

非平行双目视觉系统水下标定与测量

解则晓, 余江姝*, 迟书凯, 李俊朋, 李美慧

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 针对用非平行双目视觉系统进行水下拍摄测量时,由于折射所导致的测量误差较大、精度不高的问题,建立了基于折射光路的水下双目视觉系统测量模型,并以 Agrawal 方法为基础,在已知两摄像机相对位置关系的前提下,对该测量模型参数标定的方法进行了改进。为验证改进的 Agrawal 方法的可靠性,与 Agrawal 方法进行水下标定对比实验。结果表明,相较于 Agrawal 标定算法得到的防水罩法向量这一模型参数,提出的改进算法的结果与真实值更为接近。在此基础上,应用标定后的水下双目视觉系统测量模型对水下靶标标定点间的标准距离进行测量,测量误差平均值为 -0.0134 mm,最大误差为 0.2073 mm,与空气中双目视觉系统测量精度相当。

关键词 测量; 水下双目视觉; 水下摄像机标定; 平面折射几何

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0912004

Underwater Calibration and Measurement Based on Non-Parallel Stereovision

Xie Zexiao, Yu Jiangshu*, Chi Shukai, Li Junpeng, Li Meihui

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

Abstract Aiming at the large measurement error and low accuracy problems caused by refraction when conducting underwater measurement based on non-parallel stereovision system, a measurement model of underwater stereovision system is built via refraction light path. Given the relative position relationship between two cameras, a parameter calibration method which is suitable for the measurement model is improved based on Agrawal's algorithm. To verify the feasibility and robustness of the improved method, the underwater calibration experiments are carried out. Experimental results show that, for the parameter of normal vector of waterproof cover, the results of the improved method are closer to the actual results than that of Agrawal's algorithm. The measurement model of underwater stereovision system calibrated in this paper is applied to measure the standard length between the calibration points on the underwater target. The average measurement error is -0.0134 mm, and the maximum error is 0.2073 mm, which is equivalent to the measurement accuracy of stereovision system in air.

Key words measurement; underwater stereovision; underwater camera calibration; flat refractive geometry

OCIS codes 120.4820; 150.1488; 120.5710

1 引 言

近十几年来,由于陆地资源的日益短缺,对海洋资源的开发和利用备受重视。在海洋探测中,视觉系统常被用作声学系统的补充,搭载在自主式水下潜器(AUV)和有缆水下机器人(ROV)上来完成自动化的调查、测量、测绘、监测的任务,在海上设备检测和生态环境监测、水下考古物三维重建及海洋地质勘探等^[1-3]领域应用广泛。

在水下应用场景中,摄像机通常被密封在带有

玻璃窗的防水罩中,在进行拍摄时,被测物反射的光线会经过水、玻璃防水罩和空气三种介质进入相机镜头。由于三种介质的密度不同,传播的光线在玻璃防水罩的内、外表面会发生两次折射,使得传统成像模型不再适用^[4],基于此推导得到的陆上双目视觉测量系统的数学模型也不再成立。针对光线折射问题,Shortis 等^[5]和 Lavest 等^[6]等认为可以用镜头的高阶畸变来等效折射给图像带来的影响,据此提出高次畸变补偿法来消除折射给图像带来的形变。Ferreira 等^[7]则提出用折射介质的折射率与原

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-05-09; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61571408)

* E-mail: windconer@163.com

有相机焦距乘积作为等效焦距的方法来补偿折射给系统带来的影响,但该模型只适用于景深变化不大的情况。燕山大学的张文明等^[8]推导了像面和折射面不平行时的水下图像转换模型,并在此基础上对水下特征点进行了三维信息的恢复,但受转换条件的限制,对距离视觉系统较近的特征点三维信息的恢复精度不高。由于上述对折射进行近似的方法自身的局限性,基于折射光路的水下成像模型的建立和参数标定成为国内外研究的热点。

Agrawal 等^[9]针对单摄像机多介质平面折射成像系统进行了建模,提出用折射共面约束、共线约束来求解模型参数——折射平面法向量和光心到折射平面的距离,但其求解过程较为繁琐。Chen 等^[10]针对水下双目视觉系统,基于两摄像机对水下一被测点观测形成的折射光线必将交于观测点的条件,提出了利用两折射光线的共面约束对光心到平面玻璃防水罩的距离进行求解,但该方法需要事先知道折射平面的法向量。Yau 等^[11]提出了一种基于不同光线折射率进行水下相机标定的方法,但由于该方法所需的水下防水发光靶标造价昂贵且对硬件要求高的因素,应用范围受到了限制。燕山大学的张文明等^[12]应用光线追踪法给出了多介质条件下的目标精确定位模型,并通过粒子群优化得到相应的模型参数,但由于优化评价函数的计算涉及二元四次方程的求解,一般情况下只能用其数值解近似,增大了系统误差。

针对以上问题,基于折射光路建立非平行水下双目视觉系统测量模型^[13],以 Agrawal 单摄像机水下成像模型参数求解方法为基础,在已知两摄像机相位置关系前提下,利用成像点在两摄像机坐标系下成像唯一性约束,提出适用于该测量模型的参数标定方法,得到了比 Agrawal 方法更接近真实值的标定结果。为进一步验证本文方法的有效性,应用水下双目测量模型进行了水下标准距离测量实验,得到和陆上相当的测量精度。

2 水下双目成像系统

双目视觉系统被应用于水下拍摄时,常被密封在防水罩内。目前,非平行水下双目视觉成像系统一般有图 1 所示的两种成像方式^[14]。图 1(a)为两摄像机共用同一折射面的会聚成像方式,其中像面与折射面不平行;图 1(b)为两摄像机分别放置在不同防水罩中,拥有各自折射面的会聚成像方式,为了使系统误差尽量小,应该使像面与折射平面尽可能平行。对于第二种成像系统,由于像面与折射面放

置位置的特殊性,此时折射面的法向量与像面垂直,其模型参数中光心到折射面的距离可用 Chen 等^[10]提出的左、右两摄像机折射光线共面约束求解得到,故在此不做讨论。本文仅针对第一种成像系统进行模型推导和参数求解。

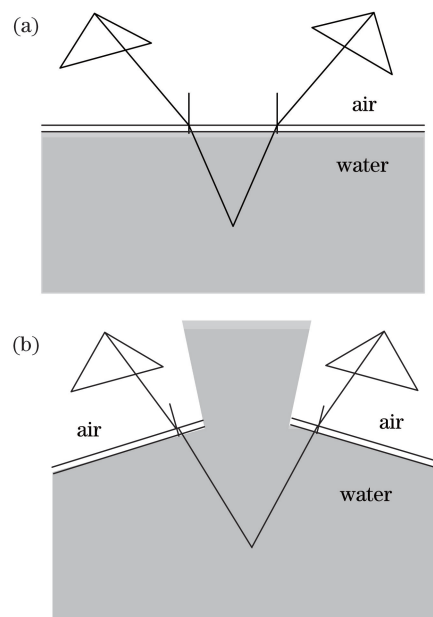


图 1 水下双目摄像机成像方式。(a)共用折射面成像;
(b)独立折射面成像

Fig. 1 Underwater stereo camera imaging model.
(a) Common refractive flat imaging; (b) independent refractive flat imaging

当用第一种成像系统对水下被测物进行拍摄时,水下被测物反射的光线经过水-平面玻璃防水罩交界面、平面玻璃防水罩-密封舱内空气交界面的两次折射后,最终在左、右摄像机像面上成像。根据左、右摄像机像面上的成像点,通过对左、右摄像机的折射光路进行反向计算后求交点,即可得到被测物去除折射影响的真实三维信息。上述过程涉及平面玻璃折射面的法向量和左、右摄像机光心到折射面的距离三个系统参数,模型参数标定的好坏决定着系统的水下测量精度,对提出的水下双目测量模型的参数进行标定研究,并将标定结果应用于水下标准长度的测量,以验证该方法的有效性。

3 水下双目测量模型

建立水下双目系统测量数学模型,如图 2 所示。设水下有任意一被观测点 P ,以 P 在左摄像机下的成像为例,对其折射光路进行分析, o_l 为左摄像机光心, p_l 为 P 经平面玻璃防水罩折射后在左摄像机像面上的成像点, P_{il} 、 P_{ol} 分别为 P 点的左折射光路

与平面玻璃防水罩内、外侧表面交点, θ_{al} 、 θ_{gl} 、 θ_{wl} 分别为折射光线的入射角、一次折射角、二次折射角, $\tilde{\mathbf{X}}_{al}$ 、 $\tilde{\mathbf{X}}_{gl}$ 、 $\tilde{\mathbf{X}}_{wl}$ 分别为折射光路 $o_{cl}P_{il}-P_{il}P_{ol}-P_{ol}P$ 各个光路段对应光线的方向向量, \mathbf{n} 为平面玻璃防

水罩的法向量, 即折射平面的法向量, d_l 、 d_r 分别为平面玻璃防水罩内表面到左、右摄像机光心的距离, d_g 为平面玻璃防水罩的厚度, n_a 、 n_g 、 n_w 为空气、玻璃和水的相对折射率。

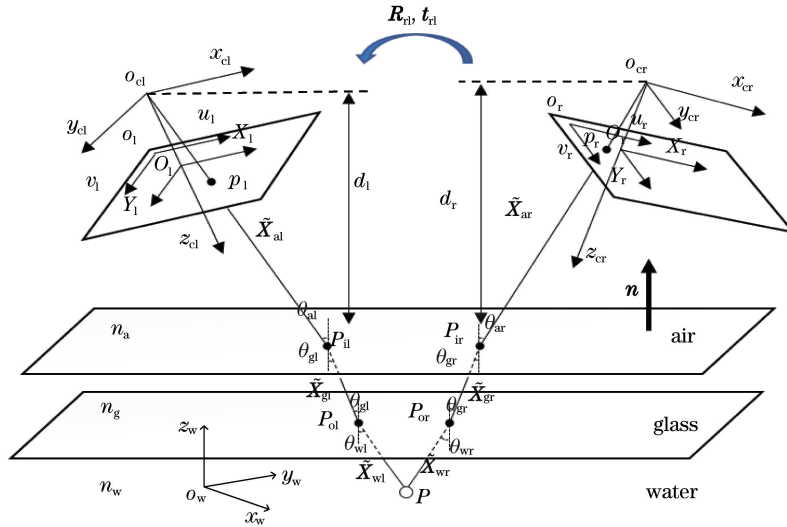


图2 水下双目视觉系统测量数学模型

Fig. 2 Mathematical model of underwater stereovision measurement system

设成像点 p_1 经镜头畸变补偿后像面坐标系下坐标为 $[\bar{X}_1, \bar{Y}_1]$, 则其对应的入射光线 $o_{cl}P_{il}$ 在左摄像机坐标系下的方向向量为

$$\tilde{\mathbf{X}}_{al} = \left[\frac{\bar{X}_1}{f_{x1}}, \frac{\bar{Y}_1}{f_{y1}}, 1 \right]^T, \quad (1)$$

式中 f_{x1} 、 f_{y1} 为左摄像机 u 、 v 坐标轴对应的焦距, 单位为 mm。

在左摄像机坐标系中, 光线 $o_{cl}P_{il}$ 与 $o_{cl}p_1$ 共线, 则有

$$\lambda_{al} = \frac{d_l}{\mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{X}}_{al}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_{il} = \mathbf{o}_{cl} + \lambda_{al} \tilde{\mathbf{X}}_{al}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{n} 为平面玻璃防水罩的法向量在左摄像机坐标系下的值, $\mathbf{o}_{cl} = [0, 0, 0]^T$, $\mathbf{P}_{il} = [x_{il}, y_{il}, z_{il}]^T$ 分别为点 o_{cl} 、 P_{il} 在左摄像机坐标系下坐标值。

由(2)式、(3)式及折射定理可得

$$\theta_{al} = \arccos \left(\frac{\mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{X}}_{al}}{\|\mathbf{n}\| \|\tilde{\mathbf{X}}_{al}\|} \right), \quad (4)$$

$$\theta_{gl} = \arcsin \left(\sin \theta_{al} \frac{n_a}{n_g} \right). \quad (5)$$

当 p_1 的反投光线到达防水罩玻璃内表面即空气-玻璃交界面时, 会在 P_{il} 点发生折射, 由于折射前后光线共面, 该平面可由 p_1 的反投光线与平面防水罩法向量 \mathbf{n} 决定, 且该平面的法向量 \mathbf{n}_{rot} 即为此次旋转的旋转轴, 计算过程为

$$\mathbf{n}_{rot} = \left(\frac{\mathbf{n}^T \times \tilde{\mathbf{X}}_{al}}{\|\mathbf{n}\| \|\tilde{\mathbf{X}}_{al}\| \sin \theta_{al}} \right), \quad (6)$$

且旋转角度 $\theta_{rot} = \theta_{al} - \theta_{gl}$, 则将在点 P_{il} 处发生的第一次折射描述为: 求成像点 p_1 的反投光线方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{al}$ 绕旋转轴 \mathbf{n}_{rot} 旋转 θ_{rot} 后光线的方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{gl}$ 。应用四元数定义此次旋转, 设描述折射向量转动的四元数记作 \mathbf{q} , 则有 $\mathbf{q} = \left[\cos \left| \frac{\theta_{rot}}{2} \right|, \sin \left| \frac{\theta_{rot}}{2} \right| \cdot \mathbf{n}_{rot} \right]$, 将待旋转向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{al}$ 表示为纯四元数 $\mathbf{p} = [0, \tilde{\mathbf{X}}_{al}]^T$, 则旋转后四元数为

$$[0, \tilde{\mathbf{X}}_{gl}] = \mathbf{q} \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{q}^{-1}. \quad (7)$$

(7)式中 $\tilde{\mathbf{X}}_{gl}$ 即为折射光路在玻璃防水罩中传播光路 $P_{il}P_{ol}$ 的方向向量在左摄像机坐标系下的坐标值, 由此折射光路与平面玻璃防水罩外侧表面的交点 P_{ol} 可计算如下:

$$\lambda_{gl} = \frac{d_g}{\mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{X}}_{gl}}, \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{ol} = \mathbf{P}_{il} + \lambda_{gl} \tilde{\mathbf{X}}_{gl}, \quad (9)$$

式中 $\mathbf{P}_{ol} = [x_{ol}, y_{ol}, z_{ol}]^T$ 为点 P_{ol} 在左摄像机坐标系下坐标值。

此时光线 $P_{il}P_{ol}$ 在点 P_{ol} 处发生第二次折射, 可将折射光路在玻璃内光线与平面玻璃法向量的夹角 θ_{gl} 视为入射角, 则由折射定理可得出射角为

$$\theta_{wl} = \arcsin \left(\sin \theta_{gl} \frac{n_{gl}}{n_{wl}} \right). \quad (10)$$

设第二次折射时光线转动的角度为 $\theta'_{\text{rot}} = \theta_{\text{wl}} - \theta_{\text{gl}}$, 由于折射前后光线共面, 所以此次旋转仍位于 p_1 的反射光线与平面防水罩法向量决定的折射平面上, 则旋转轴仍为 \mathbf{n}_{rot} 。

设描述此次旋转的四元数 $\mathbf{q}' = \left[\cos \left| \frac{\theta'_{\text{rot}}}{2} \right|, \sin \left| \frac{\theta'_{\text{rot}}}{2} \right| \cdot \mathbf{n}_{\text{rot}} \right]$, 待旋转向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{gl}}$ 表示纯四元数为 $\mathbf{p}' = [0, \tilde{\mathbf{X}}_{\text{gl}}]^T$, 则旋转后四元数为

$$[0, \tilde{\mathbf{X}}_{\text{wl}}] = \mathbf{q}' \cdot \mathbf{p}' \cdot (\mathbf{q}')^{-1}, \quad (11)$$

式中 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{wl}}$ 即为折射光路在水中传播的方向向量在左摄像机坐标系下的坐标值。

又由(8)式、(9)式可求得折射光路与平面玻璃防水罩交点 \mathbf{P}_{ol} , 则有

$$\mathbf{P}_{\text{cl}} = \mathbf{P}_{\text{ol}} + \lambda_{\text{wl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{wl}}, \quad (12)$$

式中 \mathbf{P}_{cl} 为水下被观测点 P 在左摄像机坐标系下的三维坐标值。

类似地, 对右摄像机成像光路进行分析, 可得成像点 p_r 对应的入射光线 $\mathbf{o}_{\text{cr}} P_{\text{ir}}$ 在右摄像机坐标系下的方向向量为

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}} = \left[\frac{\tilde{X}_r}{f_{xr}}, \frac{\tilde{Y}_r}{f_{yr}}, 1 \right]^T. \quad (13)$$

设两摄像机坐标系间旋转矩阵为 \mathbf{R}_{rl} , 平移向量为 \mathbf{t}_{rl} , 则 $\mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}$ 即为方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}$ 在左摄像机坐标系下的坐标值, 令 $\mathbf{p} = [0, \mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}]^T$, 描述此次旋转的四元数 $\mathbf{q} = \left[\cos \left| \frac{\theta_{\text{rot}}}{2} \right|, \sin \left| \frac{\theta_{\text{rot}}}{2} \right| \cdot \mathbf{n}_{\text{rot}} \right]$, 其中 $\mathbf{n}_{\text{rot}} = \left(\frac{\mathbf{n}^T \times \mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}}{\|\mathbf{n}\| \|\tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}\| \sin \theta_a} \right)$, 根据(4)~(7)式, 可得到折射光线 $P_{\text{ir}} P_{\text{or}}$ 在左摄像机坐标系下的方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{gr}}$:

$$[0, \tilde{\mathbf{X}}_{\text{gr}}] = \mathbf{q} \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{q}^{-1}. \quad (14)$$

同理, 令 $\mathbf{p}' = [0, \tilde{\mathbf{X}}_{\text{gr}}]^T$ 可得折射光线 $P_{\text{or}} P$ 在左摄像机下的方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{wr}}$, 且折射光路与平面玻璃防水罩内、外表面的交点 $P_{\text{ir}}、P_{\text{or}}$ 在左摄像机坐标系下坐标为

$$\mathbf{P}_{\text{ir}} = \mathbf{o}_{\text{cr}} + \lambda_{\text{ar}} \mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}, \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{\text{or}} = \mathbf{P}_{\text{ir}} + \lambda_{\text{gr}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{gr}}, \quad (16)$$

式中, $\lambda_{\text{ar}} = \frac{d_r}{\mathbf{n}^T \mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}}$, $\lambda_{\text{gr}} = \frac{d_g}{\mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{X}}_{\text{gr}}}$, \mathbf{o}_{cr} 为右摄像机光心在左摄像机坐标系下的坐标值, 即有 $\mathbf{o}_{\text{cr}} = \mathbf{t}_{\text{rl}}$, 则(15)式可改写如下

$$\mathbf{P}_{\text{ir}} = \mathbf{t}_{\text{rl}} + \lambda_{\text{ar}} \mathbf{R}_{\text{rl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{ar}}. \quad (17)$$

根据上述求解得到左摄像机坐标系下的左、右折射光路与平面玻璃防水罩外表面交点 $P_{\text{ol}}、P_{\text{or}}$ 及水下折射光线方向向量 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{wl}}、\tilde{\mathbf{X}}_{\text{wr}}$, 点 P 为水下折射光线 $P_{\text{ol}} P、P_{\text{or}} P$ 的交点, 所以 P 在左摄像机坐标系下的方程可表示为

$$\mathbf{P}_{\text{cl}} = \mathbf{P}_{\text{ol}} + \lambda_{\text{wl}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{wl}}, \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{\text{cl}} = \mathbf{P}_{\text{or}} + \lambda_{\text{wr}} \tilde{\mathbf{X}}_{\text{wr}}. \quad (19)$$

联立(18)式和(19)式求交点, 即可求解得到 $\lambda_{\text{wl}}、\lambda_{\text{wr}}$, 由(18)式即可得到水下被观测点 P 在左摄像机坐标系下的坐标值 \mathbf{P}_{cl} 。再利用摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换关系 $\mathbf{R}、\mathbf{t}$, 即可得到 P 在世界坐标系下的坐标, 但由于实际采集图片过程中噪声或系统误差的存在, 上述两光线可能相互异面, 若两光线异面, 求解两异面直线公垂线的中点, 并将其近似为待求的空间点 P 。

4 模型参数标定

由第3节测量模型的推导过程可知, 为实现水下被测点的三维信息精确求解, 在已知两摄像机相对位置关系 $\mathbf{R}_{\text{rl}}、\mathbf{t}_{\text{rl}}$ 前提下, 还需对模型参数折射平面法向量 \mathbf{n} , 即平面玻璃防水罩法向量, 左、右摄像机光心到折射平面的距离 $d_l、d_r$ 以及玻璃厚度 d_g 这几个模型参数进行标定。考虑到这几个标量的求解互不耦合, 因此将模型参数分两步进行标定, 且关于 $d_l、d_r$ 以及 d_g 的求解可通过 Chen 等^[10] 提出的左、右两摄像机折射光线共面约束求解得到, 故在此不作讨论。本节主要介绍针对水下双目改进的 Agrawal 折射平面法向量 \mathbf{n} 的估计方法。

关于摄像机水下折射成像, Agrawal 发现如下几个性质: 1) 水下折射光线的延长线均与过摄像机光心且垂直于折射平面的公共轴相交, 如图 3(a) 所示; 2) 根据折射定理, 对于水下一观测点 P , 其不同介质中的折射光路段均位于同一平面上, 称此点 P 的折射面(POR), 此平面由过光心且与折射平面法向量平行的轴 A 和点 P 经平面玻璃折射后入射摄像机的光线 $\tilde{\mathbf{X}}_a$ 决定, 如图 3(b) 平面 Π 所示。设 $\mathbf{P}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ 为点 P 在世界坐标系下的坐标值, $\mathbf{R}、\mathbf{t}$ 为世界坐标系和摄像机系的旋转、平移矩阵, 则有 $\mathbf{R} \mathbf{P}_w + \mathbf{t}$ 位于平面 Π 上, 从中可推导出折射共面约束:

$$(\mathbf{R} \mathbf{P}_w + \mathbf{t})^T (\mathbf{A} \times \tilde{\mathbf{X}}_a) = 0, \quad (20)$$

式中, \mathbf{A} 为轴 A 的方向向量, 其方向与平面玻璃防水罩法向量方向相反, $\mathbf{A} \times \tilde{\mathbf{X}}_a$ 为折射平面 Π 的法向量。

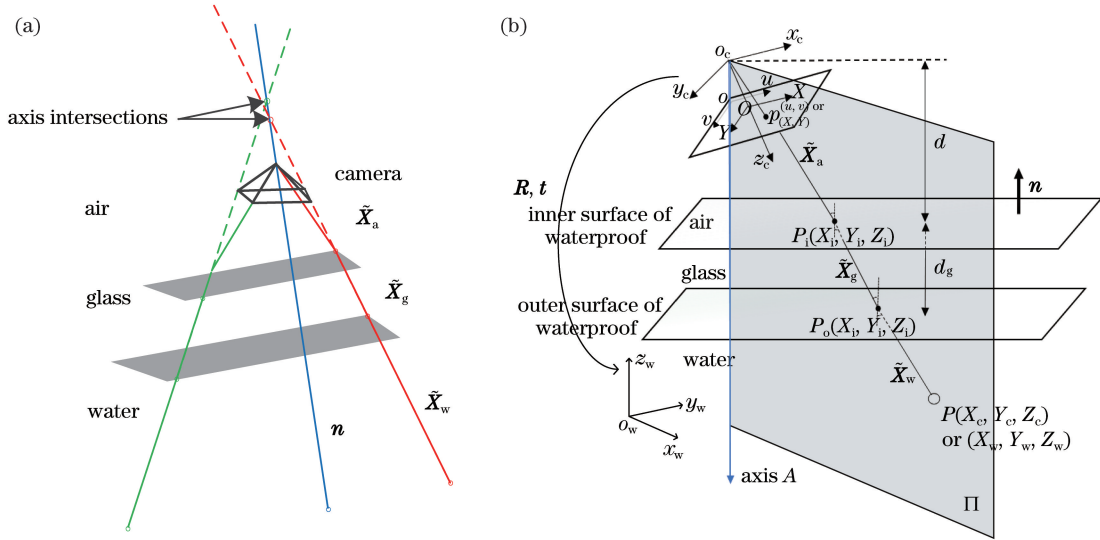


图 3 摄像机水下折射成像性质。(a)水下折射光线延长线与折射面的公共轴相交;(b)折射共面约束
Fig. 3 Refractive imaging properties of camera underwater. (a) Intersection of an underwater refracted ray extension line with a common axis of the refractive surface; (b) refractive flat constraints

对于不同的水下被观测点 P^i , 由于其所对应的入射摄像机的光线 \tilde{X}_a^i 不同, 对应的折射平面 Π 也不同。考虑到共面约束和光心到玻璃面的距离参数无关, 只和轴 A 和两坐标系间的转换关系有关, 接下来对轴 A 进行估计, 通过整理可将(20)式转换为

$$0 = \tilde{X}_a^T [A \times (RP_w + t)] = \tilde{X}_a^T EP_w + \tilde{X}_a^T s, \quad (21)$$

式中, $E = A \times R = [A] \times R$, $[A] \times$ 为向量 A 的反对称矩阵, $s = A \times T$ 。由于 $s^T A = 0$, 所以平移向量 t 在轴 A 上的分量 t_A 无法估计, 但这并不影响对轴 A 的估计。设 $E(\cdot)$ 为将矩阵 E 按列排布形成的一维列向量, \otimes 为克罗内克积, 则可将(21)式整理为

$$[P_w^T \otimes \tilde{X}_a \quad \tilde{X}_a] \begin{bmatrix} E(\cdot) \\ s \end{bmatrix} = 0. \quad (22)$$

为求解(22)式中的未知量 $E(\cdot)$ 和 s , 至少需要 11 个水下标定点的世界坐标 $P_w(i)$ 和由其对应成像点 $p(i)$ 所求解得到的 $\tilde{X}_a(i)$, 将其代入(22)式有

$$\underbrace{\begin{bmatrix} P_w(1)^T \otimes \tilde{X}_a(1) & \tilde{X}_a(1)^T \\ \vdots & \vdots \\ P_w(11)^T \otimes \tilde{X}_a(11) & \tilde{X}_a(11)^T \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} E(\cdot) \\ s \end{bmatrix} = 0, \quad (23)$$

式中 B 是一个 11×12 的矩阵, 其秩为 11。对 B 进行奇异值分解, 有 $B = U \Sigma V^T$, 则(23)式的解为矩阵 B 的右零空间, 即为矩阵 V 的最后一列, 并且通过设置矩阵 E 的范数为 1 来对尺度因子进行处理。

恢复 E, s 后, 轴 A 可以通过计算矩阵 E 的左奇异值向量得到, 因为 $A^T E = 0$, 定义远离相机方向为轴 A 的正方向, 而平移向量垂直于轴 A 的分量 $t_{A \perp} = s \times A$ 。又有 $E = [A] \times R$, 从 E 中恢复旋转矩阵 R 的方法和在对极几何中从本质矩阵 E 中恢复旋转矩阵的方法十分类似, 在此不再赘述。通过此方法可由 E 中得到四个 R 矩阵, 由图像求解得到的标定物的大致姿态信息, 能去除两个不正确的 R 矩阵。剩下两个 R 矩阵中正确解的选取与世界坐标系建立 Z 轴时的朝向有关。

对于水下双目视觉左、右两摄像机, Agrawal 共面约束均成立, 对于共用同一折射平面的水下双目视觉系统, 应用上述 Agrawal 算法求解得到的左、右摄像机坐标系下的两个玻璃平面法向量, 转换到同一摄像机坐标系下应完全相同, 但实验发现两向量间存在较大角度差, 若将标定求解结果直接用于测量, 会造成较大系统误差。所以, 需对算法进行改进, 对于水下任意标定点 P , 若设 $P_{cl} = [x_{cl}, y_{cl}, z_{cl}]^T$, $P_{cr} = [x_{cr}, y_{cr}, z_{cr}]^T$, $P_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ 分别为点 P 在左、右摄像机坐标系和世界坐标系下坐标, R_l, t_l 为 Agrawal 算法求解得到的左摄像机坐标系与世界坐标系的旋转、平移矩阵, R_r, t_r 为 Agrawal 算法求解得到的右摄像机坐标系与世界坐标系的旋转、平移矩阵, 则有

$$P_{cl} = R_l P_w + t_l, \quad (24)$$

$$P_{cr} = R_r P_w + t_r. \quad (25)$$

考虑到折射并不影响点 P 在双目视觉系统左右摄

像机坐标下的转换关系,则有

$$\mathbf{P}_{cl} = \mathbf{R}_{rl}\mathbf{P}_{cr} + \mathbf{t}_{rl}, \quad (26)$$

式中 \mathbf{R}_{rl} 和 \mathbf{t}_{rl} 为左、右摄像机坐标系间的旋转、平移矩阵,为已知量。将(24)式和(25)式代入(26)式,整理后可得

$$\mathbf{R}_l\mathbf{P}_w - \mathbf{R}_{rl}\mathbf{R}_r\mathbf{P}_w = 0. \quad (27)$$

即对于水下任一标定点,通过世界坐标系与左、右摄像机坐标系的关系求解得到标定点在同一坐标系下的距离差应为零,但由于图像噪声的存在,此约束并不一定成立,但可以将(27)式的值最小化来对 Agrawal 算法求解得到的矩阵 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l 的值进行优化,从而优化玻璃平面的法向量 \mathbf{n} 。

优化算法基于 RANSAC 框架进行,具体步骤如下:

1) 任意选择 11 个水下标定点应用 Agrawal 算法求解矩阵 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l ;

2) 将求解得到的矩阵 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l 代入(27)式,计算剩余每一个水下标定点的距离差,并将距离差与设定阈值进行比较,若距离差小于此阈值,则认为该点为内点;

3) 统计内点的个数,并记录当前内点个数最多的一组 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l 和 \mathbf{n} 的值,若内点个数大于水下标定点个数的 2/3,则认为此求解得到的 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l 和 \mathbf{n} 为最优解,停止迭代,否则重复步骤 1),直至迭代次数达到设定最大值,此时认为内点个数最多的一组 \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_l 和 \mathbf{n} 的值为最优解。

5 实验设计与结果分析

为验证改进的 Agrawal 方法的可靠性,与 Agrawal 方法进行水下模型参数标定对比实验和水中靶标上标准距离测量实验。水下双目视觉系统实验台如图 4 所示,双目摄像机前水箱玻璃相当于玻璃防水罩的折射平面,用此来模拟相机被密封在平面玻璃防水罩内的拍摄情况。实验所用的立体视觉系统为 Watec 公司生产的 WAT-902B 模拟摄像机,该摄像机分辨率为 752 pixel(H)×582 pixel(V),像元尺寸为 8.6 μm(H)×8.3 μm(V);镜头选用 Computar 公司生产的焦距为 8 mm 的百万像素级的工业镜头 0814-M;采集卡选用 Euresys 公司的 Picolo Pro2 对图像进行采集。所用标定靶标为水箱内的圆点型靶标,靶标行、列方向上每两个标记点圆心的标准距离为 25 mm,精度为 ±0.002 mm。

5.1 系统标定实验

首先,进行系统模型参数标定实验。在水箱无

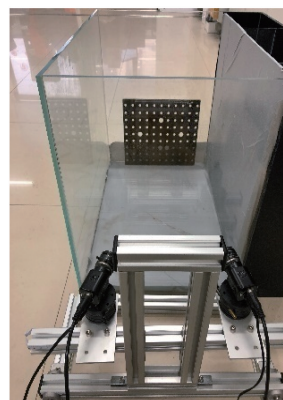


图 4 水下双目视觉系统实验台

Fig. 4 Underwater stereovision system test bed

水状态下将如图 4 所示的平面玻璃靶标紧贴于水箱后侧玻璃,此时靶标平面的法向量即为折射平面法向量真值 $\mathbf{n} = [0.2572, -0.0214, -0.9661]$ 。在水箱有水状态下,将平面玻璃靶标以任意姿态放置于水箱内,并用双目系统采集此时的靶标图像,通过图像处理算法得到水下标定点的像素坐标值,通过改进的 Agrawal 算法,可得到折射平面法向量估计值 $\hat{\mathbf{n}} = [0.2635, -0.0398, -0.9638]$,其与真实值的角度差为 0.66°,而用 Agrawal 算法计算得到的折射平面法向量的估计值与真实值的误差对于左、右摄像机分别为 1.24°和 1.07°。由此可见,对于折射平面法向量的估计,改进后的 Agrawal 算法相较 Agrawal 算法将角度误差缩小了近 1/2。在此基础上对拍摄的水下靶标图按 Chen 等^[10]提出的两折射光线的约束算法进行求解,得到左、右光心到玻璃平面的距离以及玻璃厚度的估计值为 $d_l = 167.602$ mm, $d_r = 169.944$ mm, $d_g = 7.897$ mm。

5.2 标定结果精度测试实验

为进一步说明算法的有效性,将靶标置于水中距离双目摄像机系统不同距离的 6 个位置,每个位置变换 5 个靶标姿态进行 30 次拍摄,利用本文测量模型对靶标上标定点进行三维重建,其中一对水下靶标图及其三维重建结果如图 5(a)所示。

图 5(b)中,“+”表示由本文测量算法得到的水下标定点的三维信息,“*”为忽略折射直接用空气中双目测量模型得到的水下标定点的三维信息。从图 5(b)可以看出,忽略折射直接求解存在重建错误的点,且本文算法得到的标定点三维坐标 Z 轴分量要更大,离相机更远,这与由于折射使得观察到的被测物三维形貌被放大、离相机距离变近的实际观测现象一致,定性地说明了水下双目系统测量数学模型的有效性。

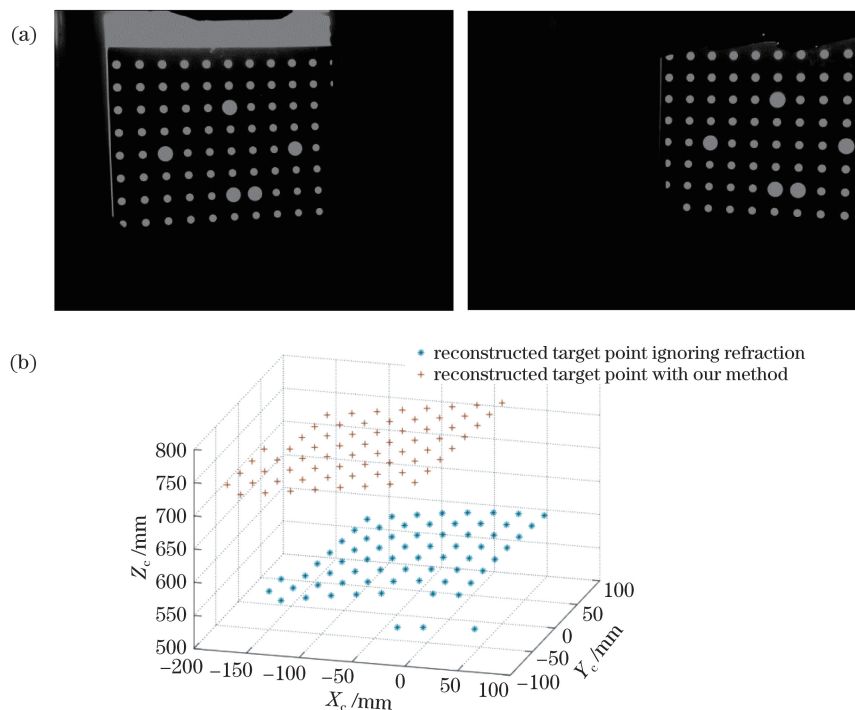


图5 水下靶标的标定点的重建结果。(a)左、右摄像机拍摄得到水下靶标示意图;(b)水下标定点的三维信息

Fig. 5 Reconstruction results of underwater targets points. (a) Images of left and right cameras;
(b) three-dimensional information of underwater target points

5.2.1 标定板点阵平面度分析

对水下靶标标定点进行三维重建,所得的水下标定应尽可能位于一个平面上,可以从重建得到

标定点拟合平面的平面上对本文算法的有效性进行验证。将图5(b)放大,从侧面对两种重建方法所得的标定点进行观察,如图6所示。

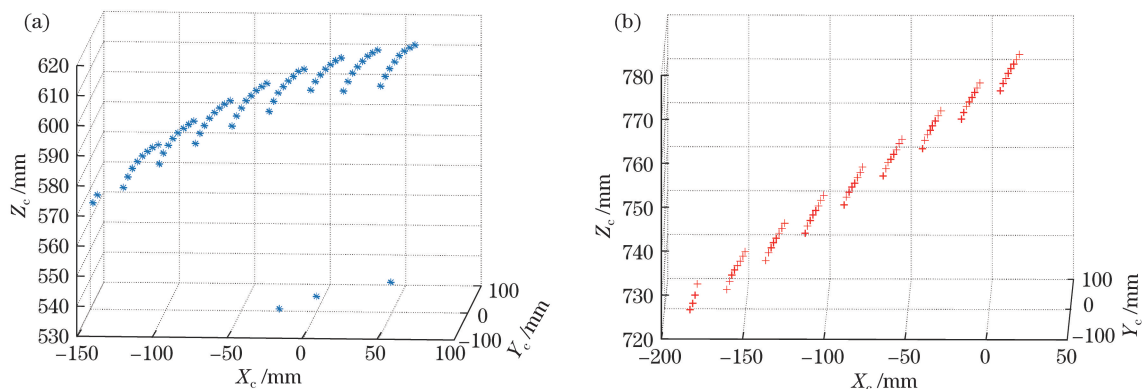


图6 水下标定点的三维信息。(a)忽略折射直接三维重建得到水下标定点;(b)本文方法三维重建得到水下标定点

Fig. 6 Three-dimensional information of underwater target points. (a) Reconstructed underwater target point ignoring refraction; (b) reconstructed underwater target point with our method

由图6可知,本文方法得到的水下标定几乎完全分布在一个平面上,而不考虑折射直接得到的水下标定并非完全分布在一个平面上,而是呈现中间凸、两边凹的分布特点。

为更直观感受两种算法求解得到靶标上标定点的平面度,对上述两组标定点进行平面拟合,用Imageware软件求解两组标定点到各自拟合平面偏

差,结果如图7所示,本文算法求解得到水下标定点到拟合平面距离误差范围为 $-0.660 \sim 0.407$ mm,远小于忽略折射直接三维重建得到的标定点到平面拟合的距离误差范围($-9.91 \sim 9.92$ mm),由此证明本文算法的有效性。

5.2.2 标准长度的重建精度分析

利用本文算法对水下30个姿态下靶标的标定

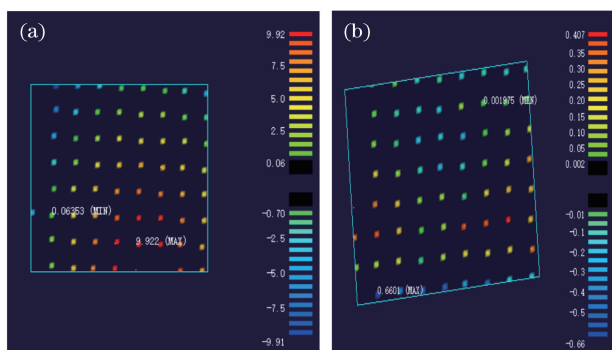


图 7 水下重建靶标的平面度。(a)忽略折射直接三维重建得到水下靶标标定点的平面度;(b)本文方法得到水下靶标标定点的平面度

Fig. 7 Flatness of reconstructed underwater target. (a) Flatness of reconstructed underwater target point ignoring refraction; (b) flatness of reconstructed underwater target point with our method

点进行三维信息重建后,对靶标上距离为 150 mm 的两大圆的圆心距进行恢复,得到表 1 所示的水下标准长度测量结果,其与真值的平均误差为 -0.0134 mm,最大误差为 0.2073 mm,且此时对应的靶标倾斜角较大。为进一步证明本文算法的有效性,用所设计的双目视觉系统对空气中 30 个姿态不同的靶标进行拍摄,并对空气中靶标上 150 mm 的长度进行测量,可得本系统空气中测量值与真值的平均误差为 0.0310 mm,将本文算法得到的水下 150 mm 标准距离的测量值与空气中 150 mm 标准距离的测量值进行对比,结果如图 8 所示。由图 8 可得,本文算法对于水下标准距离测量,除第 4 个、第 11 个、第 17 个、第 28 个姿态由于靶标放置太过倾斜导致测量误差较大外,其余姿态下对靶标上标准距离测量的误差均小于 0.1 mm,与陆上测量精度相当。

表 1 水下靶标 30 个姿态下标准长度测量结果

Table 1 Standard length measurement results for underwater target of 30 postures

No.	Measurement length /mm	Measurement error /mm	No.	Measurement length /mm	Measurement error /mm
1	149.9983	-0.0017	16	149.9926	-0.0073
2	150.0199	0.0199	17	149.8474	-0.1526
3	150.0136	0.0136	18	149.9546	-0.0454
4	149.7574	-0.2425	19	150.0127	0.0127
5	149.9811	-0.0190	20	150.0423	0.0423
6	149.9783	-0.0217	21	150.0226	0.0226
7	150.0293	0.0292	22	150.0074	0.0074
8	149.9977	-0.0023	23	149.9677	-0.0323
9	150.0104	0.0104	24	150.0428	0.0428
10	150.0099	0.0098	25	150.0130	0.0130
11	150.1162	0.1161	26	150.0026	0.0026
12	150.0738	0.0738	27	149.9656	-0.0344
13	149.9546	-0.0454	28	149.7927	-0.2073
14	150.0218	0.0218	29	149.9392	-0.0608
15	150.0060	0.0060	30	150.0261	0.0260

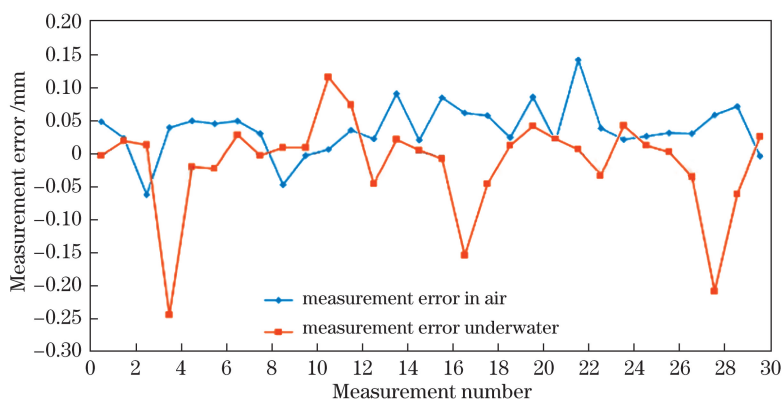


图 8 空气中和水下标准距离测量误差对比

Fig. 8 Comparison of standard length measurement error in air and underwater

为进一步证明本文算法对空间中任意距离的测量均有较高的精度,对水下同一靶标上任意两标定点间的距离进行重建,并将重建距离与真值进行比较得到测量误差,并得到水下靶标 30 个姿态下任意两标定点间距离误差的最大值与平均值,结果如表 2 所示。由表 2 可得,对于水下靶标 30 个姿态,同一姿态靶标上任意两标定点间的距离测量误差平均值均小于 0.15 mm,测量误差的最大值均小于 0.8 mm。将此结果与靶标在空气中的测量结果进行

对比,结果如图 9 所示。空气中 30 个姿态下靶标上任意两标定点间距离的测量误差平均值均小于 0.1 mm,测量误差的最大值均小于 0.3 mm,本文算法对水下标准长度的测量误差的平均值与空气中测量误差的平均值相当。对于多个姿态下靶标上的标准长度测量误差的最大值来说,除去几个极端姿态造成最大误差过大的情况,水下靶标大部分姿态下标准长度测量误差的最大值与空气中的结果相当,由此也可反映本文算法的有效性。

表 2 水下 30 个姿态下靶标上标定点间所有标准长度误差

Table 2 Standard length measurement error of all calibration points for underwater target of 30 postures

No.	Average error /mm	Max error /mm	No.	Average error /mm	Max error /mm
1	0.0432	0.2142	16	0.0416	0.2476
2	0.0237	0.1106	17	0.1116	0.6701
3	0.0209	0.1013	18	0.0725	0.3193
4	0.1466	0.5568	19	0.0342	0.1305
5	0.0390	0.2623	20	0.0459	0.2648
6	0.0859	0.5859	21	0.0270	0.1049
7	0.0276	0.1570	22	0.0392	0.1500
8	0.0291	0.1211	23	0.0404	0.1558
9	0.0366	0.2571	24	0.0226	0.1205
10	0.0224	0.0999	25	0.0478	0.2161
11	0.0587	0.2565	26	0.1056	0.4161
12	0.0392	0.2782	27	0.0501	0.2441
13	0.0449	0.2005	28	0.1271	0.7789
14	0.0845	0.3619	29	0.0802	0.3861
15	0.0361	0.1512	30	0.0363	0.2031

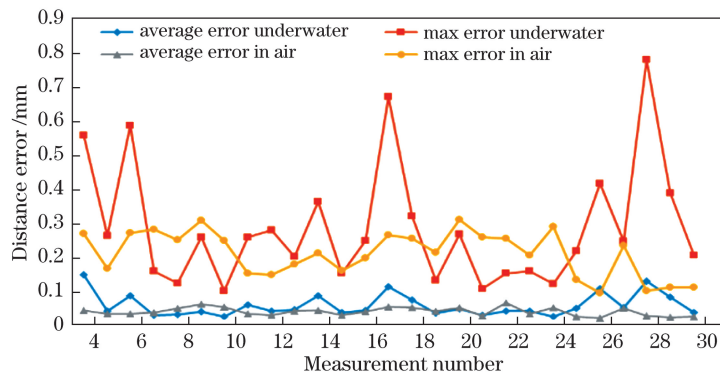


图 9 靶标上所有标准长度在水中、空气中的测量误差对比

Fig. 9 Comparison of all standard length measurement errors in air and underwater on target

6 结 论

对水下双目视觉测量系统建模和模型参数标定问题进行研究,建立了基于折射光路的水下双目测

量模型,并提出改进的 Agrawal 标定方法对模型参数进行求解。实验结果表明,改进的 Agrawal 标定方法相较于 Agrawal 标定方法,标定结果更接近真实值,且将误差降低了近一半,基于改进的 Agrawal

标定方法的水下双目测量算法具有和空气双目测量系统相当的测量精度,很好地解决因折射导致的双目视觉系统水下测量误差大的问题。

参 考 文 献

- [1] Jordt A, Köser K, Koch R. Refractive 3D reconstruction on underwater images[J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 15/16: 90-113.
- [2] Kang L, Wu L D, Wei Y M, *et al.* Two-view underwater 3D reconstruction for cameras with unknown poses under flat refractive interfaces[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 69: 251-269.
- [3] Kawahara R, Nobuhara S, Matsuyama T. Dynamic 3D capture of swimming fish by underwater active stereo[J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 17: 118-137.
- [4] 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.
- [5] Shortis M R, Harvey E S. Design and calibration of an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna populations[J]. *International Archives Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 32(5): 792-799.
- [6] Lavest J M, Rives G, Lapresté J T. Underwater camera calibration[M]//Vernon D. *Computer vision-ECCV 2000. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000, 1843: 654-668.
- [7] Ferreira R, Costeira J P, Santos J A. Stereo reconstruction of a submerged scene[M]//Marques J S, Pérez de la Blanca N, Pina P. *Pattern recognition and image analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 102-109.
- [8] Zhang W M, Deng X X, Zhang Q, *et al.* Non-parallel system underwater image transformation model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0211002.
- 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): 0211002.
- [9] 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, 2012, Providence, RI. New York: IEEE, 2012: 3346-3353.
- [10] 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, 2014: 524-531.
- [11] 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, 2013: 2499-2506.
- [12] Zhang W M, Wang X, Zhang Q, *et al.* Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system based on particle swarm optimization calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0515001.
- 张文明, 王鑫, 张强, 等. 基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0515001.
- [13] Zhang Q, Wang X, Li H B. Calibration algorithm of underwater imaging system based on PSO[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 0111004.
- 张强, 王鑫, 李海滨. 基于粒子群优化的水下成像系统标定[J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 0111004.
- [14] 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.