

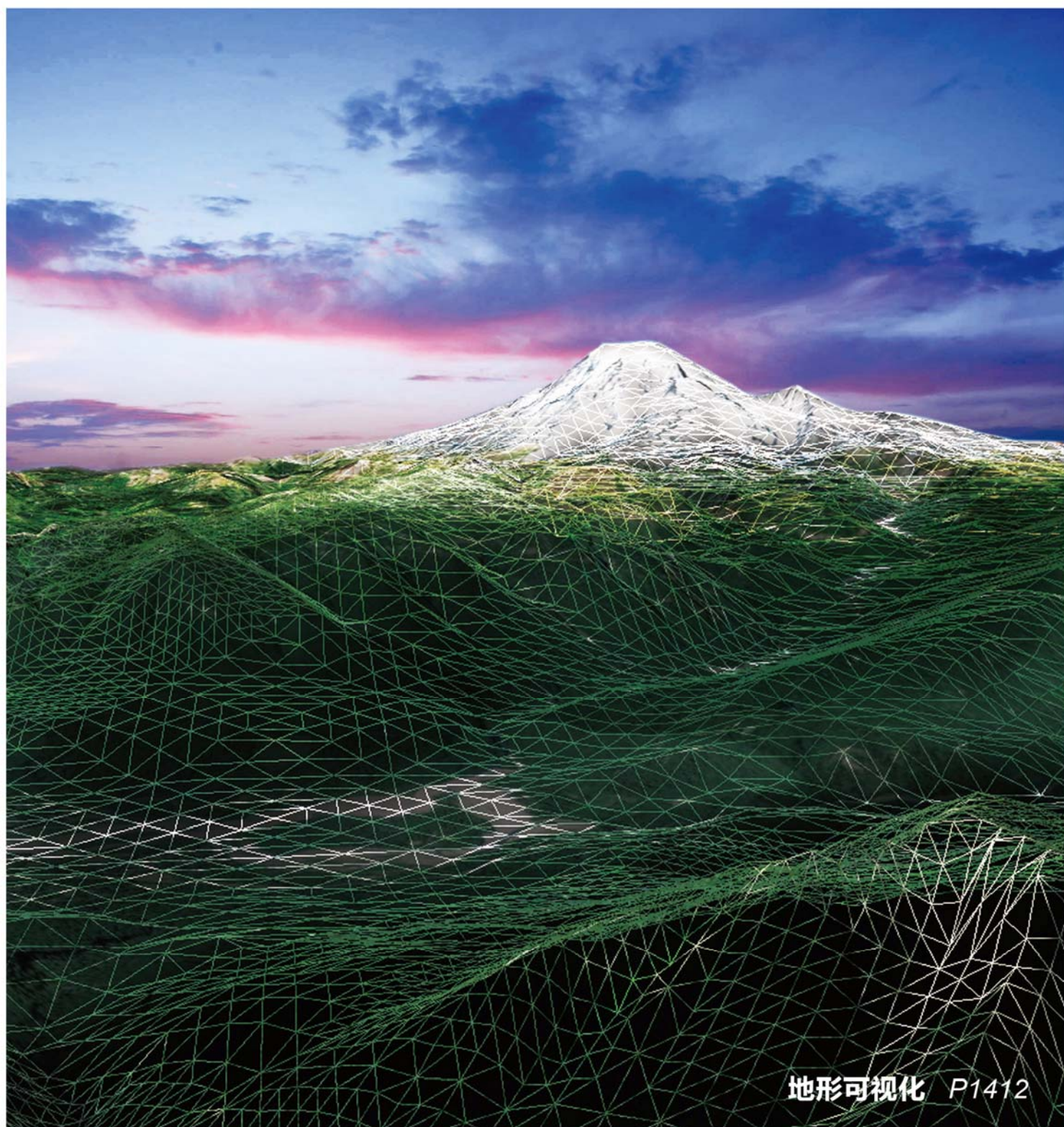


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
10
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



地形可视化 P1412



第20卷第10期（总第234期）

2015年10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
中文核心期刊

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@radi.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@radi.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.

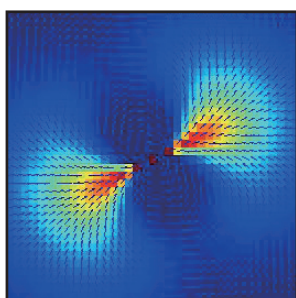
CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元



JPEG图像双重压缩偏移量估计的篡改区域自动检测定位(第1304页)



基于表情传输的交互式照片编辑(第1366页)



结合张量投票和Snakes模型的SAR图像道路提取(第1403页)

图像处理和编码

基于模式特征的H.264/AVC可逆视频水印

李淑芝, 张翔, 邓小鸿, 吴晓燕1285

二阶总广义变分小波修复模型

许建楼, 郝岩, 张翼1297

JPEG图像双重压缩偏移量估计的篡改区域自动检测定位

赵洁, 郭继昌, 张艳, 张众维1304

图像分析和识别

基于非对称局部梯度编码的人脸表情识别

胡敏, 程轶红, 王晓华, 任福继, 许良凤, 黄晓音1313

采用积分图块间距离检测图像边缘

贾迪, 孟琢, 孙劲光, 李思慧, 赵明远1322

自适应属性加权2维FCM分割算法

侯晓凡, 吴成茂1331

利用层间相关性的岩心CT图像半自动分割方法

徐永进, 滕奇志, 吴晓红, 卿粲波1340

图像理解和计算机视觉

在线特征选取的多示例学习目标跟踪

周志宇, 彭小龙, 吴迪冲, 朱泽飞1346

融合外观和运动特征的在线目标分割

张雷, 李成龙, 汤进, 高思晗1358

基于RGB-D深度相机的室内场景重建

梅峰, 刘京, 李淳芃, 王兆其1366

计算机图形学

带平台伸缩函数的参数曲线变形

张莉, 余慧芳, 檀结庆1374

视景建模中树木纹理图像的随机变形网格方法

施冠羽, 欧阳清1384

基于表情传输的交互式照片编辑

刘锦云, 彭宏京1390

遥感图像处理

结合张量投票和Snakes模型的SAR图像道路提取

符喜优, 张风丽, 王国军, 邵芸1403

GPU Tessellation全球地形可视化方法

李尚林, 郑利平, 张迎凯, 李琳1412

CONTENTS

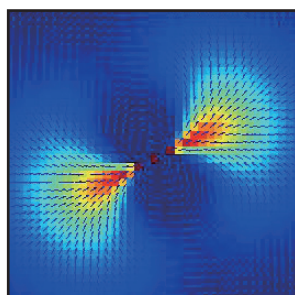
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Automatic detection and localization of image forgery regions based on offset estimation of double JPEG compression (P1304)



Interactive photo editing based on expression transmission (P1366)



Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model(P1403)

Image Processing and Coding

- Reversible video watermarking algorithm for H.264/AVC based on mode feature
Li Shuzhi, Zhang Xiang, Deng Xiaohong, Wu Xiaoyan 1285
- Second order total generalized variational model for wavelet inpainting
Xu Jianlou, Hao Yan, Zhang Ji 1297
- Automatic detection and localization of image forgery regions based on offset estimation of double JPEG compression
Zhao Jie, Guo Jichang, Zhang Yan, Zhang Zhongwei 1304

Image Analysis and Recognition

- Facial expression recognition based on asymmetric region local gradient coding
Hu Min, Cheng Yihong, Wang Xiaohua, Ren Fuji, Xu Liangfeng, Huang Xiaoyin 1313
- Edge detection method of block distance combining with summed area table
Jia Di, Meng Lu, Sun Jinguang, Li Sihui, Zhao Mingyuan 1322
- Adaptive weighted two-dimensional histogram FCM segmentation algorithm
Hou Xiaofan, Wu Chengmao 1331
- Semi-segmentation of rock CT images using the correlation of adjacent frames
Xu Yongjin, Teng Qizhi, Wu Xiaohong, Qing Linbo 1340

Image Understanding and Computer Vision

- Object tracking based on multiple instance learning with online feature selection
Zhou Zhiyu, Peng Xiaolong, Wu Dichong, Zhu Zefei 1346
- Online object segmentation via fusing appearance and motion features
Zhang Lei, Li Chenglong, Tang Jin, Gao Sihan 1358
- Improved RGB-D camera based indoor scene reconstruction
Mei Feng, Liu Jing, Li Chunpeng, Wang Zhaoqi 1366

Computer Graphics

- Deformation of parametric curves based on platform extension function
Zhang Li, Yu Huifang, Tan Jieqing 1374
- Method of random transmogrification mesh for tree texture images in scene modeling
Shi Guanyu, Ouyang Qing 1384
- Interactive photo editing based on expression transmission
Liu Jinyun, Peng Hongjin 1390

Remote Sensing Image Processing

- Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model
Fu Xiyu, Zhang Fengli, Wang Guojun, Shao Yun 1403
- GPU Tessellation method of global terrain visualization
Li Shanglin, Zheng Liping, Zhang Yingkai, Li Lin 1412

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)10-1403-09

论文引用格式: Fu X Y, Zhang F L, Wang G J, Shao Y. Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1403-1411. [符喜优, 张风丽, 王国军, 邵芸. 结合张量投票和 Snakes 模型的 SAR 图像道路提取[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(10): 1403-1411.][DOI:10.11834/jig.20151014]

结合张量投票和 Snakes 模型的 SAR 图像道路提取

符喜优^{1,2}, 张风丽¹, 王国军¹, 邵芸¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 目的 Snakes 模型对曲线轮廓具有良好的拟合能力,被广泛应用于遥感图像的道路提取。但 SAR 图像受乘性斑点噪声影响严重,因此利用 Snakes 模型从 SAR 图像提取道路时,传统的以图像灰度负梯度为外部能量的方法难以取得理想结果。针对这一问题,利用计算机视觉中的张量投票算法可以从噪声掩盖的图像中提取显著结构特征的特点,将张量投票与 Snakes 模型结合从 SAR 图像提取道路。**方法** 首先利用模糊 C 均值分割法从 SAR 图像中分割出道路类,然后对道路类进行张量投票获得每点的曲线显著性值,最后以该曲线显著性值的负值作为 Snakes 模型外部能量从 SAR 图像提取道路。在 Snakes 模型能量最小化阶段,提出了一种优化的拟合策略,一边内插节点一边最小化 Snakes 模型能量。**结果** 利用机载和星载不同场景的 SAR 图像进行实验,与同类的基于 Snakes 模型的半自动方法相比,本文方法对曲率较大的道路仅需较少控制点即可取得较好的拟合效果;与基于 MRF 模型的自动方法相比,本文方法对道路提取的完整率、正确率、检测质量都优于基于 MRF 模型的方法,并且提取的时间远远快于基于 MRF 模型的方法,对于大范围的道路网提取将更为实用。**结论** 本文方法充分考虑到道路的几何形态特征,利用张量投票算法对该特征进行量化,并利用优化的拟合策略来最小化 Snakes 模型能量来提取道路。基于机载和星载 SAR 图像的实验表明本文方法可以较好地提取不同场景中的主要道路目标和道路网。

关键词: 张量投票;计算机视觉算法;显著性;Snakes 模型;SAR 图像;道路提取

Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model

Fu Xiyu^{1,2}, Zhang Fengli¹, Wang Guojun¹, Shao Yun¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: **Objective** Snakes models can effectively fit curve features and are thus widely used to extract roads from remote sensing images. However, when used to extract roads from synthetic aperture radar (SAR) images, traditional Snakes models that utilize the negative gradient of images as external energy cannot obtain the desired results because of serious speckle noise. To address this issue, we employed a tensor voting method in improving Snakes models because such method can extract salient structures from images influenced by noises. **Method** Road class was first segmented from SAR images using

收稿日期:2015-01-20;修回日期:2015-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61471358,41001213);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-320);国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2011AA120403)

第一作者简介:符喜优(1991—),男,中国科学院遥感与数字地球研究所电子与通信工程专业硕士研究生,主要研究 SAR 图像处理与应用。E-mail: fuxy@radi.ac.cn

通信作者:张风丽,副研究员,E-mail: zhangfl@radi.ac.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61471358,41001213); National High Technology Research and Development Program of China (2011AA120403)

the FCM clustering method. Then, the saliency value of the curve features was obtained by employing the tensor voting method on the extracted road class. Finally, the negative normalized saliency value of the curve features was used as the external energy of the snakes model to extract roads. To minimize the energy of the snakes model, a strategy for minimizing energy while interpolating nodes was proposed. **Result** Road extraction experiments were performed on different scenes of spaceborne and airborne SAR images. Compared with a similar method based on the snakes model, the proposed model achieved better fitting results with less control points. Moreover, the proposed method showed better detection completeness, correctness, and quality than the MRF-based method. The proposed method also demonstrated a shorter detection time, which is a practical feature for wide-range road network extraction. **Conclusion** The proposed method quantified the geometric characteristics of roads through tensor voting. An optimized fitting strategy was used to minimize the energy consumption of the snakes model for road extraction. The experiments on spaceborne and airborne SAR images proved that main roads in rural and urban scenes can be effectively extracted using the proposed method.

Key words: tensor voting; computer vision algorithm; saliency; snakes model; SAR images; road extraction

0 引言

随着遥感技术的不断发展,遥感图像成为道路提取的重要信息源。由于合成孔径雷达(SAR)不受光照和云层遮挡影响,可以全天时、全天候进行对地观测,对于灾害应急监测和多云多雨地区具有重要意义,利用 SAR 图像提取道路的研究逐渐受到重视。但 SAR 成像特有的乘性噪声使得道路提取变得困难,并且 SAR 独特的侧视成像方式使得道路容易被周围树木、建筑物遮挡,对道路提取造成干扰。根据是否需要人工干预,利用 SAR 图像提取道路可分为自动化方法和半自动化方法。经典的自动化方法有基于马尔可夫随机场(MRF)模型^[1]、基于遗传算法^[2]和基于区域增长法^[3]的道路网提取方法,该类方法鲁棒性不强且经常会出现错判和断裂,需要复杂的人工后处理。半自动方法如模板匹配法^[4,5]、粒子滤波法^[6-7]、Snakes 模型法^[8-9]充分利用人类的认知和解译能力,又发挥了计算机的计算能力,是从 SAR 图像提取道路较好的选择。

Snakes 模型法是一种高效的半自动轮廓检测方法,对曲线轮廓具有较好的拟合效果,因此被广泛用于遥感图像道路提取^[8-12]。在应用 Snakes 模型进行道路提取时,需要根据不同的情况对 Snakes 模型的外部能量进行定义并制定拟合策略。对于光学遥感图像常以图像灰度的负梯度作为 Snakes 模型的外部能量,但这一做法对于受非高斯乘性噪声影响的 SAR 图像不再适用。文献[8]利用方向性滤波器对 SAR 图像进行滤波后,以线检测算子响应值的负值作为 Snakes 模型外部能量驱动初始轮廓向道路拟

合取得较好效果,但该方法需要道路数据库提供较准确的初始轮廓曲线。文献[9]以细化的道路类二值图像作为外部能量,利用 Snakes 模型提取复杂城市道路网,该方法需输入较准确的初始控制点,加大了人工操作的难度,并且对曲率较大的道路拟合效果一般。

针对利用 Snakes 模型从 SAR 图像提取道路存在的问题,引入张量投票算法重新定义 Snakes 模型的外部能量,提出了一种结合张量投票和 Snakes 模型从 SAR 图像提取道路的方法。首先利用模糊 C 均值(FCM)分割法从 SAR 图像中分割出道路类,但分割结果常包含非道路噪声,并且存在空洞和断裂现象,不利于下一阶段的道路中心线提取。张量投票算法是一种能从噪声掩盖的图像中提取显著结构特征的鲁棒性算法,能从噪声和断裂的道路类中提取道路的几何形态特征—曲线显著性。然后以张量投票计算得到的曲线显著性值的负值作为 Snakes 模型外部能量,引导 Snakes 模型能量最小化的过程。在 Snakes 模型能量最小化阶段针对传统方法存在的问题,提出了一种边内插节点边优化的策略,无需事先确定节点数量,在控制点较少的情况下对曲率较大的道路也可以取得较好的拟合效果。

1 基本理论

1.1 Snakes 模型

Snakes 模型是 Kass 等人^[13]提出的一种在内部约束力和外部约束力作用下移动变形的轮廓线,它的内部能量函数能保证提取光滑曲线,而且在外部能量中很容易加入一些符合待提取特征的约束条

件,使 Snakes 轮廓很好地收敛到待提取的目标上。Snakes 可以表示为定义在参数 $s \in [0, 1]$ 上的参数曲线,即 $v(s) = (x(s), y(s))$,其模型的总能量可以定义为

$$E_{\text{snake}} = \int_0^1 (E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s))) ds \quad (1)$$

式中, $E_{\text{int}}(v(s))$ 表示内部能量函数, $E_{\text{ext}}(v(s))$ 表示外部能量函数。内部能量函数 $E_{\text{int}}(v(s))$ 可以看做是连续能和曲率能两种能量函数的组合,表示为

$$E_{\text{int}}(v(s)) = [\alpha(s) |v'(s)|^2 + \beta(s) |v''(s)|^2] / 2 \quad (2)$$

式中, $v'(s)$ 表示 $v(s)$ 对 s 的一阶导数,它被定义为连续能,表示 Snakes 轮廓线上相邻两点的连续性。 $v''(s)$ 表示 $v(s)$ 对 s 的二阶导数,被定义为曲率能,表示 Snakes 轮廓线上相邻三点的曲率。 $\alpha(s)$ 和 $\beta(s)$ 分别为连续能和曲率能的控制参数。

外部能量函数 $E_{\text{ext}}(v(s))$ 主要由与图像目标特征相关的一些因素构成,表示为

$$E_{\text{ext}}(v(s)) = \gamma(s) E_{\text{image}}(v(s)) \quad (3)$$

式中, $E_{\text{image}}(v(s))$ 是图像能量,它反映了图像的某些特征,如边缘、线状目标等,推动 Snakes 轮廓线向感兴趣的目標靠近直至与目标拟合。 $\gamma(s)$ 是图像能量的控制参数。

在寻找指定的目标轮廓时,初始轮廓曲线在内部能量和由图像数据产生的外部力量的共同作用下逐渐向目标特征位置靠拢。最小化能量函数的过程就是 Snakes 模型的轮廓收敛过程,可以采用变分法^[13]和贪婪算法^[14]求解。

1.2 张量投票理论

张量投票^[15]是一种用于推断图像中显著性结构的计算机视觉算法。它能从噪声掩盖的图像中提取显著的结构特征且具有参数少,鲁棒性强,计算有效,快速等特点,被广泛应用于图像去噪、轮廓提取、图像序列分析等方面。张量投票主要由3部分组成:张量表示、张量投票和特征提取。每个输入点经张量编码后,通过一个预定义的投票域向其邻域点进行投票,同时收集自身获得的投票并将其编码为一个新张量,最后将投票结果进行分解,提取点、线、面等空间结构特征^[16]。

1.2.1 张量表示

在张量投票算法中为了满足映射连续性和表示唯一性,输入数据以二阶对称半正定的张量形式表

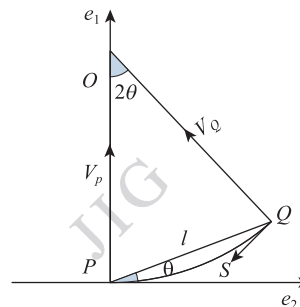
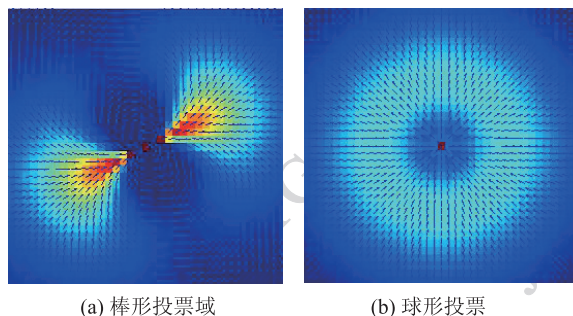
示,也称张量编码。利用张量可以同时表示数据的局部方向信息(如切线、法线方向)和数据类型信息(如点、线)。根据矩阵谱分解定理,2维平面中,张量 T 可以分解成特征值和特征向量的线性组合,即

$$T = (\lambda_1 - \lambda_2) e_1 e_1^T + \lambda_2 (e_1 e_1^T + e_2 e_2^T) \quad (4)$$

式中, λ_1 和 λ_2 为非负特征值, e_1 和 e_2 为相应的特征向量; $e_1 e_1^T$ 为棒形张量,显示其线特征; $\lambda_1 - \lambda_2$ 代表线特性的显著性。 $(e_1 e_1^T + e_2 e_2^T)$ 称为球形张量,显示其点特性; λ_2 代表点特性的显著性。

1.2.2 张量投票

张量投票中每个输入点通过一个预定义的投票域向其邻域点进行投票。2维空间中的张量投票域有两种:棒形投票域和球形投票域,如图1(a)(b)所示。



(c) 棒形张量投票示意图

图1 张量投票算法

Fig. 1 Tensor voting algorithm

棒形投票域的张量投票过程如图1(c)所示。记 P 为投票点,投票方向为 V_P ,获票点为 Q ,定义从 P 点出发,通过 Q 点的最有可能的光滑路径为密切圆的一段弧,该弧具有恒定不变的曲率,圆心为 O 。图中 l 为线段 PQ 的长度; θ 为线段 PQ 与 P 处切线方向的夹角; s 为 PQ 的弧长, $s = \frac{\theta l}{\sin(\theta)}$; ρ 为圆弧 PQ 的曲率, $\rho = \frac{2 \sin(\theta)}{l}$ 。

根据 Gestalt 原理,投票的大小应该为与邻近性、光滑性和连续性有关的函数, P 给 Q 投票的票值

DF 满足以下衰减规律

$$DF(s, c, \rho) = \exp\left(-\frac{s^2 + c\rho^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, σ 称为尺度因子, 影响投票域的大小; c 控制了曲率的程度, 是 σ 的函数, 即

$$c = \frac{-16\ln(0.1) \times (\sigma - 1)}{\pi^2} \quad (6)$$

P 点处一个沿 V_p 方向的单位棒形投票所形成的 2 维中的棒形投票域可以定义为投票者与受票者之间距离 l 和角度 θ 的函数, 其张量形式可以表达为

$$S_{so}(l, \theta, \rho) = DF(s, c, \rho) \begin{bmatrix} -\sin(2\theta) \\ \cos(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

任意大小的棒形张量的投票数量, 定义为式(5)与棒形分量的大小 $\lambda_1 - \lambda_2$ 的乘积。球形张量的投票域可由棒形投票域得到, 即

$$B_{so}(P) = \int_0^{2\pi} S_{so}(P) d\theta \quad (8)$$

任意大小的棒形张量的投票数量, 定义为式(5)与棒形分量的大小 λ_2 的乘积。

投票过程分为两种: 1) 稀疏投票, 从投票者处向有投票能力的受票者处投票; 2) 稠密投票, 从投票者处向所有位置投票。

1.2.3 显著特征提取

投票完成后, 通过对每个点获得的投票进行如式(4)的张量分解就可以提取相应特性显著性图如点显著性图、线显著性图, 显著性图中每一点的值代表相应特性的显著性, 即线特征显著性 $\lambda_1 - \lambda_2$ 或点特征显著性 λ_2 。

2 本文道路提取方法

提出的结合张量投票和 Snakes 模型从 SAR 图像提取道路的方法主要包括以下步骤: 首先利用模糊 C 均值分割法从 SAR 图像提取出道路类, 然后对道路类进行张量投票获得每一点的曲线显著性值, 接着以曲线显著性值的负值作为 Snakes 模型外部能量, 采用一种边内插边优化的策略最小化 Snakes 模型能量, 获得较准确的道路。方法流程如图 2 所示。

2.1 FCM 分割道路类

在 SAR 图像上, 道路通常表现为后向散射强度

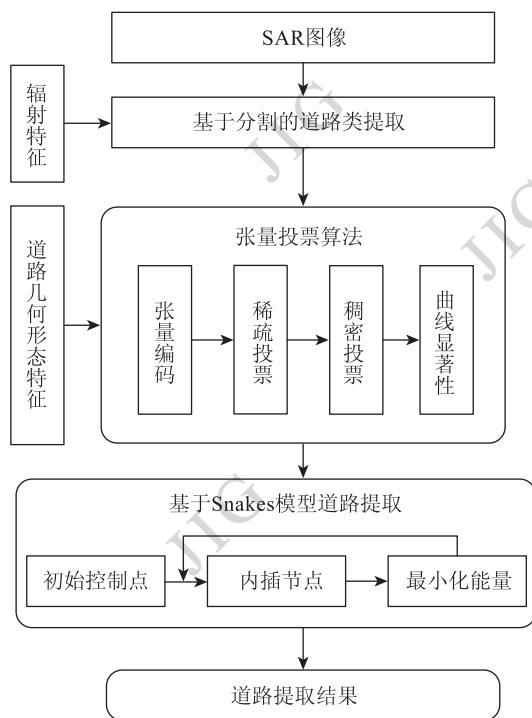


图2 方法流程图

Fig. 2 Diagram of the proposed method

较弱的线状或条带状特征, 灰度比其他地物低, 因此可以利用 FCM 分割法将潜在的道路类从 SAR 影像中提取出来。FCM 分割是一种无监督分割算法, 它建立了样本对类别的不确定程度, 被广泛应用于图像处理领域。其基本思路是将 n 个样本点构成的样本集合 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 划分为 c 个类别, 通过计算每个类别的聚类中心和隶属度矩阵, 使非相似性指标的目标函数达到最小。FCM 的目标函数定义为

$$J(U, v_1, v_2, \dots, v_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^m u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中, u_{ij} 是第 j 个样本对于第 i 类的隶属度函数; v_i 为类别 i 的聚类中心; $d_{ij} = \|v_i - x_j\|$ 为第 i 个聚类中心与第 j 个样本点之间的距离; m 是模糊加权指数, 通常取值为 2。

FCM 分割是一个使目标函数最小化的迭代优化过程。采用 FCM 从 SAR 图像分割道路类的步骤如下:

1) 初始化聚类中心 $\{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 。采用 3×3 窗口内像素灰度的均值和方差为特征初始化聚类中心。

2) 计算隶属度矩阵。隶属度 u_{ij} 的计算方法为

$$u_{ij} = \sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{\frac{-2}{m-1}} \quad (11)$$

3) 更新聚类中心。根据隶属度矩阵计算新的聚类中心为

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m} \quad (12)$$

4) 由聚类中心和隶属度矩阵计算目标函数值。若目标函数值小于某个阈值, 或者相对于上一次的目标函数值的变化非常小, 则算法结束实现了分类; 否则转到步骤 2)。

图 3 为利用 FCM 分割算法从 SAR 图像提取道路类的例子。图 3(a) 为海南地区机载 SAR 图像, 图像大小为 356×678 , C 波段, 分辨率为 2×2 m。图 3(b) 为采用 3×3 窗口内像素灰度的均值和方差为特征, 利用 FCM 分割法分割得到的道路类。

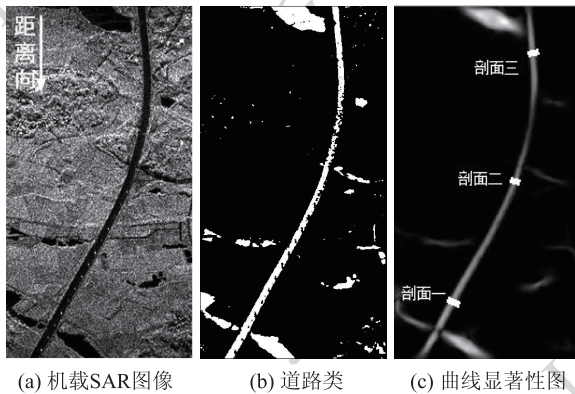


图 3 FCM 分割道路类

Fig. 3 FCM road class segmentation

2.2 张量投票提取曲线显著性

受到斑点噪声以及周边地物的影响, 利用 FCM 分割后得到的道路类中包含许多虚假目标, 且会出现空洞、断裂等现象, 如图 3(b) 所示。一些水体也被分割成了道路类, 但受树木、车辆影响的像元却被分割成了非道路类, 这将直接影响基于 Snakes 模型的道路中心线提取。张量投票具有从噪声掩盖的图像中提取显著结构特征的能力, 因此本文对 FCM 分割得到的道路类结果图像进行张量投票, 获取能表征道路几何形态特征的曲线显著性值, 并用来引导 Snakes 模型的收敛过程。

由于 FCM 分割出的道路点没有方向性, 而无方

向的点不具备棒形张量部分, 不能投出棒形票, 也就无法提取曲线显著性。因此先对所有道路点进行球张量编码, 即对每个道路点编码为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

然后对所有编码点进行一次球形投票域的稀疏投票, 使道路点具有一定方向性。在此基础上, 再对非道路点进行球张量编码, 并对所有点重新进行一次棒形投票域的稠密投票。经过 2 次投票后, 对每个点获得的线型投票张量和进行如式 (4) 的分解, 就可以提取每个道路点的曲线显著性值 $\lambda_1 - \lambda_2$ 。图 3(c) 为对图 3(b) 进行张量投票后提取的曲线显著性图, 图 4 为对图 3(c) 取 3 个道路剖面得到的剖面图。由该图可见具有线性结构的道路具有较高的曲线显著性, 且道路中心点往往比非中心点显著性高。因此, 以曲线显著性值的负值作为 Snakes 模型的外部能量, 即令

$$E_{\text{ext}} = -\text{Norm}(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (14)$$

式中, Norm 表示归一化。当最小化 Snakes 模型能量时, 曲线轮廓会向道路中心逼近, 从而准确地提取出道路。

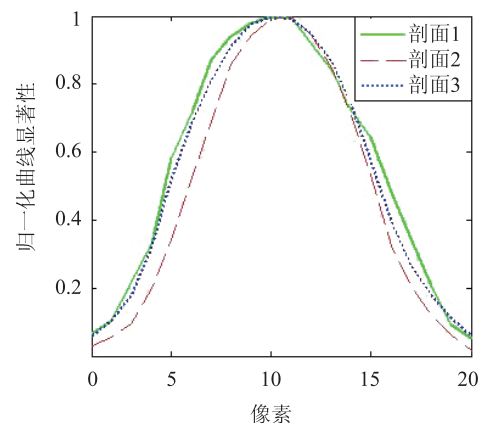


图 4 张量投票提取曲线显著性

Fig. 4 Curve saliency extraction by tensor voting

2.3 利用 Snakes 模型提取道路

采用 Williams 提出的贪婪算法^[13]求解 Snakes 模型的最小能量, 需要先定义 Snakes 模型的各部分能量。设 v_i 为 Snakes 模型的一点, 定义连续能为

$$E_{\text{cont}}(v(s)) = \bar{d} - |v_i - v_{i-1}| \quad (15)$$

式中, $\bar{d}$ 为轮廓相邻节点之间的平均距离, 且 $\bar{d} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |v_{i+1} - v_i|$, n 为轮廓的节点个数。连续能使轮

廓上的节点较均匀地分布,增强轮廓的拟合能力。

节点 v_i 的曲率能定义为

$$E_{\text{curv}} = |v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}|^2 \quad (16)$$

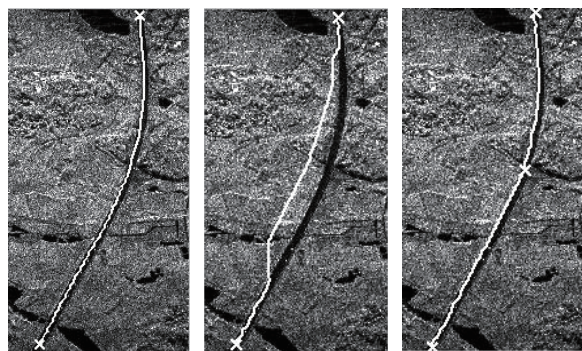
当曲率能在迭代过程中寻找最小值时,轮廓线会由折线趋向于直线使曲率降到最低。则 Snakes 模型的总能量为

$$E_{\text{snake}} = \alpha E_{\text{cont}} + \beta E_{\text{curv}} + \gamma E_{\text{ext}} \quad (17)$$

式中, α 、 β 、 γ 分别为控制连续能 E_{cont} 、曲率能 E_{curv} 和外部能量 E_{ext} 的权重函数,当某一参数较大时,其对应的能量在总能量中产生较大的影响。传统方法采用先确定所有内插节点再最小化 Snakes 能量的策略,需要预先确定内插的节点数,增加人工操作难度,并且对曲线道路拟合效果一般。本文提出了一种优化的拟合策略,即每内插一个节点后立即最小化 Snakes 模型能量,再继续内插下一个节点并最小化 Snakes 能量。这种边内插边拟合的方法无需事先确定节点数,且能使 Snakes 轮廓在输入较少控制点的情况下,对曲线道路具有较好的拟合效果。具体步骤为:1) 参数的初始化,确定权值 α 、 β 、 γ 内插步长 $step$ 和贪婪算法迭代次数 n 的大小,并人工选取控制点;2) 按步长在最后一个节点与控制点间内插一个节点,使用贪婪算法迭代计算每一个节点和它 3 邻域节点的总能量,把该节点重新定位至能量最小的像素点;3) 若最后一个节点与控制点距离小于步长,则退出,否则返回步骤 2);4) 对每两个控制点重复步骤 2)3),直到每两个控制点间都完成拟合。

3 实验结果与分析

利用机载和星载 SAR 图像进行道路提取实验,首先与文献[9]中同类的基于 Snakes 模型方法的提取结果进行对比。图 5 为简单背景环境下道路提取对比实验。图 5(a)为本文方法提取道路结果,即在利用 FCM 分割算法分割出道路类的基础上,对每个道路点进行张量投票提取曲线显著性值,以曲线显著性值的负值为 Snakes 模型的外部能量,驱动模型轮廓形变拟合出的道路。对于该段道路,只需人工给出两个控制点(标记 $\times$ 表示控制点,下同),即可提取出整段光滑的道路;图 5(b)为采用文献[9]方法选取 2 个控制点时的道路提取结果,此时正确率仅为 28%;当控制点增加为 3 个时(如图 5(c)所示),才能取得与本文方法相近的结果。



(a) 本文方法 (b) 文献[9]方法结果1 (c) 文献[9]方法结果2

图 5 利用机载 SAR 图像的简单背景道路提取实验

Fig. 5 Experiment of road extraction from airborne image under simple background

图 6 为较复杂环境下的道路提取对比实验。图 6(a)为广州地区 TerraSAR-X 图像,实验图像大小为 638×551 像素,X 波段,分辨率为 3×3 m。实验区有一条沿距离向曲率较大的道路和一条沿方位向曲率较小的道路相交,道路受树木、建筑物、车辆干扰严重。图 6(b)为本文方法道路提取结果,可见不论曲率较大或曲率较小的道路都只需两个控制点就可以提取整条道路,正确率为 100%;图 6(c)为采用文献[9]方法选取 5 个控制点时的提取结果,其中对于曲率较小的道路输入两个控制点,而对于曲率较大的道路需要 3 个控制点,此时道路提取正确率为 67%;图 6(d)为采用文献[9]方法选取 6 个控制点的提取结果,对于曲率较小的道路输入两个控

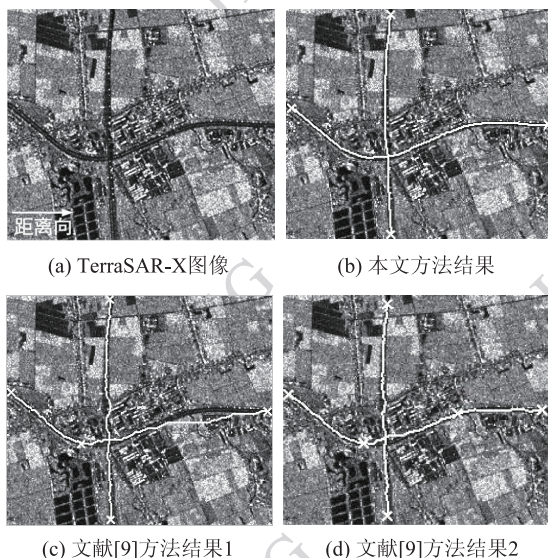


图 6 利用星载 SAR 图像的较复杂环境道路提取实验

Fig. 6 Experiment of road extraction from spaceborne image under complex background

制点,而曲率较大的道路需要 4 个控制点才能取得与本文方法相近的结果。

本文方法充分考虑到道路的几何形态特征,利用张量投票算法对该特征进行量化从而提取得到道路的显著特征,充分利用了目标本身的先验知识和人的视觉认知能力,因此仅需较少的人工操作即可得到较好的提取结果,提高了道路提取的自动化水平。

为了进一步分析本文方法在道路提取实际应用中的效果,利用机载和星载 SAR 图像对郊区和城区

两类场景的道路网提取进行了实验,与被广泛应用的基于 MRF 模型的道路自动提取方法(文献[1])的效果进行了对比分析。

图 7 为郊区道路网提取实验。图 7(a)为海南地区机载 SAR 图像,图像大小为 $1\,502 \times 780$ 像素,C 波段,分辨率为 2×2 m,实验区内道路受其他地物干扰较少,少数道路有较大曲率;图 7(b)为本文方法道路网提取结果;图 7(c)给出了基于 MRF 模型的道路提取结果,图 7(d)是实际道路分布情况。

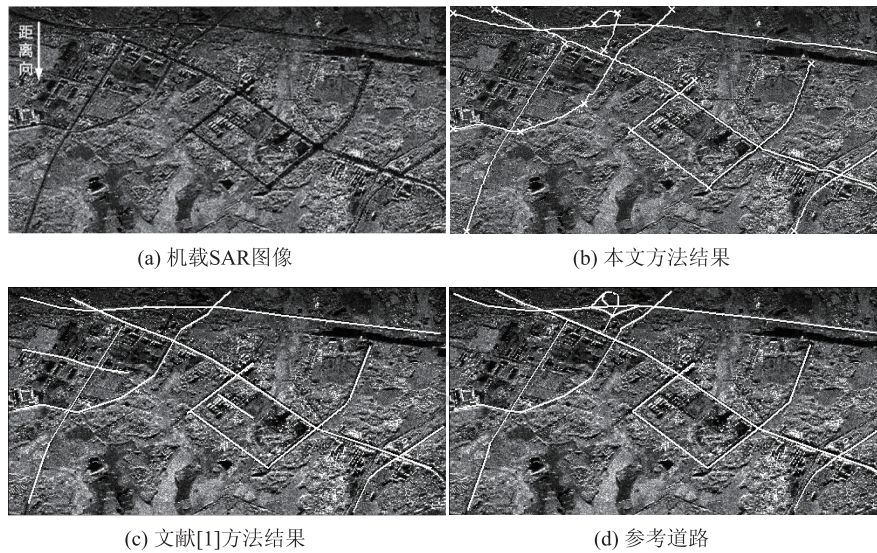


图 7 郊区道路网提取实验

Fig. 7 Experiment of road network extraction in rural area

可以看出,基于 MRF 模型的方法将不是道路的一些线性特征也检测出来,而利用本文方法得到的结果更接近于真实道路情况。表 1 利用文献[17]中的评价指标对两种方法的提取结果进行了对比,可以看出,本文方法对郊区道路提取的完整率、正确率、检测质量都优于文献[1]中的基于 MRF 模型的自动方法。对于该实验区,大多数道路段只需要两个控制点就能提取出来,个别曲率较大或较模糊的道路,通过增加少量控制点,也可以得到较好的提取结果。而本文是半自动方法,充分利用了人的认知能力和计算机快速计算能力,因此更高效,更适用于道路提取的实际应用。

城区道路网提取实验如图 8 所示。图 8(a)为广州地区 TerraSAR-X 图像,图像大小为 $1\,361 \times 642$ 像素,X 波段,分辨率为 3×3 m。实验区位于城区,场景复杂,道路两边有大量的建筑物、行道树,并且部分道路曲率较大;图 8(b)为道路提取结果;

图 8(c)给出了基于 MRF 的道路提取结果;图 8(d)是实际道路分布情况。对比两种方法可以看出,当场景变得更为复杂时,MRF 方法提取得到的道路的连续性、准确性都显著降低,而综合利用张量投票方法和 Snakes 模型,可以较好地剔除噪声的干扰,仅需要少数控制点就可以将复杂城区中的主要道路网有效地提取出来。由表 1 可以看出,本文方法对于城区道路提取的完整率、正确率、检测质量都优于基于

表 1 本文方法与基于 MRF 模型法的结果对比
Table 1 Comparision between results of the proposed method and the MRF based method

评价指标	图 7		图 8	
	本文方法	文献[1]方法	本文方法	文献[1]方法
完整率/%	96.46	91.12	93.15	78.00
正确率/%	100	91.59	100	94.30
检测质量/%	96.46	84.08	93.15	74.49
时间/s	108	856	94	1 044

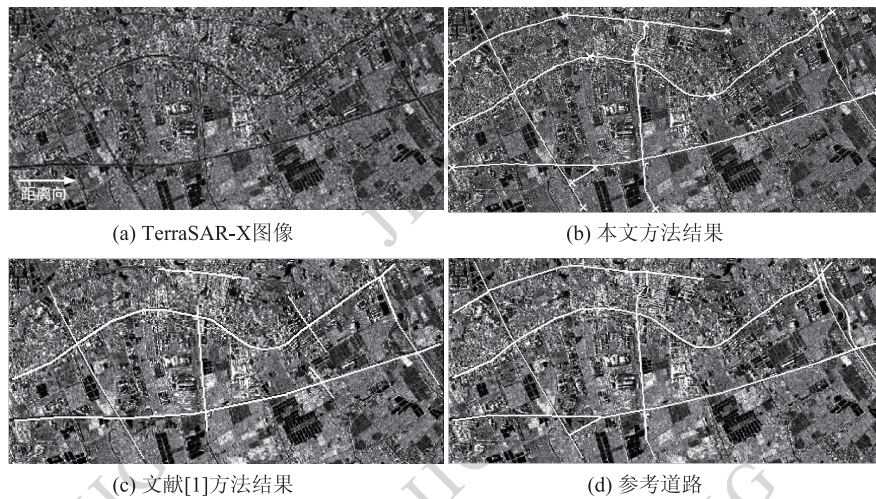


图8 城区道路网提取实验

Fig. 8 Experiment of road network extraction in urban area

MRF 模型的方法,并且运算时间是基于 MRF 模型的方法的 1/10 左右,对于大范围的道路网提取将更为有效。

4 结 论

提出一种结合张量投票和 Snakes 模型从 SAR 图像提取道路的方法。针对传统方法以图像负梯度为外部能量从 SAR 图像提取道路时 Snakes 轮廓不易收敛到道路目标的问题,首先对 FCM 分割得到的道路类进行张量投票提取出道路类每点的曲线显著性值,以该显著性值的负值作为 Snakes 模型的外部能量;在 Snakes 模型能量最小化阶段,采用一种优化的拟合策略,即每内插一个节点后立即最小化 Snakes 模型能量,再继续内插下一个节点并最小化 Snakes 能量。基于机载和星载 SAR 图像的实验表明该方法可以较好地剔除背景噪声的干扰,有效地从郊区和城区场景中提取出主要的道路目标和道路网。在输入较少控制点的情况下就可以取得较好的拟合效果,而且无需事先确定节点数量,可以大大减少人工操作,较好地兼顾道路提取的准确度和时间效率。由于本文方法需要先分割出道路类,因此对细小的道路提取效果不太理想,下一步将研究更有效的道路类分割方法以提高道路的检测效果。

参考文献 (References)

- [1] Tupin F, Maitre H, Mangin J F, et al. Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 434-453. [DOI: 10.1109/36.662728]
- [2] Byoung-Ki J, Jeong-Hun J, Ki-Sang H. Road detection in spaceborne SAR images using a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 22-29. [DOI: 10.1109/36.981346]
- [3] Lu P P, Du K N, Yu W D, et al. A new region growing-based method for road network extraction and its application on different resolution SAR images [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(12): 4772-4783. [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2340394]
- [4] Sun X F, Li Y C, Lin X G. Semi-automatic extraction of ribbon roads from VHR remotely sensed SAR imagery [C]//Proceedings of Chinese Conference on Pattern Recognition. Chongqing: IEEE, 2010: 1-4. [DOI: 10.1109/CCPR.2010.5659265]
- [5] Cheng J H, Guan Y F, Ku X S, et al. Semi-automatic road centerline extraction in high-resolution SAR images based on circular template matching [C]//Proceedings of International Conference on Electric Information and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2011: 1688-1691. [DOI: 10.1109/ICEICE.2011.5777358]
- [6] Liu J, Li D, Sui H, et al. Road extraction from SAR images based on particle filtering [C]//Proc. of SPIE 6786, MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis and Multispectral Image Acquisition. Wuhan: SPIE, 2007: 67862G-67862G. [DOI: 10.1117/12.749687]
- [7] Deng Q M, Chen Y L, Yang J. Joint detection of roads in multi-frequency SAR images based on a particle filter [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(4): 1069-1077. [DOI: 10.1080/01431160903252319]
- [8] Bentabet L, Jodouin S, Ziou D, et al. Road vectors update using SAR imagery: a snake-based method [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1785-1803. [DOI: 10.1109/TGRS.2003.813850]

- [9] Xiao Z Q, Bao G S. A method of road networks extraction in urban areas using SAR images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(3):264-268. [肖志强, 鲍光淑. 一种从 SAR 图像中提取城市道路网络的方法. 测绘学报, 2004, 33(3):264-268.]
- [10] Lin Z, Wang X L. Road extraction in high resolution remote sensing images based on mathematic morphology and snake model [C]//*Proceedings of the 3rd International Congress on Image and Signal Processing*. Yantai: IEEE, 2010:1436-1440. [DOI: 10.1109/CISP.2010.5647990]
- [11] Shi H L, Zhou S G, Xu Y. Urban road detection of high resolution remote sensing images based on snakes model[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(2):106-111. [施海亮, 周绍光, 徐勇. 基于 Snakes 模型的高分辨率遥感影像城区道路提取方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(2): 106-111.] [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.02.005]
- [12] Liu J Y, Sui H G, Tao M M, et al. Road extraction from SAR imagery based on an improved particle filtering and Snake model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 8199-8214. [DOI:10.1080/01431161.2013.835082]
- [13] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, 1(4): 321-331. [DOI: 10.1007/BF00133570]
- [14] Williams D J, Shah M. A fast algorithm for active contours and curvature estimation[J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1992, 55(1):14-26. [DOI:10.1016/1049-9660(92)90003-L]
- [15] Medioni G, Lee M S, Tang C K. A Computational Framework for Feature Extraction and Segmentation[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2000.
- [16] Wen P Z, Huang J F, Ning R H, et al. Boundary extraction of active contour based on tensor voting[J]. *Computer Engineering*, 2012, (6):216-218. [温佩芝, 黄锦芳, 宁如花, 等. 基于张量投票的主动轮廓边缘提取[J]. 计算机工程, 2012, (6): 216-218.] [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.06.071]
- [17] Wiedemann C, Heipke C, Mayer H, et al. Empirical evaluation of automatically extracted road axes[C]//*Proceedings of the 9th Australasian Remote Sensing Photogrammetry Conference*. The University of New South Wales, Sydney:[s. n.], 1998:239.