

doi:10.3788/gzxb20154402.0211002

基于非平行系统的水下图像转化模型

张文明^{a,b}, 邓茜雪^a, 张强^a, 李海滨^{a,b}

(燕山大学 a. 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室;

b. 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对水下三维重建成像时图像失真的问题,提出一种基于非平行双目视觉系统的转化条件和转化模型,将摄像机透过平面防水罩拍摄的水下图像转化为摄像机与目标间无水存在的一般空气图像.当摄像机焦点在水与空气分界面处时,水下图像和空气图像像素间存在一一对应关系,当摄像机焦点位于水面外时,该模型在物距远大于焦距及焦点沿 z 轴方向与折射面距离的情况下仍成立.实验利用特征点三维坐标重建验证模型的正确性,结果显示,利用本文方法重建的三维坐标和实际三维坐标相比, x 、 y 、 z 轴方向的重建误差平均值分别为 2.23%, 1.51%, 1.10%,表明该模型转化后的图像可采用空气中的图像处理方法,为空气中的三维重建方法应用于水下的探索提供理论依据.

关键词: 机器视觉; 三维重建; 双目立体视觉; 海洋光学; 水下成像系统

中图分类号: **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0211002-5

Non-Parallel System Underwater Image Transformation Model

ZHANG Wen-ming^{a,b}, DENG Xi-xue^a, ZHANG Qiang^a, LI Hai-bin^{a,b}

(a. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Institute of Electrical Engineering;

b. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the problem of image distortion of the three-dimensional reconstruction underwater, a model based on the non-parallel binocular stereo vision system was proposed, which could transfer the image shot through a plat waterproof cover underwater into the image shot in air, and general conditions were presented to use it. When the focus of lens is on the surface of the water, there is a one-to-one correspondence between the underwater image and the image-without-water. If the focus of lens is outside the water, the proposed model still valid when the distance from the focus to the object is far greater than the focal length and the distance from the focus of lens to refractive surface along z axis. Three-dimensional reconstruction of the feature points was used in experiments to verify the validity of the model. The results show that with the mentioned method, the average coordinate errors of the feature points are 2.23% (x), 1.51% (y), 1.10% (z), respectively, compared with the actual one. The proposed model provides a basis of applying the three-dimensional image reconstruction.

Key words: Machine vision; Three-dimensional reconstruction; Binocular stereo vision; Oceanic optics; Underwater imaging system

OCIS Codes: 110.3055; 150.0155; 150.6910; 330.1400

0 引言

水下探测技术作为海洋工程技术研究的热点,可广泛应用于海底导航、海底勘查、海洋环境监测以及水

下目标识别等领域^[1].目前广泛应用的水下探测技术主要分为声学探测和视觉探测两种^[2].其中视觉探测技术具有声学探测技术无法达到的高准确度、高速度等优点^[3],具有广阔的应用前景.

基金项目:河北省自然科学基金(Nos. D2013203363, D2014203153)资助

第一作者:张文明(1979-),男,讲师,博士,主要研究方向为计算机视觉. Email: zwmwen@ysu.edu.cn

通讯作者:李海滨(1978-),男,教授,博士,主要研究方向为计算机视觉、智能控制. Email: hbli@ysu.edu.cn

收稿日期:2014-07-16; **录用日期:**2014-10-27

<http://www.photon.ac.cn>

水下视觉系统工作时,摄像机一般加装保护罩,此时被测物体位于水中,摄像机在空气中进行拍摄.光线经过水、防水罩、空气三种介质进入相机镜头,发生折射,造成空气中的成像模型不能应用于水下环境,空气中图像处理不能应用于水下图像的问题.针对这一情况,Kwon等^[4]提出采用径向失真补偿以抵消折射影响;Swaminathan等^[5]介绍了基于几何图像系统的失真分类,得到一个焦散失真量化指标;J. Queiroz-Neto等^[6]提出忽略折射对成像的影响;Chang和Chen^[7]利用多目相机获取单一折射平面的场景,用一个与深度有关的模型表示折射失真,但附加条件过多;Treibitz等^[8]分析了折射失真并利用模拟的方式近似展示了SVP的折射误差;Lu J等^[9]提出一种利用单目摄像机拍摄识别圆形目标的三维方向和位置,通过补偿抵消折射影响的水下定位,但该方法只能识别圆形特征;Y. J. Gedge等^[10]提出利用像素的对极曲线,得到一个匹配代价量,来补偿折射影响.这些方法都是专门针对水下视觉系统,没有充分利用已有的空气中图像处理 and 计算机视觉技术^[11-12],适用范围局限,改进难度大.王宗义^[13]提出的在平行双目视觉系统下水下图像向一般空气图像转化的模型,该方法对系统样式有较强的要求,应用范围较窄.

本文提出一种在非平行水下双目视觉系统下,仅通过一幅图像将水下图像转化为摄像机与目标间无水存在的一般空气图像的模型,即寻求水下图像与一般空气图像一一对应的比例关系.转化后的图像可用空气中图像处理方法处理,具有良好的可扩展性.与平行系统转化模型相比,本文算法更具一般性.

1 非平行水下双目视觉模型

采用非平行水下双目视觉模型,将被测物体置于水槽内,摄像机在水槽外拍摄.水槽玻璃板的厚度远远小于物距,只能引起光线的微小径向偏移并且不改变光线的方向^[14],因此在推导过程中不考虑玻璃板的厚

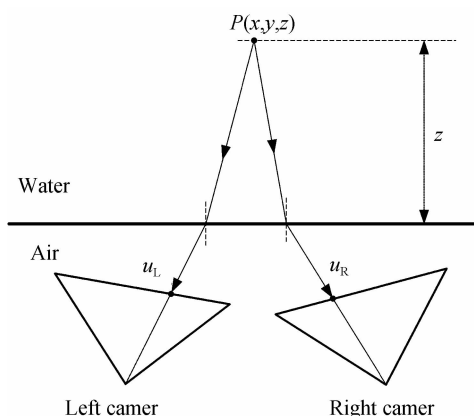


图1 水下双目视觉模型

Fig. 1 Underwater binocular vision model

度,认为光线只是在水与空气的分界面发生折射.本文研究只考虑物体成像时光线发生折射对成像的影响,并不考虑水的波动、光线反射、光照不足等因素,因而实验都是在水面静止、光照充足的环境下进行的.

2 水下图像向一般图像的转化

水下图像向一般空气图像转化,是指仅通过一幅水下图像,得到与其对应的摄像机与目标间无水存在时的空气中的图像.转化后图像的后续处理,可利用现有空气中的方法.

2.1 摄像机焦点在水与空气分界面处

摄像机焦点在水与空气分界面处的物点与像点位置关系如图2,可得

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} = f \tan(\alpha - \beta) \\ r_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} = f \tan(\theta - \beta) \\ n_\theta \sin \theta = n_a \sin \alpha \\ \sin \beta = \frac{n_\pi \vec{AP}}{|n_\pi| |\vec{AP}_i|} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为摄像机焦距, r_c 是物点距摄像机坐标系 z 轴的距离, α 、 θ 分别为成像法线与空气和水中光线的夹角, β 是透镜与折射平面的夹角, n_a 、 n_θ 分别为空气和水的折射率, n_π 为折射面的法向量, P_i 为水下成像点, r_i 是 P_i 到 z 轴的距离, P_a 为无水时空气中的成像点, r_a 是 P_a 到 z 轴的距离, n_π 、 P_i 、 P_a 、 P_c 均采用摄像机坐标系坐标.

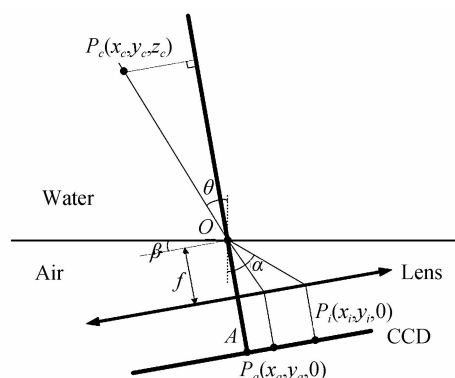


图2 摄像机焦点在水与空气分界面处

Fig. 2 Focus is on the surface of the water

转化的实质是仅通过一幅水下的图像得到与之对应的一般空气图像,即只用摄像机自身参量和水下成像点 P_i ,表示出空气中成像点 P_a .根据式(1)得 r_i 与 r_a 的关系为

$$r_a = f \cdot \tan \left(\arcsin \left(\frac{n_a}{n_\theta} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{r_i}{f} \right) + \beta \right) \right) - \beta \right) \quad (2)$$

式中

$$\beta = \arcsin \frac{n_\pi \cdot \vec{AP}_i}{|n_\pi| \cdot |\vec{AP}_i|} \quad (3)$$

2.2 摄像机焦点在水面外

摄像机焦点在水面外时物点与像点位置关系如图3,其中 δ 为焦点沿摄像机坐标系 z 轴到空气与水交界面的距离, $P_c-B-O-P_i$ 是有水存在时的光线路径,

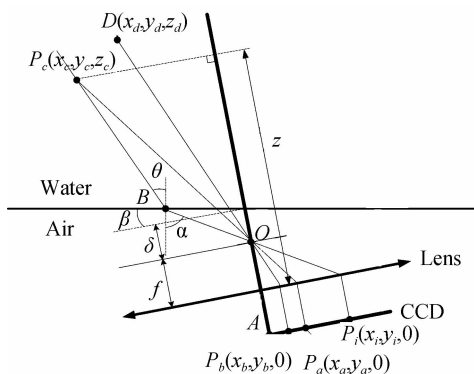


图3 摄像机焦点在水面外物点与像点位置关系

Fig. 3 Focus is outside the water

P_c-O-P_a 是对应的无水存在时的光线路径,当假设 P_c 点位于 \vec{BP}_c 射线上无穷远点处时,光线路径为 $D-O-P_b$, P_i 是在无水情况下 B 点的成像点, P_b 点是 \vec{BP}_c 射线上无穷远点的成像点, P_iP_b 是 \vec{BP}_c 射线在成像面上的成像线段.当 P_c 在射线 AB 上变化时, P_a 在线段 P_iP_b 上变化, r_a 与 r_b 的比例关系为

$$\frac{r_a}{r_b} = \frac{(z-f-\delta)\tan(\theta-\beta) + \delta\tan(\theta-\beta)}{(z-f)\tan(\theta-\beta)} = 1 + \frac{\delta}{z-f} \left(\frac{\tan(\theta-\beta)}{\tan(\theta-\beta)} - 1 \right) \quad (4)$$

当 $z \gg f, z \gg \delta$ 时, $r_a/r_b \approx 1$.一般情况下 $z \gg f, z \gg \delta$ 成立,因此 $r_a \approx r_b$.

x_b 的推导与式(2)相似,容易得到

$$r_a \approx r_b = f \cdot \tan \left(\arcsin \left(\frac{n_a}{n_\theta} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{r_i}{f} \right) + \beta \right) \right) - \beta \right) \quad (5)$$

可知,无论在摄像机焦点在水与空气分界面处还是摄像机焦点在水面外,式(2)均可用于计算水下图像向一般空气图像的转化.

2.3 摄像机焦点在水面内

摄像机焦点在水面内物点与像点位置关系如图4.由几何关系,得

$$\begin{cases} r_a = f \cdot \tan(\theta - \beta) \\ r_i = (f - \delta) \cdot \tan(\alpha - \beta) + \delta \cdot \tan(\theta - \beta) \end{cases} \quad (6)$$

即

$$r_i = \frac{\delta}{f} \cdot r_a + (f - \delta) \cdot \tan \left(\arcsin \left(\frac{n_a}{n_\theta} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{r_a}{f} \right) + \beta \right) \right) - \beta \right) \quad (7)$$

由式(7)可知,当摄像机焦点在水面内时,可以求得 r_a, r_i 的准确比例关系,但这种情况很少见,一般不

做考虑.

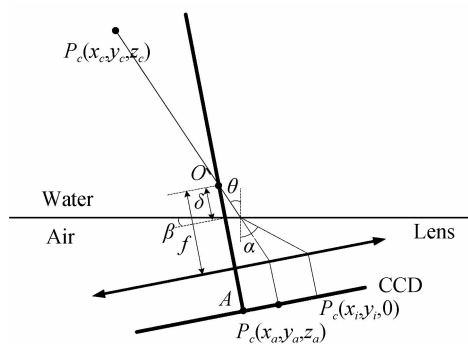


图4 摄像机焦点在水面内物点与像点位置关系

Fig. 4 Focus is inside the water

3 实验

3.1 实验设备

实验所采用的拍摄平台如图5,包含两台维视公司的MV-1300FC工业数字相机,MV-1394图像采集卡,双目视觉支架台,Pentium 4处理器的计算机,具有透明平板玻璃罩的水槽^[15].实验采用非平行双目视觉模型,如图1.

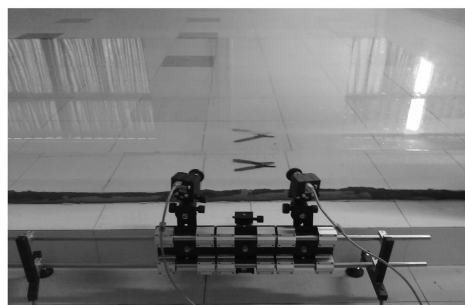


图5 实验室拍摄平台

Fig. 5 Laboratory shooting platform

3.2 实验及实验数据

实验首先采用张正友标定方法对两摄像机内、外参量进行标定,再用粒子群算法对标定结果进行优化^[16],得到标定参量结果(如表1).其中, (f_x, f_y) 是摄像机焦距像素坐标, (u_0, v_0) 为摄像机主点像素坐标, k_c 是摄像机畸变系数, n_x 是折射面法向量, d 为光心到折射面的距离.

表1 标定参量

	Left Camera	Right Camera
(f_x, f_y)	(983.599 2, 981.589 3)	(974.142 7, 969.403 6)
(u_0, v_0)	(654.986 6, 581.409 8)	(689.288 2, 537.865 6)
k_c	(-0.163 4, 0.332 5, 0.001 4, 0.000 10, 0)	(-0.139 3, 0.194 5, 0.001 6, 0.000 11, 0)
n_x	(0.056 2, -0.085 9, 0.970 4)	(0.174 7, 0.051 9, 0.960 3)
d/mm	121.094	109.068

由式(2)易得,当输入坐标为整数时,输出坐标多为非整数,反之亦然^[17].而图像的像素点都是以整数坐标保存,所以算法实现时时需要进行插值运算.插值运算分为前向插值和后向插值两种,如图5.本文采用后向插值,即先求出投影图像像素的整数坐标对应于原图像的非整数坐标的值,再根据双线性插值算法计算该坐标的灰度,最后再将灰度值投影到投影图像的整数坐标.

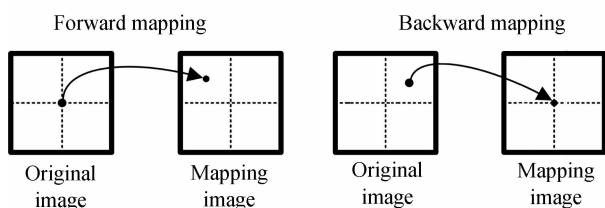


图6 映射示意图
Fig. 6 Mapping

3.3 实验结果

图7为水下图像和与之对应的一般空气图像.因为空气中的成像视场角与水中相比较大,与水下图像相比,转化的一般空气图像较小.同时水下图像由于折射影响存在枕形失真,当转化为一般空气图像时,失真被校正,图像边缘向外弯曲.

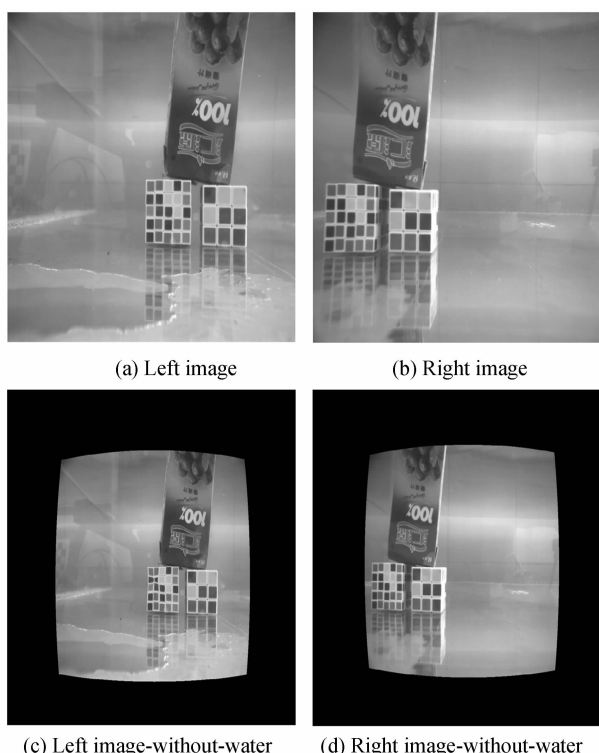


图7 水下图像与其对应的空气中的图像
Fig. 7 Underwater image and corresponding image-without-water

利用特征点的三维重建准确度来验证算法的可行性与准确性(如图8).首先应用 Sift 算法^[18]匹配水下图像得到匹配的特征点对,直接采取水下三维重建法

求出特征点的三维坐标,将其视为实际坐标.其次利用本文模型,求出这些特征点对应的一般空气图像的位置,利用空气中三维重建方法,求出目标点三维坐标.将特征点实际的三维坐标和利用本文方法求得的坐标做对比,分析算法准确性.

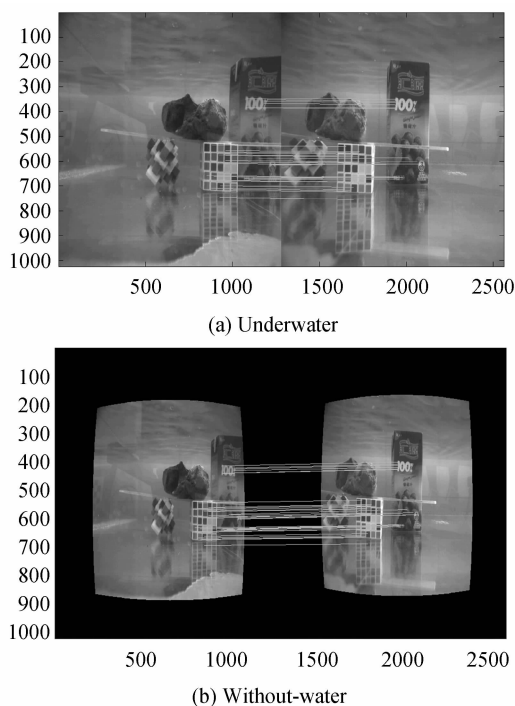


图8 匹配的特征点对
Fig. 8 Corresponding feature points

3.4 实验结果分析

由表2、表3实验结果可知,针对图7中的水下图像特征点,利用本文方法重建得到的三维坐标和实际三维坐标相比, x 、 y 、 z 方向的重建误差分别为3.03%,0.34%,1.54%.图8中 x 、 y 、 z 方向的重建误差分别为1.43%,2.67%,0.66%.在误差允许范围内,算法的重建坐标可视为实际坐标.同时特征点三维重建的结

表2 图7特征点三维坐标(50对匹配点)
Table 2 3D Coordinates of the Corresponding points(50 couples)

Axis	Actual average value/mm	Error variance/mm ²	Average error
x	-87.1751	1.232 6	3.03%
y	-54.766 1	0.347 7	0.34%
z	400.525 6	10.636 3	1.54%

表3 图8特征点三维坐标(37对匹配点)
Table 3 3D Coordinates of the Corresponding points(37 couples)

Axis	Actual average value/mm	Error variance/mm ²	Average error
x	-17.879 8	4.798 0	1.43%
y	8.730 3	1.732 3	2.67%
z	452.364 3	20.471 5	0.66%

果表明模型正确可行。

4 结论

本文在非平行系统下,对水下成像产生畸变的问题进行研究,提出了一种将水下图像转化为一般空气图像的模型,并通过特征点的三维重构验证空气中三维重建方法应用于水下图像的正确性与可行性。实验结果表明,先通过本文模型转化,再利用空气中重构方法获得的特征点三维坐标,可用来代替特征点的实际三维坐标。为空气中的三维重建方法应用于水下的探索提供理论依据,具有一定的实践意义。

参考文献

- [1] 张伟. 基于双目立体视觉的水下三维定位研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [2] 李绪勇. 水下摄像机的建模与标定技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [3] HUANG Chuan-bo, JIN Zhong. A method of color image retrieval based on visual attention model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1025-1030.
黄传波, 金忠. 基于视觉注意的彩色图像检索方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1025-1030.
- [4] KWON Y H, LINDLEY S. Applicability of the localized-calibration methods in underwater motion analysis[C]. XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. 2000: 48 - 55.
- [5] SWANINATHAN R, GROSSBERG M D, NAYAR S K. A perspective on distortions[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2003, 594-601.
- [6] QUEIROZ-NETO J P, CARCERONI R, BARROS W, et al. Underwater stereo [C]. Computer Graphics and Image Processing, 2004. Proceedings. 17th Brazilian Symposium on. IEEE, 2004: 170-177.
- [7] CHANG Y J, CHEN T. Multi-view 3D reconstruction for scenes under the refractive plane with known vertical direction [C]. Computer Vision, 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 351-358.
- [8] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y, KUNZ C, et al. Flat refractive geometry [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(1): 51-65.
- [9] LU J, XIA M, LI W, et al. 3-D location estimation of underwater circular features by monocular vision[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(23): 6444-6449.
- [10] GEDGE J, GONG M, YANG Y H. Refractive epipolar geometry for underwater stereo matching[C]. Computer and Robot Vision, 2011 Canadian Conference on. IEEE, 2011: 146-152.
- [11] LIU Hao-ran, ZHANG Wen-ming, LIU Bin. Three dimensional measurement based on the binocular vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1830-1834.
刘浩然, 张文明, 刘彬. 基于双目立体视觉实现物体三维测量的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1830-1834.
- [12] LIU Ning, LU Rong-sheng, XIA Rui-xue, et al. A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 178-184.
刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 178-184.
- [13] WANG Zong-yi. Vision sensor with structured light and underwater 3D measurement [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 96-106.
王宗义. 线结构光视觉传感器与水下三维探测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 96-106.
- [14] SERVOS J, SMART M, WASLANDER S L. Underwater stereo SLAM with refraction correction [C]. Intelligent Robots and Systems, 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013: 3350-3355.
- [15] ZHANG Wen-ming, WANG Xin, ZHANG Qiang, et al. Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system based on particle swarm optimization calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 171-176.
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): 171-176.
- [16] ZHANG Qiang, WANG Xin, LI Hai-bin. 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.
- [17] 王玲玲. 基于双目立体视觉的水下三维重建[D]. 浙江大学, 2011.
- [18] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.