光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022080102

航空滤光片阵列多光谱图像条带灰度校正算法

李铜哨[1]，孙文邦[1*]，赵汉东[2]，王志磊[3]，白新伟[1]

（1. 空军航空大学 航空作战勤务学院，长春 130022；2. 陆军勤务学院，重庆 400050；
3. 93525 部队，西藏 日喀则 857000）

摘　要： 针对航空滤光片阵列多光谱图像中存在的条带灰度差异问题，提出条带灰度校正算法。首先，对多光谱图像构建条带图像模板，基于 SIFT（Scale-Invariant Feature Transform）算法提取图像特征点并计算图像间坐标转换矩阵，用于确定条带图像重叠区域；其次，依次计算各条带图像重叠区域像素灰度均值，并以中间图像各条带灰度为基准，依次拟合相邻图像间灰度校正系数；最后，利用投影后的图像模板依次提取序列单波段条带并进行拼接，得到灰度一致的单波段图像。实验结果表明：该方法可以有效解决航空滤光片阵列多光谱图像条带灰度差异，且能够最大限度保持地物光谱信息特征。

关键词： 滤光片阵列；多光谱；灰度校正；拟合；单波段

中图分类号： TP751；TP391　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1173－06

Grayscale Correction Algorithm for Multispectral Image Stripes of Aerial Filter Array

LI Tongshao[1], SUN Wenbang[1], ZHAO Handong[2], WANG Zhilei[3], BAI Xinwei[1]

(1. School of Aviation Operations and Services, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, CHN;
2. Army Logistics Academy, Chongqing 400050, CHN; 3. N0. 93525 Troops of PLA, Rikaze 857000, CHN)

Abstract: Aiming at the problem of grayscale difference in multispectral images of aerial filter array, a new method of the strip grayscale correction algorithm is proposed in this paper. Firstly, the strip image template was constructed for multispectral image, and the scale invariant feature transform algorithm was used to extract image feature points and calculate inter-image coordinate transformation matrix, which was used to determine the overlap region of strip image. Secondly, the mean value of the greyscale of pixels in the overlapping area of each strip image was calculated, and the greyscale correction coefficients between adjacent images were fitted with the greyscale of each strip of greyscale intermediate image as a reference. Finally, the projected image templates were used to extract sequential single-band strip in turn and stitch them together to obtain a single-band image with same greyscale. Experimental results show that this method can effectively solve the difference in the greyscale of multispectral image strips of aerial filter array, and can maintain the maximum spectral information characteristicsof the ground feature.

Key words: filter array; multispectral; grayscale correction; fitting; single band

0　引言

近年来，滤光片阵列多光谱相机因平台要求较低被广泛应用于多光谱遥感[1]。相机成像数据为多波段图像，需要通过裁剪拼接处理得到各单波段图像[2]。虽然相机成像原理简单，但不同时刻成像曝光量并不相同，导致单波段拼接图像中存在一定宽度的明暗条纹，影响了多光谱图像后续处理与应用。因此，必须对条带图像灰度进行校正。

收稿日期：2022－08－01.
基金项目： 全军军事类研究生课题项目(DSSQ910252018010).
* **通信作者：**孙文邦　**E-mail:** chwenbang@163.com

目前，灰度校正算法主要用于提高图像拼接的质量，按照校正区域可分为图像模型方法和灰度线性变换方法。其中，图像模型方法主要用于消除局部区域灰度分布不均问题，较为常用的算法有 Mask 算法[3]和 Retinex 算法[4]。灰度线性变换方法则主要用于消除各相邻时刻图像灰度差异，即通过重叠区域的像素灰度计算校正系数，实现图像灰度校正，例如：矩匹配算法[5]、Wallis 算法[6]等。此外，Tian 等[7]针对图像灰度差异提出一种改进 Wallis 滤波算法。该算法在经典 Wallis 滤波基础上，提高逐行/列计算图像行/列重叠区域像素灰度均值比，将图像灰度调整一致。上述方法虽然能够解决图像灰度的差异，但灰度校正过程属于强制改正图像灰度，用于滤光片阵列多光谱图像时，灰度校正效果并不理想，且并未考虑同一地物光谱信息的损失。

因此，本文提出一种基于辐射定标的航空滤光片阵列多光谱图像条带灰度校正算法，用于解决滤光片阵列多光谱图像因曝光时间差异导致拼接图像中地物的灰度不一致问题，校正后的单波段图像地物灰度一致，且较好保持了地物光谱信息。

1 滤光片阵列多光谱成像特点

滤光片阵列多光谱相机通过在 CCD 探测器前面加入滤光板，实现滤光片阵列分光。其中，滤光板上沿着垂直于飞行方向镀制了数个窄带带通滤光膜，每个带通滤光膜只能通过一个谱段的图像[8]。

滤光片阵列多光谱相机成像数据不同于其他分光方式的多光谱相机，单波段图像并不是同时成像。在某一时刻下，相机成像获取的光谱数据为多波段图像，需要通过图像裁剪、拼接方法才能够形成一幅单波段图像。

然而，由于相机在成像过程中，机械快门开合时间不稳定，不同时刻曝光时间存在一定差异，导致裁切拼接后单波段图像可能存在一定宽度的明暗条纹[9]，如图 1 所示。

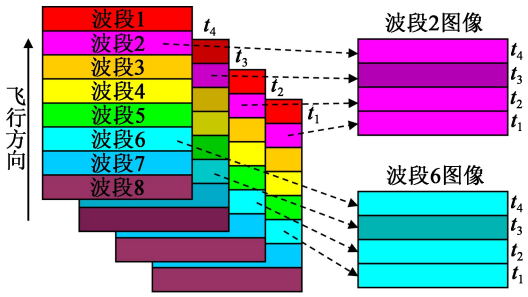


图 1 滤光片阵列多光谱数据面阵处理示意图

由图 1 可知，条带曝光量差异破坏了单波段拼接图像中地物灰度的一致性，由于各单波段图像中灰度差异对应不同地物，当对多光谱图像提取地物光谱信息时，地物光谱信息存在一定偏差，影响了多光谱图像数据的应用。

2 滤光片阵列多光谱图像条带灰度校正算法

滤光片阵列多光谱图像条带灰度校正过程与遥感图像拼接流程基本一致，主要包括条带重叠区域确定、拟合灰度校正系数、图像灰度校正和条带提取与拼接三个步骤。

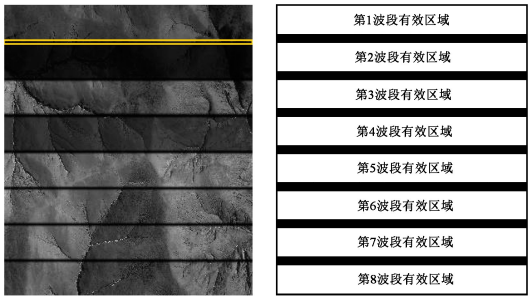
2.1 条带重叠区域确定

条带重叠区域确定主要包括构建条带图像模板和条带空间位置确定两部分。

2.1.1 构建条带图像模板

以 8 谱段滤光片阵列多光谱相机为例，获得的多光谱图像数据如图 2(a)所示。相邻波段条带图像间存在过渡区域，如图 2(a)中黄色框线区域。

为便于计算条带图像重叠区域，基于各波段条带有效区域的四个顶点坐标，分别构建多光谱图像条带模板，如图 2(b)所示。



(a) 多光谱图像数据 (b) 条带模板

图 2 多光谱图像

2.1.2 条带图像空间位置确定

为保证条带重叠区域的准确性，需要对各相邻时刻获得的图像进行配准，即确定单条带图像在同一坐标下的空间位置。虽然滤光片阵列多光谱相机成像过程中记录了图像数据与平台状态参数信息，但由于 POS 信息的精度较低，校正后图像仍然存在几何畸变。因此，本文选用基于特征的配准方法实现多光谱图像对齐。

考虑到滤光片阵列多光谱图像灰度差异较为明显，选择鲁棒性较高的 SIFT 算法[10]提取图像匹配点。由于图像数据量较大，为提高图像拼接效率，采用基于单应矩阵补偿的方法[7]计算相邻序列多光谱图像间的坐标转换矩阵，并以中间序列图像为基准，确定各序列图像相对于基准图像坐标转换矩阵，如图 3 所示。

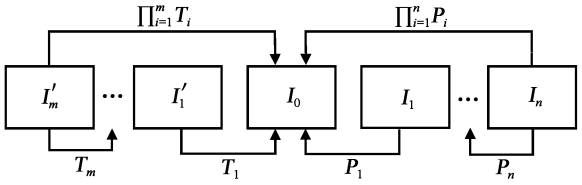


图 3　序列图像投影矩阵

然后，利用各投影矩阵将对应的图像及条带模板投影到同一坐标下，将投影后相邻条带模板相乘即为条带重叠区域模板。

以图像 I_1，I_2 为例，投影后的条带图像模板分别为 M_1，M_2，各条带图像重叠区模板如图 4 所示。

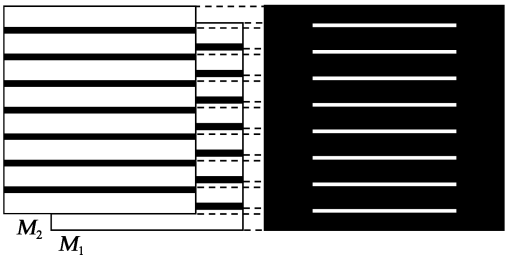


图 4　图像重叠区域模板

2.2　拟合灰度校正系数

考虑到滤光片阵列多光谱图像由数个条带组成，且同一时刻条带图像曝光时间相同，为了保证地物光谱特性，同一时刻获得的多条带图像必须使用同一校正系数进行处理。

根据大气辐射传输模型[11]可知，多光谱相机各波段图像灰度值 d_k 可以由式(1)确定。

$$d_k(\lambda)=l(\lambda)r(\lambda)\tau(\lambda)s(\lambda)+n(\lambda) \tag{1}$$

式中，$l(\lambda)$为光源照度，$r(\lambda)$为地物反射率，$\tau(\lambda)$为滤光片透过率，$n(\lambda)$为图像噪声，$s(\lambda)$为 CCD 光谱响应函数。一般情况下，$r(\lambda)$，$\tau(\lambda)$，$n(\lambda)$，$s(\lambda)$均可以视为常数，在不考虑图像噪声情况下，式(2)可以改写为

$$d_k(\lambda)=kl(\lambda) \tag{2}$$

由式(2)可知，在不考虑图像噪声的情况下，单波段条带灰度成比例关系。但由于成像过程中的噪声因素无法避免，因此，校正滤光片阵列图像灰度差异可以选用式(3)作为灰度校正模型，其中，x 为待校正图像像素灰度，(g,n)为校正系数。

$$y=gx+n \tag{3}$$

因此，本文对各条带重叠区域像素均值进行拟合，得到灰度校正系数。以 8 谱段滤光片阵列多光谱序列图像中相邻的第 i 幅、第 j 幅图像为例进行调整，如图 5 所示。

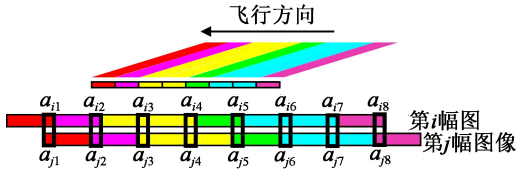


图 5　条带重叠区域

首先依次计算第 i，j 幅图像中各波段重叠区域像素平均灰度值 a_{i1}，a_{j1}，a_{i2}，a_{j2}，a_{i3}，a_{j3}，a_{i4}，a_{j4}，a_{i5}，a_{j5}，a_{i6}，a_{j6}，a_{i7}，a_{j7}，a_{i8}，a_{j8}，选择第 i 幅图像的灰度为基准，分别对 i，j 图像中各重叠区域灰度平均值进行拟合，得到灰度拟合直线，如图 6 所示。

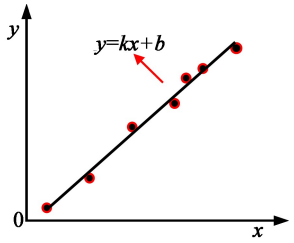


图 6　拟合灰度校正系数

其中，$\boldsymbol{x}=[a_{j1}\quad a_{j2}\quad a_{j3}\quad a_{j4}\quad a_{j5}\quad a_{j6}\quad a_{j7}\quad a_{j8}]$，$\boldsymbol{y}=[a_{i1}\quad a_{i2}\quad a_{i3}\quad a_{i4}\quad a_{i5}\quad a_{i6}\quad a_{i7}\quad a_{i8}]$。利用校正系数$(k_i,b_i)$即可对图像灰度进行校正，$x$ 代表待校正图像 $I_j(m,n)$处像素的灰度值，y 代表灰度校正后的图像 $I'_j(m,n)$处像素灰度。

2.3　图像灰度校正

求出图像灰度校正系数后，就可以对图像进行灰度调整。例如，以 7 幅多光谱条带图像为例，选择中间的第 4 幅图像为基准，依次将各灰度校正系数与对应序列图像中的每个像素灰度相乘，图像灰度校正计算公式如下：

$$\begin{cases} I'_1=[(I_1\times k_1+b_1)\times k_2+b_2]\times k_3+b_3 \\ I'_2=(I_2\times k_2+b_2)\times k_3+b_3 \\ I'_3=I_3\times k_3+b_3 \\ I'_4=I_4 \\ I'_5=I_5\times k_4+b_4 \\ I'_6=(I_6\times k_5+b_5)\times k_4+b_4 \\ I'_7=[(I_7\times k_6+b_6)\times k_5+b_5]\times k_4+b_4 \end{cases} \tag{4}$$

2.4 条带提取与拼接

滤光片阵列多光谱图像条带拼接不同于其他图像，需要利用图像模板依次提取处各序列单波段条带图像，通过图像融合算法，得到灰度一致的多光谱单波段图像，如图 7 所示。

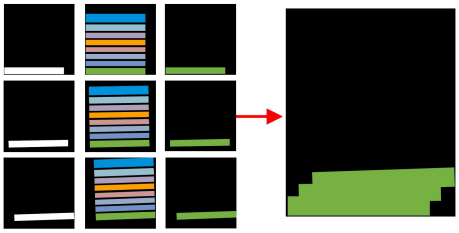


图 7 多光谱图像拼接示意图

3 实验与分析

为了验证本文提出算法的可行性，采用某航拍无人机滤光片阵列多光谱相机拍摄某地区的序列滤光片阵列多光谱图像进行验证实验。其中，实验图像大小为 4 008 像素×5 000 像素，如图 8 所示。

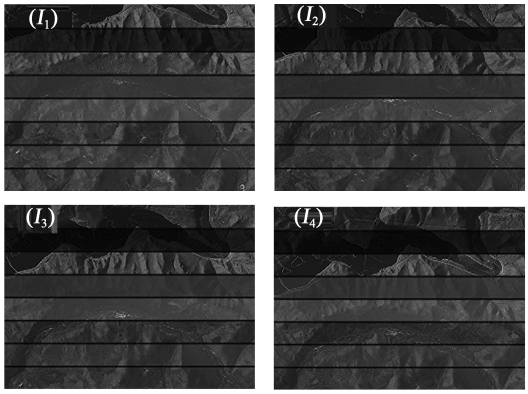
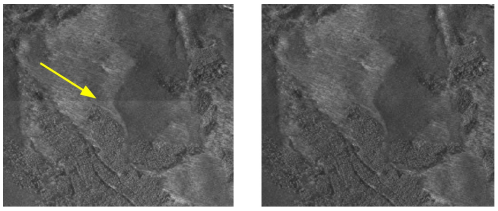


图 8 实验图像

未进行灰度处理和利用本文算法处理的第 5 波段条带局部拼接图像如图 9 所示。从目视效果上看，直接对裁剪后的条带进行拼接得到的单波段图像存在地物明显的灰度差异，拼接图像质量较差。而图 9(b)中地物不存在灰度差异，说明本文方法较好地解决了条带间灰度差异。



(a) 灰度未处理 (b) 灰度校正后

图 9 灰度校正前后对比

为了更好地说明本文算法的性能，选择滤光片型多光谱数据灰度校正算法[12]与本文算法进行灰度校正实验对比。其与本文算法处理后的单波段条带局部拼接图像如图 10 所示。

由图 10 可知，未进行灰度处理的波段拼接图像存在不同程度的灰度差异，波段 5 与波段 8 图像较为明显。

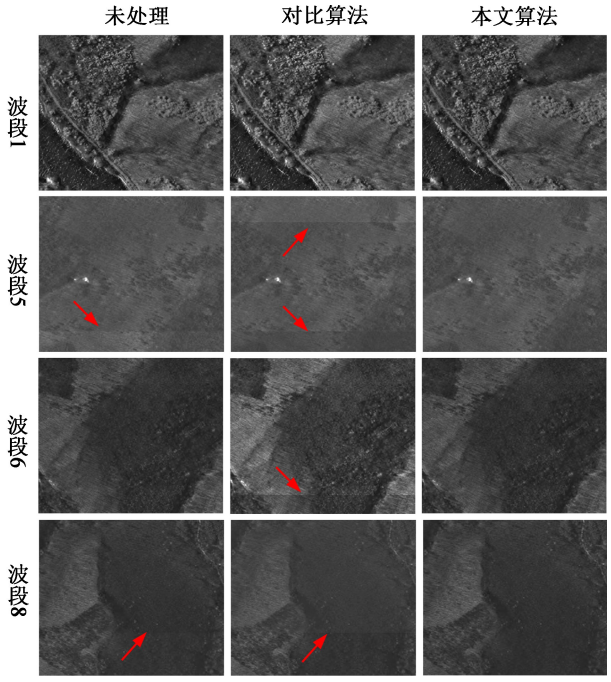


图 10 灰度校正效果对比

对比算法处理的波段 1 图像与本文算法处理结果较为相近，但波段 5 和波段 6 图像中地物灰度差异明显变大，且波段 8 图像中的灰度差异并未得到较好解决。

本文算法处理后的图像地物灰度一致，不存在灰度突变现象。

经分析发现，利用对比算法校正条带图像灰度时，受条带重叠率与图像质量影响，部分条带图像提取匹配点时存在数量较少、误匹配点，甚至提不出同名像点。图像 I_1，I_2 中波段 5、波段 6 条带匹配点分布如图 11 所示。

其中图像 11(a1)，(a2)和(b1)，(b2)分别对应图像 I_1，I_2 中波段 5、波段 6 条带图像。可以看出，图 11 中条带匹配点分布不均，部分重叠区域不存在匹配点，且匹配点存在明显误匹配点，无法反映条带间真实的灰度变换关系，导致利用匹配点像素灰度计算的灰度校正系数与真实值会存在较大偏差，可能会增加相邻条带图像间的灰度差异，甚至出现灰

度无法校正的现象。

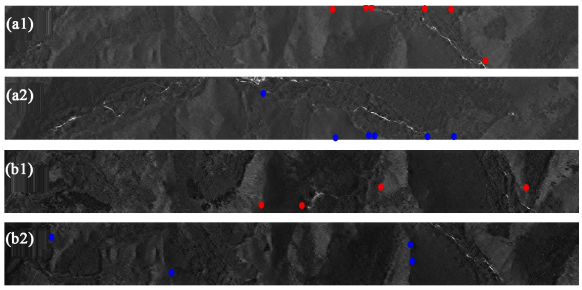
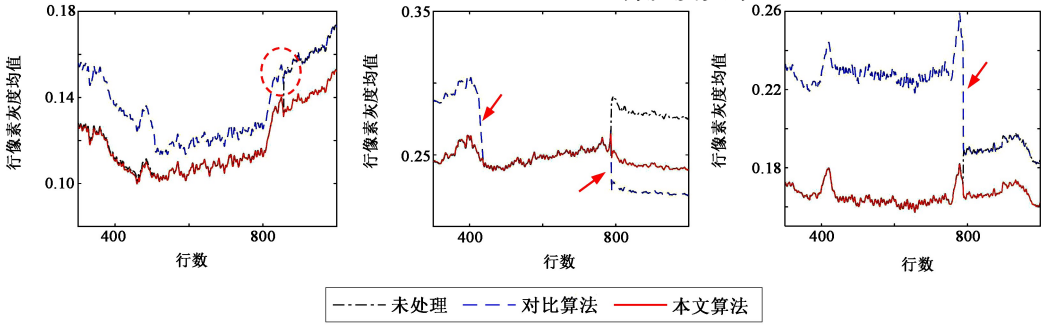


图 11　匹配点分布

因此，当相邻条带图像重叠率低、重叠区域匹配点数量少以及数量分布不均匀时，文献[12]的算法无法解决大图像灰度不一致的问题，甚至会加大图像同一区域中地物的灰度差异。而本文算法调整后的各单波段图像灰度分布均匀，较好地解决了多光谱单波段图像灰度不一致的问题。

为了进一步说明本文算法的有效性，分别对波段 1、波段 6 和波段 7 的拼接图像计算行像素灰度均值变化曲线，如图 12 所示。其中，图 12 中纵坐标代表拼接图像行像素灰度均值，横坐标代表拼接图像行数。

从图 12 中可以看出，对比算法处理后的拼接图像灰度校正效果差异较大，波段 1 中图像灰度差异较未处理图像有所减轻，如图 12(a)中红色虚线圆圈区域。但在波段 5 与波段 6 图像，部分条带间灰度差异明显变大，如图 12(b)，(c)中红色箭头所指区域，说明对比算法灰度校正效果并不稳定。此外，对比算法校正单条带图像灰度时，基准图像选择并不一致，灰度校正过程中并未考虑波段间图像中同一地物灰度关系。



(a)　波段 1　　(b)　波段 6　　(c)　波段 7

图 12　拼接图像行像素灰度均值变化

对于本文算法而言，单波段图像中条带拼接缝处灰度差异较小，拼接图像行像素灰度均值变化较为平缓，说明相邻条带图像灰度近似一致。

由此可知，本文基于图像中各条带重叠区域像素灰度均值拟合灰度校正系数，充分利用了条带重叠区域各像素灰度信息，校正后的单波段图像灰度变化均匀，有效解决了单波段拼接图像存在的地物灰度差异。

4　结论

针对航空滤光片阵列多光谱图像中存在的条带灰度差异，提出了一种基于辐射定标的条带灰度校正算法，即根据图像中各波段条带重叠区域灰度均值拟合相邻图像灰度校正系数，用于校正同一时刻获得的条带图像灰度，校正后的拼接图像地物灰度一致。实验对比表明：本文算法较目前灰度校正算法有着更好的灰度处理效果，能够较好解决航空滤光片阵列多光谱图像中条带灰度差异，且拼接图像能够满足图像后期配准与光谱数据应用需求。

参考文献：

[1]　刘春雨，丁　祎，刘　帅，等. 滤光片分光型高光谱相机发展现状及趋势(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(1)：309-323.
Liu Chunyu，Ding Yi，Liu Shuai，et al. Development status and trend of filter hyperspectral camera (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(1)：309-323.

[2]　方　煜，吕群波，刘扬阳，等. 滤光片阵列型多光谱相机中阵列的设计与形变影响分析[J]. 光子学报，2015，44(7)：13-18.
Fang Yu，Lv Qunbo，Liu Yangyang，et al. Designed deformation analysis of the filter array in the filter array multispectral camera[J]. Acta Photonica Sinica，2015，44(7)：13-18.

[3]　李　烁，王　慧，王利勇，等. 遥感影像变分 Mask 自适应匀光算法[J]. 遥感学报，2018，22(3)：450-457.
Li Shuo，Wang Hui，Wang Liyong，et al. Adaptive dodging method based on variational mask for remote sensing images

[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018, 22(3): 450-457.

[4] 黄 慧, 董林鹭, 刘小芳, 等. 改进 Retinex 的低光照图像增强[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1835-1849.
Huang Hui, Dong Linlu, Liu Xiaofang, et al. Improved Retinex low light image enhancement method[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1835-1849.

[5] 杨赞伟, 郑亮亮, 吴 勇, 等. 一种改进的矩匹配高光谱图像非均匀校正算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 329-337.
Yang Zanwei, Zheng Liangliang, Wu Yong, et al. An improved algorithm for non-uniform correction of hyperspectral images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 329-337.

[6] Tian J, Li X, Duan F, et al. An efficient seam elimination method for UAV images based on Wallis dodging and Gaussian distance weight enhancement[J]. Sensors, 2016, 6: 1-12.

[7] Tian J H, Wu Y L, Cai Y H, et al. A novel mosaic method for spaceborne ScanSAR images based on homography matrix compensation[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2866-2886.

[8] 曹丛峰, 方俊永, 赵 冬. 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 51-55.
Cao Congfeng, Fang Junyong, Zhao Dong. Development of UAV-borne multispectral camera based on narrow bandwidth filter array[J]. Optical Technique, 2018, 44(1): 51-55.

[9] 赵 峰. 一种用于海洋赤潮监测的多光谱高分辨相机设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Zhao Feng. A multi-spectral high-resolution camera design for maring red tide monitoring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[10] Zhao J Q, Zhang X H, Gao C X, et al. Rapid mosaicking of unmanned aerial vehicle (UAV) images for crop growth monitoring using the sift algorithm[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1226-1245.

[11] 王贵川. 基于 6S 辐射传输模型的大气校正过程优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
Wang Guichuan. Study on the optimization of atmospheric correction process based on 6S radiative transfer model[D]. Qing Huangdao: Yanshan University, 2020.

[12] 方秀秀, 黄 旻, 王德志, 等. 基于高程和地物光谱约束的多光谱图像预处理算法[J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 264-267, 272.
Fang Xiuxiu, Huang Wen, Wang Dezhi, et al. Multispectral image preprocessing based on elevation and surface feature spectrum constraints [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 264-267, 272.

作者简介:

李铜哨(1998—),男,河南省驻马店市人,硕士研究生,研究方向为数字图像处理;

孙文邦(1976—),男,安徽省怀宁县人,博士,副教授,研究方向为数字图像处理。