

基于离散外极曲线模型的水下多线结构光 双目测量方法

解则晓, 邵玮婧, 高翔*, 官韩磊, 王皓月, 焦雨庆

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 采用非平行双目视觉测量系统对水下目标进行测量时, 水对光线的折射使传统外极线约束关系不再成立, 导致系统的测量误差较大。为了进一步提高系统的测量精度, 提出了一种基于多线结构光的水下双目视觉测量方法。该方法基于水下非平行双目视觉测量系统模型和光线追踪原理建立了水下外极线离散曲线模型, 并提出了一种用于特征点匹配的水下外极线匹配方法, 以实现水下目标的三维测量。实验结果表明, 本方法可以有效实现多结构光的光条立体匹配, 提高水下目标的测量精度。

关键词 测量与计量; 机器视觉; 组织中光传播; 光路折射

中图分类号 TN2 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.1304003

1 引言

视觉是人类认识世界、获取外界信息的主要方式^[1], 随着海洋经济的发展, 人类在海洋领域的活动范围不断扩大, 水下环境的三维(3D)测量需求也逐渐增加^[2], 计算机视觉已逐渐成为人类认识海洋的重要技术手段。在海洋探测中, 经常将视觉系统搭载在自主式水下航行器(AUV)和有缆水下机器人(ROV)上, 以完成海上设备检测、生态环境监测、水下遗迹 3D 重建^[3-4]、海洋地质勘探和深海采矿等领域中的自动化调查、测量、测绘、监测任务^[5]。为了实现不同的水下任务, 需要通过多相机捕获场景的多视角信息^[6], 然后基于图像中的物体特征实现特征匹配, 完成水下目标的 3D 重建。

由于水下环境中光照弱、介质浑浊, 单纯的图像处理算法难以对特征纹理不明显的物体进行测量。针对该问题, 陈元杰等^[7]提出了一种基于线结构光扫描的水下目标主动测量方法, 但该方法采用扫描方式实现目标测量, 时效性较差。陈云赛等^[8]利用激光器以一定角度将激光条纹发射到目标表面上,

再基于激光三角测距原理求解目标表面的深度信息, 该方法同样存在时效性较差的问题, 且对水下目标的深度测量误差较大。此外, 光线从某一介质到另一不同光密度的介质时, 会在不同介质的交界处发生偏折, 偏折的角度取决于介质的折射率和入射光的入射角。而相机通常被放在玻璃的防水外壳中, 即光线必须先在水到玻璃, 再从玻璃到空气, 之后才能到达光学传感器, 导致相机获取的图像与实际情况存在较大畸变。目前, 主要通过相机标定、特征点提取和 3D 重建解决该问题, Treibitz 等^[9]的研究结果表明, 水下折射具有非线性特点, 用单视点(SVP)模型对水下摄像机进行标定的误差较大。因此, 一般忽略折射效应, 采用多视点^[10]等方法补偿折射的影响。Kawahara 等^[11]通过一种像素级的可变焦相机模型模拟水下的折射过程, 并计算视图中每个像素点的折射光路, 最后通过多视图的相互约束还原物体的 3D 形态和位置。但该方法的计算过程复杂, 且需要多个相机以及投影仪辅助工作, 设备体积较大, 不适用于完全自主的水下作业。现有的水下研究大多需要已知尺寸的校准目标或附加的校

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2020-12-26; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(42076192, 62003319)、山东省自然科学基金(ZR2020QF075)、青岛市博士后应用研究项目

通信作者: *xgao@ouc.edu.cn

准装置对相机进行标定^[12-16],如 Agrawal 等^[17]提出了一种用平面棋盘校准水下相机参数的方法,该方法的通用性较强,且能获得精确的水下折射模型参数。Yau 等^[18]基于特殊设计的校准装置提出了一种新的水下相机校准方法,该装置由一个包含 122 个网格状的发光二极管和防水外壳组成,利用光的色散特性进行系统校准,虽然该方法的标定精度较高,但校准装置比较复杂。此外,还可以采用更适用于水下环境的 3D 重建方法^[19-21]提高水下目标的测量精度。李焯等^[19]提出了一种基于目标尺寸估计的 3D 重建方法,先利用双目测量数据估计目标尺寸,然后采用单目测量实现 3D 重建。解则晓等^[21]提出了一种适用于水下的 3D 重建方法,该方法的水下适用性较强且测量速度快,但在进行特征匹配时未考虑折射对外极线的影响。张强等^[22]根据双目视觉测量系统相机与折射面的几何关系,指出传统外极线模型不适用于水下环境测量,并提出了三种水下外极线约束模型,验证了基于视觉测量系统模型求解水下外极线的可行性。但该方法在系统建模时假设两相机光心连线与折射面平行,与实际双目视觉测量系统的水下工作情况不符,适用性较差。

为了解决水下目标特征提取困难的问题,同时提高测量效率,本文利用在水下穿透性更强的多阵列线结构光测量水下目标。该结构光通过主动视觉测量方式,将多条线结构光同时投射在被测物体上,在提高测量效率的同时解决了水下目标特征点缺失、目标特征点不足等问题。针对水下特征匹配的问题,基于主动双目视觉测量系统,提出了一种适用于水下环境的基于外极线约束和最小距离约束的匹配方法,并对其有效性进行了实验验证。

2 系统工作原理及模型建立

2.1 系统结构及工作原理

为了验证本方法的普遍适用性,用更具普遍性的非平行双目测量系统进行了实验验证,水下视觉测量系统的流程图如图 1 所示。

双目测量系统主要由 CMOS 相机、25 个线激光器、照明 LED 以及交换机组成,如图 2 所示。其中,相机为德国 Basler 公司生产的 Aca1300-60gm 灰度摄像机,激光器投射波长为 405 nm 的蓝色线激光,照明 LED 为蓝色发光二极管。系统中的硬件均严格固定在相机密封舱外壳的底面,两相机的夹

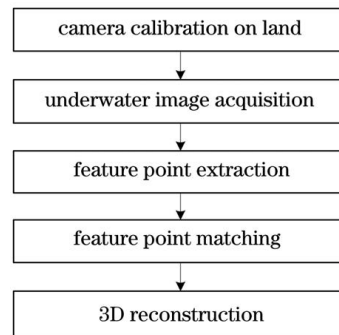


图 1 水下测量系统的流程图

Fig. 1 Flow chart of the underwater measurement system

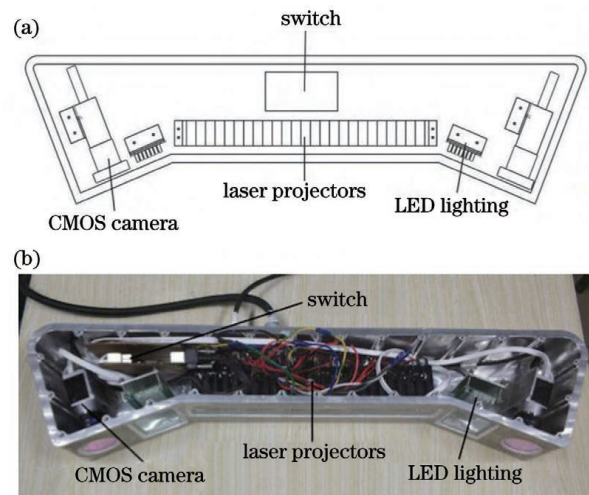


图 2 双目测量系统的原理。(a)系统的内部结构;

(b)内部实物图

Fig. 2 Principle of the binocular measurement system.

(a) Internal structure of the system; (b) internal

physical map

角约为 35° ,光心距约为 500 mm,激光器位置固定且所有光平面近似平行。用 1 个点激光器指示光条图案中心,用蓝色发光二极管照明,交换机放置在激光器后,以传输两相机获得的图像数据。双目相机可同时拍摄投射到被测物体上的激光光条,瞬间完成对物体的 3D 测量,可适用于搭载水下 ROV AUV 等载体,完成动态测量。系统的封装情况如图 3 所示,其视场范围内的测量距离最小约为



图 3 设备的密封情况

Fig. 3 Sealing condition of the equipment

550 mm, 最大约为 1000 mm, 公共视野范围最小为 400 mm × 350 mm, 可适用于水下中小型物体的测量及 3D 数据提取。

将被测物体置于相机公共视场范围内, 同时将阵列线激光光条投射在物体表面, 通过双目相机抓拍图像的同时获取当前目标物体的特征点图像, 具体工作环境如图 4 所示。

2.2 双目立体视觉模型

陆地上的双目立体视觉模型如图 5 所示, 基于该模型建立二维(2D)相面到 3D 空间以及两相机之间的转换关系。其中, $P(x_p, y_p, z_p)$ 为世界坐标系中物点的坐标, $o_{c1}-x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 、 $o_{c2}-x_{c2}y_{c2}z_{c2}$ 分别为左、右相机坐标系, $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}$ 、 $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}$ 分别为左、右相机中物点的像面坐标系, f_1 、 f_2 分别为左、右相机的焦距。基于张正友标定法对相机进行双目标定, 可以获得相机的内外参数, 进而通过内参得



图 4 系统拍摄的水下标准球图片

Fig. 4 Underwater standard ball picture taken by the system

到左右相机坐标系到像面坐标系的转换关系, 并通过相机的外参数得到左右相机之间的转换关系。若以左相机坐标系 $o_{c1}-x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 为世界坐标系, 则物点 P 在世界坐标系中的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_p = z_p \frac{X_1}{f_1} \\ y_p = z_p \frac{Y_1}{f_1} \\ z_p = \frac{f_1(f_2 t_x - X_2 t_z)}{X_2(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + f_1 r_9) - f_2(r_1 X_1 + r_2 Y_1 + f_1 r_3)} \end{cases}, \quad (1)$$

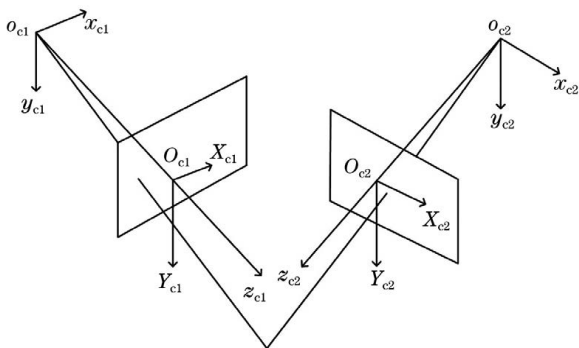


图 5 双目视觉模型的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the binocular vision model

式中, $\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为坐标系 $o_{c1}-x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 到

$o_{c2}-x_{c2}y_{c2}z_{c2}$ 之间的旋转矩阵, $\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 为原点 o_{c1}

到 o_{c2} 的平移向量, 其中, t_x 、 t_y 、 t_z 分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴的平移参数。

3 多线结构光光条的识别及提取

系统中的线结构光由一个中心激光点和 25 条线激光构成, 如图 6 所示。测量过程中先采用灰度重心法提取光条中心, 然后利用中心激光点确定各光条的顺序, 再按照光条顺序对每条光条数据进行提取和标号, 最后用本方法对光条数据进行匹配。具体步骤如下。

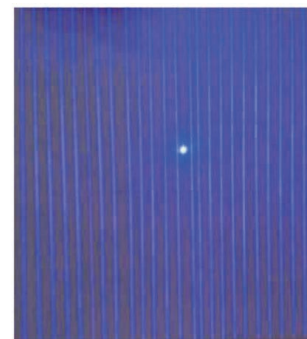


图 6 线结构光系统的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the line-structured light system

1) 获取图像中激光光条的宽度。首先,设置背景灰度阈值 h_0 ,依据该阈值对图像非背景部分的像素进行扫描提取;然后,记录可连续扫描的像素个数,并将该像素个数作为所识别图像中的激光光条宽度 d_0 。

2) 寻找中心激光点。遍历图像中的所有区域,寻找连续像素个数 $l_i \geq d_0$ 的位置,并将该连续区域的中心点位置作为中心激光点位置,记为 (u_0, v_0) 。

3) 以中心激光点为起点,分别计算其上下两部分的光条数量。

4) 取左右图像中提取到的光条数最小值作为公共光条数。

5) 从每条光条中心点开始分别向左右两边扫描并获取有效像素,然后对数据进行整合。

4 水下外极线模型的建立与特征点匹配

4.1 水下外极线模型的建立

在多线结构光光条提取及匹配后,对于左图像中某一光条上的特征点,其待匹配点位于右图像的对应该光条之上。由于空气和水的折射率不同,且水下环境中相机封装于密闭空间,光线在空气和水的交界处传播路径发生偏折,传统外极线约束原理不再适用于水下特征点匹配。因此,根据光线追踪原理,确定了左像面上某一点在右像面上对应的水下外极线,并采用迭代优化方法求解其轨迹,从而实现更高精度的水下特征点匹配与筛选。

假设左右相机的光心分别为 o_{c1} 和 o_{c2} ,左右相机的焦距分别为 f_1 和 f_2 ,左右相机像平面到折射平面的距离分别为 h_1 和 h_2 。 d_1 为任取虚拟平面与左相机折射平面之间的距离,该平面平行于左相机的折射平面, d_2 为任取虚拟平面与右相机折射平面之间的距离。取不同的 d_1 ,可以得到多个平行于左相机折射平面的虚拟平面,进而得到左相机入射光线与多个虚拟平面的多个交点 Q' ,并在右相机折射面上获得一系列对应的点 Q'' 。通过相机投影关系可在右相机像面上获得点 Q'' 的投影点 P' ,连接多个 P' 点即可在右相机像面上获得一条相应的曲线,该曲线即为左像面上点 P 对应的水下外极曲线。双目视觉测量系统中建立的水下外极线离散曲线模型如图 7 所示,假定左右相机的玻璃折射面均垂直于其光轴,光在空气和水中的折射率分别为 n_1, n_2 。求解左像面上任意一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 在右

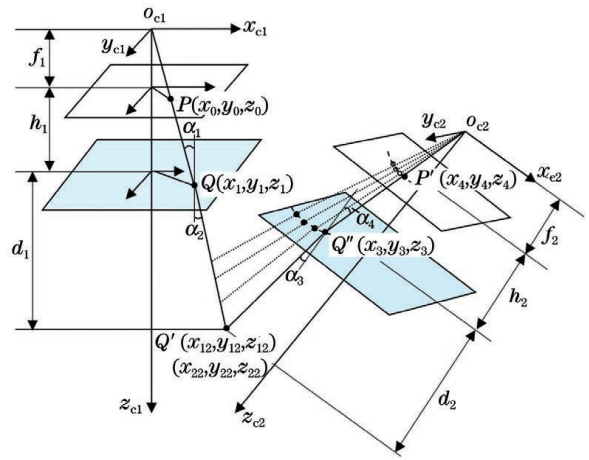


图 7 水下外极线离散曲线的模型

Fig. 7 Model of the underwater epipolar line dispersion curve

像面上对应点的步骤如下。

1) 光线传播过程中与玻璃折射面相交于点 $Q(x_1, y_1, z_1)$,由相似三角形原理可知

$$\begin{cases} x_1 = \frac{x_0}{z_0}(z_0 + h_1) \\ y_1 = \frac{y_0}{z_0}(z_0 + h_1) \\ z_1 = z_0 + h_1 \\ z_0 = f_1 \end{cases} \quad (2)$$

2) 忽略玻璃板的厚度,光线在点 $Q(x_1, y_1, z_1)$ 处发生折射,并沿 QQ' 方向在水中传播。假设玻璃折射面到点 Q' 的垂直距离为 d_1 ,则入射角 α_1 和折射角 α_2 可表示为

$$\begin{cases} \tan \alpha_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} / f_1 \\ n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (3)$$

$Q'(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ 为物点在左相机坐标系下的坐标,可表示为

$$\begin{cases} x_{12} = x_1 + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} d_1 \tan \alpha_2 \\ y_{12} = y_1 + \frac{y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} d_1 \tan \alpha_2 \\ z_{12} = f_1 + h_1 + d_1 \end{cases} \quad (4)$$

由标定的相机内外参数得到 $Q'(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ 在右相机坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{22} \\ y_{22} \\ z_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} x_{12} \\ y_{12} \\ z_{12} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{12} \quad (5)$$

式中, \mathbf{R}_{12} 和 \mathbf{T}_{12} 分别为左相机坐标系到右相机坐标系的转换矩阵和平移向量。

点 Q' 到右相机玻璃折射面的距离可表示为

$$d_2 = z_{22} - h_2 - f_2, \quad (6)$$

右相机折射面上点 $Q''(x_3, y_3, z_3)$ 的坐标可表示为

$$\begin{cases} n_2 \sin \alpha_3 = n_1 \sin \alpha_4 \\ \tan \alpha_3 = \frac{(x_{22} - x_3)^2 + (y_{22} - y_3)^2}{d_2^2} \\ \tan \alpha_4 = \frac{x_3^2 + y_3^2}{(f_2 + h_2)^2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中, α_3, α_4 分别为出射光线与右相机折射面和像面的夹角。

3) 由入射光线 $Q'Q''$ 与垂直于玻璃面的法线方向确定一个平面, $Q'Q''$ 的矢量方向为 $(x_{22} - y_3, y_{22} - y_3, z_{22} - z_3)^T$, 其左相机坐标系下法线方向的矢量为 $(0, 0, 1)^T$, 则右相机坐标系下平面的法线方向为 $(y_{22} - y_3, x_3 - x_{22}, 0)^T$, 入射光线与法线所确定的平面在右相机坐标系下的平面方程为 $(y_{22} - y_3)x + (x_3 - x_{22})y = 0$, 代入点 $Q''(x_3, y_3, z_3)$, 得到

$$x_{22}y_3 - x_3y_{22} = 0. \quad (8)$$

可以发现, (7) 式中有 4 个未知量 $x_3, y_3, \tan \alpha_3, \tan \alpha_4$, 联立 (7) 式与 (8) 式, 得到初始优化方程

$$\begin{cases} x_3^0 = \frac{x_{22}(f_2 + h_2)}{z_{22}} \\ y_3^0 = \frac{y_{22}(f_2 + h_2)}{z_{22}} \\ \tan \alpha_3^0 = \frac{(x_{22} - x_3)^2 + (y_{22} - y_3)^2}{d_2^2} \\ \tan \alpha_4^0 = \frac{x_3^2 + y_3^2}{(f_2 + h_2)^2} \end{cases} \quad (9)$$

通过迭代求解点 Q'' 的坐标值, 优化过程中将 4 个未知量的初值假定为在右相机 $\{x_3^0, y_3^0, \tan \alpha_3^0, \tan \alpha_4^0\}$ 折射面处不发生折射时对应的值。由三角形相似原理得到 $P'(x_4, y_4, z_4)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_4 = x_3 f_2 / (f_2 + h_2) \\ y_4 = y_3 f_2 / (f_2 + h_2) \\ z_4 = f_2 \end{cases} \quad (10)$$

4.2 基于最小距离约束和弯曲外极线的特征点匹配方法

水下环境中光线的折射虽然会导致外极线发生弯曲变形, 但相机的像面点坐标与弯曲后的外极线仍然具有对应关系。虽然外极线变为曲线, 但左相机像面上像点在右像面上对应的匹配点必然在该弯

曲外极线附近。因此, 提出了一种改进的外极线匹配方法。首先, 通过建模推导出某一左像面上点 P 的对应外极线, 即 1 条由离散像素组成的曲线。然后, 计算每条外极曲线上的数据点与右像面上光条中心点的距离, 取 2 个最小距离对应的 4 个数据点连线, 其交点即为左像面上点 P 对应的右像面匹配点, 如图 8 所示, 其中, minflag 1、minflag 2 和 minflag 3、minflag 4 分别为各外极线离散点与光条中心点距离最小和次小时对应的外极线离散点、光条中心点。具体步骤如下。

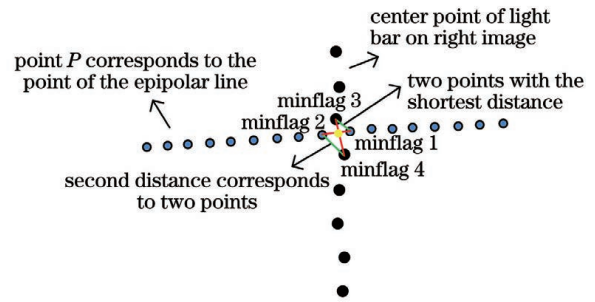


图 8 特征点匹配方法的原理

Fig. 8 Principle of the feature point matching method

1) 先提取左像面某一光条中心点 P , 并用 4.1 节中的方法得到该点对应外极线上的离散数据点。

2) 提取右像面同一光条的所有中心点数据, 并将其作为待匹配点。

3) 依次求解右像面光条中心点与各外极线离散点的距离, 并找到最小及次小距离对应的 2 个点。

4) 以外极线上的 2 点做一条直线, 以光条中心上的 2 点做另一条直线, 求交点 P' 。

5) 验证点 P' 的合理性。以点 P' 为圆心, 搜索附近是否存在光条中心点, 若存在, 则证明点 P' 为点 P 对应的匹配点; 反之, 则排除点 P' 。

6) 依次求取左像面光条中心点对应的外极曲线, 并与其在右像面上的光条中心进行匹配, 得到相应的匹配点。将得到的多组匹配点代入非平行双目折射模型中, 计算每组匹配点相应的两条异面光线^[21], 并将两异面光线公垂线的中点近似为该组匹配点对应的 3D 空间点。

5 实验结果与分析

5.1 实验环境

为了验证本方法的有效性, 对多个标准规格的目标物进行验证实验。测量目标选用半径为 26.032 mm, 高为 40.021 mm 的标准圆柱和半径为 20.058 mm 的标准球, 如图 9 所示。由于实验的主

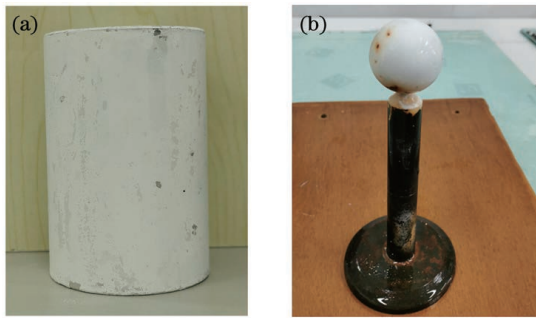


图 9 实验中的目标物。(a)标准圆柱;(b)标准球
Fig. 9 Target in the experiment. (a) Standard cylinder;
(b) standard ball

要目的是验证本方法提高匹配精度和测量精度的有

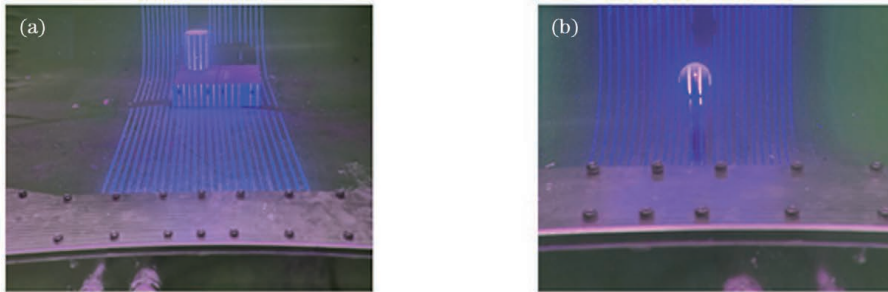


图 10 静水环境的实际情况。(a)标准圆柱;(b)标准球
Fig. 10 Actual situation of the static water environment. (a) Standard cylinder; (b) standard ball

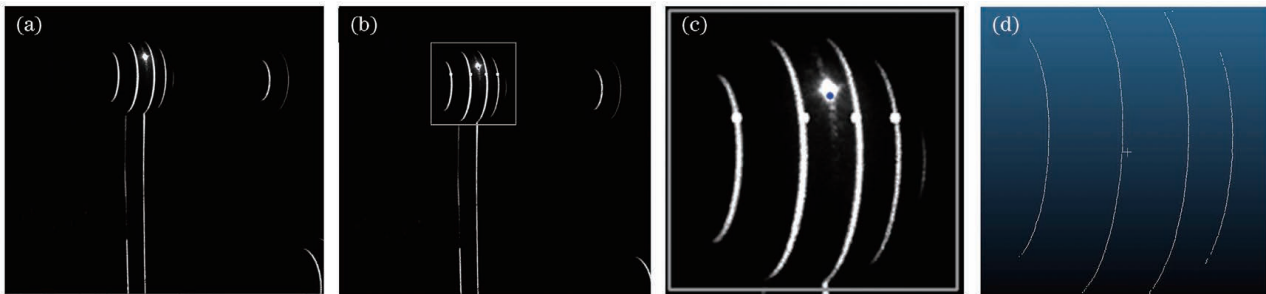


图 11 原始图像的处理结果。(a)原始图像;(b)感兴趣区域;(c)感兴趣区域内的结构光特征信息;(d)本方法提取的特征点
Fig. 11 Processing result of the original image. (a) Original image; (b) region of interest; (c) feature information of structured light in the region of interest; (d) feature points extracted by our method

为了验证基于曲线外极线的特征点匹配方法的有效性,将本方法与文献[21]中的传统外极线方法进行了对比实验。传统外极线方法使用陆地上的标定矩阵求解外极线直线方程,并将该外极线近似为水下外极线估算水下待匹配点的位置,从而实现特征点匹配。首先,拍摄水下标准靶标的图像并采用文献[23]中的方法提取靶标点,获得多组具有明确匹配关系的靶标点图像坐标。然后,分别利用本方法和传统外极线方法求解左像面上某一靶标点对应的外极线,并计算右像面上该靶标点到相应外极线的最小距离。更换多组靶标点数据进行重复计算,结果如表1所示。可以发现,本方法中的外

效性,因此未考虑实际海水中复杂的暗流及温度等因素对折射率的影响。实验时分别将标准模型放置于静水中进行测量,如图 10 所示。

5.2 水下外极线验证实验

首先,将标准圆柱放置在水下环境中,提取目标的特征并完成特征点的匹配。然后,用改进的外极线匹配方法对待匹配点进行筛选匹配。原始图像及对标准目标物体特征点的处理结果如图 11 所示。基于图 11(d)中的特征信息,结合 4.1 节中的方法计算每个特征点对应的外极曲线,并利用 4.2 节中基于最小距离约束和曲线外极线的特征点匹配方法实现特征点匹配。

表 1 不同方法对特征点的匹配精度

Table 1 Matching accuracies of feature points by different methods unit: mm

Feature point data group	Ours	Traditional method
1	0.0001029	0.027353
2	0.0001097	0.068374
3	0.0001061	0.020321
4	0.0001092	0.019906
5	0.0001081	0.019378
6	0.0000588	0.009712

极线模型更接近实际特征点的分布情况,而传统外极线与实际特征点的距离较大,这表明本方法中的曲线外极线模型能进一步提高特征点的匹配精度。

5.3 匹配特征点的 3D 重建实验

基于水下外极线和最小距离约束筛选标准圆柱的待匹配点,同时将匹配后的 2D 数据进行 3D 重建,构建特征点的 3D 数据模型。将 3D 数据导入 ImageWare 进行曲面拟合,得到的拟合结果如图 12(a)所示。为了进一步验证本方法的有效性,用水下外极线匹配方法对标准球进行匹配测量实验,结果如图 12(b)所示。

将本方法和传统方法得到的标准圆柱和标准球测量数据导入 ImageWare 中,拟合其相应的圆柱半径和标准球半径,并与实际半径进行对比,结果如

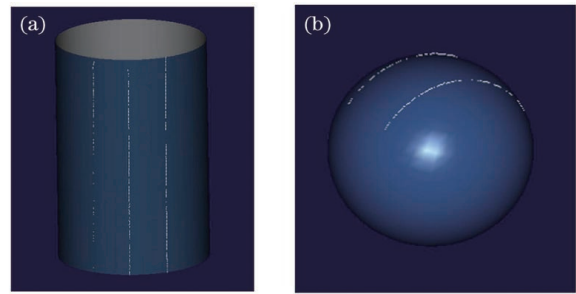


图 12 水下外极线匹配方法的测量结果。(a)标准圆柱;
(b)标准球

Fig. 12 Measurement results of underwater epipolar line matching method. (a) Standard cylinder;
(b) standard ball

表 2 不同方法的 3D 重建结果

Table 2 3D reconstruction results of different methods

unit: mm

Method	Fitting radius	Standard radius	Error	
Standard cylinder	ours	25.7912	26.032	0.2408
	traditional method	25.0320	26.032	1.0000
Standard ball	ours	19.7709	20.058	0.2871
	traditional method	19.7699	20.058	0.2881

表 2 所示。可以发现,本方法在 500 mm×400 mm×350 mm 的测量范围内,误差小于 0.3 mm,这表明本方法能获得较高精度的测量结果。

为了进一步验证本方法的可靠性和系统的测量精度,用 3 个标准球组成球靶,且每个球的半径和三个球之间的球心距是已知的,如图 13 所示。A 球的半径为 30.200 mm、B 球的半径为 30.193 mm、C 球的半径为 30.166 mm,球心 AB、AC、BC 的间距分别为 $D_{AB} = 151.763$ mm、 $D_{AC} = 220.079$ mm、 $D_{BC} = 221.490$ mm。在 2 个位置下测量这 3 个球的半径以及任意 2 球之间的球心距,在每个位置下,分别用本方法和传统方法进行匹配,并用得到的球面 3D 数据拟合球半径,结果如表 3、表 4 所示。其中, R_1 、 R_2 分别为本方法和传统方法测量的半径,

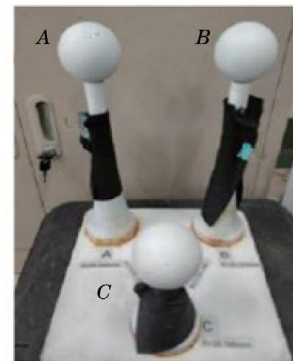


图 13 标准球模型

Fig. 13 Standard sphere model

表 3 不同方法的标准球半径测量结果

Table 3 Standard sphere radius measurement results of different methods

unit: mm

Measurable target	R_1	Error of R_1	R_2	Error of R_2	
Position 1	A	30.1609	0.0391	29.7571	0.4429
	B	29.9437	0.2493	29.7309	0.4691
	C	30.1781	0.0121	29.8000	0.3987
Position 2	A	30.0032	0.1968	29.8013	0.3987
	B	30.1600	0.0330	30.7780	0.5850
	C	30.0156	0.1504	29.7300	0.4360
Max	29.9437	0.2493	30.7780	0.5850	

表 4 不同方法的标准球心距测量结果

Table 4 Measurement results of standard sphere center distance by different methods

unit: mm

Position	Ours			Traditional method		
	e_{AB}	e_{AC}	e_{BC}	e_{AB}	e_{AC}	e_{BC}
1	0.0320	0.0916	0.1013	0.213	0.486	0.682
2	0.1760	0.1430	0.0730	0.255	0.573	0.130
Max	0.1760	0.1430	0.1013	0.255	0.573	0.682

e_{AB} 、 e_{AC} 、 e_{BC} 分别为 AB、AC、BC 球心的距离。可以发现,本方法在不同位置处测量的半径最大误差基本小于 0.3 mm,而传统方法测量的半径最大误差大于 0.5 mm,这表明本方法适用于水下环境,测量精度较高。此外,本方法测量球心距的最大误差小于 0.2 mm,而传统方法测量球心距的最大误差大于 0.6 mm,这表明本方法用于水下目标 3D 测量时可以获得较高的空间精度,满足实际测量的高精度需求。

6 结 论

基于多线结构光的水下双目视觉测量系统,提出了一种改进的水下外极线匹配方法。该方法通过建立水下折射模型,推导计算出精确的水下外极线离散模型,并基于该外极线模型筛选待匹配点数据,实现对特征点的有效匹配。实验结果表明,本方法对水下标准球和标准圆柱的测量精度较高,可以解决水下双目特征点匹配误差较大的问题,具有较好的 3D 重建效果;且测量过程操作简单、时效性强,适用于水下目标物体的测量与定位。

参 考 文 献

- [1] Zhang C, Zhang X, Tu D W, et al. On-site calibration of underwater stereo vision based on light field[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 252-260.
- [2] Xu L, Zhou Y H, Zhang F, et al. Underwater three-dimensional measurement vision system using light-plane constraint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904004.
许丽,周永昊,张帆,等. 基于光平面约束的水下三维视觉测量系统[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904004.
- [3] Huo G Y, Wu Z Y, Li J B, et al. Underwater target detection and 3D reconstruction system based on binocular vision[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(10): E3570.
- [4] Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1110001.
张子健,程效军,曹宇杰,等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1110001.
- [5] Bruno F, Bianco G, Muzzupappa M, et al. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(4): 508-518.
- [6] Wu J L, Guo Z H, Chen X F, et al. Three-dimensional measurement method of light field imaging based on deep learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204005.
伍俊龙,郭正华,陈先锋,等. 基于深度学习的光场成像三维测量方法研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204005.
- [7] Chen Y J, Zhu K W, Ge Y Z, et al. Binocular vision based locating system for underwater inspection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(5): 567-573.
陈元杰,朱康武,葛耀峥,等. 基于双目视觉的水下定位系统[J]. 机电工程, 2011, 28(5): 567-573.
- [8] Chen Y S, Yang L, Gong Y, et al. Underwater target scanning and location method based on line structured light[J]. Robot, 2018, 40(6): 786-793, 802.
陈云赛,杨磊,宫垠,等. 基于线结构光的水下目标扫描定位方法[J]. 机器人, 2018, 40(6): 786-793, 802.
- [9] Treibitz T, Schechner Y Y, Singh H. Flat refractive geometry[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [10] Queiroz-Neto J P, Carceroni R, Barros W, et al. Underwater stereo[C]//Proceedings of 17th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, October 20, 2004, Curitiba, Brazil. New York: IEEE Press, 2004: 170-177.
- [11] Kawahara R, Nobuhara S, Matsuyama T. Dynamic

- 3D capture of swimming fish by underwater active stereo [J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 17: 118-137.
- [12] Chadebecq F, Vasconcelos F, Dwyer G, et al. Refractive structure-from-motion through a flat refractive interface[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 5325-5333.
- [13] Chen X D, Yang Y H. Two-view camera housing parameters calibration for multi-layer flat refractive interface[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 524-531.
- [14] Kunz C, Singh H. Hemispherical refraction and camera calibration in underwater vision[C]//OCEANS 2008, September 15-18, 2008, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2008: 1-7.
- [15] Telem G, Filin S. Photogrammetric modeling of underwater environments[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5): 433-444.
- [16] Jordt-Sedlazeck A, Koch R. Refractive calibration of underwater cameras[M]//Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, et al. *Computer vision-ECCV 2012. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2012, 7576: 846-859.
- [17] Agrawal A, Ramalingam S, Taguchi Y, et al. A theory of multi-layer flat refractive geometry [C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 3346-3353.
- [18] Yau T, Gong M L, Yang Y H. Underwater camera calibration using wavelength triangulation [C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2013: 2499-2506.
- [19] Li X, Zhang M J. Target segmentation and target positioning of underwater binocular vision system[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(12): 53-59.
李焯, 张铭钧. 水下双目视觉系统中的目标分割和目标定位[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(12): 53-59.
- [20] Ouyang B, Dalglish F, Negahdaripour S, et al. Experimental study of underwater stereo via pattern projection[C]//2012 Oceans, October 14-19, 2012, Hampton Roads, VA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [21] Xie Z X, Li J P, Chi S K. Underwater binocular measurement method based on-line-structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504004.
解则晓, 李俊朋, 迟书凯. 基于线结构光的水下双目测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504004.
- [22] Zhang Q, Dong Y, Li H B, et al. Underwater curve constraint model based on non-parallel binocular vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0315001.
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): 0315001.
- [23] Xie Z X, Gao X, Zhu R X. Efficient extraction and robust recognition algorithm of circular coded target [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(3): 559-566.
解则晓, 高翔, 朱瑞新. 环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 559-566.

Underwater Multiple Line-Structured Light Binocular Measuring Method Based on Discrete Epipolar Curve Model

Xie Zexiao, Shao Weijing, Gao Xiang^{*}, Gong Hanlei, Wang Haoyue, Jiao Yuqing

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract

Objective When the binocular vision system is used to measure underwater targets, the refraction effect of water makes the measurements differ from the actual situation. The existing methods for reducing the refraction effect include the following. 1) A high-accuracy refraction model is established for calculating the refraction path of each pixel in the camera using the model and for obtaining the actual position of the pixel. 2) The refraction effect is assumed to be an aberration of the camera model. Furthermore, a new camera-calibration method is used to estimate the camera parameters in the underwater environment through which a new measurement model is established to reduce the refraction effect. 3) By improving the traditional epipolar line-based matching method, the traditional onshore epipolar line model can be applied to underwater situations for feature point matching. However, these three methods have certain limitations. 1) High-order parameters need to be introduced when establishing a high-accuracy refraction model, making the calculation process more complex. 2) Special calibration devices are used for camera calibration to compensate for the refraction effect of water. Although an accurate underwater refraction model can be obtained using this method, the calibration devices are usually complex. 3) Although the matching method of the traditional epipolar line exhibits good practicability, the refraction effect on the epipolar line is not considered. Herein, we propose a new modeling method of underwater epipolar line using a device containing multiple line-structured light and a binocular vision system. The discrete curve model of the underwater epipolar line is established based on the ray-tracing principle. In addition, the underwater epipolar line-matching method is improved for feature point matching. The method can effectively improve the matching accuracy of underwater feature points and further improve the measurement accuracy of underwater targets.

Methods Herein, the objects of measurement included a standard ball workpiece (Fig. 9), a standard cylinder workpiece (Fig. 9), and a three-ball workpiece (Fig. 13). Our multiple line-structured light and binocular vision system comprised two Aca1300-60gm gray-scale cameras produced by the German Basler Company, 25 blue line lasers, a blue dot laser, several lighting LEDs, and a switch (Fig. 2). The abovementioned devices are strictly fixed in a sealed cabin. The included angle of principal axes and the spatial distance of optical centers between the two cameras are approximately 35° and 500 mm. The laser position is fixed, and all the light planes are approximately parallel to each other. The measured object is placed within the cameras' public field of view, and the array line laser beams are projected on the object surface. The images are captured simultaneously by the binocular vision system. The feature points of the current target objects are obtained from these images (Fig. 11). According to the above system's underwater binocular stereo vision model and ray-tracing principle, we adopted an iterative optimization method to solve the underwater epipolar line model, which corresponded to a pixel on the left image plane. Then, we could achieve a higher precision underwater feature point selection and matching according to the epipolar line model. In the experiment, the standard ball and standard cylinder workpieces are, respectively, placed in still water for measurement. The feature points of the extracted object are the waiting-for-matched points. The waiting-for-matched points are screened and matched based on the minimum distance constraint and the epipolar line model. To evaluate the matching effect, we compared the matching precision of the model with that of the traditional epipolar line model in the experiments. Furthermore, we conducted a three-dimensional (3D) reconstruction of the matched feature points to verify the effect of using the epipolar line model for underwater target object measurement.

Results and Discussions Our multiple line-structured light exhibit good penetration capability and can capture the characteristic information of underwater targets more accurately. The experimental results showed that the established underwater discrete epipolar line model is more consistent with the actual distribution of feature points than the traditional epipolar line model. The distance between the feature points and the epipolar line model is closer, and the matching accuracy is higher (Table 1). In the measurement experiments on the three-ball workpiece, the maximum measurement radius errors obtained using the traditional epipolar line model are greater

than 0.5 mm, whereas those obtained using the epipolar line model are less than 0.3 mm (Table 3). In the experiments of measuring the center distance of several standard ball workpieces, the maximum center distance error obtained using the traditional epipolar line model is greater than 0.6 mm, while that of the epipolar line model less than 0.2 mm. Thus, the epipolar line model can achieve higher spatial accuracy when it is applied to 3D underwater target measurement.

Conclusions Herein, we proposed a discrete epipolar curve model-based underwater multiple line-structured light binocular measuring method. According to the underwater refraction model of the measurement system, we established the underwater discrete epipolar curve model. Then, we selected the waiting-for-matched feature points using the epipolar line model to achieve effective feature matching. The experimental results showed that the method has high measurement accuracy for the standard underwater ball and cylinder workpieces. It solves the problem of large matching error of feature points in the underwater binocular system and exhibits a good 3D reconstruction effect. Moreover, it is suitable for underwater target measurement because of the simple operation of the measurement process.

Key words measurement and metrology; machine vision; light propagation in tissues; light path refraction

OCIS codes 150.0155; 170.3660; 120.5710