



基于 LSPIV 的航道表面流场实时孪生方法

田一博¹, 刘振嘉², 梁 锴², 任伯浩¹, 韩 越², 李明伟¹

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 长江三峡—葛洲坝水利枢纽两坝间石牌弯道的河床地形复杂, 流量变化巨大, 表面碍航流态具有变化多, 分布广的特点, 对往来船只的通航造成了安全隐患。但现有的流场测量技术存在测量范围有限、受环境影响较大, 实时性不足等问题, 无法满足复杂航道表面流场测量的需求。针对上述问题, 进行了表面流场实时孪生方法研究, 采用 LSPIV 技术结合多视角摄像头的方法, 构建急弯航道环境下的表面流场实时孪生系统; 并在石牌弯道水域进行现场对比测试, 得到了表面水域的流场孪生数据。结果表明: 该方法能够实时、准确地还原实际航道表面的水流状态, 与无人机雷达测速设备测量值吻合度较好, 为枢纽通航安全提供了技术支撑。

关键词: 流场测量; LSPIV; 多视角摄像头; 实时孪生

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0203-08

Real-time twin method of waterway surface flow field based on LSPIV

TIAN Yibo¹, LIU Zhenjia², LIANG Kai², REN Bohao¹, HAN Yue², LI Mingwei¹

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150000, China; 2. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: The riverbed terrain of the Shipai bend between the two dams of the Three Gorges and Gezhouba Water Conservancy Hub on the Yangtze River is complex, with significant changes in flow rate and a wide distribution of surface obstruction flow patterns, posing safety hazards to the navigation of ships. However, the existing problems of flow field measurement technology are limited measurement range, significant environmental impact, and insufficient real-time performance, which cannot meet the needs of complex channel surface flow field measurement. In response to the above issues, this article conducts research on real time twin method for surface flow fields. LSPIV technology combined with multi view cameras is used to construct a real-time twinning system for surface flow fields in sharp curved waterway environments. And on-site comparative tests are conducted in the curved water area of Shipai, obtaining twin data of the flow field in the surface water area. The results show that this method can accurately and real-time restore the actual water flow state on the surface of the waterway, and has a good agreement with the measurement values of the unmanned aerial vehicle radar speed measurement equipment, providing technical support for the safety of hub navigation.

Keywords: flow field measurement; LSPIV; multiview camera; real-time twin

长江三峡—葛洲坝水利枢纽两坝间航道长约 38 km, 位于长江西陵峡河段; 石牌弯道是两坝间典型碍航河段, 位于长江上游航道里程 22.5~23.8 km 处。汛期三峡大坝下泄流量达到 2.5 万 m³/s 以上时, 弯道下段的底层水流受大片岩盘顶冲, 水流条件复杂, 航行条件十分恶劣, 过往船舶通航安

全风险较大。因此需对其表面流场进行全面、实时的测量和孪生, 为防范复杂流态导致的通航安全风险、提高枢纽通过能力提供技术支撑。

在表面流场测量领域, 非接触式流速测量仪^[1-2]如声学多普勒流速仪(acoustic Doppler velocimeter, ADV)能够提供高精度的流速和流向数据, 但测

收稿日期: 2024-08-15

作者简介: 田一博(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智慧水利。

量范围有限,设备成本较高,无法在大规模测量中应用,而无人机测量方法^[3]具有快速高效和机动性强的特点,可以覆盖大面积区域并获取高分辨率的数据,但受环境因素影响较大,且续航能力有限,影响数据采集的连续性和完整性,较为成熟的 ADCP (声学多普勒流速剖面仪, acoustic Doppler current profiler) 流速测量方法^[4]对于大范围的流场测量有较好的应用效果,对于较为精确的、实时的流场测量需求则难以满足。

为了克服上述技术的局限性,大尺度粒子图像测速技术 (large scale particle image velocimetry, LSPIV)^[5]逐渐受到学术界的广泛关注。Lewis 等^[6]采用 LSPIV 技术研究河流汇流问题,结果表明可以精确求解汇流过程的表面二维流场分布,与 ADV 测量误差在 1~3 cm/s。Sun 等^[7]将 LSPIV 应用于小型不规则河流的流量测验,并且通过 ADCP 的实测数据计算该河流的流量修正系数。廖敏涵等^[8]通过无人机遥感结合 LSPIV 技术,对山区中小河流表面流场进行测量,结果表明无人机遥感获取的流速与传统方法接近。

随着成像技术的发展,LSPIV 技术已被广泛应用于河流、海洋等不同水体的流速测量中^[9-10],然而 LSPIV 技术在实时测量方面,尤其是针对急弯航道快速变化的流场环境中,如何快速、准确地处理和分析大量图像数据,以实现高效、准确的流速测量仍是一个挑战。此外,在高流速或光照条件不理想的自然环境中,图像的质量可能会受到影响,进而影响 LSPIV 的测量精度,而且 LSPIV 技术依赖示踪粒子以追踪流场,但单个摄像头对天然示踪粒子的捕获容错率较低。针对这些不足,本文提出了一种多视角下基于 LSPIV 的航道表面流场实时孪生方法,并对石碑弯道的表面流场进行实时孪生研究,建立实时孪生系统,

为实际船舶航行和通航管控提供数据支撑。

1 基于 LSPIV 的表面流场孪生方法

LSPIV 是由粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV)^[11]衍生出来一种非侵入式瞬时测量计算全局流场的技术,主要用于测量和计算大面积水体的全局流场。利用泡沫、水流波纹和漂浮物等天然颗粒作为示踪粒子,记录示踪粒子的图像序列,并通过分析这些粒子的位置变化计算流体速度场,计算公式为:

$$V_{el} = D / (\lambda_f \Delta t) \quad (1)$$

式中: D 为位移场 (dx, dy), pix; V_{el} 为速度场 (u, v), m/s; λ_f 为图像空间分辨率, pix/m。

基于 LSPIV 算法理论,利用数字图像处理技术,在目标水域内识别具有一定规律(扫湾水、泡水、漩水等)的示踪粒子速度场,能够实时采集并分析目标航道的表面流场数据,实现航道表面流场的实时孪生。

1.1 原始图像数据采集方法

从航道的实际测量环境出发,为了稳定、清晰地获取航道表面图像数据,采用三台挂壁式球型摄像头(图 1、表 1)实时同步采集目标航道的图像数据,通过在线视频流对采集的图像数据进行传输和保存。

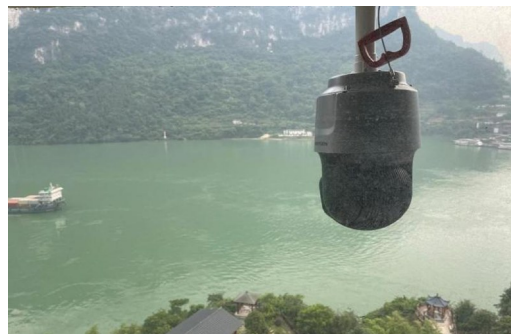


图 1 球型摄像头

Fig. 1 Spherical camera

表 1 球型摄像头相关技术参数

Tab. 1 Technical parameters of spherical camera

型号	焦距/mm	变倍	拍摄频率	快门/s	夜视性能	录像分辨率	转动范围
iDS-2DF8C84515XS	7.1~320.0	45 倍光学变倍和 16 倍数字变倍	25 fps	1/1~1/30 000	星光级超 低照度	H. 265, 4K; 3 840×2 160	俯仰: -20°~90°; 平移: 360°

1.2 图像预处理方法

为了使图像特征提取和特征点匹配顺利地进行, 采取一系列方法对采集的航道表面图像数据进行预处理。其中, 针对采集图像亮度波动、噪点密集等原因导致的图像数据局部细节失真, 采用灰度化调整、对比度调整、伽玛校正和二值化等方法对图像进行预处理, 同时将复杂图像数据转变为易于提取特征的一维数据。

由于摄像镜头本身存在径向畸变和切向畸变, 使用基于棋盘格的标定算法计算摄像头的内参和外参, 对摄像头进行标定, 消除摄像头的光学畸变。同时由于摄像头轴向和水体表面呈一定倾角, 导致拍摄图像存在透视畸变, 采用基于地面控制点的方法对图像进行正向校正, 见式(2)、(3), 将视角转换为垂直水平面向下, 统一图像的物理分辨率。

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (2)$$

$$y = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (3)$$

式中: $A_1 \sim A_3$ 、 $B_1 \sim B_3$ 、 $C_1 \sim C_3$ 为投影系数, X 、 Y 、 Z 为控制点的地面坐标, x 、 y 为校正后算法内的坐标。

将地面控制点在 2 个坐标系中的位置信息带入转换公式中, 确定 11 个投影坐标系数, 从而完成图像的正向校正, 统一图像的物理分辨率。

1.3 图像特征提取和匹配方法

针对图像数据特征复杂、数据量庞大的特点, 为保证特征提取过程的稳健和高效, 采用 SURF (加速稳健特征, speeded up robust features) 算法^[12]对 3 个摄像头采集的图像数据进行特征提取, 采用互相关算法^[13]进行特征点的匹配, 使多视角下的图像位置特征点得到精准匹配。SURF 算法通过 Hessian 矩阵在尺度空间中寻找局部极值点, 从而提取具有旋转不变性和尺度不变性的特征点, 通过编码特征点周围的局部图像信息生成具备高区分度和鲁棒性的特征描述子, 可以有效提高后续的特征点匹配的计算效率和精度。通过计算 Hessian 矩阵的行列式值, 可以在尺度空间中找到局部极值点, 即特征点。图像中 Hessian 矩阵的定

义为:

$$H(x, y, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $L_{xx}(x, y, \sigma)$ 为图像 I 在 x 方向上的二阶导数与高斯函数的卷积结果; $L_{xy}(x, y, \sigma)$ 为图像 I 在 x 方向和 y 方向上的二阶导数与高斯函数的卷积结果; $L_{yx}(x, y, \sigma)$ 为图像 I 在 y 方向和 x 方向上的二阶导数与高斯函数的卷积结果; $L_{yy}(x, y, \sigma)$ 为图像 I 在 y 方向上的二阶导数与高斯函数的卷积结果。

互相关算法通过计算特征描述子之间的相关性来匹配特征点对。对于 2 个特征描述子 d_1 和 d_2 , 互相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{1i} - \bar{d}_1)(d_{2i} - \bar{d}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{1i} - \bar{d}_1)^2 \sum_{i=1}^n (d_{2i} - \bar{d}_2)^2}} \quad (5)$$

式中: d_{1i} 和 d_{2i} 分别为 2 个特征描述子的第 i 个元素, $\bar{d}_1$ 和 $\bar{d}_2$ 分别为 2 个描述子的平均值。根据计算得到的互相关系数, 为每个特征点找到最相似的匹配点, 并设置阈值减少匹配误差。

1.4 流场的计算和可视化方法

如图 2 所示, 在航道表面流场实时孪生方法中, 导入每个摄像头采集的图像数据样本, 根据实际流场的精度要求, 对图像划分出一定密度的计算网格。通过相邻图像同位置的网格, 对比质点位置, 获取每个网格质点位移, 并进行平均化处理, 计算位移矢量。然后根据相邻图像的时间间隔与位移矢量, 计算得到每个网格的平均流速; 接着通过遍历所有图像, 就可以得到某一时段内目标水域的速度矢量数据, 使用最小二乘法^[14]对 3 个摄像头采集并初步计算的速度矢量数据进行融合。设某一点处单个摄像头采集到的速度为 a_i , 用 $a_{i,x}$ 和 $a_{i,y}$ 分别表示其在 x 和 y 方向的分量, 其中 i 表示第 i 个摄像头, A 表示融合后的合速度, 用 A_x 和 A_y 分别表示其在 x 和 y 方向的分量。 a_i 与 A 的方差可表示为:

$$S_{ME} = \sum_i^3 \left(\frac{a_i A}{|a_i|} - |a_i| \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{其中: } A = \sum_i^3 a_i \quad (7)$$

$$a_i = (a_{i,x}, a_{i,y}) \quad (8)$$

$$A = (A_x, A_y) \quad (9)$$

结合式(6)~(9), 令 $S_{ME}=0$, 得到:

$$2A_x \sum_i^3 \left(\frac{a_{i,x}^2}{|a_i|^2} \right) + A_y \sum_i^3 \left(\frac{2a_{i,x}a_{i,y}}{|a_i|^2} \right) + \sum_i^3 (-2a_{i,x}) = 0 \quad (10)$$

$$2A_y \sum_i^3 \left(\frac{a_{i,y}^2}{|a_i|^2} \right) + A_x \sum_i^3 \left(\frac{2a_{i,x}a_{i,y}}{|a_i|^2} \right) + \sum_i^3 (-2a_{i,y}) = 0 \quad (11)$$

联立求解式(10)与(11)可得到融合后的速度 A_x 与 A_y 。

最后使用 OpenPIV 库函数, 结合可视化引擎, 生成目标水域的可视化流场。

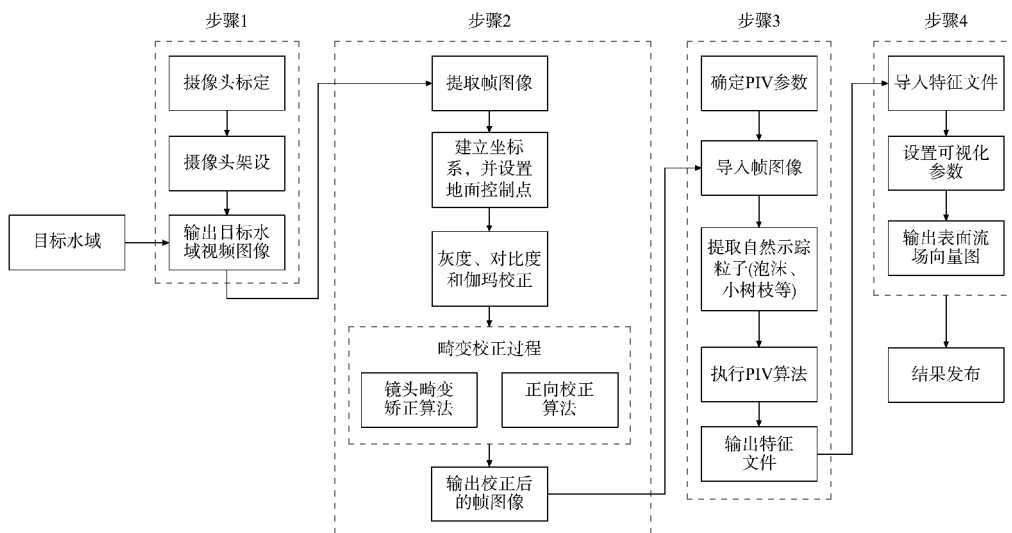


图 2 方法流程
Fig. 2 Method flow

1.5 表面流场孪生系统构建

如图 3 所示, 根据所提出的表面流场孪生方法, 建立包括多个高清摄像头、计算主机及结果发布终端的表面流场孪生系统, 实现了对目标水域的实时流速测量、高精度流场可视化、数据存储与分析、环境适应性强、远程监控与数据传输、以及用户友好的界面等功能。

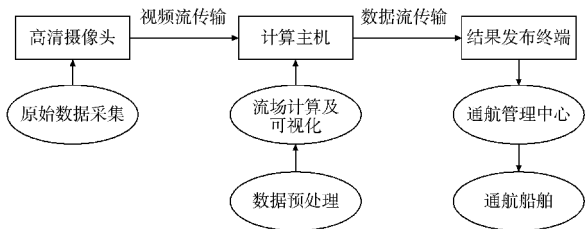


图 3 系统框架
Fig. 3 System frame

2 实例分析

2.1 测试区域点位分布

测试区域设置于石碑弯道处, 并设 3 个观测

点, 测试期间水域的流量约 $2 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 。第 1 观测点位于河道凸岸侧的高点位置, 观测整个水域; 第 2 观测点位于弯道处的趸船顶部, 观测水域的具体细节; 第 3 观测点位于河道凹岸侧的灯塔顶部, 观测水域的具体细节。观测点位置如图 4 所示。

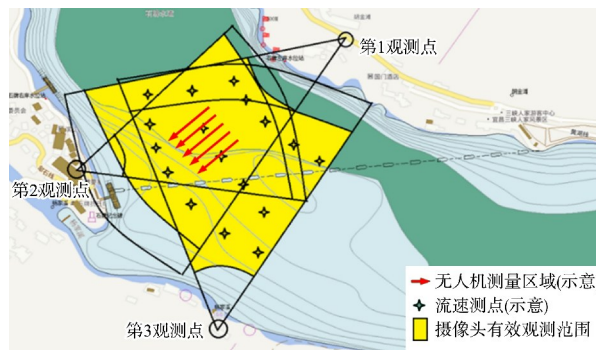


图 4 观测点位置
Fig. 4 Position of observation points

2.2 数据采集

2.2.1 表面流场实时孪生现场试验方案

为了对比验证所提出方法的测量精度, 采用高

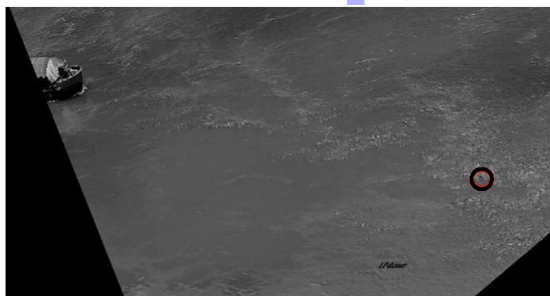
精度雷达无人机对目标水域进行逐点流速测量,在测量过程中同时采集测点位置信息和对应的时间信息。

采用棋盘格标定法对摄像头进行校准,减小镜头畸变,确保相机拍摄画面清晰。根据现场测试环境,确定包含典型流态的目标水域的位置,调整3个观测点摄像头的摄像角度,使得3个观测点的摄像头都能清晰地覆盖目标水域,并使摄像角度与水域的法向夹角尽量小。

固定摄像头的拍摄角度之后,在目标水域中均匀地选取6个地面控制点,用无人机的雷达记录各控制点的经纬度信息,建立地面控制点的世界坐标系,并分别在3个观测点的摄像头中记录无人机在图像中的位置信息,分别建立地面控制点的图像坐标系,将地面控制点在2个坐标系中的位置信息带入式(2)、(3)中,确定11个投影坐标系数,进而完成图像的正向校正。原始图像经过系统校正后输出的矫正图像如图5所示。



a) 原始影像



b) 矫正影像

注:图中标记处为画面中观测到的无人机位置。

图5 图像预处理对比

Fig. 5 Comparison before and after image preprocessing

在测量时,3个观测点的摄像头实时同步采集目标水域图像数据、储存画面和时间信息,并传输给云端,PC终端调用云端图像数据进行流场计算,将3个观测点摄像头计算得到的流场数据用最小二乘法进行数据融合,得到表面流场实时孪生测量值,并生成可视化流场数据图。

2.2.2 无人机测量方案

为了获得实测流速数据并进行对比验证,选用水面流速无人机测量方法对实际航道表面流速进行测量。在摄像头监控的水域内,依据现场的水流条件,选定既流速平稳又能被清晰拍摄的矩形测量区域。该矩形测量区域沿水流方向的长度为100 m,垂直于水流方向的长度为140 m。在沿水流方向每25 m划定一条测量航线,共计5条航线,每条航线20个测量点,共计100个测点。无人机根据航线进行流速测量,并记录测点位置信息、实时时间及测点处流速信息。无人机测速航线如图6所示。

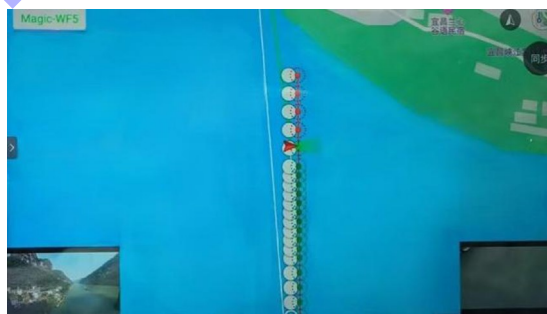


图6 无人机测速

Fig. 6 UAV speed measurement

2.3 数据处理及结果分析

部分时刻的表面流场计算结果如图7所示。图7a)为航道表面流速较大的时刻,河流的流向朝左上方,符合物理规律;图7b)为有船经过观测水域时的表面流场,发现船舶附近的流速显著增大;图7c)为航道比较平缓时的流场,流速指针较为稀疏,流速大小较为集中。

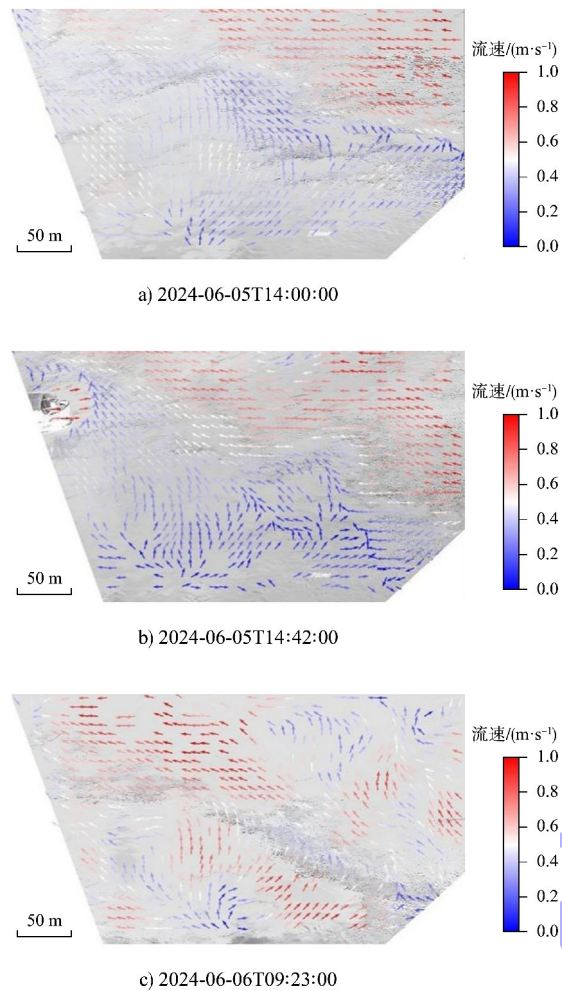


图 7 表面流场
Fig. 7 Surface flow field

将单摄像头测量数据、表面流场实时孪生系统测量数据与无人机实测的数据进行对比。其中，无人机测量水域流速时间跨度为 20 s，每隔 1 s 进行 1 次测量，共计 20 次。采用相对误差式(12)和均方根误差 S_{RME} 式(13)分别统计单摄像头测量数据、表面流场实时孪生系统测量数据与无人机实测流速数据的计算误差。

$$E_{\text{rr}} = \frac{|v - v_{\text{real}}|}{v_{\text{real}}} \times 100\% \tag{12}$$

$$S_{\text{REM}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^{\text{real}})^2} \tag{13}$$

式中： v 为系统测量的流速值， v_{real} 为无人机实测的流速值， x_i 为在第 i 个点位系统测量的流速值， x_i^{real} 为在第 i 个点位无人机实测的流速值， n 为测量点位的总个数。

测量过程中选取与无人机某一条测线的数据验证，发现单摄像头测量结果的误差较大，而表面流场实时孪生测量值与无人机测量的结果吻合度较高(表 2、图 8)。其中，由于航行船舶的干扰，使得部分计算出的流速较大(点位 5、7、11)；同时由于局部范围内，水面特征不显著，示踪物较少，导致计算的流速较小(点位 10、13)。

表 2 孪生系统测量值与无人机测量值对比
Tab. 2 Comparison between twin system measurements and UAV measurements

点位	单摄像头测量值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	孪生测量值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	无人机测量值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单摄像头 $E_{\text{rr}}/\%$	孪生 $E_{\text{rr}}/\%$	单摄像头 S_{RME}	孪生 S_{RME}
1	0.74	0.70	0.68	8.77	2.94		
2	0.63	0.73	0.79	-19.77	7.59		
3	0.52	0.56	0.58	-10.11	3.45		
4	0.75	0.72	0.66	13.72	9.09		
5	0.73	0.67	0.60	21.78	11.67		
6	0.74	0.70	0.66	11.98	6.06		
7	0.67	0.60	0.52	28.04	15.38		
8	0.69	0.68	0.65	5.69	4.62		
9	0.75	0.65	0.60	24.90	8.33		
10	0.50	0.59	0.66	-24.26	10.61		
11	0.53	0.46	0.41	28.05	12.20	0.059 2	0.045 5
12	0.52	0.47	0.43	19.78	9.30		
13	0.48	0.59	0.66	-26.56	10.61		
14	0.69	0.65	0.61	13.92	6.56		
15	0.69	0.68	0.67	3.70	1.49		
16	0.57	0.58	0.55	4.36	5.45		
17	0.45	0.43	0.42	6.09	2.38		
18	0.40	0.37	0.35	15.25	5.71		
19	0.57	0.52	0.51	12.14	1.96		
20	0.34	0.39	0.39	-12.12	0.00		

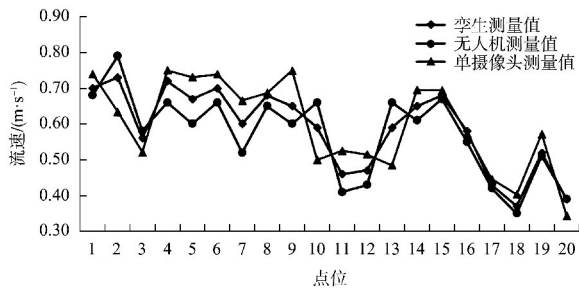


图8 孪生系统测量值与无人机测量值分布

Fig. 8 Distribution of measured values of twin system and UAV

3 方法的优缺点

采用LSPIV技术结合多视角摄像头进行流场测量具有显著的优势,同时也伴随着一些挑战和局限性。在复杂的流场环境中,单个摄像头对天然示踪粒子的捕获容错率较低,而多个摄像头从不同角度进行观测,可以更有效地利用有限的示踪粒子信息,并通过融合多个摄像头的数据,获得更高的空间分辨率,从而更清晰地捕捉到流场的细节,提高流场测量的精度。同时,增强数据的冗余性,即使部分摄像头数据受损,其余摄像头的数据仍可用于恢复流场信息,显著提升了测量的可靠性,而且采集的数据采用并行处理的方式,提高数据处理速度,增强实时监测能力,适用于快速变化的流场环境,如洪水监测和预警等场景。

本方法的局限性在于增加摄像头的数量使得硬件成本更高、数据处理更复杂,对计算资源提出更高的要求。此外,天然示踪粒子的不足可能影响测量结果的准确性。未来的研究可进一步优化多摄像头系统的部署策略、图像处理算法和数据融合技术,以提高其在各种应用场景中的性能和可靠性。

4 结论

1) 提出基于LSPIV技术的航道表面流场实时孪生方法,并通过现场试验的方式,与无人机雷达测速设备的测量值进行对比验证,发现两种方式测量值吻合度较好。

2) 基于提出的孪生方法,构建表面流场孪生

系统,实现从数据采集、数据分析到最终结果发布的全流程实时信息覆盖,对船舶安全通航具有重要的现实意义。

3) 当天然示踪粒子数量较少时,可能导致计算出的表面流场孪生结果精度下降,需要进一步研究以克服此技术难点。

参考文献:

- [1] 尹鑫昊,周艳,朱宁,等.基于二维激光多普勒测速仪测量低压流场速度[J].品牌与标准化,2024(2):188-190.
YIN X H, ZHOU Y, ZHU N, et al. Measurement of low-pressure flow velocity based on two-dimensional laser Doppler velocimeter [J]. Brand & standardization, 2024(2): 188-190.
- [2] 李文清,郭松青,张小娟,等.利用多普勒效应测量液体流速的研究[J].大学物理实验,2023,36(4):37-40.
LI W Q, GUO S Q, ZHANG X J, et al. Research on measuring liquid velocity by Doppler effect [J]. Physical experiment of college, 2023, 36(4): 37-40.
- [3] 刘望天,陈慧莎.基于无人机技术的航空水面流速法测流系统开发及应用研究[J].广东水利水电,2021(5):33-39.
LIU W T, CHEN H S. Research on development and application of air surface velocity measurement system based on UAV technology [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2021(5): 33-39.
- [4] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 45-49.
LIU Y X. Review on development of ADCP technology and its application [J]. Hydrographic surveying and charting, 2016, 36(2): 45-49.
- [5] FUJITA I, MUSTE M, KRUGER A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications [J]. Journal of hydraulic research, 1998, 36(3): 397-414.
- [6] LEWIS Q W, RHOADS B L. Resolving two-dimensional flow structure in rivers using large-scale particle image velocimetry: an example from a stream confluence [J]. Water resources research, 2015, 51(10): 7977-7994.
- [7] SUN X, SHIONO K, CHANDLER J H, et al. Discharge estimation in small irregular river using LSPIV [J].

- Proceedings of the institution of civil engineers - water management, 2010, 163(5): 247-254.
- [8] 廖敏涵, 刘九夫, 廖爱民, 等. 基于无人机遥感的山区中小河流表面流场测量[C]//中国地球物理学会. 2020 年中国地球科学联合学术年会论文集. 南京: 南京水利科学研究所, 2020: 737-740.
- LIAO M H, LIU J F, LIAO A M, et al. Surface flow field measurement of small and medium-sized rivers in mountainous areas based on UAV remote sensing [C]//Geophysical Society of China. Proceedings of the 2020 Joint Academic Annual Meeting of China's Geosciences . Nanjing: Nanjing Institute of Water Conservancy Science, 2020 : 737-740.
- [9] 曹列凯. 大尺度表面流场测量技术研发与应用[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- CAO L K. Development and application of large scale surface velocimetry [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [10] 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): 1441-1450.
- ZHANG Z, XU F, WANG X, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2015, 36(7): 1441-1450.
- [11] KEANE R D, ADRIAN R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images [J]. Applied scientific research, 1992, 49(3): 191-215.
- [12] 张锐娟, 张建奇, 杨翠. 基于 SURF 的图像配准方法研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 160-165.
- ZHANG R J, ZHANG J Q, YANG C. Image registration approach based on SURF [J]. Infrared and laser engineering, 2009, 38(1): 160-165.
- [13] 董安国. 图像匹配最大互相关快速算法[J]. 浙江万里学院学报, 2005, 18(4): 13-15.
- DONG A G. The fast algorithm of maximum cross-correlation algorithm for image match [J]. Journal of Zhejiang Wanli University, 2005, 18(4): 13-15.
- [14] TSUBAKI R. Multi-camera large-scale particle image velocimetry [C]// Proceedings of the 38th IAHR World Congress, Panama City: [s. n.], 2019.
- (本文编辑 赵娟)
- ~~~~~
- (上接第 193 页)
- [4] 刘庆强, 刘鹏云. 基于优先级经验回放的 SAC 强化学习算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(2): 192-199.
- LIU Q Q, LIU P Y. Soft actor critic reinforcement learning with prioritized experience replay [J]. Journal of Jilin University (information science edition), 2021, 39(2): 192-199.
- [5] BURDA Y, EDWARDS H, STORKEY A, et al. Exploration by random network distillation [C]//ICLR. Proceedings of Seventh International Conference on Learning Representations. Appleton: ICLR, 2019: 1-17.
- [6] 朱大鹏. 耙吸挖泥船的装舱建模与施工参数自主寻优研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- ZHU D P. Research on loading modeling and optimization of construction parameters for traveling suction hopper [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [7] BRAAKSMA J, BABUSKA R, KLAASSENS J B, et al. A computationally efficient model for predicting overflow mixture density in a hopper dredger [J]. Terra et aqua, 2007, 106: 16-25.
- [8] 韩胜明, 肖芳, 程纬森. 深度强化学习在自动驾驶系统中的应用综述[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 25-31.
- HAN S M, XIAO F, CHENG W S. Overview of the application of deep reinforcement learning in autonomous driving systems [J]. Journal of Xihua University (natural science edition), 2023, 42(4): 25-31.
- [9] HAARNOJA T, ZHOU A, HARTIKAINEN K, et al. Soft actor-critic algorithms and applications [J]. Arxiv preprint arxiv, 2018: 1812.05905.
- [10] BAO W, SU Z. DDPG-based control strategy for sedimentation process in mud of rake suction dredger [C]//IEEE. Proceedings of 2024 5th International Conference on Computer Engineering and Application. New York: IEEE, 2024: 1578-1581.
- (本文编辑 王璁)