

基于主方向的建筑物轮廓优化方法

潘美美¹, 常京新¹, 高贤君^{1*}, 杨元维^{1,2,3}, 钟康¹¹长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;²湖南科技大学测绘遥感信息工程湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;³城市空间信息工程北京市重点实验室, 北京 100045

摘要 现有常规分类识别建筑物的提取方法容易受到周围复杂环境的干扰而导致错误检测,造成建筑物的边界存在不规则、与真实形状不符等问题。针对此问题,提出一种基于主方向的建筑物轮廓优化方法。首先,依据影像和建筑物特征对建筑物初始提取结果进行预处理,剔除非建筑物图斑和散乱线段。然后,结合建筑物正外接矩形判定建筑物主方向,并利用主方向对建筑物对象进行轮廓重构,得到初步规则化结果。最后,结合初始建筑物提取结果,计算边界特征强度,进一步降低规则化后的偏差,实现建筑物轮廓的深度优化。此外,通过与其他方法进行对比,对相关参数进行讨论分析。结果表明:相较于对比方法,所提方法能够有效提高建筑物初始提取结果的完整性和规则化程度,并且能够对不同大小与复杂度的建筑物进行细节优化,从而获得更高的优化精度;所提方法可作为建筑物提取后优化的参考方法。

关键词 遥感; 高分辨率遥感影像; 建筑物轮廓优化; 主方向; 最佳外接矩形

中图分类号 TP753

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828005

Building Contour Optimization Method Based on Main Direction

Pan Meimei¹, Chang Jingxin¹, Gao Xianjun^{1*}, Yang Yuanwei^{1,2,3}, Zhong Kang¹¹School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China;²Hunan Provincial Key Laboratory of Geo-Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;³Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100045, China

Abstract The traditional building extraction methods for classification and identification are susceptible to interference from the complex environment and can lead to false detection. As a result, the building contour is irregular and inconsistent with the actual shape. To solve this problem, a building contour optimization method based on the main direction is proposed. Firstly, according to the image and building features, the initial extraction results of a building are pretreated to remove non-building patterns and scattered line segments. Then, the main direction of the building is determined by considering its positive circumscribed rectangle, and it is used to reconstruct the building contour for the preliminary regularization result. Finally, the boundary characteristic strength is calculated with the initial result to further reduce the deviation after regularization, and achieve depth optimization of building contours. In addition, by comparing with other methods, the relevant parameters are discussed and analyzed. The result indicates that compared with other methods, this method can effectively improve the integrity and regularity of the initial result, and it can finely optimize the buildings with different sizes and complexity to obtain higher optimization accuracy. The proposed method can be used as a reference method for optimization after building extraction.

Key words remote sensing; high-resolution remote sensing images; building contour optimization; main direction; optimal circumscribed rectangle

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-04-01

基金项目: 城市空间信息工程北京市重点实验室经费资助(20210205)、湖南科技大学测绘遥感信息工程湖南省重点实验室开放基金(E22133,E22205)、海南省地球观测重点实验室开放基金(2020LDE001)、自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金(2020NGCM07)、城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程实验室开放课题基金(2021ZH02)

通信作者: junxgao@whu.edu.cn

1 引言

建筑物作为城市场景中最具代表性的人工目标之一,从高分辨率遥感(HRRS)影像中提取建筑物在土地利用调查、城市规划和灾害应急评估等领域中具有重要意义^[1]。现有的HRRS影像建筑物分类方法^[2-6]易受到周围地物的干扰,造成建筑物提取结果中出现漏分、错分和边界不规则等问题。因此,在基于建筑物轮廓准确性的条件下,进一步研究建筑物轮廓优化方法,实现建筑物边缘信息的完整提取和规则化,对满足现有的应用需求具有重要的研究意义^[7]。

HRRS影像建筑物优化方法主要可分为三类,即数学形态学法、对象特征法和辅助信息法。数学形态学法是利用腐蚀、膨胀、开运算和闭运算及其推导、组合算法,对图像进行形状与结构的分析和处理。游永发等^[8]在建筑物区域边界识别后,利用顶帽变换、阈值分割和特征约束等技术实现建筑物细节信息的提取优化,可在一定程度上抑制虚假特征点和特征冗余现象。高贤君等^[9]利用阴影结合支持向量机(SVM)^[10]分类模型的方法提取建筑物的初始结果,再利用形态学处理方法^[11]优化建筑物结果。该类方法将一幅影像中所有的建筑物一起优化,不能全面地考虑不同建筑物的细节差异。对象特征法是基于建筑物对象的特征如几何特征、拓扑关系等提取和优化建筑物轮廓^[12-13]。张祖勋等^[14]通过人工勾画角点的初始位置,利用物方空间几何约束的最小二乘匹配模型求取房屋精确的轮廓定位。尹峰等^[15]使用基于模板的角点检测算子来提取角点,综合角点的位置、角度和显著性等信息,利用空间投票和阈值分割来提取建筑物。然而,这类方法会受到人为因素或周边干扰地物等因素的影响,由于某些角点的模糊或缺失,故会导致提取的建筑物轮廓局部不规则。辅助信息法借助辅助信息如数字表面模型(DSM)数据、数字高程模型(DEM)数据和多时相数

据等进行建筑物轮廓优化。常京新等^[16]利用两期高分影像获得了建筑物的提取结果,通过角点匹配和最优边选择的方式优化了建筑物轮廓。该方法对建筑物被植被遮挡引起的漏分有修复效果,但对影像数据要求较高。Mousa等^[17]利用DSM数据获取高程信息,采用数据驱动与模型驱动相结合的方式对建筑物规则化,可以有效解决建筑物漏分的问题,但该方法过于依赖高程参数。

基于以上分析,本文针对分类法提取建筑物形态不规则、轮廓信息不完整的问题,提出一种基于主方向的建筑物轮廓优化方法。在经分类方法提取的初始建筑物图像的基础上,首先利用几何特征如多边形面积、线段夹角和线段长度等对图像进行预处理。然后,结合建筑物轮廓及其外接矩形提取最佳主方向,依据最佳主方向对建筑物轮廓进行规则化重构。最后,在规则化重构后的建筑物轮廓上叠加上初始建筑物图像,将复杂建筑物轮廓进行深度优化,以实现建筑物轮廓向真实目标轮廓的逼近,进而达到提升建筑物轮廓精度的效果。

2 所提轮廓优化方法

所提轮廓优化方法流程图如图1所示。首先,利用分类法获得建筑物的初始提取结果,对建筑物提取结果进行预处理,选取合适的面积阈值、长度阈值和角度阈值进行非建筑物图斑和散乱线段的剔除。然后,利用建筑物轮廓的外接矩形^[18-19]与其最长线段相结合来提取主方向,以主方向为基准,对预处理后的轮廓线段进行校正,使其与主方向保持水平或垂直,并依据相邻线段间的位置关系和拓扑关系如平行、相交等,对校正后的线段进行接合,以构建规则化的轮廓。最后,将规则化的轮廓与建筑物提取结果叠加,依据边界特征强度^[20]确定轮廓上每一条边的最佳位置,使轮廓与建筑物边界贴合,进而提高建筑物的优化精度。

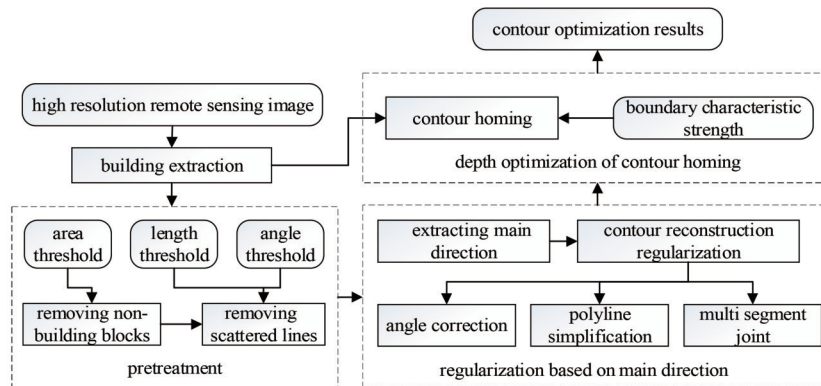


图 1 建筑物轮廓优化流程图

Fig. 1 Flow chart of building contour optimization

2.1 建筑物轮廓的提取及预处理

在高分辨率遥感影像中,常因建筑物与周围裸地、道路和车辆等光谱相似,而导致提取结果中存在误检与漏检。对建筑物轮廓进行提取及预处理可以剔除错

误检测的部分,进而可以使得建筑物轮廓更加平整。首先,利用SVM分类方法提取建筑物区域,通过中值滤波处理去除噪声,这样可以有效保护建筑物边缘信息,并将得到的结果作为建筑物的初始提取结果。然

后,对初始提取结果进行预处理,排除非建筑物的多边形、点和线^[21]。预处理方法主要包括以下两个部分。

1) 剔除非建筑物图斑。为了排除比常规建筑物小很多的连通域,假设建筑物轮廓面积为 δ ,面积阈值为 ω ,若 $\delta < \omega$,则删除该连通域。面积阈值 ω 与影像分辨率成正比,即分辨率越高,面积阈值 ω 越大。处理后的结果如图 2(c)所示,与图 2(b)所示的初始轮廓提取结果相比,预处理后的结果剔除了明显不是建筑物的区域。

2) 剔除散乱线段。为了减少多边形上的锯齿,应当

去除建筑物轮廓中的部分短线段。假设当前建筑物轮廓面积为 δ ,长度阈值为 ν ,轮廓线段集合为 $N = \{0, 1, \dots, \mu\}$,相邻的三条轮廓线段分别为 $N_{\mu-1}, N_{\mu}, N_{\mu+1}$,若 $N_{\mu-1}, N_{\mu}$ 和 $N_{\mu+1}$ 的长度均小于 ν ,则删去线段 N_{μ} 。长度阈值 ν 与建筑物轮廓面积 δ 成正比,即 δ 越大,该建筑物的长度阈值 ν 越大。由于建筑物轮廓上可能存在突兀的节点,因此可通过移除角度小于阈值 α 的尖锐角和角度大于阈值 β 的平滑角,得到相对平滑的轮廓。处理后的结果如图 2(f)所示,与图 2(e)所示的初始轮廓提取结果相比,预处理后结果的轮廓更加平滑。



图 2 预处理前后的结果对比。(a)(d)原始遥感图;(b)(e)初始轮廓提取结果;(c)(f)预处理后的结果

Fig. 2 Comparison of results before and after pretreatment. (a)(d) Original remote sensing images; (b)(e) results of initial contour extraction; (c)(f) results after pretreatment

2.2 基于主方向的规则化

城市场景中大部分建筑物为矩形或矩形组合的直角建筑物,预处理方法可以去除部分错误检测的轮廓和短小的散乱线段,但是轮廓边界处还是会存在锯齿

等结构。为解决上述问题,提出了一种基于主方向^[22]规则化建筑物轮廓的方法,该方法流程图如图 3 所示。

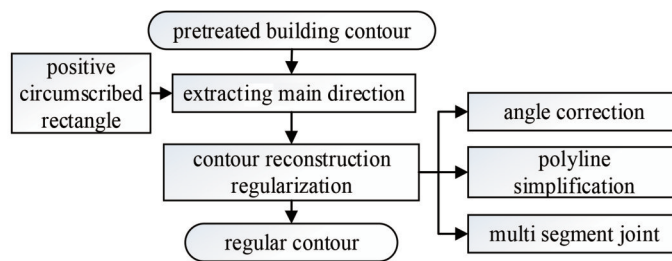


图 3 轮廓重构规则化方法流程图

Fig. 3 Flow chart of contour reconstruction regularization method

2.2.1 建筑物主方向提取

建筑物主方向提取示意图如图 4 所示,主要可分为三步,即轮廓旋转至水平方向、提取初始主方向与参考方向和判定最佳主方向。

多边形的正外接矩形是以多边形顶点中的最大坐标和最小坐标来确定的矩形。本文规定轮廓的主方向由其正外接矩形与轮廓的最长线段方向共同判定。在轮廓旋转某一角度后,其与正外接矩形的面积比达到

最大,此时认为已将轮廓主方向旋转至水平方向或垂直方向。

由于建筑物周边地物的复杂性,会有干扰线段影响建筑物主方向的判断,导致主方向选取存在误差,因此需要进一步确认建筑物的主方向。在获得水平方向的轮廓之后,以轮廓上的一条最长线段的方向作为初始主方向,利用 X 轴方向或 Y 轴方向作为参考方向,如图 4 所示。

根据初始主方向与参考方向夹角越小,则参考价值越大的原则,设定夹角阈值为 θ ,建议 θ 的取值范围为 $\theta \in [0^\circ, 10^\circ]$ 。若 $|\theta_0 - \theta_c| \leq \theta$,即参考方向与初始主方向夹角较小,并且此时的建筑物主方向与参考方向一致,则可将 θ_c 设定为最佳主方向。若 $|\theta_0 - \theta_c| > \theta$,则认为当前建筑物为非直角多边形,此时强行调整可能会破坏建筑物的轮廓结构,因此使用初始主方向作

为最佳主方向更符合优化要求。建筑物主方向的计算方式为

$$\theta_m = \begin{cases} \theta_c, & |\theta_0 - \theta_c| \leq \theta \\ \theta_0, & |\theta_0 - \theta_c| > \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中: θ_0 为初始主方向的角度; θ_c 为参考方向的角度,参考方向选取X轴方向和Y轴方向中与初始主方向夹角更小的方向; θ_m 为最佳主方向。

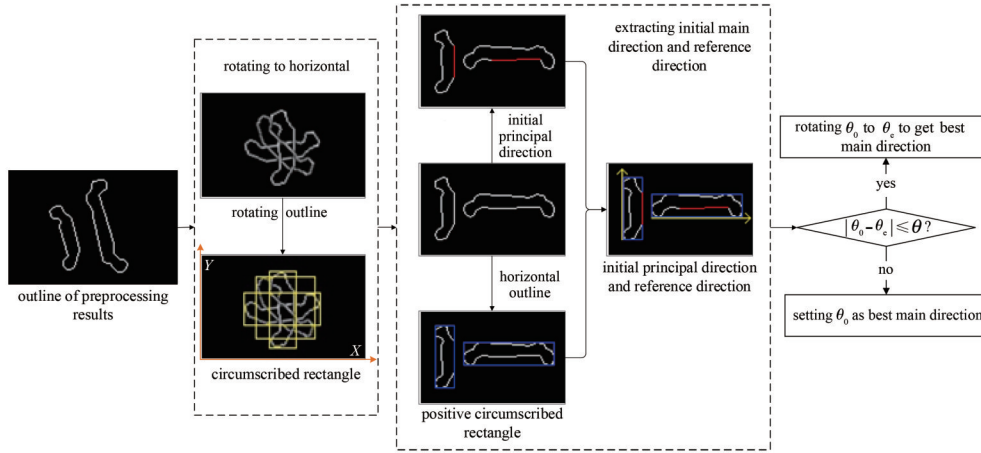


图 4 提取最佳主方向的流程图

Fig. 4 Flow chart of extracting best main direction

2.2.2 轮廓重构规则化

建筑物主方向的正确获取可以为轮廓重构提供依据。以主方向为基准,将建筑物轮廓线段分别旋转至与主方向水平的方向或垂直的方向。在旋转完成后,

相邻线段间相互独立且会存在错位分布的问题,如图5(b)所示,所以也应对这些独立线段进行相应的处理,利用两条或多条线段间的关系,将其相互连接,进而得到完整的规则轮廓,如图5(d)所示。

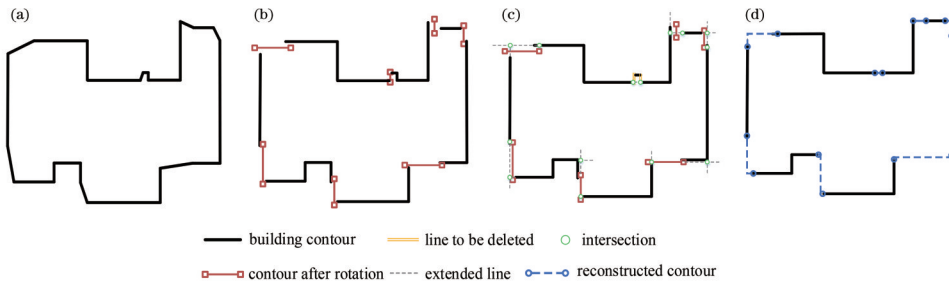


图 5 规则化算法示意图。(a)建筑物轮廓线;(b)校正线段角度;(c)简化折线及接合线段;(d)重构后的轮廓

Fig. 5 Schematic diagram of regularization algorithm. (a) Building contour; (b) adjusting angles of lines; (c) simplifying polylines and jointing segments; (d) reconstructed contour

轮廓重构规则化算法主要包括角度校正、折线简化和多段接合三步,如表1所示,具体步骤如下。

1) 角度校正。轮廓点集以 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ 表示,其中 p_n 为第 n 个轮廓点。点集 P 中相邻两点 p_i 与 p_j 连线为 l_{ij} ,其与主方向 o_{main} 形成的夹角为 η ,若 $\eta \in [0^\circ, 45^\circ]$ 或 $\eta \in (135^\circ, 180^\circ]$,则旋转线段 l_{ij} ,使其平行于主方向,否则垂直于主方向。旋转之后的平行线段与垂直线段分别用 e_i, v_i 表示,最后将轮廓存储至 $F = \{f_0, f_1, \dots, f_k\}$ 中,其中 f_k 为第 k 个线段。角度校正的效果如图5(b)所示。

2) 折线简化。由于预处理阶段为保证建筑物结构

的完整,依然保留了细部结构,因此经角度校正后的轮廓会存在细小的转折部分,并且这些转折会影响步骤3)中的多线段接合。因此,需要对线段集合 F 进行进一步简化,剔除集合中不必要的转折线段,如图5(c)所示。当线段两端均出现转折时,若此线段长度小于阈值 ν ,则舍去该线段,反之保留。

3) 多段接合。若两线段互相垂直,则直接将其交点 p_{cross} 作为轮廓角点。设定一个前提条件 C 为平行线段的间距小于阈值 t 。假设多条线段互相平行,且符合条件 C ,则将这些线段加入集合 $L = \{l_0, l_1, \dots, l_u\}$ 中,其中 l_u 为第 u 条线段。此时,集合 L 中至少存在两条线

段。计算集合 L 中最长线段 l_{\max} 在整个集合中的长度占比 r_L , 设定参数 κ , 建议 κ 的取值范围为 $\kappa \in (0, 0.1]$, 若 $r_L > \kappa$, 则以 l_{\max} 为基准合并集合 L 中的线段, 否则以首条线段为基准逐段合并。假设两线段平行但不满足条件 C , 则在两线段之间补充垂直线段 m_{line} 。

表 1 轮廓规则化重构算法

Table 1 Contour regularization reconstruction algorithm

input: an array $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, which is group of building boundary points after preprocessing

output: a reconstructed building boundary

```

for  $i \in [0, n]$  do
  if  $0^\circ \leq \eta < 45^\circ$  or  $135^\circ < \eta \leq 180^\circ$  then
    Add ( $e_i$ )
  else
    Add ( $v_i$ )
  end if
end for
 $F$  is equal to simplifying this array ( $F$ )
for  $h$  in len ( $F$ ) do
  if  $F_h$  is vertical to  $F_{h+1}$ 
    Insert ( $p_{\text{cross}}$ )
  else
    if  $C$  is true
      Merge  $L$ 
    else
      Add ( $m_{\text{line}}$ )
    end if
  end if
end for
return  $F$ 

```

2.3 轮廓归位深度优化

轮廓重构规则化方法通过将轮廓线段逐段调整至与主方向一致, 可以使建筑物整体边缘变得规整, 实现拐角直角化, 但是由于非主方向线段旋转的过程中会有偏移, 故无法贴合建筑物边缘。为了更准确地保留和完善建筑物的轮廓特征, 本文进一步设计了轮廓归位深度优化的算法。

轮廓归位深度优化算法的基本原理如图 6 所示。白色区域为建筑物, 黑色区域为背景, 已知建筑物边界应为白色区域与黑色区域相交的位置。将线段 l_{AB} 顺着法线方向 n 的两侧逐像素移动, 由此计算边界的特征强度 H , H 的定义为

$$H = |X_y - X_z|, \quad (2)$$

式中: X_y 和 X_z 是线段沿法线方向移动时在相邻位置 y 和 z 处的建筑物像素占比。在线段 l_{AB} 的移动过程中, 某些时刻会同时包含黑色像素点和白色像素点, 当线段 l_{AB} 的长度为 m 个像素, 且其中有 s 个白色像素点 (建筑物像素点) 时, 则可定义建筑物像素占比为

$$X = s/m. \quad (3)$$

设定一个突变阈值 ω , 若 $H > \omega$, 则边界特征明

显, 说明当前线段 l_{AB} 移动经过了建筑物边界, 可准确识别建筑物边界的位置。若在一定移动范围内, H 始终小于 ω , 则表明边界特征不明显, 说明当前线段 l_{AB} 处于过渡区域, 无法准确识别建筑物边界, 此时取该区域内的中间位置。依据此思想将建筑物轮廓逐线段移动至合适的位置。该算法针对轮廓多边形正则化后产生的外扩或者内缩有较强的修正效果, 既能保证轮廓的完整性, 又不会破坏轮廓的规则性。

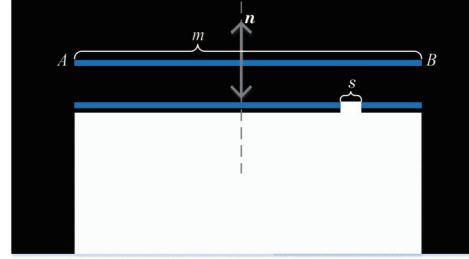


图 6 深度优化原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of depth optimization

为了验证轮廓归位深度优化算法的有效性与实用性, 选取图 7(a) 作为基本实验图像。利用轮廓归位算法深度优化建筑物轮廓后得到的结果如图 7(g) 所示, 与图 7(e) 所示的预处理后的建筑物轮廓相比, 消除了建筑物轮廓的锯齿和部分缺失的问题。轮廓归位算法通过计算边界特征强度检测二值图中的建筑物边界, 相对于图 7(f) 所示的基于主方向规则化后的轮廓, 在保证轮廓规则性的前提下, 使轮廓进一步贴合真实建筑物边界, 最终输出的深度优化规整的建筑物轮廓效果如图 7(h) 所示。

3 实验

3.1 评价指标

为了量化评价优化结果的优劣, 选择总体精度 (E_{OA})、正确率 (E_{CR})、完整度 (E_{CM}) 和综合值 (E_{F1}) 作为评价指标, 参考数据均由人工勾绘而成, 对于存在遮挡的影像采用多时相数据进行比对, 从而获得其参考数据。各评价指标的定义为

$$E_{OA} = \frac{P_T + N_T}{P_T + N_T + P_F + N_F}, \quad (4)$$

$$E_{CR} = \frac{P_T}{P_T + P_F}, \quad (5)$$

$$E_{CM} = \frac{P_T}{P_T + N_F}, \quad (6)$$

$$E_{F1} = \frac{2 \times E_{CR} \times E_{CM}}{E_{CR} + E_{CM}}, \quad (7)$$

式中: P_T 表示被正确分类的建筑物像素的个数; P_F 表示不是建筑物但被分类成建筑物的像素的个数; N_F 表示应该是建筑物但被分类成背景的像素的个数; N_T 表示被正确分类的背景像素的个数。

3.2 实验分析

为了说明研究的有效性和普适性, 选取了一幅大

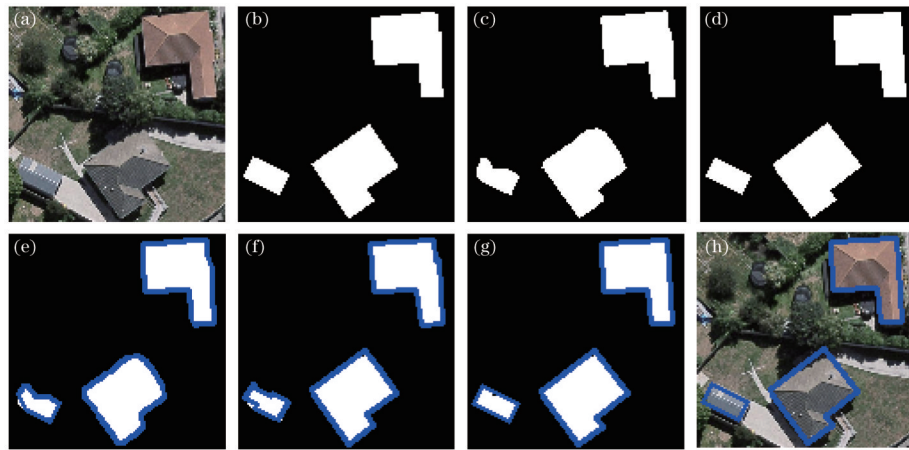


图 7 预处理结果、规则化结果与深度优化结果对比。(a)原始影像;(b)参照数据;(c)初始提取结果;(d)最终优化结果;
(e)预处理后的轮廓;(f)规则化后的轮廓;(g)归位后的轮廓;(h)优化效果

Fig. 7 Comparison of pretreatment result, regularization result and depth optimization result. (a) Original image; (b) reference data; (c) initial extraction result; (d) final optimization result; (e) contour after pretreatment; (f) regularized contour; (g) contour after homing; (h) optimization effect

小为 $1410 \text{ pixel} \times 815 \text{ pixel}$ 的高分辨率遥感影像进行实验分析。图 8(a)所示的影像 S1 来自美国新墨西哥州阿尔伯克基地区,影像中包含 133 栋建筑,形状复杂多样、大小差异较大,且建筑物周围存在光谱相似的地物。采用 SVM 分类方法提取研究区域中的建筑物,经初步处理后将该提取结果作为所提方法的优化目标。选取了王伟玺等^[23](记为方法 A)和 Kwak 等^[24](记为方法 B)提出的建筑物优化方法作为对比。如图 8(d)所示,方法 A 首先栅格化遥感影像,再以建筑物周长设定算子大小,利用算子对建筑物轮廓进行腐蚀膨胀,以达到规则化的目的。该方法能够较好地解决直角建筑物边缘存在凹陷和突出部分的问题,但当建筑物倾斜时会造成边缘锯齿。同时,由于建筑物提取结果的不准确和建筑物本身的复杂性,栅格尺寸的选取

也较为困难,故易导致过度优化。方法 B 基于迭代外接矩形(RMBR)对建筑物进行优化,通过设定合适的阈值对建筑物进行分解,并将轮廓映射到 RMBR 上,以达到规整建筑物形态的目的,能够保留建筑物的细部结构。如图 8(e)所示,此方法可以去除毛边和锯齿,但易受建筑物边缘错分的影响,拟合的外接矩形明显大于真实建筑物轮廓,从而导致优化后的图形外扩。然而,所提方法利用预处理算法解决了边缘的毛边和明显的错分部分。轮廓重构算法充分利用边缘线段间的几何特征对其进行分段规则化,既可以去除锯齿,保证轮廓平直,填补漏分部分,又能较好地保留建筑物的细部结构。轮廓归位则通过轮廓与初始提取结果叠加的方式分析避免规则化后图形的外扩和内缩问题,使得轮廓贴合建筑物边界,从而达到更好的优化效果,如图 8(f)所示。

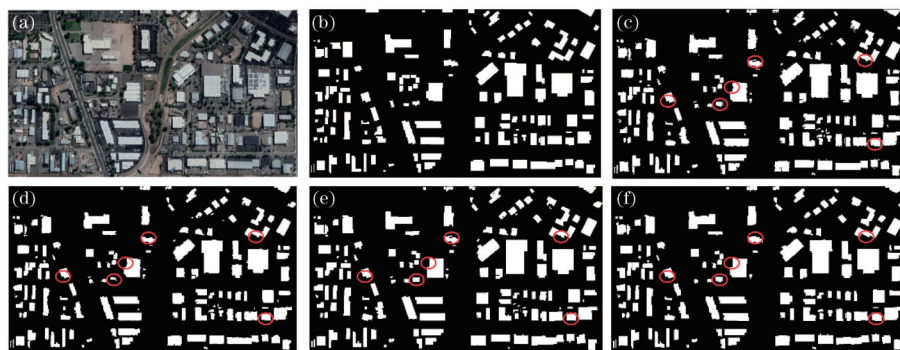


图 8 影像 S1 的建筑物轮廓优化结果对比。(a)影像 S1;(b)参考数据;(c)提取结果;(d)方法 A 优化结果;(e)方法 B 优化结果;
(f)所提方法优化结果

Fig. 8 Comparison of building contour optimization results of image S1. (a) Image S1; (b) reference data; (c) extraction result; (d) optimization result of method A; (e) optimization result of method B; (f) optimization result of proposed method

表 2 给出了三种优化方法的精度对比结果。可以看出:利用所提方法优化建筑物轮廓结果的完整度相对于方法 A 和方法 B 的优化结果,分别提高了 2.82 个百分点和 0.28 个百分点;利用所提方法优化建筑物轮

廓结果的综合值相对于方法 A 和方法 B 的优化结果分别提升了 0.52 个百分点和 2.51 个百分点。精度对比结果表明,所提方法能够提升建筑物结果的完整度和规整度,综合值和总体精度均优于初始提取结果。

表 2 影像 S1 的建筑物轮廓优化结果精度对比

Table 2 Precision comparison of building contour optimization results of image S1 unit: %

Method	E_{CR}	E_{CM}	E_{F1}	E_{OA}
Initial extraction	91.50	93.83	92.65	97.16
Method A	93.22	91.70	92.46	97.14
Method B	86.98	94.24	90.47	96.21
Proposed method	91.48	94.52	92.98	97.27

为了更加直观地表现不同方法的差异性,选取了 6 幅单个建筑物影像进行对比,如图 9(a)~(f)所示,其建筑物形状差异大,部分建筑物被阴影或植被遮挡。图中分别将各方法结果与原始影像进行了对比。从建筑物整体形态方面可以看出,方法 A 有效去除了剑状错分与漏分,但建筑物倾斜时,优化后的轮廓会存在锯齿。当建筑存在大面积植被遮挡时,会出现较多建筑物边界漏检区域,如图 9(e)所示。由于方法 A 是以建

筑物周长计算栅格算子的,故若建筑物形状过于复杂则可能导致边缘调整出现错误,如图 9(c)所示。方法 B 对建筑物轮廓锯齿的优化效果较好,此时提取的建筑物轮廓较平滑,如图 9(b)、(d)所示。然而,当建筑物边缘存在剑状错分时,建筑物轮廓明显外扩,偏离真实边缘,如图 9(f)所示。与以上两种方法相比,所提方法利用预处理去除了明显的错分与漏分,通过轮廓分解与重构对建筑物进行规则化,使建筑物轮廓呈平直分布,并且通过轮廓归位进行进一步优化,使最终结果更贴近于建筑物的真实轮廓。从精度评价方面来看,图 10 和图 11 为图 9 所示的各类单个建筑物轮廓优化结果的精度分析。可以发现,利用所提方法优化建筑物轮廓的总体精度相对于初始提取、方法 A 和方法 B,分别提升可达 2%、3% 和 3% 以上; E_{F1} 值相对于初始提取、方法 A 和方法 B,分别提升可达 3%、4% 和 3% 以上。图 10 和图 11 的结果表明了所提方法的有效性和准确性。



图 9 不同建筑物影像下三种优化方法的实验对比。(a)建筑物影像 1;(b)建筑物影像 2;(c)建筑物影像 3;(d)建筑物影像 4;(e)建筑物影像 5;(f)建筑物影像 6

Fig. 9 Experimental comparison of three optimization methods under different building images. (a) Building image 1; (b) building image 2; (c) building image 3; (d) building image 4; (e) building image 5; (f) building image 6

3.3 讨论

3.3.1 阈值选择

所提方法涉及到一系列的阈值选择与确定:实验部分采用的阈值包括预处理阶段的面积阈值 ω 、长度阈值 ν 和角度阈值 α 与 β ;规则化阶段涉及的阈值包括确定主方向的夹角阈值 θ 、折线简化所需的长度阈值 ν 和多段合并的距离阈值 l ;深度优化阶段涉及的阈值为突变阈值 w 。其中, ω 、 α 、 β 、 θ 和 w 的取值不因建筑物

个体形态的变化而发生改变,可采用经验法选择取值,即

$$\begin{cases} \omega = 90m^2 \\ \alpha = 30^\circ \\ \beta = 170^\circ \\ \theta = 10^\circ \\ w = 0.4 \end{cases} \quad (8)$$

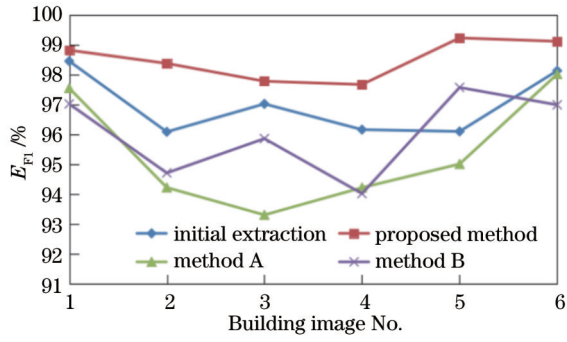


图 10 三种方法的建筑物优化结果的 E_{F1}

Fig. 10 E_{F1} of building optimization results of three methods

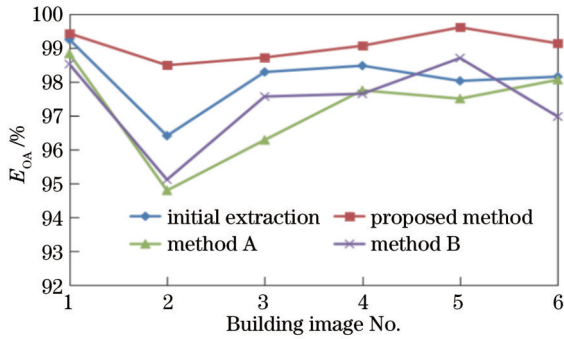


图 11 三种方法的建筑物优化结果的 E_{OA}

Fig. 11 E_{OA} of building optimization results of three methods

ω 用于去除零散的非建筑物小面积图块, 本文选用的影像 S1 为工业区, 建筑物面积相对较大, 因此在本文实验部分中将 ω 设定为 $90m^2$ 。 α 和 β 用于去除导致角度太尖锐和太平滑的节点, 因此本文设定 $\alpha = 30^\circ$ 和 $\beta = 170^\circ$ 。 θ 用于控制主方向的正确性, 当建筑物为矩形结构时, 建筑物旋转至水平方向后的主方向与参考方向一致, 因此当其初始主方向与参考方向的夹角较小时, 可认为当前参考方向更接近于真实建筑物的主方向, 而当建筑物非矩形结构时, 建筑物旋转至水平方向后的主方向难以确定, 初始主方向与参考方向的

夹角往往较大, 故初始主方向更接近真实建筑物的主方向。 因此, 在本文实验部分将 θ 设定为 10° 。 ω 用于识别建筑物边界, 在轮廓线段平移过程中, 当相邻两位置的建筑物像素占比之差较大时, 认为此时经过建筑物的边界位置, 在本文实验中根据经验将 ω 设定为 0.4。

为了体现其余阈值设定对结果的影响, 对图 9 (c)、(f) 中的两幅建筑物影像采用控制变量法进行实验分析, 各阈值设定如表 3 所示。 阈值 ν 、 ν 和 t 的改变均对实验结果有一定影响, 如图 12~14 所示。 预处理阶段的长度阈值 ν 的作用是剔除零散的短线段, 根据建筑物的面积与复杂度进行取值, 建议设定 ν 的取值范围为 $\nu \in [2, 20]$ 。 建筑物面积越大, 建筑物轮廓上的细节相对来说出现的几率越小, 则 ν 的取值越大。 当面积较小而复杂度较高时, 需要保留的细节越多, 则 ν 的取值越小。 如图 12 所示, 该建筑物的复杂度较高, 随着阈值 ν 的增大, 轮廓细节部分被抹平, 预处理后的轮廓与提取结果差异较大, 从而导致最终结果不合理。 因此, 本文实验中将当前建筑物的阈值 ν 设定为 16。 规则化阶段涉及的长度阈值 ν 是针对轮廓线段角度校正后仍然存在的转折结构作进一步处理的, 如图 13 所示。 当 ν 偏大时, 会使得建筑物的一些转折部分被删除, 从而导致优化结果不合理。 对于同一个建筑物应当保证优化程度的一致性, 故可参考其预处理的阈值 ν , 且建议 $\nu < \nu$ 。 规则化阶段的距离阈值 t 是针对轮廓中连续的平行线段进行拼接处理的, 阈值 t 可以对轮廓的细节部分的优化程度进行控制, 图 14 给出了 t 取不同值时的优化效果。 阈值 t 与建筑物的复杂度相关, 建议取值范围为 $t \in [2, 20]$, 复杂度越大, t 取值越小, 可以保证建筑物细节的呈现。 复杂度越小, t 取值越大, 可以减少建筑物轮廓的锯齿。

3.3.2 时间复杂度

所提优化方法主要包括三个阶段, 即预处理、基于主方向的规则化和用轮廓归位的方式实现深度优化。 每一阶段的时间复杂度如表 4 所示。 预处理阶段主要

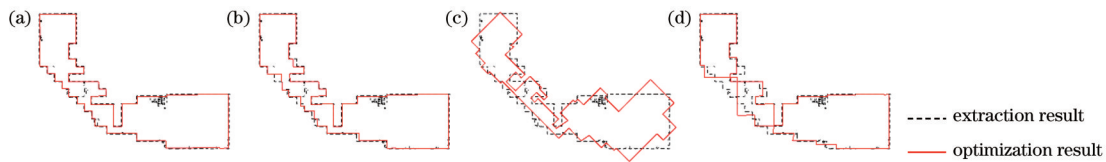


图 12 阈值 ν 对实验结果的影响。(a) $\nu=16$; (b) $\nu=26$; (c) $\nu=30$; (d) $\nu=39$

Fig. 12 Effect of threshold ν on experimental results. (a) $\nu=16$; (b) $\nu=26$; (c) $\nu=30$; (d) $\nu=39$



图 13 阈值 ν 对实验结果的影响。(a) $\nu=9$; (b) $\nu=20$; (c) $\nu=40$; (d) $\nu=60$

Fig. 13 Effect of threshold ν on experimental results. (a) $\nu=9$; (b) $\nu=20$; (c) $\nu=40$; (d) $\nu=60$

表 3 各项阈值设定

Table 3 Setting of each threshold unit: pixel

Picture	ν	ν	t	Picture	ν	ν	t
Fig. 12(a)	16	9	7	Fig. 13(c)	16	40	7
Fig. 12(b)	26	9	7	Fig. 13(d)	16	60	7
Fig. 12(c)	30	9	7	Fig. 14(a)	11	10	19
Fig. 12(d)	39	9	7	Fig. 14(b)	11	10	2
Fig. 13(a)	16	9	7	Fig. 14(c)	11	10	9
Fig. 13(b)	16	20	7	Fig. 14(d)	11	10	14

表 4 时间复杂度

Table 4 Time complexity

Stage	Time complexity				Sum
	Step1	Step2	Step3	Step4	
Pretreatment	$O(n)$	$O(n^2)$			$O(n^2)$
Regularization	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$
Depth optimization	$O(n)$				$O(n)$
Total					$O(n^2)$

包括两步:一是剔除非建筑物图斑,该步骤的复杂度为 $O(n)$;二是剔除零散线段,此步骤的复杂度主要取决于建筑物轮廓中零散线段、尖锐角的数量和平滑角的数量,由于线段或角点的去除可能会生成新的零散线段或角点,因此需要通过迭代循环处理此问题,该步骤的复杂度为 $O(n^2)$ 。该阶段所消耗的总时间复杂度为 $O(n) + O(n^2) \approx O(n^2)$ 。规则化与深度优化阶段中各步骤的复杂度主要取决于建筑物轮廓点的数量,故这两个阶段的时间复杂度均为 $O(n)$ 。因此,所提方法的总时间复杂度是 $O(n^2) + O(n) + O(n) \approx O(n^2)$ 。

3.3.3 对非矩形建筑物的适用性分析

为了分析所提方法对非矩形建筑物或含有非矩形构件的建筑物的适用性,利用所提方法对图 15(d)、

(h)所示的原始影像的提取结果进行优化,结果如图 15所示。由于所提方法是基于主方向的思想,通过对轮廓进行分割、线段方向调整和接合实现建筑物的轮廓直角化和规则化的,因此对于非矩形和非矩形构件组成的建筑物,提取结果上的弧线和圆形在优化后会呈现锯齿现象,如图 15(b)、(f)所示。高分辨率遥感影像中的建筑物多存在直角转折,故本文针对矩形或由矩形组成的建筑物提出了该方法,一方面能保证建筑物轮廓的平直与规则化,另一方面也能通过合适的阈值来保留局部细节特征。然而,对于非矩形建筑物和包含非矩形构件的建筑物,所提方法还无法适用,这将是下一步的研究方向。

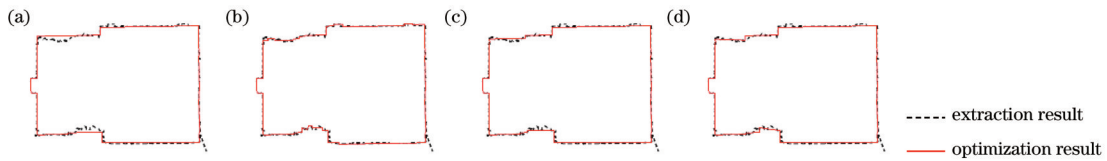


图 14 阈值 t 对实验结果的影响。(a) $t=19$; (b) $t=2$; (c) $t=9$; (d) $t=14$

Fig. 14 Effect of threshold t on experimental results. (a) $t=19$; (b) $t=2$; (c) $t=9$; (d) $t=14$

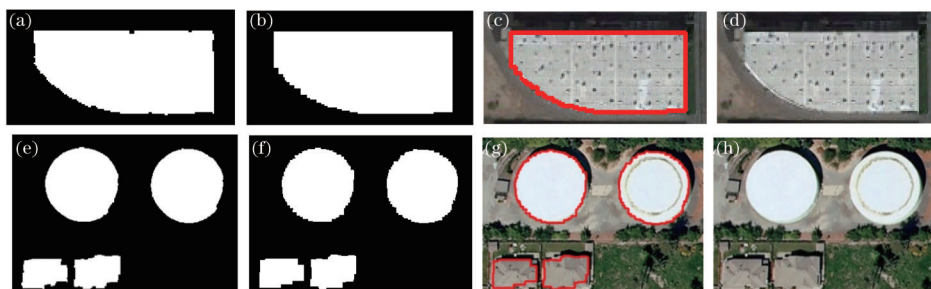


图 15 非矩形建筑物优化效果。(a)(e)提取结果;(b)(f)优化结果;(c)(g)优化结果与原始影像的叠加;(d)(h)原始影像

Fig. 15 Optimization effect of non-rectangular buildings. (a) (e) Extraction results; (b) (f) optimization results; (c) (g) superposition of optimization result with original image; (d) (h) original images

4 结 论

提出基于主方向的建筑物轮廓优化方法,主要针对对高分辨率遥感影像的建筑物提取结果不规则的问题,通过对初始建筑物提取结果进行预处理,排除错分的干扰,简化建筑物轮廓点集,有利于主方向的提取,便于后续处理。首先,结合建筑物轮廓与其正外接矩

形分析判定建筑物的主方向,并将轮廓线段旋转至与主方向一致。然后,采用规则化重构的思想,根据一定阈值将相邻的平行线段合并或相连,垂直线段正交,得到封闭的规则化建筑物轮廓。最后,设计轮廓归位深度优化策略,依据边界特征强度对轮廓进行校正,可以更精确地拟合建筑物的真实边界,以获得高精度、高完整度的建筑物轮廓。

参 考 文 献

- [1] 吴炜, 骆剑承, 沈占锋, 等. 光谱和形状特征相结合的高分辨率遥感图像的建筑物提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(7): 800-805.
Wu W, Luo J C, Shen Z F, et al. Building extraction from high resolution remote sensing imagery based on spatial-spectral method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(7): 800-805.
- [2] 齐永菊, 裴亮, 叶国风, 等. 高分辨率遥感影像建筑物提取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(2): 119-123.
Qi Y J, Pei L, Ye G F, et al. Study on building extraction method of high resolution remote sensing image [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(2): 119-123.
- [3] Aytakin O, Ulusoy I, Erener A, et al. Automatic and unsupervised building extraction in complex urban environments from multi spectral satellite imagery[C]// 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, June 11-13, 2009, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2009: 287-291.
- [4] Sirmacek B, Unsalan C. Urban-area and building detection using SIFT keypoints and graph theory[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1156-1167.
- [5] 王俊, 秦其明, 叶昕, 等. 高分辨率光学遥感图像建筑物提取研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 653-662, 701.
Wang J, Qin Q M, Ye X, et al. A survey of building extraction methods from optical high resolution remote sensing imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 653-662, 701.
- [6] 龚循强, 刘星雷, 鲁铁定, 等. 面向对象的中值绝对偏差法在建筑物提取中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1212005.
Gong X Q, Liu X L, Lu T D, et al. Application of object-oriented median absolute deviation method to building extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1212005.
- [7] Chang J X, Gao X J, Yang Y W, et al. Object-oriented building contour optimization methodology for image classification results via generalized gradient vector flow snake model[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2406.
- [8] 游永发, 王思远, 王斌, 等. 高分辨率遥感影像建筑物分级提取[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 125-136.
You Y F, Wang S Y, Wang B, et al. Study on hierarchical building extraction from high resolution remote sensing imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(1): 125-136.
- [9] 高贤君, 郑学东, 沈大江, 等. 城郊高分影像中利用阴影的建筑物自动提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1350-1357.
Gao X J, Zheng X D, Shen D J, et al. Automatic building extraction based on shadow analysis from high resolution images in suburb areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(10): 1350-1357.
- [10] 张峰, 薛艳丽, 李英成, 等. 基于 SVM 的多源遥感影像面向对象建筑物提取方法[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(2): 27-29, 47.
Zhang F, Xue Y L, Li Y C, et al. Object-oriented building extraction of multi-source remote sensing imagery based on SVM[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, 20(2): 27-29, 47.
- [11] 胡荣明, 黄小兵, 黄远程. 增强形态学建筑物指数应用于高分辨率遥感影像中建筑物提取[J]. 测绘学报, 2014, 43(5): 514-520.
Hu R M, Huang X B, Huang Y C. An enhanced morphological building index for building extraction from high-resolution images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(5): 514-520.
- [12] 丁亚洲, 冯发杰, 吏军平, 等. 多星形约束图割与轮廓规则化的高分遥感影像直角建筑物提取[J]. 测绘学报, 2018, 47(12): 1630-1639.
Ding Y Z, Feng F J, Li J P, et al. Right-angle buildings extraction from high-resolution aerial image based on multi-stars constraint segmentation and regularization[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(12): 1630-1639.
- [13] 孙金彦, 黄祚继, 周绍光, 等. 高分辨率遥感影像中建筑物轮廓信息矢量化[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 396-405.
Sun J Y, Huang Z J, Zhou S G, et al. Building outline vectorization from high spatial resolution imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(3): 396-405.
- [14] 张祖勋, 张剑清, 胡翔云. 基于物方空间几何约束最小二乘匹配的建筑物半自动提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 290-295.
Zhang Z X, Zhang J Q, Hu X Y. Semiautomatic building extraction by least squares matching based on geometrical constraints in object space[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(4): 290-295.
- [15] 尹峰, 祁琼, 许博文. 基于角点的高分辨率遥感影像建筑物提取[J]. 地理空间信息, 2018, 16(10): 58-61, 69.
Yin F, Qi Q, Xu B W. Building extraction from high-resolution remote sensing images based on junction detection[J]. Geospatial Information, 2018, 16(10): 58-61, 69.
- [16] 常京新, 高贤君, 杨元维, 等. 融合多时相高分影像的建筑物轮廓优化方法[J]. 测绘通报, 2020(7): 112-115.
Chang J X, Gao X J, Yang Y W, et al. Building contour optimization method based on multitemporal high-resolution images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(7): 112-115.
- [17] Mousa Y A, Helmholtz P, Belton D, et al. Building detection and regularisation using DSM and imagery information[J]. The Photogrammetric Record, 2019, 34(165): 85-107.
- [18] 王双喜, 杨元维, 常京新, 等. 高分辨率影像分类提取建筑物轮廓的优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 022801.
Wang S X, Yang Y W, Chang J X, et al. Optimization of building contours by classifying high-resolution images

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 022801.
- [19] 常京新, 王双喜, 杨元维, 等. 高分遥感影像建筑物轮廓的逐级优化方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1010002.
Chang J X, Wang S X, Yang Y W, et al. Hierarchical optimization method of building contour in high-resolution remote sensing images[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1010002.
- [20] Xia L G, Zhang X B, Zhang J X, et al. Refined extraction of buildings with the semantic edge-assisted approach from very high-resolution remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(21): 8352-8365.
- [21] Wei S Q, Ji S P, Lu M. Toward automatic building footprint delineation from aerial images using CNN and regularization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(3): 2178-2189.
- [22] Awrangjeb M. Using point cloud data to identify, trace, and regularize the outlines of buildings[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(3): 551-579.
- [23] 王伟玺, 杜靖, 李晓明, 等. 基于栅格填充的直角多边形建筑物轮廓规则化方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(2): 318-324.
Wang W X, Du J, Li X M, et al. A grid filling based rectangular building outlines regularization method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 318-324.
- [24] Kwak E, Habib A. Automatic representation and reconstruction of DBM from LiDAR data using Recursive Minimum Bounding Rectangle[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 93: 171-191.