

面向河湖监管的 无人机视频全景融合技术研究与应用

高睿^{1,2}, 范子武^{1,2}, 刘国庆^{1,2}, 洪磊^{1,2}, 王梓豪^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要:针对高空河湖监管中视角受限、广角畸变及复杂水面环境下配准不稳等问题,研究并实现了一种面向河湖监管的高空自由视角视频全景融合技术。首先针对广角镜头造成的几何失真,利用河岸线等天然几何特征进行自标定校正,为影像对齐奠定几何基础。其次,针对水面纹理稀疏导致的配准失效,采用ORB特征提取结合RANSAC算法剔除外点,通过求解最优单应性矩阵实现像素级精确配准。最后,为解决无人机姿态抖动引起的视频跳变及色差,引入动态配准机制并配合分层融合策略,实现了时空连贯、无缝的动态全景监测。在锦溪镇典型水乡的实验验证表明,该技术能显著提升巡河效率,为蓝藻识别与智慧管护提供了有效的数字化支撑。

关键词:多源视频融合; 无人机监测; 畸变矫正; 视频拼接; 河湖监管

中图分类号:TV213.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)06-0046-0006

Research and application of UAV video panoramic fusion technology for river and lake supervision

GAO Rui^{1,2}, FAN Ziwu^{1,2}, LIU Guoqing^{1,2}, HONG Lei^{1,2}, WANG Zihao^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of the Taihu Basin Water Treatment of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: To address the challenges in high-altitude river and lake supervision, such as limited field of view, severe wide-angle lens distortion, and unstable registration in complex water environments, a free-viewpoint panoramic video fusion technology for UAV-based monitoring is researched and implemented. First, to correct the geometric distortion caused by wide-angle UAV lenses, a self-calibration method utilizing natural geometric constraints—such as riverbank lines—is employed to establish an accurate foundation for image alignment. Second, to overcome registration failure in texture-sparse water surfaces, the ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) algorithm combined with RANSAC (Random Sample Consensus) is used to eliminate outliers and solve for the optimal homography matrix, achieving pixel-level precision. Finally, to eliminate video jitter and color differences caused by UAV attitude fluctuations and photometric differences, a dynamic registration mechanism and layered blending strategy are introduced to generate seamless, spatiotemporally coherent panoramic monitoring results.

收稿日期: 2026-03-14

基金项目: 重点研发计划(2024YFC3210800); 广西科技重大专项(桂科AA23062053); 南京水利科学研究所研究生学位论文基金(Yy125005)

作者简介: 高睿(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: 2017170689@qq.com

通信作者: 范子武(1970—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事洪灾风险分析、城市水力学、河湖治理、水利信息化等研究工作。E-mail: zwfan@nhri.cn

Experimental validation in the typical river-lake network of Jinxi Town demonstrates that the proposed method significantly enhances river inspection efficiency and provides effective digital support for algal bloom detection and intelligent water management.

Key words: multi-source video fusion; UAV monitoring; distortion correction; video stitching; river and lake supervision

当前,水利行业正处于从传统治理向数字化、智能化监管转型的关键阶段^[1]。构建以数字孪生流域为核心的智慧水利体系,实现预报、预警、预演、预案的“四预”功能,已成为新阶段水利高质量发展的战略要求。随着“河湖长制”的深度落实,行业要求对河湖水域岸线实施全维度、全天候的精细化监管。在这一背景下,传统的“点对点”式人工巡查和定点监控已难以满足大尺度、动态化的水网监管需求,需构建更加高效的非接触式监测感知体系。无人机作为“天、空、地、水、工”一体化监测体系中的重要移动感知单元,凭借其机动性强、视野广阔等优势,在河湖巡检中得到了广泛应用。然而,在复杂水利环境的工程应用中,现有的无人机视频监测技术仍面临多重技术瓶颈。首要问题是广角镜头引起的几何失真,无人机为获取大视角常配备广角镜头,产生的径向与切向畸变导致影像边缘严重扭曲^[2],若不进行有效校正,拼接后的全景视频会产生明显的几何错位,无法满足精准监管的要求。其次是复杂水面环境下的配准困难,巡河场景中水面占比较大且纹理特征稀疏,加之光照反光干扰,导致传统算法在特征提取时效率低下且误匹配率高,难以实现不同视角视频的稳定对齐^[3]。最后是动态视频拼接的连贯性较差,无人机在飞行过程中受气流影响存在姿态抖动,若仅进行单帧静态拼接,视频画面会出现剧烈的跳变与闪烁,同时不同相机的光度差异也会导致拼接处存在明显的物理缝隙。

目前通用的视频拼接技术在街景地图、全景监控领域已有广泛应用,但直接迁移至河湖监管场景时存在显著的局限性。一方面,水域环境缺乏人工标定参照物,传统的相机标定方法在野外作业时由于难以布设靶标而无法实施,导致影像纠偏精度受限^[4]。另一方面,水体环境的动态变化与纹理一致性使得经典的特征配准算法(如 SIFT、ORB^[5])极易产生误匹配,特别是在涉及桥梁、岸线等具有视差结构的复杂场景时,容易出现画面重影与对齐失效。此外,动态视频流处理对实时性与时序平滑度有极高要求,现有的静态图像拼接逻辑往往忽略了

帧间的运动约束,导致生成的全景视频在视觉上缺乏连贯性,难以支撑高精度的实时监管任务。

针对上述问题,本文研究并实现了一种面向河湖监管的视频全景融合技术,通过多项算法优化提升了全景监测的可靠性。本文提出一种基于边缘约束的自标定方法,利用河道场景中天然的河岸线几何特征纠正广角畸变,解决了野外环境下缺乏标定参照物的难题。在此基础上,本文优化了ORB与RANSAC算法的组合策略,引入多几何模型切换机制^[6],有效解决了弱纹理水面环境下的高精度配准难题,并通过构建动态配准机制与分层融合策略^[7],消除了无人机姿态抖动导致的画面跳变,实现了时空连贯、无缝的动态全景监测效果。

1 研究现状

1.1 摄像头几何畸变校正现状

摄像头畸变校正是实现高精度视频拼接的前提,尤其在无人机搭载广角镜头进行大范围巡河时,径向与切向畸变会直接导致接缝处的几何错位。现有研究表明,相机标定的精确度直接决定了无人机视频在水利定量分析中的可靠性。随着智慧水利建设的深入,建立高精度的感知支撑体系已成为数字孪生流域建设的基础,相关研究详细阐述了智能化水利技术体系的构建现状及其对精准感知的需求^[8]。在这一背景下,有关数字孪生智慧水利的研究进一步指出,感知识别层的精度直接影响到后续业务的决策质量,而针对复杂环境下的相机参数鲁棒性校正仍是当前面临的挑战之一^[9]。

1.2 水面场景下的视频配准技术

在视频拼接的工程实现方面,已有学者针对多路监控影像的对齐与实时处理开展了大量研究。目前的配准主流技术可分为基于区域的匹配和基于特征的匹配(如 SIFT、SURF 及 ORB 算法)。闫慕云^[10]针对多路摄像头提出了基于特征匹配的拼接改进算法,重点解决了多源影像间的空间几何一致性问题;崔鹏^[11]则通过优化多目视频的实时拼接技术,进一步提升了系统在高动态、多视角场景下的

像素处理速度与对齐精度。

然而,河湖监测场景具有极大的特殊性。首先,水面纹理具有高度相似性和稀疏性,导致传统特征描述子极易出现误匹配;其次,波光粼粼产生的随机反光干扰会产生大量“噪声特征点”。Koutalakis P等^[12]通过对比实验证实,低成本无人机在复杂水力环境下需配合更稳健的影像处理策略,才能在纹理缺失的情况下准确提取水流流速等关键物理信息。针对此问题,近年来的研究开始向深度学习配准转向,利用卷积神经网络(CNN)提取深层语义特征以增强在弱纹理环境下的鲁棒性,但其在嵌入式端(如无人机机载板卡)的实时性表现仍是制约因素。

1.3 视频融合的实时性与一致性

在多源视频融合与空间构建方面,李昌令^[13]探讨了面向三维场景的多路视频拼接投影融合方法,为构建大尺度、具有空间关联性的全景感知系统提供了数学框架与投影模型。近年来,数字孪生技术为河湖监管提供了新的演进方向,程丹丹等^[14]提出了基于数字孪生的智慧水利系统设计方案,强调了多源视频全景融合在提升水域监管感知维度中的实际应用价值。

为了消除拼接缝隙,研究者们提出了多波段融合(multi-band blending)和最佳拼接线算法(seam-line optimization),旨在解决不同光照条件下影像重叠区的亮度不一致问题。然而,在实际动态巡检中,无人机姿态抖动引起的画面跳变仍是技术难点。Acharya B S等^[15]在综述中明确指出,无人机在水资源管理应用中仍面临感知不稳、时空连续性不足等挑战。尽管目前已有研究尝试利用无人机构建数字孪生水质监测系统^[16],但对视频流在大范围巡航过程中的时空一致性平滑约束研究仍相对匮乏。特别是在长距离河道拼接中,由于缺乏全局控制点,累积误差常导致“地图漂移”现象,亟须构建适应无人机运动特征的动态配准机制与全局平差优化模型。

2 算法优化

本文围绕多源视频拼接监测的核心环节,对无人机影像的畸变校正与视频拼接算法进行系统设计与优化,实现从单一视角拼接向大范围、多时空无人机融合监测的拓展。通过在空间几何与特征匹配层面提升影像一致性,进一步增强系统在复杂河湖环境下的实时性与稳定性。

2.1 基于边缘约束的自标定畸变校正

本文采用针孔相机模型作为几何校正的基础框架,通过建立径向与切向畸变描述函数对影像进行初步纠偏。在归一化坐标系下,理想像素点 (x, y) 与畸变点 (x_d, y_d) 的关系可表示为:

$$x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \quad (1)$$

$$y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \quad (2)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$, k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数。

在参数估计阶段,算法提取视频帧中河岸线等天然几何矢量作为约束。这种做法针对无人机在水域作业时难以布设外部标定靶标的问题,将传统的“靶标约束”改进为基于重投影误差 $\sum \|q_i - \hat{q}_i\|^2$ 最小化的“场景特征约束”。通过自标定法解算出最优内参,纠正了广角镜头造成的边缘扭曲。

2.2 多几何约束下的ORB-RANSAC配准

算法选用ORB算子进行特征提取,利用Harris响应函数筛选稳定角点,并生成二进制描述子。在匹配阶段,系统求解源帧坐标与目标帧坐标之间的单应性矩阵 H :

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, (u, v) 和 (u', v') 分别为同一场景点在源帧与目标帧中的像素坐标。该矩阵通过RANSAC算法迭代求解,以剔除误匹配外点。

针对锦溪镇复杂水网中存在的立体结构以及弱纹理导致的配准失效问题,本文在优化过程中引入了基础矩阵 F 与极几何约束作为冗余校验:

$$q_i^T F p_i = 0 \quad (4)$$

式中, $p_i = [u_i, v_i, 1]^T$ 和 $q_i = [u'_i, v'_i, 1]^T$ 分别为匹配点在两幅图像中的齐次坐标。

该方程表明,源图像中的点 p_i 通过基础矩阵 F 映射后,其对应的目标点 q_i 必定位于该点的极线上。当系统检测到监测区域存在显著视差时,会自动切换至基于基础矩阵的配准模型,以补偿非平面假设带来的局部扭曲,增强了算法在复杂环境下的几何保真度。

2.3 动态更新机制与分层去缝融合策略

系统在视频生成阶段采用了分层融合架构,其中加权平均融合的计算公式为:

$$I_{\text{fused}}(x, y) = \alpha(x, y)I_A(x, y) + [1 - \alpha(x, y)]I_B(x, y) \quad (5)$$

式中, $I_{\text{fused}}(x, y)$ 为拼接结果图像在像素位置 (x, y) 的

亮度或颜色值; $I_A(x,y)$ 为第一幅输入图像(或来源帧A)在位置 (x,y) 的值; $I_B(x,y)$ 为第二幅输入图像(或来源帧B)在位置 (x,y) 的值; $\alpha(x,y)$ 为定义在重叠区域内的权重函数。

在几何变换的连续性处理上,算法建立了基于帧间运动建模的参数更新逻辑。这一改进针对无人机姿态抖动导致的视频画面跳动问题,通过引入动态配准机制,利用上一帧变换模型预测当前位姿并施加平滑约束。这种逐帧更新策略强制几何变换参数在时间轴上平滑演变,在消除物理缝隙的同时,确保了全景动态监测画面在时空维度上的视觉连贯性。全景视频拼接的效果图如图1所示。这是一张通过图像拼接技术生成的多视角融合鸟瞰图,展示了同一地点在同一时间、不同角度下捕捉的画面被整合在一起的效果。



图1 自由视角视频拼接效果

3 系统开发与场景验证

3.1 系统总体架构

系统基于空地协同逻辑,构建了由前端无人机集群采集、边缘算法处理与云端应用展示组成的实时视频融合框架。该架构通过端、云、节点的深度耦合,解决了河湖监测中单视角影像时空连续性差、存在感知盲区的工程痛点,实现了分布式视频源向全域感知图的转化。系统架构与系统界面分别如图2、图3所示。

前端采集层利用多台搭载高清广角镜头的无

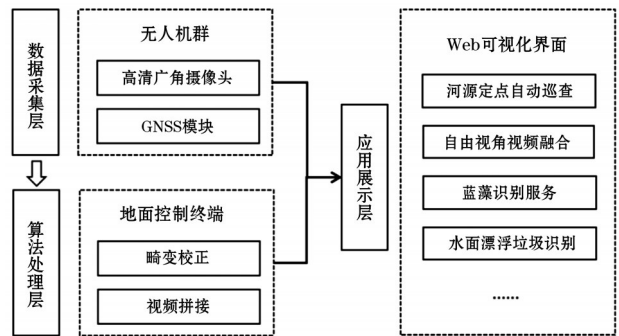


图2 系统架构

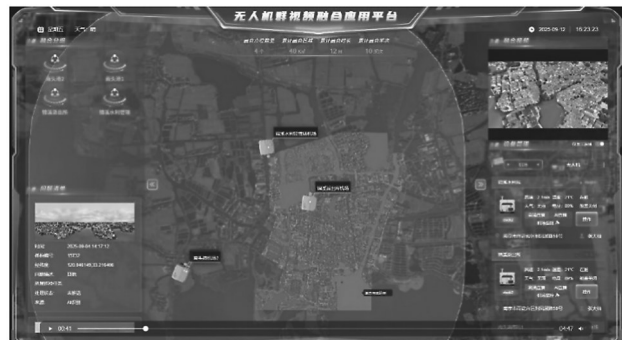


图3 系统界面

人机集群作为移动感知单元。各机位通过集成的GNSS模块与地面基站(RTK)配合,执行多视角视频的同步采集与高精度时间戳对齐。在空间布局上,根据河道走向预设航线,确保相邻视角间维持30%以上的重叠率,为后续特征匹配提供必要的冗余数据。无人机通过无线链路将压缩后的高清视频流实时回传至地面处理终端,确保了数据源的实时性。

地面边缘处理层是系统的核心算法中枢。该层通过高度集成的计算单元,依次执行畸变校正、特征提取、空间配准及融合去缝等核心任务。系统首先调取预设的自标定参数对原始广角视频进行几何校正,消除镜头畸变;随后,通过边缘侧算力对各路视频进行ORB特征捕捉与RANSAC筛选,完成单应性矩阵的动态求解。为了应对多路视频并行处理带来的计算压力,系统采用了硬件加速技术,确保多源视频流的实时配准与缝合,将处理时延控制在毫秒级。

云端应用层则负责全景影像的呈现与业务交互。处理后的全景视频流通过网络协议推送到监管平台,实现在三维数字孪生底图上的精准映射。系统界面集成了实时全景监控、点位轨迹回溯及多窗口协同显示功能,显著增强了监管人员对大尺度水域态势的整体感知能力。

3.2 复杂水网环境下的自由视角视频拼接效果验证

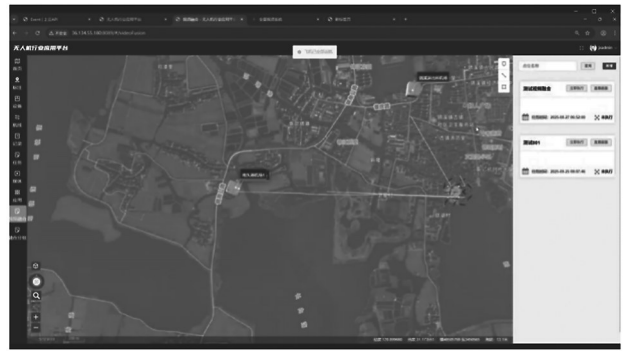
实验选择在锦溪镇主干河道及典型水乡环境展开。该区域水网密布,包含多处蜿蜒河道与岸线建筑的组合,能够充分验证算法在真实复杂物理环境下的几何一致性与时空连贯性。

在处理具有显著径向失真的广角影像时,系统首先对回传的原始视频流进行预处理。利用影像中自动提取的河岸线、堤坝边缘等天然几何矢量执行边缘约束自标定程序。通过重投影误差最小化迭代,有效纠正了影像边缘的几何扭曲,为后续配准建立了统一的投影平面。这一步骤从底层解决了镜头畸变导致的接缝处线条断裂问题,确保了不同视角影像在空间坐标系下的初步对齐。

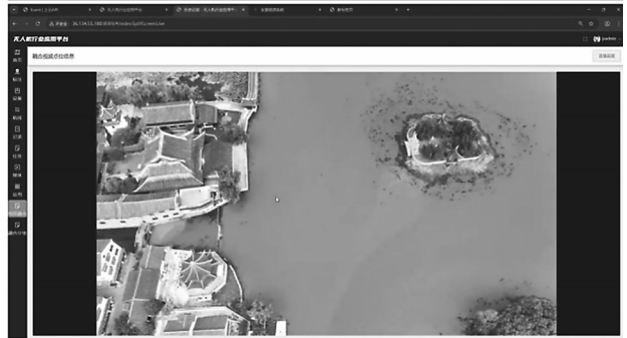
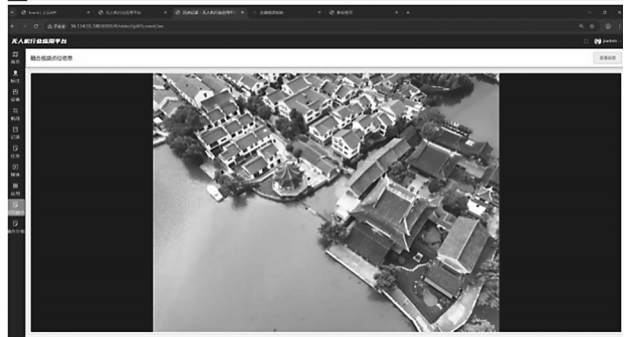
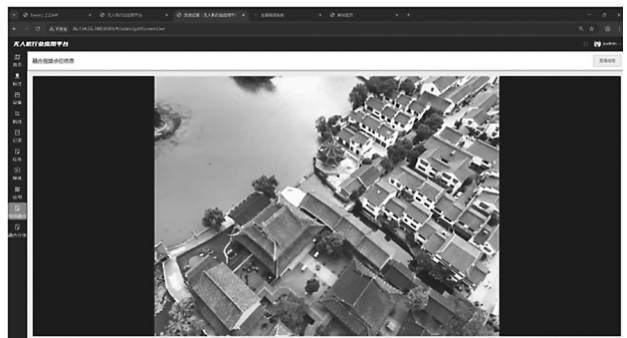
针对传统算法在处理复杂场景时易产生画面错位,以及无人机姿态抖动引起视频“跳动”的工程痛点,本节通过实测结果证实了优化后的配准策略与动态更新机制的可靠性。如图4所示,该图直观展示了多机协同覆盖河道的空间逻辑。4架次无人机根据河道走向及汇合口地形,采取了科学的交错覆盖航线规划,确保了相邻监控视角间具备充足且合理的重叠区域。这种空间布局为特征算子在复杂环境下的稳健提取提供了物理保障,显著提升了变换矩阵求解的可靠性。

通过观察最终生成的自由视角视频拼接示例图是由4架无人机在同一地点不同视角下的画面,可以自由选择不同视角观察主题,能让决策者或观众获得更全面、直观的视觉信息。图4结果显示,即便在水面占据画面较大比例、纹理特征相对稀疏的场景下,通过优化后的误匹配剔除策略,算法依然实现了精确对齐。各视角衔接处的河岸线条过渡自然,水面与岸边建筑的几何关系保持连续,未见明显的重影或错位现象。系统消除了不同传感器间因视角差异产生的拼接痕迹,使全景影像呈现出高度的视觉一致性。

此外,针对无人机受环境风场干扰产生的位姿抖动,系统引入了动态运动平滑约束机制。实测验证表明,在维持系统实时处理效能的前提下,该机制显著抑制了全景视频画面的剧烈跳变与视觉闪烁。生成的监控流在时空维度上表现出良好的融合效果,完全消除了各视频源之间的视觉接缝。实测结果表明,该技术架构能够为河湖监管人员提供直观、连贯的全域视觉支撑,大幅提升了对大范围水域态势的实时研判能力。



(a)无人机点位



(b)拼接后效果

图4 自由视角视频拼接示例

4 结 论

针对高空河湖监管中存在的单视角监测范围受限、广角镜头畸变严重以及动态视频拼接不稳等工程痛点,研究了一种面向河湖场景的视频全景融合技术。通过在锦溪镇水网环境下的系统开发与实测验证,得出以下主要结论:

第一,自适应的配准与纠偏机制提升了复杂环境下的应用表现。基于场景特征的自标定和多模型切换策略,解决了广角畸变与弱纹理水面导致的对齐失效问题。这证明了在不依赖外部标定物的条件下,通过挖掘场景自然特征来实现高精度监管是可行的,具有较强的实用性,能够满足水利一线作业中对设备快速部署和环境自适应的需求。

第二,该技术能够有效支撑水利行业的数字化转型。通过将碎片化的无人机视频源整合为统一的全景视角,系统大幅增强了监管人员对复杂河网环境的整体掌控能力。这种全局感知手段符合“数字孪生流域”建设的逻辑,为感知识别层的完善提供了新的路径,有助于推动治水模式从传统手段向智能化方向跨越。

第三,视频全景融合技术在提升河湖管护水平方面具有广阔前景。随着智慧水利体系的不断成熟,这种全域感知的视频流可以与数字孪生“四预”业务进一步结合,为水旱灾害防御和幸福河湖建设提供直观的决策参考。通过技术赋能,可以有效弥补人工监管的不足,提升河湖管护的精细化水平。

综上所述,研究提出的全景视频融合技术不仅在算法层面解决了畸变校正与动态配准的难题,在工程层面也实现了空地协同的闭环应用。该技术能够为河湖长制下的数字化巡检提供全视角、高清晰的实时感知手段,在提升巡河效率、辅助应急调度决策以及构建数字孪生水利体系方面具有重要的实用价值。未来研究可进一步探索在极端天气及夜间弱光环境下影像增强与全景融合的结合,以实现全天候、全覆盖的河湖智能化监管。

参考文献:

- [1] 蔡阳. 以数字孪生流域建设为核心构建具有“四预”功能智慧水利体系[J]. 中国水利, 2022(20): 2-6, 60.
- [2] 李志安. 广角图像畸变矫正及双光谱视频中游泳池人员实时检测和跟踪[D]. 济南: 济南大学, 2024.
- [3] SIMARRO G, CALVETE D, PLOMARITIS T A, et al. The influence of camera calibration on nearshore bathymetry estimation from UAV videos[J]. Remote Sensing, 2021, 13(1): 150.
- [4] LIAO K, NIE L, HUANG S, et al. Deep learning for camera calibration and beyond: A survey[J]. arXiv preprint arXiv, 2023(2303): 10559.
- [5] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]//2011 International conference on computer vision. Ieee, 2011: 2564-2571.
- [6] DING Y, VAVRA V, BHAYANI S, et al. Fundamental matrix estimation using relative depths [C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 142-159.
- [7] ZHANG H, SHEN H, YUAN Q, et al. Multispectral and SAR image fusion based on Laplacian pyramid and sparse representation[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 870.
- [8] LI Q, MA Z, LI J, et al. Overview of the research status of intelligent water conservancy technology system [J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 7809.
- [9] LI W, MA Z, LI J, et al. Digital twin smart water conservancy: Status, challenges, and prospects[J]. Water, 2024, 16(14): 2038.
- [10] 闫慕云. 基于图像特征匹配的多路摄像头视频拼接算法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- [11] 崔鹏. 多目视频实时拼接技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [12] KOUTALAKIS P, TZORAKI O, ZAIMES G. UAVs for hydrologic scopes: Application of a low-cost UAV to estimate surface water velocity by using three different image-based methods[J]. Drones, 2019, 3(1): 14.
- [13] 李昌令. 面向三维场景的多路视频拼接投影融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.
- [14] 程丹丹, 钮月磊, 刘创. 基于数字孪生的智慧水利系统的设计与应用[J]. 现代信息科技, 2025, 9(2): 105-109.
- [15] ACHARYA B S, BHANDARI M, BANDINI F, et al. Unmanned aerial vehicles in hydrology and water management: Applications, challenges, and perspectives[J]. Water Resources Research, 2021, 57(11): e2021WR029925.
- [16] HAMZAH A, AQLAN F, BAIDYA S. Drone-based digital twins for water quality monitoring: A systematic review[J]. Digital Twins and Applications, 2024, 1(2): 131-160.