

基于非下采样 Contourlet 变换的 光照不变量提取算法

范春年^{1,2} 张福炎³

(1. 南京信息工程大学江苏省网络监控中心, 南京, 210044; 2. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 南京, 210044; 3. 南京大学计算机系, 南京, 210092)

摘 要: 人脸识别作为一种非接触式、友好的生物特征识别技术, 在军事、公安、经济等领域具有广阔的应用前景。近年来, 人脸识别技术取得了很大进展, 涌现出许多优秀的人脸识别方法, 许多人脸识别系统表现优异。但是, 人脸识别仍是一个没有彻底解决的难题, 光照变化是其中关键问题之一。2006 年 FRVT 测试结果表明光照变化会严重影响自动人脸识别系统的识别性能。为了消除光照变化对人脸识别的影响, 提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换的光照不变量提取算法。首先, 对图像进行光照归一化, 预先减弱光照变化对人脸识别的影响; 其次, 进行对数变换和非下采样 Contourlet 变换, 得到低频分量和高频方向子带分量; 再次, 低频分量进行直方图均衡化以进一步减弱光照的影响, 高频分量进行自适应 NormalShrink 阈值去噪处理; 最后利用处理后的低频和高频方向子带分量进行逆非下采样 Contourlet 变换, 提取到光照不变量, 作为后续的识别依据。为验证算法性能, 本文在 Yale B 和 CMU PIE 人脸库上做了对比实验, 结果表明: 本文方法提取的光照不变量具有较强的鲁棒性, 能够大大提高任意光照情形下的人脸识别率。

关键词: 人脸识别; 光照变化; 光照不变量; 非下采样 Contourlet 变换; NormalShrink; 图像去噪

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)04-0507-07

Illumination Invariant Extracting Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform

FAN Chun-nian^{1,2} ZHANG Fu-yan³

(1. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China; 2. School of Computer & Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044; 3. Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing, 210092, China)

Abstract: Face recognition, a non-contact and friendly biometric identification technology, has broad application prospects in the military, public security and economic security. Related research in recent years has made great progress, a number of excellent face recognition algorithms have emerged, and a number of face recognition systems have achieved good performance. However, many issues still remain to be addressed and illumination changes remain one of the major challenges for current face recognition systems. The report of FRVT 2006 shows that varying illumination will seriously affect the performance of face recognition. In order to eliminate the effect of varying illumination on face recognition, a novel illumination invariant method based on nonsubsampled Contourlet transform is proposed. Firstly, we perform illumination normalization on images under varying illumination, which can reduce the effect of varying illumination to some extent. Secondly, the logarithmic transformation and the nonsubsampled Contourlet transform is used to decompose the images into its low frequency and high frequency directional subband components. Thirdly, adaptive NormalShrink is applied to each directional subband to eliminate noise, and the histogram equalization is applied to the low frequency components aimed at weakening

the illumination affects further. Lastly, the illumination invariant is obtained by inverse nonsubsampling Contourlet transform using the modified low frequency components and high frequency directional subband components. Experimental results on the Yale face database B and CMU PIE database show that the proposed method can effectively eliminate the effect of varying illumination on face recognition and the obtained illumination invariant is robust.

Key words: face recognition; illumination; illumination invariant; nonsubsampling Contourlet transform; NormalShrink; Image denoising

1 引言

人脸识别研究近年来取得了很大进展^[1]。FRVT 2006^[2]测试中,涌现出许多表现优异的人脸识别系统。但人脸识别仍是一个没有彻底解决的难题,光照变化是其中的一个关键问题^[3]。为攻克光照变化问题,研究人员提出了很多方法,大体可分为三类。第一类是光照归一化方法,使用图像处理技术对人脸图像进行预处理以归一化光照,如直方图均衡化、对数变换、Gamma校正^[4]及同态滤波^[5]等;第二类为人脸建模方法,构建一个通用的3D人脸模型,用它来合成不同光照条件和不同姿态的人脸图像。这类方法能同时解决光照和姿态问题,但因为训练时需要充足的样本、需要假设人脸图像是凸结构、并且算法的复杂度较高等缺陷,不适用于实际的人脸识别系统^[6,7];第三类是提取光照不变量方法,试图提取对光照变化具有鲁棒性的人脸特征的方法。如边缘图、灰度导数^[3]、MSR^[8]、GB^[9]和LTV^[10]方法等。

研究表明,人脸的面部结构对识别至关重要,光照变化下的面部结构信息包含在多尺度空间中^[11]。有鉴于此,Zhang等^[11]提出了一种基于小波的光照不变量提取算法(本文简称WD),获得了较好的效果。该算法以朗伯光照模型为基础,引入了小波消噪模型以去除高频中混杂的非图像内在特征的信息,最后获取光照不变量。小波变换是各向同性的,只能表征点状奇异性,对轮廓与纹理等非点状奇异性则无表征能力,因而基于小波变换的光照不变量提取方法会产生较强

的伪Gibbs现象。针对这个不足,2010年,Cheng等^[12]引入多尺度几何分析工具和自适应NormalShrink滤波技术,对WD方法进行改进,提出了一种基于非下采样Contourlet变换的光照不变量提取方法(本文简称NSCT)。Xie等^[13]也提出了类似的算法。NSCT算法首先对图像对数变换再进行非下采样Contourlet变换,得到低频分量和高频方向子带;接着保留低频分量而对高频方向子带进行阈值去噪;最后逆变换得到光照的近似估计,接着用对数变换结果减去光照近似估计获取光照不变量。事实上,NSCT算法中利用低频和去噪后的高频分量重构获得的光照近似估计中除了光照成分,还包含许多有效的识别信息,因而最后利用减法运算提取的光照不变量中就会丢失许多有用的识别信息,这对人脸识别是不利的。针对这个不足,本文提出了一种改进的基于非下采样Contourlet变换的光照不变量提取算法(简称INSCT),算法首先对图像进行光照归一化,预先减弱光照的影响;接着进行对数变换和NSCT变换,得到低频分量和高频方向子带;然后,低频分量直方图均衡化,对高频方向子带进行自适应NormalShrink阈值去噪处理;最后逆非下采样Contourlet变换,得到光照不变量。为验证算法性能,本文在Yale B和CMU PIE人脸库上进行了对比实验,结果表明,本文方法提取的光照不变量具有较强的鲁棒性,能够大大提高任意光照条件下的人脸识别率。

2 算法描述

算法包括六个处理步骤,其处理流程如图1所示。

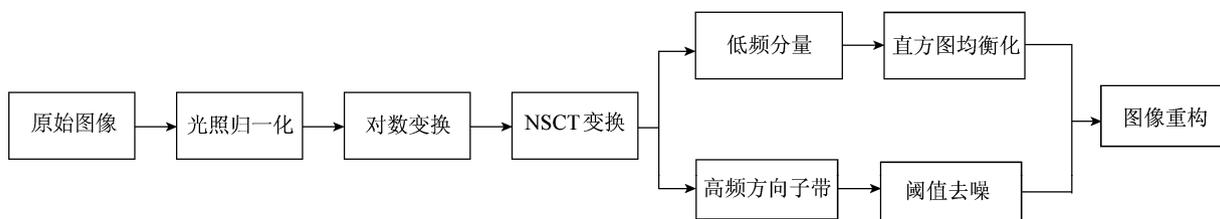


图1 算法处理流程

Fig. 1 Framework of the proposed method

2.1 光照归一化

文献^[14]表明,对人脸图像进行光照归一化预处理后,可以提高光照不变量提取算法的性能。故本文首先对人脸图像进行光照归一化,预先减弱光照变化对人脸识别的影响。光照归一化方法使用了同态滤波结合直方图均衡化的方法^[5]。

2.2 对数变换

对数变换主要有两个方面的作用:一是可以将乘性朗伯光照模型转化为对数域加性模型,这样便于采用信号处理的方法将图像的光照不变(反射)成分和光照成分进行分离;二是对数变换作为一种非线性变换可以将图像的低亮度区域进行大幅拉伸,将图像的高亮度区域进行压缩,提高图像的对比度。

2.3 非下采样 Contourlet 变换

Contourlet 变换^[15]是一种有效的多分辨率多方向的图像表示方法,对细小的有方向的轮廓和线段的表达具备独到的优势。其实质是用类似于线段(Contour segment)的基结构来逼近图像,也称为轮廓波变换。该变换具有多方向和各向异性的特点,可以灵活选择每个尺度的分解方向,不同方向子带能以更稀疏的形式表示曲线。其不足之处在于:基函数没达到理想的光滑度,变换中采用了下采样,这会在高频和低频产生频谱混淆现象,从而减弱了 Contourlet 变换的方向选择性。为此,Da Cunha 等^[16]提出了一种新的非下采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT),变换中采用非下采样操作,其基函数光滑度更高,因而具有平移不变性和更强的方向选择性,减弱了

频谱混淆现象。非下采样 Contourlet 变换的示意图如图 2 所示。

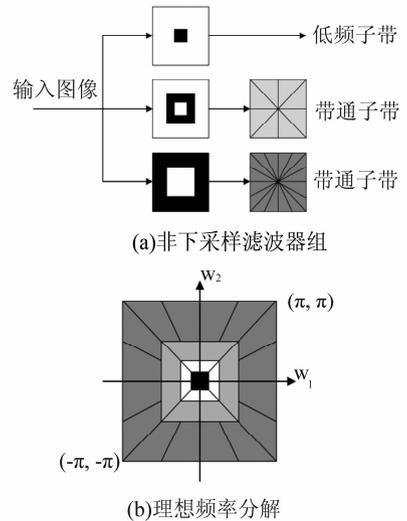


图 2 非下采样 Contourlet 变换示意图

Fig. 2 Diagram of Nonsubsampled Contourlet transform

非下采样 Contourlet 变换能更好地表达图像的二维几何结构,能提取更多的边缘信息,获取更好的效果。一幅人脸图像 2 层 8 方向的非下采样 Contourlet 变换结果如图 3 所示。

本文在对数变换后,对图像进行非下采样 Contourlet 变换。参照文献^[12],对图像进行 3 层非下采样 Contourlet 变换,每个尺度上的方向子带个数分别为 2、4 和 8。变换后得到 1 个低频分量和不同尺度下的共计 14 个高频方向子带($2 + 4 + 8 = 14$)系数。

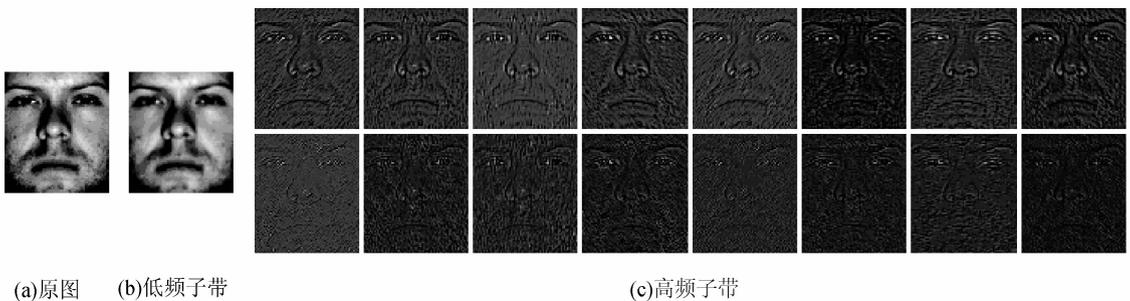


图 3 一幅人脸图像的非下采样 Contourlet 变换

Fig. 3 Nonsubsampled Contourlet transformation of a face image

2.4 低频分量直方图均衡化

非下采样 Contourlet 变换后得到的低频分量中包含了很多光照成分,同时也包含了具有优异分辨能

力的识别信息^[17]。为了保留有用信息的同时尽量去除光照成分,本文对低频分量进行直方图均衡化处理。此举既保留了对识别有用的信息,又在一定程度上去

除了光照的影响。

2.5 高频方向子带的阈值去噪

高频方向子带反映了人脸的边缘和轮廓等特征,对光线变化不太敏感,具有一定的人脸识别性能,但其中也混杂了较多的噪声。本文采取文献^[12] NSCT 算法的策略,对高频子带进行阈值去噪,去噪时采用了自适应软阈值滤波,阈值选择采用 NormalShrink^[18] 方法,每个高频方向子带的阈值均不相同。

2.6 图像重构

利用处理后的低频系数和高频方向子带系数进行逆非下采样 Contourlet 变换,重构图像,得到提取的光照不变量。图 4 展示了原始人脸图像、光照归一化处理后的图像及本算法提取的光照不变量。从图中可以看出,处理后的人脸图像,光照的影响大大减弱了,而对识别有利的人脸的轮廓、关键面部特征的形状、位置及纹理等信息均保留了下来,这更有利于接下来的人脸识别环节。

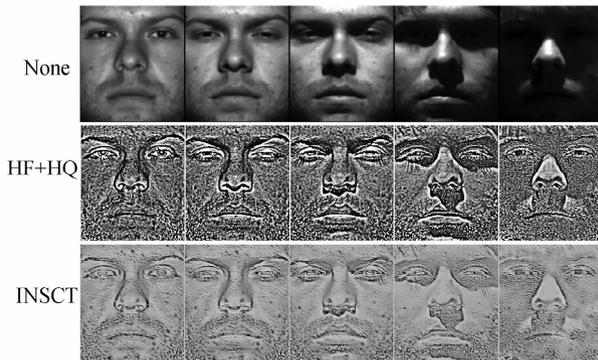


图 4 同态滤波后图像与 IN SCT 算法提取的光照不变量

Fig. 4 Examples of the HF processed images and illumination invariant using the IN SCT method

3 实验及结果

为了验证算法的有效性,我们在 Yale B 和 CMU PIE 人脸库上进行了对比实验。实验中本文算法(IN-SCT)与 MSR、GB、LTV、NSCT 方法进行了比较,给出了相应的实验结果。各种方法的参数设置与相应的参考文献一致。不同方法处理后得到的光照不变量如图 5 所示。实验中,在特征提取阶段,分别用各自算法提取光照不变量;在识别阶段,采用对光照变化敏感的 Eigenfaces 方法,计算欧氏距离,选择最近邻分类器进

行分类,计算首次识别率(Top 1)。

3.1 Yale B 人脸库的实验结果

Yale B^[6] 人脸库由 Yale 大学计算视觉与控制中心建立,采集了 10 人的图像,每人有 9 种姿态变化,64 种光照变化。本文仅关注光照变化,实验中选用了 64 种不同光照条件的正面图像。所有图像都进行手工对齐和人工裁剪仅保留面部区域。实验中 640 幅图像依据光源方向分为 5 个子集:子集 1(角度<12),子集 2(20<角度<25),子集 3(35<角度<50),子集 4(60<角度<77)和子集 5(其他)。其中一人 5 个子集的 25 幅图像及本文算法提取的对应的光照不变量如图 6 所示。

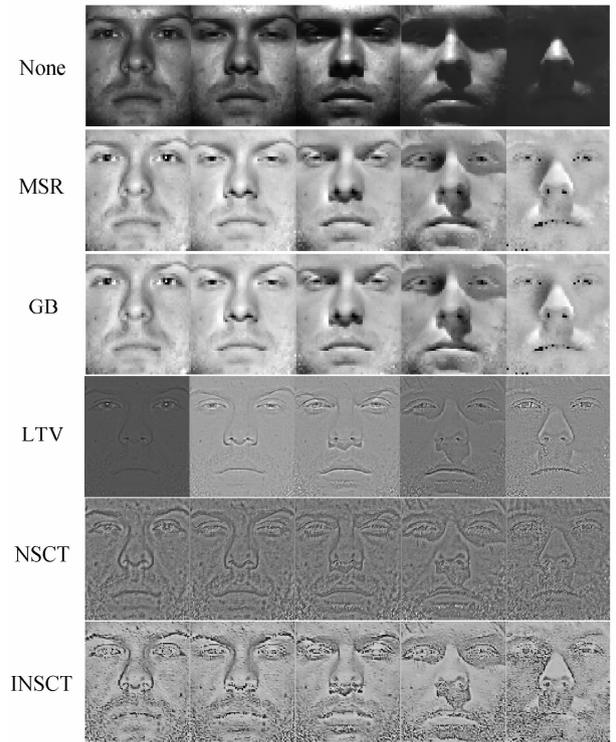


图 5 不同方法提取的光照不变量

Fig. 5 Examples of the effects of the different illumination invariants

实验分三组进行,分别选择光照变化较小的子集 1、光照变化大的子集 4 以及随机选取 10 幅图像作为训练集,其余图像作为测试集,计算各自的首次识别率。在随机选取 10 幅图像作为训练集的实验中,为得到可信数据,重复该操作 50 次求取平均值。实验结果如表 1-3 所示。注意,计算平均识别率时采用了加权平均,权重为各个子集所包含的图像个数占总图像个数的比率。

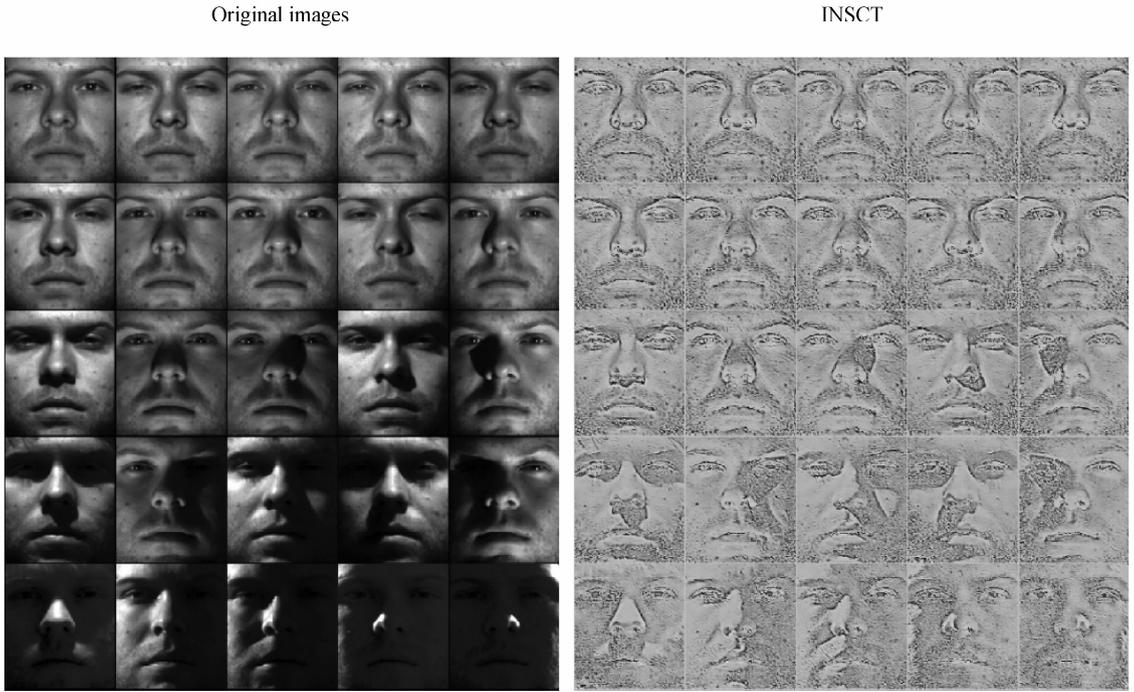


图 6 Yale B 人脸库的光照不变量

Fig. 6 Original and their illumination invariants on Yale B

实验分别选择了不同光照变化强度的训练集,实验结果表明本文算法的识别率均高于其他方法,在极端光照条件下优势更加突出。这说明本文方法提取的光照不变量确实是一种有效的具备光照不变性的人脸特征。

表 1 子集 1 作为训练集时不同方法的识别率
Tab. 1 Recognition rates of various methods when using images of subset 1 as training set

方法 (%)	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
原图	89.17	40.83	16.43	11.05	35.09
MSR	97.50	64.17	40.00	58.95	63.51
GB	95.00	98.33	61.43	28.95	65.44
LTV	85.00	100.00	89.29	98.42	93.68
NSCT	95.00	100.00	94.29	97.37	96.67
本文算法	99.17	100.00	95.00	98.42	98.07

表 2 子集 4 作为训练集时不同方法的识别率
Tab. 2 Recognition rates of various methods when using images of subset 4 as training set

方法 (%)	子集 1	子集 2	子集 3	子集 5	平均
原图	15.71	22.50	42.50	25.26	27.40
MSR	72.86	70.00	50.83	81.05	70.00
GB	74.29	56.67	75.00	68.95	68.20
LTV	94.29	95.00	100.00	99.47	97.80
NSCT	100.00	99.17	100.00	100.00	99.80
本文算法	100.00	99.86	100.00	100.00	99.96

表 3 随机选择 10 幅图像作为训练集时不同方法的识别率
Tab. 3 Recognition rates of various methods when randomly choosing ten images per person as training set

方法 (%)	子集 1	子集 2	子集 3	子集 4	子集 5	平均
原图	20.00	26.67	50.00	39.29	20.53	31.25
MSR	94.29	91.67	56.67	71.43	90.00	80.47
GB	84.29	70.00	86.67	88.57	75.79	80.47
LTV	100.00	99.17	100.00	100.00	99.47	99.69
NSCT	100.00	99.28	99.78	99.29	99.99	99.67
本文算法	100.00	99.95	100.00	100.00	100.00	99.99

3.2 CMU PIE 人脸库的实验结果

CMU PIE^[19]人脸库由美国卡耐基梅隆大学创建,该人脸库包含 68 位志愿者的 41368 张多种姿态、多种光照情况和不同表情的面部图像。库中的姿态和光照变化图像是在严格的控制条件下采集的。本文选择不同光照变化的正面无表情人脸图像进行实验。所有图像都进行了手工对齐和人工裁剪以仅包含面部区域。一个人不同光照条件下的原始图像及本文算法提取的光照不变量如图 7 所示。

实验中随机选取 4 幅图像作为训练集,其余图像作为测试集,计算首次识别率 (Top 1)。为获取可信结果,实验重复 50 次,计算平均值。表 4 列出了实验结果,从中可以看到,本文方法的识别率均高于其他方法。

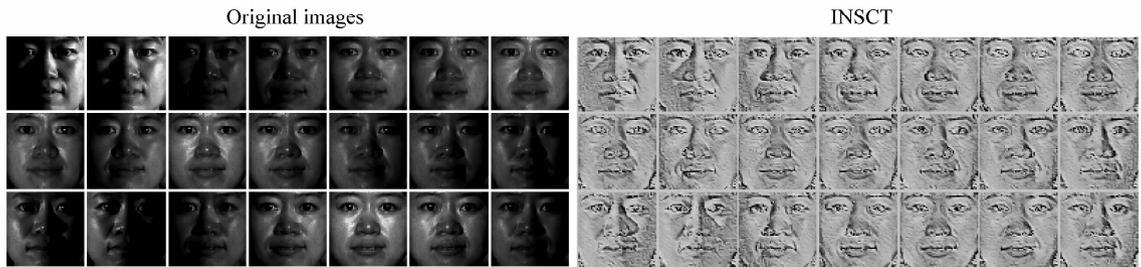


图7 CMU PIE 人脸库上提取的光照不变量

Fig. 7 Original images and their illumination invariants using INSCT on CMU PIE

表4 随机选择4幅图像作为训练集的平均识别率

Tab. 4 Average recognition rates of various methods when randomly choosing 4 images per person as training set

算法(%)	原图	MSR	GB	LTV	NSCT	本文算法
平均识别率(%)	42.17	84.50	92.02	99.37	98.94	99.64

4 结论

本文提出了一种新的基于非下采样 Contourlet 变换的光照不变量提取算法,相比于其他方法,该算法提取的光照不变量保持了良好的边缘特征和几何结构,对光照变换具有较强的鲁棒性;在 Yale B 和 CMU PIE 人脸库上取得了非常好的实验结果;同时,该算法无需预先获取 3D 形状和光源等先验信息;此外,该算法在训练时也不需要大量的训练样本,能够运用于单训练样本的人脸识别场合。

参考文献

- [1] Zhao, W., et al. Face Recognition: A Literature Survey [J]. ACM Computing Surveys, 2003, 35(4):399-458.
- [2] Phillips, P. J., et al. FRVT 2006 and ICE 2006 Large-Scale Experimental Results [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(5):831-846.
- [3] Adini, Y., Y. Moses and S. Ullman. Face Recognition: The Problem of Compensating for Changes in Illumination Direction [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7):721-732.
- [4] Shan, S., et al. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [C]. in Proceedings of the IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures (AMFG'03), Nice, France, Oct. 16-17, 2003, IEEE Computer Society, 17,157-164.
- [5] Fan, C.-N. and F.-Y. Zhang. Homomorphic filtering based illumination normalization method for face recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(10):1468-1479.
- [6] Georgiades, A. S. and P. N. Belhumeur. From Few to Many: Illumination Cone Models for Face Recognition Under Variable Lighting and Pose [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6):643-660.
- [7] Basri, R. and D. W. Jacobs. Lambertian reflectance and linear subspaces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2):218-233.
- [8] Jobson, D. J., Z. Rahman and G. A. Woodell. A multi-scale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7):965-976.
- [9] Gross, R. and V. Brajovic, An Image Preprocessing Algorithm for Illumination Invariant Face Recognition, in Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication. 2003, Springer: Guildford, UK. 10-18.
- [10] Chen, T., et al. Total variation models for variable lighting face recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9):1519-1524.
- [11] Zhang, T., et al. Multiscale facial structure representation for face recognition under varying illumination [J]. Pattern Recognition, 2009, 42(2):251-258.
- [12] Cheng, Y., et al. Robust face recognition based on illumination invariant in nonsubsampling contourlet transform domain [J]. Neurocomputing, 2010, 73(10-12):2217-2224.
- [13] Xie, X., J. Lai and W.-S. Zheng. Extraction of illu-

- mination invariant facial features from a single image using nonsubsampled contourlet transform [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(12):4177-4189.
- [14] Tan, X. and B. Triggs. Enhanced Local Texture Feature Sets for Face Recognition Under Difficult Lighting Conditions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6):1635-1650.
- [15] Do, M. N. and M. Vetterli. The Contourlet Transform; An Efficient Directional Multiresolution Image Representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12):2091-2106.
- [16] da Cunha, A. L. , Z. Jianping and M. N. Do. The Non-subsampled Contourlet Transform; Theory, Design, and Applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10):3089-3101.
- [17] 夏思宇等. 一种基于 Contourlet 变换的人脸识别方法 [J]. 信号处理, 2008, 24(4):631-634.
XIA Si-yu, , et al. Face Recognition based on Contourlet Transform [J]. Signal Processing, 2008, 24 (4): 631-634. (in Chinese)
- [18] Liang-liang, H. , W. Hong-zhi and Z. Bo. Adaptive Thresholds Algorithm of Image Denoising Based on Non-subsampled Contourlet Transform [C]. // Proceedings of International Conference on Computer Science and Software Engineering Wuhan, China; IEEE Computer Society, 2008: 209-212.
- [19] Sim, T. , S. Baker and M. Bsat. The CMU pose, illumination, and expression database [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2003, 25(12):1615-1618.

作者简介



范春年(1979-),女,博士,讲师,研究方向:图像处理与模式识别。
E-mail:fcn@nuist.edu.cn



张福炎(1939-),男,学士,教授,博士生导师,研究方向为多媒体技术及其应用系统、多媒体网络及数字化图书馆。