

# Analysis on Consumer-grade UAV Tilt Photography Aerial Triangulation and 3D Model Accuracy

Mengda Li

Surveying and Mapping Institute of Linyi Natural Resources and Planning Bureau, Linyi, Shandong, 276000, China

## Abstract

With the advancement of digital cities, three-dimensional digital cities have become an important means of urban planning and urban management. They provide early warning of the future form of the city, complete the dynamic simulation of urban disasters and emergencies, and obtain scientific basis for the adjustment of urban planning plans. Planning is more forward-looking, and the demand for three-dimensional urban models is increasing. In recent years, the development of drone oblique photogrammetry technology has changed the limitation of traditional aerial photogrammetry to perceive ground objects from a single angle. Sensors equipped with multiple cameras at different angles can acquire all-round image information of ground objects, and construct real urban scenes quickly and efficiently. Three-dimensional model. However, compared with oblique photography based on consumer-grade drones, it is recognized by the public because of its convenient operation, light weight, low cost, and no need to apply for airspace. Using it as a platform for oblique cameras to observe the earth, there is little research on the accuracy of results based on consumer-grade drone tilt photogrammetry technology. Therefore, the dissertation focuses on the aerial triangulation of consumer drone tilt photography and the accuracy of the 3D model.

## Keywords

UAV tilt photography; triangulation; three-dimensional model; accuracy analysis

## 消费级无人机倾斜摄影空中三角测量及三维模型精度分析

李孟达

临沂市自然资源和规划局测绘院, 中国·山东 临沂 276000

## 摘要

随着数字化城市推进, 三维数字城市开始成为城市规划和城市管理重要手段, 对城市的未来形态进行预警, 完成城市灾害事件和突发事件的动态模拟, 获得城市规划方案调整的科学依据, 使城市规划更具前瞻性, 城市三维模型的需求越来越大。近些年, 无人机倾斜摄影测量技术的发展, 改变了传统航空摄影测量单一角度感知地物的局限, 搭载多个不同角度相机的传感器获取地物全方位影像信息, 快速高效的构建城市实景三维模型。然而与基于消费级无人机倾斜摄影相比, 因其操作方便、质量轻、成本低、无需申请空域等特点得到大众认可。将其作为倾斜相机对地观测的平台, 基于消费级无人机倾斜摄影测量技术在成果精度方面研究很少。因此, 论文围绕消费级无人机倾斜摄影空中三角测量及三维模型精度进行论述。

## 关键词

无人机倾斜摄影; 三角测量; 三维模型; 精度分析

## 1 消费级无人机倾斜摄影测量空中三角测量精度分析

### 1.1 空中三角测量简介

解析空中三角测量是利用少量控制点解求大量地面控制点(定向点), 提高工作效率, 减少外业工作量而提出来的方法。在平差过程中观测值是控制点和待定点的像点坐标, 最终需要解求待定点的测量坐标以及相片的外方位元素。随着数字图像处理技术的发展, 摆脱了传统需要人工在影像上选取待定点的相片坐标的局限性。通过特征点检测算子便可以得到

影像覆盖区域的稀疏点云数据。

控制点: 解析空中三角测量布设的地面控制点, 需要实地测量外业坐标。

定向点: 单模型绝对定向时的控制点, 一般是通过解析空中三角测量加密得到测量坐标。

待定点: 需要通过解析空中三角测量计算测量坐标的加密点, 一般是单模型的定向点。

模型点: 是上述三种点的统称, 指需要测量像点坐标的控制点、待定点通过一系列的解析空三过程计算出地面摄影测量坐标的点。

独立模型法区域网空中三角测量的基本思想是：把整个测区分成若干个小区域，每一个区域视为刚体，利用区域间连接点做平移、缩放、旋转变换，合并各区域变成整体区域。

光束法区域网空中三角测量的基本思想：摄影中心、像点、物点所组成的光束线为平差的基本单元，使用中心投影共线方程进行平差。在空间中旋转、平移各个光束线，以达到最佳交会。利用外业控制点使区域网具有真实的地理坐标。

## 1.2 倾斜摄影测量空中三角测量精度评估方法

空中三角测量的精度分析可以从以下方面分析：

(1) 理论精度：将加密点坐标改正数看作一个随机误差，通过最小二乘平差的函数关系和谐方差传播计算坐标改正数看作一个随机误差，通过最小二乘平差中的函数关系和谐方差传播定律计算坐标改正数的方差矩阵，从而得到平差精度。

实际精度：利用外业实测地面控制点作为真实坐标，真实坐标值与平差坐标值进行差值运算，求得的中差值作为真误差。

## 1.3 倾斜影像、下视影像、多视影像空中三角测量精度对比

在相同测区、相同的控制点数量、相同控制点的布设方式下，以4、6、8、10、12、13、15、18、22个数量控制点分别参与倾斜相片（四个倾斜相机拍摄得的影像）、下视相片（下视相机所拍摄得到的影像）、多视相片（包括四倾斜相机和一个下视相机所拍摄得到的影像）空中三角测量加密解算当中，外业测量40个点作为检查点，与模型相应量测点进行精度评估。可以得到以下结论：

(1) 实验结果表明，下视影像空中三角测量平面中误差最大为0.0933m，高程中误差最大为0.0264m，多视影像空中三角测量平面最大误差最大为0.07504m，高程中误差最大为0.0078m，均满足空中三角测量加密成果规范中的相应比例尺精度的要求。

(2) 相比而言，倾斜影像误差比较大，主要是因相片倾斜引起像点位移造成的。

(3) 相同测区、相同控制点数量、相同布设方式下，与多视影像空中三角测量精度相比，不论是平面中误差、高程中误差，下视影像的误差都要大。

(4) 控制点参与数量的增多，下视影像的平面中误差、高程中误差会降低；多视影像的空中三角测量的平面中误差、

高程中误差小幅度降低，但相对不明显。

## 1.4 相同传感器，高差不同测区（平坦测区北京建筑大学校园与高差较大测区北京房山区大安山）精度对比

为了探索消费级无人机搭载轻型便捷的倾斜相机进行摄影测量的可行性和可靠性，以4个、6个、8个、10个、12个控制点分别在两个高差不同测区参与空中三角测量加密解算，在北京建筑大学校园测区量测30个具有明显特征的地面检查点，在北京市房山区大安山测区量取12地面检查点，并利用GPSRTK进行坐标采集然后分别与影像上对应点的量测坐标进行对比，计算平面中误差、高程中误差。可以得到以下结论：

(1) 针对平面中误差和高程中误差，地势高差大测区的到要比地势平坦测区相对较大，主要是高差较大的测区，造成因地形起伏引起的像点位移，测区内植被干扰也会产生一定误差；

(2) 地势平坦测区的平面、高程中误差均有所降低但不是很明显；地势高差较大的测区高程中误差明显降低。

## 1.5 探讨消费级无人机搭载五镜头相机航测布设控制点的原则

目前消费级无人机搭载轻型便捷的五镜头倾斜相机获取的数据运用于倾斜摄影空中三角测量，尚存在一些技术难点需要改进和完善。

与传统的航空摄影获取的影像相比，消费级无人机航测获取的影像像幅小，影像数据量大，易受恶劣条件影响，航向、旁向重叠度不规则，航向倾角、旁向倾角、相片旋角大等。无人机搭载倾斜相机进行数据采集，一般航向重叠度在80%，旁向重叠度在70%~80%，根据影像覆盖密度图明显看出，相比测区中间区域，影像覆盖度的四周边缘是比较薄弱的。而测区中间的地物点可达几十张影像所捕获，所限制的条件很多，重叠度高、精度高而且均匀，故需要加强测区边角的控制，分析在满足精度的条件下，尽量减少控制点的布设数量，有效提高工作效率。

在控制点分布对消费级无人机航测空中三角测量精度影响的研究中，根据无人机获取的影像特点及整个场景覆盖特点，实验采用六种控制点布设方案，进行空中三角测量加密及成果精度的评估对比<sup>[1]</sup>。

六种不同的控制点布设参与空中三角测量解算后,对其相应的空中三角测量精度进行统计,利用中误差计算公式评定模型平面、高程位置精度,依据中华人民共和国国家标准里的《数字航空摄影测量——空中三角测量规范》中规定的空中三角加密成果,计算中误差值来评定消费级无人机搭载轻型便捷的五镜头倾斜相机进行倾斜摄影测量的空中三角测量的加密解算精度。

(1) 六种布设方案参与空中三角测量解算结果中平面、高程中误差均满足《数字航空摄影测量——空中三角测量规范》中相关比例尺的精度要求。

(2) 六种方案中,采用区域网均匀布设、四角点组布设方案结果精度高。

(3) 只在区域四角布设平高控制点,虽然控制了整个测区,但相比较而言精度太低。在受灾或人员无法到达测区,使用四角点组布设方式,是非常合适的。

(4) 根据点组布设与单点布设方案实验比较,点组布设比单点布设其精度有着明显的提高。

论文主要进行了在相同的测区,相同的控制点数量、相同的布设方式对倾斜影像、下视影像、多视影像的空中三角测量精度对比分析;对高差不同测区的空中三角测量的精度进行评价;根据消费级无人机搭载轻型便捷倾斜相机航测的特点及获取数据质量的特点及影像密度覆盖图,提出增强边角控制的控制点布设方案,进行空中三角测量解算并精度评估。

## 2 倾斜摄影测量三维模型单体建筑物立面细节精度评价

以 FARO 扫描仪获取的点云数据为基础,利用计算机手工辅助建模技术构建的三维模型作为标准模型,评价实景三维模型场景中的单体建筑物模型的细部结构的精度,为采用倾斜摄影测量生产高精度、精细化的三维模型产品提供相应实践指导<sup>[2]</sup>。

### 2.1 实景三维中综合楼模型数据规则立面细节精度评价

以北京建筑大学侧面为例进行规则立面的细部结构精度分析。

使用区域网均匀布设四角点组布设加密边角控制的19个控制点参与空中三角测量解算成果引入建模中,通

过倾斜摄影技术生成 OBJ 格式实景三维模型。生成的三维场景共由 113 个瓦片构成。生成的综合楼瓦片数据在 Tile\_+004\_+003>Tile\_+004\_+004 两个文件夹里,把数据导入 3smax 软件里,OBJ 数据中除了研究区以外的多余的图形要素需要删除,只保留综合楼整体数据,提取综合楼侧面规整面数据,通过 MATLAB 软件下写出的 objdis.m 程序分别读取综合楼整体模型、综合楼侧面模型的三维数据并显示。

以点云数据为基础,3dMAX 手工绘制的标准三维模型建模范围与倾斜摄影生成的场景三维模型中单体面模型保持一致,坐标需统一,进行对比分析。

建筑物细节精度分析。消费级无人机倾斜摄影技术生成的模型与计算机构建的模型作对比,进行细节精度评价。任何物体都是由点、线、面构成,点与点之间可以连接成一条直线,点、线可以构成立体。无数多个三角面片构成模型数据,每个三角面片都有三个顶点,且具有坐标信息。综合楼的标准模型和倾斜摄影方式获取的模型中 X 方向指的是综合楼正面的南北方向,范围从 4399721.60m~4399789.32m, Y 方向指的是综合楼侧面东西方向,范围从 438265.41 m ~438306.37 m, Z 方向指的是综合楼高程,范围是从 32.97 m ~56.78 m, X 方向指的是综合楼侧面的平整度,如窗户的深度用 X 值表示,在 X 方向上有变形和扭曲现象,因此需要从倾斜摄影生成三维场景中综合楼侧面规整立面上读取 X 方向值的细节坐标与标准模型上的 X 值做相减分析。获取模型点的坐标方式通过 ObtainsanweimoxingXYZ.m 程序。Z 方向从最低开始,在 Y 方向从最小值开始记录每隔十厘米的位置上的 X 方向值, Z 方向每隔十厘米迭代,再记录 Y 方向从最小值到最大值每隔十厘米位置上的 X 方向值, Z 增加到最大,迭代终止。所有获取的 X 值都存放在表格文档中。每行总共记录 409 个点的 X 值,总共 238 行。分别总共获取 409\*238 个点的 X 值,保存到文档表格中。

通过 Arcgis 软件,分别加载标准模型与倾斜模型上获取的 409\*238 个同名点的 X 方向值,分别构建相应 TIN 模型。

综合以上可知:

第一,从标准模型和倾斜摄影模型上分别获取 409\*238 个同名点,同名点的 X 方向值相减后计算中误差,得到综合楼侧面的总体误差是 1.832095 米。

第二,通过 ObtainsanweimoxingXYZ.m 分别读取 TIN 一与 TIN 二模型上 Z 值为 35.86、44.38、50.15 固定时相同位置

的点 X 方向坐标,通过绘制 X 方向值的折线对比图分析误差,总结造成的原因。

东西方向对比:

(1) 当  $Z=35.86$  固定时,东西方向(Y方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 379 值,得到 X 值对比图。

(2) 当  $Z=44.38$  固定时,东西方向(Y方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 379 值,得到 X 值对比图。

(3) 当  $Z=50.15$  固定时,东西方向(Y方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 379 值,得到 X 值对比图。

因此,我们可以得出这样的结论: $Z=35.86$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.6873804 m;  $Z=44.38$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.5354832 m;  $Z=50.15$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.9526723 m。

第三,通过 ObtainsanweimoxingXYZ.m 程序分别读取 TIN 一与 TIN 二模型上 Y 值为 438277.63、4383292.35、438303.39 固定时相同位置的点 X 方向坐标,通过绘制 X 方向值的折线对比图分析误差,总结造成的原因。

高度方向的对比:

(1) 当  $Y=438277.63$  固定时,高度方向(Z方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 1 万个值,得到 X 值对比图。

(2) 当  $Y=438292.35$  固定时,高度方向(Z方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 1 万个值,得到 X 值对比图。

(3) 当  $Y=438292.35$  固定时,高度方向(Z方向)每隔 10cm,读取南北方向(X方向)一个值,分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上获取 1 万个值,得到 X 值对比图。

因此,我们可以得出这样的结论: $Y=438277.63$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.5692049 m;  $Y=438292.35$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.4892704 m;  $Y=438292.35$  固定时, X 值对比图通过误差值计算得到 0.5595927 m。

位于屋檐处下方小范围模型变形大。除屋檐处下方,小范围模型变形大外,高程值越高,立面模型的建模效果越好。建筑物局部区域点云缺失,倾斜摄影三维重建系统会根据周

边点云,自动补充三角网,产生严重变形,其误差值大<sup>[3]</sup>。

## 2.2 北京建筑大学大兴校区实景三维中综合楼模型数据不规则面细节精度评价

以北京建筑大学正面为例进行不规则面特征的细部结构精度分析。该模型在 Tile+004+003、Tile+004+004 的两个文件夹里。

OBJ 数据中除了研究区以外的多余的图形要素需要删除,只保留综合楼整体数据,综合楼正面不规整面数据。

以点云数据为基础,3dmax 手工绘制的标准立面三维模型与倾斜摄影生成的三维场景中综合楼正面规整面模型的坐标系建模范围需要保持一致,便于后续分析。利用上述方法采用计算机辅助建模技术生成标准综合楼不规整面模型数据。

通过 MATLAB 软件下写出的 objdis.m 程序分别读取综合楼整体模型、综合楼侧面模型的三维数据并显示。

建筑物细节精度分析。消费级无人机倾斜摄影技术构建的模型和计算机构建模型作对比,精度分析。通过上面在 MATLAB 显示的单体模型可知,综合楼正面不规整立面模型 X 方向的范围是 4399721.60 m ~4399789.32 m,总长度 67.72 m。Z 方向从 32.97 m ~56.78 m。ObtainsanweimoxingXYZ.m 程序实现读取模型点位坐标值。Z 方向从最低开始,在 X 方向从最小值开始记录每隔十厘米的位置上的 Y 方向值,Z 方向每隔十厘米迭代,再记录 X 方向从最小值到最大值每隔十厘米位置上的 Y 方向值,Z 方向值达到最大,迭代终止。所有获取的 Y 值都存放在表格文档中。每行共记录 677 个点的 Y 值,总共 238 行。分别总共获取 677\*238 个点的 Y 值,保存到表格文档中<sup>[4]</sup>。

通过 Arcgis 软件,分别加载标准模型与倾斜模型上获取的 677\*238 个同名点的 Y 方向值,分别构建相应标准 TIN 模型一图和倾斜摄影 TIN 模型二图。

综合以上可知:

第一,综合楼正面的标准模型数据和倾斜摄影模型上分别获取 677\*238 个同名点,对应同名点的 Y 方向值相减后计算中误差,得到综合楼正面总体中误差是 3.085742 米。

第二,通过 ObtainsanweimoxingXYZ.m 程序分别读取标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二模型上 Z 值为 35.86、44.38、50.15 固定时相同位置点的 Y 方向坐标,通过绘制 Y 方向值的折线对比图分析误差,总结造成的原因。

南北方向的对比:

(1) 当  $Z=35.86$  固定时, 南北方向 ( $X$  方向) 每隔  $10\text{cm}$ , 读取东西方向 ( $Y$  方向) 一个值, 分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上总共获取 6 个值, 绘制  $Y$  值对比图。

(2) 当  $Z=44.38$  固定时, 高度方向 ( $Z$  方向) 每隔  $10\text{cm}$ , 读取东西方向 ( $Y$  方向) 一个值, 分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上总共获取 6 个值, 绘制  $Y$  值对比图。

(3) 当  $Z=50.15$  固定时, 高度方向 ( $Z$  方向) 每隔  $10\text{cm}$ , 读取东西方向 ( $Y$  方向) 一个值, 分别在标准 TIN 一与倾斜摄影 TIN 二上总共获取 6 个值, 绘制  $Y$  值对比图。

因此, 我们可以得出这样的结论:  $Z=35.86$  固定时,  $Y$  值对比图通过误差值计算得到  $1.7864042\text{ m}$ ;  $Z=44.38$  固定时,  $Y$  值对比图通过误差值计算得到  $1.3776798\text{ m}$ ;  $Z=50.15$  固定时,  $Y$  值对比图通过误差值计算得到  $2.0685433\text{ m}$ 。

由以上可知, 竖直面落差比较大的地方误差值大变形大, 屋檐与门厅柱地方严重变形, 甚至粘连一片分辨不出支撑柱与通行空间, 主要原因还是未获取足够多的细节数据, 可以从数据源头寻找解决方案<sup>[5]</sup>。

消费级无人倾斜摄影技术构建的三维场景模型中的单体

建筑物存在边缘扭曲变形、窗沿、门厅柱粘连等。通过两组实验数据对场景中单体建筑物的规则立面和不规则 (立面落差比较大) 立面细部结构的精度分析。结果表明: 规则立面的综合楼侧面的细部结构总体中误差是  $1.83209\text{m}$ 。立面落差比较大的综合楼正面的细部结构的总体中误差是  $3.085742\text{m}$ 。注意的是, 落差面比较大的区域误差比较大。

## 参考文献

- [1] 李欢. 低空无人机倾斜摄影测量成果精度研究 [J]. 甘肃科学学报, 2020(2):27-33.
- [2] 张尔严, 高珊珊. 基于无人机倾斜摄影测量的城市大比例尺地形图更新与修测 [J]. 测绘标准化, 2018,034(004):59-62.
- [3] 夏祖伟. 消费级无人机倾斜摄影测量测图应用 [J]. 河南水利与南水北调, 2019,48(04):63-64.
- [4] FU Zhujun. 无人机倾斜摄影在建筑物立体测量中的应用 [J]. 北京测绘, 2019(7):839-842.
- [5] 余忠迪, 李辉, 巴芳, 等. 基于消费级无人机的城市三维建模 %3D city model construction based on a consumer-grade UAV [J]. 国土资源遥感, 2018,030(002):67-72.