

# 无人驾驶飞艇低空遥感影像的几何处理

张永军<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:**介绍了基于无人驾驶飞艇的低空遥感系统的组成及技术指标,详细论述了飞艇按航线自动控制飞行、遥感影像自动获取,以及低空遥感影像匹配、相对定向、区域网平差、全景图和正射影像生成等处理与分析。试验结果说明,低空遥感系统可以满足大重叠度、高分辨率立体影像获取的需求,在大比例尺测图、精细三维重建等领域具有广阔的应用前景。

**关键词:**低空遥感;无人驾驶飞艇;自动控制;影像处理;空中三角测量

**中图法分类号:**P237.3; P231

为了实现大比例尺测绘、城市精细三维建模及真正射影像生成等任务,必须获取大重叠度的高分辨率立体影像。以飞机和卫星为平台的航空航天摄影测量由于成像间隔、云层遮挡等因素的影响,很难拍摄到大重叠度的高分辨率立体影像,而建筑物墙面、悬崖、大佛等近似垂直的物体表面根本无法用航空摄影手段获取到合格影像,只有近距离低空摄影才有可能解决这些难题<sup>[1,2]</sup>。

近年来,低空摄影测量迅速成为广泛关注的热点<sup>[3-7]</sup>。相对于传统的航空摄影机,数码相机的最大优势在于不增加飞行成本的大重叠度(如 80% 以上)影像的获取能力,此时,每个地面物体至少出现在相邻的 5 幅影像上<sup>[8]</sup>,在影像匹配与三维重建方面具有巨大优势<sup>[9, 10]</sup>。国家测绘局已经明确将“数字航空摄影、无人驾驶飞行器低空遥感影像等先进的影像获取技术用于测绘生产”列入了近期工作要点。小型无人驾驶飞艇价格低廉,操作简单,可以实现低空低速飞行,且几乎不存在任何安全隐患。在飞艇上搭载数码相机及相关通讯、导航设备,并研发相应的飞行、曝光控制及数据处理软件,即有可能应用于大比例尺测绘、三维重建、应急响应、城市规划等方面。本文系统地阐述了基于无人驾驶飞艇的低空遥感系统的硬件组成及其自动控制飞行,并对所拍摄的遥感影像进行了影像匹配、区域网空中三角测量、正射影

像生成等处理与分析。

## 1 低空遥感平台的组成及技术参数

武汉大学与北京航空航天大学联合进行了多年的合作研究与试验,初步建立了低空遥感系统的硬件平台和相应的软件系统,硬件平台由飞艇、自动控制系统、任务系统、通讯系统、地面站等五部分构成,如图 1 所示。其中,飞艇由气囊、尾翼、吊舱(包括动力系统)、控制系统等组成;自动控制

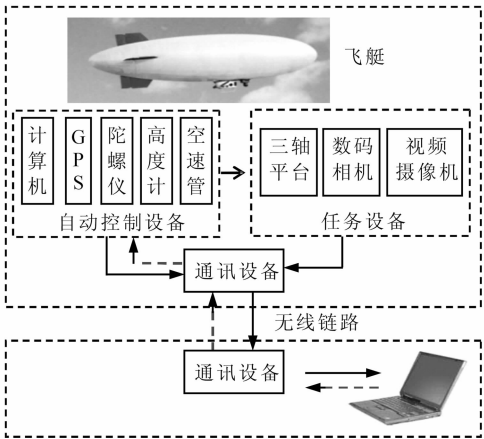


图 1 基于无人驾驶飞艇的低空遥感平台  
Fig. 1 Composition of Low Altitude Remote Sensing System

系统由飞控计算机、GPS、三轴陀螺仪、气压高度计、空速传感器等组成;任务系统包括三轴稳定平台、数码相机、视频摄像机;通讯系统实现测区航线信息上下传、飞行状态信息及视频图像实时下传;地面站负责测区航线规划、控制信息上传以及下传信息实时显示与处理等功能。

低空遥感平台的主要技术参数为:飞艇气囊长 13.2 m,最大空速 72 km/h,巡航速度 20~30 km/h,最大续航时间 2 h,抗风能力 4 级,任务载荷约 15 kg;自动飞控系统航线保持精度优于  $\pm 10$  m,微风情况下优于  $\pm 5$  m;三轴稳定平台航向控制精度约  $5^{\circ}$ ,俯仰和滚转控制精度约  $3^{\circ}$ ;Kodak Pro SLR 数码相机的像幅为 4 500 像素  $\times$  3 000 像素,像元大小为 8  $\mu\text{m}$ ;通讯系统的信号传输距离 5~10 km;地面站包括监控计算机和无线通讯设备。

## 2 无人驾驶飞艇的自动控制飞行

影像的重叠度由曝光时刻相机间的相对位置和姿态决定,因而相机位置和姿态的实时获取与控制是拍摄合格影像的关键,即在飞行平台按航线飞行的同时保证相机的主光轴基本不变。

GPS 实时定位和高精度三轴陀螺仪技术的成熟为飞艇的自动化控制奠定了基础。本系统所用的自动飞行控制系统由飞控计算机、GPS、三轴陀螺仪、气压高度计、空速传感器、微型磁通门等组成。自控系统具有稳定姿态、爬升和俯冲、航向稳定控制及高度稳定控制等功能,可以实现飞艇按航线自动控制飞行。

2006 年 8 月,笔者进行了自控系统的飞行试验,如图 2 所示。该航线为矩形闭合航线,长约 1.7 km,宽约 300 m,无人驾驶飞艇在自控系统的控制下进行无人值守自动飞行,共围绕该矩形航线飞行 19 圈,飞行试验时,风速约 6~8 m/s。可以看出,飞行轨迹具有非常好的航线保持特性和重复性,经事后计算,航线最大偏距不超过 10 m,

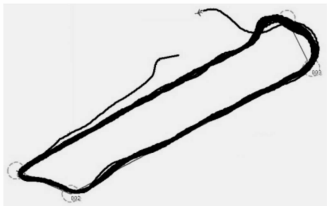


图 2 自动控制飞行轨迹

Fig. 2 Flying Tracks of the Automatic Control System

重复性优于 6 m。航线两端的偏差为飞艇固有的转弯特性,在实践中,只需将测区航线适当向外扩展即可完全避免。

## 3 低空遥感影像的自动获取

在实现飞艇按航线飞行后,数码相机的姿态控制精度成为影像间重叠度是否满足要求的决定性因素。为了对数码相机的姿态进行实时控制,并尽可能保持稳定,将数码相机安放在能够进行三轴旋转的稳定平台上,由姿态传感器及控制计算机自动保持数码相机的预设姿态,航向保持精度约  $5^{\circ}$ ,俯仰和横滚方向约  $3^{\circ}$ 。数码相机所摄取的影像数据量很大,不可能实时下传到地面计算机,因而直接存储到大容量存储卡中。系统安装了一台较低分辨率的摄像机,并将视频影像实时下传,以便对拍摄情况进行实时监控。

在航线规划阶段,按照相机的焦距、像幅大小、要求的地面分辨率及预设重叠度等技术指标即可确定航线的相对航高和曝光点间的距离(即摄影基线长度)。将设计好的航线数据上传到飞控计算机即可执行拍摄任务。自控飞行过程中,当飞艇到达预定的曝光位置时,由飞控计算机给出信号控制相机曝光,完成影像获取。

2006 年 11 月,进行了按航线自控飞行及大比例尺遥感影像获取试验。试验所用相机为 Kodak Pro SLR 数码相机。由于飞行时空中能见度较低,因而配置 14 mm 广角镜头,并采用相对航高 200 m 进行低空拍摄,预设航向重叠度为 75%。图 3 为试验拍摄的其中 4 幅相邻影像。可以看出,影像间的重叠度和姿态保持都非常好。

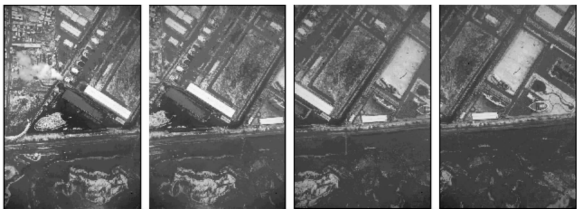


图 3 低空遥感系统所拍摄的 4 幅立体影像

Fig. 3 Four Stereo Images Taken by Low Height Remote Sensing System

2007 年 4 月,进行了大比例尺低空遥感影像获取试验。试验使用 Kodak Pro SLR 数码相机,配置 24 mm 镜头,并采用相对航高 150 m 进行低空拍摄,预设航向重叠度 80%,旁向重叠度 50%,影像地面分辨率(ground sample distance, GSD)

约 0.05 m,5 条航线共拍摄了 110 张影像。每幅影像的摄站平面位置如图 4 所示,经数据处理发现,实际摄站位置相对于预设位置在垂直于航线的方向上最大偏差不超过 8 m,也即飞艇按航线飞行的性能优于 8 m;实际飞行高度与预设高度的最大偏差不超过 10 m。图 5 为其中 5 幅相邻的影像,可以看出,影像间的重叠度和姿态保持都较好。

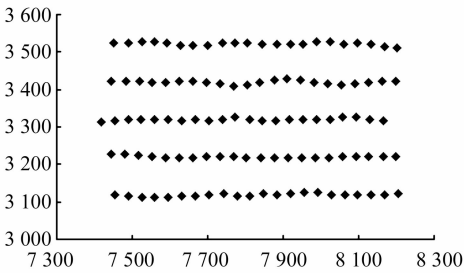


图 4 大比例尺遥感影像获取摄站位置

Fig. 4 Exposure Points of Large Scale Image Acquiring



图 5 低空遥感系统所拍摄的 5 幅立体影像

Fig. 5 Five Stereo Images Taken by Low Altitude Remote Sensing System

4 低空遥感影像的几何处理

低空遥感影像的几何处理包括影像匹配、相对定向、区域网平差、DEM 和正射影像生成以及立体测图等内容。2007 年 4 月,拍摄试验影像时,利用差分 GPS 同步测量了 25 个地面控制点,其平面和高程精度均优于 0.02 m。

4.1 影像匹配与重叠度计算

影像匹配是进行数据质量分析和后续处理的前提。影像匹配时,首先将整幅影像分成 90 像素×90 像素的格网,然后在每个格网内提取一个特征点,即每幅影像最多可提取 1 650 个特征点。低空遥感影像中,相邻影像间的姿态变化较航空影像大,如 3°的俯仰角或横滚角控制精度会导致±5%(3/57.3≈1/20)左右的航向或旁向重叠度变化,也即极端情况下,相邻影像间的重叠度会变化 10%,大大增加了匹配的难度。通过所研究的低空遥感影像匹配方法进行匹配后,相邻影像间的平均匹配点数约 600 个,同名点基本均匀分布

在影像重叠区域内,满足影像重叠度和姿态变化分析以及区域网空中三角测量的需要。

经过影像匹配后,可根据同名点坐标计算相邻影像间的实际重叠度和相对姿态的变化情况。经计算发现,航向重叠度保持在 77%~83%之间,航线间的旁向重叠度也与预设的重叠度较为接近,显示了低空遥感系统较好的影像获取能力。

4.2 相对定向与自由网平差

利用影像匹配所获得的同名点可以进行相对定向、自由网空中三角测量等处理。相对定向时,可以采用传统方法进行;而自由网平差时,由于低空遥感影像的重叠度高,同一地面特征会出现在多幅影像上,因此,需要按照多基线摄影测量的方法进行整体平差。图 3 所示影像的相对定向中误差约为 4 像素,经检查发现,中误差较大并不是由于同名点存在粗差引起的,而是由于所配置的 14 mm 广角镜头存在很大的畸变差所致。因此,进行相对定向和自由网空中三角测量前,需要先进行像点坐标的畸变改正,则自由网平差的中误差迅速提高到 0.3 像素左右。在进行图 5 所示的 24 mm 镜头拍摄影像的相对定向与自由网平差时,畸变差改正前后,平差中误差分别为 1.2 像素和 0.3 像素,充分说明数码相机的畸变差改正是获得高精度测量成果的前提。

4.3 全景影像图快速拼接

全景影像图与正射影像不同,它是原始影像的直接拼接结果,不需要地面控制点等已知数据,只需要影像匹配获得的同名点即可快速生成。尽管这种快速拼接图不是基于严格的共线方程生成的,也没有考虑地形起伏的影响,相邻影像在拼接线附近会存在比较明显的接边误差,但是这种方法具有很强的实时性,完全满足测区整体现状评估、自然灾害快速响应、外业控制点设计与布设等方面的要求,因而具有良好的应用前景。

全景影像图的快速拼接可以采用基于同名点的旋转平移变换、仿射变换,或基于自由网平差结果进行纠正等不同方法。图 6 为由低空遥感平台获取的 110 幅影像经旋转平移变换构成的全景拼接图,该拼接影像直观地反映了相邻影像间的重叠和姿态变化情况。可以看出,由于未考虑俯仰和横滚角的影响,因而拼接图不可避免地存在一定的接边误差,不过足以满足快速响应等应用的需求。

4.4 区域网空中三角测量

利用拍摄的数码影像获取地面目标的三维坐标时,所能达到的精度是低空遥感系统能否实用



图 6 110 幅立体影像构成的全景拼接图

Fig. 6 Panorama Image Generated by 110 Stereo Images

化的关键之一。需要布设地面控制点和检查点进行整体区域网平差等工作,从而进行系统深入的分析。本试验采用 25 个控制点中的 10 个作为空中三角测量的控制点,其余 15 个作为独立检查点进行整体平差,控制点和检查点的分布如图 7 所示,三角形标志为控制点,其余为检查点。

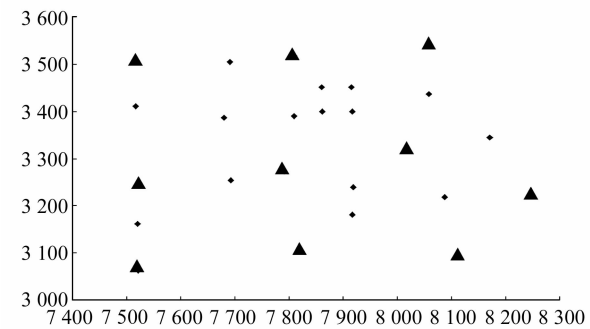


图 7 控制点和检查点分布图

Fig. 7 Distribution of Control Points and Check Points

经过影像匹配与自由网平差后,获得 65 402 个影像点,对应地面点总数为 17 203 个,其中绝大多数地面点都具有 3°以上的对应同名点,且同名点在影像上基本呈均匀分布,说明区域网的连接强度较好。由于低空遥感影像的航向重叠度约 80%,旁向重叠度约 50%,空中三角测量时,每个地面对应的像点观测值较传统摄影测量大大增加,而冗余观测值的增加不仅可以提高整体平差的精度,而且非常有利于粗差观测值的探测和剔除,因而采用多基线摄影测量方法进行整体平差后的高程精度应该高于传统空中三角测量所能达到的精度。由于数码相机的检校精度有限,区域网平差时,需要将畸变参数同时作为未知数进行自检校光束法平差,整体平差的单位权中误差为 0.002 3 mm,约 1/4 像素。区域网平差结果的精度统计如表 1 所示,其最大误差均小于 3 倍中误差,说明地面点和像点量测均不存在粗差。

由统计结果可以看出,相对于 0.05 m 的影像地面分辨率来说,检查点的高程精度已经达到约 0.7 GSD,明显优于传统空中三角测量所能达

到的高程精度,也与理论分析结果一致。由于采用地面的自然特征点作为控制点,因而区域网平差精度会受到控制点对应像点坐标量测误差的影响,采用明显人工标志作为控制点时的区域网平差精度应该会有较大提高。

表 1 空中三角测量精度统计/m

Tab. 1 Precision of Aerial Triangulation/m

统计项目		中误差	平均值	最大值
控制点	X	0.013	0.000	-0.029
	Y	0.015	-0.002	-0.030
	Z	0.022	-0.008	-0.052
检查点	X	0.018	-0.002	-0.033
	Y	0.021	0.006	0.042
	Z	0.036	-0.010	-0.073

另外,如果在飞艇上安装高精度的 GPS 接收机,并在飞行过程中记录 GPS 观测数据,则有可能向传统航空摄影测量一样进行 GPS 辅助空中三角测量,从而大大减少地面控制点的数量,进一步提高低空遥感影像数据的获取与处理效率。

4.5 正射影像生成

完成区域网空中三角测量后,即可进行 DEM、正射影像生成及立体测图等应用。本文利用区域网平差后的方位元素,将经过密集影像匹配后获得的大量同名点进行前方交会生成离散三维点,并采用人机交互方式编辑生成测区的 DEM,进而采集对应的正射影像。由全部 110 幅影像自动采集的正射影像如图 8 所示。



图 8 110 幅立体影像自动生成的正射影像图

Fig. 8 Orthoimage Generated by 110 Stereo Images

通过量测地面控制点在正射影像上的平面坐标,并与已知坐标比对,可以对正射影像进行精度检查。经检查发现,地面控制点的平面位置残差的中误差约 0.03 m,说明所生成的正射影像精度较为理想。不过由于没有经过匀光和编辑等处理,正射影像在航线间存在较为明显的色彩不一致现象,这也是数码相机的共同特点,可以采用专用后处理软件进行处理。

## 5 结 语

基于无人驾驶飞艇的低空遥感系统具有价格低廉、操作简单、低空低速、几乎不存在任何安全隐患等突出优点。采用该系统拍摄的影像重叠度大,数码相机姿态稳定度较高,同名特征的匹配相对容易,而且利用多度重叠点进行基于多条摄影光线的摄影测量处理,既能增加观测值数量,有效地解决误匹配问题,又能增加交会角,提高高程测量的精度。如何利用GPS观测值进行联合平差,以便减少地面控制点的数量,是需要进一步研究的问题。试验结果说明,无人驾驶飞艇所获取的低空遥感影像可以满足数字立体摄影测量的要求,在大比例尺测绘、三维重建、快速响应、城市规划等方面具有较好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Bitelli G, Girelli V A, Tini M A, et al. Low-Height Aerial Imagery and Digital Photogrammetrical Processing for Archaeological Mapping [J]. IAPRS, 2004, 35(B5): 498-503
- [2] Karras G E, Mavromati D, Madani M, et al. Digital Orthophotography in Archaeology with Low-Altitude

Non-metric Images[J]. IAPRS, 1999, 32(B5): 8-11

- [3] 曹立, 潘然, 田挚. 遥控飞艇数字航空摄影系统[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(5): 92-93
- [4] 孙杰, 林宗坚, 崔红霞. 无人机低空遥感监测系统[J]. 遥感信息, 2003(1): 49-51
- [5] 李春林, 齐怀琴. 林火监测飞艇姿态控制系统的设计[J]. 传感器技术, 2005, 24(6): 52-54
- [6] 王磊, 李和军. 低空遥感平台摄影测量技术的探索和应用[J]. 北京测绘, 2003(4): 28-30
- [7] 崔洪禹, 孙微, 牛彦彬, 等. 南极采用飞艇进行航空摄影测量的可行性探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(2): 6-9
- [8] 张永军, 张勇. 大重叠度影像的相对定向与前方交会精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(2): 566-571
- [9] 刘奇志. 低空摄影测量与三维建模[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005
- [10] Zhang Yongjun, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing, et al. 3D Building Modeling with Digital Map, LIDAR Data and Video Image Sequences[J]. Photogrammetric Record, 2005, 20(111): 285-302

**作者简介:**张永军,教授,博士,博士生导师。主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉及多源数据融合方面的研究。

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

## Geometric Processing of Low Altitude Remote Sensing Images Captured by Unmanned Airship

ZHANG Yongjun<sup>1</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The composition and technical characteristics of low altitude remote sensing system based on unmanned airship are introduced. The unmanned airship automated flies along the predefined routes and captures image sequences under the controlment of autopilot system. Geometric processing of captured low altitude stereo images, such as image matching, relative orientation, bundle block adjustment, panorama and orthoimage generation, are addressed in detail. Experimental results show that the developed system is qualified for high overlap and high resolution stereo imagery acquisition, and has good potential in large scale mapping and precise three dimensional reconstruction areas.

**Key words:** low altitude remote sensing; unmanned airship; automatic control; image processing; aerial triangulation

**About the author:** ZHANG Yongjun, professor, Ph.D., Ph. D supervisor. He is mainly engaged in the research of digital photogrammetry and remote sensing, computer vision and data integration.

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn