

程建荣<sup>1</sup> 王春<sup>1,2</sup> 代文<sup>3</sup> 李敏<sup>4</sup> 周毅阳<sup>1</sup>

# 像控后处理倾斜摄影三维建模方法研究

## 摘要

无人机倾斜摄影三维模型的精度是衡量模型质量好坏的重要指标。常规的倾斜摄影三维建模需要先布设像控点,作业效率低且维护成本高。无像控建模不需要布设像控点,航测效率高,但精度较低。本文以南京信息工程大学东苑为实验区,研究了一种像控后处理倾斜摄影三维建模方法。结果表明:1)基于像控后处理建立的三维模型与常规方法建立的三维模型精度基本相同,平面中误差、高程中误差均小于0.05 m,满足高效率、高精度、低成本的建模要求;2)像控后处理建模避免了制作和维护像控点的过程,同时基于已有高精度三维模型选择像控点并提取坐标,提升了像控点选择的科学性并降低了外业测点的工作量;3)该方法在城市、乡镇及其他道路丰富地区高精度三维实景模型定期更新上具有较好的普适性。

## 关键词

倾斜摄影;像控点;三维实景模型;像控后处理;精度

中图分类号 P231

文献标志码 A

收稿日期 2022-03-15

资助项目 安徽高校自然科学研究重大项目(KJ2021ZD0130);滁州市“113”产业创新团队(实景地理环境智能科技产业创新)

## 作者简介

程建荣,男,硕士生,主要研究方向为倾斜摄影实景三维建模。2637329695@qq.com

王春(通信作者),男,博士,教授,主要从事DEM数字地形分析与GIS集成应用技术研究。wangchun93@126.com

1 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院,南京,210044

2 滁州学院 地理信息与旅游学院,滁州,239000

3 南京信息工程大学 地理科学学院,南京,210044

4 滁州学院 实景地理环境安徽省重点实验室,滁州,239000

## 0 引言

近年来,倾斜摄影测量技术快速发展<sup>[1]</sup>,利用无人机进行三维实景模型构建技术已经被广泛应用在数字城市<sup>[2]</sup>、道路工程<sup>[3]</sup>、地籍调查<sup>[4]</sup>等领域。常规的无人机倾斜摄影三维建模在外业航摄获取影像前需要先布设像控点标识,但像控点布设成本高、耗时长,布设好的点位易受外界干扰而出现磨损、移动和遮挡,尤其是在城市建筑物密集、地形环境复杂等地区,像控点的布设非常困难。因此,基于免像控方式构建三维模型的方法被提出并进行探讨。文献[5-6]采用天狼星无人机航摄系统实现免像控模型的构建,此系统对硬件设备精度要求高且价格昂贵;文献[7-8]通过改正相机曝光时的延迟与全球定位系统(GPS)相位中心的位置误差提出免像控方法,提高POS数据的精度辅助空三测量实现免像控三维模型建立;文献[9]根据不同距离的网络通信技术(CORS)站作出方案搭配,解算出平差优化的高精度POS数据进行免像控模型的构建,但增加了内业数据处理的计算量和难度。总体来讲,免像控对航摄设备或算法提出极高要求,同时在满足诸如1:500测图、房地一体确权等高精度测图应用中,所建立的三维模型仍存在一些需要解决的问题。

文献[10]通过研究像控点的布设数量及方式对倾斜摄影三维模型精度的影响,指出像控点的布设方式和数量影响着模型的精度;文献[11]通过像控点刺点相片的选取分析倾斜摄影三维模型的精度,指出刺点于5个镜头的影像时模型精度效果最佳;文献[12]通过探究非规则实验区3种不同方式的像控点布设方法对模型精度的影响,指出像控点位置选择理想时增加像控点数量模型精度的改善效果不明显。以上方法都需要事先在研究区范围内布设像控点,然后航摄获取影像和完成三维实景模型的构建。像控点只能从参考地图预测点位的布设范围内选取,不能科学有效地确定点位布设的精确位置,而点位的不确定性给外业布点工作带来很大的挑战。此外,点位布设与航飞获取的影像数据存在时间差,外业的不可控因素会导致点位遭到破坏,影响内业像控点选刺时的使用情况。通过返测、补测等维护工作重新布设采集导致建模效率低,二次布设的像控点标记未被无人机拍摄无法在内业数据处理中被使用,缺失的像控点数据会影响模型构建的精度。

由于倾斜摄影和三维实景模型的广泛使用,对于三维实景模型

更新等问题,像控后处理倾斜摄影三维建模既能避免无像控处理的设备和算力需求,也不需要按照传统倾斜摄影建模方法进行像控点布设,从而节省人力、物力和生产时间.本文以南京信息工程大学东苑为实验区,针对无像控三维模型精度低的问题,不需要返工航飞和测点,利用该区域已有的高精度三维实景模型进行取点,并对特征控制点数量和位置的不同而构建模型的精度差异进行对比,探究采用像控后处理方式完成倾斜摄影三维模型精度提升的最佳可行性方案.

## 1 试验数据准备和像控后处理三维建模技术

### 1.1 实验区介绍

本文实验区为南京信息工程大学东苑(118.72°E,32.20°N),平原地形,面积约0.4 km<sup>2</sup>.通过大疆M210多旋翼无人机搭载赛尔101S五镜头相机获取多视倾斜影像数据.设定无人机绝对飞行高度约96 m,地面分辨率小于1.5 cm,规划航线的航向重叠度为80%,旁向重叠度为80%(表1),航摄共获取12 066张影像.

表1 航测信息

Table 1 Aerial survey information sheet

相关参数	参数设置
焦距/mm	35
飞行速度/(m/s)	7.5
镜头倾角/(°)	45
平均航高/m	96
航向重叠度/%	80
旁向重叠度/%	80
航摄方向	S型

### 1.2 像控后处理三维模型构建技术

像控后处理倾斜摄影三维模型构建,就是针对无像控倾斜摄影三维模型精度低的问题,在构建好的无像控三维模型中选取地面特征明确、位置合适的点作为像控点.同时在已有的高精度三维实景模型上测取像控点坐标,将采集的像控点坐标刺入到无像控模式航测所获取的原始相片中,按照常规倾斜摄影三维模型构建方法再次进行实验区三维模型的构建.

本文采用倾斜摄影+POS数据在内业处理中进行空中三角测量处理.先构建无像控的三维模型,然后在已有同区域高精度三维实景模型中选取和采集控制点,获取坐标参数,对无像控三维模型进行刺点

和模型构建,最终对实验区的3种模型——已有的高精度三维实景模型、无像控三维实景模型、基于参考真值模型提点方式的像控后处理模型进行模型点位精度对比与分析.关键步骤如图1所示.

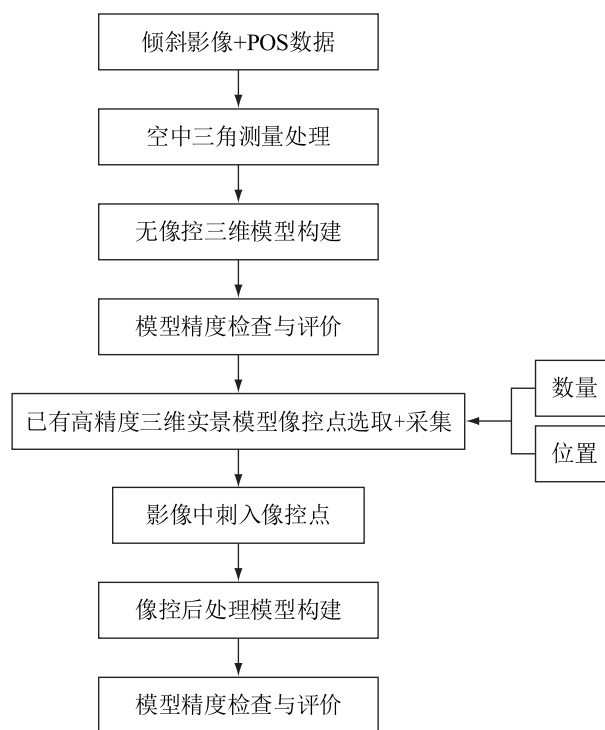


图1 像控后处理三维模型构建技术流程

Fig. 1 Flow chart of post-processed image control 3D modeling

## 2 无像控、常规带控和像控后处理模型构建及点位选择

### 2.1 无像控三维模型构建

由于采用无像控无人机倾斜摄影测量技术,在利用ContextCapture Center软件进行三维建模时省去了刺点工作,直接导入航飞影像数据,设置传感器的尺寸和焦距,并检查影像文件的完整性.然后提交空中三角测量,空三完成后点击新建重建项目,并在空间框架中进行块的数量设置和提交新的生产项目,最终生成OSGB格式的三维实景模型.

无人机在不同航线航飞过程中,因受到飞行时间、外界环境等影响,飞行平台倾斜角、旋转角以及传感器获取的信息存在误差,相片瞬时姿态和定位信息不精确,致使对于不同航线间的重叠区域,不同架次无人机航摄所获得的相片的瞬时姿态不同,从而导致无像控三维模型出现分层、扭曲以及拉伸错位等现象,如图2a所示.常规的处理方法是在重叠区域内通

过沿航线布设像控点,从而保证三维模型精度.本文通过反复试验,以某一完整的单架次为主体,在保证相邻航线间的旁向重叠率满足已设计的75%条件下,删除与之重叠的其他航线影像数据,然后构建无像控三维模型.图2b结果显示,该方法能够有效消除模型中的分层、扭曲以及拉伸错位等现象.

## 2.2 常规带控和像控后处理三维建模像控点的选取

根据建模方法的差异,目前广泛应用的有两种像控点采集方式(方式1、方式2),本文像控后处理构建高精度三维实景模型是第3种方式(方式3).

方式1:常规布测方式,即航摄前制作像控点标志和布设像控点,同时外业实测采集像控点的坐标数据,如图3a所示.

方式2:通过外业实测采集像控点坐标的像控后处理模式方式,简称后处理实测方式,即在无像控模型上选择标志显著、易于外业识别、位置科学合理的点作为像控点,并通过外业实测方式采集这些点的坐标信息,如图3b所示.

方式3:通过已有高精度三维实景模型采集像控点坐标的像控后处理模式方式,简称后处理模测方式,即该样区如果已经建设有全部或局部的高精度三维实景模型,此时可在无像控模型上选择标志

显著、易于在已有三维实景模型中识别、位置科学合理的点作为像控点,并从已有高精度三维实景模型中采集这些点的坐标信息,如图3c所示.

常规布测方式(方式1)在实验区视野开拓的位置通过布设标识方布或者绘制点位标志确定点位的地理位置,然后选用高精度测量仪器采集像控点坐标信息.

后处理实测方式(方式2)结合实验区地物分布的实际地理位置,在无像控模型中选取地物特征点,例如道路中心线、瓷砖样式分界线以及地面指示标记等具有明显几何特征的地物.基于无像控模型能够清晰地看到预选特征点的位置和几何信息,无需进行外业点位的踏勘工作,一是能够科学地布设像控点且准确确定像控点位置,二是无需制作像控点标志和埋设像控点标志,能有效节约成本和提高效率.选择好像控点后,利用高精度测量仪器在外业采集特征点的点位坐标.

后处理模测方式(方式3)则是选择与后处理实测方式同位置、同数量的地物特征点作为像控点,区别在于该方式是在已有高精度三维实景模型上采集像控点坐标信息,无需进行外业实地测量,在城市、乡镇等三维实景模型局部变化区域更新上减少了工作量,降低了成本,提高了航测建模的效率.

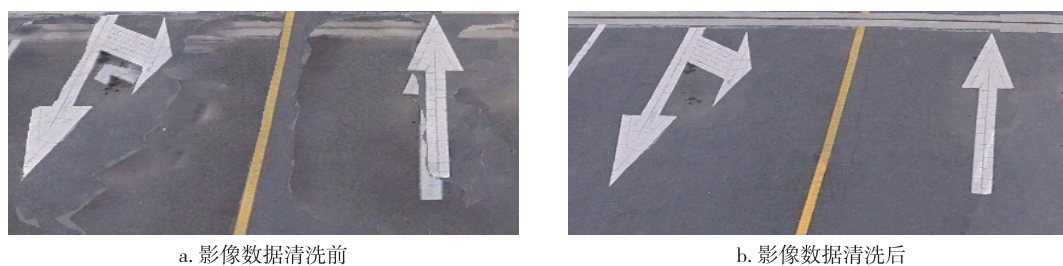


图2 模型分层现象  
Fig. 2 Model layering



图3 像控点采集方式  
Fig. 3 Collection of image control points

### 2.3 像控后处理三维建模控制点数量与位置的选取

本文对像控后处理控制点最佳选取方式设计了2步实验:

第1步:在保证控制点数量相同的情况下,控制点位置布设分为边角和沿边选点、中心选点和边角、沿边加中心选点3种方式,本次均选取8个像控点.

第2步:在确定第1步哪种方式选取控制点使得像控后处理三维模型精度最高的情况下,再探究该方式选点的数量对像控后处理三维模型精度的

影响.

控制点选取方式如下:

方式 a:边角和沿边选点.根据测区形态,先在测区边角内侧选取特征点作为像控点,当测区面积较大、边缘较长时可在沿边适当补点,如图 4a 所示.

方式 b:中心选点.在测区中心区域选取适当特征点,如图 4b 所示.

方式 c:边角、沿边加中心选点.首先在测区边角内侧各选取 1 个特征点,较长边缘适当补点,然后在中心区域均匀选取几个特征点,如图 4c 所示.

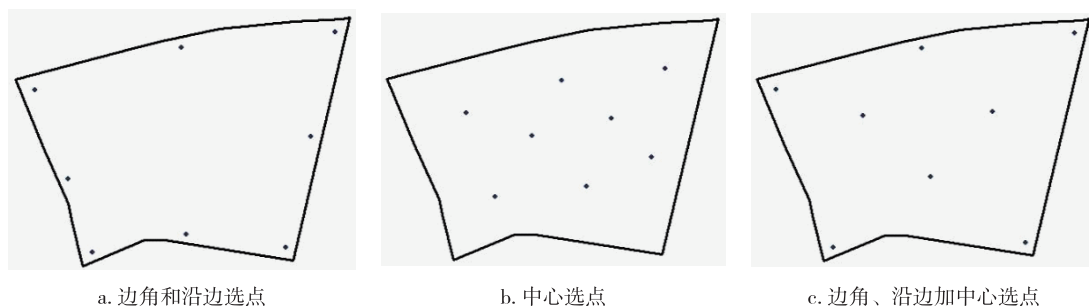


图 4 像控后处理控制点位置选取分布

Fig. 4 Control point selection for post-processed image control

### 2.4 像控后处理三维模型构建

像控后处理模式与常规方法构建模型的流程不同.首先,针对原始影像数据对实验区构建无像控模型精度低的问题,在无像控模型上清晰地了解地物的空间关系并科学准确地预选合适的点位位置,利用该区域已有高精度三维实景模型采集预选的像控点坐标;其次,基于实验区已完成相对定向的数据,从不同架次、不同航线的五镜头影像数据中选取点位清晰、无遮挡的相片将像控点以人工的方式刺入原始影像,根据航线的覆盖范围对每个像控点选取 8~12 张影像,对单张分辨率不高或像控点不清晰的相片不选作刺点对象;最后,按照常规方法进行带控制点的空三平差,完成不规则格网和白模的构建,根据三维模型的形状、位置信息从航测的相片中选择真实的纹理来映射,从而构建出与现实世界相符合的三维实景模型.实验区像控后处理三维实景模型如图 5 所示,纹理逼真清晰,与常规带控模型外观一致.

## 3 模型精度分析

本文采用模型点位精度分析的方法对三维模型的  $x, y, z$  方向的误差和中误差进行分析,在测区内



图 5 实验区像控后处理三维实景模型

Fig. 5 3D model of post-processed image control in experimental area

布设 12 个检查点,在连接地面参考站(CORS)的情况下使用实时动态(RTK)差分技术测量点位坐标,以外业采集的检查点坐标值作为真实值,模型中采集到对应点号的坐标值为测量值,分别计算各检核点  $x, y, z$  方向的误差和中误差.

中误差公式如下:

$$\partial_x = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}, \quad (1)$$

$$\partial_y = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{yi}^2}, \quad (2)$$

$$\partial_z = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{zi}^2}, \quad (3)$$

$$\partial_{xy} = \sqrt{\partial_x^2 + \partial_y^2}, \quad (4)$$

式中: $\partial_x, \partial_y, \partial_z, \partial_{xy}$ 分别为  $x$  方向、 $y$  方向、高程及平面的中误差; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为  $x, y, z$  方向的真误差.

在像控点数量相同的条件下,对不同位置选取像控点进行三维实景模型的像控后处理,并对模型做点位精度分析,以检查点的 RTK 测量坐标为真值,对应的模型点坐标为测量值,用上述中误差计算公式计算得到各模型的平面中误差和高程中误差,检查各方案构建模型的点位精度,结果如表 2 所示.分析可知:

1) 方式 a 像控后处理模型平面误差为 0.028 7~0.043 5 m,  $RMSE_{\text{平面}}$  为 0.038 2 m, 高程误差为 0.035 9~0.060 3 m,  $RMSE_{\text{高程}}$  为 0.042 7 m, 高程超过 5 cm 的检查点 4 个,均为测区中间部分的检查点.方式 b 像控后处理模型平面误差为 0.038 5~0.056 7 m,  $RMSE_{\text{平面}}$  为 0.041 5 m, 平面误差超过 5 cm 的检查点有 5 个,均为边缘部分的检查点;高程误差为 0.042 7~0.124 9 m,  $RMSE_{\text{高程}}$  为 0.073 9 m, 高程误差超过 5 cm 的检查点有 7 个,均为边缘部分的检查点.方式 c 像控后处理模型平面误差为 0.025 3~0.041 7 m,  $RMSE_{\text{平面}}$  为 0.035 6 m, 高程误差为 0.031 8~0.042 3 m,  $RMSE_{\text{高程}}$  为 0.039 5 m.

2) 借助已有高精度三维实景模型采集特征点作为控制点来提高无像控模型的精度.方式 a 边角和沿边选择控制点构建的后处理三维模型整体精度满足 1:500 比例尺测图精度要求,但模型的中间部分达不到 0.05 cm 的精度要求,因此当测区面积较大且对边相距较远、中间部分较广时,应避免这种像控点仅边角和沿边位置的布设方案;方式 b 中心选择控制点构建的后处理三维模型精度无法满足 1:500 比例尺测图精度要求,在后处理选择特征控制点时应该避免这种像控点仅中间位置布设方案;方式 c 边角、沿边和中心均选取像控点所得的后处理三维模型精度满足 1:500 比例尺测图精度要求,因此在像控点数量相同的条件下,边角、沿边加中心区域均匀选取控制点的布设方式,像控后处理三维模型精度最高.在此结论下进一步探究像控点数量对后处

理三维模型精度的影响.

在已有的高精度三维实景模型上分别选取 5~12 个特征点作为像控点,以方式 c 的布设方法进行像控后处理三维建模.基于上述检查点和中误差公式对模型精度分析和对比,可知:在测区 5 个像控点的基础上,中间部分增加像控点的数量可提升模型精度,但增加到 4 个及以上像控点时,模型平面精度和高程精度提升不明显.因此,像控点在测区以边角、沿边和中间区域均匀分布时,增加布设像控点的数量对模型精度提升作用不大.实验区以边角、沿边加中间的方式在高精度三维实景模型上选取 9 个特征点作为控制点,像控后处理三维模型控制点的选取及模型精度可达最优,如图 6 所示.

表 2 检查点精度

误差	像控后处理构建三维模型		
	方式 a	方式 b	方式 c
平面	0.038 2	0.041 5	0.035 6
高程	0.042 7	0.073 9	0.039 5

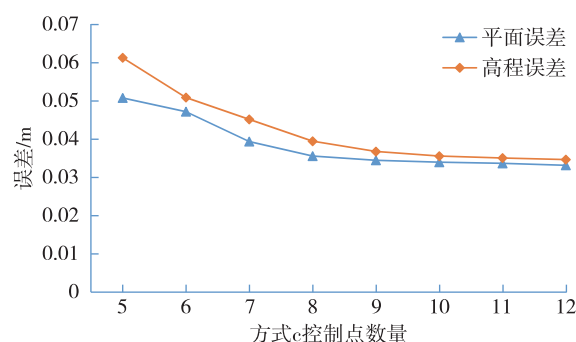


图 6 像控后处理方式 c 控制点布设密度对精度的影响

Fig. 6 Impact of control point density on accuracy of post-processed image control mode c

基于上述中误差公式对实验区进行无像控三维模型点位精度分析,计算结果如表 3 所示.实验区相同航测影像数据常规带控三维模型点位精度分析结果如表 4 所示.

1) 采用无像控方式构建的倾斜摄影三维实景模型,模型点位在  $x$  方向的中误差  $RMSE_x = 0.103 5$  m,  $y$  方向的中误差  $RMSE_y = 0.145 5$  m, 平面中误差为 0.113 9~0.260 3 m,  $RMSE_{\text{平面}} = 0.178 6$  m, 高程中误差为 0.558 4~0.754 4 m,  $RMSE_{\text{高程}} = 0.680 6$  m, 检查点的平面和高程中误差均超过 0.10 m,特别是高程精度很低.

表3 无像控模型点位精度

Table 3 Point accuracies of control-free model m

点号	x 方向误差	y 方向误差	平面误差	高程误差
J1	-0.158 1	0.146 9	0.215 8	0.732 0
J2	-0.131 0	0.002 4	0.131 0	0.613 6
J3	-0.093 5	-0.242 9	0.260 3	0.754 4
J4	-0.036 7	-0.159 6	0.163 8	0.558 4
J5	0.002 1	-0.158 6	0.158 6	0.655 6
J6	0.053 8	-0.100 4	0.113 9	0.630 8
J7	0.103 9	-0.073 5	0.127 3	0.699 8
J8	0.150 7	0.201 6	0.251 7	0.754 4
J9	-0.052 9	0.142 6	0.152 1	0.712 3
J10	-0.059 2	0.202 4	0.210 9	0.668 6
J11	0.118 4	0.039 2	0.124 7	0.597 0
J12	0.141 0	-0.062 7	0.154 3	0.754 1
RMSE	0.103 5	0.145 5	0.178 6	0.680 6

表4 常规带控模型点位精度

Table 4 Point accuracies of conventional control point model m

点号	x 方向误差	y 方向误差	平面误差	高程误差
J1	-0.025 1	0.026 5	0.036 5	0.036 2
J2	-0.015 4	0.039 4	0.042 3	0.016 3
J3	-0.024 2	-0.039 9	0.046 7	-0.020 3
J4	-0.005 3	-0.039 0	0.039 4	-0.039 9
J5	-0.004 4	-0.013 4	0.014 1	-0.039 2
J6	0.009 1	-0.018 1	0.020 3	-0.040 7
J7	-0.005 6	-0.002 2	0.006 0	-0.029 6
J8	0.024 1	0.011 6	0.026 7	0.019 2
J9	-0.029 7	-0.038 8	0.048 9	0.045 3
J10	0.022 9	0.026 8	0.033 8	-0.022 6
J11	0.018 7	0.017 7	0.025 7	0.025 2
J12	-0.009 1	0.001 7	0.009 2	0.037 9
RMSE	0.001 8	0.026 7	0.032 3	0.032 5

2)采用常规布设像控方式构建的倾斜摄影三维模型,模型点位在x方向的中误差 $RMSE_x = 0.0018$  m,y方向的中误差 $RMSE_y = 0.0267$  m,平面中误差为0.006 0~0.048 9 m, $RMSE_{平面} = 0.0323$  m,高程中误差为-0.040 7~0.045 3 m, $RMSE_{高程} = 0.0325$  m,检核点的平面和高程中误差均不超过0.05 m,模型精度满足1:500大比例尺测图精度要求。

经过对比可知,采用无像控构建的三维模型省去了布设控制点的工作量,作业效率得到很大提升,且能够清晰地还原真实地物的纹理特征、范围形态,

但存在地物的几何位置、地物间的相对空间关系表达不够精确等不足。

本实验区以边角、沿边和中间区域均匀分布的方式在已有高精度三维模型上选取9个特征控制点,使得像控后处理三维建模精度高、效率高,此时模型精度计算结果如表5所示.采用像控后处理模式构建的模型点位平面中误差为0.024 3~0.043 9 m, $RMSE_{平面} = 0.0345$  m,高程中误差为-0.041 7~0.041 6 m, $RMSE_{高程} = 0.0368$  m.采用像

表5 像控后处理模式模型点位精度

Table 5 Point accuracies of post-processed image control model m

点号	无像控模型		常规带控模型		后处理模式模型	
	水平误差	高程误差	水平误差	高程误差	水平误差	高程误差
J1	0.215 8	0.732 0	0.036 5	0.036 2	0.032 1	0.040 5
J2	0.131 0	0.613 6	0.042 3	0.016 3	0.043 9	0.036 5
J3	0.260 3	0.754 4	0.046 7	-0.020 3	0.036 6	0.035 9
J4	0.163 8	0.558 4	0.039 4	-0.039 9	0.032 4	0.041 6
J5	0.158 6	0.655 6	0.014 1	-0.039 2	0.029 6	-0.028 6
J6	0.113 9	0.630 8	0.020 3	-0.040 7	0.034 5	-0.041 2
J7	0.127 3	0.699 8	0.006 0	-0.029 6	0.040 6	0.032 5
J8	0.251 7	0.754 4	0.026 7	0.019 2	0.025 4	0.036 8
J9	0.152 1	0.712 3	0.048 9	0.045 3	0.033 8	0.035 2
J10	0.210 9	0.668 6	0.033 8	-0.022 6	0.041 8	0.033 6
J11	0.124 7	0.597 0	0.025 7	0.025 2	0.032 8	-0.041 7
J12	0.154 3	0.754 1	0.009 2	0.037 9	0.024 3	0.036 6
RMSE	0.178 6	0.680 6	0.032 3	0.032 5	0.034 5	0.036 8

控后处理模测方式和常规布设像控方式建立的倾斜摄影三维模型精度基本相同,其平面、高程中误差均小于 0.05 m,表明采用像控后处理方式进行倾斜摄影三维模型的构建具有可行性,3 种建模方式构建的模型点位精度比较如图 7 所示。

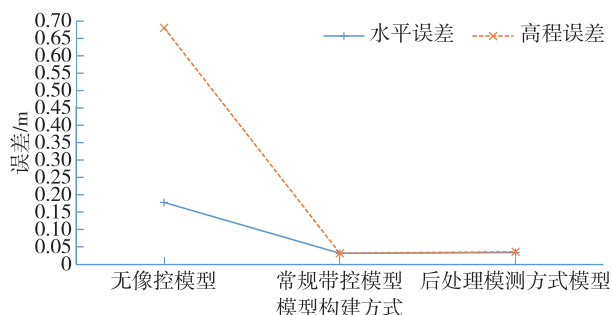


图 7 3 种建模方式构建的模型点位精度比较

Fig. 7 Comparison of point accuracy built by three modeling methods

## 4 总结

本文以南京信息工程大学东苑为实验区,研究了一种像控后处理模测方式的倾斜摄影三维模型构建方法,通过与无像控方法、常规方法建立的倾斜摄影三维模型进行对比分析,得出以下结论:

1) 本文研究的像控后处理模测方式倾斜摄影三维模型构建方法,一是直接在无像控模型上选择像控点,场景直观全面,可以科学合理地布设像控点,二是直接选地面特征明显的标识点,因地制宜就地取材,不需要制作和布设像控点标志,能有效节约布设和维护像控点的成本,并提高作业效率。

2) 以常规布控方式建立的倾斜摄影三维模型作为参照对象,分别对不带像控建模、像控后处理模测方式建立的倾斜摄影三维模型进行精度对比分析。结果表明:无像控建模误差大、精度低,不能满足测绘应用需要。采用常规布设像控方式、像控后处理模测方式建立的倾斜摄影三维模型精度基本相同,其平面、高程中误差均小于 0.05 m。采用像控后处理方式进行倾斜摄影三维模型的构建具有可行性,在每平方千米测区以边角、沿边加中间的布设方式在高精度三维实景模型上选取 20 个特征点作为控制点,像控后处理三维模型精度可达最优。

3) 本文方法需要在无像控点的三维模型上选取像控点,像控点的基本要求是:点特征明显,易于识别;变化棱角分明,方便刺点;分布广泛,方便全域科

学布点。因此,本文方法在城市、乡镇等道路丰富区三维实景模型定期更新上具有很好的普适性,但是在滩涂、林地、草地、水域等地面明显变化点稀少区域,存在难以选到合适点的问题,这类地区如何进行高精度的倾斜摄影三维模型快速构建,还有待进一步深入研究。

## 参考文献

### References

- [1] 孙杰,谢文寒,白瑞杰.无人机倾斜摄影技术研究与应用[J].测绘科学,2019,44(6):145-150  
SUN Jie, XIE Wenhan, BAI Ruijie. UAV oblique photogrammetric system and its application[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 145-150
- [2] 江明明.基于倾斜摄影测量技术的三维数字城市建模[J].测绘与空间地理信息,2017,40(3):189-190  
JIANG Mingming. The 3D digital city modeling based on tilt photogrammetry technology[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(3): 189-190
- [3] 潘成军.无人机倾斜摄影在道路工程中的应用与分析[J].测绘工程,2018,27(12):64-69,74  
PAN Chengjun. Application and analysis of UAV tilt photogrammetry to the surveying and mapping of road engineering[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(12): 64-69, 74
- [4] 马茜茜,黄振华.无人机倾斜摄影测量技术在地籍调查中的应用[J].测绘通报,2020(增刊1):118-121  
MA Xirui, HUANG Zhenhua. Application of UAV tilt photogrammetry technology in cadastral survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020 (sup1): 118-121
- [5] 朱晓康,魏景帅.1:500 免像控无人机航测技术应用研究[J].地理空间信息,2019,17(2):22-26,9  
ZHU Xiaokang, WEI Jingshuai. Key technologies and application research on 1:500 unmanned aerial vehicle photography without image control point[J]. Geospatial Information, 2019, 17(2): 22-26, 9
- [6] 马海政,强德霞.免像控无人机航摄系统在大比例尺地形图测量中的应用[J].测绘通报,2020(7):159-161  
MA Haizheng, QIANG Dexia. Application of video-free UAV aerial photography system in large-scale topographic map measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(7): 159-161
- [7] 张春森,朱师欢,臧玉府,等.顾及曝光延迟的无人机GPS辅助光束法平差方法[J].测绘学报,2017,46(5):565-572  
ZHANG Chunsen, ZHU Shihuan, ZANG Yufu, et al. GPS-supported bundle adjustment method of UAV by considering exposure delay[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5): 565-572
- [8] 王永菊,龚克,东正兰.无人机大比例尺免像控关键技术探讨[J].全球定位系统,2020,45(4):89-94  
WANG Yongju, GONG Ke, DONG Zhenglan. Discussion on key technology of large scale image free control for

- UAV[J].GNSS World of China,2020,45(4):89-94
- [9] 贾向东.城市 CORS 辅助的无人机影像免像控处理方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019  
JIA Xiangdong.Research on image-free control method of UAV image supported by city CORS[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2019
- [10] 桑文刚,李娜,韩峰,等.小区域消费级无人机倾斜摄影像控点布设及建模精度研究[J].测绘通报,2019(10):93-96  
SANG Wengang,LI Na,HAN Feng,et al.Research on the control point layout scheme for consumption-grade UAV oblique photogrammetry in small areas and modeling accuracy[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2019(10):93-96
- [11] 王丽霞,王晨辉,刘招,等.像控点刺点影像选取对无人机测量精度的影响[J].科学技术与工程,2019,19(10):237-240  
WANG Lixia,WANG Chenhui,LIU Zhao,et al.The influence of the selection of image control points puncture image on the measurement accuracy of unmanned aerial vehicle[J].Science Technology and Engineering,2019,19(10):237-240
- [12] 张光祖,王春,徐燕,等.像控点布设对无人机小范围非规则区域实景建模精度的影响[J].全球定位系统,2020,45(2):60-67  
ZHANG Guangzu,WANG Chun,XU Yan,et al.Effect of image control point layout on the accuracy of real-world modeling of small-scale irregular areas of UAVs[J].GNSS World of China,2020,45(2):60-67

## Three-dimensional modeling of oblique photography with post-processed image control

CHENG Jianrong<sup>1</sup> WANG Chun<sup>1,2</sup> DAI Wen<sup>3</sup> LI Min<sup>4</sup> ZHOU Yiyang<sup>1</sup>

1 School of Remote Sensing& Geomatics Engineering,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

2 School of Geographic Information and Tourism,Chuzhou University,Chuzhou 239000

3 School of Geographical Sciences,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

4 Anhui Key Laboratory of Real Geographical Environment,Chuzhou University,Chuzhou 239000

**Abstract** Accuracy is an important indicator of the three-dimensional (3D) model of UAV oblique photography. Conventional modeling need to deploy Ground Control Points (GCPs), which is inefficient and costly. Control-free modeling does not require GCPs, which is efficient but not accurate. Here, we propose a 3D modeling approach for oblique photography with post-processed image control. The study was carried out in the east area of Nanjing University of Information Science & Technology. The results show that both the 3D models established by conventional modeling and post-processed image control modeling are accurate, with plane errors and elevation errors less than 0.05 m, meeting the modeling requirements of high efficiency, high precision and low cost. However, the post-processed image control modeling avoids the making and maintaining of the image control points, instead, it deploys the existing high-precision 3D model to select image control points and extract the coordinates. The proposed approach can be applied to regular updating of high-precision 3D real scene models for cities, towns, roads, etc.

**Key words** oblique photography; image control point; realistic 3D model; post-processed image control; precision