

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209215

水下双目立体视觉对应点匹配与三维重建方法研究*

庄苏锋,屠大维,张旭,姚钦舟

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444)

摘要:针对水下双目立体视觉成像稠密立体匹配因不满足空气中极线约束问题,提出一种水下对应点匹配与三维测量方法,可将水下双目相机采集的立体图像校正为符合共面行对齐原则的图像对,再套用空气中成熟的立体匹配方法得到水下左右相机图像视差图,从而实现水下目标的三维重建。首先,将进入相机的所有光线总和看成光场,采用四维光场参数表达对每一条光线建模,据此建立相机的折射成像模型和双目立体视觉模型并计算光线的方向向量;根据光线的光场表达将光线转化为点矢量的形式,计算方向图像上任意像点对应原图像的像素坐标并确定位置映射关系。通过插值即可快速得到符合行对齐原则的左、右方向图像,并最终获得每条光线对应的视差图。仿真结果表明,方向图像的行对齐误差小于0.8 pixel。水池实验采用事先标定的靶球作为目标物,利用随机散点主动投射以增加目标物表面的纹理信息,对靶球多次测量的均方根误差为2.8 mm,具有较高的测量精度。

关键词:水下双目立体视觉;水下立体匹配;水下三维重建;光线的四维参数化表达;水下双目立体视觉折射模型

中图分类号: TH74 TP39 TP751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.5 520.6

Research on corresponding point matching and 3D reconstruction of underwater binocular stereo vision

Zhuang Sufeng, Tu Dawei, Zhang Xu, Yao Qinzhou

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

Abstract: The dense stereo matching in underwater binocular stereo vision imaging does not meet the epipolar constraint in air. To address this issue, an underwater corresponding point matching and the 3D measurement method are proposed. The stereo image collected by the underwater binocular camera can be corrected to an image pair conforming to the principle of coplanar line alignment. Then, the display image of the underwater left and right cameras can be obtained by applying the mature stereo matching method in the air to realize the 3D reconstruction of the underwater target. Firstly, the sum of all the light entering the camera is regarded as a light field, and each light is modeled by a 4D light field expression. Based on this, the plane refraction imaging model and the binocular stereo vision model of the camera are established, and the direction vector of the light is calculated. According to the light field expression, the light is transformed into the form of a point vector, the pixel coordinates of any image point on the direction image corresponding to the original image are calculated, and the position mapping relationship is determined. Through interpolation, the left and right images in line with the line alignment principle can be quickly obtained. Finally, the display map corresponding to each light is obtained. Simulation results show that the line alignment error of the direction image is less than 0.8 pixel. In the pool experiment, the ball calibrated in advance is used as the target, and the random scattered point active projection is used to increase the texture information of the target surface. The root mean square error of multiple measurements of the target ball is 2.8 mm, which has high measurement accuracy.

Keywords: underwater binocular stereo vision; underwater stereo matching; underwater 3D reconstruction; four-dimensional parametric representation of the light; refraction model of underwater binocular stereo vision

0 引言

水下光视觉相比于水下声视觉具有分辨率高的特点,成为近距离水下目标探测的重要手段^[1-3]。水下双目立体视觉因其具有简单实用的特点,因而受到人们的普遍关注^[4-6]。

双目立体视觉的关键是左、右图像对应像素之间的匹配。目前,空气中的双目立体视觉技术已较为成熟,但在水下应用却面临诸多困难。水下环境中,除了光衰减和散射造成成像质量的下降外^[7-9],光线通过水和空气的分界面时发生折射,导致左、右图像对应点匹配极线约束模型改变,传统相机模型失效^[10-12]。文献[13-14]证实水下极线约束变为曲线,并得出约束极线弯曲程度与相机焦距的关系。但若以曲线极线约束作为水下立体匹配的约束条件,其计算量非常大。

为了解决水下环境中双目立体匹配问题,Ferreira等^[15]通过等效焦距来近似弥补折射对水下成像的影响;Chiang等^[16]对水下三维测量研究时忽略了光的折射所造成的影响。解则晓等^[17]提出基于折射补偿的结构光测量方法,用以补偿摄像机在水下成像时的像素坐标畸变。以上方法对折射进行近似处理,误差较大,并且匹配效果受物距影响。李雅倩等^[18]提出一种基于深度约束的水下搜索区域优化方法以实现水下立体匹配,算法效率虽得以提高,但依旧在一个较大区域搜索匹配点。以上方法大多基于几何数学折射理论,在较大的二维区域中搜索匹配点,才能获取较高精度的视差图,不同的点在不同深度下对应着不同的曲线,且无规律性。同时,对于高分辨率相机,折射图像和透视图像之间的像素差异可能是数十个像素,这将导致极大的行误差。Kwon等^[19]深入研究了水下成像折射现象,指出解决水下立体匹配问题的根本解决方法在于构建新的水下折射模型。Wu等^[20]提出一种基于几何关系将水下图像转化为空中图像的图像校正方法以解决折射导致极线约束失败的问题。

本文采取的对应点匹配与三维重建方法是:利用四维参数光场表示法对水下相机成像任一光线重新建模,建立基于光场参数表示的折射模型,将常规左、右水下图像校正为符合共面行对齐原则的左、右方向图像,从而可套用空气中成熟的立体匹配方法,快速得到水下左、右相机图像的视差图,实现水下双目立体视觉三维重建。该方法将水下立体匹配的搜索空间从二维缩小为一维搜索,保证匹配精度的同时提高了计算效率。研制的工程样机辅以随机散点激光投射到水下物体表面,用来增强物体表面的纹理信息。采用上述方法,取得了满意的三维成像效果。

1 光线的四维光场参数表示及成像模型

水下双目视觉中,相机被封装在带有玻璃窗口的装置内,成像光线在不同介质界面发生折射。将进入相机的所有光线总和看成光场,光场中任一条光线可以用两个平面、四维参数来表示^[21]:一个平面表示光的位置($[u \ v]^T$),另一个平面表示光线的方向($[s \ t]^T$),两个平面的距离为1个单位长度,如图1所示。因此,光线在空间上可表示为 $[u \ v \ s \ t]^T$ 。可用光线的方向向量 \mathbf{a} 和位置向量 \mathbf{q} 来表示空间中的某个三维点,这两种表达间的关系为:

$$\begin{cases} \mathbf{L} = [u \ v \ s \ t]^T \\ \mathbf{a} = \frac{[s \ t \ 1]^T}{\|[s \ t \ 1]\|} \\ \mathbf{q} = [u \ v \ depth]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中, $depth = \sum d$, 它表示平面折射坐标系 x - y 平面沿 Z 方向到那个点的总距离。

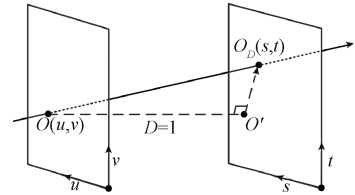


图1 光场光线四维参数化表达

Fig. 1 4D parameterized representation of the light field

将摄像机坐标系建立在光心上,其 z 轴与光轴平行。利用上述光场四维参数法定义平面折射图像模型:以多层界面法线 \mathbf{n} 为 z 轴,其与摄像机 z 轴的向量积为 x 轴,构成平面折射成像坐标系如图2所示。

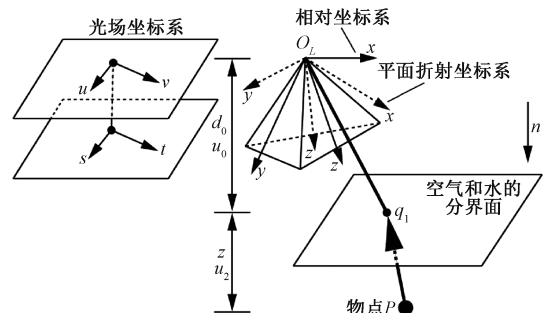


图2 光场折射光线模型

Fig. 2 Light field refraction ray model

平面折射成像坐标系与摄像机坐标系间的关系为:

$$\begin{cases} P_c = {}^cR_r P_r + {}^c t_r \\ {}^cR_r = [n \times z_c \quad n \times (n \times z_c) \quad n] \\ {}^c t_r = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ z_c = [0 \quad 0 \quad 1]^T \end{cases} \quad (2)$$

物体坐标系相对于平面折射成像坐标系的关系表示为:

$$P_r = {}^rR_o P_o + {}^r t_o \quad (3)$$

同时定义光场位置平面在平面折射成像坐标系的 $x-y$ 平面, $u-v$ 坐标系与 $x-y$ 坐标系平行, 且坐标系原点重合; 与 $u-v$ 坐标系距离 1 个单位长度的平行平面定义为 $s-t$ 平面, $s-t$ 坐标系与 $u-v$ 坐标系平行。

2 对应点匹配与三维坐标测量

在图 2 所示折射模型基础上建立立体视觉坐标系: 以左相机光心为原点, 左相机光心与右相机光心的连线方向为左立体视觉坐标系的 x 轴; 将左平面折射坐标系的 z 轴(分界面的法线)与左立体视觉坐标系 x 轴的向量积作为左立体视觉坐标系 y 轴; x 轴与 y 轴向量积作为 z 轴。将左立体视觉坐标系平移到右相机光心, 即可得到右立体视觉坐标系。最终建立的水下立体视觉模型如图 3 所示, 立体视觉坐标系与多层折射坐标系的关系可表示为:

$$\begin{cases} P_r = {}^rR_s P_s + {}^r t_s \\ {}^rR_s = [n_x \quad n_r \times z_x \quad n_x \times (n_r \times z_x)] \\ {}^r t_s = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ z_r = [0 \quad 0 \quad 1]^T \end{cases} \quad (4)$$

同时, 定义方向图像内参矩阵, 在立体视觉坐标系下建立左、右方向图像。然后计算左、右方向图像任意像素在立体视觉坐标系下对应的光线方向向量 $I_{L,S}, I_{R,S}$ 。

根据立体视觉坐标系与折射坐标系的变换关系:

$$P_r = {}^rR_s \times P_s \quad (5)$$

可得光线在折射坐标系下的方向向量 $I_{L,r}, I_{R,r}$ 。

左、右方向图像的光线矢量可表示为:

$$L_r = \begin{bmatrix} 1/I_r(3) & 0 \\ 0 & 0 & I_r^T & 0 & 1/I_r(3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

对于折射率为 μ_n 的介质, 光线 ${}^n L_r$ 传播距离 d_n 后进入折射率为 μ_{n+1} 介质时发生折射, 入射光线和折射后光线可表示为:

$$\begin{cases} {}^{n+1} \vec{L}_r = T(d_n) \times {}^n L_r \\ {}^{n+1} L_r = R(s_n \quad t_n \quad \mu_n \quad \mu_{n+1}) \times T(d_n) \times {}^n L_r \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中, } T(d_n) = \begin{bmatrix} 1 & d_n \\ & 1 & d_n \\ & & 1 & d_n \\ & & & 1 \end{bmatrix}.$$

根据上式计算左、右方向图像像点经过分界面传播和折射后到达空气中的光线 ${}^r \vec{L}_l, {}^r \vec{L}_r$, 并转换成光线矢量 \vec{a}_l, \vec{a}_r :

$$a = \frac{[s \quad t \quad 1]^T}{\|[s \quad t \quad 1]\|} \quad (8)$$

再将光线矢量 \vec{a}_l, \vec{a}_r 转换到左、右相机坐标系下。根据左、右相机内参计算得到方向图像上任意像点对应原图像上的像素位置, 并建立 X 轴方向和 Y 轴方向的映射表, 即可快速计算出左、右方向图像, 即为立体校正过的左、右水下图像。得到的左、右方向图像已符合共面行对齐原则, 可直接套用空气中的稠密立体匹配算法得到高精度的稠密视差图。此外, 由于校正后的左、右方向图像与原始水下左、右图像分别在 u 和 v 方向上存在偏差, 此处将偏差量(单位: pixel)分别保存在两通道的左、右位置图像中。

图 3 中, 左相机折射坐标系下点 P 同时也位于右相机折射坐标系下, 因此满足下列约束:

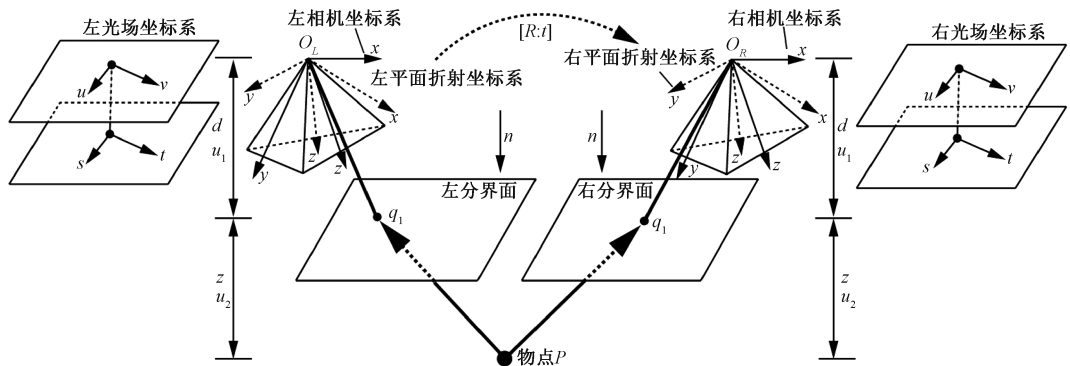


图 3 基于四维光场表达的水下立体视觉模型

Fig. 3 Underwater stereo vision model based on the 4D light field representation

$$\begin{cases} {}_l\mathbf{a} \times (P - {}_l\mathbf{q}) = 0 \\ {}_r\mathbf{a}' \times (P - {}_r\mathbf{q}') = 0 \end{cases} \quad (9)$$

使用反对称矩阵表示代替向量积,式(9)可转化为如下形式:

$$\begin{cases} [{}_l\mathbf{a}]_x \cdot (P - {}_l\mathbf{q}) = 0 \\ [{}_r\mathbf{a}']_x \cdot (P - {}_r\mathbf{q}') = 0 \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)奇异值分解可得 P 的三维坐标。

3 仿真计算

上述方法的核心在于将水下原始图像校正为符合共面行对齐原则的方向图像,行对齐的精度将直接影响后续立体匹配和三维重建的精度。左、右图像对应点的行对齐误差越小,表明所提方法的效果越好,有助于获得高精度的左右相机图像视差图。根据上节理论进行仿真分析,仿真环境为 Win10 + MATLAB R2015b,仿真参数为:镜头焦距 5 mm;相机分辨率 $2\,048 \times 1\,536$,像元尺寸 $3.45\ \mu\text{m}$;基线距离 500 mm;物距为 3 000 mm;视场 $2\,000\ \text{mm} \times 2\,000\ \text{mm}$ 。均匀分布 121 个点(11×11 ,如图4所示),光心与分界面的距离为 25 mm,空气折射率为 1,水的折射率为 1.333。

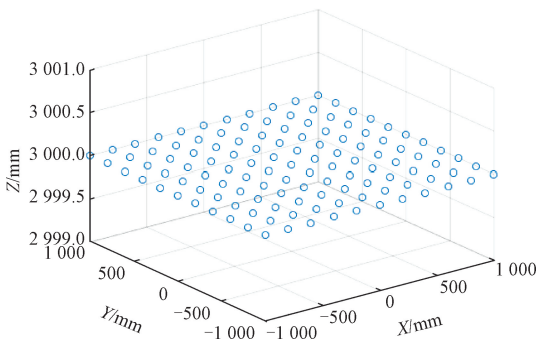


图4 深度 3 m 时 $2\,000\ \text{mm} \times 2\,000\ \text{mm}$ 视场范围内 11×11 物点

Fig. 4 11×11 object points within $2\,000\ \text{mm} \times 2\,000\ \text{mm}$ field of view at 3 m depth

基于上述仿真参数,根据上节提出的水下双目视觉系统校正方法,行对齐误差仿真结果如图5所示。 X 轴和 Y 轴表示视场范围(单位:mm), Z 轴表示行对齐误差(单位:pixel)。由仿真结果可看出,当光心到分界面的距离为 25 mm,深度为 3 000 mm 时,基于上述仿真参数,根据上节提出的水下双目视觉立体系统校正方法得到的左、右图像对应点的行对齐误差在 0.8 pixel 以内,具有较高的对齐匹配精度。

进一步,其他条件不变,在不同物距(2 500~3 500 mm)下进行仿真,去除 4 个角上的极限值后提取每次行对齐误差的最大值绘制得到图6。同样,该图纵轴表示行对

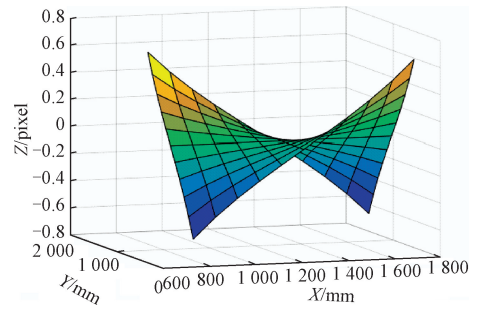


图5 行对齐误差仿真结果

Fig. 5 Simulation results of row alignment errors

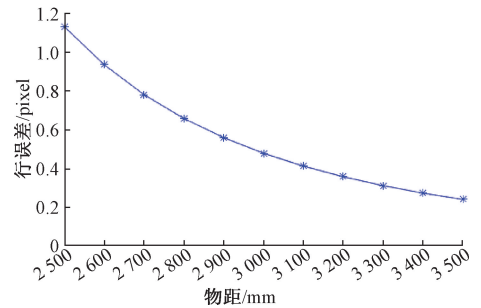


图6 不同深度下的行对齐误差

Fig. 6 Row alignment errors at different depths

齐误差,横轴表示物距。从仿真结果可看出,随着物距的减小,最大行对齐误差逐渐缓慢增加,但最大行误差仍低于 1.2 pixel。本文研制的实验样机工作景深范围选择在 2 500~3 500 mm 范围。

4 三维重建实验与分析

4.1 实验样机与实验环境

研制的水下双目立体成像实验样机如图7右上角所示。两台大恒工业相机(MER2-1220-32U3M/C + LM12JC10 M)位于样机两侧小圆筒内,分辨率为 $4\,048 \times 3\,036$ 。中间圆筒内为用于对目标物主动投射照明的随机散点激光器及控制集成单元。散点激光器的功率为 1 W;波长为 532 nm;经过随机散点模板发出散点激光,模板上的散点总数为 3.3 万;发散角度 $38^\circ \times 26^\circ$ (与相机的视场基本重合)。激光器主动投射随机散点到物体表面,用于增加目标物的表面纹理信息。控制集成单元具有左、右相机同步拍摄控制及图像存贮等功能。实验用水池尺寸为 $3\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 3.5\ \text{m}$,实验时,水池内放满自来水,将安装固定在水池顶部的实验样机沉没在水面线,样机成像窗口离水池底约 3 m,水池底板视场范围内放置目标物,如图7所示。

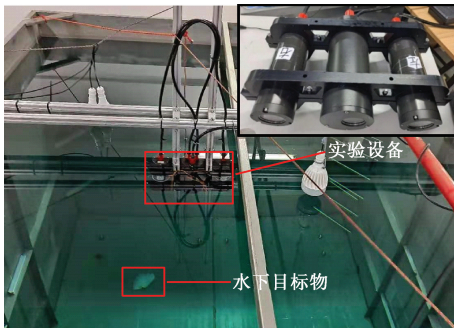


图 7 实验环境与样机

Fig. 7 Experimental environment and equipment

4.2 系统标定

利用课题组文献[21]中的水下标定方法进行水下标定,得到的系统参数如表 1 所示,其中: (f_x, f_y) 为相机焦距; (u_0, v_0) 为主点坐标; (k_1, k_2, k_3) 和 (p_1, p_2) 为畸变系数; $Error$ 为反向投影误差; \mathbf{n} 为折射平面法向量; d 为光心到折射面的距离; \mathbf{R}_{air} 为空气中左、右相机坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{T}_{air} 为空气中左、右相机坐标系之间的平移矩阵; \mathbf{R}_{water} 为水中左、右多层折射坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{T}_{water} 为水中左、右多层折射坐标系之间的平移矩阵; μ 为水池中水相对于空气的折射率。

表 1 相机参数

Table 1 Camera parameters

参数	左相机	右相机
(f_x, f_y)	(6 801.772 8 6 801.983 4)	(6 766.651 4 6 767.138 1)
(u_0, v_0)	(2 032.803 6 1 456.357 9)	(2 146.771 0 1 495.447 5)
(k_1, k_2, k_3)	(-0.028 0 0.132 1 0.001 7)	(-0.027 1 0.137 2 0.000 0)
(p_1, p_2)	(0.001 0 -0.465 4)	(-0.000 7 -0.484 6)
$Error/\%$	3.3	2.6
\mathbf{n}	(0.003 2 0.007 2)	(-0.005 0 -0.002 9)
d/mm	60.682 3	59.714 0
$\mathbf{R}_{air}/\text{mm}$	[0.000 7 -0.007 0 0.014 8]	
$\mathbf{T}_{air}/\text{mm}$	[-349.917 6 -4.145 8 -12.145 7]	
$\mathbf{R}_{water}/\text{mm}$	[-0.009 4 0.001 1 0.014 8]	
$\mathbf{T}_{water}/\text{mm}$	[-349.974 0 -4.178 4 -10.381 8]	
μ	1.333	

4.3 实验结果分析

通过测量标准靶球直径的方式来评估成像系统对于水下目标物的三维测量精度。样机固定于水池顶端(沉没于水面下)向下拍摄采集图像。靶球随机摆放至水池底部(物距 3 m 左右),摆放示意图如图 8 所示。图 9(a) 为事先经过标定的标准靶球实物,直径为 199.8 mm(由上海计量院标定)。图 9(b) 所示为计算得到的靶球三维点云正视图,图 9(c) 所示为靶球三维点云侧视图。将三维点云数据导入 Polyworks 软件,拟合得到三维球体的直径 D 。随机摆放靶球 10 次球径 D_1, D_2, \dots, D_{10} , 10 次数据如表 2 所示。由表中数据可知,球径的均方根误差为 2.8 mm,具有良好的测量精度。表 2 中,摆放在下方的靶球测量精度低于上方位置,这是由于重建精度与标定精度有关。实际标定时,按照文献[18]方法,在一个较浅的水池中进行,样机平放在水池中,从水平方向采集标定板图像,这种情况对应图 8 的上方位置,而没有在整个视场内进行标定。今后应该将标定板在整个测量视场内按照“九宫格”均匀放置,采集标定板图像,取其平均,从而

获得整个视场内的精确标定。图 9(b) 靶球的三维点云清晰、致密,成像效果较好。

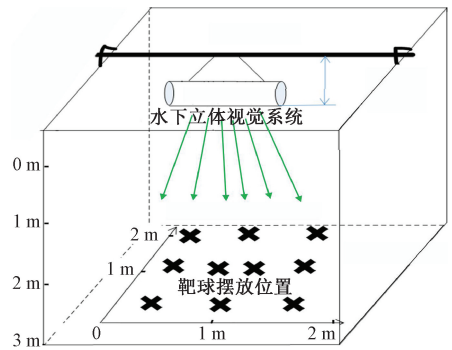


图 8 靶球与样机的位置示意图

Fig. 8 Position diagram of target ball and prototype

为了验证本文所设计的系统对水下目标物三维成像的适用性,在水池中放置贝壳和海螺壳。水下双目立体视觉成像系统实际拍摄的左、右相机水下图像如图 10 所示。

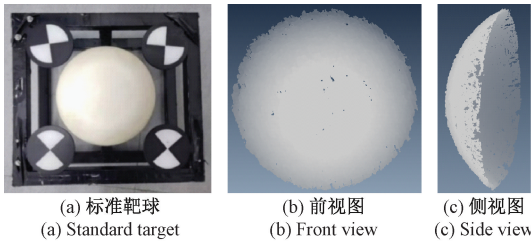


图9 靶球以及3D点云

Fig.9 Target ball and 3D point cloud

表2 多位姿测量精度

Table 2 Measurement accuracy of multiple poses mm

位置	靶球测量值	误差	均方根
中间水平 1	200.2	0.4	2.8
中间水平 2	200.1	0.3	
中间左侧	201.2	1.4	
中间右侧	201.5	1.7	
上方左侧	202.6	2.8	
上方中间	203.6	3.8	
上方右侧	203.1	3.3	
下方左侧	203.7	3.9	
下方中间	203.1	3.3	
下方右侧	203.8	4.0	

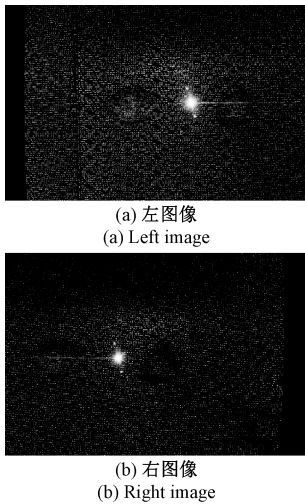


图10 水下双目立体视觉系统拍摄的左、右图像

Fig.10 Left and right images captured by the underwater binocular stereo vision system

先将以上采集到的原始左、右水下图像按照上述理论计算得到左、右方向图像,再套用 OpenCV 中的 SGBM 算法可快速得到稠密视差图,最终得到三维点云如

图 11(b)、(d)所示。从点云图可看出,样机具有较好的水下物体三维成像效果。

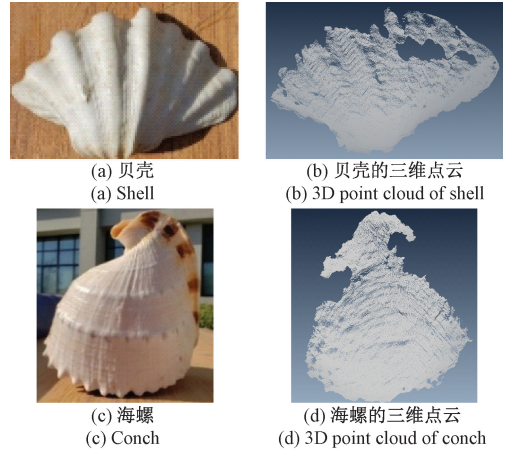


图11 生物壳及重建结果

Fig.11 Biological shell and reconstruction results

5 结 论

对水下双目视觉左右相机的对应点匹配与三维重建测量技术进行了研究,提出基于四维光场表达的水下双目立体视觉折射模型,解决光线在水下不同介质分界面折射导致的极线约束对应点匹配失效问题。首先,使用四维光场参数来描述水下成像的任一光线,建立光场折射模型以反映光线的实际传播路径;然后,根据原始左、右水下图像推导出符合共面行对齐原则的方向图像;最后,套用空气中的立体匹配方法得到左、右相机图像视差图,从而实现水下双目立体视觉三维重建。仿真计算表明,在 3 m 远处,提出的方法的行对齐误差小于 0.8 pixel,具有很高的匹配精度;水池实验表明,在 3 m 远处的靶球的测量精度为 2.8 mm(标准差),同时贝壳和海螺壳的重建实验也表明了样机具有较好的水下三维成像效果。

参考文献

[1] CHUANG T Y, TING H W, JAW J J. Dense stereo matching with edge-constrained penalty tuning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(5): 1-5.

[2] KIM S, MIN D B, KIM S, et al. Feature augmentation for learning confidence measure in stereo matching[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(12): 6019-6033.

[3] HAN F, YAO J, ZHU H, et al. Marine organism detection and classification from underwater vision based

- on the deep CNN method [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020; 1-11.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 谢亮亮, 屠大维, 张旭, 等. 深海原位激光扫描双目立体视觉成像系统[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 106-114.
- XIE L L, TU D W, ZHANG X, et al. Deep sea in-situ binocular stereo vision imaging system with laser scanning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 106-114.
- [7] WU H, ZHAO M, XU W. Underwater de-scattering imaging by laser field synchronous scanning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105871.
- [8] GHANI A. Underwater image quality enhancement through integrated color model with Rayleigh distribution [J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 27: 219-230.
- [9] 王聪, 薛晓军, 李恒, 等. 基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(2): 171-178.
- WANG C, XUE X J, LI H, et al. Underwater image enhancement based on color correction and improved 2D gamma function[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(2): 171-178.
- [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): 0408004.
- 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 Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0408004.
- [11] TREIBITZ T, SCHECHNER Y, KUNZ C, et al. Flat refractive geometry [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(1): 51-65.
- [12] ANNE J, KEVIN K, REINHARD K. Refractive 3D reconstruction on underwater images [J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 15: 90-113.
- [13] GEDGE J. Underwater stereo matching and its calibration [D]. Edmonton: University of Alberta, 2011.
- [14] CHANG Y J, CHEN T. Multi-view 3D reconstruction for scenes under the refractive plane with known vertical direction [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011: 351-358.
- [15] FERREIRA R, COSTEIRA J P, SANTOS J A. Stereo reconstruction of a submerged scene [C]. *Springer, 2nd Iberian Conference on Pattern Recognition*, Estoril, Portugal, 2005: 102-109.
- [16] CHIANG M H, LIN H T, HOU C L. Development of a stereo vision measurement system for a 3D three-axial pneumatic parallel mechanism robot arm [J]. *Sensors*, 2011, 11(2): 2257-2281.
- [17] 解则晓, 刘鹏. 基于折射补偿的水下结构光三维测量系统[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(4): 745-750.
- XIE Z X, LIU P. Underwater 3D structured light system based on refraction compensation [J]. *Journal of Optoelectronics: Laser*, 2012, 23(4): 745-750.
- [18] 李雅倩, 张岩松, 李海滨, 等. 基于深度约束的水下稠密立体匹配[J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0715001.
- LI Y Q, ZHANG Y S, LI H B, et al. Underwater dense stereo matching based on depth constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0715001.
- [19] KWON Y H, CASEBOLT J B. Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis [J]. *Sports Biomechanics*, 2006, 5(2): 315-340.
- [20] WU X, TANG X C. Accurate binocular stereo underwater measurement method [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(5): 172988141986446.

- [21] ZHANG C, ZHANG X, ZHU Y K, et al. Model and calibration of underwater stereo vision based on the light field[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(10): 105402.

作者简介



庄苏锋, 2014 年于南京理工大学获得学士学位, 2018 年于南京林业大学获得硕士学位, 现为上海大学博士研究生, 主要研究方向为水下图像处理和基于双目立体视觉的三维测量。

E-mail: sufengzhuang@163.com

Zhuang Sufeng received his B.Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2014 and received his M.Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2018. He is currently a Ph.D. candidate at Shanghai University. His current

research interests include underwater image processing and 3D measurement based on binocular stereo vision.



屠大维 (通信作者), 分别于 1987、1989、1993 年在浙江大学分别获得学士、硕士、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.