

文章编号: 1000-5862(2013)04-0397-04

Curvelet 变换在人脸识别中的应用研究

赵庆敏, 欧阳欢, 辜道平

(南昌大学信息工程学院 江西 南昌 330031)

摘要: 针对小波只能反映信号的点奇异性, 无法实现人脸图像面部轮廓和五官曲线信息的最优稀疏表示, 提出了一种基于第2代 Curvelet 的人脸识别算法. 通过对人脸图像进行第2代 Curvelet 变换, 分解得到表征人脸基本信息的低频系数, 再利用双向2维主成分分析((2D)²PCA)进行降维, 并结合最近邻算法进行人脸识别. 以 ORL 人脸数据库进行试验, 结果表明: 与基于小波变换的算法相比, 该算法具有更高识别率和更短的识别时间.

关键词: 小波; 人脸识别; 第2代 Curvelet; 双向2维主成分分析

中图分类号: TP 391.41

文献标志码: A

0 引言

人脸识别技术作为一种最友好的生物特征识别技术^[1], 在安防监控、用户认证、人机交互等方面有着非常广泛的应用, 已经得到了广大科学工作者的普遍关注, 并且产生了许多优秀的人脸识别算法. 小波变换因其较强的时、频局部化分析能力和多分辨率的特点, 已经被广泛应用于人脸识别当中^[2]. 然而小波变换的基是各向同性的, 仅仅能反映1维信号中奇异点的性质, 而无法表达2维图像的“沿”边缘特征. 对含有较多面部轮廓和五官曲线信息的人脸图像无法实现最优的稀疏表示. E. J. Candès 等^[3]提出的 Curvelet 变换在很大程度上弥补了小波变换的缺陷, Curvelet 变换不但具有小波多尺度的特点, 同时具有较强的方向性、高度各向异性, 能够较好地表示直线奇异和曲线奇异特征, 相比小波可以更稀疏地表达图像, 使信号能量更集中. 针对第1代 Curvelet 实现过程复杂、冗余度较高的不足^[4], E. J. Candès 等^[5]于2002年构造了新的 Curvelet 框架体系, 称为第2代 Curvelet 变换, 之后又于2005年提出了2种快速离散实现方法, 实现方法更简单、快

速, 大大降低了算法的冗余度.

本文提出了一种基于第2代 Curvelet 和 (2D)²PCA 的人脸识别算法. (2D)²PCA 可以同时利用行和列上的投影矩阵, 消除了图像行和列的相关性^[6]. 相比于2维主成分分析(2DPCA), 有效降低了计算复杂度, 大大压缩了特征向量的维数. 采用 ORL 人脸数据库进行试验, 结果表明: 与基于传统小波变换的人脸识别算法相比, 该算法具有明显的优势.

1 第2代 Curvelet 变换

1.1 离散 Curvelet 变换

笛卡尔坐标系下的局部窗为^[7] $\tilde{U}_j(\omega) = \tilde{W}_j(\omega) V_j(\omega)$, 其中 $\tilde{W}_j(\omega) = \sqrt{\Phi_{j+1}^2(\omega) - \Phi_j^2(\omega)}$, $V_j(\omega) = V(2^{\lfloor j/2 \rfloor} \omega_2 / \omega_1)$, $j \geq 0$, $\tilde{W}_j(\omega)$ 和 $V_j(\omega)$ 分别为径向窗和角度窗, 局部窗 \tilde{U}_j 是受 \tilde{W}_j 和 V_j 支撑区间限制的楔形区域, 如图1中的楔形阴影区域. Φ 为1维低通窗口的内积, 且 $\Phi_j(\omega_1, \omega_2) = \phi(2^{-j}\omega_1) \cdot \phi(2^{-j}\omega_2)$.

引入等间隔斜率序列 $\tan \theta_l = l \times 2^{\lfloor -j/2 \rfloor}$, $l =$

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 江西省科技支撑计划(2009BGB01900)资助项目.

作者简介: 赵庆敏(1964-), 女, 天津人, 副教授, 主要从事计算机网络方面的研究.

$-2^{\lfloor -j/2 \rfloor}, \dots, 2^{\lfloor -j/2 \rfloor} - 1$ 则有 $V_j(S_{\theta_l} \omega) = V_j(2^{\lfloor j/2 \rfloor} \omega_2 / \omega_1 - l)$ 其中 S_{θ_l} 为一剪切矩 $S_{\theta_l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \theta_l & 1 \end{bmatrix}$ 则离散 Curvelet 变换可表示为 $c^D(j, l, k) = \int f(\omega) \tilde{U}(S_{\theta_l}^{-1} \omega) \exp[i \langle S_{\theta_l}^{-T} b, \omega \rangle] d\omega$ 其中 b 取离散值 $(k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j/2})$.

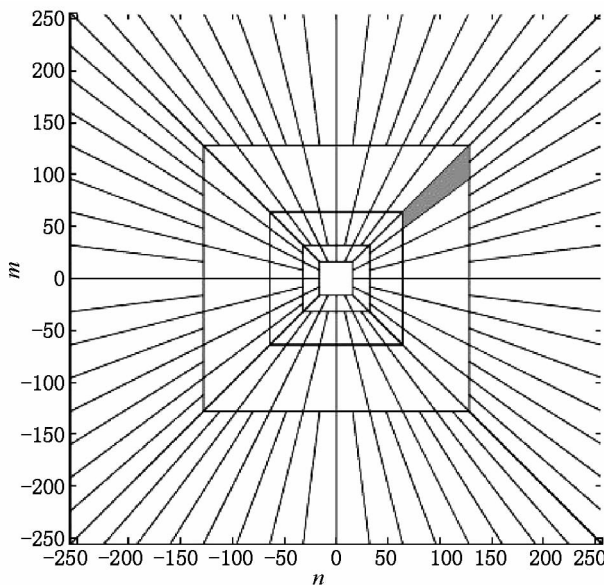


图1 离散 Curvelet 变换的尺度角度分割图

1.2 实现方法

E. J. Candès 等设计了 2 种快速离散 Curvelet 算法, 分别是 USFFT 算法和 Wrap 算法, 它们具有相同的输出结果, 但后者的速度更快且效率更高, 故本文采用第 2 种算法.

基于 Wrapping 的快速离散 Curvelet 变换算法^[8-10]具体步骤为

- (i) 对于给定的一个笛卡尔坐标系下的 2 维函数进行 2D FFT 变换, 得到 2 维频域表示为 $\hat{f}[n_1, n_2]$, $-n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2$;
- (ii) 在频域, 对于每一对 (j, l) (尺度, 角度), 重采样 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 将得到的采样值 \hat{f} 与窗函数 \tilde{U}_j 相乘得 $\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \tilde{U}_j[n_1, n_2]$;
- (iii) 围绕原点 Wrapping 局部化 $\hat{f}[n_1, n_2]$;
- (iv) 对局部化的 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 进行 2D FFT 逆变换, 可得离散的 Curvelet 系数集合 $c^D(j, l, k)$.

1.3 基于第 2 代 Curvelet 的人脸图像分解

图像进行第 2 代 Curvelet 变换后, 将被分解为

低频子带部分和不同方向和尺度的高频子带部分. 以一幅 112×92 的人脸图像为例, 对它进行第 2 代 Curvelet 分解, 如图 2 所示. 图像被划分为 4 个尺度层, 最内层称为 Coarse 尺度层 (最粗尺度层), 位于该系数显示图的最中央, 是由低频系数组成的一个 19×15 的矩阵, 该系数矩阵包含了人脸最主要的特征信息; 最外层称为 Fine 尺度层, 是由高频系数组成的一个 112×92 的矩阵; 中间的第 2 层 ~ 第 3 层称为 Detail 层, 每层系数被分割为 2 个大方向, 每个方向被划分为 8 个、16 个小方向, 每个小方向是由中高频系数组成的矩阵, 高频部分包含人脸面部轮廓和五官曲线信息.

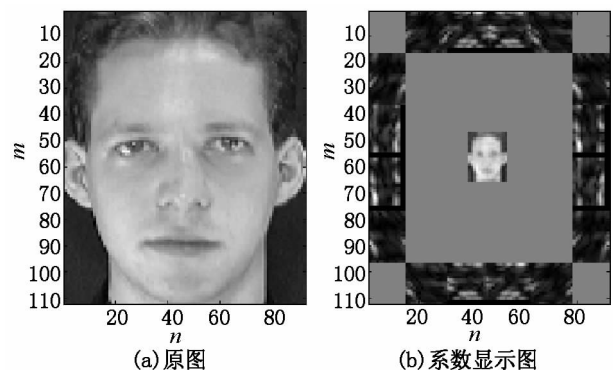


图2 第 2 代 Curvelet 变换后系数显示图

2 基于第 2 代 Curvelet 和 $(2D)^2PCA$ 的人脸识别算法

Curvelet 分解后得到的低频系数能较好地表征人脸的基本特征, 但将它直接作为特征向量, 数据量依然较大, 通过 $(2D)^2PCA$ 可将其进一步压缩降维, 减少数据运算量, 方便后面的分类识别.

令 F 为第 2 代 Curvelet 变换后得到的低频人脸图像, 其尺寸为 $m \times n$. $(2D)^2PCA$ 主要包括行 2DPCA 和列 2DPCA, 即在水平和垂直方向上分别执行 2DPCA, 将可获得 2 个方向上的最优投影向量 X 和 Y , 将低频人脸图像 F 同时投影到 X 和 Y 上, 最终可得到一个 $p \times q$ 矩阵 L , $L = Y_i^T F X_j$, $i = 1, 2, \dots, p$, $j = 1, 2, \dots, q$, 其中 L 为人脸识别的特征矩阵, 可用来重构人脸图像, 其尺寸 $p \times q$ 要远小于 $m \times n$, 从而有效地降低了特征向量的维数.

采用最近邻分类器对样本进行分类, 对于给定的测试样本, 通过计算可得到相应的特征矩阵 L . 对

于训练样本的低频人脸图像 F' , 将其同时投影到 X 和 Y 可得到训练特征矩阵 L_k . 最后, 利用

$$d(L, L_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (L^{(i,j)} - L_k^{(i,j)})^2}$$

计算出 L 和 L_k 的距离.

若 $d(L, L_k) = \min_j d(L, L_j)$, $j = 1, 2, \dots, N$, N 为样本总数, 并且有 $L_k \in \omega_i$ (ω_i 表示第 i 个类别), 则 $L \in \omega_i$.

3 实验结果及分析

本文从 ORL 人脸数据库选取人脸图像样本进行人脸识别实验. ORL 人脸数据库共有 40 类 400 张人脸图像, 图像尺寸为 112×92 , Curvelet 分解后得到的低频部分形成的图像(称为“曲波脸”)尺寸为 19×15 . 部分样本图像及“曲波脸”图像如图 3 所示.



图 3 ORL 人脸数据库的样本图像及对应的“曲波脸”图像

为了验证算法的有效性, 分别利用基于小波 (Wavelet) 变换的 $(2D)^2PCA$ 算法和本文算法对以上数据库进行人脸识别. 在实验前, 对所有人脸图像进行预处理和归一化, 以消除光照和姿态对人脸识别的影响.

在 ORL 人脸数据库中选取 150 张人脸图像作为训练集合, 其余 250 张人脸图像作为测试集合. 在不同的特征矩阵的维数下, 分别任意地进行 10 次实验, 仿真实验利用 Matlab 软件实现, 相应的实验结果见表 1, 其对应的人脸识别仿真曲线如图 4 所示.

表 1 ORL 人脸数据库实验结果

人脸库	算法	识别率/%	识别时间/s
ORL	Wavelet + $(2D)^2PCA$	94.26	0.558 6
人脸库	Curvelet + $(2D)^2PCA$	98.28	0.431 5

注: 表中的识别率为 10 次实验识别率的平均值.

从表 1 可以看出, 基于第 2 代 Curvelet 的 $(2D)^2PCA$ 人脸识别算法具有更高的识别率和更短的识别时间. 图 4 为在 ORL 人脸数据库实验当中得到的识别率与特征向量维数之间的关系仿真曲线,

这幅图进一步说明了本文算法要明显优越于基于传统小波的 $(2D)^2PCA$ 的人脸识别算法. 从图 4 也可以看出, 随着特征向量维数的增加, 识别率也越来越高, 但当达到一定维数之后, 识别率不再增加, 反而有下降趋势. 当特征向量维数为 8 时, 基于第 2 代 Curvelet 的 $(2D)^2PCA$ 人脸识别算法的平均识别率最高, 可以获得最好的人脸识别效果, 识别时间也较短.

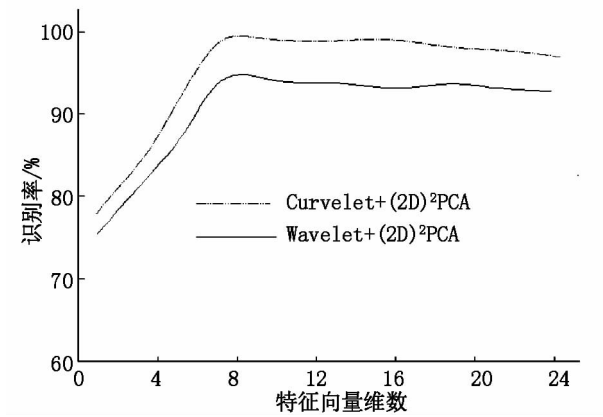


图 4 ORL 人脸数据库的识别仿真结果

4 结论

Curvelet 具有多方向多尺度的特点, 能很好地表示曲线特征. 对含有大量曲线信息的人脸图像能实现最优的稀疏表示. 本文研究了第 2 代 Curvelet 在人脸识别中的应用, 并以 ORL 人脸数据库为例进行了仿真分析. 仿真结果表明, 基于第 2 代 Curvelet 的人脸识别算法具有较好的人脸识别效果, 和传统的人脸识别算法相比, 不仅提高了识别率, 而且降低了识别时间, 在人脸识别中具有广阔的应用前景.

5 参考文献

[1] 王映辉. 人脸识别: 原理、方法与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[2] Amira A, Farrell P. An automatic face recognition system based on wavelet transforms [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005, 5: 6252-6255.

[3] Candès E J, Donoho D L. Curvelet-A surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges [C]. TN: Vanderbilt University Press, 2000: 105-120.

[4] Donoho D L, Duncan M R. Digital curvelet transform:

- strategy, implementation and experiments [EB/OL]. [2012-11-16]. http://spie.org/x648.html?product_id=381679.
- [5] Candès E J, Demanet L, Donoho D, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling & Simulation 2005, 5(3): 861-899.
- [6] Zhang Daoqiang, Zhou Zhihua. $(2D)^2$ PCA: two-directional two-dimensional PCA for efficient face representation and recognition [J]. Neurocomputing 2005, 69(1/2/3): 224-231.
- [7] 焦李成. 图像多尺度几何分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社 2008.
- [8] 杨家红, 许灿辉, 王耀南. 基于快速曲波变换的图像去噪算法 [J]. 计算机工程与应用 2007, 43(6): 31-33.
- [9] 赵晓花, 张贵仓. 一种基于边缘检测和正负量化的盲水印算法 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013, 37(1): 42-45.
- [10] 王俊杰, 张宇波. 基于线性回归的图像边缘处理算法的研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013, 37(1): 56-59.

Application Study on Curvelet Transform in Face Recognition

ZHAO Qing-min, OUYANG Huan, GU Dao-ping

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031, China)

Abstract: As wavelet can only reflect the zero-dimensional singularities of signal and cannot provide an optimally sparse representation of facial contour and five sense organs' curve information of face image, a face recognition algorithm based on second-generation curvelet transform is proposed. The proposed method firstly transforms face image with second-generation curvelet to get low frequency coefficients with facial basic information and then reduce dimensions with the two-directional two-dimensional principal component analysis ($(2D)^2$ PCA). At last the test face is recognized by using the nearest distance algorithm. Experimental results on ORL and Yale face database show that the proposed method has higher recognition rate and less recognition time than the method based on wavelet.

Key words: wavelet; face recognition; second-generation curvelet; two-directional two-dimensional principal component analysis ($(2D)^2$ PCA)

(责任编辑: 冉小晓)