

基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取方法

朱庆¹ 徐胜华¹ 韩李涛²

摘要 阴影特征在影像,特别是遥感影像中具有重要的意义.本文针对彩色航空遥感影像的颜色信息进行分析,提出了表述阴影在 RGB 和 HIS 空间的三种不同特征,并利用 Mean Shift 分割的方法对彩色航空影像进行区域分割.选取分割后的区域,统计每个区域的多个颜色特征并定义相应的概率分配函数,利用其互补特性,使用 Dempster-Shafer(D-S) 证据理论中的合成法则对其进行合成,最终判别区域是阴影或非阴影.对实验图像进行阴影特征提取,取得了较好的效果.

关键词 Dempster-Shafer(D-S) 证据理论, 阴影提取, 彩色航空影像
中图分类号 TP391.3

A New Shadow Extraction Method from Color Aerial Images Based on Dempster-Shafer Evidence Theory

ZHU Qing¹ XU Sheng-Hua¹ HAN Li-Tao²

Abstract Shadows play an important role in our understanding of imagery especially the remote sensing imagery. According to the color features of shadow in the color aerial images, a new approach is proposed to extract shadow from color aerial images based on the Dempster-Shafer (D-S) evidence theory. Firstly three different feature descriptions of shadow in RGB and HIS spaces are introduced, then the image is segmented based on Mean Shift method, the color features of the segmented regions are computed and the basic probability assignment function (BPAF) of each segment is defined respectively. By using of the complementary characteristics of such three color features, the D-S rule is applied to the fusion of BPAF. Finally, the BPAF fusion is utilized to find the conclusive shadow segments. Experimental image analysis results demonstrate that the proposed method is effective and robust.

Key words Dempster-Shafer(D-S) theory of evidence, shadow extraction, color aerial image

1 引言

阴影检测与计算机视觉、彩色不变性和图像恢复等问题密切相关.虽然对时间序列影像或视频影像中动态目标的阴影检测已有一系列有效的算法,而彩色航空影像的阴影处理对于正射影像生产、目标识别和提取等日益成为一个亟待解决的难题^[1~4].阴影一方面在计算机图像处理过程中将直接影响相应阴影区域地物的边缘提取、目标识别和影像匹配等算法的成功率^[5,6];另一方面可以提供大量产生阴影的目标的形状、大小、定位、表面特征、顶面结构等相关信息^[6~8],所以研究彩色航空影像阴影的提取具有重要的意义和实际应用价值.

现有的阴影检测算法大致分为两类:基于阴影

模型的方法和基于阴影特征的方法^[9].基于模型的方法是根据影像中的地物几何形状或 DSM 数据与太阳、传感器等有关参数建立一个阴影的统计模型,然后根据此模型来判别每个像素点是否属于阴影区域.基于特征的方法一般是分析阴影区域的共性及其与非阴影区域的差别,直接采用图像的特征信息进行判断来提取阴影区域.遥感影像中阴影检测的主要算法分类及其方法见表 1(见下页顶部).

基于模型的方法往往需要一些不易获得的辅助信息,如太阳高度角、方位角等信息,阴影模型一般计算复杂,造成这类方法局限性较大^[10],阴影提取的精度不高.因此,基于特征的方法更具有普遍性,通过分析阴影在颜色、纹理、边缘等方面的特征来提取阴影.其中,基于纹理特征的方法是根据周围像元值计算阴影区像元值,计算量大,到目前为止还不能取得完美的结果;基于边缘特征的方法提取的影像边缘不仅仅是阴影边缘,也可能是建筑物、路面等等,要在这么多的边缘中找到真实的阴影边缘是比较困难的;基于单个颜色特征的方法适应影像分辨率的能力差,算法通用性不强. Sarabandi 等^[11]还指出,仅凭单波段影像无法提供足够的信息来区分阴影和影像中其它较暗的物体.

上述方法各有利弊,但都不能很好地解决从彩色航空影像中提取阴影的问题.根据阴影在彩色航

收稿日期 2006-7-12 收修改稿日期 2006-11-3
Received July 12, 2006; in revised form November 3, 2006
国家自然科学基金(40671158),新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0626)资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (40671158), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-05-0626)
1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079 2. 山东科技大学地球信息科学与工程学院 青岛 266510
1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079 2. Geoinformation Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510
DOI: 10.1360/aas-007-0588

表 1 遥感影像中阴影检测的主要算法分类及其方法

Table 1 Classification and methods of shadow extraction algorithms from remote sensing image

类别	检测主要依据	方法
基于模型的方法	DSM、相机模型参数	利用 DSM 计算建筑物阴影的空间坐标, 加速的光线跟踪算法通过 DSM 以及相机模型来计算建筑物的可见阴影区域 ^[5] .
	DSM、太阳高度角和方位角	根据太阳高度角、方位角和 DSM 运用 hillshade 算法提取阴影区域 ^[12] . 根据太阳高度角、方位角和 DSM 通过阴影模拟来获取阴影区域 ^[13] .
基于特征的方法	颜色特征	根据城市彩色航空影像中阴影区域具有色调较高的特征提出了一种简便的城市彩色航空影像阴影检测方法 ^[10] . 根据影像的强度和饱和度信息来提取航空影像中的阴影区域 ^[3] . 根据颜色不变量特征和目标的几何特征来提取目标的投射阴影 ^[9] . 利用影像亮度得到阴影候选区域, 颜色不变量模型来确定阴影区域 ^[14] . 对影像的颜色特征比值图像运用 OSTU 来分割阴影和非阴影区域 ^[7] .
	纹理特征	利用纹理分析的方法通过共生矩阵和相应指数的计算提取影像中的阴影 ^[15] .
	边缘特征	在基于结构线一侧灰度统计法进行阴影检测的基础上, 结合边缘等信息提出了一种多重约束下的建筑物阴影提取方法 ^[8] .

空影像上的颜色特征和彩色图像含有比灰度图像更多信息, 本文利用区域分割的方法对彩色航空影像进行分割, 选取分割后的区域, 统计区域的多个颜色特征并完成区域是阴影或非阴影的判别, 以达到阴影提取的目的. 因为在阴影识别过程中使用了多个颜色特征, 并且这些颜色特征具有不确定性, 因此, 本文将 Dempster-Shafer(简称为 D-S) 证据理论应用于阴影识别中.

2 阴影特征分析

2.1 阴影产生的光学机理

航空影像上的阴影是由于在摄影成像过程中, 太阳光线被地面上有一定高度的物体遮挡或地形起伏的遮挡而形成的. 航空影像的太阳光源可视为一个无穷远的点光源, 根据 Phong 物体光照模型, 物体被感知的光照强度由环境光、漫反射光和镜面反射光组成^[16~18]:

$$I = K_{\alpha}I_{\alpha} + K_dI_l \cos \theta + K_sI_l \cos^n \alpha \quad (1)$$

式中 K_{α} 、 K_d 、 K_s 分别为环境光、漫反射光及镜面反射光系数, I_{α} 、 I_l 分别为环境光及光源强度, θ 为入射光与物体表面法线之间的夹角, α 为反射光与视线间的夹角, n 为高光系数.

考虑到实际自然场景中地面物体表面不光滑和无光泽, 式 (1) 中第三项物体对点光源的镜面反射可以忽略; 再加上阴影是由于直射光线被遮挡造成

的, $I_l = 0$, 所以阴影区域的物体被感知的光强为

$$I = K_{\alpha}I_{\alpha} \quad (2)$$

若考虑航空影像上的一个较小区域, 则该区域内的环境光强 (I_{α})、光源强度 (I_l) 及入射角 (θ) 均保持一致, 此时阴影区域与非阴影区域的光强差为

$$\Delta I = K_dI_l \cos \theta \quad (3)$$

对应于 RGB 色彩空间, 阴影区域与非阴影区域在红、绿、蓝三通道中的光强差相应为^[19]

$$\begin{aligned} \Delta I_R &= \cos \theta \times \int_{\lambda} K_d(\lambda)I_l(\lambda)S_R(\lambda)d\lambda \\ \Delta I_G &= \cos \theta \times \int_{\lambda} K_d(\lambda)I_l(\lambda)S_G(\lambda)d\lambda \\ \Delta I_B &= \cos \theta \times \int_{\lambda} K_d(\lambda)I_l(\lambda)S_B(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 λ 为可见光的波长范围, $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ 分别为 R、G、B 通道的通频带.

漫反射系数 K_d 与波长成正比, 在 RGB 色彩空间中, $\lambda_R > \lambda_G > \lambda_B$, 阴影区域与非阴影区域在红、绿、蓝三通道中的光强差满足

$$\Delta I_R > \Delta I_G > \Delta I_B \quad (5)$$

即在阴影区域的三个通道中, R 通道下降得最多, G 通道次之, B 通道下降得最少, 亦相当于相对增加了阴影区域的蓝色分量, 蓝色分量的增加提高了色调值, 从而使得阴影区域的色调显著提高.

2.2 阴影颜色特征

彩色航空影像中的阴影主要是由城市建筑物或树木等对太阳光线的遮挡而形成. 一般认为, 阴影的结果是使所投射地表的表面光照强度降低, 但不改变原有地表、目标表面的光照特征, 如纹理特征及光照强度方向统计特征等. 建筑物阴影的颜色特征主要有以下几点^[3,7,19,20]:

1) 阴影属于图像中的局部黑区域. 对遥感图像的阴影区域进行统计表明, 阴影区域内的灰度方差一般小于其它非阴影区域, 不同阴影区域之间的灰度值具有较强的一致性;

2) 阴影颜色一般比较均匀, 而且分布基本上有规律可寻. 阴影在颜色上偏蓝, 泥土、植被往往是偏绿、偏红或偏黄;

3) 城市彩色航空影像中的阴影区域具有色调、饱和度较高而亮度较低的明显特征;

4) 在非阴影区域, 蓝光波段和绿光波段有很高的相关性; 在阴影区域, 绿光波段相对于蓝光波段急剧减小.

2.3 色彩空间的选择

对于彩色影像, 根据研究目的和面向对象的不同, 需要选择合适的色彩模型, 并在特定的色彩空间中进行. 色彩空间的类型很多, 除了 RGB 外, 常见的还有 CYMK、HIS、CIE、YIQ 等.

2.3.1 RGB 色彩空间

RGB 色彩空间是最基本的色彩空间, 其颜色是通过彩色光的相加而产生的, 即任何一种颜色都可由 R、G、B 三原色按照一定的比例构成. RGB 色彩空间有三个特点^[21,22]: 1) RGB 色彩空间不是基于人眼视觉的色彩空间, 空间中任意两点的颜色欧氏距离与人眼感知不成正比; 2) RGB 色彩空间包含亮度信息, 受环境亮度影响较大; 3) RGB 色彩空间的三色彩分量是强相关的.

2.3.2 $L^*U^*V^*$ 色彩空间

在彩色影像分割中, 使用一个与人类知觉一致的彩色空间一般比较好^[23]. 成为 CIE 标准的 $L^*U^*V^*$ 坐标系统是均匀的颜色空间, 可以使感知的颜色差异与颜色空间的欧氏距离近似成线性关系, 具有很好的知觉一致性^[24]. 其定义为

$$L^* = \begin{cases} 25(100\frac{Y}{Y_0})^{\frac{1}{3}} - 16 & \frac{Y}{Y_0} \geq 0.008856 \\ 903.3\frac{Y}{Y_0} & \frac{Y}{Y_0} < 0.008856 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U^* &= 13L^*(u' - u'_0) \\ V^* &= 13L^*(v' - v'_0) \end{aligned} \quad (7)$$

上式中

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (7) 中 u'_0 和 v'_0 是通过将基准白色替代为三原色 X_0 、 Y_0 、 Z_0 获得的.

$$\begin{aligned} X &= 0.490R + 0.310G + 0.200B \\ Y &= 0.177R + 0.812G + 0.011B \\ Z &= 0.010G + 0.990B \end{aligned} \quad (9)$$

2.3.3 HIS 色彩空间

阴影分析中, 可以通过分辨不同色彩来区分阴影和非阴影区域, 而色彩的三要素是色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和亮度 (Intensity). HIS 色彩模型主要有两个优点: 1) 亮度分量 I 和影像中的彩色信息是分离的; 2) 色调分量 H 值和饱和度分量 S 值与人眼观察彩色的方式有关. 这些性质对于开发基于彩色描述的图像处理方法是一个理想的工具^[21]. 其定义为

$$\begin{aligned} H &= \begin{cases} \theta & G \geq B \\ 2\pi - \theta & G < B \end{cases} \\ \theta &= \arccos\left\{\frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{\frac{1}{2}}}\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S &= 1 - \frac{3}{R+G+B}[\min(R, G, B)] \\ I &= \frac{R+G+B}{3} \end{aligned} \quad (11)$$

阴影提取时的色彩空间主要是根据阴影的颜色特征来确定的. 阴影的颜色特征 2) 和 3) 便于在 HIS 色彩空间中度量, 特征 4) 便于在 RGB 色彩空间中度量, 因此, 选择在 HIS 和 RGB 色彩空间中统计阴影的颜色特征. 采用与人类知觉特性之间有很好的线性对应关系的 $L^*U^*V^*$ 色彩空间进行区域分割, 能很好地保证阴影区域的封闭性和区域边界的准确性^[23~25].

3 基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取算法

3.1 阴影特征选择

阴影在颜色分布上有规律可寻, 但是由于阴影颜色受到其它物体反光、灰尘以及光照方向、时间、天气等因素的影响会发生一些变化, 必须综合采用多种色彩变换才能得到较好的效果. 考虑到阴影的

颜色特征, 使用以下三个特征来对影像的阴影进行分析:

1) I_1 : 色调 H 影像. 按式 (10) 计算, 一般而言影像中阴影和非阴影在色调上差别比较大, 可以作为直方图单阈值分割的主要特征来得到阴影的候选区域.

2) I_2 : 影像的绿色通道与蓝色通道的差值影像, 反映了阴影颜色偏蓝程度. 按式 (12) 计算, 阴影的颜色往往偏蓝, 而对于组成非阴影的如泥土、植被、游泳池等也具有较高的色调, 但其颜色往往是偏绿、偏红或偏黄, 在绿色通道与蓝色通道的差值图像中, 可以通过直方图单阈值分割来剔除这些干扰因素.

$$m_{GB} = G - B \quad (12)$$

3) I_3 : 影像的亮度与饱和度的差值影像. 对 I 、 S 归一化后按式 (13) 计算^[3], 式中的 K 由传感器到场景的距离确定. 对分辨率比较高的航空影像 K 值较低, 一般取 0; 对分辨率比较低的轨道卫星影像 K 值较大, 一般取 0.2; 其它的影像可以介于这两个值之间. 影像中的一些偏蓝色物体 (如蓝色车棚、蓝色屋顶等) 也具有较高的色调值, 其颜色也偏绿, 但在亮度与饱和度的差值影像中, 阴影区域的亮度较偏蓝色物体低.

$$m_{IS} = \begin{cases} 0 & I - S \leq K \\ 255 & I - S > K \end{cases} \quad (K \in [0, 0.2], 0 \text{ 表示阴影区域}) \quad (13)$$

3.2 D-S 证据理论

I_1 、 I_2 、 I_3 三个特征从不同的角度描述了阴影区域. I_1 特征易将影像中的一些具有较高色调的偏蓝色物体如蓝色屋顶、蓝色车棚等误识别为阴影, 但能剔除 I_2 、 I_3 特征中色调较高的伪阴影物体; I_2 特征易将影像中的一些色调、饱和度较高而亮度较低的物体如汽车等误识别为阴影, 但能剔除 I_1 、 I_3 特征中亮度较低的伪阴影物体; I_3 特征易将影像中的一些具有较高色调和较低亮度的物体如植被、泥土等误识别为阴影, 但能剔除 I_1 特征中偏蓝色物体的干扰. 由于实际地物和现实场景的复杂性, 采用单一特征或仅仅对这三个特征所描述的阴影区域求交, 都难以达到理想的效果. 要提高阴影检测的精度, 利用 I_1 、 I_2 、 I_3 三个特征之间的互补性, 融合这三个特征的结果是一种可行的方案. 但是多个特征产生的阴影结果可能互相吻合, 也可能互相矛盾, 由此产生的不确定性因素较多. 而 D-S 证据理论^[26] 通过对不确定信息的描述采用区间估计的方法, 在区分未知与不确定方面显示了很大的灵活性. 当不同的分类器所提供的关于目标的报告发生冲突时, 它可以通

过“悬挂”在所有目标集上共有的概念 (可信度) 使得发生的冲突获得解决, 并保障原来高可信度的结果比低可信度的结果加权要大.

D-S 证据理论通过合并多重证据做出决策, 对推理进行合理的信息论解释^[26], 是一种决策理论, 通过对一些事件的概率加以约束以建立信度函数而不必说明精确的难以获得的概率, 与概率决策理论相比, 它不仅能够处理由于知识不准确引起的不精确性, 而且还能够处理由于未知引起的不确定性. D-S 证据理论用识别框架 H 表示所感兴趣的命题集, 它定义了一个集函数 $m: 2^H \rightarrow [0, 1]$, 满足: $m(A) = 0$, $\sum_{A \subset H} m(A) = 1$. 其中 m 为识别框架 H 上的概率分配函数 (Basic probability assignment function, BPAF), 若 A 属于识别框架 H , 则 $m(A)$ 称为 A 的基本概率数, 基本概率数反映了对 A 本身的信度大小. 对于任何命题集, A 的信度函数为 A 中每个子集的概率数之和, 即 $Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B)$, 似真函数定义为 $Pal(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \cap A = \emptyset} m(B)$. 令 m_1, m_2, \dots, m_n 分别表示 n 个信息的 BPAF, 如果它们是由独立的信息推得, 则融合后的概率数可以表示为

$$m(A) = \frac{\sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1 - \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = \phi} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)} \quad (14)$$

3.3 算法流程

本文将阴影提取归结为对分割后的区域是阴影或非阴影的分类问题. 首先对彩色航空影像在 $L^*U^*V^*$ 色彩空间进行均值平移 (Mean Shift) 分割, 再对三个颜色特征所对应的影像进行直方图单阈值分割, 得到阴影点集, 根据阴影点集为分割后的每一个区域计算 BPAF, 使用 D-S 证据理论中的合成法则进行合成, 最后借助一定的判决准则对候选阴影区域是阴影或非阴影的决策, 得到比较完整的阴影区域. 图 1(见下页) 给出了基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取流程.

3.3.1 区域分割

阴影提取的过程可以理解为从影像中分割出阴影的过程. 本算法中使用了 Mean Shift 分割和直方图单阈值分割两种方法, 前者主要是对影像进行分割得到阴影候选区域, 后者是为了获取阴影特征影像分割的阈值.

Mean Shift 分割算法是一种基于颜色特征聚类的分割方法, 通过简单的非参数密度梯度估计过程来实现区域分割过程, 集成了边缘和区域的优点, 使

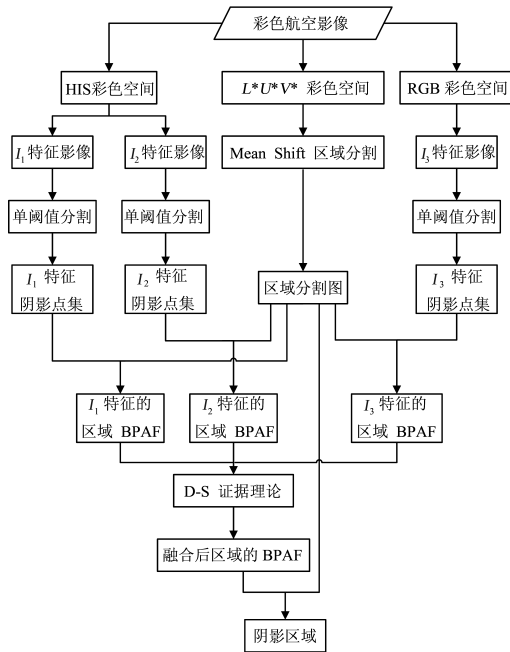


图 1 基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取

Fig.1 The algorithm of shadow extraction from color aerial images using D-S evidence theory

分割的结果综合利用了边界的精确性和区域的封闭性^[24,25]. Mean Shift 分割需要确定两个参数: 带宽 h 和区域最小像素个数 $nMin$. 带宽决定对于影像中的像素点处密度梯度值的估计将在多大的范围内进行, 对迭代结果起着重要作用. 区域最小像素个数决定了分割后的最小区域面积, 像素小于该值的区域将被合并. 可以根据区域的特征和分割的目的来设置带宽, 对于阴影提取而言, 阴影区域的颜色比较均匀, 区域连通性比较好, 可以根据影像的分辨率来设置, 当影像分辨率比较高时, 带宽 h 设置在 10 到 15 之间, 区域最小像素个数设置在 100 到 200 之间比较理想; 当影像分辨率比较低时, 带宽 h 设置在 5 到 10 之间, 区域最小像素个数设置在 20 到 50 之间比较理想.

单阈值分割采用计算简单且效果较好的最大相关准则分割算法 (Maximum correlation criterion, MCC)^[19]. 设图像归一化直方图为 $H(i)$, 则 MCC 准则函数

$$TC(t) = 2\ln[P(t)(1 - P(t))] - \ln[G(t)G'(t)]$$

$$G(t) = \sum_{i=0}^{t-1} H^2(i), G'(t) = \sum_{i=t}^{255} H^2(i), P(t) = \sum_{i=0}^{t-1} H(i) \quad (15)$$

使 $TC(t)$ 取得最大值的灰度级 t 即为所求的最优阈值.

3.3.2 BPAF 计算

经 Mean Shift 分割后的影像是一系列区域 $\{R_j\}(j = 1, 2, \dots, L)$, 被划分为两类: 阴影区域

和非阴影区域. 假设空间定义为 $H = \{h_0, h_1\}$, 其中 h_0 代表区域被识别为阴影, h_1 代表区域被识别为非阴影, 因此 2^H 的非空子集包括 $\{h_0\}, \{h_1\}, \{h_0, h_1\}$. $m_{I_i}^j(h_0)$ 表示特征 I_i 将第 j 区域识别为阴影的可信度, 第 j 区域内由特征 I_i 得到的阴影点数 $nShadowCount_j$ 与该区域的所有点数 $nTotalCount_j$ 的比值越大, 表明这个区域属于阴影区域的概率越大, 故可将其 BPAF 定义为

$$m_{I_i}^j(h_0) = \frac{nShadowCount_j}{nTotalCount_j} p_{I_i}$$

$$m_{I_i}^j(h_1) = (1 - \frac{nShadowCount_j}{nTotalCount_j}) p_{I_i} \quad (16)$$

$$m_{I_i}^j(h_0, h_1) = 1 - p_{I_i}$$

$$(i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, L)$$

其中 $p_{I_i} \in p$, $p = \{p_{I_1}, p_{I_2}, p_{I_3}\}$ 为多个特征不确定度的集合, 可根据各特征对阴影判别的重要性和准确性依经验给出.

根据式 (16) 计算每个特征的 BPAF, 使用式 (14) 计算融合后所有特征共同作用的 BPAF, 并计算相应的 Bel 和 Pla , 作为阴影判别的基础, 对第 j 区域判别为阴影的规则如下:

1) 判别结果类具有最大的可信度, 且大于设定的阈值, 即 $m^j(h_0) > m^j(h_1)$, $m^j(h_0) > m^j(h_0, h_1)$, $m^j(h_0) > T_1$;

2) 判别结果类的不确定性较小, 且小于设定的阈值, 即 $m^j(h_0, h_1) < T_2$.

T_1 、 T_2 根据经验和先验知识确定, 一般而言, 对于分辨率较高、阴影区域面积较大的影像, 单个区域中提取的点较多, 从而判决的最小可信度阈值 T_1 和最大不确定度阈值 T_2 取值较大.

4 实验与分析

为了验证本文算法的正确性, 选取两幅不同分辨率的航空影像 (图 2(a) 和图 3(a), 图 2 和图 3 分别见下页) 进行实验. 其中图 2 选自国际摄影测量与遥感 ISPRS 官方网站提供的影像 (<http://www.isprs.org/data/avenches/>), 影像大小为 1800×1800 , 影像分辨率为 0.1M; 图 3 选自美国一家公司网站上提供的影像 (<http://www.usgsquads.com/aerialphotos.htm>), 影像大小为 1407×924 , 影像分辨率为 2M.

4.1 提取结果评价方法

阴影提取的精度与从影像中正确识别的阴影区域数目 (TN)、漏检的阴影区域数目 (FS)、误识别为阴影区域数目 (FN) 等因素有关, 可以通过两个方面来评价提取的阴影区域精度: 一个是阴影区域

检测率 (DR), 一个是阴影区域漏检率 (FR). DR 和 FR 根据下式计算

$$DR = \frac{TN}{TN + FN} \times 100\%$$

$$FR = \frac{FS}{TN + FN + FS} \times 100\% \quad (17)$$

一种好的阴影区域提取算法应该满足 DR 尽量大, 同时 FR 尽量小, 因此, 可将阴影区域提取精度定义为

$$DA = DR \times 50\% + (1 - FR) \times 50\% \quad (18)$$

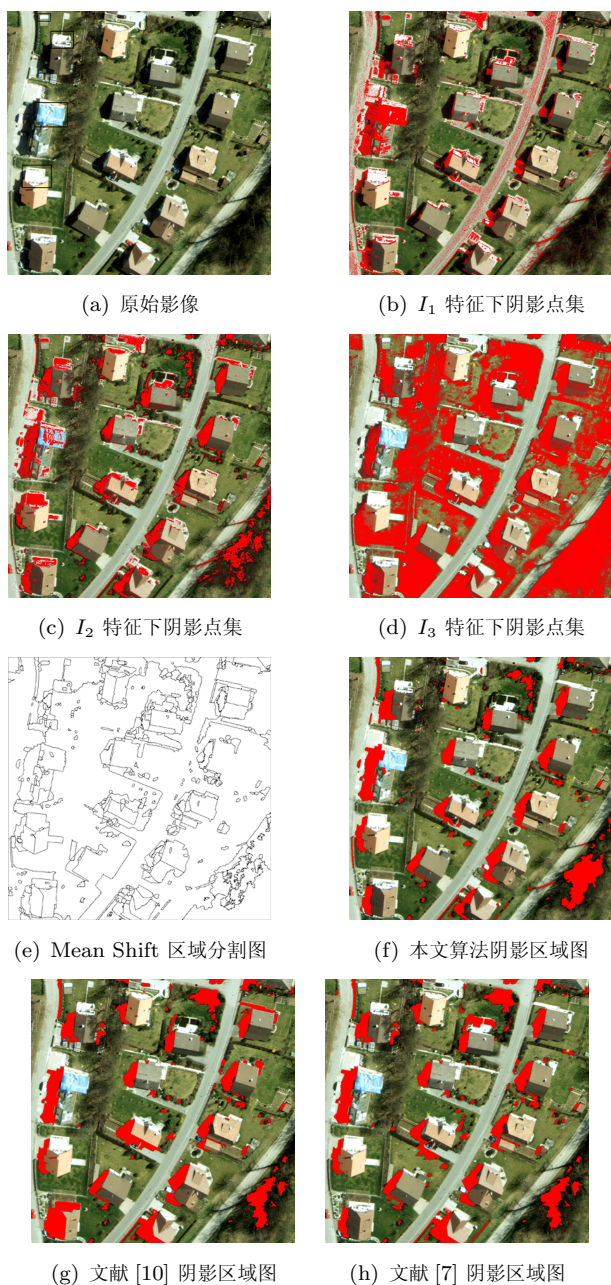


图 2 彩色航空影像阴影提取结果

Fig. 2 Shadow extraction results from color aerial image

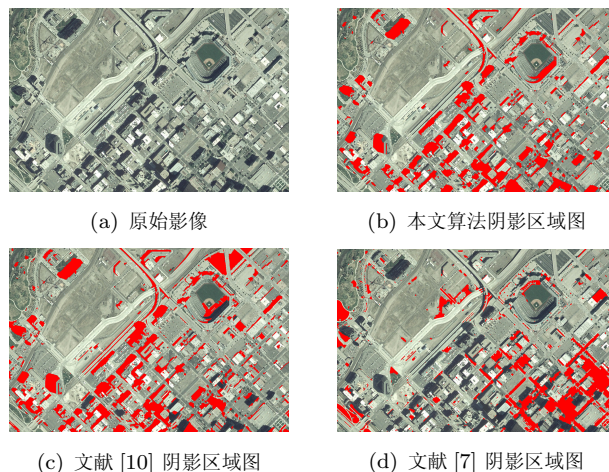


图 3 彩色航空影像阴影提取结果

Fig. 3 Shadow extraction results from color aerial image

4.2 参数设置

本文算法都是直接从原始大小的影像中提取阴影区域, 参数设置见表 2.

表 2 参数设置

Table 2 Parameters of the proposed method

影像	h	$nMin$	K	p	T_1	T_2
图 2(a)	12	100	0	{0.82,0.91,0.95}	0.5	0.08
图 3(a)	8	30	1.6	{0.82,0.86,0.92}	0.4	0.06

4.3 实验结果

图 2(a)~(f) 给出了基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取结果, 图 2(a) 是原始影像, 图 2(b) 是 I_1 特征下阴影点集, 图 2(c) 是 I_2 特征下阴影点集, 图 2(d) 是 I_3 特征下阴影点集, 图 2(e) 是 Mean Shift 区域分割图, 图 2(f) 是多特征融合后的阴影区域图. 图 2(g) 是文献 [10] 中算法提取的阴影区域图, 该算法主要是通过对彩色影像的色调图进行单阈值分割来提取阴影区域; 图 2(h) 是文献 [7] 中算法提取的阴影区域图, 该算法是通过对彩色影像的色调和亮度的比值影像进行单阈值分割来提取影像区域, 图中红色表示阴影区域.

图 2(a) 中标识的矩形区域是蓝色屋顶或偏蓝色的墙面, 在图 2(b) 中大部分被识别为阴影点集, 在图 2(c) 中小部分被识别为阴影点集, 而在图 2(d) 几乎全部被识别为非阴影点集, 在融合后的图 2(f) 中剔除了这些蓝色或偏蓝色伪阴影区域; 图 2(b) 把道路中的部分区域误识别为阴影点集, 图 2(c) 中很好地将草地、树木等与阴影区别开了, 图 2(d) 全部树木、大部分草坪被误识别为阴影点集, 但阴影区域几

表3 阴影提取精度

Table 3 Shadow extraction results from color aerial image

算法	TN		FN		FS		DR(%)		FR(%)		DA(%)	
	图2	图3	图2	图3	图2	图3	图2	图3	图2	图3	图2	图3
本文算法	65	210	5	17	6	26	92.86	92.51	7.89	10.28	92.46	91.12
文献 [10]	61	195	8	26	10	41	88.41	88.26	12.66	15.65	87.88	86.31
文献 [7]	59		7		12		89.39		15.38		87.01	

乎没有遗漏, 草坪、树木等干扰区域在图 2(f) 中被剔除. 图 2(g) 中左下角的建筑物的墙面因其色调与阴影相似而被误识别为阴影; 图 2(g)、图 2(h) 中一些车辆的阴影区域没有检测出来. 图 2(f) 中主要的阴影区域都被正确提取, 显示了较为合理、准确的阴影边界定位. 通过对比表明, 使用多特征融合进行阴影识别减少了错误识别的区域, 其结果优于单一特征识别结果.

图 3(a) 是原始影像, 图 3(b) 为本文算法提取的阴影区域. 图 3(a) 右上的橄榄球赛场、草坪等的颜色与阴影区域的很相似, 本文算法很好地将它们与阴影区域区别开了, 图中高层建筑物、高速公路等的阴影都被很好地提取出来. 图 3(c) 是文献 [10] 中算法提取的阴影区域图, 大部分阴影区域均提取出来了, 只是部分低矮建筑物由于其阴影区域面积较小等原因被遗漏; 图 3(d) 是文献 [7] 中算法提取的阴影区域, 由于影像分辨率不是很高, 图 3(a) 中阴影区域和非阴影区域的色调和亮度的比值差别不大, 导致单阈值分割时图中绝大部分阴影区域无法提取出来, 并将很多非阴影区域误识别为阴影, 该算法只对分辨率很高的彩色航空影像有效.

表 3 是不同算法对图 2(a)、图 3(a) 阴影提取的精度比较 (因文献 [7] 中算法对图 3(a) 失效, 不统计该算法对图 3(a) 的提取精度). 在精度方面本文算法优于文献 [10] 中算法和文献 [7] 中算法, 可见本文算法能达到较高的识别率, 能适用于不同分辨率的彩色航空影像, 阴影提取精度较高, 而且在提取前需要人工设定的参数较为简单, 不需要有关影像场景、目标的三维结构信息和光源方向等信息, 只有 Mean Shift 区域分割的两个阈值、计算 I_3 特征的阈值、证据不确定度和判别阈值, 整个提取过程有较好的处理效率.

5 结论

本文根据彩色航空影像的阴影颜色特征, 提出了一种基于 D-S 证据理论的彩色航空影像阴影提取算法. 该算法充分利用了阴影多种颜色特征之间的互补性, 依据 D-S 证据理论对经 Mean Shift 分割后的区域进行阴影或非阴影的判别. 由于 D-S 证据理

论为目标识别提供了一个既考虑根据各种特征进行分类的不确定性, 又考虑多种特征共同作用的结果, 所以这种方法的效果优于只依据某一特征进行识别的方法. 本文算法能适应不同分辨率的彩色航空影像, 具有较好的实用性和通用性. 同时, 这种方法还具有良好的可扩展性, 如果有新的阴影特征, 可以直接形成新的证据与已有的特征共同作用, 以提高阴影识别的正确率.

References

- 1 Mikic I, Trivedi M M, Cucchiara R. Detecting moving shadows: algorithms and evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(7): 918~923
- 2 Massalabi A, He D C, Benie G B, Beaudry E. Detecting information under and from shadow in panchromatic Ikonos images of the city of Sherbrooke. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Anchorage, Alaska, USA, IEEE, 2004. 2000~2003
- 3 Polidorio A M, Flores F C, Imai N N, Tommaselli A M G, Franco C. Automatic shadow segmentation in aerial color images. In: *Proceedings of the XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. Sao Carlos, Brazil, IEEE, 2003. 270~277
- 4 Yao J, Zhang Z. Hierarchical shadow detection for color aerial images. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, **102**(1): 60~69
- 5 Li Y, Sasagawa T, Gong P. A system of the shadow detection and shadow removal for high resolution city aerial photo. In: *Proceedings of ISPRS Congress*. Istanbul, Turkey, ISPRS, 2004. 802~807
- 6 Yang Yi-Jun, Zhao Rong-Chun, Wang Wen-Bing. The detection of shadow region in aerial image. *Signal Processing*, 2002, **18**(3): 228~232
(杨益军, 赵荣椿, 汪文秉. 航空图像中阴影区域的检测. 信号处理, 2002, **18**(3): 228~232)
- 7 Tsai V J D. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(6): 1661~1671
- 8 Guo Hai-Tao, Xu Qing, Zhang Bao-Ming. Shadow extraction of building based on multiple constraints. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, **30**(12): 1059~1062
(郭海涛, 徐青, 张保明. 多重约束下的建筑物阴影提取. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, **30**(12): 1059~1062)
- 9 Salvador E, Cavallaro A, Ebrahimi T. Cast shadow segmentation using invariant color features. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, **95**(2): 238~259

- 10 Jianjun H, Weixin X, Liang T. Detection of and compensation for shadows in colored urban aerial images. In: Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China, IEEE, 2004. 3098~3100
- 11 Sarabandi P, Yamazaki F, Matsuka M, Kiremidjian A. Shadow detection and radiometric restoration in satellite high resolution images. In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, Alaska, USA, IEEE, 2004. 3744~3747
- 12 Zhan Q, Shi W, Xiao Y. Quantitative analysis of shadow effects in high-resolution images of urban areas [Online]. In: Proceedings of the 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, available: <http://www.isprs.org/commission8/workshop/urban/>, May 20, 2006
- 13 Nakajima T, Tao G, Yasuoka Y. Simulated recovery of information in shadow areas on IKONOS image by combing ALS data [Online]. In: Proceedings of the 23rd Asian Conference on Remote Sensing, available: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/vhr/index.asp>, May 10, 2006
- 14 Salvador E, Cavallaro A, Ebrahimi T. Shadow identification and classification using invariant color models. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Salt Lake City, USA, IEEE, 2001. 1545~1548
- 15 Xu Miao-Zhong, Yu Zhi-Hui. Automated extraction of shadows in very-high resolution spatial satellite images. *Journal of Geomatics*, 2003, **28**(1): 20~22
(许妙忠, 余志惠. 高分辨率卫星影像中阴影的自动提取与处理. 测绘信息与工程, 2003, **28**(1): 20~22)
- 16 Phong B T. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 1975, **18**(6): 311~317
- 17 Du You-Tian, Chen Feng, Xu Wen-Li. Region-based moving shadow detection approach. *Journal of Tsinghua University*, 2006, **46**(1): 141~144
(杜友田, 陈峰, 徐文立. 基于区域的运动阴影检测方法. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(1): 141~144)
- 18 Guan Ye-Peng, Gu Wei-Kang. Automatic and robust shadow segmentation from two-dimensional scenes. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(4): 624~627
(管业鹏, 顾伟康. 二维场景阴影区域的自动鲁棒分割. 电子学报, 2006, **34**(4): 624~627)
- 19 Tang Liang, Xie Wei-Xin, Huang Jian-Jun. Detection of shadow in urban color aerial images. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2003, **8**(3): 129~134
(唐亮, 谢维信, 黄建军. 城市彩色航空影像中的阴影检测. 中国体视学与图像分析, 2003, **8**(3): 129~134)
- 20 Guo Jian-Hong, Tian Qing-Jiu, Wu Yun-Zhao. Study on multispectral detecting shadow areas and a theoretical model of removing shadows from remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(2): 151~159
(郭建宏, 田庆久, 吴昉昭. 遥感影像阴影多波段检测与去除理论模型研究. 遥感学报, 2006, **10**(2): 151~159)
- 21 Gonzalez S I. *Digital Image Processing (Second Edition)*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 228~240
(岗萨雷斯. 数字图像处理. 北京: 电子出版社, 2004. 228~240)
- 22 Wang Jun-Li. The Research of Shadow Detection Algorithms Based on Color Aerial Images [M.S. dissertation], Wuhan University, 2005
(王军利. 基于彩色航空影像的阴影检测算法研究 [硕士学位论文]. 武汉大学, 2005)
- 23 Luo J, Guo C E. Perceptual grouping of segmented regions in color images. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(12): 2781~2792
- 24 Jiang Wan-Shou. Multiple Aerial Image Matching and Automatic Building Detection [Ph.D. dissertation], Wuhan University, 2004
(江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法研究 [博士学位论文], 武汉大学, 2004)
- 25 Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(5): 603~619
- 26 Hong X, Smets P. Some strategies for explanations in evidential reasoning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, **26**(5): 599~607



朱庆 武汉大学教授. 主要研究方向为数字摄影测量, 多维地理信息系统和虚拟地理环境.

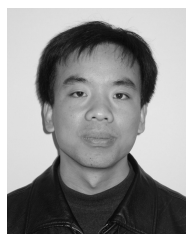
E-mail: zhuqing@lmars.whu.edu.cn

(ZHU Qing Professor at State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing (LIESMARS), Wuhan University. His research interest covers digital photogrammetry and virtual geographic environments.)



徐胜华 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生, 2002 年获得武汉大学学士学位. 主要研究方向为遥感影像处理, 数字摄影测量. 本文通信作者. E-mail: sweetmoon98032@tom.com

(XU Sheng-Hua Ph.D. candidate at LIESMARS, Wuhan University. He received his B.S. degree from Wuhan University in 2002. His research interest covers image processing and digital photogrammetry. Corresponding author of this paper.)



韩李涛 山东科技大学地球信息科学与工程学院地理系讲师, 2006 年获得武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士学位. 主要研究方向为三维城市建模, 虚拟地理环境.

E-mail: hlt1978@sohu.com

(HAN Li-Tao Lecturer at Geoinformation Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology. He received his Ph.D. degree from LIESMARS of Wuhan University in 2006. His research interest covers 3D urban modeling and virtual geographical environment.)