

# 基于色彩分割的水下立体匹配算法的研究

张 强<sup>1,2</sup> 卢士强<sup>2</sup> 李海滨<sup>2\*</sup> 李雅倩<sup>2</sup> 张文明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

<sup>2</sup>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** 针对空气中极线几何不再适用于水下双目图像匹配以及尺度不变特征转换(SIFT)算法只能实现稀疏匹配的问题,提出了基于色彩分割的水下立体匹配算法。获取双目摄像机标定参数、参考图和待匹配图;推导参考图的特征点在待匹配图上对应的曲线表达式,同时利用均值漂移算法对参考图进行图像分割;用像素灰度差的绝对误差和算法进行匹配,根据图像分割结果对窗口内像素分配不同权重,并将搜索范围改为在对应曲线上,提高匹配精度。实验结果表明,该算法优于特征匹配 SIFT 算法,匹配精度有所提高,成功将区域匹配算法应用于水下图像稠密匹配。

**关键词** 机器视觉; 稠密匹配; 曲线约束; 色彩分割; 水下图像; 水下折射

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0815001

## Research on Underwater Stereo Matching Method Based on Color Segmentation

Zhang Qiang<sup>1,2</sup> Lu Shiqiang<sup>2</sup> Li Haibin<sup>2</sup> Li Yaqian<sup>2</sup> Zhang Wenming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

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

**Abstract** In term of underwater the epipolar constraint no longer meet binocular image matching, and the scale-invariant feature transform (SIFT) algorithm can only achieve sparse matching, the underwater stereo matching algorithm based on color segmentation is proposed. The calibration parameters of binocular camera are obtained as well as reference image and image to be matched. Corresponding curve expression of the feature points of reference image on image to be matched is derived and the reference image is segmented by mean shift algorithm. The sum of absolute differences algorithm is used to match two images after assigning different weights to the pixels within the window based on the results of image segmentation and searching for the corresponding point in the curve, which can improve the matching accuracy. Experimental results show that the proposed algorithm is superior to feature matching SIFT algorithm, and the matching accuracy is improved. The area matching algorithm is successfully applied to underwater image dense matching.

**Key words** machine vision; dense matching; curve constraint; color segmentation; underwater image; underwater refraction

**OCIS codes** 150.0155; 150.1135; 100.2960

## 1 引 言

随着科学技术的发展,越来越多的国家将目光转向海洋资源的研究和利用。水下探测机器人作为海洋开发领域的重点,能够实现图像采集、立体匹配、目标三维建模,在海底资源勘探、水下考古、海洋生物研究等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。双目立体匹配是水下三维重建的关键步骤,也是计算机视觉技术的热点与难点。

**收稿日期:** 2016-02-26; **收到修改稿日期:** 2016-03-30

**基金项目:** 河北省自然科学基金(D2015203310)、河北省自然科学基金(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

目前,基于特征和基于区域的算法是双目匹配中的常用算法<sup>[3-4]</sup>。前者是生成特征点描述符,计算描述符之间的欧式距离,寻找距离最小的特征点作为匹配点,但仅能获得稀疏点的匹配;后者是比较左、右窗口内像素灰度值的差异,以差异程度作为匹配标准。在空气中,两类算法均能获得较好的匹配效果。但在水下环境中,摄像机需要安装透明的防水罩,光线沿水、防水罩、空气的传播路径进入相机镜头,由于防水罩很薄,可以忽略不计,所以考虑折射只发生在水和空气的交界处<sup>[5-6]</sup>。这导致极线偏折、弯曲,空气中的极线约束不再成立,从而使以极线约束为搜索范围的基于区域的算法计算量加大,匹配难度增加。考虑到水下和空气中立体匹配环境的不同,国内外学者进行了大量研究。文献[7]提出近似处理光线的折射问题,把水下图像转换到空气中,达到提高匹配精度的目的;文献[8]详细分析了非平行双目系统下的转化模型;Gedge等<sup>[9]</sup>研究了水下折射对成像和匹配的影响,并推导了折射面参数标定和曲线几何;文献[10]提出基于水下曲线的尺度不变特征变换(SIFT)特征匹配算法,但仅作为剔除误匹配的约束条件;文献[11]提出基于最佳搜索域的匹配算法来提高匹配精度,但没有直接将曲线约束作为搜索范围,也没有充分利用曲线约束的优点,因此增加了计算量。

针对以上问题,本文提出一种基于色彩分割的水下双目立体匹配算法。该方法应用水下折射模型标定双目摄像机获取内外参数;推导参考图特征点对应的待匹配图上的曲线几何;对参考图进行图像分割;选择绝对误差和(SAD)算法进行匹配,根据分割结果对窗口内不同像素分配不同权重;在水下曲线上搜索匹配点,实现减少计算量,提高匹配精度的目的。

## 2 基于色彩分割的水下立体匹配算法的研究

### 2.1 曲线约束

在空气中,极线几何原理是立体视觉的重要理论。以极线几何作为约束条件,不仅能减少立体匹配的复杂度,而且可以降低错误匹配的可能性<sup>[9]</sup>。由于水下环境中存在折射现象,极线几何不再成立,即一幅图像中某像素在另一幅图像中的对应点为曲线而不再限制在一条直线上。曲线约束的数学推导过程如图1所示。

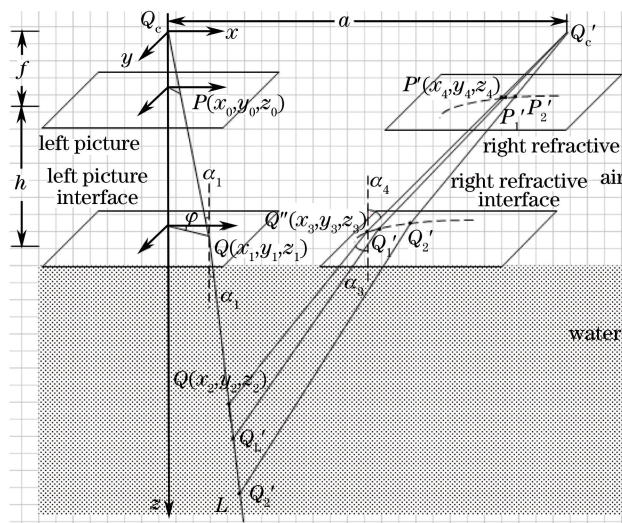


图1 曲线推导图

Fig. 1 Figure of curve derivation

如图1所示,遵循摄像机模型为理想针孔模型的假设,两摄像机满足平行几何关系。已知两摄像机的光心分别为 $O_c, O'_c$ ,两光心间基距为 $a$ ,两摄像机焦距均为 $f$ ,成像平面到折射面的距离是 $h$ ,空气的折射率为 $n_1$ ,水的折射率为 $n_2$ 。假设世界坐标系和左摄像机坐标系重合,左光心作为坐标原点,则 $O'_c$ 坐标是 $(a, 0, 0)$ 。

任取左像平面上一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ ,光心 $O_c$ 和 $P$ 的连线交左折射面于 $Q(x_1, y_1, z_1)$ ,由三角形相似原理可得

$$\begin{cases} x_1 = (z_0 + h) \tan \alpha_1 \cos \varphi = \frac{x_0}{z_0}(z_0 + h) \\ y_1 = (z_0 + h) \tan \alpha_1 \sin \varphi = \frac{y_0}{z_0}(z_0 + h) \\ z_1 = z_0 + h \\ z_0 = f \end{cases} \quad (1)$$

由入射光线  $O_cQ$  和折射光线  $QL$ , 不能确定像点  $P$  的真实物点空间位置, 取  $Q'(x_2, y_2, z_2)$  为真实物点坐标, 物点到折射面的垂直距离为  $d$ 。由折射定律和三角形相似得

$$\begin{cases} x_2 = [d \tan \alpha_2 + (f + h) \tan \alpha_1] \cos \varphi = d \cdot \frac{x_0}{\sqrt{(n^2 - 1)(x_0^2 + y_0^2) + n^2 f^2}} + \frac{x_0}{f}(f + h) \\ y_2 = [d \tan \alpha_2 + (f + h) \tan \alpha_1] \sin \varphi = d \cdot \frac{y_0}{\sqrt{(n^2 - 1)(x_0^2 + y_0^2) + n^2 f^2}} + \frac{y_0}{f}(f + h) \\ z_2 = f + h + d \\ n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \\ n = \frac{n_2}{n_1} \end{cases} \quad (2)$$

物点  $Q'$  和右折射面交点为  $Q''$ , 坐标为  $(x_3, y_3, z_3)$ 。  $Q''$  和右光心  $O'_c$  连线交右像平面于点  $P'(x_4, y_4, z_4)$ 。同理, 由折射定律可得

$$\begin{cases} n \sin \alpha_3 = \sin \alpha_4 \\ \tan \alpha_3 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}{\sqrt{(z_3 - z_2)^2}} \\ \tan \alpha_4 = \frac{\sqrt{(x_3 - a)^2 + y_3^2}}{z_3^2} \\ z_3 = f + h \end{cases} \quad (3)$$

由于  $Q', Q'', O'_c$  在一个平面, 则其平面方程满足

$$(y_2 z_3 - y_3 z_2)(x - a) + [(x_3 - a) z_2 - (x_2 - a) z_3] y + [(x_2 - a) y_3 - (x_3 - a) y_2] z = 0. \quad (4)$$

取法线上一点  $(x_3, y_3, z_0)$  代入上式, 整理得

$$y_2(x_3 - a) - y_3(x_2 - a) = 0. \quad (5)$$

联立方程组(3)、(5)式, 可得  $Q''$  的坐标。

直线  $Q'_c Q''$  方程表示为

$$\frac{x - a}{x_3 - a} = \frac{y}{y_3} = \frac{z}{z_3} = \frac{z}{f + h}. \quad (6)$$

点  $P$  在直线  $Q'_c Q''$  上, 满足方程

$$\begin{cases} x_4 = \frac{f}{f + h}(x_3 - a) + a \\ y_4 = \frac{f}{f + h} y_3 \\ z_4 = f \end{cases} \quad (7)$$

从(2)、(3)、(5)、(7)式可以看出, 当  $d$  的取值变化时,  $Q', Q'', P$  的坐标也跟着变化, 即可得到一系列不同的  $P$  点, 如图 1 中的  $P'_1, P'_2$ 。利用这些离散的  $P$  点拟合出一条曲线, 即上文提出的曲线约束, 并求曲线表达式的具体系数。借助 Matlab 软件拟合工具箱, 用二次多项式拟合曲线, 拟合精度已经很高。考虑到算法简单性, 选择二次多项式拟合水下曲线。

## 2.2 色彩分割

色彩分割是依据图像中像素的颜色信息, 像素之间相似性、相邻性等特征将图像划分成一系列不重叠的

相似颜色区域块,为进一步的处理提供有力支持<sup>[12]</sup>。

基于窗口的区域匹配算法的难点在于选择支持窗口的形状和大小<sup>[13]</sup>,同时基于这样的假设:支持窗口内的所有像素具有相似的视差值。但是当支持窗口覆盖视差不连续区域时,这种假设不再成立,匹配精度下降<sup>[14]</sup>。尤其在水下环境,除了光的折射,还存在光的吸收和散射,导致水下图像对比度下降、色偏明显<sup>[15]</sup>,加剧了这种情况。在大多数情况下,满足这样的前提:同一色彩分割区域内的视差平滑过渡,视差不连续一般发生在颜色的边界处<sup>[16]</sup>。因此,将色彩分割融合到区域立体匹配算法中,需对参考图像进行色彩分割,对支持窗口中与中心像素在同一分割区域的像素分配较大权重,否则分配较小权重,以达到提高匹配精度的目的。

为了满足图像分割的前提,一般需要对图像进行过分割。考虑分割效果,选择 Comanicu 等<sup>[17]</sup>提出的均值漂移图像分割算法。由于均值漂移算法不是本文研究重点,不再展开,具体介绍可参考文献[12,18-19]。均值漂移算法参数选择为空间搜索带宽  $h_s=10$ ,颜色搜索带宽  $h_r=7$ ,最小区域像素  $M=200$ 。

### 2.3 SAD 算法

色彩分割的本质是对像素分类,假设每个类(或)对应一个类标签号,用数字序列 1,2,3...依次表示,即同一类的像素具有相同的类标签号。利用均值漂移算法分割参考图,可以获得与参考图相同大小的两幅图像:分割后的参考图和标签图。标签图中的每个元素数值表示参考图对应像素的类标签号。由此权重定义为

$$\omega_{I_m, I_n} = \begin{cases} 1, & L_{I_m} = L_{I_n} \\ \lambda, & L_{I_m} \neq L_{I_n} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $I_m, I_n$  分别表示中心像素和窗口邻域像素,  $L_{I_m}, L_{I_n}$  分别表示中心像素和窗口邻域像素的类标签号,  $\omega_{I_m, I_n}$  表示像素  $I_m$  和  $I_n$  之间的权重;参数  $\lambda \ll 1$ ,若标签号相同则取较大权重 1,否则取较小权重  $\lambda$ ,令  $\lambda=0.1$ 。

SAD 算法是基于窗口的区域匹配算法中的典型代表<sup>[20]</sup>,具有结构简单、效率高的特点,并且能得到稠密视差图。引入权重后的 SAD 算法表达式为

$$f_{\text{SAD}}(x, y, d) = \sum_{i, j \in \omega_{\text{in}}} \omega_{I_o, I_i} \cdot |I_l(x+i, y+j) - I_r(x+i+d, y+j)|, \quad (9)$$

式中  $I_l$  和  $I_r$  分别代表左图、右图在  $(x+i, y+j)$ 、 $(x+i+d, y+j)$  位置的像素灰度值,  $\omega_{\text{in}}$  代表  $I_l, I_r$  的邻域窗口,  $d$  代表可以搜索的视差范围,  $\omega_{I_o, I_i}$  表示窗口邻域像素和中心像素的权重。当  $f_{\text{SAD}}(x, y, d)$  取得最小值时,表示左右两个像素点相似程度最高,此时的  $d$  值即目标视差。本文算法选择窗口大小为  $51 \text{ pixel} \times 51 \text{ pixel}$ 。在精度满足要求的前提下,仅考虑了参考图上邻域像素和中心像素的权重关系,若同时考虑待匹配图,可进一步提高匹配精度,但需重新定义权重且计算量增加。

### 2.4 算法步骤

1) 将双目视觉支架固定在水槽正面,利用已安装的上位机软件控制左、右两台相机,同时获取水中同一实验物体的图片,对应的两张图片为一组,拍摄多组图片,选择成像质量好的图片。替换其他物体,重复此过程。获取的所有图片用于后续的处理、仿真。

2) 选择一组图片,利用 SIFT 算法获得特征点坐标和匹配点对,记录总匹配对数、错误匹配对数。

3) 选择 2) 中一组图片的左图作为参考图,右图作为待匹配图。计算参考图上特征点在待匹配图上对应的拟合曲线,求二次多项式系数  $p_1, p_2, p_3$ 。

4) 定义  $x$  表示图像列坐标,  $y$  表示图像行坐标,  $d_{\text{max}}$  表示最大视差。取左图任一特征点  $P(x, y)$ ,将  $(x-d_{\text{max}}+1:x)$  依次代入二次多项式,得到对应值  $(y_1, y_2, \dots, y_{d_{\text{max}}+1})$ 。  $d_{\text{max}}+1$  个坐标  $(x-d_{\text{max}}, y_1)$ ,  $(x-d_{\text{max}}+1, y_2), \dots, (x, y_{d_{\text{max}}+1})$  组成曲线约束,作为后面 SAD 算法匹配搜索区域。

5) 利用均值漂移算法对 3) 中参考图进行色彩分割,每个像素获得一个相应  $L_{\text{label}}$ 。

6) 利用 SAD 算法进行匹配,判断支持窗内像素  $L_{\text{label}}$  与中心像素是否相同,若相同,则分配较大权重 1;若不同,则分配较小权重 0.1。

7) 对参考图上所有特征点重复步骤 3)~6),完成匹配。

### 3 实验结果

#### 3.1 实验设备

仿真实验的主要平台是实验室设计的双目视觉支架,包括两台配有 1394 数字图像采集卡的 MV-1300FC 工业相机,一台配备 Intel i3 处理器的计算机,一个由透明玻璃平板组成的水槽。实验平台如图 2 所示。

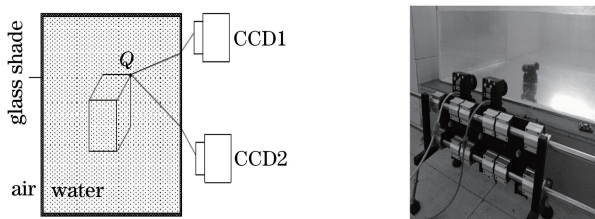


图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

#### 3.2 实验结果

##### 1) 参数标定

软件运行在 Matlab R2010b 环境下,利用张正友标定法和粒子群算法<sup>[21-22]</sup>对两台摄像机进行了标定,主要参数如表 1 所示。其中 $(f_x, f_y)$ 表示摄像机焦距, $(u_0, v_0)$ 表示中心点坐标, $k_c$ 、 $r$ 、 $T$ 、 $n_\pi$ 、 $h$  依次表示畸变系数、旋转矩阵、平移矩阵、折射平面法向量、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)
$r$	(2.17, 2.03, 0.01)	(-2.30, -2.14, 0.21)
$T$	(-231.19, 31.42, 532.73)	(34.35, -6.89, 555.11)
$n_\pi$	(0.0562, -0.0859, 0.9704)	(0.1747, 0.0519, 0.9603)
$h$ /mm	121.094	109.068

##### 2) 极线几何和曲线约束对比

由 2.1 推导过程可知,选择不同  $d$  值,可获得参考图上一点在待匹配图上一组对应点,即满足水下环境的曲线约束关系。选择 SIFT 算法匹配的两组正确点对作为说明,参考图上点(974, 639)、(703, 170),待参考图上对应点(481, 641)、(228, 159)。极线几何和曲线约束对比如图 3 所示。

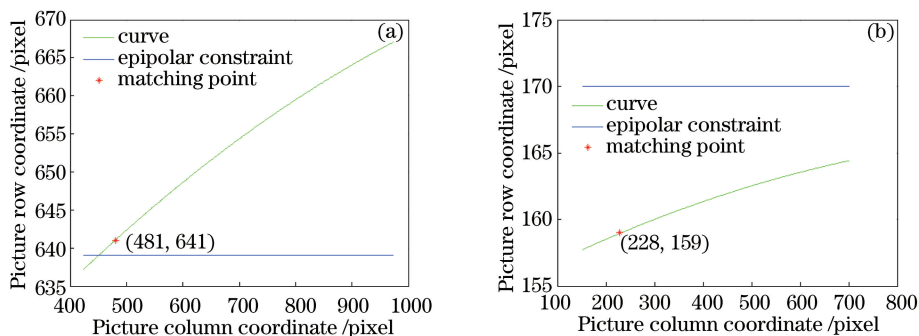


图 3 点(974, 639)和(703, 170)极线、曲线对比

Fig. 3 Comparison of epipolar and curve at point (974, 639) and (703, 170)

##### 3) 稀疏匹配

由于水下立体匹配尚未建立标准图库,所以选取了有显著特征的物体并用实验组的设备进行拍摄来得到水下立体匹配图像对。

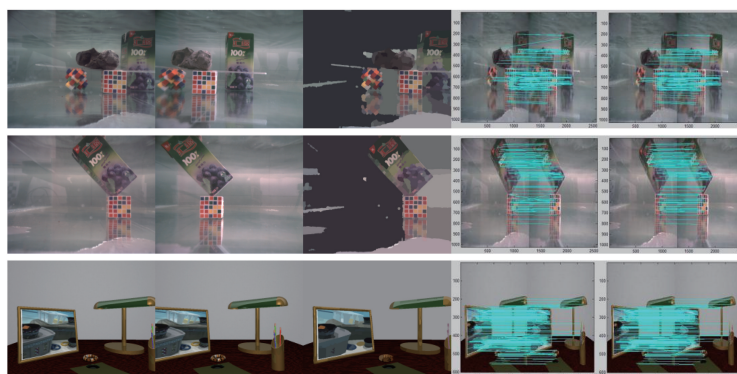


图 4 稀疏匹配效果

Fig. 4 Results of sparse matching

选择 3 组实验图像对,第 1、2 组为实际图像,第 3 组为利用软件 POV-Ray 生成的仿真图像。如图 4 所示,第 1~3 行分别表示第 1~3 组图像对,每行从左到右依次为左图、右图、分割后的左图、SIFT 算法匹配结果、本文算法匹配结果。SIFT 算法最近邻距离与次近邻距离比值为 0.7。

#### 4) 稠密匹配对比

考虑本文算法速度有待进一步优化,若对整幅图像进行稠密匹配时间较长,因此截取第 2 组中左图的两个小区域进行稠密匹配实验,区域范围分别是 $[(892:902), (572:582)]$ 和 $[(1062:1072), (575:585)]$ ,区域大小均为  $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ ,共计 121 pixel。如图 5 中箭头所示。并与空气中的稠密匹配算法 SAD 进行比较,邻域窗口大小  $51 \text{ pixel} \times 51 \text{ pixel}$ 。

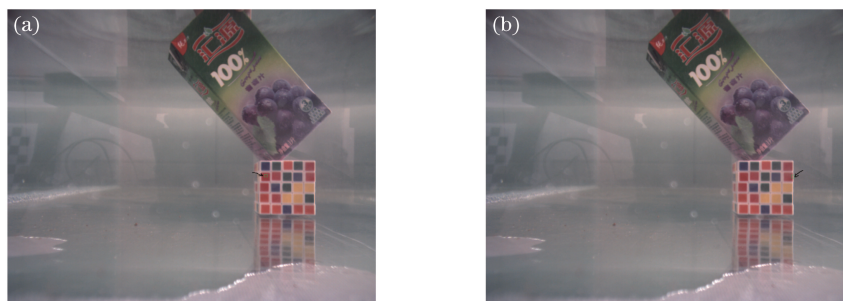


图 5 (a)小区域 1(11×11);(b)小区域 2(11×11)

Fig. 5 (a) Small area 1(11×11); (b) small area 2(11×11)

## 4 分析与讨论

稀疏匹配结果数据统计如表 2 所示。

表 2 匹配结果对比

Table 2 Comparison of matching result

Algorithm	Label	Total number of matches	Wrong number of matches	Matching error rate
SIFT algorithm	First pair	124	21	16.9%
Proposed algorithm		124	8	6.5%
SIFT algorithm	Second pair	121	19	15.7%
Proposed algorithm		121	9	7.4%
SIFT algorithm	Third pair	231	37	16%
Proposed algorithm		231	19	8.2%

Note: Matching error rate = (Wrong number of matches / Total number of matches) × 100%

从表 2 可以看出,本文算法匹配效果有较大提升。由表 2 具体数据可知,对于第 1 组实验图片,SIFT 算法总共得到 124 对匹配点,其中 21 对是错误匹配,误匹配率为 16.9%;本文算法改正了部分错误匹配,总匹

配对数保持不变,但错误匹配对数降为 8 对,误匹配率是 6.5%,匹配精度明显提升。第 2、3 组图片匹配结果与第 1 组相似。

稠密匹配结果数据统计如表 3 所示。

表 3 匹配结果对比

Table 3 Comparison of matching result

Label	Algorithm	Total number of matches	Wrong number of matches	Matching error rate
Small area 1	SAD+epipolar constraint	121	23	19%
	SAD+curve constraint	121	10	8.3%
	Color segmentation+ curve constraint	121	8	6.6%
Small area 2	SAD+epipolar constraint	121	41	33.9%
	SAD+curve constraint	121	18	14.9%
	Colorsegmentation+ curve constraint	121	11	9.1%

由表 3 可知,对于区域 1,三种组合:SAD+空气中极线约束、SAD+水下曲线约束、色彩分割+水下曲线约束误匹配率分别为 19%、8.3%、6.6%,说明水下曲线约束的引入,使匹配精度有较大提高;由于区域 1 处于视差连续区域,色彩分割的作用不明显,SAD+水下曲线约束错误匹配 10 对,与本文算法的 8 对相近。对于区域 2,匹配结果与区域 1 相似;同时由于区域 2 跨越视差不连续区域,组合 SAD+空气中极线约束,缺少曲线约束和色彩分割的限制,误匹配对数明显增多;色彩分割发挥作用,本文算法色彩分割+水下曲线约束比组合 SAD+水下曲线约束误匹配对数减少 7 对,匹配精度有所提高。综上所述,本文算法对匹配精度有较大提升,验证了该算法在水下图像稠密匹配中的有效性。

## 5 结 论

对平行双目视觉系统在水下条件中的立体匹配问题进行了研究。考虑水下环境存在折射,推导了适用于水下双目立体匹配的曲线约束,并作为结合色彩分割的 SAD 算法的搜索范围,利用实验图片验证了有效性。实验结果表明,与 SIFT 算法和空气中 SAD 算法相比,本文算法匹配精度有较大提高,成功将空气中匹配算法用于水下双目匹配,为水下图像的稠密匹配提出了可行方案。

## 参 考 文 献

- Sanchez-Ferreira C, Mori J Y, Llanos C H, Fortaleza, *et al.* Development of a stereo vision measurement architecture for an underwater robot[C]. IEEE 4th Latin American Symposium on Circuits and Systems, 2013: 1-4.
- Wu Y, Nian R, He B. 3D reconstruction model of underwater environment in stereo vision system[C]. IEEE Oceans San Diego, 2013: 1-4.
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- Zhu Shiping, Li Zheng. A stereo matching algorithm using improved gradient and adaptive window[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0110003.  
祝世平, 李 政. 基于改进梯度和自适应窗口的立体匹配算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0110003.
- Qin Guiqin, Zhang Yongsheng, Huang Guiping, *et al.* Underwater photography collinear measurement theory and camera calibration method[J]. Metering Sinica, 2014, 35(2): 133-138.  
钦桂勤, 张永生, 黄桂平, 等. 水下摄影测量共线理论与相机标定方法[J]. 计量学报, 2014, 35(2): 133-138.
- 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.
- Wang Zongyi. 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.
- 8 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.
- 9 Gedge J, Gong M, Yang Y. Refractive epipolar geometry for underwater stereo matching[C]. 2011 Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2011: 146-152
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Gong Wenbiao, Gu Guohua, Qian Weixian, *et al.* Stereomatching algorithm based on image segmentation and adaptive support weight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s210002.  
龚文彪, 顾国华, 钱惟贤, 等. 基于图像分割和自适应支撑权重的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s210002.
- 13 Ni Weiji, Xu Guili, Tian Yupeng, *et al.* Rapid stereo matching based on color segmentation and adaptive window[J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(1): 194-200.  
倪炜基, 徐贵力, 田裕鹏, 等. 基于色彩分割和自适应窗口的快速立体匹配[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(1): 194-200.
- 14 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1-3): 7-42.
- 15 Iqbal K, Odetayo M, James A, *et al.* Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method[C]. 2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, 2010: 1703-1709.
- 16 Gerrits M, Bekaert P. Local stereo matching with segmentation-based outlier rejection[C]. The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2006: 66-66.
- 17 Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 603-619.
- 18 Liang Fang. Research on stereo matching algorithm based on image segmentation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.  
梁 芳. 基于图像分割的立体匹配算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- 19 Gao Bo. Research on stereo matching algorithm based on color image segmentation[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.  
高 博. 基于彩色图像分割的立体匹配算法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- 20 Brown M Z, Burschka D, Hager G D. Advances in computational stereo[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(8): 993-1008.
- 21 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.
- 22 Li Guangle, Huang Wenyou, 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.