文章编号:1001-5078(2019)07-0876-05

· 光电技术与系统 ·

面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术研究

王义坤1,韩贵丞1,姚 波1,亓洪兴1,蔡能斌2

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室,上海 200083;

2. 上海市现场物证重点实验室,上海 200083)

摘 要:提出了一种面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术,控制基于马赛克型滤光片分光的画幅式高光谱相机在翼展方向进行扫描实现大视场、高光谱分辨率成像。进行外场飞行试验,获取了像质清晰的大视场、高光谱分辨率对地观测图像,飞行作业效率为 8.64 km²/h,较单相机成像,作业效率提高约 3.4 倍。系统光机结构简单,体积、重量优势明显,在无人机高光谱遥感方面应用前景广阔。研究成果对推动无人机载光谱成像技术向大视场、高光谱分辨率方向发展具有一定的参考价值。

关键词:无人机;高光谱遥感;大视场高光谱分辨率;画幅式高光谱相机;翼展扫描

中图分类号:TN21 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.016

The research on wide-field hyperspectral imaging technology with UAV

WANG Yi-kun¹, HAN Gui-cheng¹, YAO Bo¹, QI Hong-xing¹, CAI Neng-bin²
(1. Key Laboratory of Space Active Optical- Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Key Lab. of Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: A technology of wide-field hyperspectral with unmanned aerial vehicle (UAV) was introduced, a frame hyperspectral camera, whose spectrophotometer was based on the mosaic filter, was used to scan in the direction of the wingspan to achieve wide-field and high spectral resolution image. An outfield flight test has done, which obtained wide-field and high spectral resolution observation image over the ground with high quality. The flight operation efficiency is 8.64 km²/h, which is about 3.4 times higher than the single camera imaging without scanning. With simple structure, obvious advantages in size and weight, the camera has a broad prospect in unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing. The results of research in this paper have a certain reference value in promoting unmanned aerial vehicle load imaging spectrometry to develop in the direction of wide field and high spectral resolution.

Key words: unmanned aerial vehicle; hyperspectral remote sensing; wide-field and high spectral resolution; frame hyperspectral cameras; scanning in the direction of the wingspan

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金项目(No. GFZX04061502);上海市现场物证重点实验室开放课题基金项目(No. 2014XCWZK06;No. 2015XCWZK06;No. 2016XCWZK22)资助。

1 引言

近年来,随着无人机应用的普及,大视场、高光 谱分辨率的无人机载高光谱成像技术在精细农业、 林业资源调查、矿物勘探以及地质分析与识别等领 域有着迫切的应用需求[1-3]。传统高光谱成像系统 一般采用面阵探测器在飞行方向进行推扫成像,进 而通过分光获取地物目标的高光谱分辨率遥感图 像。面阵探测器的空间维对应于翼展方向的一行地 物,将该行地物待探测波段的光谱信息通过棱镜或 光栅等分光器件分光到面阵探测器飞行方向光谱维 上实现高光谱成像[4]。推扫型高光谱相机在积分 时间内只能获取一维空间数据和一维光谱数据,实 际飞行作业时需要配置惯性稳定平台进行主动姿态 修正,才能实现稳定的推扫成像[4-5]。一方面,传统 推扫型高光谱相机受面阵器件规模的限制,成像视 场通常较小,无法满足无人机大视场的高作业效率 应用需求。另一方面,无人机的载重限制决定系统 不能使用稳定平台,并且无人机在空中的姿态又极 不稳定,导致推扫型成像数据后期很难拼接[6]。

针对传统推扫型高光谱成像系统在无人机大视场、高光谱遥感上应用受限的问题,本文提出了一种面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术,利用基于马赛克型滤光片分光的画幅式高光谱相机实现高光谱分辨率成像,进而控制横滚环架带动画幅式高光谱相机在翼展方向进行扫描实现大视场成像。这种大视场高光谱相机的马赛克型分光器件直接制作在面阵探测器上,不仅相机非常轻小,而且单次凝视曝光成像即可同时获取二维空间的高光谱信息,非常适用于姿态扰动较大的无人机高光谱遥感。

2 工作原理

2.1 基于集成滤光片分光技术的画幅式高光谱 相机

画幅式高光谱相机将滤光片轮、AOTF 或者集成滤光片等分光器件直接放置在面阵探测器前端或者表面,进而通过凝视曝光成像获取二维空间的高光谱信息。画幅式高光谱相机与推扫型高光谱相机的技术特点比较如表1所示。

在无人机姿态变化较大的前提下,画幅式高光谱相机利用空间重叠率即可保证相邻帧的成像数据能够顺利拼接,对姿态修正的要求不高,因此更适于无人机应用。

表 1 不同类型高光谱相机技术特点对比 Tab. 1 Technical feature comparison of

different type hyperspectral cameras

相机类型	推扫型 高光谱相机		画幅式 高光谱相机		
分光器件	色散 分光	傅里叶 变换	滤光 片轮	AOTF	集成 滤光片
光谱分辨率	高	高	低	高	中
积分时间	短	长	长	长	短
运动部件	无	有	有	无	无
后处理难度	中	大	中	中	小
体积重量	大	大	中	大	小
结构抗扰性	高	低	高	中	高
姿态敏感度	高	高	中	中	低

相比于滤光片轮分光和 AOTF 分光,基于集成滤光片分光技术^[7]的画幅式高光谱相机具有积分时间短、成像效率高、结构紧凑可靠、体积小、重量轻等优点,是未来无人机载高光谱面阵相机的一个主流发展方向。

如图 1 所示,基于集成滤光片分光技术的画幅 式高光谱相机利用放置在面阵探测器表面的楔形多 层膜介质干涉滤光片实现高光谱成像。面阵探测器 光谱维的每一行探测像元接收与滤光片透过波长相 对应的光谱带能量,所以单个干涉型滤光片即可覆 盖较宽的光谱范围。这种高光谱相机单次凝视成像 可以获取不同空间行对应的不同光谱信息,进而将 不同时刻探测器光谱维不同行的输出信号组合即可 得到每一个空间行的光谱信息。这种时空关系可以 应用于推扫型成像光谱仪或摆扫型成像光谱仪。

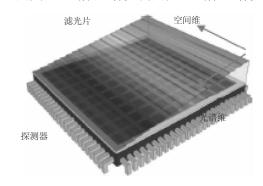


图 1 集成滤光片分光原理

Fig. 1 The spectral theory of integrated filter

随着镀膜技术的提高,集成滤光片分光技术又有了进一步发展,出现了马赛克型滤光片。如图 2 所示,滤光片以薄膜的形式镀在探测器的像元上,每个马赛克型滤光片单元包含 $N \times M$ 个像元,单元内

部不同像元上镀中心波长各异的带通薄膜。采用该种分光技术的画幅式高光谱相机不仅具有结构紧凑,体积小,重量轻等优势,而且解决了二维空间信息和目标波段所有光谱信息无法同时获取的难题。

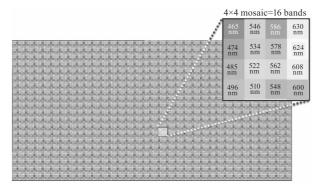


图 2 马赛克型集成滤光片分光原理

Fig. 2 The spectral theory of mosaic integrated filter

比利时 IMEC 公司基于马赛克型滤光片分光技术开发了一款画幅式面阵高光谱相机 - MOSAIC SNAPSHOT^[8],如图 3 所示。该相机的探测器采用面阵规模为 2048×1088 的 CMOS 器件,其马赛克型滤光片分为 4×4(16 谱段)可见光滤光单元和 5×5(25 波段)近红外滤光片单元两种类型。可见光谱段范围为 470~630 nm,近红外谱段范围为 600~1000 nm。可见光高光谱相机单波段面阵规模为512×272 像素,近红外高光谱相机单波段面阵规模为409×216 像素。



图 3 Mosaic Snapshot 高光谱相机

Fig. 3 The mosaic snapshot hyperspectral camera

近红外画幅式高光谱相机成像效果如图 4 所示(图中仅给出 6 波段的光谱图像),单次凝视曝光成像即可同时获取指定二维空间 25 个波段的高光谱信息。

2.2 大视场扫描成像原理

受面阵探测器器件规模和马赛克型滤光片分光 两个因素的制约,画幅式高光谱相机单波段的像元 数非常有限,成像视场较小,无法满足大视场的高飞 行作业效率应用需求。

控制画幅式高光谱相机沿翼展方向进行扫描能够实现大视场、高光谱分辨率成像。大视场扫描成像原理示意如图 5 所示,扫描一行时,画幅式高光谱相机进行多次曝光成像实现翼展方向的大视场覆盖,而飞行方向的大视场覆盖则由相机跟随载机的前向飞行完成。

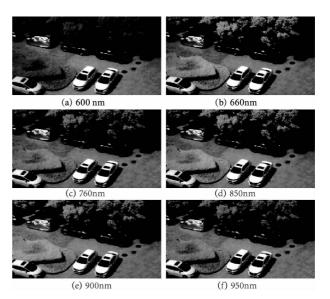


图 4 不同波段的近红外高光谱相机成像效果 Fig. 4 NIR hyperspectral images in different bands

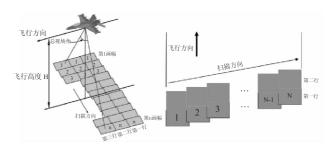


图 5 大视场成像原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wide-field imaging principle

3 系统实现

本文提出的新型大视场高光谱相机的光机结构示意如图 6 所示,画幅式高光谱相机垂直安装于横滚环架上,实现高光谱分辨率对地成像;横滚环架可以绕横滚轴转动,带动画幅式高光谱相机沿翼展方向扫描实现大视场成像。系统技术指标如表 2 所示。

系统实现框图如图 7 所示,光机头部为本文提出的新型大视场高光谱相机,通过翼展方向的扫描实现大视场、高光谱分辨率成像;电控部分实现整机的电子学控制,其中控制驱动模块控制横滚环架的

翼展扫描运动以及画幅式高光谱相机的外触发曝光 成像,单板计算机作为上位机负责存储画幅式高光 谱相机获取的地物数据,电池则负责为系统供电。

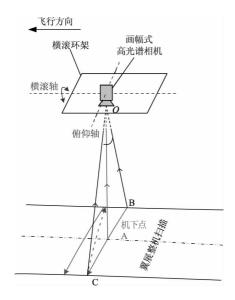


图 6 系统光机结构示意图 Fig. 6 Schematic diagram of the system optical-mechanical structure

表 2 系统技术指标

Tab. 2 The system technical specifications

相机类型	画幅式面阵高光谱相机		
谱段范围/nm	600 ~ 1000		
波段数	25		
光谱分辨率/nm	< 15		
单波段像元数	409 × 216		
角分辨率/mrad	1. 1		
空间分辨率	16. 5 cm@ 150 m		
单帧视场/(°)	25. 8		
总视场/(°)	90		
重叠率	20 %		
适应速高比	不大于 0.063		
尺寸/mm	300 × 200 × 250		
重量/kg	3		

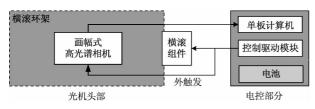


图 7 系统实现框图

Fig. 7 The system chart

4 试验及分析

2017年6月,在太仓市进行了旋翼无人机载外场飞行试验,无人机飞行速度为8 m/s,飞行高度150 m,试验现场照片如图8所示。



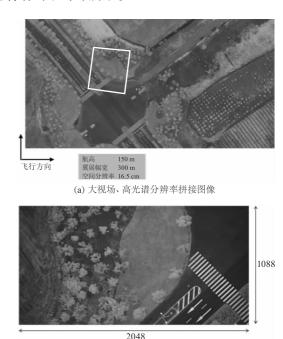
图 8 外场飞行现场照片

Fig. 8 Photo of the outfield flight scene

外场飞行试验获取了像质清晰的大视场、高光谱分辨率对地观测图像,飞行数据的大视场拼接处理效果如图 9(a) 所示。根据飞行参数以及总视场可以算出,翼展方向的幅宽覆盖为 300 m,可以实现 8.64 km²/h 的大面积探测,相比于单相机成像 1.98 km²/h的探测面积,飞行作业效率提高约 3.4 倍。

图 9(b)是图 9(a)中方框区域对应的单帧高光 谱图像,该图像像质清晰,地物细节丰富,甚至可以 分辨出高压电线。图像既包含二维空间信息,又包 含目标波段的所有光谱信息。

根据马赛克型滤光片的几何分布关系,对图 9 (b) 所示的单帧高光谱图像进行解算,获取了同时包含二维空间数据和一维高光谱数据的三维数据立方体,如图 9(c) 所示。



(b) 单帧高光谱图像

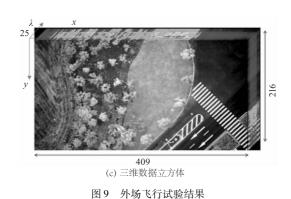


Fig. 9 Results of the outfield flight test

5 结束语

针对传统推扫型高光谱成像系统不适用于无人机大视场、高光谱遥感应用的问题,本文提出了一种新型的大视场高光谱相机,描述了系统实现方法,并进行外场飞行试验,获取了像质清晰的大视场、高光谱分辨率对地观测图像,飞行作业效率为8.64 km²/h,相比于单相机成像每小时1.98 km²/h的探测面积,飞行作业效率提高约3.4倍。由于马赛克型分光器件直接制作在面阵探测器上,上述新型大视场高光谱相机具有光机结构简单、重量轻和体积小等优点,并且可以单次凝视曝光同时获取二维空间的三维数据立方体(二维空间数据和一维高光谱数据),在无人机高光谱遥感领域具有一定的推广应用价值。

参考文献:

- [1] Sheng Hu, Chao Haiyang, Coopmans C., et al. Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, calibration and applications [J]. IEEE Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), 2010:38 – 43.
- [2] LI Xiangdi, HUANG Ying, ZHANG Peiqing, et al. Infrared imaging system and applications [J]. Laser & Infrared, 2014,44(3):229-230. (in Chinese)

- 李相迪, 黄英, 张培晴, 等. 红外成像系统及其应用 [J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 229-230.
- [3] Derick M Cochrane, Paul A Manning, Tim A Wyllie. Uncooled thermal imaging sensor for UAV applications [C]. Infrared Technology and Applications XXVII. Proc. SPIE, 2001,4369;168-177.
- [4] SHAO Hui, WANG Jianyu, XUE Yongqi. Key technology of pushbroom hyperspectral imager(PHI)[J]. Journal of remote sensing,1998,2(4):251-254. (in Chinese) 邵晖,王建宇,薛永祺. 推帚式超光谱成像仪(PHI)关键技术[J]. 遥感学报,1998,2(4):251-254.
- [5] WANG Jianyu, SHU Rong, et al. Introduction to imaging spectrum techniques [M]. Beijing: Science Press, 2011.
 (in Chinese)
 王建宇,舒嵘,等. 成像光谱技术导论[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [6] GE Mingfeng, QI Hongxing, WANG Yikun, et al. Hyperspectral imaging remote sensing technology based on light-weight unmanned helicopter platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (11): 3402 3407. (in Chinese) 葛明锋, 亓洪兴, 王义坤, 等. 基于轻小型无人直升机平台的高光谱遥感成像系统[J]. 红外与激光工程, 2015,44(11):3402 – 3407.
- [7] DUAN Weibo, LI Daqi, YU Deming, et al. Design and fabrication of an integrated order blocking filter for hyperspectral imaging system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(4):430-434. (in Chinese) 段微波,李大琪,余德明,等.一种用于超光谱成像系统中消高级次光谱集成滤光片的设计与研制[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4):430-434.
- [8] Imec. Hyperspectral snapshot mosaic impader[R]. Shanghai: Isuzu Optics Corp., 2015.