

基于图像的水下三点激光测距方法研究

胡波¹, 张云菲², 吴超鹏², 杨永¹, 陈宗恒¹, 宋宏², 陶军¹

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 2. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 基于光学成像原理和激光三角测距法, 提出将三个点激光器与水下相机结合、根据水下光学图像对水下目标物距离进行测量的思路。建立了激光束与目标物垂直、与目标物之间存在旋转角、存在俯仰角三种情况下的三点激光测距理论模型, 推导了目标物距离与水下激光光斑图像之间的数学关系, 在此基础上得到了三种情况下的三点激光测距公式。研制了系统样机, 并通过空气中和水下的距离测量实验, 测试了测距模型和定标算法的误差。实验结果显示, 在 8.4 m 范围内, 使用统一测距公式对距离进行测量时, 测距误差最大值约为 35 cm, 平均测量误差小于 15 cm。研究成果可望用于水下目标较近距离的精确测距。

关键词: 水下激光测距; 水下光学成像; 水下图像处理

中图分类号: P714 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005011

Image-based three-beam underwater laser ranging method

Hu Bo¹, Zhang Yunfei², Wu Chaopeng², Yang Yong¹, Chen Zongheng¹, Song Hong², Tao Jun¹

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China;
2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Based on the principles of optical imaging and the method of triangular laser ranging, a method was proposed to measure the distance of an underwater target by three point laser sources and underwater camera. Theoretical models were built for the cases when the target was perpendicular to the laser beams, when there was a rotation angle and a pitching angle between the target and the laser beams. Mathematical relationships was established between underwater distance and geometric parameters of the laser spot pattern in the underwater image. Based on theoretical models, formulas for distance calibration were deduced. To verify the feasibility and accuracy of the proposed method, a prototype of the laser ranging system was implemented and tested in air and underwater. Experimental results show that the maximal measurement error is 35 cm and the mean value is less than 15 cm for a range within 8.4 m. The system has the potential to be used for accurate ranging at short distance underwater.

Key words: underwater laser ranging; underwater optical imaging; underwater image processing

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41606071); 中国大洋矿产资源研究开发协会资源环境类课题(DY135-C1-1-08)

作者简介: 胡波(1986-), 男, 工程师, 主要从事水下光学和机器人相关方面的研究。Email: huboqf@foxmail.com

0 引言

水下距离的准确测量对于深海资源勘探、水下地形扫描、水下避障有着重要作用。目前水下距离测量的技术有多种,例如,水下声学测距^[1]、水下多目视觉测距^[2-3]、水下激光测距等^[5-6]。

水下声学测距^[1]是目前水下测距的主要技术手段之一,可以实现中远程距离的准确测量。就水下近距离(米级)测量而言,水下三维激光扫描仪^[4]的测距精度可达厘米或毫米级别,但其功耗大,价格昂贵。采用相位式测距原理的水下激光测距仪^[5-6]也被用于水下测距,但由于水体散射严重,极大地影响了测距精度和测量范围,仅实现了水下 3 m 范围内的距离测量。将水下相机与两束平行激光相结合^[7],根据图像上两光斑像素距离和目标距离间的函数关系也可实现水下距离测量。单目三点视觉测距系统^[8-9]使用三种不同颜色(红、绿、蓝)的平行激光束,按照等边三角形的排列组合照射在目标物或平面上,根据图像进行距离测量,但是当系统与目标物之间存在一定夹角时,测距误差将会急剧增加。此外,还有一种用于移动港系统高效货物海运的三光束检测系统^[10-11]。该系统中三个一维激光测距仪按照等腰三角形的排列平行出射激光束,结合红外相机成像,实现了集装箱距离的测量。

文中主要基于激光三角测距的工作原理,设计并研制了可用于水下 10 m 距离测量的三点激光测距系统。相较于陆地上的三光束检测系统,本系统以特殊距离排列和特殊俯角固定安装三个红色点状激光器组,使用水下相机拍摄三激光束形成的光斑,结合测距模型理论推导测距定标算法实现水下近距离高精度的目标距离探测。文中研究了激光束与目标物垂直、两者存在旋转角、存在俯仰角三种情况下的三点测距定标算法,并通过实验进行验证。

文中提出将带有俯角固定安装的水下三点激光器组与水下成像和图像处理技术结合进行水下距离测量,对测距原理进行了理论分析,并通过实验加以验证。所研究的系统硬件结构简单、功耗低、便于安装搭载,而且提高了距离测量与图像采集之间的同步性。

1 水下三点激光测距系统结构

图 1 为水下三点激光测距系统的结构示意图,

主要由水下三点激光器组、水下相机、图像获取与存储、图像数据处理及定标、显示模块组成。图 2 所示为水下三点激光测距系统照片,水下三点激光器组由三个水下激光器、激光器安装支座等构成。

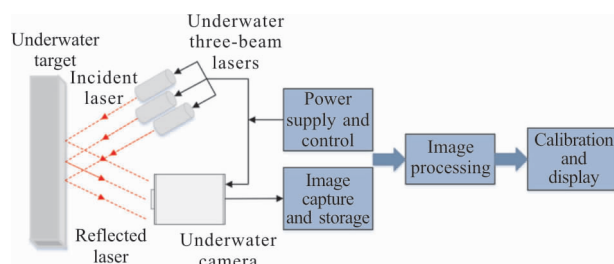


图 1 水下三点激光测距系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of underwater three-beam ranging system

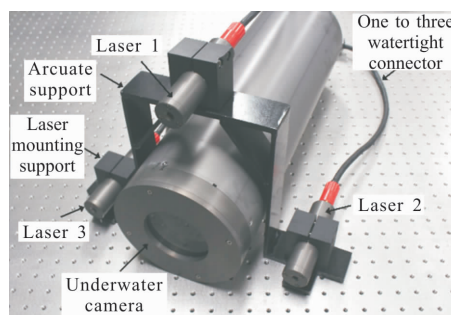


图 2 水下三点激光测距系统实物图

Fig.2 Photo of the underwater three-beam laser ranging system

水下激光器的激光功率为 150 mW,出射激光中心波长为 638 nm。水下三点激光器组中的下方两个水平激光器的中心距离为 300 mm,上方激光器与下方两平行激光器间的垂直距离为 230 mm,且上方激光器存在一个 3.5°的安装俯角。水下相机采用美国 Lumenera 公司 LM165 型号的 CCD 相机并进行水下密封。

水下三点激光器组下方的两个激光器(激光器 2 和 3)发射两束平行激光,上方的激光器(激光器 1)以固定俯角出射激光。三束激光均照射在水下目标物上,产生三个激光光斑,形成光斑图案,光斑图案随着水下目标距离的改变而发生变化。水下相机拍摄三个激光光斑形成的图案,通过图像处理获得三个激光光斑间的像素点信息,再根据距离与激光光斑间的定标关系计算系统到水下目标物的距离并进行显示。

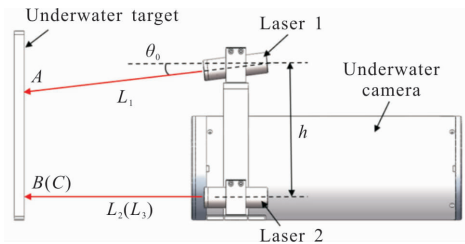
2 工作原理

此节以平板目标为例,分析激光束与目标物垂

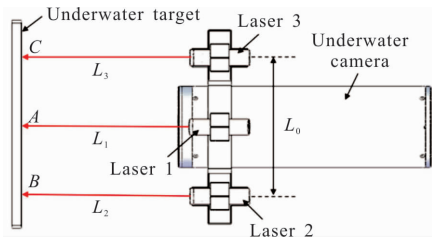
直、两者存在旋转角和存在俯仰角三种情况下的三点激光测距工作原理,推导三点激光测距公式。

2.1 垂直情况下的激光测距

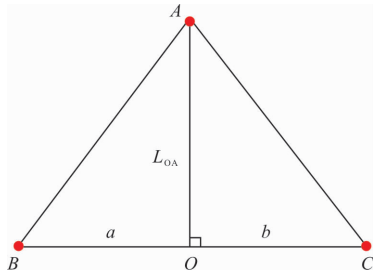
当三点激光测距系统水平出射的激光与目标物垂直时,如图 3(a)、(b)示,激光器 1 斜向下出射的激光束与水平面成一固定俯角 θ_0 , 激光器 2 和 3 水平出射激光,水下相机安装在激光器 1 的正下方,激光器 1、2、3 出射的三束激光照射在目标物板上所形成的激光光斑分别标记为 A、B、C, 传输距离分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 。



(a) 侧视图
(a) Side view



(b) 俯视图
(b) Top view



(c) 图像中三个激光光斑的位置

(c) Position of three laser spots in the image

图 3 垂直情况下三点激光测距系统工作原理图

Fig.3 Working principle of the three-beam laser ranging system when the target is perpendicular to the parallel laser beams

水下相机拍摄的图像中目标物板上三个激光光

斑可组成一个等腰三角形,如图 3(c)所示。其中 a 、 b 分别为水下图像上激光光斑 A 与激光光斑 B 和 C 的水平像素点差值, L_{OA} 为图像上激光光斑 A 和激光光斑 B 与 C 连线之间的垂直像素点差值。

根据透镜成像规律,可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L_2 - f} \\ b \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L_3 - f} \\ L_{\text{OA}} \cdot L_{\text{CCD}} = (h - L_1 \cdot \tan \theta_0) \cdot \frac{f}{L_1 - f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_{CCD} 为 CCD 图像传感器的单个像素尺寸; f 为镜头焦距; L_0 为激光器 2 与 3 之间的水平距离; h 为激光器 1 与激光器 2、3 之间的垂直高度; θ_0 为激光器 1 的俯角,均为定值。

三点激光测距系统到目标物的实际距离 L 与 L_1 、 L_2 、 L_3 三者间的距离关系为:

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

整理可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L - f} \\ b \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L - f} \\ L_{\text{OA}} \cdot L_{\text{CCD}} = (h - L \cdot \tan \theta_0) \cdot \frac{f}{L - f} \end{cases} \quad (3)$$

解方程组(3)得到距离 L 的理论计算公式:

$$L = \frac{h}{\tan \theta_0} - \frac{L_0 L_{\text{OA}}}{(a+b)\tan \theta_0} \quad (4)$$

定义中间变量 u 为:

$$u = \frac{L_{\text{OA}}}{a+b} \quad (5)$$

则实际距离 L 的理论计算公式为:

$$L = \frac{h}{\tan \theta_0} - \frac{L_0 L_{\text{OA}}}{(a+b)\tan \theta_0} = \frac{h}{\tan \theta_0} - \frac{L_0}{\tan \theta_0} \cdot u \quad (6)$$

由公式(6)可知,在测距定标算法中可以采用线性函数的形式进行实际距离 L 与中间变量 u 的定标系数拟合。

2.2 存在旋转角时的测距原理

当三点激光测距系统水平出射激光与目标物不垂直且存在旋转角 θ 时,水下相机拍摄的图像中目标物板上三个激光光斑不再组成一个等腰三角形,侧视图、俯视图、激光光斑位置见图 4(a)~(c)。

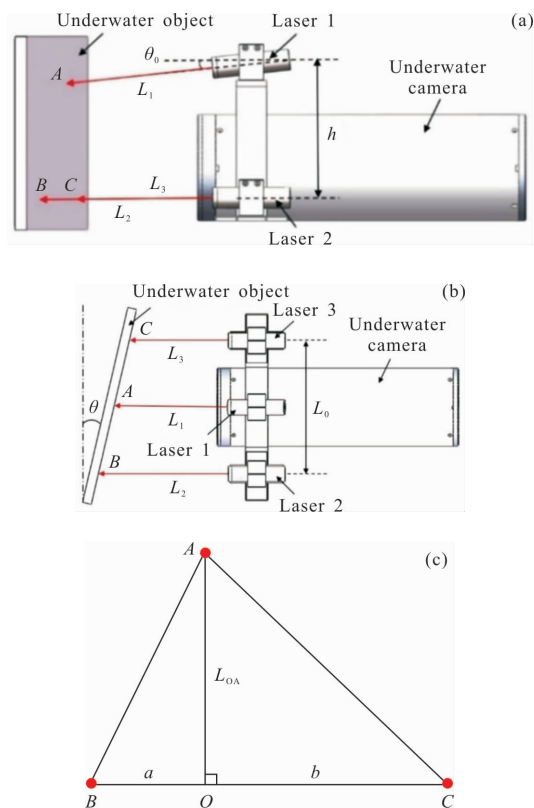


图 4 存在旋转角情况下三点激光测距系统工作原理图

Fig.4 Working principle of the three-beam laser ranging system when there is a rotation angle

此时实际距离 L 与 L_1 、 L_2 、 L_3 三者间的距离关系为:

$$\begin{cases} L_1=L \\ L_2=L+\frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 \\ L_3=L-\frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 \end{cases} \quad (7)$$

结合透镜成像公式(1),整理可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L + \frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 - f} \\ b \cdot L_{\text{CCD}} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L - \frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 - f} \\ L_{\text{OA}} \cdot L_{\text{CCD}} = (h - L_1 \cdot \tan\theta_0) \cdot \frac{f}{L - f} \end{cases} \quad (8)$$

则实际距离 L 的理论计算公式为:

$$L = \frac{h}{\tan\theta_0} - \frac{L_0}{\tan\theta_0} \cdot \frac{L_{\text{OA}}(a+b)}{4 \cdot ab} \quad (9)$$

根据泰勒公式 $\frac{1}{1+x} \approx 1-x (|x| \ll 1)$ 和 $L_0 \cdot \tan\theta_0 \ll$

$L-f$,对公式(8)进行整理,可得:

$$\begin{cases} a \cdot L_{\text{CCD}} \approx \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L-f} \left(1 + \frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 \cdot \frac{1}{L-f}\right) \\ b \cdot L_{\text{CCD}} \approx \frac{L_0}{2} \cdot \frac{f}{L-f} \left(1 - \frac{L_0}{2} \cdot \tan\theta_0 \cdot \frac{1}{L-f}\right) \end{cases} \quad (10)$$

再将公式(10)代入公式(9),则实际距离 L 的理论计算公式为:

$$L \approx \frac{h}{\tan\theta_0} - \frac{L_0 L_{\text{OA}}}{(a+b)\tan\theta_0} \approx \frac{h}{\tan\theta_0} - \frac{L_0}{\tan\theta_0} \cdot u \quad (11)$$

由公式(11)可知,旋转角度存在时,测距公式(11)的结构与垂直情况下的测距公式(6)一致。即在不同旋转角度的情况下,中间变量 u 与距离 L 仍保持线性关系。

2.3 存在俯仰角时的测距原理

三点激光测距系统水平出射激光与目标物不垂直且存在俯仰角 φ 时,水下图像中目标物板上三个激光光斑仍可组成一个等腰三角形,侧视、俯视、三个激光光斑位置见图 5 (a)~(c)。与垂直情况下的激光光斑图像相比,光斑三角形中 B 、 C 点保持不变,但等腰三角形的高度 OA 会减小,且在同一距离下,随着俯仰角 φ 的增大,光斑三角形中 A 点逐渐下移。

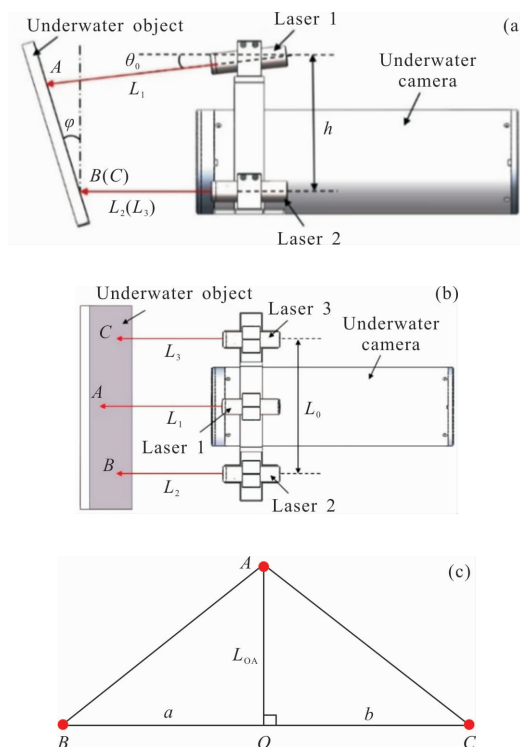


图 5 存在俯仰角情况下三点激光测距系统工作原理图

Fig.5 Working principle of the three-beam laser ranging system when there is a pitching angle

此时实际距离 L 与 L_1 、 L_2 、 L_3 三者间的距离关系为:

$$\begin{cases} h-L_1 \cdot \tan \theta_0 = \frac{L_1-L}{\tan \varphi} \\ L_2=L_3=L \end{cases} \quad (12)$$

结合透镜成像公式(1),整理可得实际距离 L 的理论计算公式为:

$$L=f+\frac{f \cdot L_0(a+b)}{4L_{\text{CCD}} \cdot ab} \quad (13)$$

定义中间变量 v 为:

$$v=\frac{a+b}{ab} \quad (14)$$

则实际距离 L 的理论计算公式为:

$$L=f+\frac{f \cdot L_0}{4L_{\text{CCD}}} \cdot v \quad (15)$$

公式(15)的结构与公式(6)和(11)并不一样,没有把距离 L 完全表示为激光器的几何间距、图像上三角形的边长及高等参数。在引入焦距 f 以后,可以看出距离 L 与中间变量 v 存在线性关系。

把存在旋转角的情况和存在俯仰角的情况进行对比可以发现:存在旋转角时,旋转角度的变化会引起顶点 A 的左右移动, BO 、 OC 两条线的长度发生变化,即一条线变长、另一条线相应变短,因此具有一定的差分放大作用。根据这两条线相对长度的变化可以获得角度变化的信息,从而可以把距离和角度的变化加以区分。而当俯仰角增大或者减小时,其引起的顶点高度变化与距离引起的高度变化效果相重合,而且没有另外的点(例如与 A 相对于 O 点对称的点)把俯仰角引起的变化进行差分放大,因此仅从图像上 A 、 B 、 C 三点难以准确区分俯仰角的大小和目标物距离的远近。

3 空气中测试结果

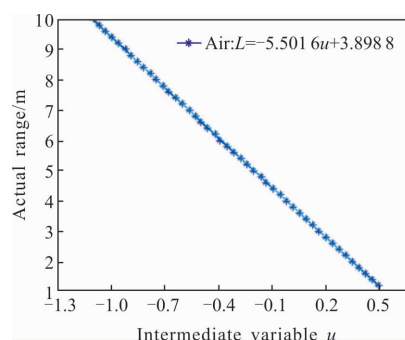
3.1 垂直情况下测试

在空气中搭建三点激光测距实验平台,使用白板作为测距目标物且与平行激光束垂直。移动白板,并拍摄不同距离下白板上激光光斑的图像。白板与系统的距离通过卷尺测量得出,用于数据校准和测试。

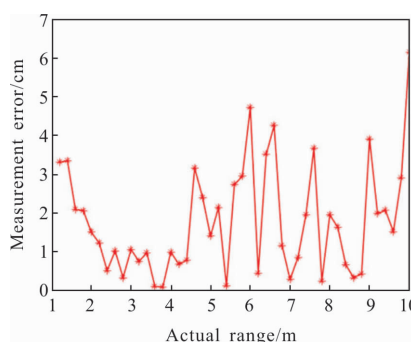
对所拍摄光斑图像进行处理,提取出三个激光光斑的中心像素坐标值,从而计算三个激光光斑间的水平像素差值和垂直像素差值。在此基础上,根据公式(5)计算中间变量 u ,并对中间变量 u 和距离 L

进行数值拟合,得到两者之间的数值关系。

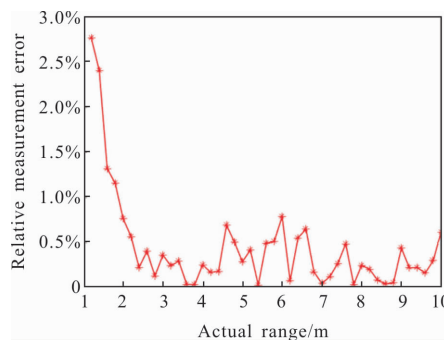
图 6 所示为空气中的三点激光测距定标曲线、定标绝对误差曲线和定标相对误差曲线。定标误差数据显示,在空气中 10 m 测试范围内,测距定标的距离误差绝对值在 0.1~6.1 cm 范围内,误差绝对值的平均值为 1.8 cm,距离定标相对误差最大为 2.8%。



(a) 空气中定标关系曲线
(a) Calibration curve in air



(b) 定标绝对误差
(b) Absolute error during calibration



(c) 定标相对误差
(c) Relative error during calibration

图 6 空气中垂直情况下三点激光测距系统定标结果及误差
Fig.6 Calibration results and errors of three-beam laser ranging system in case of perpendicular measurement in air

为了进一步验证定标公式的准确性,重新获取 10 组距离分布在 1.2~10 m 间的三点激光光斑图,使用上述定标实验所得的测距定标算法对此 10 组测试数据进行计算,求得距离。距离测量误差绝对值在 0.1~4.7 cm 范围内,测距相对误差最大值为 1.0%,验证了模型的准确性。

3.2 存在旋转角情况下测试

在 1.5~7.1 m 的距离范围内等间距确定 21 个距离点,在每个距离点上均在 0°~50° 旋转角范围内以 5° 为间隔旋转目标白板(共计 11 个角度),并拍摄白板上的光斑图像,共获取 231 组激光光斑图像,从中计算出 231 组激光光斑三角形数据。

基于光斑图像数据计算中间变量 u , 并与实际距离 L 进行拟合定标,图 7(a)~(c)所示为各旋转角

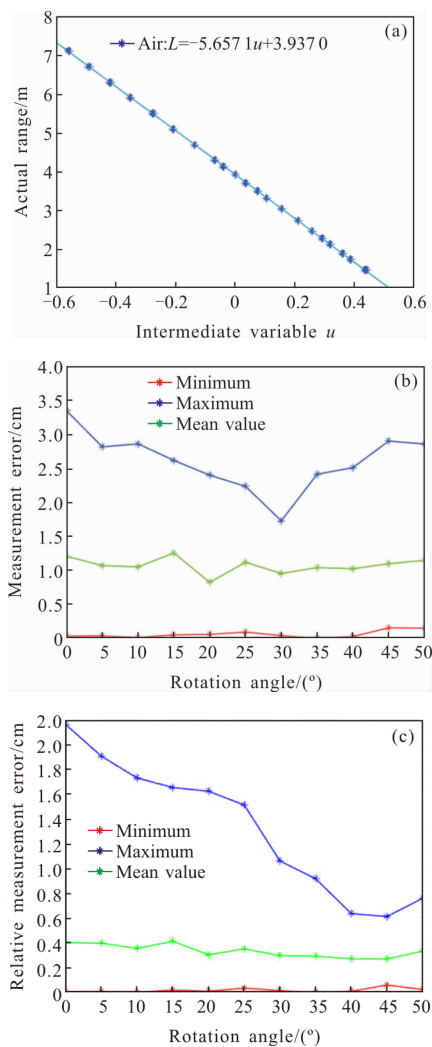


图 7 存在旋转角度时三点激光测距系统定标误差

Fig.7 Calibration error of three-beam laser ranging system in case there is a rotation angle

度下的测距定标曲线、距离定标绝对误差曲线和相对误差曲线。距离定标绝对误差最大为 3.3 cm,绝对误差平均值为 1.1 cm,相对误差最大为 2.2%,相对误差平均值为 0.3%。

3.3 存在俯仰角情况下测试

在 1.16~8.42 m 距离范围内等间距确定 21 个距离点,在每个距离点上改变目标白板的俯仰角,俯仰角的范围为 0°~60°,角度间隔为 5°(共计 13 个角度),共获得 273 组激光光斑图像。计算出每组激光光斑三角形的几何数据,基于这些数据计算中间变量,并与实际距离 L 进行数值拟合定标。

图 8(a)~(c) 所示为各俯仰角度下的测距定标曲线、距离定标绝对误差曲线和相对误差曲线。距离定

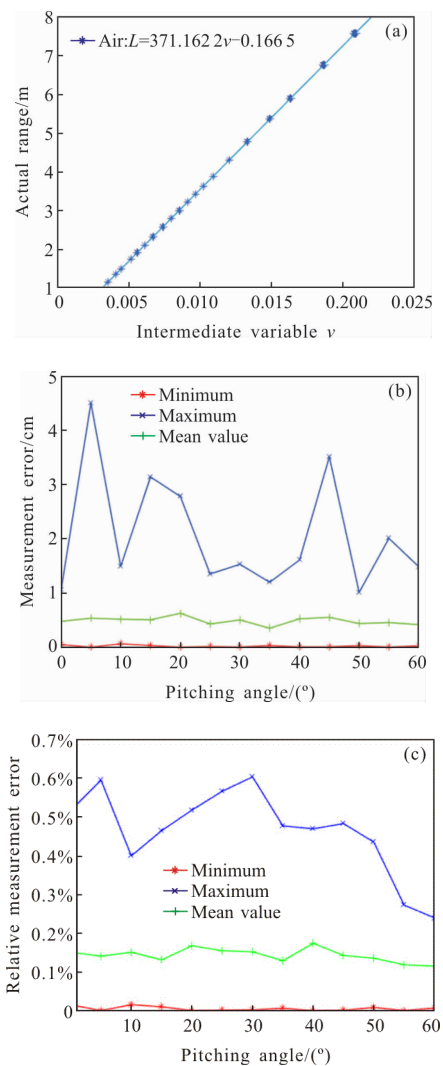


图 8 存在俯仰角度时三点激光测距系统定标误差

Fig.8 Calibration error of three-beam laser ranging system in case there is a pitching angle

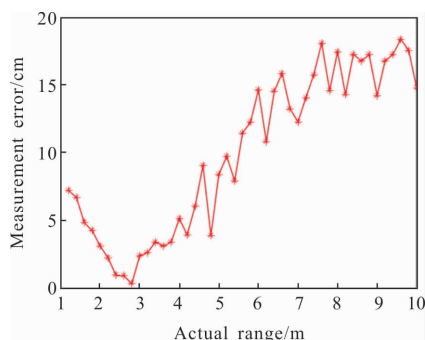
标绝对误差最大值为 4.5 cm, 绝对误差平均值为 0.5 cm, 距离定标相对误差最大值为 0.6%, 相对误差平均值为 0.1%。

3.4 使用统一的测距公式进行测试

在实际测量的过程中, 目标物的距离、角度等参数均是未知的, 因此需要根据图像、使用统一的测距公式对目标物的距离进行计算。

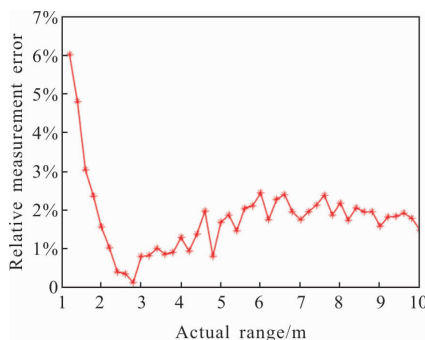
根据理论推导可知, 垂直情况可以看成是存在旋转角和存在俯仰角这两种情况的特例, 即旋转角为 0° 、俯仰角为 0° 的特殊情况。同时, 考虑到三点激光测距法存在一定的局限性, 并不能从图像上准确区分俯仰角引起的三点形状变化, 因此将采用存在旋转角的情况下的测距公式(即公式(11))作为统一测距公式进行距离测量。这样的做法实际上是忽略了俯仰角对距离测量的影响, 如果实际情况中存在俯仰角, 那么距离测量误差将会随之增加。

使用统一测距公式对垂直、存在俯仰角两种情况下(存在旋转角的情况见 3.2 节)的图像进行处理, 得到测距误差曲线分别如图 9、图 10 所示。



(a) 测距绝对误差

(a) Absolute error during measurement



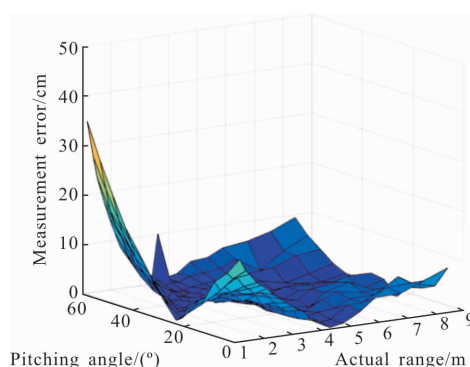
(b) 测距相对误差

(b) Relative error during measurement

图 9 使用统一测距公式时, 垂直情况下的测距误差结果
Fig.9 Distance measurement error in case of perpendicular measurement, using the unified ranging formula

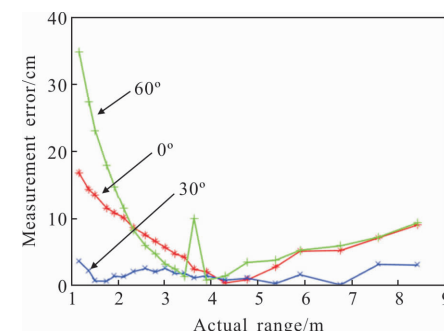
由图 9 可以看出, 垂直情况下的测距误差绝对值在 0.3 cm~18.4 cm 范围内, 误差绝对值的平均值为 10.0 cm, 测距误差相对值在 0.1%~6.0% 范围内, 相对误差平均值为 1.8%。

存在俯仰角时, 误差随距离和角度的分布情况如图 10 所示。从图上大致可以看出, 当距离较小时,



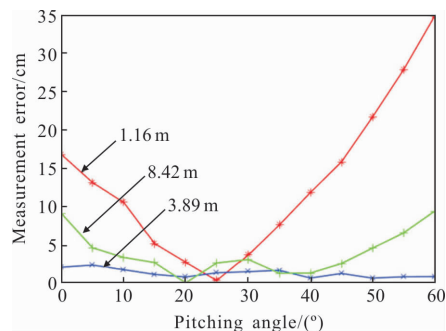
(a) 测距误差随距离和俯仰角变化

(a) Measurement error with respect to the distance and pitching angle



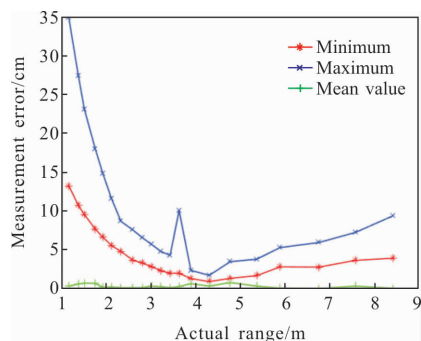
(b) 测距误差随距离变化

(b) Measurement error with respect to the distance



(c) 测距误差随俯仰角变化

(c) Measurement error with respect to the pitching angle



(d) 测距误差随距离变化的统计曲线

(d) Statistics curves on the measurement error with respect to the distance

图 10 使用统一测距公式时,存在俯仰角情况下的测距误差曲线

Fig.10 Distance measurement error in case there is a pitching angle, using the unified ranging formula

测量误差受距离影响较大,而当距离增加时,角度对距离测量的影响较小,误差减小。例如,当距离为 1.16 m 时,测量误差最大达到约 35 cm;而当距离在 3.9 m 时,尽管俯仰角在 0°~60° 范围内变化,误差已被限制在 0~2.5 cm 的范围内;即使距离达到 8 m,测量误差最大值也不超过 10 cm。这一结果可以这么理解:当距离较近时,俯仰角的变化所引起顶点 A 的上下移动相对于底边长度来说比较大,因此对于测距结果影响较大;而当距离较远时,俯仰角引起的 A 点上下移动相对来说比较小,因此对于测距结果影响较小。

整体而言,测量误差绝对值的平均值在 0.9~13.2 cm 的范围内。当距离超过 2.33 m 后,尽管俯仰角在 0°~60° 之间发生变化,测量误差仍在 10 cm 以内。

4 水下测试结果

将三点激光测距系统和目标白板置于水池中进行测试,水下图像如图 11 所示。在 1.2~10 m 距离范

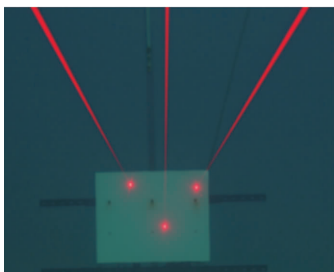


图 11 水下测试白板图像

Fig.11 Photo of the white board underwater

围内,以 20 cm 为间隔拍摄激光光斑图像。由于水下实验条件限制,将目标白板垂直于平行激光束,未施加旋转或者俯仰角度。

图 12 所示为水下不同距离的激光光斑图像。从图像可以看出,随着距离增大,图像上光斑三角形的底边长度逐渐减小,同时三角形顶部的激光光斑逐渐向下移动。

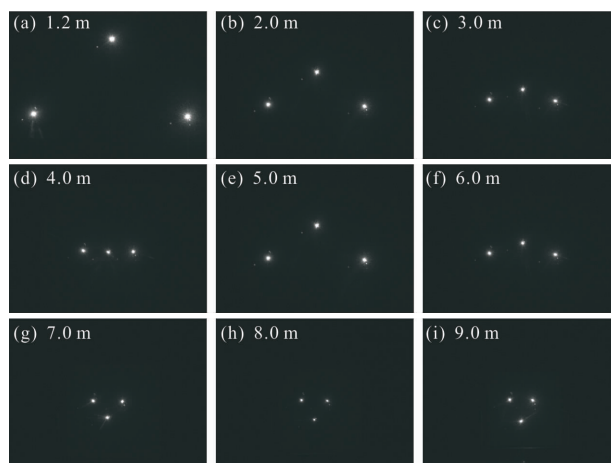
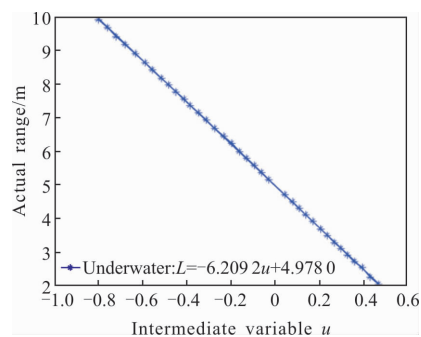


图 12 水下激光光斑图像

Fig.12 Underwater image of the laser spots

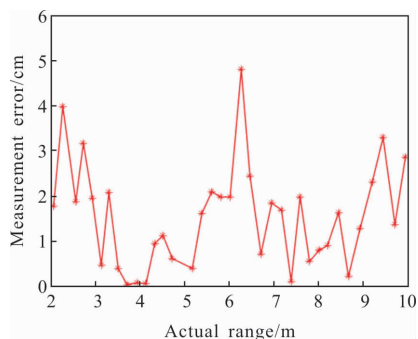
根据水下图像获得了水下三点激光测距定标曲线、定标绝对误差和相对误差曲线,如图 13(a)~(c)所示。定标误差数据显示,在水下 10 m 测试范围内,三点激光测距定标校正后的距离误差绝对值范围在 0.0~4.8 cm 范围内,误差绝对值平均值为 1.5 cm,相对误差最大值为 1.8%。

为了测试定标的准确性,在 2~10 m 范围,重新获取 9 组不同距离的三点激光光斑图像,使用这 9 组测试数据对之前水下测距定标实验所得的测距定标算法进行验证。结果显示,距离测量误差绝对值范围为 1.7~4.7 cm,测距相对误差值最大为 1.5%,结果比较准确。



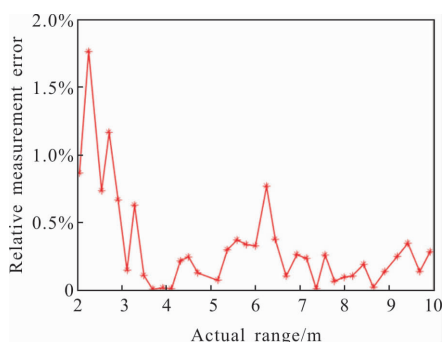
(a) 水下定标关系曲线

(a) Calibration curve underwater



(b) 定标绝对误差

(b) Absolute error during calibration



(c) 定标相对误差

(c) Relative error during calibration

图 13 水下垂直情况下三点激光测距定标结果及误差

Fig.13 Calibration results and errors of three-beam laser ranging system in case of perpendicular measurement underwater

5 测试结果对比

表 1 所示为不同情况下分别使用单独的测距定标算法的测距误差。对于空气中的测试,在有旋转角和俯仰角的情况下,随着距离的增大,图像中三个激光光斑之间的像素点差值随距离的增大越来越不明显,因此,测试范围仅分别约为 7 m 和 8 m。

表 1 不同情况下测距误差比较

Tab.1 Comparison of the calibration error in different cases

	Perpendicular		Rotation	Pitching
	In air	Underwater		
Maximum distance /m	10	10	7	8
Maximum error /cm	6.1	4.8	3.3	4.5

表 2 所示为使用旋转角度下的测距公式作为统一测距公式时的测距误差。使用统一的测定公式时,垂直和存在俯仰角度时的测距误差比分别定标时的误差更大,这一方面是因为定标数据与测试数据之间存在差异,另一方面也是因为统一公式没有考虑俯仰角对图像的影响。然而,尽管误差增加,当距离超过 2.33 m 后,俯仰角对测量的影响明显减小。当俯仰角在 0°~60°之间发生变化时,测量误差被限制在 10 cm 以内。

表 2 使用统一测距公式时测距误差比较

Tab.2 Comparison of the calibration error in different cases using the unified ranging calibration formula

	Perpendicular	Rotation	Pitching
Maximum distance /m	10	7	8
Maximum error /cm	18.4	3.3	34.8

6 结论

文中提出了将光学成像与激光三角测距相结合的水下三点激光测距方法,推导了激光束与目标物之间垂直、存在旋转角、存在俯仰角三种情况下的测距公式,搭建了空气中和水下的实验测试平台,通过实验测试了不同情况下三点激光测距方法的误差。实验结果表明,在目标物与激光束垂直、存在旋转角、存在俯仰角三种情况下,使用统一测距公式对距离进行测量时,测距误差最大值约为 35 cm;当距离超过 2.33 m 后,俯仰角在 0°~60°之间发生变化时,测量误差被限制在 10 cm 以内。

该三点激光测距系统目前尚不能区分俯仰角引起的图形变化和距离引起的变化,距离计算过程中忽略了俯仰角因素,因此测量误差会随着俯仰角度增加。后续工作中将考虑在 A 点相对于 O 点对称的位置再增加一个激光点 J 点(即变成四点激光测距系统),并且该点随着俯仰角产生与 A 点反向的变化,那么通过 A 点与 J 点位置的相对变化将可以准确地判断出俯仰角度的变化和实现距离的测量。该思路将在后续的研究工作中进行验证和完善。

参考文献:

- [1] Wan Guangnan. Research on underwater target detection based laser and ultrasound [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
万广南. 基于激光和超声的水下目标探测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] Zhang Honglong, Chen Tao, Zhuang Peiqing, et al. A Binocular stereo vision system for underwater 3D measurement [J]. *Journal of Integration Technology*, 2018, 7(3): 1–14. (in Chinese)
张洪龙, 陈涛, 庄培钦, 等. 基于立体视觉的水下三维测量系统研究[J]. 2018, 7(3): 1–14.
- [3] Weidner N, Rahman S, Li A Q. Underwater cave mapping using stereo vision [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017: 5709–5715
- [4] Liu Z, Krys D. The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31: 246–257.
- [5] Zhang Y, Guo Y, Wei H, et al. Influence of water on underwater distance measurement by a laser range finder [C]//IEEE OCEANS 2017–Aberdeen, 2017: 1–5.
- [6] Laux A, Mullen L, Perez P, et al. Underwater laser range finder [C]//Ocean Sensing and Monitoring IV. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8372: 83721B.
- [7] Chen Jiankang. Double laser underwater target detection research of two-dimensional [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
陈建康. 双激光水下目标二维探测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [8] Heng Jingjing. Design and application of underwater visual ranging system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013. (in Chinese)
衡靓靓. 水下视觉测距系统的设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [9] Cai Wenyu. Research on underwater ranging technology based on laser transmission vision processing [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2015, 35(4): 1–5. (in Chinese)
蔡文郁. 基于激光透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.
- [10] Kim Y K, Kim K S, Kim S. A portable and remote 6-DOF pose sensor system with a long measurement range based on 1-D laser sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5722–5729.
- [11] Kim Y K, Kim Y, Jung Y S, et al. Developing accurate long-distance 6-DOF motion detection with one-dimensional laser sensors: Three-beam detection system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3386–3395.