

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.06.004

水下视觉 SLAM 相机成像畸变纠正研究

张 阳¹, 欧阳犬平², 李进军², 冯俊俊², 魏 征², 周 立^{2*}

(1. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 江苏海洋大学 测绘与海洋信息学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要: 针对水下视觉 SLAM 相机成像畸变问题, 分析了水下机器人相机成像畸变原因, 构建了纠正模型计算畸变系数以获取正确的像素坐标, 实验证明在空气和水两种不同介质中, 相机内参和畸变系数均有较大差异, 而在不同水体中, 仅畸变系数存在变化。表明在进行水下 SLAM 时, 采用当前实验水体标定参数可以获取更好的定位和地图构建结果。

关键词: 水下 SLAM; 视觉 SLAM; 相机畸变; 畸变纠正; 相机标定

中图分类号: P71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2019)06-0024-06

随着水下机器人在海洋开发与维护中的广泛应用, 对其智能化的要求也越来越高^[1]。近年来, 人们开始将陆地机器人领域即时定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 技术应用于水下机器人定位中^[2], 以相机为传感器的视觉 SLAM, 因其技术完成度相对声呐更高, 成为水下 SLAM 研究热点。但是, 当前仍属于水下视觉 SLAM 研究探索阶段, 面临诸多问题。本文围绕相机传感器在水下成像畸变的原因, 研究水下相机标定问题。

水下相机成像畸变主要来自两个方面, 一是光线从一种介质传播到另一种介质, 会发生折射, 在水下机器人中, 光线需要从水体, 经过透明防护罩、空气、透镜, 最终在成像平面成像, 在不同介质传播导致光线方向改变, 产生畸变^[3]; 另一方面是由相机传感器本身的透镜与感光平面在安装时不平行, 造成光线穿过透镜到达成像平面时发生畸变^[4]。本文通过构建畸变纠正模型, 利用相机标定方法实现图像畸变纠正, 实验证明了水下标定需要在相应的水下环境中进行。

1 相机成像畸变原因分析

相机在成像过程中发生变形, 将对 SLAM 算法的定位精度产生影响。这种变形在水下机器人上可能存在 3 次, 第 1 次是光线从水中穿过机器人防护罩, 第 2 次是光线穿过透镜, 第 3 次是投影在成像平面, 如图 1 所示。

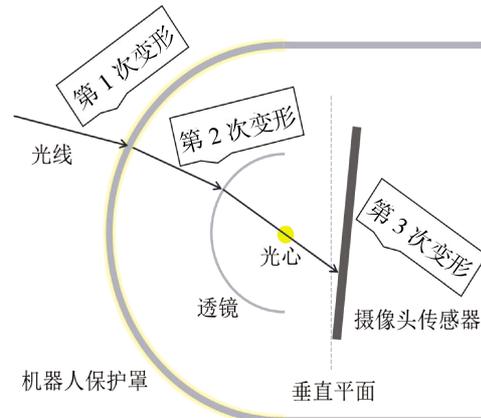


图 1 相机成像变形原因

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项资助项目 (2018YFC1405702); 海岸带地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目 (BE2017125); 江苏省海洋技术专业 (PPZY2015B116); 江苏省高等教育教改研究立项课题 (2017JSJG056)

作者简介: 张阳 (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下 SLAM、海洋测绘等。E-mail: zhyiwork@sina.com

通讯作者: 周立 (1959-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为海洋测绘、海洋观测物联网等。E-mail: zhoulilyg@aliyun.com

为了获得良好的成像效果,相机前一般都加有透镜。在水下机器人中,为了保护相机和控制系统安全,一般会将相机放置在密封舱内,并安装透明防护罩。透镜和防护罩对成像过程中光线传播造成变形。

这种影响主要有两种。一种是透镜及机器人保护罩自身形状造成光线传播过程发生变形,称之为径向畸变。这种畸变会使直线变成曲线,越靠近边缘,畸变越大。径向畸变分为桶形畸变和枕形畸变两类,桶形畸变越靠近中心位置,图像变得越大,枕形畸变与之相反,会变得更小^[9],如图 2 所示。

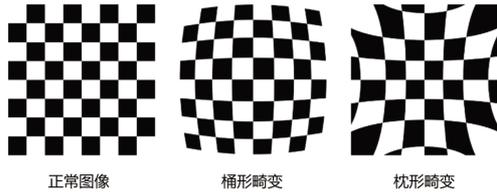


图 2 径向畸变两种类型

另一方面,相机在制造过程中,导致透镜与物理成像平面出现偏差,光线经过透镜在物理成像平面成像时,位置发生偏移,这种变形称为切向畸变,如图 3 所示。

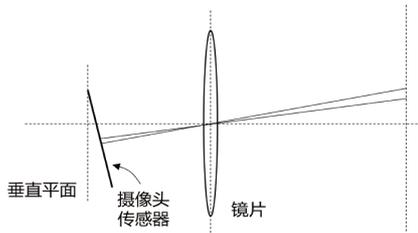


图 3 切向畸变示意图

无论是径向畸变,还是切向畸变,在实际应用中都无法避免,通过构建相机成像畸变模型,利用畸变系数对其进行纠正,可以有效减少畸变带来的影响^[6]。

2 相机成像畸变纠正模型研究

相机成像畸变纠正就是通过构建相机成像畸变模型,求解相机径向畸变和切向畸变系数,最终获取像素点在图像中的正确位置,一般将这个过程称为相机标定^[7]。目前相机标定方法可以分为基于定标物的相机标定和基于拍摄场景的相机自标定方法。张正友^[8]提出单平面棋盘格相机标定法,理论上 3 张图片就可以标定相机内参,图像越多,标定结果越精确。

假设靶标平面上任意一点 P 空间点坐标 $[X_w, Y_w, Z_w]$, P 点像素坐标标记为 $[u, v]$, 相对应的齐次坐

标表示为 \tilde{M}_p 和 \tilde{m}_p 。其中, $\tilde{M}_p = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$, $\tilde{m}_p = [u, v, 1]^T$, 单平面棋盘格经过光心到达成像平面, \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移向量。空间点 M_p 与图像点 m_p 可以用等式表示为:

$$s\tilde{m}_p = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\tilde{M}_p \quad (1)$$

可以用以下矩阵表示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x & r & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & r & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & r & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left(\mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{t} \right) \quad (3)$$

式中:坐标 (x, y, z) 位于相机坐标系; s 是非零尺度因子, a_x, a_y 分别是相机在横坐标轴和纵坐标轴上的焦距; (u_0, v_0) 是相机与物理成像平面交点是坐标; r 是像素平面坐标轴的非垂直因子。

单平面棋盘格相机标定法,提取的特征点都处于同一平面,那么假设 $Z_w=0$, 可将式(3)写成:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

得到:

$$s\tilde{m}_p = \mathbf{H}\tilde{M}_p \quad (5)$$

式中: \mathbf{H} 是单应性矩阵, $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ 。

利用映射矩阵和 \mathbf{R} 的正交性 $(r_1^T r_2 = 0, r_1^T r_1 = r_2^T r_2)$

可知 \mathbf{A} 的两个约束条件:

$$\begin{cases} h_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_1 = h_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} h_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{a_x^2} & -\frac{r}{a_x^2 a_y} & \frac{v_0 r - u_0 a_y}{a_x^2 a_y} \\ -\frac{r}{a_x^2 a_y} & \frac{r^2 + 1}{a_x^2 a_y^2} & -\frac{r(v_0 r - u_0 a_y)}{a_x^2 a_y^2} - \frac{v_0}{a_y^2} \\ \frac{v_0 r - u_0 a_y}{a_x^2 a_y} & -\frac{r(v_0 r - u_0 a_y)}{a_x^2 a_y^2} - \frac{v_0}{a_y^2} & \frac{r(v_0 r - u_0 a_y)^2}{a_x^2 a_y^2} + \frac{v_0^2}{a_y^2} + 1 \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{B} 可以用六维向量表示:

$$\mathbf{b}=[b_{11} \ b_{12} \ b_{22} \ b_{13} \ b_{23} \ b_{33}] \quad (8)$$

设 \mathbf{H} 中的第 i 列向量为 $\mathbf{h}_i=[h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$, 则:

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (9)$$

可以表示成跟 \mathbf{b} 有关的式子:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22}) \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (10)$$

在单面棋盘格拍得 n 张图像, 一张图像可以得到 2 个方程, n 张图像可以得到 $2n$ 个方程, 那么可得到:

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0 \quad (11)$$

式中: \mathbf{V} 是 $2n \times 6$ 矩阵, 因此, 当 $n \geq 3$ 即可解出方程的解。当获得 \mathbf{b} 值, 可以分解得到 \mathbf{A}^{-1} , 求逆得到 \mathbf{A} 。那么, 可以得到:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的列向量; $\lambda = 1/s$ 。

通过观察径向畸变, 发现它们越靠近边缘, 畸变越大, 那么可以用一个函数表示畸变纠正前后的坐标^[9]:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \\ y_{\text{corrected}} &= y \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: 畸变坐标为 $[x, y]^T$, 畸变纠正坐标为 $[x_{\text{corrected}}, y_{\text{corrected}}]^T$ 。 k_1 主要纠正畸变较小的图像中心区域, k_2 主要纠正畸变较大的边缘区域, k_3 纠正畸变很大的摄像头, 比如鱼眼相机, 普通摄像头用 k_1, k_2 纠正即可。

对于切向畸变, 可以使用 p_1, p_2 两个参数进行纠正:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ y_{\text{corrected}} &= y + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{aligned} \quad (15)$$

相机坐标系点 $P(X, Y, Z)$, 通过 5 个畸变纠正系数, 可以获得正确坐标。点 P 投影到物理成像平面, 坐标 $[x, y]^T$ 。通过径向畸变和切向畸变纠正系数对相机变形进行纠正:

$$\begin{cases} x_{\text{corrected}} = x \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ y_{\text{corrected}} = y \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases} \quad (16)$$

最后, 得到纠正后的坐标 $[x_{\text{corrected}}, y_{\text{corrected}}]^T$ 在像素坐标系的坐标:

$$\begin{cases} u = f_x x_{\text{corrected}} + c_x \\ v = f_y y_{\text{corrected}} + c_y \end{cases} \quad (17)$$

3 实验与分析

3.1 不同介质相机标定实验与分析

相机标定实验采用单平面棋盘格相机标定法, 同时在空气和水中进行标定, 验证相机内参和畸变系数差异是否明显。实验系统为 Ubuntu 14.04, 依赖库为 ROS Indigo。实验标定板为 10×7 布局方格, 方格边长为 29 mm, 如图 4 所示。

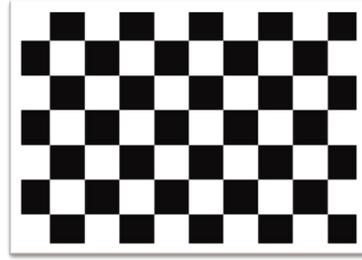


图 4 标定板

不同介质中, 采用帆布水池实验, 在注水前后分别进行实验。在终端启动 ROS Indigo 系统, 在 ROS 中调用相机^[10], 标定过程如图 5 所示。

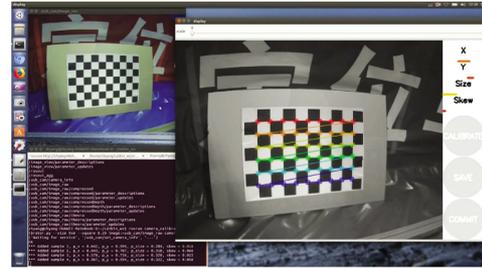


图 5 相机标定过程

图中, X 和 Y 表示标定板在相机中的上下和左右位置; $Size$ 表示占视野尺寸大小; $Skew$ 表示上下左右倾斜位置。可以通过移动相机相对标定板位置, 获取更加准确标定结果。标定时, 程序会截取标定时图像, 将图像导入 MATLAB 中 Camera Calibrator 程序^[11], 得到标定时相机位置和角度, 如图 6 所示。

其中, 空气中 42 张图像剔除了 8 张重投影误差较大图片, 水中 49 张图像剔除了 2 张。重投影误差是检测标定图像误差大小的一个参数, 误差越小, 标定结果越准确。虽然 MATLAB 标定程序剔除

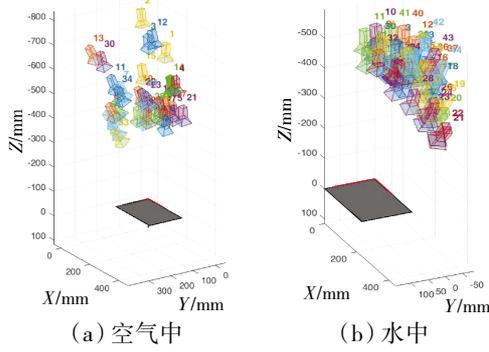


图 6 标定相机拍摄位置

了少量标定图像,但在 3 张图像即可求得相机标定结果的情况下,ROS 系统标定获取的图像远远满足标定精度需要。空气中重投影平均误差为 0.18 pixels,水中重投影平均误差为 0.29 pixels,如图 7~图 8 所示。

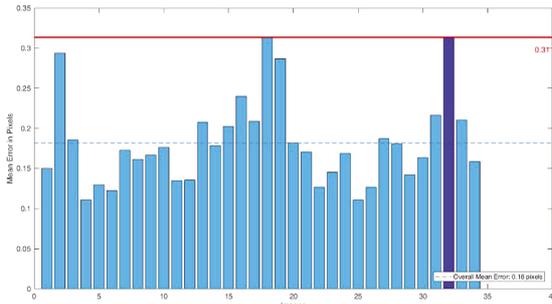


图 7 空气中重投影误差

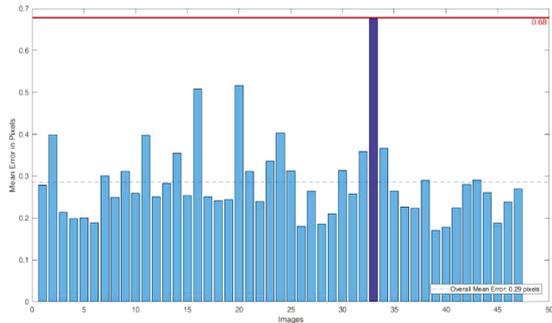


图 8 水中重投影误差

最后,获得相机标定结果,在结果文件 ost.yaml 中, camera_matrix 是相机内参, distortion_coefficients 是畸变改正参数。通过两次实验,分别获得空气和水中相机标定结果。

(1) 空气中相机标定内参及畸变系数分别为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 585.649935 & 0.000000 & 311.878140 \\ 0.000000 & 584.794956 & 312.834346 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] = [-0.455836, 0.239824, 0.004961, 0.000828, 0.000000] \quad (19)$$

(2) 水中相机标定内参及畸变系数分别为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 775.270656 & 0.000000 & 293.603808 \\ 0.000000 & 775.814093 & 295.499837 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] = [-0.446910, 0.298707, -0.002197, 0.001014, 0.000000] \quad (21)$$

从两次标定结果来看,在空气中和水中,相机标定结果是不同的。在相机内参结果中,归一化焦距 f_x, f_y 存在较大差距,图像中心值 c_x, c_y 差距较小。在畸变系数方面,虽然各参数相差不大,但除了 k_3 值均为 0,径向畸变和切向畸变改正参数都有差别。

相机作为 SLAM 获取数据的传感器,其标定结果直接参与 SLAM 算法计算,对 SLAM 系统定位精度产生重要影响,因此采用更加准确的内参和畸变系数,能有效提高系统精度。在水下进行视觉 SLAM 前,需要在水下进行相机标定,而不能采用在空气中的标定结果。

空气和水体因为介质存在巨大差异,导致相机标定结果不同,那么如果在两种水体中进行标定,其结果是否存在差异,对 SLAM 系统稳定性影响需要进一步验证。

3.2 不同水体相机标定及 SLAM 实验与分析

在空气中,相机焦距未发生变化时,即使在不同地方标定,结果也基本一致。为了检验在不同水体,相机标定结果是否会发生变化,以及不同标定结果对于 SLAM 系统的影响,另外在淮海工学院海洋工程技术中心测绘水池进行标定实验,同时利用 ORB-SLAM2 算法对测绘水池相机数据进行处理。

首先采用测绘水池相机标定结果进行实验,相机内参标定结果和相机畸变系数为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 786.446591 & 0.000000 & 289.708264 \\ 0.000000 & 782.054939 & 290.687562 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] = [-0.469435, 0.335624, -0.001500, -0.002487, 0.000000] \quad (23)$$

将式(22)~式(23)作为参数参与 ORB-SLAM2 算法计算,在测绘水池数据实验结果如图 9 所示。

由于测绘水池实验条件较差,获得 31 个关键帧和 1 126 个点云信息。

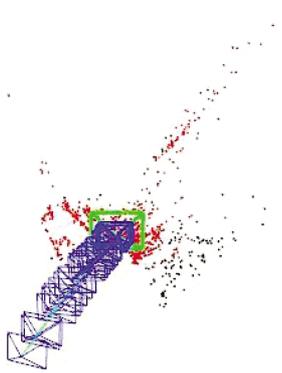


图 9 测绘水池标定参数实验结果

同样,将帆布水池相机标定结果式(20)~式(21),放入 ORB-SLAM2 算法中进行计算,在帆布水池相机标定结果获得 20 个关键帧和 671 个点云。实验结果如图 10 所示。

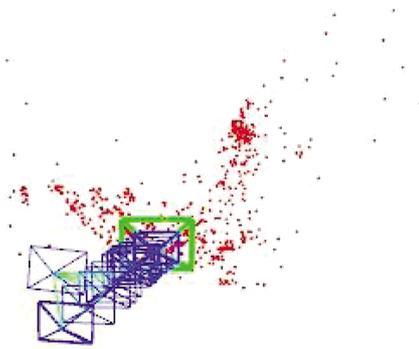


图 10 帆布水池标定参数实验结果

通过实验结果可知,在不同水体中,相机标定结果存在差异,差异主要体现在相机畸变系数大小上,对于相机内参来说,可以认为无变化。这是因为相机内参跟焦距有关,在焦距固定情况下相同介质中内参不变,这与空气中一致。另一方面,从两个标定结果对 SLAM 系统影响来看,首先获取的关键帧分别为 31 帧和 20 帧,环境地图点云数量为 1 126 个和 671 个。关键帧数量和点云数量分别多 55%和 68%,说明利用正确的标定参数,可以获得更好的定位结果和环境信息。

4 结束语

本文围绕水下相机成像畸变问题,通过构建畸变纠正模型,采用单平面棋盘格相机标定法对相机进行变形纠正。在空气中和水下分别进行标定实验,验证了在不同介质中,相机内参和畸变系数均有差异。在不同水体环境中进行标定实验,验证了在不同水域,相机内参标定结果一致,但是畸变系数存在差异,使用对应水体标定结果进行 SLAM,可以获得更多关键帧和点云数量。因此,在不同水体进行视觉 SLAM 时,尽可能使用对应水体相机标定结果,方可获得更加准确的定位结果。

参考文献:

- [1] 庞硕, 纠海峰. 智能水下机器人研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(23):66-71.
- [2] Hidalgo F, Kahlefeldt C, Bräunl T. Monocular ORB-SLAM application in underwater scenarios[C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). IEEE, 2018: 1-4.
- [3] 高新浩, 黄茹楠, 杨育林. 水下相机标定算法研究[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(03):252-258.
- [4] Hartley R, Kang S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(8): 1309-1321.
- [5] 陈晓燕, 董志国, 轧刚, 等. 相机标定精度外界影响因素仿真及实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(01):16-20.
- [6] 王勇, 陈国良, 李晓园, 等. 一种相机标定辅助的单目视觉室内定位方法[J]. 测绘通报, 2018(02):35-40.
- [7] 支健辉, 董新民, 孔星炜, 等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(02):286-291.
- [8] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]// Iccv, 1999, 99: 666-673.
- [9] 王立中, 薛河儒, 王靖韬. 一种改进的相机标定方法[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2010, 41(02):223-228.
- [10] 谢宇忻, 刘延雯, 王铄, 等. ROS 系统下的相机标定研究[J]. 电脑与电信, 2018(11):31-34.
- [11] 寻言言, 薛河儒, 姜新华. 基于 MATLAB 的相机标定方法[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(02):164-168.

Research on Imaging Distortion Correction of Underwater Vision SLAM Camera

ZHANG Yang¹, OUYANG Quan-ping², LI Jin-jun², FENG Jun-jun², WEI Zheng², ZHOU Li²

1. *College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;*

2. *School of Geomatics and Marine Information, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu Province, China*

Abstract: Aiming at solving the imaging distortion problem of underwater visual SLAM camera, the causes of imaging distortion of underwater robot camera are analyzed in this paper, and the correction model is used to calculate the distortion coefficient to obtain the correct pixel coordinates. The experiment proves that in the air and water, the camera internal reference and the distortion coefficients are quite different, and in different water bodies, only the distortion coefficient changes. It is shown that when performing underwater SLAM, the current experimental water body calibration parameters can be used to obtain better positioning and map construction results.

Key words: underwater SLAM; visual SLAM; camera distortion; distortion correction; camera calibration