

文章编号:1004-9037(2014)05-0699-05

基于退化四元小波变换的纸币识别

盖 杉^{1,2} 罗立民¹

(1. 东南大学计算机科学与工程学院, 南京, 210096;

2. 江苏省社会安全图像与视频理解重点实验室(南京理工大学), 南京, 210094)

摘要:针对如何提取纸币图像特征和提高识别率的问题,综合利用退化四元小波变换具有的相位特性,提出一种基于退化四元小波变换的纸币识别方法。该方法首先对采集的纸币图像进行倾斜校正和边缘检测,然后运用退化四元小波对纸币图像进行分解操作,并对分解系数进行统计分析,将每个分解子带系数的能量和标准差作为该纸币图像的特征向量,最后将支持向量机作为分类器对纸币图像进行识别。本文方法在资源约束的嵌入式清分系统上实现,实验结果表明采用本文提出的算法突破了传统纸币识别系统识别率很难再提高的瓶颈,同时能够满足清分系统的实时性要求。

关键词:退化四元小波变换;特征提取;支持向量机;纸币识别

中图分类号:TP391.43

文献标志码:A

Banknote Recognition Based on Reduced Quaternion Wavelet Transform

Gai Shan^{1,2}, Luo Limin¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Image and Video Understanding for Social Safety, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: A new banknote classification method is proposed by using phase concept of reduced quaternion wavelet transform (RQWT) to improve the banknote recognition rate and feature extraction. Banknote is preprocessed including edge detection and slant correction. And image is decomposed by reduced quaternion wavelet. The statistical characteristics of the decomposition coefficients are used as features of the banknote image for classification. Finally, the support vector machine is applied as classifier in the banknote classification system. The experimental results show that the proposed method can obtain better results compared with other conventional methods and satisfy the real-time requirements.

Key words: reduced quaternion wavelet transform; feature extraction; support vector machine; banknote recognition

引 言

纸币流通期短暂,需要不断地被清点、分类。金融系统每天需要对海量的纸币进行清分,分辨种类、鉴别真伪,并按新旧、污损程度进行分类。人工完成这一过程效率低,易出错,并且缺乏客观标准。

自动化的纸币清分系统能够在纸币一次通过机器的情况下,根据纸币的图案与尺寸,对钞票的柔软性、肮脏、胶带、折角、多张重叠、破洞、裂缝与缺损等多种状况进行检测,最终实现对纸币的点算、鉴伪并按照面额、版本、正反面进行清分。其中纸币图像特征提取技术是纸币清分系统中最为重要的步骤。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61202319)资助项目;江西省教育厅(GJJ13481)资助项目;江苏省社会安全图像与视频理解重点实验室(南京理工大学)(30920140122007)资助项目;中国博士后基金(2013M530223, 2013M530224)资助项目。

收稿日期:2014-06-03;**修订日期:**2014-06-16

目前提取纸币图像特征的常用方法主要有几何特征^[1]、网格特征^[2-3]、自由掩模^[4]和类 Haar 小波特征。文献[5]针对污损纸币提出一种基于分量的特征提取算法,该算法在一定程度上克服了污损对纸币图像特征的影响。文献[6]利用统计模型模拟纸币图像在流通中的退化过程,同时构造了特征提取模型。文献[7]利用四元小波对纸币图像的统计特性进行分析,并建立了纸币图像的统计模型。

四元小波变换(Quaternion wavelet transform, QWT)^[8]作为一种新的多尺度分析工具能够更好地捕获图像的纹理和几何特征。目前 QWT 已经广泛应用于图像理解与分析等领域^[9-12]。然而, QWT 构造准则中的乘法运算不具有交换性,同时也很难区分图像对角线方向的纹理特征。针对上述问题,本文提出一种新的基于退化四元小波变换(Reduced quaternion wavelet transform, RQWT)的纸币识别方法。本文利用 RQWT 捕捉纸币图像具有的纹理特征,然后提取出每个分解子带的能量和标准差作为特征向量,采用最小二乘支持向量机^[13-14](Least square support vector machine, LS-SVM)作为分类器完成识别。实验结果表明采用本文方法提取的纸币特征具有良好的可分性,并且取得了较高的识别率,降低了系统的计算复杂度,能够满足清分系统每分钟识别 860 张纸币的实时性要求。

1 退化四元小波变换

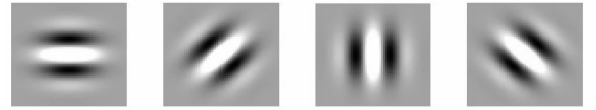
采用 QWT 对图像进行分解的时候很难区分纸币图像位于对角线方向的纹理特征信息,同时具有较高的计算复杂度。在 QWT 构造机理的启发下,本文提出一种新的图像描述手段退化四元小波变换 RQWT。该变换通过对 QWT 中使用的 Gabor 滤波器旋转一定的角度 α 来实现。由于要区分图像对角线方向的纹理特征信息,所以在本文方法中的角度取为 45° 。令 f_1 和 f_2 表示新构造的旋转滤波器,有

$$f_1 = g(x, y, \theta_1, f) \exp\left(i \frac{3x}{\theta_1}\right) \exp\left(j \frac{3y}{\theta_1}\right) \quad (1)$$

$$f_2 = g(x, y, \theta_2, f) \exp\left(i \frac{3x}{\theta_2}\right) \exp\left(j \frac{3y}{\theta_2}\right) \quad (2)$$

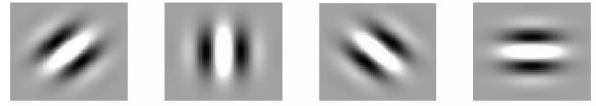
式中: $\theta_i = \sigma_i - 45^\circ$ ($i = 1, 2$)。令 H_r^R, G_r^R 分别表示滤波器 f_1, f_2 沿着行进行下 2 采样得到的滤波器, H_r^R, G_r^R 表示滤波器 f_1, f_2 沿着列下 2 采样得到的滤波器,这样可以得到 4 种组合滤波器。图像经过 RQWT 分解后可以得到更多关于图像位于对角线方向的纹理信息。图 1 表示经过 QWT 和 RQWT

滤波器作用后的脉冲响应。从图中可以看到使用 QWT 中滤波器的方向为 $\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$, 而使用 RQWT 滤波器的方向为 $\{45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 0^\circ\}$, 此外 QWT 和 RQWT 具有相同的计算复杂度。



(a) 2-D QWT 滤波器脉冲响应

(a) Impulse response of filter for 2-D QWT



(b) 2-D RQWT 滤波器脉冲响应

(b) Impulse response of filter for 2-D RQWT

图 1 2-D QWT 和 RQWT 的滤波器脉冲响应

Fig. 1 Impulse response of filter for 2-D QWT and RQWT

假设 ϕ 表示退化四元小波尺度函数, ψ^D, ψ^V, ψ^H 分别表示退化四元小波基函数, 按着实数小波与复数小波多分辨率分析构造框架的思路, 分别对四元二维解析信号的 3 个虚部进行希尔伯特变换, 得到

$$\begin{cases} \phi(x, y) = \phi_h(x)\phi_h(y) + i\phi_g(x)\phi_h(y) + \\ \quad j\phi_h(x)\phi_g(y) + k\phi_g(x)\phi_g(y) \\ \psi^H(x, y) = \psi_h(x)\phi_h(y) + i\psi_g(x)\phi_h(y) + \\ \quad j\psi_h(x)\phi_g(y) + k\psi_g(x)\phi_g(y) \\ \psi^V(x, y) = \psi_h(y)\phi_h(x) + i\psi_h(y)\phi_g(x) + \\ \quad j\psi_g(y)\phi_h(x) + k\psi_g(y)\phi_g(x) \\ \psi^D(x, y) = \psi_h(x)\psi_h(y) + i\psi_g(x)\psi_h(y) + \\ \quad j\psi_h(x)\psi_g(y) + k\psi_g(x)\psi_g(y) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϕ_h, ϕ_g 表示一维尺度函数; ψ_h, ψ_g 表示一维小波基函数。由式(3)可知, RQWT 是由 4 个实小波变换构成, 其中一个实小波变换构成 RQWT 实部, 另外 3 个实小波变换构成 RQWT 的 3 个虚部。其分解系数可由 4 个四元数表示如式(4)。

$$\begin{cases} RQ_1 = LL_{\phi_h(x)\phi_h(y)} + iLH_{\phi_h(x)\psi_h(y)} + jHL_{\psi_h(x)\phi_h(y)} + \\ \quad kHH_{\psi_h(x)\psi_h(y)} \\ RQ_2 = LL_{\phi_g(x)\phi_h(y)} + iLH_{\phi_g(x)\psi_h(y)} + jHL_{\psi_g(x)\phi_h(y)} + \\ \quad kHH_{\psi_g(x)\psi_h(y)} \\ RQ_3 = LL_{\phi_h(x)\phi_g(y)} + iLH_{\phi_h(x)\psi_g(y)} + jHL_{\psi_h(x)\phi_g(y)} + \\ \quad kHH_{\psi_h(x)\psi_g(y)} \\ RQ_4 = LL_{\phi_g(x)\phi_g(y)} + iLH_{\phi_g(x)\psi_g(y)} + jHL_{\psi_g(x)\phi_g(y)} + \\ \quad kHH_{\psi_g(x)\psi_g(y)} \end{cases} \quad (4)$$

2 纸币清分系统

2.1 纸币图像预处理

纸币图像预处理包括纸币图像边缘检测和纸币图像倾斜校正。首先利用纸币图像边缘为直线的特点,不需要检测出边缘上的每一个点,只需要检测出边缘上的若干离散点就可以拟合出边缘直线,本文采用在纸币图像上等间隔位置检测的方法,每一条边检测出一个边缘点序列,用边缘点序列作最小二乘拟合得到边缘直线。由于高速扫描装置是在纸币运动过程中扫描图像,因此一般情况下都会存在一定程度的几何变形,这种变形来自两个方面。一方面是纸币倾斜造成的,另一方面是纸币在扫描过程中横向移动造成的。图2,3为纸币边缘检测和倾斜校正。

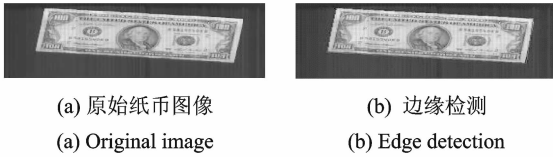


图2 纸币图像边缘检测

Fig. 2 Edge detection of banknote image

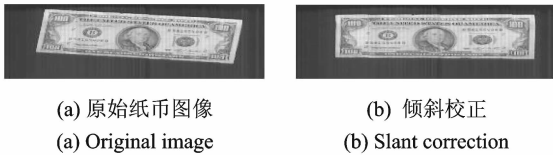


图3 纸币图像倾斜校正

Fig. 3 Slant correction of banknote image

2.2 纸币特征提取

运用RQWT的方法提取纸币图像特征向量。令 l 表示运用RQWT对纸币图像进行分解的层数,将得到一系列分解子带,其大小为 $M/2^l \times N/2^l$,每个子带含有4个组成部分。因此,每个子带的分解系数表示为: $C_l = \{q_m^{(l)}, \varphi_m^{(l)}, \theta_m^{(l)}, \psi_m^{(l)}\}$ 。其中, $q_m^{(l)}$ 表示系数幅值, $(\varphi_m^{(l)}, \theta_m^{(l)}, \psi_m^{(l)})$ ($m=1, 2, 3, 4$)表示纸币图像的局部位移和纹理信息。利用式(5)对其进行归一化处理

$$\begin{cases} q_i^{(l)} = \frac{q_i^{(l)}}{E(q_i^{(l)})}, \phi_i^{(l)} = \frac{\phi_i^{(l)}}{E(\phi_i^{(l)})} \\ \theta_i^{(l)} = \frac{\theta_i^{(l)}}{E(\theta_i^{(l)})}, \psi_i^{(l)} = \frac{\psi_i^{(l)}}{E(\psi_i^{(l)})} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} E(q_m^{(l)}) = \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} q_m^{(l)}(x, y)^2 \\ E(\varphi_m^{(l)}) = \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} \varphi_m^{(l)}(x, y)^2 \\ E(\theta_m^{(l)}) = \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} \theta_m^{(l)}(x, y)^2 \\ E(\psi_m^{(l)}) = \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} \psi_m^{(l)}(x, y)^2 \end{cases} \quad (6)$$

结合RQWT具有的相位和幅值特性,采用如下统计特性描述分解系数具有的特点。

$$\begin{cases} T_1 = \frac{2^{2l}}{M \times N} \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} r(x, y) \\ T_2 = \frac{2^{2l}}{M \times N} \sum_{y=1}^{N/2^l} \sum_{x=1}^{M/2^l} (r(x, y) - T_1)^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $r = \{q_m^{(l)}, \varphi_m^{(l)}, \theta_m^{(l)}, \psi_m^{(l)}\}$,则在分解层 l 提取的纸币图像特征定义如下

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{q,l} = [T_k(q_1^{(l)}), \dots, T_k(q_4^{(l)})] \\ \mathbf{F}_{\varphi,l} = [T_k(\phi_1^{(l)}), \dots, T_k(\phi_4^{(l)})] \\ \mathbf{F}_{\theta,l} = [T_k(\theta_1^{(l)}), \dots, T_k(\theta_4^{(l)})] \\ \mathbf{F}_{\psi,l} = [T_k(\psi_1^{(l)}), \dots, T_k(\psi_4^{(l)})] \end{cases} \quad k=1, 2 \quad (8)$$

2.3 纸币图像识别

LS-SVM是一种新的基于统计学习理论的分类器。LS-SVM是一个二元分类器。用二元组 (x_i, y_i) 表示,其中 $x_i \in x_m$ 为输入特征向量, $y_i \in [-1, 1]$ 为输出类别标号。对于多类别问题,LS-SVM结合核函数将输入的非线性可分特征向量映射到高维线性可分特征向量空间。其中核函数有高斯函数、S型函数、线性函数和径向基函数(Radial basis function, RBF)。LS-SVM多分类问题方法包括一对一和一对多。考虑到纸币识别系统的实时性,本文采用一对多的训练方法。核函数采用RBF,采用网格搜索方法进行参数优化。运用函数Trainlssvm进行训练,Simlssvm计算数据库中的每个样本和每个类别SVM的距离向量,并存于距离数据库中。用式(9)计算检索纸币图像和距离数据库中纸币图像距离

$$D_c(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) = \frac{(\mathbf{x}_r - \mu_r)(\mathbf{x}_s - \mu_s)}{\sqrt{[(\mathbf{x}_r - \mu_r)(\mathbf{x}_r - \mu_r)'] [(\mathbf{x}_s - \mu_s)(\mathbf{x}_s - \mu_s)']}} \quad (9)$$

式中: \mathbf{x}_r 表示检索图像距离向量, \mathbf{x}_s 表示距离数据库中的图像距离, μ_r 和 μ_s 分别为距离向量 \mathbf{x}_r 和 \mathbf{x}_s 的均值。

3 试验结果分析

为了验证本文提出的纸币清分系统的识别性

能,从自行设计的清分系统中分别采集人民币和美元构建两个纸币图像数据库。纸币图像样本采用分辨率为 200 dpi 的接触式图像传感器采集得到,两个实验数据库描述如下:(1)数据库 1(D1)由 12 000 张人民币图像组成,其大小为 270×140 。由于人民币具有 100,50,20,10,5 元 5 个币值,每个币值有 4 个面向,一共 20 类;(2)数据库 2(D2)由 16 000 张美元图像组成,其大小为 270×140 。美元面额 100,50,20,10,2,1 美元,共 6 种,每个面额有 4 个面,共 24 类。

数据库 D1, D2 作为本文纸币清分系统的实验样本,表 1, 2 显示了两个数据库平均识别率,其中分别使用基于离散小波变换 (Discrete wavelet transform, DWT)、双树复数小波变换 (Dual-tree complex wavelet transform, DT-CWT)、离散余弦变换 (Discrete cosine transform, DCT)、QWT 以及 RQWT 混合方法提取纸币图像特征向量,其中分解级数为 3 级。针对数据库 D1 与 D2 中的测试样本,图 4, 5 显示了使用各种方法得到的平均识别率比较曲线图,从图中可以看出采用 RQWT 的方法得到的识别率明显高于其他方法所取得的平均识别率,其识别率分别提高到 99.18% (D1) 和 99.68% (D2)。表 3 为本文清分系统中纸币特征提取和纸币识别过程的执行时间,实验结果表明本文提出的方法比其他方法大大降低了时间复杂度。

表 1 数据库 D1 平均识别率

Table 1 Average recognition rate of D1

人民币 / 元	DWT / %	DT-CWT / %	QWT / %	DCT / %	RQWT / %
100	73.26	72.48	76.63	72.60	88.69
50	74.45	77.94	86.15	80.15	90.62
20	77.50	76.28	88.66	83.75	95.79
10	83.32	79.46	87.18	84.34	96.86
5	87.15	83.42	83.63	82.32	94.28

表 2 数据库 D2 平均识别率

Table 2 Average recognition rate of D2

美元	DWT / %	DT-CWT / %	QWT / %	DCT / %	RQWT / %
100	71.48	78.16	81.34	77.68	95.48
50	74.56	79.42	82.59	79.83	94.73
20	73.68	80.56	84.46	83.15	96.90
10	76.35	75.36	80.36	76.80	97.25
2	77.18	72.86	77.84	77.52	93.67
1	80.76	76.37	76.08	75.83	97.95

表 3 纸币识别时间

Table 3 Banknote recognition time

方法	DWT	DT-CWT	QWT	DCT	RQWT
特征向量长度	24	40	96	96	192
特征提取时间/s	0.510	0.640	0.720	0.760	1.040
识别时间/s	0.053	0.062	0.075	0.072	0.079

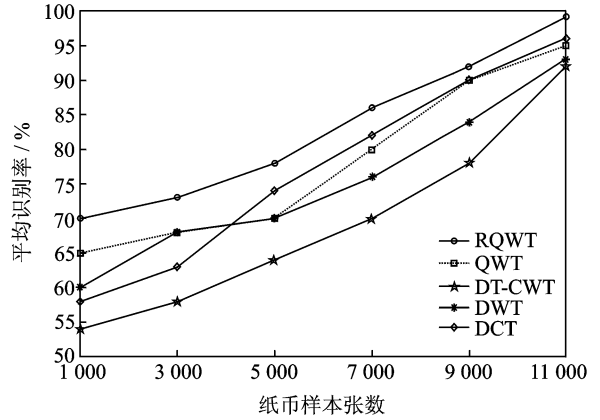


图 4 数据库 D1 平均识别率

Fig. 4 Average recognition rate of D1

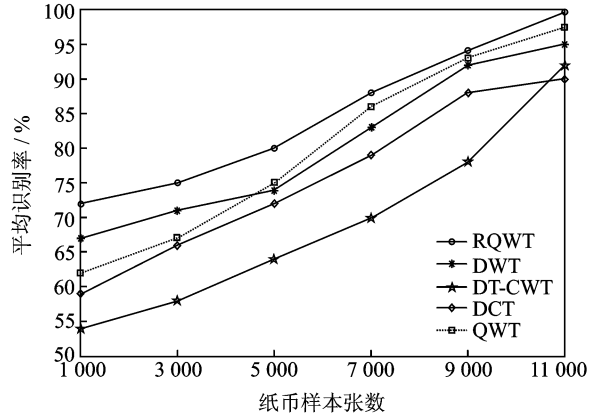


图 5 数据库 D2 平均识别率

Fig. 5 Average recognition rate of D2

4 结束语

四元小波变换不能够很好地提取纸币图像对角线方向的特征信息,同时考虑到纸币图像具有丰富的纹理信息,因此本文提出了一种基于退化四元小波变换的纸币识别方法,并将其应用到实际的纸币清分系统中。为了验证本文提出方法的识别性能,构建了两个实验数据库 D1 和 D2。实验结果表明,采用本文算法提取的特征具有良好的可分性。相比其他方法取得了更好的平均识别率,而且大大降低了纸币识别的时间,能够满足纸币清分系

统的实时性要求。

参考文献:

- [1] Kato N, Omachi S. A handwriting character recognition system using directional element feature [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(3):258-262.
- [2] Takeda F, Omatu S. High speed paper currency recognition by neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Network, 1995, 6(1):73-77.
- [3] Takeda F, Omatu S. A neuro-money recognition using optimized masks by CA[J]. Advance in fuzzy logic Neural Networks and Genetic Algorithms, 1995, 101(8):190-201.
- [4] Takeda F, Nishikage T. Multiple kinds of paper currency recognition using neural network and application for Euro currency[C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Como, Italy; IEEE, 2000:143-147.
- [5] Hasanuzzaman F M, Yang X D, Tian Y L. Robust and effective component-based banknote recognition for the blind[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2012, 42(6):1021-1030.
- [6] Jin Y, Song L, Tang X L, et al. A hierarchical approach for banknote image processing using homogeneity and FFD model[J]. IEEE Transactions on Signal Processing Letters, 2008, 15(6):425-428.
- [7] Gai Shan, Yang Guowei, Wan Minghua. Employing quaternion wavelet transform for banknote classification[J]. Neurocomputing, 2013, 118(8):171-178.
- [8] Corrochano E B. The theory and use of quaternion wavelet transform[J]. Mathematical Imaging and Vision, 2006, 24(7):19-35.
- [9] Raphael S, Philippe C. Quaternion wavelets for texture classification[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(13):1669-1678.
- [10] Mohamed N, Atef H, Aroua A, et al. New approach for road extraction from high resolution remotely sensed images using the quaternion wavelet [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2011, 20(3):452-459.
- [11] 叶佳, 张建秋, 胡波. 客观评估彩色图像质量的超复数奇异值分解法[J]. 电子学报, 2007, 35(1):28-33.
Ye Jia, Zhang Jianqiu, Hu Bo. Hypercomplex singular value decomposition approach to objectively assessing color image quality [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1):28-33.
- [12] Guo Liqiang, Zhu Ming. Quaternion Fourier-mellin moments for color images[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(2):187-195.
- [13] Xu J H. Multi-label core vector machine with a zero label[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(7):2542-2557.
- [14] 李忠国, 侯杰, 王凯, 等. 模糊支持向量机在路面识别中的应用[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(1):146-151.
Li Zhongguo, Hou Jie, Wang Kai, et al. Application of fuzzy support vector machine on road type recognition[J]. Data Acquisition and Processing, 2014, 29(1):146-151.

作者简介:盖杉(1980-),男,博士,研究方向:图像处理、模式识别, E-mail:gaishan886@163.com;罗立民(1956-),男,教授,研究方向:图像处理、科学计算可视化。

