

Detection of Cerebral Thrombosis Based on Dual Tree Complex Wavelet Transform

Xinxiang Lin, Xingqun Zhao

School of Biological Sciences and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu
Email: linxx044@foxmail.com, ndt@seu.edu.cn

Received: Mar. 26th, 2019; accepted: Apr. 5th, 2019; published: Apr. 12th, 2019

Abstract

The embolus in the cerebral arteries may block the cerebral blood vessels and cause ischemic stroke. Therefore, cerebral thrombosis detection has important clinical significance. Traditional cerebral thrombosis testing relies on subjective judgment by experts and is time consuming. In order to overcome these shortcomings, this paper proposes a fast, accurate and robust method for detecting cerebral thrombosis based on dual-tree complex wavelet transform (DTCWT). The dual-tree complex wavelet transform is more robust than the ordinary discrete wavelet transform, which enhances the coefficients extracted from the Doppler ultrasound signal. For the detection method proposed in this paper, embolization and artificial artifact signals are used for experimental demonstration. Firstly, the blood flow coefficients of the forward blood flow signals of different samples are extracted by DTCWT, then the dimensionality of each set of coefficients is reduced and the dimension is reduced. The subsequent coefficients are fed into the classifier one by one. Comparing the results with the FFT and DWT-based cerebral thrombus detection system, the results showed that the features extracted using DTCWT had the highest accuracy and embolization rate.

Keywords

Dual-Tree Complex Wavelet Transform, Dimensionality Reduction, Support Vector Machines, Cerebral Thrombosis

基于双树复小波变换的脑血栓检测研究

林鑫翔, 赵兴群

东南大学生物科学与医学工程学院, 江苏 南京

摘要

脑动脉中的栓子有可能阻塞脑血管而引起缺血性脑卒中等疾病, 因此脑血栓检测具有重要的临床意义。传统的脑血栓检测依赖于专家的主观判断, 并且耗时长。为了克服这些缺点, 本文提出了一种基于双树复小波变换(DTCWT)的快速、准确和健壮的脑血栓检测方法。双树复小波变换相对普通离散小波变换, 增强了从多普勒超声信号中提取的系数的鲁棒性。对于本文提出的检测方法, 采用栓塞和人工伪像信号进行实验论证, 首先对不同样本的正向血流信号使用DTCWT分别提取其血流系数, 然后对每组系数进行降维, 并将降维后的系数逐一馈送进分类器。将所得结果与基于FFT和DWT的脑血栓检测方法进行对比, 结果表明使用DTCWT提取的特征具有最高的准确性和栓塞检测率。

关键词

双树复小波变换, 降维, 支持向量机, 脑血栓

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脑动脉中的血流栓子有可能阻塞脑血管而引起缺血性脑卒中等疾病。概括来说, 脑血栓是一种发病率高、死亡率高且容易复发并发的慢性疾病。如果能及时发现尚未出现病症的栓塞, 采取适当的治疗手段, 会大大降低病人脑卒中的发病几率[1]。

经颅多普勒超声检测技术由于能无损地监测颅内血流的状况, 已被广泛应用于脑血栓的检测[2]。传统上, 有经验的专家通过分析经颅多普勒频谱来为病患进行诊断, 但是这样的检测技术非常耗时(病人的监测可能需要持续数小时)并容易受到病人活动和检测环境的干扰, 也对检测人员有着极高的要求。由于这些缺点, 一种不依赖专家的自动化脑血栓检测技术具有重要的临床意义。

由于血液中的栓塞和红细胞对超声波的散射特性不同, 使得当栓塞进入超声多普勒仪器的采样容积时, 接收到的超声多普勒信号和正常血流的超声多普勒信号具有不同的特征[3]。然而, 因为探头移动、病人咳嗽、呻吟、运动或者手术操作等人工干扰的存在, 在监测中所采集到的超声多普勒信号内不可避免地会混入干扰噪声。如图1和图2所示, 这些含有干扰噪声的血流信号解调后在时域波形上跟栓塞信号非常相近, 都表现为瞬时高强度信号[4]。

2. 系统算法设计与实验论证

如何准确地区分栓塞和人工伪像一直是脑血栓检测研究的重点和难点, 由于从时域上较难实现两种信号的区别, 基于频域的分析得到广泛发展, 本文针对已有的频率算法[5]的不足, 引入双树复小波变换, 提出一种新的自动化系统设计方案。如图3所示, 该方案通过不同的算法从两种信号中分别提取特征, 在特征提取步骤之后, 应用降维算法来处理维数过多的问题[6], 最后馈送入分类器实现不同信号的区分。

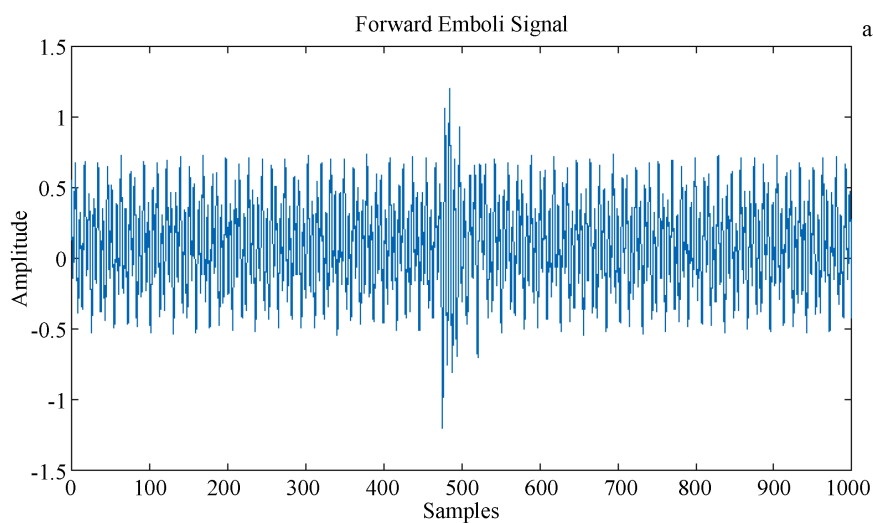


Figure 1. Time domain representation of the embolic signal

图 1. 栓塞信号的时域表示

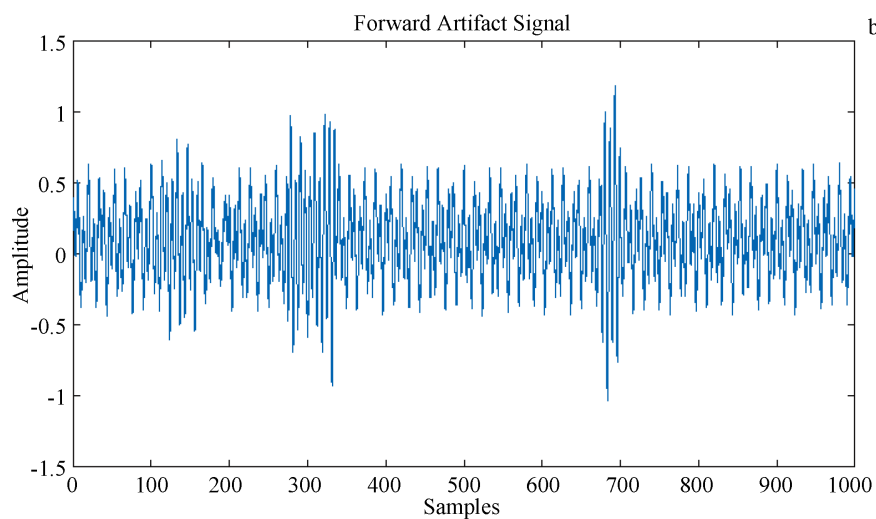


Figure 2. Time domain representation of artificial artifact signals

图 2. 人工伪像信号的时域表示

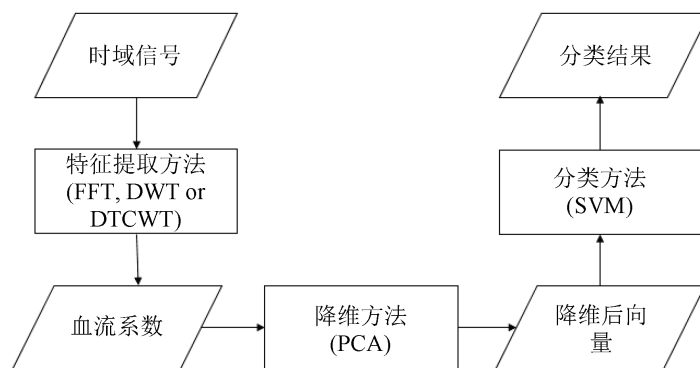


Figure 3. Automated embolization testing process

图 3. 本文提出的自动化栓塞检测的设计流程

2.1. 数据集描述

对于本研究, 使用经颅多普勒系统(由南京科进公司制造的 KJ-2V6 型 TCD 仪)记录 100 个栓塞信号和 100 个人工伪像信号, 组成了多普勒超声数据集。数据集中的栓塞信号采集于有症状的颈动脉狭窄患者的同侧大脑中动脉, 人工伪像则通过在信号记录期间敲击探头与患者咳嗽形成。

实验使用的多普勒超声系统输出是同相和正交相分量, 关于血流方向的信息被编码为这两个分量之间的相位关系, 采用正交相位解调法获取正向和反向血流信号。由于栓塞信号是单向存在的, 为了提高检测效率, 实验采用正向血流信号来验证。

2.2. 特征提取算法

2.2.1. 特征提取算法选择

虽然在时域上无法区分栓塞与人工伪像, 但深入特征提取后能发现, 当出现栓塞时, 可将多普勒超声信号视为窄带信号, 因此基于频率分析的方法可应用于检测系统中的特征提取步骤[7]。快速傅里叶变换(FFT)常用于特征提取, 然而, 基于连续小波变换(CWT)的方法在描述栓塞信号时表现优于快速傅里叶变换(FFT) [8]。在作为 CWT 快速实现的离散小波变换(DWT), 在文献[9]中提出了一种基于 DWT 来推导出用于检测栓塞信号的多个参数的自动化系统。

为了避免地会丢失信号细节信息, 双树复小波变换(DTCWT)于 1998 年首次被 Kingsbury 在其文章中提出。它保留了复小波变换的近似平移不变性, 同时通过采用两个平行滤波器的形式, 满足了完全重构条件, 解决了传统离散小波变换的不足之处——平移敏感性和频率混叠[10]。

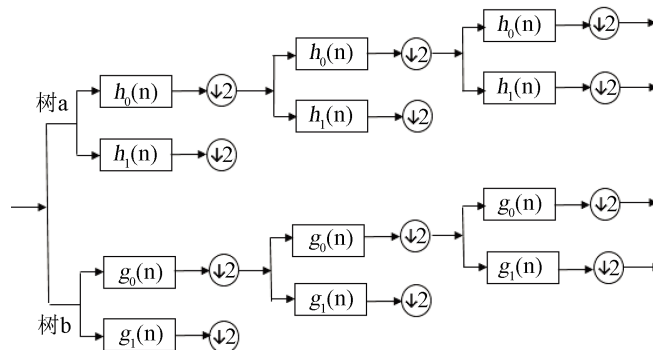


Figure 4. One-dimensional double-tree complex wavelet transform schematic

图 4. 一维双树复小波变换原理图

双树复小波变换由实部和虚部组成, 利用两个树状的共轭正交滤波器组实现。如图 4 所示, 树 *a* 生成实部, 而树 *b* 生成虚部。构建复小波函数:

$$\psi_c(t) = \psi_h(t) + i\psi_g(t) \quad (1)$$

为了满足重构条件 $\psi_g(t)$ 是 $\psi_h(t)$ 的 Hilbert 变换, 要求图 2 中 $h_0(n)$ 、 $g_0(n)$ 和 $h_1(n)$ 、 $g_1(n)$ 分别对应低通滤波器和高通滤波器, $\downarrow 2$ 代表隔点采样。在第一层分解中, 如果要求树 *a* 和树 *b* 的滤波器之间的延迟刚好是一个采样间隔, 就可以保证树 *b* 中第一层的隔点采样后所得的数据恰好是采样到树 *a* 中因隔点采样所丢掉的数据, 这些就会降低数据的丢失, 也就不会有平移敏感性了。

当小波系数被用作机器学习算法中的特征来检测栓子时, DTCWT 的平移不变性是非常重要的, 因为栓塞信息被编码为同相和正交相位分量的相位关系以及任何期间的相位失真都会降低小波特征的判别

能力。DTCWT 在分析非平稳信号方面的成功在[8] [11]中已被证明, 而栓塞信号就是典型的非平稳信号。

2.2.2. 特征提取阶段实验结果

本研究首先将采集的多普勒超声信号通过 FFT、DWT 和 DTCWT 方法分别进行变换以获得变换系数。在 FFT 特征提取部分中, 找到傅立叶变换系数并且将系数的绝对值用作特征。对于 DWT 和 DTCWT 特征提取部分, 分别使用[12] [10]中的滤波器系数, 将多普勒超声信号分解为 5 个尺度, 如图 5 所示可以在第三或第四尺度中观察到栓塞信号, 将 DWT 和 DTCWT 系数的绝对值用作降维步骤的特征。

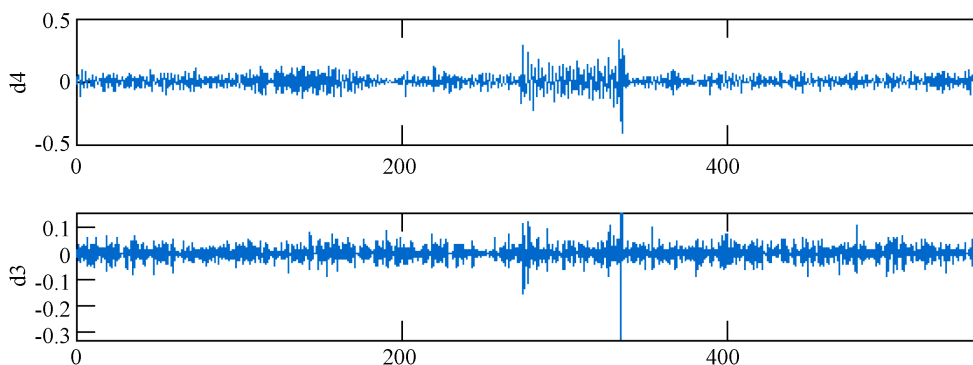


Figure 5. DTCWT filter decomposes the embedding signal

图 5. DTCWT 滤波器分解栓塞信号所得结果

2.3. 降维算法

2.3.1. 降维算法选择

维数降低是机器学习问题的一个关键预处理步骤, 特别是当数据集的维数与样本数相比较时, 降维可以避免高维 - 小样本问题, 这在生物医学应用领域中是非常普遍的。维度降低技术可分为两类: 不使用类别标签(PCA)的无监督技术以及将类别标签并入其框架的监督技术(线性差异分析-LDA) [13]。

主成分分析(PCA)的原理是根据方差最大化, 用一组全新的、相互正交且线性无关的向量来表征原来数据矩阵的行或列。这组新向量被称为主成分, 是原来数据向量的线性组合。通过对原始数据的平移、尺度伸缩和坐标旋转, 得到新的坐标系后, 用原始数据在新坐标系下的投影(点积)来替代原始变量。

PCA 技术在对高维变量进行降维处理时, 能够保证有效信息损失最少, 这样的优势使其广泛应用于生物医学信号处理领域。

2.3.2. 降维阶段实验结果

本研究采用 PCA 技术对特征提取阶段所得的特征数据进行降维处理, 如图 6 和图 7 的实验成果所示, 不同特征提取算法经 PCA 后在二维平面的投影具有清晰的区域差别。

2.4. 分类算法

2.4.1. 分类算法选择

常见的分类方法有线性分类法、人工神经网络法等。线性分类器较为简单、计算量和存储量小, 但由于的超声多普勒信号为非线性, 使用该分类器识别率很低。人工神经网络虽然能够有效地解决非线性问题, 但本身存在容易陷入局部极小特性和无法解释结论等缺点。支持向量机(SVM)是一种基于统计学习理论的机器学习方法, 特别适合于复杂的、非线性的数据的分类识别, 不会出现过学习问题, 泛化能力强。

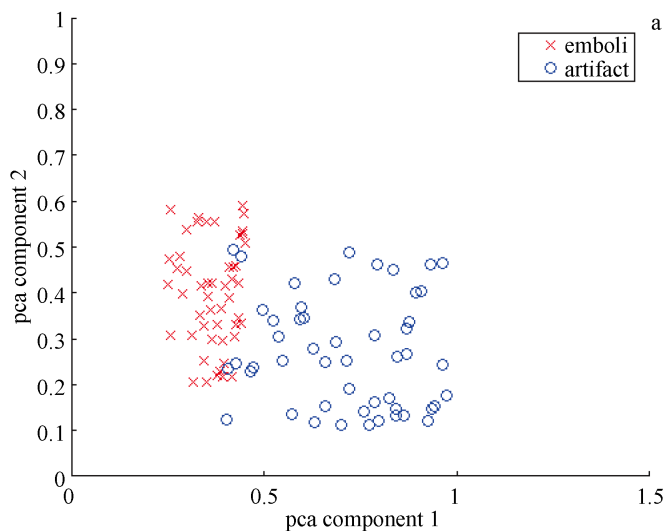


Figure 6. PCA component projection extracted after FFT processing
图 6. 经过 FFT 处理后提取的 PCA 分量投影

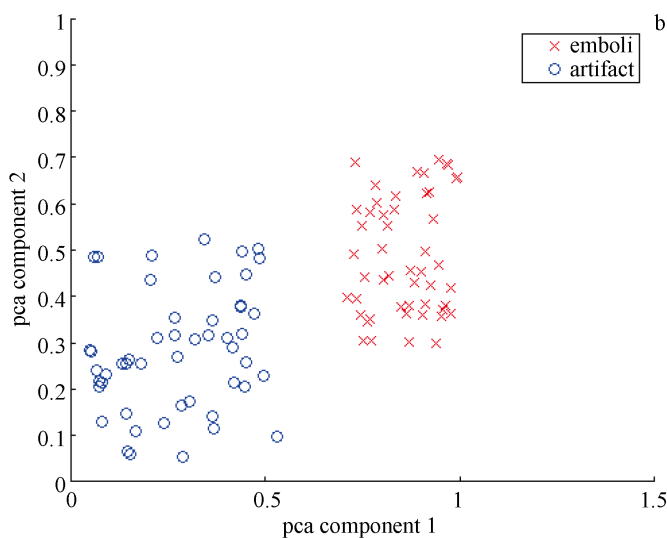


Figure 7. PCA component projection extracted after DTCWT processing
图 7. 经过 DTCWT 处理后提取的 PCA 分量投影

SVM 分类的基本思想是通过事先选定的核函数将输入空间映射到高维特征空间, 在高维空间构造最优分类超平面, 高维空间中的超平面对应低维空间中的超曲面[14]。通过核函数的引进, 在原低维空间进行高维空间的点积运算。选择不同的核函数可构建不同的 SVM。目前常用的核函数如下:

线性核函数:

$$K(x, x_i) = xx_i \tag{2}$$

多项式核函数:

$$K(x, x_i) = (xx_i + 1)^d \tag{3}$$

径向基核函数:

$$K(x, x_i) = \exp\left[-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

Sigmoid 核函数:

$$K(x, x_i) = \tanh[v(\langle xx_i \rangle) + c] \quad (5)$$

考虑到多普勒超声信号的非线性特点且所能提供实验样本小, 采用 SVM 来处理这样的数据集会有较好的表现。针对数据集的小样本特性, 使用带线性核的支持向量机[15], 因为它是一个简单的模型, 具有较小的方差和给定的可比较的经验误差, 并且一个简单的模型有望推广到更为复杂的模型。

2.4.2. 分类阶段实验结果

本研究选择线性核支持向量机, 通过随机挑选每个类样本的一半(每个样本 50 个)产生训练集, 并使用另一半作为测试集, 重复 10 次使分类结果更可靠, 所得结果如表 1 所示。

Table 1. Support vector machine recognition rate (%)

表 1. 支持向量机各项识别率(%)

识别率	FFT	DWT	DTCWT
栓塞	75.40	84.20	88.20
伪像	82.50	90.40	95.50

3. 结论与局限性分析

由于传统的脑血栓检测非常耗时且受观察者主观因素影响, 因此基于计算机的决策支持系统有利于更高效地在生物医学工程领域中将栓塞信号与人工伪像样本区分开来。本文提出了一种稳健可用的脑血栓检测方法。实验验证首先利用 DTCWT 对正向血流方向的多普勒超声信号进行特征提取, 然后使用 PCA 技术降低获得的特征集的维数, 所获得的简化特征集被馈送到 SVM 分类器。通过应用相同的降维和分类程序将 DTCWT 的特征与 FFT 和 DWT 的特征进行横向对比。

实验结果表明, 与基于 FFT 的特征相比, 基于 DWT 和 DTCWT 的特征提取提供了更高的栓塞检测精度, 这是由于小波在时间和频率上的良好局部化特性, 而因为独有的移位不变性质, DTCWT 在支持向量机方面的栓塞检测率上优于 DWT。因此在脑血栓的检测中, 应用 DTCWT 算法能够有效地提高准确率, 结合主成分分析和支持向量机, 可以实现自动化的栓塞检测流程, 为减少脑血栓检测对于专业人员的依赖提供一种可靠的方案。

当然本研究也存在其局限性, 首先由于脑血栓的形成原因较为复杂, 用于实验论证的数据来源比较单一, 数据量也比较少, 对于该系统的泛用性还有待更多的临床实验支持; 其次, 当出现脑血栓信号中掺杂人工干扰的情况, 该系统的分类准确性还待验证。

参考文献

- [1] Markus, H.S. (2000) Monitoring Embolism in Real Time. *Circulation*, **102**, 826-828. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.102.8.826>
- [2] King, A., Shipley, M. and Markus, H. (2012) Optimizing Protocols for Risk Prediction Asymptomatic Carotid Stenosis Using Embolic Signal Detection: The Asymptomatic Carotid Emboli Study. *Journal of Vascular Surgery*, **55**, 1-1220. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2012.02.016>
- [3] Mitsuoka, A., Inoue, Y., Kume, H., et al. (2010) Discrimination of Types of Venous Emboli Using Doppler Ultrasound. *Annals of Vascular Surgery*, **24**, 721-727. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2010.03.004>

- [4] Guepie, B.K., Sciolla, B., Millioz, F., *et al.* (2017) Discrimination between Emboli and Artifacts for Outpatient Transcranial Doppler Ultrasound Data. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **55**, 1-11.
- [5] Aydin, N. (2007) DWT Based Adaptive Threshold Determination in Embolic Signal Detection. *Nasa/Esa Conference on Adaptive Hardware & Systems*, Edinburgh, 5-8 August 2007, 214-219.
- [6] Xu, D. and Wang, Y. (2007) An Automated Feature Extraction and Emboli Detection System Based on the PCA and Fuzzy Sets. *Computers in Biology and Medicine*, **37**, 861-871.
- [7] Baudry, M. (1998) The Narrow Band Hypothesis: An Interesting Approach for High Intensity Transient Signals (HITS) Detection. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **24**, 375. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(97\)00279-2](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(97)00279-2)
- [8] Serbes, G. and Aydin, N. (2011) Denoising Embolic Doppler Signals Using Modified Complex Discrete Wavelet Transform. *IEEE Signal Processing & Communications Applications Conference*, Antalya, 20-22 April 2011, 1840-1843.
- [9] Aydin, N., Marvasti, F. and Markus, H.S. (2004) Embolic Doppler Ultrasound Signal Detection Using Discrete Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, **8**, 182-190. <https://doi.org/10.1109/TITB.2004.828882>
- [10] Selesnick, I.W., Baraniuk, R.G. and Kingsbury, N.C. (2005) The Dual-Tree Complex Wavelet Transform. *IEEE Signal Processing Magazine*, **22**, 123-151. <https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1550194>
- [11] Serbes, G., Sakar, C.O., Kahya, Y., *et al.* (2012) Pulmonary Crackle Detection Using Time-Frequency Analysis. *Signal Processing & Communications Applications Conference*, Mugla, 18-20 April 2012, 1012-1021.
- [12] Kingsbury, N.G. (1999) Image Processing with Complex Wavelets. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **357**, 2543-2560. <https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0447>
- [13] Yang, J. and Yang, J.Y. (2003) Why Can LDA Be Performed in PCA Transformed Space. *Pattern Recognition*, **36**, 563-566. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00048-1)
- [14] Cherkassky, V. and Ma, Y. (2004) Practical Selection of SVM Parameters and Noise Estimation for SVM Regression. *Neural Networks*, **17**, 113-126. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(03\)00169-2](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(03)00169-2)
- [15] Bao, Z.J., Zhong, W.M., Pi, D.Y., *et al.* (2007) Robustly Stable Model Predictive Control Based on Parallel Support Vector Machines with Linear Kernel. *Journal of Central South University of Technology*, **14**, 701-707. <https://doi.org/10.1007/s11771-007-0134-9>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8976, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjbm@hanspub.org