

doi: 10.6046/gtzyyg.2018.02.09

引用格式: 余忠迪, 李辉, 巴芳, 等. 基于消费者级无人机的城市三维建模[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 67-72. (Yu Z D, Li H, Ba F, et al. 3D city model construction based on a consumer-grade UAV[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2): 67-72.)

# 基于消费者级无人机的城市三维建模

余忠迪<sup>1,2</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 巴芳<sup>1</sup>, 王朝阳<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 2. 北京洛斯塔数字遥感技术有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 城市三维建模是“智慧城市”建设的关键技术之一。为解决传统城市建模方法存在的数据采集难度大、成本高、建模效率低等问题, 提出了一种基于消费者级无人机倾斜摄影技术的城市三维建模方法。首先, 利用云台控制无人机镜头方向来获取研究区的正射及倾斜影像; 然后, 利用空中三角测量生成的三维点云构建三维模型, 并将从多视影像中提取的建筑物墙面纹理映射到相应的模型; 最终, 以中国地质大学(武汉)校园为例建立城市真三维模型。结果表明, 该方法在满足模型精度要求的同时, 大大提高了建模效率, 降低了模型生产成本。

**关键词:** 消费者级无人机; 倾斜摄影测量; 三维建模

**中图法分类号:** P 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2018)02-0067-06

## 0 引言

城市三维模型的构建一直是国际遥感、地理信息系统及相关学科研究的热点。近年来, 随着“智慧城市”的迅速发展及日益普及, 建立有真实纹理的三维城市景观显得尤其重要。目前城市三维建模技术主要有以下3种: ①基于软件的建模技术, 以大比例尺地形数据为基础, 使用三维制作软件(如3Ds MAX等)建模, 该方法能逼真地表示城市的精细结构和材质特征, 但存在生产成本低、周期长、效率低等缺点<sup>[1]</sup>; ②基于传统摄影测量的三维建模技术, 采用航空摄影测量技术采集最新数字线划图(digital line graphic, DLG)二维或三维矢量数据, 再利用软件进行建模, 该方法具有自动化程度高、建模速度快、易于实时更新等优点, 但是建筑物侧面纹理信息需要靠其他手段来获取构建<sup>[2]</sup>; ③基于激光扫描的建模技术, 利用激光点云可以快速建立物体的三维模型, 但其纹理信息依旧需要靠其他手段获取, 并由人工进行纹理贴合<sup>[3]</sup>。一定程度上, 上述方法都存在生产工艺复杂、成本高、效率低等缺点, 制约了城市三维建模的发展和推广。

数字摄影测量技术因在处理大范围场景能力以及三维重建精度方面具有无可比拟的优势, 被认为是目前获取三维城市模型数据最有吸引力的方法之

一。然而, 传统摄影测量获取航空影像时, 基本近似竖直摄影, 造成航空影像上的屋顶信息丰富而墙面往往不可见。同时, 建筑物稠密区域存在遮挡现象, 也使航空影像不能有效提供建筑物侧面纹理信息。倾斜摄影测量技术是国际测绘领域近些年发展起来的一项新技术, 其通过多角度组合相机, 打破了以往只能垂直拍摄的局限, 使航空摄影系统不但能获取竖直影像, 还能获取倾斜影像, 较好解决了传统航空摄影获取城市建筑物时遇到的遮挡问题<sup>[4]</sup>。利用倾斜摄影测量技术进行城市三维建模, 不仅可以节省模型细部分析时间, 简化模型纹理采集和处理方法, 还可以提高工作效率, 降低成本。倾斜摄影测量系统在国外起步较早, 产品相对成熟, 如天宝公司的AOS系统、德国IGI公司的Penta-DigiCam系统和以色列VisionMap公司的A3系统等。国内刘先林院士团队于2010年率先研发成功了第一款国产倾斜相机SWDC-5, 并成功完成实验检验, 是国内倾斜相机的一大突破。后续上海航遥公司和中测新图公司也相继推出了AMC580和TOPDC-5倾斜相机, 使国产倾斜航空摄影测量系统得到了快速发展<sup>[5]</sup>。上述倾斜摄影测量系统为快速、大面积城市真三维模型的获取提供了新方法, 但由于倾斜摄影测量系统本身体积和重量较大, 必须需要小型飞机或动力三角翼飞行器, 甚至是运5运输机作为平台进行数据采集, 加之其价格昂贵, 使得数据生产成本

收稿日期: 2016-11-15; 修订日期: 2017-02-04

第一作者: 余忠迪(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究。Email: 1786399629@qq.com。

通信作者: 李辉(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感地学应用等研究。Email: leelmars@gmail.com。

极高,很大程度上限制了该技术的广泛运用<sup>[6]</sup>。

近年来,无人机成本和可操作性有了革命性的突破,使其从传统的军事、航测等专业领域进入到大众消费市场。消费者级无人机具有获取影像成本低、速度快和空间分辨率高等优点,在遥感地质、精准农业、环境监测及城市规划等领域得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。其虽然只搭载一个相机,但可以通过控制云台改变相机的拍摄角度来获取倾斜影像,从而实现专业倾斜摄影测量系统的影像采集功能。同时,基于计算机视觉和运动恢复结构(structure from motion, SfM)的图像处理技术不仅可以将正射影像与倾斜影像进行联合平差,生成点云,并自动构建三维模型、纹理映射,最终生成逼真的三维场景,而且对相机拍摄位置、图像尺度及拍摄焦距没有要求<sup>[8]</sup>,较大提高了数字城市三维模型的生产效率。无人机软硬件技术的发展拓宽了其应用领域,在城市三维建模领域展示了巨大的发展潜力。但利用消费者级无人机倾斜摄影测量进行三维建模的研究少有报道。本文拟探讨利用消费者级无人机进行城市三维建模的一般步骤与方法,以中国地质大学(武汉)北校区为例,进行研究区倾斜影像采集及三维模型构建,并对建模结果进行验证,旨在为城市三维建模研究提供一种方便、快捷的新方法。

### 1 无人机摄影测量系统

目前无人机种类繁多,有无人直升机、固定翼无人机和多旋翼无人机等多种机型。不同无人机具有不同的特点和适用领域。多旋翼无人机飞行速度可控,飞行高度可调且可以低空飞行,同时该无人机不受起降场地限制,更适合用于城市三维建模的数据获取。本研究选用深圳大疆科技精灵系列四旋翼无人机 DJI Phantom 4(图 1)。



图 1 Phantom 4 无人机及地面控制系统

Fig.1 Phantom 4 UAV and ground control system

该无人机由飞行器、遥控器、云台相机以及配套使用的移动设备组成。飞行器重为 1 380 g,配备全

新的影像稳定系统,控制精度高达  $\pm 0.03^\circ$ 。飞控系统集成于飞行器机身内部,具备双冗余惯性测量单元(inertial measurement units, IMU)和指南针系统。一体式云台位于机身下部,其上搭载嵌入式相机。遥控器配备灵敏的控制杆和专用按钮,工作频率为 2.400 ~ 2.483 GHz。内置 DJI Lightbridge 高清图传系统,图像传输和可遥控距离达 5 km。Phantom 4 能同时接受 GPS 及 GLONASS 定位卫星信号,可获得 5 m 精度的影像位置信息。其搭载的相机焦距为 20 mm(35 mm 格式等效),内置 1 200 万像素 1/2.3 in CMOS 图像传感器。相机镜头针对航拍进行了专门优化,94° 视角、f/2.8 光圈的超低畸变的镜头,成像清晰锐利。云台相机的可控转动范围为  $(-90^\circ, +30^\circ)$ ,可以通过控制云台来采集不同角度的倾斜影像。Phantom 4 携带了高能量密度智能飞行电池和高效率的动力系统,最大平飞速度为 20 m/s,单个电池最大续航时间约为 28 min。

### 2 三维模型构建技术流程

利用倾斜摄影测量技术进行三维建模主要包括外业数据采集、空中三角测量、多视影像密集匹配、数字表面模型(digital surface model, DSM)数据生成、纹理贴合及实景三维建模等步骤<sup>[6,9]</sup>。其中最关键的步骤是空中三角测量获取相机外方位元素、多视影像密集匹配获取加密点云以及纹理贴合。三维模型构建技术路线如图 2 所示。

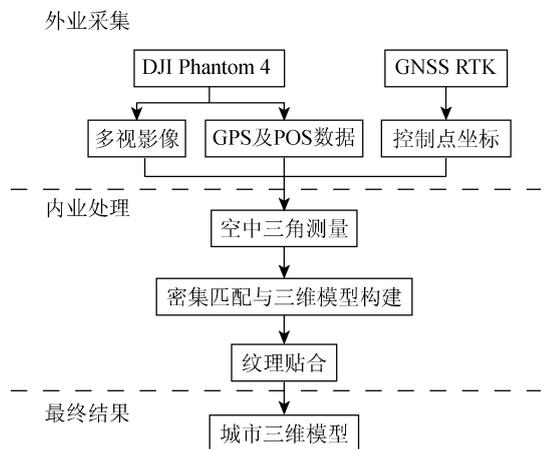


图 2 三维模型构建技术路线

Fig.2 Flowchart of three - dimensional model construction

无人机采集数据不仅包含垂直影像,还包含多角度、大倾角倾斜侧视影像,且不同于航空影像,存在重叠度高、像幅小、基线短、旋片角大且畸变严重等问题,所以传统摄影测量算法已经不适用倾斜影像。基于 SfM 的新型数字摄影测量为获取三维地形数据提供了有效的方法。倾斜摄影测量处理软件主

要有法国 ASTRIUM 公司的“Street Factory”、法国 Accute3D 公司的 Context Capture 和瑞士 PIX4D 公司的 PIX4D mapper 系统等<sup>[5]</sup>。其中, Context Capture 软件运行时无需人工干预,生成的模型精度高,同时在纹理贴合时运用自动颜色补偿算法保证瓦片间的数据差异更小,因此本研究采用该软件来处理无人机影像,构建城市三维模型。

### 3 实例分析

#### 3.1 数据采集

##### 3.1.1 地面控制点

在影像获取之前需要在研究区采集控制点,用于后续的空三角测量及模型精度验证。在研究区内选择道路交叉点、建筑物拐点和体育场标记线交点等作为地面控制点,然后利用 GNSS RTK(1+1) 测量其坐标,测量精度达到 cm 级,可以满足实验的精度要求。本次实验共采集 15 个控制点,其中 10 个用于校正空中三角测量结果,5 个用于精度验证。

##### 3.1.2 航线设计与无人机影像采集

实验采用 Altizure 软件进行无人机航线设计。该软件是一款优秀的飞控及航线规划软件,支持 DJI 等多款型号的无人机。飞行前需要在软件提供的地图上规划需要建模的航拍区域、设定飞行高度、影像重叠度以及相机倾斜角度等参数,软件会自动生成 1 次正摄和 4 次倾斜摄影的飞行路线,预估飞行时长,并可实现智能续飞。图 3 为采集中国地质大学(武汉)北校区多视影像的 5 个架次航线设计。

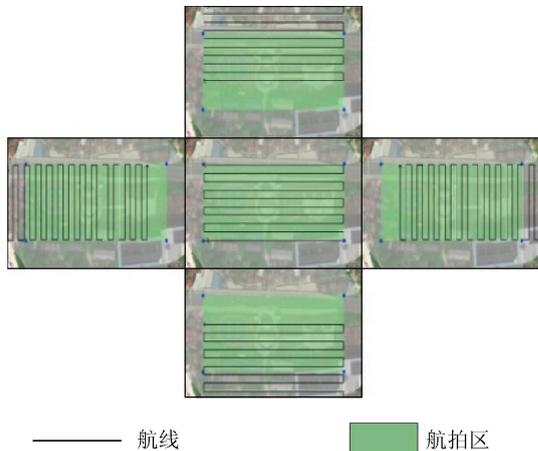


图 3 航线设计

Fig. 3 Flight planning

在图 3 中,中间航线用于获取正摄影像,上下左右航线分别获取倾角为 40° 的南、北、东和西 4 个方向的多视影像。实验飞行航高为 60 m,航向与旁向重叠度均为 80%,5 个航次耗时 18 min,共获取研究

区 194 张影像。获得的正摄影像的地面空间分辨率为 0.027 m,影像成像质量好,各类地物清晰可见,多视影像不仅显示建筑物顶面信息还包含丰富的侧面纹理(图 4),这为后续三维模型建立及纹理提取奠定了数据基础。



图 4 多视影像

Fig. 4 Pictures with multi-view

#### 3.2 全自动快速三维模型构建

##### 3.2.1 空中三角测量

空中三角测量是三维重建中最基础的步骤。Context Capture 软件利用特征点检测算法,本文采用尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)方法从多视影像中提取大量特征点,同时结合影像的 GPS 位置信息利用高效匹配算法进行特征点的快速匹配。在此基础上,利用迭代光束平差过程生成研究区的稀疏点云(图 5),并同时求解相机的内、外方位元素,完成空中三角测量<sup>[10]</sup>。

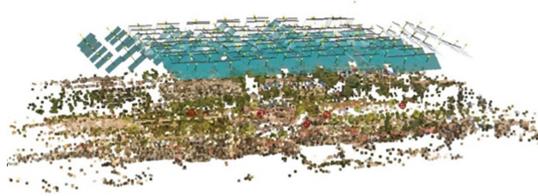


图 5 空中三角测量结果

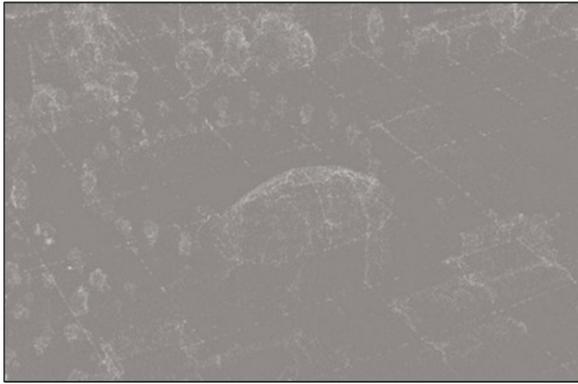
Fig. 5 Result of aerotriangulation

##### 3.2.2 密集匹配与模型构建

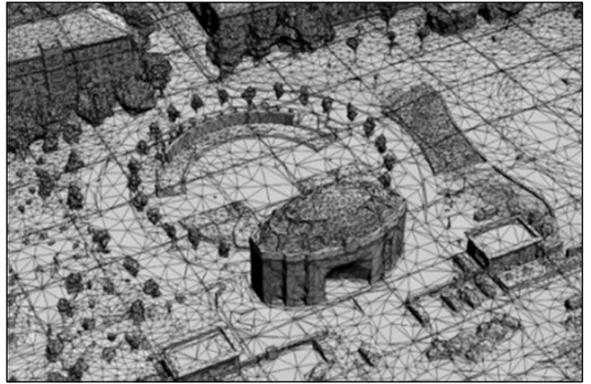
由于初始匹配得到的点云过于稀疏,无法构建高精度的模型,所以需要对点云进行扩展、滤波和优化获得加密点云。首先,利用密集匹配技术将稀疏点云扩展到相邻像素,得到密集点云;然后,通过滤波算法剔除存在于地物模型内外部的误差点,优化结果<sup>[11]</sup>;最后,根据地物复杂度对密集点云进行删减优化,降低数据冗余,并构建不同尺度下的三角

网,获得优化后的模型。研究区加密点云与 DSM 模

型如图 6 所示。



(a) 加密点云



(b) DSM

图 6 加密点云与 DSM 模型

Fig.6 Dense point cloud and DSM

从图 6 中可以看出,由于树木和大门顶部修饰结构复杂,点云和三角网较为密集,而广场和路面的结构简单,点云和三角网较为稀疏。

### 3.2.3 纹理贴合

纹理贴合是城市三维模型构建中的重要部分。通常以 3Ds Max 为建模工具的三维城市模型构建,数据处理过程均由人工完成,不仅效率低下,而且地物的表面纹理常会出现失真现象。本研究采用的全自动纹理贴合方法很好地克服了这一缺点。首先,对三维模型和纹理影像配准,通过摄影测量的计算机视觉原理,建立空间地物点到各影像的投影关系,从而确立模型中各三角形与多视影像的投影关系,筛选面积最大、效果最优、无遮蔽的目标影像;然后,将其反投影到模型的三角面上,实现三维模型的纹理贴合<sup>[4]</sup>。图 7 为纹理贴合的三维模型成果,从图 7 中可以看到建筑物、树木和草坪等景观的纹理表达都十分逼真。

平差得到的三维坐标之间的误差,来衡量区域内空中三角测量加密结果的精度。验证点误差统计如表 1 所示。

表 1 验证点误差统计

Tab.1 Statistics for the error of check points (m)

误差参数	平面	高程
最大值	0.066 0	0.012 0
最小值	0.018 2	-0.000 1
中误差	0.030 0	0.011 0

从表 1 中可以看出,空中三角测量加密结果最大平面误差为 0.066 m,中误差为 0.03 m;最大高程误差为 0.012 m,中误差为 0.011 m。这些误差均远小于《数字航空摄影测量空中三角测量规范》中规定的“1:500 平地地形测量平面中误差不超过 0.175 m,高程中误差不超过 0.15 m”的要求<sup>[12]</sup>。由此可见,本文方法构建的模型几何精度非常高。

### 3.3.2 模型复杂度

利用定性方法来评估构建的三维模型的复杂度。对三维模型进行旋转和缩放,将模型纹理、颜色、空间位置和模型完整度等与真实场景进行对比。结果表明,建筑物模型的基本轮廓、外部建构表现良好,其中屋檐、阳台和装饰物表现基本完整;带状绿化树和绿化林地采用主体建模表现,基本上能够反映树木的色调和基本特征;仅有少量的栅栏、路灯和座椅等地物要素未表现出来。基于《三维地理信息模型数据产品规范》,根据模型精细度和纹理精细度将三维地理信息产品分为 I—IV 级(I 级为最优)<sup>[13]</sup>,本文构建的三维模型复杂度介于 II 级到 III 级之间,能够满足城市三维模型的需求。



图 7 三维模型成果

Fig.7 3D model with texture

## 3.3 精度分析

### 3.3.1 空中三角测量加密精度

通过计算 5 个验证点的实测三维坐标与区域网

## 4 结论

针对传统测量建模方法生产工艺复杂、效率低,以及专业倾斜摄影测量设备昂贵、机动性差等缺点,尝试利用消费者级无人机倾斜摄影技术进行三维城市建模,并以中国地质大学(武汉)北校区为研究区,进行了多视影像的采集和三维模型构建实验,得到以下结论:

1)通过飞行控制软件控制改变内嵌在无人机云台中相机的方向,消费者级无人机可完成专业摄影测量系统的多视影像采集工作,从而大大降低了城市三维模型数据的获取成本。

2)利用消费者级无人机获得的高空间分辨率多视影像,结合高精度地面控制点,可以全自动化生成高精度的城市三维模型,生产的模型整体性好、地物无缝衔接、场景真实、纹理逼真,是一种经济高效的三维模型生产方法。

## 参考文献(References):

[1] 万宝林. 3DS MAX 与 SketchUp 的三维城市建模技术实验对比分析[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(2): 23-25.  
Wan B L. Comparative analysis of urban geospatial 3D modeling technology between 3DS MAX and SketchUp[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(2): 23-25.

[2] 谭金石, 吴云辉, 范海生, 等. 基于 ArcGIS 与航空影像的城市三维建模方法研究[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(6): 59-61.  
Tan J S, Wu Y H, Fan H S, et al. Research on city 3D modeling based on ArcGIS and aerial images[J]. Journal of Geomatics, 2014, 39(6): 59-61.

[3] 吴静, 靳奉祥, 王建. 基于三维激光扫描数据的建筑物三维建模[J]. 测绘工程, 2007, 16(5): 57-60.  
Wu J, Jin F X, Wang J. Three dimension modeling of buildings based on three dimension laser scanner data[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(5): 57-60.

[4] 张春森, 张卫龙, 郭丙轩, 等. 倾斜影像的三维纹理快速重建[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 782-790.  
Zhang C S, Zhang W L, Guo B X, et al. Rapidly 3D texture reconstruction based on oblique photography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(7): 782-790.

[5] 李安福, 曾政祥, 吴晓明. 浅析国内倾斜摄影技术的发展[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(9): 57-62.  
Li A F, Zeng Z X, Wu X M. The analysis of the development of oblique photography technique in China[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2014, 37(9): 57-62.

[6] 曲林, 张淑娟, 冯洋, 等. 倾斜摄影测量高中低空解决方案研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 19-23.  
Qu L, Zhang S J, Feng Y, et al. Study on photogrammetry solutions based on high - middle - low level[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2016, 39(1): 19-23.

[7] 毕凯, 李英成, 丁晓波, 等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报, 2015(3): 27-31, 48.  
Bi K, Li Y C, Ding X B, et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: Status and trend of development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(3): 27-31, 48.

[8] 魏占玉, Ramon A, 何宏林, 等. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质, 2016, 37(2): 636-648.  
Wei Z Y, Ramon A, He H L, et al. Accuracy analysis of terrain point cloud acquired by "structure from motion" using aerial photos[J]. Seismology and Geology, 2016, 37(2): 636-648.

[9] 曲林, 冯洋, 支玲美, 等. 基于无人机倾斜摄影数据的实景三维建模研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(3): 38-39, 43.  
Qu L, Feng Y, Zhi L M, et al. Study on real 3D modeling of photographic data based on UAV[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2015, 38(3): 38-39, 43.

[10] 何豫航, 岳俊. 基于 CMVS/PMVS 多视角密集匹配方法的研究与实现[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(3): 20-23.  
He Y H, Yue J. Research and implementation based on multi-view dense matching by applying CMVS/PMVS[J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(3): 20-23.

[11] 刘彬, 陈向宁, 郭连朋. 分块立体重建的 PMVS 算法研究与实现[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(6): 614-619.  
Liu B, Chen X N, Guo L P. Research and implementation of PMVS algorithm based on block dimensional reconstruction[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(6): 614-619.

[12] 国家测绘地理信息局测绘标准化研究所, 国家测绘地理信息局第一航测遥感院, 国家测绘地理信息局第三航测遥感院. GB/T 23236—2009 数字航空摄影测量空中三角测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
Institute of Standardization of Surveying and Mapping of the State Bureau of Surveying and Mapping, the First Institute of Aero - Photogrammetry and Remote Sensing, NASG, the Third Institute of Aero - Photogrammetry and Remote Sensing, NASG. GB/T 23236—2009 specifications for aerotriangulation of digital aerophotogrammetry[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2009.

[13] 国家测绘地理信息局. CH/T 9015—2012 三维地理信息模型数据产品规范[S]. 北京: 中国测绘出版社, 2013.  
National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation. CH/T 9015—2012 specifications for the digital products of three - dimensional model on geographic information[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2013.

## 3D city model construction based on a consumer – grade UAV

YU Zhongdi<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, BA Fang<sup>1</sup>, WANG Zhaoyang<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Beijing North – star Digital Remote Sensing Technology Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** 3D modeling of urban buildings is one of the key technologies for smart city construction. The traditional modeling methods have many disadvantages in the process of data collection, such as operating difficulty, high cost and low efficiency in 3D modeling. In this paper, the authors propose a 3D city modeling approach based on oblique photography technology of unmanned aerial vehicle(UAV) for consumption. The cradle is used to control the direction of lens, and multi – angle slanted images are obtained. Then the 3D model is constructed by using aerial triangulation principle, and textures of building walls are extracted from multi – angle images. Finally the texture is mapped to the corresponding models, and the true 3D model is built. Result shows that the approach can not only improve modeling efficiency but also reduce the cost during data producing process.

**Keywords:** consumer – grade UAV; oblique photogrammetry; 3D model

(责任编辑: 张 仙)