

基于轻小型无人直升机平台的高光谱遥感成像系统

葛明锋^{1,2}, 亓洪兴¹, 王义坤^{1,2}, 王雨曦^{1,2}, 马彦鹏^{1,2}, 蔡能斌³, 舒嵘¹

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083)

摘要: 设计并实现了一套基于轻小型直升无人机的的高光谱遥感成像系统。该系统包括高光谱成像, 采集存储, 姿态和位置测量及地面监视控制等部分。在烟台和扬州分别进行了两次飞行实验, 获取了高分辨率的高光谱数据。分析了该系统在无人机平台上工作的性能。对实验数据分析后, 发现平台姿态和位置的变化对地物目标的光谱信息无明显的影响, 但对几何特性有明显影响, 实验中平台的振动导致图像在横向有 4 个像元的抖动。最后利用 POS 数据对图像数据进行了几何校正, 并分析了校正误差的来源。

关键词: 遥感技术; 轻小型无人直升机; 高光谱成像; 几何校正

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3402-06

Hyperspectral imaging remote sensing technology based on light weight unmanned helicopter platform

Ge Mingfeng^{1,2}, Qi Hongxing¹, Wang Yikun^{1,2}, Wang Yuxi^{1,2}, Ma Yanpeng^{1,2}, Cai Nengbin³, Shu Rong¹

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-Ei Electronics Technology CaS, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Key Laboratory of Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: A set of hyperspectral imaging remote sensing instruments was designed and completed. The system included hyperspectral imaging subsystem, data acquired and storage subsystem, monitoring and controlling on ground subsystem and position and orientation subsystem. To validate the performance of this system, a serial of experiments had been made in Yantai and Yangzhou, high geometric resolution hyperspectral data was acquired. After analyzing the spectral characterization and geometric characterization of the acquired data, the results show that the position and orientation of unmanned helicopter have no distinct effect on spectral characterization, but the shake of motor of unmanned helicopter results in 4 pixels dither of the image in roll in the experiment. Finally, the geometric information of the hyperspectral data was corrected with the data of position and orientation subsystem and the error of the geometric correction was analyzed.

Key words: remote sensing technology; light weight unmanned helicopter; hyperspectral imaging; geometric correction

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121103)

作者简介: 葛明锋(1987-), 男, 博士生, 主要从事无人机载遥感方面的研究。Email: gmingfeng@qq.com

导师简介: 亓洪兴(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高光谱成像方面的研究。Email: qhx@mail.sitp.ac.cn

0 引言

近年来,随着航空,导航,通讯及计算机等技术的不断发展,无人机性能不断提升,已经逐步从研究阶段进入实用阶段。与有人机相比,无人机有起飞环境要求低,操作简单,使用成本低等诸多优点。在遥感领域,无人机平台已经开始应用在农业资源调查^[1],环境监测^[2]以及自然灾害救援^[3]等方面。由于无人机平台载重有限,姿态稳定性差,目前应用在该平台的遥感系统以面阵成像为主。而高光谱遥感成像技术在目标探测与分类中有着重要作用,将其应用到无人机平台尚处于研究阶段。近年来国外报道了基于固定翼无人机平台高光谱成像实验^[4-5]和基于无人直升机平台的干涉型高光谱成像实验^[6],国内只是报道了在重型无人机(载重150kg)平台上的高光谱成像实验^[7]。

文中研制出一套应用在轻小型无人直升机的推帚式高光谱遥感成像系统。与参考文献[4-5,7]中使用的固定翼无人机相比,无人直升机无需起飞跑道,而且可以低空低速飞行,获取更高分辨率的高光谱数据。与参考文献[6]中使用的干涉型高光谱成像系统相比,推帚式高光谱成像系统可以同一时间获取地物目标的光谱信息。在烟台和扬州等地进行多次飞行实验,获取了分辨率为 6 cm 的高光谱数据,并对实验数据进行分析,验证了该系统在无人直升机平台上工作的性能。

1 无人直升机高光谱遥感成像系统集成

1.1 整体结构

无人直升机高光谱遥感成像系统的组成如图 1

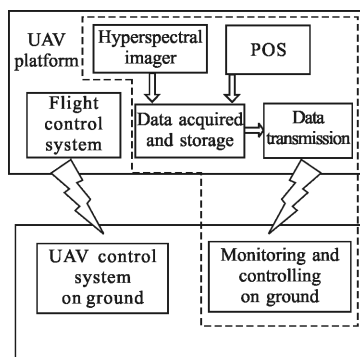


图 1 无人机高光谱遥感成像系统

Fig.1 Hyperspectral imaging remote sensing system based on unmanned helicopter

所示,分为无人机平台和地面站两部分。无人机平台搭载遥感仪器,地面站用于对无人机和遥感仪器监视和控制。

1.2 子系统功能

为了保证无人机和遥感仪器工作时互不干扰,这两个系统使用独立的电源系统和无线数据通道,图 1 中虚线框内是高光谱遥感成像系统,虚线框外是无人机系统。

1.2.1 无人机系统

无人机系统主要分成地面控制站和机上控制系统。根据遥感仪器的性能和需要遥感的区域,地面控制站规划无人机的飞行速度、高度及航线,将指令发送到机上控制系统,并根据机上控制系统返回的数据实时监视无人机工作状态。

1.2.2 高光谱遥感成像系统

高光谱遥感成像系统主要由以下几个子系统组成:高光谱成像子系统、位置姿态测量子系统、采集存储子系统、监视遥控子系统以及地面监控站。各子系统的功能如下。

(1) 高光谱成像子系统

高光谱成像系统用于获取地物目标的光谱特征和几何特征,由成像系统、分光系统和探测器组成。文中采用的是推帚式高光谱成像系统,具体原理可以参照参考文献[8]。考虑到轻小型直升无人机的载重有限,分光系统采用结构紧凑的 PGP 分光计。文中研制的高光谱成像仪参数见表 1。

表 1 高光谱成像仪参数

Tab.1 Characteristics of hyperspectral imager

Parameter	Value
Weight/kg	1.5
Spectral bands	344
Crosstrack pixel	464
<i>F</i> number	5.6
I FOV/mrad	0.80
FOV/(°)	20
Frame/fps	<40
Smile and keystone/pixel	<1

(2) 姿态位置测量子系统

推帚式成像的每一个扫描行的外方位元素都不

相同,无法通过设立地面控制点计算外方位元素,进行几何校正。需要使用姿态位置测量仪(POS)实时测量每一扫描行成像时探测器的姿态和位置。系统采用的 POS 是星网宇达的 ADU7635,相关参数见表 2。

表 2 ADU7635 参数

Tab.2 Characteristics of ADU7635

Parameter	Value	
Range	Heading	0-360°
	Roll	±90°
	Pitch	±75°
Accuracy	Heading	0.2°
	Roll pitch	0.1°
	Position	2 m/2 cm(RTK)
Power	25 W	
Weight	4.1 kg	

(3) 机上采集存储子系统

文中研制的高光谱成像仪数据输出速率最高可达 12.2 MB/s,高速率数据通过无线数据链路直接传回地面站实现的成本很高,所以必须实现机上存储。文中使用 Commell 公司生产的 LS37B 单板计算机作为数据采集存储设备,并用 Labview 软件编写采集控制软件,可以同时记录高光谱数据和姿态数据。

(4) 监视遥控子系统和地面控制站

机上和地面遥控子系统主要是为了实现实时监测高光谱遥感成像系统的工作状态,并根据成像情况对仪器参数进行实时修改。考虑到下行图像,数据量大,而上行的控制信号只需要几个字节的数字信号,二者数据量严重不对称,所以该系统采取双通道方式。单波段的图像数据和光谱信息转换成视频信号通过 5.8 GHz 频率的图传设备发送到地面控制站,控制信号以短信方式通过基站上传到机上遥控系统的电信数据模块。

2 飞行实验

2.1 微型电动无人直升机飞行实验

2014 年 4 月中旬在烟台某体育馆进行了第一次飞行实验,实验仪器及无人直升机情况如图 2 所示。实验仪器挂载在无人直升机头部,其中 1 是数据采集存储器和遥控设备,2 是高光谱成像仪,3 是锂电

池。由于该无人直升机载重(3.5 kg 以内)限制,这次实验未安装 POS 系统,无法对实验数据进行几何校正,所以此次实验以无人直升机平台对光谱测量影响的研究为主。无人直升机控制以操控员地面遥控方式进行。部分实验结果如图 3 所示。

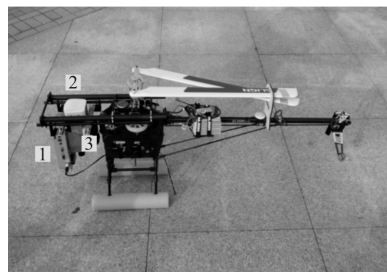


图 2 高光谱遥感仪器安装图 1

Fig.2 Micro weight unmanned helicopter fixed with hyperspectral imagery

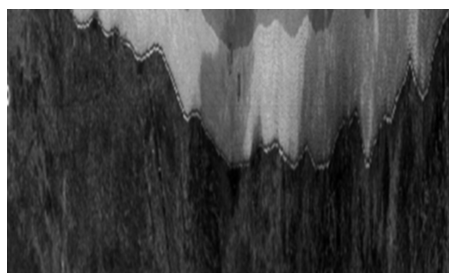


图 3 飞行实验获取部分数据

Fig.3 Partial hyperspectral data acquired over the flight test in Yantai

2.2 轻小型无人直升机飞行实验

2014 年 4 月底在扬州与中科院遥感与数字地球研究所合作,进行了第二次无人直升机飞行实验。实验仪器及无人直升机情况如图 4 所示,仪器以挂载的方式安装在无人直升机底部。该无人直升机型号为 TC1235,为交叉式双旋翼无人直升机,载重可达 35 kg。此次实验搭载了完整的高光谱遥感成像系统。飞行相关参数见表 3。



图 4 高光谱遥感仪器安装图 2

Fig.4 Light weight unmanned helicopter fixed with hyperspectral imagery

表 3 飞行实验参数

Tab.3 Flight configuration

Parameter	Value
Area/m	100×100
Longitude	119.489 0
Latitude	32.491 1
Altitude AGL/m	80
Speed/m·s ⁻¹	2
Swath width/m	28
GSD/cm	6

3 实验结果与分析

与航天航空等平台相比,无人直升机平台重量轻,容易受到气流等因素的影响,姿态稳定性差。扬州飞行实验中 POS 测量的某一航带内平台的姿态数据如图 5 所示,40 s 内俯仰角范围为(-3.80°, -0.50°),横滚角范围为 (-2.65°, 0.2°),航向范围为 (178.14°, 185.20°)。由于 TC1235 采用汽油发动机,发动机的转动方向与横滚方向一致,会造成平台在横滚方向的振动。将横滚数据局部区域放大,可以明显看出平台在横滚方向有幅值为 0.2° 的高频振动(频率在 15~16 Hz)。平台姿态和位置变化对推帚式成像的影响如图 6 所示。若平台以速度 v 平稳飞行, t_i 时刻像元 j 在曝光时间 Δt 内对应的地物目标将是 S_i ,平台姿态和位置的变化会导致实际对应的地物目标是 S'_i ,目标的位置和大小均会发生改变。文中将结合两次飞行实验,分析平台姿态和位置的变化对光谱信息和几何信息获取的影响。

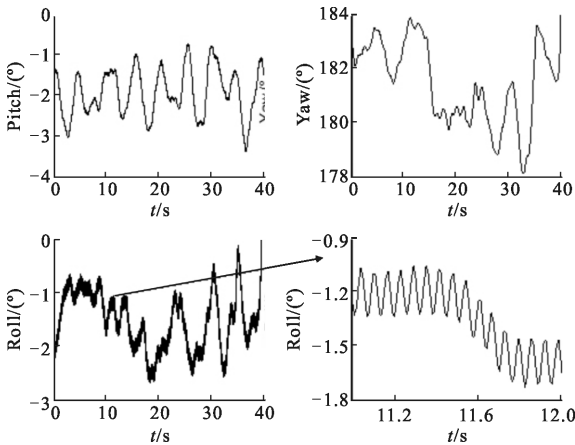


图 5 无人直升机平台姿态变化

Fig.5 Position and orientation of the unmanned helicopter

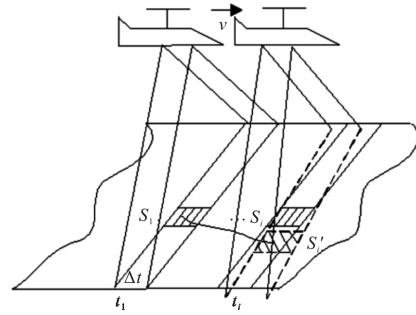


图 6 无人直升机姿态和位置变化对推帚式成像的影响

Fig.6 Effect of the position and orientation of the unmanned helicopter to push-broom imagery

3.1 平台姿态对光谱信息的影响

系统中采用是推帚式高光谱成像的方式,地物目标的光谱信息可以同时获取,曝光时间内平台姿态的变化只对成像区域位置和形状有影响,不会引起光谱信息变化。烟台飞行实验中,获取的植被和泥土的光谱信息见图 7(a),落地后静止状态下测得的相应目标光谱信息见图 7(b)。经比较可知相同的物体的光谱特性没有明显差异,而且在 760 nm 附近的氧气吸收峰也没有偏移。

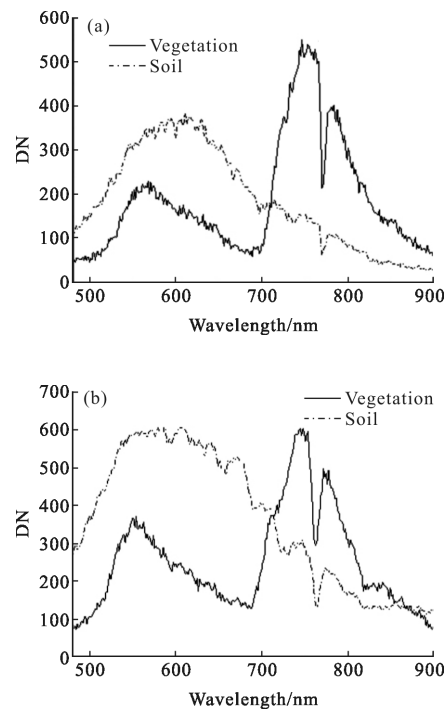


图 7 无人直升机(a)和地面(b)获取的植被和泥土的光谱信息

Fig.7 Spectral information of the vegetation and soil acquired from unmanned helicopter platform(a) and ground(b)

3.2 平台姿态对几何信息的影响

如图6所示,平台姿态和位置的变化会导致像元成像的区域偏离预定的目标,引起目标的几何形变。图8(a)是含有黑白光学靶标的图像数据,可以明显看出道路的扭曲和矩形靶标的形变。图8(b)是靶标放大图,可以看出标靶边缘有4像元左右的抖动。经前面分析可知,平台在横滚方向振动幅值为 0.2° ,而仪器的空间分辨率为 0.048° ,恰好会引起4个像元偏移。

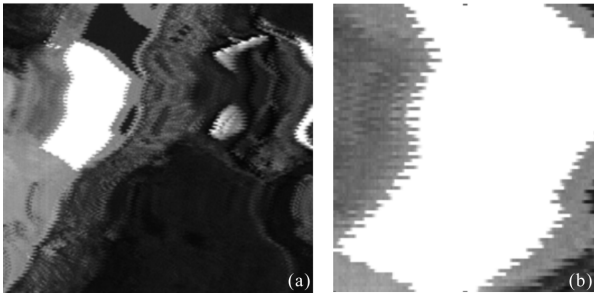


图8 扬州飞行实验的部分数据(a)和靶标区域的放大图(b)
Fig.8 Hyperspectral data acquired over the flight test in Yangzhou
(a) and reflectance target (b)

3.2.1 几何校正与算法选择

为了消除平台姿态和位置变化的影响,恢复地物目标的几何特性,需要利用地物目标与像点的共线关系,进行几何校正。假设地面目标坐标为 (X, Y, Z) 在图像上坐标点是 $(x, y, -f)$,成像时投影中心是 (X_s, Y_s, Z_s) ,这三者关系可由公式(1)表示:

$$\begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:参数 $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3, c_1 \sim c_3, X_s, Y_s, Z_s$ 可以通过POS记录的外方位元素计算出,详细的计算过程可以参考文献[9-10]。

航天航空平台姿态变化缓慢,可认为相邻扫描行近似平行,一般采取间接法^[10]进行几何校正。首先通过公式(1)求出 (x, y) 表达式,再通过二分法等算法^[11]求出地面点 (X, Y) 对应最佳扫描行,计算出在图像中的坐标,进行重采样,求得地面点 (X, Y) 的值。但是无人直升机平台姿态变化剧烈,而且伴有高频振动,相邻扫描行无法满足近似平行这一条件,所以只能采取直接法^[10]进行几何校正,将高光谱图像数据根据公式(1)依次填入地面图像中。图8的图像数据

经几何校正后的结果如图9所示,与原图相比,标靶的几何特性得以恢复,振动引起的锯齿状也得以修正,图像右侧的报废的飞机也可以清晰看出。



图9 飞行数据校正后的图像
Fig.9 Hyperspectral data after correction

3.2.2 几何校正误差分析

从图9可以看出,校正后的图像仍有一定的误差,如矩形标靶的形变,道路的弯曲。这是由姿态和位置的测量误差引起的。一是姿态角度测量精度达不到像元级,高光谱成像仪的瞬时视场为 0.048° ,而POS的姿态测量和航向的角度精度分别为 0.1° 和 0.2° 。二是GPS定位精度达不到仪器空间分辨率,由于实验条件限制,GPS采用单点定位,精度仅为米级,而仪器空间分辨率为分米级。对图9中白色靶标进行分析,提取轮廓,各边形变程度见表4。可以看出姿态和定位的误差引起了最大5.59个像元的误差。

表4 几何校正后标靶误差

Tab.4 Geometric errors of the reflectance target after correction

Line	RMSE/pixel	MAX error/pixel
1	1.21	2.55
2	1.83	4.69
3	2.41	4.65
4	3.07	5.59

4 结论

将高光谱遥感成像技术应用在轻小型无人直升机平台上,可以降低作业成本,提高空间分辨率,也是对航空航天高光谱遥感成像的有益补充。在烟台和扬州的两次飞行实验表明,研制的高光谱遥感成像系统应用在轻小型无人直升机平台上是可行的。平台的姿态和位置变化会引起图像的几何形变,但

可以通过 POS 记录的外方位元素来进行校正。在减小无人直升机振动对系统的影响和提高 POS 精度等方面还待进一步研究,以提高系统的实用性。

参考文献:

- [1] Rango A, Laliberte A, Herrick J E, et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3(1): 033542-15.
- [2] Koo V C, Chan Y K, Vetharatnam G, et al. A new unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar for environmental monitoring [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 122: 245-268.
- [3] Lei Tianjie, Li Changchun, He Xiaoying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(1): 178-183. (in Chinese)
雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178-183.
- [4] Hruska R, Mitchell J, Anderson M, et al. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(9): 2736-2752.
- [5] Zarco-Tejada P J, González-Dugo V, Berni J A J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 322-337.
- [6] Saari H, Pellikka I, Pesonen L, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications[C]//SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81740H-15.
- [7] Duan S B, Li Z L, Tang B H, et al. Land surface reflectance retrieval from hyperspectral data collected by an unmanned aerial vehicle over the Baotou test site [J]. *PLOS One*, 2013, 8(6): e66972.
- [8] Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian. The Introduction Imagery Spectral Technology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 93-198. (in Chinese)
王建宇, 舒嵘, 刘银年. 成像光谱技术导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 93-198.
- [9] Wang Shunmin, Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, et al. Geometric correction of linear push-broom hyperspectral camera side-scan imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 579-585. (in Chinese)
王书民, 张爱武, 胡少兴, 等. 线推扫式高光谱相机侧扫成像几何校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 579-585.
- [10] Su Jiabing. Principles and Applications of Remote Sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2013, 133: 108-113. (in Chinese)
孙家柄. 感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013, 133: 108-113.
- [11] Wang Mi, Hu Fen, Wang Haitao. A fast algorithm for back project calculation of linear array pushbroom imageries based on object-space geometric constraints [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 385-390. (in Chinese)
王密, 胡芬, 王海涛. 一种基于物方几何约束的线阵推扫式影像坐标反投影计算的快速算法 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 385-390.