

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.03.006

# 基于无人机的用海项目施工期悬浮泥沙监测

孙芹芹, 张加晋, 罗美雪

(福建海洋研究所 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室, 福建 厦门 361013)

**摘要:**为实现对用海项目施工期悬浮泥沙扩散的实时跟踪监测, 尝试采用无人机携带可见光、多光谱传感器对古雷围填海项目的围堰区进行遥感探测。利用 Pix4d 软件对无人机携带的可见光及多光谱照片进行处理, 结果表明, 可见光及多光谱影像对水体中的悬浮泥沙分布均具有一定的识别能力。通过研究分析多光谱影像的光谱特征发现, 近红外波段对悬浮泥沙含量的升高较为敏感, 运用波段比值公式计算结果显示, 围堰内含沙水体经溢流口排入海域后浓度明显降低, 并可向南继续扩散约 300 m。该方法可克服遥感卫星影像时空分辨率低的特点, 为用海项目资源环境影响跟踪监测提供新的技术手段。

**关键词:**无人机; 多光谱; 悬浮泥沙; 填海

**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2029(2019)03-0034-05

随着无人机航空技术的日益成熟, 利用无人机携带可见光传感器在三维建模、数字测量等方面得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。与卫星遥感影像相比, 无人机航摄数据具有时间灵活、空间分辨率高、作业成本较低等优点<sup>[3-4]</sup>。越来越多的领域尝试利用无人机携带热红外、多光谱、高光谱等传感器进行温度识别、农作物估产、植被信息提取等应用<sup>[5-7]</sup>。根据海洋遥感监测原理, 水体中的叶绿素、悬浮泥沙等含量不同导致在一定波长范围内反射率不同, 从而形成不同的光谱特征<sup>[8]</sup>。对水体中悬浮泥沙浓度敏感的波段选择是进行遥感监测悬浮泥沙的基础和前提, 水中悬浮泥沙含量的增高会引起反射率的增加, 并使得波谱反射峰值向长波方向移动, 即所谓的红移现象<sup>[9]</sup>。为提高监测结果的准确性, 采用红光波段与蓝光波段的波段比值方程来反映不同水体区域的悬浮物浓度差异也取得了一定的成功<sup>[10-12]</sup>。但是, 国内外大多数的水色遥感研究均集中于对卫星遥感技术的应用, 对无人机携带多光谱传感器在水色遥感方面的应用研究尚未多见, 利用无人机携带可见光传感器进行水体含砂量的监测也仅停留在定性研

究应用阶段<sup>[13]</sup>。

围填海项目施工多采取先围后填的方式完成陆域回填, 在回填过程中势必引起施工区附近水体悬浮泥沙含量的增加, 导致海水透光率及含氧量的降低, 进而影响该地区海洋生物的生存环境条件<sup>[14]</sup>。由施工回填带来的悬浮泥沙扩散分布及范围是关系到项目用海所造成的海洋资源环境损失计算及赔偿的重要条件。为实现对围填海项目施工时悬浮泥沙扩散的实时动态跟踪监测, 本研究尝试使用无人机携带可见光、多光谱传感器对项目施工期附近水域进行遥感监测与分析, 该方法可克服遥感卫星影像时空分辨率低的特点, 为用海项目资源环境影响跟踪监测提供新的技术手段。

## 1 研究区域

古雷半岛位于我国东南沿海福建省漳州市, 东临台湾海峡, 地理位置独特。古雷石化工业园区是国家石化产业发展的重要位置之一, 根据古雷石化园区区域建设用海规划, 该区域土地资源严重不

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016J01178); 福建省公益项目资助(2017R1006-2, 2018R1006-2)

作者简介: 孙芹芹(1983-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事 3S 技术在海洋环境管理中的应用研究。E-mail: norasun1983@126.com

足,需填海 1 000 多 ha 用以保证石化产业项目的建设。自 2018 年开始各填海地块陆续开始施工,填海规模较大。本次研究区域位于古雷半岛西侧,测区已有部分填海,大部分区域已建立围堰。项目位置见图 1,红色矩形区域为本次航飞计划覆盖区域。



图 1 项目位置图

Fig.1 The location of study area

## 2 研究方法

### 2.1 仪器准备

本次航飞采用无人机为瑞士 Sensefly eBee 固定翼飞机,搭载的传感器为五通道多光谱相机 Parrot Sequoia,带有 4 个光谱带和 1 个 RGB 相机,可同时采集可见光和多光谱数据,其 4 个窄波段光谱带分别为绿、红、红边和近红外波段,其中心波长及其波段特征见表 1。

表 1 Parrot Sequoia 传感器波长及波段特征

Tab.1 Band wavelength and features of Parrot Sequoia

波段	名称	中心波长/nm	波宽/nm
1	绿	550	40
2	红	660	40
3	红边	735	10
4	近红	790	40

### 2.2 飞行设计

本项目设计飞行高度 120 m,地面分辨率 11.2 cm/px,旁向重叠 65%,航向重叠 80%,预计飞行时间 29 min,整体飞行面积 0.61 km<sup>2</sup>,拍照间距 21.5 m,相片幅宽 143.4 m×107.5 m,总体飞行航线长度约 20.8 km。

原定于 2018 年 3 月 8 号中午的飞行计划由于天气原因只能推迟至 3 月 9 日开展,由于风速过大,原定 1 个架次飞完的任务被分为 2 个架次进

行。第 1 架次航飞自 3 月 9 日 8 点 50 分开始,9 点 10 分飞机降落后进行电池更换,9 点 15 分飞机进行第 2 个架次飞行,9 点 30 降落飞行任务结束。由于本次航飞是为了获取同一时刻悬浮泥沙含量的相对分布情况,不需要绝对的反射率数据,因此,在飞行之前未对多光谱传感器进行白板校正。

### 2.3 数据处理

本次航行拍摄 RGB 照片 431 张,多光谱照片 1724 张。在 Pix4dmapper 软件中对 RGB 照片及多光谱照片进行分别处理,软件经过初始化、点云处理、DSM 正射影像制作和指数模型计算等步骤<sup>[15]</sup>,完成各类照片的内定向、相对定向和绝对定向后,最终生成正射影像成果图和多光谱模型成果图。

## 3 结果与讨论

### 3.1 可见光影像分析

本次航飞实际飞行 2 个航次,但是由于第 2 个航次航摄区域全部位于海面,所获取的照片几乎无特征点,且受海面反射、波浪等干扰较大,无法在 Pix4dmapper 软件中完成无人机海上 RGB 影像的拼接,因此仅实现了 2 个航次部分照片的拼接。

从可见光成像结果来看(图 2),航摄区域的围堰较为清晰,该围堰池南北长约 450 m,自围堤北部边界向南约 220 m 处有一溢流口正在向围堤西侧排水。围堤东侧的水面在溢流口处较为浑浊,可能与围堤内水流向溢流口汇集导致悬沙浓度增大有关。



图 2 RGB 成像结果

Fig.2 The result of RGB image

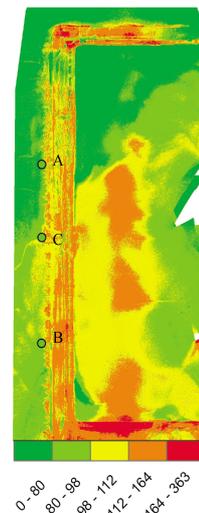


图 3 多光谱波段运算结果

Fig.3 The calculation result of multispectral image

### 3.2 多光谱影像波谱特征分析

选取近岸 3 个点采取水样测量其实际悬浮泥沙浓度,采样点位置见图 3,通过室内实验分析测定 A,B,C 3 个点的悬浮物浓度含量分别为 0.71 mg/L, 0.95 mg/L, 1.74 mg/L。对其航飞影像上对应位置的波谱特征进行分析发现(图 4),随着悬浮物浓度的增加,各波段反射率均有增加,但是波段 2 增加幅度更大,然后浓度增加之后,波段 3、4 均有增加,但是波段 4 增加幅度明显增大。由于波段 4 较波段 1 的值增加幅度大,且随着水体含沙量的增加,波谱反射峰值不断向波段 4 方向移动,即波段 4 与波段 1 的值之间的关系发生了明显的变化,因此,可选择用波段 4 与波段 1 的比值来识别不同水域悬浮物浓度的差异。由于水体中悬浮物含量相对较低,为增强不同悬浮物浓度之间的对比,将其扩大 100 倍进行增益。即:

$$T=100*N4/N1 \quad (1)$$

式中: $T$  代表水体中的悬浮泥沙的相对含量; $N4$ 、 $N1$  分别代表多光谱成像的波段 4 和波段 1。由于采样点较少,因此并未进一步建立该公式与实际悬浮泥沙含量之间的定量关系,所以由该公式计算得到的悬浮泥沙含量分布图实际代表的是不同水体的悬浮泥沙浓度相对值。

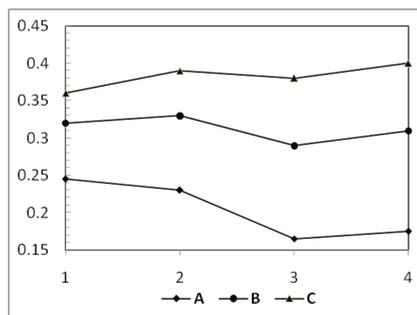


图 4 多光谱影像波谱特征图

Fig.4 Spectrum character maps of the multispectral image

### 3.3 多光谱影像结果分析

与可见光成像结果类似,多光谱照片也未实现

海域部分的全部拼接,但是与可见光成像结果不同的是,多光谱数据围堤西侧及东侧成像宽度略大,分别是沿围堤边界向海一侧 45 m,向陆一侧 155 m,而可见光成像结果沿围堤向海向陆一侧分别为 20 m 和 120 m,说明多光谱影像拼接结果较可见光影像拼接结果宽。

根据不同悬浮物浓度的光谱特征差异,利用公式(1)将波段 4 与波段 1 相除并进行增益后得到悬浮泥沙相对含量分布,对该结果进行分类发现(图 3),项目施工区围堰内悬浮泥沙含量相对较高,围堰内侧约 80 m 处悬浮泥沙含量更高,而含沙水体经围堰溢流口排出后继续向西向南扩散,向南扩散距离约 300 m,向西扩散边界超出了本次成像范围。溢流口东侧图像值明显大于溢流口西侧图像值,说明海水对自溢流口排出的含沙水体具有一定的稀释作用。该结果与可见光成像结果基本一致,说明利用无人机携带多光谱传感器进行水体悬浮泥沙的监测具有一定的可行性。

## 4 结论

本研究尝试采用无人机携带可见光及多光谱传感器对用海项目施工期间的资源环境影响进行监测,所取得的可见光及多光谱影像对水体中的悬浮泥沙分布均具有一定的识别能力,可为用海项目资源环境影响监测提供新的技术手段。

根据多光谱影像的光谱特征,运用波段比值公式进行计算得到的图像可以较为明显地识别溢流口周围悬浮泥沙含量的相对分布情况,与可见光成像结果基本一致,说明利用无人机携带多光谱传感器进行水体悬浮泥沙的监测具有一定的可行性。

受限于水面特征点缺乏、波浪反射等问题,基于无人机的航摄影像无论是可见光还是多光谱数据,均存在部分纯水面区域未完成拼接,下一步需重点解决无人机影像的纯水面拼接困难问题。

#### 参考文献:

- [1] 罗艳,谢健,徐淑升. 重视无人机系统在海洋工作中的作用[J].海洋开发与管理, 2011, 28(9): 43-46.  
Luo Y, Xie J, Xu S. Value the effects of UAV system in ocean works[J]. Ocean Development and Management, 2011, 28(9):43-46.
- [2] 李忠强,唐伟,张震,等. 无人机技术在海洋监视监测中的应用研究[J].海洋开发与管理, 2014, 31(7):42-44.  
Li Z, Tang W, Zhang Z, et al. Study on the application of UAV technology in marine survey and monitoring [J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(7):42-44.

- [3] 张永年. 无人机低空遥感海洋监测应用探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(8):143-145.  
Zhang Y. Discussion on application of UAV low-altitude remote sensing marine monitoring [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2013, 36(8):143-145.
- [4] 郭忠磊, 翟京生, 张靓, 等. 无人机航测系统的海岛礁测绘应用研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 55-61.  
Guo Z, Zhai J, Zhang L, et al. Research on UAV photogrammetric systems in areas of islands and reefs[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(4):55-61.
- [5] 王琳, 吴正鹏, 张晓东, 等. 利用无人机搭载热红外成像仪探测地下输油管道的初探研究[J]. 城市勘测, 2013, 10(5):160-163.  
Wang L, Wu Z, Zhang X, et al. The preliminary study on using the UAV equipped with the thermal infrared imager to detect the underground oil pipelines [J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2013, 10(5):160-163.
- [6] 朱婉雪, 李仕冀, 张旭博, 等. 基于无人机遥感植被指数优选的田块尺度冬小麦估产[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11):78-86.  
Zhu W, Li S, Zhang X, et al. Estimation of winter wheat yield using optimal vegetation indices from unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11):78-86.
- [7] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度的高空间分辨率遥感估算[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 505-512.  
Zhou Z, Yang Y, Chen B. Estimating the *Spartina alterniflora* fractional vegetation cover using high spatial resolution remote sensing in a coastal wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 505-512.
- [8] Koponen S, Pulliainen J. Lake water quality classification with airborne hyper spectral spectrometer and simulated MERIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79 (1): 51-59.
- [9] Dekker A G, Vos R J, Peters S M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (1):15-35.
- [10] Kloiber S M, Brezonik, P L, Olmanson L G, et al. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82 (1):38-47.
- [11] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 水污染遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(2):74-77.  
Wang X, Wang Q, Liu G, et al. Water pollution monitoring using remote sensing [J]. Remote sensing Technology and Application, 2002, 17(2):74-77.
- [12] 童小华, 谢欢, 仇雁翎, 等. 基于多光谱遥感的水质监测处理方法与分析[J]. 同济大学学报, 2007, 35(5): 675-680.  
Tong X, Xie H, Qiu Y, et al. Multi-spectral remote sensing data based processing method and analysis of water quality monitor [J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(5): 675-680.
- [13] 杨静学, 陈亮雄, 李伟添, 等. 无人机航测和水色遥感技术在水库管理和保护范围划界和水资源保护中的应用[J]. 广东水利水电, 2016, 39(8):180-185.  
Yang J, Chen L, Li W, et al. Application of UAV aerial technique and water color technique in demarcation of reservoir and protection of water resource [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2016, 39(8):180-185.
- [14] 郭晓峰, 王翠, 陈楚汉, 等. 湄洲湾峰尾围垦工程施工期间海水悬浮泥沙输移扩散的数值模拟[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(1): 125-132.  
Guo X, Wang C, Chen C, et al. Numerical simulation of the transport diffusion of suspended matter during the construction of Fengwei reclamation project at Meizhou Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(1):125-132.
- [15] 李忠强, 王瀚宇, 刘婷婷, 等. 基于 Pix4Dmapper 的无人机数据自动化处理技术探讨[J]. 海洋科学, 2018, 42(1):39-44.  
Li Z, Wang H, Liu T, et al. Investigation of Pix4Dmapper automatic data-processing technology in unmanned aerial vehicles [J]. Marine Science, 2018, 42(1):39-44.

## Monitoring on Suspended Sediments During the Construction Period of Reclamation Projects Based on UAV

SUN Qin-qin, ZHANG Jia-jin, LUO Mei-xue

*Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, Fujian Province China*

**Abstract:** In order to track and monitor the diffusion of suspended sediments in the construction period of reclamation projects in a real-time manner, this study attempts to use unmanned aerial vehicles (UAVs) with visible light and multi-spectral sensors to detect the cofferdam area of the Gulei Reclamation Project by remote sensing. The Pix4d software is used to process visible light and multispectral photographs carried by UAVs. The results show that both images can recognize the suspended sediment distribution in the water body. By studying and analyzing the spectral characteristics of the sensor, it is found that the near-infrared band is sensitive to the increase of suspended sediment content. The calculation results using the band ratio formula show that the suspended sediment concentration of the water in the cofferdam decreases significantly after being discharged into the sea area, and continues to diffuse southward for 300 m. This method can overcome the low spatial and temporal resolution of remote sensing satellite images, and provide a new technical means for tracking and monitoring the environmental impact of marine projects.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV); multispectral; suspended sediments; reclamation