

# 基于小型 UAV 的森林公园正射影像制图分析

——以上海滨江森林公园为例

刘 杰<sup>1</sup>, 李卫正<sup>1,2</sup>, 张青萍<sup>1\*</sup>, 申世广<sup>1</sup>, 舒 婷<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 现代分析测试中心, 江苏 南京 210037)

**摘 要:**高空间分辨率森林公园遥感影像图,能反映森林公园景观布局特点和景观要素间空间特征关系。以植被覆盖率 90%,面积 120 hm<sup>2</sup> 的上海滨江森林公园为研究对象,使用小型 UAV 采集影像,借助瑞士 Pix4UAV 软件尝试进行 1:1 000 森林公园正射影像制作。同时,分析影像同名点连接度分布与不同森林植被覆盖类型间关系,探讨像控点数量对制图精度的影响。试验表明,小型固定翼 UAV 配合地面像控点采集可以快速准确完成森林公园高分辨率影像制图,正射影像空间分辨率为 0.052 m,平面位置 X 方向误差为 0.048~0.190 m;Y 方向误差为 0.013~0.112 m,平面偏移量为 0.048~0.194 m;综合考虑制图精度与外业数据采集效率,建议的像控点数量为 16~26 个。针叶林景观区的影像对同名点连接数在 200 以下,公园内及周边建筑密度较大区域影像对同名点连接数在 1 500~2 000 之间,杉科植物景观区、专类植物景观区、入口景观区、原生林景观区以及草坪游憩区匹配点连接数介于两者之间,可能存在不同区域制图精度不同的现象。

**关键词:**UAV;森林公园;正射影像图;像控点;匹配点;精度评估

**中图分类号:**S771.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)02-0213-06

## DOM Mapping Analysis of Forest Park Based on UAV ——A Case Study of Shanghai Riverside Forest Park

LIU Jie<sup>1</sup>, LI Wei-zheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-ping<sup>1\*</sup>, SHEN Shi-Guang<sup>1</sup>, SHU Ting<sup>1</sup>

(1. School of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

2. Advanced Analysis and Testing Center, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

**Abstract:** Forest park remote sensing plane mapping with high spatial resolution can more accurately reflect the characteristics of forest park landscape layout and spatial relation among landscape elements. Shanghai Riverside Forest Park with an area of 120 hm<sup>2</sup> and vegetation coverage of 90% was selected as research object to prepare orthophoto (1:1 000) of the park. Portable UAV was used to capture images and Swiss Pix4UAV software was used to process the data. The relationship between image point connection distribution and forest landscape was analyzed to probe the impact of GCPs number on cartographic accuracy. The results showed that small fixed-wing UAV could complete the forest park high resolution plane mapping quickly and accurately when using GCPs, the orthophoto spatial resolution was 0.052 m. The X- and Y-direction errors were 0.048—0.190, and 0.013—0.112 m, respectively. The plane position offset was 0.048—0.194 m. Considering the efficiency of the data acquisition, the image control points were 16 to 26. The coniferous forest landscape image matching-point connections were below 200, in places with more architect-

收稿日期:2015-05-12 修回日期:2015-08-29

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201304208);国家自然科学基金(31270587,31570703);江苏高校优势学科建设工程(PAPD,生物学);国家级园林虚拟现实实验教学示范中心资助。

作者简介:刘 杰,女,硕士研究生,研究方向:无人机图像在风景园林规划设计中的应用。E-mail:1119356404@qq.com

\*通信作者:张青萍,女,教授,博士生导师,研究方向:园林规划设计与数字景观。E-mail:qpzh@njfu.edu.cn

tures in the park, the surrounding matching-point connections were between 1 500—2 000. Metsequoia landscape area, native forest landscape area as well as lawn area had different matching-point connections. Different regional mapping accuracies might exist among different regions.

**Key words:** UAV; forest park; DOM; GCPs; match points; accuracy assessment

森林公园是充分发挥森林功能特别是森林生态系统服务功能的主要载体,也是森林旅游事业发展最重要的阵地<sup>[1]</sup>。对森林公园的研究已然成为林业工作者的研究热点之一<sup>[2]</sup>。能否快速、准确地获取森林公园空间信息并转化为易读取的图文模式,是森林公园改造建设中需要解决的重要问题。

近年来,随着小型无人机(UAV)技术不断发展,无人机遥感广泛应用于森林资源管理及动态监测、森林三维绿量估算以及森林三维景观可视化等领域。国外,Hormigo<sup>[3]</sup>等利用微型 UAV 系统进行森林火灾的探测,试验结果表明无人机系统可以对预测火灾的三维位置进行实时估算,依据载荷数据可以完成高植被覆盖率公园的制图以及进一步森林表征,如木材和软木的材积估算。Gini<sup>[4]</sup>等基于高分辨率遥感影像,探讨了植物种类辨别及交互式城市三维景观重建技术与方法。国内,张园<sup>[5]</sup>等以森林资源二类调查为例,辅以 GIS、GPS 技术,指出无人机遥感技术可用于森林精确区划调查、森林病虫害监测防治等方面。彭培胜<sup>[6]</sup>等利用无人机影像提取高精度 DEM,在提取的 DEM 上叠加高分辨率无人机影像,实现森林景观三维可视化。上述研究都依托于小型无人机获取影像,具有平台构建容易、运行和维护成本低、体积小、质量轻、操作简单、灵活性高、作业周期短等特点<sup>[7]</sup>。小型无人机能提供多角度、高空间分辨率、时效性强的遥感影像,克服载人航空遥感受制于长航时、大机动、恶劣气象条件、危险环境等的影响<sup>[8]</sup>,是航空和航天遥感的有力补充。基于高空间分辨率遥感影像的森林景观制图,反映公园景观的布局特点,揭示森林景观要素之间的耦合关系,为景观的规划、管理及生态恢复提供科学依据<sup>[9]</sup>。

以植被覆盖率 90% 的上海滨江森林公园为研究对象,利用小型 UAV 获取遥感影像,借助瑞士 Pix4UAV 软件,完成公园了 1 : 1 000 正射影像图制作,分析影像同名点连接度分布与森林植被空间分布关系,并探讨像控点数量对成图精度的影响,提高制图精度和效率,试验成果可为公园后期的管理使用、生态维护提供基础数据。

## 1 研究区概况

上海滨江森林公园位于浦东新区高桥镇高沙

滩,黄浦江、长江、东海交汇处,地理位置为 31°22′—31°23′N、121°30′—121°32′E,属亚热带季风气候。公园面积约 120 hm<sup>2</sup>,是在保留大面积苗圃地基础上扩建而成,以常绿落叶阔叶混交林为主<sup>[10]</sup>,园内存留 20 万株乔灌木和 204 种野生植物。改建后,公园形成了一套城郊森林湿地生态系统,包括次生生态人工森林、人造林群落与滨江湿地景观,森林覆盖率达 90%<sup>[11]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 无人机遥感影像获取

试验采用小型固定翼无人机飞行平台,常规气动布局,机长 2.07 m,翼展 3 m,续航时间 2.5 h,巡航速度 80~130 km/h,有效荷载约 5 kg。搭载高分辨率 Canon EOS 5D Mark II 数码相机,相机经中测新图(北京)遥感技术有限公司检校,传感器尺寸 36 mm×24 mm,类型为 CMOS,相机镜头焦距为 35 mm,像幅大小为 5 616×3 744 像元。试验航摄时间为 2013 年 7 月 20 日,微风,能见度较好,预设航高 290 m,航摄过程 1.5 h。地面操控人员通过地面站实时跟踪无人机位置并获取飞行状态参数。航拍共设 15 条航带,获取 631 张影像和 POS 数据,总数据文件大小为 5 G 左右。

### 2.2 无人机数据处理系统

2.2.1 无人机数据处理软件瑞士 Pix4UAV 数据处理过程分 3 个步骤:第一步,基于改进 SIFT (Scale-Invariant feature transform,尺度不变特征转换)算法<sup>[12-14]</sup>完成影像特征点提取、匹配,相机参数优化,控制点信息载入;第二步,点云加密及平滑滤波;第三步,数字表面模型(DSM)和正射影像生成。软件可从单幅影像 EXIF 信息中自动读取相机的基本参数,如:相机型号、焦距、像主点等,处理过程不完全依赖 IMU 姿态信息,只需提供影像曝光点 GPS 信息,就可自动进行光束法区域网平差<sup>[15-17]</sup>,从而完成拼接工作。运算结束,软件可将航摄所得的影像制作成精确的二维正射影像和三维纹理模型。

2.2.2 图像处理工作站配置 曙光天阔 A840, 4 路 64 位 CPU,共 32 个处理核心,每个核心主频为 2.0 GHz,64 G 内存,RAID5 磁盘阵列 2 T。

2.3 影像质量评估指标

由于小型无人机重量较轻,受空中气流影响大,飞行姿态波动频繁,为保证图像的处理精度,需要对航摄所获得的影像进行质量评估,主要包括以下几个指标:影像重叠度<sup>[18]</sup>;航线弯曲度<sup>[18]</sup>;航高差<sup>[18]</sup>;影像旋角<sup>[18]</sup>;影像模糊度<sup>[19]</sup>。

2.4 像控点采集

快速有效的像控点布设方式,可以提高试验效率和精度。利用地理信息系统软件 ArcGIS 10. 1,完成内业像控点的位置初选。像控点(GCPs)坐标信息通过 RTK 差分 GPS(南方测绘 S82)采集,采用高斯-克里格投影,北京 1954 地理坐标系统。像控点共采集 61 个,具有明显地面识别特征,尽可能均匀分布在研究区内部及周边(图 1)。为了探讨不同数量像控点对成图精度的影响,随机分别采用 46、36、26、16、6 个像控点与 15 个检查点进行精度试验。

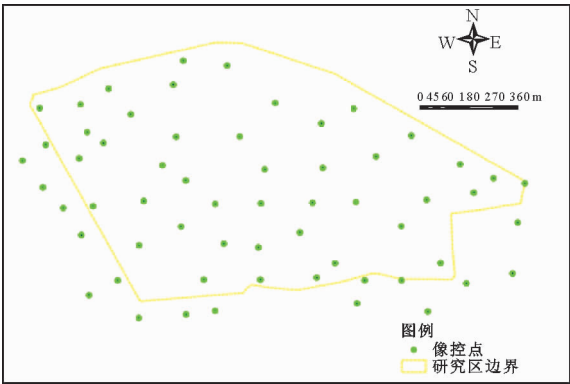


图 1 研究区像控点分布

Fig. 1 GCPs distribution maps of study area and surroundings

2.5 正射影像生成与精度评估

将原始机载 POS 数据转化为 Pix4UAV 软件适用的 .csv 文件格式,校核照片名称与参数,导入软件,进行本地化处理。相邻影像间通过提取的特征点(keypoints)匹配,然后使用匹配点及 POS 数据进行光束法区域平差和 3D 坐标计算。3D 点内插形成不规则三角网,继而得到 DEM。DEM 被用来重投影每一个影像点,生成正射影像。处理过程中,影像间匹配点连接数可反映影像间的拼接效果,连接数越大,影像拼接精度越好。处理完成后,自动生成带坐标的数字表面模型(DSM)和正射影像(DOM)文件。生成的正射影像会有少量拉花或称扭曲变形(artifacts and wobbly edges),使用自带模块可以进行处理,同时调整影像的色彩。

正射影像生成后,通过借助点位误差<sup>[20]</sup>进行成图精度评定,点位误差可表示为下式:

$$\Delta X_1 = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_i)^2]/n}$$

(1)

$$\Delta Y_1 = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (Y_{pi} - Y_i)^2]/n}$$

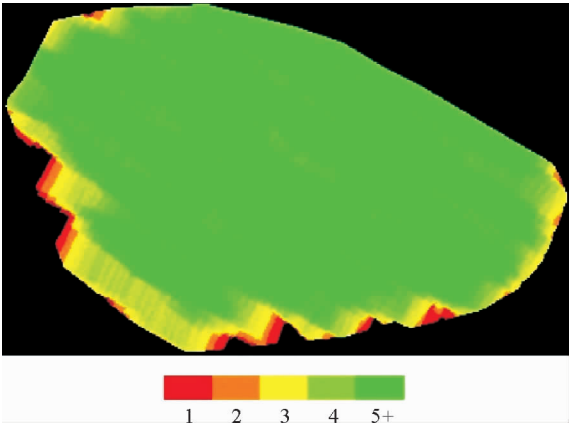
(2)

式中: $X_{pi}$ 为控制点在单张影像 X 方向上的点位, $Y_{pi}$ 为控制点在单张影像 Y 方向上的点位, $X_i, Y_i$ 分别为检查点在单张影像 X 方向和 Y 方向上实际点位坐标, $n$ 代表单张影像上检查点的个数。

3 结果与分析

3.1 初始无人机影像质量评估结果

通过 Pix4UAV 软件运算及统计,研究区图像重叠张数平均在 5 张以上(图 2);航带弯曲度不超过 5%,航摄轨迹和预设航线基本一致;同一航带相邻相片的航高差为 4. 2 m,最大航高差和最小航高差之差为 16. 4 m,符合航迹控制精度中航高差小于 20 m 的要求;剔除影像旋角超过 3°的图像 6 张;影像最大模糊值为 0. 466,最小为 0. 181,平均值为 0. 356,剔除 11 张模糊值在 0. 4 以上的图像(一般出现在飞机转弯掉头处,对试验精度影响较小)。剔除少量影像后,航摄剩余影像各项质量评估结果均满足《无人机航摄系统技术要求》<sup>[21]</sup>。



注:数字 1~5 代表航摄图片重叠张数,数值越大,重叠度越高。

图 2 研究区图像重叠度

Fig. 2 Images overlapping of study area

3.2 影像匹配点与植被分布特征关系

此次航摄所得单张影像特征点数量最大值为 104 520,最小值为 2 189,平均值为 59 766,中值为 56 327;相邻影像特征点匹配数量的最大值为 14 596,最小值为 41,平均值为 7 380,中值为 8 029。相邻影像特征点平均匹配率为 12. 35%。影像对匹配点连接分布如图 3 示,数值在 25~2 000 之间。

将图 3 与植被分布图(图 4)进行对比分析,结果表明,公园内针叶林景观区匹配点连接数最低,在 200 以下,即图 4 中 6 号区域及周边颜色较浅的位置。主要原因可能为该区域针叶林种植密度大、森

林郁闭度<sup>[22]</sup>高,特征点提取及匹配较困难。5 号草坪游憩景观区及公园周边建筑密度较大的区域匹配点连接数在 1 500~2 000 之间,原因可能为植被覆盖率低、边界特征明显,特征点提取较易。杉科植物景观区、专类植物景观区、入口景观区、原生林景观区、森林湿地景观区匹配点连接数介于两者之间。

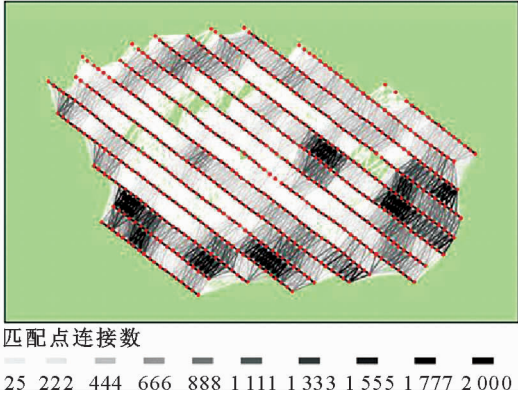


图 3 影像对匹配点连接分布

Fig. 3 Distribution of images matching-point connection

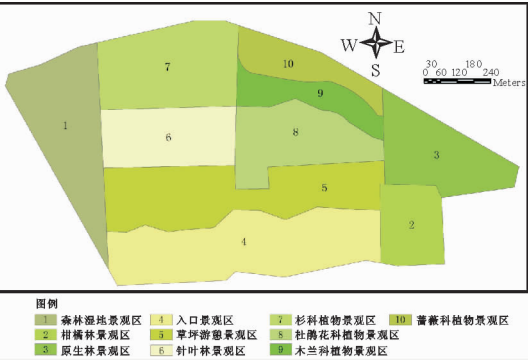


图 4 上海滨江森林公园植被分布

Fig. 4 Distribution of Shanghai Riverside Forest Park landscape district

3.3 正射影像精度评估

采用 46 个像控点和 15 个检查点进行光束法区域网平差(表 1),统计结果为: X 方向的平均误差 0.022 m,中值误差 0.015 m,标准差 0.002; Y 方向的平均误差 0.029 m,中值误差 0.024 m,标准差 0.005; Z 方向的平均误差 0.049 m,中值误差 0.026 m,标准差 0.000。生成的滨江森林公园正射影像如图 5 示。

表 1 光束法区域网平差精度

Table 1 The bundle block adjustment accuracy table

点类型	Max /m	Min /m	Average /m	Median /m	Sigma
控制点	X 0.090	0.000	0.022	0.015	0.002
	Y 0.082	0.001	0.029	0.024	0.005
	Z 0.502	0.002	0.049	0.026	0.000

正射影像整体清晰且色彩自然,空间分辨率为 0.052 m,小部分植被茂密区域出现模糊或拉花现象。随机抽取 15 个像控点作为检查点,将原始 POS 数据与像控点的实测数据导入 Pix4UAV 软件,计算结果见表 2。

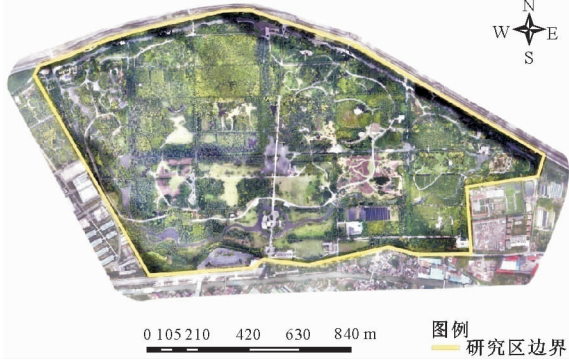


图 5 研究区正射影像

Fig. 5 The orthophoto of study area

表 2 点位精度计算

Table 2 Point precision computation table

检查点号	坐标差 $\Delta X_i/m$	坐标差 $\Delta Y_i/m$	坐标平面 偏移量/m
1	0.085	0.019	0.087
2	0.060	0.037	0.070
3	0.091	0.038	0.099
4	0.073	0.006	0.073
5	0.063	0.006	0.063
6	0.190	0.037	0.194
7	0.116	0.112	0.161
8	0.048	0.003	0.048
9	0.062	0.042	0.075
10	0.079	0.044	0.090
11	0.123	0.025	0.126
12	0.150	0.096	0.178
13	0.130	0.065	0.145
14	0.101	0.038	0.108
15	0.072	0.016	0.074
Max/m	0.190	0.112	0.194
Min/m	0.048	0.003	0.048
Median/m	0.085	0.037	0.090
Average/m	0.096	0.039	0.106
Sigma	0.009	0.002	0.009

由表 2 可知,检查点为 15 个, X 方向的平均误差为 0.096 m,中值误差为 0.085 m,标准差为 0.009; Y 方向的平均误差为 0.039 m,中值误差为 0.039 m,标准差为 0.002。正射影像内业加密点对外业像控点平面位置中误差为 0.090 m,符合《低空数字航空摄影测量内业规范》中,比例为 1 : 1 000 的正射影像图,内业加密点对外业控制点的平面位置中误差为 0.8 m 以内的要求<sup>[23]</sup>。

3.4 不同数量像控点对成图精度的影响

分别采用 46、36、26、16、6 个像控点和随机抽取的 15 个检查点进行精度试验,将相应点的坐标信息载入 Pix4UAV 软件进行计算,得统计结果(表 3)。坐标平面偏移量,即实测数据与真实数据之间的误差。

表 3 点位误差精度统计  
Table 3 Error statistics of check points m

统计类别	坐标差 $\Delta X_i$	坐标差 $\Delta Y_i$	坐标平面 偏移量	$X_i,Y_i$
46GCPs	Max	0.190	0.112	0.194
	Min	0.048	0.003	0.048
	Median	0.085	0.037	0.090
	Average	0.096	0.039	0.106
36GCPs	Max	0.209	0.441	0.441
	Min	0.020	0.003	0.048
	Median	0.096	0.074	0.151
	Average	0.101	0.128	0.182
26GCPs	Max	0.601	0.441	0.666
	Min	0.003	0.009	0.050
	Median	0.083	0.108	0.149
	Average	0.131	0.155	0.226
16GCPs	Max	0.349	0.760	0.761
	Min	0.001	0.008	0.023
	Median	0.054	0.102	0.172
	Average	0.102	0.156	0.214
6GCPs	Max	0.655	0.448	0.679
	Min	0.002	0.005	0.038
	Median	0.077	0.155	0.331
	Average	0.131	0.201	0.274

由表 3 可知,6 个像控点时,检查点的平面位置中误差为 0.331 m,平面偏移量平均值为 0.274 m,试验误差相对较大。当像控点增加到 16 个,平面位置中误差为 0.172,平面偏移量平均值为 0.214 m,试验误差明显减小。像控点从 26 递增为 46 个时,平面位置中误差分别为 0.149、0.151 m 和 0.090 m,平面偏移量平均值分别为 0.226、0.182 m 和 0.106 m,制图精度变化幅度较小,但对应外业像控点采集工作量明显增加。

4 结论与讨论

介绍了一种利用小型无人机高重叠度影像和图像处理软件 Pix4UAV,制作高植被森林公园正射影像的方法。数据处理结果表明,无人机正射影像平面位置误差为 0.048~0.194 m,坐标平面偏移量为 0.106 m,总体符合《低空数字航空摄影测量内业规范》中 1 : 1 000 正射影像图的制图精度要求。

影像对匹配点连接度与不同森林植被类型空间分布分析表明,不同植被景观区域,图像特征点提取

及匹配数量差异较大。植被覆盖率低的草坪游憩区及公园建筑密度较大的区域,匹配点连接数较高(1 500~2 000)。而公园内针叶林区域,植被郁闭度高,特征点提取、匹配较难,匹配点连接数较低(<200)。因此,对森林公园制图而言,可能存在不同区域制图精度不同的现象,值得进一步研究。

对本文采用的方法而言,不同地面像控点数量对成图精度的有影响,数量较少时(6 个),正射影像平面位置精度较差;但当像控点数量由 26 增为 46 个时,精度变化较小。外业采集工作量明显增加。综合考虑制图精度与外业数据采集效率,建议的像控点数量为 16~26 个。

本次试验以小型无人机航摄影像为数据源,影像数据量大,图像处理时间较长。后续的研究期望能改进图像拼接算法,提高稠密森林区域的特征点识别、匹配效率。此外,采用无人机直接定向定位(Direct Georeferencing)<sup>[24]</sup>,利用 GNSS 差分定位和惯性导航测量(INS)技术结合的方法,提高机载 POS 数据的定位精度,同时充分发掘三维激光扫描作为多源辅助数据,将是高郁闭度森林制图提高精度的有效途径。

参考文献:

[1] 李柏青,吴楚材,吴章文. 中国森林公园的发展方向[J]. 生态学报,2009,29(5):2749-2756.  
LI B Q,WU C C,WU Z W. The development roadmap analysis on China's Park[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(5):2749-2756. (in Chinese)  
[2] 王梦君,唐芳林,史冬防. 我国森林公园的发展动态分析[J]. 西北林学院学报,2012,27(5):251-254.  
WANG M J,TANG F L,SHI D F. Development dynamic of forest parks in China[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(5):251-254. (in Chinese)  
[3] HORMIGO T,ARAUJO J. A micro-UAV system for forest management[C]. The International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences (UAV-g). Germany:Rostock,2013:211-216.  
[4] GINI R,PASSONI D,PINTO L,*et al.* Aerial images from an UAV system:3D modeling and tree species classification in a park area [C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (UAV-g). Australia,Melbourne,2012:361-366.  
[5] 张园,陶萍,梁世祥,等. 无人机遥感在森林资源调查中的应用[J]. 西南林业大学学报,2011,31(3):49-53.  
ZHANG Y,TAO P,LIANG S X,*et al.* Research on application of UAVRS techniques in forest inventories[J]. Journal of Southwest Forestry University,2011,31(3):49-53. (in Chinese)  
[6] 彭培胜,王懿祥,吴建强,等. 基于无人机遥感影像的三维森林景观可视化[J]. 东北林业大学学报,2013,41(6):61-65.

PENG P S,WANG Y X,WU J Q,*et al.* Three-dimensional vi-  
sualization of forest landscape based on UAV Remote Sensing  
Images[J]. 2013,41(6):61-65. (in Chinese)

[7] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取  
关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18):1-12.  
WANG P,LUO X W,ZHOU Z Y,*et al.* Key technology for re-  
mote sensing information acquisition based on micro UAV[J].  
Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-  
ing,2014,30(18):1-12. (in Chinese)

[8] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武  
汉大学学报:信息科学版,2014,39(5):505-513,540.  
LI D R,LI M. Research advance and application prospect of un-  
manned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics  
and Information Science of Wuhan University,2014,39(5):  
505-513,540. (in Chinese)

[9] 付春风. 基于 GIS 的流溪河森林公园景观分类与制图[J]. 华  
中农业大学学报,2009,28(2):233-237.  
FU C F. GIS-based forest landscape classification and mapping  
of Liuxihe National Forest Park[J]. Journal of Huazhong Agri-  
cultural University,2009,28(2):233-237. (in Chinese)

[10] 万福绪,董波,陈敏. 上海滨江森林公园景观空间格局分析  
[J]. 中国园林,2008(7):61-65.  
WAN F X,DONG B,CHEN M. Analysis on the landscape  
spatial pattern in Shanghai Waterside Forest Park[J]. Chinese  
Landscape Architecture,2008(7):61-65. (in Chinese)

[11] 上海滨江森林公园简介[EB/OL]. [http://www.bjfp.sh.cn/  
sites/binjiang/content](http://www.bjfp.sh.cn/sites/binjiang/content),2013-08-05/2014-04-13.

[12] DAVID D G. Distinctive image features from scale-invariant  
key-points[J]. International Journal of Computer Vision,  
2004,60(2):91-110.

[13] 解斐斐,林宗坚,桂德竹. 基于 SIFT 的 UAV 载组合广角相机  
影像匹配方法[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2014,32(1):  
56-63.  
XIE F F,LIN Z J,GUI D Z. Image matching method based on  
SIFI for UAV images from cambinded large frame camera[J].  
Journal of Jilin University:Information Science Edition,2014,  
32(1):56-63. (in Chinese)

[14] STRECHA C,BRONSTEIN A M,BRONSTEIN M M,*et al.*  
LDAHash:Improved matching with smaller descriptors [J].  
Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transac-  
tions on,2012,34(1):66-78.

[15] KUING O,STRECHA C,BEYELEM A,*et al.* The accuracy  
of automatic photogrammetraic techniques on ultra-light  
UAV imagery[C]. The International Archives of the Photo-  
grammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences  
(UAV-g). Switzerland:Zurich,2011:1-6.

[16] TRIGGS B,MCLAUCHLAN P F,HARTLEY R I,*et al.*  
Bundle adjustment—a modern synthesis[M]//Vision algo-  
rithms:theory and practice. Springer Berlin Heidelberg,2000:  
298-372.

[17] HARTLEY R,ZISSERMAN A. Multiple view geometry in  
computer vision[M]. Cambridge university press,2003.

[18] 何敬,李永树,鲁恒,等. 无人机影像的质量评定及几何处理研  
究[J]. 测绘通报,2010(4):22-24,35.  
HE J,LI Y S,LU H,*et al.* Research of UAV images quality  
evaluation and geometry processing[J]. Bulletin of Surveying  
and Mapping,2010(4):22-24,35. (in Chinese)

[19] CRETE F,DOLMIERE T,LADRET P,*et al.* The blur effect:  
perception and estimation with a new no-reference perceptual blur  
metric[C]//Electronic Imaging. International Society for Optics  
and Photonics,2007:64920I-64920I-11.

[20] 鲁恒,李永树,江禹. 一种基于 POS 数据的无人机影像自动展  
绘控制点方法[J]. 光电工程,2011,38(9):25-29.  
LU H,LI Y S,JIANG Y. A method of automatic extraction of  
image control points for UAV image based on POS data[J].  
Opto-Electronic Engineering,2011,38(9):25-29. (in Chi-  
nese)

[21] 国家测绘局. CH/Z3003-2010 无人机航摄系统技术要求[S].  
北京:测绘出版社,2010.

[22] 李宇昊,石田. 利用航空数码影像的色彩特征估测森林郁闭度  
[J]. 西北林学院学报,2014,29(1):148-154.  
LI Y H,SHI T. Estimating the canopy density though color  
features of aerial digital images[J]. Journal of Northwest For-  
estry University,2014,29(1):148-154. (in Chinese)

[23] 国家测绘局. CH/Z3003-2010 低空数字航空摄影测量内业规  
范[S]. 北京:测绘出版社,2010.

[24] TURNER D,LUCIEER A,WALLACE L. Direct georefer-  
encing of Ultrahigh-resolution UAV imagery[J]. Geoscience  
& Remote Sensing IEEE Transactions on,2014,52(5):2738-  
2745.