

引用格式: 熊攀, 齐向东, 孙岩林, 等. 多特征融合的 AUV 末端视觉自主对接技术研究 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 112-124.

XIONG P, QI X D, SUN Y L, et al. Multi-feature fusion-based terminal visual autonomous docking technology for AUV[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 112-124 (in both Chinese and English).

多特征融合的 AUV 末端视觉 自主对接技术研究



扫码阅读全文

熊攀, 齐向东*, 孙岩林, 赵正阳, 秦钜灏

中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051

摘要: [目的] 为解决自主水下航行器(AUV)在复杂水下环境中自主对接精度不足的问题, 提出一种基于多特征融合的视觉导引方法。 [方法] 依托实验室自主研发的四桨无舵矢量推进型 AUV, 使用暗通道先验去雾算法进行图像增强, 结合改进的 Canny 边缘检测与颜色阈值分割实现多特征融合, 利用最小包围圆法进行圆心定位, 通过坐标系转换解算相对位姿完成对接。 [结果] Unity 3D 仿真和水池实验结果表明, 均值差和均方根误差均呈现随对接距离接近而减小的距离相关性, 距离越近, 视觉测距越准确, 对接精度越高, 对接距离小于 2 m 时位姿精度误差小于 5 cm, 总体对接成功率为 88%。 [结论] 所提方法满足 AUV 自主对接任务中对接精度要求, 为水下装备自主回收提供了高鲁棒性的解决方案。

关键词: 自主水下航行器; 自主对接; Canny 边缘检测; 颜色阈值分割; 多特征融合

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04381

0 引言

自主水下航行器(AUV)凭借低成本、高机动性与强可操作性, 在海底测绘、海洋环境监测、海洋资源勘查、打捞救助及定位跟踪等方面发挥着关键作用, 已成为海洋探索的重要装备^[1]。

尽管 AUV 技术在不断发展完善, 实际应用仍面临多项挑战: 1) AUV 作为一个嵌入式系统, 在复杂水下环境中执行精确检测任务时, 其传感器等设备需要定期维护和校准; 2) AUV 运行能耗较高, 自身携带的电源容量有限, 导致续航能力差, 水下常驻作业难以实现持续能源补充^[2]; 3) 水下环境中强噪声干扰及传输媒介限制导致水下数据传输速率慢, 在任务指令更新和数据下载时需要上浮母船进行操作, 易受风浪影响, 隐蔽性差, 难以满足 AUV 大规模部署和执行隐蔽任务的需求^[3]。为了提升 AUV 运维效率, 确保能源补给并减少对水面母船的依赖, 需开展 AUV 水下自主对接技术研究。

随着光学传感器技术的不断发展和图像处理技术、计算性能的持续提升, 水下视觉图像质量得到显著提高, 畸变和噪声问题得到有效控制, 为 AUV 高精度对接奠定了技术基础。

学者在利用视觉进行水下对接方面开展了一些研究。Wang 等^[4]提出一种基于生成对抗网络的水下图像复原模型, 通过训练实现了较好的去噪和色彩校正, 但在实时性方面难以满足 AUV 动态对接需求。Wang 等^[5]提出了类条件注意力生成对抗网络, 该网络通过构建包含不同水域条件的数据集, 利用类条件标签引导生成器学习多对一的映射关系, 通过通道和空间注意力模块融合特征增强水下图像的颜色和细节。但该系统在复杂水域中仍存在颜色校正不足问题。Xu 等^[6]提出了基于立体视觉的 AUV 对接导航方法, 通过融合自适应选择算法、几何串行算法和滤波器算法, 实现对光信标的精确检测与识别。但其计算复杂度较高, 仅适用于高算力场景。Ren 等^[7]提出基于单目视觉的水下自重构 AUV 自主对接

收稿日期: 2025-02-22 修回日期: 2025-05-18 网络首发时间: 2025-07-29 15:15

基金项目: 山西省科技创新人才团队专项资金资助(202304051001030); 水声对抗技术国防科技重点实验室基金资助项目(2023JCJQLB3302)

作者简介: 熊攀, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 水下无人潜航器自主对接技术。E-mail: 18175791992@163.com

齐向东, 男, 1967 年生, 教授。研究方向: 水下无人潜航器系统技术。E-mail: zbdxqxd@163.com

*通信作者: 齐向东

方法,结合蓝绿光信标引导和 Aruco 标记,实现从长距离到近距离的精确引导,但其深度估计精度有限,在低光照环境中的鲁棒性不足。Figueiredo 等^[8]提出基于单目视觉的悬停 AUV 自主对接系统 MViDO,集成姿态估计、跟踪和引导模块,利用单个摄像头和 3 个球形彩色标记目标实现对接站的定位和跟踪,在部分遮挡和异常值情况下仍保持较高精度,但该系统依赖特定标记,仅适用于悬停 AUV,应用范围受限。

基于上述背景,本文拟对多特征融合的 AUV 末端视觉自主对接技术进行研究。以实验室自主研发的四桨无舵矢量推进型 AUV 为研究对象,采用蓝色环形灯带为水下对接导引标识光源,通过暗通道先验去雾算法提高图像细节和质量,采用权重合并阈值自整定 Canny 边缘检测算法和颜色阈值分割算法提取水下光源特征,提高不同情况下目标轮廓识别精度。随后通过最小包围圆法确定对接装置中心坐标,并进行坐标转换,解算出对接装置与 AUV 的相对位置。最后开展 Unity 3D 仿真和多次水池实验,验证该方案提高 AUV 水下自主对接成功率的有效性。

1 水下对接导引策略

AUV 与水下对接装置的对接过程通常依据两者间距划分为 3 个阶段:远程导航阶段、中程导航阶段、近程导引阶段^[9]。在远程导航阶段,使用水声定位方法或多源信息融合导航策略,实现对对接装置的大范围搜索和接近。在中程导航阶段,采用超短基线定位系统(USBL)或长基线定位系统(LBL)进行声学定位导航^[10-11]。远、中程阶段对导航精度要求较低,近程导引阶段应采用更高导航精度的传感器,精确测定 AUV 与对接装置之间的相对位置和姿态关系,确保成功对接。表 1 列出主要水下对接导航传感器,包括声学传感器、电磁传感器、光学传感器以及视觉传感器^[12-15]。

表 1 导航传感器性能列表

Table 1 Performance specifications of navigation sensors

传感器	作用距离/m	导航精度	精度影响因素
声学	2000	低	信号延迟, 噪声干扰
电磁	<20~30	较高	设备本身的电磁噪声, 外磁场干扰
光学	<10~28	较高	背景光变化, 海水浑浊程度, 光源强弱
视觉	<10~28	较高	分辨率, 镜头畸变

由表 1 可知,使用声学传感器进行声学导引会存在信号延迟、噪声干扰、近距离精度较差的问题,仅适用于中远距离对精度要求不高的阶

段;电磁传感器易受到内外磁场干扰,且该传感器尺寸较大、技术复杂,在目前各类对接场景中基本不用该类传感器^[16];光学传感器依赖单一光信号的强度或飞行时间检测,其功能局限于测距或光斑定位,难以克服海水浑浊程度以及背景光和海水散射的影响,探测距离十分有限;视觉传感器本质上属于光学传感器的子集,但其功能已从单纯的光信号测量拓展至图像采集与解析,通过算法处理不仅能提取几何特征,还可解析颜色、纹理等多模态数据,具备更强的环境感知与自适应能力^[17-18]。所以,视觉传感器成为较优选择。

2 水下对接实施方案

2.1 水下图像预处理

根据 Jaffe-McGlamery 水下光学成像模型可知,水下图像可以由直接衰减、前向衰减和后向衰减 3 个分量线性叠加得到。直接衰减分量表示由物体反射且未经水中悬浮粒子散射进入相机的光线,前向衰减分量表示由物体反射但经水中悬浮粒子散射进入相机的光线,后向衰减分量表示自然光经水中悬浮粒子散射进入相机的光线^[19]。受水深与水质影响,这些分量在进入相机之前产生强烈衰减,导致相机拍摄的水下图像出现颜色偏差、对比度损失、细节模糊、亮度不均匀、杂光和眩光等问题,严重影响图像的特征提取成功率。所以为了增强图像质量和还原图像细节,需要对图像进行预处理。

大气雾天成像模型和 Jaffe-McGlamery 水下光学成像模型在物理机制上具有相似性。大气中的雾霭与水体均属于散射介质,当光线穿透这些介质时,部分光源的白光成分在抵达目标前便发生后向散射,直接进入成像传感器。这种光学现象导致两类图像均会因介质散射作用导致图像对比度和可见度显著下降。事实上,雾气由空气中凝结的小水滴构成,与纯净水体类似,两种介质本身均呈现近似无色透明特性,其对各种颜色光的散射作用一致,这使得后向散射光完整保留了自然光的全光谱特征,造成成像画面整体呈现色彩饱和度降低、白色光晕增强的视觉效果^[20]。

暗通道先验去雾算法可以有效去除图像中的雾气,恢复图像的原始色彩和细节,且水下场景普遍存在的暗色物体、彩色表面以及自然阴影等视觉元素,能够满足暗通道先验的成立条件。因此可以采用图像去雾方法去除水下图像的背景散射^[21-22]。

暗通道是指在自然图像中,由各像素局部区域内 RGB 三通道的最小像素值所构成的灰度图像。暗通道的数学定义为

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y)) \quad (1)$$

式中: $I_{\text{dark}}(x)$ 为在像素点 x 处的暗通道值; $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部区域; $I^c(y)$ 为在像素点 y 处的颜色通道 c 的亮度值,其中 c 表示 RGB 三通道的某一个通道。

暗通道先验理论指出,有雾图像暗通道会呈现灰色,而无雾图像暗通道会呈现黑色,即无雾图像暗通道趋近于 0,如图 1 所示。

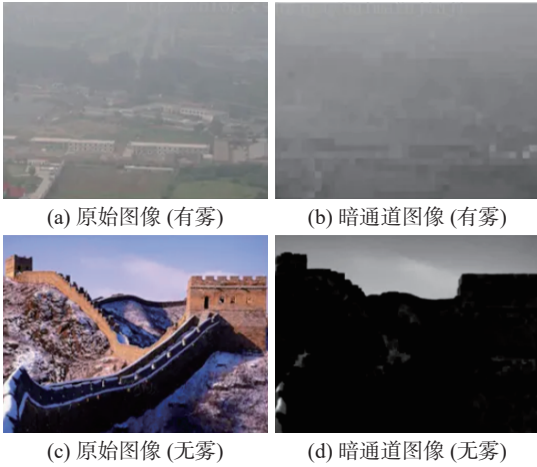


图1 有雾和无雾图像暗通道对比

Fig. 1 Comparison of dark channels in foggy and fog-free images

基于此现象,利用暗通道估计全球大气光成分和透射率^[23],推断图像中的雾气信息,消除雾气,得到增强图像。构建雾天成像模型为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (2)$$

式中: $I(x)$ 为待去雾的原始图像在像素点 x 处的像素值; $J(x)$ 为去雾算法恢复的无雾图像在像素点 x 处的像素值; A 为全球大气光成分,表示在没有物体遮挡情况下,从场景中直接进入摄像机的环境光; $t(x)$ 为透射率,表示光线穿过雾到达摄像机的比例。

在暗通道中提取亮度前 0.1% 的像素点,在原始雾图 $I(x)$ 中找到对应像素点,获取这些像素点的最大亮度值,作为全球大气光成分 A 。

对于图像上的点 x 及以 x 为中心的局部区域 $\Omega(x)$,其透射率 $t(x)$ 为

$$t(x) = 1 - \omega \times \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

式中: ω 为去雾程度, $\omega = 0$ 表示不去雾, $\omega = 1$ 表示全部去雾,通常 $\omega = 0.95$ 。

将全球大气光成分 A 和透射率 $t(x)$ 代入式(2),得到恢复的无雾图像:

$$J^c(x) = \frac{I^c(x) - A^c}{t(x)} + A^c \quad (4)$$

为直观评估暗通道先验去雾算法的图像增强效果,选取直方图均衡化算法(HE)和多尺度反射消除算法(MSRCR)进行对比。HE 算法通过重新分配图像像素的灰度级别,使图像中的灰度值分布更均匀,增强图像的整体对比度。MSRRCR 算法基于多尺度 Retinex 理论,通过估计图像的光照分量和反射分量减少图像的光照不均匀性,改善图像的质量和视觉效果。

图 2 所示为水下 3 m 对接导引光源的原始图像及分别经暗通道先验去雾算法、HE 算法和 MSRRCR 算法处理的图像。由图可见,HE 算法处理的图像对比度增强不均匀,图像上部出现了明显的伪影问题,增加了噪声和虚假边缘,会干扰边缘检测;MSRRCR 算法处理的图像中导引光源和背景对比度不足,目标难以区分,图像特征提取的准确性会降低;相比之下,暗通道先验去雾算法处理的图像虽然整体色调偏暗,但有效减少了悬浮颗粒和光散射的影响,导引光源和背景对比度明显,有利于后续图像特征提取。

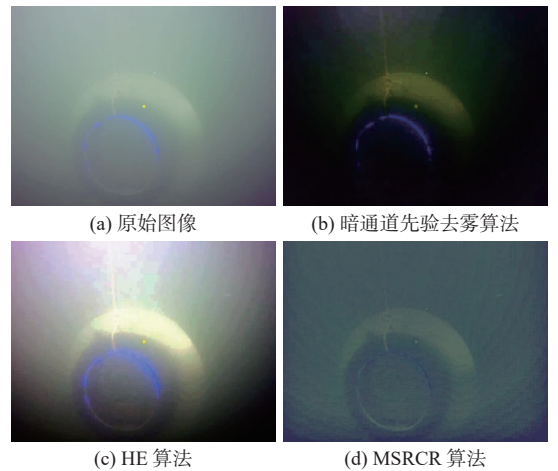


图2 处理前后水下图像对比

Fig. 2 Comparison of underwater images before and after processing

引用水下图像质量评估(UIQM)和水下彩色图像质量评估(UCIQE)作为指标对水下图像进行性能比较。UIQM 和 UCIQE 都是专门为水下图像设计的无参考图像质量评价指标。其中,UIQM 综合考虑了图像的色彩、清晰度和对比度三个维度,并通过加权平均的方式计算整体质量。值越大,图像质量越好,其计算公式如下:

$$Q_{\text{UIQM}} = c_1 \times Q_{\text{UICM}} + c_2 \times Q_{\text{UISM}} + c_3 \times Q_{\text{UIConM}} \quad (5)$$

式中: c_1 , c_2 和 c_3 为加权系数; Q_{UIQM} 为色彩测量指标; Q_{UISM} 为清晰度测量指标; Q_{UICOM} 为对比度测量指标。

UCIQE通过色度、饱和度和对比度的线性组合来量化水下图像的非均匀色偏、模糊和低对比度问题。值越高代表图像质量越好。其公式为

$$Q_{UCIQE} = c_1 \times \sigma_c + c_2 \times b_l + c_3 \times \mu_s \quad (6)$$

式中: σ_c 为色度标准差,反映色度噪声,下标 c 为色度; b_l 为亮度对比,反映图像清晰度, l 表示亮度; μ_s 为饱和度平均值, s 为饱和度。

3种算法计算得到的UIQM和UCIQE指标结果如表2所示。可以看出,MSRCR算法的得分最低,目标区分度不足;HE算法的得分最高,显示其在颜色保真度和清晰度方面具有优势。但HE算法的高评分主要源于对整体对比度的线性增强,其引入的伪影会严重干扰导引光源的边缘检测效果。暗通道先验去雾算法得分处于中等水平,是由于其对比度增强方式通过减少散射光干扰来恢复图像对比度,更具有针对性且更加温和,避免了对比度过度增强导致的伪影问题,其图像效果在实际应用中表现出色,更适合动态水下环境的鲁棒性需求。

表2 评估指标计算结果

Table 2 Calculation results of evaluation metrics

算法	Q_{UIQM}	Q_{UCIQE}
暗通道先验去雾算法	0.454001	14.665210
HE算法	0.623152	19.151030
MSRCR算法	0.418782	7.980382

2.2 水下图像特征提取

在AUV执行水下对接任务过程中,通过水下图像特征提取确定对接装置位置,为导航系统提供关键数据支持。本文通过改进Canny边缘检测,采用自适应阈值优化轮廓提取,并融合颜色阈值分割进行权重分配,提高不同场景下目标轮廓识别精度。

2.2.1 改进的Canny边缘检测

Canny边缘检测存在一些局限:高斯滤波器参数需人工设定,主观性较强,难以平衡噪声抑制与边缘保持;算法对图像噪声较敏感,易产生伪边缘并丢失部分真实边缘细节;处理动态变化图像时,固定阈值无法适应图像亮度和对比度变化,边缘检测不稳定。本文采用小波去噪滤除噪声,Scharr算子获取梯度,自适应阈值处理动态变化图像。

小波去噪是对高斯滤波的改进,通过多尺度分析可多尺度处理噪声,以适应不同频率的噪声特性。小波变换将图像分解为一系列小波基函数,表达式为

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{a,b}(x)dx \quad (7)$$

式中: $W(a,b)$ 为函数 $f(x)$ 的卷积型小波变换; a 为尺度特征,表示小波变换的分解层级; b 为平移参数; $\psi_{a,b}(x)$ 为小波基函数。在小波域中,边缘和噪声表现为小波系数的局部极大值,边缘通常在大尺度上具有显著响应,而噪声在小尺度上更明显。假设函数 $f(x)$ 在某点处的奇异性指数为 k ,则小波变换的模极大值满足

$$|W(a,b)| \leq Ka^k \quad (8)$$

式中: K 为常数; k 为奇异性指数,描述函数的局部光滑性。

式(8)描述了奇异性指数与小波变换尺度特征之间的关系:当 $k < 0$ 时,小波变换的模极大值随尺度 a 的增加而减小;反之,则增大。这一规律为区分边缘点和噪声点提供了理论基础,基于此可以有效实现噪声滤除^[24]。去噪过程如下:

1) 对噪声图像进行3层小波变换,得到小波系数 x 。

2) 计算每一层小波系数 x 的阈值 δ ,并根据式(9)处理小波系数,得到新的系数 y :

$$y = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - \delta), & |x| \geq \delta \\ 0, & |x| < \delta \end{cases} \quad (9)$$

3) 利用新的小波系数进行图像重构,通过小波逆变换得到去噪图像。

Scharr算子是对Sobel算子的改进,通过优化卷积核的权重分布,使得边缘检测具有更高的精度和更平滑的响应特性。Scharr算子与Sobel算子具有相似的计算时间和复杂度,但前者鲁棒性更好。Scharr算子在 x 方向和 y 方向的卷积核为

$$K_x = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K_y = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

梯度计算通过将卷积核与图像进行卷积实现。则 x 方向和 y 方向的梯度计算公式为

$$G_x = K_x * I = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} * I \quad (12)$$

$$\mathbf{G}_y = \mathbf{K}_y * \mathbf{I} = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} * \mathbf{I} \quad (13)$$

式中： \mathbf{I} 为原始图像； \mathbf{G}_x 和 \mathbf{G}_y 分别为 x 和 y 方向的梯度值。通过梯度值，计算梯度幅值 G 和梯度方向 θ ：

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (15)$$

在AUV动态对接过程中，导引标识光源的成像光圈大小和光强随距离呈非线性变化。固定阈值无法适应此类动态特性，易导致误检或漏检。自适应阈值能够根据图像内容实时动态调整，适应AUV水下对接。

在远距离时，标识光源在相机中的成像小且光强较弱，需要小阈值来接收更多光源，提升目标检测概率；在近距离时，标识光源在相机中的成像大且光强较强，需要大阈值来筛选光源，提高识别精度。自适应阈值调节过程如图3所示。

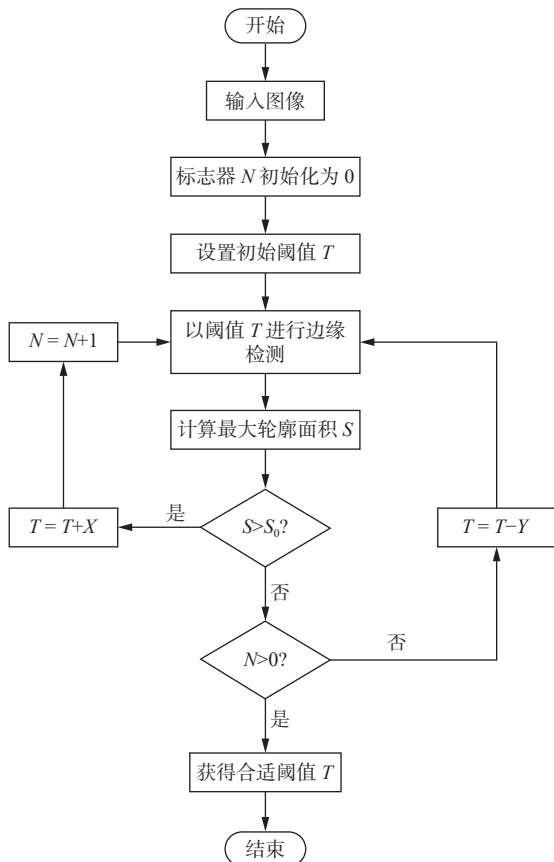


图3 自适应阈值调节流程图

Fig. 3 Flowchart of adaptive threshold adjustment

首先输入图像，将标志器 N 初始化为0，并设置一个初始阈值 T ，使用阈值 T 进行边缘检测，计算最大轮廓面积 S 。将 S 与参考轮廓面积 S_0 进行

比较：若 $S > S_0$ ，说明阈值设置较低，误检测到伪边缘，此时需增大阈值 T 来削弱伪边缘，提高识别精度。阈值增加 X 且标志器 N 加1后进入下一次检测，随着阈值 T 增加，边缘检测的最大轮廓面积 S 会逐渐减小，直到第1次出现 $S < S_0$ ，说明此时阈值 T 检测的最大轮廓面积 S 与参考轮廓面积 S_0 最接近，且此时标志器 $N > 0$ ，则最佳阈值为此时的阈值 T ；若 $S < S_0$ ，说明阈值设置较高，光圈弱边缘被抑制，造成漏检，此时需要减少阈值 T 来识别微弱光源，增大检测概率。标志器 $N = 0$ ，不满足 $N > 0$ 条件，阈值减小 Y 后进入下一次检测，随着阈值 T 减小，边缘检测的最大轮廓面积 S 逐渐增大，直到出现 $S > S_0$ ，进入 $S > S_0$ 的判断循环，直到获得最佳阈值 T 。每次阈值增加幅度为 X ，减少幅度为 Y ， X 与 Y 值需要根据实际情况和硬件设备性能确定。一般设置 $X < Y$ ，目的是为了实现减少阈值时粗调节，增加阈值时细调节，进一步提高识别精度。

水下3m经暗通道先验去雾算法处理的对接导引标识光源图像、传统Canny边缘检测图像和改进的Canny边缘检测图像对比结果如图4所示。

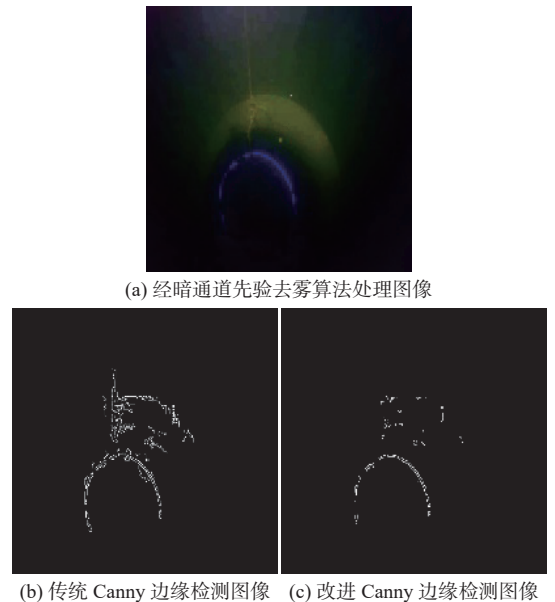


图4 边缘检测效果对比图

Fig. 4 Comparison of edge detection results

由图4可以看出，传统Canny算法的边缘检测结果受噪声污染严重，并伴随大量伪边缘信息，导致图像边缘呈现杂乱和不规则特性；而改进Canny算法在保留真实边缘特征的同时，降低了非边缘区域的误检概率，保持边缘细节信息完整，并有效抑制噪声，提高了边缘检测的准确性。

为了进一步验证改进算法的优越性，使用峰值信噪比(PSNR)、结构相似性(SSIM)和学习型感知图像块相似性(LPIPS)来评估算法改进前后

的图像质量。

PSNR 是通过计算均方误差 (MSE) 来衡量信号与噪声之间像素差异的指标, 值越大表示图像噪声越少, 劣化程度越轻。其计算公式为

$$\begin{cases} Q_{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I[i, j] - K[i, j])^2 \\ Q_{PSNR} = 20 \times \lg \left(\frac{P}{\sqrt{Q_{MSE}}} \right) \end{cases} \quad (16)$$

式中: m 和 n 表示图像尺寸为 $m \times n$; I 为原始图像; K 为算法处理后图像; P 为图像像素强度最大值。

SSIM 是一种基于人类视觉系统特性的图像质量评估指标, 同时考虑图像的亮度、对比度和结构信息, 值越大表示图像质量越高。常用的 SSIM 计算公式为

$$Q_{SSIM(x,y)} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (17)$$

式中: x 为原始图像数据; y 为经算法处理的图像数据; μ_x 和 μ_y 分别为 x 和 y 的均值; σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 的方差; σ_{xy} 为 x 和 y 之间的协方差; C_1 和 C_2 为常数, 用于维持结果的稳定。

LPIPS 是一种基于深度学习的图像质量评估指标, 通过模拟人类视觉系统对图像的感知特性, 衡量两幅图像在特征空间中的相似性, 值越低表示两张图像越相似。计算公式为

$$Q_{LPIPS}(x, x_0) = \sum_l w_l \cdot \|F_l(x) - F_l(x_0)\|_2^2 \quad (18)$$

式中: x_0 为原始图像数据; x 为经算法处理的图像数据; w_l 为层权重, 用于衡量不同层特征对感知相似度的贡献; $F_l(x)$ 为预训练网络的第 l 层特征提取结果。

将经算法处理的图像与原始图像进行对比, 计算结果如表 3 所示。可以看到, 改进的 Canny 检测算法得到的 PSNR 和 SSIM 分别增加 19.4% 和 4.8%, LPIPS 降低 33.8%。表明改进的 Canny 检测在增强图像降噪能力的同时, 更精确地保留了图像结构与细节特征, 整体性能优于传统 Canny 检测方法。

表 3 评估指标计算结果

Table 3 Calculation results of evaluation metrics

算法	Q_{PSNR}	Q_{SSIM}	Q_{LPIPS}
传统Canny检测	18.217 315	0.894 842	0.751 748
改进的Canny检测	>21.751 180	>0.938 221	0.497 714

2.2.2 颜色阈值分割

光信号在水中传播的衰减程度受水体环境影响显著。表 4 列出不同水域的吸收和散射系数^[25]。

由表 4 可见, 不同水域光强衰减的影响因素也不相同, 应根据具体情况来选择不同波长的光。

表 4 不同水域吸收和散射系数

Table 4 Absorption and scattering coefficients in different water bodies

水域类型	吸收系数	散射系数
纯净海水	0.114	0.037
海岸海水	0.179	0.220
码头海水	0.366	1.829

在清澈的海域, 如远洋深海, 由于水中颗粒物少, 散射作用较弱, 光强的衰减主要受吸收系数的影响, 因此选择吸收系数较小波段的蓝绿光, 以减少光能损失。而在近海或沿岸区域, 尤其在受陆地径流和人类活动影响较大的水域, 散射系数显著增加, 成为光强衰减的主要因素, 因此选择散射系数较小波段的黄绿光, 以提升光信号传播能力^[26]。

本研究在水池中进行对接实验, 水质较为清澈, 所以对对接导引标识光源采用蓝色光源, 以减少光能损失。

主流颜色空间包括 RGB, Lab 和 HSV, 选择合适的颜色空间对颜色阈值分割至关重要。本文采用 HSV 颜色空间进行目标提取, 因其更符合人类对颜色的感知方式且受光照条件影响较小。

利用 HSV 颜色空间进行目标分割时, 先设定色调 (H) 的区间实现初步的大范围分割, 再通过膨胀、腐蚀等形态学操作进行精细化调整^[27]。为了精确界定色调区间, 提取水下对接导引蓝色标识光源的颜色直方图, 统计目标像素在色调通道的区间分布特征, 为分割算法提供区间界定依据, 如图 5 所示。

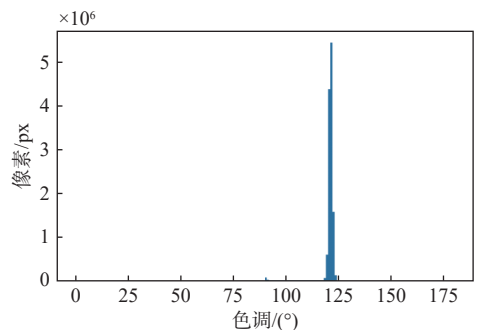


图 5 蓝色标识光源的色调直方图

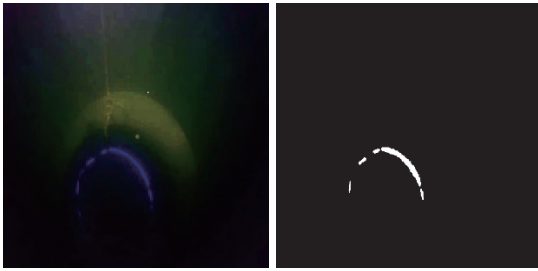
Fig. 5 Hue histogram of the blue-labeled light source

由图 5 可得, 颜色阈值分割算法中 HSV 的阈值范围为

$$\begin{aligned} b_{lower} &= \text{np.array}([110, 200, 60]) \\ b_{upper} &= \text{np.array}([125, 255, 255]) \end{aligned} \quad (19)$$

其中, np.array 是 NumPy 库中创建多维数组的函数。

水下 3 m 对接导引标识光源经暗通道先验去雾算法和经颜色阈值分割处理的图像对比结果如图 6 所示。可见颜色阈值分割算法能够有效提取蓝色标识光源,同时抑制背景噪声与非目标区域。



(a) 暗通道先验去雾算法 (b) 颜色阈值分割处理

图 6 水下 3 m 对接导引标识光源经不同算法处理的图像对比结果

Fig. 6 Comparison of algorithm-processed images for underwater (3 m) docking guidance marker light sources

2.2.3 多特征融合

海洋环境的动态性与复杂性使得单一特征提取方法难以适应多变的成像条件。为此,本文提出一种基于多特征融合的图像提取方法,即融合改进 Canny 算法提取的边缘特征和颜色阈值分割得到的颜色特征,分配合适的权重,实现特征互补,提升算法在复杂海洋图像环境中的适应性和鲁棒性。特征融合能确保边缘和颜色特征都得到利用,为后续目标识别和图像分析提供丰富信息源。

在实际应用中,环境光照的变化对图像特征的影响最为明显。在光照充足的情况下,周围环境影响会干扰边缘特征提取,易识别到伪边缘,但此时颜色特征对比度强,可以通过适当增加颜色特征权重,减少边缘特征权重,提高识别精度。如图 7 所示,边缘特征与颜色特征权重比为 0.3:0.7。

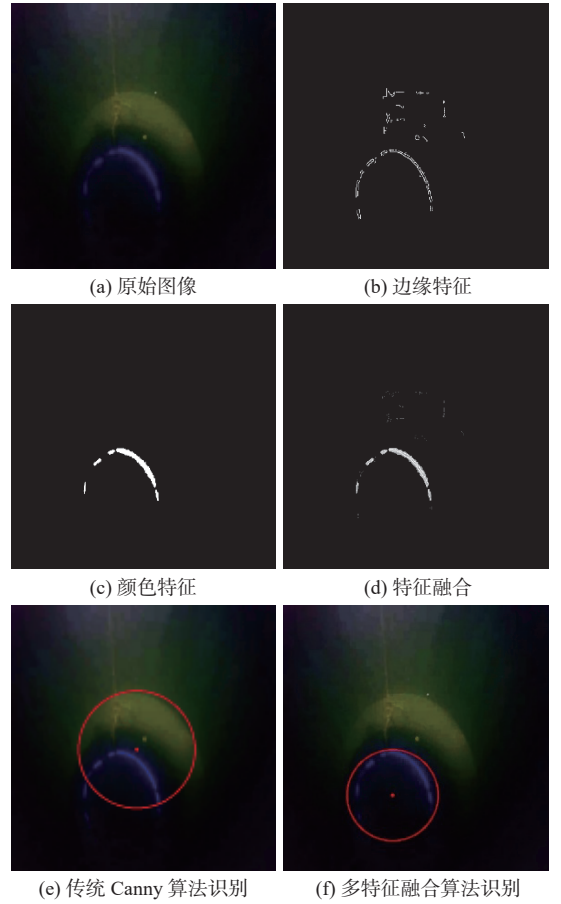
在光照不足的环境中,光晕现象使得颜色特征提取不准确,此时可以提高边缘特征的权重,降低颜色特征的权重,如图 8 所示,边缘特征与颜色特征权重比为 0.8:0.2。通过这种方式,能够提高算法的灵活性和适应性。

2.3 视觉定位

水下成像存在畸变问题。为消除成像偏差,提高成像的准确性,需要通过畸变参数对成像中心点坐标进行校正。完成畸变校正后,将修正的中心点坐标从像素坐标系转换为相机坐标系,解算 AUV 与对接装置的相对位置。

2.3.1 畸变校正

相机畸变主要分为径向畸变和切向畸变。计算时一般采用 2 阶径向畸变模型,模型公式为



(c) 颜色特征 (d) 特征融合

(e) 传统 Canny 算法识别

(f) 多特征融合算法识别

图 7 光照充足时图像处理及识别效果图

Fig. 7 Image processing and recognition results under adequate illumination

$$r = \sqrt{(u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2} \quad (20)$$

$$u - u_0 = (u_d - u_0)(1 + k_u r^2) \quad (21)$$

$$v - v_0 = (v_d - v_0)(1 + k_v r^2) \quad (22)$$

式中: r 为畸变半径; (u_d, v_d) 为理想图像坐标; (u_0, v_0) 为光学图像中心坐标; (u, v) 为畸变图像坐标; k_u 和 k_v 分别为 u, v 方向 2 阶径向畸变系数。

2.3.2 坐标系转换

单目视觉成像模型本质上就是将三维世界中的物体通过光学系统映射到二维图像平面上,可以简化为相机针孔模型。针孔成像模型中包括世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系^[28],像素坐标系与相机坐标系的转换公式为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

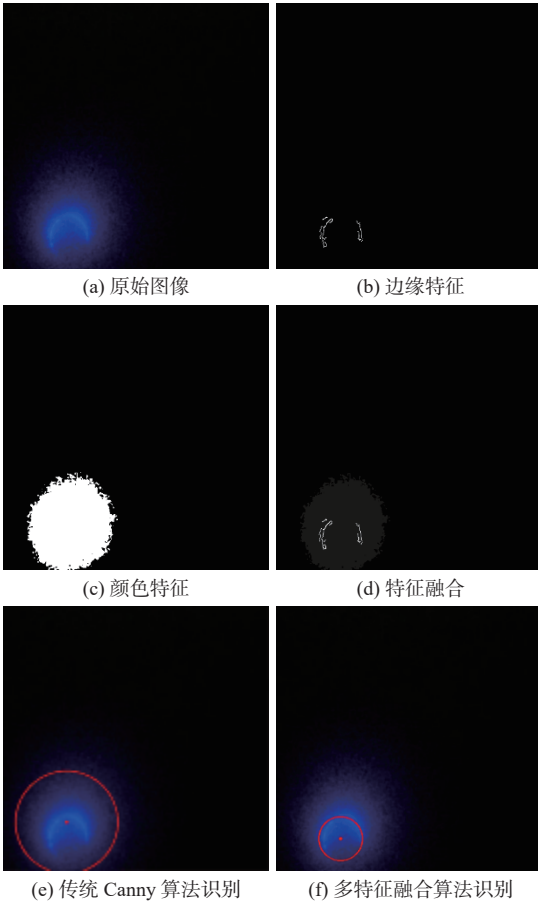


图 8 光照不足时图像处理及识别效果图

Fig. 8 Image processing and recognition results under insufficient illumination

式中: (u, v) 为像素坐标系下的目标点坐标; f_x 和 f_y 分别为相机在 x, y 方向的焦距; (X_c, Y_c, Z_c) 为相机坐标系下的目标点坐标; (u_0, v_0) 为像素坐标系下的图像中心点坐标; $\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为四参数的相机内参数矩阵。

2.4 相机标定

准确的相机标定是视觉系统实现位置检测的关键环节。通过标定可以确定相机的内参和外参,其中内参描述相机自身的光学特性,如焦距和畸变系数等,外参描述相机在世界坐标系中的位置和姿态。这些参数是图像处理和三维重建的基础。

张正友标定法^[29]是基于平面棋盘格图案的相机自标定技术。这种方法因其简单、有效且不需要特殊设备而被广泛应用于计算机视觉领域。

本文使用张正友标定法进行相机标定。标定对象为 Barlus M-T2-4DCX10 型水下相机,该相机配置 1/2.8 英寸 SONY CMOS 图像传感器,支持 1920 px×1080 px 分辨率的 50 FPS 高帧率视频流采集;全局电子快门有效抑制卷帘快门畸变;具

备 0.01 Lux 超低照度彩色成像能力,能够满足复杂水下作业场景的视觉感知需求。Barlus 水下相机的具体参数如表 5 所示。

表 5 水下相机参数
Table 5 Parameters of underwater camera

参数	数值
焦距/mm	3.6
分辨率/px	1 920×1 080
水平视野角/(°)	142
垂直视野角/(°)	102
防水等级	IP68
工作温度/(°C)	-20~55

通过拍摄不同角度的标定板,共获取 16 组图像,如图 9 所示。利用 MATLAB Camera Calibration 工具箱读取图像,得到相机内参数及几何畸变系数,如表 6 所示。这些参数用于消除镜头畸变,并建立坐标系之间的转换关系。

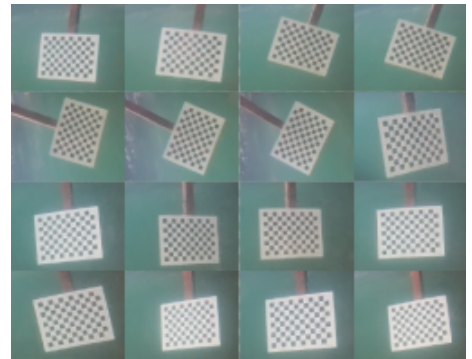


图 9 不同角度的棋盘格图像

Fig. 9 Checkerboard images at different angles

表 6 相机内参和几何畸变系数

Table 6 Intrinsic parameters and geometric distortion coefficients of the camera

相机内参和几何畸变系数	数值(水下)
焦距 f_x /px	1 696.8
焦距 f_y /px	1 686.7
主点 u_0 /px	1 156.5
主点 v_0 /px	1 115.1
径向畸变 k_{v1}	-0.062 8
径向畸变 k_{v2}	-0.087 8
切向畸变 k_{u1}	0
切向畸变 k_{u2}	0

3 半实物仿真验证

本研究采用 Unity 3D 引擎进行半实物仿真,验证所提出自主对接技术的有效性和算法的准确性。仿真环境包括四桨无舵矢量推进型 AUV 模

型、对接装置三维模型以及模拟的水下环境。为模拟真实的水流场和光照情况,通过 Gerstner 波叠加算法模拟动态水流场,结合球体追踪光线步进技术完成水下光源渲染,如图 10 所示。该仿真环境能够模拟 AUV 在水下对接过程中的动力学特性和光学成像条件,为算法测试和参数调整提供可控平台。

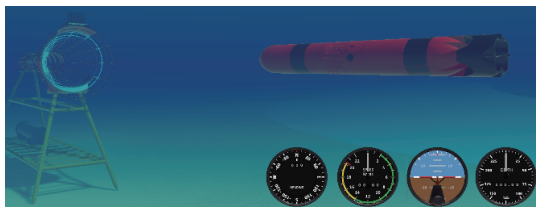


图 10 仿真环境

Fig. 10 Simulation environment

仿真环境中,水下光源为蓝色环形灯带,固定于对接装置笼口;AUV 艏部虚拟相机分辨率为 $1920\text{ px}\times 1080\text{ px}$,水平视野角 142° ,垂直视野角 102° 。在图像采集环节叠加均值 0、标准差 0.1 的高斯噪声及 5% 椒盐噪声,模拟电路噪声与水下悬浮颗粒散射^[30]。AUV 初始位置距对接装置入口 20 m,预设 AUV 自主对接任务航速 1 kn,通过第一人视角进行视景显示观察 AUV 航行状态(图 11)。仿真实验共进行 12 次,其中 10 次成功对接。

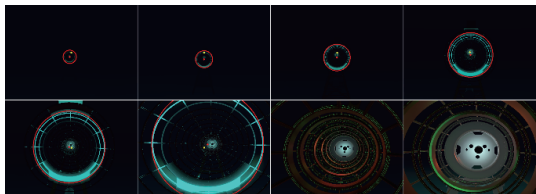


图 11 AUV 成功进入对接装置第一人视角

Fig. 11 First-person view of the AUV successfully entering the docking device

4 水池对接实验

4.1 实验设备及条件

在水池对接实验时,将 AUV 布置于距对接装置入口相同距离、不同角度处,以验证算法的准确性和鲁棒性。当摄像头识别到导引光源后,AUV 自动调整姿态直至进入对接装置。

实验用 AUV 为中小型 AUV,总长约为 4.3 m,直径为 323 mm,采用鱼雷型设计,如图 12 所示。对接装置为圆柱形铁笼,长度为 3.5 m,直径为 550 mm,笼口安装防撞缓冲轮胎。对接装置如图 13 所示。

实验水池长 30 m,宽 5 m,深 5 m,池壁采用绿

色防反射涂层,抑制杂散光干扰,水质清澈,满足对接实验条件,水池上方配备航车,方便进行设备吊放,如图 14 所示。



图 12 实验 AUV 平台

Fig. 12 Experimental AUV platform



图 13 对接装置

Fig. 13 Docking device

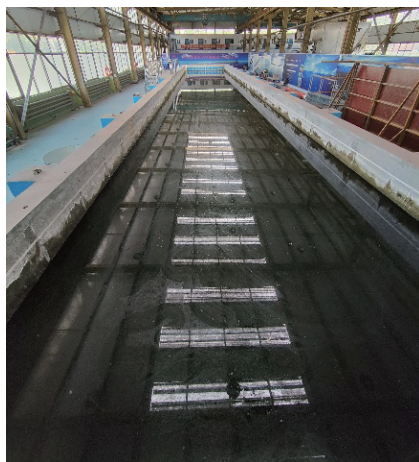


图 14 实验水池

Fig. 14 Experimental water tank

4.2 实验及数据分析

对接装置置于水下 3 m 处,AUV 在距对接装置 20 m 处入水,下潜至 3 m 后以定速 1 kn 航行,于 12 m 处开启视觉识别引导,通过不断调整姿态,修正自身航向和俯仰偏差实现对接,整个对接过程耗时约 50 s。AUV 对接过程中航向和俯仰姿态变化如图 15 所示,航向偏差修正约 22° ,俯仰偏差修正约 10° ,且能快速、连续地跟踪目标曲线。对接过程如图 16 所示,图像识别单帧耗时

约 100 ms。

水池实验时,无法从外部准确获取 AUV 与对接装置之间的角度,故将激光测距仪测得的实际距离与视觉算法测得的距离进行比较,验证算法精度。实际距离使用 SXCJ-P1 型激光测距仪获取,其水下测距量程覆盖 0.1~20.0 m,测距精度达±5 mm,采样率为 10 Hz,可实时反馈数据并跟踪动态目标。

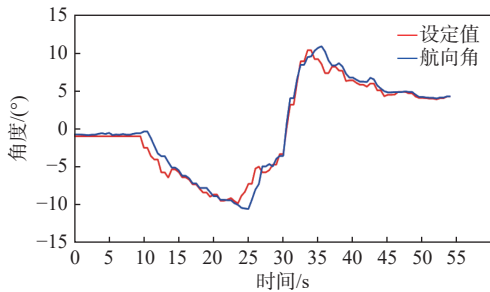
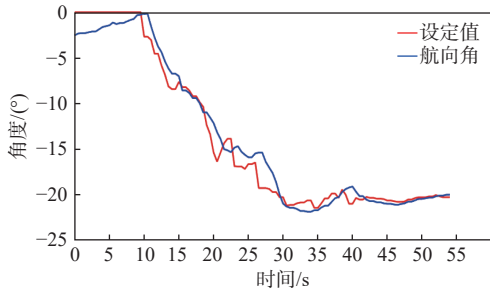


图 15 对接姿态变化及追踪过程图

Fig. 15 Docking attitude variation and tracking process

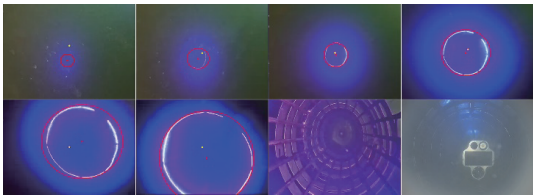


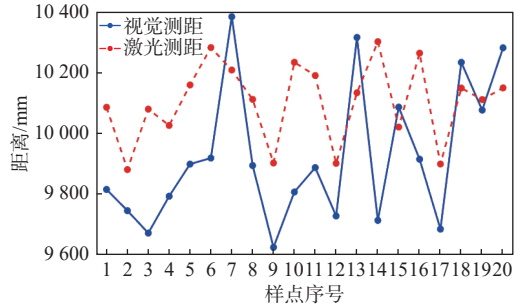
图 16 AUV 水池实验进入对接装置过程图

Fig. 16 Process of AUV successfully entering the docking device in pool experiment

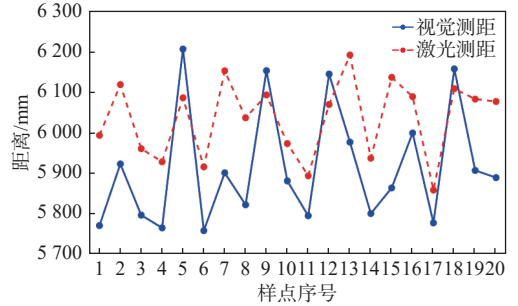
末端视觉导引开启距离为 12 m,选取离对接装置入口约 10, 6, 2 m 的位置进行定位分析。水池实验共进行 25 次,选取其中 20 次作为数据分析样本,距离曲线如图 17 所示,数据分析如表 7 所示。

结果表明,10 m 时视觉测距与激光测距的均值差为 180.25 mm,6 m 处均值差降至 120.36 mm,2 m 处均值差进一步缩减至 51.21 mm,可见均值差随距离缩短而递减,当末端对接距离小于 2 m 时位姿精度误差小于 5 cm。均方根误差呈相同趋势,对接距离越近,两条测距曲线拟合度越高,视觉测距结果越准确,对接精度越高。这种现象

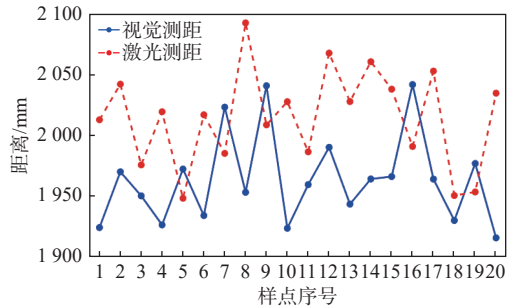
可归因于近距离条件下图像特征分辨率的提升。



(a) 约 10 m 处激光测距与视觉测距对比图



(b) 约 6 m 处激光测距与视觉测距对比图



(c) 约 2 m 处激光测距与视觉测距对比图

图 17 各距离激光测距与视觉测距对比图

Fig. 17 Comparison of laser ranging and visual ranging at various distances

表 7 各距离激光测距与视觉测距数据分析

Table 7 Data analysis of laser ranging and visual ranging at various distances

测距条件	均值/mm	均方根误差/mm
10 m视觉测距	9 923.21	277.43
10 m激光测距	10 103.46	
6 m视觉测距	5 914.39	163.83
6 m激光测距	6 034.75	
2 m视觉测距	1 963.47	76.44
2 m激光测距	2 014.68	

图 18 所示为单次对接过程的激光测距和视觉测距曲线。可以看到,在远距离时视觉测距与激光测距偏差较大,随距离减小逐渐趋近,与实验定量分析结果一致。视觉测距曲线平滑无明显抖动,稳定性较高,表明该方法近程导引鲁棒性强,具有良好的动态测量能力。

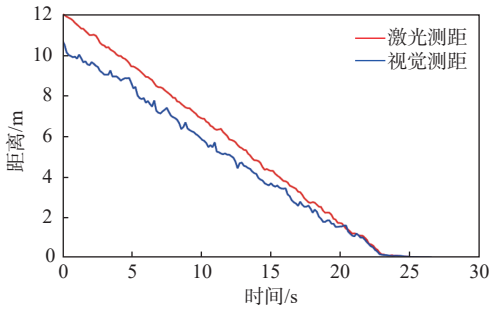


图 18 单次对接过程激光测距与视觉测距对比图

Fig. 18 Comparison of laser ranging and visual ranging during single docking process

水池对接实验共进行 25 次, 成功对接 22 次, 成功率为 88%。结果表明, 该方法在 AUV 自主对接过程中能够准确识别对接装置的导引光源, 并对 AUV 的位置姿态信息进行有效调整, 满足 AUV 自主对接精度和实时性要求, 具有实际应用价值。

对失败的 3 次对接实验进行分析后发现:

1) 其中 1 次因之前进行过多次对接实验, AUV 姿态调整时尾流扰动带起大量池底沉积物, 水质浑浊度增加, 导致图像质量下降, 特征提取失败。

2) 另外 2 次因 AUV 运动控制系统动态响应延迟, 未能及时修正航向偏差, 导致撞击笼口缓冲轮胎。

针对水质浑浊引起的特征提取失败问题, 未来可优化图像特征提取算法, 引入自适应滤波算法, 根据水质浑浊度动态调整去噪强度, 以增强图像处理的鲁棒性。针对 AUV 姿态调整滞后问题, 未来可改进姿态控制策略, 构建运动预测模型, 提前预测 AUV 的航向偏差, 同步优化矢量推进器的动态响应参数, 缩短姿态修正延迟。

5 结 语

本文针对 AUV 自主对接过程中存在的环境干扰、特征提取精度不足及动态适应性差等问题, 提出了一种基于多特征融合的视觉导引方法。通过暗通道先验去雾算法增强水下图像质量, 结合改进的 Canny 边缘检测与颜色阈值分割技术实现边缘与颜色特征互补, 并使用自适应阈值调节机制和权重分配策略, 提升了不同光照条件下的目标识别准确度和鲁棒性。利用视觉定位和相机标定技术, 解算 AUV 与对接装置的相对位置, 并通过 Unity 3D 半实物仿真与水池实验验证了算法的可行性与精度。

实验结果表明, 该方法在水下环境中具有较高的适应性, 视觉测距误差随距离减小而显著降低, 末端对接距离小于 2 m 时姿态精度误差小于

5 cm, 总体对接成功率达 88%。相比传统单特征提取方法, 多特征融合技术有效抑制了噪声干扰, 在光照变化和复杂背景下仍能保持稳定的识别性能, 为 AUV 水下自主回收、能源补给及隐蔽作业提供了可靠的技术支撑。下一阶段将开展海洋环境下的实地试验, 验证技术方案的工程适用性。

参考文献:

- [1] 卢有旺, 夏英凯, 徐国华, 等. 面向 UUV 对接的视觉引导三维轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 290–304.
LU Y W, XIA Y K, XU G H, et al. Study on vision-guided 3D tracking control for UUV docking[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 290–304.
- [2] 袁学庆, 刁家宇, 李卫民, 等. AUV 水下对接的发展与应用现状 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(5): 1–8.
YUAN X Q, DIAO J Y, LI W M, et al. Development and application status of AUV underwater docking[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(5): 1–8 (in Chinese).
- [3] 孙叶义, 武皓微, 李晔, 等. 智能无人水下航行器水下回收对接技术综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(1): 1–11.
SUN Y Y, WU H W, LI Y, et al. Summary of AUV underwater recycle docking technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(1): 1–11 (in Chinese).
- [4] WANG H Q, ZHONG G Q, SUN J X, et al. Simultaneous restoration and super-resolution GAN for underwater image enhancement[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1162295.
- [5] WANG J, LI P, DENG J H, et al. CA-GAN: class-condition attention GAN for underwater image enhancement [J]. IEEE Access, 2020, 8: 130719–130728.
- [6] XU S, JIANG Y Q, LI Y, et al. A stereo visual navigation method for docking autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(2): 374–395.
- [7] REN R Z, ZHANG L C, LIU L, et al. Two AUVs guidance method for self-reconfiguration mission based on monocular vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(8): 10082–10090.
- [8] FIGUEIREDO A B, MATOS A C. MVido: a high performance monocular vision-based system for docking a hovering AUV[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 2991.
- [9] 安平, 王亭亭, 赵渊, 等. 基于深度学习的 AUV 水下视觉导引检测方法 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(3): 421–429.
AN P, WANG T T, ZHAO Y, et al. Underwater visual guidance deep learning detection method for AUV[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(3): 421–429 (in Chinese).
- [10] SIM H, JOE H. Voronoi diagram-based USBL outlier

- rejection for AUV localization[J]. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2024, 38(3): 115–123.
- [11] Algorithms; New algorithms findings from Southeast University discussed (AUV positioning method based on tightly coupled SINS/LBL for underwater acoustic multipath propagation)[J]. *Journal of Technology*, 2016, 15(3): 45–50.
- [12] YANG Q S, LIU H T, HONG L, et al. Anti-disturbance control strategy in capture stage for AUV dynamic base docking with optical guided constraints[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311(Pt 2): 118946.
- [13] 燕奎臣, 吴利红. AUV水下对接关键技术研究[J]. *机器人*, 2007, 29(3): 267–273.
YAN K C, WU L H. A survey on the key technologies for underwater AUV docking[J]. *Robot*, 2007, 29(3): 267–273 (in Chinese).
- [14] 周冰. 面向AUV回收的异色光源阵列视觉导引方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
ZHOU B. Research on visual guidance method of heterochromatic light source array for AUV recovery[D]. Changchun: Jilin University, 2024 (in Chinese).
- [15] 黄翔. 视觉和电磁组合导引的AUV自主对接技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024.
HUANG X. Research on autonomous docking technology for AUVs utilizing visual and electromagnetic composite guidance[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2024 (in Chinese).
- [16] 孟令帅, 李明烁, 林扬, 等. 自主水下机器人布放回收技术综述[J]. *无人系统技术*, 2024, 7(1): 1–19.
MENG L S, LI M S, LIN Y, et al. Launch and recovery technology of autonomous underwater vehicle[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2024, 7(1): 1–19 (in Chinese).
- [17] LIU S, XU H L, LIN Y, et al. Visual navigation for recovering an AUV by another AUV in shallow water[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1889.
- [18] 羊云石, 顾海东. AUV水下对接技术发展现状[J]. *声学与电子工程*, 2013(2): 43–46.
YANG Y S, GU H D. Current development status of AUV underwater docking technology[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2013(2): 43–46 (in Chinese).
- [19] TRUCCO E, OLMOS-ANTILLON A T. Self-tuning underwater image restoration[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(2): 511–519.
- [20] 王蕊. 单幅雾天及水下图像的复原方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
WANG R. The research of single image recovery in fog and underwater[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [21] YAO B W, XIANG J. Underwater image dehazing using modified dark channel prior[C]//Proceedings of 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China: IEEE, 2018: 5792–5797.
- [22] 杨爱萍, 郑佳, 王建, 等. 基于颜色失真去除与暗通道先验的水下图像复原[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(11): 2541–2547.
YANG A P, ZHENG J, WANG J, et al. Underwater image restoration based on color cast removal and dark channel prior[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2541–2547 (in Chinese).
- [23] 祝志坤, 卢丙举, 李一辰, 等. 基于单双目融合的AUV坐落式回收光视觉引导算法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 28–37.
ZHU Z K, LU B J, LI Y C, et al. Light visual guidance algorithm for AUV situated recovery based on monocular and binocular fusion[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(1): 28–37 (in Chinese).
- [24] 季嘉诚. 基于视觉的水下AUV对接伺服控制系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
JI J C. Research on strategy of underwater AUV docking system based on vision[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023 (in Chinese).
- [25] 刘旖恒. 基于光视觉引导的AUV姿态估计算法研究与实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
LIU Y H. A research and implementation of AUV pose estimation algorithm based on optical vision guidance[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022 (in Chinese).
- [26] 唐松奇. 基于卷积神经网络的水下图像增强与拼接方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
TANG S Q. Research on underwater image enhancement and mosaic method based on convolutional neural network[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020 (in Chinese).
- [27] 尉金强, 杜文正, 孙晓艳, 等. 基于目标HSV(色调-饱和度-亮度)空间图像自适应分割的直线检测算法[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(5): 59–68.
WEI J Q, DU W Z, SUN X Y, et al. Straight line detection algorithm based on adaptive segmentation of target HSV space images[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(5): 59–68 (in Chinese).
- [28] 丁王杰. 面向水下自主航行器接驳的末端视觉导引关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
DING W J. Research on key technologies of terminal visual-based guidance for AUV terminal docking[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023 (in Chinese).
- [29] 石建树. 基于视觉的AUV回收末端定位方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
SHI J S. Research on vision-based AUV recovery end positioning method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).
- [30] CHERIAN A K, POOVAMMAL E, PHILIP N S, et al. Deep learning based filtering algorithm for noise removal in underwater images[J]. *Water*, 2021, 13(19): 2742.

Multi-feature fusion-based terminal visual autonomous docking technology for AUV

XIONG Pan, QI Xiangdong*, SUN Yanlin, ZHAO Zhengyang, QIN Juhao

State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract: [**Objective**] To address the low docking accuracy of autonomous underwater vehicles (AUVs) in complex underwater environments, a multi-feature fusion vision-based method is proposed. [**Method**] A self-developed rudderless vector propulsion AUV with four thrusters was used, and the dark channel prior (DCP) dehazing algorithm was adopted for image enhancement. An improved Canny edge detection algorithm was combined with color threshold segmentation to achieve multi-feature fusion. The minimum enclosing circle method was utilized for circle center positioning, and coordinate transformation was performed to calculate the relative position and orientation for docking. [**Results**] Unity 3D simulations and pool experiments revealed a distance-dependent trend: both mean difference and root mean square error decreased as docking distance decreased. Closer distances yielded higher visual ranging accuracy and docking precision. When the docking distance was less than 2 m, the positioning error was maintained below 5 cm, with an overall success rate of 88%. [**Conclusion**] The proposed method fulfills the accuracy requirements for AUV autonomous docking and provides a highly robust solution for underwater equipment recovery.

Key words: autonomous underwater vehicles (AUVs); autonomous docking; Canny edge detection; color threshold segmentation; multi-feature fusion

相关论文

- [1] 陈如意, 张永林. AUV 与拖曳式回收坞站的对接碰撞分析 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2):14–22. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04790>
- [2] 严荣慧, 郭前, 雷鸣, 等. 基于特征融合及混合注意力的小目标船舶识别 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3):69–78. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03489>
- [3] 肖永新, 向先波, 孔盾, 等. 面向无人艇对接回收的 STag 标记视觉导引技术 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2):357–365. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03549>
- [4] 李刚, 张磊, 王鑫, 等. 多特征融合的无人艇视觉小目标鲁棒跟踪 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(5):65–78. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03394>
- [5] 王秋生, 齐向东, 薛晨阳, 等. AUV 终端对接的单目视觉导引方法研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4):1–9.
- [6] 卢有旺, 夏迎楷, 徐国华, 等. 面向 UUV 对接的视觉引导三维轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1):112–120. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03242>
- [7] 陈天怡, 和卫平, 刘均, 等. 开孔球面舱壁特征应力组合代理模型预报方法 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 236–243. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02390>
- [8] 赵蕊, 许建. 自主式水下航行器水下回收融合引导技术方案及算法 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1):212–220. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02318>