

基于最佳搜索域的水下图像区域匹配算法研究

张 强¹ 刘婷婷¹ 李海滨^{1,2*} 张文明^{1,2} 李雅倩¹

(¹ 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)
(² 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 针对水下双目图像匹配时不再满足空气中极线约束条件以及归一化互相关(NCC)算法处理水下图像计算量大等问题,提出了一种基于最佳搜索域的水下图像区域匹配算法。对双目摄像机进行标定得到相关参数,并获取参考图和待匹配图;运用曲线极线约束计算出与空气中极线的最大偏离值,确定最佳搜索域;用 NCC 进行匹配,将原来的线性搜索改为在最佳搜索域中进行多行搜索,提高匹配精度;并应用盒滤波技术加速,提高匹配速度。实验结果表明,该算法达到了尺度不变特征变换(SIFT)算法的匹配精度,可以应用在整幅图中进行稠密匹配,且运算速度比原有 NCC 匹配算法大大提高,成功将区域匹配算法应用于水下环境中。

关键词 机器视觉;最佳搜索域;归一化互相关;水下区域匹配

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0615001

Research on Region Matching for Underwater Images Based on Optimum Searching Area

Zhang Qiang¹ Liu Tingting¹ Li Haibin^{1,2} Zhang Wenming^{1,2} Li Yaqian¹

(¹ Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(² National Engineering Research Center for Equipment and Technology of C. S. R., Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract In terms of underwater binocular image matching cannot satisfy the epipolar constraint of air, and the large amount of calculation of underwater image processed by the normalized cross correlation (NCC) algorithm, an underwater region matching algorithm based on optimum searching area is presented. Binocular camera should be calibrated in order to obtain some relevant parameters, as well as reference image and image to be matched; the maximum deviate value from the line in the air can be calculated through the curve constraint and the optimum searching area is therefore decided. The NCC region matching algorithm can help to match two images, at the same time, instead of searching on the original epipolar line, an optimum searching area is proposed so that the searching is performed in this area with several lines to achieve the purpose of a higher accuracy. Meanwhile, the time spent on the matching is reduced by the application of box filter technology. The results of the test indicate this algorithm achieves the same matching accuracy compared with the scale-invariant feature transform (SIFT) feature matching algorithm and this can be used to perform dense disparity. Also the speed of matching is largely accelerated compared with the original NCC algorithm. Therefore, the region matching algorithm is successfully applied to underwater image matching.

Key words machine vision; optimum searching area; normalized cross correlation; underwater region matching

OCIS codes 150.1135; 110.2960; 200.4560

1 引 言

随着科技的迅速发展,约占地球总面积 71% 的

海洋资源的应用越来越受到关注。尤其是在海洋资源勘探、海岸工程、水下设备监测等^[1-3]方面都需要

收稿日期: 2014-01-01; 收到修改稿日期: 2014-03-04

基金项目: 河北省自然科学基金(D2013203363)、河北省自然科学基金(D2014203153)

作者简介: 张 强(1982—),男,硕士,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

利用水下探测设备来完成。视觉技术所具有的非接触性、精度高、信息量大等特点,使其成为水下探测设备非常重要的组成部分,它可以完成水下图像的获取、立体匹配及三维重建。而双目视觉三维重建的关键是立体匹配技术,这也是计算机视觉领域的难点之一。目前,双目视觉的立体匹配算法广泛应用的是基于特征和基于区域的算法^[4-5],前者是提取图像特征,利用欧式距离等方法计算特征间差别,寻找到最相近的特征点来确定匹配关系,但在水下环境中,光在传播过程的折射使得其特征提取方法计算代价大,需选取合适阈值,不便实时应用,而且在纹理较少时局部特征提取困难,且只能得到稀疏点的匹配^[6]。文献^[7]提出在一定条件下,将水下图像转换为空气中图像,进而应用空气中的匹配方法来进行匹配以提高匹配精度,但该方法对光线折射问题作了近似处理且当被测物体深度变化范围较大时匹配精度不高,局限性较强。基于区域匹配的算法中归一化互相关(NCC)算法^[8-9]最为经典,它抗噪声干扰能力强,对光照不敏感,几何畸变不大时精度很高,对图像灰度值线性变换具有免疫性,可以得到稠密的视差图。它的这些特性使其适宜水下环境中的立体匹配,但在处理水下图像时,由于折射、镜头畸变以等因素的影响计算量较大。而且该算法是基

于极线约束进行搜索,而空气中极线约束条件不再适于水下环境。

针对上述问题,本文提出了基于最佳搜索域的水下 NCC 快速匹配算法。在水下环境不满足空气中极线约束的情况下,应用光线在多介质中的传播特性,推导出满足水下匹配的曲线极线约束条件,并计算出其与空气中极线的最大偏差值,确定最佳搜索域;用 NCC 匹配时,不再在原来极线上搜索,而是在最佳搜索域中进行多行搜索,以提高精度;同时利用盒滤波技术加速,以提高计算速度。

2 基于最佳搜索域的立体匹配算法

2.1 最佳搜索域的确定

在空气介质中双目视觉的区域匹配,需要在极线上进行线性搜索来提高速度和匹配精度。但水下图像由于光的折射、镜头畸变等因素的影响,空气中的极线约束已不再适用。所以,应用光线在多介质中的传播特性及相关数学知识,推导出满足水下匹配的曲线极线约束条件,以此作为参考确定最佳搜索域进而匹配,以下为最佳搜索域的确定。

如图 1 所示,假定摄像机模型为理想针孔模型,两摄像机平行光轴放置,物体放置于具有透明平板

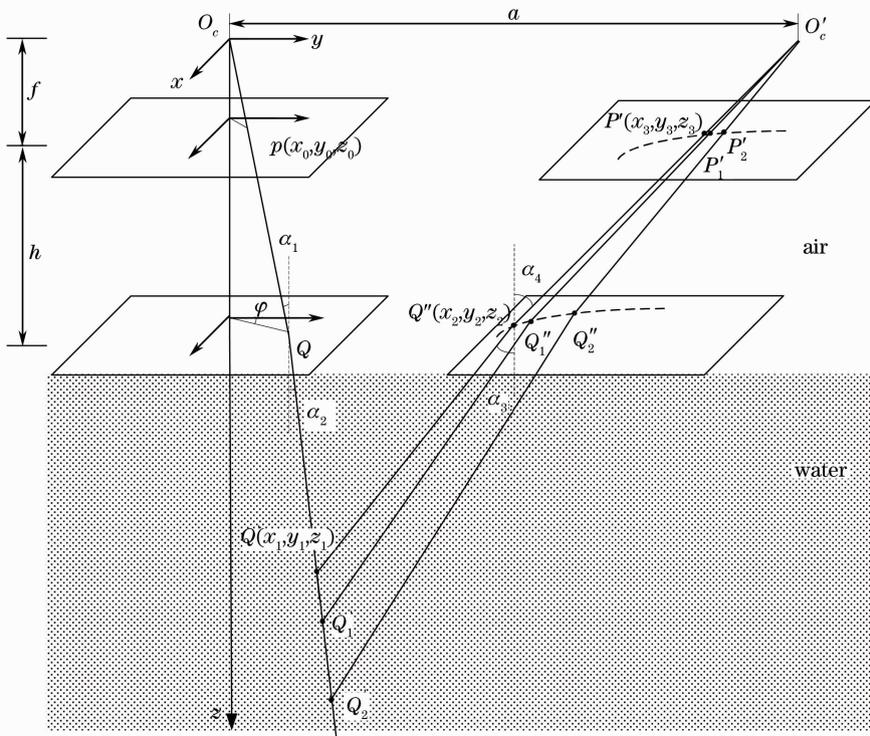


图 1 曲线极线推导图

Fig. 1 Figure of curve derivation

玻璃罩的水箱中。物点通过水、玻璃、空气三种介质在摄像机中成像,虽然水箱侧面玻璃存在一定厚度使成像光线在其内部发生一段侧移,但一般情况下,其厚度与拍摄距离相比相差较大,侧移对整体测量精度影响很小,故将玻璃厚度忽略,近似认为折射只发生在空气与水的交界面处。两摄像机的光心为 O_c, O'_c , 两光心间基线距离为 a , 相机焦距为 f , 成像平面与防水罩的距离为 h , 空气中的折射率为 n_1 , 水中的折射率为 n_2 , 以 O_c 为坐标原点建立坐标系。

在左像平面上任取一点 $P(x_0, y_0, z_0)$, 反推至

左折射面交于点 Q , 由相似三角形可得该点坐标。

$$\begin{cases} x = (z_0 + h) \tan \alpha_1 \cos \varphi = \frac{x_0}{z_0} (z_0 + h) \\ y = (z_0 + h) \tan \alpha_1 \sin \varphi = \frac{y_0}{z_0} (z_0 + h) \\ z = z_0 + h \end{cases} \quad (1)$$

由左像平面、左折射面只能确定出水下实际物点在射线 QQ' 上, 无法得到其具体的空间位置。假定实际物点位置为 $Q'(x_1, y_1, z_1)$, 设防水罩到物点平面的距离为 d , 可得到 Q' 坐标。

$$\begin{cases} x_1 [\tan \alpha_2 \cdot d + (f + h) \tan \alpha_1] \sin \varphi = d \times \frac{x_0}{\sqrt{(n^2 - 1)(x_0^2 + y_0^2) + n^2 f^2}} + \frac{x_0}{f} (f + h) \\ y_1 [\tan \alpha_2 \cdot d + (f + h) \tan \alpha_1] \cos \varphi = d \times \frac{y_0}{\sqrt{(n^2 - 1)(x_0^2 + y_0^2) + n^2 f^2}} + \frac{y_0}{f} (f + h) \\ z_1 = f + h + d \end{cases} \quad (2)$$

式中 d 为一变量, $n = n_2/n_1$ 。

经过右折射面后光线交于 $Q''(x_2, y_2, z_2)$ 点, 根据折射定理, 有

$$n \sin \alpha_3 = \sin \alpha_4, \quad \tan^2 \alpha_3 = \frac{\tan^2 \alpha_4}{(n^2 - 1) \tan^2 \alpha_4 + n^2}, \quad (3)$$

$$\tan^2 \alpha_3 = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{(f + h - z_1)^2}, \quad \tan^2 \alpha_4 = \frac{x_2^2 + (y_2 - a)^2}{(f + h)^2}, \quad (4)$$

$$\frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{(f + h - z_1)^2} = \frac{x_2^2 + (y_2 - a)^2}{(n^2 - 1)[(x_2 - a)^2 + y_2^2] + n^2 (f + h)^2}. \quad (5)$$

由 Q', Q'', O'_c 确定的平面方程为

$$[(y_1 - a)(f + h) - (y_2 - a)z_1]x + [x_2 z_1 - x_1(f + h)](y - a) + [x_1(y_2 - a) - x_2(y_1 - a)]z = 0. \quad (6)$$

取法线上一点 (x_2, y_2, z_0) , 该点在此平面上, 代入化简得

$$y_2 = \frac{y_1 - a}{x_1} \cdot x_2 + a. \quad (7)$$

由(5)、(7)式可解出 Q'' 点坐标, 物点映射到右像平面上的点为 $P'(x_3, y_3, z_3)$, O'_c, Q'' 方程:

$$\frac{x}{x_2} = \frac{y - a}{y_2 - a} = \frac{z}{z_0 + h}. \quad (8)$$

$z = f$ 时, 即为 P' 点

$$P' \begin{cases} x_3 = \frac{f}{f + h} x_2 \\ y_3 = \frac{f}{f + h} (y_2 - a) + a \\ z_3 = f \end{cases} \quad (9)$$

如(2)式所示, 深度值 d 为一变量, 选取不同的值可得到不同的 Q' 坐标, 就会在右像平面上得到不

同的 P' 点坐标, 这些像点拟合而成的曲线就是该点对应的水下曲线极线约束, 左像平面中的每个像点都可得到其对应的曲线约束表达式。但在推导参考图中的点对应的曲线极线时, 因为其在线计算量非常大, 且所需储存空间大, 所以提出最佳搜索域的思想, 其中极线的推导是离线计算, 且每个点只需储存一个最大差值, 既减少了计算量又节省了存储空间。继续推导如下:

求出该曲线极线上的点的 x 坐标与 x_0 的最大差值, 即:

$$d = \max(x_3 - x_0). \quad (10)$$

进而以 $x = x_0$ 为基准, 上下变化值为 d 确定一个搜索窗口, 即区域匹配的最佳搜索域, 如图 2 所示, 右图中的灰色区域即为左图 (x_0, y_0, z_0) 对应的最佳搜索域。

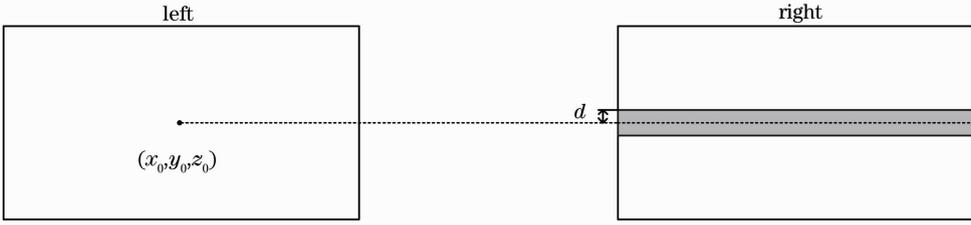


图 2 最佳搜索域的确定

Fig. 2 Optimum searching area derivation

2.2 改进的 NCC 匹配方法

NCC 匹配算法是一种经典的区域匹配算法。计算模板图像和搜索图像的相关值,当互相关值最大时,此时的模板图像的位置即为相应匹配点的位置。假设模板 T 的尺寸为 $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$,搜索

图像 S 的尺寸为 $M \text{ pixel} \times M \text{ pixel}$,且 $M > N$, M, N 代表图像像素大小。将模板 T 在图像 S 上平移时所覆盖的子图记为 $S^{i,j}$ 。互相关值通过归一化积相关匹配度量函数来确定,将其定义为

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j}(m, n) T}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j}]^2} \times \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n) - \bar{T}]^2}} \quad (11)$$

盒滤波技术是一种递归的二维均值滤波快速计算方法^[10-11]。其基本思想是应用一个滑动窗口,在计算窗口匹配代价时,充分利用上一次窗口的累计结果来消除冗余计算。对于归一化相关匹配度量 $R(i, j)$,其分母可以化简为

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j}]^2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) \cdot S^{i,j}(m, n) - 2S^{i,j}(m, n)\bar{S}^{i,j} + \bar{S}^{i,j} \cdot \bar{S}^{i,j}] =$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j}]^2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j^2}(m, n) - (2m+1)(2n+1)\bar{S}^{i,j^2}, \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n) - \bar{T}]^2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T^2(m, n) - (2m+1)(2n+1)\bar{T}^2, \quad (13)$$

式中 \bar{S}^{i,j^2} 、 \bar{T}^2 可采用盒滤波方法加速。如图 3 所示

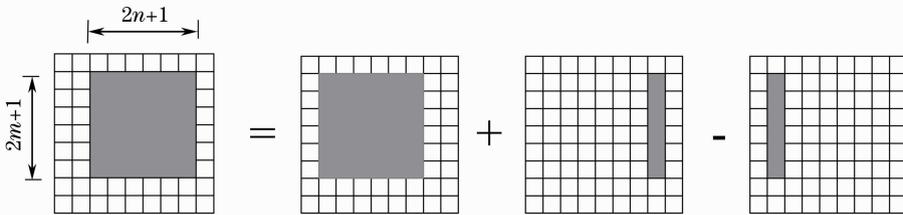


图 3 二维盒滤波加速示意图

Fig. 3 Acceleration method of box filtering

将盒滤波技术加入到 NCC 匹配算法中,并将极线上的搜索改为在最佳搜索域内的搜索,可以提高匹配精度和匹配速度。

2.3 匹配算法实现

本文算法是对于每个待匹配点都应用上一节推导出的最佳搜索域,在该搜索域内进行多行搜索,而不是在其极线上搜索,并且加入了盒滤波,加快匹配速度。

算法流程:

1) 最佳搜索域

对于左图中的每一个像点,计算其曲线极线,求出最大偏离值 d ,确定最佳搜索域;

2) NCC 区域匹配

① 以左图待匹配点为中心创建邻域窗口,分析灰度分布。

② 在右图中创建同样邻域窗口。

③ 应用盒滤波技术遍历最佳搜索域中的每一行,计算二者相似性。

④ 寻找相似性最大时的邻域窗口,记录此时对应的列数以及搜索区域的行数。

3 实验分析

3.1 实验的硬件设备

本文实验的硬件设备是本课题组设计的双目视觉支架,两张 MV-1394 图像采集卡,维视公司的 MV-1300FC CCD 工业相机两台,具有透明平板玻璃罩的水槽以及 Pentium 4 处理器的计算机。实验示意图与实验设备如图 4 所示。

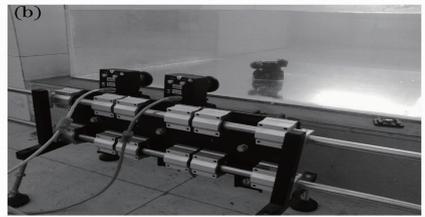
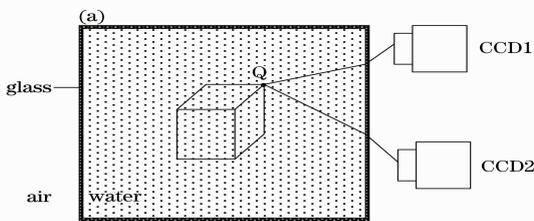


图 4 (a) 实验示意图; (b) 实验平台

Fig. 4 (a) Experimental schematic; (b) platform of laboratory equipment

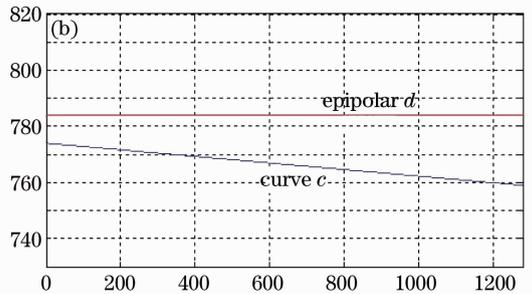
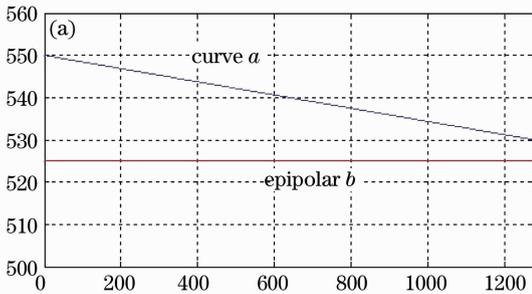


图 5 任意两点的极线曲线对比。(a) (79,525); (b) (137,784)

Fig. 5 Contrast of epipolar curve. (a) (79,525); (b) (137,784)

由于水下立体匹配尚未有标准的参考图、待匹配图及其视差图,因此本实验针对尺度不变特征变换(SIFT)算法匹配出的 90 对特征点应用本文的算法进行了匹配,如图 6 和图 7 所示,列出两组图片的实验效果图。

SIFT 算法与本文算法的匹配精度如表 1 所示。

同时,本实验还分别选取了 30、60、90 对特征点对比分析了未加盒滤波技术的算法与本文算法的匹配速度,结果如表 2 所示。

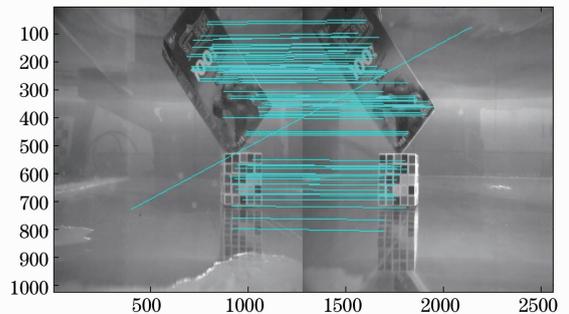


图 6 SIFT 算法

Fig. 6 Scale-invariant feature transform (SIFT) algorithm

表 1 匹配精度对比

Table 1 Comparison of accuracy

Project Algorithm	Label	Total number of matches	Wrong number of matches	Matching accuracy / %
SIFT algorithm	Fig. 6	90	25	72.2
Our algorithm	Fig. 7	90	24	73.3

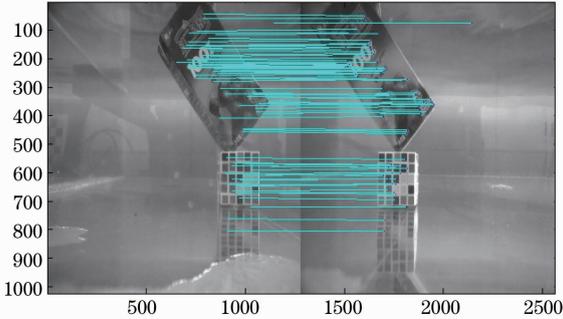


图 7 本文算法

Fig. 7 Our algorithm

表 2 匹配时间对比

Table 2 Comparison of matching time

Number of matches	30	60	90
Former algorithm /s	29	63	98
Our algorithm /s	14	30	46
Improved rate of time / %	51.7	52.4	53.1

3.3 实验数据分析

经过计算及统计分析,图 6 及图 7 图像的总匹配对数为 90 对,其中 SIFT 算法的误匹配对数为 25,匹配精度为 72.2%。本文算法对 NCC 算法进行了改进,误匹配对数为 24 对,匹配精度为 73.3%,说明本文的算法精度达到了特征匹配的匹配精度。同时,本文算法的匹配速度也有了很大提高,远远高于未加盒滤波技术的匹配时间,对应于不同的点数提高率分别为 51.7%、52.4%、53.1%,也说明待匹配点对数越多,速度提高越快。

4 结 论

对水下环境中的双目视觉的立体匹配问题进行研究,在考虑了折射、镜头畸变等因素的情况下,提出了基于最佳搜索域的 NCC 区域匹配算法,利用标定得到的摄像机参数、光的折射原理、可逆性原理及空间立体相关数学知识推导出了曲线约束理论,求得对应的最佳搜索域,成功的改进了 NCC 区域匹配算法,使其应用到了水下匹配。实验结果表明,该算法匹配精度达到了 SIFT 特征匹配的匹配精度,而且可以广泛应用于水下图像的稠密匹配中,解决了特征匹配只能得到稀释匹配点的问题,同时加入的盒滤波技术很大程度的提高了匹配速度,因此

本算法较好的解决了水下图像因折射、镜头畸变等误差因素造成匹配精度低、局限性强等问题,并将空气中的极线约束成功改进为水下的曲线极线约束,为水下图像的区域稠密匹配提出了切实可行的方案,广泛适用于纹理丰富且平坦的图像,也为进一步的水下场景的三维重建打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 V Brandou, A G Allais, M Perrier, *et al.*. 3D Reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS [C]. In Proc OCEANS'07. Europe, 2007. 1-6.
- 2 Ryohei Kawai, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko. Three-dimensional measurement of objects in water by using space encoding method [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. 2830-2835.
- 3 Arnaud Meline, Jean Triboulet, Bruno Jouvencel. A camcorder for 3D underwater reconstruction [C]. In Proc OCEANS'10. Seattle Etats-Unis, 2010. 1-9.
- 4 Bian Jilong, Men Chaoguang, Li Xiang. A fast stereo matching method based on small baseline [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(3): 517-522.
- 5 边继龙, 门朝光, 李 香. 基于小基高比的快速立体匹配方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 517-522.
- 6 D Scharstein, R Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithm [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1-3): 7-42.
- 7 Jason Gedge. Underwater Stereo Matching and its Calibration [D]. Edmonton: University of Alberta, 2011. 37-56.
- 8 Wang Zongyi. Vision Sensor with Structured Light and Underwater 3D Measurement [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. 96-107.
- 9 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.
- 10 Yang Tongyu, Peng Guohua. Fast algorithm for image matching based on NCC [J]. Computer Apply Technology, 2010, (22): 107-109.
- 11 杨通钰, 彭国华. 基于 NCC 的图像匹配快速算法 [J]. 计算机应用技术, 2010, (22): 107-109.
- 12 Guo Wei, Zhao Yigong, Xie Zhenhua. An improved normalized cross-correlation for template matching of infrared image [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 38(1): 189-193.
- 13 郭 伟, 赵亦工, 谢振华. 一种改进的红外图像归一化互相关匹配算法 [J]. 光子学报, 2009, 38(1): 189-193.
- 14 Liao Suying, Yang Huajun. Regional correlation stereo matcing with dynamic programming [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(s1): 137-140.
- 15 廖素英, 杨华军. 基于区域相关的动态匹配方法 [J]. 光电工程, 2004, 31(s1): 137-140.
- 16 Li Haibin, Zhang Qiang. A new stereo matching algorithm based on sub-line segment [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 907-912.
- 17 李海滨, 张 强. 一种新的基于子线段的立体匹配算法 [J]. 光学学报, 2007, 27(5): 907-912.
- 18 Zhang Wenming, Wang Xin, Zhang Qiang, *et al.*. A multi-medium positioning algorithm based on particle swarm optimization calibration [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0515001.
- 19 张文明, 王 鑫, 张 强, 等. 一种基于粒子群标定的多介质定位算法 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0515001.

栏目编辑: 张浩佳