DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2019. 09. 018

多旋翼无人机载高光谱成像系统几何 和辐射校正方法研究[®]

周蕊,欧毅,虞豹,王茜

重庆市农业科学院农业科技信息中心,重庆 400060

摘要:针对农林环保等行业应用,结合成像光谱仪与无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)技术,有效地解决了 高光谱遥感数据不足和空间分辨率低等问题.但UAV高光谱成像系统面临的设备昂贵、数据质量差和效率低等一 系列问题,致使低成本高效便捷的UAV高光谱成像系统成为了研究的关键.介绍了将室内成像光谱仪搭载在多旋 翼UAV上采集数据的高光谱成像系统,在试验区布设控制点和标准灰布,用GPS-RTK测量控制点的三维坐标和 ASD 地物光谱仪测量标准灰布的反射率以验证系统的成像精度.从辐射和几何两个方面进行分析评价.在辐射方 面,经过辐射定标和 MODTRAN 模型大气校正的高光谱数据中校准灰布的反射率与 ASD 地物光谱仪测量的结果 十分吻合;在几何方面,用GPS-IMU 数据进行初始几何校正的图像与地面控制点坐标以分析图像处理后的几何误 差,并提出通过改正姿态偏转角的方法提高图像的地理位置精度.

关键 词:高光谱遥感;多旋翼无人机;辐射校准;几何校正;成像光谱仪

中图分类号: TP7 文献标志码: A 文章编号: 1673 - 9868(2019)09 - 0141 - 07

高光谱遥感技术广泛应用于农林、生态环境等^[1-3]方面,如作物监测、产量预测^[4-5]和环境监测,并根据特征波段反演植被冠层的含水量、叶绿素和氮等物理参数^[6].目前,高光谱遥感一般是将传感器安装在载人飞行器上或有限的航天平台上.相比星载高光谱成像系统的质量和精度而言,机载高光谱影像具有很高的空间和光谱分辨率等优势,而且相较于星载而言具有灵活、运营成本低等特点^[7-10].但是,针对高性能的高光谱成像系统,如 AVIRIS 和 HyMap^[11-12]机载可见光-近红外高光谱成像仪,此类均是搭载在载人飞行器上,而且载人飞行器很长时间才能安排调度,且成本费用较高,容易受天气干扰.此外,载人平台的提供商的时间调度困难.随着轻小型无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术的发展,基于 UAV 的高光谱成像系统可以克服飞行器调度和飞行空域限制等难题^[13].那么就可以采用新的方式,使用按需定制的平台,在数小时内快速地完成高光谱数据^[15-16]的采集工作.

近年来,UAV 飞行技术在军事、摄影测量和倾斜摄影等方面应用较为成熟.到目前为止,相关研究领域已经将 UAV、旋翼或固定翼无人机平台与视频、多频带数字相机、量测相机、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和激光扫描等中的某一种或多种配合使用^[17-20].同时,也有很多无人机载高 光谱成像系统的研究,主要有框幅式和推扫式,然而,很少有研究成功测试了轻小型、旋翼或固定翼无 人机上搭载推扫式高光谱传感器^[21-22].而且,现在很多科研院所购置的成像光谱仪仅用于地面高光谱的 研究,失去了高光谱遥感本质上的意义.因此,本研究提出了一种地面成像光谱仪、车载全球定位系统 (global positioning system, GPS)和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)与多旋翼无人机集成

① 收稿日期: 2018-08-20
基金项目:重庆市科技服务平台专项项目(cstc2015ptfw-ggfw80001);重庆市科技计划项目(cstc2017jxjl00014).
作者简介:周 蕊(1980-),女,副研究员,主要从事农业无人机高光谱遥感的研究.
通信作者:欧 毅,硕士,研究员.

的低成本线阵推扫式高光谱遥感成像系统.因高光谱遥感成像系统需要经过辐射和几何校正才能进行 定量的科学分析,本研究通过实验测试并评价分析此无人机载高光谱成像系统所采集高光谱图像的辐 射校准和几何校正的精度.

1 系统设计

1.1 高光谱传感器

系统设计以 UAV 为中心,根据 UAV 载荷重量选择合适的成像光谱仪,原则上选择尺寸紧凑,成本和 重量相对低的成像设备.本研究选择美国 Resonon的 PIKA L 可见光-近红外推扫式成像光谱仪(图 1),光 谱范围是 400~1 000 nm,最小光谱分辨率为 2.1 nm,光谱分辨率可根据需求而更改,成像仪裸质量为 0.45 kg,尺寸大小为 10.0 cm×12.5 cm×5.3 cm. 该系统通过机载微型电脑控制数据的采集和存储.

1.2 多旋翼 UAV 成像系统集成

用于本研究的搭载平台为八旋翼电动 UAV,该机型载荷可达 10 kg,抗风性能强,续航时间可达 30~40 min,完全可以满足小范围的农田和环境等监测. UAV 自带自动导航驾驶系统,具有独立的 GPS-IMU 惯性导航定位系统,与获取图像数据中的位置和姿态信息的 GPS-IMU 互不干扰. 多旋翼 UVA 的 PIKA L 高光谱成像系统见图 2.





图 2 多旋翼 UAV 高光谱成像系统

为了快速有效地对原始高光谱图像进行地理配准,机载 GPS-IMU 必须满足一下条件:

(1) 必须确定 GPS, IMU 和传感器之间的相对位置和方向;

(2) 飞行期间 GPS, IMU 和传感器之间的相对位置和方向必须保持不变;

(3) GPS, IMU 和传感器之间必须满足足够精度的时钟同步.

为了实现这一点,系统设计中采用了大疆生产的 RONIN 三轴自稳云台,可有效地消除飞机振动产生的位置和方向上的测量误差(表1).惯导系统、成像光谱仪、微型电脑和云台组合挂载于无人机底部,总质量不超过 5 kg.

参数	数 值		
	横滚	0. 1°	
GPS-IMU 精度(Ellipse)	航向	0. 2°	
	定位	0.6 m(SBAS), 2 cm(RTK)	
空间分辨率		4.6 cm	
光谱分辨率		4.2 nm	
波段数		147	
空间通道数		900	
飞行高度		150 m	
地面高程		4.2 m	

表1 多旋翼 UAV 高光谱成像系统参数

2 实验方法

2.1 实验数据采集与方法

本研究实验数据于 2017 年 4 月 26 日在河北廊坊无人机飞行测试基地采集,该测试区地势平坦,测试 区域有人工足球场和农田旱地,裸土植被均有覆盖,具有较强的几何特性和地物特征,并且在飞行区域铺 设反射率为 35%的人工反射校正参考布.为了评价图像预处理的几何位置精度,在地面均匀布设了 113 个 地面控制点,喷涂红漆加以标识,采用南方 S86 型 GPS-RTK 测量准确的地面控制点的三维坐标.数据采 集时间在北京时间 13:00-15:00 之间,此时,天气晴朗无云,光照稳定,有利于成像光谱仪成像.飞行结 束后,立即用 ASD(analytica Spectra Devices)公司的 FieldSpec-4 地物波谱仪测量校正灰布的不同部位共 30 组反射光谱,取平均值作为校正灰布的标准反射光谱.本次实验飞行 2 个航次,共获取 6 幅高光谱立方 体,以第一幅高光谱影像为例(图 3).

2.2 UAV 高光谱影像预处理

首先,根据仪器制造商提供的辐射定标文件对高光谱图像进行辐射定标,将原始图像 DN 值转化为辐射亮度数据,并扣除仪器本身自带的噪声.然后,将辐射亮度数据经过大气校正转换成地面光谱反射率,本研究采用 MODTRAN 辐射传输模型反演地物反射率图像.最后,结合 GPS-IMU 的坐标和姿态数据进行几何校正(图 4).



图 3 原始高光谱数据



图 4 预处理后的高光谱影像

3 评价分析

3.1 辐射分析及评价

3.1.1 高光谱图像的信噪比

信噪比(signal to noise ratio, SNR)是高光谱成像仪通常要求的参数.本研究评价描述了高光谱图像 SNR 的计算,可以计算其良好的近似为

$$SNR(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda) \frac{\lambda}{hc}}{\sqrt{\left[\Phi(\lambda) \frac{\lambda}{hc}\right] + \left[B(i_{\text{Dark}})\Delta t\right] + \left[b(e_{\text{Read}}^2)\right]}}$$
(1)

其中: $\Phi(\lambda)$ 为高光谱成像仪收集的信号,单位为焦耳;*h* 是普朗克常数;*c* 是光速;*B* 是采集信号时进行 合并操作数目;*i*_{Dark}为暗电流噪声,单位为"个电子/s";*e*_{Read} 是电子中的读取噪声; Δt 是以秒为单位的 积分时间. 采用(1)式计算 147 个波段的信噪比(图 5). 从图 5 可以看出, UAV 高光谱影像的信噪比在波段首尾 位置较低, 而且不同波段的信噪比均存在一定的差 异, 信噪比与反射率成正相关, 反射率高的波段 SNR 相对会高一些. 波段首尾位置信噪比低的原因是成像 光谱仪在紫光附近和近红外附近受到噪声干扰明显导 致, 在紫光附近的反射率较低, 近红外的成像信号没 有可见光部分稳定, 且近红外波段受噪声干扰更为明 显. 因此可以通过对图像降噪的方法提高信噪比, 进 而也平滑了反射率光谱曲线.



3.1.2 评价光谱曲线

在高光谱遥感图像辐射分析中,除了计算图像的

信噪比,最为关注的是光谱曲线的能否准确反映地物的真实情况.研究中购置的标准参考布的反射率在 35%左右,并在同一时间用 ASD 地物光谱仪测量不同部位的反射率的平均值作为标准参考.实验将 ASD 地物光谱仪测量的标准参考布反射率与高光谱图像中标准参考布进行对比(图 6),以验证 UAV 成像系统 采集的光谱数据的准确性.

为了进一步分析 UAV 机载成像系统的性能,从高光谱影像中提取几种典型地物的光谱曲线,主要有 植被、人工草坪、土壤和校正参考布,改4种地物光谱曲线如图7所示.从图7可以看出,4种地物在 UAV 成像系统中获取的光谱曲线在可见光-近红外部分最为平滑,受干扰最小,能够准确地反映相应的地 物光谱信息,从而也证明 UAV 高光谱成像系统获取数据稳定可靠.





高光谱图像经过 GPS-IMU 采集的坐标和姿态信息进行地理配准和几何校正之后,因 GPS-IMU 测量 存在一定的误差,图像上地理位置仍然会有误差存在.因为 GPS-RTK 的测量误差只有几个厘米,而机载 GPS 属于单点定位模式,GPS-RTK 的测量精度远远高于机载 GPS 的精度,故用地面 GPS-RTK 测量的坐 标值作为控制点准确值,计算在图像中找到有红色标识的拐角点和人工标记的地面控制点,获取影像上有 地面测量数据相应标识点的坐标信息,并与 GPS-RTK 测量的坐标进行比较.在评价图像几何形变时,通 常只考虑平面上的畸变程度,从而本研究计算 WGS-84 坐标系下 Δx,Δy 的值以评价机载高光谱图像的几 何精度,统计6幅 UAV 高光谱影像的几何精度见表 2.

参数	$\Delta x / \mathrm{m}$	$\Delta y/m$	RMSE/m
Image 1	2.31	1.62	2.82
Image 2	2.17	1.52	2.65
Image 3	2.05	1.47	2.52
Image 4	2.24	1.35	2.61
Image 5	2.09	1.42	2.53
Image 6	2.13	1.30	2.49
平均误差	2.16	1.45	2.60

表 2 几何校正之后 UAV 高光谱影像的几何误差

高光谱图像经过几何校正后,图像中地物的形状与实际相同,但是,若需要满足测绘制图的精度还 是远远不够.本着低成本高效率的宗旨,所选择的机载 GPS-IMU 为单点定位模式,定位精度有限,价格 最便宜,但是已经足够满足高光谱遥感在农林生态行业的应用.若需要提交图像的几何地理位置精度, 可以从以下两个方面提高:一方面可以从设备上改进,采用 RTK 测量定位采集坐标信息和使用高精度 的惯导系统,但这又增加了 UAV 集成的成本;另一方面,根据地面控制点计算图像存在的偏差,反算 传感器的姿态偏移角度误差,并通过平差减小误差,重新对图像进行几何校正.因而,本研究采用第 2 种方法提高位置精度,表 3 为调整姿态偏移角度后计算图像的几何误差.从表 2 和表 3 对比分析,可以 看出不管是经纬度还是总的位置误差都有明显的提高.而且,针对第一种情况,也做过相应实验,位置 精度能达到厘米级.

参数	$\Delta x / \mathrm{m}$	$\Delta y/m$	RMSE/m
Image 1	0.53	0.35	0.63
Image 2	0.47	0.32	0.74
Image 3	0.25	0.46	0.52
Image 4	0.34	0.35	0.49
Image 5	0.29	0.42	0.51
Image 6	0.41	0.31	0.66
平均误差	0.38	0.37	0.53

表 3 调整姿态角残差之后 UAV 高光谱影像的几何误差

4 结 论

本研究从充分利用室内成像光谱仪、节约成本和轻便地获取高光谱遥感影像数据等角度考虑,基于 机载 POS 的航测原理,将价格便宜的 GPS-IMU 和小型的成像光谱仪紧凑地集成于多旋翼无人机上采集 合格高光谱数据.研究通过增加三轴自稳云台以减小 UAV 自身机械振动所产生的测量误差,从而能获 取更准确的姿态、位置和光谱信息.利用测量的辅助数据对高光谱图像进行辐射定标、大气校正和几何 校正等预处理工作,并从辐射和几何两个方面分析评价 UAV 高光谱成像系统的可靠性.实验结果表 明,组合 GPS-IMU 和高光谱成像设备通过三轴自稳云台挂载于多旋翼 UAV 上采集的高光谱影像数据 可靠,系统操作灵活便捷;而且,辐射和几何精度均可满足研究和应用的需求,达到了节约成本和现有 设备综合利用的目的.

参考文献:

[1] LI L T, REN T, MA Y, et al. Evaluating Chlorophyll Density in Winter Oilseed Rape (Brassica napus L.) Using Canopy Hyperspectral Red-Edge Parameters [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 126: 21-31.

- [2] ENTEZARI I, RIVARD B, LIPSETT M G, et al. Estimation of Methylene Blue Index in Oil Sands Tailings Using Hyperspectral Data [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95(1): 92-99.
- [3] ZHENG X T, YUAN Y, LU X Q. A Target Detection Method for Hyperspectral Image Based on Mixture Noise Model[J]. Neurocomputing, 2016, 216: 331-341.
- [4] GAO H L, GU X F, YU T, et al. Method Study and Uncertainty Analysis of Calibration Coefficients Validation Based on the Inner Mongolia Test Site [J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(9): 1540-1547.
- [5] RAFERT J. Advances in Hyperspectral Remote Sensing I: The visible Fourier Transform Hyperspectral Imager [J]. Journal of Spectral Imaging, 2015, 4: 1-5.
- [6] ZARCO-TEJADA P J, CATALINA A, GONZÁLEZ M R, et al. Relationships Between Net Photosynthesis and SteadySstate Chlorophyll Fluorescence Retrieved from Airborne Hyperspectral Imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 247-258.
- [7] YU S Q, JIA S, XU C Y. Convolutional Neural Networks for Hyperspectral Image Classification [J]. Neurocomputing, 2017, 219: 88-98.
- [8] MA X R, GENG J, WANG H Y. Hyperspectral Image Classification Via Contextual Deep Learning [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2015(1): 1-12.
- [9] 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.
- [10] DATT B, MCVICAR T R, VAN NIEL T G, et al. Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes [J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2003, 41(6): 1246-1259.
- [11] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, et al. Imagine Speuroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS) [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 227-248.
- [12] COCKS T, JENSSEN R, STEWART A, et al. The HYMAP Airborne Hyperspectral Sensor: The System, Calibration, and Performance [C] //Proceedings of the 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy. Switzerland: Zurich, 1998: 37-42.
- [13] ZABCIC N, RIVARD B, ONG C, et al. Using Airborne Hyperspectral Data to Characterize the Surface pH and Mineralogy of Pyrite Mine Tailings [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2014, 32(1): 152-162.
- [14] ACEVO-HERRERA R, AGUASCA A, BOSCH-LLUIS X, et al. Design and First Results of an UAV-Borne L-Band Radiometer for Multiple Monitoring Purposes [J]. Remote Sensing, 2010, 2: 1662-1679.
- [15] RANGO A, HAVSTAD K, ESTELL R. The Utilization of Historical Data and Geospatial Technology Advances at the Jornada Experimental Range to Support Western America Ranching Culture [J]. Remote Sensing, 2011(3): 2089-2109.
- [16] REMONDINO F, BARAZZETTI L, NEX F, et al. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling ——Current Status and Future Perspectens [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, 22: 1-7.
- [17] CHIABRANDO F, NEX F, PIATTI D. UAV and RPV Systems for Photogrammetric Surveys in Archaelogical Areas: Two Tests in the Piedmont Region (Italy) [J]. Journal of Archaeological Science, 2011, 38: 697-710.
- [18] NIETHAMMER U, JAMES M R, ROTHMUND S. UAV-Based Remote Sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and Results [J]. Engineering Geology, 2012, 128: 2-11.
- [19] STACY N J S, CRAIG D W, STAROMLYNAKA J. The Global Hawk UAV Australian Deployment: Imaging Radar Sensor Modifications and Employment for Maritime Surveillance [J]. In Proc ICARSS, 2002(2): 699-701.
- [20] BIESEMANA J, EVERAERTS J, LEWYCKYJ N. PEGASUS: Remote Sensing from a Hale-Uav [C] //ASPRS 2005 An-nual Conference. Moryland: Baltimore, 2005: 1-4.
- [21] WATTS A C, AMBROSIA V G, HINKLEY E A. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use [J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1671-1692.

[22] ZARCO-TEJADA P J, GONZALEZ-DUGO V, BERNI J A J. Fluorescence, Temperature and Narrow-Band Indices Acquired from a UAV Platform for Water Stress Using a Micro-Hyperspectral Images and a Thermal Camera [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 322-337.

Research of Geomatric and Radiation Correction of the Hyperspectral Imaging System Carried by a Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle

ZHOU Rui, OU Yi, YU Bao, WANG Qian

Agricultural Science and Technology Information Center, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400060, China

Abstract: For agriculture, forestry, environmental protection and other industrial applications, the technology of unmanned aerial vehicle (UAV) used in combination with imaging spectrometry has effectively solved the problems of insufficient data and low spatial resolution of hyperspectral remote sensing. But the UAV hyperspectral imaging system is facing a series of other problems, such as expensive equipment, poor data quality and low efficiency. Therefore, it is a key topic of research to develop a low-cost, efficient and convenient UAV hyperspectral imaging system. In this paper, we introduce a hyperspectral imaging system that collects the data of the indoor imaging spectrometer on a multi-rotor UAV. In the study reported herein, control points and standard gray cloths were set up in the test area, and the three-dimensional coordinates of the control points were measured with GPS-RTK and the reflectivity of the standard gray cloths was measured with the ASD feature spectrometer to verify the imaging accuracy of the system. The results of the test was analyzed and evaluated from the aspects of radiation and geometry. In radiation, the reflectivity of the calibrated gray cloth in the hyperspectral data corrected by the radiation calibration and the MODTRAN model was well consistent with that measured by the ASD feature spectrometer. The initial geometric correction of the image with GPS-IMU data and the ground control point coordinates were used to analyze the geometric error after the image processing. The authors recommended that the data accuracy of the geographical positions of the images be improved by correcting the attitude bias angle. In conclusion, this UAV hyperspectral imaging system improves the utilization of indoor imaging spectrometers, and the use of low-precision, low-cost imaging spectrometers and GPS-IMU to collect hyperspectral data is perfectly suited for industry applications.

Key words: hyperspectral remote sensing; multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV); radiometric calibration; geometric correction; imaging spectrometer