

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 模拟水体湍流环境下目标激光点云数据的三维重建与分析

王明军, 彭月, 刘燕荣, 李勇俊, 李乐

#### 引用本文:

王明军, 彭月, 刘燕荣, 等. 模拟水体湍流环境下目标激光点云数据的三维重建与分析[J]. *光电工程*, 2023, 50(6): 230004.

Wang M J, Peng Y, Liu Y R, et al. Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data in simulated turbulent water environment[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 230004.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230004>

收稿日期: 2023-01-04; 修改日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-04-11

### 相关论文

#### 基于图像信息约束的三维激光点云聚类方法

夏金泽, 孙浩铭, 胡盛辉, 梁冬泰

*光电工程* 2023, 50(2): 220148 doi: 10.12086/oe.2023.220148

#### 融合空间掩膜预测与点云投影的多目标跟踪

陆康亮, 薛俊, 陶重彝

*光电工程* 2022, 49(9): 220024 doi: 10.12086/oe.2022.220024

#### 基于点云与图像交叉融合的道路分割方法

张莹, 黄影平, 郭志阳, 张冲

*光电工程* 2021, 48(12): 210340 doi: 10.12086/oe.2021.210340

#### 车载激光雷达点云数据地面滤波算法综述

黄思源, 刘利民, 董健, 傅雄军

*光电工程* 2020, 47(12): 190688 doi: 10.12086/oe.2020.190688

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230004

# 模拟水体湍流环境下目标激光点云数据的三维重建与分析

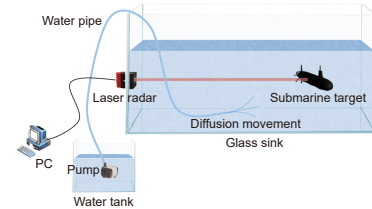
王明军<sup>1,2,3\*</sup>, 彭月<sup>4</sup>, 刘燕荣<sup>5</sup>, 李勇俊<sup>1</sup>, 李乐<sup>1</sup><sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;<sup>2</sup>西安市无线光通信和网络研究重点实验室, 陕西 西安 710048;<sup>3</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710126;<sup>4</sup>散射辐射全国重点实验室, 北京 100854;<sup>5</sup>天津航技术物理研究所, 天津 300308

**摘要:** 水下目标三维点云重建在水底勘探和水下无人飞行器避障等领域有着重要的应用。本文通过实验室模拟温度和盐度水体湍流, 开展了水下目标探测实验, 研究了温度差和盐度差对水下潜艇、滑翔机和锚雷的激光点云三维重建效果的影响, 并对重建后的三维点云数据进行误差分析。结果表明: 在水下目标三维点云重建过程中, 随着水体温度湍流和盐度湍流强度的增强, 重建点云数据的有效点数明显下降, 均值误差明显上升。研究结果对水下三维点云重建系统的研制具有一定参考价值。

**关键词:** 水下探测; 水体湍流模拟; 三维点云重建; 误差分析

**中图分类号:** TN29

**文献标志码:** A



王明军, 彭月, 刘燕荣, 等. 模拟水体湍流环境下目标激光点云数据的三维重建与分析 [J]. 光电工程, 2023, 50(6): 230004

Wang M J, Peng Y, Liu Y R, et al. Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data in simulated turbulent water environment[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 230004

## Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data in simulated turbulent water environment

Wang Mingjun<sup>1,2,3\*</sup>, Peng Yue<sup>4</sup>, Liu Yanrong<sup>5</sup>, Li Yongjun<sup>1</sup>, Li Le<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;<sup>2</sup>Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an, Shaanxi 710048, China;<sup>3</sup>Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710126, China;<sup>4</sup>National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Beijing 100854, China;<sup>5</sup>Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China

**Abstract:** Three-dimensional point cloud reconstruction of underwater targets has important applications in underwater exploration and obstacle avoidance of underwater unmanned vehicles. In this paper, the underwater target detection experiment is carried out by simulating the temperature and salinity water turbulence in the

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (92052106); 国家自然科学基金 (61771385); 陕西省杰出青年科学基金 (2020JC-42); 固体激光技术重点实验室开放基金 (6142404190301); 西安市高校人才服务企业工程项目 (GX YD14.26)

\*通信作者: 王明军, wangmingjun@xaut.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

laboratory, and the influence of temperature difference and salinity difference on the laser point cloud three-dimensional reconstruction effect of underwater submarines, gliders and anchor mines are studied, and the error analysis of the reconstructed 3D point cloud data is carried out. The results show that in the process of underwater target 3D point cloud reconstruction, with the enhancement of water temperature turbulence and salinity turbulence intensity, the effective points of the reconstructed point cloud data decrease significantly, and the mean error increased significantly. The research results have a certain reference value for the development of underwater three-dimensional point cloud reconstruction system.

**Keywords:** underwater detection; water turbulence simulation; three-dimensional point cloud reconstruction; error analysis

## 1 引言

海洋光学湍流主要由温度和盐度的波动引起, 其导致水体折射率在大于光束波长的尺度上发生随机、连续和局部微弱变化<sup>[1]</sup>。光束通过后, 其相位统计和强度统计会受到严重影响<sup>[2]</sup>, 导致光束发生光束强度起伏、光斑漂移、光斑畸变以及光束连续状态改变<sup>[3-5]</sup>。激光技术已经应用于很多领域<sup>[6-9]</sup>, 水下目标三维点云重建技术便是基于光束传输的光学应用<sup>[10-11]</sup>。当水体光学湍流对光束传输造成影响时, 也会影响到目标三维点云重建的质量。因此, 研究湍流效应对光束传输和水下目标三维点云重建的影响显得尤为重要。

由于真实海洋环境中湍流的强度无时无刻都在发生变化, 因此在真实海洋环境中开展光学湍流效应的实验研究是比较困难的, 所以人们采取在实验室模拟海洋湍流环境的方法, 开展海洋环境中光学湍流效应的研究。早在 1971 年, Gilbert<sup>[12]</sup>解释了海洋中的光学湍流效应, 并说明了海洋中折射率的不均匀性很大程度上是由于温度和盐度造成的, 压力的影响可以忽略不计。Guo<sup>[13]</sup>通过实验模拟和研究了由浊度、气泡、盐度和温度不均匀性引起的水下湍流对水下无线光通信系统信道互易性的影响, 其中温度不均匀性是通过将两种温度的水注入同一容器中实现的。Weng<sup>[14]</sup>提出了一个湍流实验模型通过湍流动能耗散率来研究水体运动产生的湍流的影响, 其代表了由于不同温度水体混合引起的水体折射率变化。闪烁指数和信噪比在均匀温度信道下的水环境下和无水环境下近似, 当存在温差变化时, 无湍流和有湍流时的闪烁指数和信噪比变化明显。卢腾飞<sup>[15]</sup>搭建了水下湍流模拟装置用以研究水体湍流对涡旋光束和高斯光束的传输影响, 总结了湍流强度变化对光束传输特性影响的规律。张晓妮<sup>[16-17]</sup>研究了水体湍流对基于相机的激光跟踪系统的对准精度的影响, 其将自来水通过加热板加热到一

定温度泵入冷水箱, 使其与水箱中的冷水发生温度扩散, 用以模拟温度湍流环境, 该实验证明了水体湍流强度的变化对系统的精度有一定的干扰作用。

本文设计了一种水体温度湍流和盐度湍流的实验室模拟方案, 单独设定两种水体间不同的温度差和盐度差, 控制水体间的扩散运动强弱以模拟不同强度的水体湍流, 研究不同强度水体湍流, 对水下目标三维点云重建的影响。本研究为水下三维点云重建系统的研制提供启发。

## 2 实验方案

在海洋湍流的形成过程中, 温度与盐度起到了主导作用, 温度每变化 1 °C, 折射率变化约为  $4 \times 10^{-5}$ , 而盐度每变化 1‰, 折射率变化在  $2 \times 10^{-4}$  左右<sup>[18]</sup>。因此可以使得水体产生不同的温度差及盐度差来实现不同强度湍流的模拟, 进而开展模拟水体湍流环境下水下目标三维点云重建实验。

图 1 所示为模拟水体湍流环境下水下目标三维点云重建的实验示意图。水体湍流模拟装置由水箱、玻璃槽 (1 m×0.5 m×0.5 m)、水泵 (流速: 23 mL/s) 三部分组成, 玻璃槽中为清水, 水箱中为具有固定温度及盐度的水, 通过水泵将水箱中的水体注入到玻璃槽中, 两种不同温度、盐度的水相遇会发生扩散运动, 从而产生水体湍流, 通过改变水箱中水体的温度及盐度即可模拟不同强度水体湍流。激光雷达 (探测波长为 850 nm, 最大帧率为 54 frame/s, 成像分辨率为 176 pixels×144 pixels, 标准视场角为 43.6°×34.6°) 紧贴水槽放置在水槽一端, 被探测目标由重物悬挂至水体中央固定, 通过改变水箱中水体与玻璃槽中水体之间的温度差及盐度差探究其对三维点云目标重建结果的影响。

激光雷达的视场角为 43.6°×34.6°, 其光束穿过玻璃和水体这组分层介质入射至水体中, 近红外光在超



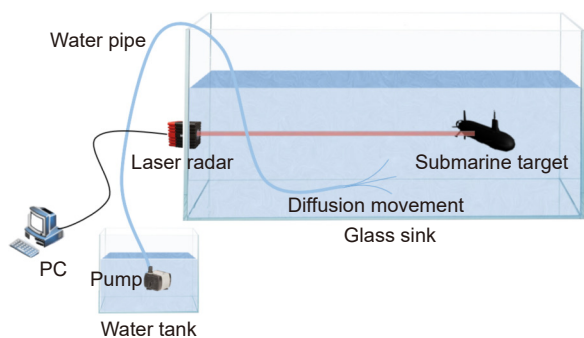


图 1 模拟水下湍流环境下的目标探测实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the target detection experiment under the simulated underwater turbulent environment

白玻璃的折射率为 1.5229, 在水体的折射率为 1.34, 因此会在其界面发生折射。当光入射至模拟湍流水体中, 因水体折射率的不均匀分布而发生多次折射, 从而导致部分光线发生偏移或落在探测视场角外, 部分光线因光路变化导致反射回探测面的时间发生变化, 从而导致点云的点远离目标物深度范围。以上情况都会导致点云的有效点数下降, 降低成像精度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 温度湍流对三维点云重建的影响

光束在温度湍流中传输时, 会发生光斑漂移和光斑畸变现象, 其会直接影响到激光雷达采集到的原始点云数据, 使雷达接收孔径内的反射光低于接收阈值, 或者是反射光落在接收孔径之外, 使得水下目标三维重建点云的质量变差, 从而影响目标探测精度以及特征点提取等目标识别的后续工作。

搭建模拟水下湍流目标探测实验环境, 在玻璃水槽和水箱中注入清水, 利用水泵将水箱中的水注入玻璃槽, 用以模拟温度差 0 °C 时的温度湍流, 开展实验获取水下滑翔机、锚雷和潜艇这三种目标物在水下盐度湍流环境下的原始点云数据。向水箱中加入热水, 将水箱中水体盐度逐步调整为 5 °C、10 °C 和 20 °C, 搅拌均匀静置, 重复上述实验过程记录数据。

在不同温度差的湍流下, 对每种目标物各采集 1000 个数据。依据文献 [8] 所介绍的水下目标三维点云重建算法对采集到的原始点云数据进行处理, 以及介绍的误差分析方法对重建点云进行误差计算, 计算其与标准点云之间的误差, 保留有效点数和均值误差两种数据用以反映温度湍流对水下目标三维点云重建的影响。将实验所得到的三种目标物的原始点云数据均处理完成后, 将其按 100 个数据分 10 组, 取其统

计平均绘制图像。

水下滑翔机的实验数据整理后如图 2 所示。图 2 的四幅图中, 其横轴为不同时刻的数据组, 左纵轴为有效点数, 对应图中的黑色方形折线, 右纵轴为均值误差, 对应图中的红色圆形折线, 四幅图的有效点数和均值误差的取值范围和间隔均一致, 图中每个数据点由 100 个三维重建点云的误差求均值而得。本文后续所有此类图像均按照此标准绘制。由图 2 可以看出, 在有效点数方面, 相较于温差为 0 °C 时的有效点数, 温差为 5 °C、10 °C 和 20 °C 湍流环境下的有效点数均有显著下降, 造成该现象的原因可能是由于水体湍流影响导致部分反射光落在了接收孔径之外; 在均值误差方面, 温差为 5 °C、10 °C 和 20 °C 湍流环境下的均值误差都大于温差为 0 °C 时, 这表明温度湍流对水下目标三维点云重建有一定影响。

图 3 为不同温度湍流环境下, 锚雷目标的三维点云重建误差折线图。由图可以总结出和水下滑翔机温度湍流环境下对三维点云重建的影响相同的规律, 即存在温度湍流的环境下, 三维重建点云的有效点数较温度差为 0 °C 时的变小, 均值误差较温度差为 0 °C 时的变大。此外, 图 3 锚雷组实验数据还反映了一个现象, 对比温差为 0 °C 到温差为 5 °C 数据, 其有效点数随着温差升高下降, 均值误差随着温差升高上升, 出现相同规律的还有温差为 10 °C 到温差为 20 °C, 但温差为 5 °C 到温差为 10 °C 时, 其均值误差随着温差升高而下降了 1~2 mm。其原因是因为温差为 10 °C 时重建点云的有效点数较温差为 5 °C 时下降了 500 个点左右, 这是造成其均值误差下降的直接原因, 其根本原因是由于温度湍流影响了水体折射率, 从而导致激光雷达接收到的原始点云数据的噪声点增多, 当对原始点云数据进行滤波处理时, 滤除掉了过多的点, 因此其均值误差会较低。

图 4 为不同温度湍流情况下, 潜艇目标的三维点云重建误差折线图。上图也同样可以验证前文总结的结论, 即在水下目标三维点云重建过程中, 产生温度湍流的水体温差越大, 重建点云的有效点数越少, 均值误差越大。

综上所述, 在水下目标三维点云重建过程中, 随着温度湍流温差的升高, 重建点云的有效点数呈下降趋势, 均值误差呈上升趋势。

#### 3.2 盐度湍流对三维点云重建的影响

搭建模拟水下湍流目标探测实验环境, 在玻璃水

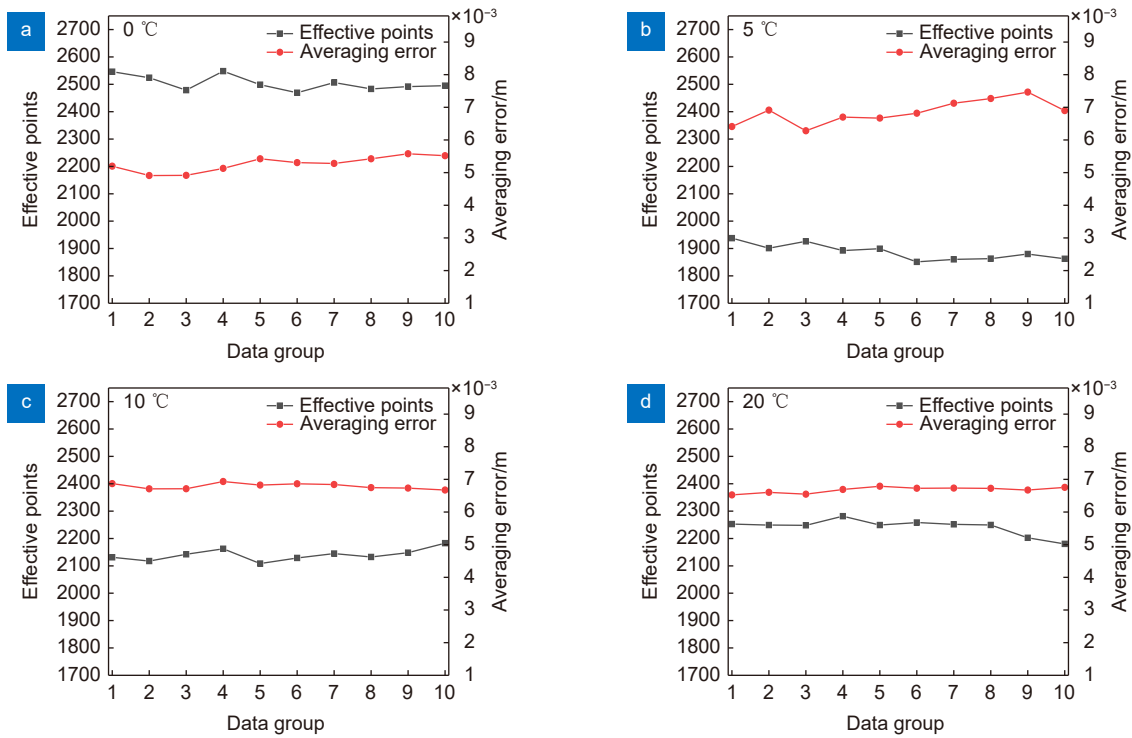


图 2 不同温度湍流对水下滑翔机的三维点云重建影响。(a) 温度差 0 °C; (b) 温度差 5 °C; (c) 温度差 10 °C; (d) 温度差 20 °C

Fig. 2 Effect of turbulent flow at different temperatures on 3D point cloud reconstruction of the underwater glider. (a) Temperature difference is 0 °C; (b) Temperature difference is 5 °C; (c) Temperature difference is 10 °C; (d) Temperature difference is 20 °C

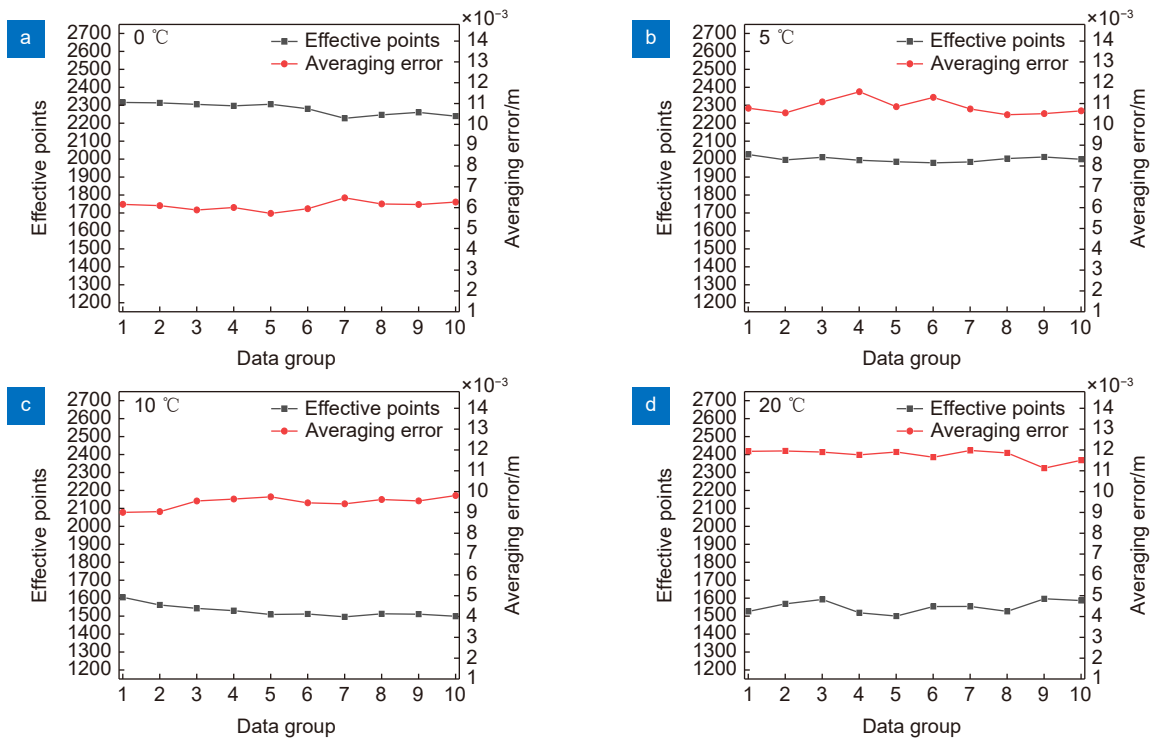


图 3 不同温度湍流对锚雷的三维点云重建影响。(a) 温度差 0 °C; (b) 温度差 5 °C; (c) 温度差 10 °C; (d) 温度差 20 °C

Fig. 3 Influence of different temperature turbulence on 3D point cloud reconstruction of the underwater anchor mine. (a) Temperature difference is 0 °C; (b) Temperature difference is 5 °C; (c) Temperature difference is 10 °C; (d) Temperature difference is 20 °C

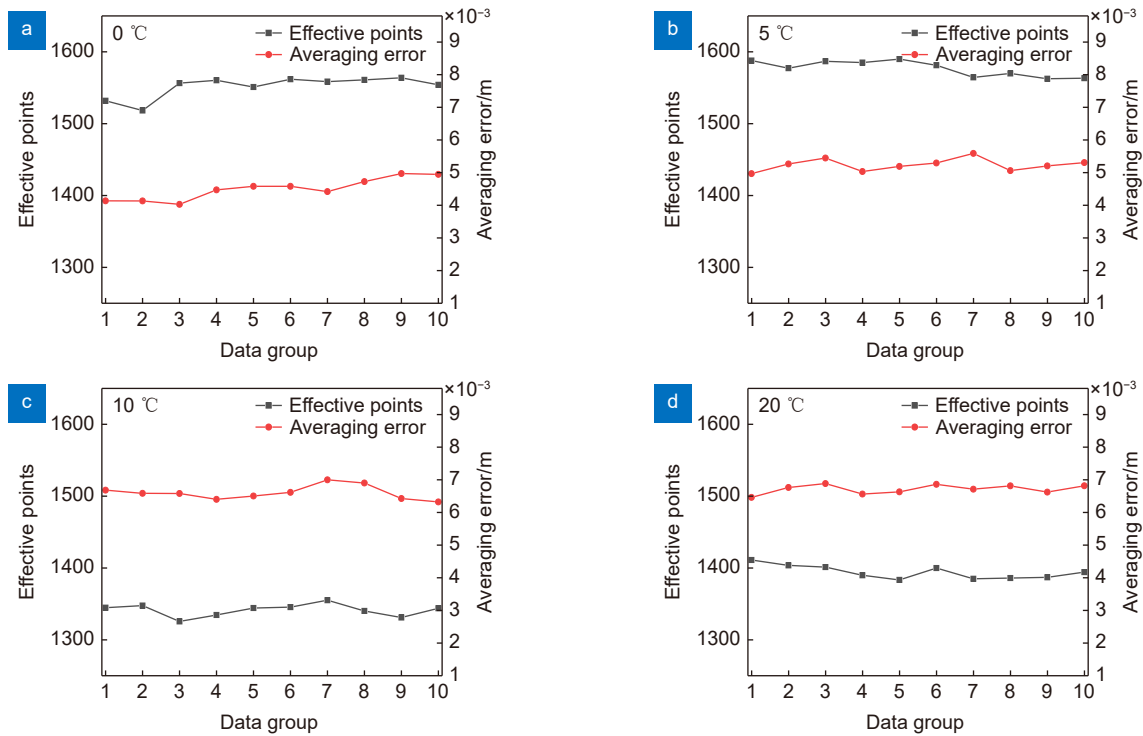


图 4 不同温度湍流对潜艇的三维点云重建影响。(a) 温度差 0 °C; (b) 温度差 5 °C; (c) 温度差 10 °C; (d) 温度差 20 °C

Fig. 4 Influence of turbulence at different temperatures on 3D point cloud reconstruction of the submarine model. (a) Temperature difference is 0 °C; (b) Temperature difference is 5 °C; (c) Temperature difference is 10 °C; (d) Temperature difference is 20 °C

槽和水箱中注入清水, 利用水泵将水箱中的水注入玻璃槽, 用以模拟盐度差 0 PSU 时的盐度湍流, 开展实验获取水下滑翔机、锚雷和潜艇这三种目标物在水下盐度湍流环境下的原始点云数据。向水箱中加入盐, 将水箱中水体盐度逐步调整为 1 PSU、2 PSU 和 3 PSU, 搅拌均匀静置, 重复上述实验过程记录数据。

在不同盐度差的湍流环境下, 每种目标物分别采集 1000 组数据。依据水下目标三维点云重建算法对采集到的原始点云数据进行处理, 计算三维重建点云与标准点云之间的误差, 保留有效点数和均值误差两种数据参数用以反映不同盐度湍流对水下目标三维点云重建的影响趋势。首先以水下滑翔机为例, 将水下滑翔机的原始点云数据处理完成后, 保存有效点数与均值误差, 将其按 100 个数据为一组共分 10 组, 取其统计平均绘制图 5。

由图 5 可以得到结论, 在均值误差方面, 当两种水体间不存在盐度差时, 其均值误差处于 5~6 mm 之间, 当两种水体间存在盐度差时, 均值误差较盐度差为 0 PSU 时上升 1~2 mm; 在有效点数方面, 随着盐度差的升高, 水下滑翔机的三维重建点云的有效点数

变化不大, 其范围一直处于 2400~2700 之间, 盐度差为 2 PSU 的环境下有效点数略大于 0 PSU 水体和 1 PSU 水体。

图 6 为不同盐度湍流对锚雷目标的三维重建点云的误差影响, 四幅图中的横轴为不同时刻的数据组, 左轴为有效点数, 对应图中黑色方形折线, 右轴为均值误差, 对应图中红色圆形折线。

由图 6 可以看出, 当盐度差为 0 PSU 时, 锚雷目标的有效点数处于 2200~2300 个点的范围内, 当盐度差为 1 PSU 时, 锚雷目标的有效点数在 1900 点左右, 当盐度差为 2 PSU 时, 锚雷目标的有效点数在 1700~1850 个点之间, 当盐度差上升至 3 PSU 时, 有效点数下降至 1300~1400 个点之间, 该趋势展示了随着盐度差的逐渐升高, 锚雷目标的三维重建点云的有效点数持续下降, 这说明水体盐度湍流对水下目标三维点云重建的影响具有一定规律性。就均值误差而言, 几种盐度湍流环境下的均值误差均高于盐度差为 0 PSU 时的均值误差, 均值误差没有随着盐度差的增高而增高, 这是因为有效点数下降过多, 从而导致重建点云的均值误差保持在了一个稳定的范围内。

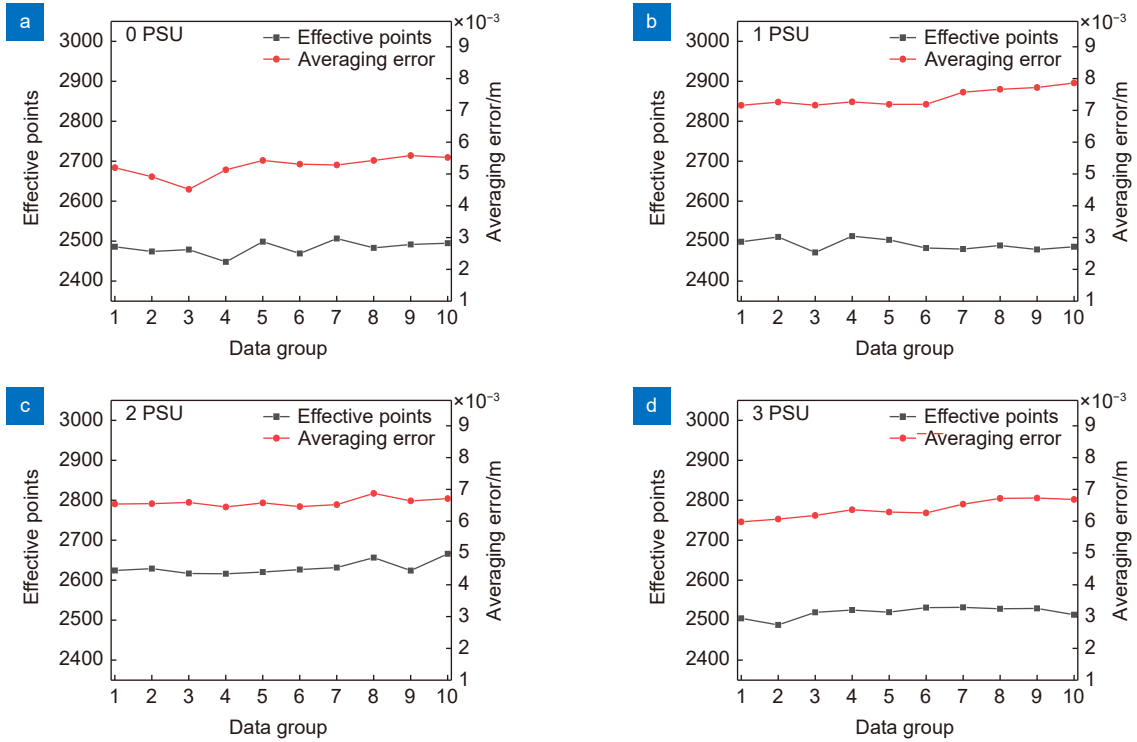


图 5 不同盐度湍流对水下滑翔机的三维点云重建影响。(a) 盐度差 0 PSU; (b) 盐度差 1 PSU; (c) 盐度差 2 PSU; (d) 盐度差 3 PSU

Fig. 5 Influence of turbulent flow with different salinity on 3D point cloud reconstruction of the underwater glider. (a) Salinity difference is 0 PSU; (b) Salinity difference is 1 PSU; (c) Salinity difference is 2 PSU; (d) Salinity difference is 3 PSU

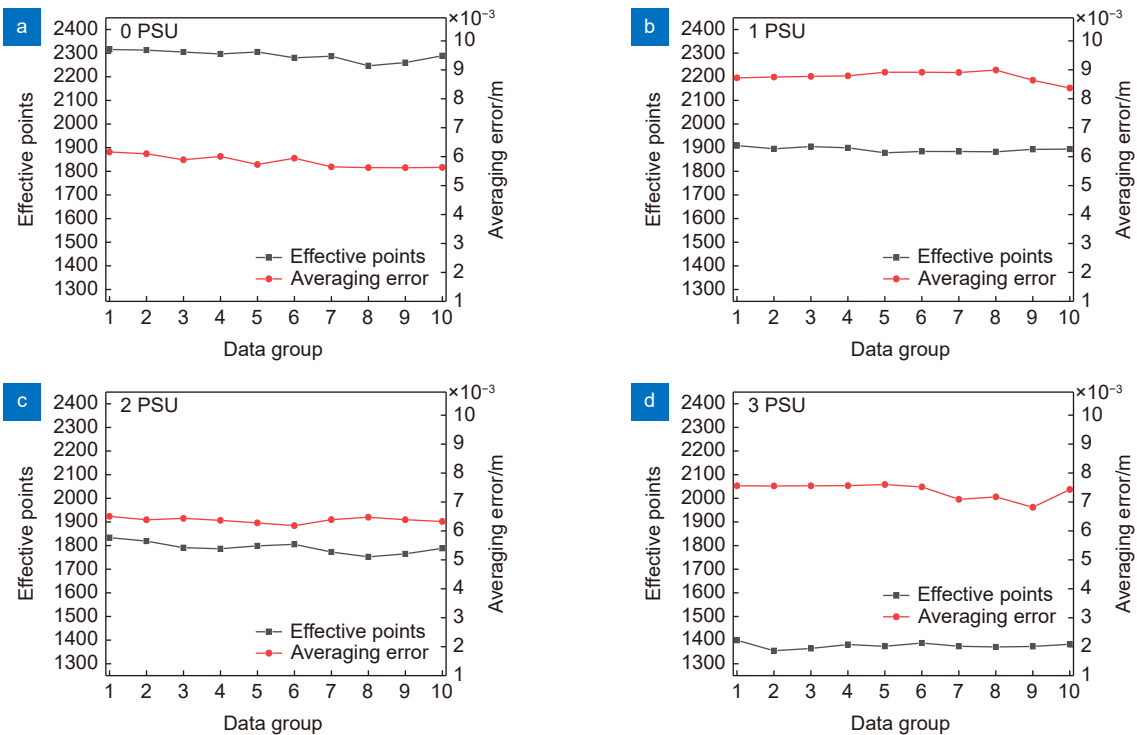


图 6 不同盐度湍流对锚雷的三维点云重建影响。(a) 盐度差 0 PSU; (b) 盐度差 1 PSU; (c) 盐度差 2 PSU; (d) 盐度差 3 PSU

Fig. 6 Influence of different salinity turbulence on 3D point cloud reconstruction of the underwater anchor mine. (a) Salinity difference is 0 PSU; (b) Salinity difference is 1 PSU; (c) Salinity difference is 2 PSU; (d) Salinity difference is 3 PSU

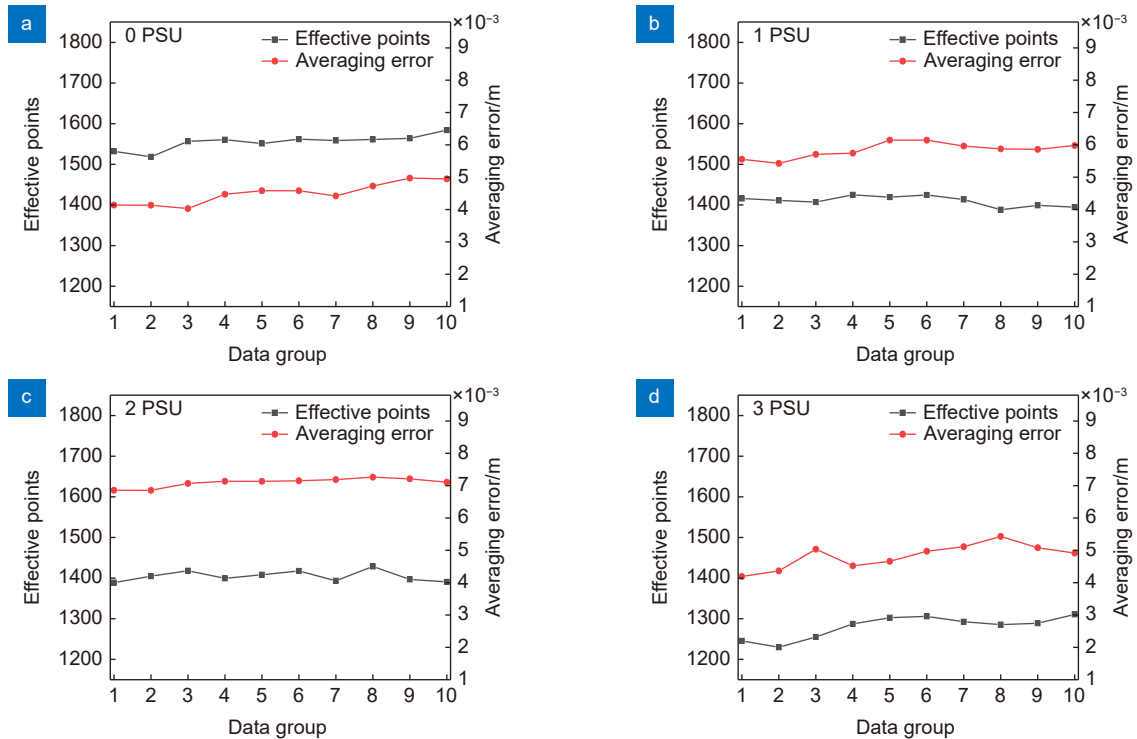


图7 不同盐度湍流对潜艇的三维点云重建影响。(a) 盐度差 0 PSU;

(b) 盐度差 1 PSU; (c) 盐度差 2 PSU; (d) 盐度差 3 PSU

Fig. 7 Influence of turbulent flow with different salinity on 3D point cloud reconstruction of the submarine model. (a) Salinity difference is 0 PSU; (b) Salinity difference is 1 PSU; (c) Salinity difference is 2 PSU; (d) Salinity difference is 3 PSU

图7为不同盐度湍流对潜艇的三维点云重建影响, 其与水下滑翔机和锚雷在盐度湍流重建的影响趋势一致。在盐度差为 2 PSU 的湍流中, 其有效点数有一个较大波动, 产生这种现象的原因是因为两种水体间的不均匀扩散, 导致激光雷达接收到的光脉冲没有达到接收阈值或是光脉冲落在接收孔径之外, 从而使得有效点数下降。当水体湍流环境较为恶劣时, 采集到的水下目标物原始点云会有更多的噪声点, 当点云滤波处理时, 会将这些噪声点一并滤除, 导致三维重建点云的有效点数下降; 当有效点数下降较多时, 三维重建点云所携带的目标物的信息会减少, 但重建点云的均值误差却会随之下降。

综上所述, 在湍流环境下进行水下目标的三维点云重建过程中, 水体湍流会对重建质量有一定影响。随着水体盐度湍流环境的愈发恶劣, 重建点云的有效点数呈下降趋势, 当有效点数下降过多时, 目标物的三维重建点云所携带的目标的三维特征信息会减小, 这种情况下, 即使重建点云的误差减小, 也不能说明其三维重建点云的质量更高; 当有效点数下降不多时, 均值误差呈上升趋势。

## 4 结论

本文开展了不同温度与盐度分别单独驱动水体湍流环境下水下目标三维点云重建实验, 通过改变温度差和盐度差, 研究了不同湍流强度对水下目标三维点云重建的影响。结果表明: 在水下目标三维点云重建过程中, 随着水体温度湍流和盐度湍流环境的愈发恶劣, 重建点云的有效点数呈下降趋势, 下降范围在 100-900 个点, 均值误差呈上升趋势, 上升范围在 1~5 mm。研究结果对水下探测具有一定参考价值。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

## 参考文献

- [1] Korotkova O, Farwell N. Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams[J]. *Opt Commun*, 2011, **284**(7): 1740-1746.
- [2] Sun Y L, Zhang J R, Lu Z Z. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. *Acta Opt Sin*, 2019, **39**(10): 1001005.  
孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中. 拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性[J]. *光学学报*, 2019, **39**(10): 1001005.
- [3] Xia T, Liu D J, Dong A Y, et al. Properties of partially coherent



- elegant Laguerre-Gaussian beam in free space and oceanic turbulence[J]. *Optik*, 2020, **201**: 163514.
- [4] Wen W, Wang Z B, Qiao C H. Beam propagation quality factor of airy laser beam in oceanic turbulence[J]. *Optik*, 2022, **252**: 168428.
- [5] Liu X Y, Zhou G Q, Shen Y T. Effect of oceanic turbulence with anisotropy on the propagation of multi-sinc Schell-model beams[J]. *Results Phys*, 2022, **36**: 105447.
- [6] Fu Y, Cao J C, Yamanouchi K, et al. Air-laser-based standoff coherent Raman spectrometer[J]. *Ultrafast Sci*, 2022, **2022**: 9867028.
- [7] Ye P, Oldal L G, Csizmadia T, et al. High-flux 100 kHz attosecond pulse source driven by a high-average power annular laser beam[J]. *Ultrafast Sci*, 2022, **2022**: 9823783.
- [8] Hou D, Ren J W, Guo G K, et al. Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220149.  
侯冬, 任军委, 郭广坤, 等. 高精度水下激光频率传递研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(2): 220149.
- [9] Zhang Y F, Li X, Lv W C, et al. Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(9): 190734.  
张雨凡, 李鑫, 吕伟超, 等. 水下无线光通信链路构成与性能优化进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(9): 190734.
- [10] Xia J Z, Sun H M, Hu S H, et al. 3D laser point cloud clustering method based on image information constraints[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220148.  
夏金泽, 孙浩铭, 胡盛辉, 等. 基于图像信息约束的三维激光点云聚类方法[J]. *光电工程*, 2023, **50**(2): 220148.
- [11] Wang M J, Li L, Yi F, et al. Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data under simulated real water environment[J]. *Chin J Lasers*, 2022, **49**(3): 0309001.  
王明军, 李乐, 易芳, 等. 模拟真实水体环境下目标激光点云数据的三维重建与分析[J]. *中国激光*, 2022, **49**(3): 0309001.
- [12] Gilbert G D, Honey R C. Optical turbulence in the sea[J]. *Proc SPIE*, 1971, **24**: 49-56.
- [13] Guo Y J, Trichili A, Alkhazragi O, et al. On the reciprocity of underwater turbulent channels[J]. *IEEE Photonics J*, 2019, **11**(2): 7901909.
- [14] Weng Y, Guo Y J, Alkhazragi O, et al. Impact of turbulent-flow-induced scintillation on deep-ocean wireless optical communication[J]. *J Lightwave Technol*, 2019, **37**(19): 5083-5090.
- [15] Lu T F, Liu Y X, Wu Z J. Experimental investigation on propagation characteristics of vortex beams in underwater turbulence with different salinity[J]. *Chin Opt*, 2022, **15**(1): 111-118.  
卢腾飞, 刘永欣, 吴志军. 涡旋光束在不同盐度的水下湍流中的传输特性的实验研究[J]. *中国光学*, 2022, **15**(1): 111-118.
- [16] Zhang X N, Li S B, Liu W J, et al. Positioning of turbulence-distorted laser spot for underwater optical wireless communication[C]//2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2020: 1-6. <https://doi.org/10.1109/CSNDSP49049.2020.9249484>.
- [17] Zhang X N. Influence of water non-uniform characteristics on the underwater wireless optical positioning and pointing performances[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.  
张晓妮. 水体非均匀特性对无线光定位定向性能的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [18] Eyyuboğlu H T. Estimation of aperture averaged scintillations in weak turbulence regime for annular, sinusoidal and hyperbolic Gaussian beams using random phase screen[J]. *Opt Laser Technol*, 2013, **52**: 96-102.

## 作者简介



【通信作者】王明军(1979-), 男, 博士, 教授, 在科学出版社出版学术著作 2 部, 在 *Optics Express*, *Optical Engineering*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 《光学学报》《物理学报》等期刊上发表论文 200 多篇。主要研究方向: 复杂介质中光/电磁波传输与散射特性、激光探测及无线光通信技术研究。

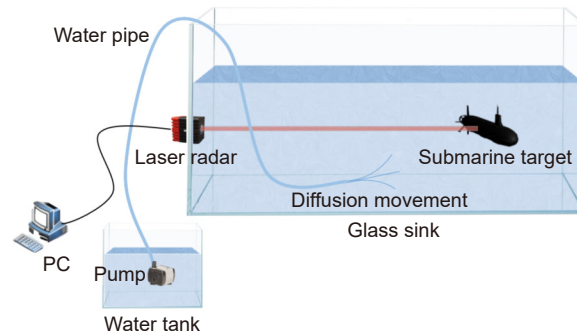
E-mail: wangmingjun@xaut.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data in simulated turbulent water environment

Wang Mingjun<sup>1,2,3\*</sup>, Peng Yue<sup>4</sup>, Liu Yanrong<sup>5</sup>, Li Yongjun<sup>1</sup>, Li Le<sup>1</sup>



Schematic diagram of target detection experiment in the simulated underwater turbulent environment.

**Overview:** Underwater target detection has important applications in underwater accident search and rescue, equipment maintenance and resource exploration. At present, underwater acoustic detection is the most common detection method, but it has the shortcomings of low resolution and target edge blur, and it is difficult to effectively identify the target. The underwater optical detection system perfectly makes up for the shortage of underwater acoustic detection. However, the existence of ocean turbulence seriously restricts the development of underwater optical detection. The generation of ocean turbulence is mainly due to the influence of temperature and salinity. In addition, it is very difficult to carry out underwater detection experiments directly in the real ocean turbulence environment. Therefore, this paper simulates the ocean turbulence in the laboratory by changing the salinity difference and temperature difference of the water body. The effects of turbulence intensity on the three-dimensional reconstruction of underwater laser point clouds of submarines, gliders and anchor mines are studied.

We used lidar to collect the original point cloud data of targets in different water environments within the experimental glass tank. The original point cloud data obtained from the experiment was then processed by using the threshold segmentation refraction correction and point cloud denoising algorithms. In the original point cloud data, the threshold segmentation separated the target point cloud and the backscattered noise point. Refraction correction corrected the influence of refraction during crossing the medium by correcting the parameters in the spherical coordinate system. To filter out noise points in the point cloud data, we first calculated the average distance from all points to their neighbors by the point cloud denoising method and then set the filtering threshold based on the obtained value. Finally, we mounted the 3Dmax-processed standard point cloud data to the k-d tree, queried the minimum distance between all points in the reconstructed point cloud data and the generated k-d tree, and saved the closest point of all points in the reconstructed point cloud. The output was used to show the error between the reconstructed point cloud and the standard point cloud.

In this paper, by changing the temperature difference and salinity difference, the influence of different turbulence intensities on the three-dimensional point cloud reconstruction of underwater targets is studied. The results show that, in the process of 3D point cloud reconstruction of underwater targets, with the increasingly harsh water temperature turbulence and salinity turbulence environment, the effective points of the reconstructed point cloud show a downward trend, and the average error shows an upward trend.

Wang M J, Peng Y, Liu Y R, et al. Three-dimensional reconstruction and analysis of target laser point cloud data in simulated turbulent water environment[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(6): 230004; DOI: 10.12086/oe.2023.230004

Foundation item: Project supported by Training Program of the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (92052106), the National Natural Science Foundation of China (61771385), Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Shaanxi Province (2020JC-42), Open Fund for Key Laboratory of Solid-State Laser Technology (6142404190301), and the Xi'an University Talents Service Enterprise Project (GXYP14.26)

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; <sup>2</sup>Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an, Shaanxi 710048, China; <sup>3</sup>Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710126, China; <sup>4</sup>National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Beijing 100854, China;

<sup>5</sup>Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China

\* E-mail: wangmingjun@xaut.edu.cn