

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514276

面向浑浊水体的稀疏阵列实时精细化三维超声成像*

马新智¹, 方博堃¹, 梅德庆¹, 袁龙春², 金浩然¹

(1. 浙江大学机械工程学院 杭州 310058; 2. 管网集团(徐州)管道检验检测有限公司 徐州 221000)

摘要:随着能源和土地资源的消耗,对海上勘探和采矿、基础设施安装、维护和修理的需求不断增加。搭载机械臂的自动化海洋机器人平台成为关键解决方案,其作业精度高度依赖于海洋环境感知能力。然而海洋感知比陆地感知更为复杂,浑浊海洋环境会导致光学成像系统失效。水下环境呈现出非结构化特征,低光和浑浊的水下环境对光学感知的有效性和准确性构成了重大挑战。现有声学感知方法虽具鲁棒特性,但受限于分辨率不足与空间信息缺失,难以支撑机械臂高精度伺服作业。为此提出一种面向浑浊水体的稀疏阵列实时精细化三维超声成像策略,首次将超声无损检测领域的全聚焦(TFM)技术应用至海洋感知。首先采用均匀稀疏策略对矩阵阵列进行降采样,大幅降低数据量与计算负担;进而针对周期性稀疏采样与大尺寸阵元引发的旁瓣伪影问题,提出自适应指向性校正算法与符号相干因子加权机制,并基于 GPU 并行计算平台实现实时处理。通过在浑浊水体中对深海设备关键部件(湿插拔连接器与阀门)的成像实验表明:该方案有效突破了传统光学成像在浑浊环境下的性能瓶颈,弥补了现有海洋声学感知方法的缺点,成像信噪比分别达 57.03 与 62.54 dB。本研究为极端海洋环境下机械臂伺服作业的精细化感知提供了一种有效解决方案。

关键词: 浑浊水体; 三维超声成像; 实时成像; 自适应指向性校正; 符号相干因子

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Real-time 3D fine-resolution ultrasonic imaging for turbid water based on sparse array

Ma Xinzhi¹, Fang Bokun¹, Mei Deqing¹, Yuan Longchun², Jin Haoran¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Pipe China (Xuzhou) Pipeline Inspection Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

Abstract: With the consumption of energy and land resources, the demands for offshore exploration and mining, infrastructure installation, maintenance, and repair continue to increase. Automated robotic platforms equipped with manipulators have emerged as a key solution, where operational precision relies heavily on the system's environmental perception capabilities. However, object perception in underwater environments is considerably more challenging than in terrestrial environments, and optical imaging systems will fail in turbid waters. The underwater environment presents unstructured features, and low-light and turbid underwater environments pose significant challenges to the effectiveness and accuracy of optical perception. Although existing acoustic perception methods are robust, they suffer from limited resolution and incomplete spatial information, constraining high-precision manipulator servo control. To address these limitations, this article proposes a real-time, fine-resolution 3D ultrasonic imaging method for turbid water based on a sparse array. This method introduces the total focusing method (TFM), which is traditionally used in ultrasonic non-destructive testing, into marine perception for the first time. A uniform sparse sampling strategy is first applied to the matrix array to significantly reduce data volume and computational load. An adaptive directivity correction algorithm and a sign coherence factor weighting scheme are introduced to mitigate the sidelobe artifacts caused by periodic undersampling and large element sizes. The method is implemented on a GPU-based parallel computing platform to ensure real-time performance. Experiments are conducted on critical subsea components, a wet-mateable connector

收稿日期: 2025-07-17 Received Date: 2025-07-17

* 基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U24A20132)、浙江省自然科学基金重点项目(LZ23E050004)、浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划项目(2025C01012, 2024C01128, 2024C03036)资助

and valve, demonstrating that the proposed method effectively overcomes the limitations of optical imaging in turbid conditions and compensates for the resolution and geometric information deficiencies of existing acoustic perception approaches, achieving signal-to-noise ratios of 57.03 dB and 62.54 dB, respectively. This work offers a promising solution for refined environmental perception in robotic operations under extreme ocean conditions.

Keywords: turbid water; 3D ultrasonic imaging; real-time imaging; adaptive directivity correction; sign coherence factor

0 引 言

随着陆地化石燃料的日益枯竭,海洋资源勘探与开采的需求不断增加^[1-2]。目前,全球约 30% 的石油和天然气产量来自于海洋工业,勘探与干预已经成为其两项核心任务^[3]。这些任务通常涉及阀门的启闭、湿插拔连接器的对接与分离操作等,需依赖配备机械臂的遥控潜水器 (remotely operated vehicle, ROV) 或自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 完成,以最大限度减少人为干预并实现操作自动化^[4-8]。作业精度不仅取决于机器人本体及其控制系统,更依赖于其对海洋环境的感知能力,因此提升水下机器人的环境感知水平具有重要的应用价值^[9]。

视觉凭借其高时空分辨率被广泛应用于机器人感知模块^[10-12]。然而,海洋环境的物理特性对光学成像构成严峻挑战:海水对可见光具有强吸收性,悬浮颗粒进一步衰减光,加之光的反射、折射和散射效应,有效光照被显著削弱^[9]。尽管常采用主动光源改善能见度,效果却差强人意。一方面,人造光源同样受到能量衰减影响;另一方面,当照明光束照射至相机与目标间的悬浮颗粒,或穿透目标后照亮其背景水体时,将引发强烈的“背散射”效应,导致图像模糊不清^[3]。上述问题在浑浊水体(如中国东海)中尤为严重,高浓度泥沙加剧了光衰减与散射,导致光学成像系统基本失效^[13]。相比之下,声学感知方法(如声呐)在复杂水体环境中表现更佳的鲁棒性。遗憾的是,声呐图像普遍存在分辨率低与空间信息缺失的问题,致使复杂结构目标(如阀门、湿插拔连接器)在图像中呈现模糊斑点状,缺乏清晰的几何与纹理特征。因此,传统声呐系统主要用于中远距离的搜索与救援任务^[14-15],难以满足水下机械臂精细伺服作业对高质量信息图像的严苛需求。

无损检测领域中全聚焦法 (total focusing method, TFM) 阵列超声成像为浑浊水体精细化成像提供了新的思路^[16]。TFM 采用“单发全收”的全矩阵采集 (full matrix capture, FMC) 模式,通过对感兴趣区域 (region of interest, ROI) 逐点聚焦重建获得高分辨率声学图像,被业界誉为“黄金法则”^[17]。然而,将 TFM 直接应用于浑浊海洋环境下的精细化机械臂作业感知面临诸多挑战。首先,三维 TFM (3D-TFM) 计算复杂度高,且 FMC 数据量

随阵元数呈平方级增长,导致全寻址阵列系统承受沉重的数据存储与处理负担^[18];其次,较低声速致使声波传播存在显著延迟,连续两次发射之间需保持足够间隔,严重制约脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) 上限^[19];同时为获得大视场和高声能而需采用的大尺寸阵元会减小声束扩散角,声束呈现更强的指向性^[20]。结果是引入较强的旁瓣效应,导致图像质量下降。因此,适用于浑浊水体机械臂作业的精细化声学感知方法仍有待研究。

基于上述背景,提出了一种面向浑浊水体的稀疏阵列实时三维精细化超声成像方法。该方法采用均匀稀疏策略对矩阵阵列进行降采样,稀疏发射有效压缩 FMC 时间,提高系统 PRF 与成像帧率上限。同时,稀疏接收则大幅减轻数据采集、存储、传输与计算负荷。针对周期性稀疏采样与大尺寸阵元引发的旁瓣伪影问题,提出自适应指向性校正算法与符号相干因子抑制机制,显著提升成像信噪比。为实现机械臂伺服作业的实时性要求,将所提方法部署于图形处理器 (graphics processing unit, GPU) 加速平台。最终,在充满泥沙的浑浊水体中对深海设备关键部件——湿插拔连接器和阀门进行成像实验,并与传统光学方法对比分析。定量检测结果表明,该方法不仅有效突破了浑浊环境下传统光学成像的性能瓶颈,且成像信噪比可达 57.03 和 62.54 dB。本研究提出的稀疏阵列三维超声成像方法为极端海洋环境下搭载机械臂的作业平台的精细化作业感知提供了一种新的解决思路与可行路径。

1 三维精细化超声成像方法

1.1 三维超声全聚焦成像方法

如图 1 所示,使用阵元数为 $N \times N$ 的矩阵阵列对空间的目标成像。阵列中的每个阵元依次被激励,同时所有阵元接收超声回波信号,形成维度为 $Nt \times N^2 \times N^2$ 的全矩阵数据, Nt 为信号时域采样点数。在此过程中,发射与接收波场均可以被视为球面散射波。

设 x 和 y 方向上的阵元间距为 d ,发射与接收阵元分别记为 u 和 v 。全寻址阵列的 3D-TFM 重建过程,即延时叠加过程 (delay and sum, DAS),可表示为:

$$I(x, y, z) = \left| H \left(\sum_{u_x=1}^N \sum_{u_y=1}^N \sum_{v_x=1}^N \sum_{v_y=1}^N S_{u_x u_y v_x v_y} (t - \tau) \right) \right| \quad (1)$$

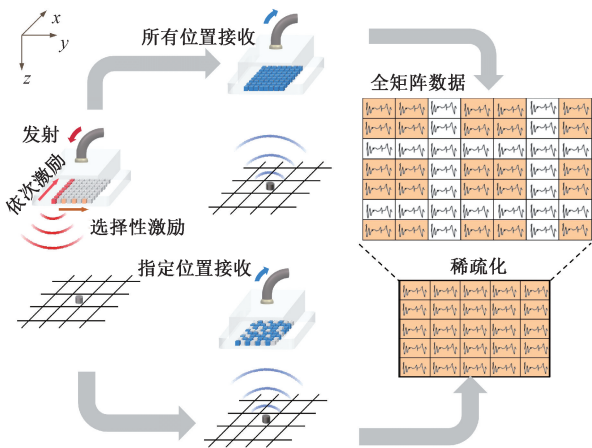


图1 全寻址阵列与稀疏阵列三维全聚焦成像示意图

Fig. 1 Schematic illustration of 3D-TFM using fully addressed and sparse arrays

$$\tau = \frac{\sqrt{(x-x_u)^2 + (y-y_u)^2 + z^2}}{v} + \frac{\sqrt{(x-x_v)^2 + (y-y_v)^2 + z^2}}{v} \quad (2)$$

式中: I 代表像素点强度; H 代表希尔伯特变换; S 表示全矩阵数据; τ 表示超声波飞行时间 (time of flight, TOF); v 为介质声速。

阵列中的每个阵元都对应特定空间频率, 而对同一空间频率有贡献的发射-接收阵元对是冗余的, 这意味着在阵列的远场区 FMC 数据存在冗余。如图 1 所示, 通过对二维阵列进行空间降采样, 可显著降低数据规模并提升成像效率。本文采用均匀掩码对图 2(a) 所示的全寻址矩阵阵列进行空间降采样, 生成的均匀稀疏阵列布局如图 2(b) 所示。

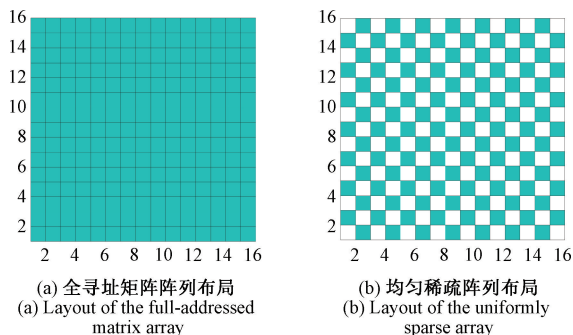


图2 不同阵列配置布局对比

Fig. 2 Matrix array layouts under different configurations

1.2 自适应指向特性校正算法

声源辐射随方向而变的特性称为指向特性。如图 3 所示, 极坐标系中尺寸为 $a \times b$ 的矩形活塞换能器, 发射

响应幅值随仰角 θ 和方位角 ϕ 变化, 可表述为:

$$D(\theta, \phi) = \text{sinc}\left(\frac{kbs \sin \theta \cos \phi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{kasin \theta \sin \phi}{2}\right) \quad (3)$$

式中: D 是由于阵元的有限尺寸而引起的指向特性函数; k 为波数。

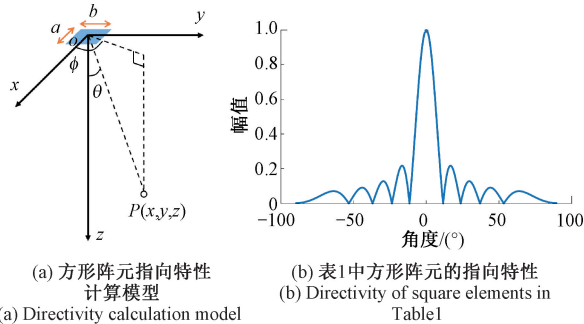


图3 指向特性示意图

Fig. 3 Diagram of directivity

通常认为, 当主瓣幅值衰减至峰值 50% 以下时, 该方向上的发射或者接收声波对成像的有效贡献可忽略, 且可能引入噪声干扰。基于表 1 的阵列参数, 计算得到阵元在 x 和 y 方向上指向特性如图 3(b) 所示。经测量, 其在 x 和 y 方向上的 -6 dB 扩散角为 6.94° 。根据指向特性曲线, 声场能量主要集中于半扩散角为 6.94° 的主瓣内, 超过此角度后, 主瓣能量急剧下降, 取而代之的是易产生伪影与噪声的旁瓣。因此, 单个发射-接收阵元对仅对部分空间区域具备有效成像能力。本文将此类区域定义为 -6 dB 主瓣覆盖区域, 即主瓣幅值下降一倍所覆盖的空间范围。

表1 矩阵阵列换能器参数

Table 1 The properties of the matrix array transducer

属性	参数值
中心频率	1 MHz
阵元数量	256
x 方向阵元数	16
y 方向阵元数	16
x 方向阵元间距	7.5 mm
y 方向阵元间距	7.5 mm
带宽	78%

阵元在 xoy 和 $yozy$ 平面内的 -6 dB 声束扩散角已在图 4 标出。在深度为 z_p 的二维平面内, 发射阵元与接收阵元的 -6 dB 主瓣覆盖区域已被标出。将该区域二值化映射为矩阵, 即得到指向特性旁瓣抑制矩阵。

发射和接收阵元的 -6 dB 主瓣覆盖区域边界由式(4)确定, 满足式(5)的像素坐标所对应索引的旁瓣抑

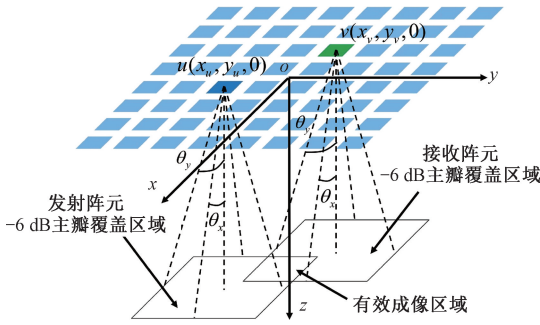


图 4 自适应指向特性校正算法模型

Fig. 4 Adaptive directivity correction algorithm model

制矩阵元素设为 1, 即:

$$\begin{cases} x_{\text{left}} = x_u - z_p \tan \theta_x \\ x_{\text{right}} = x_u + z_p \tan \theta_x \\ y_{\text{left}} = x_u - z_p \tan \theta_y \\ y_{\text{right}} = x_u + z_p \tan \theta_y \\ x_{\text{left}} = x_v - z_p \tan \theta_x \\ x_{\text{right}} = x_v + z_p \tan \theta_x \\ y_{\text{left}} = x_v - z_p \tan \theta_y \\ y_{\text{right}} = x_v + z_p \tan \theta_y \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{D}_u(x_{\text{left}} \leq x \leq x_{\text{right}} \& y_{\text{left}} \leq y \leq y_{\text{right}}) = 1 \\ \mathbf{D}_v(x_{\text{left}} \leq x \leq x_{\text{right}} \& y_{\text{left}} \leq y \leq y_{\text{right}}) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{D}_u 和 \mathbf{D}_v 均为指向特性旁瓣抑制矩阵。

发射阵元与接收阵元的 -6 dB 主瓣覆盖区域的重叠部分, 表示发射-接收阵元对的有效成像区域, 其矩阵映射为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_u \cdot \mathbf{D}_v \quad (6)$$

严格而言, 指向特性旁瓣抑制矩阵的生成需考虑阵元三维空间的完整指向特性。为了平衡计算效率与性能, 本文基于阵元在 x 和 y 方向的指向特性来确定 -6 dB 主瓣覆盖区域边界。该简化策略通过二维平面波束特性表征三维空间覆盖, 显著降低了矩阵构件的计算复杂度, 同时基本维持了噪声抑制性能。同时, 由于该方法是基于 -6 dB 下降原则, 所以其对有效区域的界定趋于保守。因此这种简化策略对最终成像质量的影响可忽略不计。由于矩阵随发射-接收阵元对及像素深度自适应更新, 故称为自适应指向特性校正算法。

1.3 基于符号相干加权的互相关波束成型

通过将符号函数近似表征相位信息, 将如图 5(a) 所示的原始信号转换为如图 5(b) 所示的符号数据, 该过程可用式(7)表示, 即:

$$S_s(t) \begin{cases} 1, & S(t) \geq 0 \\ -1, & S(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

噪声相位具有随机性, 其在成像累加过程中相互抵消; 而相干信号相位保持一致性。将上述符号数据作为

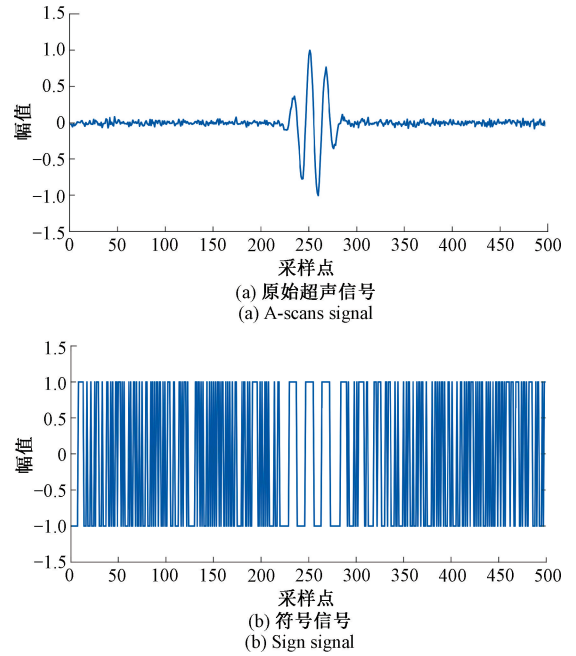


图 5 原始超声信号及其符号表示

Fig. 5 Original A-scan signal and its symbolic representation

原始数据进行相干叠加:

$$I_s(x, y, z) = \left| \sum_{u_x=1}^N \sum_{u_y=1}^N \sum_{v_x=1}^N \sum_{v_y=1}^N S_{s_{u_x, u_y, v_x, v_y}}(t - \tau) \right| \quad (8)$$

式中: τ 的计算方式如式(2)所示; I_s 为符号相干因子 (sign coherence factor, SCF)。

因此 SCF 可视为一种联合滤波器, 兼具旁瓣抑制与分辨率增强双重功能。该方法对栅瓣、混响和颗粒噪声亦具有良好的抑制效果。最终将自适应指向特性校正矩阵补偿至 SCF 计算过程, 并与原始图像结果 (复数结果) 进行互相关, 得到最终的重建结果, 即:

$$I_f = |(\mathbf{D} \cdot I_s)^\alpha \otimes \mathbf{D} \cdot I| \quad (9)$$

式中: α 为符号相干强度因子, 用于控制 SCF 图像重建过程中的作用程度, 平衡图像的抑噪与保真性能。

相比于以浮点类型表示的相位数据, 符号数据仅包含 1 和 -1, 因此显著降低了相位数据的存储需求。该特性对实现 3D-TFM 并行计算至关重要, 可有效降低内存占用并提升计算效率。

1.4 基于 GPU 异构计算的算法加速

所提出的精细化成像方法涉及高复杂度的波束成形运算, 纯 CPU 实现难以满足水下机械臂伺服作业的实时帧率要求。为此, 本文采用基于 GPU 的异构计算架构实现算法加速。CUDA 是 NVIDIA 提供的一种 GPU 编程模型, 具备简洁高效的并行计算接口, 简化了并行计算的实现。在该架构中, GPU 经由 PCIe 总线与 CPU 协同工作, 其中, CPU (主机端) 负责逻辑调度与流程控制, GPU (设备端) 则专注于数据密集型任务的并行处理。

图 6 展示了基于 GPU 异构计算的三维精细化超声成像流程。首先在主机端设置成像参数(如采样率、坐标系、声速等),并分配主机端与设备端内存;随后在 GPU 端预计算 TOF 和指向特性旁瓣抑制矩阵,将结果写入预分配的全局内存(该预计算过程仅需执行一次)。接下来将全矩阵数据从主机传输至 GPU 显存,并行执行希尔伯特变换和

符号化处理(线程数量=全矩阵数据点数),生成包络数据与符号数据。继而基于 TOF 矩阵和指向特性矩阵,对双路数据执行三维线性插值并映射至 ROI 像素网格。遍历所有发射-接收阵元对后,依据式(9)进行互相关运算,对结果取绝对值并归一化,获得三维声视觉图像(线程数=ROI 像素总数)。最终将结果回传至主机端,完成单帧成像。

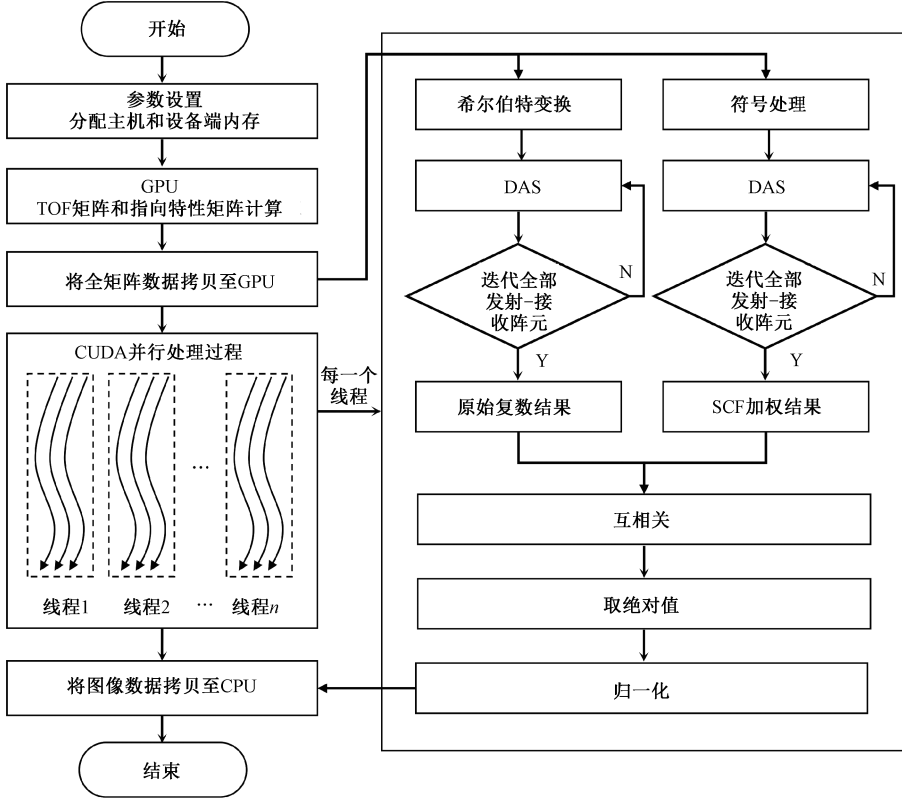


图 6 基于 GPU 异构计算的三维超声成像算法流程

Fig. 6 Flowchart of the 3D acoustic visual imaging method based on GPU heterogeneous computing

2 三维精细化超声成像仿真研究

2.1 波束特性

波束特性 (beam pattern, BP) 表征了阵列各个方向上的角脉冲响应,可以作为评估阵列性能(如栅瓣能量)指标。本节基于 3D-TFM 算法推导出波束特性方程,明确表述稀疏布局与旁瓣能量分布关系。DAS 过程在频域中的表达为:

$$I = \sum_{\omega} \sum_{u_x=1}^N \sum_{u_y=1}^N \sum_{v_x=1}^N \sum_{v_y=1}^N S_{u_x u_y v_x v_y}(\omega) e^{jk(d_u + d_v)} \quad (10)$$

式中: S 为阵列信号的频谱,指数项代表相移; d_u 和 d_v 分别像素点到发射阵元和接收阵元的距离; k 为波数。为了简化计算过程,使用方位角 α 、仰角 β 和距离 r 表述像素点 P 。单位向量 \vec{u} 由圆心指向像素点。发射阵元和接收阵元的空间位置分别用 \vec{r}_u 和 \vec{r}_v 表示。所有参数定义如图 7 所示。

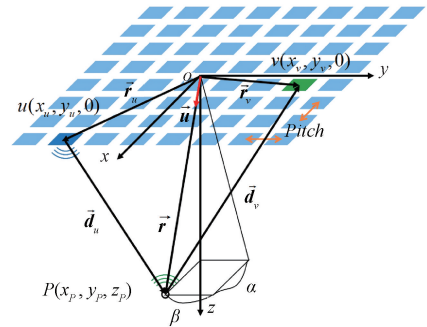


图 7 波束特性计算模型

Fig. 7 Beam pattern calculation model

这些向量可以被表示为:

$$\begin{cases} \vec{r} = |\vec{r}| \cdot \vec{u} = |\vec{r}| \cdot (\sin\alpha, \sin\beta, \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\beta}) \\ \vec{r}_u = (x_u, y_u, 0) \\ \vec{r}_v = (x_v, y_v, 0) \end{cases} \quad (11)$$

因此, \mathbf{d}_u 和 \mathbf{d}_v 可以被重写为:

$$\begin{cases} \mathbf{d}_u(u_x, u_y) = \sqrt{\vec{r}^2 + \vec{r}_u \cdot \vec{r}_u - 2\vec{r}_u \cdot \vec{r}} \\ \mathbf{d}_v(v_x, v_y) = \sqrt{\vec{r}^2 + \vec{r}_v \cdot \vec{r}_v - 2\vec{r}_v \cdot \vec{r}} \end{cases} \quad (12)$$

波束特性将在像素点位于阵列远场区的条件下进行求解,因此像素点到发射和接收阵元的距离远大于发射和接收阵元到坐标原点的距离,可以被近似为:

$$\begin{cases} \mathbf{d}_u(u_x, u_y) \cong \mathbf{r} - \vec{r}_u \cdot \vec{u} = \mathbf{r} - \vec{r}_u \cdot \frac{\vec{r}}{|\mathbf{r}|} \\ \mathbf{d}_v(v_x, v_y) \cong \mathbf{r} - \vec{r}_v \cdot \vec{v} = \mathbf{r} - \vec{r}_v \cdot \frac{\vec{r}}{|\mathbf{r}|} \end{cases} \quad (13)$$

水下场景中的成像目标位于阵列远场区,因此上述远场近似是合理的,得到:

$$I = \sum_{\omega} \sum_{u_x=1}^N \sum_{u_y=1}^N \sum_{v_x=1}^N \sum_{v_y=1}^N e^{i2kr} S_{u_x u_y v_x v_y}(\omega) e^{-jk(\vec{r}_u \cdot \frac{\vec{r}}{|\mathbf{r}|} + \vec{r}_v \cdot \frac{\vec{r}}{|\mathbf{r}|})} \quad (14)$$

将式(14)最后一项与其他项分开,得到矩阵阵列 TFM 的波束特性,将像素点、发射和接收元件的坐标表示为空间矢量并执行点积,最终的波束特性为:

$$BP = \sum_{u_x=1}^N \sum_{u_y=1}^N \sum_{v_x=1}^N \sum_{v_y=1}^N \mathbf{w}_u e^{-jk(x_u \sin\alpha + y_u \sin\beta)} \mathbf{w}_v e^{-jk(x_v \sin\alpha + y_v \sin\beta)} \quad (15)$$

式中: \mathbf{w}_u 和 \mathbf{w}_v 分别表示发射和接收阵元的稀疏系数。

为直观揭示稀疏布局对波束特性的影响,基于式(15)分别计算了图 2 所示全寻址阵列和均匀稀疏阵列的波束特性,结果如图 8 所示(阵列参数见表 1)。理论分析表明,均匀稀疏化使阵元间距 $Pitch$ 远大于避免栅瓣的临界条件 $Pitch \leq \lambda/2$,导致空间采样频率低于奈奎斯特率,从而在波束图中引发严重的空间频谱混叠。如图 8 所示,该稀疏阵列在成像空间中产生了四个与主瓣能量相当的栅瓣,这将在成像结果中引入位置固定的结构性伪影。下文将借助点扩散函数进一步量化分析该阵列模型的成像性能。

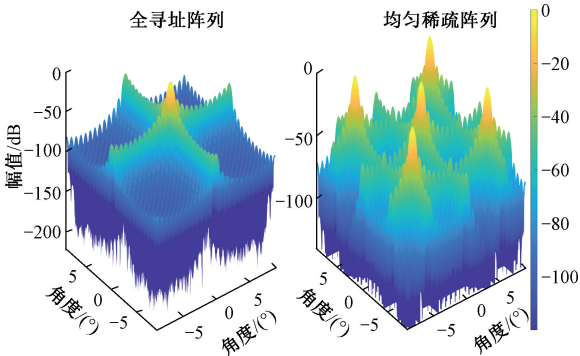


图 8 全寻址阵列和稀疏阵列的波束特性

Fig. 8 Beam patterns fully addressed and uniformly array

2.2 点扩散函数仿真

点扩散函数(point spread function, PSF)是评估阵列系统及成像算法对点散射体成像性能的重要指标^[21]。PSF 建模结果中的主瓣宽度、旁瓣幅度等特征与实际成像效果高度吻合,故可有效验证成像方法的综合性能。为验证所提出的三维精细化超声成像方法的可行性与优越性以及上述波束特性分析的准确性,本节采用 Field II 仿真软件分别计算全寻址阵列 TFM (fully addressed-TFM, FA-TFM)、均匀稀疏阵列 TFM (uniformly sparse-TFM, US-TFM)和均匀稀疏阵列结合自适应指向特性校正算法和基于符号相干加权的互相关波束成型算法的 PSF,阵列参数详见表 1,点散射体位于阵列正下方 50 cm 处。

不同方法的 PSF 仿真结果如图 9 所示,在 PSF 最大幅度处提取二维切片并绘制幅值曲线,如图 10 所示。PSF 中的主瓣宽度(main lobe width, MLW)反映空间分辨率,旁瓣峰值(side lobe level, SLL)表征成像对比度和信噪比,因此本文选取 MLW 和 SLL 作为声学成像性能的评价指标,其定量分析见表 2。通过对 MLW 和 SLL 的定量分析可知,相较于经典的 FA-TFM 和 US-TFM 方法,所提出方法的 MLL 分别缩小了 2.25 倍和 2.28 倍,SLL 分别降低

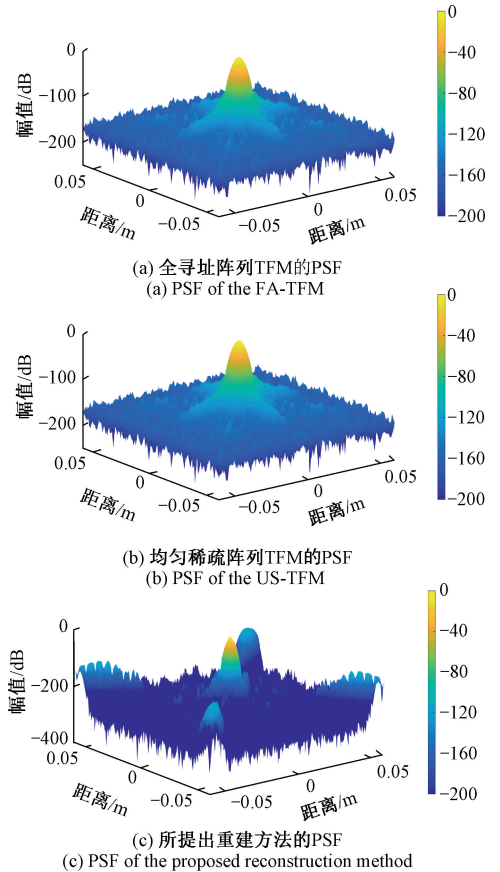


图 9 不同阵列和成像方法的 PSF 对比结果

Fig. 9 Comparison of PSF results for different arrays and imaging methods

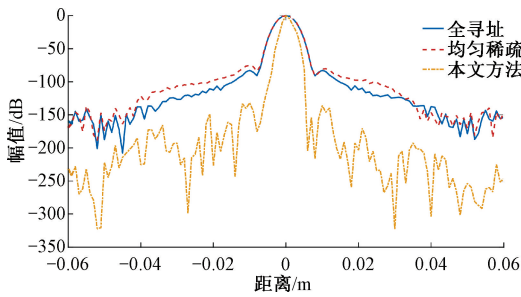


图10 二维切片 PSF 对比

Fig. 10 2D slice PSF comparison diagram

了 1.58 倍和 1.74 倍。上述定量结果与图 9 和 10 所示的视觉特征一致,证实该方法在分辨率和旁瓣噪声抑制方面均具有显著优势,能够生成更高质量的成像结果。

表 2 不同成像方法的定量性能指标

Table 2 Quantitative performance of different imaging methods

方法	主瓣宽度 (MLW)/mm	旁瓣峰值 (SLL)/dB
FA-TFM	6.40	-82.85
US-TFM	6.50	-74.94
提出的方法	2.85	-130.76

此外,稀疏阵列的 PSF 结果中存在栅瓣,并且出现位置与波束特性结果中栅瓣预测位置相同。这印证波束特性模型的准确性。实际上均匀稀疏阵列引入了严格的空域周期性,其空域频谱是周期性的,这直接导致了栅瓣;在信号处理中,均匀降采样会使原信号的频谱在频域上周期性重复。映射到阵列上,就是使原来的主瓣方向图在空间角度域上周期性重复。这些重复出现的、完全相同的主瓣副本,就是栅瓣。为了无混叠地重构一个波束特性,空间采样频率必须足够高。这直接导出我们熟知的“半波长准则”: $Pitch \leq \lambda/2$ 。SCF 并不是直接解决空域采样定律,而是利用 1.3 节中的原理削弱栅瓣和旁瓣伪影的幅度。

本节通过点扩散函数仿真定量验证了所提声视觉成像方法的性能优势。旨在验证在发射接收均匀稀疏条件下,所提出的方法能够有效保持成像质量不退化。第 3 章将在浑浊水体中开展真实零的成像实验,综合评估图像质量与成像时效性,以验证其在实际工程场景中的实时成像效能。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验设置

对于大型深海设备,电缆是关键电力与通信通道,

而湿插拔连接器作为电缆的“关节”,无疑是深海系统中至关重要的部件之一^[22-23]。阀门则是海洋石油与天然气运输系统中的核心控制节点。因此选取图 11 所示的湿插拔连接器与阀门为目标,在泥沙浓度 >700 NUT 的极限浑浊水体中开展成像实验。成像系统的中心频率选定为 1 MHz,该选择是兼顾分辨率与穿透性的权衡结果:较高的频率有利于提升空间分辨率并与传统声呐频段形成区分,而过高的频率在海水介质中衰减显著;1 MHz 在此极端浑浊环境中能在保证足够穿透深度的同时,提供区别于低频声呐的精细成像能力。该实验条件旨在聚焦于最严苛的成像环境,以验证方法的核心鲁棒性。取图 11 所示的钢制阀门与树脂基湿插拔连接器分别代表了高声阻抗与低声阻抗两类典型深海工程材料,已能初步表明方法对材质差异的适应性。零件在浑浊水体中的光学对比图像如图 12 所示。

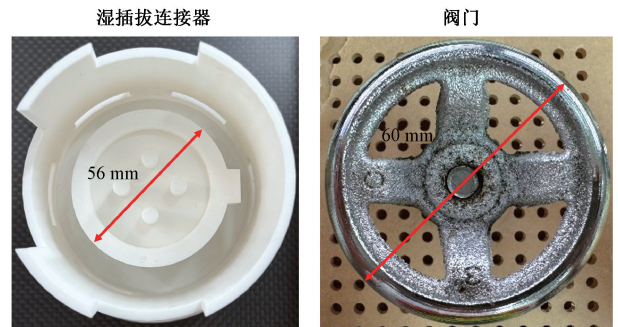


图 11 深海设备中的关键部件

Fig. 11 Key components in deep-sea equipment

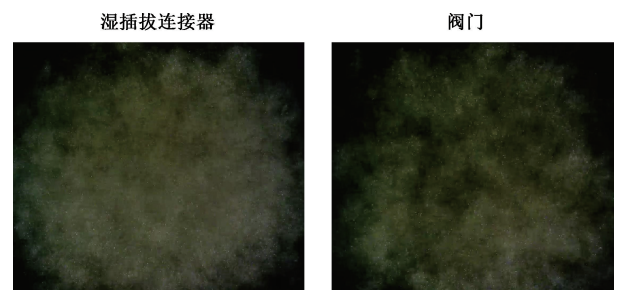


图 12 浑浊水体中湿插拔连接器和阀门光学图像结果

Fig. 12 Optical image of the wet-mateable connector (WMC) and valve in turbid water

实验所使用的二维矩阵阵列参数如表 1 所示(曼图,中国),配合 Vantage 256 (Verasonics, 美国)数据采集平台,以 15.625 MHz 采样率获取全矩阵数据。在配备 Intel Core i7-13700KF CPU 和 NVIDIA GeForce RTX 4070 GPU 的计算机上用 CUDA/C++ (微软和英伟达,美国)进行图像重建,使用 MATLAB R2021b (Mathwork, 美国)对重建结果进行定量分析。图像质量使用信噪比 (signal-to-

noise ration, SNR) 进行评估,定义如式(16)^[24]所示。

$$SNR = 20 \lg \left| \frac{I_{\max}}{I_{\text{average}}} \right| \quad (16)$$

式中: I_{average} 表示目标区域外图像的平均幅值,即背景噪声水平; I_{\max} 表示成像目标区域内的最大幅值。SNR 越大,表明目标与背景的对比度越高,图像质量越好。

3.2 实验结果及分析

图 13 展示了 3 种方法对湿插拔连接器的声学重建结果(符号相干强度因子为 0.75),阀门的声学重建结果(符号相干强度因子同样设为 0.75)如图 14 所示(均为分贝图像)。重建结果表明,全寻址阵列受限于强指向特性,在图像中产生了显著的高幅值旁瓣伪影;均匀稀疏阵列方法由于周期性稀疏结构与强指向性的叠加效应,旁瓣伪影更为严重,甚至出现伪影与目标难以区分的情况。相比之下,所提出的三维精细化超声成像方法能够显著抑制旁瓣伪影,重建出的湿插拔连接器与阀门结构边界清晰,目标识别度高,几乎无明显伪影干扰。此外,三维重建有效弥补了传统声呐在空间信息获取方面的不足,图像中不仅呈现清晰的目标轮廓,还保留了湿插拔连接器与阀门的空间结构特征。由于浑浊水体中颗粒散射和强衰减的影响,两种结构在光学相机下的成像结果不包含任何可用于机械臂伺服作业的有效信息。这进一步证实了在浑浊环境中,光学成像系统性急剧恶化甚至完全失效。

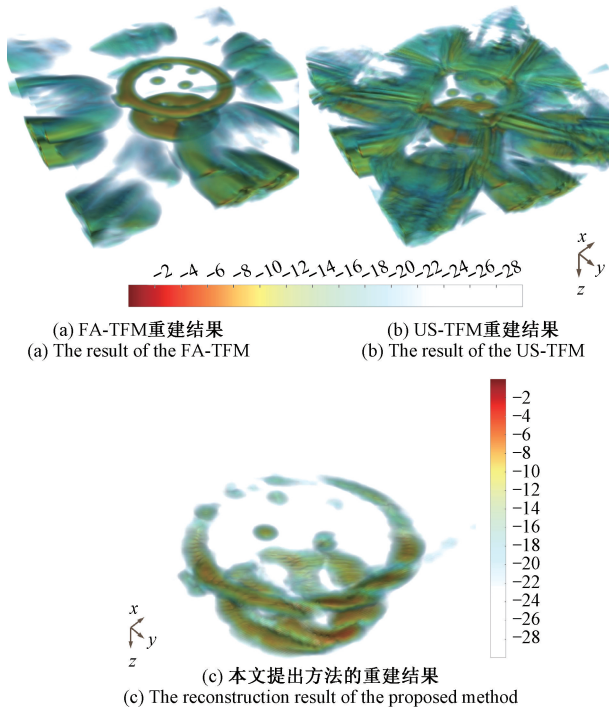


图 13 湿插拔连接器超声重建结果

Fig. 13 Ultrasonic reconstruction results of the WMC

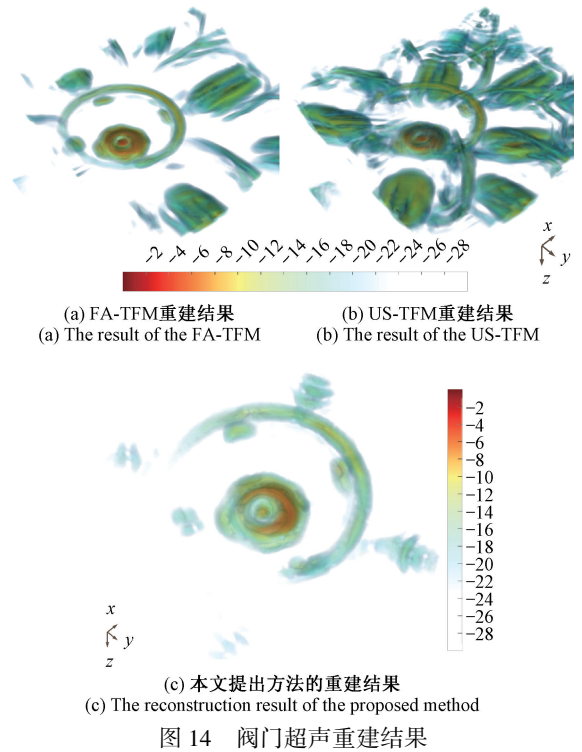


Fig. 14 Ultrasonic reconstruction results of the valve

计算不同重建方法图像的 SNR,并进行定量分析,如表 3 所示,表中还列出了 3 种方法的重建时间。湿插拔连接器三维图像包含约 60 万个体素点。针对该目标,FA-TFM 方法耗时 468.72 ms,而所提出的方法仅需 155.54 ms,重建效率提升 3 倍。同时信噪比显著提高,从 FA-TFM 的 36.47 dB 提升至 57.18 dB,提升幅度达 20.71 dB。US-TFM 虽然在时间上略占优势,耗时 121.12 ms,但其成像质量显著下降,信噪比仅为 30.97 dB,较本文方法低 26.21 dB。在阀门成像实验中,三维图像体素点数约为 90 万。FA-TFM 方法耗时 791.94 ms,所提出方法为 235.77 ms,SNR 达 62.54 dB,优势趋于一致。

表 3 重建图像定量分析结果

Table 3 Quantitative analysis results of images

试件	方法	信噪比/dB	重建时间/ms	像素数
湿插拔 连接器	FA-TFM	36.32	468.72	600 281
	US-TFM	30.82	121.12	
	本文方法	57.03	155.54	
阀门	FA-TFM	39.93	791.94	893 101
	US-TFM	35.19	181.61	
	本文方法	62.54	235.77	

上述结果表明,所提出的方法相较于 FA-TFM 显著缩短了重建时间并大幅提升了成像质量;相比 US-TFM,

虽然在效率上略有差距,却在图像质量方面具有显著优势,展现出良好的实用价值与工程适应性。

为直观评估所提出方法对栅瓣伪影的抑制能力,在成像结果的边缘区域($x = -0.02$ m)提取切面,采用最大密度投影方法计算该切面上的栅瓣能量分布,并绘制为栅瓣能量变化曲线,如图 15 所示。由图 15 可知,无论是针对湿插拔连接器还是阀门目标,均匀稀疏阵列成像结果中的栅瓣能量均显著高于本方法所得结果,这表明所提出的方法能有效抑制因阵列稀疏化引起的栅瓣伪影。

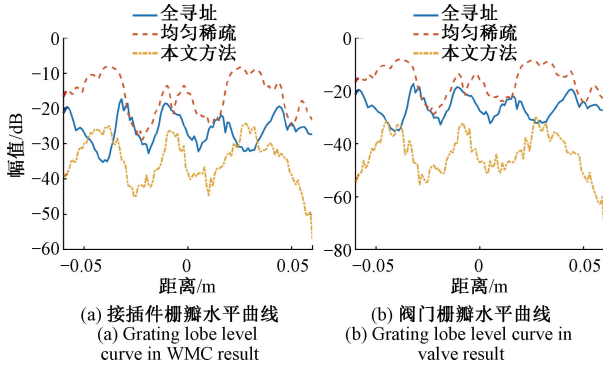


图 15 栅瓣水平变化曲线

Fig. 15 Grating lobe level curve

设备端采集的原始 FMC 数据量对比结果如表 4 所示。FMC 数据量直接影响传输带宽,过大的原始数据将显著降低从采集设备到上位机的传输效率。其次,庞大的 FMC 数据还会占用大量 GPU 显存,进而影响 CUDA 并行重建效率,导致整体成像流程出现性能瓶颈。所提出的稀疏阵列策略有效降低了原始数据量,从源头上缓解了数据传输和存储压力,从而提升了三维图像的重建效率。

表 4 不同方法的全矩阵数据量

Table 4 The data volume from different methods

试件	方法	数据大小/MB
湿插拔连接器	FA-TFM	289.25
	US-TFM	72.31
	本文方法	72.31
阀门	FS-TFM	350.75
	US-TFM	87.69
	本文方法	87.69

图 16 展示了 FA-TFM 与本文方法在 GPU 异构平台上的内存占用及单帧重建时间随体素规模的变化趋势(A-scan 采样点数为 4 000)。测试结果表明,本文方法结合面向 GPU 的异构计算架构,在保持成像质量的同时,实现了内存与时间开销的显著下降。与传统方法相比,在相同体素规模下,本文方法的内存占用量降低了一

个数量级,重建时间缩短至约 1/4。该性能分析为系统在资源受限平台(如嵌入式 GPU 或移动工作站)上的实际部署提供了可量化的评估依据。

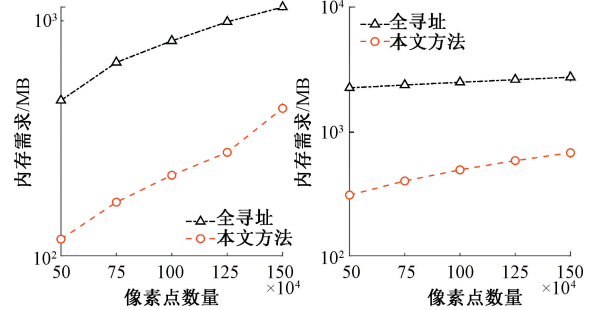


图 16 不同像素数量下 FA-TFM 和所提出方法的成像时间以及内存消耗

Fig. 16 Imaging times and memory requirements of FA-TFM and the proposed method under different pixel counts

综上,本文提出的三维精细化超声成像方法有效克服了传统光学视觉在极端海洋环境下感知失效的限制,实现了浑浊水体目标的高精度感知。相比经典的 FA-TFM 方法,所提方法的信噪比提升约 20 dB,图像重建效率提高 3 倍。提出的自适应指向特性校正算法与基于符号相干加权的互相关波束成形算法,有效抑制了强指向性与周期性稀疏阵列引起的栅瓣伪影及噪声干扰,显著提升了图像质量和系统实用性。

4 结 论

本文提出了一种基于稀疏阵列的实时三维精细化超声成像方法,旨在为极端海洋环境下车载机械臂的伺服作业提供可靠的感知信息支持。首先通过均匀稀疏策略对全寻址阵列进行空间降采样,显著降低了三维成像系统的数据量与计算负担,提升了图像重建效率。在此基础上,提出自适应指向特性校正算法与基于符号相干加权的互相关波束成形算法,有效抑制了强指向特性和周期性稀疏策略所引发的旁瓣伪影,从而提升了成像分辨率与信噪比。最终,将完整算法部署至 GPU 并行计算平台,实现了实时成像处理。该方法为复杂水体环境下的机械臂精细化作业感知提供了切实可行的解决方案,也为水下作业感知系统的发展提供了新的技术路径。

PSF 仿真结果表明,所提方法在分辨率、信噪比等关键成像性能指标上,均显著优于传统的 FA-TFM 和 US-TFM 方法,能够生成更高质量的图像。进一步地,本文在充满泥沙的浑浊水体中对大型深海设备中的关键部件——湿插拔连接器与阀门开展了成像实验,并与光学成像结果进行对比验证结果表明,泥沙与悬浮颗粒对光信号的强散射与衰减作用导致光学成像系统出现严重性能

退化,无法获取有效图像信息。相比之下,所提出的三维精细化超声感知方法不仅成功获取了两种结构的清晰空间图像,还实现了高效实时成像,充分验证了其在极端水体环境中的显著适应性与工程应用潜力。

未来工作将致力于将提出的成像方法与硬件采集系统深度集成,构建完整的水下三维超声感知系统。结合车载机械臂平台,计划开展浑浊水体环境下湿插拔连接器的对接与断开、以及阀门启闭等典型作业任务的验证实验,进一步评估其在真实工程场景中的实用性与稳定性。

参考文献

- [1] 李智, 杨士莪. 水声矢量传感器研究进展与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 1-19.
LI ZH, YANG SH E. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 1-19.
- [2] 陈昱衡, 张海成, 邹伟生, 等. 一种 ROV 型深海矿物采集装置的路径跟踪控制方法[J]. 船舶力学, 2024, 28(11): 1687-1699.
CHEN Y H, ZHANG H CH, ZOU W SH, et al. Path tracking method for ROV deep-sea mining equipment[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(11): 1687-1699.
- [3] HUY D Q, SADJOLI N, AZAM A B, et al. Object perception in underwater environments: A survey on sensors and sensing methodologies[J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113202.
- [4] 徐璠, 王贺升. 软体机械臂水下自适应鲁棒视觉伺服[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 744-753.
XU F, WANG H SH. Adaptive robust visual servoing control of a soft manipulator in underwater environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 744-753.
- [5] 刘玉红, 张大卫, 苑满星, 等. 面向 AUV 水下回收的仿花瓣机械爪设计与水池试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(5): 462-468.
LIU Y H, ZHANG D W, YUAN M X, et al. Design and tank tests of a petal-inspired robot hand for AUV underwater recovery[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2025, 58(5): 462-468.
- [6] 彭磊. 基于目标检测的水下清污机械臂视觉伺服系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
PENG L. Research on visual servo system of underwater cleaning manipulator based on target detection [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [7] 王亚博. 基于海洋环境感知的 UUV 探测任务自主控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
WANG Y B. Research on autonomous control methods for UUV exploration tasks based on marine environment perception[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [8] BU S W, YAN L, GAO X SH, et al. Vision-guided manipulator operating system based on CSRT algorithm[J]. International Journal of Hydromechanics, 2022, 5(3): 260-274.
- [9] BONIN-FONT F, OLIVER G, WIRTH S, et al. Visual sensing for autonomous underwater exploration and intervention tasks[J]. Ocean Engineering, 2015, 93: 25-44.
- [10] 祝志坤, 卢丙举, 李一辰, 等. 基于单双目融合的 AUV 坐落式回收光视觉引导算法[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 28-37.
ZHU ZH K, LU B J, LI Y CH, et al. Light visual guidance algorithm for AUV situated recovery based on monocular and binocular fusion [J]. Control and Decision, 2025, 40(1): 28-37.
- [11] 阳雨妍, 宋爱国. 基于视触融合的遥操作机器人虚拟环境几何学建模修正方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 101-111.
YANG Y Y, SONG AI G. Geometric modeling and modification method for virtual environment of telerobot based on visual-tactile fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 101-111.
- [12] XIE X H, ZHU CH Y, XIE M. Visual tracking control of SCARA robot system based on deep learning and Kalman prediction method [J]. International Journal of Hydro-mechanics, 2021, 4(4): 384-396.
- [13] LI Y. Position and time-delay calibration of transducer elements in a sparse array for underwater ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53(8): 1458-1467.
- [14] 左震, 黄泓赫, 孙备, 等. 基于无人艇载侧扫声呐的水下目标定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 310-319.
ZUO ZH, HUANG H H, SUN B, et al. Research on underwater target location based on side-scan sonar carried by unmanned surface vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 310-319.
- [15] 高家伟, 周天, 杜伟东, 等. 基于相位特征的多波束测深声呐多回波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 193-203.
GAO J W, ZHOU T, DU W D, et al. Research on the multi echo detection method of multi beam sounding sonar based on phase characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 193-203.

- [16] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 701-711.
- [17] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(8): 1541-1550.
- [18] 胡宏伟, 杜剑, 李洋, 等. 基于稀疏矩阵的两层介质超声相控阵全聚焦成像[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(14): 128-135.
HU H W, DU J, LI Y, et al. Two-layer medium ultrasonic phased array total focusing method imaging based on sparse matrix [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(14): 128-135.
- [19] MOREAU L, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(9): 1932-1944.
- [20] TAMRAOUI M, LIEBGOTT H, ROUX E. Complete complementary coded excitation scheme for SNR improvement of 2D sparse array ultrasound imaging[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023, 71(3): 1043-1055.
- [21] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. *NDT & E International*, 2006, 39(7): 525-541.
- [22] RÉMOUIT F, RUIZ-MINGUELA P, ENGSTRÖM J. Review of electrical connectors for underwater applications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 43(4): 1037-1047.
- [23] SONG W T, CUI W CH. An overview of underwater connectors[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 813.
- [24] MA X ZH, CHEN M, GU X, et al. Multi-mode plane wave imaging based full-section inspection for ultra-thick welds with the compact array [J]. *Ultrasonics*, 2025, 155: 107727.

作者简介



马新智, 2023年于长安大学获得学士学位, 现于浙江大学机械工程学院攻读博士学位, 主要研究方向为超声无损成像。

E-mail: 12325090@zju.edu.cn

Ma Xinzhì received his B. Sc. degree from Chang'an University in 2023. He is currently a Ph. D. candidate with the School of Mechanical Engineering at

Zhejiang University. His main research interest includes ultrasonic non-destructive testing and ultrasonic imaging.



方博堃, 2023年于南京农业大学获得学士学位, 现为于浙江大学机械工程学院攻读博士学位, 主要研究方向为复合材料超声无损检测以及水下超声成像。

E-mail: 12325089@zju.edu.cn

Fang Bokun received his B. Sc. degree from Nanjing Agricultural University in 2023. He is currently a Ph. D. candidate with the School of Mechanical Engineering at Zhejiang University. His main research interests include underwater ultrasonic imaging and ultrasonic non-destructive testing of composite materials.



梅德庆, 1995年于西安电子科技大学获得学士学位, 2000年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学机械工程学院教授, 主要研究方向为水下机器人与智能运维。

E-mail: medqmei@zju.edu.cn

Mei Deqing received his B. Sc. degree from Xidian University in 1995 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2000. He is currently a professor at the School of Mechanical Engineering, Zhejiang University. His main research interests include underwater robots and intelligent operation and maintenance.



袁龙春, 2002年于四川大学获得学士学位, 现就职于国家管网集团(徐州)管道检验检测有限公司, 主要从事科研项目管理工作。

E-mail: yuanlc@pipechina.com.cn

Yuan Longchun received his B. Sc. degrees from Sichuan University in 2002. He is currently employed at Pipe China (Xuzhou) Pipeline Inspection and Testing Co., Ltd. He mainly engaged in scientific research project management work.



金浩然(通信作者), 2012年于浙江大学获得学士学位, 2017年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学机械工程学院研究员, 主要研究方向为超声无损检测、机器人超声成像、超声无损检测、医疗超声。

E-mail: jinhr@zju.edu.cn

Jin Haoran (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Zhejiang University in 2012 and 2017, respectively. He is currently a researcher with the School of Mechanical Engineering at Zhejiang University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and evaluation, robotic ultrasonic imaging, and medical ultrasonics.