是建立不同条件下的人脸模型或光照模型,例如光照锥^[3]方法和基于光照样本的方法^[4]。这类方法虽然可以取得很好的效果,但是需要采集大量的不同光照条件下的人脸图像样本且计算耗时,因此限制了其在实时人脸识别系统中的应用。第二类方法是提取光照不变特征。Mose, Adini 等人^[1,5]已经证明,没有任何表示方法本身能够克服光照方向的变化,即提取人脸完全不随光照变化的特征是不可能的,只能提取对光照变化不敏感的特征,如基于边缘的图像特征^[1]: 图像边缘、轮廓、Gabor 特征和角点^[6]等,基于图像的方法^[7]: Eigenface^[8]、Fisherface 方法,以及熵图像^[9]等。尽管这些方法的思想很直接,但实践表明这种方法对光照的校正都有一定的局限性。第三类方法是光照补偿法,即对人脸图像进行预处理,消除光照对人脸图像的影响。对于均匀光照变化常用的方法有:直方图均衡化、Gamma 校正、对数变换等^[10];对于非均匀光照变化,常用的方法是自适应直方图均衡化和分块直方图均衡等方法^[11-12]^[12]。但这些方法对图像的校正并不理想。为此 Zhu 等^[13]提出用综合了乘性噪声和加性噪声的模型来描述人脸图像,并通过均值滤波的方法去除噪声,得到正常光照条件下的人脸图像(下文称作 AT 方法)。Ko 等^[14]提出用多元回归的方法(下文称作 ICR 方法)寻找光照平面,并用该平面规范人脸图像。ICR 算法过于理想化了光照模型,片面考虑了一个方向上的光照平面拟合,因此只对于解决点光

源较少,尤其是侧光环境下的光照问题较为有效。Du 等^[15]通过对小波变换后的低频和高频系数分别进行修正来提高图像的对比度并保证边缘信息不损失。

受文献^[13-14]的启示,本文用多级小波分解和样条插值对图像噪声的进行估计和去除,实现了对人脸图像光照变化的有效补偿,在 Yale B 人脸数据库上的实验结果表明,本文提出的方法能够有效地提高人脸识别的识别率。

2 基于多级小波分解的光照补偿算法

2.1 光照模型

传统的光照补偿算法认为人脸图像可以看作是反射分量和光照分量的乘积^[16-17],可通过去低频分量获得正常光照下的人脸图像。然而,现实中用一个简单的乘性效应来描述光照变化还不够全面,还应该考虑叠加在图像上的变化缓慢的背景噪声,这种噪声是一种加性噪声。因此,假设一幅大小为 $M \times N$ 的人脸图像用 $F(m, n)$ 表示,那么受光照影响后的人脸图像可表示为:

$$F'(m, n) = G(m, n) \cdot F(m, n) + B(m, n), \quad (1)$$

其中, $B(m, n)$ 和 $G(m, n)$ 分别表示由于光照变化而混入的背景噪声和增益噪声。光照调整就是通过估计并消除 $B(m, n)$ 和 $G(m, n)$ 而使图像 $F'(m, n)$ 尽可能恢复到 $F(m, n)$ 。

2.2 多级小波分解

离散小波变换可以定义为信号与一组正交基函数的内积,即

$$W_{a,b} = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \sum_t f(t) \psi_{a,b}(x), \quad (2)$$

其中, $f(t)$ 为待处理信号, $\psi_{a,b}(x)$ 是由母小波 $\psi(x)$ 通过平移、伸缩得到的小波基,即

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right). \quad (3)$$

相应地,原始信号就可以用小波和小波系数来表示:

$$f(t) = \sum_{a,b} W_{a,b} \psi_{a,b}(x). \quad (4)$$

图像可以看作是二维信号,对其进行二维小波分解后的低频成分对应图像的逼近,而高频成分对应图像的细节。令 cA_j, cH_j, cV_j, cD_j 分别代表第 j 级小波分解的逼近、水平、垂直和对角系

数,则分解过程如图 1 所示。

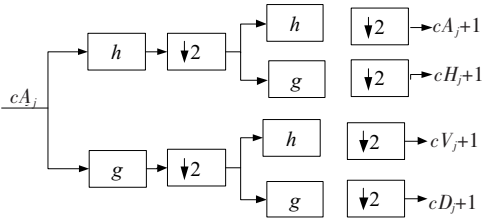


图 1 小波分解示意图

Fig. 1 Illustration of wavelet decomposition procedure

由各系数重构所得图像可表示为:

$$\begin{aligned}
 A_j &= \sum_{j,b} cA_j \psi_{j,b}(x) \\
 H_j &= \sum_{j,b} cH_j \psi_{j,b}(x) \\
 V_j &= \sum_{j,b} cV_j \psi_{j,b}(x) \\
 D_j &= \sum_{j,b} cD_j \psi_{j,b}(x)
 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, A 为图像的逼近, H 、 V 、 D 分别对应图像的水平、垂直和对角子图。图 2 为一幅人脸图像经过 6 级小波分解的示意图。

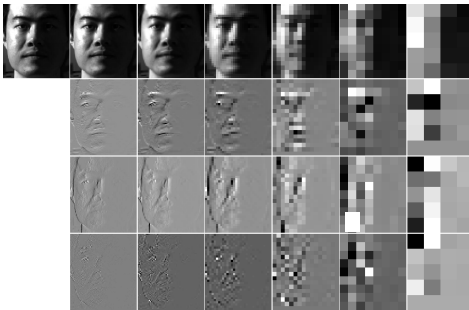


图 2 人脸图像的 6 级小波分解示意图。左上角为原始人脸图像,第二列开始从左往右分别表示第 1 到 6 级小波分解,而从下到上则分别对应图像的逼近、水平、垂直和对角子图

Fig. 2 Six level wavelet decompositions of a face image. The top-left one is the original face image; the second to seven columns are the wavelet decompositions from level 1 to 6 correspondingly, and rows from top to bottom accord to the approximation, horizontal detail, vertical detail and the diagonal detail, respectively

由图 2 不难看出,经过多级小波分解之后,图像低频子图中几乎不包含人脸的信息,相反一定

程度上说明它表示的是图像的背景噪声。这说明多级小波分解的低频子图,这里称之为图像的低分辨率近似,可以作为图像背景噪声的一种估计。

2.3 样条插值

简单的图像缩放会使图像呈现出明显的分块状,因此本文采用样条插值的方法将低分辨率图像近似恢复到与原始图像相同的分辨率。

图 3 为样条插值示意图。对于大小为 $s \times s$ 的图像,其一次插值过程是:先按行插值,在每行的相邻像素之间按照样条函数估计并插入一个值,插值后图像大小变为 $(2s-1) \times s$;再按列插值,在每列的相邻两个像素之间按照样条函数估计并插入一个值,插值后图像大小变为 $(2s-1) \times (2s-1)$ 。

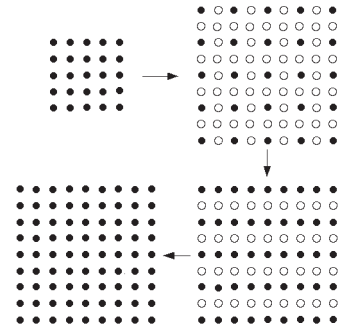


图 3 样条插值示意图(“●”表示图像的像素位置,“○”表示待插值的位置)

Fig. 3 Illustration of spline interpolation (“●” is the existed position “○” is the position to be interpolated)

对 A_j 进行多次插值,直到插值后图像的大小达到或超过 $M \times N$ 。若插值后图像大小超过 $M \times N$ 为止,则需要将其缩放为 $M \times N$,以保证插值后的图像和 $F'(m, n)$ 具有相同的分辨率。经过上述处理的插值图像即为图像 $F'(m, n)$ 的背景噪声估计 $B(m, n)$ 。图 4 为效果示意图。

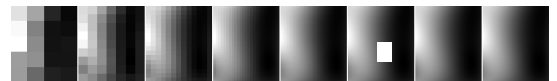


图 4 插值效果示意图。其中第一幅子图为图 2 中 6 级小波分解后的低频子图

Fig. 4 Illustration of the interpolation procedure. The first sub-image is the approximation of level 6 wavelet decomposition in Fig. 2.

2.4 光照补偿算法的实现

本文中,背景 $F'(m,n)$ 可以通过多级小波分解之后对其低频子图进行样条插值进行估计(参看 2.2, 2.3 节)。根据公式(1),去除背景噪声 $F'(m,n)$ 之后的图像可表示为:

$$f(m,n) = F'(m,n) - B(m,n) = G(m,n) \cdot F(m,n). \quad (6)$$

两边取对数可得

$$\ln f(m,n) = \ln F(m,n) + \ln G(m,n). \quad (7)$$

实际上, $G(m,n)$ 应该是变化很缓慢的,因此可以采用与背景估计类似的方法来估计对数域的增益噪声。

这样,即可获得正常光照条件下的人脸图像

$$\hat{F}(m,n) = \exp(\ln f(m,n) - \ln G(m,n)). \quad (8)$$

算法流程图如图 5 所示。



图 5 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of proposed method

3 实验

3.1 人脸数据库

本文选用 Yale B 人脸数据库^[18]进行实验。该库是光照和姿态变化的典型人脸数据库,共包括 10 人,每人 576 种条件(9 种姿态 × (64 种光照 + 1 环境))下的共 5 760 幅图像。由于本文只研

究光照变化问题,因此只选用了其正面姿态下的 650 幅样本。所有选用的图像都进行了相同的预处理,包括剪切、旋转、缩放等。

3.2 实验结果

为了验证方法的有效性,本文与前面提到的文献[13]中的 AT 方法和文献[14]中的 ICR 方法以及直方图均衡化(HE)方法进行了比较,图 6 是用不同方法进行处理之后的效果图。

人脸识别实验中采用了最常用的 Fisherface^[7]



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 直方图均衡化处理的图像

(b) Images processed by HE



(c) ICR 方法处理的图像

(c) Images processed by ICR



(d) AT 方法处理的图像

(d) Images processed by AT



(e) 本文方法处理的图像

(e) Images processed by proposed approach

图 6 各种方法处理的结果图

Fig. 6 Some experimental results based on YaleB database

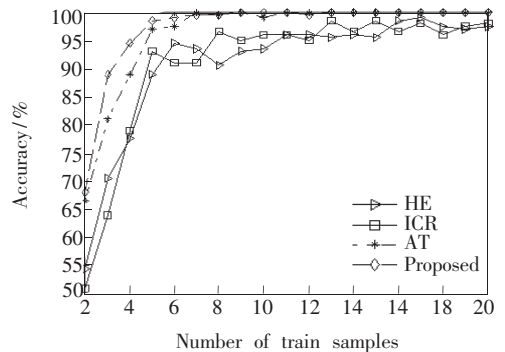


图 7 各方法人脸识别结果图

Fig. 7 Face recognition results using Fisherface methods

特征提取方法和最近邻分类器进行特征提取和分类。所有实验结果都是重复了 20 次之后取平均所得,且每次实验的训练集和测试集都是随机生成的。识别结果如图 7 所示。

由图 7 可见,本文的方法优于其他几种方法,尤其是在样本数目较小的条件下。事实上,当训练样本达到一定数目(例如此处为 8 幅)之后,各

表 1 本文方法优于其他方法的平均水平和最高水平

Tab. 1 Maximal and mean accuracies attained by our proposed method higher than that of others.

	HE	ICR	AT
Maximal (%)	18.5	25	8
Mean (%)	11.14	11.78	2.5

种方法都能取得较好的识别效果,并趋于稳定。从 2 幅训练样本变化到 8 幅训练样本的过程中,本文提出的方法优于其他几种方法的平均水平和最高水平,如表 1 所示。

4 结 论

本文提出了一种基于多级小波分解和样条插值的光照补偿算法。该算法结合一个较精确的光照经验模型,成功地对面脸图像进行了重建,得到了较好的图像预处理效果,并在 Yale B 人脸数据库上进行了人脸识别实验,识别结果表明该方法能得到较高的识别率,比其他方法高出了 2%~11%。

参考文献:

- [1] ADINI Y, MOSES Y, ULLMAN S. Face recognition: the problem of compensating for changes in illumination direction [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1997, 19(7):721-732.
- [2] 李粉兰,唐文彦,段海峰,等. 分数次幂多项式核函数在核直接判别式分析中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9):1410-1414.
LI F L, TANG W Y, DUAN H F, et al. Application of fractional power polynomial kernel function to kernel direct discriminant analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1410-1414. (in Chinese)
- [3] ISHIYAMA R, SAKAMOTO S. Geodesic illumination basis: compensating for illumination variations in any pose for face recognition [C]. *Proceeding of 16th Internat. Conf. Pattern recognition*, 2002:297-301.
- [4] LEE S W, MOON S H, LEE S W. Face recognition under arbitrary illumination using illuminated exemplars [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(5):1605-1620.
- [5] MOSES Y, ULLMAN S. Limitation of non-model-based recognition schemes [C]. *Proceeding of ECCV-92, Berlin: Springer-Verlag*, 1992:820-828.
- [6] 姚剑敏,许廷发,倪国强. 一种基于优化小波特征的非线性目标跟踪算法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3):428-433.
YAO J M, XU T F, NI G Q. Nonlinear target tracking method based on optimized wavelet features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):428-433. (in Chinese)
- [7] BELHUMEUR P N, HESPAHNA J P, KRIEGMAN D J. Eigenfaces versus fisherfaces: recognition using class specific linear projection [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1997, 19(7):711-720.
- [8] 梁毅雄,龚卫国,潘英俊,等. 基于奇异值分解的人脸识别方法 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5):544-549.
LIANG Y X, GONG W G, PAN Y J, et al.. Singular value decomposition-based approach for face recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5):544-549. (in Chinese)
- [9] WANG H T, LI S Z, WANG Y C. Generalized quotient image [C]. *Proceeding of CVPR*, 2004:498-505.
- [10] SAVVIDES M, KUMAR V. Illumination normalization using logarithm transform for face recognition [C]. *Proceeding of IAPR AVBPA*, 2003:549-556.
- [11] SHAN S G, GAO W, CAO B, et al.. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [C]. *Proceeding of IEEE Workshop on AMFG*, 2003:157-164.
- [12] XIE X D, LAM K M. Face recognition under varying illumination based on a 2D face shape model [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(2):221-230.

- [13] ZHU J H, LIU B, SCHWARTZ S C. General illumination correction and its application to face recognition[C]. *Proceeding of IEEE OCASSSP*, 2003;133-136.
- [14] KO J, KIM E, BYUN H. A simple illumination normalization algorithm for face recognition[C]. *Proceeding of PRICAI*, 2002;532-541.
- [15] DU S, WARD R. Wavelet-based illumination normalization for face recognition [C]. *Proceeding of ICIP*, 2005; 11-14.
- [16] CHEN W L, ER M J, WU S Q. Illumination compensation and normalization for robust face recognition using discrete cosine transform in logarithm domain[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2006, 36(2):458-466.
- [17] 聂祥飞, 郭军. 人脸识别中基于多小波变换的光照补偿[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(18):1-3.
NIE X F, GUO J. Illumination compensation based on multiwavelet transform in face recognition [J]. *Computer Engineering and Application*, 2007, 43(18):1-3. (in Chinese)
- [18] GEORGHIADES A S, BELHUMEUR P N, KRIEGMAN D J. From few to many: generative models for recognition under variable lighting and pose [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2006, 23(16):643-660.

作者简介: 龚卫国(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别、智能化信息技术及系统等方面的研究。E-mail: wggong@cqu.edu.cn
杨利平(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事图像处理和模式识别等方面的研究。E-mail: yanglp@cqu.edu.cn

● 下期预告

基于 LS-SVM 与遗传算法的数控机床热误差辨识温度传感器优化策略

林伟青^{1,2}, 傅建中¹, 许亚洲¹, 陈子辰¹

(1. 浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 福建农林大学 机电学院, 福建 福州 350002)

提出了一种在数控机床热误差辨识建模过程中, 利用最小二乘支持向量机结合遗传算法对温度传感器进行筛选与优化的新方法。对布置在一台数控车床上的温度传感器进行了优化, 首先根据热模态理论, 对传感器进行分组, 利用最小二乘支持向量机方法构建数控机床热误差辨识模型, 再根据遗传算法对其进行传感器优化布置。结果表明, 遗传算法与最小二乘支持向量机方法的结合, 很好地避免了温度测点的相互影响, 保证模型精度, 该台数控车床的轴向建模平均绝对百分比误差为 1.89%, 径向建模平均绝对百分比误差为 2.04%。传感器使用数量减少, 节约了硬件成本, 提高了辨识建模速度。