

船舶及海洋工程装备

视觉测波技术及其图像智能优化算法研究进展

朱真慧¹, 汪雪良^{1,2*}, 孙函宇^{1,2}, 姚骥^{1,2}

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;

2. 船舶结构安全全国重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘要: 综述了波浪监测中基于视觉的测波技术, 重点讨论了单目、双目、多目视觉技术的基本原理, 并通过应用案例分析其优势与不足。基于智能算法正逐渐应用到图像处理中, 如卷积神经网络、长短期记忆神经网络等, 对人工智能在视觉测波技术中角点检测、特征匹配等阶段的具体应用进行了分析, 讨论了深度学习算法在波浪反演、波浪预测中取得的进展, 阐述了智能算法及技术对优化波浪监测系统的重要性, 并展望了未来人工智能在此领域的发展趋势。

关键词: 机器视觉; 波浪监测; 图像识别; 特征匹配; 神经网络; 深度学习; 智能算法

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0114-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.012

Research Progress on Visual Wave Measurement Technology and
Intelligent Image Optimization AlgorithmZHU Zhenhui¹, WANG Xueliang^{1,2*}, SUN Hanyu^{1,2}, YAO Ji^{1,2}

(1. China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China;

2. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Jiangsu Wuxi 214082, China)

ABSTRACT: The work aims to provide an overview of vision-based wave measurement technology in wave monitoring, focusing on the basic principles of monocular, binocular, and multiocular vision technologies and analyze their advantages and disadvantages through application case studies. Intelligent algorithms, such as convolutional neural networks and long short-term memory neural networks, are gradually being applied to image processing. The specific applications of artificial intelligence in stages such as corner detection and feature matching in visual wave measurement technology are analyzed. The progress made by deep learning algorithms in wave inversion and wave prediction is discussed. The importance of intelligent algorithms and technologies in optimizing wave monitoring systems is elaborated, and the future development trends of artificial intelligence in this field are prospected.

KEY WORDS: machine vision; wave monitoring; image recognition; feature matching; neural network; deep learning; intelligent algorithm

收稿日期: 2024-10-30; 修订日期: 2024-12-05

Received: 2024-10-30; Revised: 2024-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFE0104300)

Fund: National Key Research and Development Project (2024YFE0104300)

引文格式: 朱真慧, 汪雪良, 孙函宇, 等. 视觉测波技术及其图像智能优化算法研究进展[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 114-124.

ZHU Zhenhui, WANG Xueliang, SUN Hanyu, et al. Research Progress on Visual Wave Measurement Technology and Intelligent Image Optimization Algorithm[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 114-124.

*通信作者 (Corresponding author)

海洋环境的复杂多变性, 尤其是风浪的不确定性, 对海上作业的安全性构成了严峻挑战。船舶在恶劣海况下作业, 其结构安全和航行稳定性受到极大考验, 因此对海洋波浪的实时监测和准确评估显得尤为关键。海洋波浪观测在航运、气象预报和海洋工程等多个关键领域发挥着至关重要的作用。在航运领域, 波浪观测确保了航行安全, 指导航线规划, 保护货物免受损害, 并为船只设计提供科学依据。气象预报依赖波浪数据来预测极端天气事件, 进行气候研究, 并发出海洋灾害的早期预警。海洋工程则利用波浪观测数据来设计和建设港口、近海设施, 评估环境影响, 并开发海洋能源。

在过去的几十年中, 海洋波浪监测技术不断转变, 雷达测波技术作为目前较为成熟的监测手段, 虽然在一定程度上能够提供波浪信息, 但在复杂海况下的精度和可靠性仍有待提高。雷达测波技术的原理是雷达装置向海洋表面发射电磁信号, 这些信号在海面上反射后返回, 被雷达接收器捕获。随后, 通过数据处理单元对信号进行分析, 从而提取出海浪的关键信息^[1-2]。这种测量方法的优势在于其非接触性, 成功规避了由于海水侵蚀或海面污染造成的测量误差, 从而确保了测量结果的高度准确性, 特别适用于对广阔海域和远洋环境的观测。然而, 它也存在一些局限性, 包括测量精度相对较低和海浪图像质量不够理想等。此外, 雷达系统的购置成本较高, 且从雷达数据中推导出海浪信息的过程也较为复杂^[3-4]。

随着立体视觉技术的兴起, 基于视觉的测波技术开始受到关注。立体摄影测波技术的原理为利用摄像机对海浪进行拍摄, 通过图像识别等计算机算法处理海浪图像, 最终得到海浪中的信息^[5]。海浪监测设备到监测目标点的距离与其监测区域范围呈正相关, 与其所能实现的测量精确度则呈负相关。作为一种非接触式的海浪观测手段, 立体摄影技术与雷达测波技术相比, 展现出其特有的优越性。凭借高分辨率的摄像设备, 该技术能够实现对海面更为详尽的观测, 不仅成本相对较低, 而且在恶劣天气条件下的稳定性也更强, 局限性则在于相机的标定和校正过程较为繁琐和复杂。尽管如此, 立体摄影技术仍然被认为是一种效率高、精度高的海浪观测手段, 尤其适合于对海浪特性进行详细分析的研究场合^[6]。海洋波浪参数的测量应用中, 立体视觉技术正逐渐展现出其适用性, 包括短重力波方向谱的评估^[7]、海平面三维构型的建立^[8]以及波浪高度、斜率和频率的推算等^[9]。

目前, 人工智能技术的快速发展为海洋波浪监测领域带来了新的研究热点, 如何利用智能算法提高波浪图像的分析 and 处理能力, 提高海洋波浪监测精度和可靠性方面的潜力, 是当前研究的关键问题。本文基于视觉测波技术的发展现状及未来趋势, 分析人工智能在其中发挥的推动作用, 并对其应用前景提出设想。

1 单目视觉技术

1.1 基本原理

根据采集二维图像数据时所运用的设备数量差异, 基于视觉的三维重建技术可以分为单目视觉技术、双目视觉技术和多目视觉技术。其中, 单目视觉技术是指仅依赖 1 台摄像机对数据进行采集, 随后提取图像中的特征信息, 并运用特定算法对特征信息进行匹配, 完成匹配后, 选取恰当的重建方法重新构建三维模型。从单目相机捕获的二维图像中的某一像素点转换至三维空间点的原理可用矩阵表示为^[10]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (u, v) 表示图像坐标系下的坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 表示空间中的三维位置坐标; $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 分别为旋转矩阵和平移向量, 描述三维空间与二维图像平面中的变化关系; (u_0, v_0) 表示摄像头中心点在二维图像中的投影位置; f_x, f_y 分别代表摄像机在 x 轴和 y 轴方向上的焦距。

由于单目视觉技术较为简单, 要实现三维重建, 往往要结合其他方法来获得深度信息, 常用方法有调焦法、运动结构恢复法、几何投影测量法^[11]。调焦法的关键是相机的焦距设定、光圈大小以及图像的清晰度, 当物体位置与摄像机焦距位置一致时, 图像的清晰度能达到最高, 因此可以通过观察图像清晰度最高时物体到投影中心的距离, 建立相应的映射关系来恢复深度信息。这种映射关系非线性和自由度很高, 因此为保证准确度, 重建过程中需要多张图片进行综合分析^[12]。运动结构恢复法 (SFM), 最初由 Longuet 提出^[13], 此方法运用 2 张图像中对应点与摄像点的空间几何关系, 来重建目标物体的三维点云。由物体的运动轨迹得到时间序列的二维图像集合后, 根据二维图像之间的关系进行匹配即可估算相机的各项参数, 用三角形测量法实现对物体空间坐标的映射和三维结构的重建, 从而实现对目标的三维测量。几何投影测量法可细分为阴影恢复法、纹理恢复法和几何关系法。阴影恢复法通过对反射模型、光源特性的分析, 根据产生的阴影不同来对单幅图像进行三维重建^[14]。纹理恢复法则是根据物体表面纹理的差异进行重建^[15], 尤其适用于具有鲜明纹理规则的物体。几何关系法则利用透视关系或几何关系实现三维测量。

1.2 应用案例

张发枝等^[16]针对无人艇海面航行场景中单目图像测距难的问题, 采用 Yolov8 模型检测海面目标, 设计基于类别先验划分的双模型测距算法。针对中小型海面目标测距引入目标画面偏航角修正和海天线

结合最小二乘曲面拟合技术, 就可以从二维图像中重建三维几何形态^[26]。

2.2 应用案例

2006 年, Benetazzo 等^[27]将双目视觉技术与图像分析技术相结合, 通过 CCD 相机捕获的图像, 在时间序列上获取了小尺度波的海面高度信息, 从同步且连续的录像图像中提取了海浪表面波的数据。2009 年, Vries 等^[28]运用双目立体视觉技术对拍岸浪的动态变化过程进行拍摄, 覆盖区域达到 $1\ 800\ \text{m}^2$, 观测船上全部部署了全球定位系统 (GPS), 其 GPS 天线即为相机标定的控制点, 通过同步 GPS 接收器和摄像设备的时间, 能够精确获取这些控制点在世界坐标系中的位置信息。

2012 年, 姜文正等^[29]提出了一种立体摄影海浪测量方法, 该方法无需依赖海面设置的控制点, 而是运用平均海平面的特性, 其定标流程简洁, 所测数据直观, 理论上为车载立体摄影海浪测量技术的研发开辟了新的思路, 并同样适用于海面微尺度波的精确测量。2016 年, 严蕾^[30]对波高测量展开了研究, 结合双目视觉技术测得了精确的波浪高度, 并实现了海啸预警功能, 这标志着视觉测波技术在海浪观测领域的进一步发展和应用。

2022 年, 中国船舶科学研究中心的孙函宇等^[31]运用立体海浪观测系统, 在青岛固定平台上进行了海上试验, 如图 3 所示。传统的接触式测波方法已不能满足高精度、非接触式、船舶波场评估的要求, 而立体视觉技术可以实现非接触和移动形式的测量。利用 siftGPU 的网格化实现大图像的快速匹配, 可以使整个算法在 6 s 内运行, 并保证超过 20 000 个特征匹配对数。利用最小二乘法 and 海面波面理论, 在没有控制点的情况下, 利用海浪参数 (波高、周期、波向) 反演和误差点拟合, 计算海面基准面, 所得结果与 RBR 测波仪相吻合。

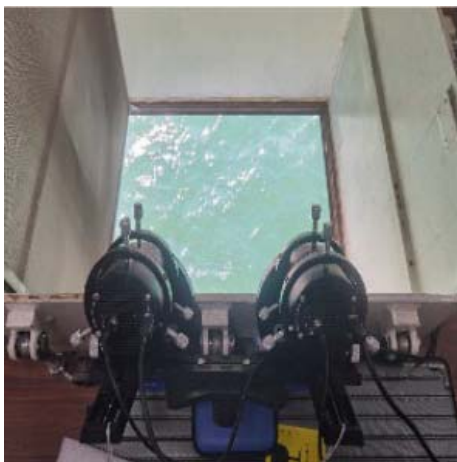


图 3 立体视觉海浪观测系统
Fig.3 Stereo vision ocean wave observation system

双目视觉技术和人眼视觉系统比较相似, 具有效率高、精度高、系统结构简单、成本相对低廉的优点。研究过程中, 利用双目摄像头对目标物体进行图像采集, 现有的算法已经能够对其进行有效处理, 得到所需要的高精度结果。由于该技术能实现非接触式的实时实验, 因此尤其适用于非接触式产品的测量。双目视觉相较于单目视觉, 设备价格更高, 重建运算量大, 在部分复杂环境中不易搭建。

3 多目视觉技术

3.1 基本原理

多目视觉法是在双目视觉原理的基础上进行延伸所形成的方法, 该方法利用至少 3 个摄像机来拍摄图像, 其核心挑战在于如何有效地进行视差图信息匹配, 其相机模型如图 4 所示^[32]。

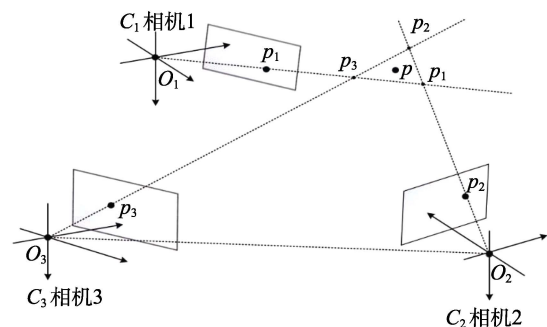


图 4 三目视觉模型
Fig.4 Trinocular vision model

多目视觉技术依赖于视差, 即同一场景点在不同摄像头图像中的水平像素差。视差与场景深度成反比, 即物体越近, 视差越大; 物体越远, 视差越小。与双目视觉类似, 多目视觉通过确定同一场景点在多个图像中的对应位置, 使用三角测量原理计算出该点的三维坐标^[33]。在多目视觉系统中, 每个摄像头的内部参数 (如焦距、主点) 和外部参数 (如相机相对于世界坐标系的位置和方向) 都需要被精确标定。在不同摄像头捕获的图像中, 识别和匹配相同的特征点, 找到左右图像中的对应点对, 从而计算视差图。

根据计算得到的视差图, 可以生成深度图, 其中每个像素的值代表场景点的深度信息。进一步, 可以将深度图转换为点云, 为三维重建提供数据。多目视觉技术还涉及到多视图几何原理, 这包括理解和处理从多个视角观察同一场景时的几何关系。在多摄像头系统中, 可能需要将来自不同摄像头的的数据融合在一起, 以获得更完整的场景表示。

3.2 应用案例

Wanek 等^[34]开发了一种全自动的海浪观测系统, 即三目立体摄影海浪观测系统 (ATSIS), 该系统能够

对 10 m^2 的观测区域进行海浪特性分析,并将测量精度提升至 1 mm 级别。2011年,Bechle等^[35]也对 ATSYS 摄影系统进行了研究。区别于其他摄影系统,ATSYS 创新性地采用 3 个同步运作的相机,以“品”字形布局构建了影像采集系统。此设计能够显著提高测量的精度,达到 1 mm 。结果表明 该系统能够精准捕捉海浪运动、海面微尺度波和波浪破碎的动态过程。为了规避 DLT 理论中对于海面控制点的依赖,ATSYS 采用一种独特的标定手段,将相机安装在一个特制的支架上,并在实验过程中记录支架的朝向,实验结束后,将相机和支架一起带回实验室。通过记录的支架朝向,能够在实验室环境中模拟测量场景,从而精确标定外方位元素。然而,ATSYS 的定标过程较为复杂,且支架的使用也限制了测量面积,仅有 10 m^2 量级。

此外,蔡政翰等^[36]也采用与 Wanek 类似的方法,进行了立体摄影的相关研究,准确地重建了海浪轮廓。他的系统同样采用 3 个同步相机,以“品”字形布局来构建影像采集系统,其不同之处在于蔡政翰通过在水下打桩来获取控制点的精确坐标。显然,这种定标方法在实际的测量过程中也相当复杂,且极大限制了立体摄影系统的应用范围和测量面积,其测量区域也只有 10 m^2 量级。

多目视觉技术通过使用多个摄像头捕捉场景,提供了比单目或双目系统更为精确的深度感知和立体匹配能力,特别适合于需要广阔视角和高鲁棒性的应用场合。其优势包括深度感知增强、立体匹配改善、视角覆盖更广、遮挡处理更好、鲁棒性提高、动态范围优化和支持多目标追踪。然而,多目视觉系统也存在一些缺点,如成本增加、计算复杂性提高、同步要求严格、数据融合挑战、空间和质量限制、校准和维护需求以及能源消耗增加。

综上所述,单目视觉系统通过单个摄像头捕捉二维图像,依靠算法推断深度信息,适用于成本敏感且对深度感知要求不高的场景。双目视觉系统受人类视觉机制启发,通过模拟人的双眼,采用 2 个摄像头从不同视角捕获图像,利用这些图像进行视差计算,获取深度信息,适用于需要精确三维空间感知的领域。多目视觉系统则通过多个摄像头覆盖不同视野和深度,提供更宽广的视野和更丰富的深度信息,适用于对环境感知要求极高的复杂场景。然而,多目系统在成本、安装校准和数据处理方面也更为复杂,在选择视觉技术时,需根据应用需求、预算和预期精度综合考虑。3 种视觉技术的对比见表 1。

4 图像处理算法

目前视觉测波技术主要包括图像采集、相机标定、特征提取、立体匹配与三维重建等方面^[37]。随着人工智能技术的发展,各种智能算法广泛地应用于图

表 1 单目、双目、多目视觉技术对比
Tab.1 Comparison of monocular, binocular and multiocular vision technologies

视觉技术类别	优点	不足
单目	操作简单;成本较低;适用范围广;复杂度较低	易受光照条件、噪声、纹理特征等因素影响
双目	技术成熟;重建效果较好	设备价格高;重建运算量大
多目	重建精度高;鲁棒性强	重建运算量大;复杂场景下重建较为局限

像处理中,进而推动视觉测波技术的进一步完善。

4.1 角点检测算法

常用的角点检测方法主要包括 Moravec 检测算法、Harris 检测算法和 SIFT 算法等。其中 Moravec 检测算法原理简单,运算量小,但是对噪声和斜边较敏感,可能检测到很多不属于角点的角点。为了克服 Moravec 角点检测算法存在的缺陷,Borgefors^[38]提出了 Harris 角点检测算法,该算法能够对像素点在各个方向上的灰度变化特征进行更全面的计算分析,这使得 Harris 算子应用场景更为广泛,提取精度也更高。

在进行角点检测时,通常用窗口在图像上进行遍历滑动,在滑动的过程中监测窗口区域内像素灰度值的变化情况。若灰度值变化幅度超过阈值,就可判定该像素位置为一个角点,窗口在角点附近移动时的场景如图 5 所示^[39]。这种方法通过评估灰度的波动范围来识别潜在的角点,是一种基于局部图像特性的检测手段。

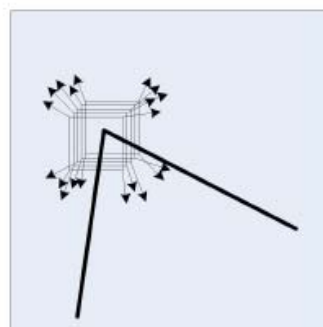


图 5 窗口在角点附近移动的场景
Fig.5 Scene of window moving around the corner

由于 Harris 角点检测算法不具有尺度不变性,而 SIFT 算法在不同尺度空间中均能对图片进行角点检测,展现出更高的适应性和准确性。孙为锦^[39]提出了一种算法,该算法融合了 Harris 角点检测算法和 SIFT 算法的优势,对每一层尺度空间中的图像都使用 Harris 角点检测算法来检测角点,保留所有检测出的角点,再筛选出在每一层尺度空间相同位置均存在的点,作为最终的尺度不变角点。采用改进后的算法所得到的角点如图 6 所示。

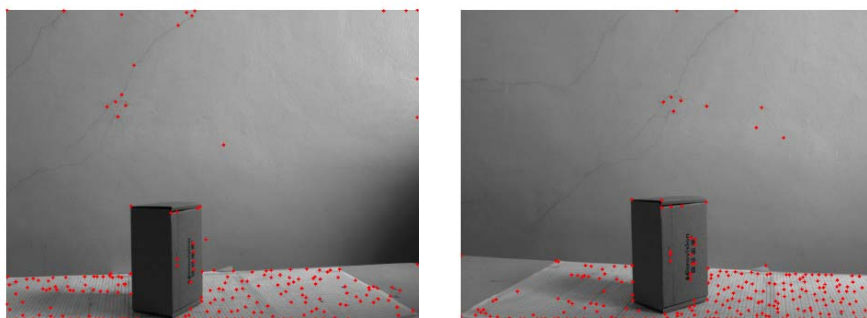


图 6 结合算法所得角点

Fig.6 Corner plot obtained by the combined algorithm

4.2 图像识别算法

在计算机中, 图像以数值矩阵的形式存在, 对矩阵进行不同的数学运算, 就可以产生不同的图像处理效果^[40]。要将实际图像转化为计算机能够处理的数字信号, 首先需要在相机坐标系下, 通过图像与相机底片的映射关系, 确定摄像机坐标系与图像坐标系之间的转换关系, 而后进一步建立图像坐标系与像素坐标系的对应关系^[41]。

图像识别技术用于提取波面信息的原理概述如下^[42]: 摄像机连续拍摄波浪水槽的壁面及其表面波浪, 进行图像畸变校正、灰度处理、滤波与增强等图像处理步骤, 随后运用阈值分割技术从图像中提取波面水位值, 计算波高。通过图像标定过程能够求得相机校正参数, 对图像进行畸变校正, 确保空间波面的真实还原, 校正前后对比效果如图 7 所示^[42]。

相机采集到的图像一般为彩色图像, 包含的信息较为复杂, 直接处理会引入大量不必要的计算, 为了

提高处理效率, 可对彩色图像进行灰度化处理。灰度图像的每个像素点仅包含 1 个通道, 处理后的每张图像所需计算量能够显著降低近 60%^[43]。常用的图像灰度化算法有最大值法、分量灰度法、加权平均法等。

图像采集过程中, 由于水体中存在杂质、光照等环境条件变化, 所获取的图像往往含有一定的噪声, 因此在对图像进行深入处理前, 可对图像采用平滑滤波技术进行预处理, 如图 9 所示。常用的滤波方法有图像均值滤波、图像中值滤波及图像高斯滤波等。

4.3 特征匹配算法

为缩小搜索范围, 降低匹配时间, 尹凤鸣^[44]对 SIFT 匹配算法进行了优化, 引入双向匹配策略来降低误匹配率, 并利用极线约束来简化匹配过程, 传统的 SIFT 匹配结果如图 10 所示, 匹配对较少, 而优化后的匹配结果如图 11 所示, 匹配效果更好。根据立体匹配的唯一性原理, 匹配基元之间存在一一对应的关系。匹配过程中, 先将左图作为基准图像, 右图作



图 7 畸变校正前后的图像

Fig.7 Images before and after distortion correction

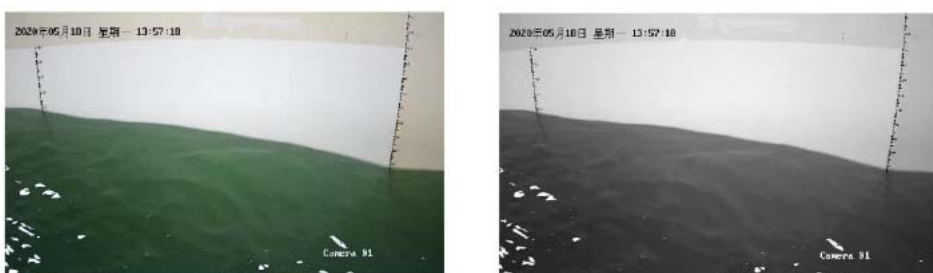


图 8 彩色 RGB 图像及灰度图像

Fig.8 Colorful RGB image and grayscale image

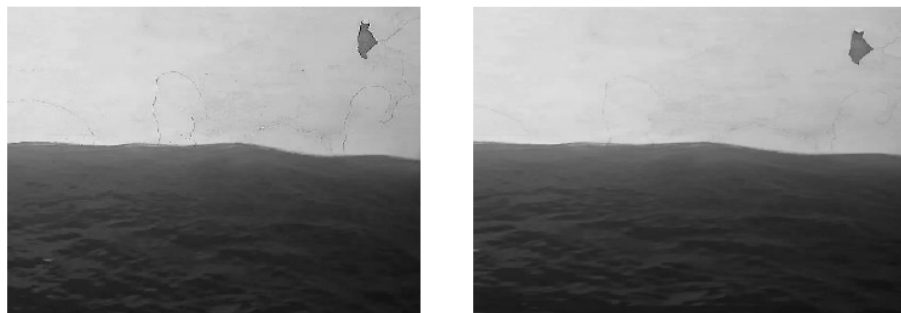


图9 原灰度图及滤波后的灰度图
Fig.9 Original gray image and filtered gray image

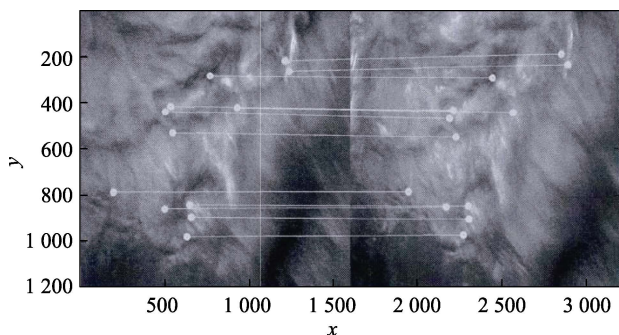


图10 传统 SIFT 匹配结果
Fig.10 Traditional SIFT matching result

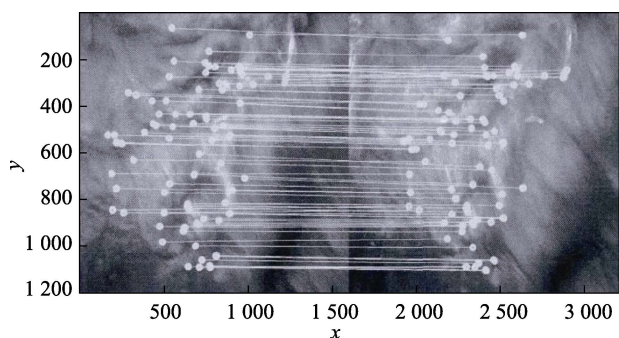


图11 改进算法匹配结果
Fig.11 Improved algorithm matching result

为待匹配图像,进行从左到右的 SIFT 匹配,得到匹配对 (p_1, p_2) ,左图的 p_1 对应右图的特征点 p_2 。接着交换基准图像与待匹配图,即进行从右到左的 SIFT 匹配,右图的 p_2 对应左图的特征点 p_1' ,如果 p_1' 与初始的 p_1 点一致,则保留该匹配对,否则将其剔除。这种双向匹配策略能够有效剔除误匹配点,而极线约束的应用则进一步缩小匹配搜索范围,将原本需要在整个二维图像中进行的搜索过程简化为在一维直线上进行,提高了匹配效率。

5 智能优化算法

在波浪监测领域,智能优化算法的应用日益广泛,这些算法通过模拟自然界的优化过程来解决复杂的工

程问题,其中基于神经网络的深度学习算法应用最为广泛。卷积神经网络(CNN)通过模拟人类视觉系统的工作原理,能够自动和逐层地从数据中提取特征,主要用于处理具有网格结构的数据,在图像识别、图像分割等领域应用广泛。卷积神经网络主要由卷积层和池化层组成,卷积操作的输出直接作为池化层的输入数据,而经过池化处理后的结果则作为下一轮卷积操作的输入,如图12所示^[45]。这样的结构设计使得网络能够有效地提取并抽象图像特征。

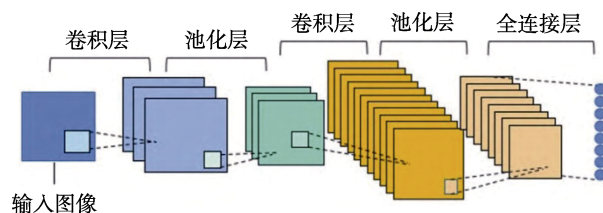


图12 卷积神经网络基本结构
Fig.12 Basic structure of CNN

基于神经网络的深度学习算法在波浪反演领域已应用,验证了其有效性。自编码器是一种无监督学习的人工神经网络,包含编码器和解码器2个主要部分,编码器将输入数据压缩为低维表示,解码器则从这个低维表示中重构原始数据。在数据的降维、特征提取和数据重构等领域,自编码器模型都展现出其应用前景。马子炜等^[45]提出了一种基于卷积自编码器的深度学习方法,实现了对X波段波浪图像的有效反演,能够生成二维实时波浪场,该方法在处理含有噪声干扰或部分区域被遮挡的图像时,也展现出了良好的恢复能力。人工神经网络能够以任何精度逼近任意连续的非线性函数,这一特性使其面对复杂不确定问题时,表现出自适应与学习能力上的优势^[46]。秦艺超等^[47]研究了基于人工神经网络(ANN)的自航浮标测波方法的可行性。该方法利用人工神经网络提取船舶的运动特征,随后将特征信息输入至线性函数,进行波面时历的反演过程,为从船舶运动中反演出海浪时域信息提供了一种有效可行的手段。叶静娴等^[48]开发了一种随机波浪荷载反演技术,该技术建立在逐步优

化算法的基础上, 通过 Newmark- β 法对结构响应进行离散化处理, 并在每对连续的时间点之间构建目标函数。以加速度历程作为输入数据, 能够逐步确定多个时间点上的波浪荷载, 并且具有较强的抗噪能力。

此外, 深度学习算法在波浪预测等领域也有了广泛的应用。长短期记忆 (LSTM) 神经网络作为循环神经网络 (RNN) 的一种改进形式, 能够有效应对传统 RNN 中存在的梯度爆炸与消失难题^[49]。在此基础上, 尚凡成等^[50]提出了一种改进的 LSTM 神经网络架构, 用于极短期波浪时序预报。该模型通过融合频域领域先验知识, 增强了神经网络对频谱特性的捕捉能力, 成功实现了时域、频域信息耦合预报。张杰等^[51]将深度学习算法引入海洋模式过程, 基于深度学习方法预报波浪的有效波高, 并在算法中耦合空间性和时间性特征, 中长期 (3 a) 预报的误差降低 70% 以上, 计算效率比常规数值模式提高了 60%, 表明 CNN-LSTM 模型在波浪预警报及极值波高捕获上具有极大的应用潜力, 且能够极大节省计算资源。

智能优化算法在波浪监测领域的应用显著提升了波浪数据的采集、处理和预测的准确性与效率。通过模拟自然现象或社会行为, 这些算法能够处理复杂的波浪数据, 并优化波浪监测系统的设计。此外, 它们还能增强波浪预测模型的精度, 为海洋工程和环境监测提供更可靠的科学依据, 已成为推动海洋波浪监测技术发展的关键因素。

6 结语

智能算法及技术的应用, 不仅能够提高波浪监测系统的测量精度, 还能增强系统的数据处理能力。智能算法能够通过学习大量的海洋波浪数据, 识别出模式和规律。例如, 深度学习模型能够从复杂的图像中提取出关键的波浪特征, 实现更准确的波高、波长和波速测量。海洋波浪监测系统产生的数据量通常非常巨大, 而智能算法可以高效地处理这些数据, 识别出有用的信息, 滤除噪声, 从而提高数据的可用性和监测系统的整体性能。

同时, 智能算法技术还可以使波浪监测系统更加灵活和自适应。系统能够根据实时数据和环境变化自动调整监测参数, 优化监测策略, 以适应不同的海洋环境和监测需求, 为海上作业提供及时的波浪信息。此外, 机器学习模型能够基于历史数据预测未来的波浪状况, 为海上活动提供预警。自动化和智能化的监测系统减少了对人工操作的依赖, 从而降低了人力成本, 减少数据处理时间, 提高监测效率。海洋环境复杂多变, 智能算法还能够处理极端天气和复杂光照条件下的监测任务, 确保在各种环境下都能获得可靠的数据。

人工智能的发展将推动视觉测波技术向更高效、更精确、更可靠的方向进步, 为海洋科学研究和海洋工程提供强有力的技术支持。人工智能在视觉测波领域的应用前景广阔, 深度学习技术, 尤其是卷积神经网络, 在图像处理中的应用广泛, 未来视觉测波技术也将与其进一步结合。通过训练数据集, 深度学习智能算法能够在波浪监测中提供更为准确的结果, 但往往会降低效率。为使视觉测波技术更适用于实际应用场景, 其智能算法还有待进一步优化, 以降低算法复杂度, 提高处理速度, 使效率和精确度都达到高要求。

目前的立体匹配算法仍然比较复杂, 往往需要选取大量特征点来获得较好的匹配效果, 而这大大增加了工作量, 使匹配过程变得复杂, 随着智能算法的进一步优化, 将发展出新的匹配算法, 能够用较少的特征点完成对图片的匹配, 缩短运算时间, 改进匹配过程。

人工智能技术的飞速发展, 也为视觉测波技术指明了智能化的方向, 未来的视觉测波系统将实现自动化, 更为自主地进行复杂图像处理和决策, 不仅能够提高数据处理效率, 还降低了人为错误的可能。自动化系统能够长时间不间断地对海浪进行监测, 并在判断异常时及时发出警报。

参考文献:

- [1] 齐勇, 闫星魁, 郑姗姗, 等. 海浪监测技术与设备概述[J]. 气象水文海洋仪器, 2015, 32(3): 113-117.
QI Y, YAN X K, ZHENG S S, et al. Glance of Wave Monitoring Technology and Equipment[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2015, 32(3): 113-117.
- [2] 周庆伟, 张松, 武贺, 等. 海洋波浪观测技术综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 39-44.
ZHOU Q W, ZHANG S, WU H, et al. Reviews of Observation Technology for Ocean Waves[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(2): 39-44.
- [3] 王静, 唐军武, 张锁平. 雷达技术在海洋观测系统中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 59-64.
WANG J, TANG J W, ZHANG S P. Application of Radar Technique in Ocean Observation System[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2012, 29(2): 59-64.
- [4] 王静, 唐军武, 冯林强, 等. 海上固定平台雷达测波技术及典型数据处理算法[J]. 海洋技术, 2012, 31(2): 49-53.
WANG J, TANG J W, FENG L Q, et al. Wave Observation with Radar Technique on Offshore Platform and Classic Data Processing Algorithms[J]. Ocean Technology, 2012, 31(2): 49-53.

- [5] BENDAT J S, PERSOL A G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] 左其华. 现场波浪观测技术发展和应用[J]. 海洋工程, 2008, 26(2): 124-139.
ZUO Q H. Advances and Applications of Ocean Wave Measurement Technology[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(2): 124-139.
- [7] SHEMDIN O H, TRAN H M, WU S C. Directional Measurement of Short Ocean Waves with Stereophotography[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1988, 93(C11): 13891-13901.
- [8] BANNER M L, JONES I S F, TRINDER J C. Wavenumber Spectra of Short Gravity Waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 198: 321.
- [9] SANTEL F, LINDER W, HEIPKE C. Stereoscopic 3D-Image Sequence Analysis of Sea Surfaces[C]// Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium. [s. l.]: ISPRS, 2013
- [10] 王兆庆, 牛朝一, 余维, 等. 基于被动视觉的三维重建技术研究进展[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56(5): 13-19.
WANG Z Q, NIU Z Y, SHE W, et al. Progress of Study on 3D Reconstruction Technology Based on Passive Vision[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2024, 56(5): 13-19.
- [11] 宋乐, 路斯莹, 侯宇鹏. 单目三维视觉测量技术研究进展[J]. 传感技术学报, 2024, 37(3): 365-380.
SONG L, LU S Y, HOU Y P. Review of Monocular 3D Vision Measurement Technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(3): 365-380.
- [12] 佟帅, 徐晓刚, 易成涛, 等. 基于视觉的三维重建技术综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2411-2417.
TONG S, XU X G, YI C T, et al. Overview on Vision-Based 3D Reconstruction[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(7): 2411-2417.
- [13] LONGUET-HIGGINS H C. A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections[J]. 1987: 61-62.
- [14] WOODHAM R J. Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images[J]. 1989: 513-531.
- [15] WARREN P A, MAMASSIAN P. Recovery of Surface Pose from Texture Orientation Statistics under Perspective Projection[J]. Biological Cybernetics, 2010, 103(3): 199-212.
- [16] 张发枝, 何佳洲, 胡剑秋, 等. 基于单目视觉的无人艇海面目标实时测距方法[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(13): 126-131.
ZHANG F Z, HE J Z, HU J Q, et al. A Real-Time Ranging Method for USV Sea Surface Targets Based on Monocular Vision[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(13): 126-131.
- [17] 倪文军, 王晨. 基于单目视觉的波高检测方法研究[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 591-595.
NI W J, WANG C. Research on a Method of Detecting Wave Height Based on Monocular Vision[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(6): 591-595.
- [18] 刘梦佳. 基于单目视觉的无人艇水面目标检测与动态避障方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 18-20.
LIU M J. Research on Detection and Dynamic Obstacle Avoidance Method of Unmanned Boat Surface Target Based on Monocular Vision[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019: 18-20.
- [19] 徐德. 单目视觉伺服研究综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(10): 1729-1746.
XU D. A Tutorial for Monocular Visual Servoing[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(10): 1729-1746.
- [20] 何红坤, 王宁, 张富宇, 等. 水面无人艇单目视觉伺服自主控制研究综述[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 15-28.
HE H K, WANG N, ZHANG F Y, et al. Review of Research on Monocular Visual Servo-Based Autonomous Control of Unmanned Surface Vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 15-28.
- [21] 汪永号. 基于双目视觉的波面测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
WANG Y H. Research on Wavefront Measurement Based on Binocular Vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [22] 王英霞. 岸基数字摄影海浪三维观测技术及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
WANG Y X. Research on Three-Dimensional Observation Technology and Application of Shore-Based Digital Photography Wave[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [23] 王爱民, 赵忠旭, 沈兰荪. 基于矢量 Prewitt 算子的多尺度彩色图象边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(12): 1024-1028.
WANG A M, ZHAO Z X, SHEN L S. Multi Scale Color Edge Detection Based on Vector Order Prewitt Operators[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(12): 1024-1028.
- [24] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—A New Approach to Low Level Image Processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [25] 乔金鹤. 基于双目立体视觉的水下三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
QIAO J H. Research on Underwater 3D Reconstruction Technology Based on Binocular Stereo Vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [26] 郑坤, 姜文正, 卢晓, 等. 基于双目立体视觉的海浪波面三维重建技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2392-2396.
ZHENG K, JIANG W Z, LU X, et al. Three-Dimensional Reconstruction of Wave Surface Based on Binocu-

- lar Stereo Vision[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2392-2396.
- [27] BENETAZZO A. Measurements of Short Water Waves Using Stereo Matched Image Sequences[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(12): 1013-1032.
- [28] DE VRIES S, HILL D, DE SCHIPPER M, et al. Using Stereo Photogrammetry to Measure Coastal Waves[J]. Journal of Coastal Research, 2009: 1484-1488.
- [29] 姜文正, 袁业立, 王英霞. 无海面控制点的立体摄影海浪测量方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 533-540.
- JIANG W Z, YUAN Y L, WANG Y X. Study on Stereo Photography for Ocean Wave Measurements in no Sea Control Points[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 533-540.
- [30] 严蕾. 基于三维图像测量技术的远距离海浪测量[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- YAN L. Long-Distance Ocean Wave Measurement Based on Three-Dimensional Image Measurement Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [31] SUN H Y, WU G Q, WANG X L, et al. Research on a Measurement Method for the Ocean Wave Field Based on Stereo Vision[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7447.
- [32] 翟凯玥. 三目视觉测量系统标定技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- ZHAI K Y. Research on Calibration Technology of Three-Eye Vision Measurement System[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [33] 李广豪. 基于三目视觉的水下目标三维重建[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- LI G H. Three-Dimensional Reconstruction of Underwater Target Based on Binocular Vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [34] WANEK J M, WU C H. Automated Trinocular Stereo Imaging System for Three-Dimensional Surface Wave Measurements[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(5/6): 723-747.
- [35] BECHLE A J, WU C H. Virtual Wave Gauges Based Upon Stereo Imaging for Measuring Surface Wave Characteristics[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(4): 305-316.
- [36] 蔡政翰, 董东巧, 周于洋, 等. 立体海况摄影技术研巧与开发[C]// 台湾中央气象局 2010 天气分析与预巧研讨会. 台湾: [出版者不详], 2010.
- CAI Z H, DONG D Q, ZHOU Y Y, et al. Research and Development of 3D Sea Condition Photography Technology[C]// Proceedings of 2010 Weather Analysis and Forecasting Symposium of the Central Weather Bureau. Taiwan: [s.n.], 2010.
- [37] 高宏伟. 计算机双目立体视觉[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- GAO H W. Computer Based Binocular Vision[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [38] BORGEFORS G. Hierarchical Chamfer Matching: A Parametric Edge Matching Algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(6): 849-865.
- [39] 孙为锦. 基于双目视觉波浪等高线测量的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- SUN W J. Research on Wave Contour Measurement Based on Binocular Vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [40] ITAMI F, YAMAZAKI T. A Simple Calibration Procedure for a 2D LiDAR with Respect to a Camera[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7553-7564.
- [41] JUAREZ-SALAZAR R, ZHENG J, DIAZ-RAMIREZ V H. Distorted Pinhole Camera Modeling and Calibration[J]. Applied Optics, 2020, 59(36): 11310-11318.
- [42] 王家伟. 基于图像识别的波面测量及空间特性研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021: 39-41.
- WANG J W. Wavefront Measurement and Spatial Characteristics Research Based on Image Recognition[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2021: 39-41.
- [43] 陈显, 陈兵. 灰度图像对比度提高方法及其评价[J]. 数字通信世界, 2018(10): 225-226.
- CHEN X, CHEN B. Methods and Evaluation of Improving Contrast of Gray Image[J]. Digital Communication World, 2018(10): 225-226.
- [44] 尹凤鸣. 立体匹配技术在波浪摄影测量中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- YIN F M. Research on the Application of Stereo Matching Technology in Wave Photogrammetry[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [45] 马子伟, 郭孝先, 卢文月, 等. 基于深度学习自编码器的 X 波段雷达二维波浪场实时重构方法研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2024, 39(3): 414-424.
- MA Z W, GUO X X, LU W Y, et al. Real-time Reconstruction of Two-dimensional Wave Field of X-band Radar Based on Deep Learning Autoencoder [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39(3): 414-424.
- [46] 陈雨虹. 基于神经网络的三自由度直升机智能控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- CHEN Y H. Research on Intelligent Control Method of Three-Degree-of-Freedom Helicopter Based on Neural Network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [47] 秦艺超, 黄礼敏, 王骁, 等. 基于人工神经网络的自航浮标测波方法可行性[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 498-505.
- QIN Y C, HUANG L M, WANG X, et al. Feasibility of Wave Measurement by Using a Sailing Buoy and the Artificial Neural Network Technique[J]. Journal of

- Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(4): 498-505.
- [48] 叶静娴, 吕中荣, 汪利. 基于逐步优化算法的随机波浪荷载反演[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(5): 33-38.
- YE J X, LYU Z R, WANG L. Random Wave Load Inversion Based on Recursive Optimization Algorithm[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2019, 58(5): 33-38.
- [49] 邱锡鹏. 神经网络与深度学习[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 129-145, 180-186.
- QIU X P. Neural Networks and Deep Learning[M]. Beijing: China Machine Press, 2020: 129-145, 180-186.
- [50] 尚凡成, 李传庆, 詹可, 等. 改进 LSTM 神经网络在极短期波浪时序预报中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(6): 659-665.
- SHANG F C, LI C Q, ZHAN K, et al. Application of Improved LSTM Neural Network in Time-Series Prediction of Extreme Short-Term Wave[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(6): 659-665.
- [51] ZHANG J, LUO F, QUAN X F, et al. Improving Wave Height Prediction Accuracy with Deep Learning[J]. Ocean Modelling, 2024, 188: 102312.