



基于数字孪生与视频融合的航道表面 流态实时监测方法研究*

闵小飞¹, 韩越¹, 李明伟², 王宇田²

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443000; 2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 针对航道表面流态实时监测中存在的多源信息融合困难、视频几何畸变校正精度不足以及三维场景动态映射不准确等关键技术难题, 开展基于数字孪生与视频融合的实时监测方法研究。通过开发全景实时视频监控耦合技术, 解决了异构设备数据兼容性问题, 视频流接入延迟降低至0.5 s以内; 通过开发表面流态监控视频的智能融合算法, 实现监控画面与三维场景的像素级匹配误差小于0.1 px。在长江三峡航道开展表面流态智能感知系统的现场实测, 实现急流、回流等典型流态的自动识别准确率达95.3%, 流速测量误差控制在 ± 0.05 m/s以内。结果表明, 所提出的智能融合算法与系统架构显著提升航道流态监测的实时性与准确性, 能够为复杂水文条件下的通航安全管理提供可靠的技术支撑。

关键词: 数字孪生; 视频融合; 流态监测; 几何校正

中图分类号: U612.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0217-10

Digital twin and video fusion-based real-time monitoring method of channel surface flow pattern

MIN Xiaofei¹, HAN Yue¹, LI Mingwei², WANG Yutian²

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China; 2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A study on real-time monitoring method based on digital twin and video fusion is carried on to address key technical challenges in real-time monitoring of surface flow pattern in channels, such as difficulty in fusing multi-source information, insufficient accuracy in correcting geometric distortions in videos, and inaccurate dynamic mapping of 3D scenes. By developing panoramic real-time video surveillance coupling technology, the compatibility problem of heterogeneous device data is solved, and the video stream access delay is reduced to less than 0.5 s. By developing an intelligent fusion algorithm for surface flow monitoring videos, the pixel level matching error between monitoring images and 3D scenes is achieved with less than 0.1 pixels. On-site testing of the surface flow state intelligent perception system is carried out in the Three Gorges channel of the Yangtze River, achieving an automatic recognition accuracy of 95.3% for typical flow states such as rapids and backflow, and controlling the flow velocity measurement error within ± 0.05 m/s. The results indicate that the proposed intelligent fusion algorithm and system architecture significantly improve the real-time and accuracy of channel flow monitoring, providing reliable technical support for navigation safety management under complex hydrological conditions.

Keywords: digital twin; video fusion; flow pattern monitoring; geometric correction

收稿日期: 2025-04-24 录用日期: 2025-06-19

*基金项目: 长江航务管理局重点科技项目(2024-CHKJ-007); 长江三峡通航管理局A类科技项目(KJ2022-02A)

作者简介: 闵小飞(1977—), 男, 高级工程师, 从事枢纽航道运行维护管理工作。

航道流态监测对水运安全与航道管理具有重要意义。据《2024年交通运输行业发展统计公报》^[11]显示,我国内河航道通航里程达12.87万km,年货运量近50亿t;复杂流态(如弯道环流、浅滩紊流)全年共发生运输船舶水上交通事故(等级事故)66起,比上年下降25.8%;死亡失踪63人,下降19.2%;沉船15艘,下降37.5%。监测数据可为船舶操纵提供预警(如流速突变预警准确率达92%^[12]),并指导航道整治工程(如长江中游航道整治使通航保证率提升至98%^[13])。

目前数字孪生与视频融合技术的发展日益成熟。数字孪生技术在水利等领域的应用已经取得了突破性进展,如美国陆军工程兵团开发的Mississippi River Digital Twin系统,通过耦合水动力模型与物联网数据,实现了流域级流态预测精度±0.15 m/s^[4];我国学者提出的三维航道数字孪生框架,成功模拟三峡库区复杂流态演变过程^[5];视频融合技术通过多源异构数据融合提升监测效能,德国Festo公司开发的智能监控系统,融合4K视频与激光雷达数据,实现了0.5 m/s流速测量误差^[6];国内研究表明,基于深度学习的视频流态分析算法,在复杂光照条件下的流态识别准确率达94.7%^[7]。

本文通过研究航道表面流态的实时数字孪生技术,针对实时航道通航管理的实时性、全天候和无人智能感知等特性需求提出解决方案^[8-11]。

1 实时监测方法研究

1.1 多源视频流实时接入与三维耦合方法

本文采用RTSP协议进行数据解析,结合VLC流媒体转码、Nginx跨域代理及三维渲染技术,成功实现了视频监控图像信号在数字孪生场景中的无缝接入与展示,见图1。在有效解决不同设备之间的数据流格式兼容问题的同时,也为航道表面流态的实时监控与数字孪生场景的联动提供了技术支持,要点为:1)多源信号融合。为实现视频监控图像与数字孪生场景的无缝接入,需要使用通用的网络流媒体协议RTSP,并通过VLC流媒体服务器将RTSP流实时转码为OGG格式,解决不同设备间的视频格式兼容性问题;同

步接入视频设备空间坐标数据,建立视频信号与三维场景的空间映射关系。2)跨域代理访问。跨域访问问题是视频监控信号接入过程中的另一个技术挑战。本文引入Nginx代理,通过在服务器配置中添加适当的头部信息,实现跨域资源共享,确保不同网络环境下的视频流稳定传输。该方案有效突破了浏览器同源策略限制,保障了系统的网络适应性。3)实时三维渲染。利用WebGL三维渲染引擎,将HTML5视频流作为材质对象绑定至三维场景模型,通过动态更新视频纹理坐标,实现监控画面与虚拟场景的时空同步映射,构建沉浸式可视化环境。

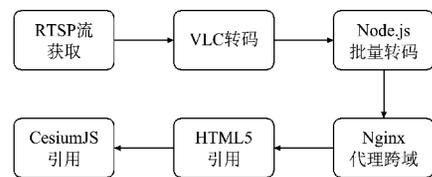


图1 全景实时视频监控耦合技术开发流程

Fig. 1 Development process of panoramic real-time video surveillance coupling technology

1.2 视频-三维场景智能融合方法

1.2.1 视频监控视锥体算法

该算法基于数字孪生技术的视频监控视锥体模拟与图像融合方法,通过精确还原摄像机空间参数实现监控画面与三维场景的无缝匹配。研究核心在于建立摄像机内参数、外参数、视场角及分辨率的数学模型,结合四维矩阵变换算法构建视锥体几何模型。视频监控设备视锥体计算内外参数见表1。视频监控视锥体见图2。

表1 视频监控设备视锥体计算内外参数
Tab. 1 Intrinsic and extrinsic parameters for visual cone calculation of video surveillance equipment

参数	含义
地理坐标	世界坐标位置
朝向	视锥体水平(x轴)旋转角
俯角	视锥体垂直(y轴)旋转角
旋转角	视锥体视线(z轴)旋转角
视场角	视野张开的角度
画面宽高比	视频监控图像(近平面)宽(w)与高(h)之比
焦距	原点到近平面的垂距
拍摄距离	原点到远平面的垂距

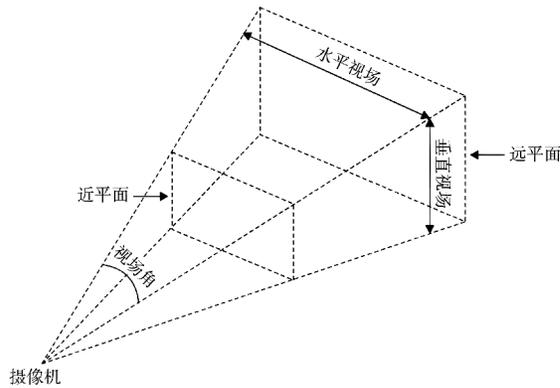


图 2 视频监控视锥体

Fig. 2 Visual cone of video surveillance

技术实现分为 5 个关键步骤, 其中第 1 步为初始化三维模型矩阵, 包括: 1) 输入拍摄距离, 即根据摄像设备到目标的实际物理距离; 2) 生成模型缩放矩阵, 即通过 `Matrix4.from Uniform Scale` 函数将拍摄距离转换为模型缩放比例, 输出远平面标准模型矩阵; 3) 绑定模型空间, 即将生成的模型矩阵赋给 `Classification Primitive.model Matrix`, 此时三维模型完成空间尺度标准化。

第 2 步为构建相机观察系统, 包括: 1) 输入相机参数, 即输入地理坐标、空间朝向、俯视角、镜头旋转角; 2) 生成逆视图矩阵, 即通过 `Camera.inverse View Matrix` 计算, 将真实世界坐标反向映射为相机相对坐标; 3) 输入镜头光学参数, 即输入视场角、画面宽高比、焦距参数、拍摄距离; 4) 生成投影矩阵, 即通过 `Perspective Frustum. projection Matrix` 计算, 将三维空间物体转换为二维成像平面。

第 3 步为核心矩阵运算, 包括: 1) 合并视图投影, 即执行 `Matrix4.multiply` 运算, 将逆视图矩阵与投影矩阵相乘; 2) 生成视图投影矩阵, 输出结果为逆视图投影矩阵/视图投影矩阵; 3) 相机视图补偿, 即额外调用 `Camera.View Matrix`, 修正镜头空间旋转偏移。

第 4 步为渲染管线装配, 包括: 1) 绑定模型视图矩阵, 即将第 1 步的 `model Matrix` 与第 3 步生成的视图投影矩阵关联, 生成统一着色器参数 `u_box MV`; 2) 生成逆向变换矩阵, 即通过 `Matrix4.inverse` 计

算 `u_box MV` 的逆矩阵, 输出为 `u_inverse Box MV`; 3) 参数注入渲染器, 即将 `{u_box MV, u_inverse Box MV}` 映射到 `Classification Primitive.uniform Map`, 完成渲染前的所有数据准备。

第 5 步为执行渲染, 包括: 1) 启动 `Classification Primitive` 渲染管线; 2) 三维模型根据装配的矩阵参数, 先通过 `u_box MV` 实现模型空间→相机空间→屏幕空间的逐级变换, 再通过 `u_inverse Box MV` 支持像素点→地理坐标的反向查询; 3) 最终输出具备地理映射能力的三维渲染结果。

本文为数字孪生场景中的视频监控应用提供了完整的技术方案, 其创新点在于提出四维矩阵参数化的视锥体生成算法、设计基于 `canvas` 动态绘制的多画面耦合机制以及构建参数化存储与跨平台传输体系。该技术在智慧城市、安防监控等领域具有重要应用价值, 为多模态数据融合与智能分析提供了基础支撑。视频监控视锥体算法实现路线见图 3。

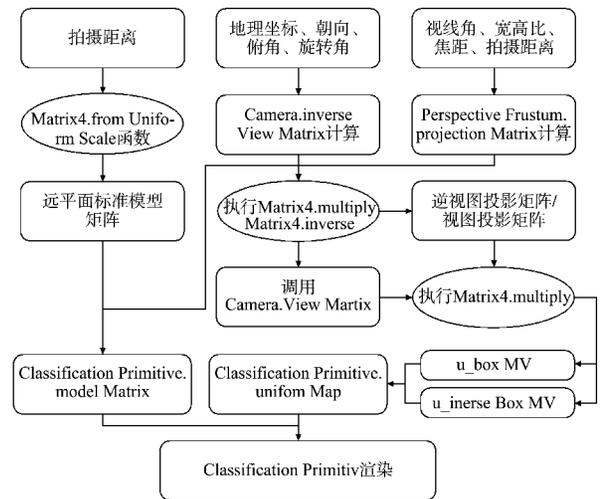


图 3 视频监控视锥体算法实现路线

Fig. 3 Implementation route of video surveillance visual cone algorithm

1.2.2 视频监控画面去畸变算法

视频监控去畸变算法旨在纠正镜头光学特性导致的图像几何失真, 核心目标是恢复图像正常几何形态。畸变分为径向畸变和切向畸变两类: 径向畸变由镜头光学设计缺陷引发, 表现为桶形或枕形变形, 通过参数 k_1 、 k_2 、 k_3 描述不同径向

位置的变形程度；切向畸变源于镜头与传感器安装误差，导致图像直线倾斜或物体偏移，由参数 p_1 、 p_2 表征非对称变形。去畸变流程包括：1) 利用相机内参矩阵对像素坐标归一化处理，转换至光轴坐标系；2) 应用径向畸变参数消除图像中心到边缘的比例扭曲；3) 通过切向畸变参数修正因安装偏差导致的平面偏移。该算法通过同步校正两类畸变，显著提升图像几何精度，使像素回归理想成像位置，有效改善监控画面质量。

具体的去畸变过程为：假设已经掌握了摄像机的内参矩阵，这个矩阵包含摄像机的内部参数，如焦距、主点偏移和畸变系数等，这些参数对摄像机的成像过程起着至关重要的作用，见式(1)。通过利用归一化平面坐标去除径向和切向畸变，可以将畸变后的像素坐标逐步调整回理想状态，从而获得去畸变后的图像。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： \mathbf{K} 为摄像机的内参数矩阵； f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向的焦距； c_x 、 c_y 分别为主点 x 、 y 方向坐标。

将原始像素坐标 (u, v) 转换为归一化平面坐标 $(x_{\text{norm}}, y_{\text{norm}})$ ，公式为：

$$(x_{\text{norm}}, y_{\text{norm}}) = \left(\frac{u - c_x}{f_x}, \frac{v - c_y}{f_y} \right) \quad (2)$$

为了消除径向畸变效应，需要通过校正公式应用相应的径向畸变参数（如 k_1 、 k_2 和 k_3 ）对归一化平面上的坐标进行调整，公式为：

$$\begin{cases} x_{\text{distort}} = x_{\text{norm}}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{\text{distort}} = y_{\text{norm}}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (3)$$

式中： x_{distort} 、 y_{distort} 为校正后的归一化平面坐标； r 为径向畸变半径。

通过应用切向畸变参数 (p_1 和 p_2)，对归一化

平面上的坐标进行校正，从而抵消由于镜头和传感器错位引起的几何偏移，公式为：

$$\begin{cases} x_{\text{distort}} = x_{\text{norm}} + 2p_1 x_{\text{norm}} y_{\text{norm}} + p_2 (r^2 + 2x_{\text{norm}}^2) \\ y_{\text{distort}} = y_{\text{norm}} + p_1 (r^2 + 2y_{\text{norm}}^2) + 2p_2 x_{\text{norm}} y_{\text{norm}} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)都满足：

$$r^2 = x_{\text{norm}}^2 + y_{\text{norm}}^2 \quad (5)$$

当摄像机同时存在径向畸变和切向畸变时，通常需要将径向畸变和切向畸变的校正公式综合使用，以确保图像的几何精度。将上述公式联立可得到：

$$\begin{cases} x_{\text{distort}} = x_{\text{norm}}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ \quad 2p_1 x_{\text{norm}} y_{\text{norm}} + p_2 (r^2 + 2x_{\text{norm}}^2) \\ y_{\text{distort}} = y_{\text{norm}}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ \quad p_1 (r^2 + 2y_{\text{norm}}^2) + 2p_2 x_{\text{norm}} y_{\text{norm}} \end{cases} \quad (6)$$

通过这个还原步骤，归一化平面上的坐标经过径向和切向畸变校正后，将被重新映射到像素平面上，生成去畸变后的像素坐标。通过这个坐标转换过程，最终可以获得一幅几何形态更加精确、符合真实物理场景的去畸变图像。现在 $(x_{\text{distort}}, y_{\text{distort}})$ 仍然在归一化平面上，将这个坐标还原到像素坐标，就是去畸变之后的像素坐标：

$$\begin{cases} u' = x_{\text{distort}} f_x + c_x \\ v' = y_{\text{distort}} f_y + c_y \end{cases} \quad (7)$$

式中： u' 、 v' 为去除畸变后的像素坐标。这个坐标已经经过了径向和切向畸变的双重校正，反映了图像中每个像素点在去除畸变影响后应当处于的准确位置。通过校正，原本由于镜头光学特性造成的几何扭曲现象得以纠正，图像中的物体形状和位置更加接近真实的物理场景。视频监控画面去畸变效果见图4。



a) 原始



b) 去畸变后

图 4 视频监控画面去畸变效果
Fig. 4 Effect of video surveillance screen distortion removal

1.2.3 视频监控画面去投影算法

去投影透视变换是一种将图像投影到一个新的视平面上的几何变换, 也被称为投影映射。透视变换的主要目的是将图像中由于透视效果而使原本为直线的物体呈现为斜线的现象进行校正, 使得这些物体在图像中恢复为直线。仿射变换是几何变换中的另一种类型, 其本质上是一种结合线性变换和平移操作的几何映射过程。视频监控画面去透视原理见图 5。

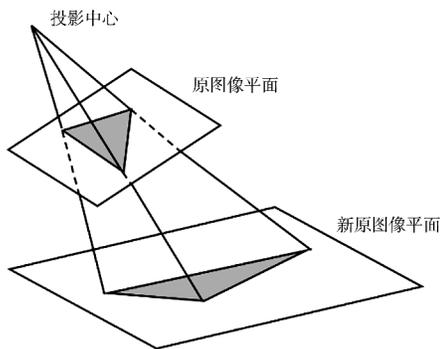


图 5 视频监控画面去透视原理
Fig. 5 Video surveillance screen to perspective principle

其核心是建立源图像平面到目标图像平面的坐标变换关系, 公式:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $a_{11} \sim a_{33}$ 为透视变换矩阵的系数(包含旋转、平移和缩放参数)。

在透视变换中, 设原图像平面中的坐标点为 (X, Y, Z) , 通过变换后, 得到对应的目标图像平面中的坐标点 (X', Y', Z') 。将 Z' 设置为 1, 并通过将变换后的坐标 X 和 Y 除以 Z , 可以实现从三维坐标系到二维平面坐标系的降维处理, 进而得到二维映射方程:

$$\begin{cases} X' = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ Y' = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ Z' = 1 \end{cases} \quad (9)$$

假设 $a_{33} = 1$, 从而简化透视变换公式的形式。基于这个假设, 能够展开透视变换公式, 见式(10), 并推导出针对单个坐标点的情况。

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y + a_{13} - a_{31}xX' - a_{32}X'y = X' \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23} - a_{31}xY' - a_{32}yY' = Y' \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)中, 共有 8 个未知数需要求解。选择源图像与目标图像的 4 对对应点(通常为四角点), 分别为 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) , 并在目标图像上选择对应的 4 个坐标点, 分别为 (X_0, Y_0) 、 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) 。将这些坐标点代入上面的透视变换的方程中, 进而推导出新方程。通过这种方式, 能够将源图像的 4 个选定点与目标图像中的对应点关联起来, 从而精确描述图像之间的透视关系。将源图像坐标点代入式(10)并整理成矩阵形式, 将其与透视变换矩阵的系数进行矩阵乘法运算, 便能得到目标图像上对应的坐标点, 见图 6。该过程进一步揭示了图像从原始空间到目标空间的几何映射规则, 帮助确定透视变换的具体参数, 最终实现图像的准确校正与映射。

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_0 Y'_0 & -y_0 X'_0 \\ 0 & 0 & 0 & x_0 & y_0 & 1 & -x_0 Y'_0 & -y_0 Y'_0 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 Y'_1 & -y_1 X'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1 Y'_1 & -y_1 Y'_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 Y'_2 & -y_2 X'_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2 Y'_2 & -y_2 Y'_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3 Y'_3 & -y_3 X'_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -x_3 Y'_3 & -y_3 Y'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ X'_1 \\ X'_2 \\ Y'_2 \\ X'_3 \\ Y'_3 \end{bmatrix}$$

图6 几何映射规则

Fig.6 Geometric mapping rules

本文通过利用 OpenCV 提供的丰富算法库，使用 Java 语言实现了上述图像处理与变换算法。在此基础上，结合 Spring Boot 框架提供的访问接口，实现航道表面流态孪生平台与相关算法的深度集成。通过该技术方案，平台能够实时处理视频监控画面，见图7，完成去畸变与去投影的几何校正操作，并将处理后的画面与实景三维数据进行无缝融合，见图8。

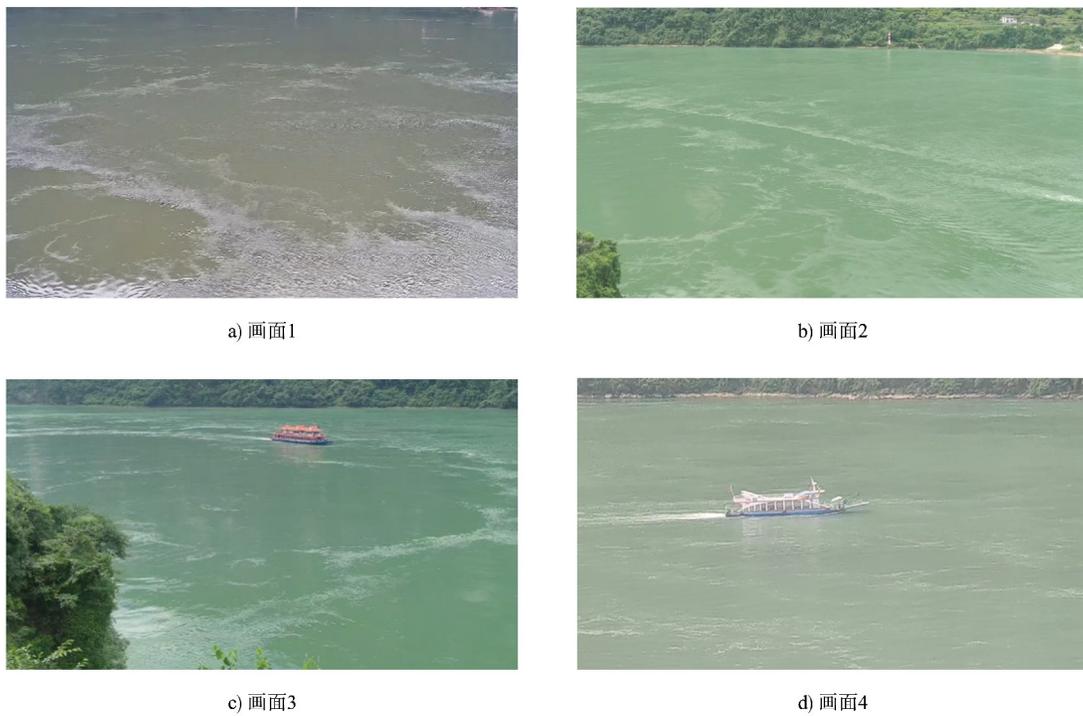


图7 航道表面实时视频监控原始画面

Fig.7 Real-time video surveillance of channel surface raw picture



a) 投影



b) 透视变换

图 8 航道表面流态实时孪生视频监控画面效果

Fig. 8 Effect of real-time twin video surveillance picture of channel surface flow pattern

1.3 表面流态智能感知系统架构

本文构建基于数字孪生、深度学习、增强现实及多源数据融合技术的航道表面流态智能监测系统，其核心架构分为 5 层：1)感知层。部署多视角高清摄像机于航道急弯区域，捕捉水面细微流态变化；集成 4G/5G 通信模块实现视频数据实时传输；配置 AI 运算服务器与平台运维服务器，保障智能分析与系统稳定运行。2)数据层。建立 AI 目标识别特征库与平台业务数据库，存储原始视频/图像数据及处理后的流态特征数据，支持高效检索并为智能分析提供数据基础。3)计算层。

通过实时孪生算法构建虚拟航道模型，实现流态精准模拟；视频实时融合接口整合多视角数据增强特征捕捉；深度学习模型自动提取流态特征，完成智能分类识别。4)功能层。提供 3 大核心功能，包括实时孪生系统动态展示流态分布、流场仿真模块基于历史数据进行趋势预测、AI 识别模块自动判别急流和回流等典型流态，为精细化管理提供依据。5)用户层。支持枢纽管理人员、船员及科研人员通过 Web /移动终端获取实时数据、预警信息及分析报告，同时实现跨平台数据共享与联动控制，提升系统扩展性。具体框架流程见图 9。

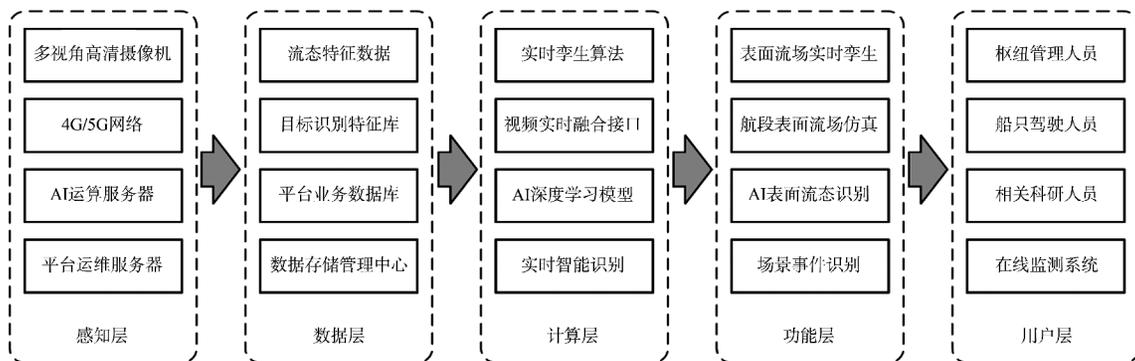


图 9 表面流态智能感知在线监测解决方案系统框架流程

Fig. 9 Framework flow of intelligent sensing online monitoring solution system for surface flow pattern

其中,在计算层内,首先由视频实时融合接口获得实时视频影像资料,然后使用实时孪生算法计算视频画面中的区域表面流场,对视频图像进行二值化处理,使用互相关算法对比计算前后两帧图像的特征像素位移差,并得到一个互相关平面,该平面的峰值位置表示两个特征像素之间的位移,接着使用亚像素峰值定位方法获得超过整像素精度的位移估计,其核心算法为高斯拟合法,将相关平面上的峰值点周围的区域视为一个二维分布,并计算该区域的质心作为位移的亚像素位置。最后使用得到的特征像素和亚像素数据计算目标区域的位移场和速度场并进行信噪比相关计算,得到目标区域可信的速度矢量场。在上述基础上,使用卷积神经网络提取速度矢量场的流态特征数据,使用人工智能优化算法优化神经网络的特征参量,实现模型自动提取流态特征,完成智能分类识别。

该系统架构通过多技术融合,实现航道流态全方位监测、智能识别与决策支持,为航运安全和航道管理提供创新解决方案。

2 应用案例

本文平台整体采用B/S架构,基于前后端分离的开发模式,将系统划分为智慧应用前台、运行维护中台和数据接口后台3大核心部分。此架构设计旨在提升系统的灵活性、扩展性和可维护性,同时确保各个功能模块能够独立开发与高效协同工作。

具体而言,平台的技术栈涵盖了前端、地图引擎、后端以及数据库4个关键部分。前端部分负责用户界面的呈现与交互设计,通过现代化的Web技术框架,实现对表面流态数据的可视化展示和用户操作的响应;地图引擎模块负责处理与展示地理信息系统数据,提供流态监测的空间可

视化支持,使用户能够在实时场景中直观地查看流态变化和相关信息;后端部分承担业务逻辑的处理和数据的集成,确保前端请求能够与数据库和各类服务进行有效交互,并通过API接口实现对多源异构数据的统一调用;数据库则负责存储与管理平台运行所需的大量数据,涵盖表面流态的监测数据、历史记录、用户信息等,为系统的高效运行提供坚实的数据支撑。

通过这种层次分明的技术架构,能够充分发挥B/S架构的优势,实现高效、稳定的表面流态全景智能数字增强平台的开发与部署。

同时,为了测试表面流态全景智能数字增强平台的测量精度,开展包括白天、夜间、大雨和大雾工况下的系统实例测试,并采用高精度雷达无人机对目标水域进行逐点流速测量得到的流速数据进行对比。具体测试过程如下。

在系统监控的水域内,依据现场的水流条件,选定既流速平稳又在摄像头清晰拍摄下的矩形测量区域,矩形测量区域沿水流方向的长度为100m,垂直于水流方向的长度为140m,矩形测量区域4个角点的经纬度坐标分别为(111.15293168°E, 30.78133691°N)、(111.15194403°E, 30.78133691°N)、(111.15293168°E, 30.78301004°N)、(111.15194403°E, 30.78301104°N)。在沿水流方向每25m划定1条测量航线,共计5条航线,每条航线测量20个点,共计100个测点。无人机根据航线进行流速测量,记录测点位置信息、实时时间及测点处流速信息,并将所得数据与流态智能感知系统所得的特征流速进行对比分析。流态级别识别及准确率部分数据见表2,表面流态级别识别准确率大于或等于95%;采用直接误差和相对误差的形式分析测量数据与流态感知系统计算数据的匹配程度,发现误差较低,各测线的计算值和实测值均小于或等于10%。

表 2 常规工况测试部分数据

Tab. 2 Partial test data of conventional working condition

测线流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	孪生流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	结果更新间隔/s	系统孪生采样频率/fps	测量误差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流态级别识别准确率/%
0.676 4	0.710 1	0.561 9	25	-0.004 5	95.02
0.747 7	0.782 8	0.528 2	25	0.051 3	95.31
0.792 2	0.812 6	0.495 6	25	0.001 2	97.43
0.666 2	0.642 7	0.465 7	25	-0.029 4	96.47
0.628 6	0.615 8	0.499 2	25	0.047 9	97.96
0.627 5	0.609 7	0.573 9	25	0.022 5	97.16
0.647 2	0.666 9	0.545 7	25	-0.013 6	96.95
0.613 2	0.630 1	0.460 4	25	-0.003 2	97.25
0.625 1	0.642 5	0.538 9	25	0.024 3	97.22
0.650 0	0.618 5	0.468 9	25	0.033 6	95.15
0.645 2	0.618 6	0.553 6	25	-0.015 6	95.87
0.576 6	0.551 8	0.530 8	25	0.042 9	95.70
0.529 1	0.544 7	0.464 2	25	0.008 5	97.06
0.390 9	0.405 8	0.475 4	25	0.010 5	96.19
0.351 5	0.343 1	0.548 4	25	-0.036 1	97.61
0.274 5	0.262 3	0.530 7	25	-0.025 9	95.55
0.315 2	0.299 6	0.474 4	25	0.008 0	95.04
0.368 9	0.383 6	0.542 1	25	-0.011 5	96.02
0.364 9	0.381 7	0.467 4	25	-0.034 6	95.40
0.312 0	0.303 5	0.443 8	25	-0.008 4	97.26
0.234 9	0.229 4	0.454 0	25	-0.003 9	97.65
0.300 5	0.310 3	0.581 8	25	0.020 1	96.75
0.244 5	0.232 5	0.491 9	25	-0.005 9	95.08
0.226 4	0.220 8	0.485 6	25	0.016 1	97.51

在现场凸岸选址架设摄像机, 通过流态智能感知系统对所拍摄画面进行实时流场感知, 使用视频-三维场景智能融合方法将实时感知流场画面进行去畸变与透视矫正, 并与三维实景系统进行系统孪生。通过现场连续拍摄记录, 对表 2 中的测试数据

及周边流场的实时孪生系统融合场景进行了可视化展现, 对测试结果进行真实场景的孪生验证。

测试获得的最终识别区域范围, 识别区域呈梯形, 最小有效宽度为 417 m, 最大有效宽度约为 683 m, 系统工作情况见图 10。

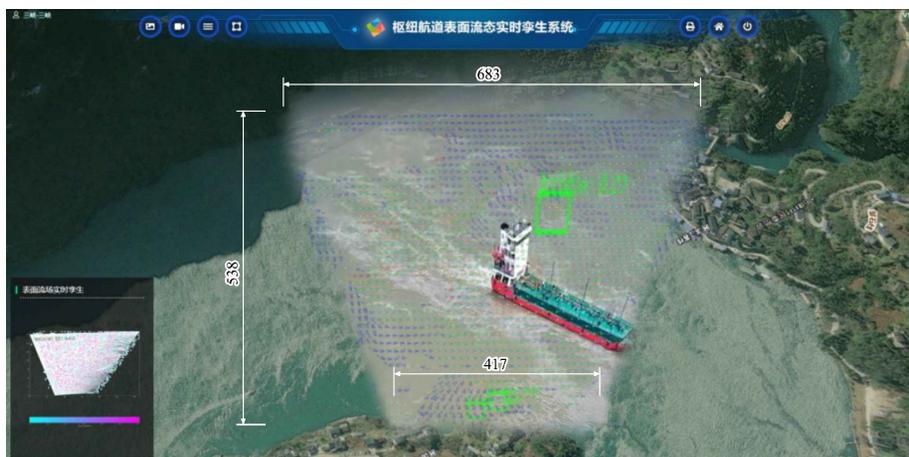


图 10 系统孪生识别画面(单位:m)

Fig. 10 System twin recognition screen(unit:m)

3 结语

1) 结果表明, 本文所提出的视锥体建模、去畸变和去投影算法显著提升了流态监测的几何精度, 现场测试中流态识别准确率达到 95% 以上, 验证了技术方案的可行性和有效性。

2) 在实际应用中仍存在强光干扰导致的特征数据缺损、摄像机角度对采集质量的影响以及复杂环境下信号传输稳定性不足等技术瓶颈。针对这些问题, 未来研究将重点突破多模态数据融合、深度强化学习等关键技术, 进一步提升系统在恶劣环境下的鲁棒性和识别精度, 为航道智能监测提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2024 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2025-06-12(2).
Ministry of Transport. Statistical bulletin of transportation industry development in 2024 [N]. China traffic news, 2025-06-12(2).
- [2] HE Z E, LI S, WANG S J, et al. Mining navigable water current information from ship-based big automated identification system data [J]. Ocean engineering, 2021, 242: 110076.
- [3] 生态环境部. 关于长江中游荆江河段航道整治二期工程环境影响报告书的批复 [A]. 北京: 生态环境部, 2022.
Department of Ecological Environment. Approval of the environmental impact report of the second phase of channel regulation project in Jingjiang section of the middle reaches of the Yangtze River [A]. Beijing: Department of Ecological Environment, 2022.
- [4] USACE. Mississippi river digital twin implementation Plan [R]. Vicksburg: USACE, 2024.
- [5] 陈瑜彬, 张涛, 牛文静, 等. 数字孪生三峡库区建设关键技术研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(8): 19-24.
CHEN Y B, ZHANG T, NIU W J, et al. Key technologies of digital twin of Three Gorges Reservoir region [J]. Yangtze River, 2023, 54 (8): 19-24.
- [6] ZHANG R L, ZHAO C H, LIANG Y, et al. Edge-based dynamic spatiotemporal data fusion on smart buoys for intelligent surveillance of inland waterways [J]. Journal of marine science and engineering, 2025, 13(2): 220-251.
- [7] 武林伟, 闫婧, 王勇. 基于深度学习的海量航拍视频智能处理技术 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(4): 182-186.
WU L W, YAN J, WANG Y. Intelligent processing technology of massive aerial video based on deep learning [J]. Modern electronics technique, 2023, 46(4): 182-186.
- [8] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual review of fluid mechanics, 1991, 23(1): 261-304.
- [9] BUCHHAVE P. Particle image velocimetry-status and trends [J]. Experimental thermal and fluid science, 1992, 5(5): 586-604.
- [10] 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.
- [11] 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.

(本文编辑 王隽)