第 40 卷 第 1 期 实 验 流 体 力 学 Vol. 40, No. 1
2026 年 2 月 Journal of Experiments in Fluid Mechanics Feb., 2026

文章编号：1672-9897(2026)01-0001-09 doi: 10.11729/syltlx20240084

基于多目立体视觉的船行波自由表面测量方法研究

韩雨坤[1, 2]，潘翀[1, 2]，刘伟[3]，王文涛[3, *]

1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191 2. 天目山实验室，杭州 311115
3. 中国船舶科学研究中心，无锡 214000

摘要：船舶在水中航行时会在船体周围产生复杂的波浪结构，其形态直接影响船舶的兴波阻力，是船体性能优化和型线设计中需要重点考虑的物理参量。传统测量方法（如接触式浪高仪和其他单点测量设备）虽然能够提供波高数据，但由于测量点位少、空间分辨率低，且可能干扰波面形态，难以满足复杂波系的全场测量需求。为此，本文提出了一种基于多目立体视觉的非接触式船行波自由表面测量方法。该方法结合激光投射技术和多目相机系统，利用神经网络进行空间标定，通过蚁群粒子跟踪匹配算法实现激光标志点匹配，并应用主成分分析进行静水基准面校正。最终，通过视场拼接技术获取了大视域、高精度的船行波自由表面三维点云数据。实验结果表明，该方法能够有效捕捉不同航速下船行波的典型波系特征。与传统浪高仪测量相比，立体视觉方法在保证波高测量精度的同时，还具备对大范围动态波场进行瞬时测量的能力，具有更高的测量灵活性和更好的复杂场景适应性。

关键词：船行波；非接触测量；多目立体视觉；三维点云重构；蚁群粒子跟踪匹配算法

中图分类号：U661.1；V211.7 **文献标识码：**A

A multi-view stereo vision approach for the free surface measurement of ship-induced waves

HAN Yukun[1, 2], PAN Chong[1, 2], LIU Wei[3], WANG Wentao[3, *]

1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
2. Tianmushan Laboratory, Hangzhou 311115, China
3. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, China

Abstract: The complex wave structures generated by a ship significantly influence the wave-making resistance, which is a critical factor in optimizing vessel performance and hull design. Traditional measurement methods, such as wave height gauges, are limited by sparse measurement points, low spatial resolution, and potential interference with the wave surface, making them unsuitable for full-field wave surface measurements in complex wave systems. To address these limitations, a non-contact measurement method for ship wave surfaces based on multi-view stereoscopic vision is presented. The proposed scheme includes: applying neural networks for spatial calibration and the three-dimensional reconstruction of feature points, using an ant colony optimization particle tracking algorithm for perspective matching, and conducting principal component analysis for still water baseline correction. Experimental results demonstrate that the proposed method can realize the wide-area free-surface measurement of the ship wave and effectively capture typical wave characteristics at various ship speeds. Compared to

收稿日期：2024-11-19；**修回日期**：2025-01-25；**录用日期**：2025-02-05

基金项目：国家自然科学基金项目（61935008，12225202）；工信部高技术船舶科研计划项目“基准船型多工况精细流场测试技术研究”；水动力学全国重点实验室开放课题资助项目

* 通信作者 E-mail: wangwentao@cssrc.com.cn

引用格式：韩雨坤, 潘翀, 刘伟, 等. 基于多目立体视觉的船行波自由表面测量方法研究 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 1-9.
HAN Y K, PAN C, LIU W, et al. A multi-view stereo vision approach for the free surface measurement of ship-induced waves[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 1-9.

traditional measurement, the stereoscopic vision approach offers enhanced flexibility and suitability for real-time measurement of dynamic wave fields over large areas.

Keywords: ship-induced wave; non-contact measurement; multi-view stereo vision; 3D point cloud reconstruction; ant colony optimization particle tracking algorithm

0 引 言

船舶在水中航行时产生的兴波阻力是其总阻力的重要组成部分，直接影响船体的航行性能与能耗[1-2]。为有效评估兴波阻力，通常需要在拖曳水池中测量船模在不同航速下的兴波波形，从而为船型设计和优化提供重要的参考依据和诊断数据[3-5]。

早期的船行波测量方法主要依赖接触式浪高仪等设备，这类设备通过电容、电阻或压力式传感器等方式获取波形数据[6-7]。然而，接触式方法存在诸多局限：首先，单点测量成本较高，且无法提供高空间分辨率的波形信息；其次，传感器易受温度、湿度、盐分等环境因素的干扰，测量误差较大；此外，浪高仪的接触特性也会对波面形状产生干扰，进而降低测量准确性[8]。为克服这些问题，非接触式浪高仪测量技术应运而生，并逐渐成为船行波测量的重要工具，典型设备包括声学测波仪、激光雷达等[9-10]。但与接触式方法类似，这类非接触技术通常也仅能实现单点或线状测量，空间分辨率依然有限，难以全面捕获波面的大范围动态特性。此外，当多个测点布置过于密集时，超声波浪高仪等设备可能会受到多路径反射的干扰，导致局部测点数据缺失或测量误差增大，从而进一步影响整体测量精度[11]。

近年来，随着计算机视觉技术的快速发展，多目立体视觉技术逐渐被应用于波浪测量领域[12-14]。该技术通过多台摄像机从不同视角同步拍摄船体或船模航行时的波浪，获取多视角图像数据，再经特征提取和视角间匹配，结合空间标定与三维重构算法，最终可重建船行波自由表面的三维点云。与传统浪高仪相比，多目立体视觉技术具有显著优势：避免了接触式测量带来的干扰，可以捕捉大视野内的波浪高度、方向和波形信息；能够借助同步拍摄的图像序列，实现对船行波自由表面的动态观测，从而弥补传统非接触方法在全场测量与空间分辨率上的不足。

De Vries 等[15] 应用双目立体视觉技术，分别在实验室环境和自然环境中对中等面积（约 50 m^2）和较大面积（103～104 m^2）的波浪表面进行了测量。研究结果表明，该技术的测量精度与传统压力传感器及浮标数据相当。然而，该技术依赖的原始波浪图像特征提取方法对水面纹理和光照条件要求较高。Gomit 等[16] 则采用了激光装置向水波表面投射激光，发展了一种用于自由表面测量的光学方法并将其应用于大型拖曳水池中，成功获取了船模周围的自由表面波场。尽管该方法有效减少了背景光干扰，但激光束的激发频率也限制了其时间分辨率以及波高方向的空间分辨率。

总的来说，虽然多目立体视觉技术已在工业领域广泛应用，但其在波浪测量，尤其是船行波测量领域的应用仍处于起步阶段。这主要源于船行波测量面临的特殊挑战：首先，水介质的折射和反射特性较为复杂；其次，由于摄像机相对位置、角度以及光照条件存在差异，不同视角下的波面成像可能出现较大差别，增大了特征提取和匹配的难度。这些因素均在不同程度上影响了波面的三维重建效果[17]。因此，将多目立体视觉技术应用于波浪测量时，如何提升特征提取与立体匹配算法的鲁棒性和精度，仍是亟待解决的问题。

针对上述难题，本文发展了一种基于多目立体视觉的船行波自由表面测量方法。其核心思路包括：1）通过激光器搭配衍射光学元件向船行波自由表面投射激光点阵，以抑制杂光干扰，为立体匹配和三维重构提供稳定特征点；2）使用多组三目相机系统同步采集多视角激光点阵图像，并借助全连接神经网络实现多目空间标定，以提高特征点匹配的准确度和测量精度；3）应用蚁群粒子跟踪匹配算法实现多视角特征点的稳健匹配，从而提升测量的空间分辨率；4）基于主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）完成静水基准面校正，并利用视场拼接技术，最终获取大视域范围内的船行波自由表面三维点云数据。

1 测量方法

多目立体视觉技术的核心在于通过多个相机从不同视角同步捕捉同一场景，并利用图像处理与计算机视觉算法重建场景的三维信息。该技术包含相机空间标定、图像特征提取、视角匹配和三维重构等

多个关键步骤。本文提出的船行波自由表面测量方法的技术流程如图 1 所示。本文相关测量算法建立在本团队此前工作的基础上，详细内容参见文献 [18]，此处仅给出算法的框架和流程。

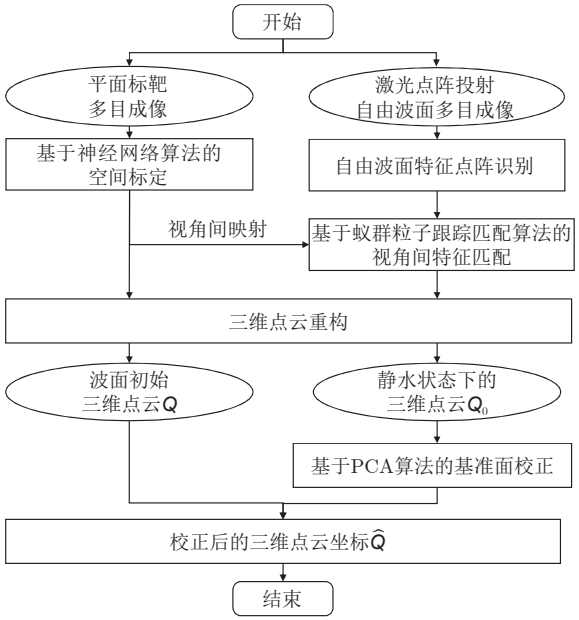
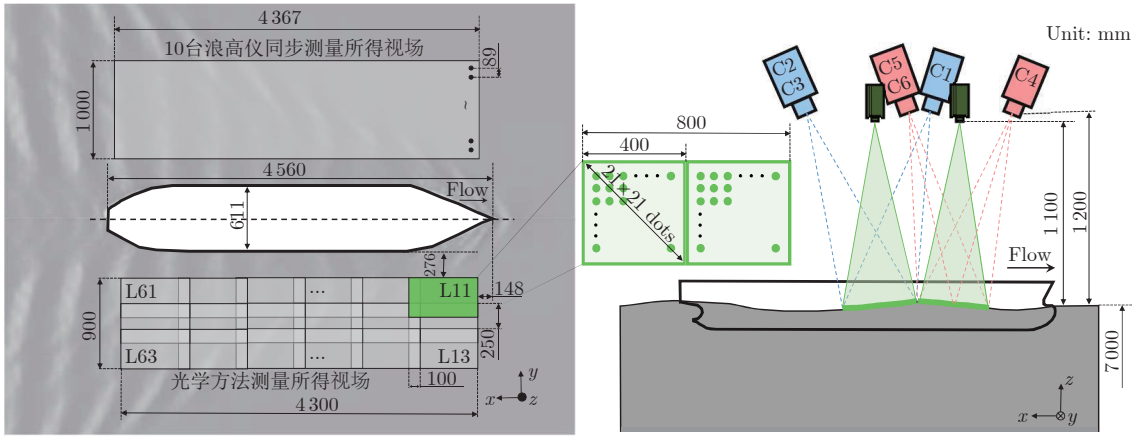


图 1　基于多目立体视觉的船行波自由表面测量流程图

Fig. 1　Flowchart of multi-view stereo vision-based free surface measurement of ship waves



（a）俯视图　　（b）侧视图

图 2　基于多目立体视觉的船行波自由表面测量装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the free-surface measurement device for ship wave based on multi-view stereo vision

1.1　多目测量系统

如图 2 所示，本文提出的船行波自由表面测量系统基于多目立体视觉技术，由 2 组配置相同的三目视觉系统组成。每个子系统包含 3 台相机（分别对应于图 2（b）中的相机组 C1、C2、C3 与相机组 C4、C5、C6），相机位于等腰三角形的 3 个顶点，激光器则位于三角形中心，其光轴沿深度方向（z 方向）垂直于静水面。2 组三目视觉系统分别拍摄沿船体轴向（x 方向）并列排布的 2 个矩形测量区域（见图 2 绿色激光点阵放大示意图），单次测量的视场约为 800 mm × 400 mm，如图 2（a）中 L11 区域所示。实验时，整个多目视觉系统固定在随船移动的拖车上，以确保与船体同步。通过使系统沿船体轴向（x 方向）和垂直轴向（y 方向）移动，可实现对船体周围更大范围自由波面的测量。

为验证多目测量系统的性能，实验同时采用传统浪高仪进行测量。10 台浪高仪沿 y 方向等间距布置，用于同步采集波高数据。每台浪高仪记录该位置的波高时间序列，再利用波速关系将时序数据转换为空间波形，从而得到经时间冻结的波面形态，用以与多目立体视觉系统获取的三维波高信息进行对比，验证该非接触测量方法的精度和可靠性。

1.2　神经网络空间标定

空间标定是计算机视觉和光学测量中的关键步骤，旨在建立三维物理空间与二维像平面之间的映射关系。对于立体视觉测量系统，标定精度直接影响三维重构结果的准确性。传统空间标定算法通常基于小孔成像模型或多项式模型，当存在复杂光学畸变和噪声干扰时，这些方法在多目视觉系统中的表现并不总能令人满意[19]。

近年来，神经网络技术为空间标定提供了新的解决途径。其优势在于能够通过神经网络隐含地建立光学投影关系，对光学畸变和噪声具有更强的鲁棒性，并能适应不同光学条件，在多相机联合标定方面通常优于传统方法[20]。

本文采用级联误差反向传播神经网络（Back

Propagation Neural Network, BP-NN)构建空间标定模型，具体方法如下。首先，在实验场景中精确布置棋盘格标定靶，获取每个目标点(棋盘格角点)的三维空间坐标$\boldsymbol{P}=[x,y,z]$；通过图像采集与角点提取，得到其在各相机像平面上对应的像素坐标$\boldsymbol{\zeta}_k=[u_k,v_k]$(其中$k=1, 2, 3$，分别对应于三目视觉系统中的不同相机)。这些数据构成训练数据集$\{\boldsymbol{P},\boldsymbol{\zeta}_k\}_{\text{train}}$，用于训练标定神经网络$NN_{3\text{D}}$，使得：

$$\boldsymbol{P}=NN_{3\text{D}}(\boldsymbol{\zeta}_1,\boldsymbol{\zeta}_2,\boldsymbol{\zeta}_3) \tag{1}$$

在三维重构阶段，若能获得水波表面某激光点在多目相机像平面上的像素坐标，代入式(1)即可得到该点在物理空间的三维坐标。

为匹配不同视角的特征点，本文选取相机C1作为参考相机，并采用结构类似的神经网络建立其他相机像平面到C1像平面的映射关系$NN_{k\to1}$(其中$k=2, 3$)。该映射可将其他视角的特征点像素坐标投影至统一的参考像平面，从而初步消除因视角不同导致的特征点分布差异。该映射关系可表示为：

$$\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1}=NN_{k\to1}(\boldsymbol{\zeta}_k,z) \tag{2}$$

式中：$\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1}$为相机$k$上的特征点像素位置$\boldsymbol{\zeta}_k$投影至C1像平面后的坐标，$z$为该点的深度坐标。该过程利用相机光学约束，结合像素坐标与深度信息来确定三维空间点的位置。在实际测量中，由于深度信息未知，通常使用估计的深度值z进行初步投影。通过在不同视角间进行此类投影映射，可有效减小成像差异，为同一特征点在不同视角间的精确匹配奠定基础[21]。

1.3 基于PTV的视角间匹配

视角间匹配是三维点云重构的关键步骤，其核心任务是在不同视角的图像中识别并匹配相同的特征点。匹配方法主要分为基于图像灰度的匹配和基于特征点坐标的匹配2类。基于灰度的匹配方法[15]依赖于局部灰度分布的互相关运算，以互相关峰值作为匹配依据。然而，由于水波波面存在复杂的光学折射和透射效应，其纹理信息往往不够充足，且不同视角间成像的灰度特征可能存在较大差异。因此，本文采用基于粒子追踪测速(Particle Tracking Velocimetry, PTV)技术的匹配方法，以几何信息为主要约束，寻找特征点在不同视角图像中的对应关系。

PTV技术通常用于流体运动速度场的高分辨率测量，其核心在于通过匹配准则将2帧图像中的示踪粒子逐一对应[22]。本文将这一方法应用于不同视角间的激光特征点匹配，将匹配问题转化为一个全局最小化问题，即通过最小化所有匹配特征点$\{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1},\boldsymbol{\zeta}_1\}$之间的欧氏距离$D_{\text{F}}$($D_{\text{F}}=\left|\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1}-\boldsymbol{\zeta}_1\right|$)来寻找最优匹配集合：

$$\min(\sum D_{\text{F}})=\min\left(\sum\left|\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1}-\boldsymbol{\zeta}_1\right|\right) \tag{3}$$

通过式(3)，可完成相机C_k和C_1像平面中全部激光特征点的匹配。其中$\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{k\to1}$由式(2)得到，其所对应激光特征点的深度信息$z$需预先估计。根据Han等[18]的工作，可采用预估–优化的迭代策略对z进行寻优。

本文采用蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)对式(3)所述的最小化问题进行求解。该算法模拟蚂蚁觅食行为，通过蚂蚁在路径上遗留的信息素引导搜索方向，使信息素浓度较高的路径更易被后续蚂蚁选择，从而在迭代过程中逐步逼近全局最优解。蚁群算法具有全局优化能力，并能有效提升特征点匹配的计算效率，具体实现细节可参见Nie等[22]的文献。

1.4 空间重构与基准面校正

将匹配后的特征点像素坐标$\{\boldsymbol{\zeta}_1,\boldsymbol{\zeta}_{k\neq1}\}$输入空间标定神经网络$NN_{3\text{D}}$，即可得到三维点云坐标$\boldsymbol{Q}$。为获取相对于静水面的波高信息，还需对该点云进行校正。本文采用主成分分析[23]进行基准面校正，步骤如下：

1)测量静水面，获得其三维点云$\boldsymbol{Q}_0$。

2) 计算$\boldsymbol{Q}_0$的协方差矩阵，并确定最大特征值对应的特征向量$\boldsymbol{e}$，该向量即为静水面的主轴方向。

3) 将波面三维点云$\boldsymbol{Q}$投影到主轴方向，完成基准面校正：

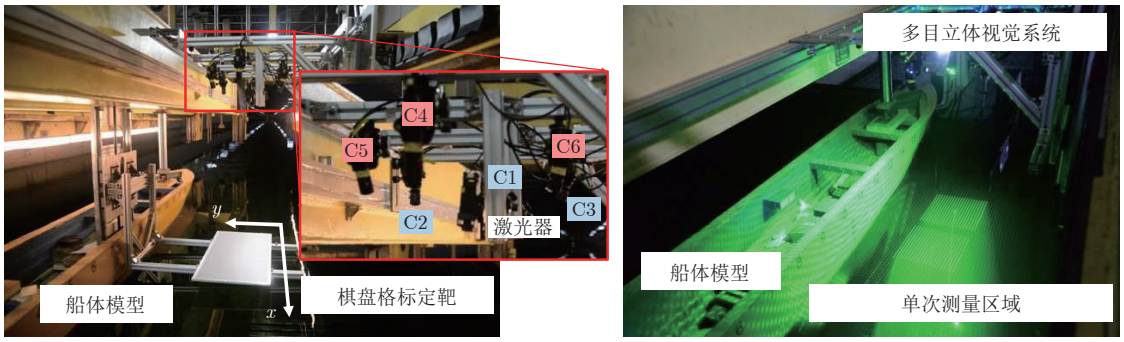
$$\hat{\boldsymbol{Q}}=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{Q} \tag{4}$$

此校正过程实质上是将标定空间的基准面与静水面对齐，从而最终得到准确的波高信息$z(x, y)$及波阵面三维点云。

2 实验结果与分析

2.1 船体模型与多目视觉系统

如图3所示，本文以韩国船舶与海洋工程研究所发布的KCS标准船体模型为实验对象，在中国船舶科学研究中心的大型拖曳水池中，利用多目立体视觉系统开展了船行波自由表面的测量实验。拖曳水池长470 m、宽14 m、深7 m，实验所用船体模型



（a）标定过程　　（b）自由表面测量过程



（c）KCS 船体模型示意图

图 3　实验过程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the experimental process

的缩比为 1∶52.6667。KCS 船模的主要几何参数见表 1。

表 1　KCS 船模几何参数

Table 1　Geometric parameters of KCS ship model

参数	取值
垂线间长L_{PP}	4.3671 m
型宽	0.6114 m
艏吃水	0.2051 m

实验使用了 2 组沿船体轴向排列的三目视觉系统。相机型号为海康威视 MV–CH050–10UM，分辨率为2448 像素 × 2048 像素；镜头为MVL–MF1628M–8M，等效焦距为 16 mm。实验主要包括标定图像采集与自由表面测量 2 个环节。

在标定环节（图 3(a)），通过调整相机架高度，使相机与标定靶平面之间的距离等于实际拍摄时相机距静水面的距离（1200 mm），以保证船行波波阵面处于标定空间内。标定靶为 400 mm × 410 mm 的黑白相间棋盘格，相邻格角点之间的间距为 10 mm，角点数量为 39 × 40。通过拍摄标定靶在不同深度位置（以 5 mm 为间隔，共 15 个位置）的图像，使其覆盖待测船行波的整个波幅范围。

在自由表面测量阶段（图 3(b)），保持相机姿态与参数不变，启动激光器（波长 520 nm，功率 1 W）。激光束经衍射光学元件（Diffractive Optical Element, DOE）后形成 21 × 21 的激光点阵，均匀覆盖三目视觉系统的视场（400 mm × 400 mm）。首先，在每个测量站位采集静水面图像，用于后续的波面校正与基准面调平。船模加速至预定航速后，通过触发信号使多目立体视觉系统以 10 Hz 的频率进行同步图像采集。测量站位布置如图 2(a)所示，沿 x 方向设 6 个站位，沿 y 方向设 3 个站位，通过视场拼接，18 个站位共同覆盖了 4300 mm × 900 mm 的全场测量区域。

2.2　数据处理与结果分析

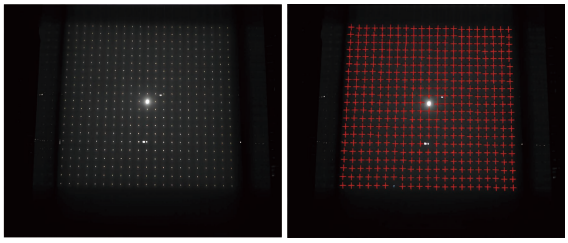
数据处理包括相机标定、特征点提取、立体匹配和三维重构。

在相机标定阶段，基于 15 个不同景深的标定靶图像，提取 39 × 40 × 15 个角点数据输入 BP 神经网络，以建立物理空间与各相机像平面之间的映射关系（NN_{3D}）以及不同相机像平面之间的映射关系（$NN_{k\to1}$）。为评估标定重投影误差，使用均匀间隔选取的 75% 角点对神经网络进行训练，将剩余 25% 角点的像平面坐标输入NN_{3D}进行三维重构，并将结果与理论坐标对比，得到平均重投影误差为 0.039 mm。

在实际测量中，由于水波表面存在反射光与环境光的干扰，其亮度与激光器经衍射光学元件投射在波面上的激光光点相当，直接使用单一阈值法提取特征点易受噪声影响，导致误提取。为有效抑制干扰，本文采用基于高斯蒙版的互相关算法进行特征点提取。投射在波面上的激光光点光强呈高斯分布，利用该特性，通过高斯滤波增强光点的亮度特征，再使用互相关方法精确定位光点的灰度中心，将其作为特征点的像素坐标。该方法显著提升了特征点的提取准确性，有效滤除了大部分杂光干扰，效果如图 4 所示。

将提取的特征点通过式(2)投影至参考像平面，

以初步消除不同像平面间特征点分布的差异。如前文所述，实验中无法预先获取水波深度信息，故将初始深度估计值 z 设定为标定深度范围的中点。随后，采用蚁群优化的 PTV 算法完成特征点匹配，并进一步进行三维重构和基准面校正。



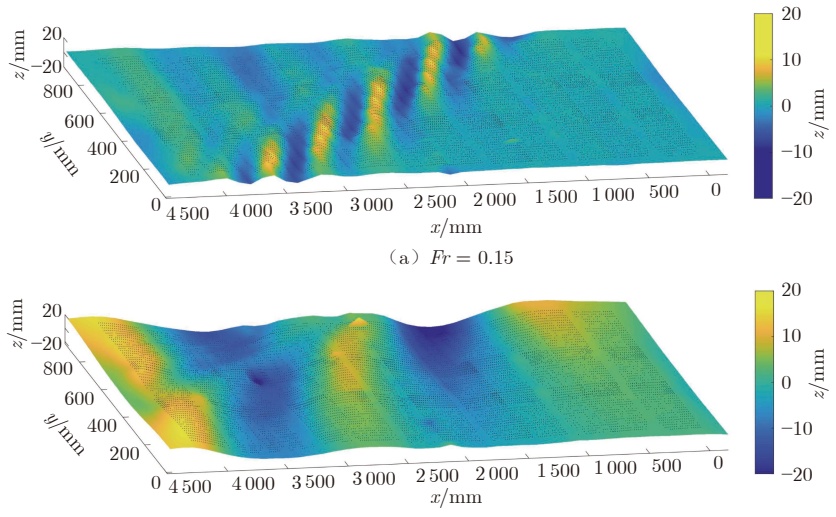
（a）投影点原始图像 （b）投影点中心位置

图 4 特征点提取过程

Fig. 4 Feature point extraction process

在点云拼接过程中，首先根据标定阶段 2 组三目视觉系统共同的成像区域确定其相对位置关系，完成坐标转换，再将校正后的 2 组点云拼接至同一坐标系，从而得到单次测量的船行波波阵面点云 $\hat{\boldsymbol{Q}}$。对于不同站位的点云拼接，本文假设波面为准定常场景，依据各站位的物理位置直接进行空间拼接，以生成完整的波阵面点云。值得注意的是，已有研究表明，在类似试验工况（弗劳德数 $Fr < 3$）下，KCS 船模产生的波面具有较好的准定常特性[1]，这为本文的简化处理提供了依据。对于强非定常波场，可通过增加多视场同步测量装置来获取瞬时全场信息，以避免时差引入的误差。本文的主要目标在于验证算法和测量方法的可行性与精度，因此选择准定常场景作为测试条件，以降低实验复杂性与成本。

实验在 $Fr = 0.15$ 和 0.26 下进行，由多目立体视觉系统测量得到的自由表面如图 5 所示。可以看出，在 $Fr = 0.15$ 时，船行波呈现典型的凯尔文波系（Kelvin wave）特征[1]，波纹结构稳定并以较小角度向外传播，主要表现为散波；而在 $Fr = 0.26$ 时，肩波特征更为显著，水面波动的非线性效应增强，波动能量集中于船体两侧。这可能是由于较高的航速增强了波系间的相互作用，从而引发了更为复杂的水动力现象。该结果为研究高速航行时的波浪特征提供了有力支持。



（a）$Fr = 0.15$

（b）$Fr = 0.26$

图 5 KCS 船行波自由表面立体视觉测量点云重构结果

Fig. 5 Point cloud reconstruction results of KCS ship-induced wave free surface via stereo vision measurement

根据 Kim 等[24] 的研究，在 $Fr = 0.26$ 工况下，横波波长可由公式 $\lambda = 2\pi Fr^2$ 计算，结果约为 0.425。船体表面预计会形成 2 个主要波长的波形。受视场限制，本次测量重构的三维点云直接覆盖船体表面区域。图 6 为最靠近船体轴的船行波纵剖面（$y/L_{\mathrm{PP}} = 0.14$）的波高图，该处波能耗散较小，波系特征与船体表面较为接近。图中可观察到 2 个波谷，分别位于 $x/L_{\mathrm{PP}} = 0.37$ 和 0.77 处，测量得到的波长约为 0.4，与理论值基本吻合，验证了测量结果的准确性。在波高方面，测量结果显示，第一个波峰超过船长的 1%，第一个波谷为−5%。与 Kim 等[24] 直接在船体表面测量的结果相比，当前点云中测得的波高明显更大。该现象可能与波系在离开船体一定距离后的演化有关，在远场区域，波能重新分布可能导致波高局部增大。综上，本次实验的测量结果虽未覆盖船体表面，但通过最靠近船体的波剖面数据，可以初步反

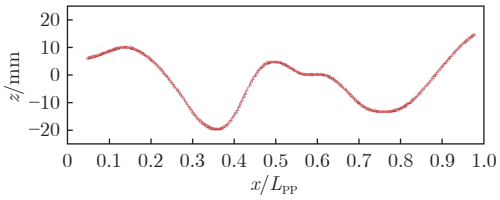


图 6　*Fr* = 0.26 工况下多目立体视觉测量的典型剖面（y/L_{PP} = 0.14）波高图

Fig. 6　Wave height plot of the typical profile (y/L_{PP} = 0.14) measured by multi-view stereo vision at *Fr* = 0.26

映船行波系统的主要特征。

2.3　测量结果对比验证

为验证基于多目立体视觉的船行波测量方法的准确性，在 $Fr = 0.26$ 的航速下，开展了与传统浪高仪阵列的对比实验，测量结果如图 7 所示。浪高仪阵列以 89 mm 为间隔布置，共采集了 401 个时刻的波高数据，其测量精度为全量程（60 mm）的 0.2%。由图 7 可以看到，2 种方法得到的凯尔文波系形态基本一致。

为进一步定量评估立体视觉方法的测量精度，选取浪高仪所在的 9 个纵剖面进行对比分析（图 8）。在各剖面上，浪高仪阵列提供了 401 个时刻的数据；立体视觉方法则通过线性插值，在保持原始点云密度的情况下，获得了由 42 个纵向特征点 × 6 个站位构成的 252 个数据点。如图 8 所示，2 种方法在各剖面测得的波高幅值与相位基本吻合，差异主要集中于波谷区域。这可能是由于前文所述的本质区别：立体视觉测量的是随船运动的瞬时波面，而岸基浪高仪得到的是经时间冻结的波形。表 2 列出了其中 10 个纵剖面的最大波高（波峰与波谷的垂直距离）及其测量偏差。可以看出，在测量该兴波场时，多目立体视觉所测波高与浪高仪结果的最大偏差不超过 1 mm，偏差比例不超过浪高仪所测最大波高的 5%。

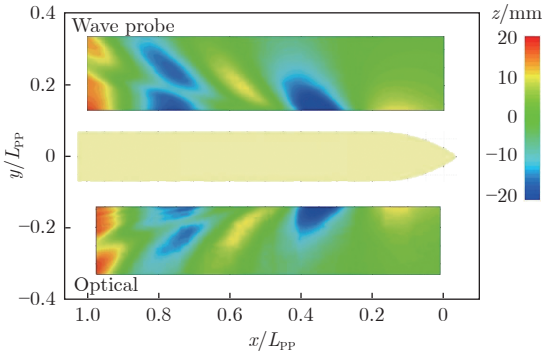


图 7　*Fr* = 0.26 工况下浪高仪阵列与多目立体视觉测量结果对比

Fig. 7　Comparison of wave height meter array and multi-view stereo vision measurement results at *Fr* = 0.26

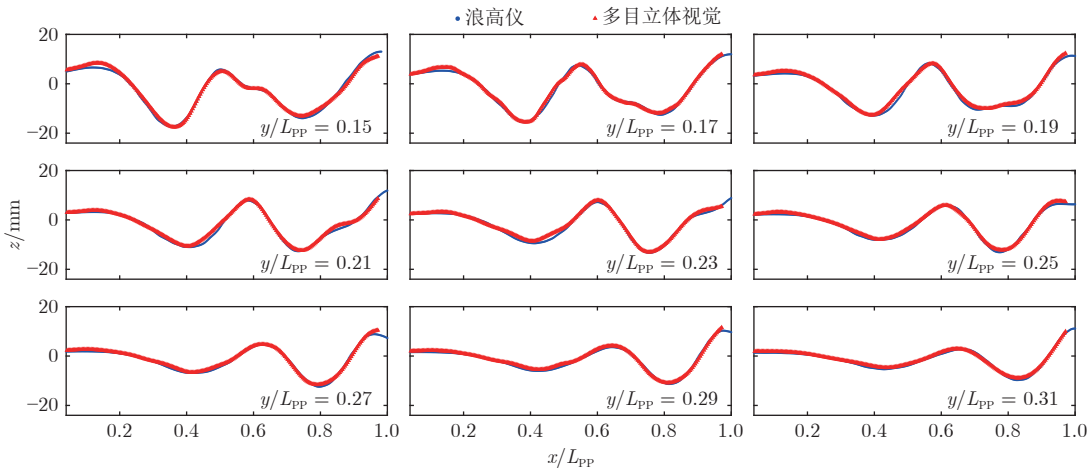


图 8　*Fr* = 0.26 工况下浪高仪阵列与多目立体视觉典型剖面测量结果对比

Fig. 8　Comparison of typical profile measurement results of wave height meter array and multi-view stereo vision at *Fr* = 0.26

上述对比结果表明：立体视觉测量方法能够准确捕捉船行波的整体波动特征。需要强调的是，与传统浪高仪基于固定点的时间冻结测量不同，多目视觉系统具有瞬时测量的优势，能够捕捉复杂的流动动态，因而具备更高的灵活性与更好的场景适应性。尤其在扩展更多三目视觉系统后，该方法可实现更大范围的瞬时测量。

3　结　论

本文提出的基于多目立体视觉的船行波自由表面测量方法，能够以非接触方式实现大视域、实时的波阵面测量。与传统浪高仪相比，该方法避免了探头对水面的干扰，可实现全域、实时，以及随船体的同步测量，且具有更高的测量效率。

表 2 典型纵剖面最大波高测量结果对比

Table 2 Comparison of maximum wave height measurements on typical longitudinal profiles

纵剖面 y/L_{PP}	最大波高/mm		偏差值/mm	偏差比例
	立体视觉	浪高仪		
0.1542	31.3346	32.0927	−0.7581	−2.36%
0.1746	29.9485	30.0352	−0.0868	−0.29%
0.1950	27.2810	26.4610	0.8200	3.10%
0.2154	22.9153	22.7963	0.1190	0.52%
0.2357	22.8723	23.1950	−0.3227	−1.39%
0.2561	21.7088	21.3755	0.3334	1.56%
0.2765	24.0573	23.2235	0.8338	3.59%
0.2969	24.4174	23.5968	0.8205	3.48%
0.3173	20.5299	20.7792	−0.2493	−1.20%

针对波面复杂的光学条件，本文采用激光器搭配衍射光学元件向水面投射激光点阵，以此作为三维波面点云重构的特征标记。在算法上，通过神经网络算法实现多目系统的空间标定，提升了系统的可拓展性；采用蚁群粒子跟踪匹配算法完成多视角图像中特征点的逐点匹配；利用主成分分析法对点云进行静水基准面校正，最终通过视场拼接实现大视域波面的重构。

在大型拖曳水池中的实验表明，该多目视觉系统能够有效重构波峰、波谷等波面信息，并准确捕捉到了典型的波系特征。测量结果与传统浪高仪阵列数据吻合良好，进一步验证了该多目视觉系统的可靠性与精度。

参考文献：

[1] 张晨亮. 船舶静水兴波阻力及波形求解分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHANG C L. Calculation and analysis of the steady wave drag and free surface waves induced by ships[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[2] 宋雅岚, 朱仁传, 缪国平, 等. Kelvin 源求解船行波及其在总阻力估算上的应用[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2018, 33(1): 1-8.
SONG Y L, ZHU R C, MIAO G P, et al. Applications of Kelvin source in ship wave problems and calculations of total resistance[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(1): 1-8.
doi: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.01.001

[3] 万爽, 贺炜. 基于兴波理论的船型设计[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(3): 39-42.
WAN S, HE W. Research on ship form design based on wave making theory[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(3): 39-42.
doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2023.03.007

[4] 田于逵, 夏贤, 吴宝山, 等. 不同型线结构船艏表面压力特性对比实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(1): 24-28.
TIAN Y K, XIA X, WU B S, et al. Comparison of surface pressure characteristics of bulbous bows in different profiles through wind tunnel tests[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2004, 18(1): 24-28.
doi: 10.3969/j.issn.1672-9897.2004.01.006

[5] DEGIULI N, MARTIĆ I, FARKAS A, et al. Experimental assessment of the hydrodynamic characteristics of a bulk carrier in off-design conditions[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114936.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114936

[6] DRENNAN W M, DONELAN M A, MADSEN N, et al. Directional wave spectra from a swath ship at sea[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(4): 1109-1116.
doi: 10.1175/1520-0426(1994)011<1109:dwsfas>2.0.co;2

[7] NA B, SON S. Void fraction estimation using a simple combined wave gauge system under breaking waves[J]. Ocean Engineering, 2021, 241: 110059.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110059

[8] 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.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.05.006

[9] CIFUENTES-LORENZEN A, EDSON J B, ZAPPA C J, et al. A multisensor comparison of ocean wave frequency spectra from a research vessel during the Southern Ocean gas exchange experiment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(12): 2907-2925.
doi: 10.1175/jtech-d-12-00181.1

[10] BLENKINSOPP C E, TURNER I L, ALLIS M J, et al. Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume[J]. Coastal Engineering, 2012, 68: 1-5.
doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.04.006

[11] 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 wave surface measurement based on binocular vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.

[12] 张军, 赵峰, 洪方文, 等. 拖曳水池随车式 PIV 技术的研究与应用[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(2): 93-97.
ZHANG J, ZHAO F, HONG F W, et al. Towing PIV technique and its application in a tank[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(2): 93-97.
doi: 10.3969/j.issn.1672-9897.2003.02.019

[13] 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 the photogrammetry of wave images[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.

[14] BERGAMASCO F, TORSELLO A, SCLAVO M, et al. WASS: an open-source pipeline for 3D stereo reconstruction of ocean waves[J]. Computers & Geosciences, 2017, 107: 28-36.
doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.001

[15] DE VRIES S, HILL D F, DE SCHIPPER M A, et al. Remote sensing of surf zone waves using stereo imaging[J].

Coastal Engineering, 2011, 58(3): 239-250.
doi: 10.1016/j.coastaleng.2010.10.004

[16] GOMIT G, CHATELLIER L, CALLUAUD D, et al. Free surface measurement by stereo-refraction[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(6): 1540.
doi: 10.1007/s00348-013-1540-4

[17] 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.
doi: 10.7498/aps.61.119101

[18] HAN Y K, PAN C, CHENG Z P, et al. A PTV-based feature-point matching algorithm for binocular stereo photogrammetry[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(12): 125602.
doi: 10.1088/1361-6501/acf875

[19] ITO M, ISHII A. Three-view stereo analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(4): 524-532.
doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767817

[20] 窦建宇, 潘翀. 基于神经网络的体视 PIV 空间标定模型[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 524720.
DOU J Y, PAN C. Spatial calibration model of stereo PIV based on neural network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524720.
doi: 10.7527/S1000-6893.2020.24720

[21] 韩雨坤, 潘翀, 王文涛, 等. 基于多目立体视觉和神经网络标定的表面形貌测量方法研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(6): 44-51.
HAN Y K, PAN C, WANG W T, et al. Research on surface measurement method based on multi-view stereo vision and neural network calibration[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(6): 44-51.
doi: 10.11729/syltlx20210048

[22] NIE M Y, PAN C, WANG J J, et al. A hybrid 3D particle matching algorithm based on ant colony optimization[J]. Experiments in Fluids, 2021, 62(4): 1-17.
doi: 10.1007/s00348-021-03160-4

[23] BELLEKENS B, SPRUYT V, BERKVENS R, et al. A benchmark survey of rigid 3D point cloud registration algorithms [J]. International Journal on Advances in Intelligent Systems, 2015, 8(1-2): 118-127.
doi: 10.1016/j.robot.2021.103734

[24] KIM W J, VAN S H, KIM D H. Measurement of flows around modern commercial ship models[J]. Experiments in Fluids, 2001, 31(5): 567-578.
doi: 10.1007/s003480100332



作者简介：

韩雨坤（1998—），女，河北石家庄人，博士研究生。研究方向：自由表面测量技术。

E-mail: hanyukun@buaa.edu.cn

（编辑：秦虹）