

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.202006335

深海原位激光扫描双目立体视觉成像系统^{*}

谢亮亮,屠大维,张旭,肖国梁,金攀

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444)

摘要:为满足深海物体原位三维测量需要,提出一种激光扫描双目立体视觉成像方法。该方法基于双目立体视觉原理,采用四维光场光线表示法,建立水下双目立体成像系统的测量模型;采用激光线扫描光条作为像素匹配线索,及基于共面约束的像素匹配算法,提高水下左、右两个相机图像像素匹配精度。通过耐高压结构设计、电气和软件设计,建立起相应的工程样机。静水压力试验表明,该工程样机能够适应4 000 m深海静水压力;实验室精度试验,采用标准球棒为测量对象,在距离样机3 m处,多次扫描三维重建后,得到两靶球球心距测量结果的标准差为2.28 mm;南海真实海域实测试验,表明样机具有深海原位三维测量重建功能,且在距离样机2 m处,对标准球棒两球心距测量结果的标准差为2.22 mm。上述研究和试验表明,研制的激光扫描双目立体视觉成像系统,具备深海原位测量功能,具有较高三维测量精度。

关键词: 深海原位测量;水下三维成像;双目立体视觉;激光扫描

中图分类号: TH74 TP39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Deep sea in-situ binocular stereo vision imaging system with laser scanning

Xie Liangliang, Tu Dawei, Zhang Xu, Xiao Guoliang, Jin Pan

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: To achieve the 3D measurement of deep sea in-situ objects, a laser scanning binocular stereo vision imaging method is proposed. Based on the principle of binocular stereo vision, an underwater binocular stereo imaging measurement model is formulated in the form of a four-dimensional light field representation. The laser line scanning light bar is used as the pixel matching clue. The pixel matching algorithm improves the accuracy between two cameras, which is based on coplanar constraints. Through the design of high-pressure resistant structural, electrical and software, the corresponding engineering prototype is developed. Hydrostatic pressure experiments show that the prototype can adapt to the pressure in a depth of 4 000 meters in deep sea. In the laboratory precision experiment, a standard bat is 3 meters away from the prototype to evaluate the measurement accuracy. After multiple scans and 3D reconstructions, the standard deviation of the center distance between two balls is 2.28 mm. The South China Sea actual experiments show that the prototype has the capacity to implement the deep sea in-situ scanning 3D measurement and reconstruction work. The standard deviation of the standard bat is 2.22 mm at a distance of 2 meters from the prototype. The above researches and experiments indicate that the prototype has the capacity of in-situ measurement in deep sea. The higher three-dimensional measurement accuracy can be realized.

Keywords: deep sea in-situ measurement; underwater three-dimensional imaging; binocular stereo vision; laser scanning

0 引言

水下视觉成像是海洋生物学研究、海洋考古、海底设备维护,以及军事上目标探测识别等的重要手段,现有的

高清二维摄像,存在有“观”无“测”的不足,促使人们开展对水下三维视觉成像测量系统的研究^[1-2]。当前已开发多种空气中应用的三维成像原理和系统,如,双目立体视觉法、结构光法、同步扫描法等^[3-6]。由于水下环境的特殊性,同样原理的三维视觉成像应用到水下,将会面临

收稿日期:2020-05-03 Received Date: 2020-05-03

^{*} 基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0302401)、国家自然科学基金(61673252)项目资助

新的问题。首先,由于光线在水中的散射、吸收,成像质量受到较大的影响,严重影响了三维重建特征点的提取精度^[7-9];其次,水下相机被封装在玻璃窗口密封筒内,光线在水-玻璃-空气多介质转播中发生折射,小孔成像模型不再适用^[10];此外,对于深海应用,还必须解决深海耐静水高压问题。

国内外学者对双目立体视觉成像技术做了大量的研究,并将其广泛应用于水下三维测量中。Giambruno等^[11]基于双目立体视觉技术,实现对水下物体的线性激光扫描并进行三维重建,但被测目标物三维点云重建精度不高。Cebrian-Robles等^[12]通过固定线性激光器和摄像机,利用被测物体的运动来完成水下扫描任务,实现对目标物的三维重建,但该方法不适合对水下物体的原位扫描测量。解则晓等^[13]提出了线结构光自扫描技术,对光条中点的位置因折射产生的误差进行补偿,存在一定的补偿累积误差,影响测量精度。张文明等^[14]提出一种水下图像转换模型,将水下图像转化为等效空气图像,但该模型对折射问题进行了近似简化,具有一定的局限性。翼光强^[15]利用线激光实现了水下目标的三维重建,但不能精确提取及匹配光条中心,目标物重建精度不高。基于此,张强等^[16]对双目立体视觉成像的立体匹配进行了研究,提出一种水下图像区域匹配算法,但该方法基于双目平行成像的理想模型,不适合于一般应用情况。

本文基于双目立体视觉原理,采用四维光场光线表示方法,建立水下双目立体视觉测量模型,采用扫描线激光光条作为像素匹配信息线索,及基于共面约束的像素匹配算法,提高左、右两个相机像素匹配精度,采用3个筒体结构设计以适应深海耐静水高压,建立了工程样机,经实验室精度试验、静水打压试验、实际海域功能试验,验证了研制的激光快速扫描双目立体视觉成像系统具有深海原位三维重建测量功能,且有较高的三维测量精度。

1 水下双目立体视觉测量模型

水下双目立体视觉测量模型如图1所示。不失一般性,假定模型左、右相机的焦距为 f ,两相机之间基线距离为 d_0 ,主点均设置为 q_0 ,相机的光心连线平行于光学玻璃窗表面,同时也平行于设定的坐标系 x 轴。光心与防水玻璃的距离为 g ,玻璃厚度为 h 。其中,空气、玻璃、海水的折射率分别为 n_0, n_1, n_2 。水下物点在左相机坐标系下的坐标为 (x, y, z) ,其在左相机和右相机的像点的像素坐标分别是 q_l, q_r 。

不同于空气中的双目立体视觉系统,水下双目立体视觉测量模型是一个多界面折射系统,存在空气、窗口玻璃、水3种介质。为描述光线在不同界面和介质中的折射和传播,本文采用四维参数化光场 $L = [u \ v \ s \ t]^T$

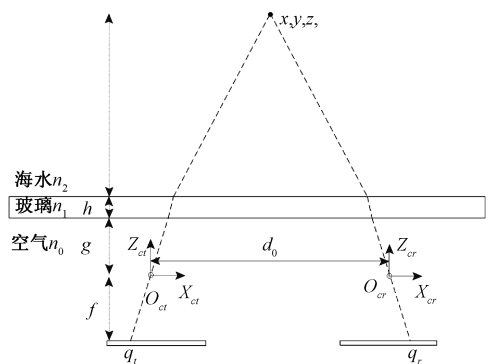


图1 水下双目立体视觉测量模型

Fig. 1 Underwater binocular stereo vision measurement model

表示光线^[17],如图2所示。光线 oo_d 穿过距离为1个单位长度的两平行平面,并与两个平面分别交于点 o 和 o_d 。其中,矩阵 $[u \ v]^T$ 用来表示光线的位置点 o ,以记录光线的位置信息,矩阵 $[s \ t]^T$ 用来表示光线方向向量 $\vec{o'o_d}$,以记录光线的方向信息。

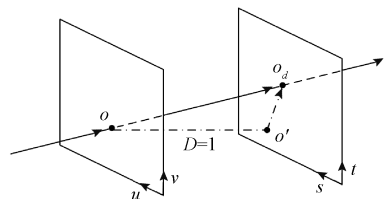


图2 光场的四维参数化表示

Fig. 2 The four-dimensional parameterized representation of the light field

以光场的四维参数化矩阵方式表示光线,方便记录和追踪光线在水下传播过程中的方向信息和位置信息^[18],能够直观地描述因受折射和传播距离影响的水下双目立体视觉成像模型。

假定光场 L 在垂直光场平面上传播距离为 d ,此时光场 L' 可表示为:

$$L' = T(d) \otimes L$$

$$T(d) = \begin{bmatrix} 1 & d & & \\ & 1 & d & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

光线在水下发生折射时,假定入射光介质的折射率为 n_1 ,折射光介质的折射率为 n_2 ,入射角为 θ_1 ,折射角为 θ_2 ,则由折射定律可得:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

$$\sin(\theta_1) = \frac{\sqrt{s^2 + t^2}}{\sqrt{1 + s^2 + t^2}} \quad (3)$$

由式(2)可得折射角为:

$$\sin(\theta_2) = \frac{n_1 \sqrt{s^2 + t^2}}{n_2 \sqrt{1 + s^2 + t^2}} \quad (4)$$

因为折射光线保持与入射光线法线在一个平面上,所以满足约束:

$$s't = st' \quad (5)$$

此外,折射光线也满足折射角的如下公式:

$$\sin(\theta_2) = \frac{\sqrt{s'^2 + t'^2}}{\sqrt{1 + s'^2 + t'^2}} \quad (6)$$

继而可得光线的方向为:

$$\begin{aligned} s'^2 + t'^2 &= \frac{n_1^2(s^2 + t^2)}{n_2^2(1 + s^2 + t^2) - n_1^2(s^2 + t^2)} \\ s' &= \frac{s}{\sqrt{s^2 + t^2}} \sqrt{s'^2 + t'^2} \\ t' &= \frac{t}{\sqrt{s^2 + t^2}} \sqrt{s'^2 + t'^2} \end{aligned} \quad (7)$$

综上,光线发生折射的传播过程可用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ s' \\ t' \end{bmatrix} = \text{Re}(n_1, n_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ s \\ t \end{bmatrix} \quad (8)$$

相机的一个像点与光心的连线确定一条光线。左相机点 $q_l = [x_l \ y_l]$, 右相机点 $q_r = [x_r \ y_r]$, 主点位置为 $q_0 = [x_0 \ y_0]$ 。其中,坐标单位为 mm。若为像素,可先进行转换 $[x_l \ y_l] = \text{pix_width} [x_{\text{pix}} \ y_{\text{pix}}]$ 。左、右相机像点确定的光线可描述为式(9)。

$$L_{ql} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_0 - x_l}{f} \\ \frac{y_0 - y_l}{f} \end{bmatrix}, L_{qr} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ \frac{x_0 - x_r}{f} \\ \frac{y_0 - y_r}{f} \end{bmatrix} \quad (9)$$

为便于研究,采用光路可逆原理对水下成像过程进行分析。以左相机为例,光线由摄像机位置传递到水中物点的过程所述如下:

1) 光线在空气中传播距离 g , 到达玻璃内表面处。

$$L_{\text{glass1_out}} = T(g) \otimes L_{ql}$$

2) 光线由空气进入玻璃,发生折射 $\text{Re}(n_0, n_1)$ 。

$$L_{\text{glass1_in}} = \text{Re}(n_0, n_1) \otimes L_{\text{glass1_out}}$$

3) 光线在玻璃中传播距离 h , 到达玻璃外表面

$$L_{\text{glass2_in}} = T(h) \otimes L_{\text{glass1_in}}$$

4) 光线在玻璃处表面处发生折射,由玻璃介质到海水介质。

$$L_{\text{glass2_out}} = \text{Re}(n_1, n_2) \otimes L_{\text{glass2_in}}$$

5) 在海水中传播未知距离 depth , 到达物点。

$$L_{\text{object}} = T(\text{depth}) \otimes L_{\text{glass2_out}}$$

综上分析,像素光线到物点位置的光线传播过程表达如下:

$$L_{\text{object}} = T(\text{depth}) \otimes \text{Re}(n_1, n_2) \otimes T(h) \otimes \text{Re}(n_0, n_1) \otimes T(g) \otimes L_{q_l} \quad (10)$$

同理,对于右相机可得:

$$L_{\text{object}} = T(\text{depth}) \otimes \text{Re}(n_1, n_2) \otimes T(h) \otimes \text{Re}(n_0, n_1) \otimes T(g) \otimes L_{q_r} \quad (11)$$

式(10)和(11)表示同一物点,因此,联立求解可得物点距离(两条直线相交在深度 depth 处),且其满足下述约束方程:

$$\text{depth} = \frac{u_1 - u_2}{s_2 - s_1} = \frac{v_1 - v_2}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

式中: $u_1, v_1, s_1, t_1, u_2, v_2, s_2, t_2$ 为玻璃到海水面上的出射光线。

2 线激光扫描与基于共面约束的像素匹配

由于水下散射等原因,不可避免导致图像质量降低。为提高双目视觉像素匹配精度,采用线激光照射到被测物体表面作为左右相机像素匹配线索^[19],如图3所示。激光器发出一线结构光,经平面镜反射,透过光学窗口1,投射于被测目标物,并形成由被测物体表面形状所调制的变形光条。变形光条漫反射光穿过光学窗口2、3,并被左、右相机记录。由双目视觉成像原理,只要得到物体上照明光条每一点在左右相机图像上的匹配点,即得到物体表面的三维坐标。通过平面反射镜的转动,线结构光快速扫过被测目标物的表面,可以完整地构建被测目标物表面的三维点云图像,进而提取出被测物体表面的特征数据。

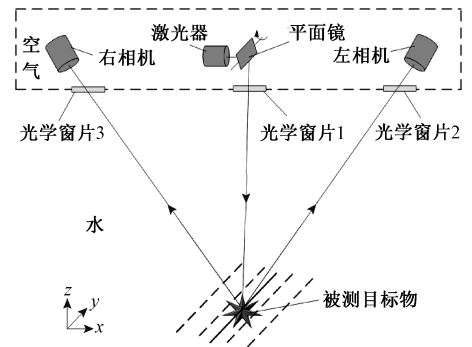


图3 水下线激光扫描测量原理

Fig. 3 Principle of underwater laser scanning measurement

由于光线在传播过程中发生折射,导致两相机行平面上的像素不符合空气中的极线约束条件^[20]。为此,分

析了水下扫描系统成像中的共面约束,并提出利用降维和混合积来快速匹配左右相机像素的方法,提高了匹配的速度和精度。

根据折射定律,入射光线、折射光线和折射面法线是共面的。因此,在匹配左、右相机的像素点时,可直接在激光光条上搜索匹配像素点。即在整个像平面的二维搜索,简化为在激光条纹上的一维搜索。如图4所示,在两相机的公共视场范围内任意一个像素点 P ,对于左相机激光光条上的像素点 P_L ,对应右相机激光光条上相应的像素点 P_R 。

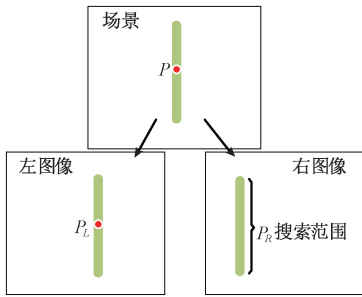


图4 像素匹配搜索

Fig. 4 Schematic diagram of pixel matching search

对于左相机条纹上的任一像素,其对应匹配的像素在右侧相机条纹上执行一维搜索。将折射后的四维参数光场转化为传统的矢量表达式。

$$\mathbf{a} = \frac{[s \quad t \quad 1]^T}{\| [s \quad t \quad 1]^T \|}, \mathbf{q} = [u \quad v \quad depth]^T \quad (13)$$

式中: $\mathbf{a}$ 表示光线的方向矢量; $\mathbf{q}$ 表示光线在此处的位置点。

由左、右相机的相对旋转和平移转换矩阵 lR_r 和 lt_r ,将右相机坐标系下的折射光线转换到左相机坐标系下。

$$\mathbf{a}_r' = {}^lR_r \mathbf{a}_r, \mathbf{q}_r' = {}^lR_r \mathbf{q}_r + {}^lt_r \quad (14)$$

由于目标点满足3个面约束,且左右相机记录的折射光线交于一点,因此有如下约束:

$$\mathbf{a}_l \otimes (\mathbf{q}_r' - \mathbf{q}_l) \cdot \mathbf{a}_r' = 0 \quad (15)$$

其中 $\otimes$ 表示矢量的混合积。

综上分析,基于共面约束像素匹配求解步骤如下:

1) 通过标定,得到系统的相关参数。激光器对被测目标物进行扫描,两相机同时分别调制后的激光条纹图像进行拍摄。

2) 对左相机拍摄的激光条纹图像,逐像素进行计算其第 N 条折射光线的矢量点和方向,并保存。同理,对右相机拍摄的图像执行同样的操作。

3) 对于左相机图像上的每一个像素,使用二分搜索法在右相机上找到对应的像素。由于激光条纹中心像素的提取存在不可避免的误差,及在计算过程中的截断误差,算法中设置阈值 T 对匹配像素点进行约束,即:

$$\mathbf{a}_l \otimes d_{l \rightarrow r} \cdot \mathbf{a}_r' < T \quad (16)$$

当求解出所有匹配像素点后,根据系统光场成像模型获得水下物点 P 在左相机坐标系下的三维坐标,进而可对有效视场内的被测目标物进行三维重建。

3 样机研制

考虑到深海耐静水高压要求,样机结构采取3个筒单独密封的形式,如图5所示。中间筒包含激光器、扫描器和控制单元等主要元器件;两个密封的相机筒中包含左、右两个相机。中间筒中的激光器及扫描器,如图6所示。图6中,激光器发射一束激光,经光路转换器中的平面反射镜改变方向,再经一柱面透镜成为线结构光,线结构光打在扫描反射镜上,通过中间筒窗口出射。为减小出射窗口孔径,扫描反射镜尽可能靠近窗口。扫描反射镜受步进伺服电机通过减速器驱动,来回摆动,实现对线结构光的扫描,其扫描速度可通过对步进伺服电机的编程控制来调节。



图5 激光扫描双目立体成像系统结构

Fig. 5 Structure of laser scanning binocular stereo imaging system

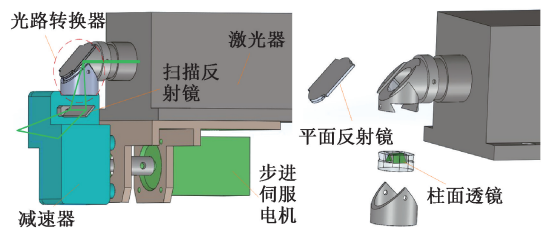


图6 激光扫描装置及其光路转换器结构

Fig. 6 Structure of the Laser scanner and optical path converter

样机按照适应水深4 000 m深海作业需要设计(静水压力40 MPa),根据海洋仪器质量管理规范,按照150%工作水深静水压力要求(即60 MPa)开展结构及壁厚、窗口玻璃厚度设计计算。详细密封结构设计及计算方法本文不重点介绍。

样机电气部分主要由开发板Arduino、微型电脑NUC等电气元件组成,如图7所示。其主要作用是接收上位机(潜器舱内)发出的通信信号,启动该双目立体成像系

统工作,包括启动激光器发出激光,启动扫描系统工作,启动左右两相机同步拍摄。图 7 中,微型电脑 NUC 连接开发板,开发板通过总线扩展器 GPIO 口,连接相机并拍摄采集图像,通过 USB3.0 数据线与 NUC 实现图像的传输。Arduino 发射脉冲信号控制继电器的通断,进而打开或关闭激光器。NUC 通过 RS485 通信方式控制电机的速度与转角。系统在软件的作用下自动完成通信及控制流程。上下位机各模块间互相配合,共同完成在激光扫描成像过程中的系统参数设置、三维点云生成和重建等一系列操作,最终实现对被测目标物的三维测量。

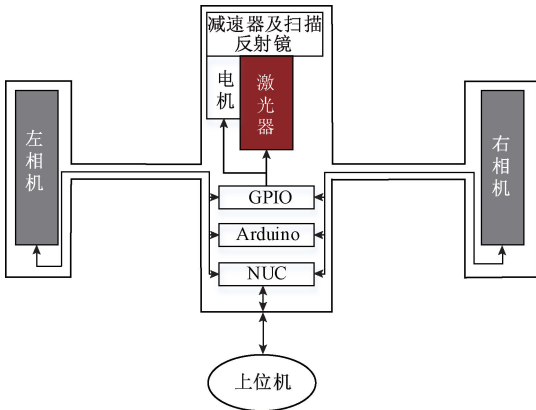


图 7 系统控制单元
Fig. 7 System control unit

样机采用加拿大 PointGrey 相机 GS3-U3-32S4M-C, 幅面尺寸 1/1.8", 分辨率 2 048 × 1 536, 像素大小 3.45 μm, 帧率 121 fps, 采用 Kowa 镜头 LM5JC10 M, 焦距为 5 mm。取基线距离 1 200 mm, 像素匹配精度(标准差)0.5 pixel。经仿真,在测量距离 2~3 m 范围内,精度(标准差)优于 3 mm。

研制的工程样机结构如图 8 所示,该样机在空气中总重量为 45 kg,水中重量约为 25 kg。主体宽度 1 340 mm,高度 592 mm(含水密接插件),厚度为 216 mm。激光器采用加拿大 OSELA 品牌的 ILS-520-1000-RS-D-50-C C 产品,功率为 1 000 mW,波长为 520 nm,线激光水下发散及扫描范围为 60°×60°。

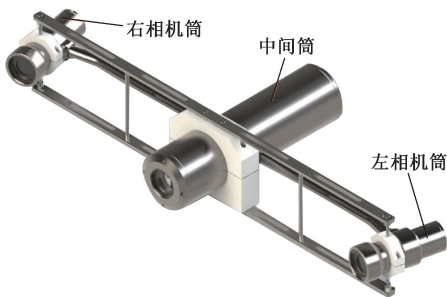
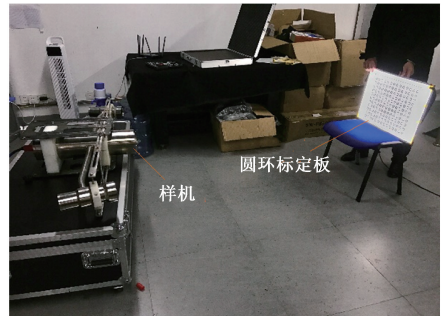


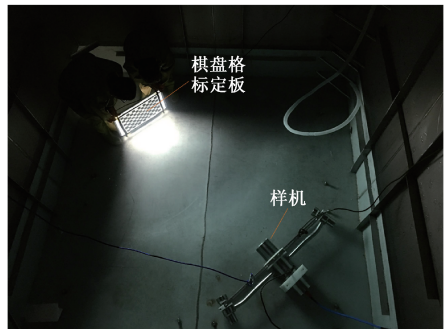
图 8 样机结构
Fig. 8 Schematic diagram of the prototype

4 系统标定

首先,在空气中,利用改进后的张正友标定算法对左、右相机的内参分别进行标定,并求出双目相机相对位置关系。如图 9(a)所示,空气中标定试验使用 14×11 的圆环标定板,并使用背光板作为辅助光源,有助于提高图像的质量。其次,利用文献[18]中提出的水下标定算法对系统进行水下标定,求出模型系统参数 n, g 和 μ 。其中,由于玻璃厚度较小,在标定时将其计算在参数 g 中。如图 9(b)所示,水下标定试验采用规格为 7×11,长、宽均为 35 mm 的棋盘格作为标定板。最后,使用另外组水下棋盘格图片对标定参数进行测试,经验证知,系统参数标定的结果满足设计要求。



(a) 空气中标定场景
(a) Calibration scene in air



(b) 水下标定场景
(b) Underwater calibration scene

图 9 系统标定场景

Fig. 9 Calibration scene of the system

最终得到系统的标定参数如表 1 所示,其中, f_x, f_y 为相机焦距; c_x, c_y 为相机的主点坐标; k_1, k_2, k_3 为相机的径向畸变系数; p_1, p_2 为相机的切向畸变系数; R_0 和 t_0 分别为两相机相对位置关系的旋转和平移矩阵; n 为相机光学玻璃的法线; μ 为水的折射率。

5 试验及结果

5.1 打压试验

为验证所设计仪器能否适合深海 4 000 m 工作时的

表 1 系统标定参数

Table 1 Calibration parameters of the system		
参数	左相机标定参数	右相机标定参数
f_x, f_y	1 451.306, 1 451.021	1 450.380, 1 450.551
c_x, c_y	1 052.594, 773.619	1 033.636, 772.173
k_1, k_2, k_3	0.015, 0.000, -0.014	0.012, 0.003, -0.016
p_1, p_2	0.001, 0.001	0.000, 0.000
n	-0.023 3, -0.013 2, 0.999 6	-0.017 2, -0.016 9, 0.999 7
g	29.342 0	28.546 6
μ	1.333 0	1.333 0
R_0	0.012 1, 0.211 0, 0.002 4	
t_0	-1 147.816 3, -14.362, 237.197 8	

耐压要求 (40 MPa),按照海洋仪器基本环境试验方法 (HY016.15-1992),采取 1.25 倍,即 50 MPa 静水压力对仪器整体进行打压试验。试验在青岛国家深海基地管理中心进行,并出具第三方报告。整个试验过程分两次循环进行。静水压力试验实时曲线如图 10 所示,第 1 次从 10~50 MPa 分 5 次逐级加压,且每升一级后保压 20 min。当压力达到 50 MPa 后,用 40 min 时间进行压力卸载至 0。随后,第 2 次用 80 min 时间将压力从 0 逐渐升至 50 MPa 并保压 5 h。最后,用 40 min 时间将压力卸载至 0。

试验结果表明,样机可以满足在深海 4 000 m 深海域的原位测量要求。

5.2 实验室精度试验

样机在实验室尺寸为 3.0 m (长)×3.0 m (宽)×3.5 m (高)的水池中开展精度试验,并由上海计量研究院出具第三方检测报告。样机窗口浸没在水中,离池底约 3.0 m 距离,如图 11(a) 所示。采用标准球棒作为靶

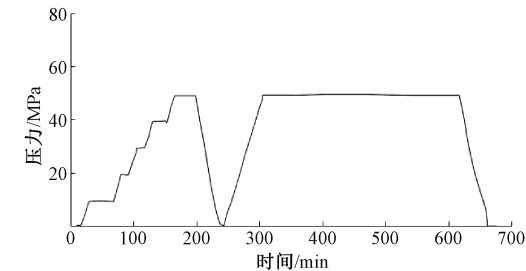


图 10 静水压力试验曲线
Fig. 10 Hydrostatic test curve

标放置在池底,两球直径为 150.13 mm,球心距为 497.72 mm。启动样机扫描测量,获得点云数据,运用 Polyworks 软件对靶球进行三维重建,如图 11(b) 所示,,得到扫描重建的两球直径 $D1$ 、 $D2$ 及两球球心距 X 。

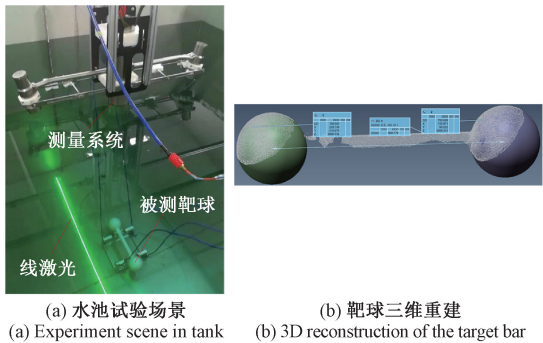


图 11 水池精度试验

Fig. 11 Measurement accuracy experiment in tank

在池底 2 m×2 m 范围内,靶球随机摆放 10 个位置,经测量系统扫描重建,分别得到 10 组靶球的两球直径 $D11, D12, \dots, D110; D21, D22, \dots, D210$ 。球心距 $X1, X2, \dots, X10$ 等数据。计算得到两靶球直径误差,两球直径和球心距相应的标准差,如表 2 所示。

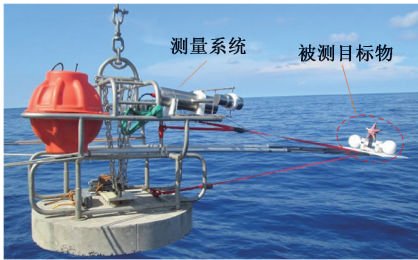
表 2 水池多位姿测量结果

Table 2 Measurement results of the multi-positions accuracy in laboratory									mm
序号	球径 1	球径 1 误差	球径 1 标准差	球径 2	球径 2 误差	球径 2 标准差	球心距	球心距 误差	球心距 标准差
1	150.625	0.495		150.932	0.802		499.919	2.199	
2	150.408	0.278		150.783	0.653		499.297	1.577	
3	149.134	-0.996		149.590	-0.540		499.577	1.857	
4	150.808	0.678		150.220	0.090		500.007	2.287	
5	150.795	0.665		150.500	0.370		499.588	1.868	
6	150.213	0.083	0.54	149.880	-0.250	0.61	498.773	1.053	2.28
7	150.696	0.566		151.301	1.171		500.462	2.742	
8	149.951	-0.179		150.760	0.630		500.622	2.902	
9	150.643	0.513		150.669	0.539		500.774	3.054	
10	150.289	0.159		150.378	0.248		500.200	2.480	

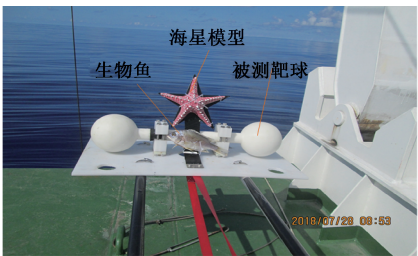
由表 2 可知,在水池 3 m 距离处任意 10 组多位姿球棒测量中,三维重建后测得球径 1、球径 2 的标准差最大值为 0.61 mm,球心距的标准差为 2.28 mm。

5.3 南海真实海域原位测量试验

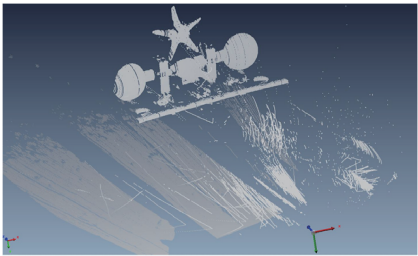
样机在南海北部海域开展原位测量试验,如图 12(a)所示。样机和被测目标物搭载在 Lander 平台上,经由缆绳下沉到 1 051 m 处的海底,采用自带电源和自容式软件启动扫描作业。图 12(b)所示为下沉海底的被测试验目标物,包括球棒、海星模型和一条生物鱼。被测目标通过一伸长悬臂与样机相连接,两者相距 2.0 m。图 12(c)所示为扫描获得的原始三维点云,包括球棒、海星模型、生物鱼、海底地貌。图 12(d)所示为提取得到的球棒、海星模型、生物鱼三维点云及拟合球体。试验采用的球棒是实验室精度试验时采用的同一标准球棒。自容式程序重复启动扫描 10 次,经三维重建拟合,获得 10 组两球直径、两球球心距数据,并计算得到多次测量结果的标准差,如表 3 所示。表 3 中,两球直径、两球球心距扫描测量结果的标准差优于表 2 所示实验室扫描测量结果,原因是在深海环境试验时,由于受图 12(a)中伸长悬臂稳定性的限制,被测目标物离样机距离为 2.0 m,而实验室精度试验时,被测目标距离样机为 3.0 m。对双目立体视觉测量系统而言,距离越近,精度越高。本系统设计的工作距离范围(景深)为 2.0~3.0 m,两者都在设计范围之内。



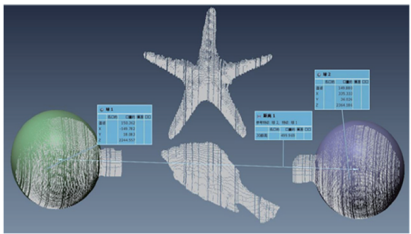
(a) 南海试验场景
(a) Experiment scene in the South China Sea



(b) 被测目标物
(b) The measured targets



(c) 原始三维点云图
(c) Original 3D point cloud



(d) 提取后的三维点云图
(d) 3D point cloud after extraction

图 12 南海原位测量试验

Fig. 12 In-situ measurement experiment in the South China Sea

南海真实海域环境试验结果表明,所研制的激光扫描双目视觉成像系统具备深海原位测量功能,具有较高的三维测量精度(2.22 mm)。

表 3 南海试验中同一位置测量精度

Table 3 Measurement accuracy experiment of the same position in the South China Sea									mm
序号	球径 1	球径 1 误差	球径 1 标准差	球径 2	球径 2 误差	球径 2 标准差	球心距	球心距 误差	球心距 标准差
1	150.407	0.277		149.941	-0.189		499.860	2.234	
2	150.439	0.309		149.928	-0.202		499.968	2.248	
3	150.417	0.287		149.791	-0.339		499.951	2.231	
4	150.420	0.290		149.972	-0.158		499.938	2.218	
5	150.362	0.232		149.880	-0.250		499.969	2.249	
6	150.297	0.167	0.210	149.881	-0.249	0.280	499.997	2.277	2.220
7	150.337	0.207		149.876	-0.254		499.988	2.268	
8	150.247	0.117		149.931	-0.199		499.970	2.250	
9	150.275	0.145		149.763	-0.367		499.900	2.180	
10	150.160	0.030		149.675	-0.455		499.902	2.182	

6 结 论

本文基于双目立体视觉原理,利用四维光场光线表示方式建立起水下应用测量模型,采用线结构光作为左、右两相机像素匹配线索,及基于共面约束的像素匹配算法,提高了测量精度。研制的工程样机,具有4 000 m深海耐压作业能力;实验室精度试验采用标准球棒为测量对象,在距离样机3 m处,多次扫描三维重建后,得到两靶球球心距的标准差为2.28 mm;经南海真实海域实测试验,表明样机具有深海原位三维测量重建功能,且在距离样机2 m处,对标准球棒两球心距多次扫描测量结果的标准差为2.22 mm。因此,所研制的激光扫描双目立体视觉成像系统,具备深海原位测量功能,达到较高三维测量精度。因受客观条件限制,样机没有能在4 000 m深真实环境水域进行原位扫描测量试验,后续将搭载蛟龙号开展4 000 m深真实环境水域规范化海试,然后交付科考航次使用。

参考文献

- [1] WU Y, NIAN R, HE B. 3D Reconstruction model of underwater environment in stereo vision system [C]. Oceans Mts/IEEE San Diego Conference: An Ocean in Common, IEEE, 2013:1-4.
- [2] 王慧斌,张倩,王鑫,等. 基于区域显著度与水下光学先验的目标检测[J]. 仪器仪表学报,2014,35(2):387-397.
WANG H B, ZHANG Q, WANG X, et al. Object detection based on regional saliency and underwater optical prior knowledge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2):387-397.
- [3] 丁莹,范静涛,宋天喻. 双目立体视觉检测系统正向最优设计方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(3):650-657.
DING Y, FAN J T, SONG T Y. Optimal forward design method for the binocular stereo vision inspection system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(3):650-657.
- [4] 吴庆阳,黄浩涛,陈顺治,等. 基于结构光标记的光场三维成像技术研究[J]. 红外与激光工程,2020,49(3):255-260.
WU Q Y, HUANG H T, CHEN SH ZH, et al. Research on 3D imaging technology of light field based on structural light marker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3):255-260.
- [5] ZHONG M, SU X, CHEN W, et al. Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning[J]. Optics Express, 2014, 22(26):31620-31634.
- [6] SUN J, MA H, ZENG D. Three-dimensional infrared imaging method based on binocular stereo vision[J]. Optical Engineering, 2015, 54(10):103-111.
- [7] PINGLI H, FEI L, KUI Y, et al. Active underwater descattering and image recovery[J]. Applied Optics, 2017, 56(23):6631-6638.
- [8] 邓翔宇,王惠刚,张永庆. 基于主动光照的深海图像增强算[J]. 光子学报,2020,49(3):187-198.
DENG X Y, WANG H G, ZHANG Y Q. Deep sea image enhancement method based on the active illumination[J]. Acta Photonica Sinica, 2020,49(3):187-198.
- [9] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. Image Processing IEEE, 2017, 26(4):1579-1594.
- [10] 耿云飞,陈曦,金文,等. 海水折射率对差分激光三角法油膜厚度测量精度的影响[J]. 中国激光,2015,42(4):245-251.
GENG Y F, CHEN X, JIN W, et al. Influence of seawater refractive index on the precision of oil film thickness measurement by differential laser triangulation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4):245-251.
- [11] GIAMBRUNO F, RADIER C, REY G, et al. Design of a 10 PW (150 J/15 fs) peak power laser system with Ti:Sapphire medium through spectral control[J]. Applied optics, 2011, 50(17):2617-2621.
- [12] CEBRIAN-ROBLES D, ORTEGA-CASANO VA J. Low cost 3D underwater surface reconstruction technique by image processing [J]. Ocean Engineering, 2016, 113(1):24-33.
- [13] 解则晓,李绪勇,辛少辉,等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. 中国激光,2010,37(8):2010-2014.
XIE Z X, LI X Y, XIN SH H, et al. Underwater line structured light self scan three dimension measuring technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8):2010-2014.
- [14] 张文明,邓茜雪,张强,等. 基于非平行系统的水下图像转化模型[J]. 光子学报,2015,44(2):152-156.
ZHANG W M, DENG X X, ZHANG Q, et al. Non-Parallel system underwater image transformation model[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2):152-156.
- [15] 冀光强. 基于线结构光扫描的水下三维重建技术[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
JI G Q. 3D reconstruction of underwater objects based on line structured light scanning [D]. Qingdao: Ocean

University of China, 2013.

- [16] 张强,刘婷婷,李海滨,等. 基于最佳搜索域的水下图像区域匹配算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 177-182.
ZHANG Q, LIU T T, LI H B, et al. Research on region matching for underwater images based on optimum searching area[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 177-182.
- [17] TU D W, XIAO G L, ZHANG X, XIE L L, et al. Laser stripe matching algorithm with coplanar constraint in underwater laser scanning systems [J]. Optical Engineering, 2019, 58(11): 114108.
- [18] CAN Z, XU Z, YUKE Z, et al. Model and calibration of underwater stereo vision based on the light field [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(10): 105402.
- [19] XIE L L, ZHANG X, TU D W, et al. Shake reduction method of underwater laser scanning system for high-precision measurement [J]. Optical Engineering, 2019, 58(8): 084108.
- [20] 张强,董玉,李海滨,等. 非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 141-147.
ZHANG Q, DONG Y, LI H B, et al. Underwater curve constraint model based on non-parallel binocular vision[J]. Acta Optical Sinica, 2016, 36(3): 141-147.

作者简介



屠大维(通信作者), 1987、1989 和 1993 年于浙江大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为上海大学机电工程与自动化学院教授、博士研究生导师, 主要研究方向为光电检测、精密机械及仪器、机器视觉及伺服控制等。

E-mail: tdw@shu.edu.cn

Tu Dawei (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees all from Zhejiang University in 1987, 1989 and 1993, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. advisor in the School of Mechanical Engineering and Automation at Shanghai University. His main research interests include photoelectric detection, precision machinery and instruments, machine vision and servo control.



谢亮亮, 2011 年于洛阳理工学院获得学士学位, 2017 年于四川轻化工大学获得硕士学位。现为上海大学博士研究生, 主要研究方向为机器视觉和基于光场的水下成像。

E-mail: xiehnpyll@163.com

Xie Liangliang received his B.Sc. degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2011 and received his M.Sc. degree from Sichuan University of Science & Technology in 2017. He is currently a Ph.D. candidate at Shanghai University. His current research interests include machine vision and underwater imaging based on light field.