

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.024

一种结合阴影补偿的城市高分遥感影像分割方法^{*}

王超¹ 石爱业² 顾爱华³ 熊允波² 刘茜¹

(1. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044;
2. 河海大学计算机与信息学院 南京 211100; 3. 盐城师范学院信息工程学院 盐城 224002)

摘要:随着遥感影像空间分辨率的不断提高,由于阴影导致的弱边缘及虚假边缘等对于准确定位对象边缘所造成的干扰也更加突出。在传统的影像分割中进一步引入阴影补偿策略,在之前所提出的 WJSEG 算法基础上,通过将阴影视为出界点并利用卡方变换进行阴影识别,提出了一种结合阴影补偿的城市场景高分辨率遥感影像分割算法 SWJSEG。实验表明,该方法能够有效应对阴影造成的干扰,有助于更加准确地定位对象边缘,使影像分割的精度及可靠性显著提高。

关键词: 高分辨率;遥感影像;图像分割;城市场景;WJSEG

中图分类号: TP317 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

High resolution remote sensing image segmentation method for urban scenes combined with shadow compensation

Wang Chao¹ Shi Aiye² Gu Aihua³ Xiong Yunbo² Liu Qian¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. College of Information Science and Technology, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: With the continuous improvement of the spatial resolution of remote sensing image, the interference of weak edges and false edges caused by the shadow to accurate extraction of the object outlines has been more protruding. Therefore, this paper introduces a shadow compensation strategy into image segmentation to propose a high resolution remote sensing image segmentation algorithm SWJSEG for urban scenes based on the previously proposed WJSEG algorithm. Firstly, the shadow is regarded as the point out of bounds to get the mean value and covariance matrix through the iterative strategy to realize the shadow detection and compensation based on Chi-square transformation. On this basis, the multi-scale segmentation algorithm WJSEG is adopted to obtain the final segmentation result. The experimental results show that this method proposed in this paper can effectively deal with the interference caused by the shadow and improve the accuracy and reliability of image segmentation.

Keywords: high resolution; remote sensing image; image segmentation; urban scenes; WJSEG

0 引言

影像分割是面向对象的遥感影像分析与应用中的一项关键技术,是后续开展基于对象的遥感影像解译的基

础与前提^[1-2]。近年来,随着传感器技术的不断进步,米级甚至亚米级的高分辨率影像得到了广泛应用,传统针对中、低分辨率的影像分割方法已愈来愈难以满足实际应用的需求,而针对高分辨率遥感影像的分割技术已经成为遥感领域热点^[3]。

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61601229)、江苏省自然科学基金(BK20160966)、江苏省高校自然科学基金(16KJB510022)、江苏高校优势学科Ⅱ期建设工程资助项目

目前学者们对高分辨率遥感影像的分割已经开展了广泛的研究并提出了一些有效的方法^[4-7]。例如, Gaetano 等人^[8]提出了一种由粗到精的多尺度分割方法, 通过将自适应提取数学形态学及光谱标记点与边缘图进行融合, 能有效避免高频信息的损失及过分割现象。Basaeed 等人^[9]定义了基于特征学习的检测算子并分别进行边缘检测, 最后采用卷积神经网络进行特征融合, 使算法具有较强的鲁棒性。作者也提出了一种基于尺度间轮廓映射的 WJSEG 算法, 较知名商业软件 eCognition 相比, 不仅定位对象边缘更加准确, 并且保持对象轮廓更为完整^[10]。

尽管如此, 这些方法在分割时大多没有单独考虑阴影因素的影响。空间分辨率的不断提高尽管带来了更加丰富的纹理、形状等空间细节信息, 有助于对地理对象的精细刻画, 但同时也使得地物阴影等干扰因素影像分割的影响更加显著^[11]。尤其在建筑物与自然地物密集混杂分布的城市场景中, 普遍存在的地物遮挡会产生大量的阴影区域^[12]。而由于阴影区域的亮度值大多要低于非阴影区域的亮度值, 会弱化对象边缘及产生虚假边缘, 从而严重影响了影像分割的可靠性^[13]。

为此, 本文在 WJSEG 算法基础上, 通过将阴影视为出界点构建了一种基于卡方变换的阴影识别策略, 提出了一种结合阴影补偿的城市场景高分辨率遥感影像分割算法 SWJSEG。通过对不同传感器、不同分辨率的高分辨率遥感影像的分割实验表明, 所提出算法能够有效应对阴影造成的干扰, 提高分割的精度及可靠性。

1 方法

为实现城市场景下高精度、高可靠的高分辨率遥感影像分割, 所提出的 SWJSEG 方法主要包括两个步骤: 基于卡方检验的阴影检测与补偿、多尺度区域分割及合并。算法实现流程如图 1 所示。

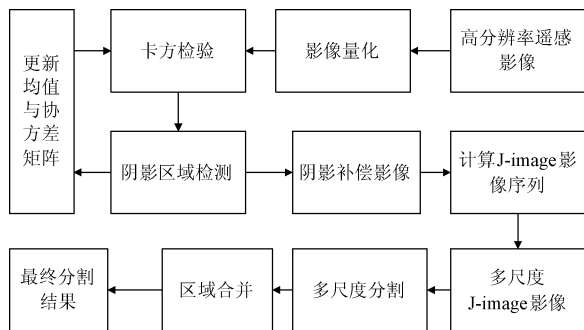


图1 算法实现流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed SWJSEG

1.1 阴影检测与补偿

鉴于阴影对遥感影像分割及后续解译所造成的干

扰, 本文首先将阴影区域视为检测的目标, 将影像划分为阴影区域及非阴影区域。在此基础上, 通过对影像进行阴影补偿, 从而避免后续的影像分割受到阴影的影响。

1.1.1 影像量化

首先, 对多波段遥感影像进行颜色量化从而转化为灰度影像。尽管与 FCM 算法相比, HCM 聚类方法的聚类结果中可能存在一些无意义的聚类, 但却可以预先人为设定聚类中心的数目^[14-16]。本文为了在影像量化时尽可能少的损失高分辨率遥感影像中的空间细节信息, 同时使所提出算法对单波段遥感影像分割具有良好的通用性, 因此本文采用 HCM 算法将多波段影像量化为包含 256 个灰度级的 8 bit 灰度影像。

1.1.2 基于卡方变换的阴影检测

在阴影检测中, 假设非阴影区域服从高斯分布, 则可以将阴影视为出界点, 依据卡方变换进行阴影检测。

$$Y = (X - m)^T \Sigma^{-1} (X - m) \sim \chi^2(b) \quad (1)$$

式中: X 为随机变量, m 和 Σ 分别为非阴影区域的均值和协方差矩阵, Y 为服从自由度为 b 的卡方变换的随机变量, b 为高分辨率多光谱影像的波段数目。

给定置信度为 $1 - \alpha$ 时, 有:

$$P(Y < \chi^2_{1-\alpha}(b)) = 1 - \alpha \quad (2)$$

则影像卡方值大于 $\chi^2_{1-\alpha}(b)$ 的区域可以视为非阴影区域。最后, 对所提取的阴影区域再采用形态学膨胀与腐蚀的闭运算来填充细小空洞从而获得阴影检测结果。

1.1.3 均值与协方差矩阵的确定

基于卡方变换的阴影去除, 关键是均值 m 和协方差矩阵 Σ 的求取, 本文采用如下迭代方法进行计算。

1) 给定置信度 $1 - \alpha$ (α 是显著性水平), 最大迭代次数 M , 阈值 ε 。由用户选择部分阴影区域作为训练样本, 进而确定非阴影区域的均值和协方差矩阵。

2) 计算式(1)和(2)。

3) 确定非阴影区域, 并更新非阴影区域的均值和协方差矩阵。

4) 如果迭代次数大于 M 或者本次迭代和上次迭代的均值和协方差矩阵的变化值小于 ε , 则迭代终止; 否则返回步骤 2), 继续迭代。

1.1.4 阴影补偿

对于所有检测结果为阴影的像素, 将灰度值设定为 0, 从而获得阴影补偿影像。例如, 图 2 所示分别为当设定 $\alpha = 0.05$, $M = 1\ 000$, $\varepsilon = 0.01$ 时对高分辨率 IKONOS 影像进行阴影检测与阴影补偿的结果。本文阈值的设定均采用 trial-and-error method 设定。

1.2 多尺度分割及区域合并

在提取的阴影补偿影像基础上, 采用 WJSEG 算法中

的多尺度区域分割及区域合并策略获得最终分割结果。在区域分割阶段其基本实现流程为：

- 1) 采用 Haar 小波对阴影补偿影像进行多尺度分解,并计算获得多尺度 J-image 序如下。
- 2) 在最粗糙尺度 J-image 中计算阈值 T_N , 确定种子区域。对剩余的非种子区域像素,重新计算阈值 T_N ,更新种子区域。依据种子区域进行区域增长,获得当前尺度下的分割结果。
- 3) 将当前尺度下的分割结果映射到下一个精细尺度中,并对映射结果进行边界修正。基于映射结果,依据局部同质性提取在当前尺度下需要分割的区域,采用与步骤 2) 相同的策略获得当前尺度下的分割结果;
- 4) 重复步骤 3), 直到所有尺度计算完毕。在最精细尺度中,为避免欠分割现象,对映射结果中的所有区域都进行分割。

对分割结果进行进一步的区域合并处理。一方面,

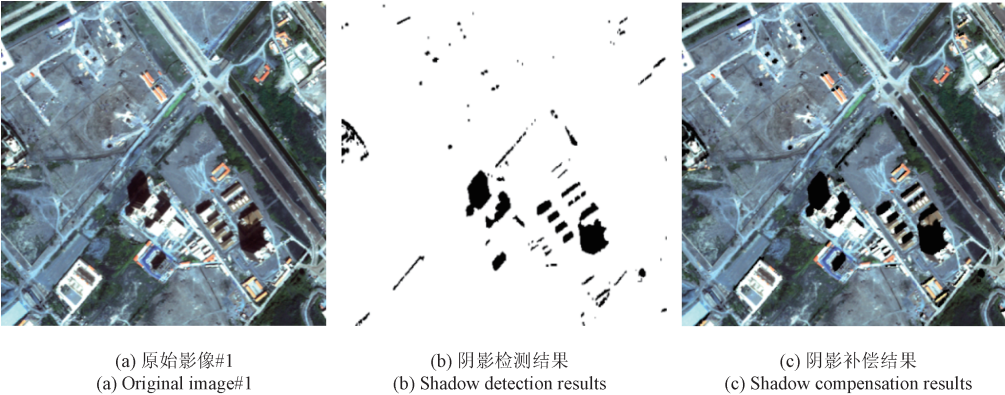


图 2 原始影像#1 与阴影补偿结果
Fig. 2 Original image #1 and shadow compensation results

如图 2、3 所示,两幅影像都是典型的城市场景,其中建筑物、道路、植被及其他人造目标混杂分布,且阴影均主要存在于阳光受到建筑物遮挡的区域。通过对比两组

利用颜色直方图描述阴影补偿影像中的各个区域,并计算相邻区域直方图间的欧式距离 D_H 。另一方,计算相邻区域的色彩标准差距离 D_{color} 。最后,根据阈值 T_H 、 T_C 进行区域合并,获得最终分割结果。关于 WJSEG 算法更加详细实现流程可参见文献[10]。

2 实验与分析

为验证所提出的算法的精度及可靠性,本文选择两幅来自不同传感器的城市场景高分辨率遥感影像进行实验。实验一采用空间分辨率为 4 m 的 IKONOS 多光谱影像,尺寸为 512 × 512 像素,所在地区为中国重庆,原始影像及阴影检测结果如图 2 所示;实验二采用空间分辨率为 0.6 m 的航空遥感 DOM 影像,尺寸为 512 × 512 像素,所在地区为中国南京,如图 3 所示。两组实验中阴影检测的阈值设定均为 $\alpha = 0.05$, $M = 1\ 000$, $\varepsilon = 0.01$ 。

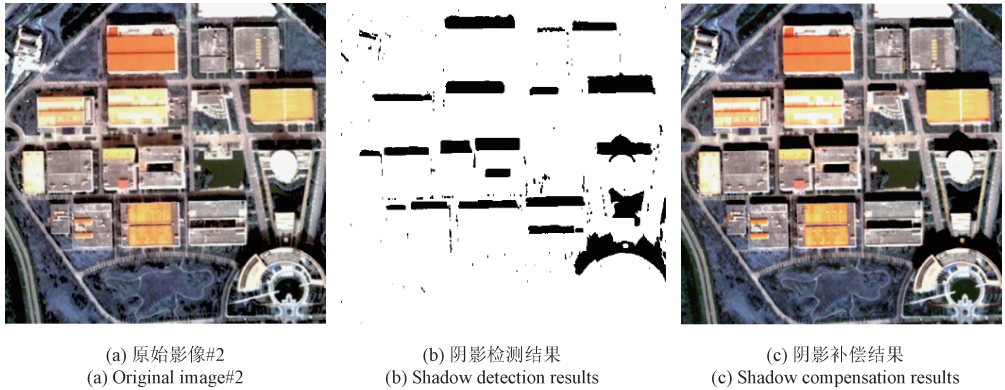


图 3 原始影像#2 与阴影补偿结果
Fig. 3 Original image #2 and shadow compensation results

2.1 分割结果与目视分析

在对阴影补偿结果进行区域分割时,SWJSEG 在两组实验中均设定 $T_H = 0.18$, $T_C = [2.5, 3.5]$,分割结果分别如图 4、5 所示。另外,为分析引入阴影补偿策略后的改进效果,实验中分别对两幅影像采用 WJSEG 进行了分割,结果如图 6、7 所示。



图 4 SWJSEG 影像#1 分割结果
Fig.4 SWJSEG results of Image #1



图 5 SWJSEG 影像#2 分割结果
Fig.5 SWJSEG results of Image #2



图 6 WJSEG 影像#1 分割结果
Fig.6 WJSEG results of Image #1



图 7 WJSEG 影像#2 分割结果
Fig.7 WJSEG results of Image #2

为便于目视分析,本文对影像中的典型地物用不同的字母进行了标注。通过比较两种算法的实验结果可以看出,在分割参数相同时,对于未受到阴影影响的区域两种方法取得了相近的分割效果。例如,对于小尺寸对象(如位置 A、B)两种算法均能够准确定位对象的边缘;而对于大尺寸建筑物及其他均质区域,两种算法均能够保持对象轮廓的完整。差异主要体现在受到阴影影响的区域(如位置 C、G 等),对于由于阴影造成的弱边缘及虚假边缘,WJSEG 算法出现了边缘定位不准确、欠分割及过分割现象,SWJSEG 算法则有效避免了这些不足。

2.2 精度评价

为进一步定量分析 WJSEG 算法的性能,通过目视解译构建了一个包含 300 个像素的参考边界集合作为地物的真实边界,其中受到阴影影响及未受阴影影响的像素各占一半。依照此集合分别与两种算法的分割结果进行比较:与参考边界差异在 1 个像素及以内的分割结果判定为“准确”,差异在 3 个像素以内的判定为“一般”,其他判定为“较差”。精度评价结果如表 1 所示。

表 1 精度评价
Table 1 Accuracy evaluation (%)

	影像#1 实验结果			影像#2 实验结果		
	准确	一般	较差	准确	一般	较差
SWJSEG	91.72	6.21	4.07	93.89	3.23	2.88
WJSEG	85.22	7.23	7.55	90.89	5.07	4.04

通过表 1 可以看出,在引入阴影补偿策略后,两组实验中所提出的 SWJSEG 较 WJSEG 的分割精度均有显著的提高,与目视分析结果一致。另外,两组实验中 WJSEG 算法归为“准确”类的像素比例波动较大,幅度达到 5.76%。而 SWJSEG 算法该幅度仅为 2.17%,且“准确”类的像素比例均达到 90% 以上,因此可靠性更高。

最后,在影像#2 的分割实验中,两种算法的分割精度均显著高于影像#1 实验,主要是由于影像#2 的空间分辨率更高因而地物的轮廓更加突出所造成的。

3 结 论

针对城市场景下的高分辨率遥感影像分割中由于地物阴影所造成的干扰,本文提出了一种结合阴影补偿的分割算法 SWJSEG。SWJSEG 算法首先通过迭代方法确定均值与协方差矩阵,进而利用卡方变换进行阴影检测。在此基础上,结合阴影补偿影像与作者较早所提出的 WJSEG 算法进行区域分割与合并,从而获得最终的分割结果。实验结果表明,与 WJSEG 算法相比,SWJSEG 能够有效应对由于阴影导致的弱边缘及虚假边缘,而且分割精度显著提高的同时又具有良好的可靠性。

参考文献

- [1] ZHENG C, WANG L. Semantic segmentation of remote sensing imagery using object-based markov random field model with regional penalties [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(5): 1924-1935.
- [2] 许妙忠,丛铭,万丽娟,等. 视觉感受与 Markov 随机场相结合的高分辨率遥感影像分割法[J]. 测绘学报, 2015, 44(2): 198-205.
XU M ZH, CONG M, WAN L J, et al. A methodology of image segmentation for high resolution remote sensing image based on visual system and markov random field [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(2): 198-205.
- [3] 王志华,孟樊,杨晓梅,等. 高空间分辨率遥感影像分割尺度参数自动选择研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 639-648.
WANG ZH H, MENG F, YANG X M, et al. Study on the automatic selection of segmentation scale parameters for high spatial resolution remote sensing images [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18 (5): 639-648.
- [4] WANG C, XU W, PEI X, et al. An unsupervised multi-scale segmentation method based on automated parameterization [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(15): 1-10.
- [5] MYLONAS S K, STAVRAKLOUDIS D G, THEOCHARIS J B, et al. A local search-based GeneSIS algorithm for the segmentation and classification of remote-sensing images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(4): 1470-1492.
- [6] 赵泉华,高郡,李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (11): 2519-2530.
ZHAO Q H, GAO J, LI Y. Multi-feature texture image segmentation based on tessellation technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2519-2530.
- [7] 王鑫,王向军,冯登超,等. 特征一致红外弱小目标匹配与定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1405-1410.
WANG X, WANG X J, FENG D CH, et al. Research on matching and locating of infrared dim small targets with the same characteristics [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (9): 1405-1410.
- [8] GAETANO R, MASI G, POGGI G, et al. Marker-controlled watershed-based segmentation of multiresolution remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6): 2987-3004.
- [9] BASAEED E, BHASKAR H, HILL P, et al. A supervised hierarchical segmentation of remote-sensing images using a committee of multi-scale convolutional neural networks [J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(7): 1671-1691.
- [10] 王铁军,任思思,徐明. 基于 eCognition 的混合对象分类方法研究[J]. 测绘通报, 2014 (3): 137-138.
WANG T J, REN S S, XU M. Research on classification method of hybrid object based on eCognition [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014 (3): 137-138.
- [11] ZHANG H, SUN K, LI W. Object-oriented shadow detection and removal from urban high-resolution remote sensing images[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(11): 6972-6982.
- [12] KADHIM N M S M, MOURSHED M, BRAY M T. Shadow detection from very high resolution satellite image using grabcutsegmentation and ratio-band algorithms[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40(3): 95.
- [13] SHAHTAHMASSEBI A R, YANG N, WANG K, et al. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing [J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(4): 403-420.
- [14] ALBÀ X, PEREAÑEZ M, HOOGENDOORN C, et al. An algorithm for the segmentation of highly abnormal hearts using a generic statistical shape model[J]. IEEE

Transactions on Medical Imaging, 2016, 35 (3): 845-859.

- [15] PETRICK J F, DURKO A M. Segmenting luxury cruise tourists based on their motivations [J]. Tourism in Marine Environments, 2015, 10(3-4): 149-157.
- [16] OUDEGA M L, VAN EXEL E, STEK M L, et al. The structure of the geriatric depressed brain and response to electroconvulsive therapy [J]. Psychiatry Research: Neuroimaging, 2014, 222(1): 1-9.

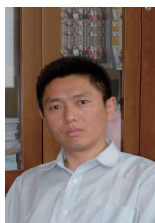
作者简介



王超, 分别在2007年、2010年于中国矿业大学获得学士学和硕士学位, 2014年于河海大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学(讲师), 主要研究方向为高分辨率遥感影像处理。

E-mail: chaowang@nuist.edu.cn

Wang Chao received B. Sc. and M. Sc. from China University of Mining and Technology in 2007 and 2010, and Ph. D. from Hohai University in 2014, respectively. Now he is a lecturer in Nanjing University of Information and Science Technology. His main research direction is high resolution remote sensing image processing.



石爱业, 2009年于河海大学获得博士学位, 现为河海大学副教授, 主要研究方向为遥感变化检测和图像超分辨率重建。

E-mail: ayshi@hhu.edu.cn

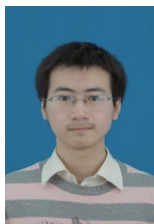
Shi Aiye received Ph. D. from Hohai University in 2009. His main research interest is image change detection and imagesuper-resolution reconstruction.



顾爱华, 2011年于扬州大学信息工程学院获得硕士学位, 河海大学博士研究生, 现为盐城师范学院教师(实验师), 主要研究方向为遥感影像处理。

E-mail: yctuaihuagu1978@163.com

Gu Aihua received M. Sc. from Yangzhou University in 2011. Now he is a Ph. D. candidate in Hohai University and an experimentalist in Yancheng Teachers University. His main research direction is remote sensing image processing.



熊允波, 分别在2009、2013年于河海大学获得学士学位和硕士学位, 现为河海大学博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理。

E-mail: ybxiong@hhu.edu.cn

Xiong Yunbo received B. Sc. and M. Sc. from Hohai University in 2009 and 2013, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Hohai University. His main research direction is high resolution remote sensing image processing.



刘茜, 2002年于南京师范大学获得学士学位, 2008年于南京信息工程大学获得硕士学位, 2015年于南京邮电大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学讲师, 主要研究方向为模式识别。

E-mail: lqxsld@163.com

Liu Qian received B. Sc. from Nanjing Normal University in 2002, M. Sc. from Nanjing University of Information Science & Technology in 2008, and Ph. D. from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2015, respectively. Now she is a lecturer at Nanjing University of Information Science & Technology. Her main research direction is pattern recognition.