

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005968

水下透视投影图像非线性畸变校正方法^{*}

姚钦舟, 庄苏锋, 屠大维, 张旭, 谢亮亮

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

摘要:针对水下成像多界面折射引起的图像非线性畸变,提出一种水下透视投影图像校正方法,将相机透过多界面拍摄的水下图像转化为空气中相机拍摄目标的透视投影图像。首先,在多层平面折射模型下,以四维光场参数化的形式对水下相机成像过程建模,通过光场的方向信息计算出水中像点与校正像点间坐标的映射关系。然后,利用两者映射关系将水下相机获取的图像转化为空气中透视投影图像。经仿真优化,物距在2~4 m的透视投影图像平均误差在1 pixel以内。实验结果也验证了该方法的可靠性与准确性,当物距在2 m时,校正后的透视投影图像平均误差为0.56 pixel,行匹配平均误差为0.4 pixel。

关键词:水下多界面成像;非线性畸变;透视投影;多层平面折射模型;光场

中图分类号: TH74 TP39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Non-linear distortion correction method for underwater perspective projection image

Yao Qinzhou, Zhuang Sufeng, Tu Dawei, Zhang Xu, Xie Liangliang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the non-linear distortion of the image caused by the multi-interface refraction of underwater imaging, this paper proposes a method for correcting underwater perspective projection images, which converts the underwater images taken by the camera through multiple interfaces into the perspective projection images of the camera in the air. First, under the multi-layer plane refraction model, the imaging process of the underwater camera is modeled in the form of a four-dimensional light field parameterization, and the mapping relationship between the underwater image point and the corrected image point is calculated from the direction information of the light field. Then, using the mapping relationship between the two, the images acquired by the underwater camera are converted into perspective projection images in the air. After simulation and optimization, the average error of the perspective projection image with an object distance of 2 m to 4 m is within 1 pixel. The experimental results also show the reliability and accuracy of the method. When the object distance is 2 m, the average error of the corrected perspective projection image is 0.56 pixel, and the average error of row matching is 0.4 pixel.

Keywords: underwater multi-interface imaging; non-linear distortion; perspective projection; multi-layer plane refraction model; light field

0 引言

水下探测技术在海洋资源探索 and 开发领域有着广泛的运用,如水下三维重建、定位导航、生物监测等^[1-4]。近年来越来越多的视觉传感器被应用于遥控无人潜水器(remote operated vehicle, ROV)和自主式水下潜器

(autonomous underwater vehicle, AUV)上,使得视觉探测成为一种高效的水下采样工具。然而,由于水下成像多界面折射所引起的图像非线性畸变问题,导致传统针孔相机成像模型失效,空气中的图像处理方法无法直接应用于水下。

针对水下图像折射带来的畸变问题,国内外学者开展了广泛研究。Shortis等^[5]所采用的方法是通过校准相

收稿日期:2020-01-02 Received Date:2020-01-02

^{*} 基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0302401)、国家自然科学基金(61673252,51575332)项目资助

机的标定参数来补偿光学元件和折射界面的折射现象。Kwon 等^[6]提出的传统相机标定重建方法虽然不能完全消除折射误差,但可以通过对实验条件的控制或图像特性的改变,在一定程度上提高标定精度。Treibitz 等^[7]提出了非单视角特殊相机理论,但是该方法无法建立实际场景中物体三维坐标与二维图像之间的对应关系。徐杰等^[8]假定密封玻璃处于摄像机镜头外焦距处,水下图像可以通过数学关系式转换为摄像机与被摄物体间没有水存在时的图像,但其对相机的相应参数有严格要求。张文明等^[9]提出一种将水下图像转换为空气图像的转换算法,其只适用于单界面的水下环境,局限性较大。以上模型仍未完全消除折射所引起的水下图像非线性畸变。这是由于水下成像经过水、玻璃、空气、透镜,实质上是一个多层折射的过程,即使采用多项式畸变模型也无法完全修正。所以, Agrawal 等^[10]提出了多层平面折射模型,并利用方向矢量完整地复现了光线多层折射的传播过程。在此基础上, Dolereit 等^[11]利用虚拟的摄像机参数来虚拟目标点在水中的位置,一定程度上校正了折射现象。Zhang 等^[12]建立了一种新的水下立体视觉建模与标定方法,但仍未将其应用于水下图像畸变的校正中。

针对上述问题,本文提出了一种单相机在水下多界面环境成像时,一次校正即可重复使用的水下透视投影图像校正方法。该方法基于多层平面折射模型,结合四维光场参数化表示方法,在保留光线信息的基础上,计算得到相应透视投影图像。首先,利用光场方向信息计算出透视投影图像的方向矢量;然后,运用透视投影变换,计算得到方向矢量与图像平面间对应的像点坐标(即本文所求校正像点坐标);最后,利用变换前后对应像点坐标的映射关系,采用双线性插值的方法得到校正后的透视投影图像。校正后图像满足针孔相机成像模型,可快速运用于空气中的图像处理算法,具有较好的延展性。仿真和实验结果验证了这一方法的可靠性和准确性。

1 水下成像模型的建立与图像校正方法

1.1 水下相机成像模型

封装后的水下相机如图1所示,光线的传播经过水、玻璃、空气等多种介质,从而导致针孔相机成像模型^[13]失效,图像会产生非线性畸变,实际的水下相机成像模型如图2所示。由于玻璃的加工精度已到微米级别,因此可以合理地假设图中各折射平面是平行的。本文针对上述情况,基于多层平面折射模型的光场参数化表示方法,对水下相机成像过程进行重新建模,使其符合针孔相机成像模型。

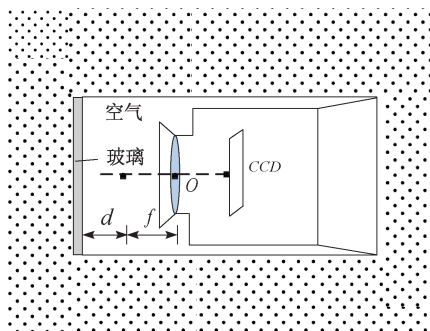


图1 水下封装相机

Fig.1 Underwater encapsulated camera

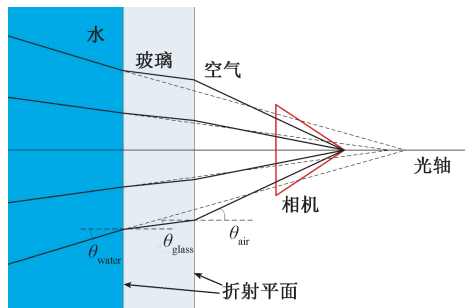


图2 水下相机成像模型

Fig.2 Underwater camera imaging model

1.2 水下多界面成像模型的建立

光是载体,携带了场景的所有信息,场景中所有光线的总和构成光场^[14],光场通常采用双平面四维参数化表示,即 $\mathbf{L} = [u, v, s, t]^T$,如图3所示。

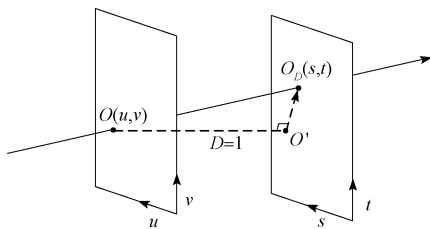


图3 光场的四维参数化表示

Fig.3 The four-dimensional parameterized representation of the light field

图3中任意一条光线可表征为位置信息-点 $O(u, v)$ 和方向信息-向量 $\mathbf{O}'\mathbf{O}_d(s, t)$,两平面间距离定义为 $D = 1$ 。对于场景中某点,也可以采用光线的方向矢量 $\mathbf{a}$ 和该点位置 $\mathbf{q}$ 表示,两种表示方法之间的关系如下:

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

如图4所示,结合光场四维参数化表示方法,在相机畸变校正后定义多层平面折射模型如下:相机坐标系位于相机光心处,其 z 轴与相机光轴平行, n 为多层界面法线(可通过相机水下标定获得),且垂直于分界面;以多层界面法线 n 为 z 轴,法线 n 与相机 z 轴的叉乘为 x 轴,构建多层平面折射坐标系;两坐标系之间转换关系如下:

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

光场的位置平面(uv)定义在多层平面折射坐标系 XY 平面,且与其坐标原点重合;方向平面(st)距离位置平面一个单位长度,且与位置平面平行。图4中 d 为相机光心到分界面距离; d_i 为各界面间距离; μ_i 为各层介质折射率。

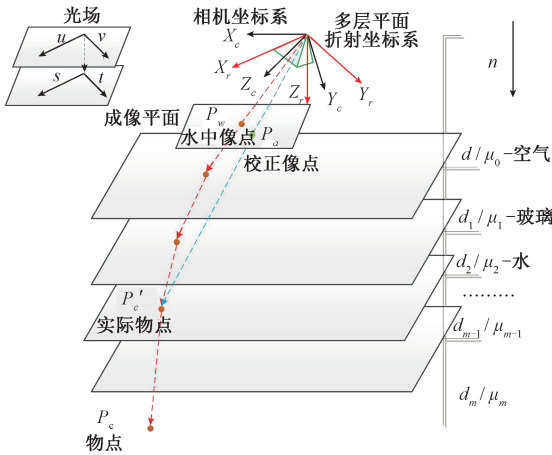


图4 多层平面折射模型

Fig.4 Multi-layer plane refraction model

基于多层平面折射模型的水下相机成像过程如下:物点 P_c 所对应的光线经过 m 层介质折射,反向传播到相机光心,并与成像平面交于点 P_w (即水中像点),同时直射光线与成像平面交于点 P_a (即校正像点)。而在实际的水下成像系统中,仅包含水、玻璃、空气3层介质。由于玻璃厚度 d_1 远小于光线在水中的传播距离 d_2 ,光线在此传播过程中只会发生微小的径向偏移且不改变方向^[15],故在实际的计算中,一般忽略玻璃层。实际物点 P'_c 位于 μ_2 层,求取像点 P_w 与 P_a 间的映射关系,即水下相机透视投影图像校正的一般过程。

1.3 水下透视投影图像的校正

当相机内部参数及封装位置未发生变化时,水下图像与校正后透视投影图像间映射关系求取一次后,便可重复使用。当界面层数发生变化时,只需多次校正折射光线,即可保证方法的准确性。对应透视投影图像求取

过程如下:

1) 根据相机小孔成像模型,可建立相机坐标系下物点 $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$ 与成像点 $P_w = [x_w, y_w]^T$ 的关系,且任意像点 P_w 可决定一根通过光心和像素的光线。

遍历原图像上所有像点 $P_w = [x_w, y_w]^T$ 并计算其对应的光线 I_c ,后将其转换至多层平面折射坐标系下 I_r ,并以光场的四维参数化形式 L 表示(其中 K 为相机内参矩阵):

$$\begin{aligned} P_w &\simeq KP_c \\ I_c &= \frac{K^{-1}P_w}{\|K^{-1}P_w\|} \\ I_r &= {}^rR_c I_c = {}^cR_r^{-1} I_c \\ L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_r^T \\ \frac{1}{I_r(3)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_r(3)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

2) 校正折射现象。

利用文献[12]中的光场折射表达式 $R(s, t, \mu, \mu')$ 将光线校正回直射状态 $L_r = R_2 \times R_1 \times L$,当忽略玻璃层时光线只经过一次折射,即 $L_r = R_1 \times L$;再根据式(1)将光场 L_r 转换成方向矢量 $a_r = [s \quad t \quad 1]^T$,则相机坐标系下方向矢量为 $a_c = {}^cR_r \times a_r$ 。

$$L_r = R(s, t, \mu, \mu') \otimes L$$

$$a_r = [S_{L_r} \quad t_{L_r} \quad 1]^T \quad (4)$$

$$a_c = {}^cR_r \times a_r$$

3) 计算相机坐标系下对应像点 $P_a = [x_a, y_a]^T$ 。

此时相机的像素坐标无镜头畸变,只需将光线进行透视投影即可得到校正后像素坐标 P_a 。

$$P_a \simeq Ka_c \quad (5)$$

4) 双线性插值算法^[16]求取像点 P_a 的像素值。

利用像点 P_a 与 P_w 之间的映射关系求取校正图像对应像点的像素值,又像点 P_a 多为浮点数坐标,而图像的像点坐标都以整数形式保存,故本文采用双线性插值的方法求取对应坐标的像素值,最后得到校正后的透视投影图像。

5) 输出所有像点 P_a 与 P_w 间的映射关系至表mapX, mapY保存,水下相机校正完成。

2 水下多物距仿真与结果分析

2.1 仿真流程

为验证方法的可靠性,本文利用相机在空气及水下的标定参数(相机内参矩阵 K 、多层平面折射参数(d, n ,

μ)) 建立模型, 对多组物距(1~4 m)不同的三维点进行仿真, 仿真流程如图 5 所示。首先利用透视投影原理及内参矩阵 K 计算出自定义三维点在空气下的像素坐标 uv_air , 作为参照标准; 之后根据多层平面折射理论反向推导出三维点在水下的像素坐标 uv_water , 作为待校正的像点; 最后, 运用图像校正方法计算出透视投影图像下对应像点 $uv_correct$ 。根据两者之间坐标的误差关系分析仿真结果。

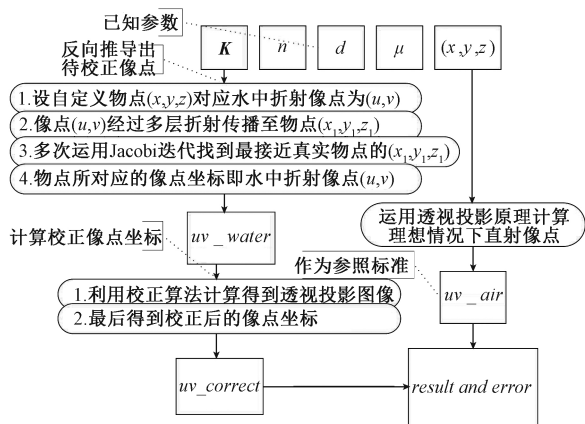


图5 仿真流程

Fig.5 Simulation process

2.2 仿真结果分析与优化

仿真结果如图 6、7 所示,由于透镜成像的特殊性,水下图像的边缘像点坐标偏移较大。通过基于多层平面折射模型的水下透视投影图像校正方法能够修复水下图像的像点偏移问题,还原图像真实性。然而,如图 7(b)~(d)所示,随着水下物距的减小,单个物点在图像上占据像素点增加,水下图像的非线性畸变显著增大,图像枕形失真严重,这种由镜头畸变产生的误差使得校正后像点坐标仍存在较大偏差。针对近距离成像点误差较大的问题,本文采用修正系数的方法来对透视投影图像进行校正。

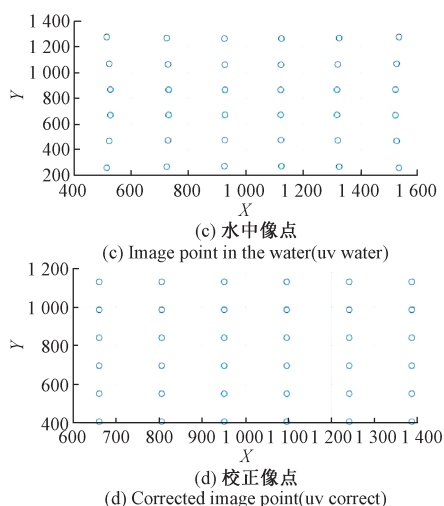
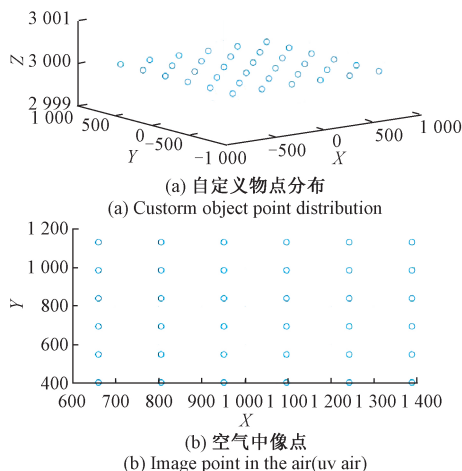


图 6 物距 3 m 处的仿真结果

Fig.6 Simulation results at an object distance of 3 meters

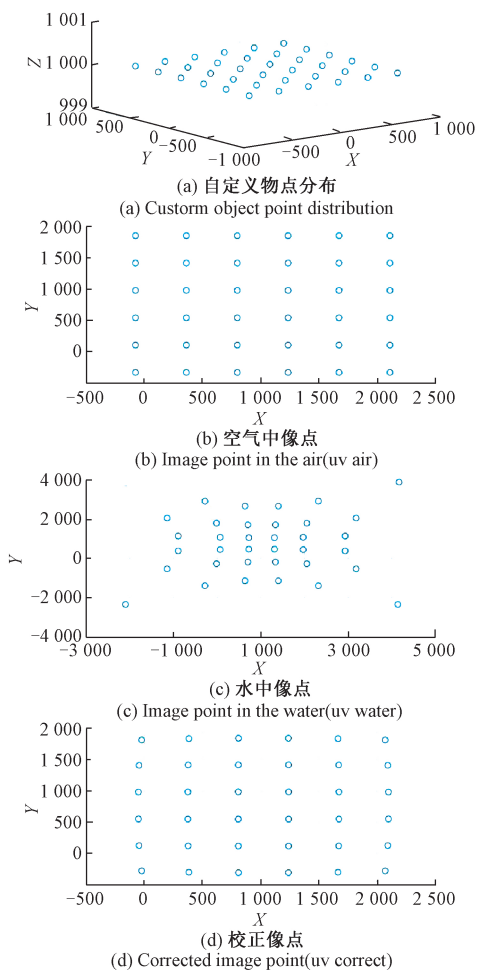


图 7 物距 1 m 处的仿真结果

Fig.7 Simulation results at an object distance of 1 meters

考虑到在实际的水下成像系统中,相机封装后相对位置保持不变,所以 d, n 是不变的(相机内参矩阵 K 与折射率 μ 同样保持不变),故本文只针对水下物距 z 进行优化。

分析实验数据,可以发现随着水下物距 z 的降低,校正后像点的误差逐渐增大,同时每组数据中 36 个自定义物点所对应的 β 值为固定值。

$$\beta = \frac{\sqrt{(uv_air_x - uv_correct_x)^2 + (uv_air_y - uv_correct_y)^2}}{\sqrt{(uv_water_x - uv_correct_x)^2 + (uv_water_y - uv_correct_y)^2}} \quad (6)$$

式中: β 为空气中像点与校正像点间距离同水中像点与校正像点间距离的比值。

仿真结果表明,采用 $(N + 0.5)$ m 处的 β 值作为修正系数来校正 N m 处透视投影图像的像点坐标,能够显著地减小图像的平均误差和最大误差。如表 1 和图 8、9 所示,修正前后像点误差明显下降,物距 1.5~2 m 的近距离成像点,经过修正后像点坐标最大误差在 6 pixel 以内,物距 2 m 以上的最大误差在 2 pixel 以内,平均误差在 1 pixel 以内。

表 1 像点修正系数

物距/mm	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
β 值	0.015 2	0.011 4	0.009 1	0.007 6	0.006 5	0.005 7
修正系数	0.011 4	0.009 1	0.007 6	0.006 5	0.005 7	0.005 0

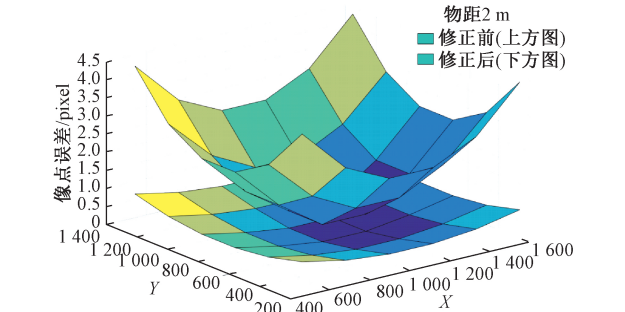


图 8 修正前后像点误差

Fig.8 Correct the front and back image point error

3 实验过程与结果分析

实验采用实验室研制的双目立体成像系统作为实验平台,并应用在该系统中。通过水下双目立体匹配的方式,计算出水下图像中参照物角点在空气中的实际三维坐标,同校正后的透视投影图像进行对比,从而验证方法的准确性。

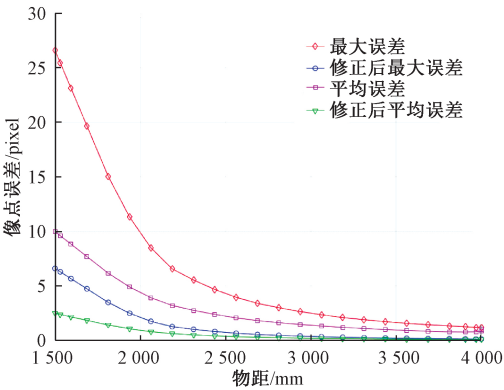


图 9 修正前后像点坐标误差变化

Fig.9 Image coordinate error change before and after correction

仿真结果表明,当水下物距大于 2 m 时,校正图像的平均误差在 1 pixel 以内,且物距越大,镜头畸变对实验的准确性影响越小。综合考虑相机的景深范围,实验的拍摄距离取 2 m。

3.1 实验设备

如图 10 所示,实验中所使用设备有水下双目立体视觉相机、标定板以及背光板。其中相机型号为 PointGrey-GS3-U3-32S4M,并配有 Kowa-LM5JC10 M 镜头,焦距为 5 mm,分辨率为 2 048×1 536。标定板规格为 12×8,单格尺寸 35 mm×35 mm,共有 96 个内角点。双目相机基线距离为 1.2 m。根据文献[17]中理想情况下双目测量精度计算公式,可以求得物距为 2 m,像素匹配精度为 0.2 pixel 时,双目测量精度为 0.51 pixel。

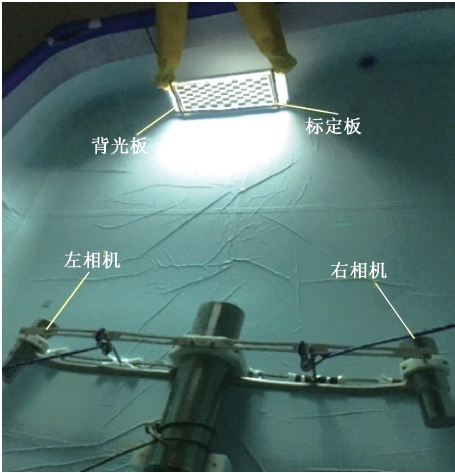


图 10 实验环境

Fig.10 Experimental environment

3.2 实验过程

首先,运用改进后的张正友迭代标定法在空气下分别对两相机进行单目标定和双目立体标定,得到左右相机的内、外参矩阵及相对位置关系。根据文献[18]提出的水下标定算法对相机进行水下标定,得到多层平面折射参数 (d,n,μ) 。具体参数如表 2 所示,其中 f_x,f_y 为相机焦距参数; u_0,v_0 为相机的主点坐标; k 和 p 分别为相机径向和切向畸变系数; lR_r 和 lt_r 为左右相机相对位置的转换矩阵。

表 2 左右相机的标定参数

参数	标定参数值	
	左相机	右相机
f_x,f_y	1 455.408,1 455.333	1 455.498,1 455.344
u_0,v_0	1 011.627,781.371	1 034.858,796.956
k_1,k_2,k_3	0.014,0.006,0.000	0.014,0.011,0.001
p_1,p_2	-0.002,-0.022	-0.002,-0.028
d	17.159	20.977
n	(0.002 1,-0.026 2,0.999 3)(0.007 4,-0.0245,0.999 3)	
μ	1.333	
lR_r	(-0.048,0.436,-0.035)	
lt_r	(-1 151.265,14.489,248.506)	

然后,如图 11 所示,根据左右相机同时拍摄的图像,利用混合积^[19]进行快速水下双目立体匹配,提取左右图像的对应像点(本文所采用参照为标定板上 96 个内角点),计算出对应像点在相机坐标系下的三维坐标;之后利用透视投影变换将三维点转换至相机像素坐标系下,并以此作为实验误差的比对标准。

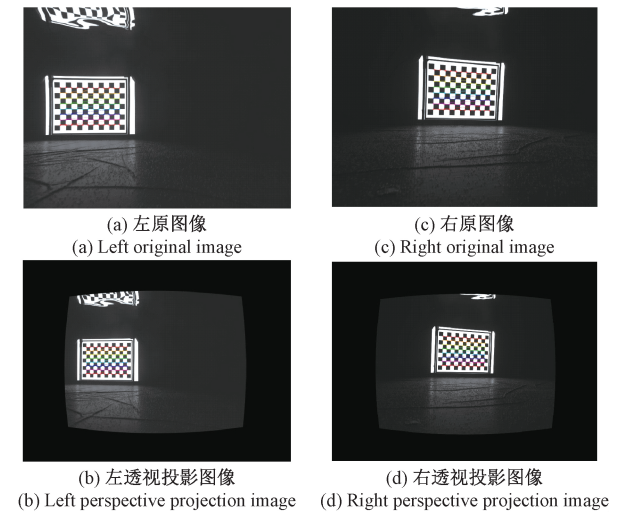


图 11 原图像和透视投影图像

Fig.11 Original images and perspective projection images

最后,利用图像校正方法将左右原图像校正为透视投影图像,并提取图像中的 96 个内角点坐标,同先前所得比对标准进行比较,分析方法的准确性。

3.3 实验结果

实验共计拍摄 22 组照片,第 1 组数据的角点信息如图 12 所示,透视投影图像的像点坐标与参照图像之间最大误差为 0.76 pixel。如图 13 所示,22 组透视投影图像的平均误差为 0.56 pixel。

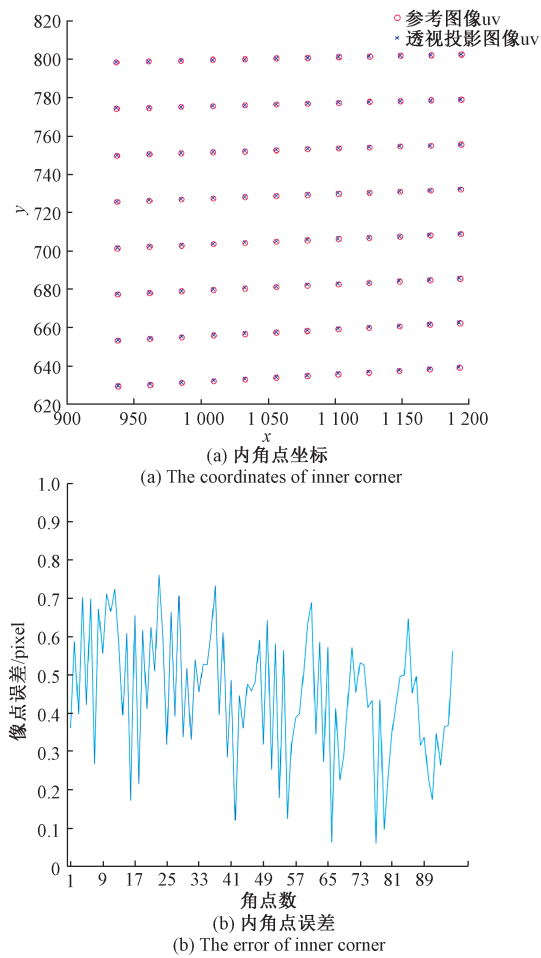


图 12 内角点像素坐标及误差(第 1 组实验)
Fig.12 Inner corner pixel coordinates and errors
(The experiment 1)

为了进一步验证方法的准确性,根据左右相机的内外参矩阵对透视投影图像进行立体校正,可得校正后图像的行匹配情况,如图 14、15 所示,最大行匹配误差为 0.4 pixel。校正前后的图像如图 16 所示,可以很清晰地看出校正前后图像的差异,校正后图像边缘的枕形失真明显消失,也进一步验证了方法的准确性。

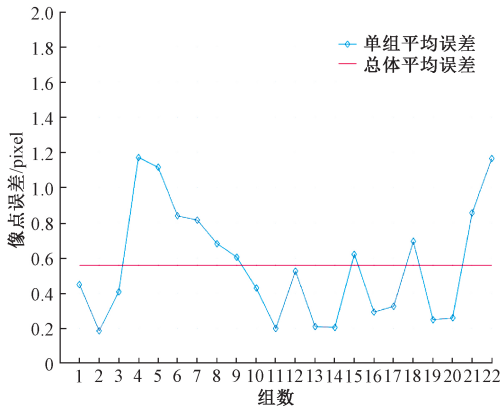


图 13 22 组实验数据平均误差

Fig.13 Average error of 22 sets of experimental data

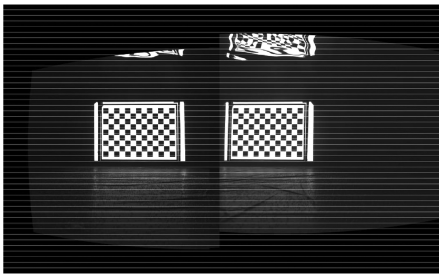


图 14 立体校正后的左右透视投影图像

Fig.14 Left-right perspective projection image after stereo correction

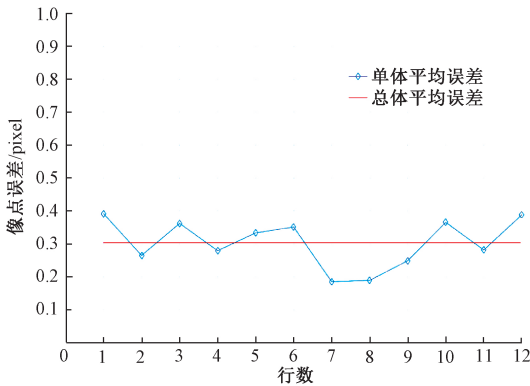


图 15 行匹配误差

Fig.15 Row matching error

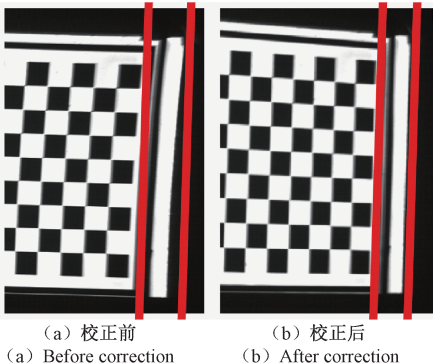


图 16 校正前后图像

Fig.16 Images before and after correction

4 结 论

本文将光场模型与多层平面折射模型相结合,提出一种新的水下透视投影图像校正方法。该方法能满足水下多界面变化的环境,相机经过一次校正即可重复使用,实用性和延展性较好。仿真和实验结果证明了该方法的可靠性和准确性,高精度的透视投影图像校正为水下双目视觉左右相机之间的像素匹配提供了保障。本文进一步研究工作是将校正方法与水下双目立体视觉技术相结合,并运用于实际的水下三维重建工作中,助力于我国海洋探索开发。

参考文献

- [1] GALCERAN E, CAMPOS R, RIBAS D, et al. Coverage path planning with real-time replanning and surface reconstruction for inspection of three-dimensional underwater structures using autonomous underwater vehicles [J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(7): 952-983.
- [2] SONG Z, BIAN H, ZIELINSKI A. Application of acoustic image processing in underwater terrain aided navigation[J]. Ocean Engineering, 2016, 121:279-290.
- [3] 李峥, 李宇, 黄勇, 等. 水下目标自主连续跟踪与定位算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 520-528.
LI ZH, LI Y, HUANG Y, et al. Study of automatic continuous tracking and location algorithm for underwater target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 520-528.
- [4] 马仙仙, 赵维谦, 李少白, 等. 激光聚变靶丸球度测量与评定 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2675-2681.
MA X X, ZHAO W Q, LI SH B, et al. Sphericity measurement and evaluation for laser fusion target [J]. Chinese Journal of Instrument, 2017, 38(11): 2675-2681.
- [5] SHORTIS M R, ROBSON S, HARVEY E S. The design, calibration and stability of an underwater stereo-video system[C]. Video sensing of the size and abundance of target and non-target fauna in Australian fisheries-a national workshop, 2001: 174.
- [6] 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.
- [7] TREIBITZ T, SCHECHNER Y, KUNZ C, et al. Flat refractive geometry [J]. IEEE transactions on pattern

- analysis and machine intelligence, 2011, 34(1): 51-65.
- [8] 徐杰,王宗义,刘涛.水下图像的校正[J]. 黑龙江科技大学学报, 2008, 18(2): 133-136.
XU J, WANG Z Y, LIU T. Correction of underwater images[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2008, 18(2): 133-136.
- [9] 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): 158-162.
ZHANG W M, DENG Q X, ZHANG Q, et al. Non-parallel system underwater image transformation model[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 158-162.
- [10] 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, 2012: 3346-3353.
- [11] DOLEREIT T, KUIJPER A. Converting underwater imaging into imaging in air [C]. 2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), 2014, 1: 96-103.
- [12] 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.
- [13] 吴迪,黄文骞,王莹.图形变换中透视投影变换矩阵的推导[J].海洋测绘, 2003(1): 18-21.
WU D, HUANG W Q, WANG Y. Derivation of perspective projection transformation matrix in graphic transformation [J]. Ocean Surveying and Mapping, 2003(1): 18-21.
- [14] 冯曼,胡国星.光场成像原理及其历史进程[J].中国科技信息, 2017(23): 47-48.
FENG M, HU G X. Principle of optical field imaging and its historical process[J]. China science and technology information, 2017(23): 47-48.
- [15] SMART M, WASLANDER S L. Underwater stereo SLAM with refraction correction [C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2013: 14002117. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696833.
- [16] 陈良,高成敏.快速离散化双线性插值算法[J].计算机工程与设计, 2007(15): 249-252.
CHEN L, GAO CH M. Fast Discrete bilinear interpolation algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2007(15): 249-252.
- [17] LUHMANN T, ROBSON S, KYLE S, et al. Close-range photogrammetry and 3D imaging[M]. Berlin: Walter de Gruyter, 2013.
- [18] 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.
- [19] LI J B, ZHANG X, ZHANG C, et al. Laser stripe matching based on multi-layer refraction model in underwater laser scanning system [C]. International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, Springer, 2018: 286-295.

作者简介



屠大维 (通信作者), 1987、1989、1993年于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、机器视觉及伺服控制等。

E-mail: tdw@shu.edu.cn

Tu Dawei (Corresponding author) received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Zhejiang University in 1987, 1989 and 1993, respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor at the School of Mechanical Engineering and Automation of Shanghai University. His main research interests include photoelectric detection, precision machinery and instruments., machine vision and servo control.



姚钦舟, 2018年于常州大学获得学士学位, 现为上海大学硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉和图像处理。

E-mail: zichuan365@shu.edu.cn

Yao Qinzhou received his B.Sc. degree from Changzhou University in 2018. He is currently a M.Sc. candidate at Shanghai University. His main research interests include machine vision and image processing.