

一种高分辨率遥感影像道路提取方法

戴激光^{1,2} 朱婷婷¹ 张依蕾¹ 马榕辰¹ 王晓桐¹ 张腾达¹

摘要 针对空间异质性导致的道路几何纹理特征突出性下降问题, 提出一种高分辨率遥感影像道路提取方法. 首先设定跟踪模型, 依据人工输入点, 自适应提取道路中心点和道路宽度, 设计迭代内插、双向迭代两种跟踪方式以及矩形跟踪模板; 然后提出多描述子道路匹配模型, 针对道路几何纹理特征突出性不足问题, 基于道路区域地物边缘与道路方向一致的语义关系, 通过线段峰值约束的思想, 提出一种多尺度线段方向直方图 (Multi-scale line segment orientation histogram, MSLSOH) 描述子, 以此对跟踪方向进行预测; 针对道路几何纹理特征均质性下降问题, 从道路区域与道路非道路混合区域纹理差异性出发, 组合三角形构成扇形描述子, 突出道路影像纹理特征, 以此不仅可对预测跟踪点进行验证, 而且也可在结构信息缺失的情况下对道路进行跟踪; 最后选取不同类型、不同分辨率、不同场景的高分辨率遥感影像, 通过与其他方法的实验对比, 表明该方法能够解决道路提取过程中几何纹理特征突出性下降问题, 具有准确率高和自动化程度高的优势.

关键词 语义关系, MSLSOH 描述子, 扇形描述子, 道路提取, 高分辨率, 遥感影像

引用格式 戴激光, 朱婷婷, 张依蕾, 马榕辰, 王晓桐, 张腾达. 一种高分辨率遥感影像道路提取方法. 自动化学报, 2020, 46(11): 2461–2471

DOI 10.16383/j.aas.c190534

A Road Extraction Method for High Resolution Remote Sensing Images

DAI Ji-Guang^{1,2} ZHU Ting-Ting¹ ZHANG Yi-Lei¹ MA Rong-Chen¹
WANG Xiao-Tong¹ ZHANG Teng-Da¹

Abstract In order to solve the problem of road geometric texture feature prominence decline caused by spatial heterogeneity, a road extraction method for high resolution remote sensing images is proposed in this paper. This method first sets a tracking model, adaptively extracts road center point and road width according to manual input points, thereby designing two tracking methods (interpolation and bidirectional iteration), and a rectangular tracking template. Secondly, a multi-descriptor road matching model is proposed: Facing with the lack of prominent geometric features of roads, based on the semantic relationship between the edges of the objects in the road area and the direction of the road, a MSLSOH (Multi-scale line segment orientation histogram) descriptor is proposed to predict the matching tracking direction through the idea of line segment peak constraint. And then, for the problem of the homogeneity reduction of road texture features, from the difference of texture between road area and road non-road mixed area, a sector descriptor composed of multiple triangles was designed to highlighting the road image texture features, so that not only the predicted tracking points can be verified, but also tracking roads in the absence of structural information. Finally, high resolution remote sensing images of different types, resolutions and scenes are selected. Compared with other methods, the experimental results show that this method can solve the problem of decreasing the prominence of geometric texture features in the process of road extraction, and has the advantages of high accuracy and high degree of automation.

Key words Semantic association, MSLSOH descriptor, sector descriptor, road extraction, high resolution, remote sensing images

Citation Dai Ji-Guang, Zhu Ting-Ting, Zhang Yi-Lei, Ma Rong-Chen, Wang Xiao-Tong, Zhang Teng-Da. A road extraction method for high resolution remote sensing images. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(11): 2461–2471

收稿日期 2019-07-18 录用日期 2019-11-08

Manuscript received July 18, 2019; accepted November 8, 2019
国家自然科学基金 (41871379), 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室经费资助项目 (KLSMNR-202004), 辽宁省教育厅服务地方项目 (LJ2019FL008), 城市空间信息工程北京市重点实验室 (2020221), 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室 (2018NGCM01) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (41871379), Key Laboratory of Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China (KLSMNR-202004), Liaoning Provincial Education Department Serves Local Projects (LJ2019FL008),

Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering (2020221), Key Laboratory for National Geography State Monitoring (National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation) (2018NGCM01)

本文责任编辑 桑农

Recommended by Associate Editor SANG Nong

1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院 阜新 123000 2. 城市空间信息工程北京市重点实验室 北京 100038

1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000 2. Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100038

近年来,随着高分二号、高景一号、北京二号等亚米级国产卫星数据的不断普及,利用遥感影像提取道路已逐渐成为更新道路信息的主要途径^[1-2].有鉴于此,国内外学者针对遥感影像道路提取开展了大量的工作.依据研究角度的差异,现有方法可分为:1) 传统方法.该方法从人工角度出发,利用经验设计特征表达“什么是道路”,并创建相应的特征提取模型用于道路的识别和提取.常用的特征包括几何特征、光谱纹理特征、拓扑特征、背景特征^[3],而面向对象方法^[4-5]、路径形态学^[6-8]、模板匹配方法^[9-12]、动态轮廓模型^[13-16]和水平集模型^[17-18]则是运用这些特征的典型方法.2) 深度学习方法.该方法从数据角度出发,利用深度学习强大的泛化能力、对任意函数的拟合能力、极高的稳定性^[19],依据先期提供的道路影像样本,自动挖掘道路影像深度学习特征,利用判别函数实现对像元级的道路影像概率值预测,以此探析道路影像的内在联系^[20-23].

虽然国内外学者提出了大量的道路提取方法,但目前自动提取道路仍然停留在理论研究和验证阶段,尚无普适性和实用性的算法及系统出现^[24].例如传统方法在面对空间异质性(机动车、道路曲率变化、隔离带、阴影、视觉遮挡、相邻相似纹理地物,且分布并不均衡)导致道路几何纹理特征突出性下降的问题时,自动化程度低.而深度学习方法虽然具有泛化性强、自动化程度高等优势,但其自身也如华为公司董事徐文伟所谈到的:没有好的样本集就没有好的深度学习结果.而样本需要大量人工处理,这就造成了“没有样本就没有智能”问题,使得利用深度学习进行大规模区域的道路提取应用尚处于实验室状态.因而在第三次全国土地调查、交通运输部的农村公路普查工作中,依然需要人工构绘,这极大地增加了信息采集的成本.

作为传统方法的典型代表,模板匹配方法已广泛应用于 Erdas Easytrace, Feature Analyst, EasyFeature 等软件,是目前商业化应用程度最高的道路提取方法.但由于模板匹配方法对道路几何纹理特征要求严格,因而在面对空间异质性问题时,虽然人机交互性高使得提取精度高,但自动化程度较低.有鉴于此,本文在模板匹配方法的基础上,提出一种高分辨率遥感影像道路提取方法.该方法从高分辨率遥感影像道路语义关系角度出发,充分利用道路内外边缘与道路方向的相似关系,构建道路与道路非道路混合区域(以下简称“混合区域”)差异分析模型,以此完成对道路的模板匹配跟踪提取.

1 本文方法

如图1所示,本文给出了具体的技术流程:

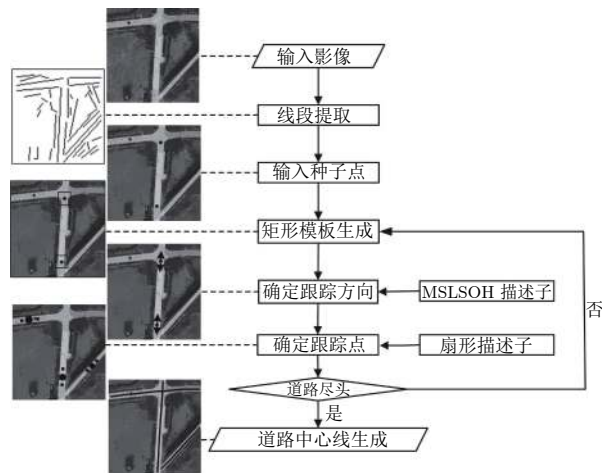


图1 技术流程

Fig.1 The technical route

1) 线段提取. 本文选取一种链码跟踪与相位验证相结合的算法用于影像线段提取^[25], 以此作为道路几何纹理特征语义关系的基础.

2) 设计道路跟踪模型, 输入道路的起点和终点位置, 自适应获取道路中心点与参数, 建立矩形跟踪模板.

3) 刻画道路几何信息, 依据道路内外边缘与道路方向间的语义关系, 基于线段结果建立多尺度线段方向直方图 (Multi-scale line segment orientation histogram, MSLSOH) 描述子, 以此对道路方向进行预测.

4) 为突出道路几何纹理特征, 利用道路与混合区域的纹理均质性对比, 构建扇形描述子, 对 MSLSOH 描述子预测的道路方向进行验证并确定最佳道路点. 当 MSLSOH 描述子没有给出预测道路方向时, 可依据已有道路点方向进行跟踪分析.

5) 依次连接跟踪点, 形成道路线输出.

1.1 跟踪模型

如图1所示, 由于本文方法采用人机交互式进行道路跟踪, 因此输入点的参数自适应调整、跟踪方式、矩形跟踪模板等跟踪参数均需展开研究.

1.1.1 位置及道路宽度自适应提取

道路中心点及道路宽度是实现道路跟踪的重要信息. 而初始人工输入点时, 难以保证其精确位于道路中心点, 因此本文选取梯度约束对种子点进行修正^[26], 以获取道路中心点和道路宽度. 具体步骤如下:

1) 创建一个以输入点为中心, 半径为一个像素的圆形模板.

2) 自动搜索输入点的8邻域像素, 以每个像素

为中心, 创建与步骤 1) 相同大小的圆形模板。

3) 比较各模板内所有点形态梯度的总和, 其形态梯度计算如式 (1) 所示。取梯度总和最小的模板作为最适合该半径的模板, 并将人工输入点更新到该模板中心点。

$$G(p) = \delta_N f(p) - \epsilon_N f(p) \quad (1)$$

式中, $G(p)$ 为影像中 p 点的形态学梯度值, $f(p)$ 为灰度影像, $\delta_N f(p)$ 为形态学膨胀值, $\epsilon_N f(p)$ 为形态学腐蚀值, N 为结构元。

4) 估计该模板的梯度总和是否超过梯度阈值 μ 。如果总和小于阈值 μ , 则以像素为单位增加圆形模板的半径, 并重复步骤 1) ~ 步骤 3), 直到超过阈值 μ 。最终模板直径为道路宽度, 而圆形模板中心点为道路中心点。

图 2 展示了自适应获取道路中心点和道路宽度的过程。大圆为最终得到的标准圆形模板, 线段为道路半径, 圆心为自适应校正后的道路中心点。

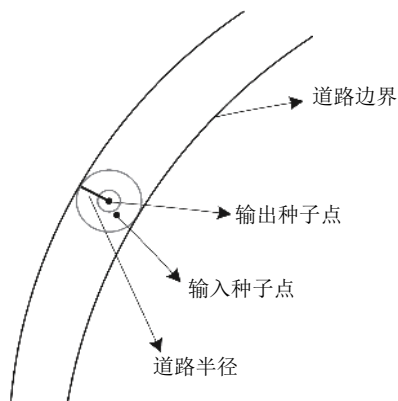


图 2 模板参数自适应提取

Fig.2 Adaptive extraction of template parameters

1.1.2 跟踪方式确定

以道路中心点为起始点, 通过迭代跟踪的方式, 完成对道路种子点的提取, 这是模板匹配获取道路种子点的常用方法。常用的跟踪方式包括迭代内插方法^[27-28]和双向迭代方法^[29-30]。双向迭代跟踪方法输入点需确定相邻两点, 具有方便快捷的优点, 但在跟踪过程中难以有效控制跟踪方向, 易引发道路误提取的问题。因此本文主要选取迭代内插方法进行匹配跟踪, 即通过起点与终点两点约束跟踪方向。如图 3 所示, P_S 和 P_E 分别为起点和终点, P_{Si} 和 P_{Ei} 分别为起点和终点方向的跟踪点, 虚线为跟踪过程中的动态方向约束线。但是, 由于种子点选取的严格要求, 道路起止点难以位于严格的道路尽头。因此, 需要采用双向迭代方法对另一侧跟踪点进行提取。



图 3 跟踪方式

Fig.3 Tracking mode

1.1.3 矩形跟踪模板建立

单一像元无法提供有效的几何纹理信息, 模板区域能够提供更多的结构信息, 因此本文方法需要围绕人工输入点设定跟踪模板。如图 4 所示, 以道路中心点为中心, 以两倍道路宽度为边长, 建立矩形跟踪模板。



图 4 矩形跟踪模板设定

Fig.4 Rectangular tracking template setting

1.2 多描述子匹配模型

在跟踪模板的基础上, 需要建立道路模板匹配模型。该模型利用 MSLSOH 描述子预测道路方向, 通过扇形描述子确定道路跟踪点。

1.2.1 MSLSOH 描述子

在实际场景中, 局部道路具有典型的方向性。在低分辨率遥感影像中, 这种方向性可由道路两侧边缘几何特征体现。但在高分辨率遥感影像中, 由于受到空间异质性的影响, 道路两侧边缘几何特征不明显, 无法体现道路方向。此时可通过挖掘相关

地物边缘的语义关系展示这种方向性.

1) 道路内部. 道路指示线、行进机动车边缘、隔离带、平顶建筑物阴影带边缘均与道路方向相同或相似.

2) 道路边缘. 道路边缘线、规则行树、停靠机动车边缘都具有与道路相同的方向.

3) 道路临近地物边缘. 建筑物的边缘通常也具有与道路相似的方向.

因此本文从道路语义关系出发, 利用多种地物边缘方向与道路方向相同的思想, 对道路种子点动态跟踪方向进行解译.

受噪声污染的边缘点分布很难规律表达, 而道路附近地物大部分为人工地物, 具有明显的规律性. 若边缘点作为基元, 直接应用时很难对地物边缘进行感知与理解. 而线段作为边缘点规律性的表达方式, 可有效准确描述地物边缘^[25]. 因此, 本文选取线段作为解析道路方向的表达基元, 提出 MSLSOH 描述子 (如图 5 所示), 以对道路方向进行解译. 该描述子是在多尺度影像基础上构建的:

1) 多尺度影像构建. 直接采用 2:1 抽样方式, 在 0 层影像 (原始影像) 基础上建立 1 层影像, 同样的方式在 1 层影像基础上建立 2 层影像, 三层影像的大小比为 4:2:1.

2) 线段提取及表达. 用戴激光等^[25] 方法在 0 层影像上提取线段, 该方法能够在保证线段提取精度的基础上, 最大程度提高线段提取长度, 这将有利于线段表达结构的准确性. 同时将线段端点坐标按照缩小 1/2 和 1/4 的方式, 分别映射到 1 层和 2 层影像.

3) 如图 5 所示, 在矩形模板内, 统计各个方向线段的长度, 将其累加到线段方向直方图. 其中, 横轴为线段方向角度分组, 量级单元为 15° , 角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$; 纵轴为线段长度累计值, 其单位为像素. 依此方式, 根据矩形跟踪区域大小不变原则, 可依次构建 1 层与 2 层的线段方向直方图. 如图 5 所示, 在 0 层白色矩形框内, 道路边缘信息并不明显, 但可明显看到路面存在机动车、行树. 统计 0 层线段方向直方图, 可发现线段方向峰值与道路方向一致, 这说明机动车、行树可成为确定道路方向的关键因素, 同时表明利用地物语义关系可确定道路方向. 对比 1 层与 2 层线段方向直方图, 依然可以看到道路方向处于峰值, 充分表明了线段方向直方图的稳定性. 因此本文构建式 (2), 按照 0-1-2 不同层次的顺序, 只要其中一层影像满足此方程即可确定道路方向.

$$Heap_f \geq \alpha \times Heap_s \quad (2)$$

式中, $Heap_f$ 为线段方向直方图中统计的最大峰值,

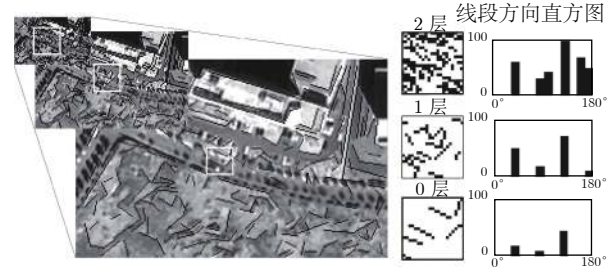


图 5 MSLSOH 描述子

Fig. 5 MSLSOH descriptor

单位为像素; $Heap_s$ 为线段方向直方图中统计的次峰值, 单位为像素; α 为比例因子.

同时, 为避免出现较大误差, 利用动态方向约束线对确定方向进行约束, 即需要满足下述公式:

$$abs(\theta_m - \theta_n) \leq \beta \quad (3)$$

式中, θ_m 为 MSLSOH 描述子确定的道路方向角; θ_n 为当前点与对向动态跟踪方向约束线的夹角; β 为角度约束阈值.

若跟踪过程中出现多峰值或不满足方向约束条件 (如噪声干扰较多、结构信息很不清晰、十字路口), 则以获取上一个跟踪点所用的跟踪方向为标准, 直接采用扇形描述子确定跟踪点.

1.2.2 扇形描述子

在高分辨率遥感影像中, 局部道路具有以下纹理特征:

1) 道路内部纹理均质性. 即道路内部具有一定的纹理相似性规律, 并且这种规律具有可定量描述的特点.

2) 道路内外纹理异质性. 即道路与相邻区域的纹理具有明显的差异性. 但由于受空间异质性的影响, 高分辨率遥感影像道路与邻域的纹理差异不够突出, 因此本文尝试通过道路区域与混合区域的异质性对比来突出道路内部的纹理特征, 以便对 MSLSOH 描述子捕捉的道路方向进行验证. 依据上述思想, 如图 6 所示, 本文以当前跟踪点 O 为中心, 构建多个三角形区域, 进而形成扇形描述子. 其中主瓣端点为 P , 该点为利用 MSLSOH 描述子预测道路方向上的抽样点, 其解算过程如式 (4)、式 (5) 所示.

$$X_{\text{Rectangle}} = x_{\text{Rectangle}} + step \times \cos \theta \quad (4)$$

$$Y_{\text{Rectangle}} = y_{\text{Rectangle}} + step \times \sin \theta \quad (5)$$

($X_{\text{Rectangle}}$, $Y_{\text{Rectangle}}$) 是求取的 P 点坐标; ($x_{\text{Rectangle}}$, $y_{\text{Rectangle}}$) 是当前跟踪点 O 坐标; $step$ 为跟踪步长, 单位为像素.

为避免 MSLSOH 描述子预测的道路方向出现

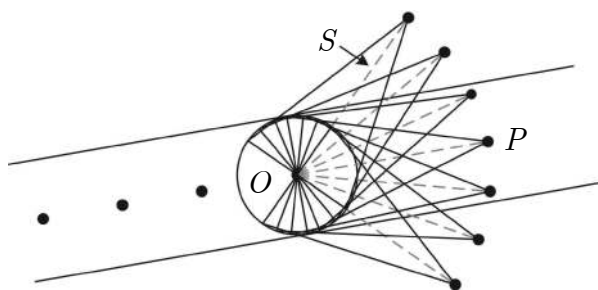


图 6 扇形描述子

Fig.6 Sector descriptor

错误, 以 OP 连线为中心, 左右各旋转三次, 旋转单元为 15° . 由此形成以 O 为中心, 虚线为中线, 道路宽度为底边的多个三角形. 其中主瓣三角形主要表达路面的纹理均质性, 其余侧瓣三角形表达道路与混合区域的纹理差异性. 在分析扇形描述子时, 以扇形内不同三角形区域的方差为统计单元, 构建扇形描述子的定量表达模型, 即 $(\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6)$, 其中 σ_3 为主瓣方差, 其他为相邻侧瓣方差. 依据符合道路方向的区域内纹理均质性更高, 反之包括道路与其他地物的混合区域异质性更高的道路纹理特征确定道路跟踪点.

扇形描述子也能够对 MSLSOH 描述子预测的道路方向进行验证. 当道路几何纹理特征不突出, MSLSOH 描述子无法对跟踪方向进行预测时, 可依据已有跟踪点确定方向建立扇形描述子, 选取方差最小的三角形, 同时满足式 (6) 以确保跟踪过程不发生偏移, 且降低相邻相似地物对道路提取的干扰.

$$\sigma_{\min} \leq \eta \quad (6)$$

式中, $\sigma_{\min}$ 为扇形描述子 7 个三角形中方差最小值, η 为方差阈值.

2 实验结果与分析

2.1 参数设定

鉴于本文方法需要确定多个参数, 为增加参数的普适性, 本文在 3 幅实验影像中, 各随机选取 100 个道路点, 同时选取其他 6 幅影像, 均随机选取 100 个道路点. 对参数设定的原因进行讨论:

1) 梯度总和阈值 μ . 由于道路内部纹理均质性较高, 梯度突变位置通常为道路边界处. 为获取最佳 μ 值, 在不同梯度阈值条件下, 对道路点进行校正. 以梯度阈值为横轴, 以道路点校正精度 (获取正确道路宽度的道路点数与总数的比值) 为纵轴, 绘制梯度阈值分析图, 如图 7 所示. 当 μ 为 400 时, 精

度最高, 由此可以确定梯度总和阈值 μ 为 400.

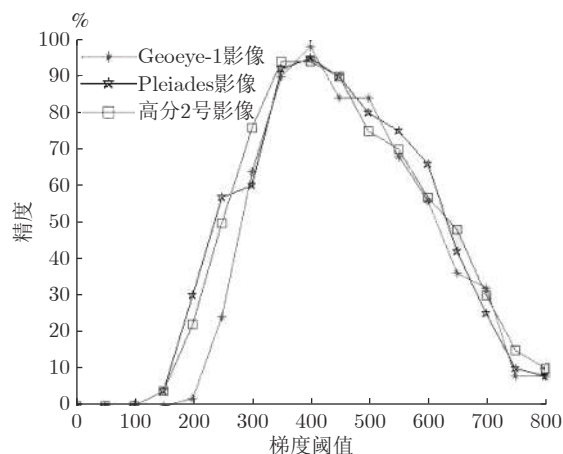


图 7 梯度阈值分析

Fig.7 Gradient threshold analysis

2) 峰值比例因子 α . 由于 MSLSOH 描述子主要展示区域内线段峰值与道路方向间的关系, α 将直接影响获取的道路方向精度. 本文以校正后道路点为中心, 构建 MSLSOH 描述子, 分析在不同的 α 条件下获取的道路方向精度. 如图 8 所示, 当 α 为 1.5 时, 道路方向精度最高; 若 α 值过小, 很容易在多峰值的情况下, 发生道路方向的误提取现象; 若 α 值过大, 则会导致算法的抗噪能力降低.

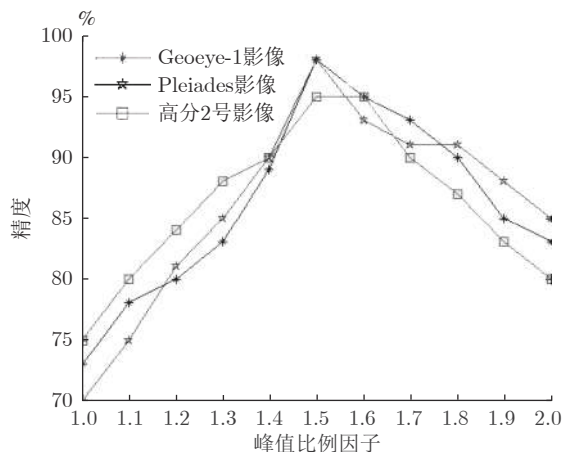


图 8 峰值比例因子分析

Fig.8 Peak scale factor analysis

3) 跟踪步长 $step$. 本文以道路宽度为底边, 三倍道路半径为 $step$ 构建三角形, 同时设置 15° 的偏移角度是为了保证至少有两个三角形始终落在路上, 以减小误差.

4) 方差阈值 η . 该参数是在结构信息不突出的情况下, 避免跟踪过程出现偏差而提出的. 如图 9 所示, 横轴为方差阈值, 纵轴为得到的跟踪点精度

(正确获取的跟踪点与跟踪点总数的比值). 当 η 为 8 或 10 时, 精度均在 95% 以上. 为增强算法的抗噪性, 本文将 η 设置为 10.

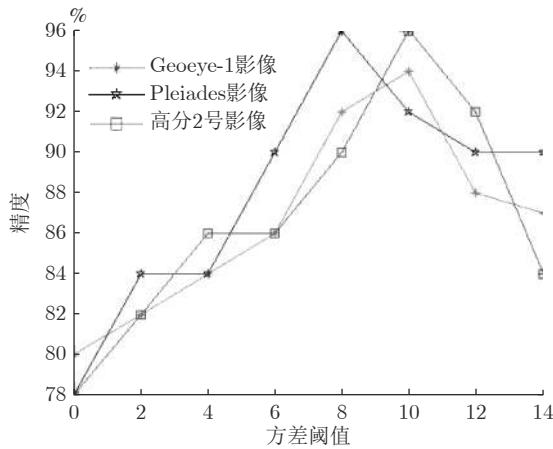


图9 方差阈值分析

Fig.9 Variance threshold analysis

5) 角度约束阈值 β . 该阈值是对跟踪过程中的方向动态约束. 由于道路在局部范围内角度偏差不大, 因此本文将该阈值设定为 $\pi/4$.

2.2 实验设计

为充分展示本文方法的有效性, 本文从影像选取、区域对比、道路类型等 6 个方面进行设计.

1) 影像选取

为展示本文方法在不同分辨率遥感影像道路提取过程中的稳定性, 选取三种不同分辨率的 Geoeye-1 影像 (0.5 m)、Pleiades 影像 (0.5 m)、高分二号影像 (0.8 m), 其影像大小分别为 2000×2000 像素、 2000×2000 像素、 4000×4000 像素.

2) 区域对比

涵盖区域包括城市、城郊以及农村, 其局部影像需要展示区域异质化问题, 包括道路曲率大、建筑物阴影遮挡、树木视觉遮挡, 也应存在机动车、隔离带、相邻相似纹理地物等影响道路提取的干扰问题.

3) 道路类型

考虑本文方法在不同类型道路的适用性, 本文选取区域包括高速路、城市主道路、支路以及乡村道路.

4) 方法对比

近年来道路提取研究多与深度学习方法有关, 深度学习方法是采用迁移学习的方法, 需预先建立大量的训练数据集; 而本文方法属于人工设计传统方法, 无需先验知识. 前提条件的差异导致两者间

难以开展定量对比分析, 因此本文选取传统方法进行对比实验. 考虑到近年来基于模板匹配的道路提取方法研究进展缓慢, 本文首先选取成熟软件 Easytrace 模块进行对比, 该模块属于经典的剖面模板匹配方法; 其次对林祥国等^[12]提出的 T 型模板匹配方法和连仁包等^[31]提出的自适应圆型模板采用 C++ 语言进行代码编写, 作为对比实验方法.

5) 种子点的选取及补点分析

本文算法在进行人工输入点时, 通常需要根据输入规则, 即在道路起止点附近、结构清晰且无明显车辆阴影及遮挡处选取种子点. 跟踪过程中, 受到路边行树及其阴影等因素的干扰和跟踪方式的限制, 丁字型路口、L 型路口、曲率较大路段、道路边界不清晰路段会不可避免地出现跟踪断裂现象, 此时需要进行补点. 但断裂区域往往结构不清晰且遮挡情况严重, 因此本文选择在断裂区域的前方不远处进行补点, 同时将输入点分别与原起点和原终点进行组合, 重新进行跟踪, 以此完成对道路的完整提取. Erdas 软件中 Easytrace 模块属于一种剖面模板匹配方法, 需要人工输入种子点, 通过部分点之间的跟踪要素定义并指定具体特征或目标. T 型模板则需同时输入两个种子点以确定跟踪方向, 同时以两点为基础进行迭代内插跟踪. 圆型模板输入种子点要求与本文一致, 此算法以两输入点为基础, 根据中垂线上的候选点与两点的匹配程度确定跟踪点, 并以迭代内插的方式完成道路中心线的提取.

6) 质量评价

在质量评价中, 本文选取经典模型即 Wiedemann 等^[32]提出的完整率 (Completeness)、正确率 (Correctness)、提取质量 (Quality) 三个指标对实验结果进行评价. 三个指标的计算公式如下:

$$Completeness = \frac{D}{D + N} \quad (7)$$

$$Correctness = \frac{D}{D + P} \quad (8)$$

$$Quality = \frac{D}{D + P + N} \quad (9)$$

式中, D 表示正确提取的道路总长度, N 表示未检测的参考道路总长度, P 表示误提取的道路总长度. 上述三个评价指标的最优值均为 1.

在上述三个指标的基础上, 本文根据输入参数个数引入自动化程度作为检验指标. 以本文方法为例, 输入一个种子点需要加入一个参数, Erdas 软件每次人工选取一个种子点也需要输入一个参数, 而 T 型模板和圆型模板每次需要人工输入两个点, 即为两个参数.

2.3 实验结果

1) 实验一

图 10 为 2 000 × 2 000 像素的 Geoeye-1 影像, 覆盖区域为城郊, 该区域道路包含具有一定曲率的多条高速公路、支路, 并且相互之间有连通关系。

表 1 为不同方法的定量分析, 可以看到 4 种方法完整度较高, 均大于 90%, 这充分说明利用人机交互的半自动模板匹配方法具有精度高的优势。可以看出 Erdas 方法自动化程度最低, 次之分别为 T 型模板方法和圆型模板方法, 本文方法自动化程

度最高。

如图 10 (a) 右上侧放大图所示, 该区域为道路跟踪过程中出现隔离带, 道路宽度发生突变, 并且路面存在机动车。本文利用 MSLSOH 描述子预测道路方向, 通过扇形描述子确定道路跟踪点, 如图 10 (a) 右上侧放大图所示, 可自动完成对该路段的提取。而如图 10 (b) 右上侧放大图中 Erdas 方法以及图 10 (c) 右上侧放大图中 T 型模板方法, 受到局部道路影像几何纹理特征突出性下降的影响, 均需要补充种子点。如图 10 (a) 右下侧放大图所示, 当道路出现树

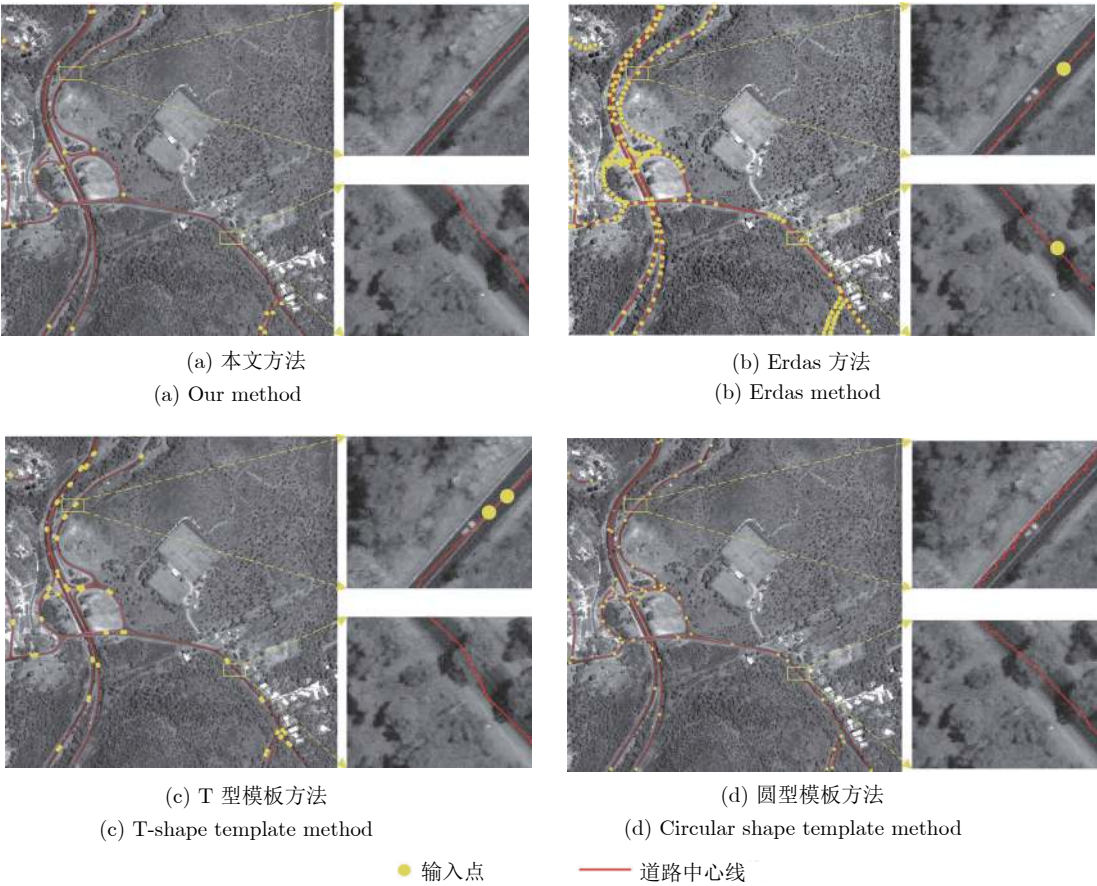


图 10 Geoeye-1 影像道路中心线提取
Fig.10 Road centerline extracted for Geoeye-1 image

表 1 不同道路提取方法对比
Table 1 Comparison of different methods for road extraction

评价参数	本文方法			Erdas 算法			T 型模板算法			圆型模板算法		
	实验一	实验二	实验三	实验一	实验二	实验三	实验一	实验二	实验三	实验一	实验二	实验三
完整度 (%)	99.7	99.7	99.6	99.8	99.6	99.7	94.7	99.2	97.4	99.4	99.7	99.1
正确率 (%)	99.5	96.4	99.4	99.6	99.7	99.8	96.4	88.5	99.1	99.5	96.3	98.7
提取质量 (%)	99.2	96.0	99.1	99.4	99.3	99.5	90.8	87.9	96.5	98.9	96.0	97.8
种子点数 (个)	22	6	24	199	62	107	70	34	110	61	13	46
运行时间 (s)	348	102	374	803	259	457	416	152	553	279	116	231

木导致的视觉遮挡问题时, 由于覆盖路面区域较少, 本文采用 MSLSOH 描述子的多尺度特征可以预测道路方向, 利用扇形描述子中道路和混合区域的纹理对比自动提取该路段. 而如图 10 (b) 右下侧放大图所示, Erdas 方法在此区域提取效果较差, 需要增加种子点以保障此段道路的提取质量. 圆型模板则可以解决在机动车干扰及视觉遮挡下的道路跟踪问题.

2) 实验二

图 11 是覆盖区域为辽宁省葫芦岛市某农村区域的 Pleiades 影像 (大小为 $2\,000 \times 2\,000$ 像素), 空间分辨率为 0.5 m, 该区域道路类型以农村公路为主. 由于部分农村区域道路宽度低于 2 m, 依据第三次全国土地调查对道路宽度的要求, 该部分道路未予提取. 该区域中由于道路设计为村级公路, 因而道路曲率较大, 同时道路两侧存在树木阴影遮挡问题. T 型模板虽然输入点较少 (34 个), 但明显存在正确率和提取质量下降问题, 表明该方法需要进一步补充人工输入点. 圆型模板自动化程度较高, 但也需要 13 个人工输入点. 而本文方法仅需要输

入 6 个点, 其完整度、正确率和提取质量均在 96% 以上. 虽然 Erdas 方法精度最高, 但其人工输入点数量远远超过本文方法、圆型模板及 T 型模板方法. 同时对道路跟踪结果局部放大后分析, 可以看到在树木阴影区域 (图 11 (a) 右上侧放大图) 和道路拐弯处 (图 11 (a) 右下侧放大图), 本文方法均可完成对道路线的提取. 而 Erdas 方法, 在两个区域均需要补充人工输入点; 图 11 (c) 右上侧放大图中, T 型模板在该路段不需要补充输入点, 但提取的道路线明显出现错误; 图 11 (d) 右下侧放大图可以看出, 在较大弯路路段, 圆型模板方法也同样需补充人工输入点.

3) 实验三

本实验对辽宁省某市中心城区地带 $4\,000 \times 4\,000$ 像素的高分二号影像进行道路中心线提取, 影像空间分辨率为 0.8 m. 由于道路位于城区, 规划比较标准, 道路曲率变化不大, 这为利用 MSLSOH 描述子捕捉道路跟踪方向提供了前提条件. 如图 12 (a) 右上侧放大图, 虽然建筑物阴影已经覆盖在道路上, 但由于仅为部分覆盖, 利用 MSLSOH 描述子的多

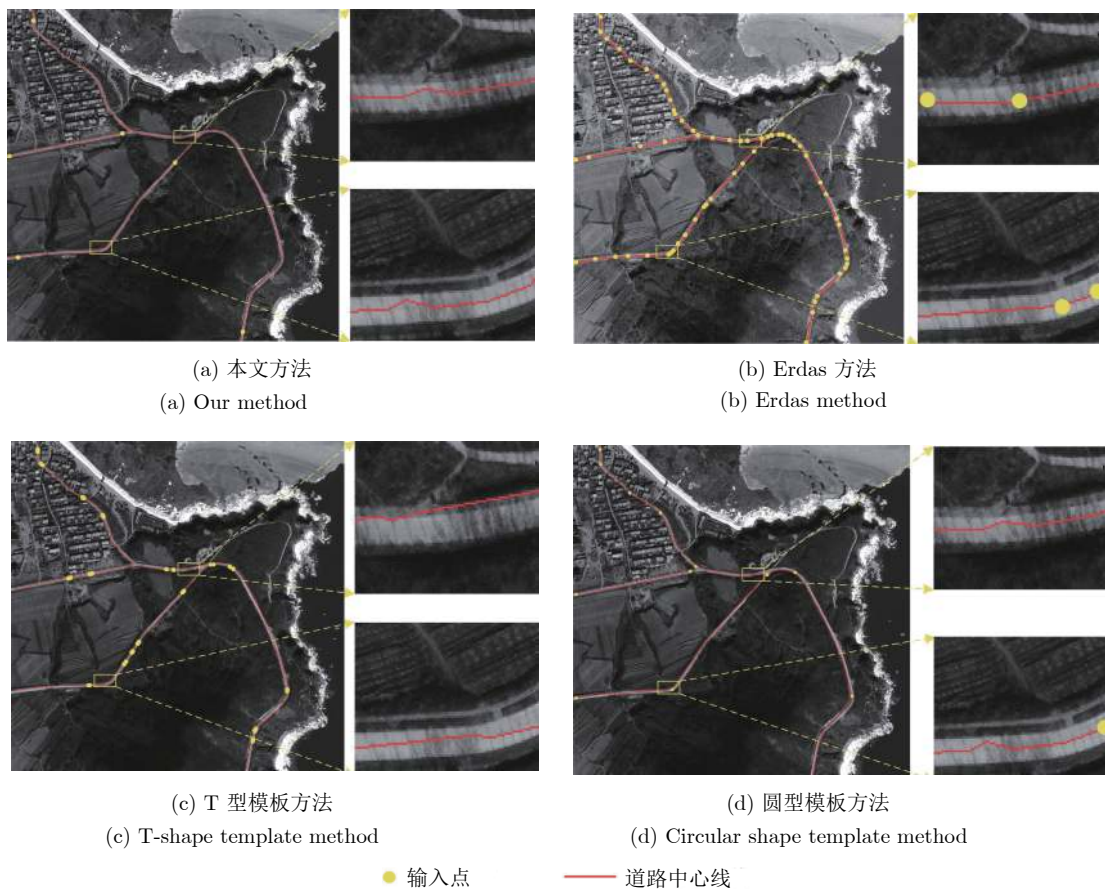


图 11 Pleiades 影像道路中心线提取

Fig.11 Road centerline extracted for Pleiades image

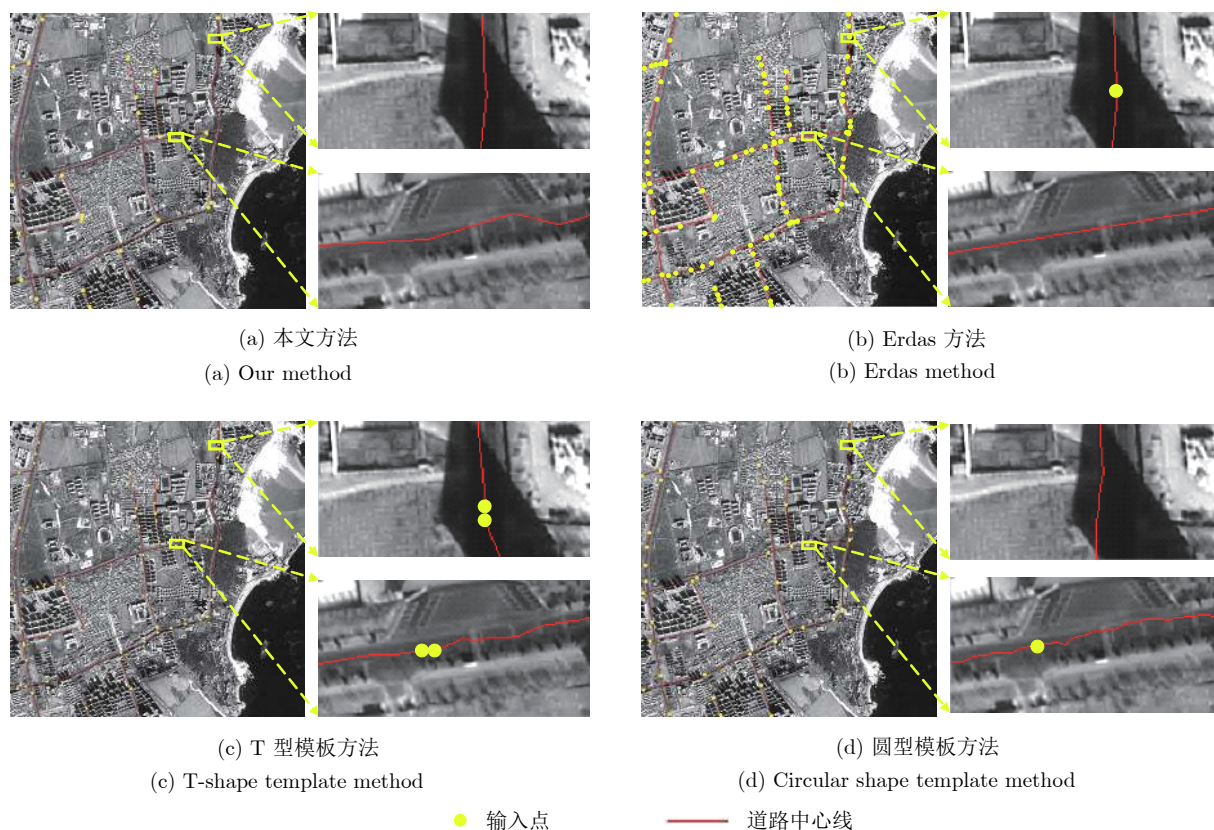


图 12 高分 2 号影像道路中心线提取

Fig. 12 Road centerline extracted for GF-2 image

尺度特征可直接捕捉道路方向, 从而实现了道路阴影的跨越. 而 Erdas 方法、T 型模板方法则需要补充种子点. 如图 12 (a) 右下侧放大图, 路面与建筑物门口纹理趋同, 这使得 T 型模板和圆型模板需要通过补点的方式完成此路段的跟踪. 而 MSLSOH 描述子可利用车辆的局部边缘信息提取线段方向峰值, 完成对此路段的跟踪.

表 1 中的运行时间为进行实验所需的总时间. 可以看出, 本文方法的完整度与 Erdas 方法、圆型模板方法和 T 型模板方法相差不大. 本文方法的正确率、提取质量均优于 Erdas 方法、圆型模板方法和 T 型模板方法. 在自动化程度上, 本文方法大幅优于 Erdas 方法、圆型模板方法和 T 型模板方法. 由此可知, 本文方法在保证道路提取精度的基础上, 大幅提高了模板匹配方法的自动化程度.

3 结论

本文针对场景空间异质性导致的道路几何纹理特征下降, 进而引起传统模板匹配方法出现自动化程度下降问题, 提出一种高分辨率遥感影像道路提取方法, 并进行了不同空间异质性问题的遥感影像道路提取. 主要工作包括:

1) 确定了道路迭代内插与双向迭代相结合的跟踪方式, 在输入点的基础上自适应获取道路中心点及道路宽度信息, 由此自动构建了初始跟踪模板.

2) 建立 MSLSOH 描述子. 该描述子建立了道路内部、边缘、邻域地物边缘与道路方向间的语义关系, 通过统计多尺度线段方向峰值的方式, 捕捉道路方向信息, 以此解决场景空间异质性导致的道路几何纹理特征下降问题.

3) 建立扇形描述子. 该描述子针对空间异质性导致的道路影像几何纹理特征下降问题, 通过构建道路与混合区域, 突出道路的几何纹理特征. 通过多个三角形构建扇形描述子, 以此对道路跟踪点进行验证和提取.

通过实验分析, 本文方法较好地解决了道路提取过程中的场景空间异质性问题. 但本文方法也存在一定的限制条件, 即目前实验中的视觉遮挡、阴影遮挡仅是覆盖道路局部区域, 如何应对更大幅度的路面遮挡将是未来面临的难题之一. 同时在 L 型和 T 型路口, 道路方向出现大于 45° 的变化时, 本文方法需要进行补点处理, 如何改进方法、提高自动化程度也是需要重点解决的问题.

References

- Cao Fan-Zhi, Zhu Shu-Long, Zhu Bao-Shan, Li Run-Sheng, Meng Wei-Can. Tracking road centerlines from remotely sensed imagery using mean shift and Kalman filtering. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, **45**(2): 205–212
(曹帆之, 朱述龙, 朱宝山, 李润生, 孟伟灿. 均值漂移与卡尔曼滤波相结合的遥感影像道路中心线追踪算法. 测绘学报, 2016, **45**(2): 205–212)
- Dai Ji-Guang, Du Yang, Fang Xin-Xin, Wang Yang, Miao Zhi-Peng. Road extraction method for high resolution optical remote sensing images with multiple feature constraints. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(5): 777–791
(戴激光, 杜阳, 方鑫鑫, 王杨, 苗志鹏. 多特征约束的高分辨率光学遥感影像道路提取. 遥感学报, 2018, **22**(5): 777–791)
- Vosselman G, De Knecht J. Road tracing by profile matching and kaiman filtering. *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images*. Basel: Birkhäuser, 1995. 265–274
- Blaschke T, Hay G J, Weng Q H, Resch B. Collective sensing: Integrating geospatial technologies to understand urban systems—An overview. *Remote Sensing*, 2011, **3**(8): 1743–1776
- Blaschke T, Hay G J, Kelly M, Lang S, Hofmann P, Addink E, et al. Geographic object-based image analysis-towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **87**: 180–191
- Talbot H, Appleton B. Efficient complete and incomplete path openings and closings. *Image and Vision Computing*, 2007, **25**(4): 416–425
- Schubert H, Van De Gronde J J, Roerdink J B T M. Efficient computation of greyscale path openings. *Mathematical Morphology - Theory and Applications*, 2016, **1**: 189–202
- Dai Ji-Guang, Miao Zhi-Peng, Ge Lian-Mao, Wang Xiao-Tong, Zhu Ting-Ting. Road extraction method based on path morphology for high resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing Information*, 2019, **34**(1): 28–35
(戴激光, 苗志鹏, 葛连茂, 王晓桐, 朱婷婷. 结合路径形态学的高分遥感影像道路提取方法. 遥感信息, 2019, **34**(1): 28–35)
- Hu X Y, Zhang Z X, Zhang J Q. An approach of semiautomated road extraction from aerial image based on template matching and neural network. In: *Proceedings of the 19th International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, Netherlands: Amsterdam University, 2000. 994–999
- Leninisha S, Vani K. Water flow based geometric active deformable model for road network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, **102**: 140–147
- Sun Chen-Yang, Zhou Ting-Gang, Chen Sheng-Bo, Shen Jing-Wei, Wang Jun-Fei, Yang Hua. Research of a semi-automatic extraction method for linear features based on rectangular template matching. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, **37**(7): 155–160
(孙晨阳, 周廷刚, 陈圣波, 沈敬伟, 王骏飞, 杨桦. 基于矩形模板匹配的线状地物半自动提取方法研究. 西南大学学报(自然科学版), 2015, **37**(7): 155–160)
- Lin Xiang-Guo, Zhang Ji-Xian, Li Hai-Tao, Yang Jing-Hui. Semi-automatic extraction of ribbon road from high resolution remotely sensed imagery by a T-shaped template matching. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, **34**(3): 293–296
(林祥国, 张继贤, 李海涛, 杨景辉. 基于 T 型模板匹配半自动提取高分辨率遥感影像带状道路. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, **34**(3): 293–296)
- Xu C Y, Prince J L. Gradient vector flow: A new external force for snakes. In: *Proceedings of the 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Juan, USA: IEEE, 1997. 66–71
- Li C M, Kao C Y, Gore J C, Ding Z H. Minimization of region-scalable fitting energy for image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, **17**(10): 1940–1949
- Tang Wei, Zhao Shu-He. Road extraction in quaternion space from high spatial resolution remotely sensed images basing on GVF Snake model. *Journal of Remote Sensing*, 2011, **15**(5): 1040–1052
(唐伟, 赵书河. 基于 GVF 和 Snake 模型的高分辨率遥感图像四元数空间道路提取. 遥感学报, 2011, **15**(5): 1040–1052)
- Nakaguro Y, Makhanov S S, Dailey M N. Numerical experiments with cooperating multiple quadratic snakes for road extraction. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, **25**(5): 765–783
- Sethian J A. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, **93**(4): 1591–1595
- Wu Xue-Wen, Xu Han-Qiu. Level set method major roads information extract from high-resolution remote-sensing imagery. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(5): 1495–1502
(吴学文, 徐涵秋. 一种基于水平集方法提取高分辨率遥感影像中主要道路信息的算法. 宇航学报, 2010, **31**(5): 1495–1502)
- Gong Jian-Ya, Ji Shun-Ping. Photogrammetry and deep learning. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(6): 693–704
(龚健雅, 季顺平. 摄影测量与深度学习. 测绘学报, 2018, **47**(6): 693–704)
- Alshehhi R, Marpu P R. Hierarchical graph-based segmentation for extracting road networks from high-resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, **126**: 245–260
- Cheng G L, Wang Y, Xu S B, Wang H Z, Xiang S M, Pan C H. Automatic road detection and centerline extraction via cascaded end-to-end convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(6): 3322–3337
- Zhang Z X, Liu Q J, Wang Y H. Road extraction by deep residual U-Net. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, **15**(5): 749–753
- Liu Ru-Yi, Song Jian-Feng, Quan Yi-Ning, Xu Peng-Fei, Xue Qing, Yang Yun, et al. Automatic road extraction method for high-resolution remote sensing images. *Journal of Xidian University*, 2017, **44**(1): 100–105
(刘如意, 宋建锋, 权义宁, 许鹏飞, 雪晴, 杨云, 等. 一种自动的高分辨率遥感影像道路提取方法. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, **44**(1): 100–105)
- Cardim G P, Da Silva E A, Dias M A, Bravo I, Gardel A. Statistical evaluation and analysis of road extraction methodologies using a unique dataset from remote sensing. *Remote Sensing*, 2018, **10**(4): Article No. 620
- Dai Ji-Guang, Zhang Li, Li Jin-Wei, Fang Xin-Xin. A line extraction method for chain code tracking with phase verification. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(2): 218–227
(戴激光, 张力, 李晋威, 方鑫鑫. 一种链码跟踪与相位验证相结合的直线提取方法. 测绘学报, 2017, **46**(2): 218–227)
- Tan Ren-Long, Wan You-Chuan, Yuan Fang, Li Gang. Semi-automatic road extraction of high resolution remote sensing images based on circular template. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(10): 63–66
(谭仁龙, 万幼川, 袁芳, 李刚. 基于圆形模板的高分辨率遥感影像道路半自动提取. 测绘通报, 2014(10): 63–66)
- Hu Xiang-Yun, Zhang Zu-Xun, Zhang Jian-Qing. Semiautomatic extraction of linear object from aerial image. *Journal of Image and Graphics*, 2002, **7**(2): 137–140
(胡翔云, 张祖勋, 张剑清. 航空影像上线状地物的半自动提取. 中国图象图形学报, 2002, **7**(2): 137–140)
- Miao Z L, Wang B, Shi W Z, Zhang H. A semi-automatic method for road centerline extraction from VHR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(11): 1856–1860

- 29 Yang Y, Zhu C Q. Extracting road centrelines from high-resolution satellite images using active window line segment matching and improved SSDA. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(9): 2457–2469
- 30 Yu Jie, Yu Feng, Zhang Jing, Liu Zhen-Yu. High resolution remote sensing image road extraction combining region growing and road-unit. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(7): 761–764
(余洁, 余峰, 张晶, 刘振宇. 结合区域生长与道路基元的高分辨率遥感影像道路提取. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, **38**(7): 761–764)
- 31 Lian Ren-Bao, Wang Wei-Xing, Li Juan. Road extraction from high-resolution remote sensing images based on adaptive circular template and saliency map. *Acta Geodactica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(7): 950–958
(连仁包, 王卫星, 李娟. 自适应圆形模板及显著图的高分辨遥感图像道路提取. 测绘学报, 2018, **47**(7): 950–958)
- 32 Wiedemann C, Ebner H. Automatic completion and evaluation of road networks. In: *Proceedings of the 19th International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam: ISPRS, 2000. 979–986



戴激光 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院副教授. 2013 年获得辽宁工程技术大学博士学位. 主要研究方向为遥感影像信息提取. 本文通信作者. E-mail: daijg03@163.com

(DAI Ji-Guang Associate professor at the School of Geomatics,

Liaoning Technical University. He received his Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2013. His main research interest is information extraction from remote sensing images. Corresponding author of this paper.)



朱婷婷 辽宁工程技术大学硕士研究生. 2017 年获得辽宁工程技术大学学士学位. 主要研究方向为遥感影像道路提取.

E-mail: tingting9295@163.com

(ZHU Ting-Ting Master student at Liaoning Technical University. She

received her bachelor degree from Liaoning Technical University in 2017. Her main research interest is road extraction from remote sensing images.)



张依蕾 辽宁工程技术大学硕士研究生. 2018 年获得辽宁工程技术大学学士学位. 主要研究方向为矢量信息分析. E-mail: zhangyilei@lntu.edu.cn

(ZHANG Yi-Lei Master student at Liaoning Technical University. She

received her bachelor degree from Liaoning Technical University in 2018. Her main research interest is vector analysis.)



马榕辰 辽宁工程技术大学硕士研究生. 2018 年获得辽宁工程技术大学学士学位. 主要研究方向为遥感影像特征提取.

E-mail: 471820526@stu.lntu.edu.cn

(MA Rong-Chen Master student at Liaoning Technical University. She

received her bachelor degree from Liaoning Technical University in 2018. Her main research interest is feature extraction from remote sensing images.)



王晓桐 辽宁工程技术大学硕士研究生. 2018 年获得辽宁工程技术大学学士学位. 主要研究方向为道路信息提取.

E-mail: wangxiaotong@lntu.edu.cn

(WANG Xiao-Tong Master student at Liaoning Technical University. She

received her bachelor degree from Liaoning Technical University in 2018. Her main research interest is road information extraction.)



张腾达 辽宁工程技术大学硕士研究生. 2018 年获得辽宁工程技术大学学士学位. 主要研究方向为遥感影像信息提取.

E-mail: zhangtengda@lntu.edu.cn

(ZHANG Teng-Da Master student at Liaoning Technical University. He

received his bachelor degree from Liaoning Technical University in 2018. His main research interest is information extraction from remote sensing images.)