

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

目次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度	朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪	杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知	封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail: jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0537-09

论文引用格式: 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤. 结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 537-545

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测

邱璇¹, 黄靖¹, 杨丰¹, 邢栋¹, 涂圣贤²

1. 南方医科大学生物医学工程学院, 广州 510515; 2. 莱顿大学医学中心放射科, 莱顿, 荷兰

摘要: 针对心血管内超声 (IVUS) 图像中-外膜边缘检测中, 伪影、斑块及血管分支等造成边缘难以准确检测的问题, 提出一种基于空频域图像增强的中-外膜边缘检测算法。首先, 采用一种空频域相结合的增强算法对图像进行增强处理, 该增强算法结合了基于方向滤波器的频率域增强算法与基于邻域、直方图均衡化的空间域增强算法的优点, 同时克服了前者导致的对比度降低的缺陷及后者带来的图像细节模糊的缺陷。然后, 将增强后的图像数据矩阵作为代价矩阵, 利用启发式图搜索法对代价矩阵进行图搜索, 从而获取中-外膜边缘。实验结果表明, 本文增强算法在增强中-外膜边缘特征的同时改善了图像的对比度和清晰度, 使其增强结果的图搜索能准确地检测到中-外膜边缘, 其检测正确率达到 92.76%, 提高了 IVUS 图像中-外膜边缘检测的准确性。

关键词: 心血管内超声; 中-外膜边缘; 空频域图像增强; 启发式图搜索

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images

Qiu Xuan¹, Huang Jing¹, Yang Feng¹, Xing Dong¹, Tu Shengxian²

1. Biomedical Engineering School of Southern Medical University, Guangzhou 510515, China;

2. Department of Radiology, Leiden University Medical Centre, Leiden, the Netherlands

Abstract: An important challenge in the analysis of intravascular ultrasound images (IVUS) is the media-adventitia border detection. However, as a result of the inevitable artifact, plaque and imaging equipment effect, the target border always appears too fuzzy to be detected. In this paper, a new border detection method based on spatial-frequency domain image enhancement is proposed. The method uses enhancing processes in the spatial and in the frequency domain during the detecting process. In the enhancing process, the directional filter band, neighborhood and histogram equalization are combined to overcome the defect of contrast reduction caused by directional filter and the defect of details vagueness caused by histogram equalization. Then in the detecting process, a heuristic graph-searching is applied to find the media-adventitia border by taking the enhanced image data matrix as the cost matrix. The experiment results show that the enhancing process not only strengthens the features of the media and adventitia greatly, but also improves the contrast and definition of the image. The graph-searching based on the enhanced results can detect the media-adventitia border accurately. The correct rate reached 92.76%.

Key words: intravascular ultrasound; media-adventitia border; spatial-frequency domain enhancement; heuristic graph-searching

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2012-01-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (81000642); 国家自然科学基金项目 (60672115)

第一作者简介: 邱璇 (1987—), 女, 南方医科大学生物医学工程学院硕士研究生, 主要研究领域为医学图像处理。

E-mail: qx457469@163.com

通讯作者: 黄靖, E-mail: jing.huang.hust@gmail.com

0 引言

心血管内超声 (IVUS) 作为一种无创性的超声技术和有创性的导管技术相结合的方法, 越来越多的被应用于冠状动脉疾病的诊断和治疗中。它利用安装在心导管顶端的微型超声换能器, 在血管内发射和接收高频超声信号, 实时显示血管的切面图像, 能清晰显示管壁结构的厚度、管腔大小和形态等, 可辨认钙化、纤维化和脂质池等病变^[1]。中-外膜边缘是心血管病变诊断和量化分析的重要依据, 也是 IVUS 图像处理与分析中的重要特征。准确、快速的检测中-外膜边缘具有十分重要的意义。

在现有的 IVUS 图像中-外膜边缘的检测算法中, 最为广泛应用的是基于活动轮廓模型, 又称 Snake^[2-4] 的算法。传统活动轮廓模型^[5] 的基本思想是在图像中找出一条内能和外能的加权总和为极小值的参数化的轮廓曲线。但该模型对初始位置依赖大、抗干扰能力差, 并且在边界凹陷处不易收敛。为改善闭合边界凹陷处的曲线收敛特性, 裘振^[6] 和 Zhu^[7] 分别从内力和外力的角度对传统的 snake 算法进行改进; 裘振^[6] 用 B 样条取代内力, 只用外力来控制整条曲线的进化。虽然 B 样条省去了选择弹性、刚性参数的过程, 但控制点的个数仍然需要设定。Zhu^[7] 引入气球力 (BF) 与基于非线性滤波的梯度矢量流场 (iGVF) 作为新的外力, 重新定义 snake 能量模型 (iGVF BS), 降低了控制点的数量并且扩展了捕获区域; 但此算法不能很好地解决局部极值点的收敛问题, 且对初始轮廓位置依赖较大。

相对于 snake 算法的上述缺陷, 基于动态规划思想的图搜索算法具有克服噪声干扰、不用手动描记初始轮廓、不受初始条件和模型参数影响等优点, 且若在图其中加入启发式信息指导搜索过程, 可大大提高搜索效率和正确率^[8]。因此, 启发式图搜索被广泛地运用于 IVUS 图像处理中^[9-12]。早在 1995 年, Milan 就提出将基于最小代价算法的图搜索法用于 IVUS 图像的边缘提取^[10], 但其代价矩阵是针对早期低频超声探头扫描得到的 IVUS 图像设计的, 不适合目前高频超声探头扫描得到的具有高分辨率、高噪声的特征的 IVUS 图像。针对这一问题, Atsushi^[9] 用边缘能量信息和边缘方向信息来构建代

价矩阵, 从中搜索出中-外膜边缘, 但斑块、伪影边缘的能量和方向与中-外膜边缘很相近, 容易被误判为中-外膜边缘。

从上述分析可知, 能否利用图搜索法寻找出正确的边缘取决于代价矩阵能否反映出目标边缘的特征, 而图像增强能最直接地提高中膜、外膜及其交界面的对比度信息, 突出目标边缘特征, 因此本文采用图像增强的方法构造代价矩阵。

图像增强是指按特定需要突出一幅图像的某些信息, 按作用域可将其划分为空间域增强和频率域增强两类。空间域增强是指直接对像素灰度进行处理来增强图像。直方图均衡算法是一种常用的空间域增强算法, 但它是建立在合并相似像素灰度的基础上, 增强过程中容易模糊图像细节、放大图像的噪声, 且因其只考虑到图像各灰度级的像素数量而与图像其他信息无关, 它很难实现以增强边缘为目的的灰度级动态范围的有效调整^[13-14]。频率域增强是对图像的频谱成分进行处理来增强图像。在频率域图像增强算法中, 基于方向滤波器组的增强算法能准确地提取图像的方向信息, 常被应用于某些具有明显方向特征的图像增强中, 但其增强后的图像存在对比度、清晰度降低及部分特征损失等等的问题^[15-16]。因此, 单一域的图像增强处理各自具有一定的缺陷。

基于上述问题, 提出空间域和频率域相结合的图像增强算法, 用基于邻域信息的算法将频率域的方向滤波器组 (DFB) 增强和空间域的直方图均衡化 (HE) 增强结合起来, 对 IVUS 图像进行增强, 在突出感兴趣区域的同时, 克服了单一域增强所带来的缺陷。在此基础上, 将增强后的图像数据作为代价矩阵进行动态规划图搜索, 获得中-外膜边缘。图 1 为本文算法的框架结构图。实验结果表明, 本文算法能克服噪声、伪影及斑块干扰的问题, 较准确的提取 IVUS 图像中-外膜边缘。

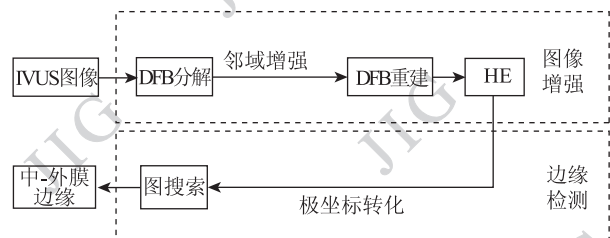


图 1 本文算法框架结构

Fig. 1 The framework of the proposed method

1 空频域结合图像增强

空频域结合的图像增强算法,是将基于方向滤波器组的图像增强算法与基于直方图均衡化的图像增强算法进行结合,以克服单一域增强所带来的缺陷,达到增强图像目标边缘的目的。

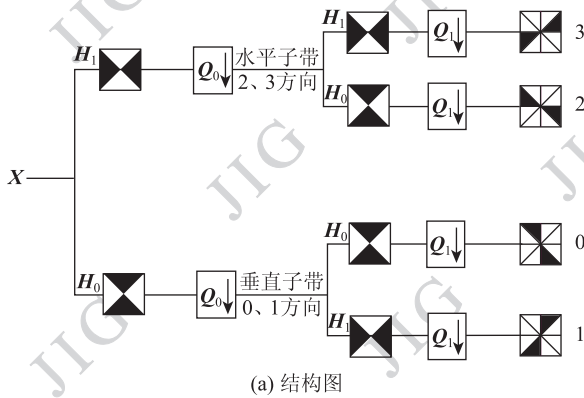
1.1 方向滤波器组

方向性滤波器组^[17-18](DFB)作为一种有效的方向特征信息提取工具,能准确获取图像的方向信息,因此其被广泛应用于图像的方向纹理增强中^[15-16]。

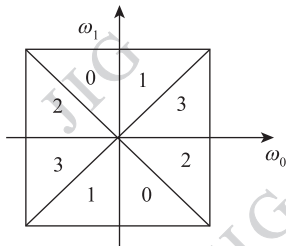
方向滤波器组^[17]的前两级分解结构如图2(a)所示:其中 H_0 、 H_1 为扇形滤波器,黑色区域代表滤波器的理想通带; Q_0 和 Q_1 为式(1)所示的5株型采样矩阵,其对应采样网格如图3所示。对图像分解得到如图2(b)所示4方向的频率划分,重建部分为相应的对偶操作。

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$



(a) 结构图



(b) 频带分解图

图2 2级4子带DFB实现结构图及频带分解图

Fig. 2 Structure and frequency analysis of two levels of four-band DFB

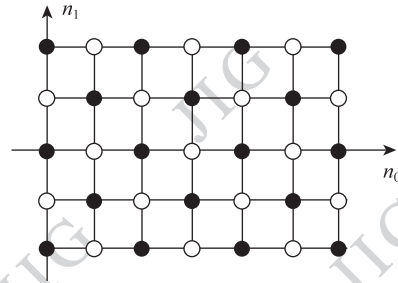


图3 与采样矩阵 Q_0 和 Q_1 相对应的采样网络

Fig. 3 Quincunx sampling lattice corresponding to sampling matrix Q_0 and Q_1

方向滤波器组通过对图像的子带进行剖分,可有效地提取2维方向信息,研究者们常把它用于图像的增强中。例如,Sang^[15]将方向滤波器组用于指纹图像的增强,处理过程对指纹图像直接进行DFB分解,通过估算子带图像的方向能量信息来加权各子带系数,最后重建得到图像增强结果。此算法降低了噪声对增强脊和谷效果的影响,但是其结果存在对比度、清晰度降低及部分特征损失等情况。针对这一问题,王发牛^[16]先对指纹图像进行小波变换,提取出低频信息,只对高频信息图像进行DFB分析处理,在抑制噪声的同时提高了增强效果。但因其只对高频分量进行分解处理,导致图像平滑区域灰度的动态范围被压缩,低频信息丢失及整幅图比较昏暗,使处理后图像的对比度和清晰度都有所降低。

1.2 直方图均衡化

直方图均衡化^[19](HE)能快速有效地扩大图像的灰度动态范围,改善图像的整体视觉效果,是空间域图像增强算法中最重要也是最常见的一种算法。

在直方图均衡化过程中,代表高频分量的灰度级的合并会导致图像细节信息的丢失,特别是对于低灰度值像素点较多的图像,均衡化后的图像灰度将集中到直方图的后半部分,这样合并了太多的灰度值,从而导致较多的细节丢失;同时,由于图像存在多种噪声,所以在增大图像灰度级动态范围的时候,也会相应地放大图像的噪声。因此,直方图均衡化的图像增强算法虽然能改善图像的亮度、对比度从而改善整幅图像的视觉效果;但是由于它对处理的数据不加选择,可能会增加背景噪声的对比度并且降低有用信号的对比度,带来图像细节信息丢失和噪声放大等问题。

直方图均衡化常被用于低对比度图像的增强,尤其对于噪声较小、细节信息较少的图像具有较好

的增强效果。朱会平^[20]将直方图均衡化用于遥感图像的增强中,在一定程度上改善了图像的对比度和动态范围,达到一定的增强效果。但是对于噪声较大、对细节信息要求高的医学图像,单纯地用直方图均衡化增强会带来细节信息损失、难以有效增强感兴趣区域、图像信息熵减少等问题^[21-22]。

1.3 基于邻域信息的空频域结合图像增强

由 1.1 节、1.2 节的分析可知,利用单一域的图像增强算法——不论是基于 DFB 的图像增强还是基于 HE 的图像增强,都因存在一定缺陷而不能达到较好的增强效果。基于 DFB 的增强使图像的方向信息得到加强,同时也降低了图像的对比度;基于 HE 的增强虽然能改善图像的亮度和对比度,但模糊了图像细节放大了噪声的影响。因此,针对 IVUS 图像的特征,提出一种空频域相结合的增强算法,提高中膜、外膜及其交界面的对比度信息,突出中中外膜边缘特征。算法的基本步骤如下:

1) 对 IVUS 图像进行 DFB 分解

对 IVUS 图像 F 进行 2 级 DFB 分解,将得到 4 个子带图像 $O_j (j=1,2,3,4)$ 。由于图像在频域中的主功率谱方向与空域中纹理方向相正交,因此每个子带图像分别表达与如图 2(b) 所示的 4 个方向相正交的纹理细节信息。以图 2(b) 中方向 3 为例,原 IVUS 图像中, $90^\circ \sim 135^\circ$ 这段弧度方向的组织细节纹理经过方向滤波将得到清晰的表达,表现为或高或低的灰度值。由于血液斑点噪声具有随机性,在频率域中表现为不具有方向分布特性,因此在各分解子带中位于血管壁内的血液斑点噪声得不到方向表达。此过程在得到图像的方向信息的同时,也抑制了血液斑点噪声的影响。

2) 用基于邻域信息的方法对各子带图像所表达的方向信息进行增强

每个子带图像都表达了一定方向上的细节纹理信息,为了避免这些信息的丢失,用基于邻域信息的方法对各子带图像进行增强处理。具体分为以下两个步骤:

(1) 判断子带中的像素点处于亮纹理区还是暗纹理区

在各子带内以每个像素为中心,设置 $w \times w$ 大小的邻域块。邻域块内所有像素的平均灰度值 $m_j(x,y)$ 表示块内所有纹理的平均亮度。因此,当该块中心像素的灰度值 $O_j(x,y) (j=1,2,3,4)$ 大于邻域平均值 $m_j(x,y)$ 时,认为它处于该邻域内较亮

的纹理区;反之,若小于邻域平均值则认为它处于该邻域内较暗的纹理区。例如当中心像素位于如图 4 箭头所指点 2 的中膜位置时,其邻域内低灰度值和高灰度值几乎各占一半,该邻域内的平均灰度值大于中心像素点的灰度值,则认为该中心像素点处于较暗纹理区;当中心像素位于如图 4 箭头所指点 1 的位置时,邻域内高灰度值的外膜组织、斑块成分较多,均值也随着更大,因此虽然像素点 1 灰度值较其他中膜上像素点灰度值大,仍然认为它属于较暗纹理区。

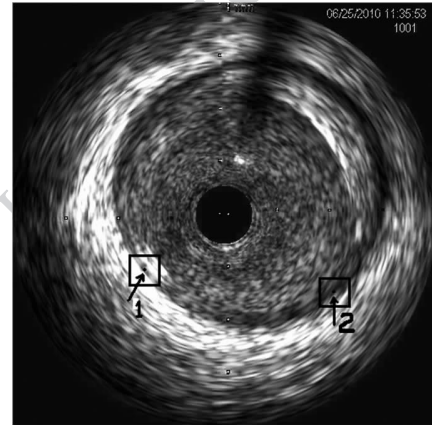


图 4 待增强 IVUS 图像

Fig. 4 IVUS image before enhancement

(2) 根据步骤(1)判断结果调整像素灰度值

为了提高亮纹理区和暗纹理区的对比度,即使得亮区更亮、暗区更暗,采取对中心像素点灰度值与邻域块内灰度均值之差 $(O_j(x,y) - m_j(x,y))$ 进行加权的方法,由式(2)计算得到新的灰度值 $N_j(x,y)$,用该新灰度值替换原来中心像素点的灰度值。当中心像素点处于亮区时,该点灰度值与邻域块内灰度均值之差为正,将该正值乘以一个大于 1 的加权值得到一个更大的正值,将其替换原灰度值,则该点的灰度值得到提高;当中心像素点处于暗区时,差值为负,将该负值乘以一个大于 1 的加权值得到一个更小的负值,将其替换原灰度值,则该点的灰度值降低。

$$N_j(x,y) = k \times (O_j(x,y) - m_j(x,y)) \quad (2)$$

式中, $N_j(x,y)$ 为增强后第 j 个子带图像位置 (x,y) 处的像素值, $O_j(x,y)$ 为第 j 个子带位置 (x,y) 处像素值 $(j=1,2,3,4)$, $m_j(x,y)$ 为 $w \times w$ 邻域块像素灰度均值, k 为大于 1 的加权系数。

上述算法处理子带图像,能很好地提高中、外膜边界对比度,同时它是对每个像素点灰度值都进行或增益或衰减的增强处理,这样在增强图像的同时,

不会遗漏任何一个像素的细节信息。

3)对增强后的各子带图像进行DFB重建,对重建后图像进行直方图均衡化处理

对增强后各子带图像 $N_j(j=1,2,3,4)$ 进行DFB重建。重建后图像 G 的灰度级集中在较窄的中间区域,其灰度级动态范围狭窄,导致整幅图像的对比度和亮度仍然较低。本文用直方图均衡化的算法对图像进行非线性拉伸,重新分配像素值,把灰度级范围调整到均匀分布,增加图像的全局对比度,得到最后增强后图像 H 。

2 结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测

本文算法分为图像增强和边缘检测两部分。图像增强部分描述具体见1.3节。采用启发式图搜索的算法^[9]来获取中-外膜边缘。把增强后极坐标下图像当作一个连通图,每个像素的灰度值代表代价矩阵中节点的代价值,一条完整的路径上所有节点代价值之和为该路径累加的代价和。在所有可能的路径中,累加的代价和最大或最小的路径就是目标的最优边缘。边缘检测算法分为以下几个步骤:

1)将增强后图像 H 转化为极坐标下图像 I 。以增强后图像 H 的导管中心位置点 (x_0, y_0) 为极坐标系统的原点(由IVUS成像设备决定,原图像中导管的圆心总是位于图像的中心坐标位置,因此本文将导管中心坐标位置点设置为极坐标系统的原点);角向按采样率 $\theta=2\pi/(M-1)$ 采样 M 个点;径向按采样率 $r=2r/(N-1)$ 采样 N 个点;通过双线性插值恢复离散化和变换过程中丢失的信息。极坐标转换后,近似圆形的闭合轮廓变成一条水平方向的边缘线,这样就符合了最小代价法以行为单位逐列进行搜索的要求。

2)计算最小代价和矩阵。第1列元素保持原值,从第2列开始,在该列每行元素的前一列邻域中寻找最小值。这里的前一列邻域是指前一列中与该元素相邻的3个像素(首行和末行两个像素)。

3)将该元素的原值与步骤2)中所找到的前一列邻域最小值的和作为该位置元素的新值。

4)重复步骤2)3),直到对矩阵每个坐标点上的元素值(除第1列以外)都更新完毕,由此得到一个最小代价和矩阵 Q 。

5)由步骤4)所得到的代价和矩阵 Q 中,从最后一列各元素中寻找最小值,并记录坐标点位置。

6)在步骤5)所得的元素的位置的前一列邻域中寻找最小值,并记录其坐标点位置;

7)重复步骤6)的逆向搜索,直至找到第一列的对应最小值。所记录的坐标点位置就为所求的最小代价和路径。

3 实验结果及分析

分别从图像增强效果和中-外膜边缘检测效果来验证本文提出增强算法的有效性与准确性。实验数据来自荷兰莱顿大学医学中心提供的临床IVUS图像,成像系统工作频率为40 MHz。从图库中随机抽取600帧大小为 500×500 ,灰度级256的IVUS图像(其中含血管分支图像86幅,含斑块的图像443幅,既含血管分支又含斑块图像26幅,既不含斑块也不含血管分支的图像有97幅)参加实验。该实验在matlab2010b平台上实现。

3.1 增强效果

分别用本文的算法和文献[23]的算法对所抽取的600帧图像进行增强实验,并从定性和定量两方面分析对IVUS图像的增强效果。文献[23]是Deepti在2010年提出的针对超声图像的增强算法,他认为在计算扩散方程中的梯度及拉普拉斯算子时,采用含较多邻域像素点的较大尺度的模板能获得更准确的数据,同时为了增加超声图像的视觉效果,在扩散方程中加入非二次正则化因子。此算法对组织、病灶结构较简单的超声图像具有较好的增强效果。实验采用24邻域模板,参数根据经验值设定。本文算法中,式(2)中 k 的取值将影响图像的灰度分布范围:若 k 取值过大,增强后图像灰度分布范围广,为后续处理带来不便;若 k 取值过小,则无法有效提高图像对比度。邻域块 $w \times w$ 的大小影响着中心像素点所属纹理区(亮纹理区或暗纹理区)的判断,为了达到增强边缘的目的,其边长 w 应大于中-外膜边缘的宽度,一般取3个或4个纹理大小。根据部分样本测试效果统计与临床经验,本文算法参数取值为 $k=2, w=15$ 。

图5为从所得结果中抽取典型的纤维斑块、钙化斑块、混合斑块及血管分支情况的IVUS原图像、利用文献[23]算法和本文算法增强的结果图

像。对比图 5(a) 可以发现,对含纤维斑块的图像,文献[23]的算法虽然增强了其亮区和暗区的对比度,但图像中细节纹理的模糊程度也随着增加,可见时钟 8 点方向的小斑块与中膜界面也不清晰,时钟 2 点方向斑块后方组织的视觉效果没有本文算法好;由图 5(b) 可见,文献[23]算法无法增强钙化斑块后方衰减较大的回声区(时钟 1 点到 4 点方向);由图 5(c) 可见,文献[23]算法无法增强受混合斑块影响反射不均匀的回声区(时钟 1 点到 5 点方向),且小斑块与中膜界面模糊(时钟 7 点到 9 点方向)。而本文增强算法不仅对于钙化斑块后方衰减较大的弱回声区能增强到肉眼可见,而且对混合斑块带来的复杂不均匀的回声区也能增强到清晰可辨,大大降低了对复杂图像搜索最优路径的难度。

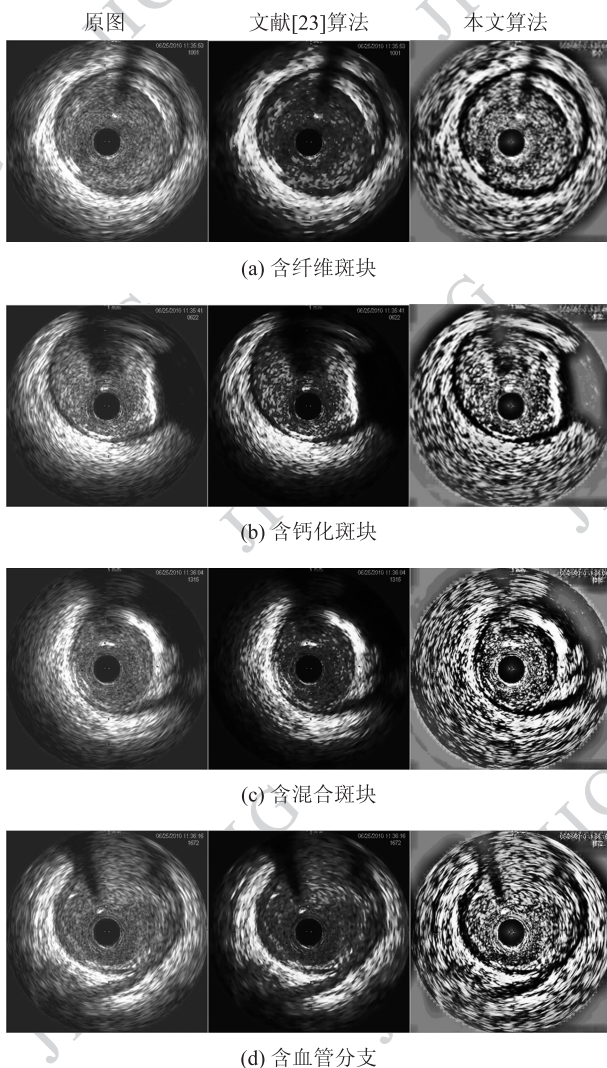


图 5 图像增强对比实验结果

Fig. 5 Contrast test results of image enhancement

为进一步比较,还利用图像的边缘能量、细节能量^[24]、清晰度、对比度^[25]和信息熵^[26]对 IVUS 图像的两组算法增强效果进行量化分析,如表 1 所示。其中,对参加实验的 600 帧图像用两种算法增强,分别对原图像、文献[23]增强后图像以及本文算法增强后图像计算上述参数,然后求其平均值。

从表 1 可以看出,文献[23]的算法和本文算法均提高了边缘的丰富程度和清晰程度(边缘能量高)以及图像的对比度。然而前者对图像的细节信息增强效果却并不明显(从细节能量增强幅度低且信息熵较低可以看出),且增强后图像的清晰度提升也不大。而本文算法在以上几方面都有较大的提高,说明本文算法在很好地增强边缘和细节信息的同时,也大大改善了图像的清晰度和对比度。此外,本文算法造成信息量一定的缺失,那是因为方向滤波器组对图像进行抽样和插值过程中不可避免地造成图像信息的丢失。

表 1 增强算法比较结果

Table 1 Results of enhancing algorithms

	原图	文献[23]	本文算法
边缘能量	0.003 5	0.017 2	0.025 5
细节能量	0.005 8	0.006 0	0.024 3
清晰度	0.071 5	0.089 6	0.113 7
对比度	0.031 4	0.104 4	0.132 6
信息熵	6.532 1	5.043 6	5.673 9

3.2 边缘检测效果

对所抽取的 600 帧图像,用本文算法对参加实验图像进行中-外膜边缘检测。为验证本文增强算法对边缘检测的有效性,用文献[23]的增强算法代替本文增强算法进行对比实验;同时为验证本文整体算法检测边缘的准确性,还引入文献[7]的算法进行对比实验。以富有临床经验的医生描记的中-外膜边缘为标准,从定性和定量两方面评价本文算法检测中-外膜边缘的效果。在实验中,将整体样本分为 3 组:含血管分支图像、含斑块图像、二者都不含的图像,对每一组中的各幅图像用 3 种算法检测中-外膜边缘(文献[7]算法中初始轮廓设置在真实内膜边缘附近)。

图 6 为抽取典型的含纤维斑块、钙化斑块、混合斑块及含血管分支等情况的结果图像。

文献[23]算法对含纤维斑块、含钙化斑块及含

血管分支图像检测到的边缘不够准确:由于其增强后的图像细节纹理信息模糊,因此将其增强结果图像作为代价矩阵易误导图搜索法把斑块的內边界认为是中-外膜边缘(如图6(a)时钟8点方向);又因其在增强边缘的同时也增强了部分血液斑点噪声,至使图搜索法将内膜边缘误认为是中-外膜边缘(图6(b)时钟9—12点方向);且该算法无法增强较低回声区,在钙化斑块处无法准确地判别边缘位置(图6(b)2—4点方向)。

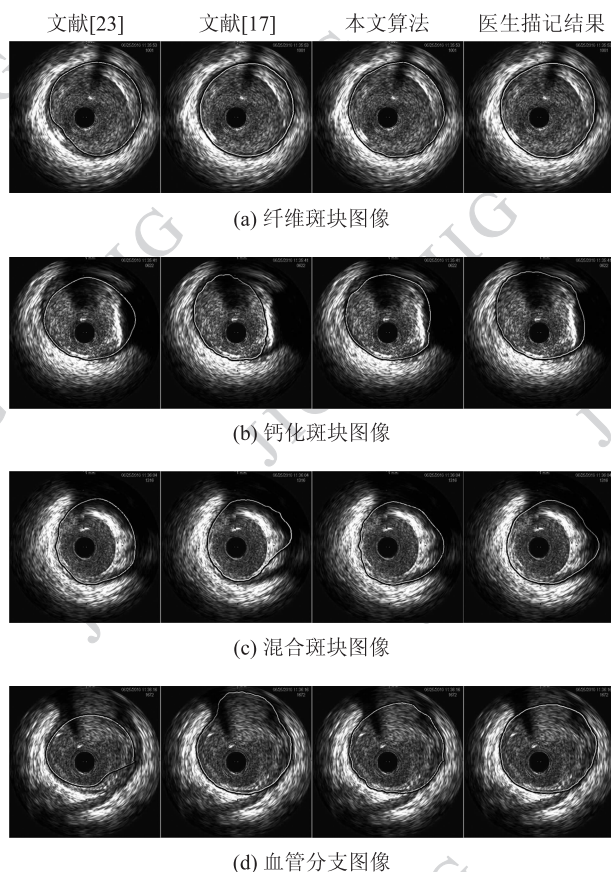


图6 边缘检测对比实验结果

Fig. 6 Contrast test results of border detection

文献[7]算法对含钙化斑块、含混合斑块及含血管分支图像检测到的边缘不够准确:曲线在钙化斑块(图6(b))、混合斑块(图6(c))的內边界处易陷入极值;且由于血管分支处没有较强边缘存在,snake也无法收敛在正确的位置(图6(d)中时钟11—2点方向);同时该算法具有运算过程耗时,对初始轮廓依赖大的问题。

本文算法对含纤维斑块、含钙化斑块、含混合斑块及含血管分支图像检测到的边缘较准确。从图中可看出,基于本文增强算法得到的代价矩阵,不仅能

克服纤维斑块的影响(图6(a)),而且能通过有效增强硬斑块及混合斑块带来的复杂的低回声区,指导图搜索法检测出正确的边缘(图6(b)(c))。此外对有分支情况的IVUS图像也能准确地检测出中-外膜边缘(图6(d))。

对比观察可发现,本文算法得到的中-外膜边缘与医生描记结果最为接近。

表2为3种算法对整个实验样本的检测结果的正确率统计,其中引入曲线相似度^[27]来衡量:当检测结果与医生描记边缘曲线相似度大于0.7时,则认为该检测结果正确;否则,认为该检测结果不正确(参数 $z=2$)。

表2 3种算法中-外膜检测正确率比较

Table 2 Correct rate comparison of media-adventitia border detection with three kinds of methods

	/%		
	文献[23]	文献[7]	本文
含斑块图像	79.01	85.78	89.39
含血管分支图像	84.88	75.58	93.02
不含血管分支也不含斑块图像	87.63	94.85	95.88
总正确率	83.84	85.40	92.76

由表2可以看出,基于文献[23]的算法对含斑块图像的边缘检测正确率较低,对二者都不含的图像正确率较高;文献[7]的算法对于含血管分支图像的边缘检测正确率较低;本文算法对含斑块和血管分支的图像准确率分别达到89.39%和93.02%,对二者都不含的图像准确率达到95.88%,说明本文提出的空频域结合的图像增强算法能有效地提高中-外膜组织及其交界面对比度,增强中-外膜边缘特征;基于空频域结合图像增强的中-外膜检测算法,比传统算法具有更好的检测性能。

4 结论

本文提出了一种结合空-频域增强的心血管超声图像中-外膜边缘检测算法。该算法将频域的方向滤波和空间域的邻域增强、直方图增强有效地结合起来,克服了空间域增强算法模糊图像细节、频率域增强算法降低图像对比度的缺陷,然后将增强结果作为代价矩阵进行图搜索,寻找代表中-外膜边缘的最小代价和路径。实验结果分析表明,本文算法

能较好克服斑块、声影对中外膜检测的影响,对一些特殊结构的血管也能有较好的检测效果,而且无需人工干预,准确性和鲁棒性较好。

志谢 感谢荷兰莱顿大学医学中心 Johan H. C. Reiber 教授和 Dijkstra Jouke 博士对本文研究的支持与帮助。

参考文献 (References)

- [1] Shi D Z, Ma L. Doctor of Medicine on Coronary Heart Disease [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2005:12-15. [史大卓, 马路. 医学博士漫话—冠心病[M]. 北京:科学出版社,2005:12-15.]
- [2] Giannoglou G D, Chatzizisis Y S, Kou T V, et al. A novel active contour model for fully automated segmentation of intravascular ultrasound images [J]. Computers in Biology and Medicine, 2007, 37 (9):1292-1302.
- [3] Sanz-Tequera R, Moratal D, Garcia-Sanchez D R, et al. Automatic segmentation and 3D reconstruction of intravascular ultrasound images for a fast pre-liminar evaluation of vessel pathologies [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2007,31 (2) :71-80.
- [4] Gao C Y. Research on edge extraction of the intravascular ultrasound sequential image based on active contour model [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2010. [高重阳. 基于活动轮廓模型的血管内超声序列图像边缘提取研究 [D]. 西安:西安科技大学, 2010.]
- [5] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models [J]. International Journal of Computer Vision. 1987,1: 321-331.
- [6] Qiu Z, Wang Y Y, Wang W Q, et al. Automatic extraction of the luminal contour from coronary artery IVUS images based on rayleigh model and B-snake [J]. Shanghai Biomedical Engineering, 2006, 26(1):3-6. [裘振, 汪源源, 王威琪, 等. 利用 Rayleigh 模型和 B-snake 自动提取冠脉内超声图像管腔轮廓 [J]. 上海生物医学工程, 2006, 26(1):3-6.]
- [7] Zhu X J, Zhang P F, Shao J H, et al. A snake-based method for segmentation of intravascular ultrasound images and its in vivo validation [J]. Ultrasonics, 2011(51):181-189.
- [8] Alberto M. Edge detection using heuristic search methods [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1972, 1 (2): 169-182.
- [9] Atsushi T, Kiysoshi H, Zhang X G, et al. Automated contour detection for high-frequency intravascular ultrasound imaging: A technique with blood noise reduction for edge enhancement [J]. Ultrasound in Med. & Biol, 2000,26(6):1033-1041.
- [10] Milan S, Zhang X G, Maria S, et al. Segmentation of intravascular ultrasound images: A knowledge-based approach [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1995, 14 (4): 719-732.
- [11] Qu H J, Sun F R, Li Y L, et al. Edge detection of IVUS image based on active contour model and statistical features [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(8):999-1004. [曲怀敬, 孙丰荣, 李艳玲, 等. 基于活动轮廓模型和统计特征的血管内超声图像的边缘提取 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(8): 999-1004.]
- [12] Bovenkamp E G P, Dijkstra J, Bosch J G, et al. Multi-agent segmentation of IVUS images [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4):647-663.
- [13] Zhu H, Francis H Y C, Lam F K. Image contrast enhancement by constrained local histogram equalization [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2):281-290.
- [14] Ji T L, Sundareshan M K, Roehrig H. Adaptive image contrast enhancement based on human visual properties [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, 13(4):573-586.
- [15] Sang Keun O, Joon Jae L. New fingerprint image enhancement using directional filter bank [J]. Journal of WSCG, 2003, 11(1):1-8.
- [16] Wang F N, Liang D, Chen J N, et al. Preprocessing on fingerprint based on directional filter bank [J]. Microelectronics & Computer, 2007, 24(8):190-192. [王发牛, 梁栋, 陈军宁等. 基于方向滤波组的指纹图像预处理 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(8):190-192.]
- [17] Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and designing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 882-893.
- [18] Do M N, Vetterli M. Contourlets: A directional multiresolution image representation [C]//Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. [S. l.]: Academic Press, 2002:1-4.
- [19] Rafael C G, Richard E W. Digital Image Processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003:344-365.
- [20] Zhu H P, Wei F Y. Discussion on the application of histogram equalization in image enhancement [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(1):174-176. [朱会平, 魏峰远. 探讨图像增强中直方图均衡化的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(1):174-176.]
- [21] Huang Z P. Image enhancement based on subsection histogram equalization [J]. Computer Knowledge and Technology, 2008, 2(16):1292-1294. [黄展鹏. 基于分段直方图均衡化技术的图像增强 [J]. 电脑知识与技术, 2008, 2(16):1292-1294.]
- [22] Ren Y F. Histogram equalization and its application in image processing [J]. Computer Information and Technology, 2007, 4: 37-38. [任艳斐. 直方图均衡化在图像处理中的应用 [J]. 计算机与信息技术, 2007, 4:37-38.]
- [23] Deepti M, Vinod K, Suresh C S. Enhancement of the ultrasound images by modified anisotropic diffusion method [J]. Medical & Biological Engineering & Computing. 2010(48):1281-1291.
- [24] Wang J, Lu F J, Gao L Y, et al. The quality assessment of

- CBERS-02B H R data [C]//China Association of Remote Sensing Application. Proceedings of the 3rd International Conference on Regional remote sensing application. Beijing:China Astronautic Publishing House, 2008, 617-629. [王静, 陆凤娟, 高陆, 等. 资源一号 02B 星 HR 图像质量参数的评价研究 [C]//中国遥感应用协会. 第三届区域遥感应用国际论坛论文集. 北京:中国宇航出版社, 2008, 617-629.]
- [25] Xian G M, Wang Z Y, Huang K. Objective effect evaluation of image fusion based on 2D compact supported wavelet [J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27 (15): 2740-2743. [洗广铭, 王知行, 黄鲲. 紧支撑二维小波多尺度融合图像效果评价 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27 (15): 2740-2743.]
- [26] Tang J S, Liu X M, Sun Q L. A direct contrast enhancement algorithm in the wavelet domain for screening mammograms [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3 (1): 74-80.
- [27] Jiang H, Chu Y D, Guo L F. Definition and measurement of shape similarity for curves [J]. Journal of Yunnan University of Nationalities: Natural Sciences Edition, 2009, 18 (4): 316-318. [江浩, 褚衍东, 郭丽峰. 曲线形态相似性的定义与度量 [J]. 云南民族大学学报:自然科学版, 2009, 18 (4): 316-318.]