

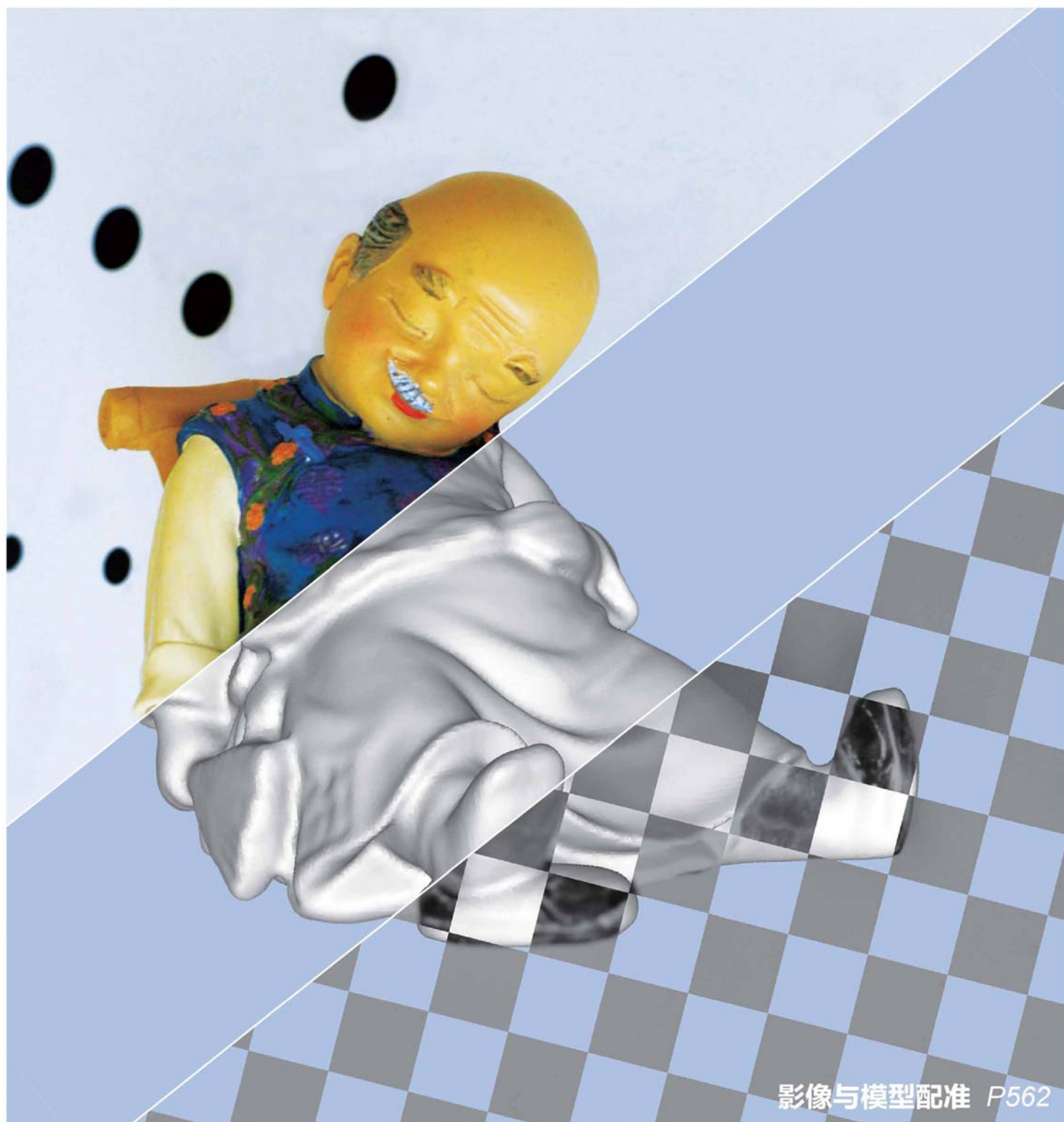


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
04
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

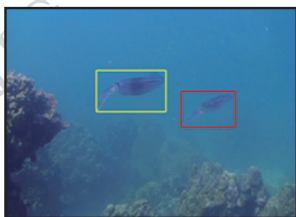
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

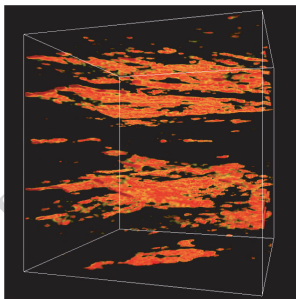
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法
刘海军, 常东超, 张凌宇 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法
王继军 0527

图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪
王慧斌, 程勇, 陈哲 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测
徐丹, 唐振民, 徐威 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位
李志, 谢强 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示
李国祥, 夏国恩 0556

图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准
郑顺义, 王晓南 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性
惠国保, 李东波 0569

计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 0577

医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 0583

遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别
曾接贤, 付俊, 符祥 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 0603

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 0630
- L_1 优化在网格去噪中的应用
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 0645

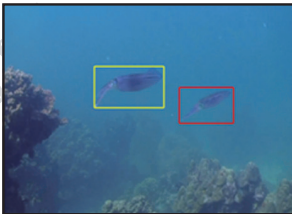
- 第五届数字地球高峰论坛征文通知 封三

CONTENTS

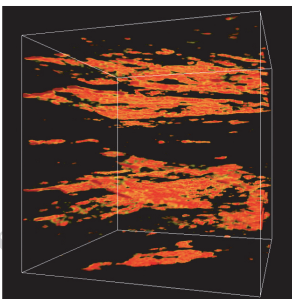
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

Image Processing and Coding

Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui	0493
Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng	0502
Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian	0512
Improved local directional pattern texture descriptor Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu	0520
High capacity reversible watermarking for image interpolation space Wang Jijun	0527

Image Analysis and Recognition

Visual depth based feature calculation and underwater target tracking Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe	0534
Combining color names with spatial information for salient object detection Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei	0541
Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location Li Zhi, Xie Qiang	0549
The global descriptor for bending non-rigid shapes Li Guoxiang, Xia Guoen	0556

Image Understanding and Computer Vision

Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects Zheng Shunyi, Wang Xiaohan	0562
Robust descriptor structured by pixel clustering Hui Guobao, Li Dongbo	0569

Computer Graphics

GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan	0577
--	------

Medical Image Processing

Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin	0583
---	------

Remote Sensing Image Processing

Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang	0592
Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai	0603

Special Issue on HHME 2013

Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao	0613
User preference mining for soccer video search engine Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao	0622
Novel binary feature from intensity difference quantization Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao	0630
The application of l_1 -optimization in mesh denoising Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun	0637
The design and implementation of real time MVC transcoding Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang	0645

中图法分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0603-10

论文引用格式: 耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佳鑫, 袁凯. 结合稀疏识别的自适应 Wallis 滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 603-612. [DOI: 10.11834/jig.20140415]

结合稀疏识别的自适应 Wallis 滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用

耿蕾蕾¹, 孙权森¹, 纪则轩¹, 刘佳鑫¹, 袁凯²

1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 济南军区司令部, 济南 250002

摘要: **目的** 随着国内遥感卫星的迅速发展, 卫星图像的图幅越来越大, 分辨率越来越高。在轨遥感图像的几何精度评价, 要求从待评遥感图像和多源参考图像之间精确地提取出分布均匀的控制点信息。使用 Wallis 滤波对高分辨率影像进行增强时, 会产生过增强和饱和现象, 影响了控制点提取效果。为了克服上述缺陷, 提出了一种基于稀疏识别的自适应 Wallis 图像增强算法。**方法** 首先计算图像子区域的辐射质量参数并构建分类特征; 然后通过稀疏识别算法确定子区域的地物类型; 最后根据子区域所属地物类型, 选择不同的 Wallis 滤波参数, 实现整幅图像的自适应增强, 并在增强的遥感图像上提取控制点信息, 实现遥感图像的几何精度自动化评价。**结果** 针对资源三号卫星影像的实验结果表明, 针对不同的子区域地物类型进行自适应 Wallis 增强, 有效防止了基于全局统一参数的 Wallis 滤波带来的过增强和饱和现象, 有效增强了高分辨率图像的纹理。**结论** 提出了一种新的高分辨率遥感影像增强策略, 增强了高分辨率图像的纹理, 提高了控制点的获取数目和准确率。

关键词: 稀疏识别; 辐射参数; 自适应 Wallis 增强; 提取控制点

Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images

Geng Leilei¹, Sun Quansen¹, Ji Zexuan¹, Liu Jixin¹, Yuan Kai²

1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094; 2. Headquarters of Jinan Military Area Command, Jinan 250002, China

Abstract: Objective With the rapid development of remote sensing satellites, the size and the resolution of satellite images is growing increasingly. The evaluation of remote sensing image quality requires precise information of control points extracted from unevaluated images and reference images. Therefore, we propose an adaptive Wallis enhancement method based on sparse recognition to increase the number of control points and to improve the matching precision for high-resolution images.

Method First, feature vectors of images are constructed by computing the image radiation-parameters. Second, the classification of sub-region terrain in the image can be determined using sparse recognition. Finally, according to the specific type of the sub-region terrain, we enhance the regions by the Wallis filter adaptively based on corresponding filter parameters and extract control points which would lead to the automatic evaluation for geometric precision. **Result** The experiments show that the proposed method can get better results especially in the detail on ZY-3 images, hence can increase the number of and improve accuracy of control points. **Conclusion** In this paper, we propose a new enhancement algorithm for high-resolution remote sensing images that we enhance textures of sub-region terrains using adaptive Wallis filter. Compared with tra-

收稿日期: 2013-05-13; 修回日期: 2013-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273251); 南京理工大学自主科研专项计划项目(2011ZDJH26); 江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0202)

第一作者简介: 耿蕾蕾(1984—), 女, 南京理工大学模式识别与智能系统专业在读博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理方法和压缩感知信号重构算法。E-mail: leileigeng@gmail.com

ditional Wallis filter, our method eliminates the number of pixels with saturated gray to increase the number of and improve accuracy of control points.

Key words: sparse recognition; radiation-parameters; adaptive Wallis enhancement; extract control points

0 引言

在遥感图像成像过程中,由于成像投影方式、传感器外方位元素变化、传感介质不均匀以及地形起伏和地球旋转或曲率等变化因素的影响,采集的遥感图像相对于实际地表目标存在一定的几何形变,因此遥感图像在应用前必须进行几何校正。遗憾的是几何校正的精确度往往非常有限,导致系统误差纠正后的图像上还存在难以预测的剩余形变。所以,有必要对几何校正后图像的几何精度进行评价,并用以指导后续的几何精校正^[1-2]。评价遥感图像几何精度需要借助地面控制点(GCP),GCP的传统采集方式,是由人工对照在轨卫星图像和参考图像来完成的,GCP准确率依赖于采集者个人的认识水平和技能。传统的人工采集方式不仅耗时长、准确率低,而且严重影响几何精度评价效率^[3]。因此,如何采用自动化的方法提高获取控制点的数目和准确率,是当前遥感图像评价有待解决的一个关键问题。

近年来,国内外研究学者在自动提取控制点方面做了大量的研究工作,控制点提取技术主要分为基于像素的方法和基于特征的方法两大类。前者直接利用灰度值来进行相关性度量,该类方法直观且容易实现,但是计算量大,对光照和畸变比较敏感。后者提取图像中含有图像重要特征的特征点,并通过相似性度量进行匹配,该类方法操作简单、匹配速度快、准确率高。近年来的研究热点主要包括 Harris 算子^[4]、Förstner 算子^[5]、尺度不变特征变换特征点检测方法^[6]和加速稳健特征(SURF)算法^[7-8]。由于目前遥感图像图幅越来越大,对遥感图像进行几何精度评价时,通常需将该图像所对应的多幅多源参考图像(包括不同光谱、时相、分辨率或传感器所拍摄的遥感图像)镶嵌成一幅参考图像。此类参考图像的灰度信息存在较大的差异,并且在轨图像存在定位精度误差和多种畸变(一般为旋转、拉伸和平移等),这些因素加大了控制点的提取难度,从而,基于像素的方法已经不适用,同时基于特征的方法也不能满足需求。因此,本文采用基于整体最优的两级匹配策略提取在轨图像与多源参考图之间的

控制点信息^[9]。

为了增加控制点提取数目以及提高控制点匹配准确率,通常需要在提取控制点之前对图像进行预处理。针对遥感图像,目前有效的预处理方法主要包括两大类:一类是基于直方图的增强算法,如刘晓春等人对遥感图像和参考图像进行了直方图相似变换以消除灰度畸变^[10];另一类是基于纹理的增强算法,如张力等人通过 Wallis 滤波对遥感图像纹理进行增强^[11],该方法可以提高特征点的数目和准确率。随着国内遥感卫星的迅速发展,卫星图像的分辨率越来越高。2008 年发射的环境与灾难监测预报小卫星星座 A、B(HJ-1-A、B)的 CCD 相机分辨率为 30 m,高光谱图像分辨率为 100 m,而 2012 年发射的资源三号卫星的正视图分辨率提高到 2.1 m,多光谱图像分辨率到 5 m^[12]。同样尺寸的图像,环境星图像覆盖区域的实际面积是资源三号卫星图像覆盖区域实际面积的 14² 倍。环境星图像块所包含的信息含量高、地物类型和纹理复杂,而资源三号卫星图像块所包含的地物类型相对单一,城市区域纹理复杂,山区、湖泊和农田等区域纹理相对简单。传统的 Wallis 滤波适用于低分辨率图像,但用于高分辨率图像时,会产生过增强和过饱和等问题。针对该问题,本文基于子区域地物类型的自适应 Wallis 滤波对整幅图像进行增强,即首先将图像分为若干个规则的子区域,然后通过分类算法对子区域类型进行分类识别,最后根据所属地物类型设置不同的参数进行 Wallis 增强。

在目前的遥感分类应用中,传统的方法包括主成分分析^[13](PCA)、独立成分分析^[14](ICA)、人工神经网络^[15]、决策树^[16]、支持向量机^[17]和专家系统^[18]等。对于高分辨率的遥感图像,如果仅利用单一的传统分类方法,就会造成空间数据大量冗余,无法有效利用高分辨率图像提供的地物信息,不能形成目标地物的上下文信息、纹理信息和形状信息。为了更好地实现高分辨率遥感图像的分类,合理地利用高分辨遥感图像提供的信息,选取图像信息量、灰度层次、统计结构信息和纹理共 4 类相关辐射质量评价参数构建图像分类特征。这样,图像的最小单元不再是单个的像素,而是一个个对象。

为了进一步提高遥感图像分类精度和鲁棒性,选取稀疏识别算法作为分类策略,该算法是由 Yang 和 Ma^[19]结合压缩感知的原理提出来的。基于稀疏表示的识别方法的前提是对任一测试样本存在一个稀疏表示,其本质是寻找测试样本相对于训练集的最稀疏的表示^[20],并基于得到的稀疏表示对测试样本分类。文献[21]假定同类数据处于同一个低维子空间,任一测试样本都可用相应类训练样本线性表示,即能用训练集稀疏表示,进而通过稀疏表示方法进行识别。Wright 和 Yang 将稀疏识别算法应用到人脸识别中^[21],殷飞等人将其应用到遥感图像目标识别中^[22]。本文采用基于稀疏识别的方法来解决遥感图像子区域地物类型分类问题,以提高分类精度。

综上所述,针对高分辨率图像块地物类型单一的特点,通过基于辐射特征的稀疏识别算法对地物类型进行分类,并根据不同类别自适应选取适合的增强参数,对高分辨率遥感图像进行自适应增强,以增加控制点的数目并提高其匹配准确率。通过与已有的特征提取方法以及识别方法对比,本文方法不仅具有较高的识别率,而且在小样本情况下也较有效。另外,针对高分辨率遥感图像,相比于已有的增强算法,自适应 Wallis 增强算法有效防止了过增强和过饱和等问题。在此基础之上,可以提取出数目更多、准确率更高的控制点信息。

1 基于 Wallis 增强的两级匹配策略

成像图幅越来越大,是目前遥感成像发展的趋势之一,也由此带来了一系列问题。对遥感图像进行几何精度评价时,通常需将该图像所对应的多幅参考图像镶嵌成一幅参考图像。参考图像往往由不同光谱、不同时相、不同分辨率或不同传感器所拍摄的遥感图像组成,使得多幅参考图像镶嵌而成的参考图像呈现多源化的特点。因此,如何在卫星图像和多源参考图像(如图1)之间精确提取分布均匀的控制点信息,成为卫星图像几何精度评价的一个技术难点。同时,由于多源化参考图像的灰度信息存在较大差异,所以传统基于灰度提取控制点技术已经不适用于解决现有问题。

文献[9]给出的基于 Wallis 增强的两级匹配策略(粗匹配与精匹配相结合),可以完成提取控制点信息的任务,具体步骤如下:

1)粗匹配提取初始控制点对,即通过 SURF 算

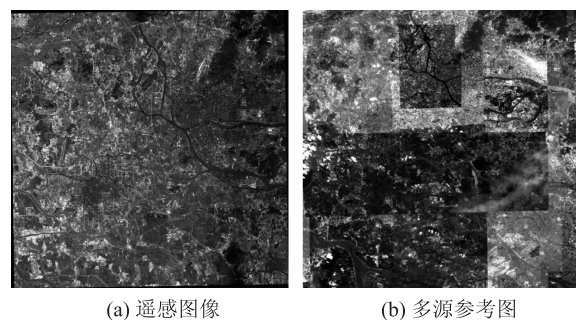


图1 遥感图像及相应参考图像

Fig. 1 Remote sensing image and its reference image

法提取控制点,并根据 M 估计^[23-25]和随机抽样一致性算法^[26-29]估计对极几何约束模型^[30-31]剔除误匹配点对。

2)根据初始控制点对,构建遥感图像和其多源参考图像之间的几何关系,并对遥感图像进行几何关系补偿。

3)通过传统 Wallis 滤波增强图像纹理。

4)精匹配提取控制点对。

以大小为 400×400 、空间分辨率为 30 m 的 HJ-1-A、B 星在轨图像块(如图2(a)所示)为例,该在轨图像块覆盖区域的实际面积为 $12\,000\text{ m} \times 12\,000\text{ m}$,包含的信息量高、地物类型和纹理复杂,Wallis 滤波可以有效增强低分辨率遥感图像的纹理(如图2(b)所示)。然而,对于同样大小为 400×400 、空间分辨率为 2.1 m 的资源三号图像块(如图3(a)所示),覆盖区域的实际面积仅为 $840\text{ m} \times 840\text{ m}$,仅是 HJ-1-A、B 星覆盖区域的 $1/14^2$ ($14 \approx 12\,000\text{ m}/840\text{ m}$)。该图像块所包含的地物类型相对单一,对应城市区域的图像块纹理复杂,对应山区、湖泊和农田的图像块纹理相对简单。若仍采用传统的基于全局统一参数的 Wallis 滤波进行增强,会产生过增强和过饱和等问题(如图3中红色标记部分)。由于传统 Wallis

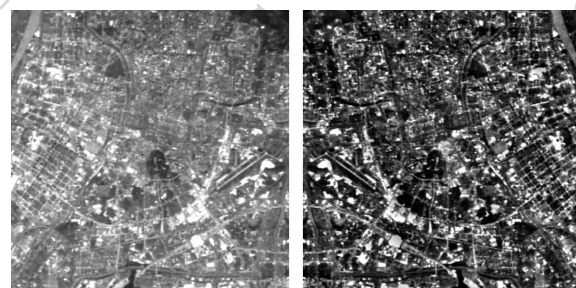


图2 低分辨率图像的 Wallis 增强对比图

Fig. 2 Comparison of Wallis enhancement on low resolution image

滤波不能有效地增强高分辨率图像纹理模式,根据子区域地区类型单一性的特点,提出基于自适应 Wallis 增强的两级匹配策略。



(a) 资源三号卫星图像 (b) Wallis增强图

图3 高分辨率图像的 Wallis 增强对比图

Fig.3 Comparison of Wallis enhancement on high resolution image

2 基于稀疏识别的自适应 Wallis 增强

由以上讨论可知,针对高分辨率图像提取控制点信息时,基于全局统一参数的 Wallis 滤波会产生

过增强和过饱和等问题,导致精匹配提取的控制点信息的数量和准确率都有待提高。提出基于自适应 Wallis 增强的两级匹配策略,算法流程如图4所示,具体步骤如下:

1)粗匹配。对在轨卫星图像进行下采样,根据粗匹配提取的初始控制点信息对在轨卫星图像进行几何关系补偿。

2)基于稀疏识别的自适应 Wallis 增强:

(1)将几何补偿后的高分辨率在轨图像和相应的多源参考图切分为规则的遥感图像子区域图像块;

(2)计算图像子区域的辐射质量参数,构建分类特征;

(3)通过稀疏识别算法对图像子区域进行地物类型分类;

(4)根据图像子区域所属类别,自适应选择相应的参数进行 Wallis 增强,从而实现整幅图像的自适应增强。

3)精匹配。针对自适应增强后的遥感图像子区域提取控制点信息并剔除误匹配点,得到最终的控制点信息。

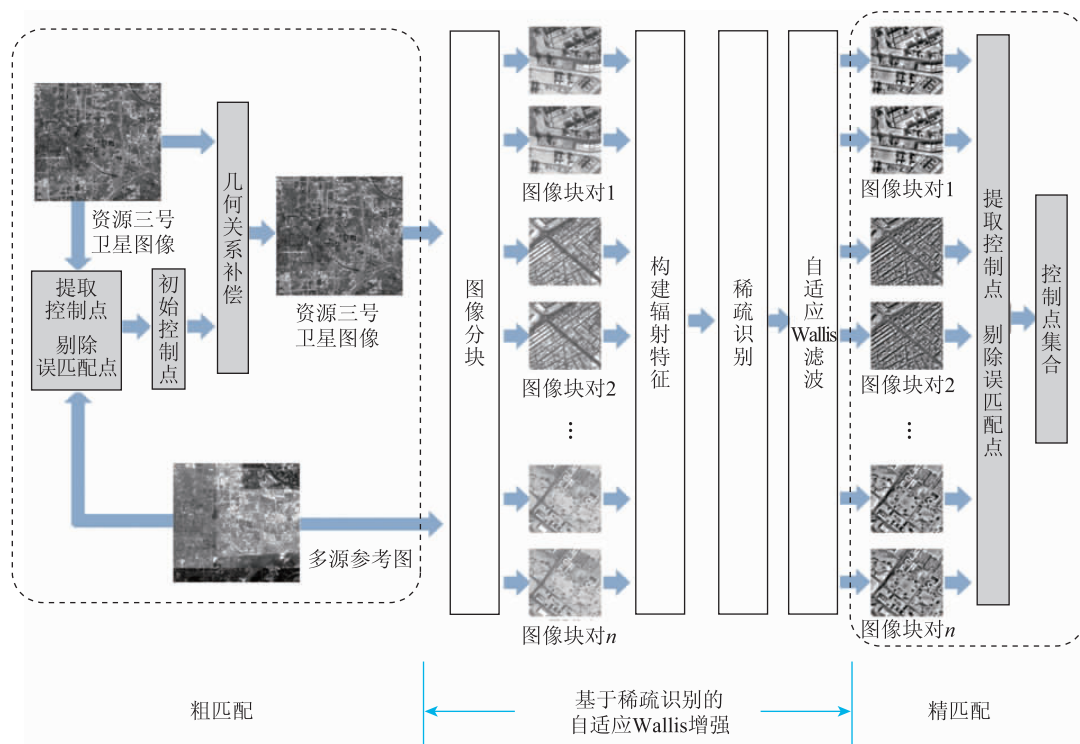


图4 基于自适应 Wallis 增强的两级匹配策略

Fig.4 Two level matching based on adaptive Wallis enhancement

2.1 基于辐射质量参数的分类特征

以分辨率为 2.1 m、迪拜地区和云南大理地区

的资源三号卫星在轨遥感图像为例,将高分辨率在轨遥感图像切分为大小为 400×400 、规则的遥感图

像子区域,并将遥感图像子区域划分为6类:

1) 海洋与湖泊。该类图像块包含了较多水域,如图5(a)所示。

2) 山区。我国山区面积占总国土面积的69.1%,因此将包含山区的图像块分为一类,如图5(b)所示。

3) 低密度建设区。该类图像块包含少量的建筑区域,其他大部分区域为山区或陆地,如图5(c)所示。

所示。

4) 中密度建设区。该类图像块主要为城镇中建筑密度相对稀疏的区域,如图5(d)所示。

5) 高密度建设区。该类图像块主要为城镇中建筑集中区域,如图5(e)所示。

6) 其他类。将计算每个子区域的辐射质量参数,并排成一个12维的列向量 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{12}$ 作为该子区域的分类特征,以此构建训练集和测试集。

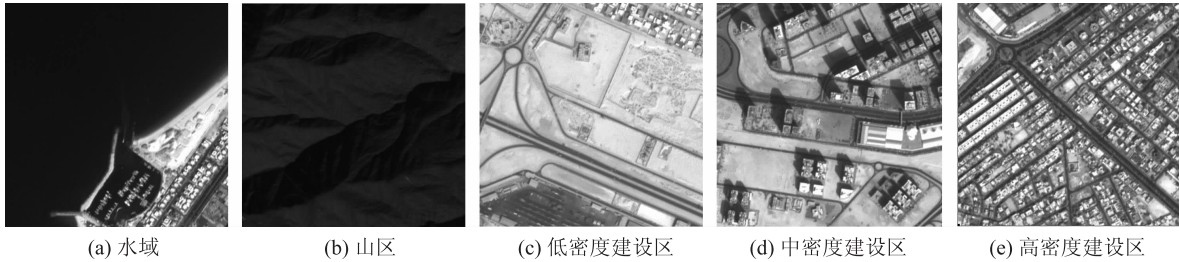


图5 资源三号卫星图像

Fig.5 ZY-3 images

针对遥感图像特征向量提取,目前主要的研究热点主要集中在主成分分析和独立成分分析等基于灰度的方法。虽然该类方法的分类精度有不少改进,但由于无法摆脱基于灰度信息的局限性,所以分类精度一直没有得到根本性提高。针对高信息量和纹理高度复杂的遥感图像,选取列信噪比、细节能量、灰度均值、边缘能量、广义噪声、陡度、角二阶矩、灰度方差、信息熵、清晰度、对比度和信噪比这12个辐射质量参数构建图像分类特征。以上12个辐射质量参数从空域和频域两个方面描述了遥感图像的细节和边缘特征^[3],反映了纹理的粗细和方向性的特征。图像纹理和边缘等统计结构信息,是子区域地物类型分类的主要依据。但是,由于纹理信息和图像噪声均属于高频信息,若仅考虑纹理信息,噪声也有可能被误认为纹理,影响分类。因此,将信噪比、广义噪声,列信噪比与其与辐射质量参数一起作为子区域的分类特征,以提高子区域地物类型的识别率。

2.2 基于稀疏识别的子区域地物类型分类

相比较于传统的分类算法(如最近邻分类器),稀疏识别算法具有更高的识别性能和更好的鲁棒性。子区域地物类型分类,即从训练集中选出数目较少的、权重较大的部分对测试样本进行表出,这样就避免了欠拟合和过拟合等问题。另外,该表出向量是稀疏的,体现了训练集类间差别,即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_0 &= \arg \min \|\mathbf{x}\|_0 \\ \text{s. t. } \mathbf{x} &= \mathbf{X} \cdot \mathbf{r} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为测试样本; $\mathbf{r}$ 为稀疏表出向量,即识别向量; $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_{1,1}, \dots, \mathbf{x}_{1,n}, \dots, \mathbf{x}_{m,1}, \dots, \mathbf{x}_{m,n}] \in \mathbf{R}^{12mn}$ 为训练样本矩阵, $\mathbf{x}_{i,j}$ 表示第 i 类的第 j 个训练样本; m 表示样本类别数; n 表示每类样本数目; $\hat{\mathbf{x}}_0$ 为式(1)的最优解。

式(1)是一个 NP 难问题,无法在多项式复杂度时间内求解。幸运的是,近几年兴起的压缩感知理论给出如下结论^[32]:如果式(1)的最稀疏解 $\hat{\mathbf{x}}_0$ 充分稀疏,那么它就等于 l_1 范数最小解,即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_0 &= \arg \min \|\mathbf{x}\|_{l_1} \\ \text{s. t. } \mathbf{x} &= \mathbf{X} \cdot \mathbf{r} \end{aligned} \quad (2)$$

该问题是一个凸优化问题,存在有效的求解方法。通过基追踪(BP)算法^[33-34]求解 l_1 范数,该方法比较稳定,并且具有较好的鲁棒性。BP 算法通过最小化 l_1 范数将稀疏表出问题定义为一类有约束的极值问题,进而转化为线性规划问题进行求解,即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_0 &= \arg \min \|\mathbf{x}\|_{l_1} \\ \text{s. t. } \mathbf{x} &= \sum x_{i,j} \sum r_{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 自适应 Wallis 增强

Wallis 滤波器能够将图像的灰度均值和方差(即图像的动态范围)映射到给定的灰度均值和方差灰度。它使在图像不同位置处的灰度方差和灰度均值都具有近似相等的数值,即实现图像反差较小区域的纹理增强,同时有效减小图像反差较大区域

的灰度差异,使得图像灰度的微小变化信息得到明显的反应。Wallis 滤波能降低误匹配概率,并减小匹配的不确定性,从而增强了图像匹配的可靠性和准确率。Wallis 滤波处理后的图像在视觉效果上与噪声图像类似,但对其进行特征提取或立体匹配,其应用效果往往能达到非常理想的水平。Wallis 滤波器的一般形式可以表示为

$$g_c(x,y) = g(x,y)r_1 + r_0 \quad (4)$$

式中, $g(x,y)$ 为原图像 (x,y) 处像素的灰度值; $g_c(x,y)$ 为增强后图像在 (x,y) 处像素的灰度值;

$r_1 = \frac{cs_f}{cs_g + \frac{s_f}{c}}$ 为乘性系数; $r_0 = bm_f + (1-b)m_g$ 为加

性系数; m_g 和 s_g 分别为某一像素的邻域窗口灰度均值和方差; m_f 和 s_f 分别为图像均值和方差的目标值,方差应随着邻域窗口的减小而减小; c 为图像反差扩展常数,取值范围为 $[0,1]$,该系数应随着处理窗口的增大而增大; b 为图像亮度系数。由式(4)可知,乘性系数 r_1 决定着该 Wallis 滤波器的性能,它与图像及其他参数的关系可描述为

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{c^2} + \frac{s_g}{s_f} \quad (5)$$

本文的核心思路在于:利用 Wallis 滤波器的优势,采用不同大小的处理窗口对图像中不同纹理模式进行增强。对于纹理丰富的地区,如城市,应选用较小的邻域窗口,对应较小的目标方差和反差扩展常数;而对于纹理相对简单的地区,如湖泊、山区和农田,应选用较大的邻域窗口,对应较大的目标方差和反差扩展常数,见表 1。实验结果表明,对于包含复杂地物类型的大区域遥感图像,采用不同尺度的邻域窗口以及相应参数进行增强,不仅可以有效防止过增强和过饱和等问题,而且能够达到更好的增强效果,从而增加控制点提取数目和匹配准确率。

表 1 子区域的 Wallis 滤波参数

Table 1 Parameters of Wallis filter for sub-region terrains

子区域类型	邻域窗口	目标方差	反差扩展常数
水域	33 × 33	139	0.9
山区	31 × 31	135	0.87
低密度建设区	25 × 25	131	0.85
中密度建设区	21 × 21	127	0.83
高密度建设区	17 × 17	121	0.8

3 实验结果与分析

针对高分辨率遥感图像,根据子区域的辐射质量参数构建其分类特征,并通过稀疏识别算法对子区域图像块进行地物类型分类。然后,针对不同类型子区域设置相应的 Wallis 滤波参数,实现自适应滤波,从而提高了控制点提取数目和匹配准确率。

3.1 遥感图像地物类型分类精度

从资源三号在轨图像中选取的湖泊海洋、山区、低密度建设区、中密度建设区和高密度建设区,共五大类典型地物区域构成训练集和测试集。其中,每个类别中包含 40 个样本,随机抽取 30 个作训练样本,剩余的 10 个样本作为测试样本;每次实验针对随机选取的训练集和测试集,进行 100 次识别,并计算识别率均值和标准差作为该次识别的结果。为验证本文方法的有效性和高效性,实验分为如下 3 部分:

1) 针对不同的图像子区域特征表达方式,讨论不同分类策略下的子区域分类效果。根据识别率均值和标准差,选择最合适的子区域特征表达方式和精度最高的分类策略。其中,特征表达方式选择以下 3 种:原始子区域灰度信息、基于 PCA 的主成分特征以及辐射特征。分类策略选择以下两种:最近邻分类器和稀疏识别算法。

图 6 和图 7 分别给出了最近邻分类器和稀疏识别算法下不同特征的识别率,其中,实线给出了不同特征维数下识别率均值的变化情况,垂直虚线给出了某特征维数下识别率标准差,标准差衡量了识别效果的稳定程度。实验结果表明,当分类策略选取最近邻分类器,特征向量选取灰度信息和主成分时,子区域地物类型的识别率仅介于 70% 到 80%,识别率低;而特征向量选取辐射参数时,识别率均在 80% 以上,最高可达到 95%,如图 6 所示。当选取稀疏识别算法时,基于灰度信息的识别率仅有 37%;随着图像主成分维数的增加识别率逐步提高,但当主成分维数大于 20 时,识别率稳定在 86% 左右;然而,基于辐射特征的识别率最高达到了 99.64%,同时识别率标准差也明显低于前两种特征,如图 7 所示。从而,实验验证了使用辐射参数作为子区域地物类型的分类特征是有效的,使用稀疏识别算法可以达到高精度的分类。

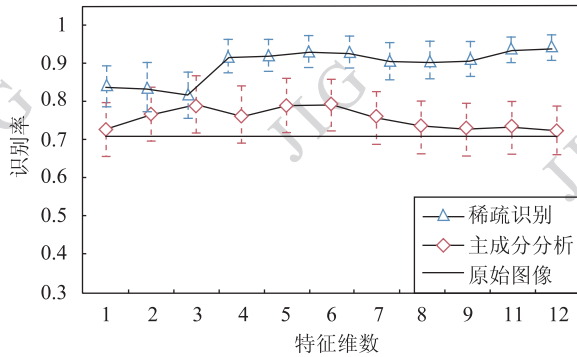


图6 基于最近邻分类器的识别率

Fig. 6 Recognition rate of nearest neighbor classifier

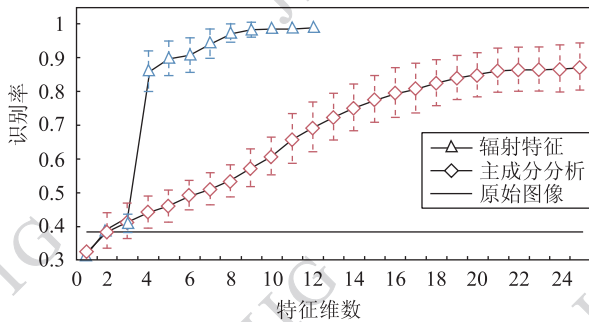


图7 基于稀疏识别的识别率

Fig. 7 Recognition rate of sparse recognition

2) 讨论辐射参数的重要性排序。针对 12 个辐射参数(RP), 根据逐个排除后的误识率对该组参数进行重要性排序。误识率越高, 说明该参数越重要。例如, 基于不含列信噪比的辐射参数集合(RP_A)的稀疏识别率为 98.64%, 则误识率为 1.36%, 误识率最高, 所以相比于其他辐射参数, 列信噪比对分类结果影响最大, 即最重要。实验结果表明(如图 8), 辐射特征的重要性顺序依次为列信噪比、细节能量、灰度均值、边缘能量、广义噪声、陡度、角二阶矩、灰度方差、信息熵、清晰度和对比度。和信噪比。

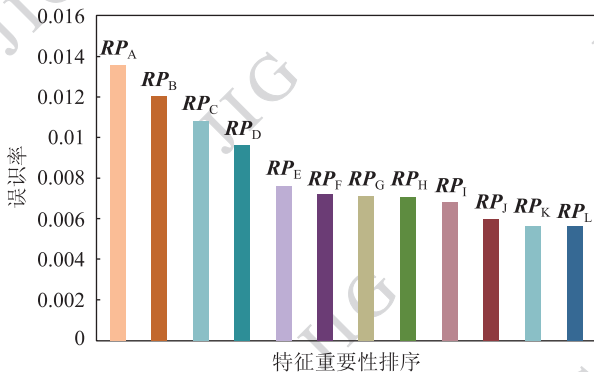


图8 辐射特征重要性排序

Fig. 8 Order of radiation-features

3) 针对辐射特征, 讨论其在不同分类策略(最近邻分类器和稀疏识别算法)下的鲁棒性。

由图 9 可知, 随着训练样本数目的增加, 稀疏识别算法和最近邻分类器的识别率都有所提高, 均具有较好的鲁棒性。当训练样本介于 20~30 时, 稀疏识别算法的识别率仍旧稳步提高, 最近邻分类器的识别率略微下降后又升高。同时, 当训练样本数目大于 10 时, 稀疏识别算法的识别率均值明显高于最近邻分类器, 且识别率标准差明显小于最近邻分类器。因此, 相比于传统识别策略, 稀疏识别算法不仅具有较高的分类精度, 而且具有更好的算法鲁棒性。

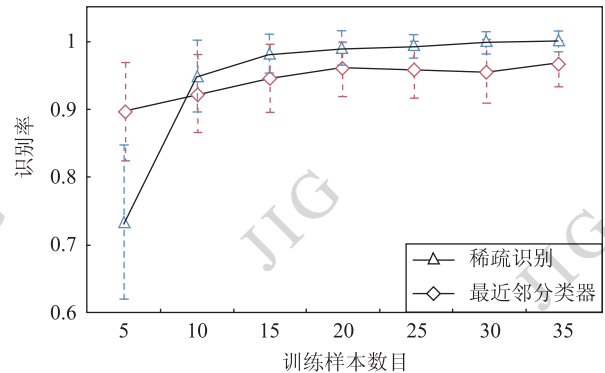


图9 基于辐射质量特征的识别率

Fig. 9 Recognition rate based on radiate-parameter

综上所述, 选择辐射参数作为地物类型的分类特征是有有效的, 选择稀疏识别算法作为分类策略可以得到较高的识别率, 并且具有较好的鲁棒性。

3.2 自适应 Wallis 增强效果

选择高精度的资源三号卫星正视影像作为实验数据, 采用传统 Wallis 滤波和自适应 Wallis 滤波进行纹理增强。为验证本文方法的有效性和高效性, 实验分为以下两部分:

1) 针对不同的子区域地物类型, 分别采用传统 Wallis 滤波和自适应 Wallis 滤波进行纹理增强, 验证自适应 Wallis 滤波的增强效果。

图 10 和图 11 给出海洋区域和城市区域的单尺度增强和自适应增强的效果对比图。实验结果表明, 对于包含信息量少、纹理不丰富区域, 使用大尺度的邻域窗口、较大目标方差和方差扩展常数, 也会产生过增强和饱和现象, 不能有效地增强图像纹理, 如图 10(b) 所示。同时, 由于水域和山区纹理简单, 图像灰度值和动态范围小, 采用自适应 Wallis 滤波进行增强时, 个别小区域也会产生像素饱和现象。

但是,相比于传统 Wallis 滤波,本文方法有效降低了过增强和饱和像素的数目,如图 10(c) 所示。相反,对于包含信息量高、纹理丰富区域,使用大尺度的邻域窗口、较大的目标方差和反差扩展常数,也会产生过增强和饱和现象,如图 11(b) 所示。同时,对于纹理丰富、动态范围大的城镇区域,本文方法可以有效防止过增强和饱和现象,如图 11(c) 所示。因此,针对不同的地物类型区域采用不同参数进行增强,可以有效防止基于全局统一参数的 Wallis 增强产生的过增强和过饱和现象,达到更好的增强效果。

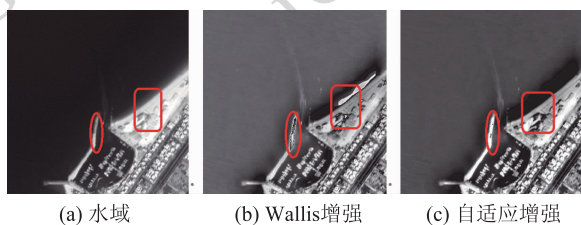


图 10 水域增强效果对比图

Fig. 10 Comparison of enhancement in water-region

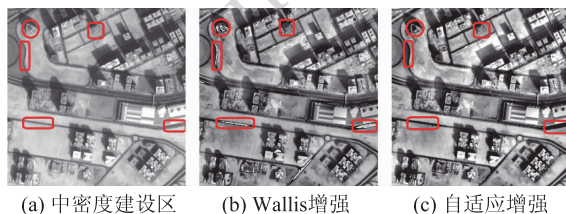


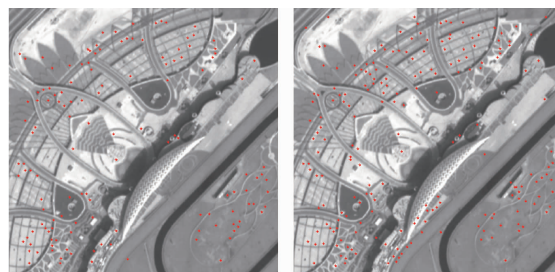
图 11 中密度建设区增强效果对比图

Fig. 11 Comparison of enhancement in middle-density region

2) 选取资源三号卫星正射影像中大小为 400×400 的子区域,分别采用传统 Wallis 滤波和自适应 Wallis 滤波进行纹理增强。针对增强后的子区域图像,采用第 2 节中的基于自适应 Wallis 增强的两级匹配策略提取控制点信息。对比不同增强方法处理后的图像,控制点提取数量和正确率的差异,验证自适应 Wallis 滤波的增强效果。

针对传统 Wallis 增强和自适应 Wallis 增强两种增强方法,图 12 给出了中密度建设区控制点提取效果对比图,图 13 给出了山区控制点提取效果对比图。

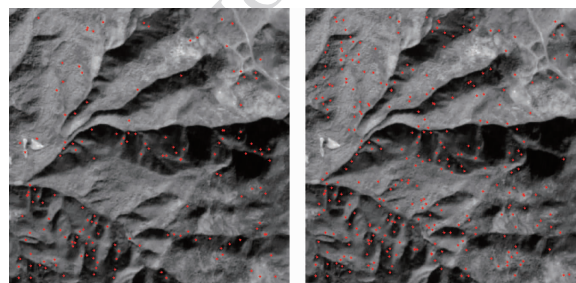
实验结果表明,通过传统 Wallis 增强后的图像,中密度建设区可以提取出 136 个控制点对,山区可以提取出 162 个控制点对。通过本文方法增强后的图像,分别可以提取出 202 个控制点对和 310 个控制点对,总的控制点对数目增加了约 48% 和 91%,



(a) Wallis 增强 (b) 自适应 Wallis 增强

图 12 中密度建设区控制点提取对比图

Fig. 12 Comparison of control points extraction and match for middle-density region



(a) Wallis 增强 (b) 自适应 Wallis 增强

图 13 山区控制点提取对比图

Fig. 13 Comparison of control points extraction and match for mountain region

见表 2。因此,相比于传统的 Wallis 滤波,通过本文方法增强后的子区域图像可以提取出更多的控制点。

由于本文的实验数据为资源三号卫星的真实遥感数据,因此,对于提取出来的控制点对,采用专家判读的方式(遥感图像评价专家对照资源三号卫星在轨卫星图像与多源参考图像,逐点检验控制点对是否正确)验证控制点是否正确。实验表明,针对中密度建设区和山区两种子区域,通过传统 Wallis 滤波增强后的图像,控制点对的正确率分别为 91.91% 和 91.36%;然而,通过自适应 Wallis 滤波增强后的图像,控制点对的正确率分别为 98.02% 和 97.42%,见表 2。因此,相比于传统的 Wallis 滤波,使用本文方法后,控制点对的正确率提高了约 6%,即本文方法可以提取出更多的正确的控制点。

实验结果表明,由于本文方法有效防止了传统 Wallis 增强产生的过增强和过饱和现象,更有效地增强了遥感图像的纹理,因此,自适应 Wallis 滤波有效增加了控制点的获取数目和匹配准确率。

表 2 提取控制点结果比较

Table 2 Comparison of control points extraction and match

增强方法	控制点数目		正确控制点数目		控制点正确率/%	
	中密度建设区	山区	中密度建设区	山区	中密度建设区	山区
传统 Wallis 增强	136	162	125	148	91.91	91.36
自适应 Wallis 增强	202	310	198	302	98.02	97.42

4 结 论

自动化提取控制点是遥感几何精度评价的关键技术,其精度直接影响了几何精度评价的精度,其数目和均匀性决定了几何精度评价的可靠性。自动化提取控制点的核心问题是图像预处理和控制点匹配策略,两者共同决定了控制点提取的数目和准确率。针对高分辨率图像的特点,通过辐射质量参数构建图像的分类特征,并采用稀疏识别算法实现对遥感图像子区域地物类型的分类。然后,针对不同地物类型子区域设置相应的 Wallis 增强参数,从而实现了整幅图像的自适应增强。针对资源三号遥感图像的大量实验表明,本文方法可以有效地改善控制点的获取数目和匹配准确率。从而,可以更有效地自动提取均匀分布的高准确率控制点信息,提高遥感图像几何精度评价的精确度和准确性。最后需要指出,Wallis 滤波参数为经验值,并通过自适应滤波提取控制点,通过本文方法增强后的图像可以提取出数目更多和准确率更高的控制点信息。而当使用其他控制点提取方法时,不宜通过本文方法来提高控制点数目和准确率。

参考文献 (References)

- [1] The Research and Application of Environment and Disaster Monitoring Satellite [G]. Beijing: China Centre for Resources Satellite Data and Application, 2008. [中国资源卫星应用中心. 环境与灾难监测预报小卫星星座 A、B(HJ-1-A、B)应用研究文集[G]. 北京:中国资源卫星应用中心,2008.]
- [2] Chen J, Wang W, Li Z Y. LANDSAT-5 TM data radiometric correction and geospatial positioning accuracy [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(6): 1094-1100. [陈俊, 王文, 李子杨. Landsat-5 TM 数据的辐射校正与几何定位精度[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(6): 1094-1100.]
- [3] On-orbit Performance Assessment of Environment and Disaster Monitoring Satellite. [G]. Beijing: China Centre for Resources Satellite Data and Application, 2008. [中国资源卫星应用中心环境与灾难监测预报小卫星星座 A、B(HJ-1-A、B)在轨测试报告[G]. 北京:中国资源卫星应用中心,2008.]
- [4] He H Q, Huang S X. Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(7): 853-857. [何海清, 黄声享. 改进的 Harris 亚像素角点快速定位[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 853-857.]
- [5] Chen M, Xiang N P, Luo W. A multi-scale feature point detector [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2010, 27(5): 357-360. [陈敏, 向南平, 罗畏. 一种多尺度特征点探测算子[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(5): 357-360.]
- [6] Wang S H, You H J, Fu K. An automatic method for finding matches in SAR images based on coarser scale bilateral filtering SIFT [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 287-293. [王山虎, 尤红建, 付琨. 基于大尺度双边 SIFT 的 SAR 图像同名点自动提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 287-293.]
- [7] Bay H, Tuytelaars T, Gool LV. Surf: speeded up robust features [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision, Graz, Austria: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [8] Lan L, Li G H, Tian H, et al. Windowed intensity difference histogram descriptor and its application to improving SURF algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1042-1048. [廉茜, 李国辉, 田昊, 等. 加窗灰度差直方图描述子及其对 SURF 算法的改进[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1042-1048.]
- [9] Geng L L, Lin J, Long X X, et al. Research on feature matching algorithm for ZY-3 image [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 93-99. [耿蕾蕾, 林军, 龙小祥, 等. “资源三号”影像特征匹配方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 93-99.]
- [10] Liu X C, Yu Q F, Lei Z H. Researches into gray value transform to improve scene matching robustness [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 48-52. [刘晓春, 于起峰, 雷志辉. 增强景象匹配鲁棒性的灰度变换技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 48-52.]
- [11] Zhang L, Zhang Z X, Zhang J Q. The image matching based on wallis filtering [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1999, 1(24): 24-35. [张力, 张祖勋, 张剑清. Wallis 滤波在影像匹配中的应用[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 1(24): 24-35.]

- [12] Li D R. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3):317-322. [李德仁. 我国第一个民用三线阵立体测绘卫星-资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3):317-322.]
- [13] Lin T, Gao G M, Liu R X, et al. Comparison between ETM+ and ASTER data for extraction of alteration information [J]. *Remote Sensing Information*, 2011, 1:65-69. [林腾, 高光明, 刘容秀, 等. ETM+ 和 ASTER 数据在遥感信息提取中的对比研究[J]. 遥感应用, 2011, 1:65-69.]
- [14] Su L H, Yi T S, Wan J W. Compression of hyperspectral image based on independent component analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5):973-976. [苏令华, 衣同胜, 万建伟. 基于独立分量分析的高光谱图像压缩[J]. 光子学报, 2008, 37(5):973-976.]
- [15] Tong X H, Zhang X, Liu M L. Urban land use change detection based on high accuracy classification of multispectral remote sensing imagery [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(8):2131-2135. [童小华, 张学, 刘妙龙. 基于多光谱遥感影像分类的城镇用地变化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8):2131-2135.]
- [16] Hua Y, Zhang T, Xi H W, et al. Research on method of hyperspectral remote sensing image classification based on decision tree [J]. *Computer Technology and Development*, 2012, 22(6):198-202. [华晔, 张涛, 奚后玮, 等. 基于决策树的高光谱遥感影像分类方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(6):198-202.]
- [17] Li X C. A remote-sense image classification technology based on SVM [J]. *Communications Technology*, 2009, 42(8):115-117. [李雪婵. 一种基于 SVM 的遥感影像分类技术[J]. 通信技术, 2009, 42(8):115-117.]
- [18] Wang G F. Research on methods of computer classification to remote sensing image [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37(10):39-41. [王国芳. 遥感图像计算机分类方法的研究[J]. 山西农业科学, 2009, 37(10):39-41.]
- [19] Yang A Y, Wright J, Ma Y, et al. Feature selection in face recognition: a sparse representation perspective [J]. *Manuscript Submitted to IEEE Trans. PAMI*, 2007, 8:1-17.
- [20] Kroeker K. Face recognition: breakthrough [J]. *Communications of the ACM*, 2009, 52(8):18-19.
- [21] Wright J, Yang A Y, Ganesh A, et al. Robust Face Recognition via Sparse Representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(2):210-227.
- [22] Yin F, Jiao L C. Robust remote sensing image target recognition based on extending training set by rotation and sparse representation [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2012, 25(1):89-95. [殷飞, 焦李成. 基于旋转扩展和稀疏表示的鲁棒遥感图像目标识别[J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(1):89-95.]
- [23] Wang X, Zhang M M, Yu X, et al. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9):2068-2077. [王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9):2068-2077.]
- [24] Chen C F, Cheng L, Yue T X. DEM accuracy assessment based on M-estimation [J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(7):50-54. [陈传法, 程垒, 岳天祥. 基于 M 估计的 DEM 精度评价[J]. 科技导报, 2011, 29(7):50-54.]
- [25] Menard C, Leonardi A. Stereo matching using M-estimators [C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. Kiel, Germany: Springer, 1997:305-312.
- [26] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [C]//*Communication of the ACM*. New York, USA: ACM, 1981, 24(6):381-395.
- [27] Dong M L, Wang Z H, Zhu L Q, et al. Stereo vision image matching based on RANSAC algorithm [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(4):452-457. [董明利, 王振华, 祝连庆, 等. 基于 RANSAC 算法的立体视觉图像匹配方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(4):452-457.]
- [28] Liu X B, Zou B J. A RANSAC-based cylindrical image registration algorithm [J]. *Journal of Hunan University*, 2010, 37(8):79-82. [刘相滨, 邹北骥. 一种基于 RANSAC 的柱面图像配准算法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(8):79-82.]
- [29] Chen F X, Wang R S. Fast RANSAC with preview model parameters evaluation [J]. *Journal of Software*, 2005, 16(8):1431-1437. [陈付幸, 王润生. 基于预检验的快速随机抽样一致性算法[J]. 软件学报, 2005, 16(8):1431-1437.]
- [30] Zhang X T, Si B, Wang H. A method to improve SIFT's correct rate based on constraints of epipolar geometry [J]. *Aero Weaponry*, 2012, 1(3):37-40. [张喜涛, 司斌, 王晖. 利用对极几何约束的方法提 SIFT 算法的正确率[J]. 航空兵器, 2012, 1(3):37-40.]
- [31] Yang M, Shen C L. Study on scene matching based on epipolar geometric constraint [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(2):235-239. [杨敏, 沈春林. 基于对极几何约束的景象匹配研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2):235-239.]
- [32] Donoho D L. For most large underdetermined systems of linear equations the minimal l_1 -Norm solution is also the sparsest solution [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(6):797-829.
- [33] Baraniuk R. A lecture on compressed sensing [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4):118-124.
- [34] Candès E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Inf. Theory*, 2006, 52:489-509.