

基于视觉的 AUV 末端回收导引方法研究

普勇博, 齐向东, 张海龙, 张涛

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 水下自主无人潜航器 (AUV, autonomous underwater vehicle) 由于其独特的高速、低阻、低噪等优势, 是如今探索海洋的有力依托; 作为自主式机器人, AUV 如何自行导航回收至对接站是研究中的重要环节; 依托于实验室独创的四桨无舵矢量推进型 AUV, 通过改进 Canny 边缘检测, 采用自适应阈值方法动态调整轮廓, 在阈值最优时采用最小外接圆方法确定圆心; 经 Unity3D 仿真和水池试验可知, 该方法简单实用, 鲁棒性强, 且相比于传统的 AUV 形式以及传统的图像识别方法, 该新型 AUV 在基于单目视觉的自适应阈值分割检测方法下, 水下末端导引对接精度 (优于 20 cm) 和对接成功率 (大于 80%) 上均得到了大幅度的提高, 在实际应用中对 AUV 能源补给、数据下载/上传、设备检修等具有重要的应用价值。

关键词: 新型 AUV; 回收对接; Unity3D 仿真; 自适应阈值; 单目视觉; 图像处理

Research on AUV Terminal Recovery Guiding Method Based on Vision

PU Yongbo, QI Xiangdong, ZHANG Hailong, ZHANG Tao

(Key Laboratory of Instrumental Science and Dynamic Testing, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An autonomous underwater vehicle (AUV) is an invaluable tool for exploring the ocean due to its unique advantages of high speed, low drag, and minimal acoustic signature. As an autonomous robot, it is an important research part for the AUV how to autonomously navigate and recover to the docking station. Based on the innovative four-paddle rudderless vector propellant AUV in the laboratory, through improving the Canny edge detection, an adaptive threshold method is used to dynamically adjust the entire contour; The minimum circumferential circle method is used to determine the circle center when the threshold is optimal. Through the Unity3D simulation and pool testing, this approach has the advantages of simple, practical, and strong robustness. Compared with traditional AUV designs and conventional image recognition methods, this novel AUV can effectively employ the adaptive threshold segmentation detection method based on monocular vision, which greatly improves the underwater terminal guidance docking accuracy of better than 20 cm as well as docking success rate of exceeding 80%. In practical applications, it is of great significance for AUV energy supply management, data upload/download, and equipment maintenance.

Keywords: innovative AUV; recycling docking; Unity3D simulation; adaptive threshold; monocular vision; image processing

0 引言

随着各国对海洋探索的不断深入, 水下无人平台在海洋观测、资源开发、领海安全等领域发挥着愈加重要的作用, 其中, 水下无人潜航器由于其具有很好的机动性和大范围的巡航能力等优点, 在海洋观测、水下作战方面独具优势。

虽然 AUV 技术逐渐趋于成熟, 但目前还存在一些突出问题: (1) AUV 自身所携带的能源有限, 运行功耗大, 导致续航能力差, 使得其在水下的作业范围由于其能源容量有限受到很大的制约。(2) 水下传输数据复杂, 数据传输速率慢, 在任务下载及数据获取方面需每次上浮母船进行操作, 这就无形中增加了任务目标暴露的风险以及母船人员安全风险, 限制了其在海中大规模的布署, 更是难以充

分发挥隐蔽任务的执行能力^[1-3]。为了增强 AUV 的作业能力和扩大其作用区域, 以适应信息收集、传输、海洋调查和特殊任务操作等多种功能需求, 开展 AUV 水下对接技术的研究是必要的。

如今图像处理技术与 PC 端芯片技术的快速发展使得计算机视觉用来定位成为可能, 且光视觉定位技术相比于传统的声视觉技术在信息辨识上有着天然的优势。先进的视觉技术所提供的高精度和高分辨率的定位信息正推动着其在 AUV 的对接任务中得到广泛应用和迅速进步^[4-5]。文献 [6] 提出了一种通过在对接回收装置上固定 4 个 LED 灯组成阵列, 4 个 LED 灯通过特殊的位置摆放形成横轴与纵轴, 在 AUV 抵近对接装置后通过其摄像头捕捉 LED 灯阵列, 输入的是实时图像, 输出的是 AUV 的空间位置, 从而精准的实现对接^[6]; 文献 [7] 提出了一种基于单目视觉的

收稿日期: 2024-03-23; 修回日期: 2024-04-30。

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

作者简介: 普勇博 (1999-), 男, 硕士生。

齐向东 (1967-), 男, 教授。

引用格式: 普勇博, 齐向东, 张海龙, 等. 基于视觉的 AUV 末端回收导引方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 299-306.

MViDO 对接系统, 该系统由姿态估计子模块、跟踪子模块和制导子模块组成。该系统基于单个摄像机和 3 个球形彩色标记目标, 向坞站发出信号, 即使在暂时遮挡的情况下, MViDO 系统也可以对 3 种颜色标记进行姿态估计, 增加 AUV 对接成功率^[7]。

基于上述背景, 本文以一款矢量驱动型 AUV 为研究对象, 以实现 AUV 的自主水下对接为研究目标, 提出了以单目视觉为基础的水下自主终端对接解决方案, 并结合具体对接场景开展了多次水池试验, 验证了该方案的可行性和可靠性。

1 AUV 水下末端导引方案

AUV 的回收对接根据其离对接装置距离的远近一般分为三部分: 一般在远距离端采用多源信息融合导航方法, 如惯性导航加多普勒速度计程仪等, 中距离采用共形超短基线声学导向法^[8], 由于此时距离对接装置较远, 故对其精度要求不高。在 AUV 进行水下对接的最后阶段, 精确测定与对接系统间的相对位置和姿态是确保成功对接的核心要素, 这一过程要求所选传感器具备厘米级的导航精度。目前可供选择的水下对接导航传感器包括声学、电磁、光学以及视觉传感器, 如表 1 所示, 它们各自具有不同的性能特点。

表 1 几种不同传感器导航定位特性对比

传感器	作用距离/m	导航精度	精度影响因素
声学传感器	1 000	距离 0.5% 方位角 1~3°	噪声干扰, 数据更新率低
电磁传感器	20~30	厘米级	AUV 本身电磁场及外磁场干扰
光学传感器	10~28	厘米级	背景光变化海水本身折射, 浑浊度
视觉传感器	10~28	厘米级	分辨率, 相机畸变, 航速

通过以上表格可知, 声学传感器在近距离测量过程中方位角偏差偏大, 导航精度较低; 电磁传感器在水下探测过程中易受内外磁场干扰, 作用范围有限; 而受水中杂质和水的散射效应等影响, 水下的光线条件往往较差, 这使得光学传感器不能完全发挥作用^[9]。鉴于这些情况, 本项目决定采用一种基于视觉的 AUV 末端回收导引方法: 首先利用声学传感器将 AUV 导引至距离对接站点 10 到 20 m 的范围内, 然后当 AUV 进入视觉传感器的有效探测区域后, 利用对接站入口的同轴圆形光源作为对接标记, 设计并优化图像处理算法, 提高视觉检测精度和鲁棒性。水池试验结果验证了该方法的精度和成功率, 为 AUV 实现自主对接提供了参考。

综上所述, 如何使水下目标具有良好的清晰度是水下机器视觉成功的先决条件。本文首先对获取到的水下图像噪声问题和细节模糊问题进行处理, 消除物体边界点, 增加水下图像的对比度, 使图像细节更加清晰^[10-12]; 然后进行准确的圆环目标识别与坐标定位; 最终得到一套独有的

水下无人系统回收末端视觉对接方案, 如图 1 所示。

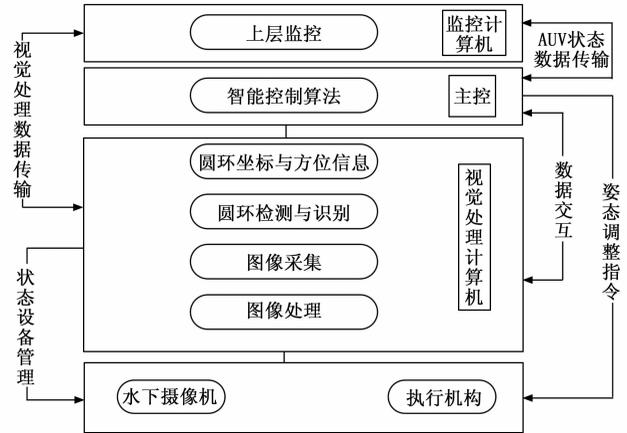


图 1 水下无人系统回收末端视觉对接方案

2 水下视觉图像获取与处理

2.1 水下摄像机畸变矫正

由于相机在实际操作中可能会受到镜头光学系统、组件装配以及工作环境中的温度和湿度等多种因素的干扰, 导致其捕捉到的图像与现实场景存在差异^[13]。因此, 为了获得更精确的图像, 需要对相机的参数进行校正以消除这种畸变错误。通过设计标定板、不同角度拍摄标定板、角点检测、求解相机内外参数并优化等流程完成此标定流程。

将标定板右上角所在位置设为世界坐标系原点, 将特征点从世界坐标系转换为像素坐标系需要在 4 个坐标系之间进行转换^[14]。换算公式如式 (1):

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = MX \quad (1)$$

其中: M 是一个 3×4 的透视投影矩阵; X 是世界坐标系内空间中一个点的坐标; M_1 由相机的内部参数决定; 而 M_2 则与相机相对于世界坐标系的位置有关, 由相机的外部参数确定。本研究采用了一种专业水下网络相机, 其切向畸变很小, 图像传输支持的协议众多, 为水下视觉图像的获取与处理提供了良好的硬件支持。

2.2 基于改进的 Canny 边缘检测

水下成像存在噪点多、颜色失真、对比度低、细节丢失等问题, 但水下终端对接需要准确捕捉图像细节。虽然 Canny 算法在边缘检测中应用广泛, 但高斯滤波使去噪时边缘平滑, 当 Sobel 的卷积核较小时, 检测精度较低, 会导

致误检测^[15-16]。为了解决这些问题, 我们使用双边滤波代替高斯滤波去噪和 Scharr 算子来获取梯度。

双边滤波是对高斯滤波的改进, 它同时考虑了像素之间的距离和相似度, 通过避免每个像素的高度差异部分被模糊, 保留图像的主要信息特征, 从而得到更清晰的边缘。双边滤波的公式如式 (2) 所示:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{\sum_{(i,j) \in S(x,y)} w(i,j)g(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S(x,y)} w(i,j)} \quad (2)$$

其中: $\hat{f}(x, y)$ 是双边滤波后的像素值; $f(x, y)$ 为像素值; $S(x, y)$ 是指以 (x, y) 为中心的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的大小的范围; $w(i, j)$ 是加权因子, 由以下两部分组成:

$$\begin{cases} w_s(i, j) = w_s(i, j) \times w_r(i, j) \\ w_s(i, j) = e^{-|g(i,j)-g(x,y)|^2/2\sigma_s^2} \\ w_r(i, j) = e^{-|g(i,j)-g(x,y)|^2/2\sigma_r^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $w_s(i, j)$ 为空间临近高斯函数, 随着目标像素与中心像素之间的欧几里得距离的增加而减小; $w_r(i, j)$ 为像素值相似度高斯函数, 随着目标像素与中心像素数值差异的增大而减小^[17]。

Scharr 算子是对 Sobel 算子的优化, 适用于 3×3 的卷积核大小。它给中心元素分配了更高的权重, 这样可以提供更强的边缘响应, 并能够准确地检测图像中微妙的变化。此外, 它具有与 Sobel 相似的计算速度, 但在准确性和噪声抗扰性方面表现更佳。Scharr 算子的公式如式 (4) 所示:

$$\begin{aligned} G_x &= \begin{pmatrix} -3 & 0 & +3 \\ -10 & 0 & +10 \\ -3 & 0 & +3 \end{pmatrix} * I \\ G_y &= \begin{pmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ +3 & +10 & +3 \end{pmatrix} * I \\ G &= \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: I 是原始图像; G_x 和 G_y 分别是图像的水平 and 垂直梯度方向; G 是像素点的梯度大小; θ 是梯度方向。

水下光学标记的近景彩色原始照片如图 2 所示。可以看出水下光源色散不均匀, 二值图像中存在大量的背景噪声^[18]。与传统的 Canny 边缘检测相比, 改进的 Canny 算法在大幅度降低噪声的同时能够更好地保留边缘细节信息。减少了缺失真实边缘和错误识别非边缘的概率, 从而全面

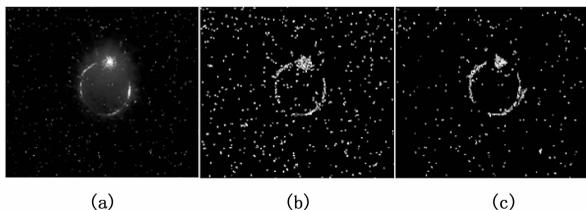


图 2 传统与改进的边缘检测水下照片对比

提高了边缘检测。

为了客观地进一步评估所提出的算法, 使用峰值信噪比 (PSNR) 和 Platt 品质因数 (PFOM) 进行性能比较。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, 值越大表示图像质量越好。计算 PSNR 的公式如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} \text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \\ \text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中: I 和 K 是原始图像和处理后的图像; m 和 n 是图像大小; MAX_I 为像素最大值。

PFOM 通常用于评估处理后图像的边缘质量^[19-20], 值越大表示理想边缘越接近实际边缘。PFOM 的计算公式如式 (6) 所示:

$$\text{PFOM} = \frac{1}{\text{Max}(N_A, N_L)} \sum_{i=1}^{N_A} \frac{1}{1 + \alpha d_i^2} \quad (6)$$

N_A 和 N_L 分别指的是检测到的边缘和理想边缘; d 表示两者之间的距离; α 是用来补偿错位边缘的补偿系数。

将检测到的边缘与原始图像中的边缘进行比较, 计算结果如表 2 所示。与传统 Canny 检测相比, 改进 Canny 检测的 PSNR 值提高了 2 db, 去噪能力更好, PFOM 值提高了 0.25, 边缘检测精度更高。

表 2 水下图片优化结果

指标	传统的 Canny 检测	改进的 Canny 检测
PSNR	21.138	23.125
PFOM	0.255	0.506

2.3 基于形态学的细节模糊

形态学滤波包含膨胀、腐蚀, 通过两者的组合可以实现消除噪声、分割出独立的图像元素、寻找图像中的明显区域以及求解图像梯度等功能^[21]。

对于结构体 B 膨胀图像 A 的基本定义为:

$$A \oplus B = \{x \mid (B)_x \cap A \neq \emptyset\}$$

对于结构体 B 腐蚀图像 A 的基本定义为:

$$A - B = \{x \mid (B)_x \subseteq A\}$$

通过结合膨胀和腐蚀算法, 能够有效地去除图像中的噪点。膨胀操作会放大图像中高亮度区域, 增强物体的边缘; 而腐蚀操作可以去除图像中的噪声和小的区域, 并强化暗噪声点^[22]。在处理水下图像时, 关键在于识别和提取亮度高的光源对象, 并适当抑制背景中的暗噪声点。因此, 采用先腐蚀后膨胀的顺序进行处理, 不仅能够减少过滤过程中可能遗漏的噪声点, 还能有效地分离那些细微相连的目标物体, 实现图像的平滑处理而不改变其形状和尺寸。

3 实施方案

3.1 水下图像预处理

水下环境中, 光线的传播会导致亮度显著下降及颜色失真, 进而引起灰度值的变化和图像失真。通过应用图像

复原技术,可以有效减轻光线衰减带来的影响,并还原出水下图像原本未受影响时的状态。本研究将依据水下光线传播的特点来构建一个退化模型,并对图像中的色彩暗通道进行修正,以达到补偿效果。

水下图像增强的目的是为了加强光源目标特征,削弱不相关的背景特征。图像增强有空间域和频域两大类,相比于频域需要空间变换作为中间变量,空间域则直接对图像像素进行处理,为了减少运算时间,本文进行空间域直方图灰度值变换方法研究,实现图像对比度增强。在水下拍摄的图像中,常常夹杂着各种随机噪声,这些噪声与图像中的重要信息在频率上相互交织,从而影响了图像的清晰度。图像处理领域提供了多种滤波方法来解决这一问题,包括空间域滤波、频域滤波和形态学滤波等^[23],这些方法都旨在去除图像中的噪声,提升图像质量。

3.2 水下光源特征提取

经过边缘检测以识别图像中的目标光源后,利用这些边缘来提取特征。在圆形特征提取领域,主要有两种流行的技术:利用 Hough 变换的方法和依靠曲线拟合的技术。Hough 变换方法由于其简单性而广泛应用,但它的缺点在于计算复杂,无法处理复杂的形状。为了克服这个问题,我们通常会选择曲线拟合技术如最小二乘法来确定光源中心在图像坐标系中的确切位置。

AUV 的对接过程是个动态变化位置的过程,固定的图像检测阈值适应性较差,漏检和误检率较高。在离回收装置相对较远时,光源成像范围较小,很多边缘将不会被提取得到。而当靠近回收装置时,许多非边缘被错误的提取为边缘。因此,需要结合 AUV 的对接过程,动态调整阈值,进行自适应变化调整。

AUV 由远及近时光源目标面积由小变大,因此在远处时采取小阈值,增加识别可能性,在近处时采取大阈值,提高识别精准度。因此可以根据末端路程的一半约 5 m 处的面积进行阈值调整,末端的中远程逐次递减,末端的中近程或递增,递变程度需要根据实际情况进行设定。自适应阈值调整过程如图 3 所示,该方法以对接装置上的光源大小作为估计距离的参考。当目标距离较远时,阈值逐渐降低以检测微弱的光源。相反,当距离变近时,阈值逐渐增加到一个最佳值,以准确检测光源区域^[24]。此外,该方法还包含一种安全机制,以防因阈值设置过低而导致过度检测。这种方法在远处优先进行搜索,在近距离时则注重检测的准确性,从而提高了水下光学标记的检测和分割能力。

由于水下环境中存在额外水面光照射及其他杂光的干扰,图像内高亮部分除了目标光源,还有水面以及部分物体的反射,将这些非导引光源统称为伪光源。伪光源的存在严重干扰视觉定位的成功及精度,必须进行筛选剔除,因此必须对伪光源和导引光源的特性进行比较和分析,水下光源识别如图 4 所示。对已经检测到的光源区域进行进一步处理,目的是消除由伪光源引起的干扰区域,以及光

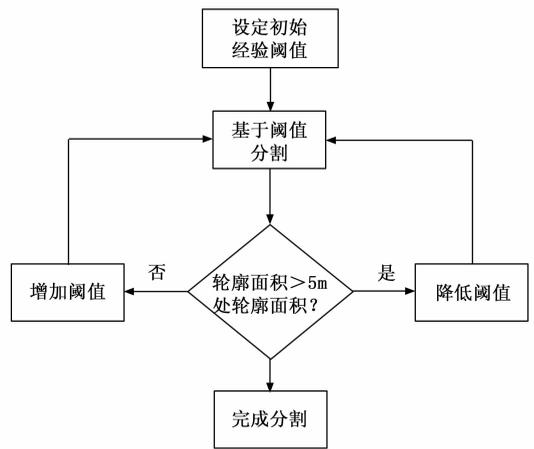


图 3 自适应阈值调整图

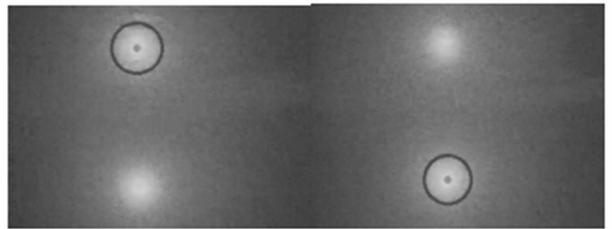


图 4 水下光源识别

源区域边缘的噪点。

3.3 单目视觉定位

姿态的解算涉及世界、相机、图像、像素坐标系之间的转换,所以首先利用公式(1)建立起4个坐标系之间的转换。单目视觉系统的运作机制是捕捉视场中物体反射的光线,并通过镜头中心点将这些光线投影到图像平面形成二维图像,这本质上构成了一种线性的摄像机成像模型。基于此可以采用简化的小孔相机模型来表征单目摄像机。

准确的相机标定是单目视觉系统成功进行距离测量的基础,即便如今相机制造工艺非常先进,广角镜头仍可能存在较大的光学畸变。为了进行有效的测距,单目相机需要获取场景中特定特征点的真实相对位置,并掌握相机的内在和外参参数。内参即相机本身特性,例如焦距和畸变系数;而外参是描述相机在世界坐标系中的位置和姿态的参数。因此,本文需要对水下相机建立畸变模型,分析张正友单目相机标定计算方法。利用水下高清摄像头从不同的角度拍摄标定板,得到如图 5 所示 16 对标定板图像。

在进行完单目相机标定后,求解出相机的内外参数,设定世界坐标系,计算出 AUV 的三维位置信息^[25],再根据世界坐标系与像素、相机坐标系之间的转换关系,估算出 AUV 位于相机坐标系下的相对位置及相对姿态。

4 水下末端对接定位试验

由于终端对接距离相对较短,在视觉处理之后,还需要基于对接位置进行快速的运动追踪处理,AUV 的姿态调

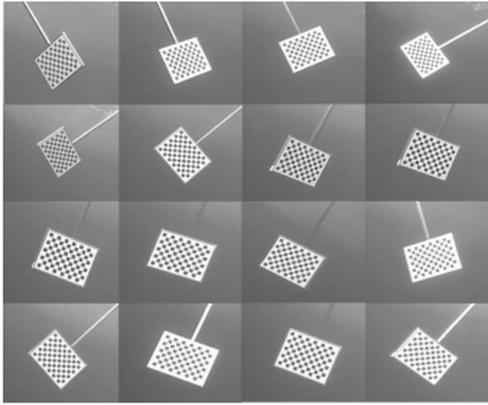


图 5 不同角度的棋盘格图像

节控制是一项复杂且关键的任务。与单环 PID 控制相比, 双环 PID 控制在动态响应速度和超调减少方面具有明显优势。因此, 我们使用外环来控制 AUV 的位置, 而内环控制其姿态。AUV 的位置-姿态控制器如图 6 所示。

AUV 对接导引图像识别系统将目标图像的位置信息传给下位机运动控制系统进而控制 AUV 在对接过程中整体的姿态调整。运动控制系统关系到整个水下对接导引的精度, 因此采用了双闭环负反馈系统来控制 AUV 的整体姿态运动。相比于单环 PID, 双闭环 PID 控制在动态响应速度、超调量等方面优势明显, 外环为目标图像位置控制, 内环负责系统整体姿态角的估算。

将 AUV 的水平和垂直偏移量作为输入被送入外环, 并通过位置 PID 控制器传递到内环, 以确定当前偏航角度和俯仰角度。处理完综合导航系统的姿态估计数据后, 姿态 PID 控制器输出 4 个电机的速度和方向。视觉引导与运动控制的结合使 AUV 在水中前进时能够持续调整其水平偏航和垂直俯仰方向, 确保了高可控性和效率。

如图 7 所示, 在 AUV 对接过程中, 设定的偏航角经历了几次大的角度变化, 跟踪曲线能够快速连续地进行追踪。如图 8 所示, 俯仰角跟踪曲线也能够迅速适应预设航向曲线上的复杂变化, 并且估计误差很小。在偏航和俯仰调整期

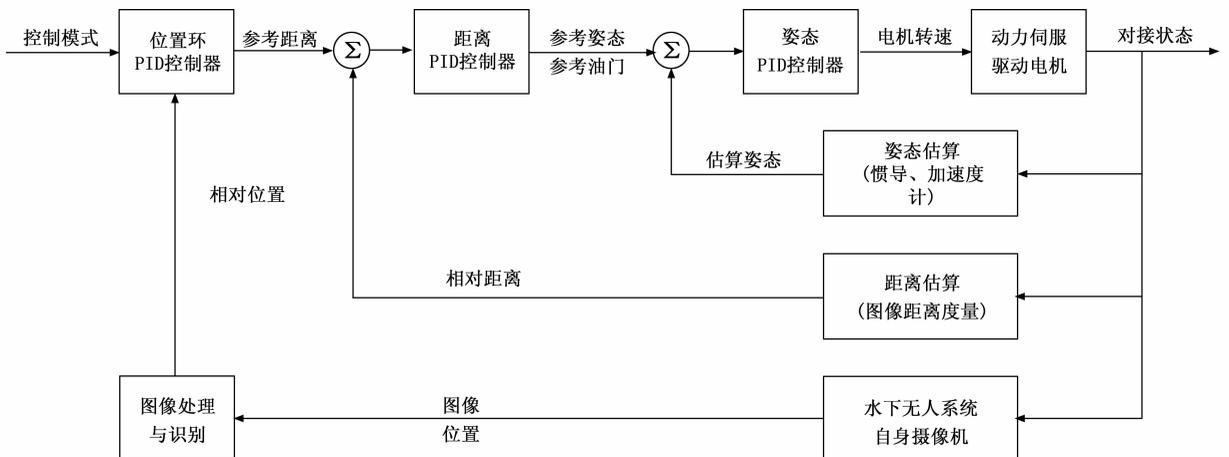


图 6 基于视觉的智能控制框图

间, AUV 始终能够稳定地定位在正确的方向和深度, 这表明位置-姿态控制系统能够快速而动态地响应, 稳定追踪目标, 并准确实现 AUV 的双自由度姿态调整, 使得最终在视觉对接过程中快速及时的调整 AUV 姿态有了较强的鲁棒性。

4.1 相机标定实验

首先利用所选单目相机进行不同角度的棋盘图像采集, 然后使用 MATLAB 软件对相机图像进行张正友相机标定, 最终得出具体相机内外参数, 其结果如表 3 所示。

表 3 相机内参数和几何畸变系数

相机参数和几何畸变系数	数值(水下)
焦距 k_x	1 275.3
焦距 k_y	1 276.6
主点 u_0	1 053.5
主点 v_0	622.5
径向畸变 k_{r1}	-0.423
径向畸变 k_{r2}	0.253
切向畸变 k_{t1}	0.157
切向畸变 k_{t2}	-0.139

4.2 Unity3D 半实物仿真验证

在开展水池对接试验之前, 采用 Unity3D 对 AUV 对接流程进行半实物仿真, 为 AUV 水下对接导引开发过程中的性能评估、控制算法改进提供了仿真和验证平台。仿真效果示意图如图 9 所示, 通过模拟光圈, 按照预设对接任务进行视景仿真, 实现虚拟、本体 AUV 的同步工作, 并对系统进行实时监测、记录数据。进行仿真实验 5 次, 4 次成功与对接装置完成对接, 其进入对接装置后 AUV 头部摄像头第一视角图如图 10 所示。

通过上位机导出仿真试验数据图, 其导引对接过程航迹如图 11 所示, 可以看出 AUV 在对接过程中姿态控制相对较好, 没有出现较大的横摆俯仰角偏差。

4.3 水池对接试验

开展水池对接试验, 为了验证算法的准确性, AUV 根据距对接装置中心不同的角度、距离选取多个人水点, 待

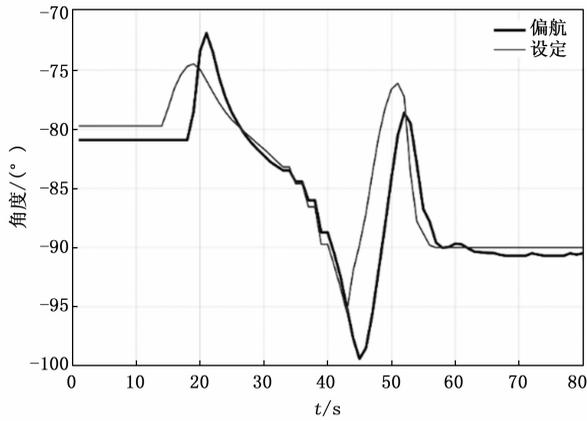


图 7 偏航设置及追踪

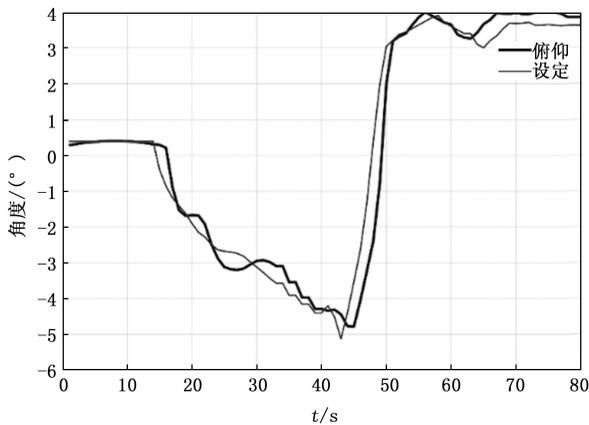


图 8 偏航设置及追踪

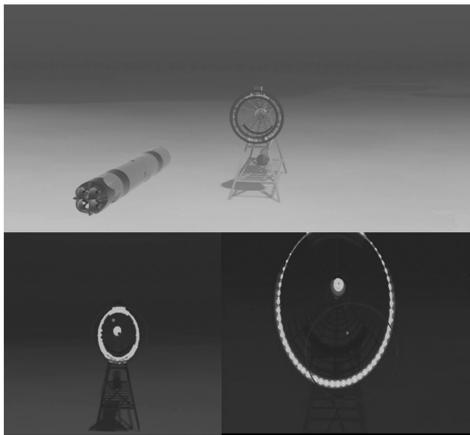


图 9 半实物仿真效果图

AUV 识别到光源后, 依靠视觉导引进行姿态的调整, 分析结果数据, 改进视觉对接算法及方案。光源标记的检测与跟踪过程如下图所示, 红点表示相机图像的中心, 绿点表示识别光源的中心。具体对接过程中摄像头捕捉水下光圈识别画面如图 12 所示。

4.4 实验数据及分析

由于本次 AUV 对接回收视觉作用范围是 10 m 以内,



图 10 AUV 成功进入对接装置示意图

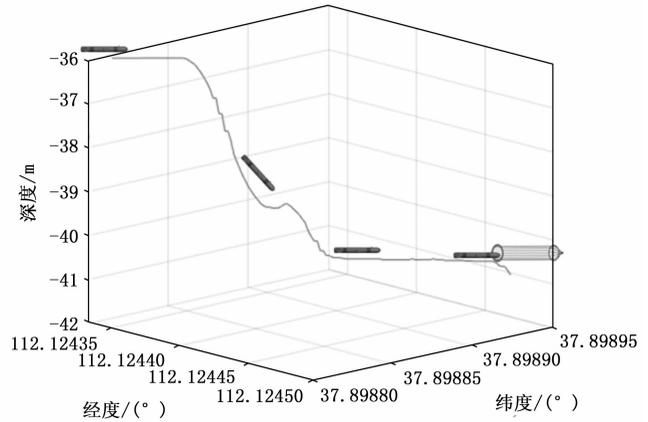


图 11 AUV 导引对接航迹图

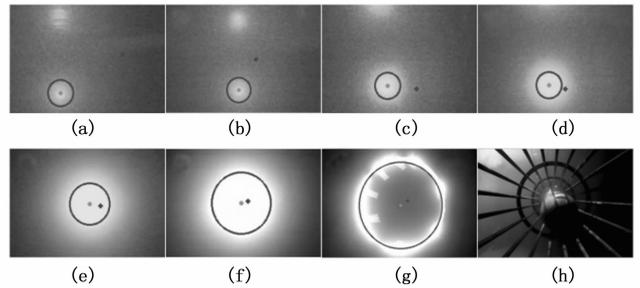


图 12 AUV 水池单目视觉对接导引回收过程

取距离定位即 z 坐标值, 选取距离相机 10 m、5 m、2 m 的图像进行定位分析, 每个距离图像抽取 20 个样本进行定位, 取定位距离为精度参考, 中心定位数据选择目标光源的圆心。由 AUV 中的工控机记录对接过程中各项数据并自动生成 Excel 表格, 距离定位数据及分析图表如图 13~15, 表 4~6 所示。

表 4 距离 10 m 处单目视觉定位数据表

	单目视觉定位/mm	对接装置中心定位/mm
均值	9 810.8	9 806.5
均值误差	189.2	193.5
总体标准差	126.532 8	89.592 6

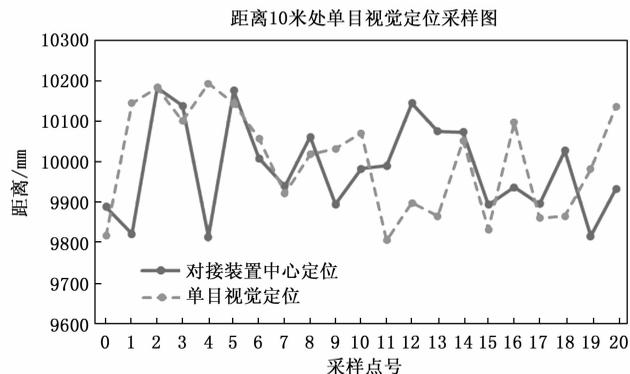


图 13 距离 10 m 处单目视觉定位数据图

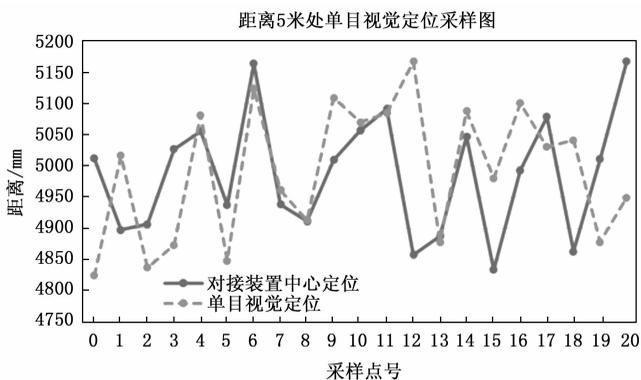


图 14 距离 5 m 处单目视觉定位数据图

表 5 距离 5 m 处单目视觉定位数据表

	单目视觉定位/mm	对接装置中心定位/mm
均值	4 863.7	4 868.75
均值误差	136.3	131.25
总体标准差	38.526 8	29.163 4

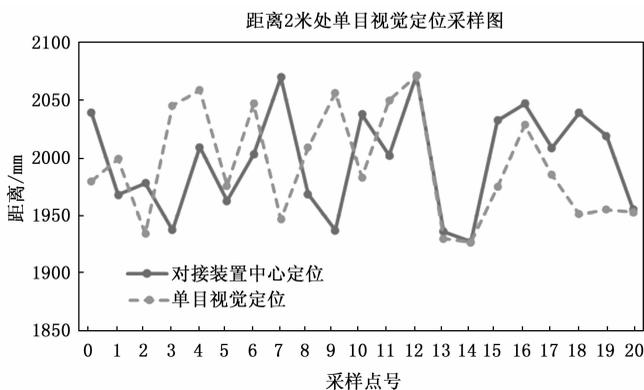


图 15 距离 2 m 处单目视觉定位数据图

表 6 距离 2 m 处单目视觉定位数据表

	单目视觉定位/mm	对接装置中心定位/mm
均值	1 926.4	1 923.5
均值误差	73.6	76.5
总体标准差	22.573 8	25.219 7

由图表可知, 距离越近, 视觉定位精度越高, 数据越准确。相较于双目视觉, 单目视觉定位有着易于标定, 结构简单, 对计算单元的性能要求不高等优势, 但是双目视觉定位精度更高, 对水下复杂环境适应性更强, 空间视角更自然, 因此后续工作就是基于改进的双目和单目视觉定位在水下对接中的综合应用, 以期达到更高的对接精度和成功率。

在水下对接过程中, AUV 最远在 10 m 处开启视觉识别, 调整航向角度的偏差为 9° , 调整深度的偏差为 0.5 m。AUV 以 0.8 Knot 的速度巡航, 整个对接过程大约用时 40 s。图像光源中心被精确定位并以超过 25 fps 的速率处理。通过改变 AUV 与对接装置不同的距离和入水角度, 进行实验 23 次, 成功对接 19 次, 总体对接成功率为 83%。这表明在充满噪音和干扰的复杂水下环境中, 视觉引导方法具有高效且准确的对接恢复能力。

5 结束语

本研究依托于一种创新型 AUV 水下运载平台, 提出了一套基于单目视觉的对接技术方案, 并在水池环境中进行了实际对接测试以验证其有效性。研究的主要内容涵盖了视觉引导定位系统的构思与规划、水下图像的降噪处理和摄像机在水下环境中的校准过程、水下图像的分割技术和特征点的识别匹配方法, 以及相应的定位算法开发, 最后通过水池试验来检验整个系统的性能。

在末端回收导引过程中, 采用环型光源作为对接导引标识, 采用改进的 Canny 边缘检测算法提高轮廓检测精度, 最后检测位于下方的最大轮廓, 通过轮廓筛选剔除水面干扰及杂散光源干扰。该图像检测方法简单、精准、具有抗干扰能力, 具有较强的适应性。此外, 为了提高水下图像中目标与背景的分離能力, 提出了一种自适应阈值分割方法, 有效地实现了导引灯与周围背景清晰区分。

本文致力于推动 AUV 能够更准确、可靠地执行水下无人对接及回收任务。水下对接技术是 AUV 在水下长时间作业与水下数据传输的重要保证, 在民用、军用领域均有很高的应用价值。AUV 水下对接技术在海底大范围扫描, 维护祖国海域安全中有着重要作用。

参考文献:

[1] TEOK K. A robust fuzzy autonomous underwater vehicle (AUV) docking approach for unknown current disturbances [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering: A Journal Devoted to the Application of Electrical and Electronics Engineering to the Oceanic Environment, 2012, 37 (2): 143-155.

[2] FENGTIAN L, HUIXI X, KAI S, et al. Estimation of positions and poses of autonomous underwater vehicle relative to docking station based on adaptive extraction of visual guidance features [J]. Machines, 2022, 10 (7): 571-571.

- [3] TIANLEI W, QICHAO Z, CANJUN Y. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 224 (3): 345–352.
- [4] SHUANG L, HONGLI X, YANG L, et al. Visual navigation for recovering an AUV by another AUV in shallow water [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19 (8): 1889–1889.
- [5] 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.
- [6] MINGJIU Z, GUANDAO W, YONGXIN X, et al. A unified approach for underwater homing and docking of over-actuated AUV [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9 (8): 884–884.
- [7] FIGUEIREDO B A, MATOS C A. MViDO: A high performance monocular vision-based system for docking a hovering AUV [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (9): 2991–3027.
- [8] FAID M Y, RIZAL M A. Switching target in position-based visual servoing for collision-free underwater docking of an autonomous underwater vehicle [J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2017, 46 (12): 2452–2460.
- [9] KAI S, XIAOHUI W, HUIXI X, et al. Integrated approach to AUV docking based on nonlinear offset-free model predictive control [J]. *Measurement and Control*, 2023, 56 (3–4): 733–750.
- [10] 朱志鹏. 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, 2021.
- [11] 伊文康. 基于视觉的水下机器人自主对接引导算法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.
- [12] LIU J, GAO J, YAN W, et al. Image-based visual servoing of underwater vehicles for tracking a moving target using model predictive control with motion estimation [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2023, 91 (1-2-3): 46–66.
- [13] BO Z, PING Z, FU Y, et al. Fast underwater optical beacon finding and high accuracy visual ranging method based on deep learning [J]. *Sensors*, 2022, 22 (20): 7940–7940.
- [14] HYEON G K, JIHONG L, YEOP P L, et al. A study on docking guidance navigation algorithm of AUV by combining inertial navigation sensor and docking guidance sensor [J]. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 2019, 25 (7): 647–656.
- [15] CANJUN Y T Z D L. Terminal underwater docking of an autonomous underwater vehicle using one camera and one light [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2016, 50 (6): 58–68.
- [16] LINGYAN D, HONGLI X, XISHENG F, et al. Research on autonomous underwater vehicle homing method based on Fuzzy-Q-FastSLAM [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2021, 143 (5): 571–580.
- [17] HAOYUAN C, JINKUI C, RAN Z, et al. Real-time position and attitude estimation for homing and docking of an autonomous underwater vehicle based on bionic polarized optical guidance [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19 (5): 1042–1050.
- [18] PARK J, JUN B, LEE P, et al. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36 (1): 48–61.
- [19] LEE P, JEON B, LEE C. A visual servo algorithm for underwater docking of an autonomous underwater vehicle (AUV) [J]. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2003, 17 (1): 1–7.
- [20] 张梦辉. 基于机器视觉的自主式水下航行器末端导引系统关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [21] 李开飞. AUV 水下对接关键技术及对接碰撞问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [22] PALOMERAS N, VALLICROSA G, Mallios A, et al. AUV homing and docking for remote operations [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 154106–120.
- [23] LI Y, JIANG Y, CAO J, et al. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110163–173.
- [24] A M, V. I P. AUV positioning algorithms used in its homing and docking to underwater docking station [J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2023, 14 (1): 66–74.
- [25] RI L, YUCHENG Z, DEJUN L, et al. Underwater electromagnetic guidance based on the magnetic dipole model applied in AUV terminal docking [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10 (7): 995–995.
- two-photon imaging applications [J]. *Neurophotonics*, 2022, 9 (3): 031920.
- [17] BEAULIEU DR, DAVISION IG, KILIÇ K, et al. Simultaneous multiplane imaging with reverberation two-photon microscopy [J]. *Nature Methods*, 2020, 17 (3): 283–286.
- [18] 刘 创, 张云海, 黄 维, 等. 皮肤反射式共聚焦显微成像扫描畸变校正 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47 (10): 154–159.
- [19] 徐宝腾, 杨西斌, 刘家林, 等. 高速扫描激光共聚焦显微内窥镜图像校正 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28 (1): 60–68.
- [20] 杨 宁, 霍 炬, 龚声民. 基于 NI FlexRIO 的图像实时采集及处理系统 [J]. *应用光学*, 2013, 34 (2): 239–247.

(上接第 298 页)

- [14] TSYBOULSKI D, ORLOVA N, GRIFFIN F, et al. Remote focusing system for simultaneous dual-plane mesoscopic multiphoton imaging [J]. *BioRxiv*, 2018; 503052.
- [15] YU C H, STIRMAN J N, YU Y, et al. Diesel2p mesoscope with dual independent scan engines for flexible capture of dynamics in distributed neural circuitry [J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 6639.
- [16] HAR-GIL H, GOLGHER L, KAIN D, et al. Versatile software and hardware combo enabling photon counting acquisition and real-time display for multiplexing, 2D and continuous 3D