

文章编号:1000-4653(2025)01-0034-09

# 视觉与 AIS 融合的桥区水域船舶自动监测方法

杜子俊<sup>1,2</sup>, 贺益雄<sup>1,2</sup>, 于德清<sup>1,2</sup>, 赵兴亚<sup>1,2</sup>, 张锐<sup>1,2</sup>, 黄立文<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为保障桥区通航安全,提出一种视觉与船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)融合的船舶自动监测方法。基于YOLOv5(You Only Look Once version 5)目标检测算法和Canny算法提取船舶图像轮廓信息,构建桥区水域目标距离、方位和高度视觉测量模型与方法,实现船舶三维定位。利用融合视觉与AIS的船舶航行态势数据建立异常行为检测模型,自动识别、监测桥区水域危险船舶。试验结果表明:在单、多船的情况下视觉与AIS数据关联准确率分别达到98.45%、91.29%;能有效监测桥区船舶的运动状态。本研究可为保障船舶和桥梁的安全提供有效方法。

**关键词:**船舶自动监测方法;目标检测;数据融合;异常行为检测

中图分类号:U675.96

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.005

## Automatic ship monitoring method in bridge area by fusion of vision and AIS

DU Zijun<sup>1,2</sup>, HE Yixiong<sup>1,2</sup>, YU Deqing<sup>1,2</sup>, ZHAO Xingya<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, HUANG Liwen<sup>1,2</sup>

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** To ensure the safety of navigation in the bridge area, this paper proposes a ship automatic monitoring method based on the fusion of vision and AIS (Automatic Identification System). The ship contour information in the image is extracted by the YOLOv5 (You Only Look Once version 5) target detection algorithm and the Canny algorithm. A distance, azimuth, and height measurement model of the visual target in the bridge area is constructed to achieve the three-dimensional positioning of the ship. An abnormal behavior detection model is established using the ship navigation situation data from the fusion of vision and AIS to automatically identify and monitor monitoring of dangerous ships in the bridge area. The experimental results show that: In cases of single and multiple ships, the accuracy of visual and AIS data association is 98.45% and 91.29%, respectively; The method can effectively monitor the motion state of ships in the bridge area. This paper provides an effective method for ensuring the safety of ships and bridges.

**Key words:** ship automatic monitoring method; target detection; data fusion; abnormal behavior detection

桥区水域环境复杂且事故多发。武汉长江大桥自投入使用以来已经发生70余起船舶撞桥事故<sup>[1]</sup>,造成巨大的经济损失,严重危害了人民的生命健康安全。研究桥区水域船舶自动监测方法可以保障船舶航行安全,预防事故发生并减少经济损失。

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)和海事视频监控(Closed Circuit Television, CCTV)系统是桥区水域监控的重要方式,许多学者基于这两种技术与系统展开研究。魏晓阳<sup>[2]</sup>利用AIS数据建立一个桥区水域船舶碰撞预警

收稿日期:2023-11-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52071249)

作者简介:杜子俊(1999—),男,硕士研究生,研究方向为交通信息工程及控制。E-mail:destan@whut.edu.cn

通信作者:黄立文(1965—),男,教授,博士,研究方向为智能航海与仿真技术。E-mail:lw Huang@whut.edu.cn

引用格式:杜子俊,贺益雄,于德清,等.视觉与AIS融合的桥区水域船舶自动监测方法[J].中国航海,2025,48(1):34-42.

DU Z J, HE Y X, YU D Q, et al. Automatic ship monitoring method in bridge area by fusion of vision and AIS[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 34-42. (in Chinese)

系统,实现了桥区水域船舶航行碰撞风险的可视化。雷进宇等<sup>[3]</sup>结合时空特性与速度信息的三维可视化模型,利用桥区船舶 AIS 数据分析船舶异常行为。潘晋等<sup>[4]</sup>基于 AIS 数据分析航行船舶动态,计算船舶撞击桥墩的概率。王炳德等<sup>[5]</sup>改进和优化 YOLOv3(You Only Look Once version 3)目标检测算法,提高对船舶目标的检测速度和精度。云霄等<sup>[6]</sup>结合多特征信息自适应融合的模型和 CamShift(Continuously Adaptive Mean Shift)算法,实现航道内船舶多目标跟踪。徐海洋等<sup>[7]</sup>基于智能视频处理技术,提出一种船-桥避碰监测预警系统。LU 等<sup>[8]</sup>、QU 等<sup>[9]</sup>和甘兴旺等<sup>[10]</sup>提出基于多传感器的数据融合算法,实现在图像中识别船舶身份信息。

但现有研究仍有以下不足。

1) 单一传感器的监测方法获取船舶信息不完整,存在粗差、误差且无法自校正,桥区水域环境感知能力不足。

2) 现有基于视觉和 AIS 数据的融合算法处理桥区水域频繁出现的船舶重叠现象有一定困难,缺少对桥区危险船舶自动识别、监测的有效方法。

针对上述问题,提出视觉和 AIS 数据融合的桥区水域船舶监测方法。分析桥区水域交通环境的特点,改进文献[11]提出的 YOLOv5(You Only Look Once version 5)目标检测算法,结合文献[12]提出边缘检测算法提取船舶轮廓信息,构建桥区水域基于单目视觉的船舶三维定位模型,将 AIS 数据补全和过滤,提出一种视觉与 AIS 数据融合算法。最后构建桥区船舶异常行为检测模型,自动识别、监测桥区危险船舶。

## 1 视觉数据预处理

视觉数据预处理是利用视频信号获取船舶图像数据,采用改进 YOLOv5 目标检测算法获取船舶目标检测框,利用 Canny 边缘检测算法提取检测框中的船舶轮廓信息,并修正船舶检测框以获得高精度数据,船舶目标提取流程见图 1。

### 1.1 YOLOv5 目标检测算法

YOLOv5 是一种基于卷积神经网络的目标检测算法,主要包括主干网络、颈部和预测端等 3 个部分。其中,预测端利用颈部部分生成的特征图进行模型预测,并使用完全交并比(Complete Intersection Over Union, CIoU)损失<sup>[13]</sup>函数计算边框回归损失值对模型进行回归优化。最后,使用非极大抑制算法获取船舶目标框信息。

桥区水域船舶种类较多,船舶真实框宽高比无

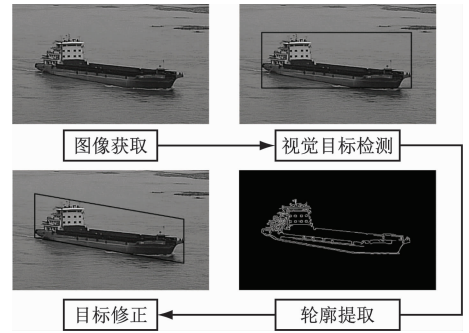


图 1 船舶目标提取流程

Fig. 1 Ship target extraction process

固定规律,传统边框回归损失易误判船舶真实框,导致船舶错检。且桥区通航水域狭窄,易出现船舶重叠,传统非极大抑制算法无法有效处理船舶重叠,造成船舶漏检。针对上述两种问题,改进边框损失函数和非极大抑制算法。

### 1.2 边框回归损失函数改进

传统边框回归损失函数采用完全交并比损失计算预测框和真实框宽高比的差值。当模型预测框和船舶真实框的宽高比成线性比例时,惩罚因数会失效,阻碍模型继续进行回归优化,造成误判船舶真实框。

高效交并比(Efficient Intersection Over Union, EIOU)损失函数<sup>[14]</sup>通过拆分完全交并比损失函数的预测框和真实框宽高比的惩罚因数,计算预测框和真实框的宽和高之间的差值,使预测框能更加准确地回归到真实框,见式(1)。

$$L_{EIoU} = L_{IoU} + L_{dis} + L_{asp} = 1 - IoU + \frac{p^2(b_o, b_{gt})}{c^2} + \frac{p^2(w_o, w_{gt})}{C_w^2} + \frac{p^2(h_o, h_{gt})}{C_h^2} \quad (1)$$

式(1)中: $p^2(w_o, w_{gt})$ 和 $p^2(h_o, h_{gt})$ 分别为预测框与真实框宽度和高度的差值; $C_w$ 和 $C_h$ 分别为预测框与真实框最小外接矩形的宽度和高度。

CIoU 与 EIOU 损失回归对比见图 2。图 2 中:随着目标检测算法迭代次数的增加,高效交并比损失函数在计算损失回归过程中可同时调整预测框的宽度和高度,能更准确地匹配船舶目标的形状和位置。

### 1.3 非极大抑制值算法改进

传统非极大抑制值算法采用抑制删除的方式剔除冗余预测框,会导致部分重叠目标被漏检。

软性非极大抑制值算法<sup>[15]</sup>对重叠的预测框采取衰减分数的方式,并将其保留到集合中进行下一次筛选,能更加有效地处理重叠目标见式(2)。

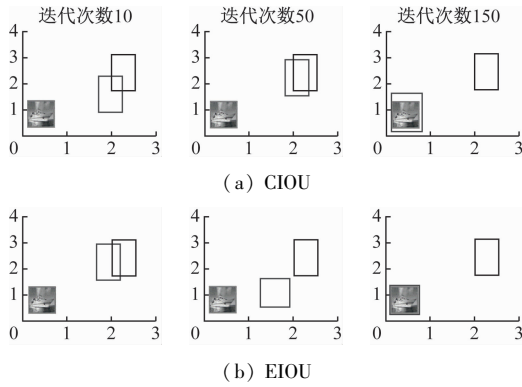


图2 CIOU与EIOU损失回归对比

Fig.2 Comparison of CIOU and EIOU loss regression

$$S_i = \begin{cases} S_i, & \text{IoU}(M, b_i) < N_i \\ S_i(1 - \text{IoU}(M, b_i)), & \text{IoU}(M, b_i) \geq N_i \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $M$ 和 $b_i$ 分别为候选框和第 $i$ 个预测框; $\text{IoU}(M, b_i)$ 为两框之间的交并比; $S_i$ 为 $b_i$ 对应的置信度分数; $N_i$ 为预设阈值。

## 2 AIS数据预处理

AIS数据预处理通过数据补全方法解决AIS与视觉数据时间不同步的问题,使用数据过滤方法筛选桥区航道监视水域和摄像机探测范围以外的冗余AIS船舶数据,以减少数据融合误差。

### 2.1 数据补全

数据补全是基于图像时间戳(图像被捕捉时间)信息采用船位推算预测短时间船舶位置,补全AIS播发间隔时间内缺失的船舶位置信息见式(3)。

$$\begin{cases} \varphi_t = \varphi_0 + (v_0 \times \sin\psi_0 \times p_1 \times \Delta t) \\ \lambda_t = \lambda_0 + (v_0 \times \cos\psi_0 \times p_2 \times \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta t = t_V - t_A \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: $t_V$ 和 $t_A$ 分别为图像和AIS信息时间戳; $\Delta t$ 为两者之间的间隔; $(\varphi_0, \lambda_0)$ 为船舶初始时刻船位, $\psi_0$ 和 $v_0$ 分别为考虑风和流后的船舶对地航向和对地航速; $p_1$ 和 $p_2$ 分别为初始时刻子午椭圆和纬线圆曲率; $(\varphi_t, \lambda_t)$ 为时间戳 $t_V$ 时刻船位。

### 2.2 数据过滤

桥区水域监视区域以摄像机探测范围为标准,即只监视该范围内船舶,自动过滤该范围外AIS信息见式(5)。

$$I_M = \begin{cases} 0, & (\varphi_t, \lambda_t) \notin (A_V \cap A_A) \\ 1, & (\varphi_t, \lambda_t) \in (A_V \cap A_A) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $I_M$ 为监视范围判断指标; $(\varphi_t, \lambda_t)$ 为相机时间戳 $t$ 时刻的船位; $A_V$ 和 $A_A$ 分别为摄像机探测

和桥区航道监视范围。

AIS数据过滤流程见图3。具体步骤如下:

1) 输入清洗过的AIS数据,筛选出图像时间戳30 s范围内的 $n$ 条AIS船舶信息。

2) 获取目标船舶位置、AIS时间戳,并预测其在相机时间戳下的船位。

3) 判断目标船舶是否在桥区水域监视和摄像机探测范围之内。若是,保留目标船舶信息,并更新其预测后的位置信息;反之,则删除目标船舶信息。

4) 反复迭代步骤1)~步骤3)过程,直至AIS信息筛选完成。

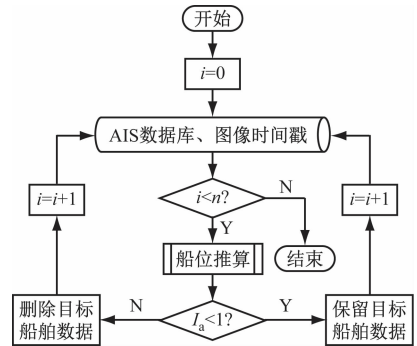


图3 AIS数据过滤流程

Fig.3 AIS data filtering process

## 3 视觉与AIS数据融合

数据融合是通过处理不完美的原始数据,生成更加全面、可靠和准确信息的方法<sup>[16]</sup>。将同一时刻的船舶图像定位、AIS位置信息转换到同一坐标系,考虑到桥区航道禁止追越,在同一方向和断面基本不出现2艘以上近距离船舶,采用距离、方位相关度匹配方法,将视觉检测获取的船舶净空高度信息与AIS船舶航向、航速、船位和身份等信息进行互补融合。

### 3.1 坐标转换

分别建立图像坐标系( $O_w-u-v$ )、图像物理坐标系( $O-x-y$ )、相机坐标系( $O_c-X_c-Y_c-Z_c$ )和假定世界坐标系( $O_w-X_w-Y_w-Z_w$ ),结合文献<sup>[17]</sup>获取相机内外参数,实现图像坐标系与世界坐标系之间的转换。

AIS船舶目标位置在世界坐标系的坐标( $x_{wa}, y_{wa}, z_{wa}$ )可由其经纬度( $\lambda, \varphi$ )进行转换见式(6)。

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wa} \\ y_{wa} \\ z_{wa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \times \arccos[\cos\varphi_w \times \cos(\lambda - \lambda_w) + \sin^2\varphi_w] \\ R \times \arccos[\cos^2\varphi_w \times \cos(\lambda - \lambda_w) + \sin^2\varphi_w] \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中: $\gamma$ 为摄像机零方位相对于正北方

向的角度; $(\lambda_w, \varphi_w)$ 为摄像机经纬度坐标; $R$ 为地球半径,取值为 6 371 000 m。

### 3.2 空间定位

基于小孔成像原理<sup>[18]</sup>构建桥区水域单目相机

测量模型,见图 4。

图 4 中: $O_c$ 、 $Z_c$ 、 $X_w$ 、 $O_w$  和  $H_c$  分别为摄像机镜头光心、光轴、零方位、地理位置坐标和水面以上高度; $f$  和  $\alpha_p$  分别为摄像机的焦距和俯仰角。

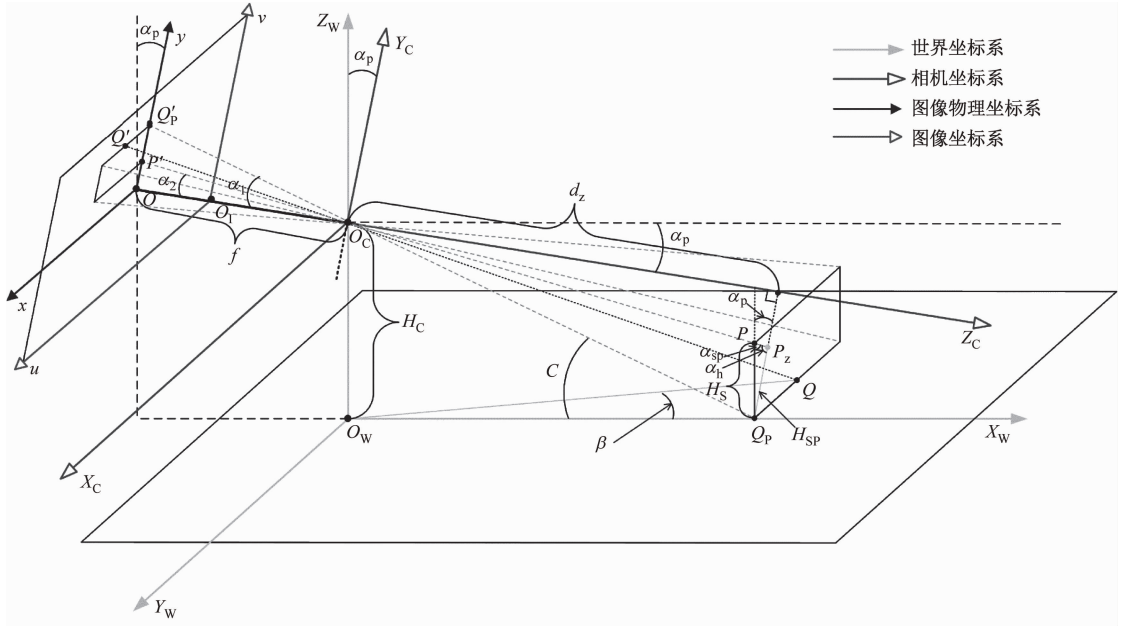


图 4 桥区水域单目相机测量模型

Fig. 4 Monocular camera measurement model of bridge waters

$Q$  点  $(x_w, y_w, z_w)$  为被测目标船舶在世界坐标系的位置,其在图像平面内的映射点  $Q'$  用帧存坐标  $(u_q, v_q)$  来表示。 $d_z$  为  $Q$  点在  $Z_c$  轴下的垂直投影长度为

$$d_z = \frac{H_c}{\sin(\alpha_p + \alpha_1)} \cos \alpha_1 \quad (8)$$

$$\alpha_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{v_q - h_1/2}{f}\right) \quad (9)$$

式(9)中: $h_1$  为图片像素高度。

$H_s$  为船舶水面以上高度,即净空高度为

$$H_s = \frac{H_{sp}}{\sin \alpha_{sp}} \cdot \sin \alpha_h \quad (10)$$

$$H_{sp} = |y_{cq} - y_{cp}| \quad (11)$$

$$\begin{cases} \alpha_{sp} = \pi - \alpha_h - \alpha_p \\ \alpha_h = \frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}\left(\frac{v_p - h_1/2}{f}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式(11)~式(12)中: $y_{cq}$  和  $y_{cp}$  分别为像素点  $Q'_p(u_{qp}, v_{qp})$  和像素点  $P'(u_p, v_p)$  在相机坐标系下的高度信息。

被测目标船舶位置经坐标转换后与摄像机的距离  $d_v$  和方位角  $\beta_v$  的计算分别为

$$d_v = \sqrt{(x_w)^2 + (y_w)^2} \quad (13)$$

$$\beta_v = \operatorname{atan}\left(\frac{x_w}{y_w}\right) + \gamma \quad (14)$$

AIS 目标船舶位置经坐标转换后与摄像机的距离  $d_A$  和方位角  $\beta_A$  的计算分别为

$$d_A = \sqrt{(x_{wA})^2 + (y_{wA})^2} \quad (15)$$

$$\beta_A = \operatorname{atan}\left(\frac{x_{wA}}{y_{wA}}\right) \quad (16)$$

### 3.3 数据融合

视觉与 AIS 数据中方位、距离相关度为

$$\begin{bmatrix} R_o \\ R_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_o \times |d_v - d_a| \\ k_d \times |\beta_v - \beta_a| \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)中: $R_o$  和  $R_d$  分别为方位和距离相关度; $k_o$ 、 $k_d$  为其权重系数。

对于一个视觉目标检测框先获取其位置信息,将该框与所有 AIS 目标船舶依次计算方位、距离相关度,若存在没有满足关联条件的 AIS 目标,则进入下一个匹配循环,数据融合算法流程见图 5。

具体步骤如下:

- 1) 输入视觉、AIS 数据;
- 2) 进行数据预处理、坐标转换、空间定位分别获取视觉和 AIS 船舶位置信息;
- 3) 计算方位、距离相关度,若在预设阈值内则保留数据,反之删除数据;
- 4) 判断是否有多个符合关联条件的 AIS 船舶数据,若是进入步骤 5),反之,则将该组数据关联为

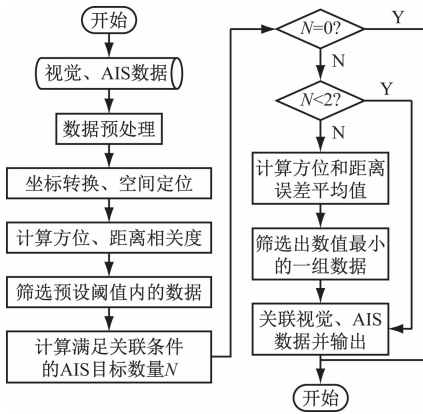


图5 数据融合算法流程

Fig. 5 Data fusion algorithm process

一组,并输出关联结果。

5) 计算视觉与AIS的船舶方位、距离误差平均值,关联数值最小的一组AIS数据并输出关联结果。

## 4 桥区水域船舶异常行为监测

桥区水域船舶异常行为监测是基于构建桥区水域数字化交通环境模型,利用多源融合数据分析船舶航行时的运动状态,通过最终评价指标判断船舶行为是否异常。

### 4.1 桥区船舶异常行为

研究中将与桥墩或桥梁底部存在触碰风险的船舶定义为桥区异常行为船舶,其评价指标为

$$I = \begin{cases} 0, & I_H, I_C \neq 1 \\ 1, & I_H, I_C = 1 \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $I$ 为船舶异常行为评价指标; $I_H$ 和 $I_C$ 分别为船舶超高和船桥碰撞危险检测指标。当存在上面任意一种异常行为,则认为目标船舶为桥区水域危险船舶,即 $I=1$ 。

### 4.2 桥区水域数字化交通环境构建

基于道路交通最小安全距离的思想,构建桥区水域三维安全距离模型,见图6。

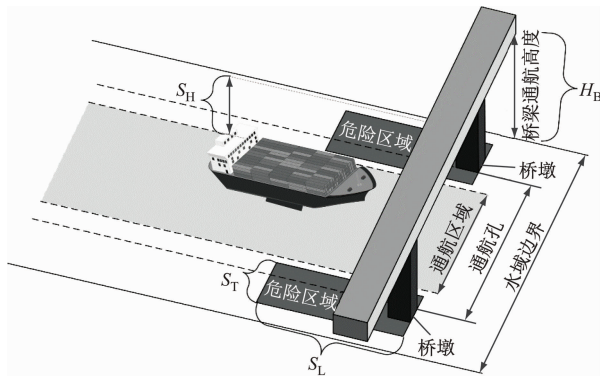


图6 三维安全距离模型

Fig. 6 Three-dimensional safe distance model

图6中: $S_H$ 为桥梁垂向最小安全距离,根据《内河通航标准》取值为2m; $S_T$ 和 $S_L$ 分别为桥梁上游横向和纵向最小安全距离,计算公式为

$$S_T = 2 \times 0.6(B_S + L \sin \beta) + B_L \quad (19)$$

$$S_L = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + L_S + L_B \quad (20)$$

式(19)和式(20)中: $B_S$ 、 $\beta$ 和 $B_L$ 分别为船舶的宽度、漂角和桥墩宽度; $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $L_S$ 和 $L_B$ 分别为船舶倒车制动减速距离、拖锚淌航距离、风流增量、安全余量、船长和桥墩长度。

### 4.3 桥区船舶超高检测

液位雷达是利用电磁波向桥区水面发射,检测发射波和放射波的时差,计算液面高度<sup>[19]</sup>,将其安装在桥梁底部可获取桥梁通航净空高度,液位雷达测量原理见图7。

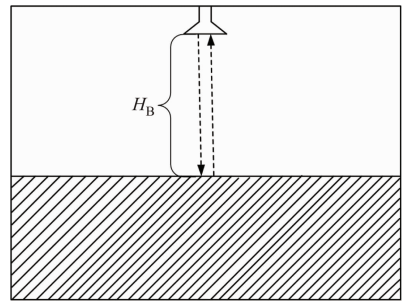


图7 液位雷达测量原理

Fig. 7 Liquid level radar measurement principle

利用融合数据、液位雷达分别获取船舶净空高度和液面高度,结合桥区三维安全距离模型检测船舶是否超高,有

$$I_H = \begin{cases} 0, & H_B - H_S > S_H \\ 1, & H_B - H_S \leq S_H \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中: $H_S$ 为船舶净空高度;若船舶通航富余高度大于桥梁垂向最小安全距离,认为船舶没有超高行为,即 $I_H=0$ ;反之,则认为船舶存在超高行为,即 $I_H=1$ 。

### 4.4 船桥碰撞危险检测

获取融合数据中船位信息并使用船位推算预测短时间内船舶轨迹,结合桥区三维安全距离模型检测船舶是否具有碰撞危险,有

$$I_C = \begin{cases} 0, & (\varphi_{t+1}, \lambda_{t+1}) \notin (A_V \cup A_A) \\ 1, & (\varphi_{t+1}, \lambda_{t+1}) \in (A_V \cup A_A) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中: $A_V$ 和 $A_A$ 分别为左和右上游桥墩危险区域; $(\varphi_{t+1}, \lambda_{t+1})$ 为预测船位;当AIS预测船位位于桥墩危险区域内,认为船舶存在船桥碰撞危险行为, $I_C=1$ ,反之,则认为船舶不存在船桥碰撞危险行为, $I_C=0$ 。

## 5 试验结果与分析

研究以重庆白居寺长江大桥上游为试验区域,使用 Python 和 QT 平台进行目标检测评估、数据融合试验,测试提出的模型改进以及融合算法性能,最后对桥区水域船舶自动监测方法进行仿真试验分析。

为获取桥区水域船舶图像数据,利用安装在桥梁底部的摄像机进行拍摄,并测量其详细参数以构建桥区水域单目相机测量模型,摄像机参数见表 1。

表 1 摄像机参数

Tab.1 Camera parameters

参数	数值
图像分辨率/px	(1 920,1 080)
水面以上高度/m	51.69
零方位/(°)	161.60
俯仰角/(°)	4.41

根据桥区交通环境和相机探测范围划分桥区水域监视范围见图 8,以筛选 AIS 船舶信息。

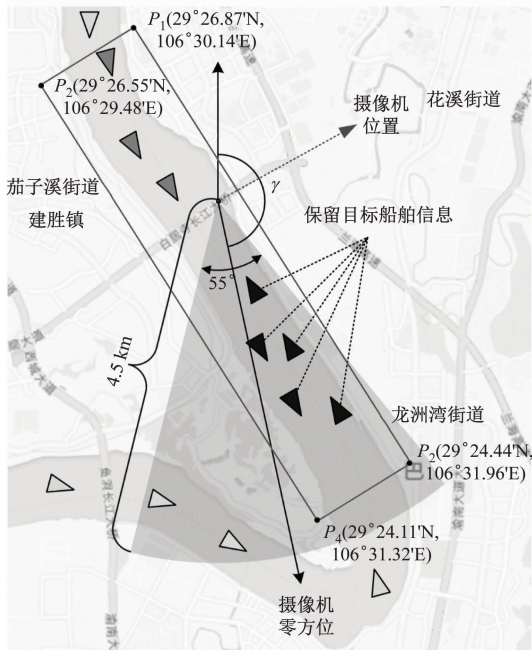


图 8 桥区水域监视范围

Fig. 8 Bridge area waters monitoring range

图 8 中:矩形区域和扇形区域分别为桥区水域航道监视范围和摄像机探测范围。

### 5.1 目标检测模型评估

使用精准率  $P$  (Precision)、召回率  $R$  (Recall)、平均精度均值 (mean Average Precision, mAP) 和检测速率 (Frames Per Second, FPS) 作为目标检测模

型的评价指标,其中  $mAP@.5:.95$  表示交并比阈值从 0.50 开始、以 0.05 的步长增长到 0.95 所对应的平均精度均值,计算为

$$P = \frac{S_{TP}}{S_{TP} + S_{FP}} \times 100\% \quad (23)$$

$$R = \frac{S_{TP}}{S_{TP} + S_{FN}} \times 100\% \quad (24)$$

$$mAP = \frac{\sum_{i=1}^c AP_i}{c_n} \quad (25)$$

$$AP = \int_0^1 PdR \quad (26)$$

式(23)~式(26)中: $S_{TP}$ 、 $S_{FP}$ 和 $S_{FN}$ 分别为预测正确、错误和遗漏的船舶目标; $c_n$ 为船舶类别数量,考虑到只需检测船舶目标而无需分类,研究取 $c_n = 1$ 。

采集桥区水域附近 6 750 张船舶图像用于模型的训练和验证,并基于公开数据 Sea Ship 测试不同模型对船舶目标的检测性能,主要包括:

- 1) YOLOv3 模型;
- 2) 传统的 YOLOv5 模型;
- 3) 改进的 YOLOv5 模型,船舶目标检测性能对比见表 2。

表 2 船舶目标检测性能对比

Tab.2 Comparison of ship target detection performance

模型	$P/\%$	$R/\%$	$mAP@.5:.95$ / %	帧率/ fps
YOLOv3	98.3	98.1	83.5	67.1
YOLOv5	98.4	98.2	83.9	85.6
改进 YOLOv5	99.1	98.9	84.4	79.6

由表 2 可知:基于同一组测试数据集,改进算法的平均精度均值为 84.4%,相较于传统 YOLOv5 算法和 YOLOv3 算法, $mAP@.5:.95$  分别提升 0.5% 和 0.9%。同时,改进 YOLOv5 算法与传统 YOLOv5 算法相比,帧率只低了 5 帧,但  $P$  和  $R$  都提高了 0.7%,在能满足桥区水域实时监控的条件下降低船舶漏检率和误检率,提升对桥区水域船舶重叠的检测能力,船舶目标检测效果对比见图 9。

### 5.2 数据融合试验

数据融合试验用于验证第 3 节提出视觉与 AIS 融合算法的性能,研究中采用关联准确率  $T_{CR}$  和关联错误率  $F_{CR}$  指标进行评估。其中, $T_{CR}$  为视觉船舶目标与 AIS 船舶目标数据正确关联的比例; $F_{CR}$  为视觉船舶目标与 AIS 船舶目标数据错误关联的比例,有

$$T_{CR} = \frac{S_C}{S} \times 100\% \quad (27)$$

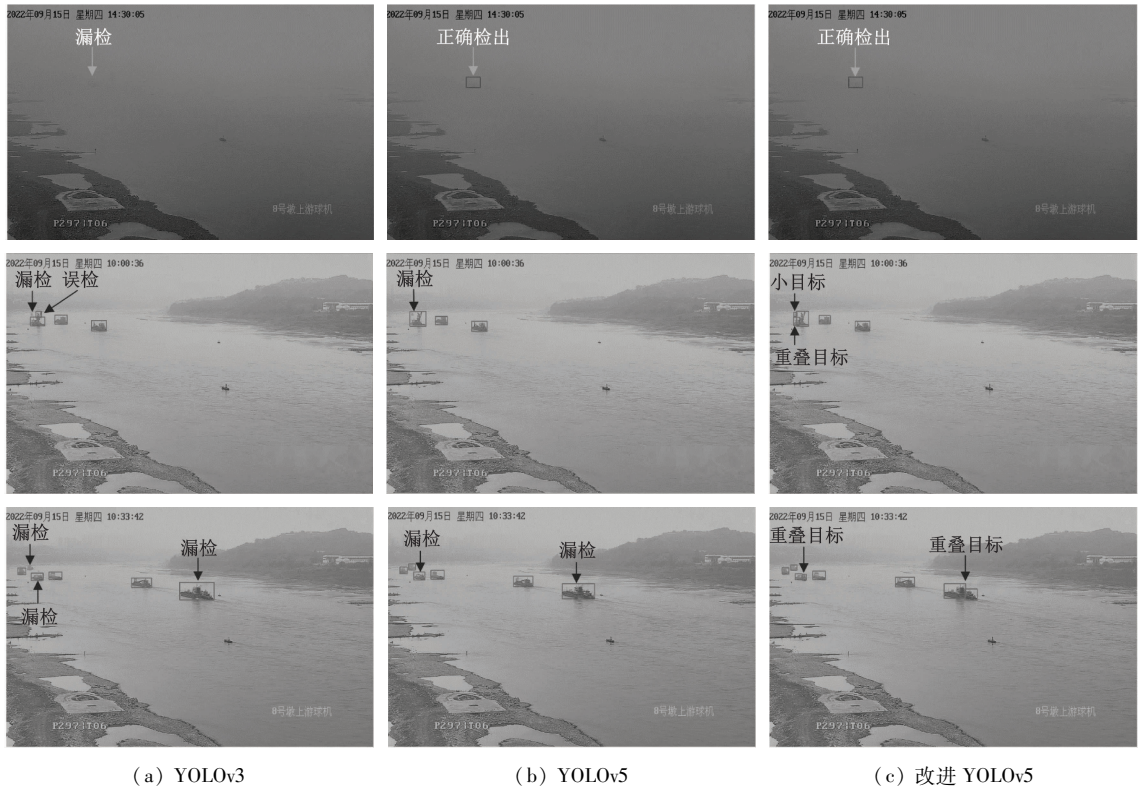


图 9 船舶目标检测效果对比

Fig. 9 Comparison of ship target detection effect

$$F_{CR} = 1 - T_{CR} \quad (28)$$

式(27)~式(28)中: $S$ 为视觉和AIS数据关联后的样本总数; $S_c$ 为视觉和AIS数据关联成功的船舶样本总数。

为验证提出融合算法的性能,随机采集桥区水域 2 000 帧图片,收集并筛选在图像时间戳 30 s 范围内的 AIS 数据作为试验数据集,分别设置方位和距离阈值为  $1^\circ$  和 85 m,以单船和多船为试验场景并考虑目标距离和重叠因素进行数据融合试验。

在传感器收集到的数据中,视觉检测和 AIS 收集到的船舶信息数量分别为 4 231 条和 6 377 条。其中,视觉检测中单船、多船目标统计数量分别为 1 029 艘、3 202 艘,数据融合试验结果分别见表 3 和表 4。

表 3 单船场景下的融合试验

Tab. 3 Fusion experiments in a single ship scenario

距离/km	$T_{CR}/\%$	$F_{CR}/\%$
0~3.0	98.89	1.11
3.0~4.5	96.87	3.13
全部范围	98.45	1.55

由表 3 和表 4 可知:提出的融合算法在关联错误率指标上还存在一定的挑战。由于相机测量时具

表 4 多船场景下的融合试验

Tab. 4 Fusion experiments in a multi-ship scenario

距离/km	交并比/ $\%$	$T_{CR}/\%$	$F_{CR}/\%$
	$\leq 0$	91.66	8.34
0~3.0	$> 0$	89.89	10.11
	$> 50$	87.93	12.07
	$\leq 0$	89.23	10.77
3.0~4.5	$> 0$	87.54	12.46
	$> 50$	85.79	14.21
	全部范围	91.29	8.71

有一定的误差,尤其是对于测量远距离船舶和船舶重叠的情况,使在数据关联过程中存在难以准确区分的情况,导致一些船舶目标的视觉与 AIS 信息关联失败。数据融合算法在单船和多船情况下的整体关联准确率分别达到 98.43% 和 91.26%,视觉与 AIS 数据融合算法能有效提升在桥区水域复杂环境下的感知能力,不同场景下的数据融合效果见图 10。

### 5.3 桥区船舶行为监测

根据第 5.2 节试验结果,筛选上午 6 时至 7 时和下午 4 时至 5 时、在桥区 1.5 km 监视范围内 4 艘船舶的视觉与 AIS 融合数据见图 11。



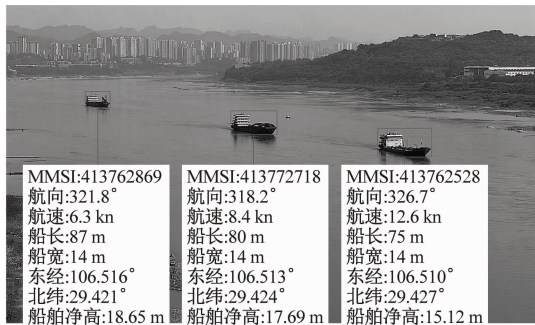
(a) 单船 (b) 多船

图 10 不同场景下的数据融合效果

Fig.10 Data fusion effect in different scenarios



(a) 单船



(b) 多船

图 11 视觉与 AIS 融合数据

Fig.11 Vision and AIS fusion data

图 11 中:信息框为视觉与 AIS 融合数据,基于此数据分别获取每艘船舶的动、静态信息,并分别计算他们在桥区的横向、纵向安全距离,以构建桥区三维安全距离模型,见表 5。

利用液位雷达测得桥区通航高度为 56.79 m,考虑桥区风、流影响采用船位推算预测 2 min 后船位,结合表 5 桥区水域三维安全距离构建模型,最后计算每艘目标船舶与桥区危险区域的距离见表 6。

由表 6 可知:4 艘船舶与桥墩危险区域范围距离均大于 200 m,与桥梁底部危险区域范围距离均超过 35 m,无超高、船桥碰撞危险异常行为。

表 5 桥区三维安全距离

Tab.5 Three-dimensional safe distance of bridge area

(单位:m)

MMSI	$S_T$	$S_L$	$S_H$
413842032	643.80	29.46	
413762528	633.64	29.76	2.00
413772718	638.75	29.08	
413762869	721.90	30.17	

表 6 目标船舶与桥区危险区域距离

Tab.6 Distance between target ship and bridge

hazard area (单位:m)

MMSI	距桥墩危险区域距离		距桥梁底部危险区域距离
	左桥墩	右桥墩	
413842032	237.37	403.49	41.00
413762528	356.56	285.13	41.67
413772718	271.57	375.87	39.10
413762869	315.64	320.32	38.14

## 6 结束语

本研究提出一种桥区水域视觉与 AIS 数据融合的船舶自动监视方法,用于保障桥区通航水域安全。通过分析桥区水域环境特点,改进 YOLOv5 目标检测模型,提高对桥区水域小目标船舶和船舶重叠的检测能力。构建桥区水域单目相机测量模型,实现对船舶目标距离、方位和高度的三维定位,提出一种基于距离、方位相关度匹配的视觉与 AIS 融合算法。通过构建桥区水域三维空间安全距离模型,监测桥区船舶运动状态,识别桥区危险船舶。鉴于相机测量的误差和数据融合的精度问题,后续研究中将进一步探索相机误差校正以及连续跟踪目标的方法,以提高船舶监测的准确性和稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] 柳立春. 基于卡尔曼滤波的长江武汉大桥段交通流预报[D]. 大连:大连海事大学, 2018.  
LIU L C. Traffic flow forecast of Wuhan Yangtze River Bridge based on Kalman filter [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. (in Chinese).
- [2] 魏晓阳. 基于 AIS 数据的桥区水域船舶碰撞预警系统的研究与实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.  
WEI X Y. Study and realization of ship collision early-warning system in bridge waterways based on AIS data [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

- (in Chinese).
- [3] 雷进宇, 初秀民, 徐武雄. 基于 AIS 的桥区船舶轨迹三维可视化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 88-94.
- LEI J Y, CHU X M, XU W X. 3D visualization model of vessel trajectory in bridge area based on AIS [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 88-94. (in Chinese).
- [4] 潘晋, 汪咏, 黄义飞, 等. 基于 AIS 数据的船桥碰撞概率评估方法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 109-114.
- PAN J, WANG Y, HUANG Y F, et al. Study on assessment method of vessel-bridge collision probability based on AIS data[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 109-114. (in Chinese).
- [5] 王炳德, 杨柳涛. 基于 YOLOv3 的船舶目标检测算法[J]. 中国航海, 2020, 43(1): 67-72.
- WANG B D, YANG L T. Ship target detection algorithm based on YOLOv3[J]. Navigation of China, 2020, 43(1): 67-72. (in Chinese).
- [6] 云霄, 肖刚. 基于 Camshift 的多特征自适应融合船舶跟踪算法[J]. 光电工程, 2011, 38(5): 52-58.
- YUN X, XIAO G. Camshift ship tracking algorithm based on multi-feature adaptive fusion [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 52-58. (in Chinese).
- [7] 徐海祥, 吴卫国, 余晋刚, 等. 船-桥避碰监测预警系统研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 151-156.
- XU H X, WU W G, YU J G, et al. Study on ship-bridge collision avoidance system [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 151-156. (in Chinese).
- [8] LU Y, MA H, SMART E, et al. Fusion of camera-based vessel detection and AIS for maritime surveillance [C]//2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Portsmouth, United Kingdom: IEEE, 2021: 1-6.
- [9] QU J, GUO Y, LU Y, et al. Intelligent maritime surveillance framework driven by fusion of camera-based vessel detection and AIS data [C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Macau: IEEE, 2022: 2280-2285.
- [10] 甘兴旺, 魏汉迪, 肖龙飞, 等. 基于视觉的船舶环境感知数据融合算法研究[J]. 中国造船, 2021, 62(2): 201-210.
- GAN X W, WEI H D, XIAO L F, et al. Research on vision-based data fusion algorithm for environment perception of ships [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(2): 201-210. (in Chinese).
- [11] JOCHER G. Yolov5 [EB/OL]. [2020-08-10]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- [12] 姜苗苗, 史国友, 许栓梅, 等. 基于自适应  $K$  均值聚类和霍夫变换的船舶干舷视觉检测[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(2): 34-39.
- JIANG M M, SHI G Y, XU S M, et al. Ship freeboard visual detection based on adaptive  $K$ -means clustering and hough transform [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42(2): 34-39. (in Chinese)
- [13] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019.
- [14] ZHANG Y F, REN W Q, ZHANG Z, et al. Focal and efficient IoU loss for accurate bounding box regression [J]. Neurocomputing, 2022, 506: 146-157.
- [15] BODLA N, SINGH B, CHELLAPPA R, et al. Soft-NMS-improving object detection with one line of code [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE, 2017: 5562-5570.
- [16] MENG T, JING X Y, YAN Z, et al. A survey on machine learning for data fusion [J]. Information Fusion, 2020, 57(5): 115-119.
- [17] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] 马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- MA S D, ZHANG Z Y. Computer vision algorithms and the theoretical calculation based [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese).
- [19] HEDDALLIKAR A, PINTO R, RATHOD A H. Calibration of X band FMCW radar level probe [C]//2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). New York: IEEE, 2021: 1-8.