

结合多种特征的高分辨率遥感影像阴影检测

张先鹏¹ 陈帆¹ 和红杰¹

摘要 针对现有的阴影检测算法对较亮阴影和较暗地物中的阴影不能同时较好地检测等问题, 提出一种结合多种特征的高分辨率遥感影像阴影检测方法. 该算法首先结合主成分分析、颜色特征和直方图的分割构建多种阈值检测条件, 然后综合多种特征来进行遥感影像阴影的初步检测, 最后通过分析 RGB 模型在阴影与非阴影地物上的差别, 利用颜色特性最终检测出阴影区域. 实验结果表明, 本文算法能有效检测较亮阴影和较暗地物中的阴影. 与现有方法相比, 较亮阴影的平均总错误率从水平集法的 31.85% 降至 24.61%, 较暗地物中阴影的平均总错误率从自动检测法的 37.75% 降至 23.30%.

关键词 高分辨率遥感影像, 阴影检测, 主成分分析, 颜色特征, 直方图的分割

引用格式 张先鹏, 陈帆, 和红杰. 结合多种特征的高分辨率遥感影像阴影检测. 自动化学报, 2016, 42(2): 290–298

DOI 10.16383/j.aas.2016.c150196

Shadow Detection in High Resolution Remote Sensing Images Using Multiple Features

ZHANG Xian-Peng¹ CHEN Fan¹ HE Hong-Jie¹

Abstract To aim at the problem that shadow detection algorithms cannot simultaneously well detect partial-bright shadows and shadows in dark object, a kind of high resolution remote sensing images shadow detection method that combine a multiple features is proposed. The algorithm firstly combines principal component analysis, color features and histogram segmentation to construct the detection conditions of various thresholds, then integra various features of remote sensing image for initial detection, finally by analyzing the difference of the RGB models in the shadow and non shadow, uses the color characteristics to detect the shadow region. Experimental results show that the algorithm proposed in this paper can detect partial uses bright shadows and shadows in dark object effectively. Compared with the existing methods, the average total error rate goes from the level set method 31.85% down to 24.61% for partial shadow, and the average total error rate is reduced from the automatic detection method 37.75% to 23.30% for shadows in dark object.

Key words High resolution remote sensing images, shadow detection, principal component analysis, color features, histogram segmentation

Citation Zhang Xian-Peng, Chen Fan, He Hong-Jie. Shadow detection in high resolution remote sensing images using multiple features. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(2): 290–298

由于高分辨率影像的应用越来越广泛, 如今遥感影像的空间分辨率大大提高, 数量级达到了米级、分米级^[1]. 分辨率的大幅度提高, 使得影像中的地物信息更为清晰、丰富, 而影像中的阴影遮挡所损失的信息也随之不断增加, 严重影响了地物信息提取及进一步应用^[2]. 因此准确检测遥感图像中的阴影区域, 是对含阴影遥感图像后续处理的前提与关键^[3].

现有的遥感影像阴影检测方法大致可分为两大

类: 一类是基于模型的方法. 该类方法是根据相关场景、遮挡物体的几何形状、DSM 数据以及太阳照射方位、传感器等相关参数来计算阴影区域. 但这类信息在实际应用中并不容易得到, 有很大的局限^[4]; 如文献 [5] 提出的黑体辐射模型根据照射光源不同识别阴影与非阴影区域. 该类方法适用于特定场景, 计算复杂度较高^[3]. 另一类是基于阴影属性特征的方法, 根据阴影区在亮度、色彩、纹理等特征上与非阴影区不同^[6–18], 结合特征阈值^[19]、统计混合模型^[4]、D-S 证据理论^[20]、整体变分模型^[21] 等方法实现阴影检测. 文献 [8] 首先人工选择影像中的阴影样本进行训练, 动态生成特征空间并获得决策参数, 然后经一系列变换实现阴影检测, 该方法综合了阴影在亮度空间与色彩空间的信息, 能有效地检测出浓厚阴影区^[12], 但对较亮和较暗地物中的阴影表现出较严重的漏检问题. 文献 [3] 针对非匀质阴影与亮阴影, 提出结合局部分类水平集与颜色特征的遥感影像阴

收稿日期 2015-04-20 录用日期 2015-09-06
Manuscript received April 20, 2015; accepted September 6, 2015
国家自然科学基金 (61373180, 61461047), 西南交通大学 2015 年研究生创新实验实践项目 (YC201504106) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61373180, 61461047) and Southwest Jiaotong University Graduate Student Innovation Experiment Project in 2015 (YC201504106)
本文责任编辑 黄庆明
Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming
1. 四川信号与信息处理重点实验室 西南交通大学 成都 610031
1. Sichuan Key Laboratory of Signal and Information Processing, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

影检测, 该方法不但能有效检测非匀质阴影和亮阴影, 还能有效去除绿地干扰, 但对较暗地物中的阴影检测效果较差. 文献 [2] 利用多种颜色特征相结合进行影像阴影检测, 该算法简单易懂, 综合了阴影在亮度空间与色彩空间的信息, 能一定程度上抵抗绿地干扰, 适用于大多数影像的阴影检测, 但对较亮阴影和较暗地物中的阴影的检测效果还有待进一步提高.

由于地物背景复杂、存在同物异谱等情况, 可能导致遥感图像的阴影区域亮度差别大, 阴影区域与非阴影区域亮度接近等情况. 例如, 图 1 是迈阿密遥感影像的子区域. 其中, 标示为 *A* 的阴影区为非匀质阴影^[3], 标示为 *B* 的阴影区为亮阴影^[3], 文中把亮阴影和非匀质阴影统称为较亮阴影. 图 2 是沙特阿拉伯麦加城遥感影像的子区域. 其中, 标示为 *C* 的阴影区, 由于其阴影覆盖区及其周围大多为弱反射性地物, 导致相应阴影区域的亮度偏暗, 我们称其为较暗地物中的阴影. 现有阴影检测算法对某一类阴影 (如较亮阴影) 的遥感图像可能得到较好的检测结果, 但对能适用于大多数影像的阴影检测方法的检测

效果还有待进一步提高. 为了对较亮阴影和较暗地物中的阴影都能进行较好检测, 提出一种结合多种特征的遥感影像阴影检测方法. 实验结果表明, 本文算法不但能有效地检测存在较亮阴影的影像, 还能有效地检测较暗地物中的阴影, 且检测过程无需人工干预.

1 算法描述

本文算法分两步, 首先进行多种检测条件联合的初始阴影获取; 然后对初步检测出的阴影进行后处理, 得到最终的阴影检测结果.

1.1 初始阴影获取

由于高分辨率遥感影像阴影形成机理的复杂性, 利用单一的特征对遥感影像阴影进行检测只能适用于特殊的场景, 所以要对大多数场景的阴影都进行较好地检测需要结合多种方法进行分析. 因此本文从不同方面构建了三种检测条件, 算法的流程如图 3 所示.



图 1 迈阿密子图 (842 × 605)

Fig. 1 Sub region of Miami (842 × 605)



图 2 沙特阿拉伯麦加城子图 (613 × 403)

Fig. 2 Sub region of Mecca in Saudi Arabia (613 × 403)

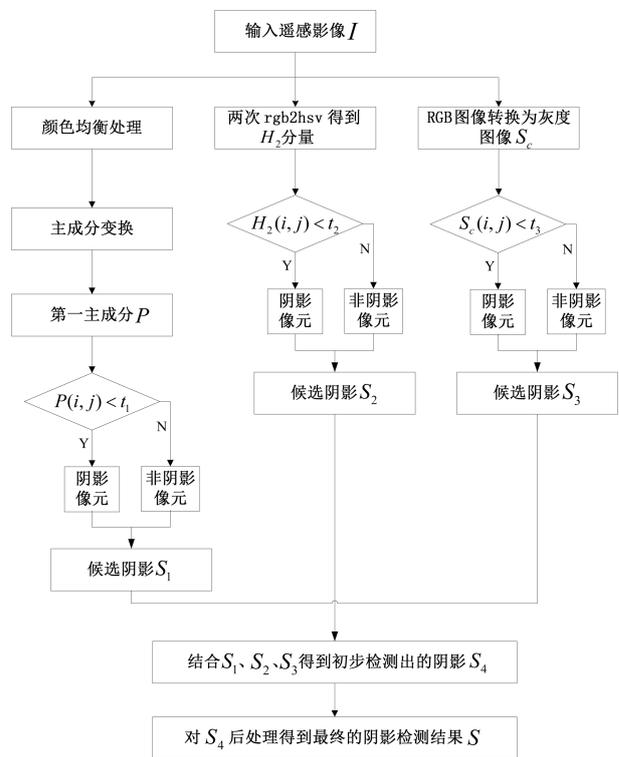


图 3 结合多种检测条件的算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the algorithm combined with many detection conditions

1) 条件 1

对存在较亮阴影的高分辨率遥感影像, 由于其受外界光照环境的影响, 采集来的影像经常会发生颜色偏移, 为使阴影检测能够适应不同的光照和光

源的变化, 必须对图像进行颜色平衡和光线补偿. 因此首先结合 Gray world^[20] 方法对输入的 RGB 遥感影像 I 进行颜色均衡处理; 然后对经过处理后的图像进行主成分变换, 得到第一主成分 PC_1 ^[18, 22], 如式 (1) 对第一主成分 PC_1 进行标准化, 得到归一化的第一主成分 P .

$$P = \frac{PC_1}{\max(PC_1)} \quad (1)$$

根据实验, 经过归一化后阴影区域的 P 值主要集中于小值端^[18]. 利用此构建一种有效检测阴影的条件 1, 如式 (2) 所示, 由此得到候选阴影图像 S_1 (阴影像元值为 1, 非阴影像元值为 0). 其中, t_1 是采用 Otsu 法^[23] 进行分割的阈值. 由于每次在进行分割前, 阴影与非阴影区域的特性都已经较显著地区分, 因此在进行阈值分割时对阈值精度的要求并不是很高且 Otsu 法的速度很快, 因此文中很多阈值都是由 Otsu 分割得到的.

$$S_1(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } P(i, j) < t_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2) 条件 2

由于阴影区域的色调值一般比非阴影区域高, 利用此性质进行一些简单遥感图像的阴影检测. 但是, 实际应用中由于遥感图像都比较复杂, 仅从色调值来检测阴影稳定性不够, 且阈值不易选取. 而采用对图像做连续两次 RGB 到 HSV 变换的方法, 提取第二次变换后的 H 分量可以达到显著区分阴影与非阴影区域的目的, 因而此时在分离阴影阈值的选取上对阈值精度的要求并不是很高, 灵活性很大, 且更加的稳定^[16].

这里需要指出的是, 在第一次变换之后, H、S、V 的值均规范至 $[0, 255]$ 并分别存放至 RGB 的三个通道之中, 以便于第二次的变换. 第二次变换将第一次变换的结果, 再应用一次相同的色彩空间变换, 并仍然将所得的结果规范至 $[0, 255]$ ^[16], 提取出最终的 H 分量, 这里简称为 H_2 分量. 通过对 H_2 分量进行 Otsu 阈值分割构建一种有效检测阴影的条件 2, 由此得到候选阴影图像 S_2 . 其中, 分割的阈值为 t_2 .

3) 条件 3

根据实验对于较暗地物中的阴影, 当选择 RGB 图像灰度直方图的第一个波谷作为阈值时, 可以用来较好地区分较暗地物中的阴影和非阴影. 其中这里的第一个波谷定义为灰度直方图中像素值由小到大, 当某像素值的像素个数满足小于该像素大小 15 像素值范围内每个像素值的像素个数的最小像素对应的波谷. 如式 (3) 所示, 最终 t_3 取的是满足式 (3) 的最小值.

$$\begin{aligned} & \text{couts}(t_3 \pm i) > \text{couts}(t_3), \\ & \text{若 } i = 1, 2, \dots, 15 \text{ 且 } t_3 > 15 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, t_3 和 i 为像素值, couts 函数计算的是某像素值所对应的像素个数.

所以将 RGB 图像转化为灰度图像, 然后对灰度图像按式 (4) 进行直方图的阈值处理, 利用此构建一种有效检测阴影的条件 3, 由此得到候选阴影图像 S_3 .

$$S_3(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } S_c(i, j) < t_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, S_c 为原始 RGB 图像转换成的灰度图像.

结合三个候选阴影 S_1, S_2, S_3 , 得到初步检测出的阴影图像 S_4 .

$$S_4(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } S_0(i, j) > t_4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, t_4 是 Otsu 分割的阈值, S_0 为三个候选阴影 S_1, S_2 和 S_3 的加权组合.

$$S_0 = [a, b, c] [S_1, S_2, S_3]^T \quad (6)$$

其中, a, b, c 是 S_1, S_2 和 S_3 的加权系数且满足 $a + b + c = 1$.

为实现算法的自动检测, 即检测过程无需人工干预, 需实现确定三个加权系数 a, b, c 的取值. 为此, 对多幅实际遥感影像实验讨论不同权值对检测效果的影响. 分别取三个权值 a, b, c 在 $0.1 \sim 0.5$ 之间, 以步长 0.1 变化, 共有以下 18 种情况: 情况 1: 0.1, 0.5, 0.4; 情况 2: 0.1, 0.4, 0.5; 情况 3: 0.2, 0.5, 0.3; 情况 4: 0.2, 0.4, 0.4; 情况 5: 0.2, 0.3, 0.5; 情况 6: 0.3, 0.5, 0.2; 情况 7: 0.3, 0.4, 0.3; 情况 8: 0.3, 0.3, 0.4; 情况 9: 0.3, 0.2, 0.5; 情况 10: 0.4, 0.5, 0.1; 情况 11: 0.4, 0.4, 0.2; 情况 12: 0.4, 0.3, 0.3; 情况 13: 0.4, 0.2, 0.4; 情况 14: 0.4, 0.1, 0.5; 情况 15: 0.5, 0.4, 0.1; 情况 16: 0.5, 0.3, 0.2; 情况 17: 0.5, 0.2, 0.3; 情况 18: 0.5, 0.1, 0.4. 图 4 给出了情况 1 到情况 18 的测试结果, 其中标“○”的曲线表示对较亮阴影检测的总错误率, 标“□”的曲线表示对较暗地物中阴影检测的总错误率. 根据图 4 可知, 兼顾较亮阴影的检测性能和较暗地物中阴影的检测性能, 情况 4 的总错误率最小. 为此, 本文算法将三个加权系数 a, b, c 分别固定为 0.2, 0.4 和 0.4.

1.2 后处理

首先是利用文献 [3] 提出的基于颜色特征绿地去除条件 C 来对绿地进行去除.

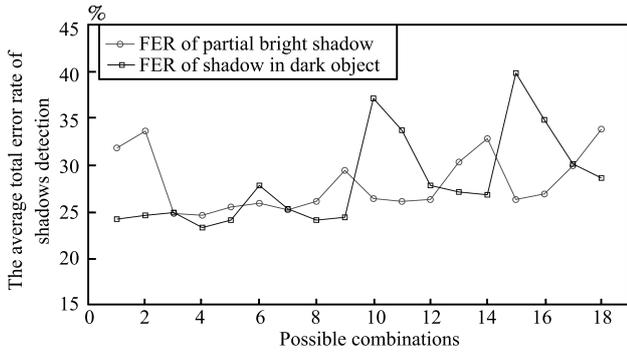


图 4 不同情况的亮、暗阴影的总错误率
Fig. 4 Total error rate of different conditions of light and dark shadow

$$C = \begin{pmatrix} G(i, j) > \max(R(i, j), B(i, j)) \\ \text{且 } (G(i, j) - B(i, j) > 6) \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $R(i, j)$, $G(i, j)$, $B(i, j)$ 分别代表 RGB 遥感图像 I 的三个颜色分量.

但是由于上述方法只是对绿地的去除效果较好, 而其他偏蓝色和偏绿色的地物仍有可能被误检测为阴影, 所以为此设置判定为偏蓝色或偏绿色地物的条件 D :

$$D = (G(i, j) > t_5) \text{ 或 } (B(i, j) > t_6) \quad (8)$$

其中, t_5 和 t_6 分别是 RGB 遥感图像 I 中 G、B 分量的 Otsu 阈值. 为此, 按式 (9) 计算, 去除候选阴影 S_4 中偏蓝色和偏绿色地物, 得到无干扰后的阴影区 S .

$$S(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } S_4(i, j) = 1 \\ & \text{且 } I(i, j) \text{ 不满足条件 } C \text{ 和 } D \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

最后由于整个算法是基于像素级处理以及噪声引入的误差, 检测结果中难以避免有极少部分微小孔洞或对影像后续处理 (如信息识别、特征提取等) 无意义的阴影碎片, 在此去除阴影区域像素个数小于 T_0 的阴影碎片, 填充阴影区域内像素个数小于 T_B 的孔洞规整检测结果. 本文所有实验均采用 $T_0 = 150$, $T_B = 20$ ^[3, 8].

为直观反映各条件识别阴影的能力, 图 5 所示较亮阴影的迈阿密和较暗地物中存在阴影的麦加城两幅影像在多种不同条件下的阴影检测结果. 为便于观察, 本文用白色表示阴影区.

为定量比较算法的检测性能, 采用文献 [8] 的三个定量评价指标: 漏检率 (Omitted error)、误检率 (Committed error) 及总错误率 (Total error), 分别定义为

$$\text{漏检率: } F_{\text{OER}} = \frac{F_N}{T_S} \quad (10)$$

$$\text{误检率: } F_{\text{AER}} = \frac{F_P}{T_S} \quad (11)$$

$$\text{总错误率: } F_{\text{TER}} = F_{\text{AER}} + F_{\text{OER}} \quad (12)$$

其中, T_S 为真实阴影像素点数, F_N 为未检测到的真实阴影像素点数, F_P 为非阴影误检为阴影的像素点数. 漏检率、误检率、总错误率均是越小表明检测效果越好.

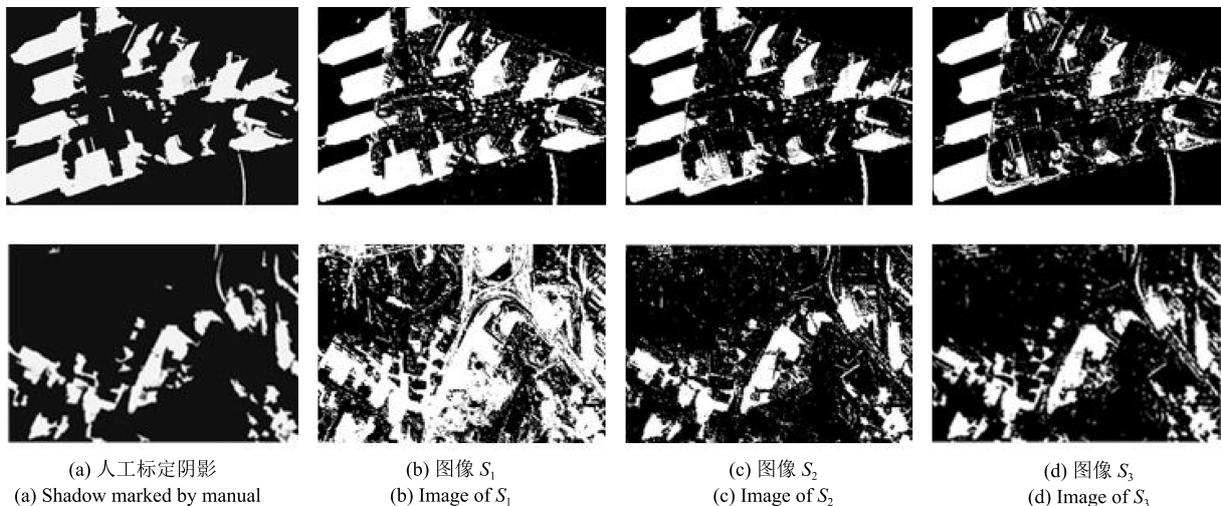


图 5 不同条件下的检测结果

Fig. 5 Detection results under different conditions

结合表 1 给出的不同条件下阴影检测性能评价指标和图 5 可知, 在图 5 (b) 中检测出的阴影图像 S_1 对遥感影像中存在较亮阴影部分具有较好的检测结果, 总错误率只有 24.74%. 但对影像中较暗地物中的阴影部分存在较大的误检, 误检率达到 211.38%. 在图 5 (c) 中, S_2 能大体上检测出影像中的阴影部分, 对较亮阴影和较暗地物中的阴影的总错误率分别为 20.79% 和 50.57%. 在图 5 (d) 中, S_3 对遥感影像中较暗地物中的阴影具有较好的检测结果, 相对于 S_1 和 S_2 , 总错误率下降到 37.66%. 但是对影像中较亮阴影部分存在一定的漏检, 相对于 S_1 和 S_2 , 漏检率上升到 26.97%.

针对影像中的阴影可能在某一特性下的呈现特性不明显, 而导致阴影的检测效果不佳. 因此为了对较亮阴影和较暗地物中的阴影都能较好地检测, 需结合上述三个条件, 通过各个条件的相互补充, 有效地降低漏检率和误检率.

2 实验对比及其分析

为验证本文算法的性能, 对大量不同卫星 (如 QuickBird、WorldView-1 等) 拍摄的遥感图像进行阴影检测. 所有实验结果都是在 Intel (R) Core (TM) i3 CPU@2.27 GHz、Win7、2 GB 内存的 PC 机、Matlab7.0 的平台上编程实验所得.

为了进行比较, 图 6 和图 8 给出了本文、自适应特征选择法^[8] (简称 SAFS)、水平集法^[3] (简称 Level) 和自动检测法^[2] (简称 Autode) 的对比实验与分析.

2.1 较亮阴影检测结果与分析

图 6 为迈阿密的检测结果, 图 6 (a) 为人工标定标准阴影. 如图 6 (b) 所示, SAFS 法检测到的阴影区连续, 轮廓清晰整齐, 但漏检较严重; 如图 6 (c) 所示, Autode 法虽然能大体上检测出阴影, 但是误检

表 1 不同条件下阴影检测性能评价 (%)

Table 1 Detection performance evaluation of shadow under different conditions (%)

Images	Miami			Mecca		
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
F_{OER}	6.13	14.98	26.94	0.27	11.19	5.41
F_{AER}	18.61	5.80	6.23	211.38	39.38	32.24
F_{TER}	24.74	20.79	33.20	211.65	50.57	37.66



(a) 人工标定阴影
(a) Shadow marked by manual



(b) 文献 [8] (SAFS)
(b) Reference [8] (SAFS)



(c) 文献 [3] (Level)
(c) Reference [3] (Level)



(d) 文献 [2] (Autode)
(d) Reference [2] (Autode)



(e) 本文
(e) Proposed

图 6 迈阿密检测结果

Fig. 6 Detection results of Miami

较大; 如图 6(d) 和图 6(e) 所示, Level 法和本文方法检测较全面, 效果较好.

为了更加充分地说明本文的检测效果, 文中列出了四幅具有代表性的较亮阴影的遥感影像, 如图 1 和图 7 所示. 其中图 1 是迈阿密图像 (Miami), 图 7(a) 是杰克逊维尔图像 (Jacksonville), 图 7(b) 是拉斯维加斯图像 (Las Vegas), 图 7(c) 是城市影像 1 (Urban image 1). 在表 2 中列出了四幅较亮阴影遥感影像的测试结果.

表 2 给出了上述四幅具有较亮阴影遥感影像的客观评价指标. 从漏检率分析, 本文方法的漏检率低于 SAFS 法, 和 SAFS 法相比, 漏检率平均降低了 18.3%; 本文的漏检率虽然略高于 Level 法与 Autode 法, 但平均漏检率也只有 13.96%. 从误检率分析, 本文方法的误检率低于 Level 法与 Autode 法, 和 Level 法相比, 误检率平均降低了 10.9%; 和 Autode 法相比, 误检率平均降低了 16.09%. 本文方法对阴影检测较全面, 误检率虽然略高于 SAFS 法, 但平均误检率也只有 10.65%. 从总错误率, 即综合性能评价分析, 本文方法平均总错误率只有 24.61%, 比 SAFS 法降低了 16.75%, 比 Level 法降低了 7.24%, 比 Autode 法降低了 14.12%, 检测效果明显优于 SAFS、Level 与 Autode 法.

2.2 较暗地物中阴影检测结果与分析

图 8 为沙特阿拉伯麦加城的检测结果, 图 8(a) 为人工标定标准阴影. 如图 8(b) 所示, SAFS 法检测到的阴影区漏检较严重; 如图 8(c) 所示, Level 法的误检很大, 几乎不能区分阴影和暗色沥青道路; 如图 8(d) 所示, Autode 法检测的误检也较大; 如图

8(e) 所示, 本文方法取得了与人工标定标准阴影相差甚微的检测效果.

为了更加充分地说明本文的检测效果, 文中列出了四幅具有代表性的较暗地物中存在阴影的遥感影像, 如图 2 和图 9 所示. 其中图 2 是沙特阿拉伯麦加城影像 (Mecca), 图 9(a) 是城市影像 2 (Urban image 2), 图 9(b) 是城市影像 3 (Urban image 3)、图 9(c) 是城市影像 4 (Urban image 4). 在表 3 中列出了对上述四幅较暗地物中的阴影的测试结果.

表 3 给出了上述四幅较暗地物中阴影的客观评价指标. 从漏检率分析, 本文方法的漏检率低于 SAFS 法与 Autode 法, 和 SAFS 法相比, 漏检率平均降低了 28.87%; 和 Autode 法相比, 漏检率平均降低了 2.2%; 和 Level 法相比, 漏检率虽然略高于 Level 法, 但平均漏检率也只有 10.03%. 从误检率分析, 本文方法的误检率低于 Level 法与 Autode 法, 和 Level 法相比, 误检率平均降低了 67.37%; 和 Autode 法相比, 误检率平均降低了 12.26%; 本文方法对阴影检测较全面, 误检率虽然略高于 SAFS 法, 但平均误检率也只有 13.27%. 从总错误率, 即综合性能评价分析, 本文方法平均总错误率只有 23.30%, 比 SAFS 法降低了 16.93%, 比 Level 法降低了 62.27%, 比 Autode 法降低了 14.45%, 检测效果明显优于 SAFS、Level 与 Autode 法.

结合表 2 和表 3 得出较亮阴影和较暗地物中阴影的平均总错误率, 如表 4 所示.

由表 4 可以看出, 虽然文献 [3] 对较亮的阴影检测效果较好, 但是对较暗地物中的阴影检测效果较差. 而本文无论是对较亮的阴影, 还是对较暗地物中的阴影, 平均总错误率都比前面的三种方法低. 由上

表 2 不同条件下阴影检测性能评价 (%)

Table 2 Detection performance evaluation of shadow under different conditions (%)

	Images	Miami	Jacksonville	Las Vegas	Urban image 1	Average
F_{OER}	Reference [8]	38.41	6.20	37.27	47.17	32.26
	Reference [3]	6.83	16.22	9.75	8.4	10.3
	Reference [2]	8.03	17.90	13.21	8.81	11.99
	Proposed	12.70	9.67	8.47	25.01	13.96
F_{AER}	Reference [8]	0.34	23.20	7.57	5.22	9.08
	Reference [3]	7.53	30.74	11.86	36.05	21.55
	Reference [2]	11.52	59.02	7.38	29.02	26.74
	Proposed	2.39	19.81	14.57	5.81	10.65
F_{TER}	Reference [8]	38.75	29.40	44.84	52.39	41.36
	Reference [3]	14.36	46.96	21.61	44.45	31.85
	Reference [2]	19.55	76.95	20.59	37.84	38.73
	Proposed	15.09	29.48	23.03	30.82	24.61

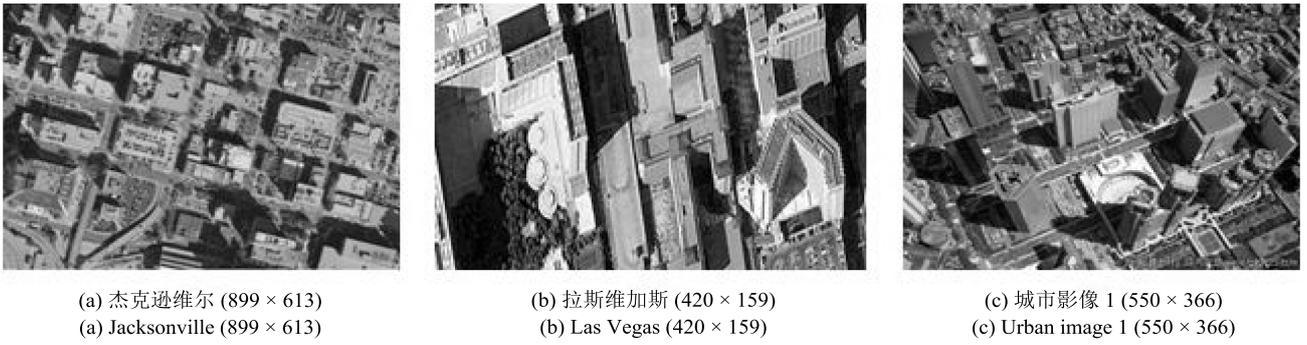


图 7 待检测的较亮阴影影像

Fig. 7 Partial bright shadow images to be detected

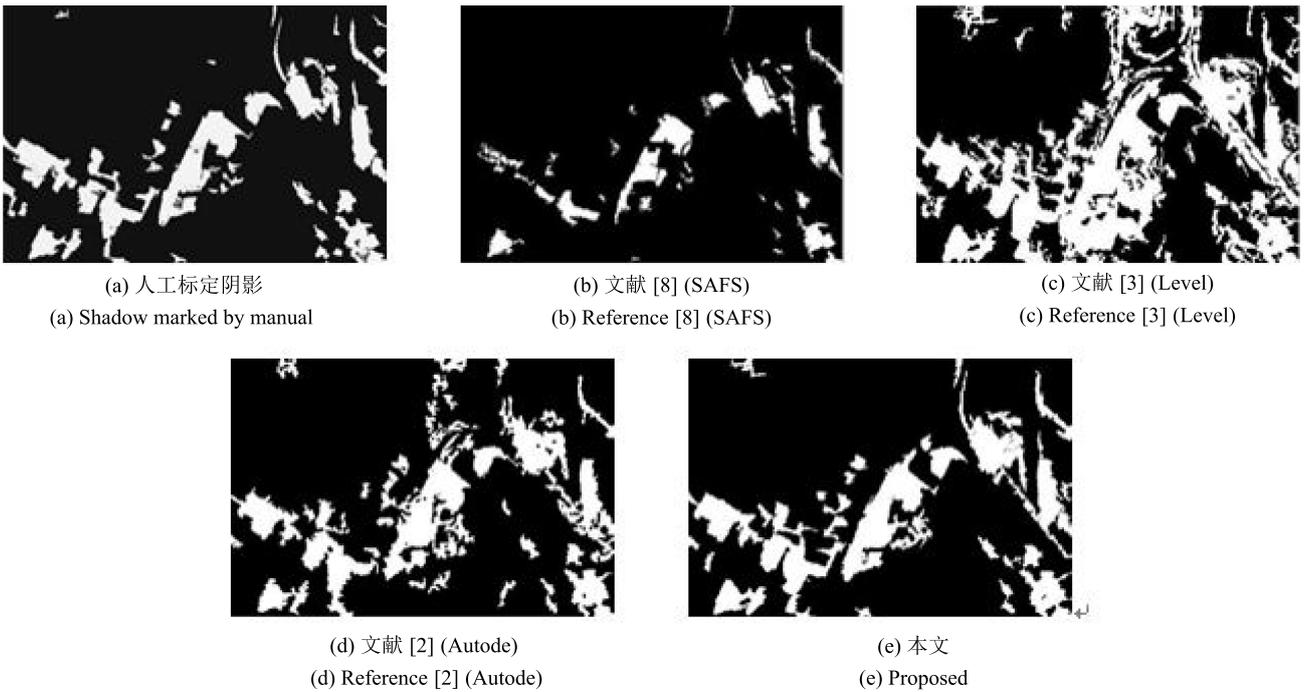


图 8 麦加城的检测结果

Fig. 8 Detection results of Mecca

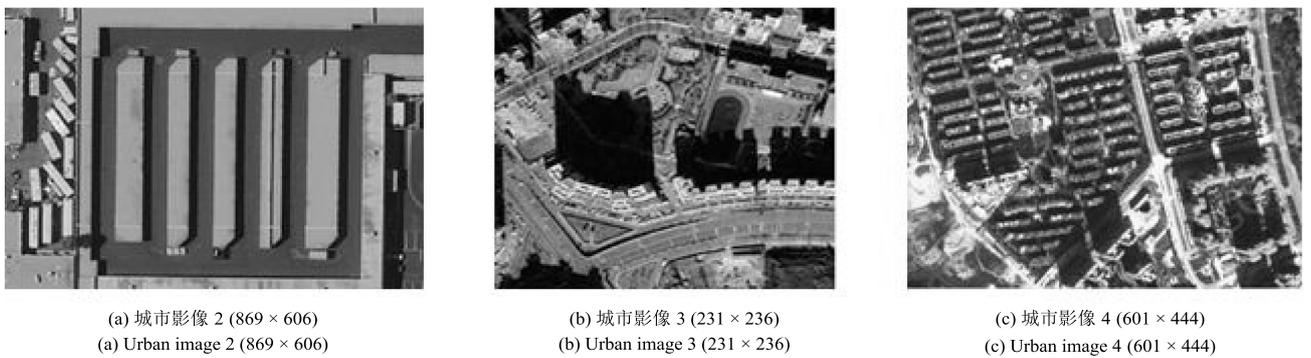


图 9 待检测的较暗地物中的阴影

Fig. 9 Shadows in dark object to be detected

表 3 较暗地物中阴影检测性能评价 (%)
Table 3 Detection performance evaluation of shadows in dark object (%)

	Images	Mecca	Urban image 2	Urban image 3	Urban image 4	Average
F_{OER}	Reference [8]	53.51	36.88	31.32	33.87	38.90
	Reference [3]	4.21	3.59	6.3	5.6	4.93
	Reference [2]	15.50	18.11	7.17	8.12	12.23
	Proposed	5.30	11.81	6.74	16.27	10.03
F_{AER}	Reference [8]	1.13	1.39	0.56	2.25	1.33
	Reference [3]	99.37	168.81	20.88	33.51	80.64
	Reference [2]	45.83	3.42	22.85	30.01	25.53
	Proposed	28.32	5.14	14.58	5.03	13.27
F_{TER}	Reference [8]	54.64	38.28	31.87	36.12	40.23
	Reference [3]	103.59	172.4	27.17	39.11	85.57
	Reference [2]	61.33	21.53	30.02	38.13	37.75
	Proposed	33.62	16.95	21.32	21.30	23.30

表 4 阴影检测的平均总错误率 (%)
Table 4 The average total error rate of shadows detection (%)

Images	F_{TER}			
	Reference [8]	Reference [3]	Reference [2]	Proposed
较亮阴影	41.36	31.85	38.73	24.61
较暗地物中阴影	40.23	85.57	37.75	23.30

述分析可知, 本文方法对大多数的阴影检测较全面, 检测效果较好.

3 结论

本文通过分析现有的阴影检测算法, 针对现有的阴影检测算法对遥感影像中较亮阴影和较暗地物中的阴影不能同时较好检测的问题, 提出通过结合主成分分析、颜色特征与直方图的分割的遥感影像阴影检测方法. 该方法对较亮阴影和较暗地物中的阴影具有较好的检测效果, 检测方法适用于大多数的遥感影像. 无论从主观性能评价还是客观性能评价, 本文方法的检测效果均优于 SAFS 法、Level 法与 Autode 法.

References

- 1 Wang Wei-Guo. Study of Shadow Processing's Method in High-spatial Resolution RS Image [Master dissertation], Xi'an University of Science and Technology, China, 2008. (王卫国. 高空间分辨率遥感影像阴影处理方法研究 [硕士学位论文], 西安科技大学, 中国, 2008.)
- 2 Gao Xian-Jun, Wan You-Chuan, Yang Yuan-Wei, He Pei-Pei. Automatic shadow detection and automatic compensation in high resolution remote sensing images. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(8): 1709–1720 (高贤君, 万幼川, 杨元维, 何培培. 高分辨率遥感影像阴影的自动检测与自动补偿. *自动化学报*, 2014, **40**(8): 1709–1720)
- 3 Fang Ju-Qin, Chen Fan, He Hong-Jie, Yin Zhong-Ke. Shadow detection of remote sensing images based on local-classification level set and color feature. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(6): 1156–1165 (方菊芹, 陈帆, 和红杰, 尹忠科. 结合局部分类水平集与颜色特征的遥感影像阴影检测. *自动化学报*, 2014, **40**(6): 1156–1165)
- 4 Xia Huai-Ying, Guo Ping. A shadow detection of remote sensing images based on statistical texture features. *Journal of Remote Sensing*, 2011, **15**(4): 778–791 (夏怀英, 郭平. 基于统计混合模型的遥感影像阴影检测. *遥感学报*, 2011, **15**(4): 778–791)
- 5 Makarau A, Richter R, Muller R, Reinartz P. Adaptive shadow detection using a blackbody radiator model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(6): 2049–2059
- 6 Bao Hai-Ying, Li Yan, Yin Yong-Yi. The study on shadow detection and shadow elimination in the urban aerial image. *Remote Sensing Information*, 2010, (1): 44–47 (鲍海英, 李艳, 尹永宜. 城市航空影像的阴影检测和阴影消除方法研究. *遥感信息*, 2010, (1): 44–47)
- 7 Chung K L, Lin Y R, Huang Y H. Efficient shadow detection of color aerial images based on successive threshold-

- ing scheme. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(2): 671–681
- 8 Liu J H, Fang T, Li D R. Shadow detection in remotely sensed images based on self-adaptive feature selection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(12): 5092–5103
- 9 Zhang H Y, Sun K M, Li W Z. Object-oriented shadow detection and removal from urban high-resolution remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(11): 6972–6982
- 10 Lorenzi L, Melgani F, Mercier G. A complete processing chain for shadow detection and reconstruction in VHR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(9): 3440–3452
- 11 Luo H, Shao Z F. A shadow detection method from urban high resolution remote sensing image based on color features of shadow. In: *Proceedings of the 2012 International Symposium on Information Science and Engineering*. Shanghai, China: IEEE, 2012. 48–51
- 12 Fang Ju-Qin. Research on Shadow Detection and Removal in Remote Sensing Images [Master dissertation], Southwest Jiaotong University, China, 2014.
(方菊芹. 遥感影像阴影检测与去除算法研究 [硕士学位论文], 西南交通大学, 中国, 2014.)
- 13 Abraham L, Sasikumar M. An efficient shadow detection method for high resolution satellite images. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*. Coimbatore, India: IEEE, 2012. 1–5
- 14 Liu Hui, Xie Tian-Wen. Study on shadow detection in high resolution remote sensing image based on PCA and HIS model. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(1): 78–84
(刘辉, 谢天文. 基于 PCA 与 HIS 模型的高分辨率遥感影像阴影检测研究. *遥感技术与应用*, 2013, **28**(1): 78–84)
- 15 Yang Jun, Zhao Zhong-Ming. Shadow processing method based on normalized RGB color model. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 92–96
(杨俊, 赵忠明. 基于归一化 RGB 色彩模型的阴影处理方法. *光电工程*, 2007, **34**(12): 92–96)
- 16 Ju He-Qi. A Fast Shadow Detection and Removal Algorithm for High Resolution Satellite Images [Master dissertation], Shanghai Jiao Tong University, China, 2009.
(鞠何其. 基于色彩空间变换的遥感影像阴影检测与去除技术 [硕士学位论文], 上海交通大学, 中国, 2009.)
- 17 Wang Mi-Feng. Research on Shadow Detection and Compensation in Remote Sensing Images [Master dissertation], Xi'an University of Science and Technology, China, 2011.
(王蜜蜂. 遥感影像的阴影检测与补偿方法研究 [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 中国, 2011.)
- 18 Duan Guang-Yao, Gong Hui-Li, Li Xiao-Juan, Chen Bei-Bei. Shadow extraction based on characteristic components and object-oriented method for high-resolution images. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(4): 760–770
(段光耀, 宫辉力, 李小娟, 陈蓓蓓. 结合特征分量构建和面向对象方法提取高分辨率卫星影像阴影. *遥感学报*, 2011, **18**(4): 760–770)
- 19 Gao Xian-Jun, Wan You-Chuan, Zheng Shun-Yi, Li Jian. Automatic shadow detection and compensation of aerial remote sensing images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, **37**(11): 1299–1302
(高贤君, 万幼川, 郑顺义, 李健. 航空遥感影像阴影的自动检测与补偿. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2012, **37**(11): 1299–1302)
- 20 Zhu Qing, Xu Sheng-Hua, Han Li-Tao. A new shadow extraction method from color aerial images based on Dempster-Shafer evidence theory. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(6): 588–595
(朱庆, 徐胜华, 韩李涛. 基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取方法. *自动化学报*, 2007, **33**(6): 588–595)
- 21 Wang Shu-Gen, Wang Jun-Li, Wang Ai-Ping. Shadow detection and extraction from imagery based on total variation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(8): 663–666
(王树根, 王军利, 王爱萍. 基于整体变分模型的影像阴影检测算法研究. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2006, **31**(8): 663–666)
- 22 Yan Hong-Ping, Yu Bing. The principal component analysis for RS image processing. *Resources Environment and Engineering*, 2006, **20**(2): 168–170
(严红萍, 俞兵. 主成分分析在遥感图像处理中的应用. *资源环境与工程*, 2006, **20**(2): 168–170)
- 23 Rusinkiewicz S, Hall-Holt O, Levoy M. Real-time 3D model acquisition. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 438–446



张先鹏 西南交通大学信息科学与技术学院硕士研究生。主要研究方向为图像处理, 遥感图像目标检测与识别。

E-mail: 15281099347m0@sina.cn

(**ZHANG Xian-Peng** Master student at the Collage of Information Science and Technology Engineering, Southwest Jiaotong University. His research interest covers image processing and target detection, and recognition of remote sensing image.)



陈帆 博士, 西南交通大学信息科学与技术学院副教授。主要研究方向为多媒体数据安全, 图像处理, 计算机应用技术。本文通信作者。

E-mail: fchen@home.swjtu.edu.cn

(**CHEN Fan** Ph. D., associate professor at the Collage of Information Science and Technology Engineering, Southwest Jiaotong University. His research interest covers multimedia data security, image processing, and computer application technology. Corresponding author of this paper.)



和红杰 博士, 西南交通大学信息科学与技术学院教授。主要研究方向为图像处理, 图像取证。

E-mail: hjhe@home.swjtu.edu.cn

(**HE Hong-Jie** Ph. D., professor at the Collage of Information Science and Technology Engineering, Southwest Jiaotong University. Her research interest covers image processing and image forensics.)