

高分辨率遥感影像阴影的自动检测与自动补偿

高贤君¹ 万幼川¹ 杨元维¹ 何培培¹

摘要 提出了高分辨率遥感影像中阴影的检测与补偿的全自动处理方法。首先,利用简单阴影特征构造复合特征的方法联合构建多种光谱阈值检测条件,结合相应自动阈值获取方案实现阴影自动初检测,并设计自动形态学处理方法对初检测结果进行后处理;然后,以补偿模型为基础,通过统计阴影与非阴影区域的亮度均值与均方差、采用特征点提取与匹配的方法自动获取模型参数,再综合区域级整体补偿和窗口级局部补偿两种结果实现阴影的全自动补偿。结果表明,多条件联合检测与自动形态学处理可提升检测结果的总体精度和区域完整性,补偿模型参数自动获取方法可靠有效,综合补偿法充分结合整体与局部补偿的优势,提升整体亮度,突显纹理细节,使得被阴影遮挡的信息得以真实再现。

关键词 高分辨率遥感影像, 阴影自动检测, 多检测条件联合, 补偿模型, 自动补偿策略

引用格式 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

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01709

Automatic Shadow Detection and Automatic Compensation in High Resolution Remote Sensing Images

GAO Xian-Jun¹ WAN You-Chuan¹ YANG Yuan-Wei¹ HE Pei-Pei¹

Abstract A method to automatically detect and compensate shadows in high resolution remote sensing images is proposed. This method consists of initial shadow detection and post-processing. Through utilizing simple shadow spectrum signatures and complicated signatures shadows are detected automatically with relative automatic thresholds. Then the initial detected result is improved by a post-processing scheme based on the principles of mathematical morphology. Meanwhile an automatic compensating method which is essentially a mathematic model is explored, whose parameters are automatically acquired by calculating the mean and variance of illumination in shadow and non-shadow areas and using feature points extraction and matching strategy. Additionally, an integrated method using the compensation information from the whole shadow area and the small pixel window respectively is used to promote the final result. Experimental results indicate that both the multifarious conditions and post-processing can improve the accuracy of shadow detection results. The post-processing can also strengthen the completeness of shadow area. Moreover, the method of automatically acquiring the parameters in the compensation model is feasible and effectual. The integrated compensation strategy makes the brightness of shadow area heightened and the details and texture enhanced. In consequence, the real information shaded by shadow can emerge again.

Key words High resolution remote sensing image, automatic shadow detection, combination of different conditions for detecting shadow, compensation model, automatic compensation strategy

Citation 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

由于在拍摄时刻的太阳高度角和具有一定高度的地物遮挡的影响,遥感影像中不可避免地存在阴

影。随着遥感传感器的快速发展,影像分辨率得到大幅度提高,影像中的地物信息更为清晰、丰富,应用范围更为广泛,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。因此,对高分辨率遥感影像中阴影的处理研究,实现自动检测与自动补偿,具有十分重要的应用价值。

近年来,国内外学者在对阴影的检测与补偿方法的研究中已经取得了不少成果。阴影的检测主要采用基于模型和基于特征的方法实现。模型法主要是根据影像上场景和地物的几何结构、光源、传感器参数、数字表面模型(Digital surface model, DSM)

收稿日期 2013-04-25 录用日期 2014-01-03
Manuscript received April 25, 2013; accepted January 3, 2014
国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA122104),国家自然科学基金(41371343, 41001255),高等学校博士学科点专项科研基金(20130141130003)资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA122104), National Natural Science Foundation of China (41371343, 41001255), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130141130003)
本文责任编辑 戴琼海
Recommended by Associate Editor DAI Qiong-Hai
1. 武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430079
1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079

等先验信息建立阴影的投影模型等来检测阴影,可用于解决真正射影像中存在的阴影遮蔽等问题^[1-2].特征法是通过分析阴影区域的特征共性及其与非阴影区域的差异,直接利用阴影所特有的不变特征^[3],如在 HIS、YIQ、YCbCr 色彩空间中的高色调、低亮度特征, $C_1C_2C_3$ 空间中的 C_3 光度不变量以及区域纹理不变性的纹理指数特征等^[4-7],结合特征阈值^[8]、统计模型^[9]、区域增长^[10]、D-S 证据理论^[11]等方法实现阴影检测.模型构建法的真实模拟性强、复杂度高、检测精度较高,但所需的先验信息难获取,使得应用范围受到了较大的限制;阴影特征阈值法相对比较简单,不依赖先验知识,被广泛应用于单幅影像的阴影检测,但仍存在特征阈值难确定、通用性差等问题.

阴影补偿处理主要有两类方法.1)重新构建光源模型,利用阴影的恒常特性估计标准光照条件下阴影区域地物应有的信息^[12-13].2)采用图像增强方法,如直方图匹配^[14]、线性拉伸修正^[15]、分形插值^[16]、同态滤波^[17]、Retinex^[18]等方法构建阴影补偿模型,对阴影进行处理,以恢复阴影区域的信息,但是这类方法仍然存在一定的不足:a)涉及的参数过多,主要依靠人工进行参数调整,比较繁琐,自动化程度差;b)对比度不强,纹理恢复不完整;c)色彩信息保真度不高等.为了解决这类问题,提高阴影处理的效率,本文探索了阴影自动检测与自动补偿的方法,无需人工参与及其他先验知识,可根据影像自身情况,自适应地处理阴影,尽可能恢复被阴影遮挡的地物的真实色彩、纹理等信息,使丢失信息重新完整呈现.

1 阴影的自动检测方法

为实现高效、高精度、自动化的阴影检测,本文仍以光谱阈值法为基本原理探索合适的检测方法.由于以像素为单位的常用光谱特征方法的检测结果中,存在区域完整性不强的问题,表现为两方面特征:1)阴影区域中的部分地物的光谱特性不足而被漏检导致检测“空洞”;2)由于阴影分布广泛或“异物同谱”被误判而呈现分布散碎现象.为减少以上问题对检测精度的影响,本文在研究了阴影所具有的光谱特性基础上,提出了通过构建能有效检测阴影的多种光谱特征阈值检测条件结合自动阈值实现阴影的初步检测方法.为保证阴影补偿结果的整体效果,进一步利用形态学方法,对初检测结果中存在的以上问题进行改善,提升阴影的区域完整性.

1.1 多种光谱阈值检测条件联合的初始阴影获取

1.1.1 阴影检测的光谱特征条件构建

通过对遥感影像在不同光谱波段下的呈现效果

进行分析,除了常有的低亮度、高色调特性外,阴影区域在归一化 RGB 的蓝色分量 B' 的波段上也具备较高的数值^[8].结合一定的阈值限定条件,可构建此类简单阴影特征的判别条件,为光谱特征阈值法的基本原理.而多特征组合方法则是将多项单特征判别条件进一步通过逻辑组合形成最终检测条件.但由于实际可有效检测阴影的简单特征十分有限,直接利用这类特征的判别条件进行组合,容易受到特征种类偏少的限制,且不能保证特征之间可以完全互补,导致检测结果在一定程度上易受到影像成像质量的影响,通用性受到限制.由此,以简单的阴影特征为基础通过数学方法构建复合特征,可用于检测阴影.但在复合特征中,其他类的地物可能会具有与阴影同样的性质,通过找出此类地物的光谱特征来排除此种地物,则可实现阴影的提取.复合特征的引入,在一定程度上解除了阴影特征数量少的限制,且可通过排除异己的思想,拓宽光谱特征阈值原理检测阴影的可行方向.多种可行方法的进一步综合,能更好地提高阴影检测的准确度.在以上思想的驱动下,本文从不同方面构建了三种检测条件.

1) 条件 1

首先直接利用多种简单阴影特征,即低亮度 I 、高 B' 分量,进行逻辑组合,构建一种有效检测阴影的条件 1,如式 (1) 所示,满足条件的所有像素构成集合 Set_1 .

$$Set_1 = \{(i, j) | B'(i, j) > T_{B'} \& \& I(i, j) < T_I\} \quad (1)$$

2) 条件 2

以差值原理放大阴影特征间的差异,使阴影特性更为突出为基本指导思想,可利用基本阴影特征构造复合特征用于检测阴影.选取基本特征时,由于 B' 相对于亮度 I 和色调 H 在突显阴影特性上更具有优势:在 B' 特征中,仅存在蓝色地物与阴影具有相同特性造成干扰,而低亮度和高色调的地物中同时包含了阴影以外的较多其他干扰地物,不易与阴影区分,但低亮度特征可以用来排除蓝色地物.依此选定 B' 和 I 分量为基础, B' 为阴影主特性,构建了复合特征 $Q = B' - I$.但在 Q 特征中阴影和绿色植被占据高端数值,若利用绿色植被的独特光谱特性将其进行排除,则能开辟另一种阴影检测方案.而植被在归一化 RGB 的绿色分量 G' 中特征值较高,正好可被利用,将 Q 和 G' 采用式 (3) 所示方式构建条件 2,可获取此中条件下的阴影像素集合 Set_2 .

$$G' = \frac{G}{R + G + B} \quad (2)$$

$$Set_2 = \{(i, j) | Q(i, j) > T_Q \& \& G'(i, j) < T_{G'}\} \quad (3)$$

3) 条件 3

在 Q 特征基础上, 只需要加强 Q 特征中阴影的高数值特性, 同时削弱特征中高数值端的绿色植被的能量, 分离出绿色植被, 即可实现可构造更为有效、独立的阴影复合特征。

通过将 B' 扩大 1 倍, 可放大复合特征中阴影占据高端数值的特性, 可大幅度排除低亮度的干扰地物, 由于植被具有高 G' 特性, 取复合特征与 G' 的差值, 可削弱绿色植被在复合特征中的高数值特性; 再通过 G' 特征结合一定阈值构建绿色植被识别条件, 对满足条件的绿色植被进一步取差削弱植被的复合特征能量, 使其不再具有高端数值特性, 而阴影的 G' 分量较低, 这样的差值处理能够有效保持阴影在复合特征中的高能量特性。按照以上思路构建的复合特征 A 如式 (4) 所示, 其中 $T_{G'}$ 可通过一维 Otsu 自动阈值方法自动获取。按式 (5) 构建条件 3, 可由特征 A 独立检测满足条件的阴影集合 Set_3 。

$$A = \begin{cases} 2B' - I - G', & G' \leq T_{G'} \\ 2B' - I - 2G', & G' > T_{G'} \end{cases} \quad (4)$$

$$Set_3 = \{(i, j) | A(i, j) > T_A\} \quad (5)$$

4) 3 种条件的综合

将三种条件下获取的阴影集合通过取并集的方式合并, 可在一定程度上相互补充, 减少了因影像中的阴影在某一特征下的呈现特性不明显导致的阴影漏检概率, 提高检测精度。

$$Set = Set_1 \cup Set_2 \cup Set_3 \quad (6)$$

图 1 所示为影像在多种不同的简单特征与复合特征下的特征值分布图, 可直观反映各特征识别阴影的能力。

1.1.2 特征自动阈值的配置方案

在 Set 中涉及多项特征阈值, 均需要通过自动阈值获取方法获取。本文选用一维 Otsu 自动阈值及带限定条件的 Otsu 自动阈值方法^[8] 为自动阈值获取的基本依据, 对相应特征选用合适的阈值方法

确定合适的自动阈值。

实验统计分析, 只有 G' 分量直接取其一维 Otsu 阈值 T_{Go} 即可有效排除绿色植被; 对特征 I 、 B' 、 Q 、 A 则需要分别采用合适限定条件改进。对 I 引入关于特征 $P = (H + 1)/(I + 1)$ 的限定条件 $\{P > T_{Po}\}$ (其中, H 为 HIS 空间中的色调分量), 对 B' 分量采用限定条件 $\{I < T_{Io}\}$, Q 分量和 A 分量则是采用关于自身特征的限定条件 $\{Q > T_{Qo}\}$ 及 $\{A > T_{Ao}\}$ 筛选满足条件的像素, 其中 T_{Po} 、 T_{Io} 、 T_{Qo} 、 T_{Ao} 分别为特征 P 、 I 、 Q 、 A 的一维 Otsu 自动阈值。将各特征自动阈值代入式 (6) 中, 即可获取满足条件的像素集合 Set , 即为最终检测结果。

多种光谱特征检测条件联合的方法, 在一定程度上可减少漏检。但由于算法仍以像素为单位, 且影像中存在一定高度的地物均会产生相应的阴影, 因此初始检测结果存在散碎分布的阴影, 区域完整性仍然较差。为保证阴影补偿的效果, 必须对阴影初始检测结果进行数学形态学后处理。

1.2 形态学后处理提取完整阴影区域

将形态学方法与阴影特征分析联合处理, 合理地去除杂碎、散乱的小区域阴影, 进一步补充被漏检的阴影区域, 以增强阴影的区域完整性, 为阴影补偿奠定良好基础。

形态学处理时所需的结构元素选取应根据应用所能提供的先验知识情况进行合理构造。若已知太阳高度角可确定阴影方向, 则可选用与阴影方向相似的结构元素。若无可利用的先验信息, 为保证结果的可靠性, 应选用中性的、不具方向性的结构元素。元素大小也需要视应用需求而定, 根据应用对耗时、精度方面的需求合理定制。本文以只有影像光谱信息为研究背景, 实现全自动去除阴影时, 为保证结果的可靠并降低时耗, 结构元素取定的是 3×3 的十字叉形的结构元素, 即可满足要求。再合理利用 OpenCV 封装的工具, 并结合像素特征综合分析, 实现合理的形态学处理。

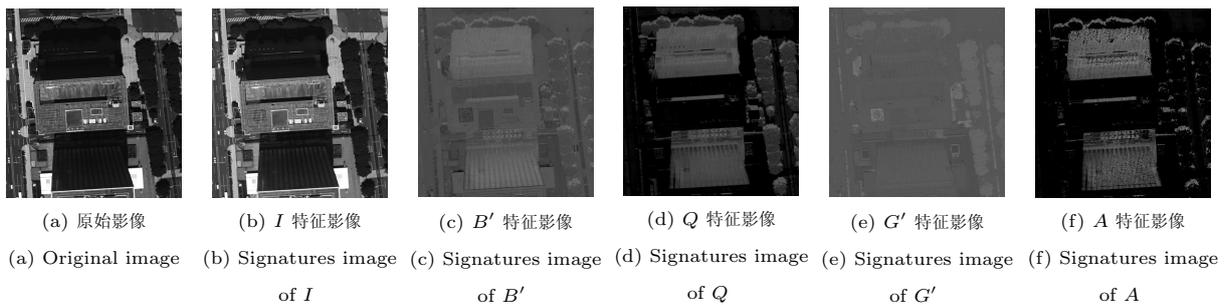


图 1 同一影像在不同光谱特征下的特征值分布图

Fig. 1 Different spectrum signatures image of the same image

1.2.1 杂、散小阴影区域的自动去除

根据阴影检测结果将图像二值化处理后, 可通过 `cvContourArea` 统计独立区域的面积. 小的阴影区域的遮挡影响较小, 补偿获取的信息可忽略, 因此可设置一定的面积阈值, 剔除小面积区域, 保留有效阴影区域. 面积阈值应根据应用目的合理设置, 若不分大小地保留会耗时、耗力. 以可提供应用所需信息的最小地物在影像中所占的像素面积大小为阈值, 对大于此面积的阴影区域进行补偿才可能提供最小地物的完整信息进行进一步利用, 其他小于此面积的阴影区域补偿后的有用信息量较少, 可忽略. 以提取建筑物阴影的应用为例, 通过设置建筑可能存在的最小有效阴影面积为条件, 进行筛选剔除, 其他地物阴影如树木阴影可在一定程度上经过小区域去除而剔除. 以应用为驱动可统一该应用下的恒定面积阈值条件, 用于自动去除无效的小区域阴影.

1.2.2 漏检阴影的进一步自动补充

由于算法的局限性, 阴影区域中存在空洞的情况很常见. 通过采用形态学方法, 填充独立连通阴影区域的内轮廓, 可实现空洞的自动填充, 提升阴影区域的完整性.

此外, 阴影区域外轮廓周边也可能仍存在一定的漏检. 对此种阴影区域的补充检入, 可通过将原始阴影边界与其周边 8 邻域中的非阴影像素的阴影特征差异进行分析, 当差异很小时, 可将该邻域像素设置为阴影像素, 一次阴影边界遍历处理完毕后, 对新加入的阴影像素进行是否为新边界像素的判断, 进一步判断新边界与邻域像素的差异, 依次循环, 取一定的循环结束条件, 停止新阴影补充. 补充后的结果可能会重新出现空洞现象, 可进一步合理填充. 此处所涉及的一些判断条件的重要程度较低, 可直接通过实验选取经验值保证自动处理.

图 2 所示为对图 1(a) 分别采用不同检测条件获取的阴影检测结果. 对比发现, 通过构造有效的复合特征构建的条件, 能够与其他方法相互补充, 减少

漏检率, 再在综合结果的基础上进行形态学处理可有效降低误判率和漏检率, 并提升区域的完整性.

1.3 非阴影区域的自动获取

自动阴影补偿需要利用阴影区域周边的非阴影区域的信息, 利用形态学梯度的原理实现每个独立阴影区域对应的非阴影区域的获取. 形态学梯度^[19]的定义为

$$GRAD(f) = (f \oplus g) - (f \ominus g) \quad (7)$$

其中, f 为原始图像, g 为结构元素, \oplus 表示膨胀运算, \ominus 表示腐蚀运算. 对式 (7) 进行变换如式 (8) 可实现应用形态学梯度的原理获取非阴影影像, 即利用 g 对阴影区域影像 f_{SD} 进行连续 n 次的膨胀运算结果直接与 f_{SD} 取差即可获得非阴影区域影像 f_{NSD} . 为同时实现各阴影区域与非阴影区域的对应, 只需在运算前对每个独立阴影区域进行编号标记, 膨胀运算时记录原始区域的标记信息即可. 膨胀次数 n 实际代表着非阴影区域的宽度, 可根据应用所需取合适经验值.

$$f_{NSD} = (f_{SD} \oplus g)^n - f_{SD} \quad (8)$$

2 阴影的自动补偿方法

在获取独立、完整的阴影区域和对应非阴影区域后, 为了实现阴影自动补偿, 本文选取恰当的补偿模型, 设计了充分利用两类区域信息的模型参数自动获取策略, 并从整体区域和局部像素窗口两方面综合补偿阴影区域, 兼得整体与局部补偿的优势, 使补偿后的地物信息达到真实呈现的效果.

2.1 补偿模型

补偿模型是补偿阴影的核心原理, 选取合适的补偿模型非常关键. 若对 HIS 空间中的 H 、 I 、 S 三分量全部补偿, 最终的补偿结果呈现的是灰白色彩, 丢失了真实色彩信息. 为了保持地物原有的色彩信息, 实验发现, 仅对亮度分量 I 进行补偿时, 色彩保

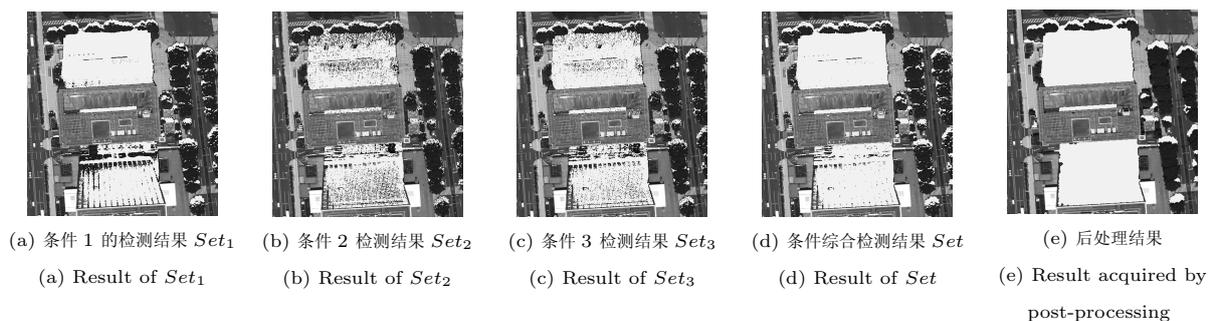


图 2 不同方法获取的阴影检测结果

Fig. 2 Comparison between the shadows detected results by different methods

真度强, 更真实地恢复被阴影遮挡的地物信息.

式 (9) 为一种利用局部均值与均方差的补偿映射模型.

$$I'(i, j) = A \left[m_T + \frac{I(i, j) - m_{SD}}{\sigma_{SD}} \cdot \sigma_T \right] \quad (9)$$

其中, $I(i, j)$ 、 $I'(i, j)$ 分别为影像中像素 (i, j) 的原始亮度分量值和补偿值, A 为补偿强度系数, m_{SD} 、 σ_{SD} 分别为阴影区域的亮度均值和均方差, m_T 、 σ_T 是理想情况下该区域的均值和均方差, 即如果该区域未被阴影遮挡而直接被阳光照射时, 所应具有的理想均值和均方差.

分析模型中的未知参数 A 、 m_T 、 σ_T 对补偿结果的影响时, 可利用非阴影区域 NSD 的信息近似替代为目标值, 计算补偿结果与目标值在图像质量基本指标上的差异, 可构建评价补偿结果的质量指标. 在图像质量基本指标中, 以反映区域明暗程度的亮度均值 B 和具有对图像微小细节反差表达能力的平均梯度 (清晰度) T 更适合反映在阴影补偿后图像的恢复效果^[13]. 将 B 和 T 代入式 (12) 和 (13), 可在亮度和平均梯度上评价补偿结果质量, 便于分析模型参数的影响.

$$B = \frac{1}{nS} \sum_{(i,j) \in S} I(i, j) \quad (10)$$

其中, S 代表兴趣区域的像素集合, nS 代表 S 中的像素总个数, B 和 T 则分别为区域 S 的亮度均值和平均梯度.

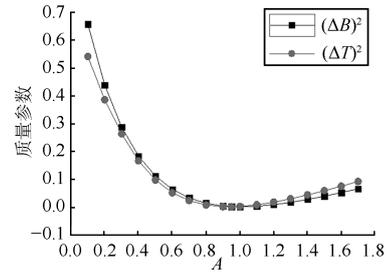
$$(\Delta B)^2 = \left(\frac{B - B_{NSD}}{B_{NSD}} \right)^2 \quad (12)$$

$$(\Delta T)^2 = \left(\frac{T - T_{NSD}}{T_{NSD}} \right)^2 \quad (13)$$

其中, B 、 T 代表阴影区域补偿后的亮度均值和平均梯度, B_{NSD} 、 T_{NSD} 代表对应非阴影区域的亮度均值和平均梯度.

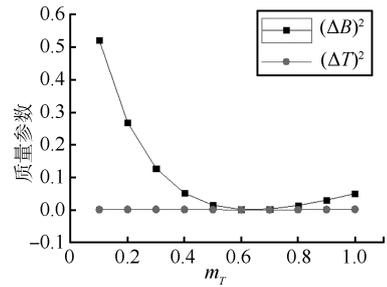
图 3 反映了模型中三个未知参数对补偿质量的影响. 当 m_T 、 σ_T 固定时, 补偿强度 A 同时对阴影区域平均亮度和平均梯度存在有利影响, 效果均成抛

物线形, 曲线极值点横坐标对应为 A 的最佳值. 而 A 固定时, 发现 m_T 和 σ_T 分别单一的影响亮度和梯度. 因此, A 对补偿结果最为关键. 对于每一块阴影区域, A 的取值决定补偿效果.



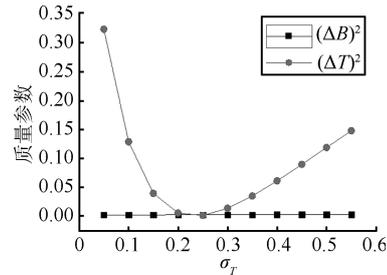
(a) A 的影响

(a) The influence caused by A



(b) m_T 的影响

(b) The influence caused by m_T



(c) σ_T 的影响

(c) The influence caused by σ_T

图 3 不同补偿参数对补偿质量 $(\Delta B)^2$ 和 $(\Delta T)^2$ 的影响对比

Fig. 3 Comparison between compensation quality indexes $(\Delta B)^2$ and $(\Delta T)^2$ influenced by different compensation parameters

$$T = \frac{1}{nS} \sum_{(x,y) \in S} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\}} \approx \frac{1}{nS} \sum_{(x,y) \in S} \sqrt{\frac{1}{2} \{ [I(x+1, y+1) - I(x, y)]^2 + [I(x+1, y) - I(x, y+1)]^2 \}} \quad (11)$$

因此将阴影区域周边邻近非阴影区域的均值 m_{NSD} 和均方差 σ_{NSD} 替代 m_T 、 σ_T , 变换成式 (14) 作为最终的补偿模型, 实现自动补偿只需自动获取 A 的合适取值, 即可使阴影区域补偿达到与邻近非阴影区域相同的光照效果.

$$I'(i, j) = A \cdot \left[m_{NSD} + \frac{I(i, j) - m_{SD}}{\sigma_{SD}} \cdot \sigma_{NSD} \right] \quad (14)$$

其他相关研究采用补偿模型进行补偿时, 多采用人工给定相关参数值并统一应用于所有阴影区域实现补偿, 虽然实现简便, 但不能根据各个阴影区域的自有特性进行应变, 可能出现阴影遮挡严重的区域补偿不足、部分区域又补偿过度的问题. 因此, 本文提出了一套全新的自动阴影补偿方法, 对阴影区域特性多变的情况可做出合理应变.

2.2 自动补偿策略

自动补偿策略分两部分: 1) 自动获取合理的补偿参数; 2) 从整体和局部两方面综合提升补偿结果.

2.2.1 补偿系数的自动获取

针对每个独立阴影区域, 设计了通过特征点匹配成对求解方程组的方法实现各个区域补偿强度系数的自动获取.

假设阴影区域某像素代表某种地物, 如裸地、柏油路, 在其邻近的非阴影区域内也应有被阳光直接照射的此类地物像素, 可将非阴影区域内的此类地物像素所具有的亮度特征值 I' , 作为阴影区域的此像素的原始亮度 I 的近似目标值, 转换式 (14) 得式 (15), A 就可以由这两个特征点的亮度获取.

$$A = \frac{I'}{m_{NSD} + (I - m_{SD}) \frac{\sigma_{NSD}}{\sigma_{SD}}} \quad (15)$$

以此思想为依据, 引入特征点提取与匹配的方法实现自动获取 A , 分三步实现:

1) 选定特征分量, 采用点特征提取算子提取阴影区域及对应非阴影区域的特征点, 本文为保障效率选定 Harris 算子用于提取特征点. 为获取类型多样、数量较多的特征点, 可综合在多种不同特征分量下提取的特征点集.

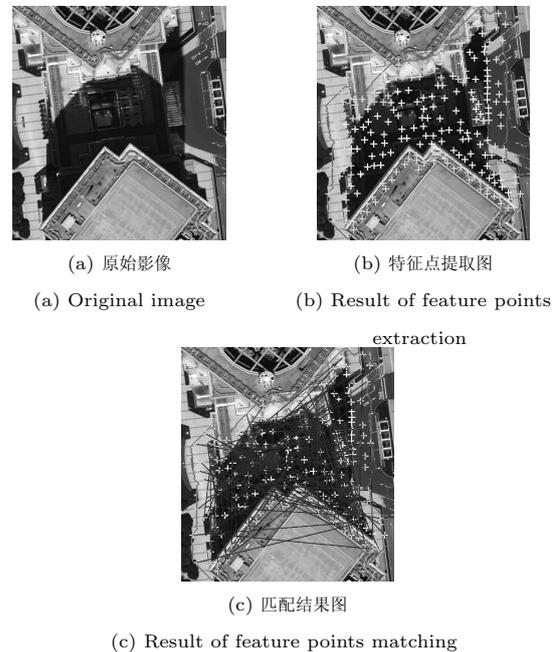
2) 在两类特征点中采用灰度分量进行相关系数匹配, 剔除粗差点, 获取相似程度高的匹配点对集

合. 设阴影区域的特征点 P_{SD} 坐标为 (x, y) , 非阴影区域的特征点 P_{NSD} 的坐标为 (x', y') , 利用以 P_{SD} 和 P_{NSD} 为中心的大小为 $m \times n$ 的匹配相关窗口 W_{SD} 和 W_{NSD} 的信息可按式 (16) (见页底) 计算两点间的相关系数^[20]. 以非阴影区域的特征点为搜索范围, 从中找出与阴影点 P_{SD} 相关系数最大的点, 即可作为其匹配点. 以此类推, 即可获取所有阴影特征点的对应匹配非阴影特征点.

式 (16) 中, $f_{x+i, y+j}$, $f_{x'+i, y'+j}$ 为相关窗口中的点 $(x+i, y+j)$ 和 $(x'+i, y'+j)$ 的影像灰度值, $\bar{f}_{W_{SD}}$ 、 $\bar{f}_{W_{NSD}}$ 分别为点 (x, y) , (x', y') 对应窗口的灰度均值.

3) 以匹配点对中, 阴影区域特征点的亮度值 I 为原始值, 非阴影区域中对应点亮度值 I' 为目标值, 由大量匹配成对的特征点集合联立方程组对 A 进行统计求解, 即可实现自动获取.

以一幢建筑的阴影补偿为例, 图 4 (b) 中阴影边界和非阴影外边界构成环状非阴影区域, 其中包含了非阴影特征点, 阴影边界包含区内为阴影特征点, 图 4 (c) 为直线连接特征点匹配成对的结果.



(a) 原始影像 (a) Original image
(b) 特征点提取图 (b) Result of feature points extraction
(c) 匹配结果图 (c) Result of feature points matching

图 4 阴影与非阴影区域的特征点提取匹配结果图

Fig. 4 Feature points extraction and matching in shadow area and non-shadow area

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{x+i, y+j} - \bar{f}_{W_{SD}})(f_{x'+i, y'+j} - \bar{f}_{W_{NSD}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{x+i, y+j} - \bar{f}_{W_{SD}})^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{x'+i, y'+j} - \bar{f}_{W_{NSD}})^2}} \quad (16)$$

以 $(\Delta B)^2 + (\Delta T)^2$ 为补偿质量总参数, 理论上数值越小, 补偿质量越高. 人工获取一组 A 及其对应质量参数, 通过插值拟合两者之间的关系曲线, 最小值对应的 A 为理想值. 对 6 个独立阴影区域进行实验, 由离散点拟合的曲线如图 5 所示, 将 A 对应的理想值与自动获取的值进行对比, 如表 1 所示, 自动获取方法取得的 A 与理想值十分接近.

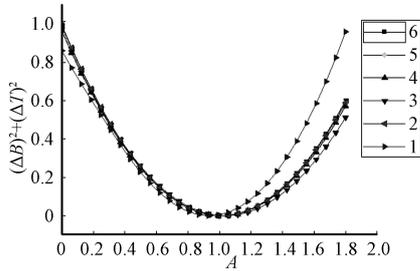


图 5 6 个阴影区域的 A 与补偿质量参数的对应关系

Fig. 5 Respective relationship between A and compensation quality of 6 shadow area

表 1 不同阴影区域的自动获取的补偿参数 A 与其理想值的对比

Table 1 Comparison between A acquired automatically and its ideal value of different shadow area

阴影区域编号	自动值	理想值
1	0.9172	0.9360
2	0.9645	1.0008
3	1.0432	1.0368
4	1.0065	1.0116
5	1.0030	1.0152
6	0.9897	1.0080

2.2.2 补偿结果的综合提升

结合图 6 所示, 对独立阴影区域 SD 进行形态学操作可获取对应的非阴影区域 NSD. 以独立阴影区域为基本单元的阴影补偿, 能基本提升阴影区域的亮度, 恢复地物信息, 但是会存在对比度不强、纹理细节不清晰的问题. 主要原因是独立阴影区域内的所有像素之间仅存在像素对应的原始亮度值不同这一区别, 其他补偿参量全部一致, 以至于对比度不强. 为了充分恢复细节信息, 应当放大阴影区域内的像素之间的区别. 因此, 本文探索出一种综合利用整体和局部信息提升补偿结果的方法, 自适应地增强对比度, 加强纹理信息的恢复. 首先, 利用各独立阴影区域的整体信息进行补偿, 对相应阴影区域的亮度进行整体提升, 恢复宏观的基本信息; 其次, 引入阴影区域内的像素局部窗口的信息进行补偿, 突显像素间的局部细节差异, 提升纹理对比度.

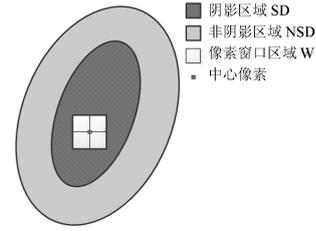


图 6 补偿相关区域示例图

Fig. 6 The example figure of the areas relative to compensation

对于阴影区域像素 (i, j) 的亮度 $I(i, j)$ 的补偿, 整体补偿是以阴影区域 SD 为单元获取的补偿值 $I'_{SD}(i, j)$, 局部补偿是以像素为中心的方形窗口 W 为局部阴影区域, 获取对应的均值 m_W 和均方差 σ_W 代入式 (18) 所得的局部补偿值 $I'_W(i, j)$. 将这两种补偿值各自赋予一定的权重进行综合, 如式 (19), 可得到最终的补偿值. 权重的确定方案本应当根据实际应用中分析影像中的阴影遮挡情况, 取合适的值应用于此影像. 由于阴影遮挡情况与拍摄时的光照情况十分相关, 不同影像的遮挡效果都有所不同. 在精度要求允许的情况下, 为实现自动化处理, 权重的取值可简化处理, 直接取恒定的经验值即可保证整体补偿结果的统一与通用. 本文中取 0.5 进行实验分析.

$$I'_{SD}(i, j) = A \cdot \left[m_{NSD} + \frac{I(i, j) - m_{SD}}{\sigma_{SD}} \cdot \sigma_{NSD} \right] \quad (17)$$

$$I'_W(i, j) = A \cdot \left[m_{NSD} + \frac{I(i, j) - m_W}{\sigma_W} \cdot \sigma_{NSD} \right] \quad (18)$$

$$I'(i, j) = \omega \cdot I'_{SD}(i, j) + (1 - \omega) \cdot I'_W(i, j) \quad (19)$$

对阴影区域的每个像素采用此方法进行补偿, 最终的补偿结果表明, 这种更为缜密的整体与局部综合的补偿方法, 充分吸收了整体和局部两种补偿结果的优势, 保证亮度与纹理信息的同时恢复.

2.3 补偿流程

采用以上策略实现阴影自动补偿时, 以整幅影像中获取的独立阴影区域为处理单元, 进行区域内像素的补偿, 补偿流程如图 7 所示. 在对阴影区域像素进行逐个补偿时, 综合阴影区域的整体补偿值和阴影像素窗口的局部补偿值, 得到处理像素的最终补偿值. 依次遍历完独立阴影区域的所有像素, 再遍历完所有的阴影区域, 实现整幅影像的阴影补偿.

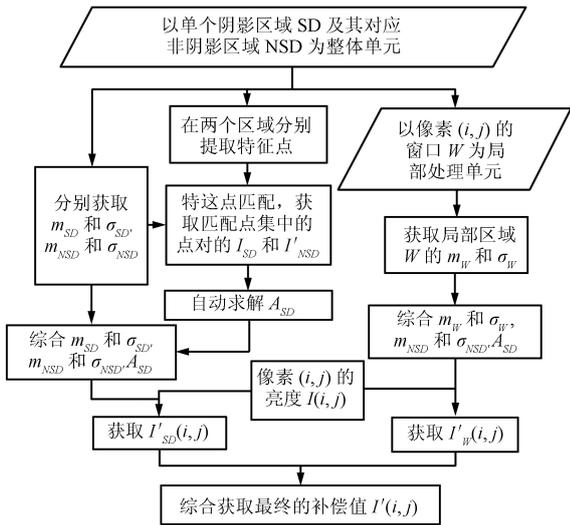


图 7 单个阴影区域中的像素亮度 I 补偿流程图

Fig. 7 Flowchart of improving each pixel in a single shadow area by compensating its value in signatures I

3 实验对比与分析

3.1 检测精度评价

选取三幅高分辨率遥感影像进行实验, 不仅将自动初检测结果和形态学自动后处理的结果进行对比, 并将自动补偿结果与文献 [8] 的改进 Wallis 补偿结果进行对比. 其中 Wallis 法补偿时, 也只对 I 分量进行提升, 对比结果分别如图 8~10 所示. 图 8(b) 中阴影区域基本上可被检测出, 但是存在大量的细碎、分散的像素点, 分散在树木周围、田地上等区域, 图 8(c) 中经过形态学自动后处理的结果, 剔除了面积小、分散的杂碎小区域, 并将像素集中的区域连接成整体, 在后处理结果基础上进行 Wallis 补偿后的阴影区域亮度整体偏低, 而本文方法补偿结果中阴影区域的亮度提升较好, 但部分阴影区域补偿后的匀光效果不如 Wallis 补偿好. 图 9 和图 10 均为城市建筑密集区域的影像处理效果图, 由于高楼林立, 高层建筑的阴影遮挡影响十分严重. 在其初始检测结果中, 由于多数高楼墙体本身具有反射性质导致部分区域阴影光谱特性不明显而易被漏检, 其中图 10 的漏检问题相对更严重, 而阴影的投影区域则基本被检测出, 经过后处理部分漏检区域得到重新补充检入, 改善了初始检测效果. 采用 Wallis 补偿的结果如图 9(d)、图 10(d) 所示, 部分高楼本影区域存在过度补偿的现象, 导致补偿结果偏离真实性, 同时部分高楼投影区域的补偿结果亮度偏暗, 细节清晰度恢复效果一般; 而采用本文方法补偿, 各个独立阴影区域的整体亮度和纹理细节信息均恢复得较好.

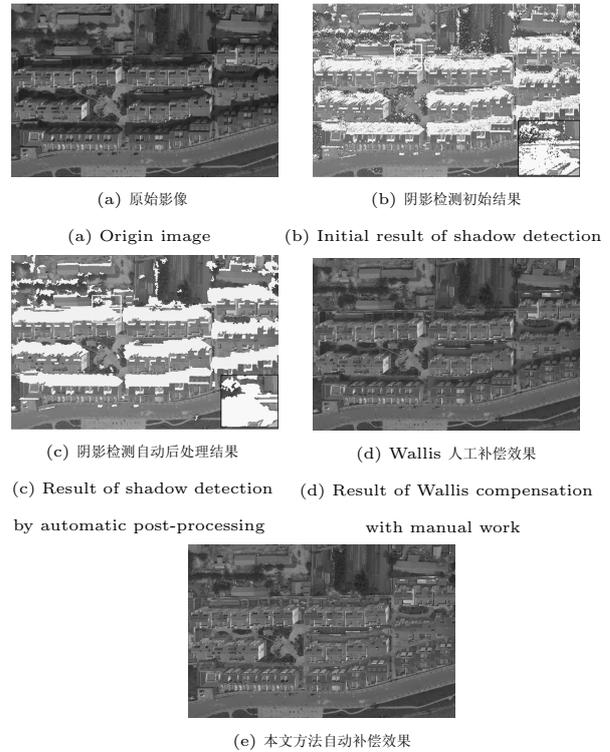


图 8 乡镇影像的阴影检测与补偿结果对比

Fig. 8 Comparison between the results of different shadow detection and compensation in rural image

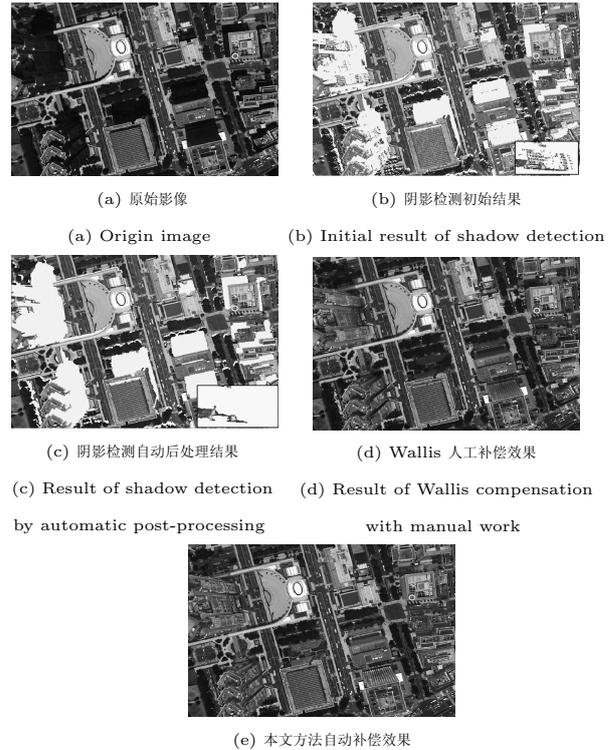
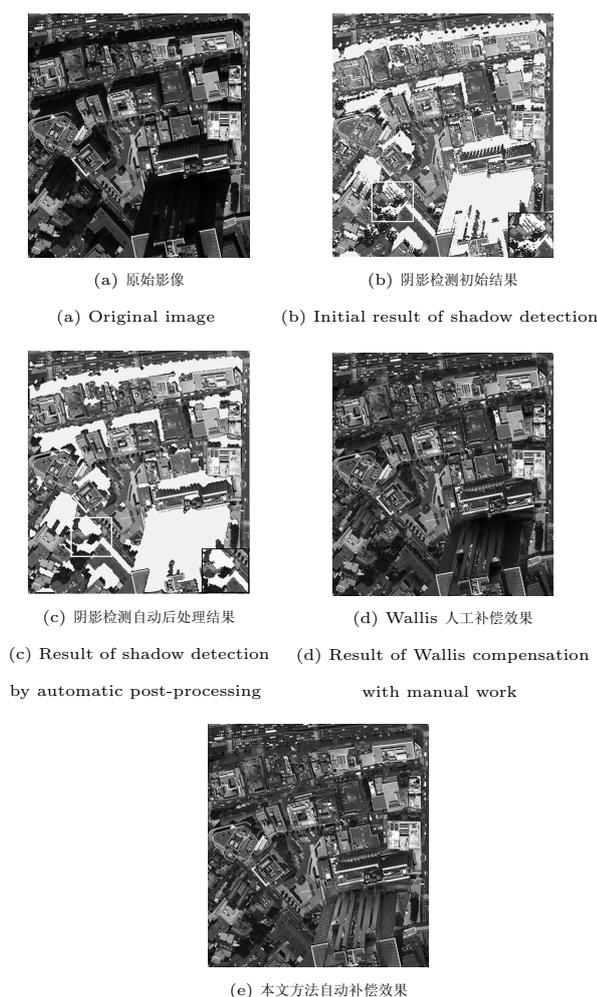


图 9 城市影像 1 的阴影检测与补偿结果对比

Fig. 9 Comparison between the results of different shadow

detection and compensation in Urban image 1



(e) Result of automatic compensation with the proposed method

图 10 城市影像 2 的阴影检测与补偿结果对比

Fig. 10 Comparison between the results of different shadow detection and compensation in Urban image 2

从检测结果小区域放大框中能更清楚地对比处理前后的差异. 阴影的原始检测结果是以像素为单位实现的, 可将基本的阴影区域检测出, 但检测结果比较散碎, 有漏检现象. 散碎的原因有: 1) 影像中只要有一定高度的地物都基本上存在阴影, 广泛分布于影像各个地方; 2) 检测算法存在一定的缺陷. 漏检主要是由于像素阴影特性不明显所致. 统计以上三幅影像的 4 项检测精度指标, 如表 2 所示, 本文提出算法的阴影检测正确率相对较高, 且在提高阴影漏检率方面效果显著. 实际应用中, 去除小阴影区域对阴影检测精度的影响具有双面性, 由于实际情况中大面积阴影是主要处理目标, 有时以损失部分正确率为代价提高补偿效率是可容忍的. 总而言之, 多条

件联合的检测方法与形态学后处理的结合提高了整体检测精度, 增强了检测结果的区域完整性.

表 2 阴影检测结果处理前后的精度评价表

Table 2 Accuracy of results before and after post-processing shadow detection

影像	检测结果	正确检测率 (%)	漏检率 (%)	总体精度 (%)	Kappa 系数
图 8	原始结果	95.33	3.36	96.10	0.9185
	后处理结果	96.70	2.06	97.30	0.9459
图 9	原始结果	98.79	3.19	97.75	0.9550
	后处理结果	98.80	1.18	98.50	0.9700
图 10	原始结果	99.10	8.76	94.74	0.8949
	后处理结果	99.40	4.58	97.30	0.9459

3.2 补偿效果分析

两种补偿方法均能有效提升阴影区域被遮挡的信息. 统计多幅影像的总体亮度均值和平均梯度在阴影区域的原始值、自动补偿值、Wallis 人工补偿值和非阴影区域的目标值, 如表 3 所示. 可以看出, 自动补偿后的亮度均值比原始区域均得到大幅度提高, 但不易达到与目标值完全一致的水平, 补偿后的梯度提高水平基本上能达到甚至超过目标值. 与人工确定三个参数的 Wallis 补偿的最佳效果相比, 本文方法整体较优.

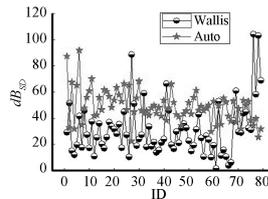
Wallis 法以整幅影像的所有阴影为整体进行统一人工补偿时, 未考虑各个独立阴影区域的自有特性, 补偿后会出现不同阴影区域补偿效果不统一的现象. 本文引入局部窗口补偿的综合补偿法使所有阴影区域整体亮度和细节纹理均得到有效恢复. 效果更真实. 为从定量上数据证明这一点, 以影像中独立阴影区域补偿结果与阴影区域 SD 原始的亮度均值和平均梯度的差值 dB 和 dT 为指标, 衡量相对原始值的提升程度; 与非阴影区域 NSD 的亮度差异 $(\Delta B)^2$ 和梯度差异 $(\Delta T)^2$ 为质量参数, 衡量补偿质量. 若结果能相对于原始值得到统一稳定的提高, 并同时与目标值达到一致, 才说明整幅影像的整体补偿效果好. 选取一幅多阴影的高分影像进行实验, 统计自动获取的各个阴影区域的 A 值如表 4 所示. 将本文自动补偿结果与 Wallis 法补偿结果在各独立阴影区域上的以上指标绘制分布图进行对比, 列出数据分布的均方差, 如图 11 和 12 所示. 图 11 为与阴影区域原始值的差异比较, 可看出两种方法补偿后的各阴影区域的亮度和梯度均得到提升, 但是自动补偿结果总体分布比 Wallis 法更紧密. 图 12 为与非阴影区域目标值的比较图, 本文方法的补偿结果相对于 Wallis 法能更稳定地达到目标值, Wallis 补偿中明显存在部分区域补偿不足、部分又补偿过度, 整体补偿效果不如本文方法稳定.

表 3 阴影补偿结果评价表
Table 3 Assessment of shadow compensation results

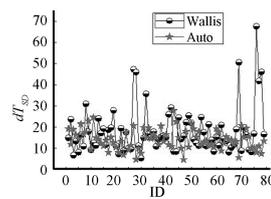
影像	指标	阴影区域	非阴影区域	本文方法补偿后的阴影区域	Wallis 补偿的阴影区域
1	<i>B</i>	70.9770	114.1716	113.9804	98.9617
	<i>T</i>	7.1073	7.6579	11.5795	9.4961
2	<i>B</i>	26.9488	101.7268	92.9905	84.8517
	<i>T</i>	7.3697	22.9355	25.2928	20.8029
3	<i>B</i>	23.6194	93.0321	85.1356	81.1687
	<i>T</i>	3.8788	20.883	19.5277	16.6485
4	<i>B</i>	25.0622	113.7045	82.7414	90.0951
	<i>T</i>	2.6567	15.3042	10.3023	18.4550
5	<i>B</i>	38.5403	130.5892	112.3905	94.1409
	<i>T</i>	6.4091	14.0662	22.9443	18.1720

表 4 一幅影像所有独立阴影区域的 *A* 值
Table 4 *A* value of each shadow area in one image

编号	<i>A</i>										
1	0.9519	14	0.9227	27	1.2200	40	0.9907	53	0.9809	66	0.9107
2	0.9640	15	0.9560	28	0.9514	41	0.9201	54	0.9496	67	0.9032
3	1.0728	16	0.9576	29	0.9564	42	0.9501	55	0.9594	68	0.9383
4	1.0207	17	0.9408	30	0.9902	43	0.9887	56	0.9291	69	1.0005
5	0.9214	18	0.9931	31	1.0153	44	0.9662	57	0.9157	70	0.9457
6	1.0857	19	0.9669	32	0.9854	45	0.9515	58	0.9621	71	0.9364
7	0.7231	20	0.9592	33	0.9269	46	1.008	59	0.9456	72	0.9493
8	0.9106	21	0.9435	34	1.0283	47	0.9487	60	1.0280	73	0.9709
9	1.0975	22	0.9522	35	0.9476	48	1.0372	61	0.9101	74	0.9642
10	0.9380	23	0.9309	36	0.9329	49	0.9333	62	0.9584	75	1.0782
11	0.9937	24	1.0993	37	0.8990	50	0.9562	63	0.9607	76	1.0068
12	0.8870	25	0.9268	38	0.9509	51	0.8948	64	0.9435	77	0.9182
13	0.9938	26	1.0665	39	0.8948	52	0.9216	65	0.9456	78	0.9390



(a) dB_{SD} 的分布, $\sigma_{Auto} = 12.37, \sigma_{Wallis} = 19.91$
(a) Scattergram of $dB_{SD}, \sigma_{Auto} = 12.37,$
 $\sigma_{Wallis} = 19.91$



(b) dT_{SD} 的分布, $\sigma_{Auto} = 4.75, \sigma_{Wallis} = 11.21$
(b) Scattergram of $dT_{SD}, \sigma_{Auto} = 4.75,$
 $\sigma_{Wallis} = 11.21$

图 11 补偿值与阴影区域原始值的差异分布图

Fig. 11 Scattergram of the difference between compensation value and origin value in shadow area

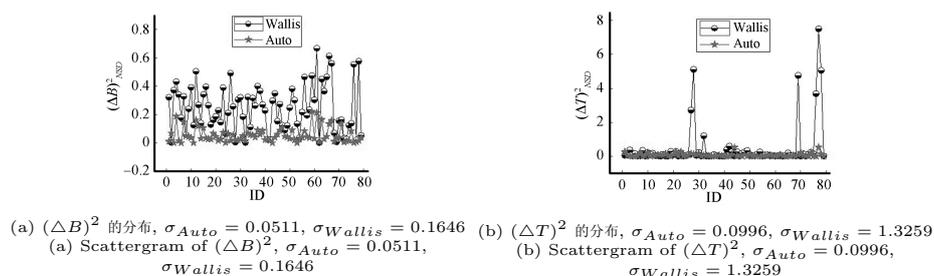


图 12 补偿值与非阴影区域目标值的差异分布图

Fig. 12 Scattergram of the difference between compensation value and the desired value in non-shadow area

通过与人工选取 Wallis 补偿参数值取得的最佳效果进行比较, 对比发现, 采用本文的自动阴影补偿方法获取的补偿效果, 能更稳定地统一恢复所有阴影区域的基本信息, 细节纹理恢复更好。

4 结论

采用本文方法实现高分辨率影像阴影的自动检测与自动补偿, 有以下结论:

1) 将多种光谱特征阈值检测条件联合的检测方法, 算法简单, 相比独立的简单阴影特征检测条件的方法, 可大幅度降低漏检率。形态学处理是十分必要的后处理手段, 可部分弥补算法的不足, 提升检测结果的总体精度。

2) 提出两种创新思路应用于自动补偿的方法中。a) 利用特征点提取与匹配的方法自动获取补偿参数; b) 整体与局部补偿综合提升补偿结果。以阴影区域为整体的补偿, 实现基本恢复, 提升亮度, 以像素窗口为局部的补偿, 可提升细节纹理信息。局部窗口的大小直接主导着细节增强的能力。

3) 其他学者研究补偿模型时重在补偿模型的提升上, 本文以实用、有效为出发点, 探索了阴影的自动补偿方法, 补偿效果和实用性均得到有效提升。

References

- Xie Wen-Han, Zhou Guo-Qing. Occlusion and shadow detection of large-scale true orthophoto in urban area. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(1): 52–58
(谢文寒, 周国清. 城市大比例尺真正射影像阴影与遮挡问题的研究. 测绘学报, 2010, **39**(1): 52–58)
- 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
- 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)
- He D X, Meng Y, Wang C Y, Chen J B. A shadow removal method based on color model and undecimated wavelet transform. In: *Proceedings of the 5th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*. Chongqing, China: IEEE, 2012. 1187–1190
- 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
- Yao J, Zhang Z F. Hierarchical shadow detection for color aerial images. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, **102**(1): 60–69
- Jiang K, Li A, Cui Z, Wang T, Su Y. Adaptive shadow detection using global texture and sampling deduction. *IET Computer Vision*, 2013, **7**(2): 115–122
- 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)
- 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)
- Arévalo V, González J. Shadow detection in color high-resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(7): 1945–1963
- 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)

- 12 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Color constancy-based visibility enhancement of color images in low-light conditions. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(8): 923–931
(禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像能见度增强. 自动化学报, 2011, **37**(8): 923–931)
- 13 Ye Qin, Xu Qiu-Hong, Xie Hui-Hong. Removing shadows from urban aerial images based on color constancy. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(11): 1706–1712
(叶勤, 徐秋红, 谢惠洪. 城市航空影像中基于颜色恒常性的阴影消除. 光电子·激光, 2010, **21**(11): 1706–1712)
- 14 Wan C Y, King B A, Li Z L. An assessment of shadow enhanced urban remote sensing imagery of a complex city-Hong Kong. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012 XXII ISPRS Congress. Melbourne, Australia, 2012. 177–182
- 15 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
- 16 He Kai, Zhao Hong-Ying, Liu Jing-Jing, Wang Cheng-You. Shadow removal of city's remote sensing images based on fractal and texture analysis. *Journal of Tianjin University*, 2008, **41**(7): 800–804
(何凯, 赵红颖, 刘晶晶, 王成优. 基于分形及纹理分析的城市遥感影像阴影去除. 天津大学学报, 2008, **41**(7): 800–804)
- 17 Yang W D, Guo W, Peng K, Liu L B. Research on removing shadow in workpiece image based on homomorphic filtering. *Procedia Engineering*, 2012, **29**: 2360–2364
- 18 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)
- 19 Tang Min. A novel image registration method combining morphological gradient mutual information with multi-resolution optimizer. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 246–250
(汤敏. 结合形态学梯度互信息和多分辨率寻优的图像配准新方法. 自动化学报, 2008, **34**(3): 246–250)
- 20 Zhang Jian-Qing, Pan Li, Wang Shu-Gen. *Photogrammetry*. Wuhan: Wuhan University Press, 2003
(张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学. 武汉: 武汉大学出版社, 2003)



高贤君 武汉大学遥感信息工程学院博士研究生. 2010 年获得武汉大学遥感信息工程学院学士学位. 主要研究方向为高分辨率遥感影像的实时处理.

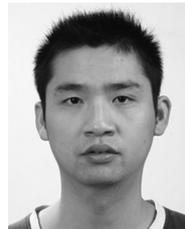
E-mail: junxgao@whu.edu.cn

(GAO Xian-Jun Ph. D. candidate at the School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University. She received her bachelor degree from Wuhan University in 2010. Her main research interest is high resolution images real-time processing.)



万幼川 武汉大学遥感信息工程学院教授. 1999 年获得武汉测绘科技大学信息工程学院博士学位. 主要研究方向为遥感数据处理与应用, 摄影测量与 Lidar 数据处理, 地理信息系统开发与环境信息系统. E-mail: ychwan@whu.edu.cn

(WAN You-Chuan Professor at the School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University. He received his Ph. D. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping. His research interest covers remote sensing data processing and application, photogrammetry and Lidar data processing, geographic information system development and environment information system.)



杨元维 武汉大学遥感信息工程学院博士研究生. 2009 年获得武汉大学遥感信息工程学院硕士学位. 主要研究方向为空间数据更新, 矢量数据匹配. 本文通信作者. E-mail: yyw_08@163.com

(YANG Yuan-Wei Ph. D. candidate at the School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan

University. He received his master degree from Wuhan University in 2009. His research interest covers spatial data updating and vector data matching. Corresponding author of this paper.)



何培培 武汉大学遥感信息工程学院博士研究生. 2012 年获得武汉大学测绘工程专业硕士学位. 主要研究方向为遥感影像处理与数字摄影测量研究.

E-mail: he_pei@whu.edu.cn

(HE Pei-Pei Ph. D. candidate at the School of Remote Sensing and Information Engineering of Wuhan University.

She received her master degree from Wuhan University in 2012. Her research interest covers image processing and digital photogrammetry.)