

复杂地形下无人机倾斜摄影技术的校园三维实景建模^①



亓信玖¹, 黄风华², 李传林¹, 林国滨², 曹俊²

¹(福州大学 数字中国研究院 (福建) 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350108)

²(阳光学院 空间数据挖掘与应用福建省高校工程研究中心, 福州 350015)

通讯作者: 黄风华, E-mail: fenghuait@sina.com

摘 要: 针对无人机倾斜摄影技术在复杂地形条件下三维实景建模的可行性及其精度是否满足实际大比例尺测量要求的问题, 本文以福州市马尾区阳光学院校园为例, 采用大疆经纬系列无人机搭载云眼系列五镜头相机的方式完成测区倾斜影像数据的采集. 采用实时动态 (Real-Time Kinematic, RTK) 连接千寻 CORS 账号的量测方式完成测区控制点的采集. 利用 Bentley 公司的实景建模软件 ContextCapture 对外业采集的数据进行内业处理, 得到了该校园的高分辨率的三维实景模型、数字表面模型 (DSM) 和真正射影像 (TDOM), 并对三维模型进行精度分析. 为了保证模型的精度, 实验过程中通过布设较多控制点, 分块航测, 提高航向和旁向重叠度来提高模型精度. 实验结果表明, 与地面实测数据相比, 采用上述技术所建立的校园三维实景模型的平面位置中误差和高程中误差均小于 5 cm, 满足实际大比例尺测量的要求, 可为后期校园三维实景模型的二次开发提供重要的数据支持.

关键词: 无人机倾斜摄影技术; CORS; 三维实景模型; DSM; TDOM

引用格式: 亓信玖, 黄风华, 李传林, 林国滨, 曹俊. 复杂地形下无人机倾斜摄影技术的校园三维实景建模. 计算机系统应用, 2021, 30(2): 110–116.
<http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7633.html>

3D Campus Scene Modeling Based on UAV Tilt Photography in Complex Terrain

QI Xin-Jiu¹, HUANG Feng-Hua², LI Chuan-Lin¹, LIN Guo-Bin², CAO Jun²

¹(Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Digital China Research Institute (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

²(Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Spatial Data Mining and Application, Yango University, Fuzhou 350015, China)

Abstract: This study takes the campus of Yango University in Mawei District, Fuzhou City as an example to study the feasibility and accuracy of 3D modeling of UAV tilt photography in complex terrain. It adopts DJI Matrice series of UAVs carrying cloud eye series of five-lens cameras to collect tilt image data in the survey area. A real-time kinematic instrument connects Qianxun CORS account to complete the acquisition of control points in the survey area. With ContextCapture, a real-world modeling software of Bentley company, the data collected from the external operation is processed for internal operation. Consequently, the high-resolution 3D scene model, Digital Surface Model (DSM) and True Digital Orthophoto Map (TDOM) of the campus are obtained, and the accuracy of the 3D model is analyzed. In order to ensure the accuracy of the model, the experiment improves the accuracy of the model by setting more control points, making sub-regional aerial survey, and improving the overlap of heading and the side direction. Experimental results reveal that the mean square error of the plane position and the mean square error of the elevation of the 3D real scene model are less than 5 cm, which can meet the requirements of large-scale measurement and provide important data

① 收稿时间: 2019-12-17; 修改时间: 2020-01-14; 采用时间: 2020-04-17; csa 在线出版时间: 2021-01-27

support for the secondary development of the 3D real scene model of the campus in the later stage.

Key words: tilt photogrammetry technology of Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Continuously Operating Reference Stations (CORS); 3D real scene model; Digital Surface Model (DSM); True Digital Orthophoto Map (TDOM)

近些年,无人机倾斜摄影测量技术是国内外测量领域中发展应用起来的一项高新技术,已成为摄影测量领域中一个新的研究热点^[1].该技术主要用于三维实景模型的生产.随着“数字校园”、“智慧校园”的出现,各大高校争相开展相应课题,其中三维实景模型是校园智慧建设的亮点之一^[2].

传统的三维模型构建主要是利用影像或规划图作为底图,利用三维建模软件结合人工收集到的二维平面和高程数据完成三维模型的构建.常见的三维建模软件有3DMAX、AutoCAD、SketchUp、CityEngine等.通过传统方法生成的三维模型不仅需要耗费大量的人力与财力,而且由于缺少必要的纹理等信息,从而导致质量和真实感较差,不能真实反映复杂地物形状,与现实世界反差较大,难以满足大区域三维城市的应用^[3].相对于传统的三维模型来说,三维实景模型具有不受模型形状的限制、模型真实、生成速度快、应用领域广泛等特点.目前该技术在大规模地形图测绘、三维建模、城市规划、国土管理、文物遗产保护等多个领域都得到了广泛应用^[4-6].本研究以阳光学院马尾校区为例,研究无人机倾斜摄影测量在复杂地形条件下三维实景模型的方法,并且检验其精度是否满足实际测量需求的问题.

1 无人机倾斜摄影测量技术与空中三角测量

1.1 无人机倾斜摄影测量技术

无人机倾斜摄影测量技术是指在无人机这一飞行平台上面搭载一台或多台传感器同时从多个角度采集影像,从而获取地物信息的技术.与传统的摄影测量相比,它突破了传统的垂直拍摄获取正射影像的束缚,可对同一地物同时从多个倾斜角度摄影,从而能够快速、高效、大视角地获取更加客观丰富的侧面纹理等信息用于三维实景建模.近年来,众多学者对无人机倾斜摄影技术进行了研究.倾斜摄影测量的发展,国外比国内早了很多,国外已经经历了十几年的发展历程^[7,8],应用比较广泛,甚至发展到了室内三维建模.国内倾斜

摄影发展也就8年左右的历史,2010年在中国测绘科学院刘先林院士的带领下研制出了第一台倾斜相机SWDC-5^[9].中海达公司自主研发并生产了一款八旋翼的无人机测量系统OS-M8^[10].上海航测和中测新图推出了AMC580和TOPDC-5倾斜相机,国产倾斜相机航摄影得到了一个快速发展^[11].总之不管硬件还是软件目前国内与国外都有一定差距,特别是软件.当前倾斜摄影相机主流为5镜头(其中包括4个倾斜镜头和1个垂直镜头).本文采用的就是基于五镜头的无人机航空摄影来完成三维实景模型的构建.

简而言之,无人机倾斜摄影测量技术就是无人机技术与倾斜摄影技术的完美结合.该技术主要包括飞行平台、多镜头倾斜传感器、地面操作控制系统3个部分.无人机倾斜摄影技术还可以与其他技术相结合来完成人们更高的需求,应用前景广泛. Stöcker等^[12]以西班牙安达卢西亚的案例研究了无人机航测在沟渠测量中的应用. Sun等^[13]利用无人机倾斜摄影技术与BIM技术及VR技术相结合,通过虚拟体验来模拟看房系统.孙少楠等利用无人机倾斜摄影技术与BIM技术相结合实现了在水利工程地形中的应用^[14].

1.2 空中三角测量

摄影测量的主要任务是最大限度地减少外业工作,因此提出解析空中三角测量这一概念.空中三角测量俗称空三平差,根据平差中采用的数学模型,空中三角测量可分为航带法、独立模型法、光束法三种方法.空三平差是数字摄影测量中通过少量野外控制点对测区内的控制点加密从而获取影像加密点平面位置和高程的重要方法^[15].该方法同样也适合倾斜摄影测量.相对于传统摄影测量,多镜头倾斜摄影计算量较大,计算过程比较复杂.无人机倾斜摄影测量系统获取的影像空三平差以原始POS数据和野外测定的控制点为基础,采用严密的数学公式,按照最小二乘法原理,平差计算出摄影测量中所需加密点的三维坐标及其定向参数,同时建立控制点、连接点以及POS辅助数据的多视角影像的联合结算,进一步保障平差结果的精度.因

此空三平差在摄影测量中占有十分重要的位置。

常见的空三软件很多,如 Inpho、Smart3D PhotoScan、Altizure 等。Bentley ContextCapture(原 Smart3D, 以下简称 CC)是一套实景三维自动建模系统。它可以自动创建真实的三维模型,自动化程度非常高,是目前市场上用的比较多的软件。此外它还具有高兼容性,能对各种对象各种数据源进行精确无缝重建。CC 有两个版本,一个普通版 ContextCapture,一个中心版 Context-Capture Center,后者可以进行集群处理,也就是在主机上能够同时分配多个任务节点给副机同时并行计算,因此计算效率大大提高。本研究采用的就是中心版本。通过多台计算机建立集群的方式,同时高效地处理数据量较大的倾斜影像数据。

2 无人机倾斜摄影三维实景建模流程

2.1 技术流程

本文具体的校园三维实景建模的技术流程如图 1。

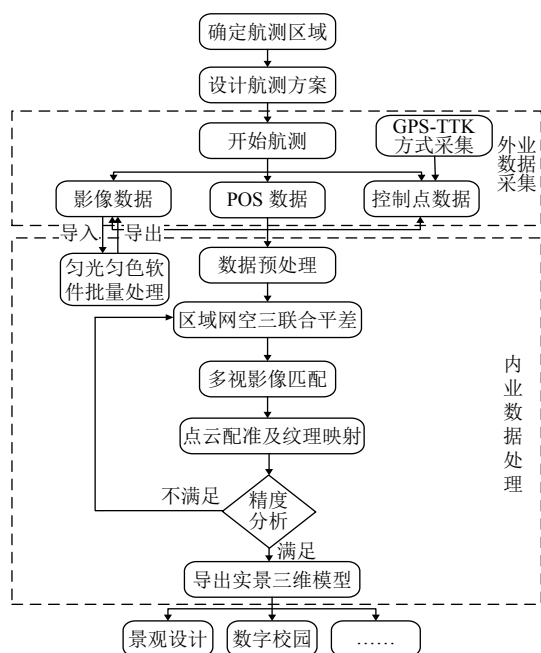


图 1 校园三维实景建模的技术流程

整个三维实景建模的流程主要分为外业数据采集和内业数据处理两个部分。主要的设计思路:外业数据采集主要是根据航测区域概况制定航测技术方案来完成。采集的外业数据包括影像数据、POS 数据、控制点数据。通过该技术采集带的外业数据也称倾斜数据。倾斜数据是带有空间位置信息的可量测影像数据,通过

内业处理软件处理能同时输出 DSM、TDOM、DOM、DLG 等多种成果^[16]。内业数据处理主要是利用 CC 对外业采集到的数据进行处理。主要步骤包括数据预处理、空中三角测量、多视影像密集匹配、构建 TIN 三角网、自动纹理映射、生产三维实景模型等。然后对生产的三维实景模型进行精度分析,满足精度要求的就是所需要的三维实景模型,否则的话继续数据预处理,再提交空中三角测量直到满足所需要的精度为止。为了达到精度要求,实验过程中通过布设较多控制点,分区航测,使用较高的航向和旁向重叠度来提高模型精度。

2.2 航测区域概况

阳光学院马尾校区坐落于福建省福州市马尾区卧龙山上,位于东经 119°37',北纬 25°29',学校占地面积约为 1 km²,建筑面积 37 万平方米。测区以校园建筑为主,由于校园坐落于山上地形起伏较大,最高点与最低点的落差在 180 m 左右。对于地形起伏较大的地貌,如用传统的人工测图,外业的工作量相当大,并且有好多地段存在安全隐患,人员和仪器根本无法到达;然而普通航测法又很难达到大比例尺地形图精度要求,因此考虑采用无人机倾斜摄影测量技术。

2.3 外业数据的采集

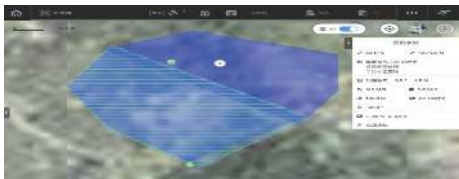
本次选取的测区范围约为 1 km²,地形起伏较大。针对航测区域的大小、地形等特点,本文采用多旋翼大疆经纬系列无人机 M600Pro (一台六旋翼的无人机)为飞行平台,云眼系列 APS-130 五拼相机(半画幅)为多镜头倾斜传感器。表 1 为相关具体参数。

为了提高模型的精度且不影响成果的质量,本研究对区域进行分块,分成南北两块。航测规划软件此次我采用大疆自主开发的 DJI GS Pro。具体无人机航线规划如图 2 所示。

通过航测规划软件 DJI GS Pro 连接无人机 M600Pro,在软件里面添加一个五镜头 APS-130 相机并设置对应参数。根据研究区域的环境等情况,此次航线规划设计的航带为 S 形线路。主要参数设置:航高 130 m,旁向重叠度 80%,航向重叠度 80%,拍照模式等距间隔拍照,拍照间隔 2 s,相机朝向平行于主航线,主航线角度 0°,边距 0 m。由软件计算得知飞行速度 8 m/s,分辨率 2 cm。此次航测南测区获得航片 4910 张(每个镜头 982 张),北测区获得航片 5555 张(每个镜头 1111 张),共航片 10465 张。

表 1 飞行平台和倾斜传感器的详细参数

飞行平台(六旋翼)	倾斜传感器
型号: Matrice600 Pro 飞机载重: 6 kg 产品重量: 9.5~10 kg 飞控系统: A3 Pro 飞行时间: 无负载约32 min 飞行速度: 最大飞行速度65 km/h(无风环境) 飞行高度: 最大飞行海拔高度2500 m 最大升降速度: 上升5 m/s, 下降3 m/s GPS模块: 3套IMU和GNSS模块 工作环境: -10 ℃至40 ℃	型号: 云眼系列APS-130五拼相机(半画幅) 单像素: 2430万 尺寸: 135 mm×135 mm×80 mm 重量: 800 g 类型: 索尼 正射镜头焦距: 25 mm (1个) 倾斜镜头焦距: 35 mm (4个) 传感器长/短边: 23.5 mm/15.6 mm 像片长/短边: 6000 pix/4000 pix 主距: 25 mm



(a) 北部测区



(b) 南部测区

图 2 无人机航线规划

本文 POS 数据是通过大疆 M600Pro 飞控导出来的, 由于大疆飞控自身的局限性, 需要我们对导出来的 POS 数据进行筛选. 剔除多余的 POS. 最终得到南测区 982 个 POS 数据, 北测区共 1111 个 POS, 共 2093 个 POS 数据.

本文控制点数据是采用 GPS-RTK 连接千寻 CORS 账号的量测方式完成采集. 首先在奥威互动地图 APP 中提前划分好测区范围, 并在其中布设控制点, 然后到实地寻找合适位置布设控制点. 根据测区的大小、地理位置、精度等因素, 共布设 61 个控制点 (38 个像控点, 23 个检查点). 坐标系采用 CGCS2000, 中央经度 120°, 3°分带, 高斯-克吕格投影. 像控点之间的布设间隔在 200 m 左右, 均匀分布于整个测区. 航测开始前, 通过铺设红白或红黄相间的标靶, 通过中海达 RTK 连接千寻定位系统完成像控点、检查点的采集. 控制点的测量方式如图 3 所示.



(a) 控制点测量分布



(b) 实际测量

图 3 控制点的测量方式

2.4 内业数据处理

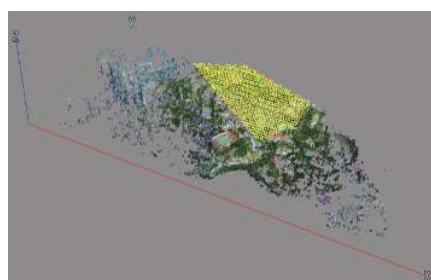
外业数据采集获取后, 首先需要对获取的数据进行预处理, 主要包括 POS 数据的筛选、照片的匀光匀色处理等. 然后再导入到 CC 进行内业数据处理.

通过 CC 软件对采集到的影像数据、POS 数据、控制点数据进行内业处理, 主要的处理流程包括添加影像照片、导入 POS 数据、刺像控点、空中三角测

量、多视影像密集匹配、构建 TIN 三角网、自动纹理映射、提交生产三维实景模型项目、提交生产 TDOM 及 DSM 项目等;像控点的选刺需要手动选择并输入实测坐标,像控点的残差越小,正射影像的精度越高,建立出来的三维实景模型质量越高。分成南北两个区域的空三结果如图 4 所示,合并后整个测区空三加密计算结果如图 5 所示。



(a) 北部区域



(b) 南部区域

图 4 南北两个区域的空三结果

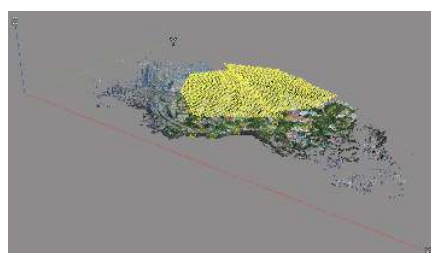


图 5 合并后整个测区的空三结果

2.5 项目成果

通过 CC 软件对采集到的数据完成处理之后,最终生成了三维实景模型。校园的部分三维实景模型如图 6 所示。

在生成三维实景模型后,对空三后的数据重新提交新的项目,生成许多格式为 TIFF/GeoTIFF 的文件,将生成的文件导入 ARCGIS 中,此处使用 ArcGIS10.5 中的“镶嵌至栅格”功能进行拼接。生成的 TDOM 和 DSM 如图 7、图 8 所示。



图 6 校园的部分三维实景模型



图 7 测区的部分 TDOM

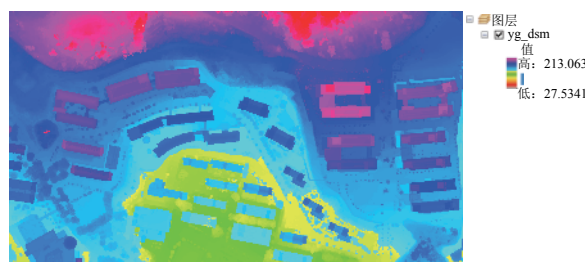


图 8 测区的部分 DSM

2.6 三维模型精度分析

为了检验无人机倾斜摄影测量的三维模型成果精度,利用航测之前采集到布设在测区分布均匀检查点,与生成三维模型中相对应位置的点进行对比,从而完成该模型的精度评定。表 2 是同位置三维模型采集点与检查点的对比。

利用外业采集的检查点坐标(作为真值)与三维模型中对应位置的坐标(作为观测值)通过下列中误差计算公式得到坐标中误差如下:

$$\begin{cases} Dx = \sqrt{\frac{1}{23} \sum_{i=0}^{22} \Delta x_i^2} \approx 0.0303 \text{ m} \\ Dy = \sqrt{\frac{1}{23} \sum_{i=0}^{22} \Delta y_i^2} \approx 0.0306 \text{ m} \\ Dxy = \sqrt{Dx^2 + Dy^2} \approx 0.0431 \text{ m} \\ Dz = \sqrt{\frac{1}{23} \sum_{i=0}^{22} \Delta z_i^2} \approx 0.0288 \text{ m} \end{cases}$$

式中 D_x 、 D_y 表示 X、Y 方向的中误差; D_{xy} 表示平面位置中误差; D_z 表示高程中误差。

通过表 2 对三维实景模型上采集的 23 个检查点进行

行统计,经计算可知 X 方向、Y 方向的中误差分别约为 3.03 cm、3.06 cm。平面位置中误差约为 4.31 cm。高程中误差约为 2.88 cm。满足实际大比例尺 1:500 测量的需求。

表 2 同位置三维数字地面模型采集点与检查点对比表

点号	检查点的实测值			模型中检查点的坐标			真误差		
	x	y	z	x	y	z	$ \Delta x $	$ \Delta y $	$ \Delta z $
0	444661.456	2877543.031	102.063	444661.48	2877543.07	102.06	0.024	0.039	0.003
1	444728.871	2877580.621	98.124	444728.86	2877580.61	98.15	0.011	0.011	0.026
2	444477.747	2877651.694	101.693	444477.72	2877651.67	101.70	0.027	0.024	0.007
3	444310.275	2877726.975	102.757	444310.27	2877726.94	102.73	0.005	0.035	0.027
4	444280.391	2877641.032	104.749	444280.35	2877641.01	104.75	0.041	0.022	0.001
5	444297.896	2877531.175	87.253	444297.87	2877531.19	87.25	0.026	0.015	0.003
6	444163.359	2877486.976	92.877	444163.39	2877486.95	92.90	0.031	0.026	0.023
7	444105.657	2877556.872	92.823	444105.69	2877556.87	92.85	0.033	0.002	0.022
8	444173.399	2877650.809	113.921	444173.38	2877650.83	113.93	0.019	0.021	0.009
9	444092.462	2877754.423	115.276	444092.42	2877754.42	115.34	0.042	0.003	0.064
10	444143.547	2877849.877	139.499	444143.52	2877849.79	139.46	0.027	0.087	0.039
11	444237.015	2877908.872	140.591	444237.03	2877908.83	140.52	0.015	0.042	0.071
12	444385.853	2877921.056	131.162	444385.87	2877921.03	131.17	0.017	0.026	0.008
13	444345.843	2877817.76	109.838	444345.83	2877817.73	109.86	0.013	0.030	0.022
14	444621.243	2877559.579	102.491	444621.27	2877559.61	102.49	0.027	0.031	0.001
15	444603.811	2877637.762	117.179	444603.77	2877637.76	117.17	0.041	0.002	0.009
16	444489.440	2877759.452	122.839	444489.38	2877759.42	122.81	0.060	0.032	0.029
17	444586.756	2877759.336	138.408	444586.79	2877759.31	138.41	0.034	0.026	0.002
18	444697.278	2877866.878	150.606	444697.25	2877866.85	150.58	0.028	0.028	0.026
19	444512.607	2877894.48	158.585	444512.63	2877894.47	158.61	0.023	0.010	0.025
20	444590.205	2877950.634	163.776	444590.22	2877950.61	163.77	0.015	0.024	0.006
21	444686.251	2877759.005	138.521	444686.30	2877759.02	138.53	0.049	0.015	0.009
22	444209.916	2877578.571	96.315	444209.89	2877578.54	96.37	0.026	0.031	0.055

3 结论与展望

该研究首先利用大疆 M600Pro 搭载五镜头相机采集获取了阳光学院校区的影像数据,通过 GPS-RTK 连接 CORS 账号的量测方式完成了像控点和检查点的采集,再结合 M600Pro 飞控导出的 POS 数据,利用这些数据经过 CC 软件处理之后,获得了该区域高分辨率的三维实景模型、TDOM、DSM。表明了无人机倾斜摄影技术在复杂地形条件下构建三维实景模型具有可行性,此外通过模型的精度分析,得到了三维实景模型的平面位置和高程中误差均小于 5 cm,满足大比例尺 1:500 的实际测量需求。为后续三维模型的二次开发提供了数据支持。但是该研究通过增加像控点来提高三维模型的精度,还存在相当的局限性。控制点多的话误差也会积累,不一定能提高模型精度。在实际的生产处理过程中,受无人机等设备、大气环境及软件算法等因素,无人机的飞行姿态,照片的质量等都会影响模型的精度。此外得到的三维实景模型还比较粗糙,对于遮

挡比较严重的地方没有进一步精细化。希望在以后的学习过程中,可以进一步对模型的精细化、单体化、多元数据融合及三维模型的二次开发进行更深层次的研究。

参考文献

- 丁志广,严新生,陈辉光. 无人机倾斜摄影用于江门市快速三维建模的探讨. 城市勘测, 2016, (4): 72–78. [doi: 10.3969/j.issn.1672-8262.2016.04.016]
- 陈优良,周亦明,兰小机,等. 基于无人机倾斜摄影的校园三维模型构建. 江西理工大学学报, 2019, 40(3): 14–21.
- 谭仁春,姚岚. 城市三维快速建模方法探讨. 测绘科学, 2015, 40(5): 136–138.
- 田野,向宇,高峰,等. 利用 Pictometry 倾斜摄影技术进行全自动快速三维实景城市生产——以常州市三维实景城市生产为例. 测绘通报, 2013, (2): 59–62, 66.
- 徐思奇,黄先锋,张帆,等. 倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用. 测绘通报, 2018, (2): 111–115.
- 杨国东,王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望. 测绘与空

- 间地理信息, 2016, 39(1): 13–15, 18. [doi: [10.3969/j.issn.1672-5867.2016.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5867.2016.01.004)]
- 7 Rau JY, Chu CY. Photo-realistic 3D mapping from aerial oblique imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science-ISPRS Archives*, 2010, 38(2): 110–115.
- 8 Nils K. Oblique aerial photograph: A status review. *Photogrammetric Week*, 2009, 20(5): 119–125.
- 9 闫利, 费亮, 叶志云, 等. 大范围倾斜多视影像连接点自动提取的区域网平差法. *测绘学报*, 2016, 45(3): 310–317, 338. [doi: [10.11947/j.AGCS.2016.20140673](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2016.20140673)]
- 10 马晨, 杨辽, 池梦群, 等. 非量测相机倾斜航空影像空三加密精度评价. *遥感信息*, 2015, 30(6): 71–75. [doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2015.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2015.06.014)]
- 11 孙宏伟. 基于倾斜摄影测量技术的三维数字城市建模. *现代测绘*, 2014, 37(1): 18–21. [doi: [10.3969/j.issn.1672-4097.2014.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4097.2014.01.006)]
- 12 Stöcker C, Eltner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry—A case study from Andalusia, Spain. *CATENA*, 2015, 132: 1–11. [doi: [10.1016/j.catena.2015.04.004](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004)]
- 13 Sun TW, Xu ZH, Yuan JY, *et al.* Virtual experiencing and pricing of room views based on BIM and oblique photogrammetry. *Procedia Engineering*, 2017, 196: 1122–1129. [doi: [10.1016/j.proeng.2017.08.071](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.071)]
- 14 孙少楠, 张瑞, 于景波, 等. 倾斜摄影技术与 BIM 技术结合在水利工程地形处理中的研究. *中州大学学报*, 2018, 35(6): 100–105, 127.
- 15 姚国标. 倾斜影像匹配关键算法及应用研究. *测绘学报*, 2015, 44(3): 354. [doi: [10.11947/j.AGCS.2015.20140548](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2015.20140548)]
- 16 顾广杰, 张坤鹏, 刘志超, 等. 浅谈无人机倾斜摄影测量技术标准. *测绘通报*, 2017, (S1): 210–213.