

基于无人机自标定的表面流场测量方法

陈 诚¹, 王 新¹, 李子阳¹, 徐 磊², 高 柱³

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 南通大学交通与土木工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 针对无人机图像标定及配准等关键技术问题, 提出了一种基于无人机自标定的表面流场测量方法。该方法基于运动恢复结构(SFM)三维重建技术完成无人机图像自标定, 采用加速稳健特征变换(SURF)方法对无人机图像进行配准。将该方法应用于南京市三汊河口闸下游表面流场测量, 结果表明, 基于SFM的三维重建精度可以满足自标定的要求, 不需要另外设置地面控制点对无人机图像进行标定, 简化无人机标定过程, SURF方法可有效地消除无人机位置飘移对表面流场测量结果的影响。

关键词: 无人机; 表面流场; 三维重建; 自标定; 图像配准; SFM技术; SURF方法

中图分类号: TV123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)04-0039-04

Surface flow field measurement method based on UAV self-calibration//CHEN Cheng¹, WANG Xin¹, LI Ziyang¹, XU Lei², GAO Zhu³(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Aiming at the key technical problems of unmanned aerial vehicle (UAV) image calibration and registration, a surface flow field measurement method based on UAV self-calibration is proposed, which is based on structure from motion (SFM) 3D reconstruction technology to complete the UAV image self-calibration and speed-up robust features (SURF) method for UAV image registration. The method was applied to measure the surface flow field downstream of the Sancha River Estuary Sluice in Nanjing City. The results show that the accuracy of the 3D reconstruction based on SFM can meet the requirements of self-calibration, and there is no need to set ground control points to calibrate the UAV images, which simplifies the UAV calibration process. SURF method can effectively eliminate the influence of UAV position drift on the surface flow field measurement results.

Key words: UAV; surface flow field; 3D reconstruction; self-calibration; image registration; SFM technology; SURF method

流速数据是水利工程建设和河流管理的基础数据, 表面流场测量对于获取复杂水流运动信息至关重要, 可为开展水沙运动基本理论研究及数值模拟验证提供数据支撑, 对于河道整治、防洪减灾、水环境治理等都具有重要意义。

流速仪作为常见的测流仪器被广泛应用于江河、湖泊、渠道、水库、径流实验站等, 其中以转子式流速仪的使用最为普遍, 目前仍是国内外测流的常用仪器, 也常作为其他流速测量仪器的比测基

准^[1]。但转子流速仪存在以下缺点: 长期的机械转动使得设备容易损坏; 设备需要定期校准, 费用比较高; 对环境的要求比较高, 一旦有杂物缠绕, 设备就无法使用, 精度相对比较差; 另外使用过程也相对复杂。声学多普勒流速仪 (acoustic Doppler velocimetry, ADV) 可用于流量小、河道窄的山区小型河流中流速测量, 测得二维或三维流速^[2]。声学多普勒流速剖面仪 (acoustic Doppler current profilers, ADCP) 是目前较为先进的流速测量方

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0405703); 国家自然科学基金 (51779151); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y220005); 南通市科技计划 (JC2018143)

作者简介: 陈诚 (1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事智慧水利及智能航运研究。E-mail: cchen@nhri.cn

通信作者: 高柱 (1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事交通工程及水利工程研究。E-mail: zhu.gao@outlook.com

法^[3],能较好地实现对河流或渠道中水流流速的实时连续测量。其特点是能够测量不同水层的三维流速和流向,即测出河流的流速剖面,具有测验历时短、精度高、资料完整丰富的特点,适合于流态复杂条件下的测验。雷达流速仪利用雷达多普勒效应实现流速测量^[4-5],其精度主要受测频精度和波浪两个因素影响。声学及雷达式测流仪器在高洪期河道水流监测中存在测验适宜性弱,精度稳定性低,施测安全性差及测量结果不直观等问题。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 是一种定量的流动显示技术,广泛应用于水沙运动量测^[6-8]。20 世纪 90 年代, Fujita 等^[9]首先提出了将 PIV 技术改进用于大尺度水面流场观测的设想,并成功将其用于洪水流量测量,该技术被称为大尺度粒子图像测速 (large-scale particle image velocimetry, LSPIV),不仅被用于实验室条件下明渠紊动特性和时均特性的研究,其在高洪期及浅水低流速等极端现场条件下河道水流监测中也得到了广泛应用^[10-13]。LSPIV 能够以植物碎片、泡沫等天然水面漂浮物为水流示踪物,以自然光代替激光片光,以普通数码相机或视频摄像机代替高帧频工业相机,简化硬件系统的配置。由于 LSPIV 通常是在河岸上以一个倾斜于待测水面的视角对大面积区域进行拍摄,需要测量出地面控制点的三维坐标和引入一个图像正射校正环节以消除图像透视畸变并实现流场定标,标定过程较为复杂^[14]。

近年来,无人机技术得到了快速发展,由于其具备机动性好、易操作、维护成本低、不受安装条件限制等优点,在水文监测领域具有实际应用价值。Tauro 等^[15-16]开展了应用无人机测量河流表面流场的探索研究,通过与传统 LSPIV 方法的对比试验,验证了无人机测量流场的可行性和优势。但在测量过程中需要通过地面控制点标定世界坐标与无人机图像坐标的映射关系,在极端洪水等恶劣条件下常难以布置地面控制点,严重束缚了其适用范围。此外,与传统的 LSPIV 图像测速不同,无人机测量过程中由于风速影响及自身稳定性等原因常会产生飘移误差,需要通过图像配准进行消除。

为此,本文通过研究基于无人机自标定的表面流场测量方法,简化标定过程,并消除无人机飘移对测量结果的影响。

1 无人机图像系统

无人机设备采用大疆 Mavic 2 Pro (图 1),该无人机配备了全新的哈苏 L1D-20c 相机,1 英寸 2000 万像素 CMOS 传感器, $f/2.8 \sim f/11$ 可调光圈,在

高光和低光环境下都能提供出色质量的图像。该无人机支持 1080p 高清图像传输,控制距离可达 8 km,最长飞行时间可达 31 min,最大续航里程可达 18 km。



图 1 大疆 Mavic 2 Pro 无人机

2 无人机自标定

为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系,必须建立相机成像的几何模型,这些几何模型参数就是相机参数,包括内参数和外参数。内参数主要包括焦距、像素大小、畸变参数等,可通过标准标定板在实验室内完成。外参数主要包括相机的位置、旋转方向等,通常需要通过精确测量地面控制点三维坐标完成。对于表面流场测量,可以将水面近似为一个平面,只要通过三维重建,在水面上确定 4 个点的平面坐标,就可通过透视投影变换标定出无人机图像坐标与世界坐标的映射关系^[17]。

2.1 三维重建

无人机三维重建基于运动恢复结构 (structure from motion, SFM) 技术,该技术是从一系列包含视觉运动信息的多幅二维图像序列中恢复三维结构的技术^[18]。SFM 的基本原理是在相机模型的基础上,通过图像的特征点匹配,建立不同视角拍摄图像的场景点之间的对应关系;再根据多视图几何原理,优化计算得到这些场景点的三维坐标和相机的位姿参数,从而生成三维点云数据。

通过在智能手机上使用 Pix4Dcapture 应用程序进行无人机遥控,设置飞行路径、飞行高度、相机角度、重叠度、飞行速度等控制参数。采用无人机和 SFM 技术对位于南京外秦淮河入江口的三汊河口闸及河岸进行三维重建,图 2 中红色点为无人机拍照位置,红色点覆盖区域为三维重建区域,飞行高度为 30 m,图像重叠度为 80%。

在完成无人机图像采集后,通过 Pix4Dmapper 软件进行 SFM 三维重建,创建三维点云数据。图 3 为 SFM 恢复相机位姿参数,包括相机拍摄位置及角度。图 4 为通过无人机图像生成的三维点云数据,可以看出,非水域部分有完整精细的三维点云数据,而水域部分没有点云数据,这是因为水流表面是流动的,SFM 只能对静止物体进行三维重建。

表 1 点云数据精度验证

间距	标准值/m	测量值/m	绝对误差/m	相对误差/%
L_1	5.000	4.993	-0.007	-0.15
L_2	5.000	4.969	-0.031	-0.62
L_3	5.000	4.994	-0.006	-0.12
L_4	5.000	4.988	-0.012	-0.23



图 2 三维重建区域

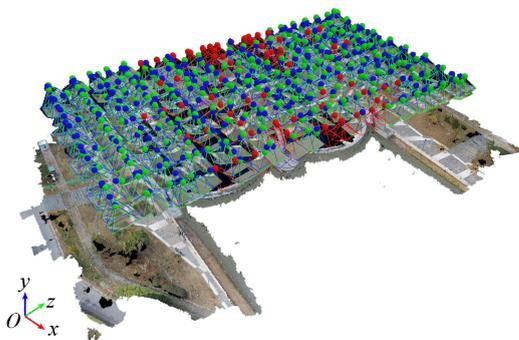


图 3 SFM 恢复相机位姿参数



图 4 三维点云数据

2.2 精度验证

为了验证三维重建点云数据的精度,在河岸平坦区域设置了 5 个地面控制点(图 5),相邻控制点之间的距离 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 均为 5 m。通过提取点云数据三维坐标,计算相邻点间距,与标准值进行对比分析(表 1)。由表 1 可见,最大绝对误差为 -0.031 m,最大相对误差为 -0.62% ,表明该重建精度可以满足自标定的要求,不需要另外设置地面控制点对无人机图像进行标定,大幅简化无人机标定过程。



图 5 地面控制点

3 无人机图像配准

由于风荷载和自身稳定性等原因,悬停无人机难以保持完全固定的位置而发生飘移,无人机相机位置的变化可能会引入严重的测量偏差。无人机位置变化主要包括:①垂直移动,通常保持在几米之内,对测量结果造成较低的偏差;②水平平移,导致水面测量结果存在偏差,是最大的误差来源;③绕垂直轴旋转,这会导致图像上测量误差的均匀分布,因此特别难以量化和校正。

通过无人机拍摄河流视频图像,从中提取相邻两帧图像,经过无人机自动标定后,采用 PIV 互相关算法提取表面流场。如图 6 所示,未配准图像处理,在河岸也出现了流速分布,且各个方向的流速都存在,流速最大达到 0.3 m/s,这说明无人机在测量过程中发生了复杂的飘移,不只是单一的水平平移,对表面流场处理结果产生了影响。

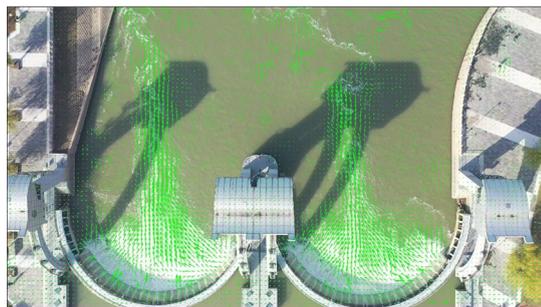


图 6 未配准表面流场

为了消除无人机飘移对表面流场测量结果的影响,必须把无人机位置配准到同一位置,采用加速稳健特征变换 (speeded-up robust features, SURF) 方法^[19]进行图像配准。SURF 方法基于与尺度不变特征变换 (scale invariant feature transform, SIFT) 方法相同的原理,SIFT 方法基于从两幅图像中检测“尺度不变特征”并进行特征点匹配,广泛应用于模式识别和图像配准。相较于 SIFT 方法,SURF 方法的计算速度更快,并且在复杂的图像变换进行特征检测方面,SURF 方法更加稳健。图 7 为通过 SURF 方法对图像进行配准后的表面流场,可以看出,河岸最大流速降低为 0.06 m/s,水闸附近流速约为 1.6 m/s,配准后无人机飘移导致测量结果的相对误差为 3.75% ,小于未配准时的相对误差 18.75% ,表明 SURF 方法有效地消除了无人机飘移对表面流场

测量结果的影响。



图7 配准后表面流场

4 结论

a. 基于 SFM 三维重建技术,自动获取无人机图像点对应的坐标信息,提出应用三维重建点云数据进行无人机自标定的方法,与以往的无人机测量表面流场的方法相比,该方法不需要另外设置地面控制点对无人机图像进行标定,可大幅简化无人机标定过程。

b. 采用 SURF 方法对无人机图像进行配准,现场试验表明,该方法可有效地消除无人机位置飘移对表面流场测量结果的影响。

参考文献:

- [1] 沈燕峰,陶悦. 河道转子式流速仪计算流速的正确适用[J]. 水利技术监督, 2018(1):137-145. (SHEN Yanfeng, TAO Yue. The correct application of the rotor current meter to calculate the velocity of the river [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2018(1):137-145. (in Chinese))
- [2] 崔旭. FLOW TRACKER 声学多普勒流速仪在山区小型河流中的运用[J]. 科技风, 2016(18):15-16. (CUI Xu. Application of flow tracker acoustic Doppler current meter in small rivers in mountainous areas [J]. Technology Wind, 2016(18):15-16. (in Chinese))
- [3] 程媛媛,金晨曦. ADCP 测流在巢湖流域水资源监测中的应用[J]. 水利信息化, 2019(4):47-50. (CHENG Yuanyuan, JIN Chenxi. Application of ADCP flow measurement in water resources monitoring on Chaohu Lake Basin [J]. Water Resources Informatization, 2019(4):47-50. (in Chinese))
- [4] 周冬生,宗军,蒋东进,等. 雷达流速仪测量精度关键技术研究[J]. 水文, 2018, 38(5):67-70. (ZHOU Dongsheng, ZONG Jun, JIANG Dongjin, et al. Core technology research on high precision for radar velocity meter [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5):67-70. (in Chinese))
- [5] 张琦. 雷达波流速仪在中小河流流量测验中的应用分析[J]. 黑龙江科学, 2017, 8(2):47-48. (ZHANG Qi. Application of radar wave current meter in flow test of

small and medium rivers [J]. Heilongjiang Science, 2017, 8(2):47-48. (in Chinese))

- [6] 罗朝林,陈若舟,吴华良. 改进的反距离权重法在 PIV 流场测量系统中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(增刊2):37-39. (LUO Zhaolin, CHEN Ruozhou, WU Hualiang. Application of improved inverse distance weight method in PIV flow field measurement system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(Sup2):37-39. (in Chinese))
- [7] 陈诚,蔡守允. 悬移质运动中水沙两相流的流场测量技术研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6):80-84. (CHEN Cheng, Cai Shouyun. Research review on measurement techniques for water-sediment two-phase flows in transport of suspended load [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6):80-84. (in Chinese))
- [8] 陈红,周国梁,闫静,等. 基于回归分析的表面流场粒子匹配算法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1):32-36. (CHEN Hong, ZHOU Guoliang, YAN Jing, et al. Study on particle matching algorithm for surface flow field based on regression analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):32-36. (in Chinese))
- [9] FUJITA I, MUSTE M, KRUGE R A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(3):397-414.
- [10] JODEAU M, HAUET A, PAQUIER A, et al. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19(2):117-127.
- [11] LE COZ J, HAUET A, PIERREFEU G, et al. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(1):42-52.
- [12] DOBSON D W, HOLLAND K T, CALANTONI J. Fast, large-scale, particle image velocimetry-based estimations of river surface velocity [J]. Computers & Geosciences, 2014, 70:35-43.
- [13] 张振,徐枫,王鑫,等. 河流水面成像测速研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7):1441-1448. (ZHANG Zhen, XU Feng, WANG Xin, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7):1441-1448. (in Chinese))
- [14] MUSTE M, FUJITA I, HAUET A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments [J]. Water Resources Research, 2008, 44(4):1-14.

(下转第 50 页)