

【引用格式】庄培显, 刘飞, 童俊杰, 等. 水下图像视野增强研究综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (4) : 390-400.

水下图像视野增强研究综述

庄培显, 刘 飞, 童俊杰, 王宸宇

(北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要 为解决传统水下成像视野受限、信息缺失等问题, 拓展真实水下环境有效视觉范围, 为后续研究提供新视角及发展方向, 采用综述研究法, 依据技术实现路径将水下图像视野增强分为水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接 2 类, 从方法论与系统架构角度对 2 类技术的原理、系统构成及现有成果进行系统梳理与深入分析。研究明确了 2 类技术核心内容与系统架构, 剖析现有成果, 优化图像空间延展与细节还原, 弥补传统水下成像不足, 同时探讨当前技术发展关键挑战。综上, 水下图像视野增强技术作为融合图像处理算法与水下场景特性的新兴技术, 缓解传统水下成像视野受限问题, 并具有显著应用价值。此外, 还探讨了水下图像视野增强面临的关键挑战, 并对其未来发展的潜在方向进行探索。

关键词 水下图像; 视野增强; 鱼眼图像畸变校正; 图像拼接

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)04-0390-11

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.04.002

Review of Underwater Image Field-of-View Enhancement Research

ZHUANG Peixian, LIU Fei, TONG Junjie, WANG Chenyu

(School of Automation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract To solve the problems of limited field of view and information deficiency in traditional underwater imaging, and to expand the effective visual range of the real underwater environment to provide a new perspective for subsequent research and to explore the development direction of technology, a review research method is adopted in this paper. Based on the technical implementation path, the underwater image field-of-view (FOV) enhancement is divided into two categories: underwater fisheye image correction and underwater image stitching. A systematic review and in-depth analysis of the principles, system composition and existing achievements of the two types of technologies are conducted from the perspectives of methodology and system architecture. The core contents and system architectures of the two types of technologies are clarified. The existing achievements are analyzed. Then, the image space extension and detail restoration are optimized to make up for the shortcomings of traditional underwater imaging. At the same time, the key challenges in current technological development are discussed. In summary, underwater image FOV enhancement technology, as an emerging technology that integrates image processing algorithms and underwater scene characteristics, can alleviate the problem of traditional underwater imaging FOV limitation, has significant application value. In addition, the key challenges of underwater image FOV are discussed and the potential directions for its future development are explored.

Key words underwater image; FOV enhancement; fisheye image correction; image stitching

收稿日期: 2025-07-26

作者简介: 庄培显 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋信息观测和水下视觉处理研究。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于先验知识与数据驱动景深估计模型的神经元提取研究”(62171252); 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于非参数层次贝叶斯景深估计模型的水下图像质量提升研究”(61701245)。

0 引言

水下图像视野 (Field-of-View, FOV) 增强已成为图像处理和计算机视觉领域的重要研究课题^[1-2]。该技术旨在通过计算方法扩大水下图像的可见范围, 并在水下科考、海洋工程和深海探测等多个领域被广泛应用。传统水下图像在角度覆盖上存在固有限制。虽然单独处理多张图像可以部分解决这一问题, 但通常会导致图像边界的信息丢失。因此, 水下图像视野增强技术对于生成覆盖范围更广、视觉质量更高的水下图像至关重要, 有助于提升后续的水下图像处理任务。

现有的水下 FOV 增强方法主要通过 2 种途径分类: 水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接。水下鱼眼图像畸变校正技术对鱼眼镜头光学设计而导致的严重失真进行校正, 并将广角图像投影到传统透视图中以扩大视野^[3]; 水下图像拼接技术是从多个重叠水下图像合成全景图像以扩展 FOV, 该方法包括特征点提取和匹配, 空间变换的估计(如平移、旋转或单应性变换等), 以及对齐图像的无缝融合^[4]等。

然而, 由于水下环境的复杂性(如光的散射、吸收、动态水流和悬浮颗粒等)限制了传统图像处理方法的应用^[4-5], 现有的图像视野增强研究^[3-6]主要集中在自然陆地场景, 而水下场景的研究则相对较少。水下图像视野增强是一个独特而具有挑战性的领域, 需要进行全面回顾, 总结现有研究成果, 并为该领域的未来发展提供有价值的参考和深远的方向。

为此, 本文旨在对现有水下图像视野增强研究进行全面概述, 并突出其面临的固有挑战及未来发展方向。对水下图像视野增强的多方面进行深入分析, 将这些内容大致归类为水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接 2 大类, 如图 1 所示。其中, 水下鱼眼图像畸变校正阐释了其进展, 以及从方法论和系统架构 2 个方面对现有研究进行分类; 而水下图像拼接系统性概述了其发展历程, 以及从方法论和系统架构 2 个方面对现有研究进行综述。本研究的主要贡献总结如下: 1) 全面概述水下 FOV 增强相关基础和最新进展, 对水下场景的该研究领域进行

深入性分析; 2) 系统阐释水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接, 对其方法论和系统架构进行深入性总结; 3) 提出水下 FOV 增强面临的当前挑战, 并前瞻性展望其未来研究方向。

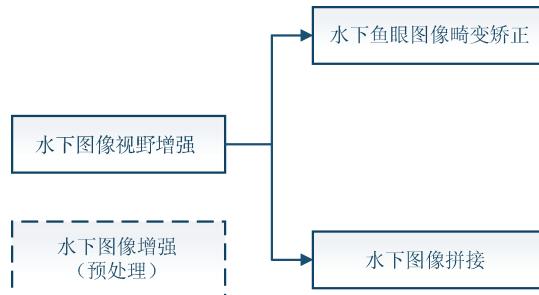


图 1 本文结构示意图

Fig. 1 Organization framework of this article

1 水下图像增强(预处理)

区别于自然场景, 水下图像视野增强 (FOV) 由于悬浮颗粒的散射、水介质折射和光衰减效应等原因更加复杂。水下环境中含有悬浮颗粒、浮游生物、海藻等, 干扰光的传播, 造成图像噪声和模糊, 且水的折射率与空气不同, 导致光路弯曲并进一步加剧透镜失真^[7]。此外, 红色和蓝色光的不同吸收率导致水下图像中的颜色失真。因此, 无论使用鱼眼图像畸变校正还是图像拼接方法, 均有必要对水下图像进行增强预处理, 以得到更加清晰的水下图像。现有水下图像增强技术已从简单的色彩校正发展到复杂的融合型和物理感知的深度学习方法, 这些方法能够联合处理多种水下退化因素。2020 年, KAZEROUNI 等人^[8]提出了一种基于 Mix-CLAHE 和快速傅里叶变换的水下图像增强方法, 有效地提高了退化图像对比度并降低了噪声, 为后续的特征匹配提供高质量的水下图像输入。然而, 该方法对于复杂水体散射所引起的局部模糊改善度有限, 并在处理高动态范围水下场景时, 容易出现过度增强现象。2022 年, SONG 等人^[9]提出了一种基于色彩补偿平衡和加权图像融合的水下图像增强方法, 有效地解决了水下退化图像的色彩失真和低对比度问题, 为后续匹配及拼接提供了高质量输入。但该方法在极端光照条件(如强光直射或弱光环境)下, 色彩校准精度欠佳, 且加权融合策略在纹理复杂区域可能会导致边缘模糊。2024 年, CHANG 等人^[10]

在增强色彩、对比度和纹理的同时，修正拼接了图像中的不规则边界，以提升水下视觉效果，但过度修正边界会致使部分细节信息丢失，且计算复杂度较高，实时性表现不佳。同时，ZHOU 等人^[11]采用解耦变分 Retinex 模型的水下图像增强方法，调整像素动态范围和亮度分量，增强高阶数据约束下的非局部特征提取，从而提高水下图像质量。然而，该模型对噪声较为敏感，在高噪声水下场景中容易放大噪声的影响。此外，为了提高水下特征点的匹配性能，ANCUTI 等人^[12]提出了一种通过融合输入的颜色补偿和白平衡的水下图像增强方法，但对水深较深、光衰减剧烈区域的色彩恢复效果受限。BACH 等人^[13]引入一种基于扩散模型的轻量级方法，使用物理网络组件和隐式采样来进行增强水下低质图像，但在处理大尺度水下图像时，局部特征的一致性保持不足，对训练数据的依赖性较强。通过对水下图像的特征点匹配验证了上述方法的有效性，结果表明增强后的水下图像拼接性能明显优于未增强的图像拼接性能，为水下图像的进一步处理提供了必要的前提条件。

2 水下鱼眼图像畸变校正

水下鱼眼图像畸变校正的研究进展，这些研究可从方法论和系统架构 2 个角度进行分类。

1) 方法论。

针对水下鱼眼图像畸变校正问题，利用现有自然场景的畸变校正方法直接对水下图像进行处理，很容易产生畸变问题。水下鱼眼图像畸变校正的主要挑战来自于水折射介质和光衰减的影响，针对这些问题，现有研究主要采用修改物理模型或深度学习的方法。2011 年，张伟等人^[14]改进一种鱼眼图像圆形有效区域的提取算法，在保证精度前提下兼顾效率，分别从二维和三维空间角度，采用经度坐标校正、等距投影校正和球面透视投影约束校正等方法对鱼眼图像进行校正并比较分析。2015 年，张军等人^[15]提出变角度线扫描法，通过准确提取鱼眼图像有效圆域参数以及纵向压缩柱面投影校正法，解决了传统柱面投影垂直方向校正视角不足的问题，且校正效果更自然。2017 年，SONG 等人^[16]提出了一种水下鱼眼图像的立

体匹配算法，采用球面梯度算子，结合颜色和梯度信息来计算匹配代价，另外，该方法还构造了基于 SLIC 分割的自适应窗口，以提高水下鱼眼图像的立体匹配精度。而该方法对水下复杂光照导致的颜色畸变较为敏感，当图像中存在大面积低纹理区域时，匹配鲁棒性会明显下降。2021 年，JUNG 等人^[17]使用定制的图像处理软件，设计了一种用于水下鱼眼图像的失真补偿方法，解决光轴和焦点的不对准问题。该方法通过应用径向和独立的 X/Y 方向非线性校正来纠正水下考古图像中的桶形失真，而其校正模型依赖特定硬件参数，在不同型号鱼眼镜头或复杂水体环境下的通用性差，且对非对称畸变的校正能力有限。2022 年，XIE 等人^[18]引入一种基于光场和多频外差技术的水下鱼眼图像展开方法，建立了多层折射成像模型和转换成像模型，将水下鱼眼图像转换为等效的空中拍摄图像，实现了高精度的水下三维重建。但该算法利用复杂的光场数据处理和模型转换，计算成本较高，对硬件设备性能要求严苛，在实时性应用场景中适应性不足。这些鱼眼图像畸变校正方法通过将介质折射补偿与物理成像模型相结合，在特定水下场景中对复合折射引起的非对称失真和色差等问题有显著改善。

2) 系统架构。

水下鱼眼图像畸变校正系统类型主要包括算法实现和硬件设计 2 个组成部分。对于镜头规格保持不变的水下鱼眼图像畸变校正系统，原始鱼眼图像与未校正结果之间的像素映射关系保持不变。基于这一原理，现有算法已从传统的物理方法逐渐演进为数据驱动的人工智能算法。水下鱼眼图像畸变校正系统的硬件设计要求采用高灵敏度的图像传感器，辅以人工光源补偿水下光衰减，在水下摄像机位置固定的情况下，成像范围会受到水深等因素的影响，无法确定像素间的映射关系，难以利用统一的映射关系进行直接校正。2010 年，ISHIBASHI 等人^[19]提出了一种具有鱼眼透镜的电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD），在水下航行器的摄像机中提供约 180° 的水平视角，通过这种低失真的全方位视图系统，可以在水下环境中产生良好的视觉图像。2018 年，MENG 等人^[20]设计了一种水下全景摄像机，该摄像机充当“眼

睛”角色, 其功能是校正来自2个鱼眼镜头的图像, 并在自然湖泊鱼类种类调查的鱼类识别系统上进行了有效验证, 通过深度学习达到了更高的鱼类识别准确率。2022年, XIE等人^[18]针对水下大场景三维成像与重建的需求, 引入了一种基于鱼眼透镜的双目视觉成像系统, 通过四维光场的参数化表示, 以重新表达水下鱼眼相机的成像过程, 并基于该鱼眼相机建立了水下双目立体视觉的多层折射成像模型。2023年, PHAM等人^[21]推出了一种为水下环境量身定制的功能性360 nm实时流媒体摄像机系统UWA360 CAM, 该系统可

以实时传输视频, 全天候工作, 并捕获360 nm水下全景图像。这些水下鱼眼图像校正系统是从基本的单镜头广角视图演变而来的, 通过全景拼接和人工智能算法结合, 利用理论建模来追求精确的水下3D感知, 最终发展成为集成的实时流媒体系统。

3 水下图像拼接

表1展示了水下图像拼接技术的发展历程, 同时本节对现有研究从方法论和系统架构2个角度进行内容阐述。

表1 水下图像拼接的发展历程
Table 1 Development of underwater image stitching

年份	参考文献	发表信息	算法	硬件	场景
方法论	2014 [22]	IEEE OCEANS	判别模型、SURF特征匹配、单应映射	Bumblebee XB3立体视觉相机	鱼类监测与行为分析
	2014 [23]	Journal of Marine Science and Application	SIFT特征提取、双向匹配、单应性变换	单目水下相机	水下目标定位与全景观测
	2015 [24]	IEEE OCEANS	SIFT特征提取、RANSAC、小波融合	Myring流线型AUV系统	水下探测
	2015 [43]	International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City	改进遗传算法的图像增强与去噪、金字塔图像构建与特征匹配、仿射变换与加权平滑融合	—	水下全景图像拼接
	2016 [26]	University of Alberta	暗通道先验、Reinhard颜色迁移、特征匹配和几何对齐	深海环境的水下相机	水下环境全景图像构建
	2017 [27]	International Journal of Advanced Robotic Systems	GNCCP优化目标函数、图匹配	ROV、AUV	水下机器人视觉感知
	2017 [44]	IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)	改进型三阶段增强算法、特征检测与匹配算法	—	海洋生态学与栖息地监测
	2020 [30]	International Journal of Advanced Robotic Systems	基于CNN的水下图像增强算法、拉普拉斯金字塔融合算法	AUV	水下机器人视觉感知
	2020 [31]	International Conference on Digital Home	多模态(视觉与声呐)图像配准与融合、大规模水下场景高效数据访问策略	分布式声呐与双目视觉混合感知系统	水下智能作业与海洋探测
	2021 [32]	IEEE OCEANS	基于SFM的拼接算法	联合检测机器人系统	水下柔性摄像头检测与评估
	2022 [9]	IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	水下图像增强、SIFT特征匹配、Mesh优化、高斯金字塔分解-融合	—	水下视觉重建
	2022 [33]	Computers, Materials and Continua	梯度特征块的水下地形图像拼接算法	侧扫声呐设备	水下地形图像拼接
	2022 [34]	Journal of Imaging Science and Technology	姿态角自适应调整的快速水下图像拼接算法	SONY 800万像素相机和1080低光芯片	水下机器人拍摄的图像拼接
	2023 [35]	Multimedia Tools and Applications	集成拼接与脊波变换融合	水下声学传感器网络	水下全景图像重建与优化
	2023 [36]	Multimedia Tools and Applications	FASTITCH快速拼接算法	鱼眼镜头相机	水下实时全景图像拼接

续表 1

年份	参考文献	发表信息	算法	硬件	场景
2023	[37]	IET Image Processing	多通道融合与改进 AKAZE 的深海图像拼接算法	深海机器人机载相机、Intel Core i5-7300Q	深海图像拼接
2023	[47]	5th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer	基于 RANSAC 和 SIFT 的水下图像拼接算法	—	水下图像拼接
2023	[48]	Applied Sciences	改进 SIFT 的水下图像拼接算法	—	水下图像拼接与全景重建
系统架构	2003 [42]	IEEE OCEANS	改进的相机校准方法、最大似然立体匹配算法、光束平差法	立体圆锥成像系统	水下环境的可视化与探测任务
	2014 [38]	IEEE OCEANS	非均匀照明算法和 SIFT 特征提取与匹配算法	新型遥控水下机器人和 6 台相机	水下近距离图像获取与自动拼接
	2015 [39]	IEEE OCEANS	全向相机校准算法和全景图像合成算法	自主水下航行器和定制全向水下相机	水下虚拟漫游创建
	2019 [40]	International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)	投影变换算法、图像拼接与融合算法	6 相机阵列	水下清洁机器人
	2021 [41]	International Conference on High Performance Computing & Communications (HPCC)	水下图像增强算法、统一视频拼接算法、ERP 投影算法	Go Pro HERO BLACK 相机	水下视频处理与展示
	2021 [45]	IEEE OCEANS	全局最优局部单应性拼接算法、海底拼接	IDS UI-5270SE Rev 4 相机、尼康 D850 单反相机	水下图像拼接与海底构建
	2022 [46]	Neurocomputing	多尺度深度单应性和边缘保持变形的图像拼接学习框架	NVIDIA RTX 2080 Ti GPU	宽视场图像拼接

1) 方法论。

水下图像拼接面临着能见度低、光照不均匀、特征匹配模糊、多模态数据融合困难等诸多挑战，传统的图像拼接算法在复杂的水下环境中往往因特征提取不稳定或计算效率低而失效，从而导致拼接不准确、目标识别不一致或实时性差，因此，水下图像拼接方法亟待发展。2014 年，SUN 等人^[22]提出了一种适用于在重叠视场内的多个静态摄像头的水下监控系统的鱼类跟踪策略，利用加速稳健特征 (Speeded Up Robust Features, SURF)，从多个摄像头中准确匹配同一鱼类，并在水下遮挡和外观变化等情况下，仍能保持高精度和稳定性，但对动态水下环境中摄像头位置变动的适应性差。LIN 等人^[23]引入了一种基于尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 算法的双向图像配准策略和拼接技术，以用于水下图像定位和识别，而在处理低对比度水下图像时，SIFT 算法特征点提取数量易受影响。2015 年，CHEN 等人^[24]

采用 SIFT 与小波融合相结合的水下图像拼接模型，改善了水下图像拼接效果，但小波融合过程易导致部分高频细节丢失。同时，LI 等人^[25]也进行了相关研究，设计了一种基于相邻图像间图像变换矩阵自适应调整的多摄像机视频拼接的快速算法，可以构建基于多摄像机的宽视野视频，且满足水下场景实时观测的要求，而在视场重叠区域较小时拼接的连贯性会下降。2016 年，HOJJATI 等人^[26]提出了一种专门针对水下图像的图像拼接方法，专注于解决水下环境带来的挑战，如能见度低、光照不均匀和特征匹配困难等，但对极端光照不均匀场景的处理效果仍有提升空间。2017 年，YANG 等人^[27]提出了一种水下图像匹配框架，结合结构约束以解决因水下图像模糊导致的特征描述符不确定性问题，但在高噪声环境下约束效果减弱。SHAFIQ 等人^[28]提出了一种基于相位一致性的方法，用于水下图像中的鲁棒边缘检测，不受照明变化的影响。RAUT 等人^[29]改进了 SIFT 算法，使用 Gabor 滤波

器作为预滤波器, 并采用 Hausdorff 距离计算关键点之间的距离, 从而提高了水下图像的配准效果。而该算法引入 Gabor 滤波和 Hausdorff 距离计算, 增加了运算复杂度。2020年, SHENG 等人^[30]利用深度学习技术建立了水下序列图像拼接框架, 以扩展自主水下航行器的视觉检测范围, 但依赖大量标注数据, 在数据稀缺场景中泛化性受限。LI 等人^[31]设计了一个多尺度多模态图像配准网络, 用于视觉和声呐图像对齐, 并结合概率融合模型实现水下三维数据的稳健集成, 但模态差异大时融合精度下降。2021年, JESUS 等人^[32]提出了一种基于空间梯度特征块的水下地形图像拼接算法, 首先采用模糊 C 均值算法对图像进行特征块划分, 然后用加速 KAZE 算法结合特征块信息, 对参考图像和目标图像进行匹配, 最后利用随机抽样一致性 (RANSAC) 算法对匹配结果进行优化^[33]。JIANG 等人^[34]提出了一种适用性较强的水下图像拼接算法, 利用加速鲁棒特征 SURF 算法提取水下图像的特征点, 并将这些特征点与参考图像进行匹配, 从而通过拼接得到较好的水下全景图像。2023年, JAIN 等人^[35]提出了一种集成技术, 利用镶嵌、脊波对全景图像进行细化并保留轮廓信息。通过 Radon 变换将线条奇点映射为点, 重建鲁棒的周期图像, 并通过计算脊线融合技术, 优化全景图像, 组合 2 个及以上图像的像素。WANG 等人^[36]引入了一种快速拼接算法, 通过保留图像匹配的特征点和转置矩阵来计算新的坐标, 并将原始特征点拼接在一起, 从而节省了寻找特征点的时间, 加快了拼接速度。此外, YUAN 等人^[37]开发了一种多通道融合和加速 KAZE (AKAZE) 特征检测算法, 以用于深海图像拼接。该算法使用 AKAZE 算法检测特征点, 并利用增强的高效二值局部图像描述符, 获取特征描述符, 最终通过匹配特征点和畸变深海图像来获得拼接图像。上述这些方法通过提高特征鲁棒性、计算效率和多模态融合, 共同推进水下图像拼接技术的发展, 从而在挑战性的水下环境中实现了更可靠有效的拼接性能。

2) 系统架构。

水下图像拼接系统一般包括算法设计和硬

件设计 2 个主体部分, 算法设计在上面方法论部分已详细介绍。为了在水下场景中实现高效的拼接, 除了算法实现外, 硬件设计也是非常必要的。2003年, FIROOZFAM 等人^[42]提供了一种立体圆锥成像系统, 包括 12 个相机, 在相邻相机对之间具有相对较大的重叠, 旨在通过在多个场景视图中使用相对距离较近的对应点, 实现三维可视化和场景重建的优化, 并在校准问题得到有效解决。2014年, XU 等人^[38]提出了一种获取相关清晰水下图像并实现全自动拼接的方法, 其中水下近距离图像是从远程操作的潜水器 (Remote Operated Vehicle, ROV) 上携带的相机捕获的, 并用不变特征使系统对输入图像的缩放、方向和照明不敏感, 以实现水下图像自动拼接。2015年, BOSCH 等人^[39]展示了配备全向水下相机的自主水下潜水器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 进行的视觉游览结果, 并开发了一套完整的内外参数估计标定方法。2019年, JIANG 等人^[40]提出了一种水下清洁机器人全景导航系统, 根据机器人的姿态选择相应的矩阵进行水下图像拼接, 利用梯度融合技术消除拼接缝, 实现无缝水下全景图像。2021年, WANG 等人^[41]开发了一个用于拍摄水下视频的移动摄像机的拼接系统, 结合了水下图像增强、统一视频拼接和三维投影, 以改善水下视频娱乐体验。上述这些系统利用不变特征匹配、全向相机校准、机器人姿态自适应、多技术融合和立体多视图成像, 有效地解决了水下环境中的缩放、光照变化、运动不稳定性和场景重建需求等挑战, 从而显著提高了水下拼接精度及全景效果。

4 2 种方式比较

表 2 具体给出了水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接的对比结果。水下鱼眼图像畸变校正在保持实时处理性能的同时保持了其 FOV 范围, 由于其仍然需要单个像素, 因此计算复杂度仍然很低。然而, 它对动态场景的适应性是适中的, 表现为水下图像边缘处的运动伪影。水下图像拼接技术可实现水下 360° 全景成像, 但其特征匹配的可靠

性受到水体浑浊度和海流等影响，导致实时性降低。由于硬件高要求，水下鱼眼图像畸变校正需要专门的防水鱼眼镜头，特别适合于自主水下航行器的实时避障等应用，而水下图像拼接则需要部署多台防水标准相机，主要用于海底地形测绘和珊瑚礁三维重建等场景。

表 2 水下鱼眼图像畸变校正 VS 水下图像拼接
Table 2 Underwater fisheye image correction versus underwater image stitching

比较角度	水下鱼眼图像畸变校正	水下图像拼接
FOV 范围	每个透镜 180°~220°	理论上无限制 (360°可实现)
实时性	高(单次捕获)	低
图像质量	低(边缘失真加剧)	适中(取决于环境)
计算复杂度	低(单帧校正)	高(需要预处理和融合)
可扩展性	受透镜物理学限制	灵活(支持多相机阵列)
动态场景适应性	适中(边缘处的运动伪影)	差(多帧拼接中的重影)
硬件依附性	一种防水鱼眼透镜	带防水外壳的标准相机 海底测绘、珊瑚礁 3D 重建
应用	AUV 实时避障	

5 当前挑战与未来展望

近年来，FOV 增强技术在水下场景中得到了逐步性的关注，并被广泛应用于海洋生态监测、海底地形测绘和三维重建等领域^[49]。与传统的单图像处理模式相比，FOV 增强技术可以实现更宽的覆盖角度。尽管现有 FOV 增强方法在自然环境中表现良好，但在水下或其他极端条件下仍面临实质性挑战，可以归纳为以下 4 个方面：

1) 水下环境复杂性。

虽然 FOV 增强技术相对成熟，但其在水下场景中存在精度低和鲁棒性差等问题。水下场景中光散射和吸收效应导致模糊、颜色失真和对比度降低，使水下图像拼接的特征匹配以及水下鱼眼图像畸变校正复杂化^[50]。此外，水流、悬浮颗粒和可变光强等动态海洋因素会使当前的 FOV 增强算法不稳定，从而加剧成像数据的复杂性和不确定性。

2) 水下数据集稀缺性。

自然陆地场景的高质量数据集非常丰富，大

多数现有的 FOV 增强算法都是专门针对陆地场景设计的。然而，水下复杂环境下的数据基准仍然很少^[51]，尤其是海洋和深海等极端场景。水下图像收集成本高昂，并受到设备耐压性、能见度和操作挑战的限制，使得大规模水下数据获取变得非常困难。此外，外部因素如生物多样性，可变的照明条件和动态干扰，复杂的数据注释和算法学习等也给水下图像视野增强带来困难。

3) 先进算法需求。

现有 FOV 增强算法大多集中在陆地场景，而相关的水下算法相对较少，这是由于水下环境的复杂性限制了传统方法或深度学习等人工智能方法的直接应用。现有的水下 FOV 增强光学模型仍有待优化。而基于深度学习驱动的方法由于训练数据集不足，而尚未取得令人满意的水下图像视野增强效果^[52]。同时，水下 FOV 增强技术的实际应用需要在精度和实时速度之间进行权衡，并需要高精度算法及密集型计算，因此迫切需要设计实时有效的水下 FOV 增强算法。

4) 硬件设计受限。

水下 FOV 增强系统的硬件设计仍面临着巨大的技术限制。为了获得高质量的水下鱼眼图像，采集设备通常需要高分辨率的水下鱼眼镜头或专用水下相机。但在高压差等极端条件下，这些镜头或相机会经历变形引起的水下图像质量下降^[53]，需要专门硬件设计来增扩它们的应用场景。此外，水下 FOV 增强对硬件组件的防水、耐压、耐腐蚀等要求较高，所需硬件成本较高，并且水下 FOV 增强系统大多采用分体式架构，其图像处理模块部署在水面上，难以满足实际应用中对数据传输速率的实时性要求。

为应对上述挑战，下面将从 4 个关键方向上探讨与展望水下 FOV 增强技术的未来发展：

1) 水下环境不变量探究。

识别在水下复杂环境中稳定的主成分特征，对于解决水下成像环境的变化性至关重要。这些不变量通常包括在光传播中不随时间或环境因素而变化的性质，如光强度模式、光谱特征、颜色通道的稳定性等。通过设计先进的深度学习算法，自动识别这些不变特征。通过训练大量的水下数据基准^[54]，

建立出一个通用或标准化的大模型, 确保在水下环境下稳定准确的图像配准和匹配, 从而增强水下 FOV。通过捕获水下场景的基本属性, 先进 AI 算法可以在变化的水下环境条件下实现精确且鲁棒的感知处理效果。

2) 多路径数据获取。

突破复杂水下场景高质量数据获取的关键瓶颈, 从现有研究中收集、组织和优化可用水下数据集^[55], 构建出更合理的水下数据基准, 为水下环境下的 FOV 增强提供必要的数据基础。同时, 利用当前的生成式人工智能(如生成对抗网络、扩展模型和 Transformer)和大模型技术等模拟具有真实物理特征的水下环境, 并产生大量的模拟水下数据/数据集, 从而在一定程度上弥补数据稀缺性^[56]。此外, 利用现有的水下采集设备(如 AUV、ROV、UUV 等)也可获得一定量的水下环境或深海环境等数据。

3) 先进算法开发。

为了有效地处理水下 FOV 增强的高质量数据, 设计开发当前主流的数据驱动算法, 以结合光学物理模型或传统视觉技术来重建准确和关键的水下 FOV 信息^[57]。针对有限的水下设备和资源, 提出一系列轻量级实时模型, 为 FOV 生成有效的水下图像/视频数据, 同时设计出生成对抗网络、扩散模型、Transformer 和 Mamba 等一系列先进 AI 算法, 以实现更快的速度和更佳的性能, 从而显著提升水下 FOV 增强效果^[58-59]。此外, 光学神经网络(Optical Neural Networks, ONNs)展现出了巨大的潜力, 通过光与物质的相互作用实现超快的模拟计算, 由于这些网络的高效性, 特别适合用于实时增强水下视野。因此, 未来应探索将 ONNs 与现有深度网络相结合的混合架构, 以增强 FOV 同时提升其处理速度和精度。

4) 硬件设备研制。

为了适应水下等极端环境, FOV 增强的硬件设备将朝着更加集成化的方向发展。随着光学材料、传感器技术和成像相机的快速发展, 水下 FOV 成像设备朝着小型化、低功耗和鲁棒性方向发展。特别是, 基于全景成像和多视图融合的先进传感

器可以在具有挑战性的条件下, 显著地提高水下 FOV 增强的精度与效率。同时, 研发具备耐高压、耐腐蚀特性的智能复合材料, 有效提升成像设备耐久性同时降低成本, 实现设备在恶劣海洋环境下的免维护运行。借助材料科学的发展成果, 制备能够在深海条件下维持成像质量的耐压光学元件, 以保障海洋设备获取高质量图像。此外, 材料创新可优化水下设备的散热性能, 使防水计算单元能够直接集成至水下成像系统, 这种集成架构可突破单独配置的局限, 从而实现复杂水下环境中的实时处理。

6 结束语

本文全面综述了水下图像视野增强技术的研究进展, 其内容涵盖水下图像视野增强的方法论及系统结构。在方法论层面上, 对水下鱼眼图像畸变校正和水下图像拼接的关键算法进行系统性归纳与总结, 并从精度和计算效率等方面对这些算法展开比较与分析。在系统架构层面上, 详细介绍水下图像视野增强系统的硬件设计及算法实现, 并对其性能进行客观评估, 同时对现有技术的应用前景进行展望。此外, 指出水下图像视野增强技术面临的关键挑战: 水下环境复杂性、水下数据集稀缺性、先进算法需求和硬件设计困境。针对上述挑战给出未来发展方向: 专注水下环境下的不变量探究, 多路径获取高质量水下成像数据, 设计先进水下图像视野增强算法, 以及研制水下关键成像硬件设备。

水下图像视野增强技术是一门多科学交叉的关键技术, 融合光学几何工程、物理成像建模、水下图像处理和人工智能技术等多领域知识, 随着对其技术及工程挑战的持续攻克, 其将成为推动海洋生态监测、水下资源勘测、深海生命探测和透明海洋观测等水下视觉相关应用领域的核心技术, 并有望成为海洋强国战略中科技进步的重要基石之一。

参考文献

- [1] ADEL E, ELMOGY M, ELBAKRY H. Image stitching based on feature extraction techniques: A survey[J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 99 (6): 1-8.

- [2] PANDEY A, PATI U C. Image mosaicing: A deeper insight[J]. *Image and Vision Computing*, 2019, 89: 236-257.
- [3] WANG Y, CHEN L D, BAI L. Large-field 3D imaging using an array of gradually-changed FOV cameras[C]// 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Banff: IEEE, 2017.
- [4] ABBADI N K, HASSANI S A, ABDULKHALEQ A H. A review over panoramic image stitching techniques[C]// 2nd International Virtual Conference on Pure Science (2IVCPS 2021). Diwaniyah: IEEE, 2021.
- [5] YANG C J, LIU S Y, SU H, et al. Review of underwater adsorptive-operating robots: design and application[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294: 116794.
- [6] WANG X, ZHANG S, LIU M, et al. Underwater image stitching based on multi-scale image fusion and SIFT feature[J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38 (5) : 213-217.
- [7] KULKARNI S, KAMBLE R, KOKARE M. Automatic field of view extraction with variable enhancement of color fundus images[C]// 14th IEEE India Council International Conference(INDICON). Roorkee: IEEE, 2017.
- [8] KAZEROUNI I A, DOOLY G, TOAL D. Underwater image enhancement and mosaicking system based on A-KAZE feature matching[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8 (6) : 449.
- [9] SONG H J, CHANG L B, CHEN Z W, et al. Enhancement-registration-homogenization (ERH) : A comprehensive underwater visual reconstruction paradigm[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44 (10) : 6953-6967.
- [10] CHANG L B, WANG Y K, DU B, et al. Rectangling and enhancing underwater stitched image via content-aware warping and perception balancing[J]. *Neural Networks*, 2025, 181: 106809.
- [11] ZHOU J C, WANG S Y, ZHANG D H, et al. Decoupled variational retinex for reconstruction and fusion of underwater shallow depth-of-field image with parallax and moving objects[J]. *Information Fusion*, 2024, 111: 102494.
- [12] ANCUTI C O, ANCUTI C, VLEESCHOUWER C D, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27 (1) : 379-393.
- [13] BACH N G, TRAN C M, KAMIOKA E, et al. Underwater image enhancement with physical-based denoising diffusion implicit models[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2025, 13 (3) : 213-230.
- [14] ZHANG W. Research on fisheye image correction algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [15] ZHANG J, WANG Z, YANG Z. Correction of a single circular fisheye image[J]. *Journal of Computer Application*, 2015: 1444-1448.
- [16] SONG T. The research of stereo vision system based on fisheye lens[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [17] JUNG Y, KIM G, YOO W. Study on distortion compensation of underwater archaeological images acquired through a fisheye lens and practical suggestions for underwater photography-A case of Taean Mado Shipwreck 1 and 2[J]. *Journal of Conservation Science*, 2021, 37 (4) : 312-321.
- [18] XIE L L, ZHANG X, TU D W. Underwater large field of view 3D imaging based on fisheye lens[J]. *Optics Communications*, 2022, 511: 127975.
- [19] ISHIBASHI S. The low distortion all-around view system using fisheye lens for an underwater vehicle[C]// OCEANS'10. Sydney: IEEE, 2010.
- [20] MENG L, HIRAYAMA T, OYANAGI S. Underwater-drone with panoramic camera for automatic fish recognition based on deep learning[J]. *IEEE Access*, 2018 (6) : 17880-17886.
- [21] PHAM Q D, ZHU Y P, HA T S, et al. UWA360CAM: A 360° 24/7 real-time streaming camera system for underwater applications[EB/OL]. [2024-02-28]. <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2309.12668>.
- [22] SUN N, NIAN R, HE B, et al. Consistent fish tracking via multiple underwater cameras[C]// OCEANS 2014. Taipei: IEEE, 2014.
- [23] LIN Y, LIU B. Underwater image bidirectional matching for localization based on SIFT[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2014, 13 (2) 225-229.
- [24] CHEN M, NIAN R, HE B, et al. Underwater image stitching based on SIFT and wavelet fusion[C]// OCEANS 2015. Genova: IEEE, 2015.
- [25] LI Q Z, ZHANG Y, ZANG F N. Fast multicamera video stitching for underwater wide field-of-view observation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, 23 (2) : 023008.
- [26] HOJJATI S. Underwater image stitching[D]. Edmonton:

- University of Alberta, 2016.
- [27] YANG X, LIU Z Y, QIAO H, et al. Underwater image matching by incorporating structural constraints[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14 (6) : 172988141773810.
- [28] SHAFIQ M A, ALAUDAH Y, ALREGIB G, et al. Phase congruency for image understanding with applications in computational seismic interpretation[C]// 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans: IEEE, 2017.
- [29] RAUT S, PATI S C. Underwater image registration with improved SIFT algorithm[C]// 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics , Information & Communication Technology(RTEICT). Bangalore: IEEE, 2017.
- [30] SHENG M W, TANG S Q, CUI Z, et al. A joint framework for underwater sequence images stitching based on deep neural network convolutional neural network[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17 (2) : 1729881420915062.
- [31] LI Z L, LAN R S, CHEN Z, et al. Underwater high-precision panoramic 3D image generation[C]// 8th International Conference on Digital Home (ICDH). Dalian: IEEE, 2020.
- [32] JESUS L, DA SILVA E A D, BARBOSA L A, et al. A robust image stitching approach for underwater flexible joint inspection[C]// OCEANS 2021. San Diego: IEEE, 2021.
- [33] WANG Z Z, LI J S, WANG X, et al. Underwater terrain image stitching based on spatial gradient feature block[J]. Computers, Materials and Continua, 2022, 72 (2) : 4157-4171.
- [34] JIANG L Z, TANG Z J, LUO Z H, et al. A fast underwater image stitching algorithm with adaptive adjustment of attitude angle[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2022, 66 (3) : 030502.
- [35] JINDAL H, BANSAL M, KASANA S S, et al. An ensemble mosaicing and ridgelet based fusion technique for underwater panoramic image reconstruction and its refinement[J]. Multimedia Tools and Applications. 2023, 82: 33719-33771.
- [36] WANG Z H, TANG Z J, HUANG J K, et al. Fast calibration stitching algorithm for underwater camera[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82: 27707-27726.
- [37] YUAN P, FAN C L, ZHANG C T. Deep-sea image stitching: Using multi-channel fusion and improved AKAZE[J]. IET Image Processing, 2023, 17 (14) : 4061-4075.
- [38] XU C C, ZHENG B, DONG X C, et al. The automatic stitching for underwater close-range images from ROV[C]// OCEANS 2014. Taipei: IEEE, 2014.
- [39] BOSCH J, RIDAO P, RIBAS D, et al. Creating 360° Underwater virtual tours using an omnidirectional camera integrated in an AUV[C]// OCEANS 2015. Genova: IEEE, 2015.
- [40] JIANG P, WEI Q X, CHEN Y H, et al. Real time panoramic system for underwater cleaning robot[C]// 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). Cape Town: IEEE, 2019.
- [41] WANG Z Y, WU H M, YU T M, et al. A video stitching system of underwater image[C]// 23rd International Conference on High Performance Computing & Communications (HPCC). Haikou: IEEE, 2021.
- [42] FIROOZFAM P, NEGAHDARIPOUR S, BARUFALDI C. A conical panoramic stereo imaging system for 3D scene reconstruction[C]// OCEANS 2003. San Diego: IEEE, 2003.
- [43] LI M J, LIU X F. Underwater panoramic image mosaic technology based on improved genetic algorithm[C]// 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City. Halong Bay: IEEE, 2015.
- [44] RAJENDRAN R, RAO S P, PANETTA K, et al. Adaptive alpha trimmed correlation based underwater image stitching[C]// 2017 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). Waltham: IEEE, 2017.
- [45] ELNASHEF B, FILIN S. Underwater image stitching using globally optimal local homographies with application to seafloor mosaicing[C]// OCEANS 2021. San Diego: IEEE, 2021.
- [46] NIE L, LIN C Y, LIAO K, et al. Learning edge-preserved image stitching from multi-scale deep homography[J]. Neurocomputing, 2022, 491: 533-543.
- [47] SU K Y. Underwater image stitching algorithm based on RANSAC+SIFT[C]// 5th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). Qingdao: IEEE, 2023.
- [48] ZHANG H S, ZHENG R H, ZHANG W R, et al. An improved SIFT underwater image stitching method[J].

- Applied Sciences, 2023, 13 (22) : 12251.
- [49] LI Q, SONG S T, LIU R X, et al. Fast correction and stitching algorithm for fisheye images[C]// 2024 International Conference on Image Processing , Computer Vision and Machine Learning (ICICML) . Shenzhen: IEEE, 2024.
- [50] OH H, HWANG G H, JEON J W. Real-time flexible accelerator for fisheye image correction based on Zynq SoC[C]// 11th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE) . Lille: IEEE, 2025.
- [51] GAI S L, CUI W H, LIANG B D, et al. A deep learning approach for rectifying fisheye image[C]// 2nd International Conference on Signal Processing and Intelligent Computing (SPIC) . Guangzhou: IEEE, 2024.
- [52] XIAO S Z, WANG F W. Generation of panoramic view from 360 degree fisheye images based on angular fisheye projection[C]// 10th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science. Wuxi: IEEE, 2011.
- [53] LIU G H, CAO J H, YIN X Q, et al. Effective region detection and distortion parameters estimation for fisheye images based on deep neural networks[C]// IEEE International Conference on Electronics Technology. Chengdu: IEEE, 2024.
- [54] KOZAWA Y, MATSUNAGA K, HABUCHI H. Individual optimization of FOV for vertices and side PDs of angle diversity receiver for underwater visible light communication[C]// 2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) . London: IEEE, 2025.
- [55] ROBOFLOW INCORPORATION. Fisheye ceiling computer vision dataset[EB/OL]. [2025-01-20]. <https://universe.roboflow.com/fisheye1/fisheye-ceiling-c5uv>.
- [56] ZHANG Q S, KAMATA S I. Fisheye image correction based on straight-line detection and preservation[C]// 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Hong Kong: IEEE, 2015.
- [57] BILLINGS G, JOHNSON-ROBERSON M. SilhoNet-fisheye : Adaptation of a ROI based object pose estimation network to monocular fisheye images[J]. IEEE Robotics and Automation Letters , 2020 : 4241-4248.
- [58] SUN P S, XIE J W. Research on distortion correction of fisheye image based on improved linear feature model[C]// 3rd International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICDSCA) . Dalian: IEEE, 2023.
- [59] XIA T. Pedestrian multi-object tracking algorithm based on fish eye camera distortion correction[C]// 9th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences. Okinawa: IEEE, 2024.

(责任编辑: 张曼莉)