

基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制

曹丛峰^{1,2}, 方俊永², 赵冬²

1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

摘要: 本文介绍一款适用于轻小型无人机的多光谱相机。把多个独立的滤光片依次拼接成滤光片阵列在成像探测器前放置由多个滤光片依次排列而成的滤光片阵列, 一次曝光得到地物目标分条带区域的分波段图像, 通过飞行平台的前向运动获得每个条带区域的多光谱图像。这种设计利用平台的前向运动代替了旋转、扫描等机械运动, 减轻了相机质量和体积, 适用于轻小型无人机平台, 且由于采用较大的探测器件, 能够获得更多的旁向像素数(约4300)和更宽的旁向幅宽。利用研制的多光谱相机, 在中科院怀柔遥感站进行了无人机飞行试验, 获取了站区周边的6波段多光谱图像, 数据处理结果表明该相机的数据质量能够满足植被指数计算等相关要求。

关键词: 轻小型无人机; 多光谱相机; 滤光片阵列

Development of UAV-borne Multispectral Camera Based on Narrow Bandwidth Filter Array

Congfeng Cao^{1,2}, Junyong Fang², Dong Zhao²

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101

Abstract: This paper presents a multi-spectral camera for small UAV. A filter array arrayed by a plurality of filters in sequence is arranged in front of the imaging detector, and several different narrow band images of the target region is obtained by one exposure. Multispectral images of each stripe region are obtained by the forward motion of the flight platform. This design uses the forward movement of the platform instead of rotating, scanning and other mechanical movement, reducing the camera quality and size, suitable for small UAV platform. And a larger number of side-by-side pixels (about 4300) and side-by-side widths can be obtained due to the larger detection devices. The flight experiment using the multispectral camera was conducted in Huai Lai Remote Sensing Station of Chinese Academy of Sciences (CAS), and the 6-band multispectral images were obtained. The data processing results show that the data quality of the camera can meet the requirements of vegetation index calculation and other related requirements.

Key Words: small UAV; multispectral camera; Filter array

0 引言

无人机遥感系统具有运行成本低、执行任务灵活性高等优点, 正逐渐成为航空遥感系统的有益补充, 是高分辨率遥感数据获得的重要平台之一^{[1][2]}。

轻小型无人机具有体积小, 机动灵活、成本低等优点, 在无人机遥感系统中具有较强的应用潜力^[3-6]。据抽样统计, 目前全国民用轻小型无人机航摄系统载荷传感器中, 数码相机占 77%, 视频摄像机占 7%, 多光谱

相机占 4%, 红外辐射计占 3%, 其他类传感器占比均小于 2%^[7]。多光谱相机不仅能获得二维空间信息, 还能获得多个光谱信息, 空间信息与光谱信息结合极大提高了目标探测的准确性。多光谱相机被广泛应用于地质灾害评估, 农作物和环境监测以及地图测绘领域。^[8]

多光谱相机的分光策略的决定了相机的结构和体积, 以及影像数据处理方法^[9]。目前多光谱相机分光策略主要分为光路分

收稿日期:

E-mail: ccf11@foxmail.com

作者简介: 曹丛峰 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机视觉和机器学习研究。

光式分光, 滤光片轮式分光, 多镜头式分光三种。但光路分光式多光谱相机复杂的光栅棱镜使得相机体积较大且相机系统复杂, 波段数的增加会降低图像质量及成本的提高^[10]。轮转系统增加了滤光片轮式多光谱相机系统的复杂性, 无法使相机达到理想的最小体积和重量^[11]。由于多个波段的姿态数据不一致, 也增加了后续的影像处理难度。多镜头分光多光谱相机由于采用短焦距镜头和小探测器使得能够实现较小的相机体积和重量, 但多光谱图像质量会受到一定的影响^[12]。

此外, 还有基于线性渐变滤光片实现上百个波段分光的相机, 一般是归于高光谱相机类型, 采取推扫式成像扫描, 数据质量对拍摄姿态和平台稳定性要求比较高。基于类似渐变滤光片的成像方式, 有相关研究给出了基于滤光片阵列多光谱相机的设计方案, 给出了相机的一些理论参数^[13]。

本文采用阵列式滤光片分光方式分时分区波段获取地物目标的多光谱图像, 设计研制成可搭载在无人机平台的多光谱相机, 并通过无人机飞行试验进行相机性能和功能验证, 取得了比较好的试验效果。

1 滤光片阵列多光谱相机基本原理及组成

通过把多个独立的滤光片基片依次拼接成滤光片阵列, 将该滤光片阵列放置于成像器件前, 经过滤光片分光后的多波段光线被镜头会聚成像于探测器前, 在面阵探测器上的不同区域得到相应波段的图像。每次曝光可获得不同条带区域的不同波段的图像,

通过飞行平台的前向运动获得同一条带区域的多光谱图像, 滤光片阵列式多光谱相机工作原理如图 1 所示。

为提高多光谱相机的适用性, 选取了 5 个广泛应用于农业、林业和环境等领域的多光谱波段^[14], 并增加一个全色波段构成 6 波段滤光片阵列。这 5 个定制的多光谱滤光片透过率曲线如图 2 所示, 图 3 所示为拼接好的滤光片阵列, 所获取的多光谱图像中各波段的位置分布从左到右分别是: 蓝色滤光片、绿色滤光片、红色滤光片、近红外 1 波段滤光片、近红外 2 滤光片和未加涂层的全色滤光片。单个波段图像的长边对应探测器的短边, 单个波段图像的短边对应探测器的长边。

采用阵列滤光片成像, 每个波段在航向上都是分区域的窄条带图像。波段数过多或探测器像素数过小会导致航向方向的像素数过低而近似于线阵推扫成像, 会加大对采集速率的要求及增加后期几何纠正的难度。本文采用具有较大像素规模的 KAI-29050 探测器, 该探测器的像素数为 6576×4384 , 6576 对应飞行方向, 依次排列 6 个波段, 每个波段的像素数能够达到约 1000 像素, 而 4384 对应旁向方向, 能够实现较宽的旁向幅宽。探测器及其详细参数如表 1 所示。KAI-29050 探测器采用 Interline (行转移) 方式, 其采集速率帧频最高可以到达 4fps, 能够满足低空无人机成像对采集速率的要求。

为了构成完整实用的多光谱相机系统, 研制配备了小型三轴云台、微型 GPS/姿态模块、同步控制模块、采集存储模块以及预处理软件, 相机系统总体框图如图 4 所示。

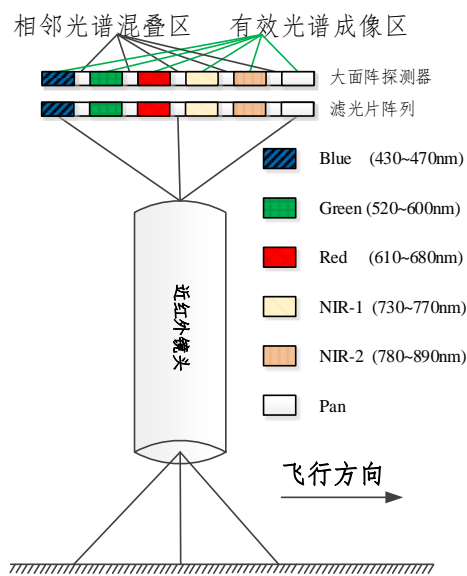


图 1 相机工作原理

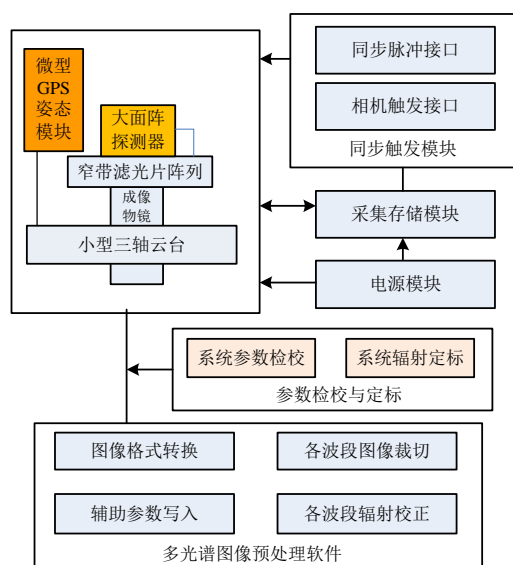


图 4 相机系统总体框图

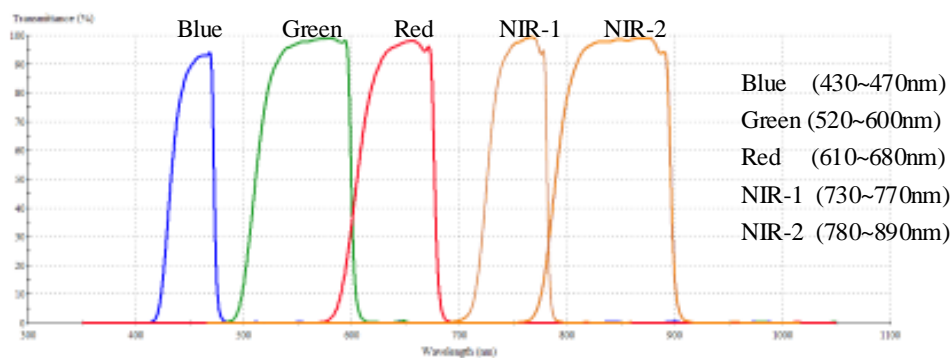


图 2 滤光片透过率

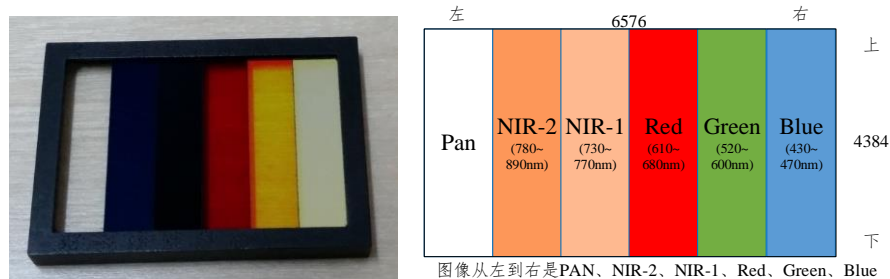


图 3 图像波段排列

表 1 面阵探测器基本参数

| 参数 | 探测器型号 | 像素数 | 像素尺寸 | 成像面尺寸 | 采集帧频 | 量化位数 |
|----|-----------|-----------|-------|---------|---------|------|
| 指标 | KAI-29050 | 6576×4384 | 5.5μm | 36×24mm | 最高 4fps | 14 位 |

本文研制的阵列滤光片多光谱相机如图 5 所示，长宽高尺寸为 21 mm×19mm×78mm，相机系统总重量约 1.5kg，共有 6 个

波段，相对航高 200 米时分辨率为 5 厘米。一次拍摄获取的一景原始图像为 4384×6576 像素，包括 6 个波段的多光谱图像。经

过实验室内光谱标定，可确定一景影像中各波段去除混叠后的具体位置，以便进行多光谱图像的裁切，6个波段图像的长宽像素数如表 2 所示，全色波段最窄图像幅宽为 628×4384 像素，近红外一波段最宽幅宽为 947×4384 像素。

表 2 滤光片阵列多光谱相机各波段幅宽

| 波段 | Pan | NIR-2 | NIR-1 | Red | Green | Blue |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 长×宽 | 628×4384 | 873×4384 | 947×4384 | 841×4384 | 931×4384 | 655×4384 |



图 5 滤光片阵列多光谱相机

2 阵列滤光片多光谱相机试验、数据获取及处理

2015 年 11 月在中科院遥感地球所怀柔实验站利用多旋翼无人机进行滤光片阵列多光谱相机的飞行测试试验，实验站周边地物包括建筑、植被、道路、农田等。拍摄时

天气晴朗，无云，基本无风。相对飞行高度为 200m，设计航线数为 2 条，飞行速度为 5m/s，采集帧频为 2fps。获得的图像质量很高，纹理清晰；空间分辨率达到 5cm；汽车、花坛、房子瓦片和田垄等细节明显。图 6 为搭载多光谱相机的多旋翼无人机，图 7 为多光谱相机获取的单张原始影像。



图 6 搭载多光谱相机的多旋翼无人机



图7 多光谱相机获取的单张原始影像

多光谱相机采用滤光片阵列分光方式，数据处理主要涉及单波段裁剪、图像校正、单波段图像拼接、谱段间配准与合成等。数据处理的技术路线如图8所示：单波段裁剪是将一幅图像裁剪为6个单波段窄带图像，图像校正是对单幅图像进行几何纠正，拼接则是将裁剪后的图像拼接为常规的单波段整幅影像；谱段间配准是将各谱段之间进行高精度配准，再合成为整景多光谱影像。

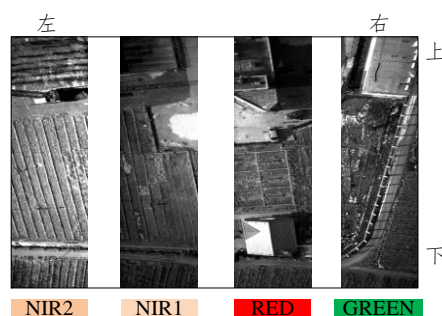


图9 裁剪后单波段图像

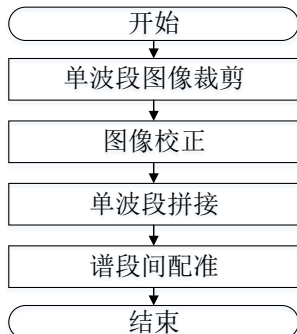


图8 数据处理技术路线图

2.1 单波段裁剪

由于滤光片阵列相邻波段存在光谱混叠，可根据实验室内光学测试的结果确定各个波段清晰成像的确切位置分布，将单张原始图像中的波段混叠区裁掉，形成6个波段的单波段图像。图9为裁剪后的单波段局部图像，分别为两个近红外波段、红波段和绿波段，图像清晰，质量较好。

2.2 图像校正、拼接和配准

由于多波段影像在同一镜头视场和探测器上分区域成像，每个波段图像具有不同的畸变量，通常情况下，机下点的红和近红外波段的畸变一定会比边缘图像的畸变小，不同波段图像的几何校正参数是不相同的，需要分别进行畸变/几何纠正。图像的拼接是指单波段的相邻图像通过重叠区进行区域拼接，图像的波段配准是指不同波段的图像进行配准形成多光谱图像。

多光谱图像的拼接配准技术路线图如图10所示。目前主要的配准方法是基于特征的匹配，通过选取相邻两幅或者多幅图像共同的特征点，建立图像变换参数，求得单应矩阵 H ，两幅影像 $I(x, y)$ 、 $I'(x', y')$ 和单应性矩阵 H 有如公式(1)的投影关系。单应性矩阵 H 共有8个未知参数。^[15]通常用随机抽样一致性算法 (RANSAC) ^[16]剔除匹配质量较差的点后再用最小二乘求得精确的单应性矩阵，将待配准影像进行投影变换，经过双线性二次插值得到配准后的影像。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

目前比较常用的算法有：SIFT 算法、SURF 算法和 ORB 算法等。本文选用基于 SURF 改进的 TSURF 算法^[17]，基于 TSURF 算法的航空影像拼接速度提高了 3 倍以上，同时保持了影像的质量和拼接精度。TSURF 在提取特征点后加入筛选机制，筛掉误差较大的特征点来减少匹配点的数量提高匹配速度。TSURF 两个关键步骤是非极大值抑制加强和模板卷积。

非极大值抑制加强：在特征点检测的极大值检测中用 Hessian 矩阵的最大值减去次极大值，差大于一定阈值则作为特征点。提高特征点提取的准确度，如公式 (2) 所示。

$$\max - \text{submax} \geq \theta \quad (2)$$

模板卷积：使用模板对已检测到的特征点进行筛选，去除零星的错误特征点。模板如公式 (3) 所示，将模板与初始检测到的特征点矩阵进行卷积运算：若卷积结果小于 0，则不为特征点；若卷积运算结果为 9，则模板内只有一个特征点，剔除该特征点；若卷积运算结果大于等于 1 小于 9，则模板内有

两个或者两个以上的特征点，保留此特征点。

$$\text{model} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

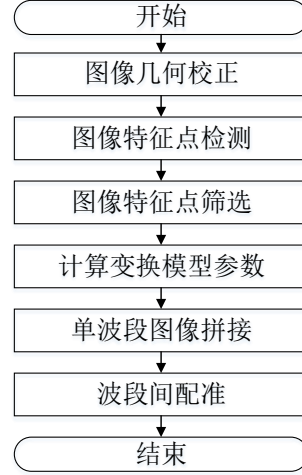


图 10 多光谱图像拼接配准技术路线图

经过单波段拼接的图像结果如图 11 所示，多波段配准后的图像结果如图 12 所示。拼接校正后的图像没有拼接痕迹，纹理清晰，并且保持了细节信息。假彩色合成图像地物明显，纹理清晰，符合试验场的地物特征。

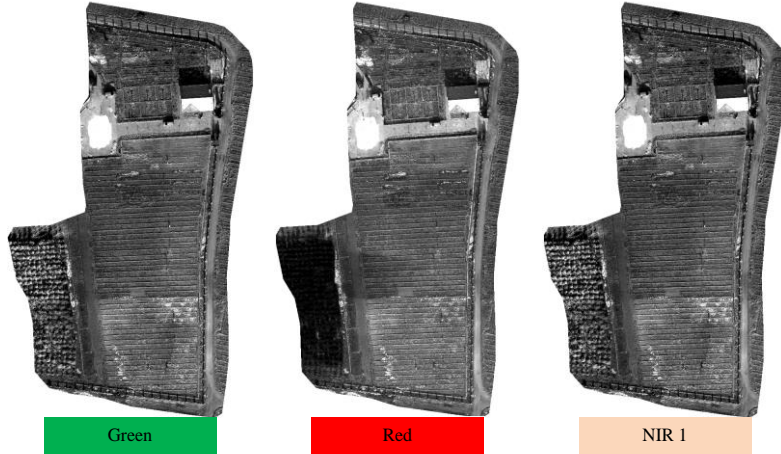


图 11 单波段拼接图像

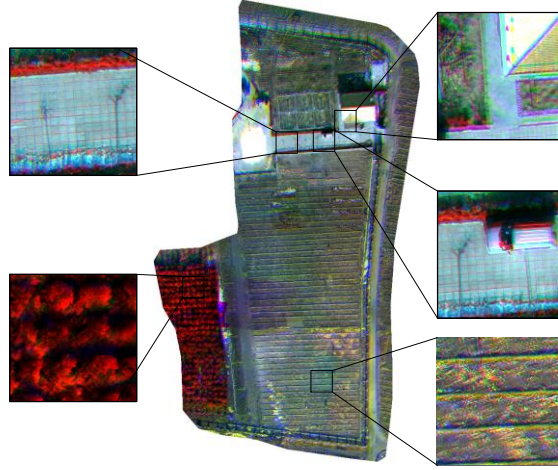


图 12 多光谱图像局部细节图

3 精度评价

精度评价方面，使用变换后的所有匹配点的平均重投影误差（MRE：mean reprojection error）^[18] 作为精度评价指标，如公式（4）所示： \hat{x} 和 \hat{x}' 分别为匹配点对 x 和 x' 经过参数变换后得到的点。最终得到的拼接精度：最好的拼接波段为红色波段精度达到 0.10 像素，最差的拼接波段为蓝色波段精度达到 0.14 像素。结果表明拼接精度比较高，满足应用要求。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n \left[d(x_i, \hat{x}_i)^2 + d(x'_i, \hat{x}'_i)^2 \right]}{n} \quad (4)$$

在波段配准后的波谱方面，如图 13 所示，通过统计特征地物的像元亮度值并转换为反射率得到特征地物光谱曲线。植物光谱曲线在绿色波段反射率和近红外波段反射率比红色波段反射率高形成吸收谷，并且在近红外波段反射率急剧增加，符合常见绿色植被的光谱反射特征。水泥道路和裸地同样也满足各自的光谱特征。

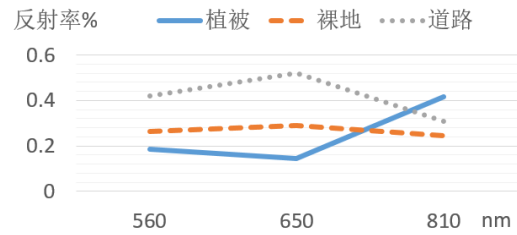


图 13 特征地物光谱曲线

4 结论

本文通过滤光片阵列的成像方式获得多光谱图像，并通过研制的多光谱相机获得了试验场的多光谱数据。通过裁剪拼接配准等处理得到了高质量的低空遥感多光谱数据，初步验证了新型相机的成像原理和多光谱数据的可用性。

目前常见的多光谱相机所获得多光谱图像大都是 1280×1024 ，而本文研制的滤光片阵列多光谱相机所获取的多光谱单个波段图像可达到约 $1000(\text{航向}) \times 4300(\text{旁向})$ ，在保障航向图幅及图像质量情况下，可大大提高旁向幅宽和飞行效率。

滤光片阵列多光谱相机在研制和试验过程中，还有几个方面的问题需要做更进一步的工作：

- ① 由于多个光谱波段是同时成像与同

一个焦面探测器位置, 由于波长色散性, 不可能实现 6 个波段同时清晰成像, 势必造成不同波段的清晰度不一致, 需要在光学装调及图像校正时兼顾不同波段的差异性。

②光学镜头、滤光片和探测器在不同波段的透过率及光谱响应是不同的, 但多光谱相机的镜头光圈和曝光时间参数对各个波段是相同的, 会造成不同光谱波段图像的辐射特性差异, 需要在各波段滤光片的透过率设计上进行均衡。

③本次测试飞行试验中没有同步获取每幅图像的 GPS 和姿态数据, 应在后续工作中增加同步模块, 得到每幅图像曝光时刻的 GPS 位置信息和姿态数据, 为后期的图像几何纠正和拼接提供辅助参数, 有助于拼接和配准的快速处理。

参考文献

- [1] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2014, 39(5): 505-513.
LI Deren, LI Ming. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. GEOMATICS AND INFORMATION SCIENCE OF WUHAN UNIVERS, 2014, 39(5): 505-513.
- [2] Adam C, Vincent G, Everett. A unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use [J]. Remote Sensing, 2012(4): 1671-1692.
- [3] IBRAHIM A W N, PANG W C, GERALD S G L, et al. Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance [A]. 2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image&Video Technology [C]. Singapore: IEEE Computer Society, Nov 14-17, 2010.456-461.
- [4] CHAO H Y, AUSTIN M J, HAN Y D, et al. AggieAir: Towards low-cost cooperative multispectral remote sensing using small unmanned aircraft systems [M]. Advances in geoscience and remote sensing, 2009: 463-490.
- [5] YI L, JUHA H, ANTONI J. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping[J]. Geoscience & Remote Sensing Letters (S1545-598X), 2011, 8(3): 426-430.
- [6] SHENG H, CHAO H Y, CAL C, et al. Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: platform, calibration and applications [A]. International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA)[C], Qingdao, China: IEEE/ ASME, 2010: 38-43.
- [7] 廖小罕, 周成虎等. 轻小型无人机遥感发展报告[M]. 科学出版社, 2015, 3.
Liao Xiaohan, Zhou Chenghu. Report on remote sensing development of small unmanned aerial vehicles [M]. Science Publishing Company, 2015, 3.
- [8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 科学出版社, 2003, 78.
Zhao Yingshi. Principle and method of remote sensing application analysis[M]. Science Publishing Company, 2003, 78.
- [9] 操乐林, 武春风, 侯晴宇, 等. 基于光谱成像的目标识别技术综述[J]. 光学技术, 2010, 36(1): 145-150.
Cao Lelin, Wu Chunfeng, Hou Qingyu, et al. Survey of target recognition technology based on spectrum imaging[j]. Optical Technique, 2010, 36(1): 145-150.
- [10] Tanikawak, Okamura T, Kudo J, et al. Six-band multispectral sensor using off-axis three-mirror reflective optics[J]. Optical Engineering, 2000, 39(10): 2781-2788.
- [11] 吴刚, 武春风, 刘建华, 等. 激光调制气溶胶红外诱饵对成像制导导弹的干扰分析[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 901-903.
Wu Gang, Wu Chunfeng, Liu Jianhua, et al. Analysis of jamming imaging guidance missile with shipborne aerosol infrared decoy modulated by laser[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 901-903.
- [12] Escobar D, Everitt J H, Noriega J R. A

- twelve-band airborne digital video imaging system [J]. Remote Sens. Environ, 1998, 66: 122-128.
- [13] 方煜, 吕群波, 刘扬阳, 谭政, 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):7-12.
FANG Yu L(U) Qunbo LIU Yangyang TAN Zheng et al. Design and deformation analysis of the filter-array in the filter-array multi-spectral camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7):7-12.
- [14] 童庆禧, 田国良, 茅亚澜. 多光谱遥感波段选择方法的研究[J]. 宇航学报, 1983, 4(2): 4-16.
Tong Qingxi, Tian Guoliang, Mao Yalan. Study on selection of multispectral remote sensing bands[J]. Journal of Aerospace, 1983, 4(2): 4-16.
- [15] Hsu Chiou-ting, Tsan Yu-chun. Mosaics of video sequences with moving objects[J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19(1):81-98.
- [16] Fischler M A, Bollers R C. Random sample consensus : a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. Communication Association Machine, 1981, 24(6):381-395.
- [17] J Wang, J Fang, X Liu, D Zhao. A fast mosaic method for airborne images: the new Template-Convolution Speed-Up Robust Features (TSURF) algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(16):5959-5970.
- [18] Richard Hartley, Andrew Zisserman. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge University Press, 2003, 95.