

中图法分类号: TN911; P733.3 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2026)05-1503-20

论文引用格式: Zhuang P X, Wang Y H, Zhang X H, Liu F, Tong J J and Fu Z Q. 2026. Survey of underwater light field imaging: theory and applications. Journal of Image and Graphics, 31(5):1503-1522(庄培显, 王一航, 张新恒, 刘飞, 童俊杰, 富振奇. 2026. 水下光场成像综述: 理论与应用. 中国图象图形学报, 31(5):1503-1522)[DOI:10.11834/jig.250255]

水下光场成像综述: 理论与应用

庄培显^{1,2*}, 王一航¹, 张新恒¹, 刘飞¹, 童俊杰¹, 富振奇³

1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 清华大学自动化系, 北京 100084

摘要: 水下光场成像是一种结合光场成像原理与水下环境需求的新技术, 能够从真实水下复杂环境中获取更丰富的视觉信息, 旨在克服传统水下成像的局限性。传统水下成像仅捕捉到光线在角度范围内的二维投影信息, 而水下光场成像则通过采集来自不同方向的辐射强度, 成功获取了传统成像中被忽略的角度细节信息。虽然水下光场面临数据高维性挑战, 但这种高维表达方式提升了对海洋场景的认知能力, 并极大地提高了各种水下视觉任务的性能。水下光场成像已在计算机视觉和计算摄影学等领域中受到越来越多的关注。为此, 本文全面回顾与深入探讨了该领域过去20年的相关研究, 以“理论—应用”双维度为主体框架, 首先从理论层面上详细介绍水下光场成像的模型机理和理论发展, 构建水下光场成像的“三阶段—双方法”理论结构, 并对比两类核心参数校准方法。然后从应用层面上总结性阐述水下图像清晰化、水下成像距离拓展、水下目标检测与跟踪以及水下三维重建等四大应用场景及技术突破, 最后剖析了当前水下成像的技术瓶颈, 并展望了其未来的发展方向。

关键词: 水下光场; 光场成像; 角度细节; 理论层面; 应用场景

Survey of underwater light field imaging: theory and applications

Zhuang Peixian^{1,2*}, Wang Yihang¹, Zhang Xinheng¹, Liu Fei¹, Tong Junjie¹, Fu Zhenqi³

1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes, Beijing 100083, China;

3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Underwater light field imaging, as an emerging cross-disciplinary technology, integrates advanced principles of light field imaging with the specific demands of complex underwater environments, thereby pioneering a new model for aquatic visual perception. Unlike conventional underwater imaging techniques, this technology enables the acquisition of more multidimensional visual information from real-world, complex underwater settings, effectively overcoming the limitations of traditional two-dimensional imaging in marine environments. Conventional underwater imaging technology is a two-dimensional projection recording of the three-dimensional light field, capturing only light intensity information within a limited angular range while losing the directional characteristics of light rays. This deficiency becomes particularly pronounced in complex underwater environments, resulting in compromised image quality due to multiple factors such as water absorption, scattering, and plankton interference. Through specially designed imaging systems, underwater light field technology

收稿日期: 2025-06-04; 修回日期: 2025-09-30; 预印本日期: 2025-10-08

* 通信作者: 庄培显 zhuangpeixian0624@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(62171252, 61701245); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(00007764)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (62171252, 61701245); Fundamental Research Funds for the Central Universities (00007764)

simultaneously records the spatial distribution and directional information of light, therefore achieving complete four-dimensional sampling of the underwater light field. This comprehensive light capture capability enables the technology to acquire angular details that cannot be preserved in traditional two-dimensional imaging, providing a rich data foundation for subsequent underwater visual tasks. Although underwater light field imaging poses high-dimensional data challenges, this multidimensional representation improves the understanding capability of marine scenes and significantly boosts the performance of various underwater vision tasks. Consequently, underwater light field imaging has garnered increasing attention in computer vision and computational photography. To this end, this paper provides a comprehensive survey and in-depth exploration of relevant research over the past two decades, structured around a two-dimensional “theory-applications” framework. At the theoretical level, our survey begins with a detailed introduction to the fundamental models and mechanistic developments in underwater light field imaging. The evolution progressed from the initial seven-dimensional plenoptic function to a simplified five-dimensional function, ultimately culminating in the establishment of the four-dimensional model. This four-dimensional model of underwater light field preserves essential information, including spatial and angular light data, while simultaneously reducing the complexity of data acquisition and processing. This reduction in complexity has made the practical application of light field imaging technology in underwater environments feasible. Existing theoretical research on underwater light field can be categorized into three main phases: underwater light field simulation, underwater light field measurement, and underwater light field reconstruction. The theoretical developments and corresponding representative works are systematically summarized, encompassing aspects such as algorithm design, hardware equipment, experimental validation, and application scenarios. In addition, parameter calibrations for underwater light field are a critical component to achieve effective restoration and reconstruction, and existing calibration approaches are primarily classified into two categories: simulation-based methods and iterative-based methods. At the application level, our survey expounds on four major application scenarios and their technological breakthroughs: underwater image enhancement, expansion of underwater imaging distance, underwater image object detection and tracking, and underwater three-dimensional reconstruction. In terms of underwater image enhancement, this technology primarily leverages the spatial-angular information inherent in light fields to address critical challenges such as image blurring and color distortion caused by underwater scattering and refraction. By effectively distinguishing target signals from noise under water environments, these specific algorithms achieve significantly superior image enhancement results compared with conventional single-image enhancement methods. Regarding expansion of underwater imaging distance, the utilization of multiview data from underwater light field enables the optimization of light propagation models, effectively mitigating the limitations imposed by water absorption and scattering on imaging distance. As a result, imaging systems can capture clear and identifiable underwater targets at substantially greater ranges. In underwater image object detection and tracking, the multiview information provided by underwater light field data dramatically enhances the robustness and accuracy of detection algorithms, particularly in challenging underwater scenarios involving small target detection against complex backgrounds and rapid motion tracking. Underwater light field imaging also demonstrates unique advantages and has been successfully deployed in practical applications of marine observation. In underwater three-dimensional reconstruction, this technique enables the acquisition of depth information from single exposures without requiring active illumination or specialized scanning equipment. This capability streamlines the underwater 3D measurement workflow, providing novel technical solutions for seabed topographic mapping and underwater archaeological research. Finally, our survey analyzes the current challenges of underwater light field imaging, involving the highly unpredictable nature of intricate underwater environments, difficulties in developing high-precision sensors or devices, and bottlenecks in efficiently processing high-dimensional massive datasets. Moreover, this survey outlines future developmental directions that will focus on establishing more accurate underwater imaging models, studying more stability properties of underwater light field, developing miniaturized and highly robust sensors or devices, and designing more efficient high-dimensional data processing algorithms. Underwater light field imaging has evolved into a multidisciplinary technology that integrates innovations from various fields such as optical engineering, physical modeling, materials design, and artificial intelligence. This convergence of technologies positions underwater light field imaging as a potentially core technology in blue economy sectors such as marine science and underwater engineering. Furthermore, this technique is poised to play a crucial role in national marine development strategies, contributing signifi-

cantly to the advancement of ocean exploration and utilization capabilities.

Key words: underwater light field; light field imaging; angle details; theoretical level; practical applications

0 引言

光作为人们感知海洋真实世界的关键介质,传递了三维水下复杂环境的大量信息(Gershun, 1939; Adelson 和 Bergen, 1991)。传统水下成像仅通过整合每个像素的光线角度捕获光的二维投影,而水下光场技术则表征了光在自由空间中的分布情况,从而可以从海洋环境中获取更全面的水下关键信息。目前,水下光场成像技术已经在水下导航、水下通信和海洋生物观测(Levoy 和 Hanrahan, 1996)等方面均有着深远的影响。水下光场的特性复杂且多变,包含了非均匀性、散射现象、衰减效应以及波长依赖性。当光穿透水面时,其传播路径很容易受到悬浮颗粒、溶解物质和水体固有属性的影响,发生直线轨迹偏移,进而产生散射现象。这种散射不仅改变了光的传播方向,而且导致了光能在水中的广泛分布,从而加剧了水下光场的不均匀性。同时,由于水的吸收特性与光的波长密切相关,从而使光在水中的传播强度逐渐减少。其中,较长的波长(如红光)更容易被吸收,而较短的波长(如绿色或蓝光)被吸收更少。随着光线传播距离的增加,不同波长的光呈现出不同的衰减程度,导致水下各处的光强分布不均匀。上述这些特征显著影响了水下成像质量。因此,需要采用更为先进的水下光场成像技术,才能获得高质量的水下图像。

当前研究主要集中于光场成像技术(石峰等, 2023; Wu 等, 2017)、光场传感器(Bigas 等, 2006; Litwiller, 2001)和光场成像算法(林冰等, 2022; 左超等, 2020)。这些研究强调光场成像以获取自然场景的关键信息,从而更好地感知自然场景。相比之下,水下光场成像不仅考虑了光场成像原理,而且还考虑到水下光传播的独特条件,如水的吸收和散射等特性。然而,目前关于水下光场成像的系统性综述十分匮乏。水下光场成像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光场成像研究进行全面概述,并突出其面临的固有挑战及潜在的发展

方向。对水下光场成像的多方面进行深入分析,将这些内容大致归类为理论和应用两个层面,如图1所示。其中,理论层面阐释了水下光场成像的模型机理,回顾了其理论发展及模型参数校准的各自历程;而应用层面分别系统性概述了水下图像清晰化(增强/复原)、水下成像距离拓展、水下目标检测与跟踪以及水下三维重建等关键技术。

此外,以往综述工作如Shen等人(2021)聚焦图像增强技术分类与性能对比,并未整合光场的多维信息特性;Jaffe(2015)梳理被动/主动成像系统,没有涉及光场角度信息的挖掘;Jaffe等人(2001)侧重工程应用与硬件设计,但缺乏光场理论体系构建。相比之下,本文具有显著差异与独特价值:突破传统二维图像局限,以光场四维(空间—角度)信息表征为核心,构建“模型机理—参数校准—应用技术”研究链,通过角度信息实现成像性能突破。针对上述文献均未覆盖的高维数据处理、动态环境适配等难题,本文阐述深度学习与物理模型结合的解决方案(如轻量化处理模型等),补充光场参数校准方法对比,为水下光场成像从技术探索走向实际应用提供理论支撑和实践思路。

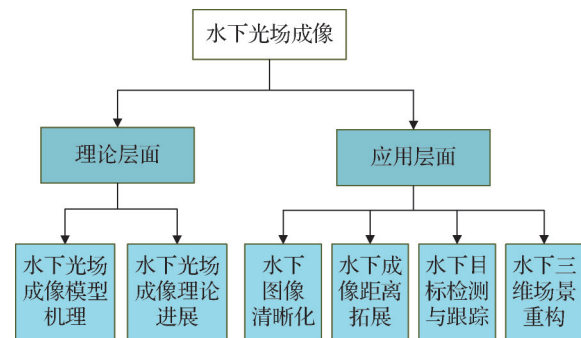


图1 本文的结构示意图

Fig. 1 Organizational framework of the article

1 水下光场成像—理论层面

本节主要概述了水下光场模型的基本模型、理论历史发展以及相关参数校准。

1.1 水下光场成像的模型机理

光场模型来源于多维的全光函数(Adelson 和

Bergen, 1991), 该函数从几何光学的角度描述了沿方向运动的光线集合。为了构建这样的函数, 有必要从每个可能的位置 (x, y, z) 、每个可能的角度 (α, β) 、每个波长 (γ) 以及每个时刻 (t) 测量光线。全光函数通常表示为一个七维函数表示 $F(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma, t)$ 。由于高维数据的实际采集与处理存在较大挑战, 光场模型经历了两次降维简化。在首次简化中, 假设测量的函数为单色且不随时间变化。每条光线的波长 γ 被分配到不同的颜色通道中, 同时在动态光场的不同帧中捕获时间序列 t 。通过这种方式可从全光函数中消除波长 γ 和时间 t 二个维度, 从而将光场模型从七维减少到五维 $F(x, y, z, \alpha, \beta)$ 。在第2次简化中, Levoy 和 Hanrahan (1996) 假设在自由空间中测量光场, 依据自由空间中光线的辐射恒定特性, 五维模型中的空间位置 (x, y, z) 存在冗余, 由于光线沿直线传播, 只需通过两个任意平行平面的交点坐标即可唯一确定一条光线, 进一步将五维表示简化为四维 $F(x, y, \alpha, \beta)$ 。最终, 描述光场的全光函数从七维减少到四维(Wu 等, 2017)。基于上述基础, 水下光场模型被建模为一个四维结构 $F(x, y, \alpha, \beta)$, 其中, (x, y) 为空间位置坐标, (α, β) 表示角度坐标(Skinner 和 Johnson-Roberson, 2017; Tao 等, 2015)。图2直观展示了水下光场的四维结构。该结构模型保留了光线空间和角度等信息, 同时显著降低了数据采集与处理的复杂度, 使光场成像技术在实际水下应用中成为可能。因此, 该四维光场模型不仅奠定了水下光场成像的理论基础, 还促进了水下目标探测、海洋生态监测等实际应用的发展, 并成为连接光学理论与水下智能感知的核心方法。

1.2 水下光场成像的理论进展

现有水下光场的理论研究可归纳为3个主要阶

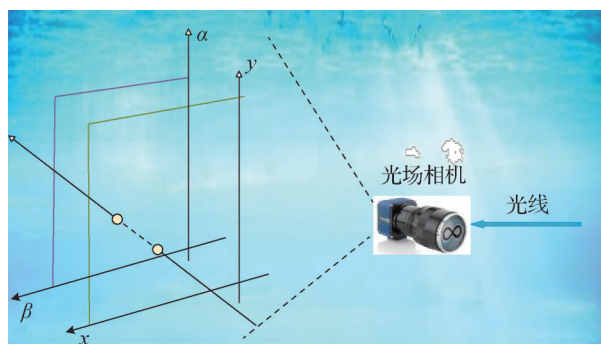


图2 水下光场的四维结构

Fig. 2 Four-dimensional structure of underwater light field

段: 水下光场仿真、水下光场测量和水下光场重构。图3总结了水下光场理论的发展进展, 表1列出了相关的代表性工作, 包括算法设计、硬件设备、实验验证及应用场景等方面。

1.2.1 水下光场仿真

水下光场仿真是在无实测硬件条件下, 通过计算模型模拟水下光传播与成像过程, 进而为后续实测提供理论基础。由于水下传感器和摄像机的局限性, 水下光场理论的早期阶段主要局限于模拟实验。Jaffe (1990) 设计了一个模拟水下图像形成过程的计算模型, 并结合了光在水中传播的固有光学特性。You 等人 (2011) 设计了一种数值模型, 综合三维蒙特卡罗方法和矩阵算子的优势, 以模拟动态海面下的偏振光场。赵欣慰等人 (2015) 针对两种不同条件 (自然光照和人工照明) 下的水下成像背景光进行模拟分析, 通过结合光在水中传播的固有光学特性计算模型, 模拟了水下光场图像的形成过程。在仿真

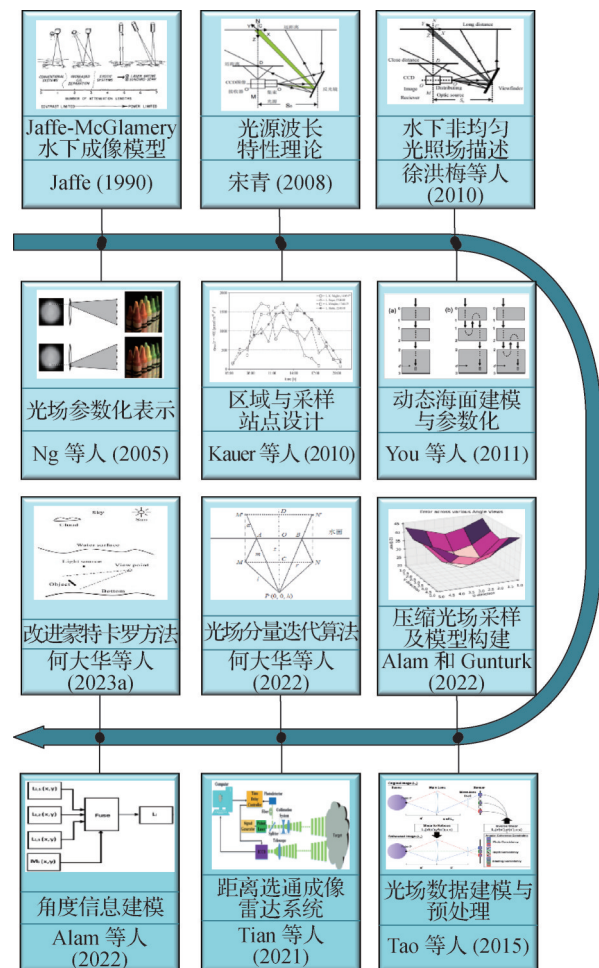


图3 水下光场成像的理论进展

Fig. 3 Theory advancement of underwater light field imaging

阶段,早期研究(Jaffe, 1990)通过计算建模模拟水下光传播特性,随后陆续对非均匀光场(宋青, 2008)、偏振光场(You 等, 2011)和动态光照(赵欣慰 等, 2015)等复杂场景进行了精细化建模,为理解水下光场的物理机制奠定了理论基础。

1.2.2 水下光场测量

水下光场测量是随着便携式光场相机出现,设计硬件适配结构与测量方法,以量化水下光场的分布特性(如光谱、衰减和偏振等)。随着硬件传感器的快速发展,便携式光场相机的出现,标志着水下光场理论研究转向测量阶段。宋青(2008)专注于水下非均匀光场光源的波长特性,并观察到不同波长簇光源在非均匀光场中对成像的影响较小。徐洪梅等人(2010)通过聚光水下成像系统构建来研究非均匀光场的分布特性。Kauer 等人(2010)整合了来自内陆和沿海地区的水体数据,调查了水下光场的光谱分布及衰减深度。这些方法为非均匀水下环境中

的波长特性、光场分布、衰减深度及偏振光场提供了全面综合的分析。在测量阶段,研究重点转向光场分布特性(徐洪梅 等, 2010)、光谱衰减(Kauer 等, 2010)和三维坐标重建(金攀 等, 2018)等实际问题的量化分析,推动了硬件设备及实验方法的进步。

1.2.3 水下光场重构

水下光场重构是针对光场数据高维性与水下退化问题,设计重构算法恢复高分辨率光场,从而解决浑浊水域成像难题。伴随着光场摄像机的进一步发展,可以提供大量的水下光场数据,其理论研究已发展到重建阶段。Gupta 等人(2017)提出了一种基于深度学习的水下光场重构压缩方法,采用了包含自编码器和四维卷积神经网络的双分支网络结构,可以从单一编码的二维图像中恢复高分辨率的四维光场。金攀等人(2018)考虑了不同介质界面的折射效应,建模得出水下同步扫描三角测距成像系统中的空间三维坐标关系表达式。何大华等人(2022)推导

表1 水下光场成像理论进展的代表性工作

Table 1 Representative works on theory advancement of underwater light field imaging

类别	作者及年份	论文来源	算法	硬件	实验	场景
水下光场仿真	Jaffe(1990)	IEEE Journal of Oceanic Engineering	-	水下摄像机、光照实验系统	模拟图像生成过程	-
	You 等人(2011)	Journal of Geophysical Research	三维蒙特卡罗模拟、混合辐射传输建模以及波面坡度重构	-	光场空间分布	海面下的偏振光场分布
	赵欣慰等人(2015)	Acta Physica Sinica	点扩散函数与傅里叶逆变换	-	背景光照	-
	何大华等人(2023b)	Optics & Optoelectronic Technology	水下光电成像系统模型	-	-	-
水下光场测量	宋青(2008)	-	图像处理、目标检测与识别	聚束光源	光源波长属性	不均匀光场
	徐洪梅等人(2010)	Acta Photonica Sinica	-	聚焦光源	光场分布属性	不均匀光场
	Kauer 等人(2010)	Oceanologia	光场光谱特性及深度衰减	BIC-2104 光谱仪	光谱特性分布	内陆水域及沿海地区的光场
	何大华等人(2022)	Chinese Optics	积分方程及数值计算	-	光场空间分布	特定光源的照明条件
水下光场重构	Gupta 等人(2017)	IEEE CVPRW	四维CNN、ADMM	Lytro Illum 及定制 CMOS 衍射光场设备	光场复原	-
	Alam 和 Gunturk(2022)	Signal Processing: Image Communication	点扩展函数、影像分割、迭代最小二乘算法与深度估计	CMOS 传感器	光场复原	-

注:“-”表示数据缺失,ADMM(alternating direction method of multipliers)。

出弗雷德霍姆积分方程求解水下光场的分布问题。同时, Alam 和 Gunturk (2022) 通过离线校准估计点扩散函数, 然后用这些点扩散函数对大孔径捕获的图像进行解卷积, 旨在提取和重建高分辨率的光场图像。何大华等人 (2023b) 沿视线方向整合亮度信息获取水下光场图像。在重构阶段, 深度学习 (Gupta 等, 2017)、积分方程 (何大华 等, 2022) 和反卷积 (Alam 和 Gunturk, 2022) 等方法显著提升了光场重建质量, 同时偏振光技术的引入进一步解决了浑浊水域的成像难题。上述技术展示了水下光场重建的创新解决方案, 对水下光场理论的发展具有重要意义。

1.3 水下光场的参数校准

水下光场的参数校准是实现水下光场恢复与重建的关键方面, 而现有的校准方法主要可以分为两类: 基于模拟的方法和基于迭代的方法。

1.3.1 基于模拟的方法

基于模拟的方法首先输入水体光学参数先验和初始光场数据, 然后通过蒙特卡罗光子散射模拟与标量照度计算, 输出校准后的光场分布参数。其中蒙特卡罗方法是近似解决复杂问题的主要方法 (James, 1980)。韩捷飞 (2016) 引入以偏振特征为特征的蒙特卡罗水下成像模型, 同时探讨了不同系统参数对成像质量的影响, 并明确了参数配置的合理范围。何大华等人 (2023a) 采用蒙特卡罗方法分析了水下光场的分布特性, 先模拟光子散射点的体积密度, 再计算反映水下光场分布的标量照度。

1.3.2 基于迭代的方法

基于迭代的方法首先输入光场相机成像模型和实测图像数据, 接着进行成像模型参数迭代优化与内参矩阵求解, 最终输出相机内参和光场映射关系。利用成像原理建立参数校准的成像模型。Duan 等人 (2019) 基于针孔相机成像原理和光传播理论, 建立了 Lytro 光场相机的成像模型, 推导出描述像素与光场关系的齐次内参矩阵, 并提出基于棋盘格图案的 Lytro 光场相机标定算法。张晓强等人 (2022) 开发了多层平面折射法和多投影中心框架, 对典型水下环境下的光场相机光路进行了建模分析, 从而估算出相应的水下校准参数。Ullah 等人 (2024) 通过深度接触每种水类型的光学特性, 以提供精确水体的固有光学衰减系数, 并加强颜色恢复和增强方面的通用性。同年, Prabhavathy 等人 (2024) 利用卷积

注意力模块、改进的 Swin 变换器和扩散模型来提高水下图像质量, 并用改进的 U 型卷积神经网络 (U-shape convolutional neural network, U-Net) 结合深度残差网络 (residual neural network, ResNet) 构建了新扩散模型 AIT-YOLOv7 (artificial intelligence technology-you only look once version 7), 以理解包含水下图像中的物体复杂结构, 从而在视觉条件恶劣情况下增强检测能力。Dai 等人 (2025) 通过从真实水下场景中分离光照和反射, 并在传统模型中添加噪声项, 建立了一种新的鲁棒水下成像模型, 以提高反射率的清晰度和校正光照的色偏。

1.3.3 两种校准方法比较

基于迭代的方法从准确建模中得到精确解决方案, 但需要更多的计算复杂度及资源。相比之下, 基于仿真的方法则通过仿真技术提供近似解, 需要较少的计算资源, 但只适用于浅层深度。韩捷飞 (2016) 给出了仿真方法和迭代方法的相对误差曲线, 表明在较浅深度, 仿真方法的相对误差相对低于迭代方法。然而, 随着深度增加, 由于模拟结果的随机性增强, 其相对误差迅速上升。为了减轻这种随机性, 可以增加模拟总数, 但这是以大幅增加计算复杂性和资源消耗为代价。

2 水下光场成像—应用层面

随着计算光学与数字图像处理技术的持续发展, 水下光场成像已从最初的概念验证逐步发展到实际应用。目前, 该技术在水下图像清晰化和水下成像距离拓展等方面取得了重大进展。同时, 借助人工智能和机器学习等方法的融合, 水下光场成像在水下目标检测与跟踪以及水下三维场景重构等领域展示了巨大的应用潜力。

2.1 水下图像清晰化

不同于传统单一图像的清晰化方法, 本文所述水下图像清晰化主要是基于光场的空间—角度信息解决水下散射与折射导致的图像模糊与颜色失真的技术, 可以分为以下两大类问题。

2.1.1 水下散射及折射消除

水下中的散射与折射是海洋领域的研究热点。当光在水中传播时, 由于水和空气之间折射率的不同, 光线进入水体时会发生折射, 导致成像系统的焦点偏移, 从而影响图像的清晰度与准确性。同时, 水

下环境中存在的悬浮颗粒和浮游生物会导致光线在传播过程中发生散射,甚至会有部分散射光沿入射光的反方向传播,形成后向散射,从而导致水下图像模糊和颜色失真。这些效应都严重影响了水下成像的最终图像质量。图 4 示意了水下散射与折射消除的发展历程。

在硬件方面,Treibitz 和 Schechner(2009)提出一种非扫描的恢复技术,通过捕获不同偏振状态下的

两帧图像,并用恢复算法消除后向散射。Jaffe (2015)提出一种水下被动光学成像体系,Secchi 盘(带有黑白交替图案的圆形盘)测量法作为经典的水体透明度量化手段。通过观测者在水下或水面上方垂直向下目视,记录 Secchi 盘从视野中完全消失时的垂直距离,可直接表征水体对光的衰减程度,进而实现对水体透明度的定量评估,从而间接反映光散射与吸收程度;同时主动成像中激光线扫描系统通

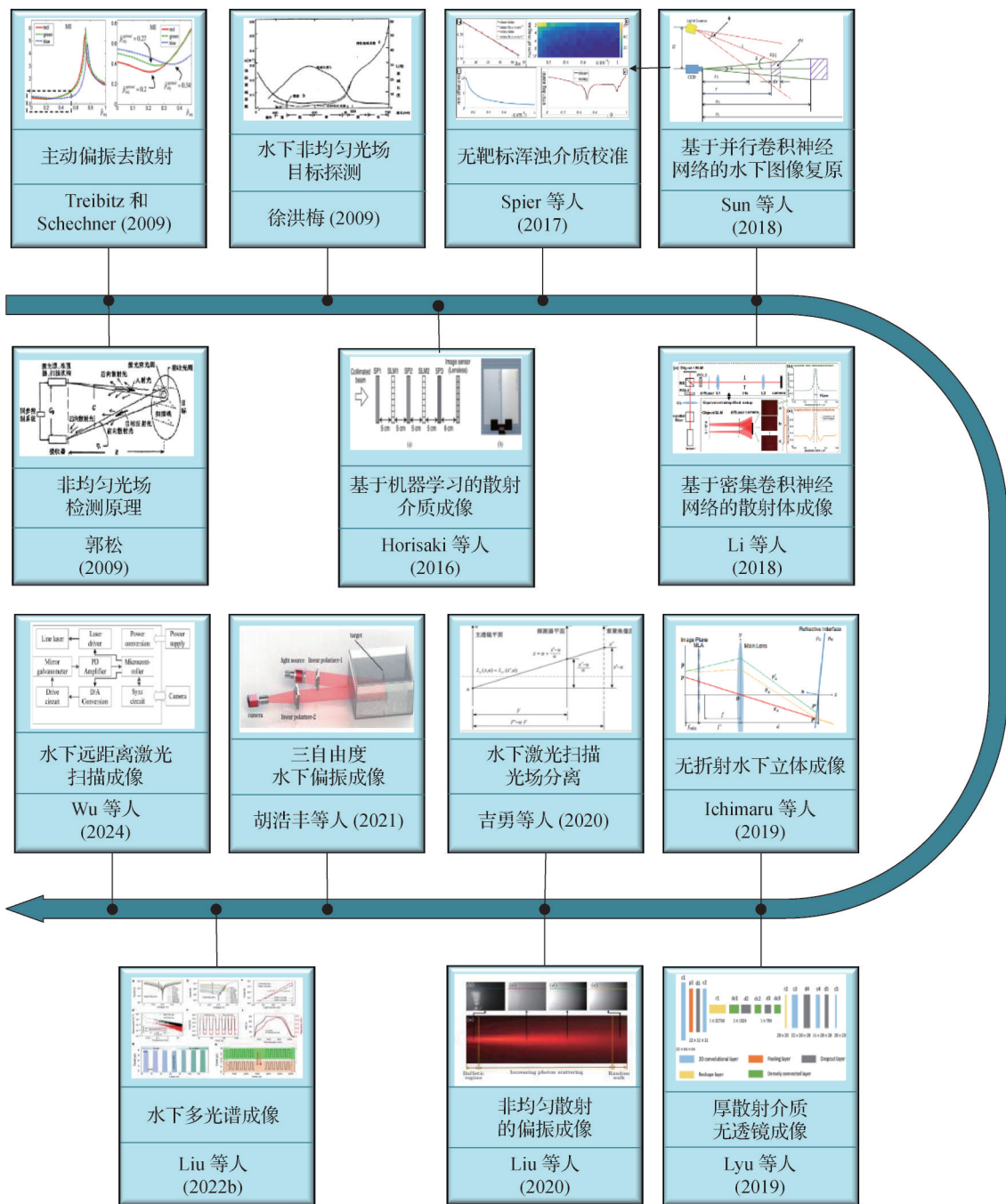


图 4 水下散射与折射的发展历程

Fig. 4 Development progress of underwater scattering and refraction removal

过分离信号光与后向散射光,显著抑制散射噪声。Zhang等人(2018)设计了一种针对水下光场立体视觉系统中折射误差的近似方法。

在算法方面,Ichimaru和Kawasaki(2019)利用光场相机拍摄的水下图像来合成无折射失真的图像,并从光场数据中提取几何准确的光线,以生成无折射效应的图像。吉勇等人(2020)采用双重视觉重聚焦和差分处理技术,将激光点从散射背景中分离出来,显著提高了激光光斑的对比度并抑制了散射。胡浩丰等人(2021)开发了一种基于两个最佳偏振方向的差分成像方法,通过引入差分项的加权系数,引入偏振方向、差分权重和光场角度3个自由度,以动态调整散射抑制强度,提高对散射光的抑制效果,最终输出无散射的水下清晰图像。实验表明,这种3自由度的偏振差分水下成像技术可以显著提高水下图像的质量,尤其是在减轻后向散射光方面表现突出。Martinho等人(2024)使用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)学习水下图像类型的增强参数,将强度变换应用于原始的水下图像,以弥补水下退化造成的视觉信息损失,从而提高水下图像的整体质量。同年,韩宏伟等人(2024)对低频子带采用基于暗通道先验方法进行处理,设计非均匀照明条件下的光源强度估计方法;而对不同方向的带通子带则用拉普拉斯算子进行增强。此外,Wu等人(2024)引入一个结合负皮尔逊相关系数作为损失函数的卷积神经网络,其在经过校准的散射介质上展示了出色泛化性能。2025年,Fan等人(2025)利用信噪比感知Transformer—卷积混合模型,判断图像区域信噪比,对高信噪比区域用轻量级卷积处理,对低信噪比区域则用Transformer捕捉全局光场特征,显著减少网络的参数量及计算量。当前水下散射与折射消除技术不仅大幅提升了图像质量,而且通过算法优化实现实时处理,充分体现理论研究与技术创新的良性互补。

2.1.2 水下图像增强与复原

水下环境的独特特性影响光的传播,导致吸收和散射现象,从而引起水下图像呈现出颜色失真、对比度低和细节模糊等问题。图5总结了水下图像增强和复原的发展历程,以及在噪声抑制、对比度增强、分辨率提高和深度估计等多个方面均取得显著进步。

在硬件方面,Tian等人(2017)利用光场相机在

不同浓度散射介质中进行图像深度估计,并引入非均匀校正的透射深度线索估计密集散射环境中的深度信息。Cui等人(2018)提出一种基于暗通道先验和金字塔图像融合的水下光场图像增强方法,首先将水下光场图像转换为四维数据,然后对每个视角的图像进行复原与增强,再通过重聚焦和全聚焦处理,以获得结构与对比度更高的水下清晰图像。Ji等人(2019)构建了一个基于单尺度Retinex理论的水下散射成像模型,并利用光场成像的多视角特性,提高了水下图像的对比度。Xiao等人(2024)对基于光场图像的水下图像深度估计进行优化,并构建了基于模糊线索的深度方向重聚焦代价函数。

在算法方面,Ye等人(2022)利用水下神经渲染技术从给定的清晰图像中生成高分辨率的水下图像,可利用单一清晰图像来合成多种逼真的水下图像。Chen等人(2023)提出了一种基于自监督信息提取网络的水下鬼影成像技术,通过提取斑点和目标信息来利用斑点数据,同时消除冗余信息,在极低采样率下实现高分辨率成像。Lyu等人(2024)设计了一种基于散斑分解和重建图像融合的水下计算鬼影成像技术,采用计算鬼影成像框架提取适合重建的高频和低频图像成分,并通过非下采样轮廓波变换对参考路径上的散斑进行处理,结合探测器捕获的整体光强,从而显著提高了信噪比和噪声抑制效果。上述图像增强与复原技术显示提高了水下图像的视觉质量,为水下目标探测和海洋生物监测等领域应用提供了强有力的技术支撑。

2.2 水下成像距离拓展

在水下成像过程中,浑浊水体中的悬浮颗粒、浮游生物和有机物等会对光进行散射和吸收,导致水下光场强度分布的不均匀性,并且光强随着距离增加而呈指数性衰减,进而显著影响水下光场的探测范围,造成了成像质量和对比度下降,从而限制有效的检测距离和景深估计。传统成像距离通常小于5 m,需要通过结构设计来增强目标反射光和抑制散射光,以突破距离限制,而通过光场角度重采样技术可将有效距离拓展至10 m以上。水下成像距离拓展则是利用光场多视角数据优化光传播模型,以减少水体吸收与散射对成像距离限制的技术;其中“拓展”是指通过光场成像技术的多视角数据、角度信息等独特优势,优化光在水下传播效率,以减少水体吸

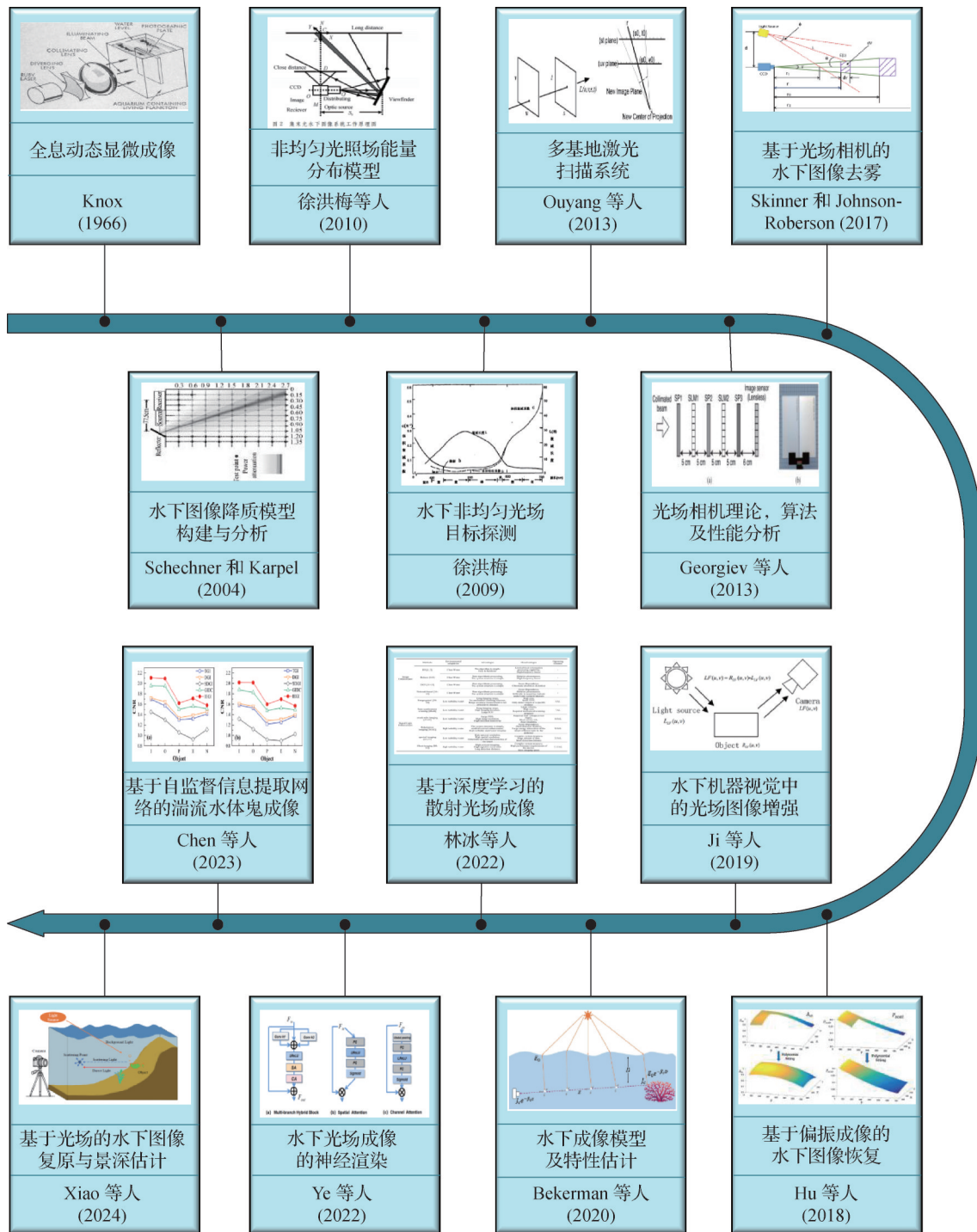


图5 水下图像增强与复原的发展历程

Fig. 5 Development progress of underwater image enhancement and restoration

收与散射对成像质量的影响,从而使成像系统能在更远距离下获取清晰可识别的水下目标。表2给出了水下成像距离扩展的代表性工作,并概述了在浑浊水下环境和非均匀光场成像中的现有技术的算法、硬件及优缺点。Jaffe 等人(2001)提出一种距离选通成像系统,采用重复频率激光和选通相机,通过时间门控抑制近场后向散射,在浑浊海水中实现远

距离成像,并将成像距离拓展至7个衰减距离。Dalglish 等人(2007)引入一种新的水下成像传感器,称为脉冲激光扫描成像仪。该设备采用一种紧凑的扫描架构结合高速数字处理能力,使其能够在浑浊的海水中实现相当大的成像距离。徐洪梅等人(2010)通过控制非均匀光场的能量分布来增强成像探测范围,该方法可有效克服后向散射光背景噪声

的影响,以实现宽视角、全景深以及图像清晰度高的水下探测效果。徐洪梅(2009)研究了聚类光源的分布特征与水下目标检测之间的关系,为相应成像设备制造提供了理论基础。郑冰(2013)根据水下光能传输理论,研发了一种用于高能量密度的长距离输送和低能量密度的短距离照明水下探测装置,以输出长距清晰图像。当距离大时,激活高能量输送模块来增强目标反射;当距离小时,切换低能量照明模块避免散射光饱和,并在浑浊水体中得到有效验证。同年,Ouyang等人(2013)设计了一种用于水下激光扫描成像系统的图像增强和可视化技术,通过多静态异步激光扫描系统,提高了在混浊水下环境

中的成像质量和检测范围。蔡晨东等人(2019)提出了一种结合场景深度估计和白平衡的水下图像复原方法,有效提升了低质量、低照度水下图像中的细节清晰度和色彩保真。Song等人(2018)提出一种基于水下光衰减先验的快速场景深度估计模型,学习监督线性回归训练模型系数,并结合准确的深度图估计背景光和透射图,从而有效恢复水下图像的真实场景。Luo等人(2020)通过使用有形状的洛伦兹源提高长距离水下成像的质量,并适当调整洛伦兹源的调制因子,显著提高了远程的水下成像质量。王丹等人(2021)提出了基于场景深度估计的水下图像增强方法,有效去除了水下图像的雾模糊,提高了图

表2 水下成像距离拓展的代表性工作

Table 2 Representative works of expanding underwater imaging distance

作者及年份	论文来源	算法	硬件	优点	缺点
Dagleish 等人(2007)	IEEE OCEANS	-	脉冲激光扫描	较大成像距离、高分辨率及对比度	易受水下环境影响
徐洪梅等人(2010)	-	集束光	-	成像质量与探测范围	复杂光源与精密光学系统
徐洪梅(2009)	-	分布照度函数与理论可见性框架	-	去除后向散射光、增大水下成像清晰度与范围	需要专用的集群光源与光场分布的精细控制
徐洪梅等人(2010)	光子学报	四维光场图像重建	相机系统传感器阵列	利用四维光场数据实现多视角重构	数据量大需较高算力
Ouyang 等人(2013)	IEEE Journal of Oceanic Engineering	光场渲染	激光扫描技术时变光强调控	提高成像探测范围,水下场景的多视角渲染	水下环境中的实际挑战
蔡晨东等人(2019)	激光与光电子学进展	场景深度估计与白平衡调整	水下成像设备与计算机系统	提高图像质量适用性强	依赖于准确的深度信息
Luo 等人(2020)	Laser Physics Letters	调整调制因子评估湍流影响	洛伦兹源	远距离水下成像	洛伦兹源的窄强度分布
王丹等人(2021)	ROBOT	水下物理成像模型	水下摄像机通用图像处理平台	自然光照效果好	深度估计敏感计算量大
Zhou 等人(2021)	Optics Express	基于单幅图像的深度图估计	水下相机计算平台	高效性应用广泛	受限于特定条件
李靖怡等人(2023)	激光与光电子学进展	结合深度和背景分割的图像复原	水下RGB相机	基于水体中光传播特性的物理模型	依赖准确的深度估计和背景分割
Liu 等人(2022a)	Optics Express	光传播模型优化基于距离的参数简化	-	增强深度估计准确性	计算复杂且环境要求高
Lin 等人(2025)	-	颜色校正与对比度调整	图像处理计算平台	构建水下光场图像数据集	水下环境中的实际挑战

注:“-”表示数据缺失。

像的对比度及颜色保真度。Zhou 等人(2021)设计了基于单幅水下图像的景深与光照估计方法,通过改进的水下成像模型,有效去除了图像中的后向散射,并显著提升了水下图像的清晰度和色彩恢复。李靖怡等人(2023)引入基于场景深度估计和背景区域分割的水下图像复原方法,结合图像梯度信息和色差信息估计场景深度,实现背景与前景的准确分离并分别进行复原处理,显著提升了水下图像的对比度、细节结构及颜色真实性。Liu 等人(2022a)提出基于背景光估计和深度图优化的水下图像恢复方法,考虑了模糊度、平滑度及红绿通道强度差异,更准确地估计背景光,构建更精确的深度图,并调整反向饱和度图去除人工光源影响,从而有效提升了水下图像质量。Lin 等人(2025)首次构建了基于四维光场的水下图像数据集,通过光场角度特征提取多视角信息,补偿长距散射导致的特征退化,结合深度估计修正光场映射偏差,并提出利用四维光场特性增强水下图像质量的深度网络方法。上述这些技术经历了从硬件革新到算法优化的演进,尤其是四维光场技术应用,实现了成像质量和景深精度的双重突破,为深海探测等实际应用提供可靠的支持。

2.3 水下目标检测与跟踪

在水下目标检测与跟踪中,水下光场的不均匀分布,悬浮颗粒、浮游生物及有机物对光的散射和吸收使光线传播路径复杂化,从而影响成像的清晰度和检测的准确度。表3总结了水下目标检测与跟踪的代表性工作,并详细剖析了这些方法的优缺点。

在硬件方面,Jaffe 等人(2001)提出一种激光线扫描系统,在沉船成像中通过多通道荧光成像实现水下目标精细识别。Dalberg 等人(2006)融合水下声传感器方位估计和电场传感器位置信息实现目标跟踪,多传感器协同抑制单一模态噪声,可以为水下光场成像中多维度光场信息(如空间—角度—偏振)的融合处理提供参考,从而有效解决光场成像在动态高散射水域中的目标跟踪精度问题。Sun 等人(2007)设计了一种水下电子全息相机,用于浮游生物分布和动态的原位研究。该装置采用Nd-YAG脉冲激光器(neodymium-doped yttrium aluminum garnet pulsed laser)和CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor)图像传感器进行高分辨率图像采集,能够记录 36.8 cm^3 体积内的生物体和粒子全息成像。郑冰和屠晓东(2009)引入基于非均匀光场的水

下目标检测方法,同时提出一个理想光场分布模式以减少后向散射光的影响,从而实现远距离的水下目标探测。Liu 等人(2020)设计出基于多角度视觉的水下目标跟踪与定位方法,通过多节点水下相机组的协同工作,实现对水下动态目标的精确跟踪和三维定位。Zeng 等人(2025)提出基于前视声纳数据的声纳图像插值和物体跟踪新框架,并改进DeepSORT(deep simple online and real-time)跟踪方法,有效减少了目标识别号变化的频率,进而提高了跟踪稳定性。

在算法方面,Jaffe(2015)提出扩展卡尔曼滤波器和无迹卡尔曼滤波器,分别在高斯与非高斯噪声条件下提升水下目标跟踪的鲁棒性。Zhao 等人(2019)提出一种基于图像融合的偏振差分水下成像算法,利用非下采样轮廓小波变换对斯托克斯矢量的参数进行积分,解决了人工调整权重系数的局限性,从而提高了水下目标细节的清晰度。Jahan 和 Rao(2020)在高斯和非高斯噪声环境下,利用扩展卡尔曼滤波器和无迹卡尔曼滤波器实现水下目标跟踪,并仿真评估了在处理非高斯噪声时的优越性能。姚全懋等人(2024)研究了扩展粒子滤波和粒子滤波等算法在水下三维目标跟踪中的应用,并仿真验证了这些算法在目标跟踪精度和实时性方面的优越性。徐楚臻(2023)引入基于神经网络的水下目标特征提取与跟踪算法模型,融合VGG-16(Visual Geometry Group with 16 layers)自适应波束成形、特征融合技术及长短期记忆(long short-term memory, LSTM)的Kalman滤波方法,有效提高了在低信噪比环境中的水下目标检测与跟踪精度与实时性。徐文等人(2023)设计了一种分布式多目标联合定位与跟踪方法,基于匹配场定位量测模型,有效提高水下多目标的跟踪精度。卢焯彬等人(2025)构建基于多层次联邦数据关联的水下方位角多目标融合跟踪方法,构建多个双观测平台子跟踪器,并利用联邦数据关联算法融合跟踪结果,有效降低虚假定位点干扰,显著提高了水下多目标跟踪系统的准确性和稳定性。这些技术经历了从传统方法到深度学习的跨越式发展,在复杂水下环境中展现了优异的检测性能和稳定性,为海洋探测和水下作业提供了可靠的技术方案。

2.4 水下三维场景重建

图6总结了水下三维场景重建的发展历程,该

表3 水下目标检测与跟踪的代表性工作

Table 3 Representative works of underwater object detection and tracking

作者及年份	论文来源	算法	硬件	优点	缺点
Dalberg 等人(2006)	International Conference on Information Fusion	水下声学 and 电磁数据来定位和跟踪	电场测量系统声学传感器	提高检测范围和鲁棒性	需要额外传感器改进结果
Sun 等人(2007)	IEEE Journal of Oceanic Engineering	表征全息图平面的光场传播	电子全息成像系统	高分辨率水下生物三维成像	无法捕捉极细微颗粒
郑冰和屠晓东(2009)	Microcomputer Information	基于分布式光场模式的目标检测	-	抑制后向散射,增强系统探测	对光源分布与强度的调控能力较差
Zhao 等人(2019)	Optical and Quantum Electronics	图像融合与计算偏振差技术	电荷耦合探测器	抑制背景光,提升目标细节	需对偏振态下散射光优化
Jahan 和 Rao(2020)	Computers and Electrical Engineering	扩展卡尔曼滤波	-	蒙特卡罗仿真,增加结果可信	对非高斯噪声表现出不稳定性
Liu 等人(2020)	Electronics	边界感知显著性网络	水下摄像头旋转云台 AUV 模型	减少静态目标干扰	系统误差较大
姚全懋等人(2024)	舰船科学技术	扩展粒子滤波	-	处理一定比例的非高斯噪声样本	高噪声环境下性能显著下降
徐楚臻(2023)	-	改进高斯混合模型滤波	-	精确度、平均准确率、召回率等指标提升	集中于软件层面
徐文等人(2023)	信号处理	基于匹配场定位量测模型的分布式多目标联合定位与跟踪	3个水平线阵	显著降低平均最优子模式分配距离	阈值设置过低时导致目标轨迹跟踪不连续
卢焯彬等人(2025)	武汉理工大学学报	基于多层次联邦数据关联的水下多目标融合跟踪	3个方位角观测平台	降低虚假定位点的负面影响	个别“鬼点”无法有效剔除
Zeng 等人(2025)	Journal of Marine Science and Engineering	基于 Swin Transformer 改进的 YOLOv5 网络模型	前视声纳多波束声呐	提高声纳图像中的目标检测精度	小样本问题限制声学图像目标跟踪的准确性

注:“-”表示数据缺失。

技术经历了从传统光学到智能计算的重要演进。早期研究主要基于结构光和立体视觉等传统光学技术,如条纹投影、激光线扫描等,为水下三维重建奠定了基础。随着技术进步,合成孔径成像和偏振成像的结合,实现四维光场信息的获取,光场相机阵列等新型设备引入,显著提升了水下复杂环境下的场景重建质量。

在硬件方面,Narasimhan 等人(2005)分析了两种类型的结构光技术:条纹投影和光度立体,然后推导了散射介质下物体检测和场景重建的物理模型。研究表明,结构光技术可恢复介质的三维场景信息和光学特性。Brandou 等人(2007)提出了基于

立体视觉系统的水下三维重建方法,可沿着预定义的轨迹以等间隔获取图像,从而提高了三维重建的精度和速度。郑冰(2013)设计了一种水下三维重建方法,利用激光线光源扫描检测区域,并用校准板进行校准,进而建立采样数据二维坐标系与三维世界坐标系之间的映射关系。Bianco 等人(2013)对两种水下近距离三维重建技术进行了深入分析:主动方法(结构光)和被动方法(多视图立体视觉)。实验表明,主动技术在浑浊的水下环境中表现出优越的稳定性,但需要手动去除点云中的噪声点,相比之下,尽管结果更容易受到物体表面纹理的影响,但被动技术能够在清澈的水下条件下产生更清洁、更密集

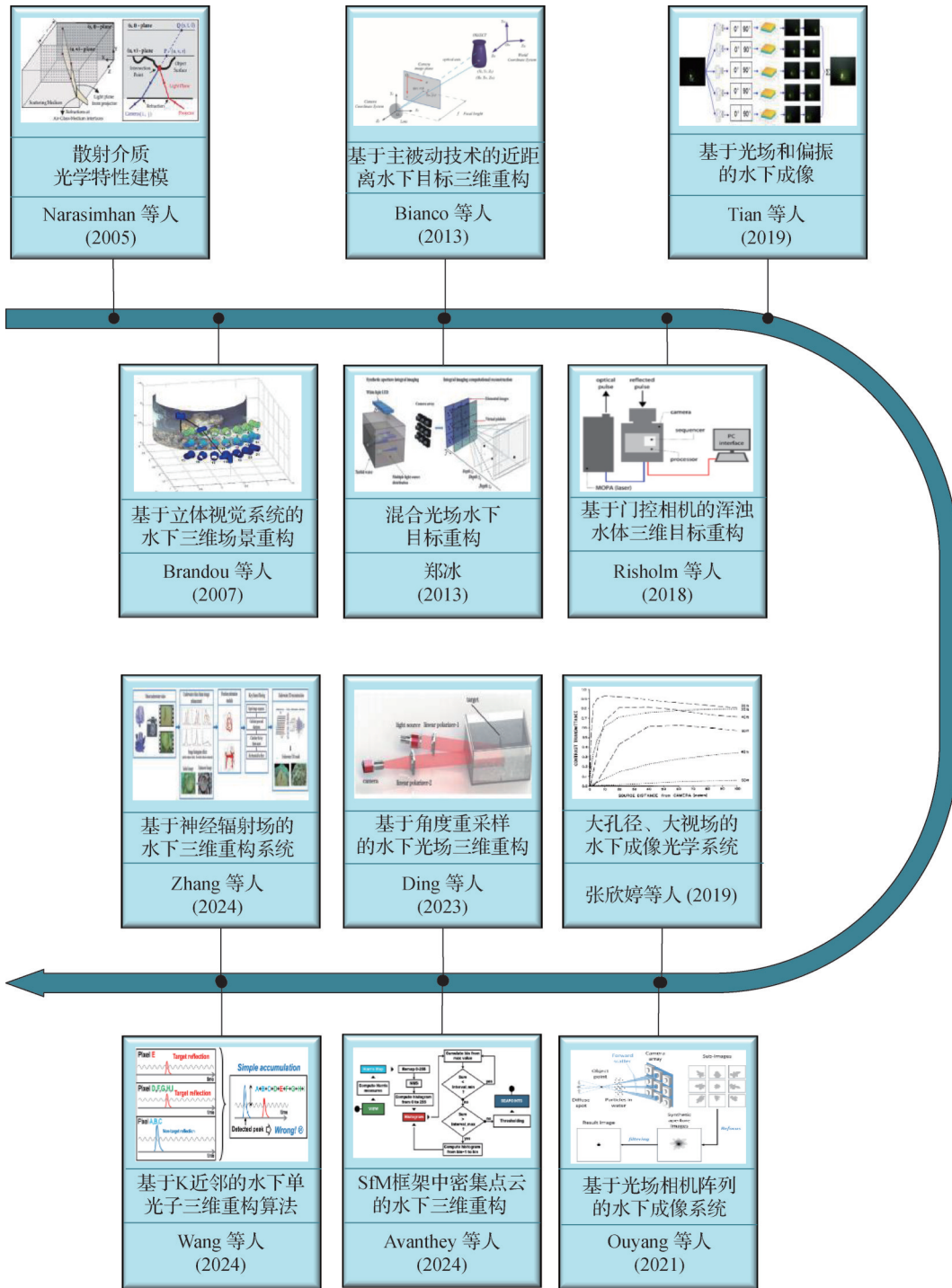


图 6 水下三维重建的发展历程

Fig. 6 Development progress of underwater 3D reconstruction

的点云。Risholm 等人(2018)设计一种快速门控 CMOS 相机系统,用于实时水下三维成像,能够在浑浊的水条件下提供高达 10 Hz 的三维深度估计。Tian 等人(2019)结合合成孔径成像和偏振成像,从多视图图像中捕获偏振度和后向散射强度,以重建物体辐射率,从而获得伴随偏振状态的四维光场信息。Ouyang 等人(2021)推出了一种基于光场摄像

机阵列的水下成像系统,在具有挑战性的水下环境中能捕获增强的高质量图像,并实现精确的三维重建。Ding 等人(2023)引入一种基于光场成像的水下三维重建技术,利用光场相机捕捉的角度样本特征,解决了水下环境中的非线性折射问题。同年,Zhang 等人(2024)对单目相机捕获的水下视频进行增强,并确保了帧间增强的一致性,所选关键帧基于多分

辨率哈希编码的神经辐射场进行三维重建,以构建模型并进行渲染。此外,Wang等人(2024)利用K近邻分类多个目标和背景,从时间光子直方图重建水下目标的高分辨率深度轮廓,从而实现了高分辨率的单光子深度剖面重建。

在算法方面,Chadebecq等人(2020)提出了一种双视点重建方法,采用折射几何约束进行相机运动估计和三维重建,在合成和真实数据上的实验表明,这种方法优于传统的双视图结构重建技术。Avanthey和Beaudoin(2024)通过在SfM(structure from motion framework)框架内逐步构建密集点云,围绕海量点云传播匹配来计算深度,将计算时间减少约70%,并保持相当的最终密度。当前水下三维场景重建技术在重建精度、环境适应性和处理效率等方面均取得了显著进步,为海洋勘探、水下工程等应用提供可靠的三维重构方案。

3 挑战与未来展望

近年来,水下光场成像作为海洋资源勘探、水下生态监测和海洋生态学研究的关键性技术,引起了学术界和工业界的广泛关注。相对于基于空气中光线传播稳定的地面光场成像其技术(Wu等,2017;Jia等,2022),水下环境存在严重的散射和吸收效应,导致水下图像质量退化如结构模糊、颜色失真等,水下光场成像技术挑战大。不同于常规的成像技术,光场成像技术能够同步记录光的空间分布、传播方向和能量强度等多维信息,从而在复杂的水下条件下获得更全面、更精确的三维场景重构结果。然而,该技术在水下实际应用中仍面临如下挑战:

1)水下环境的复杂性。相较于二维环境,三维水下环境的复杂性在垂直方向上,不同深度水体的散射系数与吸收系数呈梯度差异,表层到深层的光场从强光波动到弱光衰减再到无光补光扩散,形成立体光场不均;在空间角度上,光传播需穿越水平与垂直双重介质,随立体角度偏移出现多路径散射叠加,散射路径数量随角度增大而倍增,信噪比大幅降低;在动态干扰上,湍流的立体涡旋运动导致目标立体位置偏移,水生生物的三维游动造成动态立体遮挡,直接导致三维成像难以捕捉目标准确三维坐标和形态。同时,水体散射和吸收等特性大大降低了光的传播距离,这种现象在浑浊的水域和深海环境

中尤其明显。散射效应会导致水下图像模糊和比度降低,而吸收效应减弱了水下成像设备接收到的光的强度,导致水下目标的细节丢失。此外,以波浪、湍流、悬浮粒子、叶绿素和有色溶解物等为特征的水体动态特性容易引入了随机噪声及伪影,使光在水中的传播路径变得模糊复杂,进而加剧水下成像数据的复杂性和不确定性。因此,水下环境的复杂性严重阻碍了水下光场成像的有效性。

2)水下光场成像的硬件设计。为了获取高质量的水下光场数据,相应系统的硬件设备通常需要高分辨率的相机阵列或水中专门的光场传感器。然而,这些设备通常体积大、结构复杂,很难在水下实际场景中灵活部署。此外,水下工况环境对设备防水、耐压、耐腐蚀等条件提出了更严格的要求,导致硬件设备制造成本高。此外,由于光场成像系统捕获多维光信息,而现有传感器在实时应用中难以满足高采样率和实时传输的双重需求。因而水下光场成像系统的硬件设计仍继续面临上述诸多壁垒。

3)水下光场成像的高维数据利用。由光场成像技术所捕获的高维数据涵盖空间、角度及光谱等多重信息,这种数据结构的复杂性对后续的传输、存储和处理带来了巨大的挑战。同时,水下光场成像面临“数据集严重匮乏”的关键瓶颈,其主要原因源于水下环境复杂性。一方面,在三维水下环境中,深度分层导致光场不均、立体散射带来信号干扰,使采集设备需在不同深度与角度下反复调试,且单次采集仅覆盖极小范围水域,而要获取涵盖不同水质、不同深度和不同动态干扰的完整光场数据集,则需要投入大量时间与设备成本;另一方面,数据标注难度和成本极高,水下光场高维数据包含空间、角度和光谱等多重信息,需要同时标注目标的三维坐标、角度散射特征和光谱响应规律等,而水下目标形态复杂且易随水流动态变化,人工标注不仅耗时还难以保证准确性,进一步限制了高质量标注数据集的构建。目前仍缺乏光场图像/视频处理的统一标准和成熟解析算法,导致无法利用有价值的信息。而定制算法通常用于提取水下光场图像的目标结构和颜色等信息,同时现有的成像算法(吕凡等,2025)在处理复杂的水下散射和噪声抑制时,需要较高的计算成本与资源,从而降低光场图像的处理效率,最终影响到高维数据的利用效能。

鉴于上述所面临瓶颈,本文预测未来光场成像

技术的发展将聚焦于以下重点方向:

1) 水下光场成像的模型设计。水下光传播模型的优化设计有望超越现有的物理限制, 建立更精确的光线追踪与散射模型, 有效地减轻水体的散射和吸收效应对光传输影响。同时, 结合传统的物理成像模型和当前的数据驱动(深度学习)技术, 更准确模拟动态水下环境下的光传播特性, 以消除噪声和伪影等影响, 最终从复杂的水下环境中准确重建更真实、更清晰光场图像。

2) 水下光学特性的稳定性研究。识别在动态水下环境中的稳定光学特征, 对提升水下成像系统的环境适应性至关重要。这些稳定特征变量通常包含不随时间变化或光传播环境因素影响的特性, 如特定的光强模式、偏振状态和颜色光谱等特性。借助构建先进的深度学习算法, 通过大规模的数据训练来自动识别这些不变特征, 进而建立普适性或通用模型, 以确保在各种水下环境中数据重建过程的一致性与稳定性。

3) 水下光场成像的新装备研发。随着光学材料、传感器技术和新成像设备等的快速发展, 水下光场相机设备正朝着微型化、低功耗和高可靠性等方向演化。特别是, 基于超分辨率成像和多光谱融合的先进传感器, 在有挑战性情况下显著提高水下光场成像的准确性和效率。此外, 一些研究将聚焦于高分辨率光电检测和成像设备, 开发具有光电阴极双微通道板的图像增强器, 以实现高灵敏度、低噪声、高增益、快速响应、宽动态范围等功能, 以提高水下光场成像系统的质量、清晰度、灵敏度和响应速度等相关指标, 从而全面提升系统成像性能。

4) 高维数据处理的新设计。为有效处理水下光场的高维数据, 当前主要趋势是将数据驱动方法(如深度学习和大模型技术(Bi等, 2024; Zheng等, 2023))和水下物理模型或传统处理技术相结合, 构建水下光场成像中的关键信息。同时, 相关算法及模型(如深度神经网络, Retinex模型等), 考虑到前向散射、人工光源和水体等多因素, 显著提升水下复杂环境中的光场图像/视频处理能力。此外, 为适应于水下设备有限和资源受限等特殊情况, 开发轻量化实时处理模型, 产生更高效的清晰化图像/视频。生成式对抗网络、自注意力机制网络和扩散网络等先进模型将被重新设计与优化, 有望为水下光场成像中的高维数据提供更高效的处理方案。

4 结 语

本文系统梳理了水下光场成像技术的研究进展, 并从理论层面和应用层面两个维度展开分析。在理论层面上, 详细回顾了水下光场成像的模型机理、其理论进展及模型参数校准等方面。在应用层面上, 系统概括了该成像技术在水下图像清晰化、水下成像距离拓展、水下目标检测与跟踪以及水下三维重建等方面的应用进展。此外, 本文还指出了当前水下光场成像技术所面临的挑战: 水下环境的高度不确定性、高精度传感器研发难度大、以及海量数据的高效处理等瓶颈问题。尽管如此, 该技术仍具有巨大的发展潜力, 未来研究将聚焦于更精确的水下成像模型, 开发小型化和高度鲁棒的传感器, 开发更高效的处理算法。水下光场成像已成为一种多学科交叉技术, 整合了光学工程、物理建模、材料设计和人工智能等各个领域的创新成果。通过持续应对技术和工程挑战, 该技术有望成为海洋科学和水下工程等蓝色经济领域中的核心技术, 并将在海洋强国战略中发挥着至关重要的作用。

参考文献 (References)

- Adelson E H and Bergen J R. 1991. The plenoptic function and the elements of early vision//Landy M S and Movshon J A, eds. *Computational Models of Visual Processing*, Cambridge, USA: MIT Press: 3-20
- Alam M Z and Gunturk B K. 2022. Light field extraction from a conventional camera. *Signal Processing: Image Communication*, 109: #116845 [DOI: 10.1016/j.image.2022.116845]
- Avanthey L and Beaudoin L. 2024. Dense in situ underwater 3D reconstruction by aggregation of successive partial local clouds. *Remote Sensing*, 16(24): #4737 [DOI: 10.3390/rs16244737]
- Bekerman Y, Avidan S and Treibitz T. 2020. Unveiling optical properties in underwater images//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. St. Louis, USA: IEEE: 1-12 [DOI: 10.1109/ICCP48838.2020.9105267]
- Bi Z, Zhang N Y, Xue Y D, Ou Y X, Ji D X, Zheng G Z, et al. 2024. OceanGPT: a large language model for ocean science tasks//*Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Bangkok, Thailand: ACL: 3357-3372 [DOI: 10.18653/v1/2024.acl-long.184]
- Bianco G, Gallo A, Bruno F and Muzzupappa M. 2013. A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D

- reconstruction of close-range objects. *Sensors*, 13 (8) : 11007-11031 [DOI: 10.3390/s130811007]
- Bigas M, Cabruja E, Forest J and Salvi J. 2006. Review of CMOS image sensors. *Microelectronics Journal*, 37 (5) : 433-451 [DOI: 10.1016/j.mejo.2005.07.002]
- Brandou V, Allais A G, Perrier M, Malis E, Rives P, Sarrazin J, et al. 2007. 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS//*Proceedings of OCEANS 2007 — Europe*. Aberdeen, UK: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302315]
- Cai C D, Huo G Y, Zhou Y and Han H. 2019. Underwater image restoration method based on scene depth estimation and white balance. *Laser and Optoelectronics Progress*, 56(3): #031008 (蔡晨东, 霍冠英, 周妍, 韩辉. 2019. 基于场景深度估计和白平衡的水下图像复原. *激光与光电子学进展*, 56(3): #031008) [DOI: 10.3788/LOP56.031008]
- Chadebecq F, Vasconcelos F, Lacher R, Maneas E, Desjardins A, Ourselin S, et al. 2020. Refractive two-view reconstruction for underwater 3D vision. *International Journal of Computer Vision*, 128(5): 1101-1117 [DOI: 10.1007/s11263-019-01218-9]
- Chen Y F, Sun Z, Li C and Li X L. 2023. Computational ghost imaging in turbulent water based on self-supervised information extraction network. *Optics and Laser Technology*, 167: #109735 [DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109735]
- Cui W, Li C, Zhang C and Zhang X. 2018. Restoration and enhancement of underwater light field image//Wang K S, Wang Y, Strandhagen J O and Yu T, eds. *Advanced Manufacturing and Automation VII*. Singapore, Singapore: Springer: 93-105 [DOI: 10.1007/978-981-10-5768-7_9]
- Dai C G, Li D N, Chen C J, Zhao Z X and Lin M X. 2025. Robust underwater imaging model and automatic parameter optimization for underwater image restoration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 151: #110651 [DOI: 10.1016/j.engappai.2025.110651]
- Dalberg E, Lauberts A, Lennartsson R K, Levonen M J and Persson L. 2006. Underwater target tracking by means of acoustic and electromagnetic data fusion//*Proceedings of 9th International Conference on Information Fusion*. Florence, Italy: IEEE: 1-8 [DOI: 10.1109/ICIF.2006.301613]
- Dagleish F R, Caimi F M, Britton W B and Andren C F. 2007. An AUV-deployable pulsed laser line scan (PLLS) imaging sensor//*Proceedings of the OCEANS 2007*. Vancouver, Canada: IEEE: 1-5 [DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449184]
- Ding Y Q, Chen Z, Ji Y, Yu J Y and Ye J W. 2023. Light field-based underwater 3D reconstruction via angular re-sampling. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 9: 881-893 [DOI: 10.1109/TCI.2023.3319983]
- Duan H X, Mei L, Wang J, Song L and Liu N. 2019. A new imaging model of Lytro light field camera and its calibration. *Neurocomputing*, 328: 189-194 [DOI: 10.1016/j.neucom.2018.05.118]
- Fan G D, Zhou J C, Xu C P and Cheng Z. 2025. Deep dive into clarity: leveraging signal-to-noise ratio awareness and knowledge distillation for underwater image enhancement. *Expert Systems with Applications*, 269: #126317 [DOI: 10.1016/J.ESWA.2024.126317]
- Guo S. 2009. The Research on Establishment of Underwater Inhomogeneous Optic Field. Master's thesis. (郭松. 2009. 水下非均匀光场建立方法研究. 中国海洋大学, 硕士学位论文)
- Georgiev T, Yu Z, Lumsdaine A and Goma S. 2013. Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis//*Proceedings of SPIE 8667, Multimedia Content and Mobile Devices*. Burlingame, United States: SPIE: 86671J [DOI: 10.1117/12.2013581]
- Gershun A. 1939. The light field. *Journal of Mathematics and Physics*, 18(1/4): 51-151 [DOI: 10.1002/sapm193918151]
- Gupta M, Jauhari A, Kulkarni K, Jayasuriya S, Molnar A and Turaga P. 2017. Compressive light field reconstructions using deep learning//*Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Honolulu, USA: IEEE: 1277-1286 [DOI: 10.1109/CVPRW.2017.168]
- Han H W, Hu Q P, Sun C S and Li J. 2024. Underwater images visibility enhance algorithm based on NSCT transform and dark-channel prior. *Optics and Optoelectronic Technology*, 22(5): 14-20 (韩宏伟, 胡清平, 孙春生, 李季. 2024. 基于NSCT变换和暗通道先验的水下图像清晰化算法研究. *光学与光电技术*, 22(5): 14-20) [DOI: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2024.05.019]
- Han J F. 2016. The Design of Portable Underwater Imaging System with Continuous Illumination and the Research on Enhancement Technique of Imaging Quality. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology (韩捷飞. 2016. 便携式水下连续光成像系统设计及成像质量增强技术研究. 武汉: 华中科技大学)
- He D H, Cheng P and Li Y Y. 2023a. Monte Carlo method for solving underwater light field. *Journal of Applied Optics*, 44(2): 268-274 (何大华, 程朴, 李阳阳. 2023a. 水下光场的蒙特卡罗法求解. *应用光学*, 44(2): 268-274) [DOI: 10.5768/JAO202344.0201005]
- He D H, Li Y Y and Zhou S J. 2022. Iterative solution of underwater scattering light field. *Chinese Optics*, 15(2): 297-305 (何大华, 李阳阳, 周少杰. 2022. 水下光场的迭代求解. *中国光学*, 15(2): 297-305) [DOI: 10.37188/CO.2021-0162]
- He D H, Zhang R W, Li Y Y and Zhu X Q. 2023b. Underwater electro-optical imaging model. *Optics and Optoelectronic Technology*, 21(5): 107-116 (何大华, 张瑞文, 李阳阳, 朱雪琼. 2023b. 水下光电成像模型. *光学与光电技术*, 21(5): 107-116) [DOI: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2023.05.004]
- Horisaki R, Takagi R and Tamida J. 2016. Learning-based imaging through scattering media. *Optics Express*, 24(13): 13738-13743 [DOI: 10.1364/OE.24.013738]
- Hu H F, Li J Q, Li X B and Liu T G. 2021. Underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom. *Acta Optica Sinica*,

- 41(3): #0329001 (胡浩丰, 李嘉琦, 李校博, 刘铁根. 2021. 三自由度偏振差分水下成像技术. 光学学报, 41(3): #0329001 [DOI: 10.3788/AOS202141.0329001])
- Hu H F, Zhao L, Li X B, Wang H and Liu T G. 2018. Underwater image recovery under the nonuniform optical field based on polarimetric imaging. *IEEE Photonics Journal*, 10(1): #6900309 [DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2791517]
- Ichimaru K and Kawasaki H. 2019. Underwater stereo using refraction-free image synthesized from light field camera//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Image Processing. Taipei, China: IEEE: 1039-1043 [DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803743]
- Jaffe J S. 1990. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15(2): 101-111 [DOI: 10.1109/48.50695]
- Jaffe J S. 2015. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 40(3): 683-700 [DOI: 10.1109/JOE.2014.2350751]
- Jaffe J S, Moore K D, McLean J and Strand M P. 2001. Underwater optical imaging: status and prospects. *Oceanography*, 14(3): 64-75 [DOI: 10.5670/oceanog.2001.24]
- Jahan K and Rao S K. 2020. Implementation of underwater target tracking techniques for Gaussian and non-Gaussian environments. *Computers and Electrical Engineering*, 87: #106783 [DOI: 10.1016/j.compeleceng.2020.106783]
- James F. 1980. Monte Carlo theory and practice. *Reports on Progress in Physics*, 43(9): 1145-1189 [DOI: 10.1088/0034-4885/43/9/002]
- Ji Y, Tu D W, Zhang X, Jin Y and Li C. 2019. Light field camera image sharpness enhancement for underwater machine vision application//Proceedings of the 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). Shanghai, China: IEEE: 499-503 [DOI: 10.1109/WCMEIM48965.2019.00105]
- Ji Y, Tu D W, Zhang X and Li C. 2020. Research on light field recording and scattering background separation in underwater active laser scanning system. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 34(5): 58-64 (吉勇, 屠大维, 张旭, 李晨. 2020. 水下主动激光扫描系统中光场记录及散射背景分离研究. 电子测量与仪器学报, 34(5): 58-64) [DOI: 10.13382/j.jemi.B1902705]
- Jia C, Shi F, Zhao M and Chen S Y. 2022. Light field imaging for computer vision: a survey. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 23(7): 1077-1097 [DOI: 10.1631/FITEE.2100180]
- Jin P, Tu D W and Zhang X. 2018. Theoretical modeling and simulation analysis of underwater synchronous scanning triangulation imaging system. *Journal of Applied Optics*, 39(6): 849-855 (金攀, 屠大维, 张旭. 2018. 水下同步扫描三角测距成像理论建模及仿真分析. 应用光学, 39(6): 849-855) [DOI: 10.5768/JAO201839.0602003]
- Kauer T, Arst H and Tuvikene L. 2010. Underwater light field and spectral distribution of attenuation depth in inland and coastal waters. *Oceanologia*, 52(2): 155-170 [DOI: 10.5697/oc.52-2.155]
- Knox C. 1966. Holographic microscopy as a technique for recording dynamic microscopic subjects. *Science*, 153(3739): 989-990 [DOI: 10.1126/science.153.3739.989]
- Levoy M and Hanrahan P. 1996. Light field rendering//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. [s.l.]: ACM: 31-42 [DOI: 10.1145/237170.237199]
- Li J Y, Hou G J, Zhang X J, Lu T and Wang Y F. 2023. Underwater image restoration based on scene depth estimation and background segmentation. *Laser and Optoelectronics Progress*, 60(2): #0210010 (李靖怡, 侯国家, 张孝嘉, 鹿婷, 王永芳. 2023. 基于场景深度估计和背景分割的水下图像复原. 激光与光电子学进展, 60(2): #0210010) [DOI: 10.3788/LOP212986]
- Li S, Deng M, Lee J, Sinha A and Barbastathis G. 2018. Imaging through glass diffusers using densely connected convolutional networks. *Optica*, 5(7): 803-813 [DOI: 10.1364/OPTICA.5.000803]
- Lin B, Fan X Q, Li D K, Peng Z Y and Guo Z Y. 2022. Research progress of imaging through scattering media based on deep learning. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 39(6): 880-898 (林冰, 樊学强, 李德奎, 彭志勇, 郭忠义. 2022. 基于深度学习的散射光场成像研究进展. 量子电子学报, 39(6): 880-898) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2022.06.005]
- Lin Y J, Hou J H, Lyu X Q, Zhao Q and Meng D Y. 2025. Enhancing underwater imaging with 4-D light fields: dataset and method. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*: 1-14 [DOI: 10.1109/JSTSP.2025.3589758]
- Litwiller D. 2001. CCD vs. CMOS: facts and fiction. *Photonics Spectra*, 35(1): 154-158
- Liu D S, Zhou J C, Xie X, Lin Z F and Lin Y. 2022a. Underwater image restoration via background light estimation and depth map optimization. *Optics Express*, 30(16): 29099-29116 [DOI: 10.1364/OE.462861]
- Liu F, Sun S J, Han P L, Zhao L and Shao X P. 2021. Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging. *Acta Physica Sinica*, 70(16): #164201 (刘方, 孙少杰, 韩平丽, 赵琳, 邵晓鹏. 2021. 基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究. 物理学报, 70(16): #164201) [DOI: 10.7498/aps.70.20210314]
- Liu J, Gong S H, Guan W X, Li B Y, Li H B and Liu J X. 2020. Tracking and localization based on multi-angle vision for underwater target. *Electronics*, 9(11): #1871 [DOI: 10.3390/electronics9111871]
- Liu Y J, Liu C, Shen K, Sun P, Li W J, Zhao C X, et al. 2022b. Underwater multispectral computational imaging based on a broadband water-resistant Sb_2Se_3 heterojunction photodetector. *ACS Nano*, 16(4): 5820-5829 [DOI: 10.1021/acsnano.1c10936]
- Lu Y B, Xu H X, Feng H, Wang X Q, Gong R and Zhou Z J. 2025. Underwater multi-target fusion tracking method based on bearing-only. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation*

- Science Engineering), 49(1): 59-65 (卢焯彬, 徐海祥, 冯辉, 王晓乾, 龚锐, 周志杰. 2025. 基于纯方位角的水下多目标融合跟踪方法. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 49(1): 59-65) [DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2025.01.010]
- Luo C L, Wan W X, Chen S Y, Long A F, Peng L N, Wu S F, et al. 2020. High-quality underwater computational ghost imaging with shaped Lorentz sources. *Laser Physics Letters*, 17(10): #105209 [DOI: 10.1088/1612-202X/abb094]
- Lyu S, Man T L, Zhang W X and Wan Y H. 2024. High quality underwater computational ghost imaging based on speckle decomposition and fusion of reconstructed images. *Optics Communications*, 561: #130460 [DOI: 10.1016/j.optcom.2024.130460]
- Lyu F, Wang L, Li X, Zheng W S, Zhang Z, Zhou T, et al. 2025. Comprehensive survey of continual learning. *Journal of Image and Graphics*, 30(8): 2599-2632 (吕凡, 王亮, 李玺, 郑伟诗, 张彰, 周涛, 等. 2025. 持续学习研究进展. 中国图象图形学报, 30(8): 2599-2632) [DOI: 10.11834/jig.240661]
- Lyu M, Wang H, Li G W, Zheng S S and Situ G H. 2019. Learning-based lensless imaging through optically thick scattering media. *Advanced Photonics*, 1(3): #036002 [DOI: 10.1117/1.AP.1.3.036002]
- Martinho L A, Calvalcanti J M B, Pio J L S and Oliveira F G. 2024. Diving into clarity: restoring underwater images using deep learning. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 110(1): #32 [DOI: 10.1007/s10846-024-02065-8]
- Narasimhan S G, Nayar S K, Sun B and Koppal S J. 2005. Structured light in scattering media//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Beijing, China: IEEE: 420-427 [DOI: 10.1109/ICCV.2005.232]
- Ng R, Levoy M, Brédif M, Duval G, Horowitz M and Hanrahan P. 2005. Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera. Stanford Tech Report CTSR 2005-02.
- Ouyang B, Dalgleish F, Vuorenkoski A, Britton W, Ramos B and Metzger B. 2013. Visualization and image enhancement for multi-static underwater laser line scan system using image-based rendering. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38(3): 566-580 [DOI: 10.1109/JOE.2012.2229066]
- Ouyang F, Yu J, Liu H P, Ma Z and Yu X. 2021. Underwater imaging system based on light field technology. *IEEE Sensors Journal*, 21(12): 13753-13760 [DOI: 10.1109/JSEN.2021.3069246]
- Prabhavathy P, Chidambaram G, Jahid A and Alsharif M H. 2024. Enhancing underwater object detection and classification using advanced imaging techniques: a novel approach with diffusion models. *Sustainability*, 16(17): #7488 [DOI: 10.3390/su16177488]
- Risholm P, Thorstensen J, Thielemann J T, Kaspersen K, Tschudi J, Yates C, et al. 2018. Real-time super-resolved 3D in turbid water using a fast range-gated CMOS camera. *Applied Optics*, 57(14): 3927-3937 [DOI: 10.1364/AO.57.003927]
- Shen Y, Zhao C J, Liu Y, Wang S and Huang F. 2021. Underwater optical imaging: key technologies and applications review. *IEEE Access*, 9: 85500-85514 [DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3086820]
- Shi F, Cheng H C, Yan L, Guo X, Li S L, Qiu H J, et al. 2023. Advances in underwater photoelectric imaging technology. *Infrared Technology*, 45(10): 1066-1083 (石峰, 程宏昌, 闫磊, 郭欣, 李世龙, 邱洪金, 等. 2023. 水下光电成像技术研究进展. 红外技术, 45(10): 1066-1083)
- Skinner K A and Johnson-Roberson M. 2017. Underwater image dehazing with a light field camera//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Honolulu, USA: IEEE: 1775-1782 [DOI: 10.1109/CVPRW.2017.224]
- Song Q. 2008. Research on Characteristics of Underwater Illuminant Wavelength in Inhomogeneous Optic Field. Qingdao, China: Ocean University of China (宋青. 2008. 水下非均匀光场光源波长特性研究. 青岛: 中国海洋大学) [DOI: 10.7666/d.y1338174]
- Song W, Wang Y, Huang D M and Tjondronegoro D. 2018. A rapid scene depth estimation model based on underwater light attenuation prior for underwater image restoration//Proceedings of the 19th Pacific-Rim Conference on Multimedia Advances in Multimedia Information Processing. Hefei, China: Springer: 678-688 [DOI: 10.1007/978-3-030-00776-8_62]
- Spier O, Treibitz T and Gilboa G. 2017. In situ target-less calibration of turbid media//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). Stanford, USA: IEEE: 1-9 [DOI: 10.1109/ICCPHOT.2017.7951491]
- Sun H Y, Hendry D C, Player M A and Watson J. 2007. In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(2): 373-382 [DOI: 10.1109/JOE.2007.891891]
- Sun M N, Gu Z R, Zheng H Y, Zheng B and Watson J. 2018. Underwater wide-area layered light field for underwater detection. *IEEE Access*, 6: 63915-63922 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2877591]
- Tao M W, Srinivasa P P, Malik J, Rusinkiewicz S and Ramamoorthi R. 2015. Depth from shading, defocus, and correspondence using light-field angular coherence//Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, USA: IEEE: 1940-1948 [DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298804]
- Tian J D, Murez Z, Cui T, Zhang Z, Kriegman D and Ramamoorthi R. 2017. Depth and image restoration from light field in a scattering medium//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy: IEEE: 2420-2429 [DOI: 10.1109/ICCV.2017.263]
- Tian Y, Liu B, Su X Y, Wang L P and Li K. 2019. Underwater imaging based on LF and polarization. *IEEE Photonics Journal*, 11(1): #6500309 [DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2890286]
- Tian Z S, Yang G, Zhang Y C, Cui Z H and Bi Z J. 2021. A range-gated imaging flash Lidar based on the adjacent frame difference method. *Optics and Lasers in Engineering*, 141: #106558 [DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106558]

- Treibitz T and Schechner Y Y. 2009. Active polarization descattering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(3): 385-399 [DOI: 10.1109/TPAMI.2008.85]
- Ullah S, Hassan N and Bhatti N. 2024. A diverse underwater image formation model for underwater image restoration. *Earth Science Informatics*, 17(6): 5371-5383 [DOI: 10.1007/s12145-024-01462-9]
- Wang D, Zhang Z Y, Zhao J B, Liang W F, Yang X L, Fan H J, et al. 2021. An enhancement method for underwater images under natural illumination based on scene depth estimation. *Robot*, 43(3): 364-372 (王丹, 张子玉, 赵金宝, 梁文峰, 杨谢柳, 范慧杰, 等. 2021. 基于场景深度估计的自然光照水下图像增强方法. *机器人*, 43(3): 364-372) [DOI: 10.13973/j.cnki.robot.200275]
- Wang H, Qiu S, Lu T R, Kuang Y J and Jin W Q. 2024. Underwater single-photon 3D reconstruction algorithm based on K-nearest neighbor. *Sensors*, 24(13): #4401 [DOI: 10.3390/s24134401]
- Wu G C, Masia B, Jarabo A, Zhang Y C, Wang L Y, Dai Q H, et al. 2017. Light field image processing: an overview. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 11(7): 926-954 [DOI: 10.1109/JSTSP.2017.2747126]
- Wu H D, Liu Z Y, Li C Y, Wang H C, Zhai Y Z and Dong L L. 2024. A laser field synchronous scanning imaging system for underwater long-range detection. *Optics and Laser Technology*, 175: #110849 [DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110849]
- Xiao B, Gao X J and Huang H W. 2024. Optimizing underwater image restoration and depth estimation with light field images. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6): #935 [DOI: 10.3390/jmse12060935]
- Xu C Z. 2023. Research on Underwater Target Feature Extraction and Tracking Technology Based on Neural Network. Hangzhou, China: Hangzhou Dianzi University (徐楚臻. 2023. 基于神经网络的水下目标特征提取与跟踪技术研究. 杭州: 杭州电子科技大学) [DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2023.000880]
- Xu H M. 2009. Research of Underwater Imaging Detection Technology in Inhomogeneous Illumination Field. Qingdao, China: Ocean University of China (徐洪梅. 2009. 水下非均匀光场的目标探测研究. 青岛: 中国海洋大学) [DOI: 10.7666/d.y1828851]
- Xu H M, Zhang Z G and Zheng B. 2010. Distribution characteristics in the underwater inhomogeneous illumination field. *Acta Photonica Sinica*, 39(9): 1606-1610 (徐洪梅, 张志刚, 郑冰. 2010. 水下非均匀光场的分布特性. *光子学报*, 39(9): 1606-1610) [DOI: 10.3788/gzxb20103909.1606]
- Xu W, Wu Y S and Zhang T. 2023. Study on distributed algorithm for multi-array underwater multi-target tracking. *Journal of Signal Processing*, 39(10): 1764-1774 (徐文, 吴雨桑, 张婷. 2023. 多阵列水下多目标跟踪的分布式算法研究. *信号处理*, 39(10): 1764-1774) [DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2023.10.004]
- Yao Q M, Li Y A and Li J Y. 2024. Application of EPF and PF in underwater 3D bearings-only target tracking. *Ship Science and Technology*, 46(14): 147-152 (姚全懋, 李亚安, 李佳颖. 2024. EPF和PF在水下三维纯方位目标跟踪中的应用. *舰船科学技术*, 46(14): 147-152) [DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.14.024]
- Ye T, Chen S X, Liu Y, Ye Y, Chen E K and Li Y C. 2022. Underwater light field retention: neural rendering for underwater imaging// *Proceedings of 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. New Orleans, United States: IEEE: 487-496 [DOI: 10.1109/CVPRW56347.2022.00064]
- You Y, Kattawar G W, Voss K J, Bhandari P, Wei J W, Lewis M, et al. 2011. Polarized light field under dynamic ocean surfaces: numerical modeling compared with measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7): #C00H05 [DOI: 10.1029/2011JC007278]
- Zeng W J, Li R Z, Zhou H and Zhang T D. 2025. Underwater target tracking method based on forward-looking sonar data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3): #430 [DOI: 10.3390/jmse13030430]
- Zhang C, Zhang X, Zhu Y K, Li J B and Tu D W. 2018. Model and calibration of underwater stereo vision based on the light field. *Measurement Science and Technology*, 29(10): #105402 [DOI: 10.1088/1361-6501/aad8a7]
- Zhang X Q, Zhong L T, Leng Q Q, Ran L Y and Chu H Y. 2022. Underwater light field camera calibration based on multi-layer flat refractive model and multi-projection-center model. *Acta Optica Sinica*, 42(12): #1215001 (张晓强, 钟良涛, 冷齐齐, 冉令燕, 楚红雨. 2022. 基于多层平面折射模型与多投影中心模型的光场相机水下标定. *光学学报*, 42(12): #1215001) [DOI: 10.3788/AOS202242.1215001]
- Zhang Z Y F, Zhang L, Wang L and Wu H M. 2024. Scene 3-D reconstruction system in scattering medium. *Computers, Materials and Continua*, 80(2): 3405-3420 [DOI: 10.32604/cmc.2024.052144]
- Zhao R X, Liu L, Kong X Y, Jiang S and Chen X. 2019. Multi-scale fusion algorithm of intensity and polarization-difference images based on edge information enhancement. *Optical and Quantum Electronics*, 51(6): #178 [DOI: 10.1007/s11082-019-1899-4]
- Zhao X W, Jin T, Chi H and Qu S. 2015. Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions. *Acta Physica Sinica*, 64(10): #104201 (赵欣慰, 金韬, 池灏, 曲嵩. 2015. 不同光照条件下水下成像背景光的建模与研究. *物理学报*, 64(10): #104201) [DOI: 10.7498/aps.64.104201]
- Zheng B. 2013. The Research of Mixed Light Field Underwater Optical Two-Dimensional and Three-Dimensional Detection. Qingdao, China: Ocean University of China (郑冰. 2013. 混合光场水下光学二维与三维探测研究. 青岛: 中国海洋大学) [DOI: 10.7666/d.D328875]
- Zheng B and Tu X D. 2009. The theoretical analysis of establishment of underwater inhomogeneous optic field. *Microcomputer Information*,

- 25(7-1): 220-221, 225 (郑冰, 屠晓东. 2009. 水下非均匀光场建立方法的理论研究. 微计算机信息, 25(7-1): 220-221, 225)
- Zheng Z Q, Zhang J P, Vu T A, Diao S Z, Tim Y H W and Yeung S K. 2023. MarineGPT: unlocking secrets of "ocean" to the public [EB/OL]. [2025-06-04]. <https://arxiv.org/pdf/2310.13596.pdf>
- Zhou J C, Yang T Y, Ren W Q, Zhang D and Zhang W S. 2021. Underwater image restoration via depth map and illumination estimation based on a single image. *Optics Express*, 29(19): 29864-29886 [DOI: 10.1364/OE.427839]
- Zuo C, Feng S J, Zhang X Y, Han J and Chen Q. 2020. Deep learning based computational imaging: status, challenges, and future. *Acta Optica Sinica*, 40(1): #0111003 (左超, 冯世杰, 张翔宇, 韩静, 陈钱. 2020. 深度学习下的计算成像: 现状、挑战与未来. 光学学报, 40(1): #0111003) [DOI: 10.3788/AOS202040.0111003]

作者简介

庄培显,男,副教授,主要研究方向为水下信息感知与处理、图像处理、计算机视觉和人工智能。

E-mail: zhuangpeixian0624@163.com

王一航,女,本科生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉和人工智能。E-mail: 18802407368@163.com

张新恒,男,本科生,主要研究方向为水下图像处理与计算机视觉。E-mail: zxh18518097128@163.com

刘飞,男,本科生,主要研究方向为图像处理与计算机视觉。E-mail: 15156081038@163.com

童俊杰,男,本科生,主要研究方向为图像处理与计算机视觉。E-mail: 2239438004@qq.com

富振奇,男,博士后,主要研究方向为图象处理、生物医学成像、深度学习和人工智能。

E-mail: fuzhenqi@mail.tsinghua.edu.cn