doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.02.005

无人机数字正射影像阴影区域补偿方法研究

马小博[1,2,3],张敉源[1,2,3],赖正清[1,2,3],李　硕[1,2,3]

(1.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京 210023)
(2.南京师范大学江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点,江苏 南京 210023)
(3.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

[**摘要**] 针对无人机获取的数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)数据中阴影区域地物光谱信息缺失、对比度降低、地物纹理模糊的问题,基于全局低照度图像增强的 AINDANE(adaptive and integrated neighborhood dependent approach for nonlinear enhancement)算法,提出了 HSV 色彩空间下的 Auto-Levels AINDANE 阴影补偿改进算法. 首先,该算法将 RGB 全色影像转换至 HSV 色彩空间中,分离亮度分量 V,对其分别进行自适应亮度增强和自适应对比度处理. 然后,采用自动色阶(Auto-Levels)方法对图像进行色彩调整,从而实现正射影像阴影补偿. 选取多幅典型地类的 DOM 数据进行阴影补偿实验,并与原 AINDANE 算法及其他阴影补偿方法进行效果对比. 结果表明,相较于其他 4 种阴影补偿方法及原算法,该算法显著提高影像目视效果,有效恢复阴影区域的地物纹理信息,并保持了影像整体色彩的均衡和保真性.

[**关键词**] 遥感图像处理,阴影补偿,数字正射影像,HSV 色彩空间,AINDANE 算法
[**中图分类号**]TP751　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)02-0038-08

Research on Shadow Region Compensation Method of UAV Digital Orthophoto

Ma Xiaobo[1,2,3],Zhang Miyuan[1,2,3],Lai Zhengqing[1,2,3],Li Shuo[1,2,3]

(1.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(2.State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(3.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application,
Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

Abstract:Aiming at the problems of lack of spectral information of the features,decrease in contrast and blurred texture of features in the shaded region in the orthophoto data acquired by UAV,we propose the Auto-Levels AINDANE shadow compensation algorithm in HSV color space. Based on the AINDANE(adaptive and integrated neighborhood dependent approach for nonlinear enhancement)algorithm for global low-light image enhancement,the algorithm converts the RGB orthophoto image into HSV color space,separates the luminance component V for enhancement,and adopts the auto-contrast for the color level adjustment to achieve the shadow compensation of orthoimage. Several DOM data of typical land classes is selected for shadow compensation experiments. And the algorithm is compared with the original AINDANE algorithm and four other shadow compensation methods. The results show that,compared with the original algorithm and the other four shadow compensation methods,the algorithm significantly improves the visual effect of the image,effectively recovers the feature information in the shadow region,and maintains the overall color balance and fidelity of the image.

Key words:processing of remote sensing image data,shadow compensation,digital orthophoto map,HSV color space,AINDANE algorithm

无人机高分辨率数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)以其清晰的影像细节、直观的地物关系以及实时快速的获取方式等优势,已逐渐成为应急测绘、智慧城市建设、自然灾害监测、环境保护等多领域的重要遥感数据源[1]. 然而,因太阳位置、地形起伏等因素影响,无人机正射影像数据中含有大量阴影. 阴

收稿日期:2025-01-27.
通讯作者:李硕,博士,教授,研究方向:遥感、GIS 及分布式流域模拟. E-mail:lishuo@njnu.edu.cn

影区域的存在不仅会降低影像数据的有效利用率,同时也增加了后续图像处理任务的难度[2]. 如何有效补偿 DOM 中阴影区域的光谱、地物信息,以提高影像整体质量,已成为无人机影像处理领域的重要研究课题[3-4].

目前无人机影像阴影补偿方法可分为模型法和图像增强法两类. 模型法包括线性相关修正、Gamma 校正、色彩恒常性原理等方法. 模型法通过建立阴影补偿模型,利用非阴影区域信息补偿阴影区域信息. 这类方法在进行阴影补偿时,虽然能有效提高阴影区域的整体亮度与对比度,但仍缺乏较好的自适应能力,导致阴影补偿的效果并不理想[5]. 图像增强算法则包括直方图匹配、Retinex 方法、线性拉伸、Wallis 滤波等. 该方法通过对图像采用不同的图像增强算法,提高图像中阴影区域的亮度和对比度,从而达到阴影补偿的效果. 该方法的处理效果与图像增强算法能力相关,常依赖经验确定参数,存在补偿过度或不足现象,且自适应补偿调整能力较弱.

针对这些问题,学者们对不同的模型法和图像增强算法进行了改进. 杨元维等[5]通过引入补偿强度系数及拉伸系数,设计了改进的 Wallis 阴影补偿模型,对高分遥感影像中普通地物阴影及云阴影有较好的补偿效果. 王潇潇等[6]提出一种将多尺度 Retinex 算法与泰勒拉伸相结合的算法,并通过高斯滤波无限脉冲响应提升了原有算法的处理速度,该方法对近景图像阴影补偿效果较好,但对地物信息复杂的高分影像的阴影补偿效果尚不明确. 杨金辉等[7]提出一种利用不同层级的影像特征信息构建自适应 Gamma 变换的云阴影补偿算法,可有效实现不同形状、厚度云层下的云阴影自适应补偿. Liu 等[8]结合局部优化和颜色转移的优点,提出了一种基于纹理保持的局部颜色转移的无人机图像阴影补偿方法,能够很好地补偿城市、农田场景中普通地物阴影. 尽管这些改进取得了一定的效果,但大多数阴影补偿方法是针对特定类型阴影的影响而开发的,在某种情况下表现良好的特定方法,用在另一种情况下可能表现不佳[9],同一方法难以适用于多种阴影类型. 近年来,深度学习在图像处理中表现出明显的优势,学者们也将其引入阴影补偿研究[10]. 然而,深度学习补偿算法需要大量训练样本,迁移性较差,在阴影去除过程中,还会对与阴影有相似光谱特性的深色地物(如沥青路面、水域)发生误判,改变地物原本的色彩及纹理信息[11]. 这凸显出传统阴影补偿方法改进路径仍具有重要的研究价值.

因此,现有阴影补偿方法在处理多种阴影类型时普遍存在适用性较差、计算量较大和处理不灵活等问题. 对于阴影类型多样、地物类型繁多、空间细节复杂的正射影像,还需寻求一种能有效补偿阴影区域的光谱和地物信息,同时保持影像全局色彩协调,且具备普适性和自适应补偿能力的方法. 本文立足于数码照片处理的低照度图像增强的 AINDANE(adaptive and integrated neighborhood dependent approach for nonlinear enhancement)算法[12-13],将该算法应用于无人机高分正射影像的阴影补偿中,并针对无人机影像阴影补偿过程中存在的问题,对算法进行优化改进,提出了基于 HSV 色彩空间的自动色阶的 AINDANE(Auto-Levels AINDANE)阴影补偿算法,并通过选取多幅具有典型地物类型的 DOM 数据进行阴影补偿实验,与其他阴影补偿方法进行对比分析,以评价改进算法的适用性和有效性.

1 AINDANE 算法原理

AINDANE 算法是一种基于非线性增强的自适应和集成邻域的图像增强方法. 该算法用于 RGB 色彩空间下提高数字图像中暗区域的可见性. 算法由两个独立模块组成:自适应亮度增强和自适应对比度增强[14].

1.1 自适应亮度增强

自适应亮度增强本质上是基于非线性传递函数的亮度变换,以提升影像的像素值. 首先,将 RGB 色彩空间中的彩色图像转换为亮度图像 $I(x,y)$ 并进行归一化处理. 通过定义非线性传递函数对归一化亮度进行变换[14],

$$I'_n=\frac{I_n^{(0.75z+0.25)}+(1-I_n)0.4(1-z)+I_n^{(2-z)}}{2}. \tag{1}$$

式中,参数 z 为影像相关参数,受图像统计数据影响对不同照度图像有不同处理,

$$z=\begin{cases}0, & L\leqslant 50,\\ \dfrac{L-50}{100}, & 50<L\leqslant 150,\\ 1, & L>150.\end{cases}\tag{2}$$

式中,L 表示亮度图像的累计直方图达到 0.1 时的像素值. 若亮度图像中 90%的像素值都大于 150,则 $z=1$. 若 10%或者更多的像素值都小于 50,则 $z=0$. 其他情况 z 则根据 L 的值进行线性插值. 显然,若影像本身越暗,亮度增强的幅度就越大. 反之,影像本身越亮,增强幅度就越小,甚至趋于 0. 这就是算法中亮度信息增强的自适应.

1.2　自适应对比度增强

该算法主要采用基于邻域的对比度增强技术,对自适应亮度增强后的亮度图像进行不同尺度的高斯核函数卷积运算,以实现图像对比度增强的效果. 首先,以高斯函数 $G(x,y)$ 作为卷积核,其形式为

$$G(x,y)=K\exp\left[\frac{-(x^2+y^2)}{c^2}\right].\tag{3}$$

式中,c 为尺度或高斯空间环绕常数. 其中 K 函数满足:

$$\iint K\exp\left[\frac{-(x^2+y^2)}{c^2}\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y=1.\tag{4}$$

对原始强度图像 $I(x,y)$ 进行二维离散卷积运算,

$$I_{\mathrm{conv}}(x,y)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}I(m,n)G(m+x,n+y).\tag{5}$$

式中,卷积结果 $I_{\mathrm{conv}}(x,y)$ 包含相邻像素的亮度信息. 将其与中心像素进行对比,进行中心环绕对比度增强处理[14],

$$S(x,y)=255I_n'(x,y)^{E(x,y)}.\tag{6}$$

式中,$S(x,y)$ 为对比度增强结果. 指数 $E(x,y)$ 为

$$E(x,y)=r(x,y)^p=\left[\frac{I_{\mathrm{conv}}(x,y)}{I(x,y)}\right]^p.\tag{7}$$

式中,$r(x,y)$ 为原始亮度数据的卷积与原始影像的比值. p 是用于调整对比度过程的图像相关参数,

$$p=\begin{cases}3, & \sigma\leqslant 3,\\ \dfrac{27-2\sigma}{7}, & 3<\sigma\leqslant 10,\\ 1, & \sigma>10.\end{cases}\tag{8}$$

式中,σ 是原始亮度图像的全局均方差. 为了得到更好的对比度增强效果,算法采用多尺度卷积方法,以获取影像不同尺度上的邻域信息. 最终输出结果为多个尺度对比度增强结果的线性组合,

$$S(x,y)=\sum_i w_iS_i(x,y).\tag{9}$$

式中,w_i 为不同尺度输出的权重因子,本算法取 $w_i=1/n$,取每个尺度的均值. n 为尺度的数量.

基于输入图像的色彩信息,对增强后彩色图像的线性色彩恢复[14],

$$S_j(x,y)=S(x,y)\frac{I_j(x,y)}{I(x,y)}\lambda_j.\tag{10}$$

式中,$j=R$、G、B 表示 RGB 不同的光谱波段,S_j 是增强彩色图像的 RGB 值,引入常数 λ 来调整 3 个波段的色调,小于但接近于 1.

2　基于 HSV 色彩空间的 Auto-Levels AINDANE 算法

2.1　色彩空间转换

在 RGB 色彩空间中,R、G、B 3 个分量并不相互独立. 当改变影像亮度值时,3 个分量都会随之改变,进而对影像阴影处理、颜色校正、色彩平衡等造成影响. 因此,基于 RGB 色彩空间的 AINDANE 算法在处理正射影像时容易导致非阴影区域信息改变、色彩失衡等问题. HSV 色彩空间以色相(H)、饱和度(S)和

亮度(V)3 个属性表示颜色. 亮度分量可以独立表示颜色的明暗程度,不受色相和饱和度的影响. 而亮度是影响阴影区域的主要因素[15-16]. 因此在 HSV 色彩空间中处理正射影像阴影时,可以分离并独立增强亮度分量以恢复阴影区域的亮度,而不影响非阴影区域的颜色、饱和度信息,保证影像的整体色彩和明暗的协调性. RGB 色彩模型到 HSV 彩色模型的具体转换算法见文献[17].

2.2 Auto-Levels AINDANE 算法

在 HSV 色彩空间下,单独提取亮度分量 V 进行自适应亮度增强和自适应对比度处理,而色相 H 和饱和度 S 不受亮度变化影响,再将经过亮度 V 通道增强处理后的影像进行逆变换,转回 RGB 色彩空间[17],达到影像阴影补偿的目的.

值得注意的是,原算法增强处理后的影像仍然存在局部过曝和色偏问题,如图 1 所示. 增强后影像的色调呈现出与原始影像明显的区别,目视效果不自然,影响后续图像的解译处理. 针对这一问题,进一步运用自动色阶算法对影像进行处理. 自动色阶算法是基于图像直方图的处理方法. 该算法通过找到直方图的最低点(最暗的像素)和最高点(最亮的像素),并将它们分别映射到纯黑和纯白,实现图像色阶的自动调整. 自动色阶用于处理图像的色彩平衡问题,以及图像增强和修复,其在红、绿和蓝 3 个颜色通道中单独应用此过程. 通过调整图像的颜色分布,使其更加均匀,可以消除由于照明条件不佳等问题导致的色偏. 此外,自动色阶算法可用于自动修复经阴影补偿处理后的过曝或欠曝影像,改善影像的对比度和色彩平衡.



(a) 原始影像　　(b) AINDANE算法增强后影像

图 1　AINDANE 算法增强后影像的局部过曝和色偏问题

Fig. 1　Local overexposure and color cast issues of the enhanced image using the AINDANE algorithm

本文采取自动色阶的思路,首先对增强后的影像的 R、G、B 三通道直方图进行统计,对于像素值高于高阈值 max 的像素点设为 255,将像素值低于低阈值 min 的像素点设为 0,像素值在 max 和 min 之间则进行线性映射[18]. 映射关系为

$$\begin{cases} f(u)=0, & u\leqslant \min, \\ f(u)=255, & u\geqslant \max, \\ f(u)=((u-\min)/(\max-\min))\times 255, & \min<u<\max. \end{cases} \tag{11}$$

其中,u 是原始影像像素值,$f(u)$ 是调整后的像素值. 阈值的选取依赖于人工实验. 经验的阈值范围为 0.1%~2%,可根据图像的整体光照条件调整. 本文实验确定 1%的首尾阈值.

按照式(11)将影像像素值进行线性映射至[0,255]区间,R、G、B 三通道均进行此操作,从而扩展像素值占比较大的动态范围,改善增强后影像的色彩失真度,进一步提升影像的对比度,得到色彩更加自然的影像.

3　结果对比分析

为科学、客观地评价 Auto-Levels AINDANE 算法在阴影补偿方面的适用性和处理效果,本节选取 3 幅典型地类的正射影像数据进行阴影补偿实验,并与 AINDANE 算法及当前常用 3 种阴影处理方法 BMNet 算法[19]、MSRCR 算法[20]、同态滤波算法[21]进行对比实验分析. 实验数据分别为工业区、山地和居民区 3 种含有典型阴影特征的无人机正射影像,来源于网络开源数据. 原始影像均为 24 位 RGB 图像,数据为 TIFF 格式,实验影像参数见表 1.

表 1　实验影像参数

Table 1　Parameters of the experimental image

影像类型	航摄比例尺	相对航高/m	影像地面分辨率/(m/pixel)	分辨率
工业区	1∶1 500	150	0.03	7 310×9 398
山地	1∶18 000	650	2.7	316×318
居民区	1∶500	95	0.07	3 775×4 145

本文引入平均梯度[22]、标准差[23]和信息熵[24]来评价影像阴影补偿的效果. 平均梯度、标准差、信息熵分别表征影像的清晰度、整体对比度和信息丰富程度. 实验评价指标结果见表 2.

表 2　各影像阴影处理结果评价指标

Table 2　Objective evaluation metrics for processing results of different shadow compensation methods

处理算法	工业区			山地			居民区		
	平均梯度	标准差	信息熵	平均梯度	标准差	信息熵	平均梯度	标准差	信息熵
原始影像	10.43	58.37	7.60	2.90	28.78	6.45	3.39	47.72	7.26
BMNet 算法	4.22	48.48	7.55	3.18	28.18	6.80	4.18	45.32	7.34
MSRCR 算法	16.14	68.56	7.95	7.76	53.92	7.61	3.49	56.31	7.24
同态滤波算法	10.69	53.36	7.56	2.86	19.13	6.14	3.72	34.95	6.88
AINDANE 算法	14.63	64.70	7.82	5.25	32.51	7.01	6.29	43.17	7.46
改进 AINDANE 算法	15.56	68.92	7.86	9.21	48.52	7.99	6.60	50.88	7.64

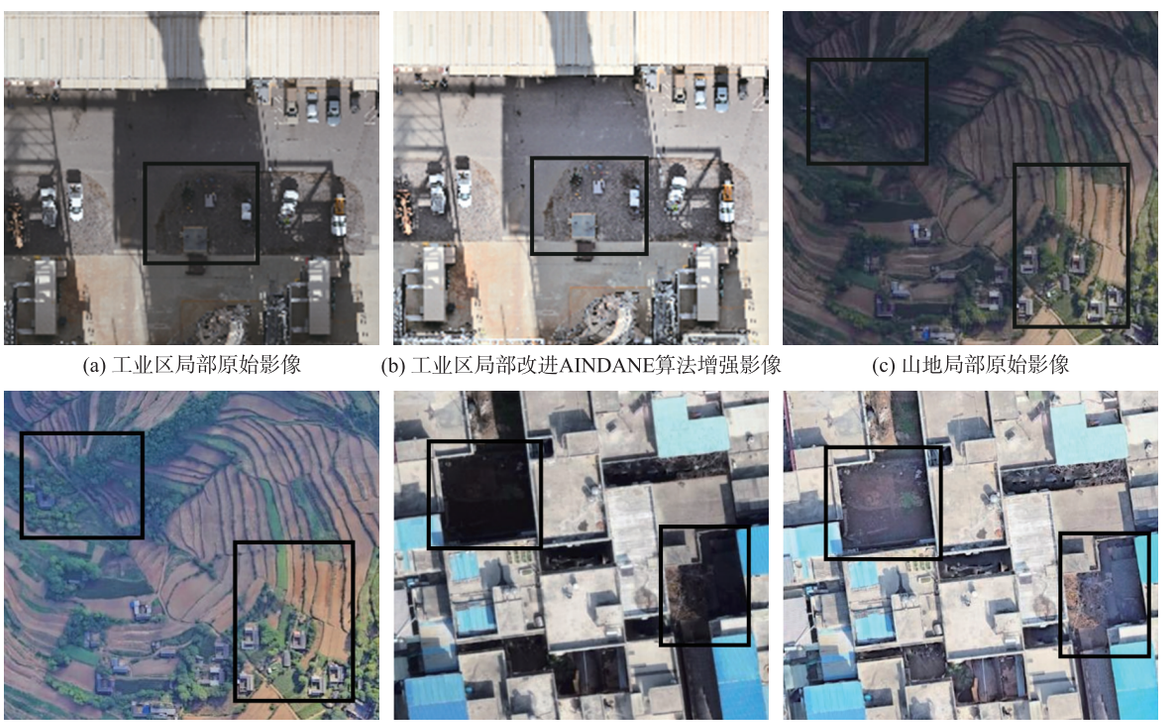
相比于原算法,改进算法在 3 个客观质量评价指标上相较于原算法均有显著提升,尤其是在处理含有大范围阴影的影像时,其平均梯度、标准差和信息熵均显著增长(如图 2 所示). 原算法增强的影像,如图 2(b-5)、图 2(c-5),影像的整体视觉效果呈现出明显泛白. 这是由于原算法是通过线性融合 R、G、B 三通道后进



图 2　不同阴影补偿方法处理结果对比

Fig. 2　Comparison of shadow compensation results under various algorithms

行增强,导致影像增强后白光部分偏高,使影像亮度过强、色彩失真,整体对比度下降. 尤其是图 2(c-5),非阴影区域还出现不自然的色彩偏绿. 而改进算法增强的影像(如图 3 所示),阴影区域对比度和清晰度得到了显著提升,地物纹理及色彩恢复效果显著,原本被阴影遮盖的模糊区域能够清楚地观察到更多的地物细节信息. 其次,在色彩保真度方面,虽然改进算法处理的影像仍有轻微的泛白,如图 3(d)、3(f),但其仍能较好保持影像的自然色彩,没有出现明显的色彩失真现象. 这是由于改进算法在 HSV 色彩空间下,通过提取亮度分量 V 进行单独增强,减少了对影像色彩及饱和度的影响,并融合改进的自动色阶算法,改善了影像对比度和色彩平衡,一定程度上解决了原算法阴影补偿的缺陷.



(a) 工业区局部原始影像　(b) 工业区局部改进AINDANE算法增强影像　(c) 山地局部原始影像

(d) 山地局部改进AINDANE算法增强影像　(e) 居民区局部原始影像　(f) 居民区局部改进AINDANE算法增强影像

图 3　改进 AINDANE 算法阴影补偿局部放大效果

Fig. 3　Localized zoom effects of shadow compensation using improved AINDANE algorithm

相比于其他 3 种算法,改进算法在各项指标值中表现出较好的性能. 改进算法通过自适应的亮度增强和精细的局部对比度调整,增强了阴影区域的细节和边缘清晰度. 由表 2 可知,改进算法的平均梯度及信息熵指标整体上优于其他算法. 但在山地、居民区影像的处理中,改进算法的标准差略低于 MSRCR 算法. 这是由于 Auto-Levels AINDANE 算法中融合自动色阶,对影像进行了动态范围拓展,使得对比度的提升不如 MSRCR 算法. 但通过动态范围拓展可以在不损失影像细节的情况下更好地呈现出丰富的亮度和色彩. 如图 3 所示,Auto-Levels AINDANE 算法对 3 幅包含多种典型地物、阴影类型的影像都能够有效地恢复阴影区域的地物信息(如图 3(b)黑色标记处),同时能较好地保持非阴影区域及整体影像的色彩保真度,并且阴影区域边缘处过渡自然. 虽然对于以云阴影为主的山地影像(图 3(d)),整体图像呈现出轻微的色偏,但阴影区域低光照部分(图 3(d)左上黑色标记处)的地物信息恢复很好,且非阴影区域(图 3(d)右下黑色标记处)也没有出现明显的过曝现象,相对其它 3 种算法和原算法,改进算法效果最好. 如图 4 所示,虽然 MSRCR 算法在评价指标上也有较好的表现,但增强结果图像表现出非阴影区亮度过度增强、色彩失真等现象. 原因在于 MSRCR 算法在增强中会引入噪声,尤其是在低光照区域,会导致影像过度增强,从而大幅度提升影像对比度. BMNet 方法在经过学习后,对阴影区域进行了针对性的增强,恢复了阴影区域的亮度以及地物纹理,阴影增强效果相对最佳. 然而,影像经该算法处理后,阴影边界明显,增强后阴影边界异化为斑块,掩盖了影像原本的地物信息,降低了影像视觉效果,如图 5 黑色标记处. 同态滤波算法最大程度的保存了影像原始信息,对阴影有一定的增强作用,但对深阴影区域的增强效果不明显,阴影补偿效果相对较差,如图 6 黑色标记处.



(a) 山地局部原始影像　　(b) 山地局部MSRCR算法增强影像

图 4　MSRCR 算法阴影补偿局部效果图

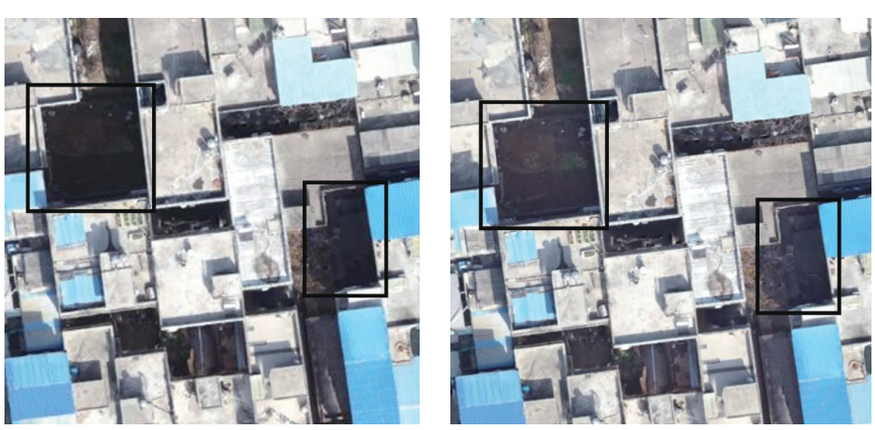
Fig. 4　Localized zoom effects of shadow compensation using MSRCR algorithm



(a) 工厂区局部原始影像　　(b) 工厂区局部BMNet算法增强影像

图 5　BMNet 算法阴影补偿局部效果图

Fig. 5　Localized zoom effects of shadow compensation using BMNet algorithm



(a) 居民区局部原始影像　　(b) 居民区局部同态滤波算法增强影像

图 6　同态滤波算法阴影补偿局部效果图

Fig. 6　Localized zoom effects of shadow compensation using homomorphic filtering algorithm

综上所述,基于 HSV 色彩空间的 Auto-Levels AINDANE 算法,有效增强了影像阴影区域的地物特征,提升了阴影区域的地物清晰度和对比度. 改进算法利用自动色阶技术充分解决了原算法及以上多种算法所出现的过曝和色彩失真问题,兼顾了影像整体及局部细节,更有效地平衡了影像整体亮度、对比度和色彩,恢复了阴影区域内被遮盖的各类地物信息,且保持非阴影区域及整体影像的色彩保真度. 此外,对比其他算法,该算法具有更好的普适性,能有效补偿包含多种地物类型、阴影类型的阴影区域,提高无人机正

射影像的可用性,使影像达到较高的质量标准,且算法计算高效,能够快速有效地解决正射影像的阴影补偿问题.

4 结论

针对 AINDANE 算法在无人机影像阴影补偿过程中出现的色彩失真及非阴影区过曝等问题,提出了基于 HSV 色彩空间下的 Auto-Levels AINDANE 算法. 从原理上进行改进,采用了从 RGB 到 HSV 色彩空间的转换,分离并独立增强亮度分量以恢复阴影区域的亮度,而不影响非阴影区域的颜色、饱和度信息,保证影像的整体色彩、明暗的协调性. 从技术上引入改进的自动色阶算法,均衡亮度信息,对影像光谱进行了动态拓展和均衡,修复经阴影补偿处理后的过曝或欠曝,改善影像的对比度和色彩平衡,进一步解决算法阴影补偿的色偏、伪色的问题. 将改进算法与其他经典阴影补偿算法进行实验对比分析. 改进算法在客观评价指标及主观视觉表现两方面均有较好效果,证明了其有效性和优越性.

[参考文献](References)

[1] Xi W F,Zuo X Q,Sangaiah K A. Enhancement of unmanned aerial vehicle image with shadow removal based on optimized retinex algorithm[J]. Wireless Communications and Mobile Computing,2022(1):3204407.

[2] Han H Y,Han C S,Huang L,et al. Irradiance restoration based shadow compensation approach for high resolution multispectral satellite remote sensing images[J]. Sensors,2020,20(21):6053.

[3] Ankush A,Kumar S,Singh D. An adaptive technique to detect and remove shadow from drone data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2021,49:491-498.

[4] Song H H,Huang B,Zhang K H. 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.

[5] 杨元维,王明威,高贤君,等. 改进 Wallis 模型的高分辨率遥感影像阴影自动补偿方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(3):318-325.

[6] 王潇潇,孙永荣,张翼,等. 基于 Retinex 的图像阴影恢复技术的研究与实现[J]. 计算机应用研究,2013,30(12):3833-3835.

[7] 杨金辉,高贤君,杨元维,等. 自适应 Gamma 变换的遥感影像云阴影补偿方法[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(10):430-438.

[8] Liu X X,Yang F B,Wei H,et al. Shadow compensation from UAV images based on texture-preserving local color transfer[J]. Remote Sensing. 2022,14(19):4969.

[9] Mostafa Y. A review on various shadow detection and compensation techniques in remote sensing images[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2017,43(6),545-562.

[10] 刘晓霞. 无人机遥感影像的阴影精准检测与补偿方法研究[D]. 太原:中北大学,2023.

[11] Inoue N,Yamasaki T. Learning from synthetic shadows for shadow detection and removal[J]. IEEE Transactions on Circuits Systems for Video Technology,2020,31(11):4187-4197.

[12] Tang J,Luo Q,Guo F,et al. SDRNet:An end-to-end shadow detection and removal network[J]. Signal Processing Image Communication,2020,84:115832.

[13] Tao L,Asari V. Adaptive and integrated neighborhood-dependent approach for nonlinear enhancement of color images[J]. Journal of Electronic Imaging,2005,14(4):043006.

[14] Tao L,Vijayan A. An integrated neighborhood dependent approach for nonlinear enhancement of color images[C]// International Conference on Information Technology:Coding & Computing. Las,Vegas,NV,USA,2004.

[15] Choi D H,Jang I H,Mi H K,et al. Color image enhancement using single-scale retinex based on an improved image formation model[C]//2008 16th European Signal Processing Conference. Lausanne,Switzerland,2008.

[16] Cucchraia R,Grana C,Piccardi M,et al. Improving shadow suppression in moving object detection with HSV color information[J]. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Oakland,CA,USA,2001.

[17] 章毓晋. 图像工程(上册):图像处理[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2012:276-297.

[18] 冯红波,李萍,李波. 基于自动色阶和多尺度 Retinex 彩色图像增强算法[J]. 无线电工程,2019,49(10):910-914.

(下转第 56 页)

[31] Liu C,Wang N,Wang L,et al. Rapid quantitative analysis of soybean protein isolates secondary structure by two-dimensional correlation infrared spectroscopy through pH perturbation[J]. Food Chemistry,2024,448:139074.
[32] 高莉莉. 抗 IL-1β 卵黄免疫球蛋白(IgY)的抗炎活性及作用机制研究[D]. 大连:大连海洋大学,2024.
[33] 向明霞,王丽娜,李子超,等. DEAE-Sepharose CL-6B 离子交换色谱分离 α_s 酪蛋白的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2013,50(2):371-376.
[34] 王丽英,马美湖,蔡朝霞,等. 离子交换色谱法分离纯化鸡卵黄免疫球蛋白[J]. 色谱,2012,30(1):80-85.
[35] 马宇菲. 重组链球菌蛋白 G 修饰的金属有机骨架选择性分离纯化健康人血清中免疫球蛋白的研究[D]. 沈阳:沈阳医学院,2024.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 45 页)

[19] Zhu Y R,Huang J,Fu X Y,et al. Bijective mapping network for shadow removal[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans,LA,USA,2022.
[20] Rahman Z U,Jobson D J,Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Human Vision Electronic Imaging VII,2002,4662:390-401.
[21] 田小平,程新,吴成茂,等. 基于同态滤波的彩色图像增强[J]. 西安邮电大学学报,2015,20(6):5.
[22] 王海晖,彭嘉雄,吴巍,等. 多源遥感图像融合效果评价方法研究[J]. 计算机工程与应用,2003(25):33-37.
[23] 吴翔. 数字正射影像图质量评价研究[J]. 科技创新与生产力,2015(6):48-50.
[24] 赵有松,尹粟,张莉,等. 航空遥感影像质量评价方法探讨[J]. 测绘科学,2016,41(1):158-161.

[责任编辑:陈　庆]