

基于光学图像的舰船航迹检测

王彦杰,汪增福

(中国科学技术大学 自动化系,安徽 合肥 230027)

摘要:舰船航迹检测在海上交通管制和军事领域中有着广泛的应用前景. 现有的航迹检测方法大都基于 SAR 图像,信息不直观而且算法复杂. 提出了一种新颖的基于光学图像的航迹检测方法. 首先利用纹理分析方法判断待检测区域中是否含有航迹,然后在通过判断的区域中使用条纹增强算法,凸现航迹特征,最后使用 Radon 变换检测航迹,并对结果进行了优化. 与现有的检测方法相比,该方法针对性强,复杂度低. 使用该方法对实际航拍图片进行了检测实验,取得了很好的效果.

关键词:航迹检测; Radon 变换; 纹理分析

中图分类号: TP391. 41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)04-0046-06

Ship wake detection using optical images

WANG Yan-jie, WANG Zeng-fu

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Ship wake detection has a broad range of applications in marine traffic control and national security. Current methods were developed based on SAR (Synthetic Aperture Radar) images. As a result they have two significant disadvantages: the information is not intuitive and the corresponding algorithms are relatively complex. This paper proposes a novel ship wake detection method based on optical images. Firstly, it judges whether there are ship wakes through texture analysis. Then it uses a stripe enhancement algorithm to enhance the characteristics of a ship wake. Finally, it applies Radon transform to detect ship wakes and optimizes detection results. Compared with existing methods, the proposed method is more appropriate for the task and has lower complexity. The method was tested on pictures with wakes and demonstrated effective wake detection.

Key words: ship wake detection; Radon transform; texture analysis

舰船检测在海上交通管制和军事领域中起着重要的作用. 舰船在航行时,航迹可达几千米甚至几万米,其特征远比舰船本身明显,因此利用航迹检测舰船有时比直接检测舰船本身更加有效可行.

现有的航迹检测方法大都是基于 SAR 图像的. 由于航迹在 SAR 图像中呈现出明显的线性特征,因此检测方法以对线性特征敏感的 Radon 变换为主. 但是直接利用 Radon 变换进行航迹检测效果并不太好,所以不断地有改进的算法被提出. 为了能够在沿海和多岛屿的海面区域进行航迹检测, Eldhuset^[1]提出了一种方法,该方法首先利用数字地图提供的信息去除 SAR 图像中的陆地部分,而后利用线

性特征检测航迹. 为了提高检测的精度、适应航迹的幅度变化, Du^[2]和 Copeland^[3]分别提出了基于滑窗 Radon 变换和局部 Radon 变换的检测方法; 为了克服背景噪声同时保留完整的航迹信息, Kuo^[4]提出了应用小波分解重构航迹的检测方法, 这些算法均取得了较好的检测效果.

但是,基于 SAR 图像的航迹检测方法有一些方法本身所导致的不可避免的缺点. 例如, Tunaley^[5]提到 SAR 图像本身有时候会呈现易于和航迹特征相混淆的线性特征. 其他人^[1-4]也提到由舰船本身产生的信号会对航迹信号产生影响. 在进行航迹检测时,必须先检测出舰船的位置,将其用背景色替换后才可进行航迹检测. 这些缺点的存在增加了检测

收稿日期: 2006-12-18.

算法的复杂度,影响了航迹的检测效果.

本文提出了一种新颖的基于光学图像的航迹检测方法.和 SAR 信号需经过多步处理后才可得到航迹图像信息相比,光学图像具备许多 SAR 图像所没有的优点,它直观、简洁,包含的信息丰富、完整,直接反映了航迹表面的相关信息.由于成像原理的原因,有些方向上的航迹特征在 SAR 图像中无法显示出来^[5],光学图像则没有这方面的限制.另外,基于光学图像的检测方法更接近于人的感知方式,随着光学传感器性能的提高,利用光学方法进行航迹检测越来越受到人们的关注.

在光学图像中,航迹依然呈现明显的线性特征.因此,本文所提出算法也是基于 Radon 变换的.但是,光学图像里的线性特征与 SAR 图像的线性特征有很大不同,单纯使用 Radon 变换并不能得到预期的效果.为此,引入了一种非线性的条纹增强算法,将其和 Radon 变换相结合取得了很好的检测效果.由于 Radon 变换需要进行多重积分运算,即使使用快速算法^[8],所需要的计算量仍然比较大.因此,如果在不确定当前图像中是否存在航迹的情况下就进行 Radon 变换处理,是一种费时不讨好的做法.受 Karathanass^[7]利用纹理检测海浪方向方法的启发,提出了一种利用纹理分析预判当前区域中是否存在航迹的方法,避免了 Radon 变换的盲目使用,提高了算法的针对性和使用效率.

1 基于纹理的候补航迹区域选择

选择纹理作为判断航迹是否存在的依据,是基于以下 2 个原因,首先,借鉴了人的感知经验,人在判断海面上是否有航迹存在时,利用了海面上纹理的分布和形状差异;其次,与图像的其他特征相比,纹理特征能更好地兼顾航迹的宏观形状和细部结构 2 个方面.

1.1 纹理分析

纹理是对于图像灰度(或色彩)在空间上的分布的一种描述.通常将图像划分为确定型(亦称结构型)纹理图像和随机型纹理图像两大类.其中,确定型纹理图像具有某种基本结构,表现在具有某种灰度的像素在图像中周期性地重复出现;与此相对应,随机型纹理图像则不具有孤立的基本结构,也不呈现明显的周期性.海浪图像是一种结构型纹理图像.

图像的局部统计性质是判断图像类型的一个有力工具^[9].其中,粗糙性和方向性是进行纹理区分时所使用的 2 个最主要的特征.纹理特征的分析方法分为两大类:统计分析法和结构分析法.前者从图像有关属性的统计分析出发,后者则致力于找出纹理基元,再从结构组成探索纹理的规律,也可以直接探

求纹理构成的结构规律.目前,在纹理特征的分析方面,统计分析法占据着主导地位.作为一种统计分析方法,空间灰度层共现矩阵方法在实际中得到广泛的应用.

1.2 空间灰度层共现矩阵(GLCM)

在纹理图像中,如果某个方向上相隔一定距离的一对像素的灰度值呈现某种统计规律,则可以用它来描述图像的纹理特性,而上述统计规律可以用灰度共现矩阵来表达.

灰度共现矩阵描述了在方向 θ 上、相隔 d 个像素距离的一对像素分别具有灰度 i 和 j 的概率,其元素可记为 $P(i, j | \theta, d)$.当 θ 和 d 选定时,简记为 $P_{i,j}$,其阶数由图像的灰度量化层数决定.由灰度共现矩阵可以计算出一组参数,并用它们来定量描述图像的纹理特性.例如,对比度是灰度分布均匀性的度量,分布越不均匀, $P_{i,j}$ 相差就越大,对比度就越大,相关性则可以用来描述 $P_{i,j}$ 矩阵中行元素或者列元素之间的相似程度,它是灰度线性关系的度量.

1.3 基于 GLCM 的航迹有无的判定

可以考虑使用空间灰度层共现矩阵(GLCM)对海浪和航迹图片进行分类.

以图 1 中的图片为例进行分析,开口较大的“V”字形航迹是 Kelvin 航迹,中间白色部分为湍流航迹.表 1 分别给出了这些图片在 $d = 1, \theta = 0$ 和 $d = 1, \theta = \pi/2$ 情况下的 GLCM 的对比度 Con_H 和 Con_V .

与直观感觉不同,几幅图片的对比度的取值比较离散,而且表面上似乎没有什么规律可循.这种情况的出现主要是由于所使用图像的空间分辨率的不同所引起的.因此,直接使用图像的对比度并不能对图片的属性(是海浪还是含有航迹的海浪)做出正确的区分.但是,仔细研究可以发现,这些数据的背后存在着一个规律:即海浪图片 2 种对比度的比值 Con_H/Con_V 均大于 1,而含有航迹的图片的 Con_H/Con_V 均小于 1.利用这个规律,可以判断待检测的区域中是否含有航迹.据此可以决定下一步的处理策略:舍弃 Con_H/Con_V 大于 1(即不含有航迹)的图片,仅对 Con_H/Con_V 小于 1(即含有航迹)的图片进行后续处理.这样,可以增强后续算法的针对性,提高检测效率.

表 1 航迹与海浪对比度分析

Table 1 Contrast analysis of shipwakes and waves

	wave1	wave2	ship-wake1	ship-wake2	Ship-wake3
Con_H	4.244 35	1.432 10	0.674 75	1.850 00	1.648 45
Con_V	1.673 74	0.618 66	1.274 35	3.022 05	2.96451

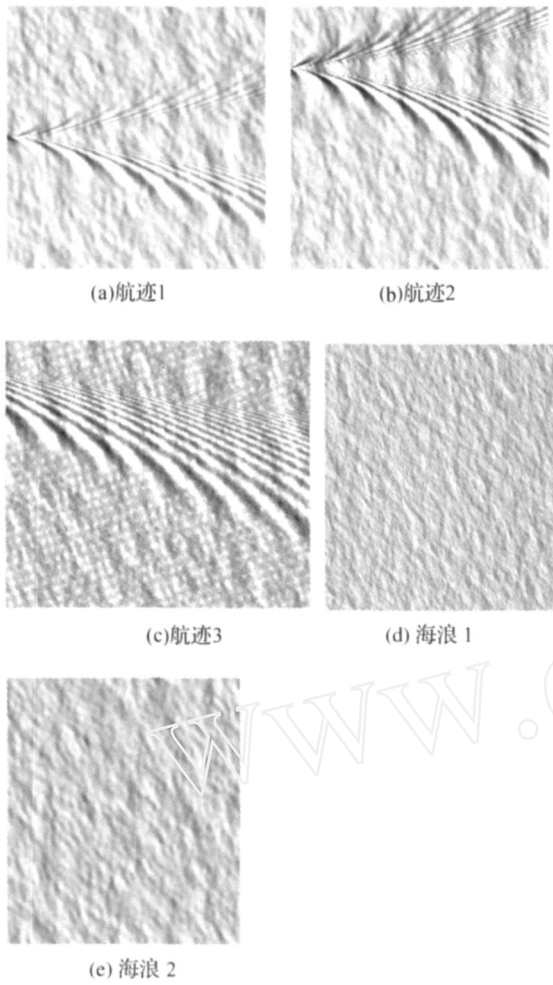


图 1 航迹与海浪
Fig. 1 Shipwakes and waves

2 基于 Radon 变换的航迹检测

Radon 变换常用来提取图像中的线性特征^[10]. 二维空间中的 Radon 变换有以下形式:

$$Rf(t, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, x_2) (\delta(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - t) dx_1, dx_2) \quad (1)$$

式中: f 为图像平面, δ 为 Dirac 函数, t 和 θ 分别为变换后的 Rf 空间的幅值和相位. 由式 (1) 可知, 变换前后图像空间的基本对应关系为: 图像平面 f 上的一点 (x_1, x_2) 对应于 Rf 空间上的一条正弦曲线 $t = x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta$, Rf 空间的一点 (t_0, θ_0) 对应于图像平面 f 的一条直线:

$$x_2 = -\frac{x_1 \cos \theta_0}{\sin \theta_0} + \frac{t_0}{\sin \theta_0}, \quad (2)$$

式中: t_0 和 θ_0 分别为该直线到原点的距离和它的法向量与 x 轴的夹角.

由基本对应关系可知, 图像平面 f 上的直线 $t_0 = x_1 \cos \theta_0 + x_2 \sin \theta_0$ 的点对应于 Rf 空间中的一

簇正弦曲线, 这些正弦曲线相交于 (t_0, θ_0) . 如图 2 所示, 图 2(a) 为手绘的“V”字形图案, 变换后的结果如图 2(b) 所示. 易见, 这些曲线相交于两点 (图中具有高灰度值的亮点), 每个亮点对应于左边“V”字形图案的一条边. 上述 2 个亮点可以看成是“V”字形图案中的 2 条边在 Rf 空间中的具体体现.

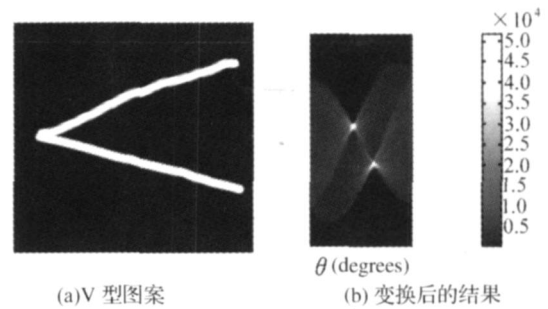


图 2 “V”字形图案及 Radon 变换
Fig. 2 Picture with pattern ‘V’ and its Radon transform

但是, 将 Radon 变换直接应用于航迹检测, 效果却不甚理想. 如图 3 所示, 在空间中具有高灰度值的点的分布范围不仅较宽, 而且产生了严重的“挪位”现象, 完全体现不出航迹的“V”字形特征.

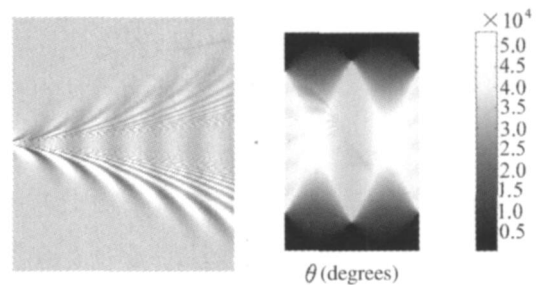


图 3 航迹 Radon 变换

Fig. 3 Shipwake Radon transform

为什么航迹的“V”字形特征在 Radon 变换后消失了呢? 这是一个令人困惑的问题. 经仔细分析后发现, 之所以经 Radon 变换后“V”字形特征变得不明显甚至消失, 是因为航迹图上的“V”字形特征虽然在视觉上很明显, 但是由于“V”字的 2 条边都是由深浅相间的条纹所组成的, 这些深浅相间的条纹对 Radon 变换积分的贡献在某种程度上被相互抵消了. 因此, 在变换后的图像上, “V”字形特征得不到应有的体现. 所以, 直接用 Radon 变换进行航迹检测是行不通的.

3 条纹增强算法

为了有效地利用航迹的“V”字形特征, 一种做法是增强其两边的条纹特征, 减弱灰度值变化较小的背景. 为此, 提出了一种非线性的条纹增强算法.

这是一种与中值滤波的处理过程相似,但功能有所不同的算法.该算法让模板依次扫过整个图像,每到一处,读取模板所覆盖的像素的灰度值并对其进行排序,将排序后的最大值和最小值的差值赋给模板中心位置的像素,作为该像素新的灰度值.经上述处理后,灰度值变化较大,即深浅相间的条纹区域明显得到增强,而变化缓慢的背景则被弱化.随后再使用 Radon 变换,则航迹的“V”字形特征在变换域中得到很好的体现,表现为具有高灰度值的、很明显的 2 个小区域.对实际图像施用的效果如图 4 所示.

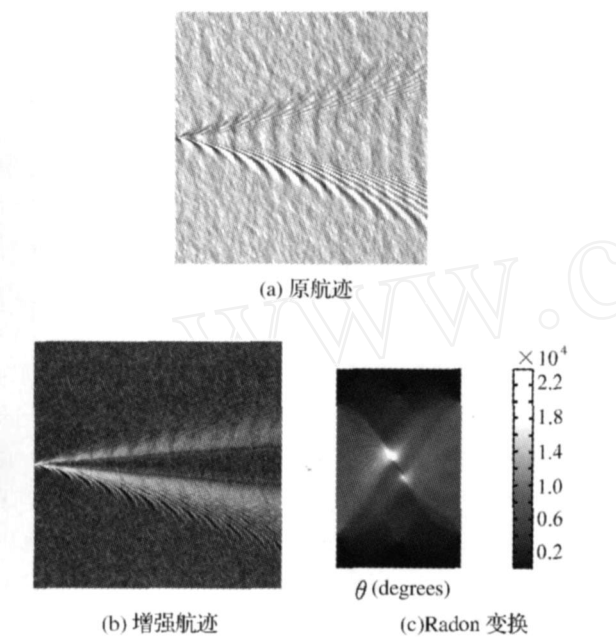


图 4 条纹增强算法

Fig. 4 Stripe strengthening algorithm

在实验过程中,曾尝试使用过 Sobel、Prewitt 等边缘检测算子,但效果很差.此外,使用 Kuo^[4]提出的基于小波变换的方法来去除噪声以凸现航迹特征,也取得了好的效果,但其计算复杂度远比上述条纹增强算法高.

4 航迹检测系统

为了验证算法的有效性,实际构建了基于 Radon 变换的航迹检测系统.系统的软件流程如图 5 所示.

为了提高检测的精确度,适应航迹的幅度变化,使用了滑窗 Radon 变换^[2].这样,当被检测区域很大且航迹幅度相对较小时,也可以准确无误地检测到航迹.在变换域中提取极大值时,使用了爬山法;提取到极大值后,考虑到航迹“V”形的夹角为 39°,湍流航迹和“V”两边的夹角均为 19.5°的约束^[6],将孤立的极值点舍去,而后进行逆变换,便可得到检测

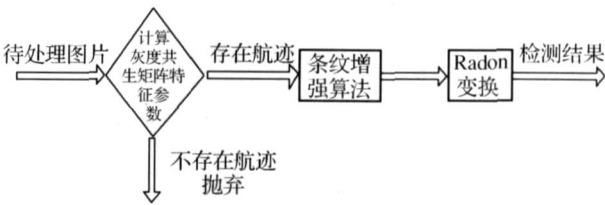
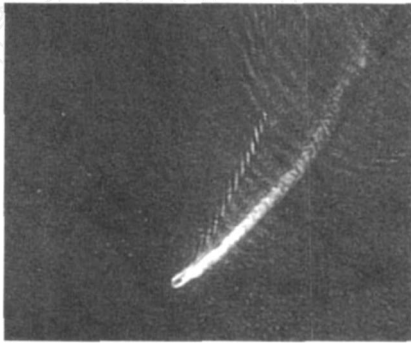


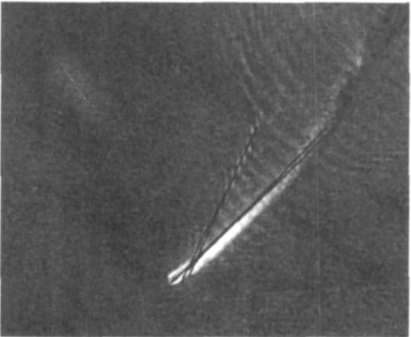
图 5 检测流程

Fig. 5 Detection flow

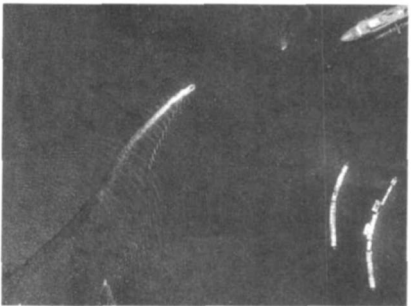
到的航迹,结果如图 6 所示.这里,Source picture1 是单纯的航迹图像,原图中的 Kelvin 航迹只有一半,但由于湍流航迹的存在,系统依然给出了正确结果. Source picture2 中含有许多干扰背景,但由于干扰的背景不满足“V”形及湍流航迹的夹角约束,系统成功地屏蔽了它们,也给出了正确结果.



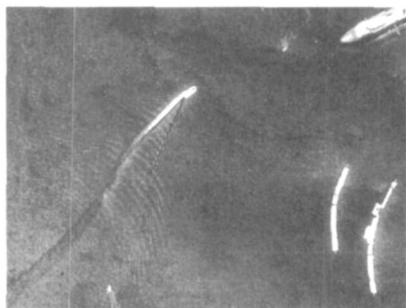
(a) 航迹 1



(b) 航迹 1 检测结果



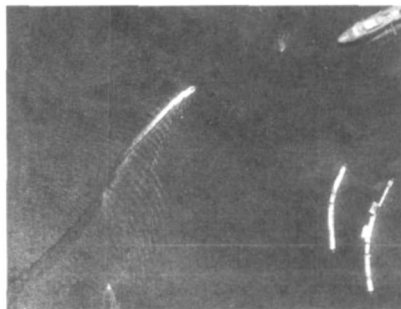
(c) 航迹 2



(d) 航迹 2 检测结果

图 6 航迹检测结果

Fig. 6 Detection results of ship wakes



(b) 航迹 2 优化结果

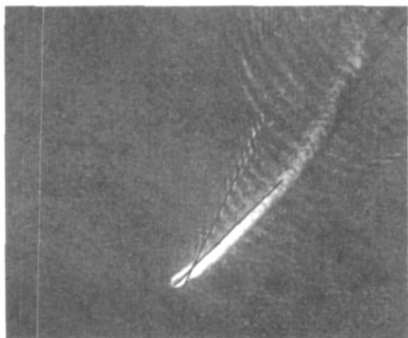
图 7 优化结果

Fig. 7 Optimization results

5 结果优化

由于“V”字形航迹的两边和湍流航迹都有一定的宽度,因此经 Radon 变换后它们在空间中的映像均是亮斑(如图 5 中 Radon transform 所示),而不是明显的亮点.尽管使用条纹增强算法可以凸现航迹特征,增强亮斑的亮度,但并不能完全将亮斑缩小至点,因此经过 Radon 逆变换后,检测到的航迹结果依然是由多条相邻的线段组成(如图 6 中(a)(b)所示).这样,检测结果就不是很精确.

为了消除亮斑造成的影响,使得每个亮斑对应一个极值点,得到精确的航迹位置和方向,对航迹检测结果进行了如下的处理.首先在 R_f 空间中检测出最大亮斑中灰度值最大的点 P ,由式(1)知,该点对应的是航迹中最明显的线段;然后利用式(1)稍作变形来消除该亮斑点 P 附近极值点,即将式(1)中的积分求和变为相减,再进行一次“Radon”变换,将所有经过点 P 的正弦曲线簇抵消,这样将点 P 所在亮斑变为暗斑,点 P 附近的极值点自然也被消除;最后,依次对其他亮斑做类似处理,得到精确的检测结果如图 7 所示.



(a) 航迹 1 优化结果

6 结束语

本文提出了一种全新的基于光学图像的航迹检测方法.该算法具有针对性强、算法复杂度低和实时性好的特点.为了验证算法的有效性,使用该算法对实际航拍图片进行了航迹检测实验,取得了很好的效果.目前,该算法还存在一些不足之处.例如,在使用 GLCM 判断航迹是否存在时,仅使用对比度作为特征可能并不充分,需要进一步引入对比度之外的其他特征参数.此外,在检测出航迹之后,如何抽取舰船参数、进行航速分析等是需要进一步探讨的课题这些将是下一步的工作重点.

参考文献:

- [1] ELDHUSET K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 1010 - 1019.
- [2] DU G, YEO T S. A novel radon transform-based method for ship wake detection [A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2004 [C]. New York: Wiley-IEEE Press, 2004.
- [3] COPELAND A C, RAVICHANDRAN G, TRIVEDI M M. Localized radon transform-based detection of ship wake in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 35 - 45.
- [4] KUO J M, CHEN K S. The application of wavelet correlator for ship wake detection in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1506 - 1511.
- [5] TUNALEY J K E. The estimation of ship velocity from SAR imagery [A]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2003 [C]. New York: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [6] 邹焕新, 蒋咏梅, 匡纲要, 等. 一种基于斑点抑制的 SAR

- 图像舰船航迹检测算法[J]. 电子与信息学报, 2003(8): 1051 - 1058.
- ZOU Huanxin, JIANG Yongmei, KUANG Gangyao, et al. Detection algorithm of ship wakes of SAR image based on the speckle noise suppression[J]. Electronic Information Transaction, 2003(8): 1051 - 1058.
- [7] KARATHANASSI V, TOPOUZELIS K, SARANTOPOULOS D. Texture-based detection of sea wave direction remote sensing for environmental monitoring [A]. Proceedings of SPIE[C]. [S.l.], 2004.
- [8] OLMO G, MAGLI E. Determination of a segment end-points by means of the radon transform electronics, circuits and systems[A]. Proceedings of International Conference on Electronics, Circuits, and Systems '99 [C]. [S.l.], 1999.
- [9] 张宏林, 蔡 锐. 数字图像模式识别技术及工程实践 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [10] TERRADES O R, VALVENY E. Radon transform for linear symbol representation analysis and recognition [A]. Proc Seventh Internat Conf on Document Analysis and Recognition (ICDAR03) [C]. Edinburgh, 2003.

作者简介:



王彦杰,男,1981生,硕士研究生,主要研究方向为模式识别和图像处理.



汪增福,男,1960生,教授,博士生导师,主要研究方向为视听觉信息处理、模式识别和智能机器人等,发表论文 80 余篇,1998 年以来,主持国家自然科学基金项目、863 项目、科学院创新项目等 10 余项.

E-mail: zfwang @ustc. edu. cn.

2007 年全国高性能计算学术年会

National Annual Conference on High Performance Computing, HPC China 2007

由中国计算机学会高性能计算专业委员会主办,中国科学院深圳先进技术研究院承办的“2007 年全国高性能计算学术年会”将于 2007 年 10 月 26 日至 28 日在深圳召开。全国高性能计算学术年会是中国高性能计算领域一年一度的盛会,为相关领域的学者提供交流合作、发布最前沿科研成果的平台,并将有力促进中国高性能计算的发展。欢迎从事高性能计算及相关研究的专家、学者踊跃投稿。

会议论文涉及的主要领域:高性能计算应用特征分析、数据模拟与仿真(数字城市、水利工程、CAE、航空航天、气候、地球物理、生物化学等)、高性能计算机软件及算法、网格技术及其应用、高性能计算机体系结构、其他高性能计算相关领域。

论文通过电子邮件提交至: hpcchina2007 @siat. ac. cn;

论文提交截止时间: 2007 年 08 月 26 日;

论文录用通知时间: 2007 年 09 月 26 日;

排版稿件截止时间: 2007 年 10 月 16 日;

联系人: 中国科学院深圳先进技术研究院 朱定局;

电话: 0755-26803533 13266867589;

传真: 0755-26803589;

E-mail: dj. zhu @siat. ac. cn; zhudingju @ncic. ac. cn.