

文章编号 1004-924X(2008)01-0150-06

# 应用小波变换的人脸光照补偿

聂祥飞<sup>1,2</sup>, 谭泽富<sup>1</sup>, 郭 军<sup>2</sup>

(1. 重庆三峡学院 物理与电子工程学院, 重庆 404000; 2. 北京邮电大学 信息工程学院, 北京 100876)

**摘要:**提出了一种用于非均匀光照条件下人脸识别的光照补偿算法。该算法将人脸图像变换到对数域,并在对数域中计算二维小波变换,通过舍弃低频子带图像中的系数来实现人脸图像的非均匀光照补偿。由于人脸光照补偿是为了提高人脸识别性能,所以光照补偿的效果利用人脸识别率来表征。在 Yale B 人脸库中,本文方法的平均误识率可达到 0.18%,比对数域离散余弦变换(DCT)光照补偿算法性能更佳;在 CAS\_PEAL 人脸库中的实验结果表明,本文方法的性能与对数域 DCT 方法相近。

**关键词:**人脸识别;人脸光照补偿;小波变换

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Face illumination compensation based on wavelet transform

NIE Xiang-fei<sup>1,2</sup>, TAN Ze-fu<sup>1</sup>, GUO Jun<sup>2</sup>

(1. *School of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China*; 2. *School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** A novel illumination compensation algorithm for face recognition under nonuniform illumination conditions is presented. The face images are transformed from spatial domain to logarithm domain and 2-dimension wavelet transform is calculated by the algorithm. Then coefficients of low-frequency subband image are discarded for face illumination compensation in logarithm domain. Because the purpose of illumination compensation is to improve the performance of face recognition, the effect of face illumination compensation is defined by face recognition rate. The proposed algorithm is compared with the Discrete Cosine Transformation(DCT) method in logarithm domain in Yale B face database, the experimental results show that the average error rate of the proposed algorithm can reach 0.18%, which is lower than that of the DCT method. In addition, the experimental results in CAS\_PEAL face database indicate that the performance of the proposed algorithm is equivalent to that of the DCT method.

**Key words:** face recognition; face illumination compensation; wavelet transform

收稿日期:2007-06-06;修订日期:2007-07-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60475007);重庆市教委自然科学基金资助项目;重庆市科委自然科学基金资助项目;重庆三峡学院自然科学基金资助项目

# 1 引 言

在二维正面人脸识别中,非均匀光照会使人脸识别率大幅度下降,人脸的非均匀光照补偿一直是人脸识别系统中一个非常重要而难以解决的问题<sup>[1-3]</sup>。一般地,解决人脸识别中光照问题的方法主要包括<sup>[4]</sup>:提取光照不变特征、光照变化的建模、光照条件标准化等。提取光照不变特征的基本思想是:提取人脸不随光照变化或至少对光照变化不敏感的特征,包括人脸边缘图<sup>[5-6]</sup>、人脸灰度图像的二阶导数<sup>[7-8]</sup>、人脸图像的二维 Gabor 变换<sup>[4]</sup>等。对于光照变化的建模,其主要思想是在一个合适的子空间中表示光照引起的变化,然后根据人脸的特征估计模型参数,如子空间投影法<sup>[9]</sup>、商图像法<sup>[10-11]</sup>、光照锥法<sup>[12]</sup>和基于球面谐波基图像的方法<sup>[13-15]</sup>等。光照条件标准化方法的基本思想是在人脸图像被识别之前消除光照变化的影响,如经典的直方图均衡技术、SFS(Shape From Shading)技术<sup>[16]</sup>和 3D 变形技术<sup>[17]</sup>等。

最近,Chen<sup>[18]</sup>等人提出在对数域利用离散余弦变换(DCT)来进行人脸非均匀光照补偿的算法,在 Yale B 正面人脸库中的实验表明,该方法与现有的其它方法相比能得到更好的性能。受到该文的启发,本文在对数域结合小波变换对图像的优异处理能力<sup>[19-21]</sup>来实现二维正面人脸的非均匀光照补偿。由于人脸非均匀光照补偿的目的是为了提高人脸识别率,所以,在对数域对人脸光照补偿结束后,直接在对数域进行人脸识别实验,用人脸识别率来表征人脸非均匀光照补偿的效果。

# 2 光照补偿算法

## 2.1 图像的小波变换

若在  $L^2(\mathbf{R})$  上有一个多分辨分析(MRA)  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$  和尺度函数  $\varphi(x)$ , 定义  $j$  尺度下的二维尺度空间

$$V_j^2 = V_j \otimes V_j, \tag{1}$$

符号  $\otimes$  表示空间相乘。由于  $V_j$  中的标准正交基为

$$\varphi_{j,n}(x) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}x - n), \tag{2}$$

则可得  $V_j^2$  中的标准正交基为  $\{\varphi_{j,n}(x) \varphi_{j,m}(x)\}_{n,m \in \mathbf{Z}}$ 。用  $W_{j+1}^2$  表示  $V_{j+1}^2$  在  $V_j^2$  中的正交补

空间,用  $\psi(x)$  表示与  $\phi(x)$  相应的一维小波,由此可以得到  $L^2(\mathbf{R}^2)$  中 3 个小波函数:

$$\Psi^1 = \varphi \otimes \psi = \varphi(x)\psi(y), \tag{3}$$

$$\Psi^2 = \psi \otimes \varphi = \psi(x)\varphi(y), \tag{4}$$

$$\Psi^3 = \psi \otimes \psi = \psi(x)\psi(y). \tag{5}$$

使得

$$\{\Psi^j(2^j x - k, 2^j y - l)\}_{j,k,l \in \mathbf{Z}, i=1,2,3}, \tag{6}$$

构成  $L^2(\mathbf{R}^2)$  的规范正交基。在二维的多分辨分析中,对于平方可积的二维图像信号  $f(m,n) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ , 令  $C_{0,mm} = f(m,n)$ , 则二维图像的小波分解递推公式为:

$$C_{j,mm} = \sum_{k,l} C_{j-1,kl} h_{k-2m} h_{l-2n}, \tag{7}$$

$$D_{j,mm}^1 = \sum_{k,l} C_{j-1,kl} h_{k-2m} g_{l-2n}, \tag{8}$$

$$D_{j,mm}^2 = \sum_{k,l} C_{j-1,kl} g_{k-2m} h_{l-2n}, \tag{9}$$

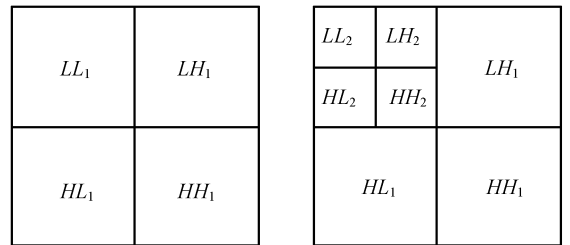
$$D_{j,mm}^3 = \sum_{k,l} C_{j-1,kl} g_{k-2m} g_{l-2n}, \tag{10}$$

其中

$$h(n) = \langle \varphi, \varphi_{-1,n} \rangle, \tag{11}$$

$$g(n) = \langle \psi, \varphi_{-1,n} \rangle, \tag{12}$$

$$g(n) = (-1)^n h(1-n). \tag{13}$$



(a) 1 级分解 (a) One level wavelet decomposition  
(b) 2 级分解 (b) Two levels wavelet decomposition

图 1 二维小波分解

Fig. 1 Two dimensional wavelet decomposition

图像的二维小波分解可以用图 1 形象地表示。

图像经过 1 级小波分解后,变成了 4 个子图像,如图 1(a)所示:  $LL_1$  为低频分量;  $LH_1$ 、 $HL_1$  和  $HH_1$  分别为水平细节分量、垂直细节分量和对角细节分量,该 4 个分量的尺寸均为原图像的一半。若需要对图像进行二级小波分解,则如图 1(b)所示:即将  $LL_1$  分量进一步分解为 1 个低频分量  $LL_2$  和 3 个细节分量  $LH_2$ 、 $HL_2$  和  $HH_2$ ,且尺寸都是  $LL_1$  的一半。如果还需要对图像进行

下一级分解,则重复上述步骤对  $LL_2$  进行分解,依次类推。最终,对图像进行  $n$  级小波分解后得到的子图像  $LL_n$  就是对原图像的低频近似。

## 2.2 算法的具体实现

人脸灰度图像  $f(x, y)$  可以看成是反射分量  $r(x, y)$  和光照分量  $e(x, y)$  的乘积:

$$f(x, y) = r(x, y) \times e(x, y), \quad (14)$$

其中,  $r(x, y)$  对应图像的快变化部分,  $e(x, y)$  对应图像的慢变化部分<sup>[18]</sup>。对式(14)两边取对数,得:

$$\log[f(x, y)] = \log[r(x, y)] + \log[e(x, y)], \quad (15)$$

从式(14)和式(15)可以看出,在空间域中,原始图像的反射分量  $r(x, y)$  和光照分量  $e(x, y)$  是相乘的关系,而在对数域中,与反射分量和光照分量对应的部分  $\log[r(x, y)]$  和  $\log[e(x, y)]$  变成了相加的关系,所以,在对数域对图像进行光照补偿就是尽可能消除对数域图像的  $\log[e(x, y)]$  分量,而该分量主要由对数域图像中的低频成分构成。那么,在对数域中对人脸图像进行光照补偿就等效于对人脸图像高通滤波。而在图像处理中,小波变换技术对图像具有非常优越的高通处理能力。利用二维小波变换的多级分解算法和重建算法,可以有效地消除对数域图像中的低频部分,实现人脸图像在对数域的光照补偿。具体步骤如下:

(1) 对空间域中的人脸图像  $f(x, y)$  进行对数变换,得对数域中的图像  $f_0(x, y) = \log[f(x, y)]$ 。

(2) 对  $f_0(x, y)$  计算 1 级二维离散小波分解,得到  $f_0(x, y)$  经过 1 级小波分解后的低频近似分量  $A_1 f_0(x, y)$ 、垂直细节分量  $D_1^1 f_0(x, y)$ 、水平细节分量  $D_1^2 f_0(x, y)$  和对角细节分量  $D_1^3 f_0(x, y)$ 。

(3) 对低频近似分量  $A_1 f_0(x, y)$  进行 1 级二维离散小波分解,得到  $A_1 f_0(x, y)$  的低频近似分量  $A_2 f_0(x, y)$ 、垂直细节分量  $D_2^1 f_0(x, y)$ 、水平细节分量  $D_2^2 f_0(x, y)$  和对角细节分量  $D_2^3 f_0(x, y)$ 。

(4) 以此类推,对低频近似分量  $A_2 f_0(x, y)$  继续进行 1 级二维离散小波分解,直到第  $n$  级二维离散小波分解完成。

(5) 提取出第  $n$  级低频近似分量  $A_n f_0(x, y)$ 。

(6) 对  $A_n f_0(x, y)$  进行  $n$  级二维离散小波重建,得到对数域图像  $f_0(x, y)$  的重建图像  $\tilde{f}_0(x, y)$ 。

(7) 从  $f_0(x, y)$  中减去  $\tilde{f}_0(x, y)$ , 得到光照补偿后的图像  $\bar{f}_0(x, y) = f_0(x, y) - \tilde{f}_0(x, y)$ 。

## 3 实验结果

### 3.1 在 Yale B 人脸库中的实验结果

为了便于进行比较,与文献[18]类似,采用 Yale B 人脸库<sup>[12]</sup>进行实验。该数据库共包含 10 个人的 9 种不同姿态的人脸图像,每种姿态又包含 64 种不同的光照情况。由于本文只研究人脸的光照补偿问题,所以在实验中,只使用正面姿态下的人脸图像。人脸图像的尺寸都被重新剪切为  $120 \times 105$ , 两眼之间的距离被设定为 人脸图像宽度的  $4/7$ 。同时将所有人脸图像按照入射光线的角度不同分为 5 个子集:子集 1,入射光线角度  $< 12^\circ$ 。子集 2,入射光线角度位于  $13 \sim 25^\circ$ 。子集 3,入射光线角度位于  $26 \sim 50^\circ$ 。子集 4,入射光线角度位于  $51 \sim 77^\circ$ 。子集 5,入射光线角度  $> 77^\circ$ 。在人脸识别实验中,子集 1 用于训练,其余子集用于测试。图 2 显示了同一人不同子集的部分人脸图像。



(a) 子集 1 中部分图像



(b) 子集 2 中部分图像

(a) Some faces from subset 1 (b) Some faces from subset 2



(c) 子集 3 中部分图像



(d) 子集 4 中部分图像

(c) Some faces from subset 3 (d) Some faces from subset 4



(e) 子集 5 中部分图像

(e) Some faces from subset 5

图 2 Yale B 人脸库中同一人的部分人脸图像

Fig. 2 Some samples of one subject from Yale B face database

在对数域对人脸图像进行光照补偿后,直接在对数域进行人脸识别实验。与文献[18]类似,利用 PCA 提取特征(特征向量数为 50),采用基于欧氏距离的最近邻分类器,对光照补偿后的人脸图像的均值和方差分别规范化为 0 和 1。为了找到最佳的小波类型和小波分解级数,本文对不同类型的小波在不同分解级数下进行了光照补偿和人脸识别实验。部分实验结果如表 1 所示。

表 1 在 Yale B 人脸库中的部分实验结果

Tab. 1 Part of experimental results in Yale B face database

小波类型 (小波分解级数)	误识率(%)				
	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
db1(1)	1.67	0.83	0.71	2.11	1.40
db2(2)	0	0	1.43	0.53	0.53
db3(3)	0	0	2.14	3.68	1.75
db4(2)	0	1.67	0.71	2.63	1.40
db6(3)	0	0.83	0.71	1.05	0.70
<b>db10(2)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.53</b>	<b>0.18</b>
db11(3)	0	0	1.43	1.05	0.70
db12(2)	0	0	0.71	1.05	0.53
<b>db16(2)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.53</b>	<b>0.18</b>
db18(2)	0	0	0.71	1.58	0.70
db20(2)	0	0	0	1.05	0.35
sym2(2)	0	0	1.43	0.53	0.53
sym4(2)	0	0.83	0	2.11	0.88
coif2(3)	0	0	0.71	1.58	0.70
coif4(2)	0	0.83	0	1.05	0.53
bior3.3(2)	1.67	0	2.14	1.58	1.40
bior5.5(3)	0	0	0.71	0.53	0.35
rbio3.3(2)	0	0	0.71	1.05	0.53
rbio5.5(3)	0	0	0.71	2.63	1.05

从表 1 可以看出,利用不同的小波类型和不同的小波分解级数进行光照补偿后,会得到不同的人脸识别结果。当采用 db10 和 db16 小波,且小波的分解级数为 2 级时,只有在子集 5 中有 1 个测试样本识别错误,其余样本均能够正确识别,此时的平均误识率最低,仅为 0.18%。

为了进行比较,表 2 列出了几种方法在 Yale B 人脸库中的实验结果。其中包括不进行光照补偿直接利用 PCA 的方法、直方图均衡法、商图像法<sup>[11]</sup>和对数域 DCT 方法<sup>[18]</sup>。从表 2 可以看出,在相同的实验条件下,本节提出的对数域小波变换法具有最低的误识率,利用平均误识率进行比

较,对数域小波变换法的平均误识率比上述方法分别降低了 99.52%、99.35%、97.79% 和 70.49%。

表 2 几种方法在 Yale B 人脸库中的实验结果

Tab. 2 Experimental results of different algorithms in Yale B database

方法	误识率(%)				
	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
直接 PCA 方法	0	6.67	46.71	74.21	37.37
直方图均衡法	0	8.33	47.14	42.63	27.54
商图像法 <sup>[11]</sup>	0	0	9.40	17.50	8.14
对数域 DCT <sup>[18]</sup>	0	0	0.18	1.71	0.61
<b>本文方法</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.53</b>	<b>0.18</b>

### 3.2 在 CAS\_PEAL 人脸库中的实验结果

从 CAS\_PEAL 人脸库<sup>[22]</sup>的 Lighting 子库中,取出 150 人,每人 9 幅图像,共 1350 幅人脸图像。将人脸尺寸剪切为  $64 \times 64$ ,在每个人的 9 幅图像中,把光照方位角为  $0^\circ$  且仰角分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $-45^\circ$  的 3 个样本作为训练集,其余的 6 个样本作为测试集,如图 3 所示。所以一共有 450 个训练样本和 900 个测试样本。



(a) 训练集人脸样本示例

(a) Samples from training set



(b) 测试集人脸样本示例

(b) Samples from test set

图 3 CAS\_PEAL 人脸库中某人的样本示例

Fig. 3 Samples of one subject from CAS\_PEAL face database

在实验中,引入累计匹配特性(Cumulative Match Characteristic, CMC)<sup>[1-2]</sup>曲线来评价光照补偿后的识别性能。其中,累计匹配分数(Cumulative Match Score)表示在识别过程中,识别正确的样本出现在最佳的  $N$  个候选样本中的概率。这种识别率也称为“ $N$ -级”(Rank- $N$ )识别率<sup>[1-2]</sup>。

实验结果表明,不同的小波分解级数对人脸

光照补偿后,会得到不同的识别性能,且分解级数与识别性能之间并没有直接的联系,如图 4 所示,其中,利用 PCA 提取特征时,主分量的个数取为 80。从图 4 可以看出,当 Haar 小波分解 4 级时,在 CAS\_PEAL 人脸库中得到的识别性能最优。

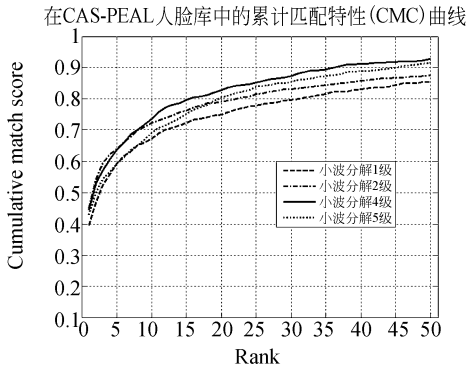


图 4 Haar 小波不同分解级数的 CMC 曲线

Fig. 4 CMC curves of Haar wavelet decomposition at different levels

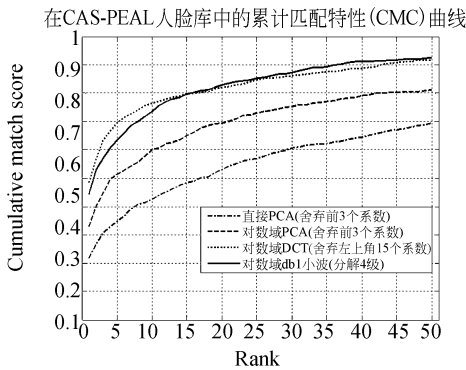


图 5 几种方法的 CMC 曲线

Fig. 5 CMC curves of different algorithms

图 5 显示了基于小波变换的对数域光照补偿算法与其他几种方法的 CMC 曲线(利用 PCA 提取特征时,主分量个数取为 80)。其中,在直接

PCA 方法和对数域 PCA 方法中,均舍弃了代表低频成分的前 3 个主分量<sup>[9]</sup>;在对数域 DCT 方法<sup>[18]</sup>中,通过实验发现,当舍弃 DCT 变换域中左上角 15 个系数后,能够在 CAS\_PEAL 人脸库中得到最好的性能。从图 5 可以看出,当采用 Haar (db1)小波且分解级数为 4 级时,在 CAS\_PEAL 人脸库中对人脸进行光照补偿后,人脸识别的性能与对数域 DCT 方法基本一致,优于直接 PCA 和对数域 PCA 方法。

## 4 结 论

本文对基于小波变换的对数域二维正面人脸非均匀光照补偿进行了研究。将人脸图像通过对数变换后,利用小波变换对图像的高通滤波处理能力,在对数域舍弃低频子带图像的系数,来实现对二维正面人脸非均匀光照的补偿。由于人脸光照补偿的目的是为了提高人脸识别率,所以人脸非均匀光照补偿的性能用人脸识别率来表征。在 Yale B 人脸库中正面人脸集上的实验结果表明,在相同的条件下,采用本文提出的方法进行人脸光照补偿后,人脸识别的误识率低于其它方法。在 CAS\_PEAL 人脸库中的实验结果表明,本文提出的方法对人脸进行光照补偿后,人脸识别性能与对数域 DCT 方法相近,并优于舍弃前 3 个系数的直接 PCA 方法和对数域 PCA 方法。综合来看,本文提出的算法针对总类别数较少且每类训练样本数较多的情形(如 Yale B 人脸库),对人脸进行光照补偿后,能得到比现有其它算法都高的性能。对于总类别数较多且每类训练样本数较少的情况(如 CAS\_PEAL 人脸库),其性能与对数域 DCT 方法接近。

## 参考文献:

- [1] PHILLIPS P J, MOON H, RIZVI S A, *et al.*. The FERET evaluation methodology for face-recognition algorithms [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2000, 22(10):1090-1104.
- [2] PHILLIPS P J, GROTH P, IMCHEALS R J, *et al.*. FRVT 2002: evaluation report[R/OL]. [http://www.frvt.org/DLs/FRVT\\_2002\\_Evaluation\\_Report.pdf](http://www.frvt.org/DLs/FRVT_2002_Evaluation_Report.pdf), 2003.
- [3] WARRINGTON E, TAYLOR A. Two categorical stages of object recognition [J]. *Perception*, 1978, 7: 152-164.
- [4] LIU D H, LAM K M, SHEN L S. Illumination invariant face recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38: 1705-1716.

- [5] GAO Y, LEUNG M K H. Face recognition using line edge map [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2002, 24(6): 764-779.
- [6] GUO B, LAM K M, LIN K H, *et al.*. Human face recognition based on spatially weighted hausdorff distance [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24: 499-507.
- [7] ADINI Y, MOSES Y, ULLMAN S. Face recognition: the problem of compensation for changes in illumination direction [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1997, 19(7): 721-732.
- [8] CHEN H, BELHUMEUR P, JACOBS D. In search of illumination invariants [C]. *In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000: 254-261.
- [9] BELHUMEUR P N, HESPAHHA J P, KRIEGMAN D J. Eigenfaces vs. fisherfaces: recognition using class specific linear projection [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1997, 19(7): 711-720.
- [10] SHASHUA A, RAVIV R T. The quotient image: class-based re-rendering and recognition with varying illuminations [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2001, 23(2): 129-139.
- [11] SHAN S, GAO W, CAO B, *et al.*. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [J]. *In Proceedings of IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures*, 2003: 157-164.
- [12] GEORGHIADES 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 Trans. on PAMI*, 2001, 23(6): 643-660.
- [13] RAMAMOORTHY R. Analytic PCA construction for theoretical analysis of lighting variability in images of a lambertian object [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2002, 24(10): 1-12.
- [14] BASRI R, JACOBS D W. Lambertian reflectance and linear subspaces [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2003, 25(2): 218-233.
- [15] 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.
- QING L Y, SHAN S H, CHEN X L, *et al.*. Face recognition under varying lighting based on the harmonic images [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(5): 760-768. (in Chinese)
- [16] ZHAO W Y, CHELLAPPA R. SFS based view synthesis for robust face recognition [C]. *In Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2000: 285-292.
- [17] BLANZ V, VETTER T. Face recognition based on fitting a 3D mophable model [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 2003, 25(9): 1063-1074.
- [18] CHEN W, ER M J, WU S. 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.
- [19] 陈升来, 黄廉卿, 郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 498-502.
- CHEN S H, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting wavelet transform and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 498-502. (in Chinese)
- [20] 王沛, 姚恒, 李莉. 结合图像空间域和小波域特性的自适应盲水印算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1057-1062.
- WANG P, YAO H, LI L. Adaptive digital watermarking algorithm combining spatial and DWT domain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1057-1062. (in Chinese)
- [21] 王欣, 于晓, 隋永新, 等. 基于多小波的图像处理在电晕检测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 714-719.
- WANG X, YU X, SUI Y X, *et al.*. Application of multiwavelet based image processing to corona detection. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 714-719. (in Chinese)
- [22] GAO W, CAO B, SHAN S, *et al.*. The CAS-PEAL large-scale Chinese face database and baseline evaluations [EB/OL]. [http://www.jdl.ac.cn/~peal/peal\\_tr.pdf](http://www.jdl.ac.cn/~peal/peal_tr.pdf), 2004.