

主动电场线型电极阵列扫描成像方法研究



蒋淘宇, 彭杰钢*, 韩远见

(电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

摘要 水下主动电场幅值法成像的灵感源于弱电鱼主动发射电信号识别周围环境这种生物机制。目前的主动水下成像技术在复杂黑暗的水下环境下仍有一定缺陷, 因此一种新的解决方案被提出, 即利用水下主动电场原理识别完成短距离目标物体复杂形状的成像。针对此前电极阵列覆盖有限、成像分辨率较小、对较大物体成像时电极数量多造成的成本较高以及缺少对复杂几何特征物体成像的实例等问题, 设计了线型电极阵列连续运动扫描并采集数据的幅值成像平台, 来对实验物体不同体积大小、不同材质及复杂形状进行成像, 并对比结果, 最后研究了如何根据横纵向幅值积分斜率曲线的最值点, 提取成像图片中的物体位置和面积信息。实验结果证实了基于主动电场原理的线型电极阵列运动扫描幅值成像方法的有效性。与传统的主动电场成像方法相比, 该方法不仅降低了硬件成本, 还提高了成像的效率和分辨率。此外, 该方法为主动电场成像技术的进一步工程化应用提供了一种实用的解决方案, 优化了水下物体的成像过程, 展示了其在复杂水域环境中的应用潜力。

关键词 主动电场成像; 线型电极阵列; 运动扫描; 面积估算

中图分类号 TP23

文献标志码 A

DOI 10.12178/1001-0548.2023211

Research on Imaging Method of Linear Electrode Array Scanning Based on Active Electric Field

JIANG Taoyu, PENG Jiegang*, and HAN Yuanjian

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract The inspiration for imaging using the underwater active electric field amplitude method comes from the biological mechanism where weakly electric fish actively emit electrical signals to detect the surrounding environment. Current active underwater imaging techniques still have certain shortcomings in complex, dark underwater environments. Hence, a solution has been proposed, utilizing the principle of the underwater active electric field to identify and image the complex shapes of short-range target objects. To address previous issues such as limited coverage of electrode arrays, low imaging resolution, high costs due to the large number of electrodes needed for imaging larger objects, and the lack of examples for imaging objects with complex geometric features, a platform was designed featuring a linear electrode array that continuously moves, scans, and collects data for amplitude imaging. This platform is used to image experimental objects of various sizes, materials, and complex shapes, and to compare results. It also explores how to extract the position and area information of objects in the imaging pictures by analyzing the extreme points of the amplitude integral slope curves in both horizontal and vertical directions. Experimental results confirm the effectiveness of the amplitude imaging method based on the active electric field principle using a linear electrode array motion scan. Compared to traditional active electric field imaging methods, this proposed method not only significantly reduces hardware costs but also greatly enhances imaging efficiency and resolution. Additionally, this approach provides a practical solution for the further engineering application of active electric field imaging technology. This approach significantly optimizes the imaging process of underwater objects, demonstrating its potential applications in complex aquatic environments.

Key words active electric field imaging; linear electrode arrays; motion scanning; area estimation

水下探测领域一直是科学家和工程师研究的重点领域, 水下探测技术的发展程度更是体现了大国的核心科技竞争力^[1]。其中水下成像技术作为水下

探测领域中的关键技术, 被广泛应用于水下探测、水下机器人和水下救援任务等多个领域当中^[2]。

目前主流的获取水下物体轮廓形状及图像的方

收稿日期: 2023-08-17; 修回日期: 2023-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(62273075); 四川省自然科学基金(2022NSFSC0800)

作者简介: 蒋淘宇, 主要从事水下主动电场方面的研究。

*通信作者 E-mail: pengjiegang@uestc.edu.cn

法有水下光学成像、水下声纳成像两种^[3-6]。但这两种方法在复杂黑暗的水下环境中都有其缺陷,如水下光学成像方法会由于水下浮游生物及藻类的存在导致太阳光散射、反射甚至吸收,而受到直接影响^[7];水下声纳成像方法的空间分辨率较差,水声效应影响显著,探索很小目标时比较困难^[8]。水下主动电场成像,其灵感源于弱电鱼主动发射电信号识别周围环境这种生物机制^[9-12],经过对弱电鱼主动电场定位器官的深入研究,仿生传感器研究者借鉴其主动电场原理,成功开发了一系列传感器。这些传感器已在多种应用场景中得到利用,包括水下物体定位^[13-15]、水下导航^[16]、液体管道检测^[17]、水下机器人避障^[18]、水下物体识别^[19]以及水下对接定位^[20-22]。特别地,这种技术在物理机制上不受水体环境的影响,适用于在水下黑暗和浑浊的环境中工作。利用这一特性,文献[23-24]成功实现了复杂水域中短距离目标物体形状的精确成像,从而为水下成像技术提供了一种创新的解决方案。

主动电场电极阵列幅值法成像的原理基于将测试物体放置在已建立的水下主动探测电场中时,水中物体会干扰电场的正常传播,导致接收电极阵列检测到的电压幅值因物体的存在而发生显著变化。这种幅值的变化不仅与物体的性质和几何特征相关,还受到电极排布和水体环境的影响^[25-27],将这种幅值变化与电极位置信息结合起来,即可描绘出图像。

文献[12]利用传感器阵列获得主动电场电压幅值,来测绘水中塑料小球的图像。但是该工作未对复杂几何形状和不同材料的物体的成像进行研究。文献[24]使用7×7接收电极阵列仿生弱电鱼生物机制,短距离内获取了物体作用电场产生扰动的“电子图像”,并提出使用一种名为“电子轮廓”的定义描述物体形状。该验证工作由于接收电极较少,使得成像效果不理想。水下主动电场电极阵列成像集成是一个极其复杂的系统工程,利用面型电极阵列对物体进行成像时,为了保证足够的成像精度,往往需要数量较多的电极阵列,且为了保证成像分辨率,其电极排列间隔不能太大,这需要高昂的成本代价。

因此,本文就现有水下电场成像方式硬件复杂、成本高、效果差以及无针对不同材料的复杂几何特征物体进行成像的研究等问题进行改进。本文提出基于线性电极阵列运动扫描测量区域内不同位置幅值变化的方法,对不同材料的复杂几何形状的水下物体进行成像,核心思想是用线性阵列接收电

极集成阵列,通过连续运动的方法持续采集数据,代替手工定点采集,提高了对水中物体成像的效率,并解决了以往多方向往复运动和定点暂停采集数据效率低的问题^[21],同时解决了文献[24]的7×7电极阵列区域覆盖有限且物体形状较小等问题。本文为主动水下电场成像方法提供了一种实用思路,为主动水下电场的运用提供了可能的应用方法。

1 线性电极阵列扫描成像平台构建

根据实验需求构建出水下主动电场的线型电极阵列运动扫描成像平台结构框图,如图1所示。

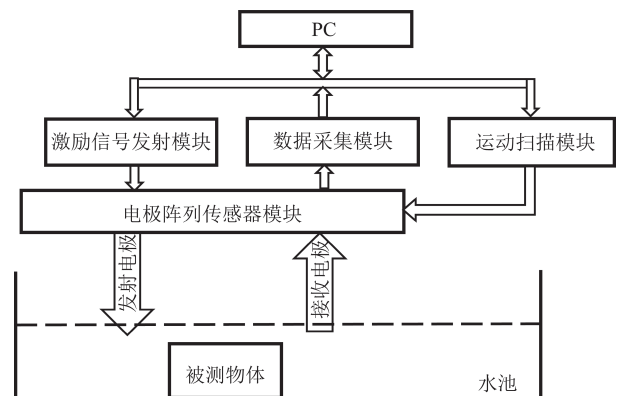


图1 电极阵列扫描成像平台结构框图

1.1 成像平台的硬件设计

成像系统硬件主要包括以下5个模块:线型电极阵列传感器模块、激励信号发射模块、运动扫描模块、数据采集及分析模块和水环境及实验物体模块。成像流程如下:首先,激励信号在水中建立水下主动电场环境;接着,数据采集卡开始测量电压数据并记录;最后,线型电极阵列装置运动扫描一定区域的水环境,实现水平面上的多点电压采集,来对物体进行成像。

线型电极传感器阵列结构设计如图2所示,包括固定板和滑动板两部分组成,并集成了一对发射电极和4对接收电极。发射电极正负极分别位于固定板两端,用于传导信号建立电场,4对接收电极分布于滑动板之上,用于接收不同位置的电压信号,并使用差分输入端子横向排列的测量方式。固定板上有4个等距的“三孔固定孔”,用于固定滑动板在这4个位置进行纵向运动扫描,从而提高水下主动电场成像横向、纵向分辨率和成像区域面积,解决了数据采集卡模拟信号输入端不够的问题。每个接收电极孔之间的距离为10mm,总长度为320mm。

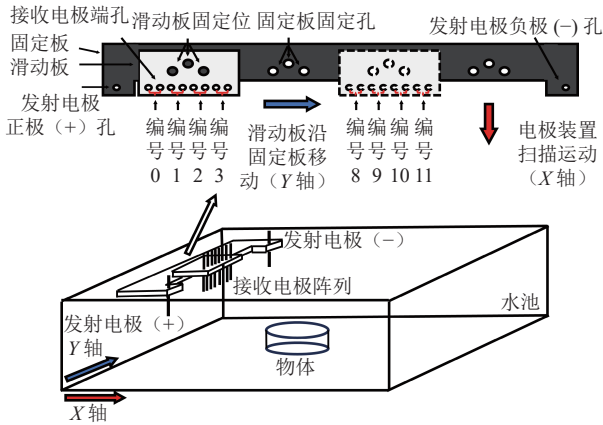


图 2 线型电极阵列传感器装置结构图

运动扫描成像过程如图 3 所示。实验开始前。将装置上的电极浸入水中，电极阵列传感器装置固定于三轴运动装置上，先沿水平 X 轴方向匀速运动扫描，运动过程中发射电极建立的电场与电极装置同步运动，与此同时数据采集卡同步采集数据，并记录存储不同时间点（位置点）的电压数据。

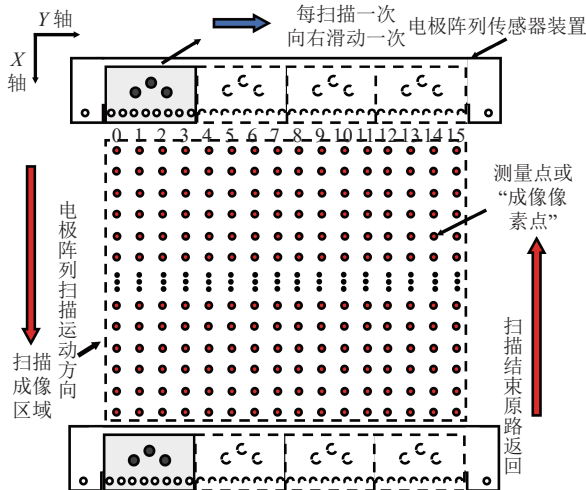


图 3 运动扫描示意图

单次扫描完成后，暂停数据采集卡的采集功能，此时可以得到 4 列（编号 0~3、4~7、8~11、12~15）不同扫描位置点的成像点幅值信息，待返回线型电极阵列至初始位置，随后将滑动板向水平 Y 轴滑动一个位置，开始进行第二次扫描，直至完成所有 16 列（0~15）幅值信息采集。实验装置通过程序控制电机来精确控制扫描间距，从而确保扫描获得的信息等同于一个由 32 个电极组成的均匀分布的矩形阵列所获得的 16 路差分电压信息。这样处理后，可以获取构建二维平面图像所需的电场信息。

激励信号发射模块包括信号发生器 HDG2102B

和功率放大器 ATA-308，数据采集及分析模块包括数据采集卡 USB-6636 和 PC，水环境及实验物体模块包括水槽和多组实验物体，水槽注入定量水用于建立水下电场环境，设置多组被测物体，主要用于研究物体的特征（体积大小、组成材质、复杂形状）对成像的影响。

1.2 成像平台的软件设计

成像平台的软件部分借助 LabVIEW 软件和 Python 完成，主要包括以下 3 个模块：实验数据采集模块、实验数据分析处理模块和幅值成像模块。

实验数据采集模块流程如下，采集过程需要将电压数据按通道编号写入到 TDMS 文件的通道中，最后判断是否完成了 16 组电压数据的采集。如果没有完成则滑动线型接收电极沿 Y 轴至下一位置，重复启动数据采集卡和三轴运动装置正向运动，直至完成 16 组电压数据的采集，结束程序运行。

实验数据分析处理模块，对采集到的时域波形电压信号经过 STFT 短时傅里叶变换转化到频域进行分析处理，且为了能消除其他频率的干扰，只对激励信号频率下的幅值进行分析。幅值成像模块中的成像原理是计算物体处于电场前后各位置点处的幅值信息差值，来对物体形状进行成像。定义一个概念为距离分辨率，是成像点数与物理长度的比值，则 Y 轴方向距离分辨率为 $16/320=0.05$ 点/mm。X 轴方向距离分辨率和 STFT 处理密切相关，假设线型电极装置沿 X 轴运动了 L mm，运行速度为 V ，采样频率为 F_s ，单位为 Hz，STFT 变换的窗函数长度为 N （假设窗函数重合率为 0），则 X 轴方向的成像点数为 $M = F_s \times L / (N \times V)$ 距离分辨率为 $F_s / (N \times V)$ ，仅与 F_s 、 N 和 V 有关系。

借助 Python 编写成像算法。设成像点的坐标为 $((x, y), \lambda)$ ，其中 x 表示横坐标数值， y 表示纵坐标数值， λ 表示幅值数值。Y 轴的成像点数为 16 个，X 轴成像点数为 M 个，则每个成像点的坐标可以表示成 $((x_i, y_j), \lambda_{ij})$ ，其中 $i \in (0, M)$ ， i 为整数； $j \in (0, 16)$ ， j 为整数。使用 Python 的绘图工具根据各成像点的坐标数据确定成像点的位置，根据 λ_{ij} 数值确定该位置点的着色颜色，就能够对物体形状进行成像。

2 线型电极阵列扫描成像实验

实验中水介质的电导率为 $318 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，长方形水槽的尺寸为 $90 \text{ cm} \times 57 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 。信号发生器产

生频率为 500 Hz, 幅值为 5 V 的正弦信号, 功率放大器设置为放大 20 倍, 输出功率约为 10 W。三轴运动装置的速度设置为 2 cm/s, 成像装置 X 轴的最大行程为 480 mm。数据采集卡的采样频率为 10 kHz, 满足奈奎斯特采样定理。

将实验物体放置于水槽中心位置, 线型电极传感器装置的接收电极和发射电极导电端浸于水中并能够在物体上方连续水平移动, 且均使用直径为 6 mm 的钛金属片电极。本文使用线型电极阵列装置扫描两次成像区域, 第一次扫描为无物体放置, 第二次扫描为有物体放置于水环境中, 数据处理过程中, 只需要将两次的扫描幅值信息相减, 就能得出较好的成像图像。

3 实验结果分析

3.1 物体不同体积大小下的成像结果对比

实验设置 3 组不同体积大小的铝四棱柱作为实验物体, 研究体积大小对幅值成像的影响。3 组四棱柱的尺寸依次为 50 mm×50 mm×50 mm、100 mm×100 mm×50 mm、150 mm×150 mm×50 mm。将 STFT 窗函数长度设置为 5 000, 则 X 轴生成 36 个成像点, 距离分辨率为 36 点/480 mm=0.075 点/mm, Y 轴方向距离分辨率为 0.05 点/mm, 成像时将 X 轴作为横向, Y 轴作为纵向, 则横纵距离分辨率之比为 3:2, 因此在绘制平面颜色映射图时要保证成像颜色块的横纵比例为 3:2, 才能显示出物体真实比例的形状。图 4 为不同尺寸的铝四棱柱的线型电极阵列扫描成像曲面幅值图和无物体环境对照。

图 4a 中发现当成像区域中无物体时, 幅值曲面虽然凹凸不平, 但相比于图 4b 和图 4c 曲面起伏波动不大。图 4b 和图 4c 中均出现了一定程度的凹陷, 这种凹陷是金属铝四棱柱存在于电场中引起的, 且最低幅值数值相差不大, 差异在于凹陷的面积不一致, 凹陷面积随着物体体积的增大而增大。绘制这 3 个四棱柱的幅值信息颜色映射二维图, 如图 5 所示。

观察图 5a 的成像结果, 当无物体存在时, 图像中没有明显的形状信息, 成像区域由无规律的像素点构成。对比图 5b 和图 5c, 可以观察到物体形状越大, 图像中的深色区域相应增大, 并且图像形状近似为正方形, 这进一步证明了扫描成像方法的有效性。通过分析, 发现图像呈现为长方形而非物体的正方形截面, 这种变形可能是由于系统在运动

扫描过程中电机实际运行距离的控制误差引起的。此外, 数据处理过程中的计算误差也可能是导致图像变形的另一个因素。

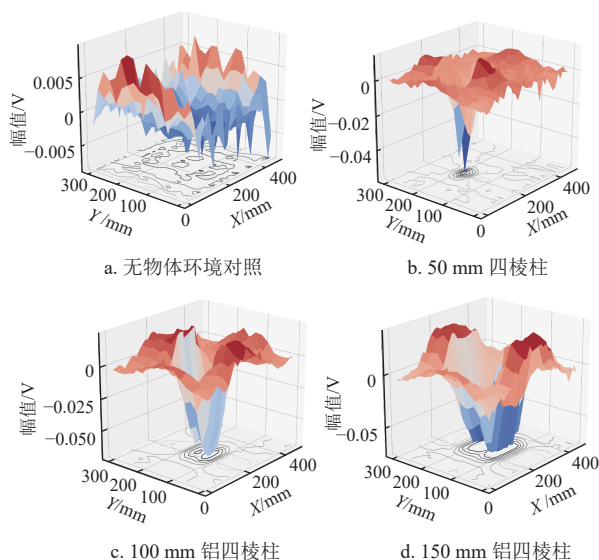


图 4 不同尺寸的铝四棱柱扫描幅值成像三维曲面图

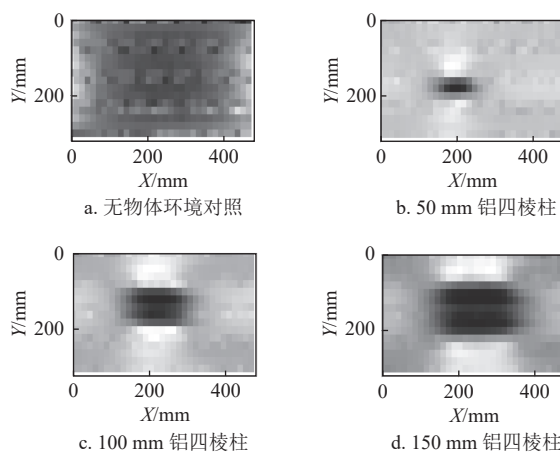


图 5 不同尺寸的铝四棱柱扫描幅值成像二维幅值颜色映射

3.2 不同材质的实验物体成像结果对比

扩大实验物体的范围, 研究不同材质的物体成像结果。其中圆弧形状的物体是最难成像的, 对像素点数目要求较高, 实验中设置 3 组不同材质的圆弧型物体, 分别为铁材质的锈蚀金属圆盘、聚合材质的有机物质圆盘、铝材质的金属圆环。铁金属圆盘和聚合有机物质圆盘的尺寸一致, 直径为 120 mm, 厚度为 10 mm, 圆环的外直径 200 mm, 高 105 mm, 圆环厚度为 12 mm。

图 6 为 3 组不同材质的圆弧形物体的线型电极

阵列扫描成像曲面幅值图和无物体环境对照的三维曲面图。

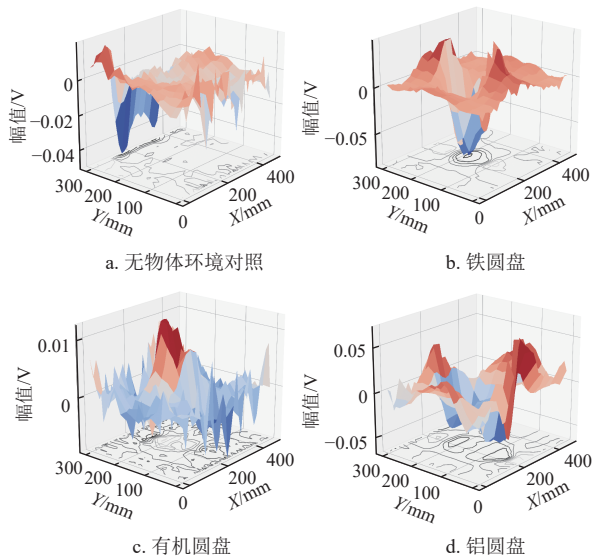


图6 不同材质物体扫描幅值成像三维曲面图

对比观察发现图6a(无物体情况)显示其边缘附近存在一定误差,而其他区域的幅值曲面比较平坦;图6b(铁圆盘物体),幅值曲面呈现了明显的凹陷,且凹陷深度超过了铝圆环;图6c(有机圆盘物体)的图像展现了凸起特征,但凸起程度相对平坦。相比之下,图6d(铝圆环物体)中的凹陷区域最为显著。绘制这3个实验物体的幅值颜色映射二维图,如图7所示。

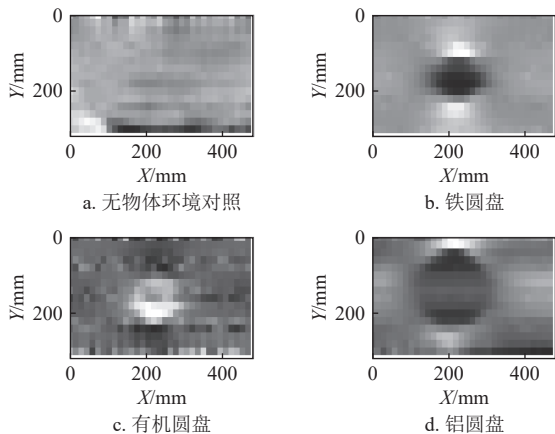


图7 不同材质物体扫描幅值成像二维颜色映射图

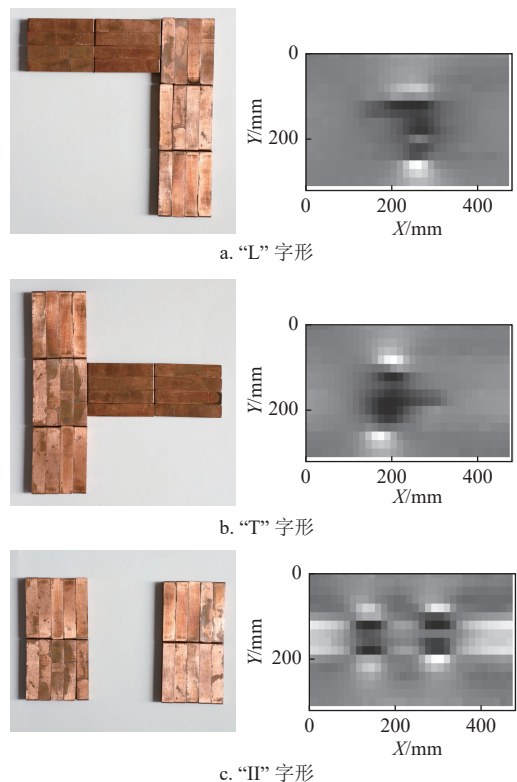
观察图7a,发现没有明显几何特征的形状,像素点颜色无明显变化规律,图7b和图7d中成像结果为近似圆形的暗色区域,而图7c为近似圆形的亮色区域,这是因为成像算法中幅值大于零为明亮色,小于零为暗黑色。图7b和图7c中成像区域

面积近似相等,这符合铁金属和有机聚合物圆盘的尺寸大小一致。图6d成像面积明显要大于图7b和图7c,且可以发现其圆周的颜色亮度比中间的颜色亮度暗,表征了物体是圆环形状而不是圆盘形状。

上述的实验结果表明,线型电极阵列运动扫描幅值成像方法能够对金属和非金属的材质进行成像。金属铁对电场的扰动高于铝和有机材质,金属材质物体的三维幅值曲面图表现为向下凹陷,有机材质物体的三维幅值曲面图表现为向上凸起。

3.3 复杂形状物体的成像结果对比

设置多组复杂多变形状来验证成像系统的可行性。使用多个立方体小铜柱拼凑出复杂的形状,小铜柱的体积尺寸为10 mm×10 mm×50 mm,共20个。拼凑出的形状分别为“L”字形、“T”字形、“I”字形及“口”字形。图8为4种复杂形状的幅值颜色映射图和实物图。图8a~8b中左图均为小铜柱拼凑的实物图,右图均为实物对应成像的幅值映射颜色图。观察图8a中“L”字形物体成像形状,具有明显横竖折弯形状,大致能反映出物体“L”变化的形状。观察图8b中的“T”字形物体成像形状,具有明显的变化形状。同样,观察图8c和图8d中的成像结果,均能表征出实物的形状。



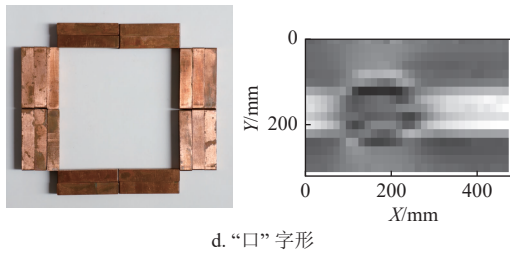


图 8 4 种复杂形状的实物图和成像幅值颜色映射图

3.4 物体位置及面积估算研究

经过实验验证了基于线型电极阵列集成扫描的方式能够对水下物体的形状进行成像。接下来思考能否根据幅值信息对成像图片提取出物体的其他特性信息，如位置信息、物体暴露于电场内的面积信息，并且实现量化描述。本文发现物体成像的轮廓区域亮度明显低于周围环境成像亮度，如果能够使用一个特定的阈值参数分割出这种亮度变化，就能够计算物体的位置信息。为了验证此想法，以边长 100 mm 的四棱柱的实验数据为例，绘制横纵轴向上的积分曲线和积分曲线求导后的斜率曲线，如图 9 所示。

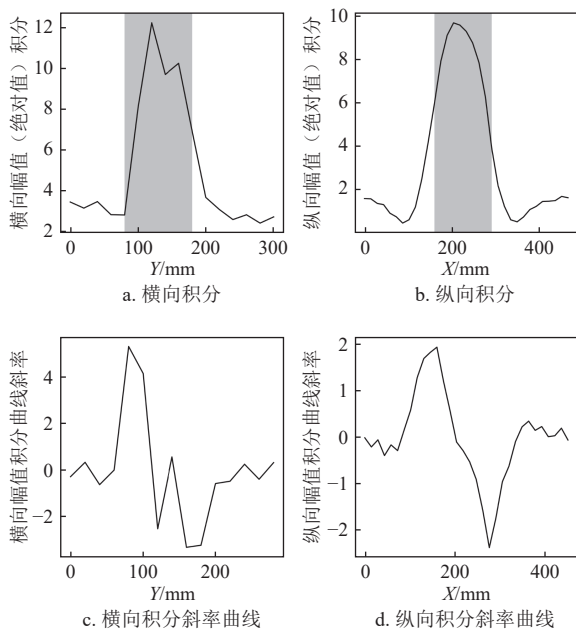


图 9 横纵轴向上的积分曲线和求导后斜率曲线

图 9a 和图 9b 中横纵两个方向幅值绝对值积分曲线均出现明显峰值，峰值是物体对水下主动电场扰动量的反映，扰动量越大峰值越高，扰动面积越大，峰值的宽度越宽。通过斜率曲线中的最大值和最小值就能确定积分曲线中变化趋势最大的点，此点是映射图中明暗像素点变化最大的点，可以认为

是物体成像的边界分割阈值。图 9a 和图 9b 中的灰色阴影区域即为使用图 9c 和图 9d 中曲线最大值和最小值数值框选的。首先，通过确定图 9c 和图 9d 中斜率曲线的最大值和最小值，可以获得相应的横坐标。然后，将这些坐标信息导入至二维成像图中，从而可以准确地定位物体在扫描区域中的位置。

图 10 分别使用 4 个不同体积大小的物体作为实验被测对象，图 10a~10d 分别对应的物体边长为 30 mm、50 mm、100 mm、150 mm。观察发现图中紫色阴影交叠区域能够覆盖物体的成像区域，已知成像点的纵横距离分辨率，计算物体位置，具体坐标数值如表 1 所示。计算每个像素点的面积约为 266 mm^2 ，因此可以根据阴影交叠面积大致估算出物体的横截面面积尺寸，具体数值如表 1 所示。随着物体体积增大，算法计算的面积误差率逐渐降低。面积估算的误差原因很多，如在选择区域分割阈值时是否合适，横向扫描的运动距离是否精准，像素点的物理面积计算是否准确，都决定着面积误差估计。需要注意的是，图 9 的水平竖直阴影交叠面积估算只能针对水平放置形状规则的四棱柱，更复杂形状的物体的面积估算，需要根据对图像进行分割才能进行面积估算，本文的面积估算只是初步研究。

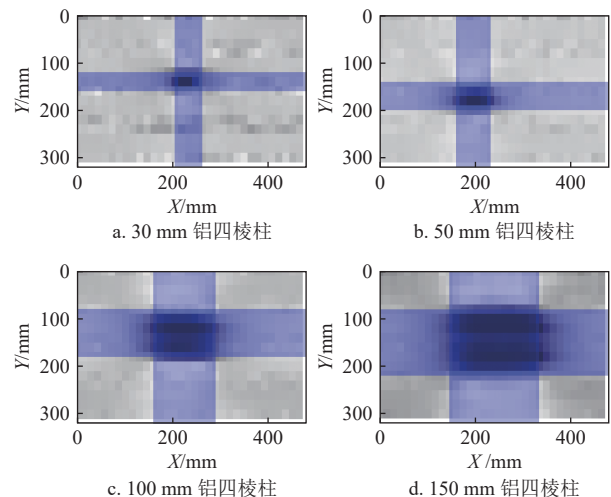


图 10 不同体积大小物体位置计算结果

表 1 不同物体的位置估算和面积估算

边长 /mm	左边缘 /mm	右边缘 /mm	上边缘 /mm	下边缘 /mm	实际面积 /mm ²	测量面积 /mm ²	误差 /%
30	204	262	120	160	900	2 327	159
50	160	233	140	200	2 500	4 364	75
100	160	291	80	180	10 000	13 091	31
150	145	335	80	220	22 500	26 473	18

4 结束语

根据以上实验结果, 并对比以往工作, 可以对主动电场原理的线型电极阵列运动扫描成像研究得出以下结论。

1) 在对不同体积大小的物体进行成像时, 物体越大, 成像效果越好, 如果物体太小, 会变得难以成像, 这与单位面积的电极数量即成像分辨率有关。文献 [24] 利用 7×7 的面型电极阵列, 实现了约 10 cm^2 的成像面积, 但成像效果不太理想, 而本文中仅用 4 对接收电极差分采集方式完成了约 1500 cm^2 的成像面积, 且成像效果较显著。一定区域下, 要想对小物体成像, 则需增加大量电极数量, 对成本要求太高。本文提出的线型电极阵列运动扫描方法, 用较少数量的电极和采集通道, 可推断只需减小电极间距及运动扫描间隔, 即可提高成像分辨率, 还可以大大增加成像覆盖区域面积。以往工作中, 对于网格区域的数据采集, 均采用多方向往复运动和定点暂停采集数据的实验方法, 时间成本极高^[21], 采用自动运动加同步扫描采集的方法缩短了 10 倍以上的实验时间, 大大提高了成像效率, 且后续可继续深入研究实现实时成像、同步分析等工作。

2) 主动电场幅值成像方法能够对金属和非金属材质的物体进行成像。由于这两种材质的物体对电场产生的幅值变化具有不同的特性, 因此能够在成像结果中明显区分这些物体。这一特性在实际应用中具有重要的价值。

3) 这种方法不仅能够对复杂形状的物体进行成像, 而且本文还提出了一种新算法。该算法通过对幅值的绝对值积分曲线求导, 能够在成像图像中定量估算物体的位置和面积。这一技术对于工程应用具有显著的价值。

主动电场成像方法作为一种应用在浑浊、复杂、黑暗的水下环境中的新型成像技术, 具有广阔的应用前景, 为水下成像技术提供了新思路。

本研究提出了一种线型电极阵列运动扫描成像方法, 该方法克服了现有水下电场成像技术的多项局限性, 包括有限的覆盖区域、硬件复杂性、高成本以及效果不佳等问题。通过采用自动运动扫描替代传统的手动定点采集, 本方法能有效成像不同材料构成的复杂几何特征物体, 显著提高了成像效率与分辨率。此外, 本研究为主动水下电场成像技术提供了一种实用方法。本文还进一步利用电压幅值

数据信息在成像图片中对物体的位置和面积进行了量化提取, 并提出未来研究方向, 探讨如何对不规则形状物体进行精确估算并实现实时成像, 为该领域的进一步研究提出了新的可能。

参考文献

- [1] 吴天元, 江丽霞, 崔光磊. 水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 898-909.
WU T Y, JIANG L X, CUI G L. Status and trends of energy power supply technologies for underwater equipment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 898-909.
- [2] 赵永强, 戴慧敏, 申凌皓, 等. 水下偏振清晰成像方法综述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 43-53.
ZHAO Y Q, DAI H M, SHEN L H, et al. Review of underwater polarization clear imaging methods[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 43-53.
- [3] 陈哲, 周旭, 沈洁, 等. 基于梯度先验的水下图像恢复[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 39-46.
CHEN Z, ZHOU X, SHEN J, et al. Underwater image restoration based on gradient prior[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 39-46.
- [4] JIAN M W, LIU X Y, LUO H J, et al. Underwater image processing and analysis: A review[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 91: 116088.
- [5] 李鹏, 郑大成, 徐丽华, 等. 稀疏基阵水下声成像的压缩感知方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1843-1850.
LI P, ZHENG T C, XU L H, et al. Compressive sensing method for underwater acoustic imaging using sparse array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1843-1850.
- [6] 管风, 韩宏伟, 张晓晖. 水下目标激光成像的可视化模型[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 506-513.
GUAN F, HAN H W, ZHANG X H. Model for visualization of laser imaging of underwater targets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 506-513.
- [7] SHEN Y, ZHAO C J, LIU Y, et al. Underwater optical imaging: Key technologies and applications review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 85500-85514.
- [8] 黄海宁, 李宇. 水声目标探测技术研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 264-271.
HUANG H N, LI Y. Underwater acoustic detection: Current status and future trends[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 264-271.
- [9] LISSMANN H W, MACHIN K E. The mechanism of object location in *Gymnarchus niloticus* and similar fish[J]. Journal of Experimental Biology, 1958, 35(2): 451.
- [10] CAPUTI A A, BUDELLI R, GRANT K, et al. The electric image in weakly electric fish: physical images of resistive objects in *Gnathonemus petersii*[J]. The Journal of Experimental Biology, 1998, 201(14): 2115-2128.
- [11] GERHARD V D E. Non-visual environmental imaging and object detection through active electrolocation in weakly electric fish[J]. Journal of Comparative Physiology

- A, 2006, 192(6): 601-612.
- [12] NGUYEN N, WIEGAND I, JONES D L. Sparse beamforming for active underwater electrolocation[C]// 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S.l.]: IEEE Press, 2009: 2033-2036.
- [13] MACLVER M A, MARK E N. Towards a biorobotic electrosensory system[J]. *Autonomous Robots*, 2001, 11(3): 263-266.
- [14] MALCOLM A M, FONTAINE E, BURDICK J W. Designing future underwater vehicles: Principles and mechanisms of the weakly electric fish[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(3): 651-659.
- [15] GERHARD V D E, STEFFEN F. Distance, shape and more: Recognition of object features during active electrolocation in a weakly electric fish[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2007, 210: 3082-3095.
- [16] LEBASTARD V, CHEVALLEREAU C, GIRIN A, et al. Environment reconstruction and navigation with electric sense based on a Kalman filter[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(2): 172-188.
- [17] 何春秋, 彭杰纲. 主动电场管道堵塞内检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1054-1061.
HE C Q, PENG J G. Research on on-line inspection of blockage in pipeline based on active electrolocation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1054-1061.
- [18] NEVELN I D, BAI Y, SNYDER J B, et al. Biomimetic and bio-inspired robotics in electric fish research[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2013, 216(13): 2501-2514.
- [19] YANG B, JAMES B S, MICHAEL P, et al. Finding and identifying simple objects underwater with active electrosense[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2015, 34(10): 1255-1277.
- [20] PENG J G, ZHU Y, TAO Y. Research on location characteristics and algorithms based on frequency domain for a 2d underwater active electrolocation positioning system[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, 14(4): 759-769.
- [21] 祝悦. 基于主动电场定位的水下终端对接目标定位研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
ZHU Y. Research on target location in underwater terminal docking based on active electrolocation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [22] 杨玉娥, 杜文豪, 刘鲁宁. 基于主动电场定位的海参水下识别技术[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(8): 210-217.
YANG Y E, DU W H, LIU L N. Underwater sea-cucumber identification technology based on active electrolocation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 41(8): 210-217.
- [23] GOTTWALD M, MATUSCHEK A, GERHARD V D E. An active electrolocation catheter system for imaging and analysis of coronary plaques[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(1): 015002.
- [24] GOTTWALD M, HENDRIK H, GERHARD V D E. A bio-inspired electric camera for short-range object inspection in murky waters[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(3): 035002.
- [25] PENG J G. A study of amplitude information-frequency characteristics for underwater active electrolocation system[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(6): 066007.
- [26] PENG J G, WANG Y L, LIU L. A research on effect of probed object shape on frequency inflection point (fip) of underwater active electrolocation system[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(7): 1-5.
- [27] HAN Y J, WU H L, PENG J G, et al. The effect of object geometric features on frequency inflection point of underwater active electrolocation system[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(7): 756.

编辑 刘飞阳