

一种航空影像阴影补偿方法

林宗坚^{1,2} 任超锋¹ 姚娜¹ 解斐斐¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 中国测绘科学研究院,北京市北太平路 16 号,100039)

摘要:首先,对航空影像进行影像分割和阈值计算来预测阴影区域。其次,计算阴影区域的直射光与环境光的比值,同时,采用多波段合成方式实现阴影区域与非阴影区域之间的平滑过渡;最后,根据特定的阴影光照模型完成阴影补偿。实验结果表明,该方法不仅能有效补偿阴影,还能确保补偿后的阴影区域与非阴影区域平滑过渡。

关键词:无人机影像;影像分割;阴影检测;阴影补偿;低通滤波

中图分类号:P231.1

阴影补偿一般包括阴影区域识别和阴影区域补偿两方面内容^[1]。阴影区域识别方法可分为基于模型的方法和基于属性的方法两类。基于模型的方法通常是依据一定的先验知识,对过渡区域进行分类识别^[2]。但当将该方法应用于航空影像时,可靠性较低。基于属性的方法通常是利用阴影的光谱特性来识别阴影区域^[1,3]。它对城区造成的阴影有较好的识别结果,但对地形复杂的区域会造成明显的阴影与非阴影界限,且阴影边缘处理过于简单,会造成影像信息损失。本文以低空无人机航空影像为对象,利用阴影区域的属性特征来识别阴影,同时顾及阴影边界处理,并根据特定的光照模型对阴影区域进行补偿。

1 阴影识别

由于复杂的几何关系、地面反射率、照射条件等原因,自然影像的阴影识别非常困难。但是,单张无人机影像幅面小、清晰度高,且阴影与非阴影之间具有明显的灰度差,因此,可以借助区域之间的灰度对比来识别阴影。

首先,生成灰度影像。与彩色影像相同,灰度影像亦能反映整幅影像整体和局部色度与亮度的分布和特征。因此,本文首先将彩色影像转变为灰度影像以减少计算量。

其次,影像分割和生成二值化阈值图。影像分割是指将灰度影像按照其相关性分割为不同的区域。其中,分割算法为均值漂移影像分割算法^[4]。以一幅原始影像为例(图 1),其灰度影像的分割结果见图 2。同时,采用文献^[5]推荐的直方图阈值法计算灰度影像的灰度阈值。将小于阈值的像元灰度值设为 0,并初步判定为阴影;反之,则判定为非阴影,并将像元灰度值设为 1。据此,便得到灰度影像的二值化阈值图(见图 3)。

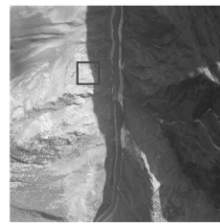


图 1 原始影像 I

Fig. 1 Initial Image I

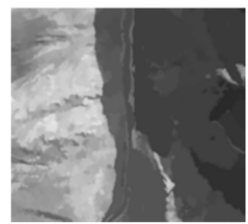


图 2 影像分割

Fig. 2 Image Segmentation

第三,判定区域与阴影合并。由于地物亮度的不均匀变化,直方图阈值法很可能将阴影区域内较亮的地物识别为非阴影,反之亦然。因此,还应在阈值图的基础上剔除误判或零散的阴影区域。对于零散或误判的阴影区域,其局部均值应当接近于 0,而非阴影区域的局部均值应该接近于 1。因此,本文将影像分割结果与阈值图相结

收稿日期:2013-03-16。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41071286, 41271451, 41171346)。

合,利用分割结果中的区域位置信息与阈值图中的灰度信息进行阴影识别。从分割结果中逐个取出分割区域,并计算当前区域在二值化图中的灰度平均值,将小于设定阈值(本文取 0.1)的区域识别为阴影区域。识别结束后,将属性相同的相邻区域进行合并。

最后,生成阴影掩膜影像。在保留最大的阴影区域后,便可生成一幅与原始影像等大的阴影掩膜影像,如图 4 所示。



图 3 二值化阈值图 图 4 阴影掩膜影像
Fig. 3 Threshold Image Fig. 4 Shadow Mask

2 阴影补偿

2.1 区域划分

在影像处理中,通常只能将影像灰度的跳变处识别为阴影与非阴影区域的边界线。例如,掩膜影像的阴影与非阴影区域已可通过一条明显的边界线分隔。但实际上,真实影像中阴影与非阴影区域的过渡转换并无明显边界线,而是一种渐变过程。因此,对于一幅包含阴影的影像,可将其划分为阴影区域、非阴影区域和过渡区域。如图 5 所示。其中,阴影区域为 P_s ;非阴影区域为 P_f ; E_{sf} 为经掩膜影像识别所得的 P_s 与 P_f 的公共边界线;过渡区域为 P_t ,它是以边界线 E_{sf} 为中心向两侧辐射的缓冲区。

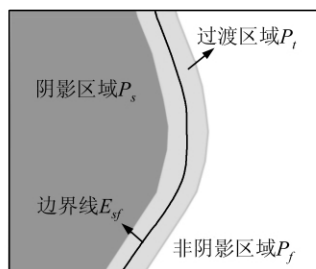


图 5 区域划分
Fig. 5 Region Division

由于过渡区域是一个缓冲区,因此可借助影像形态学操作中的膨胀与腐蚀得到。其中,膨胀是使边界向外部扩张的过程,可以用来填补物体中的空洞;而腐蚀是使边界向内部收缩的过程,可

以用来消除小且无意义的物体。两者均是将单波段图像与固定的核函数进行卷积,不同之处在于前者是求局部最大值,而后者是求局部最小值。在对阴影掩膜影像分别进行膨胀与腐蚀操作后,便可得到沿边缘线扩大或缩小的阴影区域,两者结果之差即为过渡区域。膨胀与腐蚀的次数视过渡边界线的渐变区半径而定,以使生成的过渡区域完全覆盖阴影到非阴影的渐变过程,本文膨胀与腐蚀操作的次数均为 5。

2.2 阴影区域补偿

影像可视为由直射光和环境光合成而得^[6]。其中,直射光是指由光源直接照射到地物的光线,而环境光是指从其他地物反射而得的光线。因此,影像的光照模型可抽象为^[6]:

$$I = (kL_d + L_e)R \quad (1)$$

其中, I 为某像元的灰度值; L_d 和 L_e 分别为该像元的直射光分量与环境光分量; R 为该像元的地面反射率; k 为该点的阴影系数。由于阴影区域只包含环境光而无直射光,因此, k 的定义为:

$$\begin{cases} k = 0, I \in P_s \\ 0 < k < 1, I \in P_t \\ k = 1, I \in P_f \end{cases} \quad (2)$$

因此,若要将一个处于阴影区域的像元 I_s 补偿为非阴影区域的像元,就需要补偿其缺损的直射光分量 L_d 。该补偿的函数模型为^[6]:

$$I_s^{\text{shadow_free}} = (L_d + L_e)R_s = (k_s L_d + L_e)R_s \frac{L_d + L_e}{k_s L_d + L_e} = \frac{r_s + 1}{k_s r_s + 1} I_s \quad (3)$$

此时, I_s 为一个处于阴影区域内的像元; $I_s^{\text{shadow_free}}$ 为该像元补偿后的结果; $r_s = L_d/L_e$ 为该像元直射光与环境光的比值(简称为直环比)。进一步地,由于 I_s 位于阴影区域内,即 $k_s = 0$,因此,式(3)可简化为:

$$I_s^{\text{shadow_free}} = (r_s + 1)I_s \quad (4)$$

精确的直射光与环境光分量无法计算,进而精确的直环比 r_s 也无从计算。鉴于影响直环比的主要因素是地物质地与地面反射率,因此,可根据相邻的阴影与非阴影区域来估算直环比。本文提出了一种基于边界线像元的直环比内插阴影区域像元直环比的方法:① 计算边界线上全部像元的直环比;② 选取与阴影区域内待求像元相距一定距离的边界线像元;③ 利用边界线像元的直环比内插获取该阴影区域内该像元的直环比。边界线上像元的直环比的计算方法如下所示。

假设 I_k 为边界线 E_{sf} 上的一个像元, I_i 与 I_j 分别为 P_s 和 P_f 内的像元,且 I_i 与 I_j 关于 I_k 点

对称,则依据式(1)可得:

$$\begin{cases} I_i = (k_i L_d + L_e) R_i \\ I_j = (k_j L_d + L_e) R_j \end{cases} \quad (5)$$

两像元 I_i 与 I_j 之间的距离应尽可能地接近过渡区域的宽度,即 I_j 越邻近 I_i ,两像元地物属性的一致性也越高,即满足 $R_i = R_j$ 。联立式(5)可得^[4]:

$$r_k = \frac{L_d}{L_e} = \frac{I_j - I_i}{I_i k_j - I_j k_i} \quad (6)$$

参照式(2),式(6)可简化为:

$$r_k = (I_j - I_i) / I_i \quad (7)$$

若直接代入 I_i 与 I_j ,则直环比 r_k 会受地物局部亮度不均匀的影响而无法正确反映阴影与非阴影区域之间的亮度对比。为此,可利用像元邻域的灰度均值代替该像元的灰度值。本文所选邻域为 10×10 个像元的正方形窗口。当沿边界线逐像元计算直环比后,便可内插求取阴影区域内像元的直环比。

假设 I_s 为阴影区域 P_s 内的一点,则依次计算边界线 E_{sf} 上的像元与像元 I_s 之间的距离(本文均采用曼哈顿距离),记其中的最短距离为 d_{\min} 。进一步地,令边界线上所有与 I_s 的距离小于 $2d_{\min}$ 的像元 I_k 作为集合 Ω ,并根据下式计算 I_s 的加权平均值,即可求得该像元的直环比 r_s 。

$$r_s = \sum_{k \in \Omega} (r_k \omega_k) / \sum_{k \in \Omega} \omega_k \quad (8)$$

其中, k 为集合 Ω 内一点; r_k 为满足条件的边界线像元的直环比; ω_k 为对应直环比的权值,随着点 I_k 与点 I_s 之间的距离 d_{ks} 线性减小。权值 ω_k 的定义为:

$$\omega_k = \begin{cases} 1, d_{ks} = d_{\min} \\ 2 - \frac{d_{ks}}{d_{\min}}, d_{\min} < d_{ks} < 2d_{\min} \\ 0, d_{ks} \geq 2d_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 过渡区域补偿

过渡区域是阴影与非阴影合成的结果,如果直接按照上文方法内插求取该区域像元的直环比,进而依据式(4)进行阴影补偿,会造成沿边界线的部分近阴影区域补偿过渡,而远离阴影的部分区域补偿不足,从而造成明显的边界线,其效果如图 6 所示。因此,本文提出了一种过渡区域的阴影补偿方法,确保边界过程的渐变与平滑,其一般过程包括内插灰度值、多波段合成和计算直环比等三个步骤。补偿结果如图 7 所示。

首先,内插灰度值。该步骤是利用过渡区域两侧的像元灰度内插求取过渡区域内像元的灰度值。如图 8 所示,假设 I_t 为过渡区域 P_t 内的一个

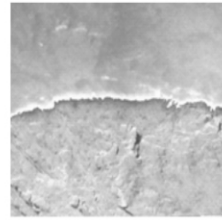


图 6 不处理边界的补偿
Fig. 6 Compensation without Considering Boundary

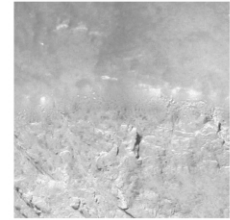


图 7 处理边界的补偿
Fig. 7 Compensation with Considering Boundary

待内插像元, I_s 为阴影区域 P_s 内且距离 I_t 最近的像元,记其距离为 d_s , I_f (若存在多个,则任选一个)为非阴影区域 P_f 内且距离 I_t 最近的像元,记其距离为 d_f 。同样地,为避免地物局部亮度的不均匀变化, I_s 与 I_f 的灰度值应取满足特定条件的区域内像元灰度值的加权平均值。参照式(8),将 P_s 内靠近 P_t 边缘且与像元 I_t 的曼哈顿距离小于 $2d_s$ 的像元定义为一个集合,并取这些像元灰度的加权平均值作为像元 I_s 的灰度值,其权值可参考式(9)。同理可得像元 I_f 的灰度值。此后,即可依据下式内插求取像元 I_t 的灰度值:

$$I_t = I_f - (I_f - I_s) \cdot \frac{d_f}{d_f + d_s} \quad (10)$$

其次,多波段合成。尽管利用式(10)可以保证过渡区域内底图色调之间的平滑过渡,但其结果并不包含纹理信息。因此,本文借鉴文献[7]中多波段合成的思想,将原始影像的 R 、 G 、 B 三波段分别进行不同尺度的低通滤波,再对滤波结果进行线性组合,从而生成一幅无明显边缘效应的合成影像,其实质为在相对宽的频率域合成低频波段,在相对窄的频率域合成高频波段。以原始影像的 R 波段为例,其不同尺度滤波结果的线性组合方式为:

$$I'_T = \sum_{b=1}^k (\omega_b \cdot L_b) \quad (11)$$

式中, I'_T 为像元 I_t 的合成灰度值; L_b 为像元 I_t 在第 b 个低通滤波波段内的灰度值; ω_b 是该波段的权重系数,且满足 $\sum_{b=1}^k \omega_b = 1$; k 为低通滤波的尺度(本文采用两个尺度的低通滤波,即 $k=2$)。滤波器采用高斯低通滤波器,滤波器半径分别为 11 和 21 个像元,波段权重系数采用 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。

最后,计算直环比。由上文分析可知,过渡区域是直射光与环境光相互影响的合成结果,若得到两者的直环比,即可依据式(4)完成过渡区域的阴影补偿。本文将过渡区域内像元灰度的内插值 I_T 视为直射光分量,而多波段合成结果 I'_T 相当于滤掉纹理信息的真实影像,可视为环境光分量。

因此,当得到过渡区域像元灰度的内插值 I_T 及多波段合成值 I'_T 后,即可依据式(7)的形式计算过渡区域内所有像元的直环比。

$$r_i = (I_T - I'_T) / I'_T \quad (12)$$

当对 R 、 G 、 B 三波段分别计算完过渡区域内所有像元的直环比后,便可依据式(4)逐像元完成过渡区域的补偿。

至此,阴影区域与过渡区域的补偿均已完成,即可得到原始含阴影影像的补偿结果。

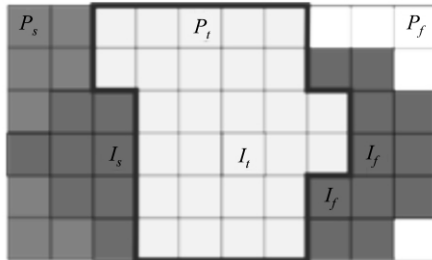


图8 过渡区域插值

Fig. 8 Interpolation for Transition Regions

3 实验结果与分析

本文实验区位于东经 $98^{\circ}41'13'' \sim 99^{\circ}13'45''$ 、北纬 $30^{\circ}00'15'' \sim 30^{\circ}59'24''$, 隶属于巴塘县西北部金沙江流域的高山峡谷地段。实验区内金沙江江面地理高度由下游的约 2 600 m 升至上游的 2 750 m 左右,流域两侧山峰平均高达 5 000 m,最高峰海拔 5 700 m。

实验所用航空平台为国内某所研制的长航时无人机,航摄传感器为专为高山峡谷地形设计的五镜头组合宽角双分辨率相机:中央为 50 mm 主距相机,焦距长宽 5 616 像元 \times 3 744 像元;全像幅由四拼组合宽角相机获取,其等效主距 35 mm,视场角 $66^{\circ} \times 66^{\circ}$,焦距长宽 7 168 像元 \times 7 168 像元。飞行的相对航高为 2 000 m。

以图 1 的原始影像为例,该影像中阴影严重,已直接影响到视觉效果。本文首先根据其灰度影像预测阴影区域。然后,逐波段计算过渡区域和阴影区域像元的直环比。最后,根据式(4)进行逐像元阴影补偿。其各个阶段的处理效果如图 9 所示。

对比图 1 与图 9(c),原始影像大部分的阴影影响已得到有效补偿,而且阴影与非阴影之间实现了平滑过渡(见图 10)。

图 10(a)为图 1 中原始影像中矩形内的阴影边缘,从图中可以看出,原始影像的阴影与非阴影区域并无明显边界线,而是呈现平滑渐变的特点。从图 10(b)中可以看出,过渡区域的直环比从阴

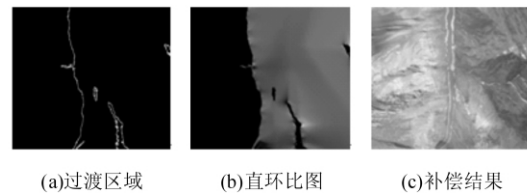


图9 阴影补偿过程

Fig. 9 Procedures of Shadow Compensation

影区域的直环比逐渐过渡为非阴影区域的直环比,且三个区域之间没有明显的边界线,保证了区域之间补偿效果的连续性。从图 10(c)的补偿结果可以看出,阴影与非阴影之间实现了平滑过渡,在保证过渡区色彩连续性的基础上,基本保存了原始影像的纹理信息。

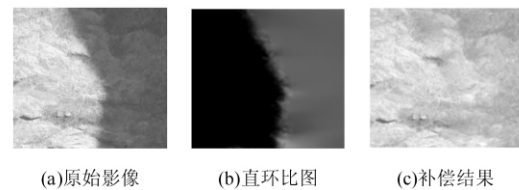


图10 边缘补偿

Fig. 10 Shadow Compensation of Boundary

图 11 为另外两张影像的阴影补偿结果。在图 11(a)中,影像右上方存在若干零散的小块阴影,而图 11(b)仅对影像左侧的大面积阴影进行了修改。对比可知,影像右上角未补偿的小块阴影增强了影像的立体效果,进而验证了面积最大的阴影区域是主要补偿对象的合理性。

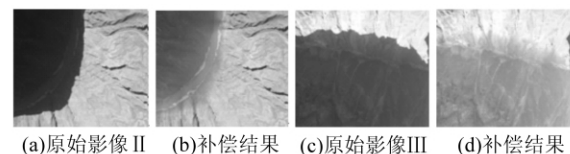


图11 实验结果

Fig. 11 Experimental Results

4 结语

本文根据阴影的成像模型推导出了阴影的补偿方法和实现流程,并针对阴影与非阴影的过渡区域,采用多波段合成方法,在保存纹理信息的前提下,使阴影与非阴影区域实现平滑过渡。实验结果表明,本文方法能够有效补偿阴影造成的影响,改善遥感影像的表达效果。对于阴影识别,本文采用影像分割与二值化阈值图相结合的方法识别阴影,简单、高效,但存在误判的可能。因此,航空影像中阴影识别的可靠性问题有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 杨俊,赵忠明,杨健.一种高分辨率遥感影像阴影去除方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(1):17-20
- [2] 王树根,李德仁,郭泽金,等.正射影像上阴影和遮蔽的信息处理方法研究[J].测绘信息与工程,2004,29(4):1-4
- [3] 王树根,郭泽金,李德仁.彩色航空影像上阴影区域信息补偿的方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2003,28(5):514-516
- [4] Comaniciu D, Meer P. Mean Shift: a Robust Approach Toward Feature Space Analysis[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 2002, 24(5):603-619
- [5] 陈宁宁.几种影像阈值分割算法的实现与比较[J].电脑知识与技术,2011,13(7):3109-3111
- [6] Guo Ruiqi, Dai Qieyun, Hoiem D. Single-Image Shadow Detection and Removal Using Paired Regions[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2011(2):203-204
- [7] Burt P J, Adelson E H. A Multiresolution Spline with Application to Image Mosaics [J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 2(4):217-236

第一作者简介:林宗坚,教授,博士生导师,研究方向为低空无人飞行器遥感系统、遥感影像的信息量与不确定性分析。

E-mail:lincasm@casm.ac.cn

A Shadow Compensation Method for Aerial Image

LIN Zongjian^{1,2} REN Chaofeng¹ YAO Na¹ XIE Feifei¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaping Road, Beijing 10039, China)

Abstract: A shadow compensation method for aerial images is proposed. First, an image segmentation method is applied and the threshold value is calculated to help predict a shadow region. Then the ratio of direct light to ambient light pertaining to the shadow region is calculated. In the meantime, the multi-band blending method is adopted to realize a smooth transition from shadow region to non-shadow region. Finally, the shadow compensation is finished according to a certain illumination model. The experiments show that the proposed method can not only effectively compensate the shadow regions, but ensure a smooth transition from shadow to non-shadow regions.

Key words: UAV image; image segmentation; shadow detection; shadow compensation; low-pass filter

About the first author: LIN Zongjian, professor, Ph. D supervisor. His main research interests include low altitude unmanned aerial vehicles remote sensing system, information amount and uncertainty of remote sensing imagery.

E-mail: lincasm@casm.ac.cn