

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311296

基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究*

刘涛, 关添航, 杜宏旺, 曾泽松, 王宁宁
(哈尔滨工程大学智能科学与工程学院 哈尔滨 150000)

摘要: 随着海洋工程领域的不断发展, 如何高精度地获取水下物体的三维点云具有重要学术和应用价值。由于光在不同介质中传播会引起光路的变化, 导致水下线结构光视觉测量获得的点云受折射畸变影响, 精度降低。针对上述问题, 设计了一种基于线结构光的水下旋转扫描测量系统。提出了一种轴眼标定算法, 能够将多视角水下点云配准到统一坐标系中。提出了一种引入折射补偿的水下相机成像模型, 该模型可准确的描述激光在不同介质间传播过程中的光路, 基于水下激光平面方程的约束, 对水下点云进行折射校正, 提高了水下点云的重建精度。水下测量实验结果表明, 提出的高精度测量方法能够获得水下物体的三维点云信息, 可测量水下目标的尺寸信息, 距离目标 30~80 cm 时测量精度达到 0.2 mm, 满足了水下目标三维高精度测量要求。

关键词: 水下三维测量; 计算机视觉; 线结构光传感器; 轴眼标定; 水下折射补偿

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6

Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light

Liu Tao, Guan Tianhang, Du Hongwang, Zeng Zesong, Wang Ningning

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China)

Abstract: With the development of the field of marine engineering, how to obtain high-precision three-dimensional point clouds of underwater objects has significant academic and practical value. However, the propagation of light in different media causes change in the optical path, which may lead to refraction distortion in the point clouds obtained through underwater structured light vision measurement and reduce accuracy. To address these issues, this article proposes an underwater rotational scanning measurement system based on structured light. An algorithm for axial calibration is proposed to register multi-view underwater point clouds into a unified coordinate system. In addition, an underwater camera imaging model is introduced, which incorporates refraction compensation. This model accurately describes the optical path of laser propagation between different media. By applying the constraints of the underwater laser plane equation, refraction correction is performed on the underwater point clouds. Thereby, the reconstruction accuracy is improved. Experimental results of underwater measurements demonstrate that the proposed high-precision measurement method can obtain three-dimensional point cloud information of underwater objects. The measurement accuracy reaches 0.2 mm when the distance to the target is between 30~80 cm, which could meet the requirements of high-precision three-dimensional measurement of underwater targets.

Keywords: underwater three-dimensional measurement; computer vision; line structured light sensor; axis calibration; underwater refraction compensation

0 引言

近年来, 水下三维重建在许多应用中发挥着重要作用, 例如机器人导航的水下地图重建^[1-2]、石油天然气行

业的管道检查和海洋钻井平台检查^[3]、水下考古的陶瓷残骸可视化、生物珊瑚礁测量^[4-5]等。随着海洋资源的开发和海洋探测新技术的不断发展, 对海中目标的三维重建精度提出了较高的要求, 实现高精度的三维重建技术不论在民用还是军事领域都具有重要意义。目前使用的

收稿日期: 2023-04-11 Received Date: 2023-04-11

* 基金项目: 国家自然科学基金(51409059)、国防科工局项目(JCKYS2021SXJQR-04)资助

水下探测技术主要有声学 and 光学两中途径^[6],但声学探测分辨率低,很难生成三维信息。水下视觉测量技术与声学探测技术相比较,具有低成本、高精度等特点,国内外学者对此展开了深入的研究。结构光视觉测量法是一种基于主动视觉的水下高精度三维视觉测量技术^[7],具有大尺度测量、效率高、抗干扰性好等优点,同时由于采用的蓝绿激光在水中传播衰减减小,非常适合在无可见光的深海中实现对物体表面的精确测量。

基于线结构光的三维重建方法是通过线结构光与被测物体之间的相对位移,对物体的整个外表面进行扫描来获得表面三维轮廓信息。罗哉等^[8]、Liu等^[9]、李云梦等^[10]和Lee等^[11]提出了线结构光与移动平台结合的三维测量,采用转台或电机带动被测物体与线结构光传感器进行相对运动,实现物体全貌的测量,但该方法存在结构限制,无法应用于水下测量。因此,本文提出了一种水下旋转扫描三维重建方法,通过提出的轴眼标定算法,确定转轴坐标系和相机坐标系之间的关系,实现水下整周旋转扫描。

折射的存在是水下三维重建的固有问题^[12],针对这个问题,Pedersen等^[13]比较了基于SVP(single viewpoint)相机模型的水下标定方法与基于光线追踪结合Snell折射定律的方法。通过将两种方法与在空气中进行的标定结果进行比较,以测试折射对标定的影响。解则晓等^[14]和Zhou等^[15]通过建立折射补偿,弥补了水下折射对成像产生的影响,以实现水下视觉三维测量的目的。Xue等^[16]组建了扫描式水下三维重建系统,并对三维重建系统折射进行补偿,系统实验误差分析验证了其可行性。孙茜等^[17]提出一种水下线激光的三维重建系统,并针对由于光线在不同介质表面折射造成的视角误差问题,提出了一种折射校正算法以实现水下目标物体的三维重建。Zhao等^[18]研究了水下线性结构光传感器的校正模型,考虑了密封玻璃和水引入的系统畸变,将线结构光传感器作为一个整体来分析水下多介质折射的影响。

本文设计了一种基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法并设计了水下三维测量系统。提出了一种轴眼标定算法和引入折射的水下相机成像模型。完成了三维点坐标折射校正、光平面标定算法等研究工作。通过实验验证了水下折射补偿算法的正确性,取得了满意的三维重建效果,验证了本文提出的水下旋转扫描高精度测量方法的可行性。

1 水下视觉测量系统与系统标定

1.1 水下视觉测量系统

根据提出的水下旋转扫描高精度测量方法设计了如下的水下测量系统。系统由水下相机、单轴旋转转台、水下激光器、上位机操控平台等组成。如图1所示,水下相

机和水下激光器固定在转轴上。通过上位机操控平台控制转轴旋转,进而带动水下相机和水下激光器同步旋转。激光器打出的激光平面在物体表面形成光条信息,光条扫过整个被测物体表面,对光条进行测量便得到了物体的三维信息,达到测量目的。

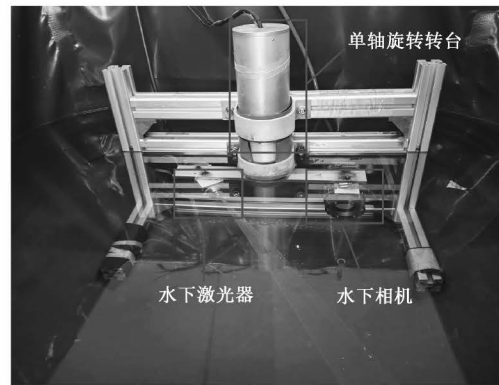


图1 水下测量系统实物

Fig. 1 Real picture of the underwater survey system

系统硬件组成如表1所示。系统的标定共有两个部分,分别需要进行轴眼标定和光平面标定,每个步骤都紧密联系,轴眼标定描述了转轴坐标系和相机坐标系的关系,光平面标定描述了激光平面在相机坐标系下的平面方程。

表1 水下旋转测量系统硬件设备组成
Table 1 Hardware components of the underwater rotary measurement system

硬件设备	型号	主要参数
水下相机	自研	水平/垂直分辨率 2 048 px/ 1 536 px,帧速率 125 fps
单轴旋转伺服系统	自研	直流力矩电机,转动速度 0~200°/s,角度重复定位 精度为 0.02°,分辨率以及 控制精度为 0.036°。
水下激光器	自研	波长为绿光 550 nm 管芯功率为 150 mW

1.2 轴-眼标定

由于相机的转动导致其获得的坐标不在同一个相机坐标系中,得不到连续的三维重构图,但其与转轴的相对位置不变,因此可根据转轴自旋转的特性,建立转轴坐标系与相机坐标系的转换关系,将光条点坐标转换到同一坐标系中。本文定义转轴未发生旋转的相机位置为初始相机坐标系。具体的标定做法分为两步:将相机坐标系中的光条点坐标转移到转轴坐标系;通过转轴自旋转变

换矩阵再将光条点坐标转换到初始转轴坐标系。由于无论在水下还是在空气中,转轴坐标系与相机坐标系之间的位置关系不变,因此本文在空气中进行轴眼标定。

转轴带动相机旋转的运动模型如图2所示。其中世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 建立在靶标平面上。在相机运动过程中,由于靶标位置不变,因此世界坐标系不变。 $a_1 \sim a_{12}$ 代表的是不同旋转角度的相机坐标系原点指向转轴坐标系原点的向量。 $O_1 \sim O_{12}$ 代表的是不同位置的相机光心。其所在平面与转轴垂直。

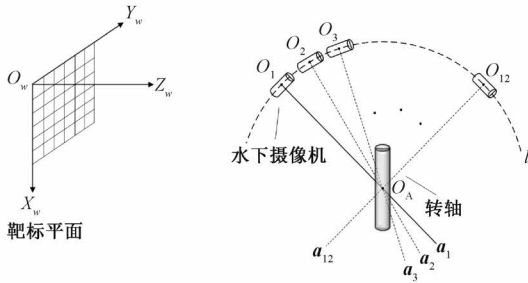


图2 水下相机运动模型

Fig. 2 Underwater camera motion model

由于世界坐标系固定不动,本文以世界坐标系为媒介,求解不同相机光心在世界坐标系的坐标,再通过世界坐标系与初始相机坐标系之间的外参,将世界坐标系的坐标表示在初始相机坐标系中,通过这些光心点的坐标计算初始相机坐标系与转轴坐标系的转换关系。本文将相机旋转了12个位置,得到在不同角度拍摄棋盘格靶标的相机参数,求出这12个相机光心在初始相机坐标系的坐标来完成转轴坐标系的建立。

由于相机绕转轴进行圆周运动,形成以转轴上某一定点为圆心的圆周轨迹。由于每个光心的计算方式相同,不妨以 O_1 为例进行分析。根据以上描述的运动特点,以圆心 O_A 为转轴坐标系原点、圆周的法线方向为 Z_A 轴、转轴坐标系原点 O_A 与初始位置相机坐标系 O_1 的连线为 Y_A 轴、垂直于 $O_A X_A Z_A$ 平面的方向为 X_A 轴建立空间直角坐标系,即转轴坐标系 $O_A - X_A Y_A Z_A$ 。

将图2所示运动模型简化,如图3所示,本文根据初始位置标定的相机外参(R_1, T_1)将12个位置的光心在世界坐标系中的坐标转换到初始相机坐标系中拟合运动圆的方程。

通过相机标定易知世界坐标系中任意一点 P_w 通过外参(旋转矩阵 R 和平移向量 T)可转换到相机坐标系中,如式(1)所示。

$$P_c = RP_w + T \quad (1)$$

则相机坐标系中的点转换到世界坐标系中有:

$$P_w = R^{-1}(P_c - T) \quad (2)$$

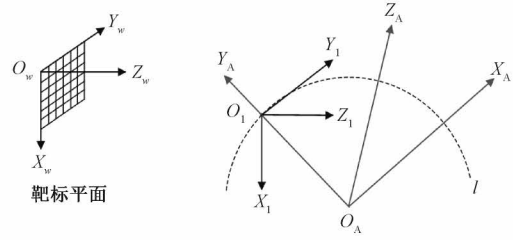


图3 相机简化运动模型

Fig. 3 The simplified move model of camera

将光心坐标 $(0,0,0)$ 代入式(2),并通过初始位置 O_1 的相机外参将光心坐标再转到初始相机坐标系中,如式(3)所示。

$$P_{c1} = R_1 P_w + T_1 = R_1 (-R^{-1} T) + T_1 \quad (3)$$

式中: P_{c1} 指代的是光心在初始相机坐标系中的坐标。

由式(3)可知,光心在初始相机坐标系中的坐标只取决于当前位置相机的外参数。按照同样的方式可以计算出其余11个位置的光心在初始相机坐标系中的坐标。

如果已知转轴在相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的向量 E 及其上一点 M ,则可以 ME 作为转轴坐标系 $O_A - X_A Y_A Z_A$ 的 Z 轴,以 M 为转轴坐标系的原点。根据右手系规则定出转轴坐标系的 X, Y 轴。则转轴坐标系到相机坐标系之间的转换矩阵如下:

$$\begin{aligned} P_A &= R_{CA} P_C + T \\ R_{CA} &= [\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z]^T \\ T_{CA} &= -R_{CA} M \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P_A 和 P_C 为同一点分别在转轴坐标系下和相机坐标系下的坐标; $\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z$ 分别为 $O_A - X_A Y_A Z_A$ 坐标系坐标轴在 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 坐标系下的单位向量。

设 O_1, O_2, \dots, O_N 为标定过程中后续 $N(N=11)$ 个位置初始相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的坐标,并设已知该坐标系下转轴的方向向量及其上一点 \vec{E} 和 M ,则可以得到如下的旋转不变性:

$$O'_i = A(O_i | \vec{E}, M) = \begin{bmatrix} |O_i - M \times \vec{E}| \\ (O_i - M)^T \vec{E} \end{bmatrix} = O'_j \quad (5)$$

式中: O_i 和 O_j 是任意两个位置在 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的光心坐标。

建立如下的最小二乘优化函数并将式(5)代入可得:

$$\begin{aligned} E^*, M^* &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{11} \|A(O_{ci} | E, M) - A(O_{c0} | E, M)\|^2 = \\ & \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{11} \| \|(O_{ci} - M) \times E\| - \|E^T(O_{ci} - O_{c0})\| \|^2 + \\ & \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{11} \|E^T(O_{ci} - O_{c0})\|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}^* 和 \mathbf{M}^* 为待求优化后的旋转向量和基准点; \mathbf{O}_{ci} 分别是第 i 个位置相机光心在 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 坐标系下的坐标; $\mathbf{O}_{c0} = [0, 0, 0]^T$ 。

式(6)为非线性最小二乘问题且待优化变量有两个,较为复杂,因此需要将优化函数分为前后两部分。由于后半部分只与旋转向量 \mathbf{E} 有关,因可以用后半部分解出 \mathbf{E}^* ,再代入前半部分得到 \mathbf{M}^* 。

将式(6)转化为:

$$\mathbf{E}^* = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{11} \|\mathbf{E}^T(\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{O}_{c0})\|^2 \quad (7)$$

$$\mathbf{M}^* = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{11} \left(\|\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{M}\| \times \|\mathbf{E}^*\| - \|\mathbf{E}^{*T}(\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{O}_{c0})\| \right)^2 \quad (8)$$

式(7)可以转换为线性最小二乘的标准形式:

$$\sum_{i=1}^{11} \|\mathbf{E}^T(\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{O}_{c0})\|^2 = 0$$

$$\mathbf{BE} = 0, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} (\mathbf{O}_{c1} - \mathbf{O}_{c0})^T \\ (\mathbf{O}_{c2} - \mathbf{O}_{c0})^T \\ \vdots \\ (\mathbf{O}_{c11} - \mathbf{O}_{c0})^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)得出的最优解 \mathbf{E}^* 为正定矩阵 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ 最小特征值对应的特征向量。

设求解的 \mathbf{E}^* 为:

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据 \mathbf{E}^* 构造出反对称矩阵 \mathbf{E}_x^* :

$$\mathbf{E}_x^* = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

则可以将式(8)也分为两部分分别简化并求解:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{11} \|\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{M}\| \times \|\mathbf{E}^*\| = 0 \\ \sum_{i=1}^{11} \|\mathbf{O}_{c0} - \mathbf{M}\| \times \|\mathbf{E}^*\| = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mathbf{D}_i^T \mathbf{M} = \mathbf{C}_i \\ \mathbf{D}_i = \mathbf{E}_x^{*T} \mathbf{E}_x^* (\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{O}_{c0}) \\ \mathbf{C}_i = \frac{1}{2} (\mathbf{O}_{ci} + \mathbf{O}_{c0})^T \mathbf{E}_x^{*T} \mathbf{E}_x^* (\mathbf{O}_{ci} - \mathbf{O}_{c0}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $i=1, \dots, 11$ 。

令 $\mathbf{B} = [\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_{11}, \mathbf{E}^*]^T$, $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_{11}, 0]^T$ 。根据式(13)可将式(8)转换为线性最小二乘形式:

$$\mathbf{BM} = \mathbf{C} \quad (14)$$

其最小二乘意义上的最优解为:

$$\mathbf{M}^* = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \quad (15)$$

经过以上推导,只要给定标定过程中得到的 N 个位置下相机坐标系原点在 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的坐标,就可以估计出旋转扫描装置旋转轴的向量和位置,并以此建立旋转轴坐标系 $O_A - X_A Y_A Z_A$ 。相机坐标系和转轴坐标系之间的旋转变换矩阵 \mathbf{T}_{CA} 可由式(4)得出, \mathbf{R}_{CA} 如下:

$$\mathbf{R}_{CA} = [\mathbf{M}^* \times \mathbf{E}^*, \mathbf{M}^*, \mathbf{E}^*]^T \quad (16)$$

1.3 激光平面标定

光平面标定即获取激光平面在相机坐标系下的平面方程参数。在张氏标定法中,世界坐标系建立在平面靶标上,因此靶标上的点的世界坐标系为 $(X_w, Y_w, 0)$,此时像素坐标系与世界坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \quad (17)$$

$$\mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ X_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X_w \\ X_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{H} 称为单应性矩阵, \mathbf{A} 为相机内参矩阵。

标定过程中,在同一位置拍摄不带光条的标定板图片 a 和带光条的标定板图片 b。对于每一副 a 图像,可通过标定得到对应的 \mathbf{H} 矩阵和外参数 \mathbf{R}, \mathbf{T} 。由式(17)可知,图片 b 光条上的点可通过 \mathbf{H} 矩阵的逆矩阵,求出其世界坐标系的坐标 X_w, Y_w ,然后通过外参 \mathbf{R}, \mathbf{T} ,可求得其相机坐标系的坐标。改变标定板位置,拍摄多组图片并进行上述操作后,可得到许多不共线的光条点相机系坐标,通过非线性最小二乘拟合可得到光平面方程,完成光平面标定。

拟合的光平面方程如式(18)所示,拟合出的光平面如图4所示。

$$-0.009533X - 0.767634Y - 0.640818Z + 139.601723 = 0 \quad (18)$$

2 水下折射补偿

光在不同介质之间传播的过程中会发生折射现象,导致光路变化^[19-20]。在水下,相机接收到的光来自水中,穿过密封玻璃,最后到达相机内部的空气中。光在3种不同介质下传播,必然会发生折射,因此空气中关于光线沿直线传播的成像模型已经不再适用于水下,需要建立水下关于折射的相机成像模型。受文献[14, 18]启发,针对本研究所设计的三维重建系统,建立关于水下折射

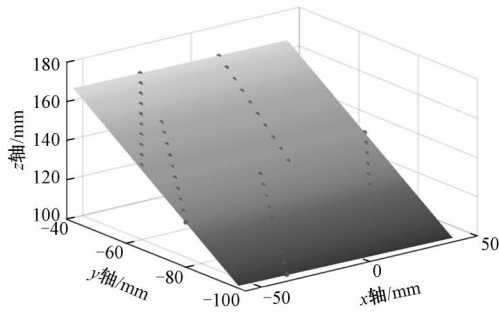


图4 激光平面拟合

Fig. 4 Optical plane fitting

的相机成像模型,以激光平面为约束,获取去除折射畸变误差的实际三维点坐标。本研究中激光器的激光平面垂直于激光密封玻璃,因此不发生折射,不会影响测量,相机光轴方向与相机密封玻璃表面垂直。

2.1 空气-玻璃-空气折射模型

空气-玻璃-空气折射模型如图5所示。点 P 是在光条上一点,其在相机坐标系的坐标值为 (x_c, y_c, z_c) 。由于折射,点 P 反射的光路发生变化,将通过 $PB-BA-AO_c$ 进入相机,而根据激光三角测量原理,会得到点 P' 坐标,点 P' 是折射光 O_cA 的反向延长线与激光平面的交点, p 是实际成像点其图像坐标系下坐标为 (u, v) 。 O_c 为相机光心点,坐标为 $(0, 0, 0)$, D 为相机光心到折射平面的距离,折射平面法向量为 $(0, 0, 1)$, f 为相机焦距。密封玻璃的厚度为 t ,折射率为 n_g ,空气的折射率为 n_a 。从空气进入密封玻璃的光线 PB 的入射角为 θ_{a1} ,折射角为 θ_{g1} 。从密封玻璃进入水的光线 BA 的入射角为 θ_{g2} ,折射角是 θ_{a2} 。光线 O_cP 的长线与相机光轴之间的角度为 α 。

从 Snell 折射定律以及相机成像模型可得:

$$\begin{cases} n_a \sin \theta_{a1} = n_g \sin \theta_{g1} = n_g \sin \theta_{g2} = n_a \sin \theta_{a2} \\ \theta_{a1} = \alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{f}\right) \end{cases} \quad (19)$$

点 A 坐标可表示为 $\left(\frac{uD}{f}, \frac{vD}{f}, D\right)$,由于直线 PB 、 BA 、 AO_c 与相机光轴在同一平面,因此,直线 AO_c 方向向量表示为:

$$\mathbf{n}_{AO_c} = \left(\frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}}, \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}}, \frac{f}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \right) \quad (20)$$

由于直线 BA 与直线 AO_c 在同一平面,且平面法向量、旋转角度已知,因此通过罗德里格斯公式^[21],确定向量 BA 与 AO_c 之间的旋转矩阵 R_r :

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{I} + [\mathbf{n}]_x \sin\theta + [\mathbf{n}]_x^2 (1 - \cos\theta) \quad (21)$$

式中: $\theta = \theta_{g1} - \theta_{a1}$, $[\cdot]_x$ 表示斜对称矩阵。

$$[\mathbf{n}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -n_3 & n_2 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ -n_2 & n_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: n_i 为 \mathbf{n} 中第 i 个元素。 \mathbf{n} 为 $PB-BA-AO_c$ 与相机光轴构成的平面法向量为:

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_{AO_c} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \\ u \\ \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}}{0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

由式(21)~(23)可获得向量 BA 与 AO_c 之间的旋转矩阵 R_r 。则直线 BA 方向向量表示为:

$$\mathbf{n}_{BA} = \mathbf{R}_r \mathbf{n}_{AO_c} \quad (24)$$

线段 BA 的长度为:

$$BA = \frac{t}{\cos\theta_{g1}} = \frac{n_g t}{\sqrt{n_g^2 - (n_a \sin\theta_{a1})^2}} \quad (25)$$

因此点 B 相机坐标系坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} uD \\ f \\ vD \\ f \\ D \end{bmatrix} + \frac{n_g t}{\sqrt{n_g^2 - (n_a \sin\theta_{a1})^2}} \mathbf{n}_{BA} \quad (26)$$

根据 Snell 折射定律,直线 PB 在相机坐标系下的方向向量与直线 AO_c 相同,因此已知直线 PB 的方向向量与 B 点坐标,即可求得直线 PB 在相机坐标系下的直线方程,如式(27)所示。联立激光平面方程与 PB 直线方程即可得到 P 点相机坐标系下实际坐标。

$$\frac{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} (X - X_B)}{u} = \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} (Y - Y_B)}{v} = \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} (Z - Z_B)}{f} \quad (27)$$

2.2 空气-玻璃-水折射模型

空气-玻璃-水折射模型如图6所示。与空气-玻璃-空气折射模型不同的是折射偏差由水折射和玻璃折射两部分组成。由于折射,点 P 反射的光路发生变化,将通过 $PB-BA-AO_c$ 进入相机,而根据激光三角测量原理,会得到点 P' 坐标,点 P' 是折射光 O_cA 的反向延长线与激光平面的交点,点 P'' 表示排除水折射影响后的三维坐标, p 是实际成像点其图像坐标系下坐标为 (u, v) 。 O_c 为相机光心,其坐标为 $(0, 0, 0)$, D 为相机光心到折射平面的距离,折射平面法向量为 $(0, 0, 1)$, f 为相机焦距。

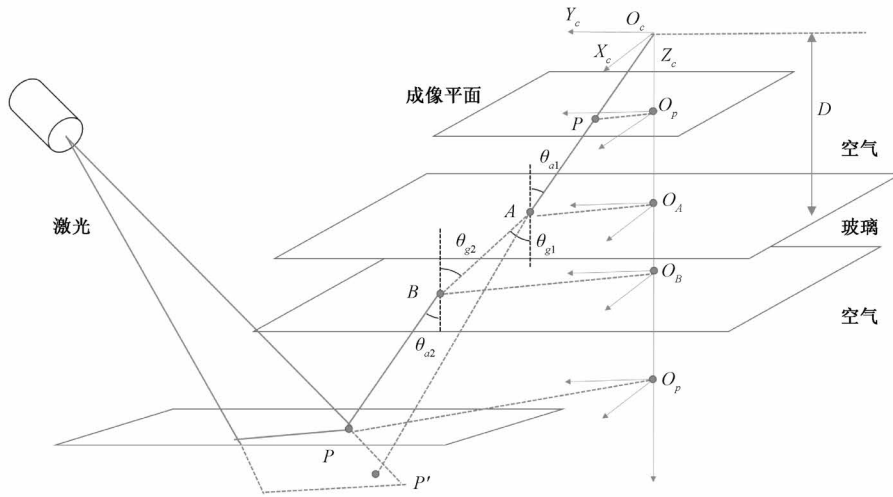


图 5 空气-玻璃-空气折射模型
Fig. 5 Air-glass-air refraction model

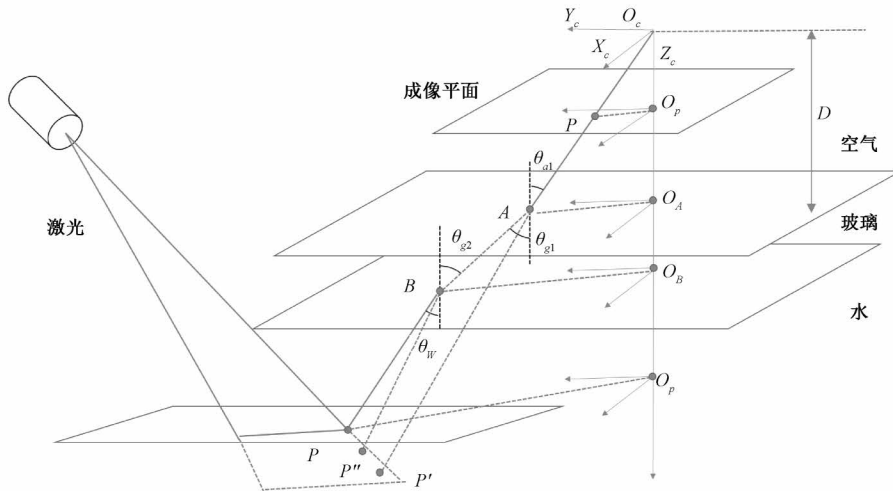


图 6 空气-玻璃-水折射模型
Fig. 6 Air-glass-water refraction mode

密封玻璃的厚度为 t , 折射率为 n_g , 空气的折射率为 n_a 。从空气进入密封玻璃的光线 PB 的入射角为 θ_a , 折射角为 θ_{g1} 。从密封玻璃进入水的光线 BA 的入射角为 θ_{g2} , 折射角是 θ_w 。光线 O_cP 的长线与相机光轴之间的角度为 α 。

相机折射补偿公式推导大体与 2.1 节类似, 但由于水的折射影响光线进入玻璃的入射角与光线进入空气的折射角不同, 因此直线 PB 在相机坐标系下的方向向量表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_r = \mathbf{I} + [\mathbf{n}]_{\times} \sin\theta_w + [\mathbf{n}]_{\times}^2 (1 - \cos\theta_w) \\ \mathbf{n}_{PB} = \begin{bmatrix} n_{PB1} \\ n_{PB2} \\ n_{PB3} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (28)$$

根据式(26)直线 PB 在相机坐标系下的直线方程如

式(29)所示。联立激光平面方程与 PB 直线方程即可得到点 P 相机坐标系下实际坐标, 实现水下折射补偿。

$$\frac{X - X_B}{n_{PB1}} = \frac{Y - Y_B}{n_{PB2}} = \frac{Z - Z_B}{n_{PB3}} \quad (29)$$

2.3 折射模型参数标定

2.1 以及 2.2 节建立了水下相机成像模型, 并根据此模型对三维点坐标水下折射补偿公式进行推导。由式(26)和(29)可知, 实现水下折射补偿涉及到玻璃厚度 t , 空气折射率、玻璃折射率、水折射率, 相机焦距 f , 以及相机光心到玻璃表面距离 D 。其中, 玻璃厚度 t 可由卡尺测量, 空气折射率、玻璃折射率、水折射率和相机焦距 f 可当作已知量, 而相机光心到玻璃表面距离 D 未知, 且不易测量, 需要对参数进行标定。对相机光心到玻璃表面距离 D 的参数标定过程如图 7 所示。

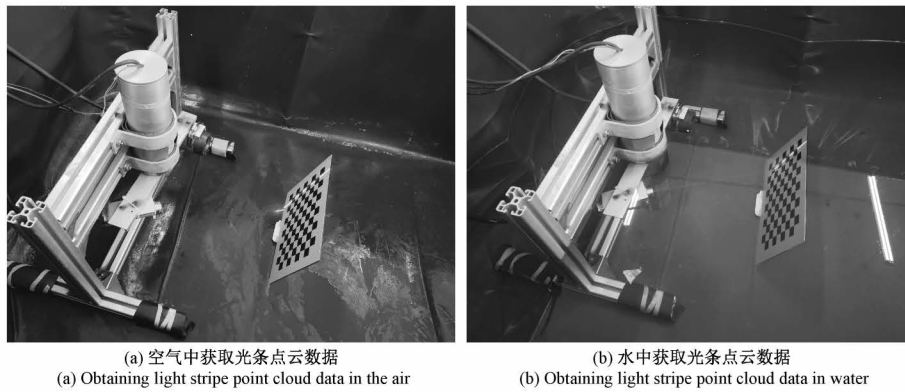


图7 参数标定过程示意图

Fig. 7 Diagram of parameter calibration process

1) 将传感器密封好, 激光投射至平面靶标表面, 提取棋盘格角点, 并连接与光条垂直的直线, 获得多个交点的像素坐标, 如图8所示, 根据2.1与2.2节可获得交点的三维坐标。

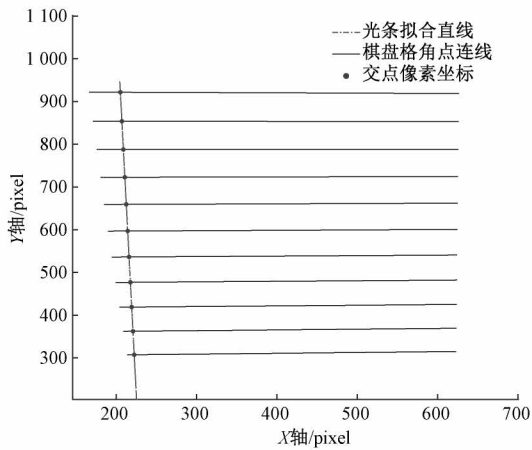


图8 光条与棋盘格角点连线的交点

Fig. 8 Intersection point of the line connecting the light bar and the corner of the checkerboard

2) 将传感器放入水槽中, 并注水没过传感器与平面靶标, 重复步骤1), 获取经水折射后的交点三维坐标。

3) 因传感器与靶标之间的位置关系没有发生改变, 因此, 如果不受玻璃和水介质的折射影响, 两次获得的对应交点的三维坐标应该相同。由式(27)和(29)分别与激光平面方程联立求得两次获得的对应点三维坐标, 并求得使其相等的 D 值, 对多个 D 值相加取平均, 进行优化, 即可完成参数标定。

3 水下三维坐标测量

光条点相机系坐标根据第二节进行折射校正后, 通过1.2节轴-眼标定可标定出相机坐标系到转轴坐标系

的变换矩阵, 以此可将旋转之后的相机坐标系点云转换到转轴坐标系中, 之后根据旋转的角度将点云转换到初始位置转轴坐标系中, 具体操作如下。

将相机坐标系中的点通过变换矩阵转换到转轴坐标系中有 (设相机坐标系中的点 P_n 转换到转轴坐标系中为 P_{An}):

$$P_{An} = R_{CA} P_n + T_{CA} \quad (30)$$

其中, R_{CA} 、 T_{CA} 分别表示变换阵中的旋转矩阵和平移向量, 而转台绕转轴做的是纯旋转运动, 则 T_A (自旋平移矩阵) 为 0 向量, 而转轴即为转轴坐标系的 Z 轴, 因此便可通过预先设定的旋转角 θ 得到自旋变换矩阵, 且其旋转矩阵为:

$$R_{Ai} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

由旋转的角度便可将旋转之后两个转轴坐标系联系起来, 即得 P_{A1} 与 P_{An} 的关系:

$$P_{An} = R_{An} \cdots R_{A2} R_{A1} P_{A1} \quad (32)$$

每一帧图片代表在上一个位置的基础上旋转了 θ° , 则对每一帧图片的光条点坐标转换时可按照同样的方法进行, 需要注意的是转轴自旋角度的变化。

基于以上算法可以将旋转之后的点云坐标全部转换到初始位置转轴坐标系下, 得到完整的三维点云。

4 实验及结果分析

为了验证本文设计的水下高精度测量方法的准确性, 在实验室水池内搭建测试系统, 如图9所示。并对不同物体进行三维重建, 对其测量误差进行分析。

实验首先以棋盘格平面靶标为例进行水下折射补偿与三维重建的实验结果展示。棋盘格平面靶标的平面度为 0.01 mm , 其与水下旋转扫描系统的距离为 60 cm 。



图 9 实验场景
Fig. 9 The experimental scene

采用重心法对光条图像进行亚像素中心提取,根据 2.2 节计算光条中心点折射补偿后的三维坐标,则可得棋盘格平面靶标一个截面的点云。通过 1.2 节轴-眼标定、式(28)和(30)可将所有截面点云统一到同一坐标系中,即可得到完整点云。对从水下获得的平面靶标点云数据拟合平面,按照每个点到最佳拟合平面的距离着色。校正前后点云平面拟合误差图如图 10、11 所示。

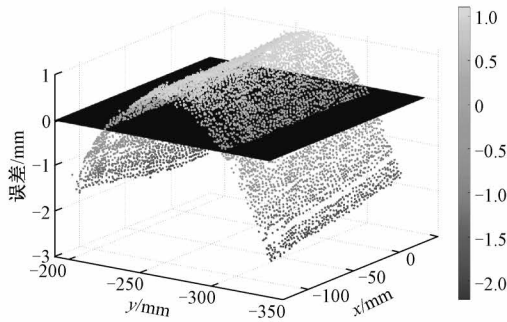


图 10 折射校正前水下点云数据平面拟合误差
Fig. 10 Plane fitting error of underwater point cloud data before refraction correction

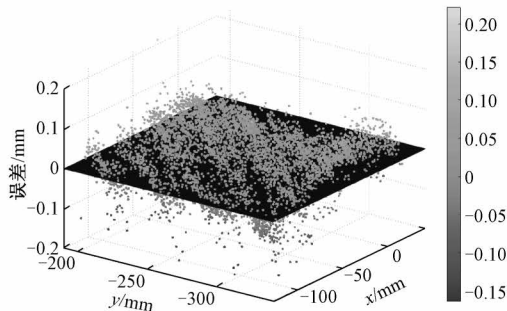


图 11 折射校正后水下点云数据平面拟合误差
Fig. 11 Plane fitting error of underwater point cloud data after refraction correction

折射补偿前后点云平面拟合误差如表 2 所示。水下点云数据的平面拟合绝对误差小于 0.2 mm,可验证折射补偿算法的有效性,以及本文设计的旋转水下三维重建系统的精度。

表 2 折射校正前后平面拟合误差对比
Table 2 Comparison of plane fitting errors before and after refraction correction mm

统计指标	平面点到拟合平面距离	
	折射校正前	折射校正后
最大值	1.10	0.12
最小值	-2.21	-0.15
均方根误差	0.874 9	0.038 5

多次调整平面靶标与水下旋转扫描系统的距离,并进行三维测量,获得的实验结果如表 3 所示。

表 3 不同工作距离下点云平面度误差
Table 3 Point cloud planarity error under different working distances mm

工作距离	点云平面度误差
30	0.19
40	0.15
50	0.12
60	0.15
70	0.13
80	0.14

由于相机与激光器的角度限制,当工作距离 > 80 cm 或 < 30 cm,相机无法捕捉到光条。但在 30~80 cm 的工作距离区间,水下三维测量的精度都在 0.2 mm 以内。

为了进一步验证本文系统的精度以及实用性,以自制加工件为实验对象,进行水下三维重建,如图 12 所示。加工件实物图与尺寸标注如图 13 所示。通过对比所获点云沟槽深度与实际深度,验证本文系统对真实物体水下扫描并三维重建的精度。

对从水下获得的加工件点云数据的顶部点拟合平面,按照每个点到拟合平面的距离即沟槽深度值着色。校正后点云的沟槽深度如图 14 所示,其沟槽深度误差分析如表 4 所示。结果表明本文系统可对一般物体进行水下三维重建,完成获取其尺寸信息等任务,验证了系统的精度与实用性。

最后通过对花瓶、小天使、兔子分别进行了水下三维重建以验证系统的可实现性、稳定性和准确性,如图 15 所示。

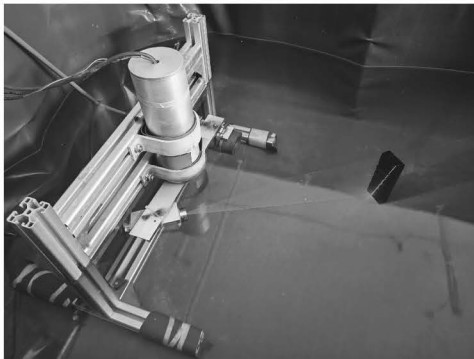


图 12 加工件水下三维重建实验

Fig. 12 Experiments on underwater three-dimensional reconstruction of machined parts

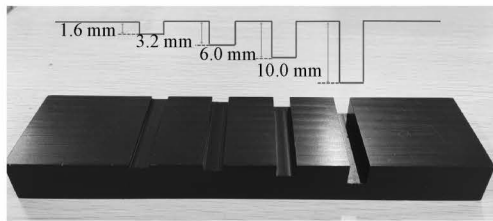


图 13 加工件图片及沟槽尺寸标注

Fig. 13 Pictures of machined parts and groove dimensions

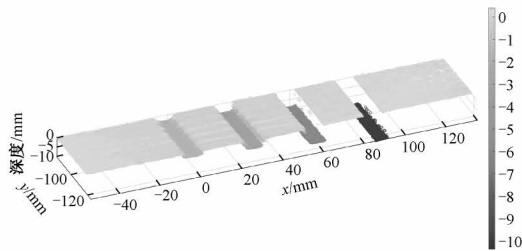


图 14 水下点云数据的沟槽深度值

Fig. 14 Trench depth values for underwater point cloud data

表 4 沟槽深度值

Table 4 Trench depth values mm

沟槽	真实值	折射校正后尺寸测量值		
		最大值	最小值	平均值
1号	10.00	10.18	9.91	10.04
2号	6.00	6.13	5.92	6.06
3号	3.20	3.31	3.12	3.25
4号	1.60	1.69	1.55	1.62

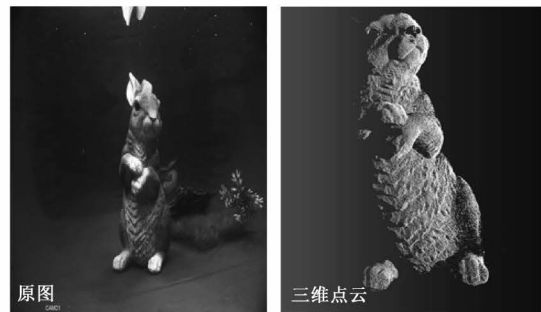
由图 15 可知,该水下三维高精度测量系统对于水下一般物体具有较好的三维重建效果,所获取的点云能够准确描述水下物体的三维轮廓,并可以显示出物体的细



(a) 花瓶
(a) Vase



(b) 小天使
(b) Cherub



(c) 兔子
(c) Rabbit

图 15 不同物体的水下点云数据

Fig. 15 Point cloud data of different objects

节信息。证明了本文提出的水下相机成像模型和轴眼标定的有效性和准确性,验证了本文提出的水下高精度测量方法及系统的可行性。

5 结 论

本文提出了一种基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法并设计了水下旋转扫描测量系统,完成了激光平面的高精度标定,引入轴-眼标定算法将点云配准在同一坐标系中,获取物体完整点云,建立了引入折射补偿的水下相机成像模型,通过分析激光在不同介质传播的光路变化,对水下三维点坐标进行折射校正。实验结果表明,距离目标 30~80 cm 时,折射校正后的水下点云平面拟合均方根误差为 0.038 5 mm,对加工件的水下三维重建的精度为 0.2 mm,能够完成获得水下物体的三维点云尺寸信息任务。同时对花瓶、小天使、兔子等物体进行的水下三维重建,也可表明该系统具有较好的水下三

维重建效果,验证了本文设计的水下三维旋转扫描高精度测量方法的可行性。

参考文献

- [1] MCCONNELL J, CHEN F, ENGLLOT B. Overhead image factors for underwater sonar-based slam [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 4901-4908.
- [2] ZHANG S, ZHAO S, AN D, et al. Visual SLAM for underwater vehicles: A survey [J]. Computer Science Review, 2022, 46: 100510.
- [3] HU S, FENG R, WANG Z, et al. Control system of the autonomous underwater helicopter for pipeline inspection [J]. Ocean Engineering, 2022, 2669(8): 113190.
- [4] WANG C C, TANG D. Seafloor roughness measured by a laser line scanner and a conductivity probe [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(4): 459-465.
- [5] HUGHES D J, ALDERDICE R, COONEY C, et al. Coral reef survival under accelerating ocean deoxygenation [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(4): 296-307.
- [6] WU Y, DENG Y, ZHANG L, et al. Research on the development of unmanned underwater system detection technology [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2218(1): 012079.
- [7] ZHAO H, ZHANG Z, FAN M, et al. Calibration of a circular structured light measurement system based on a multi-diameter calibrator [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6): 065017.
- [8] 罗哉, 赵洪楠, 江文松, 等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 184-190.
- LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 184-190.
- [9] LIU C, FU X, DUAN F, et al. A novel method to calibrate the rotation axis of a line-structured light 3-dimensional measurement system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107524.
- [10] 李云梦, 关丽敏, 王会峰, 等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 66-73.
- LI Y M, GUAN L M, WANG H F, et al. Three-dimensional detection system of rotating scanning structured light and its calibration [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 66-73.
- [11] LEE J, LEE M, PARK S Y. Complete 3D foot scanning system using 360 degree rotational and translational laser triangulation sensors [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(9): 3013-3025.
- [12] ZHANG X, LI L, YANG J. Study on underwater dual-laser structured-light system for ROV guiding [J]. International Journal of Automation Technology, 2014, 8(4): 584-591.
- [13] PEDERSEN M, HEIN B S, GADE R, et al. Camera calibration for underwater 3D reconstruction based on ray tracing using Snell's law [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2018: 1410-1417.
- [14] 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.
- [15] ZHOU Y, XU L, YU Y, et al. An underwater vision measurement method based on segmented synchronous rotational scanning [C]. 2022 IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP), IEEE, 2022: 1-4.
- [16] XUE Q, SUN Q, WANG F, et al. Underwater high-precision 3D reconstruction system based on rotating scanning [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1402.
- [17] 孙茜, 薛庆生, 张冬雪, 等. 水下目标物三维激光重建方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(8): 234-240.
- SUN X, XUE Q SH, ZHANG D X, et al. Research on 3D laser reconstruction method of underwater targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(8): 234-240.
- [18] ZHAO J, CHENG Y, CAI G, et al. Correction model of linear structured light sensor in underwater environment [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 107013.
- [19] FAN J, WANG X, ZHOU C, et al. Development, calibration and image processing of underwater structured light vision system: A Survey [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 78(1): 1-18.

- [20] 姚钦舟,庄苏锋,屠大维,等. 水下透视投影图像非线性畸变校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 176-183.

YAO Q ZH, ZHUANG S F, TU D W, et al. Non-linear distortion correction method for underwater perspective projection image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 176-183.

- [21] LOH C H, HUANG Y T, HSIUNG W Y, et al. Vibration-based identification of rotating blades using Rodrigues' rotation formula from a 3D measurement[J]. Wind and Structures, 2015, 21(6): 677-691.

作者简介



刘涛, 分别在 2002 年、2005 年和 2009 年于哈尔滨工程大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为哈尔滨工程大学副教授, 主要研究方向为水面水下视觉图像识别、工业机器视觉技术与应用。

E-mail: liutao@hrbeu.edu.cn

Liu Tao received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Harbin Engineering University in 2002, 2005, and 2009,

respectively. He is currently an associate professor at Harbin Engineering University. His main research interests include visual image recognition of water surface and underwater scenes, industrial machine vision technology and applications.



杜宏旺(通信作者), 1998 年于武汉水利电力大学获得学士学位, 分别在 2005 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 2010 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为哈尔滨工程大学工程师, 主要研究方向为机器人控制与视觉测量。

E-mail: duhongwang@hrbeu.edu.

Du Hongwang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University of Water Resources and Electric Power in 1998, M. Sc. from Harbin Engineering University in 2005 and Ph. D. degree both from Harbin Engineering University in 2010. He is currently an engineer at Harbin Engineering University. His main research interests include robot control and vision measurement.