

Imaging Performance Analysis in Resources Survey between two UAV Photogrammetry Platforms: Pix4D Mapper and Photoscan

Wang Haozhou¹, Chang Yaquan¹, Li Chuan^{1*}, Liu Qiurong¹,
Zhong Min¹, Chen Qinxuan¹

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To provide a valuable suggestion of choosing unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry software, we evaluated 13 photos of a construction site near the Bahnhof Fo Bitsch town in Switzerland on Pix4D and Photoscan platforms. These photos were computed to image matching, DOM (digital orthophoto map) producing, etc. After generating the quality reports, we compared software performance in terms of hardware demand, copyright protection, software functions and quality of outputs. The results showed that both platforms have the complete ability to process the UAV images. The Pix4D mapper has lower hardware demand, better quality reports with more precise results. Moreover, better copyright protection and more user-friendly trial mode for Pix4D mapper improve the user experience and the unique index calculation function made it more suitable for agriculture, forestry and construction applications. However, Photoscan has batch processing compatibility on multiple platforms, together with Python scripting and parallel computing, to generate better data visualization performance.

Keywords: UAV remote sensing; Hardware configuration; Index calculation; Copyright protection

Chinese book classification code: TP79

无人机影像处理软件 Pix4Dmapper 与 hotoscan 在资源普查中的成像性能分析^{*}

王浩舟^{1,2}, 常雅荃^{1,2}, 李川^{1,2,Δ}, 刘秋蓉^{1,2}, 钟敏^{1,2}, 陈沁璇^{1,2}

(1.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 2.南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘 要:在相同实验平台上,使用 Pix4D 和 Photoscan 对瑞士 Bahnhof Fo Bitsch 镇附近工地的 13 张示例航拍照片进行了图像拼接、正射影像(digital orthophoto map, DOM)生成等操作,并从硬件需求、版权保护、软件功能和成果质量几个方面对这两款软件进行了比较分析。结果表明:两款软件都有完备的无人机影像处理能力;Pix4D 对硬件配置的要求较低,在相同的平台上可以获得更加精确的结果和质量报告,同时具备更好的版权保护措施和更人性化的试用模式,其独有指数计算功能,更适宜在农林和建筑业方面应用;Photoscan 兼容平台较多,具有批量处理、Python 脚本和联机并行计算等高效、大数据处理功能,在数据可视化上效果较好。

关键词:无人机遥感;硬件配置;指数计算;版权保护

中图分类号: TP79

传统的资源调查通常采用样方调查法^[1],该方法主要适用于局部抽样调查,方法简便但受样方设置、随机性甚至人为主观的影响,严重影响了普查的精度^[2]。卫星影像可以进行区域、国家甚至全球大尺度的资源调查^[3-5],但卫星影像的时间、空间分辨率低,且受天气制约、成本较高^[6,7]。

在新型搭载平台和传感器发展的背景下^[8]无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)的出现恰好弥补了地面调查范围小、卫星遥感时空分辨率低的缺点^[9],被逐渐广泛应用于资源普查和空间调查方面^[10-12]。与其他遥感方式相比,无人机遥感具有机动灵活、安全、高效、成本低、受气象条件限制少等特点^[13]。然而,无人机的飞行特性决定了其获得的遥感影像旋转角大、畸变严重、重叠不规则、像幅小、影像数量多等问题^[7],使得无人机图像的处理问题成为制约无人机遥感发展的一个重要条件。

为了解决无人机图像处理的难题,市场上出现了一批无人机影像处理软件,主要分为传统摄影测量方法(traditional photogrammetric method)^[14]和计算机视觉(computer vision)^[15]方法。前者侧重于高匹配精度的三维建模领域,主要有 PhotoModeler, Erdas LPS 和 EyeDEA 等软件;后者侧重于较快获得有效

成果,有 Pix4Dmapper (Pix4D), Agisoft Photoscan, VisualSFM 等^[8]软件。众多的软件给消费者带来多样选择的同时,相似功能软件优缺点的对比无疑具有重要参考价值。

本文使用相同的实验数据和硬件环境,对计算机视觉方法的两款软件 Pix4Dmapper 软件和 Photoscan 软件进行影像匹配、数字高程模型(digital elevation model, DEM)生成等常规处理,从硬件配置、版权保护、软件功能、成果质量等方面进行比较分析,并将软件特有的功能进行单独说明,这两款软件的对比分析可为消费者在选择遥感影像软件上提供一定的参考价值。

1 软件简介

1.1 Pix4D

Pix4D(原为 Pix4UAV)是瑞士 Pix4D 公司研发的无人机数据处理软件,集全自动、快速、专业精度为一体,无需人工过多干预,即可将数千张影像快速制作成专业的、精确的二维地图和三维模型^[16]。具有自动生成纹理模型、充分利用硬件资源、支持三维点、线、面、体积的量测和注记等特点,本次实验所用版本为 Pix4D Pro2.1。

^{*} 基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);南京林业大学大学生创新训练计划项目(2016NFUSPITP217)。

^Δ 通讯作者:李川(1973-),女,博士,副教授,主要研究方向:气候变化对生态环境影响。Email:lichuan_2001@hotmail.com。

1.2 Photoscan

Photoscan 是由俄罗斯 Agisoft 公司研发的 3D 扫描软件,能根据影像自动生成三维模型,它根据多视图三维重建技术,仅通过导入具有一定重叠率的影像,便可实现高质量的正射影像生成及三维模型重建,整个工作流程(影像定向、三维模型重建等)都是完全自动化^[7],具有摄影三角测量、点云编辑与分类、数字地形模型(digital terrain model, DTM)、数字表面模型(digital surface model, DSM)、正射影像、三维测量、控制点、二次开发、多光谱影像处理、精细纹理、4D 时序、全景拼接、分布式和 GPU 计算等功能,本次实验所用的版本为 Photoscan Pro 1.2.4 for windows(64bit)。

2 实验数据与环境

2.1 实验数据

实验数据为位于瑞士的 Bahnhof Fo Bitsch 镇附近一处工地的 13 张航拍照片。选取地点约有 5.8hm²,由道路、工地、河流、房屋、农田、树林所组成(如图 1 所示),具有多样而复杂的地形地貌种类,适合对两款软件的处理功能进行比较。



图 1 航拍区域概览

2.2 实验环境

实验环境为联想小新 700 笔记本,其配置详见表 1。

表 1 实验环境配置

软硬件	配置
操作系统	Microsoft Windows 10 家庭中文版 (64 位)
CPU	Core i7-6700HQ, 2.60GHz, 四核八线程
内存	DDR4, 2133MHz, 4GB
硬盘	西数 500GB, 5400rpm
显卡 1	NAVIDA GeForce GTX 950M, 2GB
显卡 2	Intel(R) HD Graphics 530, 1GB

2.3 无人机遥感影像处理

在相同的实验数据及实验环境下,由同一操作者分别对这两款软件进行了遥感影像处理实验。

2.3.1 Pix4D 无人机遥感影像处理

Pix4D 软件的操作流程如图 2 所示,整理图片属性中含有 GPS 坐标的航拍影像并进行权限验证,新建项目并进行照片添加,此时软件会自动读取照片属性信息,保持默认设置或在图片属性中设置坐标系,照片分组等参数,设置输出坐标系和处理模板(不同模板有不同的处理精度和速度,亦可根据实验精度等需要自定义模板)后,软件开始图像处理。

在 Pix4D 的图像处理流程中,有 3 个主要操作步骤,分为(1)初始化处理,(2)点云和纹理,(3)DSM、DOM 和指数,其中试用版只可以进行前两步的操作,专业版不但可以进行第三步,还可以基于其基础上进行 DTM、等高线和三维网格的生成。完成图片处理后即可导出质量报告,其中 Pix4D 试用版不支持在软件中直接导出 DOM、DSM 和点云等文件,需要在项目子文件夹中的相应位置手动寻找输出结果。

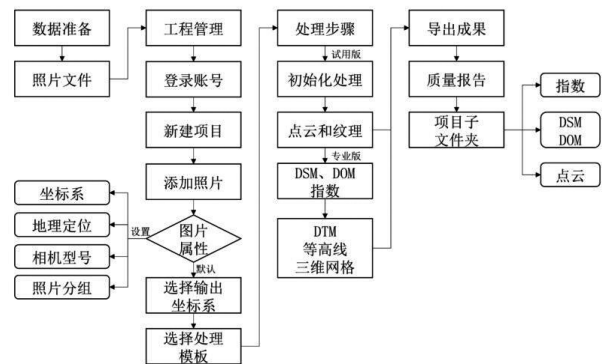


图 2 Pix4D 影像处理流程

2.3.2 Photoscan 无人机遥感影像处理

Photoscan 操作流程图见图 3,与 Pix4D 大同小异。

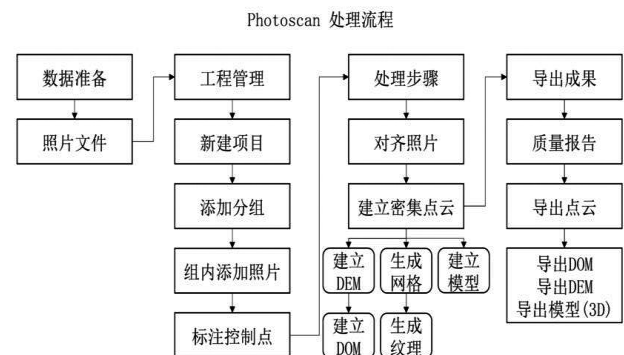


图 3 Photoscan 影像处理流程

在数据准备与新建项目后,需新建照片组才可进行照片添加,进行图像数据处理。设置具体精度后建立密集点云后,分成 3 种路线进行进一步处理:(1)建立 DEM,(2)生成网格,(3)建立三维模型。这三条路线相互独立,但 DOM 需在 DEM 的基础上生成;同理,纹理需建立在网格的基础上生成。

Photoscan 在软件内部就可以完成点云文件,DOM、DEM 和三维模型的导出。亦可随时导出当前工作进度的质量报告。

3 研究结果

3.1 硬件需求

运行自动化程度较高的图像处理软件对电脑性能的要求往往较高,特别是涉及大容量图片的遥感影像处理,普通电脑性能往往无法满足高效运行的要求,官网的推荐配置多为工作站,最低硬件配置如表 2。

表 2 最低配置硬件要求对比

	Pix4D	Photoscan
操作系统	64 位 windows7/8/10	Windows/ios/Linux
处理器 CPU	二核 CPU	四核 Core i7
内存 RAM	4GB	16GB
显卡 GPU	2008 年起任何 NVIDIA 和 AMD	NAVIDA GTX980

由表 2 可知,两款软件对电脑硬件的要求较高,需用到较高端的处理器和显卡,对内存的需要也都较大(4GB 以上)。

在软件优化上,Pix4D 软件所要求的硬件配置比 Photoscan 低,Photoscan 所要求的硬件是 2016 年 5 月时台式机和笔记本硬件配置中,较为顶端的显卡和处理器,对内存的需求也是远超 Pix4D 的 4GB 要求。但 Photoscan 的平台兼容性较广,不但可在 windows32 位以及 64 位的操作系统上运行,也可以同时在苹果 ios 和 Linux 系统上运行,大大提高了同行业不同操作系统之间的交流与共享。

从本文所用的实验平台处理数据的体验来看,Pix4D 对 CPU 的需求比较高,在遥感数据处理过程中,CPU 常常满负荷运转,而内存消耗并不太多,在处理数据的同时,电脑还有能力进行一些其他的基础操作。而 Photoscan 对内存的要求极高,因为本实验平台没有达到该软件所要求的最低内存,数据处

理质量不能超过中等质量,导致在该实验平台上 Photoscan 输出结果的效果大大降低。

综上所述,如果在电脑性能有限的情况下,使用 Pix4D 软件有着比较好的体验,但是为了保证数据处理的精度,建议按照软件推荐配置,对硬件进行必要的升级。

3.2 软件版权保护措施

这两款软件的开发公司均对软件进行了一定程度上的版权保护措施,在版权保护上,Photoscan 运用了注册码激活的方法;Pix4D 运用了网络服务器激活验证的方法。由于 Pix4D 采用了网络验证机制,使得软件保护措施更加有效;用户需在 Pix4D 官网上注册并登陆,软件联网时与 Pix4D 公司的数据库进行验证进入相应版本使用。

在试用功能上,Photoscan 采用的是 30 天全试用模式,即软件的功能全部在 30 天试用期内可以完全使用,但是试用期一过就必须购买正版,这对于以上提到的非专业用户并不是十分友好。而 Pix4D 采用的是限制软件的功能,用户可以永远免费使用该软件的部分功能,如照片配准和三维模型的生成,动画视频的输出,但数字高程模型、点云模型的输出受到了限制,对于普通用户来说,如果只在该软件中查看样地模型或者为了导出样地动画视频,Pix4D 完全可以满足这类用户的需求;但对专业人员来说,购买专业版获得所有的输出功能是十分有必要的。

综合所述,Pix4D 具有较好的版权保护措施和较为人性化的试用模式,对于业余建模爱好者而言,不失为一种较为理想的选择。

3.3 软件功能

从功能上分析,这两款软件都具有图像自动拼接、空三射线、点云生成、数字模型生成等功能,但二者也有本身的独特之处。如 Pix4D 独有指数计算器,可以利用 RGB 三个波段对用户自定义的计算公式进行计算,可以运用在归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)、土壤调整植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index,SAVI)、绿色归一化植被指数(GreenNormalized Difference Vegetation Index,GNDVI)等指数的计算上 [18];而 Photoscan 具有运行 Python 脚本、批量处理和联机并行处理的功能,大大节约了数据处理的人力成本和时间。

3.3.1 相近功能对比

1)图像匹配对比。Pix4D 在新建项目后选择拼接图片,并按照提示输入 GPS 等信息(支持从 TXT 和 TIFF 格式中导入 GPS),选择图像拼接模板(三维地图、三维模型、农业多光谱、农业 RGB、农业改制相机以及热红外相机等),可通过增加控制点来提高图像匹配精度。

Photoscan 不提供丰富的图像拼接模板,也没有手动输入控制点的功能,只有能够连接相机进行图像拼接,虽简化了用户操作,提高了软件便利度,但自动拼接图像出现问题后无法快速调整。Photoscan 的优势在于图片分组,Pix4D 虽可进行图片分组,但处于项目设置之中且不会自动弹出,用户初次操作时容易忽略。Photoscan 则在新建项目后自动弹出,为用户图片分批处理和拼接提供了良好的使用体验。

综上所述,在图像匹配对比上,Pix4D 提供了更丰富的模板和更精准的控制点操作,而 Photoscan 虽提供了更加简化的拼接和照片分组处理模式,但不利于拼接图像的重新调整。

2)点云生成、数字模型等功能对比。这部分功能两款软件十分相似,只需要点击对应的选项即可进行计算。不同之处在于:Pix4D 中设定处理模式会采用模板默认的参数进行计算,用户自定义时需进入处理选项中进行调整。而 Photoscan 在计算之前,就会弹出选项卡进行参数选择。

3)产品输出。这两款软件均支持点云生成、三维模型、DSM、正射影像(DOM)等输出,但两款软件的输出方式略有不同。

Pix4D 运算完之后,自动将结果保存在该项目所在的文件夹内,结束后只需到项目所在的文件路径下寻找即可,大大简化了用户操作与减轻了磁盘读写负担,但项目所在的子文件夹内文件众多,对于不熟悉软件的用户来说十分不便。相比之下,Photoscan 在文件菜单中清楚地有导出选项,可供用户手动选择导出文件所在路径。

4)质量报告对比。两款软件均支持生成质量报告以使用户直观了解数据质量,进行进一步的调整。Pix4D 质量报告在默认条件下,每次计算完都会弹出;而 Photoscan 的质量报告则需要用户手动生成

进行查看。两款软件的质量报告组成部分各有侧重,详细项目参数见表 3。

表 3 质量报告信息对比

项目	Pix4D	Photoscan
样地名称	√	√
生成时间	√	√
平均地面采样距离	√	
面积	√	√
图像关键点平均数	√	
数据量	√	√
相机优化	√	
匹配度	√	√
配准	√	
DOM	√	√
DEM		√*
DSM	√	√
初始图像位置	√	
相机标定		√
相机位置		√
连接点的位置	√	
有效重叠	√	√
颜色校正		√
相机内部参数	√	√
二维分析表	√	
三维点匹配关键点	√	
二维匹配关键点	√	
绝对定位方差	√	
相对定位方差	√	√
机器性能	√	
处理参数		√
处理时间		√
处理模式	√	√

注:photoscan 中,要先对点云进行自动分类,分类之后导出地面点云的 DSM 即为所要的 DEM

3.3.2 独有功能

1)Pix4D 独有功能。Pix4D 最新版本提供了指数计算功能,即可以提取图像的红、绿、蓝光三个波段进行用户自定义的公式计算。在此定义植被指数(plants index,PI)的计算公式如下:

$$PI = \frac{Red-Blne}{Red+Blne}$$

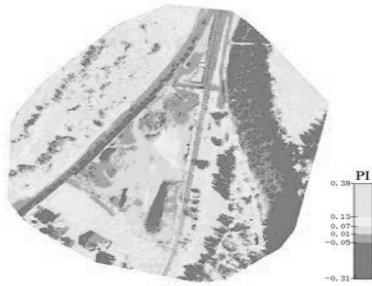


图 4 航拍区域 PI 植被指数

经计算,植被指数 PI 在该区域的变化图如图 4 所示。

其中,PI 指数越大,代表植被的生长状态与覆盖度越好,由图可知,PI 指数高的地方,往往是树林、草原等植被覆盖度较高的地方。

2)Photoscan 独有功能。用户可以自定义作业类型、作业范围、属性设置等参数,因此可以实现有针对性的进行批量处理,节省了批量处理时大量的人力成本;同时 Photoscan 还支持 Python 脚本操作以及网络并行计算^[19],具体操作方法可以在 Photoscan 网站上 <http://www.agisoft.com/downloads/user-manuals> 获得 Python API 脚本官方手册^[20]。

3.4 成果质量

通过常规流程生成的 DOM 如图 5 所示(图中 DOM 均未经后期编辑)

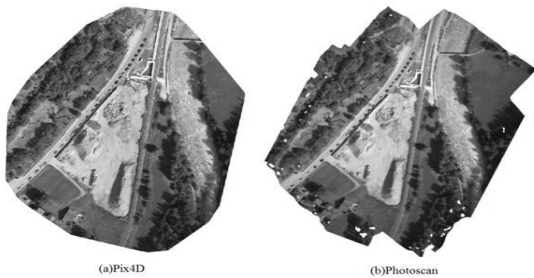


图 5 两款软件生成的正射影像(DOM)

由目视法可知,图 3 中生成的 DOM 拼接效果良好,没有出现明显的错缝。将两款软件的 DOM 进行对比,可以发现 Pix4D 的图像边界比较平滑,没有出现空洞,画质比较细腻,而 Photoscan 生成的 DOM,图幅比 Pix4D 大,但是在边界的区域有破洞,图像的细节不够细腻,亮度比 Pix4D 生成的 DOM 较暗。主要是由于电脑性能的限制,Photoscan 只能使用中低质量进行处理,而 Pix4D 由于优化较好,在该实验平台上可以进行高画质的处理,因此,在硬件配置较低的实验平台上,Pix4D 由于更好的软件性能优化,可以生成质量较高的 DOM,生成的 DOM 拼接效果和细节效果更加优良。

对比两款软件生成的图像重叠度影像(如图 6 所示),可观察到 Pix4D 的图像边缘更加平滑规整,从生成重叠度的视觉效果来看,Photoscan 提供了更多的颜色层次(9 层),而 Pix4D 只提供了 5 层的颜色层次,在试验区中,由于 Pix4D 重叠度较高,可视化效果大大降低。

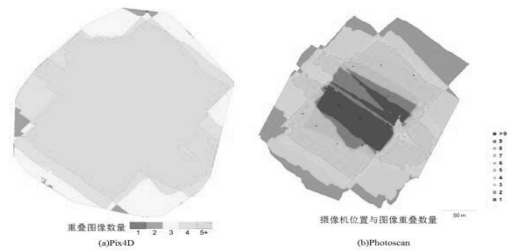


图 6 两款软件生成的图像重叠度

Pix4D 和 Photoscan 均能生成数字表面模型(DSM)(如图 7 所示),DSM 是在 DEM 的基础上,进一步涵盖了除地面以外的其他地表信息,在农林业和建筑业等对地表物体有高度要求的领域更有应用前景^[21],除此之外,Pix4D 还支持计算数字地形模型(DTM)。Pix4D 生成的数字表面模型,在细节上很好的表现了样地的不同地形地貌以及下垫面的边界范围,可以清楚地分辨出河流与草原、道路与植被等。Photoscan 通过点云分类的方法,可分出地面、水面、建筑、植被等点云类别,并可以针对某一种点云类别生成 DSM,然而 Photoscan 由于受实验平台性能制约,生成精度较低,不同下垫面之间很难区分。在图中只能勉强分别出树林和河流,道路、工地等其他信息失真较为严重。

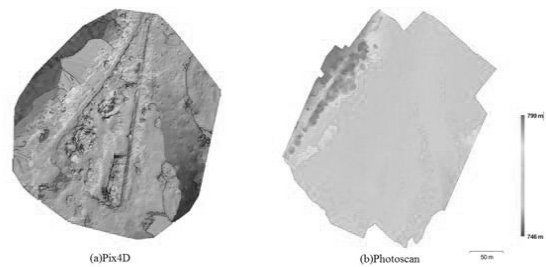


图 7 两款软件生成的数字表面模型(DSM)

最后,对两款软件的空间几何精度进行检查,结果如表 4 所示。

表 4 成果空间误差统计(m)

产品	平均误差		
	X	Y	Z
Pix4D	0.00001	0.00001	-0.000031
Photoscan	2.01377	2.23693	0.560824

注:其中 X、Y 为平面误差,Z 为高程误差

从表 4 中可以看出, Pix4D 生成的平面精度极高, 而 Photoscan 由于受平台性能的影响, 没能进行精度最高的计算, 从而导致了平面上误差较高的情况。

4 结论

本文以瑞士的 Bahnhof Fo Bitsch 镇附近一处工地为例, 对 Pix4D 和 Photoscan 两款软件进行了数据处理实验, 利用这两款软件的常规流程, 完成了从原始数据生成 DOM、点云、DSM 等操作, 并从硬件需求、版权保护、软件功能和成果质量等方面对这两款软件进行了比较分析, 得出如下结论:

1) 两款软件具有相似且完整的无人机影像处理功能, 对操作平台的硬件配置要求均较高, 其中 Pix4D 软件优化相对较好, 对配置的要求相对较低, Photoscan 兼容的平台较多, 成果跨平台间共享比较容易。

2) Pix4D 具有更加完备的版权保护措施, 其试用模式较为人性化, 对于业余建模爱好者长期处理遥感数据而言, 是一种较为理想的选择。

3) 两款软件均具有完备无人机影像处理功能的同时, Pix4D 独有指数计算器, 支持用户对遥感数据进行直接而深层次的自定义挖掘。Photoscan 具有批量处理、运行 Python 脚本和联机并行处理的功能, 大大节约了数据处理的人力成本和时间。

4) Pix4D 由于对硬件性能要求较低, 在相同的配置情况下可以产生更加优秀的成果质量; 而 Photoscan 在重叠影像的可视化方面, 拥有更加丰富的颜色图层, 提供了更加直观的可视化效果。

5) Pix4D 支持导出 DSM 和 DTM, Photoscan 支持点云分类, 不仅可以导出 DSM, DEM, 还能针对不同的点云类别, 导出对应的数字表面模型, 进一步涵盖除地面以外的其他地表信息, 因此 Photoscan 在农林和建筑业方面更有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] WILSON A, ABRAHAM N, BARRAT R, et al. Evaluation of methods of assessing vegetation change in the semiarid rangelands of southern Australia [J]. *Rangeland Journal*, 1987, 9(1): 5-13.

[2] CURRAN P J, WILLIAMSON M S. Sample size of ground and remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 20(1): 31-41.

[3] WITTICH K P, HANSING O. Area averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1995, 38(4): 209-215.

[4] EASTWOOD J A, YATES M G, THOMSON A G, et al. The reliability of vegetation indices for monitoring salt marsh vegetation cover [J]. *International Journal of Remote Sensing*,

1997, 18(18): 3901-3907.

[5] GUTMAN G, IGNA TOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.

[6] HUNTER R, HIVELEY W D, FUJIKAWA S J, et al. Acquisition of NIR green/blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(1): 290-305.

[7] TURNER D L, LUCIEER A, WATSON C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultrahigh resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5): 1392-1410.

[8] DP, AL, LW. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2738-2745.

[9] GARCIA-RUIZ F, SANKARAN S, MAJA J M, et al. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 91(91): 106-115.

[10] GINI R, PAGLIARI D, PASSONI D, et al. UAV photogrammetry: Block triangulation comparisons [J]. *Int Arch Photogram Remote Sens Spat Inf Sci*, 2013.

[11] ALLAN B M, IERODIACONOUD, NIMMODG, et al. Free as a drone: ecologists' add UAV to the toolbox [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(7): 354-359.

[12] BRECKENRIDGE R P, DAKIN S M E, BUNTING S C, et al. Using Unmanned Helicopters to Assess Vegetation Cover in Sagebrush Steppe Ecosystems [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(4): 362-370.

[13] 金鼎坚, 支晓栋, 王建超, 等. 面向地质灾害调查的无人机遥感影像处理软件比较 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(1): 183-189.

[14] BALLESTEROS R, ORTEGA J F, HERNANDEZ D, et al. Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part I: Description of image acquisition and processing [J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(6): 579-592.

[15] DANDOIS J P, ELLISECH. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 13(6): 259-276.

[16] 黄日娟, 梅树红, 陆向明. 基于无人机遥感的高分辨率影像快速获取研究 [J]. *科技资讯*, 2015, 13(20): 20-21.

[17] 张小宏, 赵生良, 陈丰田. Agisoft photoscan 在无人机航空摄影影像数据处理中的应用 [J]. *价值工程*, 2013, 32(20): 230-231.

[18] CL, PB, GJ, et al. Assessment of Unmanned Aerial Vehicle Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crops in Small Plots [J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3557-3585.

[19] ZIF_YEE. 在 linux 平台使用 photoscan 建立网络并行计算 [更新 opencv] [M]. 新疆社区, 2016.

[20] LLC. PhotoScan Python Reference, Release 1.2.4 [M]. 2016.

[21] 张静, 刘小强, 解修平. DSM 生产与应用概述 [J]. *测绘标准化*, 2013, 29(4): 19-22.