

doi:10.3788/gzxb20154412.1228002

面向对象的高分辨遥感影像阴影探测方法

帅滔^{1,2}, 张洪艳^{1,2}, 张良培^{1,2}

(1 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

(2 武汉大学 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

摘 要:利用阴影在色调亮度饱和度颜色空间中低亮度、高色调和高饱和度的特性,对高分辨率遥感影像做过分割处理,并将影像从红、绿、蓝颜色空间转换到色调、亮度、饱和度颜色空间,利用色调、亮度、饱和度三个分量构造一组能够更好地区分阴影和其他地物的新型阴影探测指标.对阴影指标做面向对象处理,得到一种保持空间几何形状的阴影指标结果;根据最大类间方差法计算得到最佳阈值,并做直方图阈值分割,最终得到阴影探测结果.实验结果表明,该方法可以有效地将阴影与其他地物分离开来.

关键词:阴影探测;阴影指标;颜色空间;面向对象;影像分割;阈值分割;高分辨率

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1228002-8

The Object-based Method of Shadow Detection in High-resolution Remote Sensing Imagery

SHUAI Tao^{1,2}, ZHANG Hong-yan^{1,2}, ZHANG Liang-pei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, 430079, China)

(2 Collaborative Innovation Center of Geo-Spatial Information Technology, Wuhan University, Wuhan, 430079, China)

Abstract: The shadow areas have the characters of lower brightness, higher saturation and greater hue value. Over-segmentation of the high resolution remote sensing image was operated, and the red, green and blue color image was transformed to the hue, intensity and saturation space. A shadow index was calculated using the hue, intensity and saturation, which could separate shadow from other classes. An object-oriented processing was performed on the shadow index results, which could keep the spatial geometry information of image. OSTU algorithm is used to choose a suitable threshold value. With the threshold value, the shadow detection results could be acquired by the histogram thresholding segmentation algorithm. Experimental results demonstrate that the proposed approach can be used to separate shadow from other classes effectively.

Key words: Shadow detection; Shadow index; Color space; Object-based; Image segmentation; Thresholding; High resolution

OCIS Codes: 280.0280; 100.2000; 110.2960; 100.3008; 100.2960; 100.5010

0 引言

随着遥感影像空间分辨率的逐步提高^[1],阴影成为影响影像质量的重要因素之一.阴影现象是影像质量退化的一种独特方式,会使影像阴影区域所反映的

地物信息受到干扰,导致影像出现损坏甚至信息完全丢失^[2],造成相应区域地物的影像匹配、边缘提取和地物识别的准确度出现不同程度的降低.阴影是在阳光照射下,由于高于地面物体的遮挡导致太阳光无法到达遮挡物体后面而产生的^[3-4].在影像上阴影区域亮度

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61201342, 41431175)和国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB707105)资助

第一作者:帅滔(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为高分辨率遥感影像质量改善. Email: 1207569104@qq.com

导师(通讯作者):张洪艳(1983—),男,副研究员,博士,主要研究方向为遥感影像质量改善和高光谱遥感影像分析. Email: zhanghongyan@whu.edu.cn

收稿日期:2015-05-13; **录用日期:**2015-10-13

<http://www.photon.ac.cn>

值大多要低于非阴影区域亮度值. 一般来讲, 对阴影处理包括阴影探测和阴影补偿两个过程.

阴影探测方法主要分为两大类, 即基于模型的方法和基于阴影特性的方法. 基于模型的方法是根据影像上地物目标的几何形状, 数字地表模型 (Digital Surface Model, DSM) 数据, 以及太阳、传感器的有关参量等先验知识建立模型探测阴影区域^[5-6]. 这类方法的缺点为需要先验知识, 且辅助数据的获取成本较高. 基于阴影特性的方法则是根据影像上阴影区域光谱、几何性质, 以及阴影区域与非阴影区域的差别来检测阴影. 影像上色度信息在一定条件下不受光照变化影响, 通过选取某些比其周边区域暗、而色度信息类似的区域可以检测出影像上的阴影区域, Jaynes 和 Finlayson 等人基于此提出了有效的彩色图像阴影检测方法^[7-8]. 之后 Elemadma 提出了基于同态滤波的检测方法^[9]. Polidorio 等人利用阴影的低亮度和蓝波段的高饱和度两个特性, 通过对饱和度分量和亮度分量做分割处理来检测彩色航空影像上的阴影^[10]. Tsai 通过分析彩色航空影像上阴影区域的亮度和色调属性, 提出了一种阴影检测方法^[11]. Lorenzi 等人提出了基于监督分类的阴影检测方法^[12], 利用分类器 (如支持向量机分类器) 和各种数学形态学滤波算子来区分阴影区域与非阴影区域^[12]. Li 等人和 Guo 等人采用软阴影探测方法, 通过估算每个像素与阴影及非阴影的灰度距离值来计算像素被阴影覆盖的概率, 软阴影中的概率值能反映出半阴影和不均匀阴影^[13-14]. Sun 等人提出对红绿蓝三波段做加权计算, 并将得到的灰度影像做面向对象处理, 再对灰度影像直方图进行阈值分割, 最终得到探测结果^[15].

文献[7-14]虽然介绍了多种阴影探测方法, 但這些方法只能在特定的遥感影像上取得较好的探测准确度, 不具有普适性. 例如, 基于色度光照不变性的方法没有考虑彩色航空影像中的阴影特性, 无法适用于彩色航空影像上的阴影探测; 基于颜色空间阴影指标的方法容易使深蓝色、深绿色的地物与阴影区域产生混淆; 基于监督学习的阴影探测方法可以得到比较理想的结果, 但该方法需要较多的人工干预, 自动性较差; 基于软阴影的探测方法较难确定半阴影的分布范围, 探测准确度也难以评价.

为了提高阴影探测的准确度和方法的自动化程度, 本文提出了一种基于新型阴影探测指标的面向对象阴影探测方法. 该方法主要利用阴影在色调、亮度、饱和度三个分量中的特性构造新型阴影探测指标. 相对于其他阴影指标, 该阴影指标增强了阴影区域和非

阴影区域内各类地物的差异, 能够更准确地分离出阴影区域. 针对高分辨率遥感影像采用面向对象处理, 通过对影像做过分割操作, 确保分割块内像素的纯粹性, 从而保持探测结果中阴影区域的空间几何形状. 此外, 直方图阈值分割时的阈值选取采用最大类间方差法进行计算, 无需人工干预, 保证了方法的完全自动化.

1 阴影探测

1.1 阴影成像

阴影是指从光源发射的光线在照射方向上由于障碍物的遮挡, 使得能量不能或者部分不能到达障碍物后方而形成的特殊区域. 对于高分辨率遥感影像来说, 太阳就是唯一的光源, 而太阳与地球之间距离非常大, 因此可以将影像上的阴影理解为一组平行光线被阻挡产生的, 太阳直射光线的照射强度基本为零, 阴影区域的亮度主要取决于散射光 (天空光为主) 的照射强度. 阴影形成的示意图如图 1.

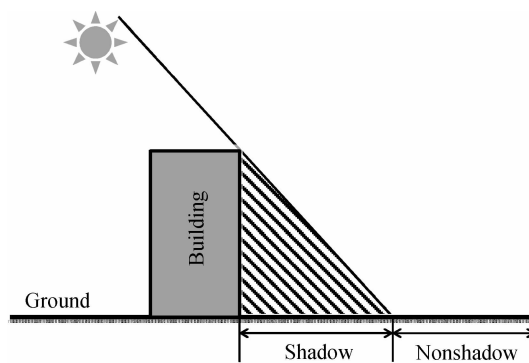


图 1 阴影形成示意图

Fig. 1 Illustration of shadow

1.2 阴影在颜色空间 HIS 中的性质

在红绿蓝 (Red, Green, Blue, RGB) 颜色空间中, 阴影区域的地表反射率明显较低, 而在色调亮度饱和度 (Hue, Intensity, Saturation, HIS) 空间中则是与光度无关的颜色空间, 根据坐标转换可以分离地物的亮度和色度, 其中亮度与光度相关, 但色度与亮度无关, 色度分别用色调和饱和度表示^[16].

影像由 RGB 空间变换至 HIS 空间的公式为

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/3 \\ 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$$

$$H = \arctan(V_2/V_1) \quad V_1 \neq 0$$

式中, 当 $V_1 = 0$ 时, 不对色调 H 做定义. 图 2 显示了将影像由 RGB 转换至 HIS 颜色空间中的结果.

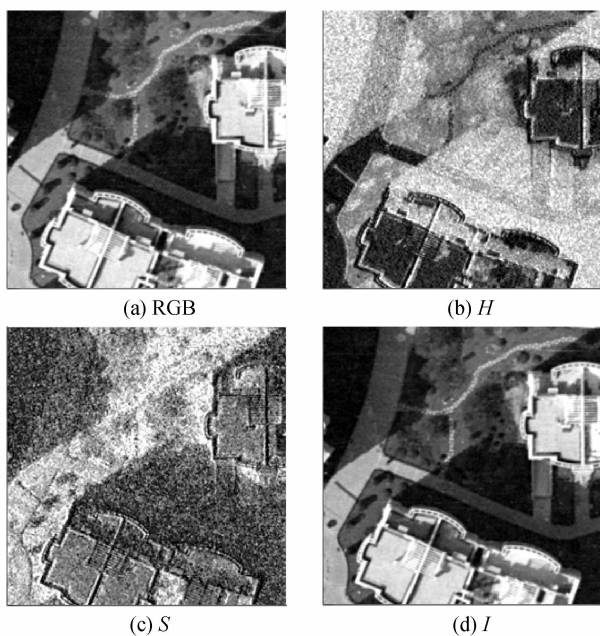


图2 颜色空间
Fig. 2 Color space

在 HIS 颜色空间中,对比于非阴影区域内的各类地物,阴影表现出以下三条独特的光谱特性^[11](如图 3).

- 1) 由于太阳的电磁辐射被阻挡,因此阴影区具有较低的亮度值 I ;
- 2) 由于阴影区的亮度主要来自大气散射的环境光,阴影对红光波段亮度值的影响大于蓝光波段,根据色调的计算公式可以推算,当一个区域被阴影覆盖时,其色调 H 较无阴影时高.
- 3) 蓝紫光在大气中较强的瑞利散射作用下,使其阴影像素具有较高的饱和度 S .

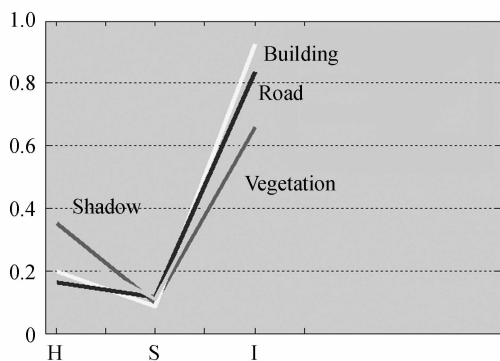


图3 HIS 颜色空间中的光谱特性
Fig. 3 Spectrums in HIS color space

1.3 HIS 阴影探测方法

根据阴影的上述特性,Tsai 在 2006 年提出一种基于光谱比值图像和阈值分割的阴影探测方法.在该方法中,首先将影像由 RGB 空间转换至 HIS 颜色空间,由 H 分量和 I 分量构建式(2),得到比值图像.然后,对该比值图像采用最大类间方差法计算最佳阈值,并

逐个判定影像上的所有像素是否属于阴影像素,最终得到阴影探测结果为

$$r = (H + 1) / (I + 1) \quad (2)$$

比值图像可增强低亮度阴影区域的色调属性,即该图像中阴影区域的值要大于非阴影区域的值,如图 4.从比值图像中可以看出,虽然阴影区域的像素得到了很大的增强,但是非阴影区域中的植被像素也同样得到了增强,这是因为植被区域和阴影区域在 H 、 S 、 I 三个分量中的值都非常类似的,在 H 分量中都有较大的响应,同时在 I 分量中都比较暗,这导致了 Tsai 提出的阴影指标式(2)不能有效地区分阴影区域与其他地物类型.

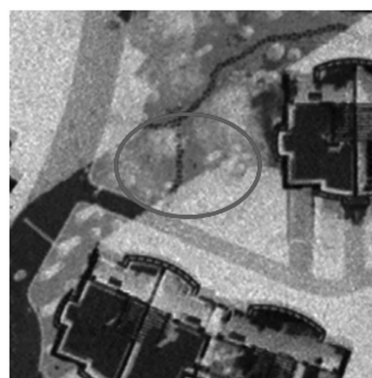


图4 阴影比值图像
Fig. 4 Image of shadow index

2 面向对象的新型阴影探测方法

2.1 影像分割

在高分辨率遥感影像中,由于更丰富的空间信息,地物几何结构、形状、纹理特征更加明显,但影像波段较少,导致地物类间差异减小、类内差异增大^[17].高分辨率遥感影像的这种特性,导致传统的面向像素方法易受椒盐噪声的影响,从而降低目标信息提取的准确度.面向对象是近年来提出的新方法,对于高分辨率遥感影像阴影而言,面向对象的处理方式可以较好地保持探测结果中阴影区域的几何形状,过滤掉结果中不必要的椒盐噪声点.

影像分割是实现面向对象的高分辨率遥感影像信息提取的一个重要步骤^[18-19],即通过影像分割可提取影像中的同质区域.本文采用均值漂移(Mean Shift)分割算法^[20].均值漂移算法是一种无参量统计迭代算法,它是使每一个点“漂移”到密度函数的局部极大值点^[21],近年来已广泛应用于计算机视觉领域,如聚类分析、跟踪、图像分割、图像平滑、滤波、图像边缘提取、信息融合等方面^[22-23].均值漂移分割算法是将像素灰度值和空间坐标组成联合特征空间,通过迭代过程实现图像的滤波,通过对滤波结果的区域增长实现对图像的区域分割^[24].

本文对 RGB 影像做 Mean Shift 分割处理,结果如图 5,其中图(a)是对影像做欠分割处理的结果,图(b)是对影像做过分割处理的结果.从图中观察得知,影像的欠分割结果不能将多种地物有效分离开,而影像的过分割则可以将影像分成大量纯净地物块.由于本文方法需要尽量保证每个分割块中所包含的像素属于同一类地物,即确保分割块内的地物纯粹性,因此需要对 RGB 影像进行 Mean Shift 过分割处理.

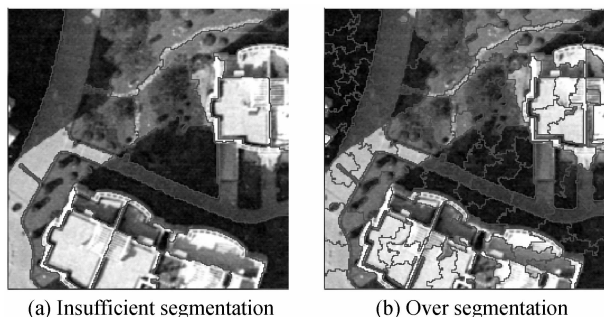


图 5 Mean shift 分割
Fig. 5 Image of mean shift segmentation

2.2 面向对象的新型阴影指标

由上述 Tsai 的方法分析可知,在区分阴影区域和植被区域时,阴影指标仅依靠 H 和 I 分量显然是不理想的.理想的阴影指标应更充分的利用 H 、 I 、 S 三个分量,尤其还应考虑 S 分量中阴影的特性.因此,在式(2)的基础上,本文建立新的阴影指标为

$$\text{Index} = \frac{(H+1) \cdot |I-S|}{(I+1) \cdot (I+S)} \quad (3)$$

式中, $\frac{|I-S|}{I+S}$ 可抑制植被区域的高响应,并保证阴影区域的突显性,称为抑制因子,如图 6(a).根据新型阴影指标式(3)得到结果如图 6(b).通过比较实验结果,相对 Tsai 提出的阴影指标,新型阴影指标在保证了阴影区域和房屋屋顶、道路的可分性的前提下,更好地区分开了容易混淆的阴影区域和植被区域.

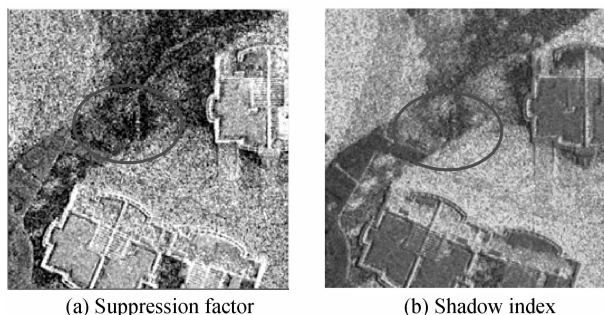


图 6 新型阴影指标结果
Fig. 6 Image of new shadow index

对新型阴影指标做面向对象处理,即对每个分割块内的像素新型阴影指标结果取平均值,并赋给该分割块的所有像素,如图 7.从图中可以观察到,面向对象处理后的新型阴影指标结果在同质区域内平滑,去

除了像素级别的指标结果中的大量噪声,同时保持了影像的几何形状特征,有利于后面通过最大类间方差法确定最佳阈值,以及得到更准确的阴影探测结果.



图 7 面向对象的新型阴影指标结果
Fig. 7 Object-based shadow index image

2.3 最佳阈值的确定

得到阴影指标结果之后,需要确定最佳阈值对影像做阈值分割^[11].OSTU 方法^[25]是 OSTU 在 1978 年提出的最大类间方差法,由于其计算简单、稳定高效,因此被广泛应用于阈值选取.其原理是根据某一阈值将影像的直方图分成两组,当两组的方差最大时,可得最佳阈值.方差反映影像灰度分布的均匀性,因此方差值越大表明组成图像的两组分量之间的差异性越大,方差值越小则表示两组分量之间的差异性越小,分量间存在错分的情况.因此,类内方差最小且类间方差最大的数值就是最佳阈值.根据确定的最佳阈值可将影像分割成一个二值影像,其中大于阈值的像素判为阴影,小于阈值的像素则判为非阴影.OSTU 阈值分割法的目标函数可以用类间方差表示为

$$V(T) = \frac{(\bar{\mu} \cdot w(T) - \mu(T))^2}{w(T) \cdot \mu(T)} \quad (4)$$

式中 $w(T) = \sum_{i=0}^T p_i$, $\mu(T) = \sum_{i=T+1}^{255} p_i$, $\bar{\mu} = \sum_{i=0}^{255} i \cdot p_i$, p_i 表示值为 i 的像素在影像中出现的频率,.

2.4 本文算法流程

综上所述,本文所提出的面向对象阴影探测算法的具体操作流程如下

- 1) 对原始 RGB 影像做 Mean Shift 过分割,提取影像上的同质区域,用于后续的面向对象处理;
- 2) 将 RGB 影像转换到 HIS 颜色空间中,根据式(3)计算得到新型阴影指标结果;
- 3) 根据分割结果对阴影指标做平滑处理,得到面向对象的阴影指标结果;
- 4) 用 OSTU 法确定阴影指标结果的最佳阈值 T ;
- 5) 根据最佳阈值,对阴影指标结果做阈值分割操作,得到二值化的阴影探测结果.

本文的算法流程框图如图 8.

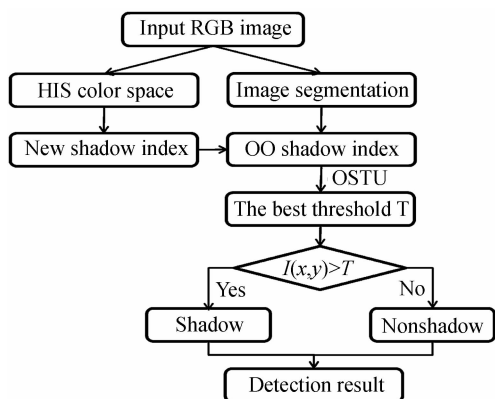


图8 本文算法的流程框图
Fig. 8 Flow chart of the proposed algorithm

3 实验结果与讨论

3.1 实验设置

3.1.1 实验数据

为了验证本文方法的有效性,采用2003年拍摄的武汉汉阳区两块高分辨率航空影像区域作为实验数据,如图9(a)和图9(b).影像中阴影区域都是由于城区中的高大建筑物和树木对太阳光的阻挡而形成的,其中大部分是建筑物遮挡造成的阴影.其中,图9(a)是一幅 676×536 像素大小的实验数据,包含RGB三个波段,主要有植被、房屋、道路、橡胶跑道;图9(b)是 600×536 像素大小,也包含RGB三个波段,影像中包含了更复杂的地物类型,主要有水体、植被、房屋、道路、橡胶跑道.这两幅实验影像中的阴影区域同样地包括了多种地物类型,即植被、水体、房屋、道路、橡胶跑道.图9(c)和图9(d)分别是实验数据一和实验数据二的地面真实阴影参考数据,本文中的地面真实参考数据是采用目视解译的方法人工绘制,用于对探测结果做准确度评定.

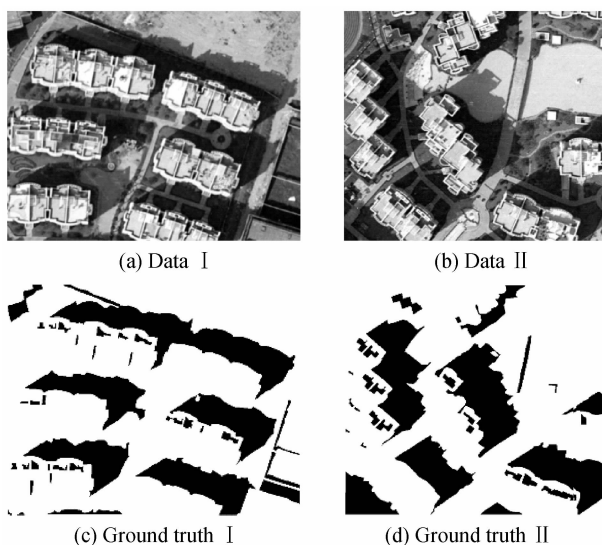


图9 实验数据
Fig. 9 Experiment dataset

3.1.2 实验对比方法

本文方法选择了四种典型的影像探测对比算法.第一种方法是Lorenzi等人采用支持向量机分类器来分离影像上的阴影区域和非阴影区域,此处简称为SVM方法(Support Vector Machine, SVM).第二种方法是在RGB三波段组成的灰度图上直接做直方图阈值分割得到阴影探测结果,这是像素级别的探测方法,简称为HT方法(Histogram Thresholding, HT).第三种方法是Sun等人在HT方法的基础上进行改进,对灰度图先做面向对象处理,再做灰度影像的直方图阈值分割得到探测结果,简称为OHT方法(Object-oriented Histogram Thresholding, OHT).第四种方法是Tsai提出的在颜色空间中采用比值图做阈值分割的探测方法,这同样是一种像素级别探测方法,简称为R-CS(Ratio of Color Space, R-CS).本文提出的基于新型阴影指标的面向对象阴影探测方法用OI-CS(Object-based Index of Color Space, OI-CS)代表.

3.1.3 准确度指标

本文对各种探测方法的结果做准确度评价时,采用了五个准确度指标,即生产者准确度、用户准确度、总体准确度,漏检率和错检率.生产者准确度(Producer's accuracies)包括两个值 η_s 和 η_n ,如式(5). η_s 表示影像中所有的真实阴影像素中被正确检测到的比例, η_n 表示影像中所有的真实非阴影像素中被正确检测到的比例.

$$\left. \begin{aligned} \eta_s &= \frac{TP}{TP + FN} \\ \eta_n &= \frac{TN}{FP + TN} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,真阳性(True Positive, TP)表示正确被探测到的阴影像素.假阴性(False Negative, FN)表示没有被探测到的阴影像素,即在探测结果中是非阴影但实际上是阴影的像素.假阳性(False Positive, FP)表示在探测结果中是阴影,但真实情况是非阴影的像素.真阴性(True Negative, TN)表示被正确探测的非阴影像素.

用户准确度(User's accuracies)包括两个值 p_s 和 p_n ,如式(6). p_s 表示阴影探测结果中的所有阴影像素中是真实的阴影像素的比例, p_n 表示探测的阴影结果中的所有非阴影像素中是真实的非阴影像素的比例.

总体准确度(Over all, OA) τ 是指探测结果中所有被正确探测到的像素,包括正确的阴影像素和正确的非阴影像素,如式(7).

$$\left. \begin{aligned} p_s &= \frac{TP}{TP + FP} \\ p_n &= \frac{TN}{FP + FN} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (7)$$

漏检率 (Mission detection rate, MDR) 是指影像中真实的阴影像素没有被检测到的比例; 错检率 (False detection rate, FDR) 是指探测结果中的所有阴影像素中真实是非阴影像素的比例^[26]. 理论上, 探测结果的漏检率和错检率取值均为越小越好, 但实际情况中是无法同时都达到很小的.

3.2 实验结果与讨论

3.2.1 实验数据一

数据一的实验结果如图 10. 在像素级别的方法中, SVM 方法探测结果是最佳的, 但是这种方法的结果存在很多椒盐噪声点, 并且在保持阴影区域的几何形状方面效果并不好, 另外 SVM 分类器在训练时需要人工选取训练样本. 在对象级别的方法中, OHT 方法虽然可以很好地保持阴影区域的几何形状, 但是植被区域存在很大范围的错分现象, 即植被区域被错分为了阴影区域. 对比实验结果可看出, 本文提出方法阴影探测的效果是最佳的, 错分情况明显降低了, 阴影区域的几何形状保持的很好, 并且去除了探测结果中大量的椒盐噪声点. 此外, 该方法是完全自动化的, 不需要人工干预.

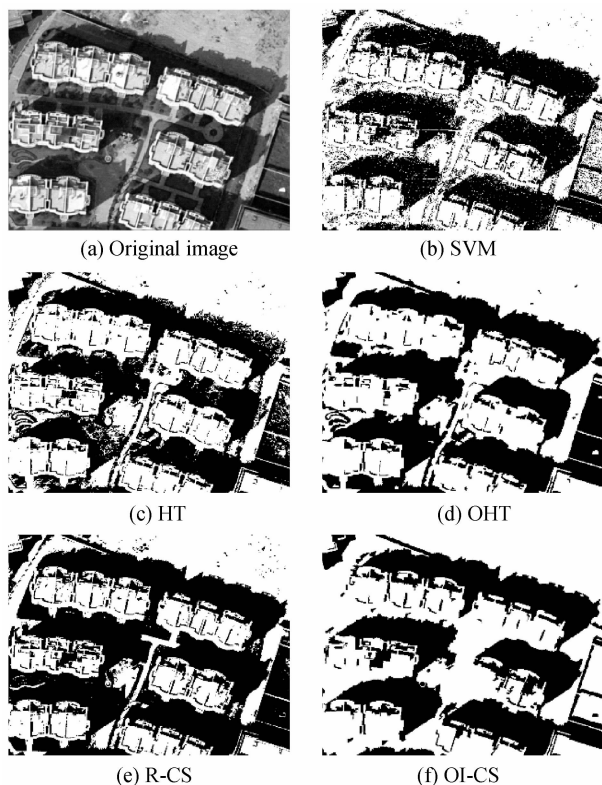


图 10 实验数据一的探测结果

Fig. 10 The experimental results of Data I

对各探测方法的结果进行定量准确度评价, 如表 1 和表 2. 表 1 是计算实验数据一探测结果的生产者准确度、用户准确度, 以及总体准确度. 对比表 1 中的各个准确度指标, 本文提出的方法总体准确度高于其他所有方法. 同时, 生产者准确度和用户准确度都取得了

较高的准确度. 表 2 是计算实验数据一探测结果的漏检率和错检率. 对比表中的准确度值, 本文提出的方法错检率最低, 漏检率仅高于 R-CS 方法. 综合评定, 本文方法的阴影探测是最有效的.

表 1 实验数据一探测结果的准确度评价

Table 1 Detection accuracy measurements of Data I

Method	OA	Producer's accuracies		User's accuracies	
	$\tau/(%)$	$\eta_p/(%)$	$\eta_n/(%)$	$p_s/(%)$	$p_n/(%)$
SVM	<u>83.14</u>	96.74	77.77	63.24	98.37
HT	80.75	93.51	75.70	60.35	96.72
OHT	38.39	3.43	81.98	96.57	76.20
R-CS	74.11	99.80	63.94	52.26	99.88
OI-CS	86.56	<u>99.59</u>	<u>81.40</u>	<u>67.93</u>	<u>99.80</u>

表 2 实验数据一探测结果的漏检率和错检率

Table 2 MDR and FDR evaluations of Data I

Method	MDR	FDR
SVM	0.0326	<u>0.3675</u>
HT	0.0649	0.3965
OHT	0.6161	0.9825
R-CS	0.0020	0.4774
OI-CS	<u>0.0041</u>	0.3207

3.2.2 实验数据二

数据二的探测结果如图 11. 其中, (a) 是原始影像, (b) 是 SVM 方法探测结果, (c) 是 HT 方法探测结果, (d) 是 OHT 方法探测结果, (e) 是 Tsai 方法探测结果,

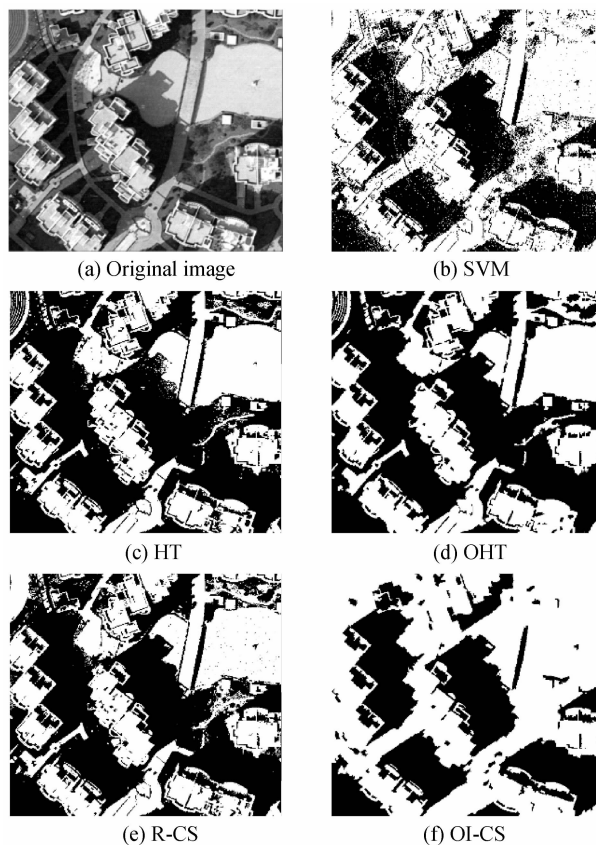


图 11 实验数据二的探测结果

Fig. 11 The experimental results of Data II

(f)是本文方法探测结果.其中,SVM方法、HT方法、OHT方法和R-CS四种对比算法的探测结果中都存在较大范围的植被区域错分现象,并且在左上角处的橡胶跑道都存在不同程度的错分现象,尤其是HT方法和OHT方法.经观察对比可知,本文方法在目视效果上最佳.

定量准确度评价如表3和表4.表3中本文方法的总体准确度最高,比其他方法有较大的提高.总体上生产者准确度和用户准确度优于其他方法.观察表4可以得知,本文提出的方法错检率和漏检率明显低于其他方法,证明本文方法的阴影探测准确度是最高的.综上所述,从实验结果的目视效果和准确度评定来看,本文方法对阴影探测是最佳的.

表3 实验数据二探测结果的准确度评价

Table 3 Detection accuracy measurements of Data II

Method	OA	Producer's accuracies		User's accuracies	
	$\tau/(%)$	$\eta_p/(%)$	$\eta_n/(%)$	$p_s/(%)$	$p_n/(%)$
SVM	<u>84.76</u>	94.26	<u>80.81</u>	67.11	97.13
HT	72.60	97.24	62.37	51.76	98.19
OHT	46.87	1.71	74.05	98.29	63.99
R_CS	74.89	<u>98.89</u>	64.92	53.94	<u>99.30</u>
OOR_CS	90.22	99.45	86.39	<u>75.22</u>	99.73

表4 实验数据二探测结果的漏检率和错检率

Table 4 MDR and FDR evaluations of Data II

Method	MDR	FDR
SVM	0.0574	<u>0.3290</u>
HT	0.0276	0.4824
OOHT	0.5313	0.9890
R_CS	<u>0.0111</u>	0.4606
OOR_CS	0.0055	0.2478

4 结论

本文着眼于阴影在颜色空间中更突显的特性,提出了一种基于新型阴影指标的面向对象高分辨率遥感影像阴影探测算法.通过实验证明该算法具有以下优点:

1) 更充分地利用H、I、S三分量中阴影的特性构造新型阴影探测指标,尤其是S分量,可以更好的区分开阴影与非阴影区域内的其他地物,尤其是植被和水体.

2) 对新型阴影指标做面向对象处理,可以减少同一地物类型区域内的差异性,从而减少探测结果中的椒盐现象,保证了区域的几何形状.

3) 面向对象处理后的阴影指标结果能够去除同质区域内的奇异点,因此采用OSTU算法能够得到比像素级OSTU方法更准确的最佳阈值,从而得到更好的阴影探测结果.

参考文献

[1] WANG Zeng-mao, DU Bo, ZHANG Liang-pei, et al. Based

on texture feature and extend morphological profile fusion for hyperspectral image classification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 810002.

王增茂,杜博,张良培,等.基于纹理特征和形态学特征融合的高光谱影像分类法[J].*光子学报*,2014,**43**(8):810002.

[2] HAO Ning-bo, LIAO Hai-bin. A shadow removal method based on the homomorphic filter for high resolution remote sensing images[J]. *Soft Ware Guide*, 2010, **9**(12): 210-212.
郝宁波,廖海斌.基于同态滤波的高分辨率遥感影像阴影消除方法[J].*软件导刊*,2010,**9**(12):210-212.

[3] LI Le. Research on shadow-based building extraction from high resolution remote sensing images [D], Hunan University of Science and Technology, Hunan, 2011.

李乐.基于阴影的高分辨率遥感图像建筑物提取研究[D],湖南科技大学,湖南,2011.

[4] DARE P M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, **71**(2): 169-178.

[5] GILES P T. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, **67**(7): 833-840.

[6] YAO J, ZHANG Z M. Hierarchical shadow detection for color aerial images[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, **102**(1): 60-69.

[7] JAYNES C, WEBB S, TEELE R M, et al. Dynamic shadow removal from front projection displays[C]. in IEEE Computer Society Proceedings of the conference on Visualization, 2001: 175-182.

[8] FINLAYSON G D, HORDLEY S D, DREW M S. Removing shadows from images[J]. *European Conference on Computer Vision*, 2002, **28**(1): 823-836.

[9] ETEMADNIA H, ETEMADNIA M R. Automatic Image Shadow Identification using LPF in Homomorphic Processing System[C]. Sydney, 2003:429-438.

[10] POLIDORIO A M, FLORES F C, IMAI N N, et al. Automatic shadow segmentation in aerial color images[C]. in Computer Graphics and Image Processing. Brazilian, 2003: 270-277.

[11] TSAI V J. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(6): 1661-1671.

[12] LORENZI L, MELGANI F, MERCIER G. A complete processing chain for shadow detection and reconstruction in VHR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(9): 3440-3452.

[13] LI H, ZHANG L, SHEN H. An adaptive nonlocal regularized shadow removal method for aerial remote sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 106-120.

[14] GUO R, DAI Q, HOIEM D. Paired regions for shadow detection and removal [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(12): 2956-2967.

[15] 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.

[16] LIU Jia-hang, YANG Jian-feng, FANG Tao. Color property analysis of remote sensing imagery [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 441-447.

柳稼航,杨建峰,方涛.彩色遥感影像阴影颜色特性分析

- [J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 441-447.
- [17] HUANG Xin, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang. Classification of high spatial resolution remotely sensed imagery based upon fusion of multiscale features and SVM [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, **11**(1): 48-54.
黄昕, 张良培, 李平湘. 基于多尺度特征融合和支持向量机的高分辨率遥感影像分类[J]. 遥感学报, 2007, **11**(1): 48-54.
- [18] SHEN Zhan-feng, LUO Jian-cheng, HU Xiao-dong, et al. A mean shift multi-scale segmentation for high-resolution remote sensing images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(3): 313-316.
沈占锋, 骆剑承, 胡晓东, 等. 高分辨率遥感影像多尺度均值漂移分割算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2010, **35**(3): 313-316.
- [19] SHEN Zhan-feng, LUO Jian-cheng, WU Wei, et al. Implementation of parallelization of mean-shift algorithm for multi-scale segmentation of remote sensing images [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(5): 811-815.
沈占锋, 骆剑承, 吴炜, 等. 遥感影像均值漂移分割算法的并行化实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, **42**(5): 811-815.
- [20] MEER P, COMANICIU D. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(5): 603-619.
- [21] WANG Kai, ZHAO Yong-qiang, CHENG Yong-mei, et al. Hyperspectral image segmentation based on mean shift and fuzzy integral fusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 188-192.
王凯, 赵永强, 程咏梅, 等. 基于均值漂移和模糊积分融合的高光谱图像分割[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 188-192.
- [22] LI Xiang-ru, WU Fu-chao, HU Zhan-yi. Convergence of a mean shift algorithm [J]. *Journal of Software*, 2005, **16**: 365-374.
李乡儒, 吴福朝, 胡占义. 均值漂移算法的收敛性[J]. 软件学报, 2005, **16**: 365-374.
- [23] LI Zheng-zhou, PENG Su-jing, WANG Yun, et al. Gray image segmentation algorithm based on mean shift [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**: 286-289.
李正周, 彭素静, 王允, 等. 基于均值偏移的灰度图像分割方法[J]. 光子学报, 2007, **36**: 286-289.
- [24] DAI Qin-ling, WANG Lei-guang, HONG Liang. Regional segmentation of natural scene color images by integrating edge cues [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, **18**(5): 523-528.
代沁伶, 王雷光, 洪亮. 融合边缘测度的自然场景彩色图像区域分割[J]. 中国图象图形学报, 2013, **18**(5): 523-528.
- [25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62-66.
- [26] SONG H, HUANG B, ZHANG K. Shadow detection and reconstruction in high-resolution satellite images via morphological filtering and example-based learning [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(5): 2545-2554.