

非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型

张 强^{1,2} 董 玉² 李海滨^{2*} 李雅倩² 张文明²

¹东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

²燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 针对水下非平行双目成像系统图像匹配时无法进行平行校正, 并且不再满足空气中的极线约束条件这一问题, 推导出一种适用于水下的极线约束模型。根据摄像机和防水罩间相对位置关系的不同, 把水下双目成像方式分为平行成像、共用折射面成像和独立折射面成像三种情况, 并推导了后两种情况的极线约束模型。对摄像机进行标定, 利用尺度不变特征变换(SIFT)进行立体匹配, 推导了参考图上特征点在待匹配图上所对应的曲线, 根据待匹配图上特征点是否在曲线上, 剔除误匹配点, 提高匹配精度。实验结果表明, 利用所推导出的水下曲线约束模型, 可以有效地剔除误匹配点, 降低误匹配率。

关键词 机器视觉; 非平行曲线约束; 尺度不变特征变换; 水下双目成像系统; 折射模型

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0315001

Underwater Curve Constraint Model Based on Non-Parallel Binocular Vision

Zhang Qiang^{1,2} Dong Yu² Li Haibin² Li Yaqian² Zhang Wenming²

¹College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

²Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract In terms of underwater non-parallel binocular image matching not being parallel correction, and no longer satisfying the epipolar constraint in the air, a kind of epipolar constraint model that suitable for underwater is presented. According to the differences of relative position between the camera and waterproof cover, the underwater imaging ways of binocular vision is divided into parallel imaging, common reflection surface imaging and independent reflection surface imaging. And the epipolar constraint model of the last two are deduced. The camera is calibrated. The scale invariant feature transform (SIFT) algorithm can help to match stereo. And corresponding curve of the feature points on reference image is derived. According to whether the corresponding feature is on the curve, the false matching points are eliminated and the matching accuracy are improved. Experimental results show that the underwater curve constraint model can effectively eliminate false matching points, and reduce the error matching rate.

Key words machine vision; non-parallel curve constraint; scale invariant feature transform; underwater binocular imaging system; refractive model

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 120.4820

1 引 言

随着科技的发展, 海洋资源越来越受到重视。近年来, 国内外开展了大量的水下航行、海底考古、海洋资源勘探、生物种类研究等工作^[1-2]。然而海水中暗流的存在、缺氧的环境以及其他不可预知的因素, 增加了

收稿日期: 2015-09-06; 收到修改稿日期: 2015-11-08

基金项目: 河北省自然科学基金(D2015203310, D2014203153)

作者简介: 张 强(1982—), 男, 博士, 实验师, 主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: jhtzq@ysu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: hbli@ysu.edu.cn

探测的危险性和复杂性。立体视觉能够利用相机代替人眼,深入到危险或人所不能到达的环境中,观察海底地形地貌、重现场景三维信息。

然而,精密光学设备在海底的应用存在着许多的困难和障碍。摄像机在水下工作往往需要加装防水罩,光线通过水和空气介质交界处发生折射,从而使光线传播路径发生变化^[3-4]。双目立体视觉以极线约束模型为基础,而水下由于光线的折射作用,使极线发生偏折、弯曲,从而空气中的成像模型不再适用。由于相机防水罩等装置与两相机间相对位置的不同,使折射平面关系发生变化,进一步对水下极线模型的推导造成困难。为了使立体匹配技术能够应用于水下环境,国内外学者展开了广泛的研究。文献[5]将水下图像转化成空气中图像进行处理,文献[6]深入讨论了几种转化模型,但都对折射问题进行了近似,具有一定的局限性。文献[7]利用多目系统,整体还原了从水下相机标定、图像匹配到三维重建的整个过程,处理过程较为复杂。文献[8]和文献[9]分别推导出适合水下环境中的极线约束,并用尺度不变特征变换(SIFT)和归一化互相关匹配算法(NCC)进行了匹配,但仅仅研究了双目平行成像的理想情况,在实际应用环境中作用不大。

针对以上问题,本文推导出非平行双目视觉系统的水下成像约束模型。全面探讨了水下摄像机的几种成像方式;根据光线传播特性,推导出不同情况下水下成像所满足的曲线约束关系;利用推导出的曲线约束,剔除 SIFT 算法产生的误匹配点,以降低误匹配率。

2 基本原理

2.1 水下摄像机折射模型

将光学技术应用于水下环境时,往往需要将摄像机放置于透明罩中,以起到隔水、保护相机的作用。在成像过程中,光线经过水、透明罩、空气三种介质发生折射,由于防水罩厚度相对很小,故可忽略不计,近似认为只在空气与水的交界处发生折射。

水下环境中的双目成像系统共有如图 1 所示的三种成像方式。图 1(a)为两摄像机光轴平行,且均垂直于折射面的理想成像方式;图 1(b)为两摄像机共用同一个折射面的会聚成像方式;图 1(c)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。

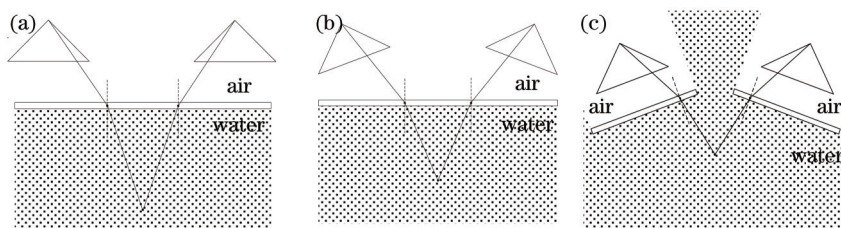


图 1 水下摄像机成像方式。(a) 平行成像; (b) 共用折射面成像; (c) 独立折射面成像

Fig.1 Underwater camera imaging mode. (a) Parallel imaging; (b) common reflection surface imaging; (c) independent reflection surface imaging

空气中的不同成像方式,均可通过图像的平行校正环节,统一到理想的平行成像方式。但在水下环境中,由于折射的存在,使光线传播路径发生了改变,小孔成像模型不再适用,故无法通过简单的校正使图像呈现理想的方式,需根据各自的几何关系,分别推导水下环境中所适用的图像校正及极线约束模型。由于第一种理想成像方式在现实中很难达到,故不做讨论,本文仅推导后两种成像方式的极线约束模型。

2.2 共用折射面成像极线约束模型

极线约束理论是绝大多数立体匹配算法建立的基础。在水下环境中,由于折射的存在,使极线不再为一条直线,而发生弯曲变形,本文称之为曲线约束。共用折射面成像模型如图 2 所示。

假设两摄像机的光心为 O_c 、 O'_c ,两光心间基距为 a ,摄像机焦距为 f ,摄像机与折射面的距离为 h ,两摄像机平面与大地平面间夹角均为 θ ,空气和水的折射率分别为 n_1, n_2 ,以左摄像机光心为坐标原点建立坐标系,作为世界坐标系。

在左图像上任取一点 $P(x_0, y_0, z_0)$,易知左像平面方程为 $\sin\theta x + \cos\theta z = f$,折射平面方程为 $z = h$,直线 $O_c P$ 方程

为 $\frac{x}{x_0} = \frac{y}{y_0} = \frac{z}{z_0}$ 。直线 $O_c P$ 交折射平面于点 Q , 设 Q 点坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 则

$$\begin{cases} x_1 = y_1 = z_1 \\ x_0 = y_0 = z_0 \\ z_1 = h \end{cases} \quad (1)$$

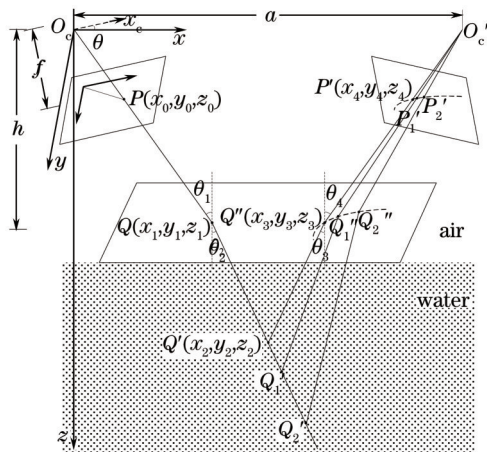


图 2 共用折射面曲线约束推导图

Fig.2 Curve constraint derivation of common reflection surface

光线由空气传播至水中, 入射光线方程为 $\frac{x}{x_1} = \frac{y}{y_1} = \frac{z}{z_1}$, 法线方程为 $\begin{cases} x = x_1 \\ y = y_1 \end{cases}$, 则由入射光线和法线共同决定的平面为 $y_1 x - x_1 y = 0$ 。在折射光线上任取一点 $Q'(x_2, y_2, z_2)$, 设 $z_2 = k (k > h)$ 。根据折射定律及三角变换, 则

$$\begin{cases} y_1 x_2 - x_1 y_2 = 0 \\ n_1^2 - \frac{n_1^2}{1 + \tan^2 \theta_1} = n_2^2 - \frac{n_2^2}{1 + \tan^2 \theta_2} \\ \tan^2 \theta_1 = \frac{x_1^2 + y_1^2}{z_1^2} \\ \tan^2 \theta_2 = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{(z_2 - z_1)^2} \\ z_2 = k \end{cases} \quad (2)$$

光线由水中传播至空气, 设折射点为 $Q'(x_3, y_3, z_3)$, 易知 $z_3 = z_1$, 入射光线方程为 $\frac{x - x_2}{x_3 - x_2} = \frac{y - y_2}{y_3 - y_2} = \frac{z - z_2}{z_3 - z_2}$, 法线方程为 $\begin{cases} x = x_3 \\ y = y_3 \end{cases}$, 则由入射光线和法线共同决定的平面为 $(y_3 - y_2)x - (x_3 - x_2)y + x_3 y_2 - x_2 y_3 = 0$ 。 O'_c 点坐标为 $(a, 0, 0)$, 在平面上, 则

$$\begin{cases} (y_3 - y_2)a + x_3 y_2 - x_2 y_3 = 0 \\ n_2^2 - \frac{n_2^2}{1 + \tan^2 \theta_3} = n_1^2 - \frac{n_1^2}{1 + \tan^2 \theta_4} \\ \tan^2 \theta_3 = \frac{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}{(z_2 - z_3)^2} \\ \tan^2 \theta_4 = \frac{(a - x_3)^2 + y_3^2}{z_3^2} \\ z_3 = z_1 \end{cases} \quad (3)$$

直线 $O'_c Q''$ 方程为 $\frac{x - a}{x_3 - a} = \frac{y}{y_3} = \frac{z}{z_3}$, 右像平面方程为 $-\sin \theta x + \cos \theta z + \sin \theta a = f$, 设折射光线与右像平面交于点 P' , 坐标为 (x_4, y_4, z_4) , 且在直线 $O'_c Q''$ 上, 根据折射定律及几何关系可知:

$$\begin{cases} -x_4 \sin \theta + z_4 \cos \theta + a \sin \theta = f \\ \frac{x_4 - a}{x_3 - a} = \frac{y_4}{y_3} = \frac{z_4}{z_3} \end{cases} \quad (4)$$

由此可知,左图像上任意一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 所对应的右图像上的点 $P'(x_4, y_4, z_4)$,通过改变 k 值大小,可得到一系列的对应点,即可获得左图像上任意一点在右图像上所对应的极线。

2.3 独立折射面成像极线约束模型

独立折射面成像模型如图3所示,各参量选择与2.2节相同,仅需做变形处理即可。

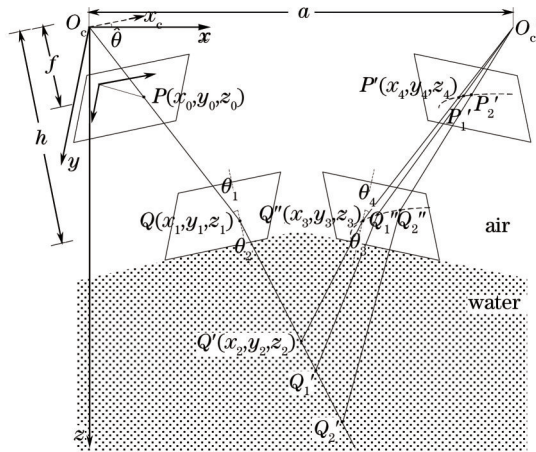


图3 独立折射面曲线约束推导图

Fig.3 Curve constraint derivation of independent reflection surface

由于左摄像机平面不变,故(1)式不变。

光线由空气传播至水中,左折射面方程为 $\sin \theta x + \cos \theta z = h$,法线方程为 $\begin{cases} \frac{x - x_1}{\sin \theta} = \frac{z - z_1}{\cos \theta} \\ y = y_1 \end{cases}$,由入射光线和法线

决定的平面为 $-y_1 x + (x_1 - z_1 \tan \theta) y + y_1 \tan \theta z = 0$ 。设法线与过 O_c 且平行于左折射面的平面交于点 $L(x_{11}, y_{11}, z_{11})$,法线与过 Q' 且平行于左折射面的平面交于点 $L'(x_{22}, y_{22}, z_{22})$,则

$$\begin{cases} \sin \theta x_{11} + \cos \theta z_{11} = 0 \\ \frac{x_{11} - x_1}{\sin \theta} = \frac{z_{11} - z_1}{\cos \theta} \\ y_{11} = y_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sin \theta x_{22} + \cos \theta z_{22} = \sin \theta x_2 + \cos \theta z_2 \\ \frac{x_{22} - x_1}{\sin \theta} = \frac{z_{22} - z_1}{\cos \theta} \\ y_{22} = y_1 \end{cases} \quad (6)$$

此时 O_c, QL 和 $QQ'L'$ 组成直角三角形,则(2)式可变形为

$$\begin{cases} -y_1 x_2 + (x_1 - z_1 \tan \theta) y_2 + y_1 \tan \theta z_2 = 0 \\ n_1^2 - \frac{n_1^2}{1 + \tan^2 \theta_1} = n_2^2 - \frac{n_2^2}{1 + \tan^2 \theta_2} \\ \tan^2 \theta_1 = \frac{x_{11}^2 + y_{11}^2 + z_{11}^2}{(x_1 - x_{11})^2 + (y_1 - y_{11})^2 + (z_1 - z_{11})^2} \\ \tan^2 \theta_2 = \frac{(x_2 - x_{22})^2 + (y_2 - y_{22})^2 + (z_2 - z_{22})^2}{(x_{22} - x_1)^2 + (y_{22} - y_1)^2 + (z_{22} - z_1)^2} \\ z_2 = k \end{cases} \quad (7)$$

光线由水中传播至空气,右折射面方程为 $-\sin \theta x + \cos \theta z + \sin \theta a = h$,法线方程为 $\begin{cases} \frac{x - x_3}{-\sin \theta} = \frac{z - z_3}{\cos \theta} \\ y = y_3 \end{cases}$,由入射光

和法线决定的平面 $y_3x - (x_3 + \tan\theta z_3 - a)y + \tan\theta y_3z - y_3a = 0$ 。

设法线与过 Q' 且平行于右折射面的平面交于点 $R(x_{33}, y_{33}, z_{33})$, 法线与过 O_c 且平行于右折射面的平面交于点 $R'(x_{44}, y_{44}, z_{44})$, 则

$$\begin{cases} -\sin\theta x_{33} + \cos\theta z_{33} = -\sin\theta x_2 + \cos\theta z_2 \\ \frac{x_{33} - x_3}{-\sin\theta} = \frac{z_{33} - z_3}{\cos\theta} \\ y_{33} = y_3 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} -\sin\theta x_{44} + \cos\theta z_{44} = -\sin\theta a \\ \frac{x_{44} - x_3}{-\sin\theta} = \frac{z_{44} - z_3}{\cos\theta} \\ y_{44} = y_3 \end{cases}, \quad (9)$$

此时 O_cQR 和 $QQ'R'$ 组成直角三角形, 则 (3) 式可变形为

$$\begin{cases} y_3x - (x_3 + \tan\theta z_3 - a)y + \tan\theta y_3z - y_3a = 0 \\ n_2^2 - \frac{n_2^2}{1 + \tan^2\theta_3} = n_1^2 - \frac{n_1^2}{1 + \tan^2\theta_4} \\ \tan^2\theta_3 = \frac{(x_{33} - x_2)^2 + (y_{33} - y_2)^2 + (z_{33} - z_2)^2}{(x_3 - x_{33})^2 + (y_3 - y_{33})^2 + (z_3 - z_{33})^2} \\ \tan^2\theta_4 = \frac{(a - x_{44})^2 + y_{44}^2 + z_{44}^2}{(x_{44} - x_3)^2 + (y_{44} - y_3)^2 + (z_{44} - z_3)^2} \end{cases}. \quad (10)$$

由于右摄像机平面不变, 故 (4) 式不变。由此可知, 左图像上任意一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 所对应的右图像上的点 $P'(x_4, y_4, z_4)$ 。

3 实 验

3.1 实验结果

在立体匹配中, 为了降低误匹配率, 往往需要利用极线几何约束关系, 剔除误匹配点。以经典的 SIFT 算法^[10]为例, 在获得匹配点对后, 经图像畸变矫正, 利用推导出的水下曲线约束关系, 剔除误匹配点。

实验硬件平台由双目视觉支架、两台维视 MV-1300FC CCD 工业相机、MV-1394 图像采集卡、具有透明平面玻璃罩的水槽及计算机组成, 为共用折射面成像结构。软件运行在 Matlab R2015a 环境下, 利用张正友标定法和粒子群算法^[11-12]对两台摄像机进行了标定, 标定参数如表 1 所示。其中, (f_x, f_y) 为摄像机焦距, (u_0, v_0) 为中心点坐标, k_c 为畸变系数, \mathbf{r} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移矩阵, \mathbf{n}_π 为折射平面法向量, h 为光心到折射平面距离。

表 1 摄像机参数

Table 1 Camera parameters

	Left camera	Right camera
(f_x, f_y)	(983.5992, 981.5893)	(974.1427, 969.4036)
(u_0, v_0)	(654.9866, 581.4098)	(689.2882, 537.8656)
k_c	(-0.1634, 0.3325, 0.0014, 0.0001, 0)	(-0.1393, 0.1945, 0.0016, 0.0001, 0)
\mathbf{r}	(2.17, 2.03, 0.01)	(-2.30, -2.14, 0.21)
\mathbf{T}	(-231.19, 31.42, 532.73)	(34.35, -6.89, 555.11)
\mathbf{n}_π	(0.0562, -0.0859, 0.9704)	(0.1747, 0.0519, 0.9603)
h / mm	121.094	109.068

由推导出的极线约束模型可知, 空气中的极线几何关系不再适用于水下环境。通过改变 k 值大小, 可得到左图像上一点在右图像上一系列的对应点, 即为可适用于水下环境中的极线模型。

以 SIFT 算法得出的一对正确匹配对为例, 左图像上点 $P(1092.40, 207.43)$, 对应的右图像上正确匹配点应为 $P'(668.91, 217.47)$ 。以左图像上点 P 为已知点, 改变 k 值大小, 得到右图像上所对应的极线如图 4 所示。可

可以看出,极线约束在空气中为直线,在水中变形为曲线,并且所得到的曲线更接近正确的匹配点。

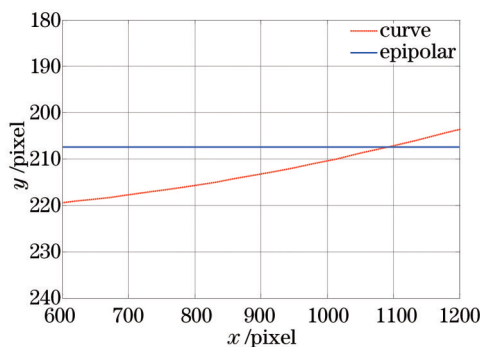


图4 (1092.40,207.43)点的极线、曲线对比图

Fig.4 Comparison of epipolar and curve at point (1092.40, 207.43)

利用SIFT算法对左右两幅图像进行匹配,取匹配阈值为0.7,对每一个匹配对中左图像上的点依次求取右图像中所对应的曲线,利用曲线约束剔除误匹配。图5(a)为单独使用SIFT算法的匹配结果,图5(b)为利用曲线约束剔除误匹配后的结果。

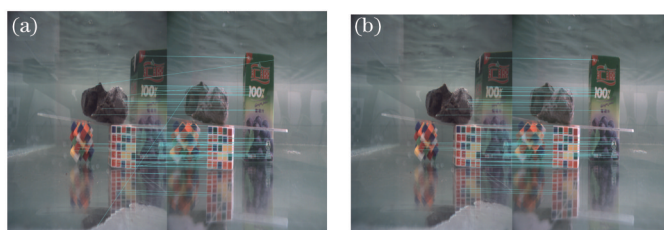


图5 匹配结果对比图。(a) SIFT算法;(b) 本文算法

Fig.5 Comparison of matching result. (a) SIFT algorithm; (b) the proposed algorithm

3.2 实验结果分析

由匹配结果可以看出,加入曲线约束后匹配效果明显变好。经过计算及统计分析可知,SIFT算法得到的总匹配对数为125对,其中误匹配对数为17对,误匹配率为13.60%。本文算法有效地剔除掉了10对误匹配点,所得到的总匹配对数为115对,其中误匹配对数为7对,误匹配率为6.09%,分析结果如表2所示。采用水下极线约束模型有效地剔除了误匹配点,使误匹配率降低了7.51%。仿真和实验结果证明了本文模型的有效性,利用曲线约束,可以将空气中的匹配方法推广到水下环境,降低误匹配率。

表2 匹配结果对比

Table 2 Comparison of matching results

Algorithm	Label	Total number of matches	Wrong number of matches	Matching error rate /%
SIFT algorithm	Fig.5 (a)	125	17	13.60
Proposed algorithm	Fig.5 (b)	115	7	6.09

4 结 论

对非平行双目视觉系统在水下环境中的极线约束模型进行了研究。在考虑折射的情况下,分别推导出了共用折射面和独立折射面的极线约束模型,并以SIFT特征匹配为例,进行了有效性验证。利用推导出的曲线约束关系剔除误匹配点,降低了误匹配率。实验结果表明,所提出的曲线约束模型,可以用于校正水下非平行双目视觉系统,使空气中的立体匹配算法得以使用,为水下场景三维重建打下了基础。

参 考 文 献

- 1 Sanchez-Ferreira C, Mori J Y, Llanos C H, *et al.*. Development of a stereo vision measurement architecture for an underwater robot[C]. IEEE 4 th Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS), 2013: 1-4.
- 2 Wu Y, Nian R, He B. 3D reconstruction model of underwater environment in stereo vision system[C]. Oceans-San Diego, 2013: 1-4.

- 3 Xiao Yun, Zhang Yunhai, Tan Huiming. Effect of aberration induced by refractive index mismatch on imaging in confocal microscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021801.
肖 昀, 张运海, 檀慧明. 折射率不匹配引入的像差对共聚焦显微成像的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021801.
- 4 Geng Yunfei, Chen Xi, Jin Wen, *et al.*. Influence of seawater refractive index on the precision of oil film thickness measurement by differential laser triangulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0408004.
耿云飞, 陈 曦, 金 文, 等. 海水折射率对差分激光三角法油膜厚度测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0408004.
- 5 Wang Zongyi. *Vision Sensor with Structured Light and Underwater 3D Measurement*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 96–107.
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: 96–107.
- 6 Zhang Wenming, Deng Xixue, Zhang Qiang, *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.
- 7 Gedge J. *Underwater Stereo Matching and its Calibration*[D]. Edmonton: University of Alberta, 2011: 37–56.
- 8 Zhang Qiang, Hao Kai, Li Haibin. Research on scale invariant feature transform feature matching based on underwater curve constraint [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0215003.
张 强, 郝 凯, 李海滨. 水下环境中基于曲线约束的SIFT特征匹配算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0215003.
- 9 Zhang Qiang, Liu Tingting, Li Haibin, *et al.*. Research on region matching for underwater images based on optimum searching area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0615001.
张 强, 刘婷婷, 李海滨, 等. 基于最佳搜索域的水下图像区域匹配算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0615001.
- 10 David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International J Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.
- 11 Zhang Wenming, 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): 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.
- 12 Li Guangle, Huang Wenyong, Liu Qingsong, *et al.*. Improved Zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215006.
李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215006.

栏目编辑: 苏 岑