

文章编号:1001-5078(2024)08-1229-08

· 激光应用技术 ·

## 基于图像的水下相机阵列激光测距与拼接方法

王惟潇<sup>1</sup>, 徐莹隽<sup>2</sup>, 何小元<sup>3</sup>, 王澄非<sup>1</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学电工电子实验中心, 江苏 南京 211189;

3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:**桥梁、大坝等结构涉水部分表现的病害检测过程中,病害参数的精确测量受到水下相机阵列与其距离的影响,并且常用的图像拼接方法依赖于显著特征点,对于上述情况,本文提出将水下相机阵列与激光器结合的方法,基于图像对物距进行测量并由激光辅助拼接图像阵列。根据激光光斑在图像中的位置,分别推导了水下相机阵列平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角三种情况下的激光测距公式,并且依次进行图像阵列校正、重叠区域计算和图像拼接。实验结果表明,三种情况下测距误差不超过2 mm,相对误差不超过1.5%,并且较好地实现了图像阵列的校正和拼接,在基础设施水下病害检测方面具有较大的应用前景。

**关键词:**水下激光测距;水下光学阵列成像;水下图像处理;水下图像拼接

中图分类号:TN249;P225.2 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.008

## Image-based underwater camera array laser ranging and stitching method

WANG Wei-xiao<sup>1</sup>, XU Ying-jun<sup>2</sup>, HE Xiao-yuan<sup>3</sup>, WANG Cheng-fei<sup>1</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Electrical and Electronic Experimental Center, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The precise measurement of the disease parameters is affected by the distance between the underwater camera array and the water-involved parts of structures such as bridges and dams, and the usual image stitching methods depend on the salient feature points. For the above, a method is proposed to measure the object distance and splice the image array based on the image by an underwater camera array and a laser. According to the position of laser spot in the image, the formulas of laser ranging are derived respectively when underwater camera array plane is parallel to the observed surface, when there is a rotation angle and a pitching angle between underwater camera array plane and the observed surface, and the image array is corrected and stitched after the size of the overlapped region is calculated. The experimental results show that the ranging error is less than 2 mm and the relative error is less than 1.5% in the three cases, and correction and stitching of image array are realized well. The method has a great application prospect in underwater disease detection of infrastructure.

**Keywords:** underwater laser ranging; underwater optical array imaging; underwater image processing; underwater image stitching

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 6322001049A)资助。

作者简介:王惟潇(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为水下图像处理。E-mail:wang\_weixiao@126.com

通讯作者:王澄非(1965-),女,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为水下图像处理。E-mail:seufei@qq.com

收稿日期:2023-12-16

## 1 引言

早期建成的桥梁、大坝随着服役时间的增加,会存在不同程度的损伤,特别是长期受水流冲刷及漂流物碰撞的涉水部分,因此,定期对涉水部分的表现进行病害检测具有重要意义。水下视觉方法直观并且包含信息较多,因此被广泛应用<sup>[1]</sup>。

为了减小浑水水质的影响,水下相机距被观测结构表面 120 ~ 200 mm 之间采集图像,但该物距下视场会随之变小,为了满足近距离大视场的图像采集要求,采用相机阵列的方式采集水下结构表面的图像。获取相机阵列与水下结构表面的距离并且拼接图像阵列,对于测量病害的参数等具有重要意义。

现有的水下激光雷达精度小于 0.6 m,但体积庞大,功耗高<sup>[2]</sup>,并且后向散射严重影响测距的分辨率<sup>[3]</sup>。基于线结构光的水下三维立体扫描仪使用轴眼标定算法和水下相机成像模型,但功耗高,价格昂贵,且在物距小于 300 mm 时测距失效<sup>[4]</sup>。高速高精度实时相位式激光测距系统在高频调制情况下,物距为 45 m 以内的测距精度高达 0.2 mm,但易受到水体散射的影响<sup>[5]</sup>。在三点测距法<sup>[6]</sup>的基础上使用三色激光发射器,解决了误差混淆问题<sup>[7]</sup>,但当相机平面与被观测表面不平行时,测距误差明显增加。此外,还有方法以特殊的距离和俯角固定三个激光器,实现对物距的测量<sup>[8]</sup>。图像拼接包括图像配准和融合,目前的配准方法主要是基于特征匹配,例如 SIFT (Scale-invariant Feature Transform) 算法<sup>[9]</sup>、SURF (Speeded Up Robust Features) 算法<sup>[10]</sup>、ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) 算法<sup>[11]</sup>等等,但对于特征点较少、纹理不明显的水下结构表面则会导致匹配错误,因此具有局限性。

针对上述问题,本文将激光器与相机阵列相结合,使用相机阵列采集激光形成的光斑图像进行测距与拼接。对于相机平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角三种情况,分别对测距原理进行理论分析,并通过实验进行验证,同时基于标定和激光光斑位置进行图像阵列拼接。

## 2 水下相机阵列激光测距与拼接总体结构

图 1 为水下相机阵列与激光器的分布示意图,水下相机阵列共 4 行 5 列即由 20 相机组成,每个相机与左右相邻的相机相距 90 mm,与上下相邻的相机相距 120 mm。激光器共 19 个,每个激光器与相

邻相机的距离均为 75 mm。本文取左上角四个相机作为水下相机阵列与三个激光器进行分析。

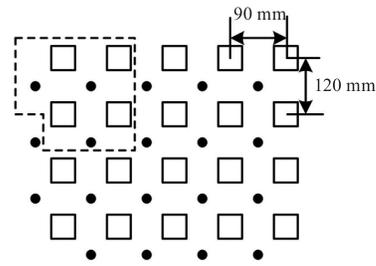


图 1 水下相机阵列与激光器的分布示意图

Fig. 1 Diagram of underwater camera array and lasers

图 2 为水下相机阵列激光测距与拼接的总体结构示意图,主要由图像采集、图像处理、距离测量、图像阵列拼接四部分组成。

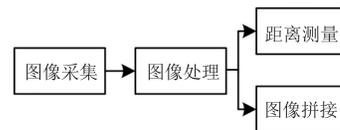
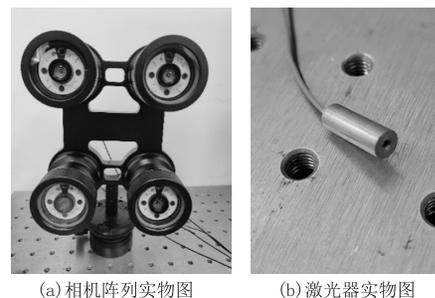


图 2 水下相机阵列激光测距与拼接总体结构示意图

Fig. 2 Diagram of the overall structure of underwater camera array laser ranging and splicing

图 3 为水下相机阵列和激光器实物图。水下相机采用 IMX477 型号的 CMOS 相机,焦距为 2.8 mm,外部设计了防水外壳。



(a) 相机阵列实物图 (b) 激光器实物图

图 3 相机阵列和激光器实物图

Fig. 3 Photo of camera array and laser

激光器发射与相机阵列平面垂直的激光束,激光照射在基础设施涉水部分的表面形成光斑图案,四个水下相机采集光斑图像,随着距离的改变,光斑在图像中的位置会发生变化。通过图像处理分别得到四张图像中光斑中心的像素信息,根据几何关系计算得到物距,并拼接四张图像。

## 3 测距原理

被观测的桥梁、大坝涉水部分的表面为平面,本节分析水下相机阵列平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角三种情况,并推导水下相机阵

列激光测距公式。

### 3.1 平行时的测距

图4为水下相机阵列平面与被观测表面平行时的示意图,激光器1、2、3发射的激光束垂直于被观测表面分别形成激光光斑 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ ,三个激光器与被观测表面的距离分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ,水下相机阵列平面与被观测表面的距离为 $L$ ,相机1和相机2的水平距离为 $W$ ,相机1和相机4的垂直距离为 $H$ 。

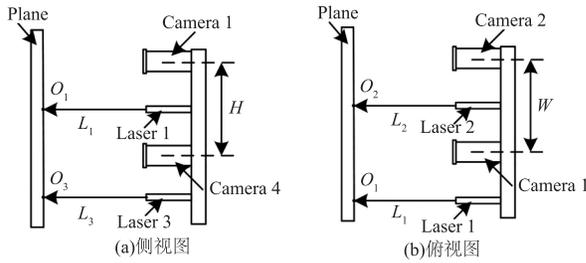


图4 平行时测距原理图

Fig. 4 Principle diagram when the underwater camera array plane is parallel to the observed surface

图5为水下相机阵列中四个相机采集的光斑图像,图像中激光器1、2、3形成的光斑位置分别标记为 $o_1$ 、 $o_2$ 、 $o_3$ 。每张图像中每个光斑与成像平面中点的距离均相同。

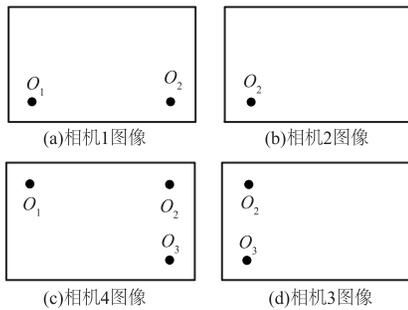


图5 相机阵列采集的图像

Fig. 5 Images captured by camera array

根据成像原理,可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L_1 - f} \\ b \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L_2 - f} \\ c \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L_2 - f} \\ d \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L_3 - f} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a$ 为相机4采集的图像中光斑 $o_1$ 与成像平面中点的像素点差值; $b$ 为相机1采集的图像中光斑 $o_2$ 与成像平面中点的像素点差值; $c$ 为相机3采集

的图像中光斑 $o_2$ 与成像平面中点的像素点差值; $d$ 为相机4采集的图像中光斑 $o_3$ 与成像平面中点的像素点差值; $L_{\text{CMOS}}$ 为CMOS图像传感器的单个像素尺寸; $f$ 为镜头的焦距; $l$ 为激光器与相机的距离。

该情况下,水下相机阵列平面与被观测表面的距离 $L$ 与 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 之间的关系为:

$$L = L_1 = L_2 = L_3 \quad (2)$$

将公式(2)代入公式(1)可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ b \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ c \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ d \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \end{cases} \quad (3)$$

求解方程组(3),得到距离 $L$ 的计算公式为:

$$L = \frac{2 \cdot l \cdot f}{(b + c) \cdot L_{\text{CMOS}}} + f \quad (4)$$

### 3.2 存在旋转角时的测距

图6为水下相机阵列平面与被观测表面存在旋转角 $\beta$ 时的示意图。

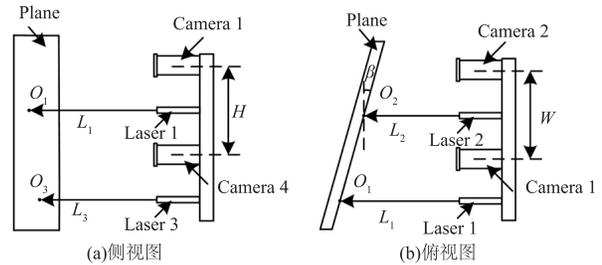


图6 存在旋转角时测距原理图

Fig. 6 Principle diagram when there is a rotation angle

图7为四个相机采集的光斑图像,此时相机4采集的图像中光斑 $o_1$ 与成像平面中点的距离发生改变,并且与光斑 $o_2$ 、 $o_3$ 与成像平面中点的距离不再相同。

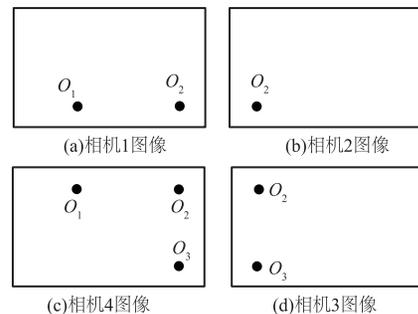


图7 相机阵列采集的图像

Fig. 7 Images captured by camera array

该情况下,距离  $L$  与  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  之间的关系为:

$$\begin{cases} L_2 = L_3 = L \\ L_1 = L + W \cdot \tan\beta \end{cases} \quad (5)$$

将公式(5)代入成像公式(1)中可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L + W \cdot \tan\beta - f} \\ b \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ c \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ d \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \end{cases} \quad (6)$$

求解方程组(6),得到距离  $L$  的计算公式为:

$$L = \frac{2 \cdot l \cdot f}{(b + c) \cdot L_{\text{CMOS}}} + f \quad (7)$$

根据公式(7)可知,当水下相机阵列平面与被观测表面存在旋转角时,距离测量公式(7)与平行时的距离测量公式(4)相同。

### 3.3 存在俯仰角时的测距

图8为水下相机阵列平面与被观测表面存在俯仰角  $\gamma$  时的示意图。图9为四个相机采集的光斑图像,此时相机4采集的图像中光斑  $o_3$  与成像平面中点的距离发生改变,并且与光斑  $o_1$ 、 $o_2$  与成像平面中点的距离不再相同。

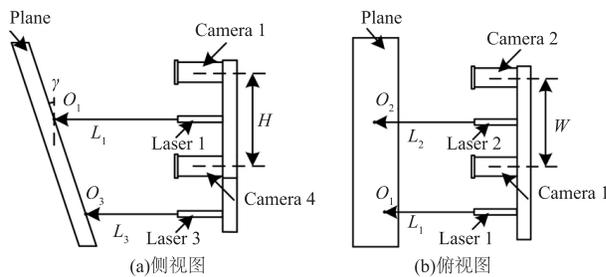


图8 存在俯仰角时测距原理图

Fig. 8 Principle diagram when there is a pitching angle

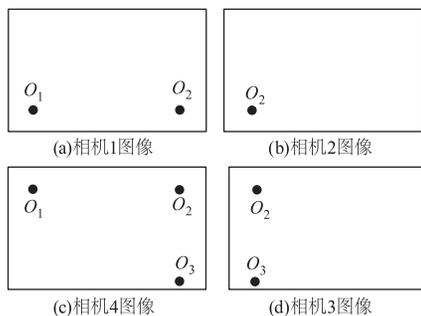


图9 相机阵列采集的图像

Fig. 9 Images captured by camera array

该情况下,距离  $L$  与  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  之间的关系为:

$$\begin{cases} L_1 = L_2 = L \\ L_3 = L - H \cdot \tan\gamma \end{cases} \quad (8)$$

将公式(8)代入成像公式(1)中可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ b \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ c \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - f} \\ d \cdot L_{\text{CMOS}} = l \cdot \frac{f}{L - H \cdot \tan\gamma - f} \end{cases} \quad (9)$$

求解方程组(9),得到距离  $L$  的计算公式为:

$$L = \frac{2 \cdot l \cdot f}{(b + c) \cdot L_{\text{CMOS}}} + f \quad (10)$$

根据公式(10)可知,当水下相机阵列平面与被观测表面存在俯仰角时,距离测量公式(10)与平行时的距离测量公式(4)相同。

综合上述三种情况,水下相机阵列平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角的测距公式相同,但在相机4采集的图像中光斑位置会发生改变。当存在旋转角时,光斑  $o_1$  与成像平面中点的距离与光斑  $o_2$ 、 $o_3$  与成像平面中点的距离不再相同,当存在俯仰角时,光斑  $o_3$  与成像平面中点的距离与光斑  $o_1$ 、 $o_2$  与成像平面中点的距离不再相同,根据变化趋势,可以得到距离或旋转角或俯仰角的变化信息。

当水下相机阵列平面与被观测表面平行且距离为 150 mm 时,获得图像中  $b$  的长度  $b_{150}$ ,代入距离测量公式(4)中,得到  $L_{\text{CMOS}}$  的长度为:

$$L_{\text{CMOS}} = \frac{l \cdot f}{(150 - f) \cdot b_{150}} \quad (11)$$

将公式(11)代入距离测量公式(4)中,得到距离  $L$  的计算公式为:

$$L = \frac{2 \cdot (150 - f) \cdot b_{150}}{b + c} + f \quad (12)$$

### 3.4 水下测距与空气中测距的数学关系

以上均为在空气中的测距原理和计算公式,当在水下测距时,需考虑水体对激光成像的影响。由于水对光的折射作用,会放大相同距离下空气中采集的目标图像,设放大系数为  $\varepsilon$ ,则在水下图像中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的长度均扩大  $\varepsilon$  倍,在物距为 150 mm 时得

到的  $b_{150}$  的长度也扩大  $\varepsilon$  倍,则距离  $L$  的计算公式为:

$$L = \frac{2 \cdot (150 - f) \cdot \varepsilon \cdot b_{150}}{\varepsilon \cdot (b + c)} + f = \frac{2 \cdot (150 - f) \cdot b_{150}}{b + c} + f \quad (13)$$

根据公式(13)可知,水下测距公式与空气中测距公式相同,即空气中距离计算公式适用于水下距离的计算。

#### 4 图像阵列拼接

受限于安装的精度,水下相机阵列的光轴不可能全部平行,光心也不可能全部在同一平面,因此校正图像阵列后根据激光光斑的位置拼接图像。

##### 4.1 图像校正

图 10 为相机阵列光轴和光心校正前后的示意图,其中  $C_1, C_2, C_3, C_4$  分别为相机阵列中四个相机的光心。

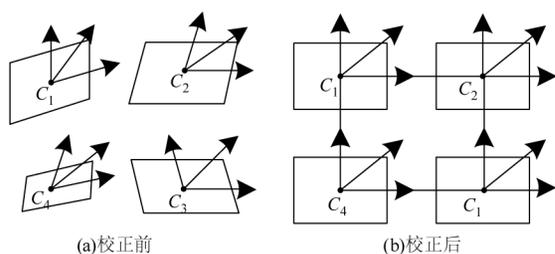


图 10 相机阵列光轴和光心校正前后的示意图

Fig. 10 Diagram of camera array optical axis and optical center

首先校正光轴,校正后相机阵列的光轴全部平行。根据单个相机成像原理,校正前后空间中任意一点的世界坐标  $M$  与对应的图像坐标  $m$  的映射关系分别为:

$$\begin{cases} M_1 = c_1 + s_1(A_1R_1)^{-1}m_1 \\ M_2 = c_2 + s_2(A_2R_2)^{-1}m_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $c$  为光心在世界坐标系中的坐标;  $s$  为物点到光心的距离在光轴的投影;  $A$  为内参矩阵;  $R$  为旋转矩阵。校正前后光心保持不动,即:

$$c_1 = c_2 \quad (15)$$

则校正前后图像坐标之间的关系为:

$$m_2 = s'A_2R_2(A_1R_1)^{-1}m_1 \quad (16)$$

光轴校正至全部平行后校正光心的位置,由于光轴平行,可根据:

$$A_1R_1 = A_2R_2 = AR \quad (17)$$

得到校正前后光心位置的关系:

$$s_2m_2 - s_1m_1 = ARc_1 - ARc_2 \quad (18)$$

##### 4.2 图像拼接

图像阵列校正后,根据激光光斑的像素点坐标,计算重叠区域大小。相机 1 和相机 2 采集的图像重合区域宽度  $L_w$  为:

$$L_w = u_1 - x_1 + x_2 \quad (19)$$

式中,  $u_1$  为相机 1 采集的图像的宽度;  $x_1$  为相机 1 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的横坐标;  $x_2$  为相机 2 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的横坐标。根据公式(19),将相机 2 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的位置拼接 to 相机 1 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的位置,并融合重叠区域。相机 3 和相机 4 采集的图像采用同样的方法拼接。

相机 1 和相机 4 采集的图像重合区域长度  $L_h$  为:

$$L_h = v_1 - y_1 + y_4 \quad (20)$$

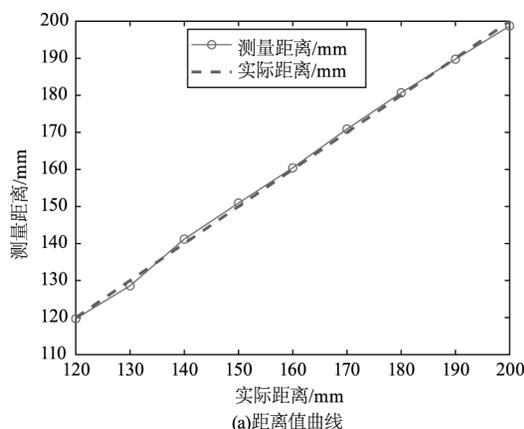
式中,  $v_1$  为相机 1 采集的图像的长度;  $y_1$  为相机 1 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的纵坐标;  $y_4$  为相机 4 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的纵坐标。根据公式(20),将相机 4 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的位置拼接 to 相机 1 采集的图像中激光光斑  $o_2$  的位置,并融合重叠区域。

#### 5 实验结果及分析

##### 5.1 平行时的实验

在空气中搭建实验环境,使用平板代替桥梁、大坝等结构涉水部分的表面,通过移动、转动平板进行实验。

在 120 ~ 200 mm 距离范围内每 10 mm 确定 1 个测距点,即 9 个测距点,每个测距点分别进行 5 次实验并取平均值,图 11 为每个测距点测得的距离值曲线、绝对误差曲线和相对误差曲线。



(a)距离值曲线

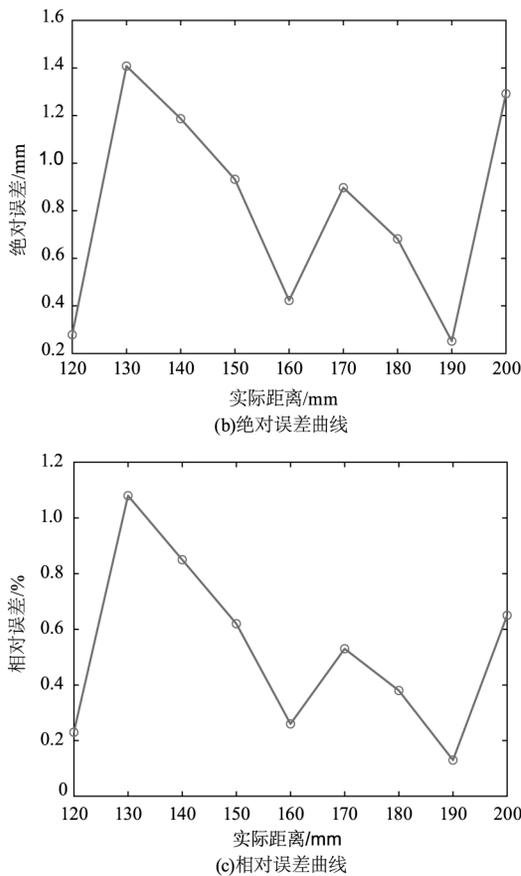


图 11 相机阵列与平板平行时的实验结果

Fig. 11 Results when the camera array is parallel to the tablet

从实验结果可看出,在 120 ~ 200 mm 的距离范围内,绝对误差最大为 1.4 mm,相对误差最大为 1.08 %。

5.2 存在旋转角时的实验

在 120 ~ 200 mm 距离范围内每 10 mm 确定 1 个测距点,即 9 个测距点,每个测距点在 5° ~ 30° 旋转角范围内以 5° 为间隔旋转平板,即 6 个角度,共进行 54 组实验,图 12 为各个旋转角度下测得的绝对误差曲线和相对误差曲线。

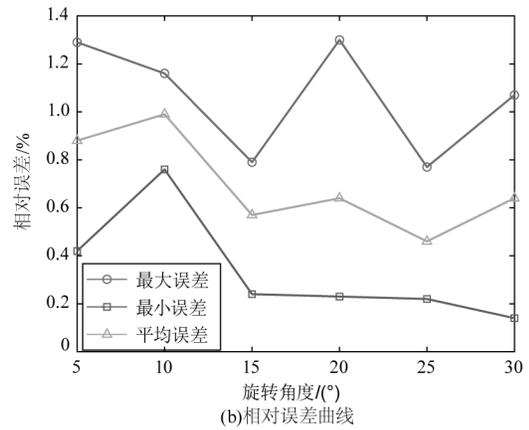
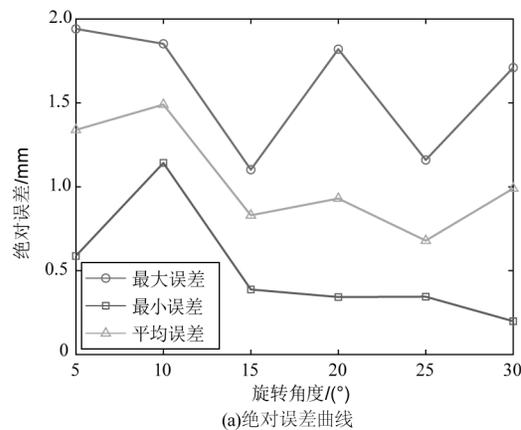


图 12 相机阵列与平板存在旋转角时的实验结果

Fig. 12 Results when there is a rotation angle

从实验结果可看出,绝对误差最大为 1.94 mm,相对误差最大为 1.29 %。

5.3 存在俯仰角时的实验

在 120 ~ 200 mm 距离范围内每 10 mm 确定 1 个测距点,即 9 个测距点,每个测距点在 5° ~ 30° 俯仰角范围内以 5° 为间隔转动平板,即 6 个角度,共进行 54 组实验,图 13 为各个俯仰角度下测得的绝对误差曲线和相对误差曲线。

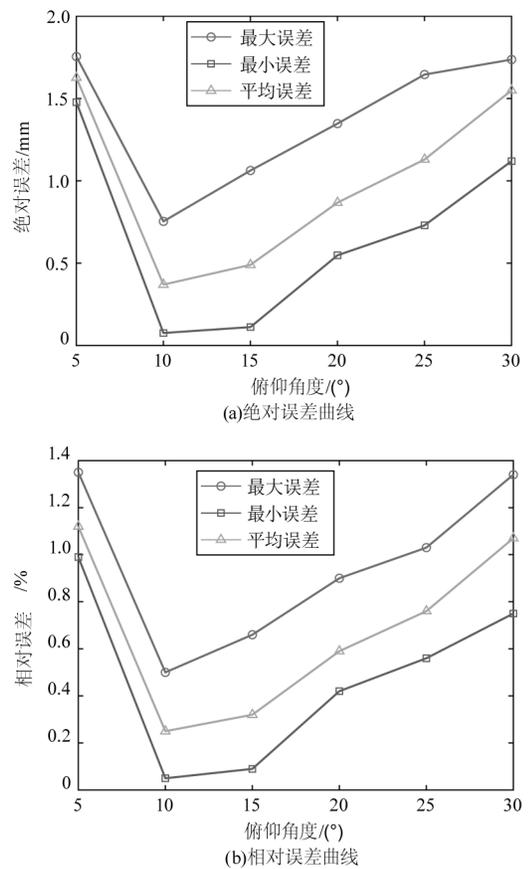


图 13 相机阵列与平板存在俯仰角时的实验结果

Fig. 13 Results when there is a pitching angle

从实验结果可看出,绝对误差最大为 1.76 mm,相对误差最大为 1.35 %。

总体来说,相机阵列平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角三种情况下的测距误差不超过 2 mm,相对误差不超过 1.5 %。

#### 5.4 水下实验

将相机阵列、激光器和平板放置在水箱中进行实验,平板垂直于相机阵列,在 120 ~ 200 mm 距离范围内每 10 mm 确定 1 个测距点即 9 个测距点,每个测距点分别进行 5 次实验并取平均值,图 14 为测得的距离值曲线、绝对误差曲线和相对误差曲线。

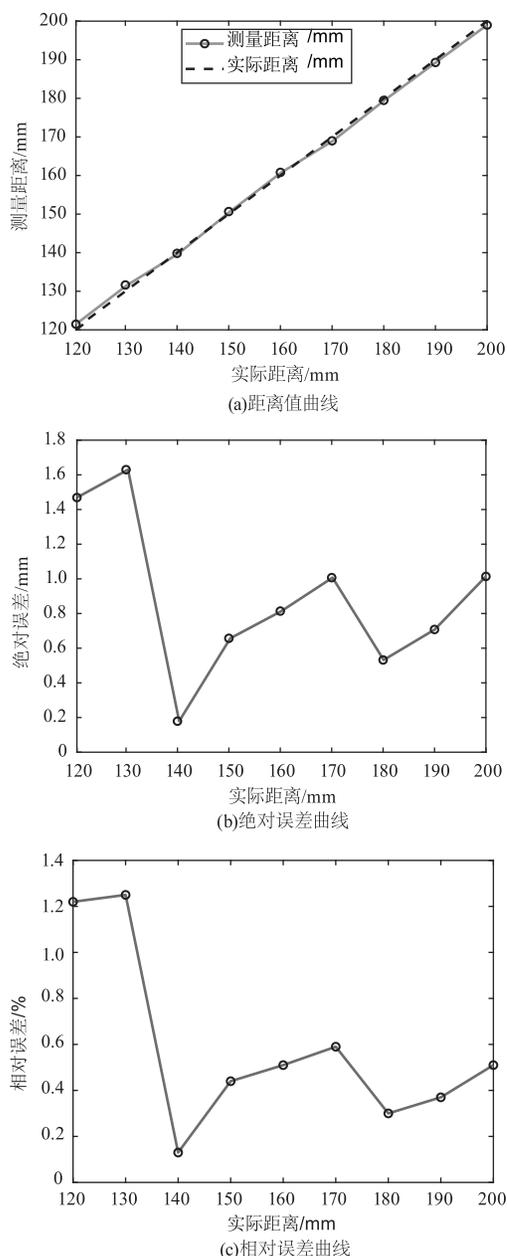


图 14 相机阵列与平板平行时的实验结果

Fig. 14 Results when the camera array is parallel to the tablet

从实验结果可看出,水中测距误差不超过 2 mm,相对误差不超过 1.5 %,与空气中相同。

#### 5.5 图像拼接实验

单个相机采集与其光轴不垂直的平板图像进行校正,图 15 为光轴和光心校正前后的效果图。从图中可以看出校正后光轴基本与平板垂直,校正效果较好。

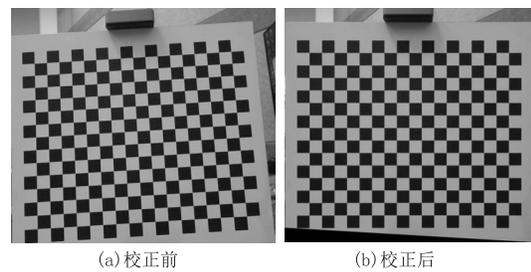


图 15 单个相机光轴和光心校正前后的效果图

Fig. 15 Rendering of camera optical axis and optical center before and after correction

相机阵列中四个相机分别采集包含激光光斑的图像,校正光轴和光心后根据光斑位置计算重叠区域大小,重新采集不包含光斑的图像,校正后根据重叠区域的大小进行拼接,图 16 为四张图像拼接后的效果图。从图中可看出,能达到拼接图像阵列的效果。

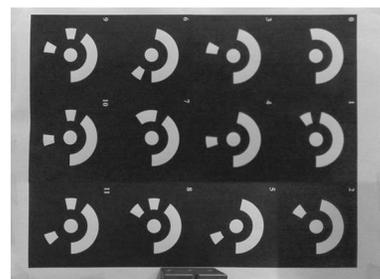


图 16 图像阵列拼接的效果图

Fig. 16 Rendering of image array stitching

### 6 结论

本文将水下相机阵列与激光器相结合实现对距离的测量和图像的拼接,分别推导了相机阵列平面与被观测表面平行、存在旋转角和存在俯仰角三种情况下的距离测量公式,并通过图像中激光光斑的位置拼接了校正光轴和光心的图像阵列。实验结果表明,三种情况下测距误差不超过 2 mm,相对误差不超过 1.5 %,并且较好地实现了图像阵列的校正和拼接。本文提出的方法对于基础设施涉水部分表现的病害检测具有重要意义,并且价格较为低廉,因此具有较大的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Wang Xinping. Research on multi-scale image fusion and stitching algorithm for underwater environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)  
王昕平. 面向水下环境的多尺度图像融合和拼接算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [2] Chen, Peng, Jamet, Cedric, Zhang, Zhenhua, et al. Vertical distribution of subsurface phytoplankton layer in south China sea using airborne lidar[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 263: 112567.
- [3] Shen Zhenmin, Shang Weidong, Wang Bingjie, et al. Lidar with high scattering ratio suppression for underwater detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 92-99. (in Chinese)  
沈振民, 尚卫东, 王冰洁, 等. 高散射抑制比激光雷达水下探测技术探析[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 92-99.
- [4] Liu Tao, Guan Tianhang, Du Hongwang, et al. Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 260-270. (in Chinese)  
刘涛, 关添航, 杜宏旺, 等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 260-270.
- [5] Pan Yingling, Ji Rongyi, Qi Qin, et al. High-speed and high-precision real-time phase laser ranging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(16): 2343-2351. (in Chinese)  
潘映伶, 纪荣祎, 祁勤, 等. 高速高精度实时相位式激光测距系统[J]. 光学精密工程, 2023, 31(16): 2343-2351.
- [6] Cai Wenyu, Heng Liangliang, Yang Junyi, et al. Research on underwater visual ranging technology based on laser projection image[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese)  
蔡文郁, 衡靓靓, 杨俊毅, 等. 基于激光投射视觉处理的水下测距技术研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2015, 35(4): 1-5.
- [7] Wang Bolun. Research on underwater laser three-point ranging method based on multi-color recognition[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022. (in Chinese)  
王博伦. 基于多色识别水下激光三点测距法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- [8] Hu Bo, Zhang Yunfei, Wu Chaopeng, et al. Image-based three-beam underwater laser ranging method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 122-131. (in Chinese)  
胡波, 张云菲, 吴超鹏, 等. 基于图像的水下三点激光测距方法研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 122-131.
- [9] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60: 91-110.
- [10] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [11] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2011: 2564-2571.