

水下图像增强技术在水下机器人设计中的应用研究

王宇轩

宁波财经学院, 浙江 宁波 315175

DOI: 10.61369/SSSD.2026090008

摘 要： 水下机器人在海洋资源勘探、水下环境监测以及水下作业维修等领域有着广泛的应用，其视觉感知系统性能如何，直接影响着其作业精度。由于水下水体对光的吸收与散射效应，水下机器人搭载的光学相机在获取图像时往往会面临色彩失真、细节模糊等问题，这也会对其水下作业能力带来直接冲击。对此，本文在分析水下图像增强技术核心类型及适配特性的同时，就水下图像增强技术在水下机器人设计中的具体应用和改进方向等进行了探讨，旨在为相关人士提供一些借鉴参考。

关 键 词： 水下图像增强；水下机器人；设计应用

Research on the Application of Underwater Image Enhancement Technology in the Design of Underwater Robots

Wang Yuxuan

Ningbo University of Finance and Economics, Ningbo, Zhejiang 315175

Abstract： Underwater robots are widely used in marine resource exploration, underwater environmental monitoring, underwater operation and maintenance, and other fields. The performance of their visual perception system directly determines their operational accuracy. Due to the absorption and scattering effects of underwater media on light, optical cameras mounted on underwater robots often suffer from problems such as color distortion and blurred details when capturing images, which directly impair their underwater operational capabilities. In response to these issues, this paper analyzes the core types and adaptive characteristics of underwater image enhancement technologies, and discusses their specific applications and improvement directions in the design of underwater robots, aiming to provide references for relevant researchers and engineers.

Keywords： underwater image enhancement; underwater robots; design and application

随着海洋开发力度的不断加大，复杂水下作业也从以往的“人工模式”逐步向着“机器人模式”方向转变，水下机器人被应用在了海洋资源勘探、水产养殖监测、水下管线检修等多个领域^[1]。而在水下环境中，水体对于光线的选择性吸收散射作用、水中浮游生物与悬浮物的干扰等因素直接影响着水下机器人相机图像捕捉效果。水下图像增强技术能够依托特定的算法或技术手段，对退化的水下图像进行处理，校正色彩偏差、提升对比度、还原细节信息，从而改善图像质量，为水下机器人的视觉感知提供清晰、可靠的图像数据。将该技术应用到水下机器人设计中来能够有效弥补水下视觉感知的短板，对于水下机器人自主作业能力与环境适应性的提升有着重要现实意义。

一、水下图像增强技术核心类型及适配特性

从处理原理角度来看，水下图像增强技术可以分为“传统”与“深度学习”两大类。它们在适配场景以及处理效果方面有着一定的差异，具体可以基于水下机器人的硬件条件和作业需求进行科学选择，以此来更好地保证水下机器人设计的科学性与实用性。

（一）传统水下图像增强技术

对于传统的水下图像增强技术而言，其硬件构成较为简单，同时运算量不大，通常适用于作业场景简单或者硬件配置有限的水下机器人^[2]。该类技术的核心包括直方图均衡化（HE）、对比度

限制的直方图均衡化（CLAHE）、小波变换、Retinex 算法等。其中，对比度限制的直方图均衡化作为直方图均衡化的改进型，能够有效降低水下机器人作业过程的噪声，保证水下机器人相机生成图像的局部对比度，还原图像的一些具体细节。它一般适用于光照均匀的浅水区，成本低并且很容易部署在一些嵌入式设备当中^[3]。此外，传统水下图像增强技术中的小波变换技术能够推动图像从空域向频域的转变，让高频细节部分得到有效增强，保障浅水环境下的图像清晰度，但是其在深水场景下的图像处理效果是较为有限的^[4]。而 Retinex 算法则基于颜色恒常理论，通过分离图像的辐射照度与反射照度，来对亮度进行矫正，适用于亮度不高、照度不均

匀的一些水下场景，它的劣势在于增强后容易出现噪声放大、图像失真等问题，因此需要结合降噪处理来处理使用。

（二）基于深度学习的水下图像增强技术

基于深度学习的水下图像增强技术主要是借助神经网络模型进行运转作业，能够自主学习水下图像退化规律，可以应对浑水、深水等一些较为复杂的水下环境，因此图像处理效果相对于传统类水下增强技术较为优秀^[6]。其核心技术包括有生成对抗网络（GAN）、多专家学习模型、仿生视觉增强模型等。其中，生成对抗网络模型（包括 FUnIE-GAN、CycleGAN 等）能够快速增强水下图像且对数据依赖度较低，无需成对的水下图像数据，能够在单板计算机上进行实时推理，适用于那些实时作业需求的应用场景^[6]。轻量级深度学习模型（包括 CFENet、轻量级非线性无激活网络）不但能够保证增强效果，拥有较快的处理速度，有效提高运算效率，而且可以适配那些硬件性能不高的水下机器人，充分提升 PSNR、SSIM 指标，进而有效提高图像质量。此外，仿生视觉增强框架（如 BRIUIE）借鉴生物视网膜的结构与功能，可生成更符合人眼视觉评估标准的增强图像，更有利于机器人的目标识别与环境判断。

二、水下图像增强技术在水下机器人设计中的具体应用

水下机器人的核心设计模块主要包括视觉感知系统、自主导航系统、目标识别系统，水下图像增强技术通过为这三大模块提供高质量的图像数据，实现机器人作业性能的提升，其具体应用需结合模块功能与作业需求，实现技术与设计的深度融合。

（一）视觉感知系统设计中的应用

视觉感知系统好比是水下机器人的“眼睛”，负责识别和反馈水下环境信息等重要职责。它主要有光学相机、图像采集以及处理模块所构成。水下图像增强技术主要集成于图像处理模块，能够有效保证水下机器人的视觉感知能力^[7]。在具体的设计过程中，应当基于水下机器人的具体作业场景（深水或浅水、清水或浑水）来科学选择相应的增强算法。例如，在浅水或水质较为清澈的作业环境中，水下机器人视觉感知系统的设计应当同时运用白平衡技术与 CLAHE 算法，在此基础上，集成于图像处理模块。期间，通过白平衡技术来对水下图像的蓝绿色偏进行及时校正，在此基础上，依托 CLAHE 算法来保证后续图像的对比度，还原养殖生物体态特征、运动状态等一些细节，让水下机器人能够更好地捕捉到周围的环境信息，为后续的作业决策奠定数据基础。又如，在深水或水质较为浑浊的作业环境中，水下机器人的视觉感知系统设计应当运用轻量级 GAN 模型（如 FUnIE-GAN），通过嵌入式芯片的运用来强化算法，以此来达到实时增强水下图像的目的，避免可能出现的图像模糊或光线昏暗等问题，进而保证水下机器人的工作效率^[8]。此外，在水下机器人视觉感知系统设计中，需考虑图像增强的实时性，避免因算法运算量过大而导致的延迟处理问题，从而影响到水下机器人的工作效率。因此，对于那些硬件配置有限的水下机器人，应当优先运用传统增强技术，或者运用一些轻量级的深度学习模型；对于那些结构复杂的

高端大型水下机器人，则可以采用复杂的深度学习模型，同时运用 GPU 加速模块，来同时保证作业实时性以及作业有效性。

（二）自主导航系统设计中的应用

在水下机器人设计中，自主导航系统主要是基于视觉图像识别水下的地形特征与路标信息（如标记物、礁石、水下管道等），从而为机器人作业路径规划提供数据支持。但是退化的水下图像会使得地形判断、路标识别出现偏差，进而导致水下机器人导航故障等问题。水下图像增强技术则能够还原图像中的一些地形细节、路标信息，为机器人自主导航提供视觉信息支持，有效提升其导航的稳定性和精准性^[9]。水下机器人的自主导航系统设计中，图像增强技术与导航算法（如视觉 SLAM 算法）协同工作：首先依托增强算法来对水下地形、路标图像信息进行捕捉，校正其色彩偏差，提升其细节清晰度，让导航算法能够精确地识别出具体的地形信息和路标信息，然后依托导航算法基于增强后的图像数据，完成对作业路径的计算与规划，有效避免传统模式下可能存在的路线偏移以及碰撞等问题。例如，在水下管线检修机器人自主导航系统设计过程中，可以依托 Retinex 算法与小波变换结合的方式，来有效增强管线图像的边缘细节，让导航算法能够清晰识别管线走向、接口位置，保证水下机器人能够精准导航和顺利作业。此外，面对浑水环境下的导航精度问题，可以依托图像融合增强技术，结合不同传感器（光学相机、声呐）获取的图像信息，通过拉普拉斯图像融合方法来生成更全面和更清晰的图像，进而为水下机器人自主导航提供精准的视觉数据支持。

（三）目标识别系统设计中的应用

目标识别是直接影响水下机器人作业质量的功能模块，它的识别精准度如何主要取决于水下图像的生成质量。水下图像增强技术在该系统中的运用主要目的是改善图像生成质量，提升目标与背景的区分度，从而让识别算法能够快速、精准地提取信息、识别目标^[10]。在该系统的设计过程中，图像增强技术作为预处理环节，集成于识别算法前端，具体应用流程为：相机捕捉水下目标信息——增强算法进行处理（校正色彩、提升对比度等）——识别算法提取目标特征——完成目标识别。例如，在水下勘探机器人设计中，勘探目标的图像容易因水体散射出现细节模糊、色彩失真等问题，采用基于对比学习的增强与检测多任务框架，可在增强图像质量的同时，引导增强过程向有利于目标检测的方向进行，使识别算法能够准确提取目标的轮廓、纹理特征，实现目标的精准识别与定位。又如，在水下故障检测机器人的目标识别系统设计中，通过轻量级深度学习增强模型，处理水下设备的图像，还原具体目标的故障细节，在此基础上，识别算法基于所获得的信息快速识别出故障的类型与位置，进而为后续的故障维修作业提供精准的信息依据。

三、水下图像增强技术在水下机器人设计中的应用要点与优化方向

（一）核心要点

水下图像增强技术在水下机器人设计中的应用首先应当注重

适配性，即要结合水下机器人的具体应用场景、硬件配置来科学选择技术类型，以此来保证设计的实用性。例如，浅水作业或小型水下机器人应当优先选择传统的增强技术或者运用轻量级的深度学习模型；深水作业或大型水下机器人则应当选择复杂深度学习模型，以此来保证其作业效率。其次，是要保证设计的实时性控制，即要优化增强算法的实际效率，缩短其反应处理时间，具体通过简化算法结构以及硬件加速等方式来实现这一目标。再者，是要注重协同优化原则，保证水下图像增强技术和机器人相机、导航以及目标识别等模块进行协同设计，以此来提升水下机器人的整体作业性能。

（二）未来优化方向

未来水下机器人将会继续得到广泛应用，而其优化方向主要有三个方面：一是轻量化算法的研发，通过简化深度学习模型结构来达到降低运算量与参数量的目的，有效保证增强效果，提升算法的适配性与实时性，从而应用于各类水下机器人设计之中；

二是多种先进技术的融合，将红外线、声呐感知等技术与图像增强技术进行融合运用，以此来进一步提高水下机器人的作业性能；三是自适应的增强，即研发能够基于水下环境变化而自主调整增强参数算法的水下机器人，以此来适应不同的场景，全面提高水下机器人的自主作业能力。

总之，水下图像增强技术是提升水下机器人视觉感知能力的关键支撑，其在机器人视觉感知、自主导航、目标识别三大核心设计模块中的合理应用，能够有效解决水下图像退化问题，提升机器人的作业精度、效率与环境适应性。在实际的水下机器人设计中，应当基于其具体的应用场景和硬件条件来科学选择增强技术类型，以此来充分发挥水下图像增强技术作用，有效提高水下机器人的作业效率。未来，随着水下图像增强技术的不断发展，水下机器人也将向更高精度、更自主、更适应复杂水下环境的方向发展，为海洋开发、水下作业提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1] 秦艳霞. 水下机器人图像增强与目标检测算法研究 [D]. 江西理工大学, 2025.
[2] 于双洋. 观测型水下机器人设计及图像增强技术研究 [D]. 江苏科技大学, 2025.
[3] 刘海鹏. 面向水下机器人的图像增强及目标检测算法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2025.
[4] 苏旭. 水下图像增强与目标识别研究 [D]. 沈阳工业大学, 2024.
[5] 付亚威. 面向水下环境的图像增强和目标检测算法研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.
[6] 高康. 面向水下机器人视觉的图像增强技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2024.
[7] 黄鑫明. 水下图像增强方法及目标检测算法与应用研究 [D]. 江苏科技大学, 2025.
[8] 王博. 水下机器人图像增强复原方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2024.
[9] 王上尹. 海底图像融合中图像增强方法研究 [D]. 太原科技大学, 2024.
[10] 郭雨青, 曾庆军, 夏楠, 等. 图像增强水下自主机器人目标识别研究 [J]. 中国测试, 2021, 47(11): 47-52.