doi: 10.6046/zrzyyg.2020336

引用格式: 李阳, 袁琳, 赵志远, 等. 基于无人机低空遥感和现场调查的潮滩地形反演研究[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 80 - 88. (Li Y, Yuan L, Zhao Z Y, et al. Inversion of tidal flat topography based on unmanned aerial vehicle low – altitude remote sensing and field surveys[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 80 - 88.)

基于无人机低空遥感和现场调查的潮滩地形反演研究

李阳1,袁琳^{1,2},赵志远¹,张晋磊¹,王宪业¹,张利权¹

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,崇明生态研究院,上海 200241; 2. 长江三角 洲河口湿地生态系统教育部/上海市野外科学观测研究站,上海 202162)

摘要:潮滩地形与滩涂湿地生态系统的结构和功能密切相关,准确获取高精度的地形数据,对于分析潮滩的冲淤动态和盐沼植被扩散过程具有十分重要的意义。受自然潮滩观测时间有限、观测条件恶劣及植被覆盖等因素影响, 传统的潮滩地形监测方法往往存在操作困难、效率较低、成本过高及覆盖范围有限等不足。文章通过无人机低空遥感方法获取航拍影像与其波段信息,基于运动结构技术提取影像三维坐标信息,构建研究区高精度数字表面模型(digital surface model,DSM),利用 DSM 模型直接获得无植被覆盖的光滩数字高程模型(digital elevation model, DEM); 对于有盐沼植被覆盖的区域,利用红、绿、蓝 3 个可见光波段信息计算可见光差异植被指数(visible – band difference vegetation index, VDVI),同时结合野外现场调查,获取潮滩盐沼植物株高与 VDVI 指数的定量关系,建立 株高反演模型;并利用株高反演模型从 DSM 中滤除植被,准确反演出潮滩植被区的 DEM,从而整体获得潮滩地形的反演结果。结果表明,结合无人机低空遥感和现场调查的方法可以较好地实现对潮滩地形的精确反演:光滩区地形均方根误差为0.07 m,其精度与高精度三维激光扫描仪测量结果接近;经过植被滤除后,潮滩植被区地形均方根误差下降到0.14 m,数据精度可提升 60%,优于传统的点云过滤方法。文章提供了一种基于无人机和现场调查的潮滩地形反演方法,实现了潮滩地形高效、大范围的监测,研究方法可应用到其他类似的潮滩或海岸区域,为海岸带滩涂湿地保护和管理提供重要的技术支撑。

关键词: 潮滩; 地形; 无人机; 滤除植被; 可见光植被指数

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097 - 034X(2021)03 - 0080 - 09

0 引言

潮滩是海陆交界地带受潮汐影响的区域,在长 江口,潮滩是滨海湿地的主要类型之一,通常包括光 滩、植被带、潮沟等地貌单元。它不但是海岸防护的 重要组成部分,还具有气候调节、生物多样性保护、 促淤造陆、固碳等显著的生态服务功能^[1-2]。在全 球海平面上升和人类干扰活动共同影响下,沿海生 态系统逐渐丧失和退化,潮滩面临着不断蚀退的威 胁^[3],如何有效保护长江口的滩涂资源变得至关重 要。滩面高程是潮滩地貌形态特征的体现,不同时 刻滩面高程变化可以反映该区域潮滩的冲淤动态, 同时它也是影响潮滩动态和盐沼植被分布的重要因 素^[4]。在类似长江口潮滩这样具有潮汐作用的盐 沼湿地生态系统中,只有当潮滩高程超过一定阈值, 盐沼植被才能成功定居^[5]。此外,不同盐沼植物在 潮滩分布的最适高程也有所不同^[6],厘米级的海拔 差异就会导致植被群落结构发生显著变化^[7-8]。因 此,高精度、大面积的潮滩地形数据是准确分析潮滩 冲淤演变和盐沼植被演替趋势的前提^[9-10],也是探 究潮滩生态系统对环境变化响应以及预测潮滩格局 演变不可或缺的数据基础^[3,11]。

目前,潮滩地形监测方法通常分为遥感监测和 地面监测2类。遥感方法包括立体像对匹配、水边 线提取、合成孔径雷达干涉技术测量等,它们具有大 范围测量能力,但是精度相对较低、时效性差^[12]。 地面监测常用方法有全站仪测量、基于全球导航卫 星系统(global navigation satellite system,GNSS)和实 时动态差分技术(real – time kinematic, RTK)的

收稿日期: 2020-10-23;修订日期: 2021-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目"长江口盐沼湿地生态系统稳态转换过程与机制研究"(编号:41876093)、交通运输行业重点科技项目"长江口南槽生态航道建设技术研究"(编号:2019-MS5-106)和上海市科委科研计划项目"长江河口滩涂生态脆弱 区监测与安全预警关键技术"(编号:20dz1204701)共同资助。 第一作者:李 阳(1995-),男,硕士研究生,主要从事湿地生态修复研究。Email: bigliyang123@126.com。

 $[\]pi^{-1}$ [1-1:子阳(1273 =),力,映工初九生,主安八事電地主記修及初九。Entail: Dignyang12.3 \cong 120. com。

通信作者:袁琳(1978-),女,副研究员,主要从事湿地生态和景观生态研究。Email: lyuan@sklec.ecnu.edu.cn。

GNSS - RTK 测量、基于非接触式高速激光测量技术 的三维激光扫描(terrestrial laser scanner, TLS)测量 等^[13],它们具有较高的精度,但是测量面积小、仪器 和人力成本高、测量效率低^[14-15]。RTK 和 TLS 技 术是现有方法中较常用且具有最高精度的方法。 RTK 技术定位快速准确,水平和垂直精度极高^[15]. 但是每次仅能获取单点数据,测量效率低。TLS 技 术具有极高的垂直和空间精度,能够有效获取平面 高程数据,但是 TLS 扫描范围有限、花费的时间和 经济成本较高,由于激光无法穿透高盖度植被,导致 TLS 观测技术难以准确获得植被覆盖下的潮滩地 形^[14]。因此,尽管目前已有多种方法可以用来测量 潮滩地形,但是依旧难以实现同时具备低成本、高精 度、大面积、可滤除植被的潮滩地形测量^[16], 亟须寻 找一种低成本、高精度、易操作目能够较准确滤除植 被影响的大尺度地形监测方法。

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)低空遥感 是近年来兴起的新型监测技术,具有轻便、易操作、 工作效率高等优势,它的发展使得高精度、高时效性 的遥感影像获取成为可能^[17-18]。运动结构(structure from motion,SFM)算法是基于多个图像的运动 视觉差异建立物体 3D 模型的一种计算机技术,它 可以通过大量重叠的 2D 图像,提取包含高密度三 维信息的点云,从而获得准确的数字地形信 息^[19-20]。将 UAV 低空摄影测量技术和 SFM 技术 相结合,为低成本、大面积的地形测量提供了可 能^[16,21]。Mancini 等^[16]用 UAV 测量了海岸沙丘的 地形,并验证了其精度与 TLS 技术相当; Dai 等^[22] 用 UAV 测量了光滩的地形,表明使用 UAV 定期监 测光滩是可行的。然而自然潮滩的潮间带区域往往 覆盖有盐沼植物,通过 UAV 遥感只能测量到植物冠 层的高程,为了获得准确地形,还需要进行植被滤除 来去除盐沼植被的干扰。植被滤除目前主要是借鉴 激光点云数据的滤波算法^[13,23],需要有较多的点云 穿透植被落到地面上,而盐沼植被密度较高,光线不 易穿透,植被滤除精度会大幅降低,因此需要探索一 种更加有效的植被滤除方法。

本研究以位于长江口的上海崇明东滩的潮滩湿 地为典型研究区,通过 UAV 低空遥感获取研究区航 拍影像与可见光波段信息,然后提取影像三维坐标 信息,构建高精度潮滩数字表面模型(digital surface model,DSM),获得光滩地形数字高程模型(digital elevation model,DEM)。此外,将从 UAV 影像可见 光波段中提取的植被指数与野外现场观测的植物株 高拟合,建立株高反演模型滤除植被,获得潮滩盐沼 植被区的地形 DEM 数据,综合实现潮滩地形 DEM 的大尺度的准确反演。以期为大范围监测潮滩地形 提供一种易操作、高效、准确的方法,为海岸带滩涂 湿地保护和管理提供重要的技术支撑。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

崇明东滩位于上海市崇明岛东部(N31°25′~ 31°38′, E121°50′~122°05′)(图1),为亚热带季风气 候,年平均气温为15.3℃,年平均降水量为1022 mm,该 区域受不正规半日潮的影响,是长江口规模最大,发 育最完善的河口型滩涂湿地^[24]。本文的研究区位 于崇明东滩鸟类国家级自然保护区南部的团结沙潮 滩的盐沼植被前沿(图2),包含了光滩和盐沼植被 2种生境(图3)。研究区分布的盐沼植被主要为藨 草属(*Scirpus* spp.)的海 三 棱 藨 草(*Scirpus mariqueter*)和藨草(*Scirpus triqueter*)混生群落,平均 株高约为30 cm,植被盖度60%~90%。



图 1 崇明东滩地理位置 Fig. 1 Location of Chongming Dongtan



图 2 研究区地理位置 Fig. 2 Location of study area



图 3 研究区的倾角拍摄图 Fig. 3 UAV oblique photography picture in study area

1.2 UAV 低空航拍及图像处理

2019年5月,天气晴朗的小潮汛低潮期间,使 用大疆 Phantom 4 Pro 四悬翼无人机对研究区进行 UAV 航测,航向重叠度 80%,飞行高度为 60 m,地面 分辨率为 2 cm/像素,航拍区域的面积约为 0.3 km², 涵盖了前沿的植被(图 4)和光滩(图 5)。使用 DJIGO 3.1.5 控制自动飞行与正射拍照。UAV 飞行前,在研 究区 8 个基本方向按米字形结构设立了 8 个 0.5 m × 0.5 m 的地面控制点(ground control point,GCP),使 用 RTK(Trimble R8 GNSS 接收机)收集了 GCP 中心 的坐标(采用 WGS1984 坐标系)和高程(采用吴



图 4 盐沼植被的正摄图像 Fig. 4 UAV orthophoto picture of saltmarsh plants



图 5 光滩的正摄图像 Fig. 5 UAV orthophoto picture of bare flat

淞高程系统)的 RTK 测量值,后期通过 GCP 的校正,可以将 UAV 航测的成果变换到指定参考系中。 1.3 现场观测

在 UAV 飞行结束后立即对研究区的光滩区和 植被区展开现场的高程和植被观测:①高程观测使 用 RTK(Trimble R8 GNSS 接收机)测量了光滩区 14 个地面点和植被区域 30 个地面点的坐标和高程 (图 6),用于后期 UAV 影像反演地形的精度验证; ②植被区内分别设置 2 条垂直和平行于海堤的样 带,在样带上随机选取 30 个样点,以每个样点为中 心设立 0.5 m × 0.5 m 的样方,使用 RTK(Trimble R8 GNSS 接收机)测量每个样点的坐标,并使用 5 点法现场测量样方内植株株高,后计算平均株高。



图 6 研究区的采样点分布 Fig. 6 Location of sampling points distribution

2 研究方法

2.1 潮滩植被滤除及 DEM 反演

利用 Pix4D Mapper 4.4.3 软件对野外拍摄获取 的 UAV 影像进行数据处理,在该软件中,通过 SFM 点云生成、GCP 坐标校正、创建网格、生成纹理等处 理后,生成研究区域的 DSM 和包含红光、绿光、蓝光 波段信息的正射遥感影像。由于 SFM 算法测算出 的是地物间的相对高差,所以再通过 GCP 坐标校正 将坐标系和高程转化到了统一的参考系统当中(本 研究采用吴淞高程基面、WGS84 坐标系和 UTM 51N 投影),以便与不同时期、不同地形测量方法获取的 DEM 产品进行比较。

UAV 影像经过 Pix4D Mapper 4.4.3 软件处理 后生成的研究区的高精度 DSM 显示了潮滩表面的 DEM。在光滩表面没有建筑或植被遮挡,该区域的 DSM 即为光滩区地形的 DEM。

对于植被区,由于有盐沼植被遮挡,DSM 显示 的是潮滩植被冠层的高程,而不是滩面的高程信息。 为了获取植被区 DEM,首先使用 ENVI 5.3 软件提 取 UAV 正射遥感影像中的波段信息,基于 UAV 影 像的红绿蓝 3 个波段的像素值,获得研究区的可见 光差异植被指数(visible – band difference vegetation index, VDVI)^[25]。其表达式为:

$$VDVI = \frac{2\rho_{\text{ff}} - \rho_{\text{ff}} - \rho_{\text{ff}}}{2\rho_{\text{ff}} + \rho_{\text{ff}} + \rho_{\text{ff}}} , \qquad (1)$$

式中, *ρ*_红, *ρ*_暴和*ρ*_{*}分别为影像在红光、绿光、蓝光

波段的像素值。

利用 MATLAB 2019 软件将地面采样点处的 VDVI 指数的值与野外样方调查的植物株高建立株 高反演模型,建模时随机选取 70% 株高数据用于建 模,剩下 30% 用于反演模型精度评估。

在 ENVI 5.3 软件中通过株高反演模型将整个研究区的空间 VDVI 指数分布反演为整个研究区的 空间植被株高分布,再利用 ArcGIS10.5 软件将植被 株高从植被区的 DSM 中滤除,获得潮滩地形的植被 区地形的 DEM,潮滩 DEM 的具体测量流程如图 7 所示。



图 7 潮滩地形测量流程 Fig.7 Flow chart of tidal flat topographic reconstruction

2.2 地形精度验证

以 RTK 野外现场测量的滩面高程数据为真实 值,UAV 地形反演结果为测量值,计算均方根误差 (root mean square error, RMSE)^[26]进行地形精度验 证,评估 UAV 植被滤除和地形反演的效果。

3 结果与分析

3.1 盐沼植物株高与植被指数关系

图 8 为株高的 VDVI 反演模型,图中阴影为 95%置信区间。从图 8 可以看出,UAV 影像反演 获得的研究区藨草属植物 VDVI 指数值主要集中

图 8 株高的 VDVI 反演模型 Fig. 8 VDVI inversion model of plant height

在 0.04 ~ 0.15 之间,野外监测获得的株高范围是 18~45 cm。通过拟合可以看出,藨草属植物株高与 VDVI 指数之间具有显著正相关关系($R^2 = 0.71$, *RMSE* = 4.07 cm),表现为随株高的增加,VDVI 指数 值也呈现增大趋势。当藨草属植物株高在 25~35 cm 区间时,株高反演的置信区间最窄(±1.7 cm)。

3.2 潮滩地形反演结果

UAV 遥感影像经过式(1)反演后,研究区内藨 草属植物群落的 VDVI 指数值在 0.02 ~ 0.16 之间 (图 9)。进一步利用株高反演模型获得的研究区盐

图 9 研究区盐沼植被 VDVI 分布 Fig. 9 VDVI distribution of saltmarsh in study area

在沼植物株高结果表明,该区域盐沼植物株高变化 范围为20~50 cm (图10),与野外实测的株高变化 范围一致。当使用 VDVI 模型滤除植被后,可以看 出研究区域整体高程变化在2.0~5.0 m 之间(图 11),由陆向海呈现逐渐递减的趋势,且呈带状分布。

图 10 研究区植物株高分布 Fig. 10 Saltmarsh height distribution in study area

3.3 地形反演的精度验证

反演得到的高程与 RTK 测量高程比较结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,在光滩区域,UAV反演地形结果与野外实测的 RTK 测量高程较为接近1:1(*RMSE* = 0.07 m),表明使用 UAV 反演的光滩

地形较为可靠,能够直接应用于光滩地形的反演。 而在植被区,从误差分析结果可以看出(表1),受 到盐沼植被的干扰,若不进行植被滤除,植被区地 形反演精度(*RMSE*=0.33 m)显著低于光滩区,且 UAV 反演的潮滩高程略高于野外现场 RTK 实测 值(图12(a))。在使用株高反演模型滤除植被

表1 不同生境植被滤除前后的地形反演 RMSE

Tab. 1 Terrain error of inversion before and after

vegetation filtering in different habitats (m)

8	8	()
生境类型	UAV 扫描	植被滤除
光滩区	0.07	—
植被区	0.33	0.14
整体平均	0.28	0.12

后,植被区地形精度显著提升,RMSE 从 0.33 m 减 小至 0.14 m,地形反演精度提高了约 60%。对于整 个研究区的地形反演结果而言,通过植被滤除后,地 形精度 RMSE 为 0.12 m,与未进行植被滤除时的反 演精度(RMSE 为 0.28 m)相比,精度大大提高。

4 讨论

在潮滩生态系统中,厘米级的地形高程差异就 能对潮滩的生态结构和功能造成影响,因此获取高 精度的地形对潮滩湿地生态系统研究十分重 要^[7-8]。到目前为止,传统遥感方法获取的地形 DEM 精度较低,难以满足研究的需要,而高精度的 地形 DEM 构建大都需要费时费力的现场工作来进 行,在潮滩地区更是受到有限调查时间和范围的限 制^[21]。目前的 SFM 技术由于具有易于使用、自动 化程度高、对图像采集和相机校准容易等优点,使得 用低成本的设备来快速获得高精度的 DSM 成为可 能^[27]。而轻小型 UAV 具有轻便灵活、云下飞行和 高时效性等特点,为 SFM 技术提供了极佳的应用场 景,其数 据产品的优秀质量已被多个研究验 证^[16-22]。对于受潮汐影响的复杂潮滩区域而言,由 于部分潮滩表面积水和水饱和度较高,基于 SFM 技 术有时难以从积水和水饱和沉积物中提取出足够的 点云来构建地形^[21]。对于这些区域,通过 UAV 近 距离飞行可获取足够多的高空间分辨率图像,以帮 助识别光滑表面的地面纹理,减少计算误差,可大大 提升自动点匹配和 SFM 点云提取的成功率^[21,28]。

本研究将 SFM 技术与野外监测和遥感图像处 理相结合,开展潮滩地形反演研究,结果表明结合现 场观测和 UAV 技术的地形反演可以实现高精度植 被下潮滩地形反演目标。该方法与常规方法相比具 有以下显著优势:

1)潮滩植被区地形反演精度显著优于其他技术。本研究在光滩区地形的 RMSE 为 0.07 m,与 TLS 技术监测的地形精度接近^[13,23];但在植被区地 形精度为 0.14 m,优于谢卫明等^[23]使用 TLS 技术 的潮滩地形监测结果得到的 0.25 ~ 0.35 m 误差。 且 TLS 技术在植被密度高于 60% 时,激光无法穿透 植被,地形精度还将显著下降^[13],而本研究中,植被 区盖度均在 60% ~ 90%,依然可以获得令人满意的 精度,很好地解决了 TLS 等技术难以准确滤除潮滩 盐沼植被高度的问题。

2) UAV 的监测范围显著扩大。TLS 设备的扫描 范围仅有 2~3 km,在潮滩上的有效范围不超过半 径 1 km,且远距离的扫描精度较低,而多站扫描较 为耗时。RTK 单点精度极高^[15],能够直接测量到植 被下方的潮滩地形,但是 RTK 将多个单点数据建立 网格生成 DEM,而在潮滩地区手工测量只能获得十 分有限的观测点,极大限制了 RTK 观测大范围地形 监测范围。而 UAV 扫描范围可以通过更换电池持 续飞行不断扩展,精度不会随着范围扩展有任何改 变。

3) UAV 监测的人力成本和经济成本显著降低。 首先传统的 RTK 技术完全依靠观测人员通过行走 获得指定地点的数据,而 TLS 观测技术需要将仪器 运输到扫描区域进行工作,TLS 及它的标靶、三脚架 等相关配套设备重达数十斤,若在泥泞难行的潮滩 环境中操作,非常费时费力。UAV 通过远程操控, 不受地域条件限制,方便易行,效率高。其次,UAV 地形监测技术更加经济和高效。TLS 设备价格通常 在百万元级别,UAV 的设备价格通常在万元到几十 万元级别,且 UAV 观测的人力成本也大大低于 TLS 观测技术。

本研究和已有研究均表明,UAV 技术和传统技 术对光滩地形可获得精度较高的结果^[22],但相比光 滩,潮滩植被区的地形监测存在更大的难度,主要原 因是植被株高滤除的准确性决定了地形反演的准确 性和误差^[13,23]。目前潮滩地形监测中植被滤除方 法并不多,主要是通过激光点云数据的滤波算 法^[13,23]提取出穿透植被的激光为地面点,从而滤除 与地面点相差过多的植被点。这类算法需要足够的 点云穿透植被落在地面上,如果植被群落密度过大, 激光较少穿透植被,传统的点云过滤算法很难实现 对植被的滤除。相较点云植被滤除方法的局限, UAV 遥感影像中含有丰富的地物光谱信息,利用 UAV 影像波段数据进行植被滤除,能够有效弥补点 云滤除的缺陷。首先,UAV 所摄可见光图像由红 光、绿光、蓝光3个波段构成,由于不同生理状况的 绿色植被在各个波段反射率不同,通过波段运算获 得的不同植被指数,已被证实可以用来反映植被的 生长信息^[29]。目前研究者基于 UAV 的可见光波 段,组合开发了许多植被指数用来提取植被生长发 育信息^[30-31]。其中 VDVI 指数包含了红光、绿光、 蓝光3个波段的信息,提取精度高且阈值容易确定, 对健康绿色植被信息具有较好的提取效果,是常用 的可见光植被指数^[25]。采用 VDVI 指数与株高建 立反演模型进行植被滤除,仅需要采集标准样方数 据并与 VDVI 指数建立关系,实施十分便捷,大大节 省了人力物力。但受到地理位置和季节因素影响, 植被 VDVI 指数会随地点和季节变化发生变化,因 此本文建立的株高反演模型在更大范围应用时,需 要在指定地点的不同季节采集数据构建反演模型, 再进行地形反演。

尽管利用 UAV 技术进行潮滩地形反演作为遥 感技术的一种应用,具有显著的优越性,但依然会受 到气候和地表物理因素的影响,因此在具体实施过 程中应注意以下要点:①观测时应该尽量选择小潮 和阴天的清晨或者傍晚进行飞行,这样可以减少滩 涂表面积水或沉积物的反射对结果的影响;②观测 时要避免在大风天气飞行,因为轻小型 UAV 抗风能 力偏弱,大风造成的机身稳定性下降会降低数据精 度甚至危及 UAV 安全;③合理布设 GCP,研究证明 在研究区外围不同方向布设 5~8 个 GCP 是较优方 案,即使 GCP 数量大量增加,数据的精度性并不会 随之明显增加^[17,28]。当然,在泥泞的潮滩布设 GCP 是一项耗时耗力的工作,对于某些具有 GNSS - RTK 定位的 UAV,由于摄像机精确位置已知,每张影像 都包含了精确定位并可以从相对系统转换到绝对系 统,因此 UAV 内置天线位置能够极好代替地面 GCP,可大幅削减了 UAV 地形反演过程中的人力成 本,大大扩展了 UAV 的工作范围,使得利用 UAV 进 行地形反演成为了一项低成本低劳动力的监测工 作。利用搭载 RTK 的 UAV 进行一次低空飞行,便 能够带来具有精准坐标系的高分辨率正射影像和地 形 DSM,这对于利用 UAV 实施潮滩地形反演具有 极大的帮助。

5 结论

本研究表明结合 UAV 低空遥感和现场调查的 方法可以实现对潮滩光滩地形和草下地形的精确反 演,其光滩区地形精度与高精度三维激光扫描仪测 量结果接近;植被区地形经过植被滤除后精度可提 升 60%。利用 UAV 低空遥感,将 SFM 技术与野外 监测和图形处理相结合进行潮滩地形反演,将大大 减少地形监测的人力与经济成本,在拥有高精度的 同时还能较好地解决植被滤除的技术问题,实现大 面积自然潮滩的地形反演,凸显出了 UAV 地形反演 方法大面积推广的价值。可以预见,随着 UAV 搭载 RTK 技术的普及和推广,以 UAV 低空遥感和 SFM 算法为基础的低成本、高效率、高精度地形反演技术 将越来越被广泛应用于潮滩地形监测、冲淤演变分 析、地貌-盐沼植被相互作用,滩涂湿地环境的保护 与修复等方面的研究。

参考文献(References):

- Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea – level rise [J]. Nature, 2013, 504 (7478):53-60.
- [2] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11):961-968.
- [3] Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats [J]. Nature, 2019, 565 (7738):222 – 225.
- [4] Kulawardhana R W, Feagin R A, Popescu S C, et al. The role of elevation, relative sea – level history and vegetation transition in determining carbon distribution in Spartina alterniflora dominated salt marshes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 154:48 – 57.
- [5] Yuan L, Chen Y, Wang H, et al. Windows of opportunity for salt marsh establishment: The importance for salt marsh restoration in

the Yangtze Estuary [J]. Ecosphere, 2020, 11(7): e3180.

- [6] Cui L, Ge Z, Yuan L, et al. Vulnerability assessment of the coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China to sea – level rise[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 156:42 – 51.
- [7] Bang J H, Bae M, Lee E J. Plant distribution along an elevational gradient in a macrotidal salt marsh on the west coast of Korea[J]. Aquatic Botany, 2018, 147:52-60.
- [8] 陈雅慧,袁琳,曹浩冰,等.基于胁迫梯度假说和互惠理论的 海三棱藨草种群恢复技术[J].生态学报,2019,39(12):4233 -4241.

Chen Y H, Yuan L, Cao H B, et al. The stress – gradient hypothesis and facilitation theory – based restoration technique for Scirpus mariqueter population [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (12): 4233 – 4241.

- [9] Widdows J, Blauw A, Heip C, et al. Role of physical and biological processes in sediment dynamics of a tidal flat in Westerschelde Estuary, SW Netherlands [J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 274;41-56.
- [10] De Backer A, Van Colen C, Vincx M, et al. The role of biophysical interactions within the ijzermonding tidal flat sediment dynamics
 [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(9):1166 1179.
- [11] Hu S, Niu Z, Chen Y, et al. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status [J]. Science of the Total Environment, 2017,586:319-327.
- [12] Nelson A, Reuter H, Gessler P. Chapter 3 DEM production methods and sources[J]. Developments in Soil Science, 2009, 33:65 – 85.
- [13] 魏 伟,周云轩,田 波,等. 基于地面激光扫描的典型海岸带盐 沼潮滩地形反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2018,48
 (6):1889-1897.
 Wei W,Zhou Y X,Tian B, et al. Topography retrieval on typical salt marsh of coastal zone based on terrestrial laser scanning[J].
 Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2018,48(6): 1889-1897.
- [14] Telling J, Lyda A, Hartzell P, et al. Review of earth science research using terrestrial laser scanning [J]. Earth – Science Reviews, 2017, 169:35 – 68.
- [15] Valente D S M, Momin A, Grift T, et al. Accuracy and precision evaluation of two low – cost RTK global navigation satellite systems
 [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105142.
- [16] Mancini F, Dubbini M, Gattelli M, et al. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments [J]. Remote Sensing, 2013, 5(12):6880 – 6898.
- [17] Reshetyuk Y, Mårtensson S. Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles [J]. The Photogrammetric Record, 2016, 31 (154):143 - 165.
- [18] Wijesingha J, Moeckel T, Hensgen F, et al. Evaluation of 3D point cloud – based models for the prediction of grassland biomass [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78:352 – 359.
- [19] Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. 'Structure from -

- [20] Han X, Thomasson J A, Bagnall G C, et al. Measurement and calibration of plant – height from fixed – wing UAV images [J]. Sensors, 2018, 18(12):4092.
- [21] Kalacska M, Chmura G L, Lucanus O, et al. Structure from motion will revolutionize analyses of tidal wetland landscapes[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 199:14 - 24.
- [22] Dai W, Li H, Zhou Z, et al. UAV photogrammetry for elevation monitoring of intertidal mudflats [J]. Journal of Coastal Research, 2018,85(85):236-240.
- [23] 谢卫明,何 青,章可奇,等. 三维激光扫描系统在潮滩地貌研究中的应用[J]. 泥沙研究,2015,48(6):1889-1897.
 Xie W M, He Q, Zhang K Q, et al. Application of the terrestrial laser scanner to measuring geomorphology in tidal flats and salt marshes[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 48(6):1889-1897.
- [24] Zhao Z Y, Yuan L, Li W, et al. Re invasion of Spartina alterniflora in restored saltmarshes: Seed arrival, retention, germination, and establishment [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266:110631.
- [25] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J].农业工程学报,2015,31(5):152-159.
 Wang X Q, Wang M M, Wang S Q, et al. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images [J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2015,31(5):152-159.

- [26] Meneses N C, Baier S, Reidelstürz P, et al. Modelling heights of sparse aquatic reed (Phragmites australis) using structure from motion point clouds derived from rotary – and fixed – wing unmanned aerial vehicle (UAV) data[J]. Limnologica, 2018, 72:10 – 21.
- [27] Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, et al. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38 (4): 421-430.
- [28] 戴玮琦,李 欢,龚 政,等. 无人机技术在潮滩地貌演变研究中的应用[J]. 水科学进展,2019,30(3):359-372.
 Dai W Q, Li H, Gong Z, et al. Application of unmanned aerial vehicle technology in geomorphological evolution of tidal flat[J]. Advances in Water Science,2019,30(3):359-372.
- [29] Bendig J, Yu K, Aasen H, et al. Combining UAV based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39:79 – 87.
- [30] Rasmussen J, Ntakos G, Nielsen J, et al. Are vegetation indices derived from consumer – grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 74:75 – 92.
- [31] Tian J, Wang L, Li X, et al. Comparison of UAV and WorldView 2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017,61:22 – 31.

Inversion of tidal flat topography based on unmanned aerial vehicle low – altitude remote sensing and field surveys

LI Yang¹, YUAN Lin^{1,2}, ZHAO Zhiyuan¹, ZHANG Jinlei¹, WANG Xianye¹, ZHANG Liquan¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Institute of Eco – Chongming, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Yangtze Delta Estuarine Wetland Ecosystem Observation and Research Station (Ministry of Education & Shanghai Science and Technology Committee), Shanghai 202162, China)

Abstract: Tidal flat topography is closely related to the structure and function of the ecosystem in intertidal wetlands. Therefore, it is significant for the analyses of tidal flat dynamics and the monitoring of the diffusion process of saltmarsh vegetation to obtain high – precision topography data. However, owing to limited ebb time, muddy tidal flats, and saltmarsh vegetation, traditional geographic observation techniques suffer the shortcomings such as low accuracy and efficiency, high cost, and limited coverage. In this study, unmanned aerial vehicle (UAV) low – altitude remote sensing was employed to obtain aerial images and their band information. Then the 3D and spectral information with precise coordinates were extracted based on the structure obtained using motion technology. They were used to construct a high – precision digital surface model (DSM) of the study area. The DSM of bare flats can be directly used as the digital elevation model (DEM) of the tidal flat. In the areas with saltmarsh vegetation, the information of red, green, and blue bands was used to calculate the visible – band vegetation index (VDVI), which was combined with field surveys to build an inversion model for vegetation height. Finally, vegetation was filtered out from the DSM using the height inversion model to obtain accurate DEM. In this

way, the elevation of the vegetation zone in the tidal flat can be reflected. As indicated by the results of this study, the method that combines UAV low – altitude remote sensing with field surveys can realize precise inversion of tidal flat topography. The root mean square error (RMSE) of the topography in bare flat obtained using the method was 0.07 m and the accuracy was close to the terrestrial laser scanner (TLS). For areas with saltmarsh vegetation, the RMSE was reduced to 0.14 m and the geographical accuracy can be improved by 60% after the vegetation was filtered out. Therefore, the method is superior to traditional point cloud filtering. Overall, this study provided an inversion method of tidal flat topography based on UAV remote sensing and field surveys, which can effectively monitor large – scale natural tidal flat systems. The method can be applied to other similar natural tidal flat systems or coastal areas, providing important technological support for the protection and management of coastal tidal flat wetlands.

Keywords: tidal flat; topography; UAV; vegetation filtering; VDVI

(责任编辑:张仙)