

# 高分辨率影像分类提取建筑物轮廓的优化方法

王双喜<sup>1</sup>, 杨元维<sup>1,2\*</sup>, 常京新<sup>1</sup>, 高贤君<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

<sup>2</sup>武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

**摘要** 分类法提取建筑物因易受到错误检测的影响而存在边缘锯齿、形状不规则等问题。提出了一种利用符合建筑物轮廓及轴向的最佳外接矩形和 Hausdorff 距离综合优化建筑物轮廓的方法。首先利用偏移阴影分割分类方法提取建筑物, 对建筑物边界进行多边形拟合; 然后用获取拟合结果的最小外接矩形判断建筑物轴向, 以选择最佳的外接矩形, 并将最佳外接矩形和建筑物轮廓进行逐段等分, 计算线段之间的 Hausdorff 距离, 并根据替换规则选择性地用外接矩形边线段进行边界替代, 以进一步进行规整优化, 最终提高了边缘表达的准确度和提取精度。对多幅遥感影像进行实验, 并与其他提取方法进行对比, 结果表明: 所提方法的总体精度均不同程度地优于参照方法, 建筑物边缘的准确性、规整程度及最终精度均得到了有效改善, 更真实、准确地反映了建筑物的真实形状。

**关键词** 遥感; 高分辨率遥感影像; 多边形拟合; 最佳外接矩形; Hausdorff 距离; 建筑物轮廓规整优化

中图分类号 TP753

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.022801

## Optimization of Building Contours by Classifying High-Resolution Images

Wang Shuangxi<sup>1</sup>, Yang Yuanwei<sup>1,2\*</sup>, Chang Jingxin<sup>1</sup>, Gao Xianjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

**Abstract** The contours of buildings extracted using the image classification method are commonly irregular and involve serration issues that are primarily caused by incorrect recognition. Therefore, this paper proposes a building contour optimization method that combines Hausdorff distance and a suitable circumscribed rectangle that conforms to the contour and axial direction of buildings. Firstly, initial results of buildings are extracted using the shifted shadow segmentation and classification principle. For each building, a corresponding fitting polygon is acquired by applying a fitting principle to its building edge. Subsequently, the building axis is assessed using the minimum circumscribed rectangle of the building polygon-fitting result. Based on the axis, a suitable circumscribed rectangle is selected. Furthermore, the building contour and its suitable circumscribed rectangle are respectively divided into equal segments. Meanwhile, the Hausdorff distance between two kinds of segmentations is calculated. If the distance satisfies the substitution rules, building contour segments are replaced with circumscribed rectangular edge segmentation to optimize building regularization. Thus, the proposed method helps in improving the accuracy of building boundary and in promoting building extraction precision. It is tested on several remote sensing images. Compared with other building extraction methods, the results show that the overall accuracy of the proposed method is better than that of the other two reference methods. Moreover, the accuracy and regularization of building contours and the overall precision of building extraction results have been effectively improved. As a result, building shape is more accurately reflected.

**Key words** remote sensing; high-resolution remote sensing image; polygon fitting; suitable circumscribed

收稿日期: 2019-06-04; 修回日期: 2019-06-18; 录用日期: 2019-07-05

基金项目: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(18R04)、地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2017NGCM07)、湖北省教育厅科学研究计划(Q20181317)

\* E-mail: yyw\_08@163.com

rectangle; Hausdorff distance; regularization of building contour

OCIS codes 280.4750; 100.2960; 110.2970; 100.2000

## 1 引言

建筑物是高分辨率遥感影像中一类极其重要的人工地物目标,研究高分辨率遥感影像上建筑物的自动化、高精度提取,对于推动高分辨率影像信息挖掘技术的发展及其在数字化城市等相关领域的应用具有重要意义<sup>[1]</sup>。随着卫星遥感技术的快速发展,从高分辨率影像中准确提取建筑物目标是近年来的研究热点。高分辨率遥感影像中建筑物的提取方法主要依据特征进行分类,但建筑物边缘邻近地物的错误分类会直接导致建筑物的最终提取结果并不具有原始建筑物的形状一致性与结构规整性<sup>[2-3]</sup>。因此,进一步研究基于分类方法的建筑物轮廓优化方法对于提高建筑物提取结果的最终精度具有重要的研究意义。目前,研究人员提出了很多针对高分辨率遥感影像中建筑物的提取方法与优化方法,这些方法主要分为三大类。

(1)动态轮廓法。该方法的主要思想是在提取建筑物的边缘后提取直线,并将它们按照一定的准则进行分组,然后由直线图形构造与优化建筑物轮廓。Simonetto等<sup>[4]</sup>对图像中线段的空间关系进行分析,结合感知分组理论对建筑物目标进行假设和验证。Turker等<sup>[5]</sup>使用高斯平滑滤波器、边缘检测、Hough变换和感知分组对影像上的矩形建筑物与圆形建筑物进行提取。此类方法充分利用目标的边缘特征进行轮廓重构,大大减轻了基于光谱特征导致的轮廓不准确等问题。

(2)基于面向对象分割分类的提取方法。这类方法先将影像分割,然后将其合并为不同大小的同质区域,再利用光谱信息、形状纹理等特征对各个区域进行建筑物目标的识别。文献<sup>[6-7]</sup>提出了一种针对高分辨率遥感影像的基于知识规则的面向对象分类的提取城区建筑物的方法,结合光谱、空间、纹理等特征按照知识规则进行建筑物分类,并结合多尺度分割的建筑物分级提取方法提取建筑物。此类方法能更好地利用目标的光谱和形状特征,避开了边缘检测的问题,并且无需其他辅助的先验知识。

(3)基于数学形态学的提取方法。这类方法建立在严格的数学理论基础之上,利用膨胀、腐蚀、开运算和闭运算等基本运算进行图像形状和结构的分析及处理<sup>[8]</sup>。林祥国等<sup>[9]</sup>利用影像分割以及基于图

像的数学形态学 top-hat 重建技术,提出了面向对象的形态学建筑物指数(OBMBI),并用它来提取建筑物。胡荣明等<sup>[10]</sup>提出一种增强的形态学建筑物指数(EMBI),结合建筑物形状特征完成了对建筑物的提取。此类方法在边缘检测和图像分割等图像处理问题方面有很好的应用,大大提高了图像分析和处理的速度<sup>[11]</sup>。

总体来看,动态轮廓法由于线段的编组复杂度高、耗时长、算法效率较低且严重依赖边缘提取效果,实用性受到了一定限制<sup>[12-13]</sup>;形态学法虽然在提取过程中提高了图像处理的精度和速度,但会出现节点畸变和端点内缩问题<sup>[14]</sup>。相对而言,面向对象分割分类法的自动化程度相对较高,但在场景复杂度较高的高分辨率遥感影像中,当建筑物受到周围其他地物,如树木遮挡、阴影、道路等噪声的干扰时会频繁出现误判、漏判,导致最终提取的建筑物轮廓不精准,缺乏规整性<sup>[15-16]</sup>。

本文针对分类法提取建筑物轮廓完整度较低、存在较多锯齿状的问题,提出了建筑物轮廓精确规则优化的方法。首先利用阴影与面向对象分割分类原理相结合的方法得到建筑物的初始结果,然后进行多边形拟合,再利用符合建筑物轴向的最佳外接矩形和 Hausdorff 距离算法对建筑物轮廓进行优化,以更准确、有效地提高建筑物目标轮廓的精度。

## 2 建筑物提取与优化方法

### 2.1 基于偏移阴影分割分类的建筑物初始结果提取

面向对象分割分类的方法是通过将遥感影像分割来提取同质区域,然后利用建筑物对象的光谱信息、形状纹理等特征对各个区域进行分类提取<sup>[17]</sup>。本文借鉴文献<sup>[18]</sup>的基于偏移阴影分割分类的建筑物自动提取思想,利用面向对象分割的方法首先将高分辨率遥感影像进行多尺度分割,然后通过阴影和植被自动检测,利用基于偏移阴影分析提取各类样本,训练支持向量机(SVM)分类器将影像分为植被、阴影、建筑物、裸地,最后通过阴影验证和数学形态学等方法进行后处理优化,以提取建筑物的初始结果。

这种方法能够有效地识别建筑物区域,但是结果中仍然存在由建筑物边界部分不能准确识别而造成

的建筑物轮廓锯齿化。这是因为高分辨率遥感影像中植被遮挡、道路或裸地与部分房屋光谱相似,导致

检测出现错误,使建筑物边缘分割不准确(图1),出现了边界锯齿化、形状不规则、不精确等问题。

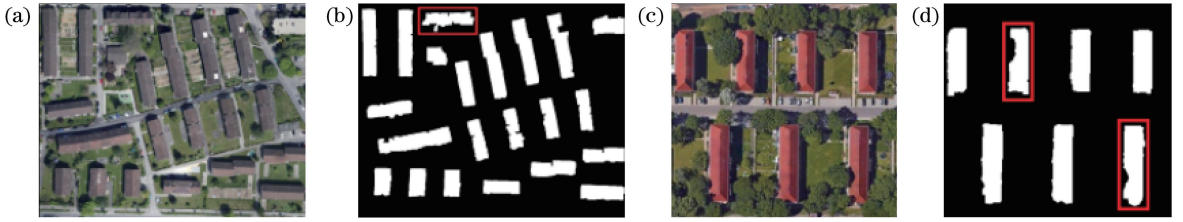


图1 偏移阴影提取的建筑物初始结果。(a)原始遥感影像 A;(b)建筑物初始结果 A;  
(c)原始遥感影像 B;(d)建筑物初始结果 B

Fig. 1 Initial results of buildings extracted by shifted shadow analysis. (a) Original remote sensing image A; (b) initial result of building A; (c) original remote sensing image B; (d) initial result of building B

### 2.2 建筑物轮廓优化的原理

本文设计的轮廓优化方法的主要思想是:首先对建筑物初始轮廓进行多边形拟合,任取轮廓上一条不规则的边界,并获取其首尾弦长垂距最大的点,选取合适的阈值进行垂距最大点的取舍,依次完成对所有不规则边界的初拟合处理;然后对拟合后的轮廓利用最小面积外接矩形(MABR)判断建筑物的轴向,以选择最佳的外接矩形轮廓;然后对此外接矩形和建筑物轮廓进行等分点划分,计算等分线段间的 Hausdorff 距离,以确定每个建筑物轮廓的最佳点,最终构建规整的轮廓,使其尽可能与原始建筑形状保持一致,提高最终结果的精度。本文的创新之处在于将外接矩形和 Hausdorff 距离算法结合起来规整建筑物的轮廓,对于小部分因植被遮挡、阴影等噪声影响造成的缺失部分,也可以很好地规整出来,使建筑物更接近原始形状,达到更好的效果。

本文建筑物轮廓优化原理主要包括三个阶段:建筑物轮廓的多边形初拟合、建筑物拟合外接矩形的选择和建筑物轮廓的规整。算法流程图如图2所示。

#### 2.2.1 建筑物轮廓的多边形初拟合

初步提取的建筑物边界轮廓通常由大量连续的像素点构成,其中有很多相邻的点可能位于同一条直线上,因此要去除建筑物的冗余像素点,将建筑物轮廓拟合成规则的多边形。初步拟合原理如图3所示,其过程如下:

- 1) 任取轮廓上一条不规则的边界  $Q$ , 连接  $Q$  的首尾两点  $E$ 、 $F$  作为不规则边界  $Q$  的弦;
- 2) 获取  $Q$  上离该直线段垂距最大的点  $C$ , 计算其与  $EF$  的距离  $d$ ;
- 3) 比较距离  $d$  与阈值  $\delta$  的大小,若  $d \leq \delta$ , 则  $EF$  段作为不规则边界  $Q$  的近似,该段不规则边界处理完毕;

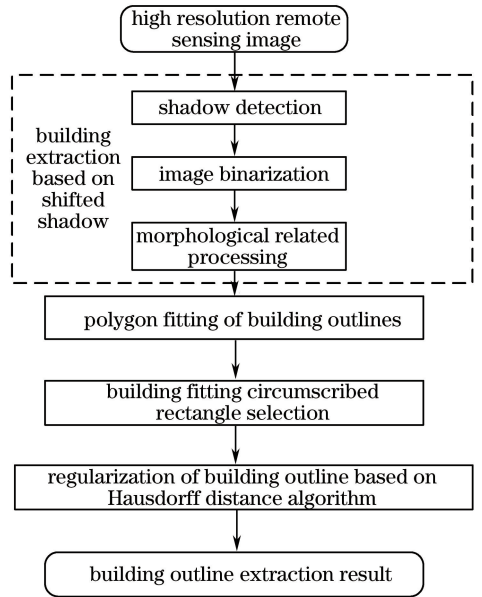


图2 建筑物轮廓优化流程图

Fig. 2 Flow chart of building contour optimization

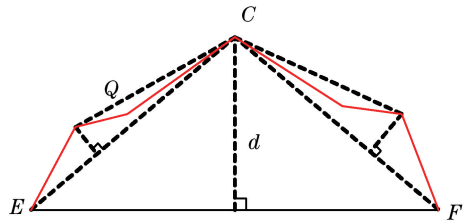


图3 初步拟合原理图

Fig. 3 Principle of preliminary fitting

- 4) 若  $d > \delta$ , 则用  $C$  点将目标图像不规则边界分成  $EC$  和  $FC$  两部分,并分别对这两段不规则边界重复步骤 1)~3) 的处理;
- 5) 当所有不规则边界都处理完毕后,依次连接各个分割点形成的折线,即可以作为拟合后的建筑物轮廓。

经过初步拟合后,建筑物提取边缘轮廓效果如

图 4 所示,与初始分类的结果相比,拟合后的提取结果明显减少了锯齿化情况,建筑物更加规整。



图 4 建筑物边缘轮廓初步拟合效果。(a)原始遥感影像;(b)初始提取的建筑物结果;(c)初步拟合后的建筑物轮廓  
Fig. 4 Preliminary fitting effect of building edge contour. (a) Original remote sensing image; (b) initial results of building extraction; (c) building contour after preliminary fitting

2.2.2 建筑物拟合外接矩形的选择

现实生活中建筑物的形状千差万别,但大多数建筑物的轮廓棱角分明,可归为矩形或者矩形的组合。因此,在提取初始轮廓后,以建筑物轴向为判定依据选择合适的外接矩形,并进行进一步

的轮廓规整。首先分别计算建筑物轮廓与其最小面积外接矩形相对于屏幕坐标轴系的倾斜程度,如果两者一致,如图 5(a)所示,选用最小面积外接矩形;否则,选用最小外包矩形作为拟合外接矩形,如图 5(b)所示。

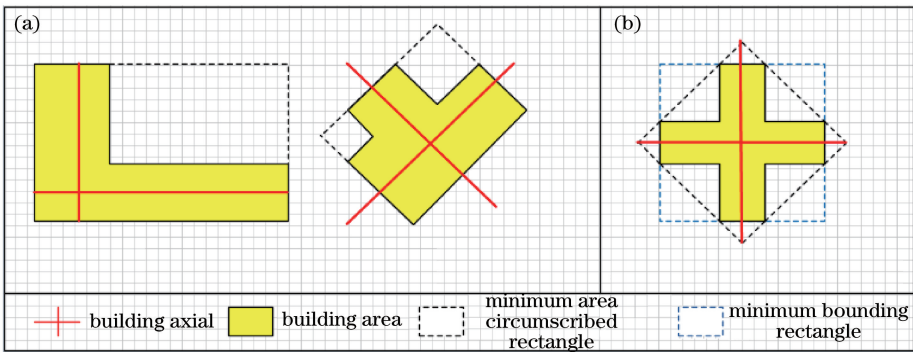


图 5 建筑物轮廓与其最小面积外接矩形的倾斜程度。(a)一致;(b)不一致

Fig. 5 Inclination of building contour and its circumscribed rectangle with minimum area. (a) Consistent; (b) inconsistent

倾斜程度的计算方法如下:任取多边形上相邻两点 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ ,计算其横、纵坐标差值 $|\Delta x|$ 和 $|\Delta y|$ ,当 $\Delta x = |x_1 - x_2| < \delta$ 或 $\Delta y = |y_1 - y_2| < \delta$ 时,认为此方向的倾斜程度为负,该方向近似平行于某一坐标轴;否则,倾斜程度为正。进一步统计多边形中所有边的方向,统计倾斜程度为正、负的概率,总体倾斜

程度选择概率大值的方向。以图 6 为例,在图 6(a)中,任取  $a, b$  与  $a, c$  两点计算其 $|\Delta x|$ 和 $|\Delta y|$ ,若大于阈值 $\delta$ ,即  $ab, ac$  两边倾斜为正,依次计算每条边的倾斜程度,得到倾斜程度为正的的概率大于 50%,即总体倾斜程度为正;反之,若倾斜程度为负的概率大于 50%,即总体倾斜程度为负,如图 6(b)所示。

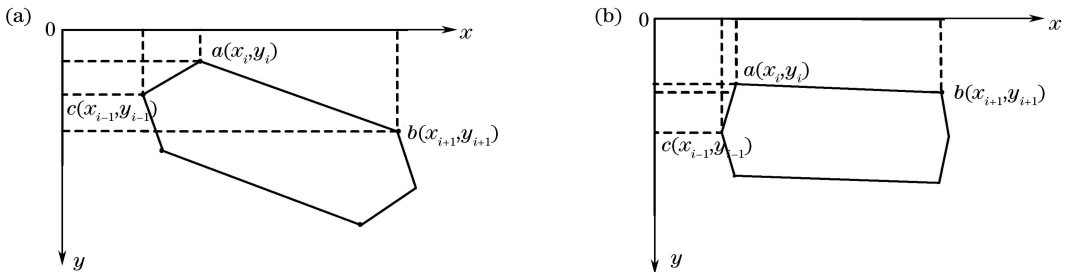


图 6 多边形倾斜程度判断示意图。(a)总体倾斜程度为正;(b)总体倾斜程度为负

Fig. 6 Schematics for judging inclination of polygon. (a) Overall positive inclination; (b) overall negative inclination

2.2.3 基于 Hausdorff 距离算法的建筑物轮廓的深度规整

在拟合后的多边形轮廓的基础上利用

Hausdorff 距离算法结合最佳拟合外接矩形对建筑物轮廓进行进一步的规整,以提高建筑物轮廓的精度。



Hausdorff 距离算法的基本原理是通过计算两组样本点之间的距离来度量样本间的相似度<sup>[19]</sup>。假设有两组集合  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ ,  $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ , 则这两个集合之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)], \quad (1)$$

其中,

$$h(A, B) = \max_{a_i \in A} \min_{b_k \in B} \|a_i - b_k\|, \quad (2)$$

式中:  $h(A, B)$  为集合  $A$  和集合  $B$  的单向 Hausdorff 距离。

利用此思想,将建筑物轮廓、最佳拟合外接矩形分别等分为  $P$ 、 $Q$  部分,作为两组样本点;然后通过计算得到的样本点之间的 Hausdorff 距离来判断是否需要用外接矩形的点坐标替换对应的建筑物轮廓点进行规整;最后,根据坐标替换的情况重新绘制规整后的建筑物轮廓。本文利用 Hausdorff 距离算法将初步拟合后的建筑物规整化,具体方法如下:

1) 将建筑物轮廓表示为一组有序点集  $A = \{P(x_i, y_i) | i=0, 1, \dots, n\}$ , 最佳拟合外接矩形表示为一组有序点集  $B = \{Q(x_i, y_i) | i=0, 1, \dots, n\}$ , 如图 7(a) 所示。

2) 计算建筑物轮廓  $A$  上任一线段与外接矩形  $B$  上各等分线段的单向 Hausdorff 距离。如图 7(b) 所示,取建筑物轮廓上任意两等分点  $P_i$ 、 $P_{i+1}$  间的线段,从  $P_i$  出发沿逆时针将其等分为  $M$  个小段,  $G_t (t=0, 1, 2, \dots, M)$  是对应的等分点,取对应的外接矩形轮廓上任意两等分点  $Q_i$ 、 $Q_{i+1}$  间的线段,从  $Q_i$  出发沿逆时针将其等分为  $N$  个小段,  $H_t (t=0, 1, 2, \dots, N)$  是对应的等分点,计算  $G_t$  与所有  $H_t$  的距离,得到该距离的最小值。当获取建筑物轮廓上所有等分点与外接矩形的最小距离后,再获得所有最小距离的最大值  $h(A, B)$ , 见(2)式。

3) 设定阈值  $\delta$ , 若最大值  $h(A, B) < \delta$ , 则将建筑物轮廓等分点的坐标全部替换为外接矩形对应等分点的坐标, 若最大值  $h(A, B) > \delta$ , 则进一步进行划分, 将线段间距离值小于  $\delta$  的建筑物轮廓等分线段的坐标替换为外接矩形对应等分点的坐标, 而距离值大于  $\delta$  的建筑物轮廓等分点的坐标保持不变。建筑物边缘轮廓规整原理效果如图 8 所示。

4) 绘制规整后的建筑物轮廓, 输出处理后的影像。

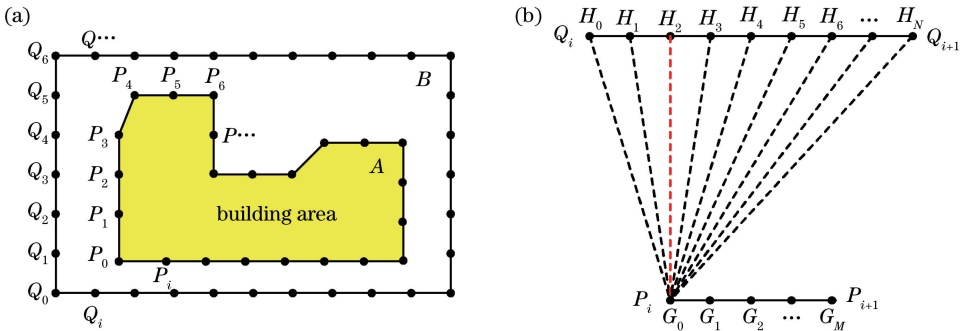


图 7 建筑物轮廓规整原理图。(a) 轮廓等分示意图; (b) Hausdorff 距离计算示意图

Fig. 7 Principles of regularization of building contour. (a) Schematic for dividing contour into equal segments; (b) schematic of Hausdorff distance calculation

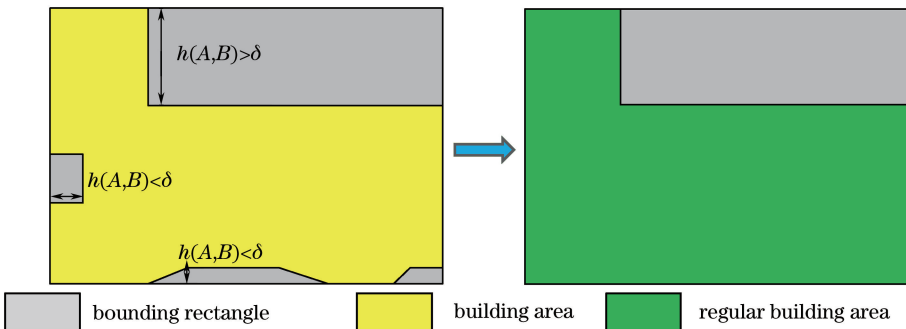


图 8 建筑物轮廓规整原理效果图

Fig. 8 Principle and effect of regularization of building contour

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 精度评价指标

为评价提取精度, 选用了分类结果评价体系最常用的评价指标: 正确率(CR,  $V_{CR}$ )、完整度(CM,  $V_{CM}$ )、综合分数( $F_1$ )、总体精度(OA,  $V_{OA}$ )。

$$V_{CR} = \frac{|V_{TP}|}{|V_{TP}| + |V_{FP}|}, \quad (3)$$

$$V_{CM} = \frac{|V_{TP}|}{|V_{TP}| + |V_{FN}|}, \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{2V_{CR} \times V_{CM}}{V_{CR} + V_{CM}}, \quad (5)$$

$$V_{OA} = \frac{|V_{TP}|}{|V_{TP}| + |V_{FP}| + |V_{FN}|}, \quad (6)$$

式中:  $|V_{TP}|$  为建筑物被判断为建筑物的像素或对象的个数;  $|V_{FP}|$  为非建筑物被判断为建筑物的像素或对象的个数;  $|V_{FN}|$  为非建筑物被判断为非建筑物的像素或对象的个数。将人工选取真实参考结果与提取结果进行对比, 并从基于像素的角度和基于对象的角度进行精度评价。其中基于对象的评价是将提取的建筑物个体作为单独的对象进行分析, 如果个体对象提取面积占该建筑物参考面积的比值为60%以上, 则视该对象正确检测; 若比值为0~60%, 则视该对象为漏检; 若比值为0, 则视对象误检。

#### 3.2 精度评价结果与分析

在大量实验的基础上, 选取文献[2]所提出的

面向对象分割分类的建筑物提取方法, 以及文献[16]提出的基于偏移阴影分析的建筑物提取方法作为参照, 与本文方法的提取结果进行对比。其中: 面向对象分割分类方法的原理是通过对影像进行分割将同质区域提取出来, 然后利用光谱信息、形状纹理等特征对各个区域进行分类, 以准确提取建筑物目标; 基于偏移阴影的建筑物提取方法先对建筑物阴影区域进行偏移阴影分析, 提取建筑物和对裸地样本分类, 然后结合数学形态学并利用相交边界阴影比率进行后处理, 获取最终的建筑物轮廓。为了验证本文方法的有效性和实用性, 选取5幅不同特点的高分辨率遥感影像进行实验: 图9(a)为城郊住宅区域, 建筑物均为矩形结构, 植被面积较广, 建筑物周围有大量的树木覆盖; 图10(a)、11(a)为普通住宅区, 图10(a)中少部分建筑物顶部和道路具有相似的光谱特性, 影像中建筑物形状多样、大小不一, 大部分建筑物呈“L”型, 图11(a)中的房屋连接紧密且呈“目”字型; 图12(a)、13(a)为较复杂的建筑物群, 影像中的建筑物分布方向不一, 错落有致, 房屋排列紧密且范围较大。为了更全面地定量分析建筑物的提取精度, 本文选用了分类结果评价体系最常用的评价指标(完整度、正确率、综合值以及总体精度)进行评价, 从基于像素和基于对象的角度对三种方法的提取结果进行精度评定, 精度统计结果如表1所示。



图9 1#影像建筑物轮廓的提取结果对比。(a)原始遥感影像;(b)面向对象分割分类方法的提取结果;(c)基于偏移阴影分析方法的提取结果;(d)所提方法的提取结果

Fig. 9 Comparison of extraction results of building contour in image 1#. (a) Original remote sensing image; (b) extraction result by object-oriented segmentation and classification method; (c) extraction result by shifted shadow analysis method; (d) extraction result by proposed method





图 10 2# 影像建筑物轮廓的提取结果对比。(a)原始遥感影像;(b)面向对象分割分类方法的提取结果;  
(c)基于偏移阴影分析方法的提取结果;(d)所提方法的提取结果

Fig. 10 Comparison of extraction results of building contour in image 2#. (a) Original remote sensing image;  
(b) extraction result by object-oriented segmentation and classification method; (c) extraction result by shifted  
shadow analysis method; (d) extraction result by proposed method

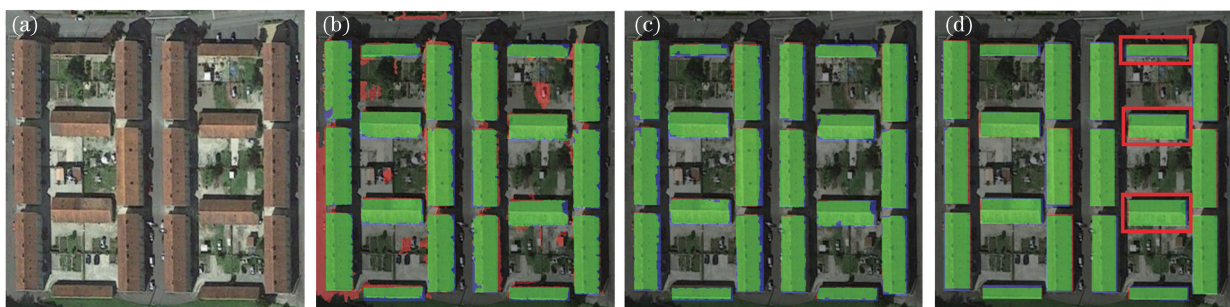


图 11 3# 影像建筑物轮廓的提取结果对比。(a)原始遥感影像;(b)面向对象分割分类方法的提取结果;  
(c)基于偏移阴影分析方法的的结果;(d)所提方法的提取结果

Fig. 11 Comparison of extraction results of building contour in image 3#. (a) Original remote sensing image;  
(b) extraction result by object-oriented segmentation and classification method; (c) extraction result by shifted  
shadow analysis method; (d) extraction result by proposed method

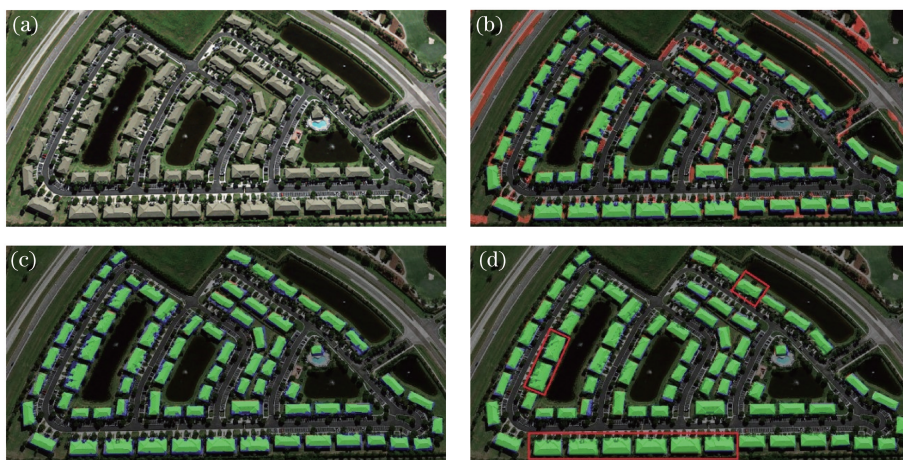


图 12 4# 影像建筑物轮廓的提取结果对比。(a)原始遥感影像;(b)面向对象分割分类方法的提取结果;  
(c)基于偏移阴影分析方法的提取结果;(d)所提方法的提取结果

Fig. 12 Comparison of extraction results of building contour in image 4#. (a) Original remote sensing image;  
(b) extraction result by object-oriented segmentation and classification method; (c) extraction result by shifted  
shadow analysis method; (d) extraction result by proposed method

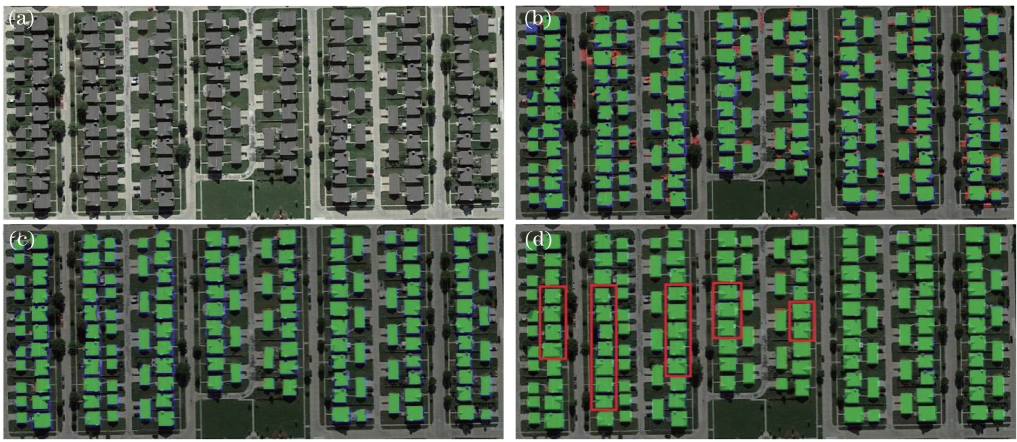


图 13 5# 影像建筑物轮廓的提取结果对比。(a)原始遥感影像;(b)面向对象分割分类方法的提取结果;  
(c)基于偏移阴影分析方法的提取结果;(d)所提方法的提取结果

Fig. 13 Comparison of extraction results of building contour in image 5#. (a) Original remote sensing image;  
(b) extraction result by object-oriented segmentation and classification method; (c) extraction result by shifted  
shadow analysis method; (d) extraction result by proposed method

表 1 图 9~13 中建筑物提取精度的对比

Table 1 Comparison of precision of building extraction results shown in Figs. 9–13

%

Image number	Extraction method	Pixel-based performance parameter				Object-based performance parameter			
		$V_{CM}$	$V_{CR}$	$F_1$	$V_{OA}$	$V_{CM}$	$V_{CR}$	$F_1$	$V_{OA}$
1 #	Proposed method	95.69	94.46	95.07	90.61	100.00	100.00	100.00	100.00
	Object-oriented method	92.75	73.18	81.81	69.22	100.00	43.33	60.46	43.33
	Shifted shadow analysis method	89.98	95.62	92.72	86.42	100.00	100.00	100.00	100.00
2 #	Proposed method	88.12	97.13	92.41	85.89	100.00	100.00	100.00	100.00
	Object-oriented method	89.76	81.37	85.36	74.46	100.00	78.57	88.00	78.57
	Shifted shadow analysis method	85.92	98.13	91.62	84.54	100.00	100.00	100.00	100.00
3 #	Proposed method	94.11	99.81	96.88	93.95	100.00	100.00	100.00	100.00
	Object-oriented method	91.86	84.62	88.09	78.72	100.00	74.07	85.10	74.07
	Shifted shadow analysis method	87.30	98.49	92.55	86.14	100.00	00.00	100.00	100.00
4 #	Proposed method	88.39	97.53	92.73	86.46	98.59	100.00	99.29	98.59
	Object-oriented method	80.11	72.07	75.88	61.13	100.00	80.68	89.30	80.68
	Shifted shadow analysis method	73.77	98.40	84.33	72.90	95.77	100.00	97.84	95.77
5 #	Proposed method	91.26	99.05	95.00	90.48	100.00	100.0	100.00	100.00
	Object-oriented method	75.52	89.51	81.92	69.38	97.85	95.80	96.81	93.83
	Shifted shadow analysis method	75.49	99.11	85.70	74.98	99.28	97.88	98.58	97.20

通过对比可以发现:由于植被遮挡、道路、阴影等噪声,面向对象分割分类方法分割后的建筑物目标形状不完整,与光谱相似的道路目标因混叠而没有被分离成独立的对象,如图 9(b)、13(b)所示,出现了大范围的误检区域(红色)和漏检区域(蓝色),导致正确率和完整度显著降低。基于偏移阴影分析的参照方法利用阴影自动提取样本及验证,有效地区分了裸地,使建筑物被准确提取出来,降低了误分率,但部分建筑物因被小面积树木遮挡而无法被完整检测出,出现了较多的漏检区域,如图 9(c)所示;而且,利用阴影提取的建筑物轮廓存在较多锯齿状,

边缘缺失部分使建筑物的完整度显著降低,同样出现漏检,如图 10(c)、13(c)所示。本文方法在偏移阴影分割分类方法提取建筑物初始结果的基础上,进一步利用外接矩形结合 Hausdorff 距离算法进行轮廓优化,得到最终的提取结果。与其他两种方法相比,对于建筑物因被小面积植被遮挡而出现的漏检区域,本文方法利用最佳外接矩形的规整有效地还原了植被遮挡的部分,如图 9(d)所示,使得建筑物的提取结果更接近建筑物的形状。此外,图 10(d)、13(d)中存在由分类法造成的建筑物边界锯齿化、形状不规则的问题,本文提出的方法保持了



原有建筑物的拐角特性,并且拟合出最佳的拐角点进行替换,还原建筑物拐角边缘原有的形状特性,棱角分明,使建筑物的整体形状更加规整。比较5幅不同特点的高分辨率遥感影像基于像素的精度结果可以看出,本文方法的综合值和总体精度均高于面向对象参照方法和基于偏移阴影的参照方法,说明本文方法能适用于不同形状、尺寸、分布及具有周围地物干扰的建筑物的提取,从图12(d)、13(d)可以看出,本文方法应用于影像范围较大、建筑物排列密集复杂、周围地物干扰多的场景时,同样能获得较高的精度。综上所述,本文所提出的方法在分类法结果的基础上,进一步改善了建筑物结果的规整性。从表1所示的精度结果对比可以看出,本文方法大大提高了建筑物提取的完整度和正确率,综合值和总体精度均优于其他两种参考方法。

## 4 结 论

本文提出了一种基于分类法优化建筑物轮廓的方法,针对分类结果中建筑物结果的规则性不佳的问题,设计了一种利用符合建筑物轮廓及轴向的最佳外接矩形和 Hausdorff 距离综合优化建筑物轮廓的方法,通过 Hausdorff 距离建立轮廓替换条件,对差异突出的不规则轮廓线段使用外接矩形轮廓线段进行替换,进而增强轮廓的规则性。通过大量的实验验证,本文方法在分类提取结果后进一步对轮廓进行精细优化处理,使得建筑物提取结果的规则程度更高,提高了与真实建筑物的形状一致性,也同时进一步提高建筑物提取结果的总体精度,为目前常用的分类法提取建筑物的后处理优化提供了一种有效的精度提升策略。

## 参 考 文 献

- [1] 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.  
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.
- [2] Tan Q L. Urban building extraction from VHR multi-spectral images using object-based classification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6): 618-623.  
谭衢霖. 高分辨率多光谱影像城区建筑物提取研究[J]. *测绘学报*, 2010, 39(6): 618-623.
- [3] 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.  
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.
- [4] Simonetto E, Oriot H, Garello R. Rectangular building extraction from stereoscopic airborne radar images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2386-2395.
- [5] Turker M, Koc-San D. Building extraction from high-resolution optical spaceborne images using the integration of support vector machine (SVM) classification, Hough transformation and perceptual grouping [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 58-69.
- [6] Qiao C, Luo J C, Wu Q Y, et al. Object-oriented method based urban building extraction from high resolution remote sensing image [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, 24(5): 36-39.  
乔程, 骆剑承, 吴泉源, 等. 面向对象的高分辨率影像城市建筑物提取[J]. *地理与地理信息科学*, 2008, 24(5): 36-39.
- [7] Lin Y Z, Zhang B M, Xu J F, et al. Building extraction from high resolution remote sensing imagery with multi-feature and multi-scale [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(12): 53-57.  
林雨准, 张保明, 徐俊峰, 等. 多特征多尺度相结合的高分辨率遥感影像建筑物提取[J]. *测绘通报*, 2017(12): 53-57.
- [8] Wang Y G, Ma C X, Liu H P. Building outline information extraction based on mathematical morphology [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, 22(1): 49-54.  
王永刚, 马彩霞, 刘慧平. 基于数学形态学的建筑物轮廓信息提取[J]. *国土资源遥感*, 2010, 22(1): 49-54.
- [9] Lin X G, Zhang J X. Object-based morphological building index for building extraction from high resolution remote sensing imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(6): 724-733.  
林祥国, 张继贤. 面向对象形态学建筑物指数及其高分辨率遥感影像建筑物提取应用[J]. *测绘学报*, 2017, 46(6): 724-733.

- [10] 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.  
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.
- [11] Huang B Y, Zuo X Q, Tang L N, et al. A study of extracting building height from IKONOS remote sensing image based on mathematical morphology [J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(2): 68-71, 76.  
黄贝莹, 左小清, 唐立娜, 等. 基于数学形态学的 IKONOS 影像提取建筑物高度方法研究[J]. *遥感信息*, 2014, 29(2): 68-71, 76.
- [12] Lin X G, Ning X G. Extraction of human settlements from high resolution remote sensing imagery by fusing features of right angle corners and right angle sides[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 83-89.  
林祥国, 宁晓刚. 融合直角点和直角边特征的高分辨率遥感影像居民点提取方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(1): 83-89.
- [13] Tao C, Zou Z R, Ding X L. Residential area detection from high-resolution remote sensing imagery using corner distribution [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2): 164-169, 192.  
陶超, 邹峥嵘, 丁晓利. 利用角点进行高分辨率遥感影像居民地检测方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(2): 164-169, 192.
- [14] Wang H L, Wu F, Wang B S, et al. Improved algorithm for extracting skeleton line of polygon based on mathematical morphology [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 29-32, 3.  
王辉连, 武芳, 王宝山, 等. 利用数学形态学提取骨架线的改进算法[J]. *测绘科学*, 2006, 31(1): 29-32, 3.
- [15] Tao C, Tan Y H, Cai H J, et al. Object-oriented method of hierarchical urban building extraction from high-resolution remote-sensing imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 39-45.  
陶超, 谭毅华, 蔡华杰, 等. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 39-45.
- [16] Liu D D, Liu J, Zhang Y J, et al. Research on the extracting buildings from the high spatial resolution images based on the object-oriented and multi-scale method [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(6): 17-20.  
刘丹丹, 刘江, 张玉娟, 等. 面向对象的多尺度高分影像建筑物提取方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(6): 17-20.
- [17] 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.  
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.
- [18] Gao X J, Zheng X D, Liu Z X, et al. Automatic building extraction from high resolution visible images based on shifted shadow analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0428002.  
高贤君, 郑学东, 刘子潇, 等. 基于偏移阴影分析的高分辨率可见光影像建筑物自动提取[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0428002.
- [19] Yang Q S, You Z S, Zhang X Y. Fast multi-face detection algorithm based on Hausdorff distance [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2004, 33(4): 407-409.  
杨清凤, 游志胜, 张先玉. 基于豪斯多夫距离的快速多人脸检测算法[J]. *电子科技大学学报*, 2004, 33(4): 407-409.