第 34 卷 第 2 期
2014 年 2 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 34, No. 2
February, 2014

水下环境中基于曲线约束的 SIFT 特征匹配算法研究

张 强[1] 郝 凯[1] 李海滨[1,2*]

([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尺度不变特征变换(SIFT)特征匹配算法处理水下图像误匹配率较高等问题，提出一种基于曲线约束的水下特征匹配算法。对双目摄像机进行标定获取相关参数，再获取参考图和待匹配图；利用 SIFT 算法对两幅图像进行匹配，同时利用由参考图提取的特征点推导出其在待匹配图上对应的曲线，将该曲线作为约束条件判定待匹配图上对应特征点是否在曲线上，从而剔除误匹配点，以达到提高精度的目的。实验结果表明，该算法优于 SIFT 算法，可以有效地剔除误匹配点，比 SIFT 算法匹配精度提高约 12%，解决了 SIFT 算法在水下双目立体匹配中误匹配率高的问题。

关键词 机器视觉；曲线约束；尺度不变特征变换；水下特征匹配

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0215003

Research on Scale Invariant Feature Transform Feature Matching Based on Underwater Curve Constraint

Zhang Qiang[1] Hao Kai[1] Li Haibin[1,2]

([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 the light of underwater binocular image matching cannot satisfy the epipolar constraint of air, and the mismatching rate of underwater image processed by the scale invariant feature transform (SIFT) algorithm is high, we put forward an underwater feature matching algorithm based on curve constraint. Binocular camera should be calibrated, and some relevant parameters are obtained, as well as the reference image and the image to be matched; the SIFT feature matching algorithm can help to match two images, at the same time, the feature points can be extracted from the reference image to deduce the corresponding curve on the image to be matched. The curve is used as a constraint to determine whether the corresponding feature is on it, thus mismatching points will be excluded to achieve a higher accuracy. The test results show that this algorithm is superior to SIFT algorithm and can help to exclude mismatching points effectively. The matching accuracy can increase by about 12%. The problem of SIFT algorithm's high rate of mismatching for underwater binocular stereo matching is solved.

Key words machine vision; curve constraint; scale invariant feature transform; underwater feature matching

OCIS codes 120.1089; 150.0155; 150.1135; 150.1488

1 引 言

近些年来，由于经济、军事等多方面的需要，海洋资源的利用与开发受到越来越多的国家的重视，特别是在海洋资源勘探、水底考古等[1-3]方面都需要利用水下探测机器人的视觉系统进行水下图像的获取、匹配以实现探测景物的三维重建。其中，双目视觉的立体匹配技术是机器人三维重建的基础，它是计算机视觉领域的难点技术之一。目前，双目视

收稿日期：2013-07-30；**收到修改稿日期**：2013-10-21

基金项目：河北省自然科学基金(D2013203363，D2014203153)、教育部博士点基金(20121333110011)

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

觉的立体匹配算法应用较为广泛的是基于区域和特征两种算法[4-5]，前者利用图像像素点的邻域信息进行计算，涉及到的信息量较少，计算复杂度也较低，该类算法引用了极线约束作为匹配过程中的约束条件，但是当此类算法应用于水下环境时，由于成像光线会经过不同的介质，光在传播过程中会发生折射，极线约束等约束条件将不再适用，使立体匹配难度增加[6]。文献[7]提出在特定的条件下，将水下图像转换为空气中图像，进而按照空气中的匹配方法进行匹配以提高匹配精度，但该方法对光线的折射问题进行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，该方法局限性强，应用范围有限。基于特征的匹配算法以尺度不变特征变换(SIFT)匹配算法[8]最为经典，它对噪声、光照不敏感，对图像的尺度缩放、旋转具有不变性并且匹配过程中不需要利用极线约束作为必要条件，它的这些特性使其适宜水下环境中的立体匹配，但该算法在处理水下图像时，由于折射、镜头畸变以及悬浮颗粒等因素的影响使其误匹配率较高。

针对上述问题，本文提出了基于曲线约束的水下特征匹配算法，利用 SIFT 算法对水下拍摄图像进行立体匹配；在水下不满足空气中极线约束的情况下，利用光线在多介质中传播的特性，推导出满足水下匹配的曲线约束条件，进而利用该约束条件对 SIFT 算法匹配出的特征点进行校验，剔除误匹配点，以达到提高精度的目的。

2　曲线约束的立体匹配算法

Lowe[8-9]提出的 SIFT 算法因具有较高的稳定性而被广泛应用于模式识别、机器人导航等领域。本文在 SIFT 特征匹配算法的基础上，结合了水下成像模型推导出的曲线约束，有效地剔除了误匹配点。

2.1　SIFT 特征匹配

SIFT 算法实施过程有以下几步。

1）特征点检测，分两个阶段：

第一阶段是初步定位特征点，即检测空间极值，初步确定特征点的位置和尺度。对输入图像 $I(x,y)$ 进行高斯滤波，有

$$L(x,y,\sigma)=G(x,y,\sigma)\times I(x,y),\tag{1}$$

$$G(x,y,\sigma)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp[-(x^2+y^2)/2\sigma^2],\tag{2}$$

式中 σ 称为尺度空间因子，代表高斯正态分布的方差，该值越小表明该图像平滑得越少，相应的尺度也就越小，L 代表图像的尺度空间。

构造高斯差分空间，有

$$D(x,y,\sigma)=[G(x,y,k\sigma)-G(x,y,\sigma)]\times I(x,y)=L(x,y,k\sigma)-L(x,y,\sigma).\tag{3}$$

(3)式即为高斯差(DoG)算子，表示两个不同尺度高斯函数的差分。在 DoG 尺度空间中，中心待检测点与其上下相邻尺度的 18 个点及同尺度 8 个点进行比较，从而保证在二维图像空间与尺度空间都检测到极值点。

第二阶段是精确定位特征点，通过 Taylor 展开式计算特征点的偏移量获得亚像素定位精度，并利用 Hessian 矩阵剔除边缘的不稳定点。

2）关键点的主方向的确定：

经过 1)，余下的点即为关键点。想要实现关键点描述子的旋转不变性，需给每个关键点添加一个方向。需将关键点邻域像素的梯度分布特性以及邻域像素的高斯权重考虑进来，从而确定该关键点的主方向。如点 (x,y) 处梯度的模值 $m(x,y)$ 和梯度的方向 $\theta(x,y)$ 分别为

$$m(x,y)=\sqrt{[L(x+1,y)-L(x-1,y)]^2+[L(x,y+1)-L(x,y-1)]^2},\tag{4}$$

$$\theta(x,y)=\arctan\{[L(x,y+1)-L(x,y-1)]/[L(x+1,y)-L(x-1,y)]\}.\tag{5}$$

3）关键点描述子的生成：

先将坐标轴旋转到关键点的主方向，再取以关键点为中心的 16 pixel×16 pixel 的邻域窗口，并计算该区域内所有像素点的梯度模值和梯度方向，最终形成 128 维的关键点描述子。若再对其进行向量的归一化操作[9]，则可进一步去除光照变化的影响。

4）特征描述子之间的匹配：

当左右两幅图像的 SIFT 特征向量生成后，通过比较特征向量间的欧式距离进行匹配，用欧式距离的最小值作为是否匹配成功的依据。

2.2　曲线约束的推导

针对在空气介质中双目视觉的特征匹配，很多学者引入极线约束来减小匹配过程中的搜索范围和提高匹配精度[10-11]；但针对水下图像，由于存在折

射、镜头畸变等因素的影响，极线约束已不再适用于该环境的匹配过程。所以，通过引入曲线约束来剔除误匹配点以增大匹配的准确度。以下为曲线约束的推导过程。

如图 1 所示，两摄像机的光心为 O_c、O'_c，两光心间基线距离为 a，在摄像机坐标系下，以 O_c 为原点在左像平面上任取一点 $P_l(x_0, y_0, z_0)$，反推至左折射面交于点 $Q(x_1, y_1, z_1)$，折射面下方介质为水，上方为空气，设相机焦距为 f，左相机光心到折射面的距离为 h，空气中的折射率为 n_1，水中的折射率为 n_2，$n = n_2/n_1$。根据相似三角形定理，可以得出 P_l 点在左折射面上所对应的折射点 Q 点坐标为

$$\begin{cases} x_1 = h\tan\alpha_1\sin\varphi = \dfrac{h}{f}x_0 \\ y_1 = h\tan\alpha_1\cos\varphi = \dfrac{h}{f}y_0 \\ z_1 = h \end{cases}. \tag{6}$$

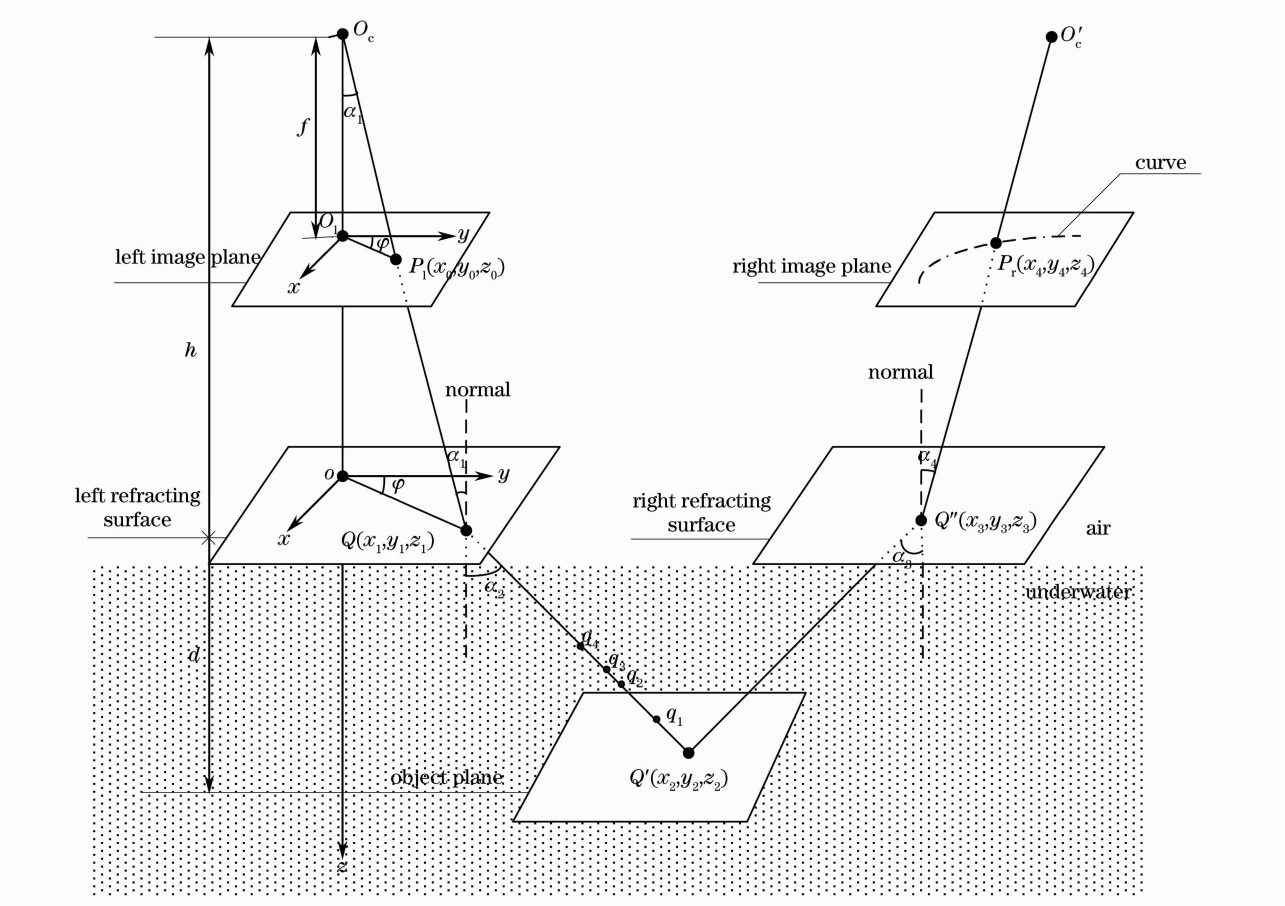

图 1　曲线推导图

Fig. 1　Curve derivation

通过左像平面、左折射面以及 Q、Q' 只能确定出水下实际物点在 QQ' 这条射线上，并不能得到其具体的空间位置。假定实际物点位置在 $Q'(x_2, y_2, z_2)$，设左折射面到物点平面的距离为 d，则物点 Q' 坐标为

$$\begin{cases} x_2 = (d\tan\alpha_2 + h\tan\alpha_1)\sin\varphi = \left[d \times \dfrac{y_0}{\sqrt{n^2(x_0^2+y_0^2+z_0^2)-(x_0^2+y_0^2)}}\right] + \dfrac{h}{f}x_0 \\ y_2 = (d\tan\alpha_2 + h\tan\alpha_1)\cos\varphi = d \times \dfrac{x_0}{\sqrt{n^2(x_0^2+y_0^2+z_0^2)-(x_0^2+y_0^2)}} + \dfrac{h}{f}y_0 \\ z_2 = d + h \end{cases}, \tag{7}$$

式中 z_0 为焦距 f，d 为一变量。

以 O_c 为原点建立坐标系，O'_c 坐标为 $(0, a, 0)$，设物点 Q' 经折射光线推至右折射面交该折射面于 $Q''(x_3, y_3, z_3)$ 点，根据折射定理，有

$$\tan^2\alpha_3 = \frac{\tan^2\alpha_4}{n^2(1+\tan^2\alpha_4)-\tan^2\alpha_4}, \tag{8}$$

$$\tan^2\alpha_4 = \frac{x_3^2+(y_3-a)^2}{h^2}, \tag{9}$$

即

$$\frac{(x_3-x_2)^2+(y_3-y_2)^2}{h^2} = \frac{x_3^2+(y_3-a)^2}{n^2h^2+(n^2-1)[x_3+(y_3-a)^2]}. \tag{10}$$

又因为 Q'、Q''、O_c' 三点共面，则该平面方程为

$$[h(y_3-y_2)-z(y_3-a)]x+[h(x_3-x_2)+x_3d](y-a)+[x_2y_3-x_3y_2+a(x_3-x_2)]z=0. \tag{11}$$

将 Q'' 点代入(11)式，得

$$[h(y_3-y_2)-z(y_3-a)]x_3+[h(x_3-x_2)+x_3d](y_3-a)+[x_2y_3-x_3y_2+a(x_3-x_2)]h=0. \tag{12}$$

由(10)、(12)式解出 Q'' 点的坐标。

所以，直线 $Q'Q''$ 方程为

$$\frac{x}{x_3}=\frac{y-a}{y_3-a}=\frac{z}{h}. \tag{13}$$

设物点映射到右像平面上的点为 $P_r(x_4, y_4, z_4)$，当 $z=f$ 时，P_r 点坐标为

$$\begin{cases} x_4 = \dfrac{f}{h}x_3 \\ y_4 = \dfrac{f}{h}(y_3-a)+a \\ z_4 = f \end{cases}. \tag{14}$$

(12)式中，因为 d 为一变量，所以不同的 d 值就有不同的 Q'' 点坐标，如图1所示，若物点取射线 QQ' 上的 q_1, q_2, q_3, q_4 等不同的点，就会得到不同的 P_r 点坐标，在右像平面上，利用这些不同的像点，便可以拟合出一条曲线。这条曲线就如同在空气中匹配时的极线。文中将此极线约束命名为水下环境中的曲线约束。

2.3　匹配算法实现

SIFT 算法在匹配阶段采用最近邻与次近邻的比值作为匹配阈值，因此容易产生误匹配，若处理存在折射等因素影响的水下图像时，误匹配率会更高。基于此，本文将前一节推导的曲线约束特性加入到匹配算法中，以提高匹配的精度。

算法流程如下。

1）特征点提取：

① 对左右图像进行高斯滤波，构造高斯差分尺度空间，初步检测特征点；

② 去除初步检测到的特征点中的低对比度点和边缘不稳定点，保证匹配的抗噪声能力和匹配的稳定性；

③ 确定关键点的主方向，利用 Taylor 展开式与 Hessian 矩阵计算其梯度模值与梯度方向；

④ 生成关键点描述子，并对其进行归一化处理，使其具有对光照变化不敏感的特性。

2）特征点匹配：

① 利用欧式距离作为左右图像特征向量间相似性度量函数进行匹配；

② 用最近邻搜索法寻找最近邻与次近邻，并令最近邻与次近邻的比值小于等于 ratio，此处 ratio 选为 0.7，获取左右图像的特征匹配对。

3）根据曲线约束剔除误匹配对：

① 将 1)提取出的参考图(左图)的特征点，利用曲线约束求取每一特征点对应在待匹配图(右图)上的曲线；

② 利用参考图上的每一特征点对应的曲线，剔

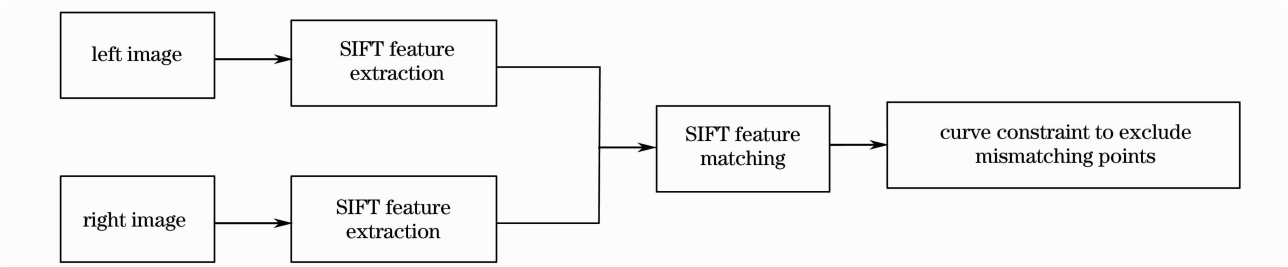

图 2　算法流程图

Fig. 2　Flow chart of proposed algrithm

除 2）中的误匹配，因为存在误差，正确的匹配点可能不会恰好落在曲线上，在此定义一个阈值 τ，令 $\tau=\frac{\mathrm{Me}}{\mathrm{Max}}$，其中 Me 为待匹配图上所有不在曲线上的特征点到对应曲线距离集合的 80%分位数，Max 为不在曲线上的点到曲线的距离的最大值。当 $\frac{\mathrm{dis}(i)}{\mathrm{Max}}<\tau$ 时，即认为是正确的匹配点，其中 $\mathrm{dis}(i)$ 为特征点 i 到对应曲线的距离。

算法流程如图 2 所示。

3　实验分析

3.1　实验的硬件设备

实验的硬件设备是本课题组设计的双目视觉支架，维视公司的 MV-1300FC CCD 工业相机两台，两张 MV-1394 图像采集卡，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 3 所示。

3.2　实验结果

实验在 Matlab R2007a 环境下运行，利用张正友标定法对两台摄像机进行了标定，获取了摄像机的内、外参数。标定得到的相关参数如表 1 所示。

表中（f_x，f_y）为相机焦距，（u_0，v_0）为主点坐标，k_c 代表径向畸变参数，$\boldsymbol{r}$ 代表旋转矩阵，$\boldsymbol{T}$ 代表平移矩阵。在此基础上，利用粒子群优化算法标定出折射平面法向量 $\boldsymbol{n}_\pi$ 和光心到折射平面距离 d[12]。

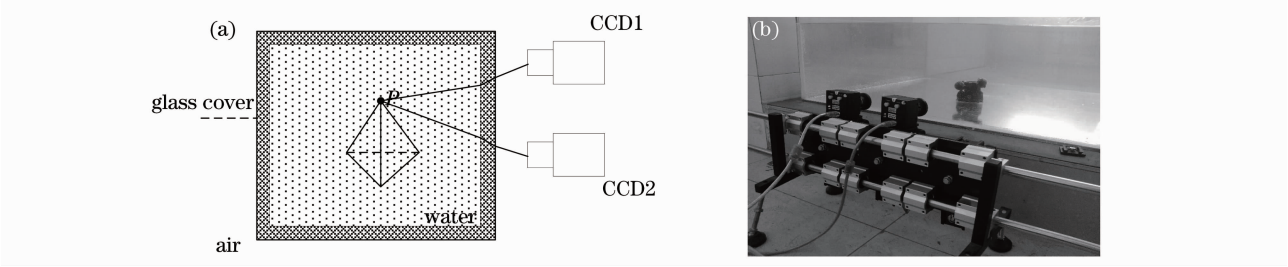

图 3　(a)实验示意图；(b)实验平台

Fig. 3　(a) Experimental schematic; (b) platform of laboratory equipment

表 1　摄像机参数

Table 1　Camera parameters

	Left camera	Right camera
(f_x, f_y)	(973.8857, 978.3486)	(970.9811, 974.3604)
(u_0, v_0)	(625.791, 456.860)	(594.090, 487.504)
k_c	(−0.137, 0.1859, 0.0001, 0.0006, 0)	(−0.1277, 0.1655, −0.0004, −0.0008, 0)
$\boldsymbol{r}$	(2.17, 2.03, 0.01)	(−2.30, −2.14, 0.21)
$\boldsymbol{T}$	(−231.19, 31.42, 532.73)	(34.35, −6.89, 555.11)
$\boldsymbol{n}_\pi$	(−0.041, 0.050, 0.995)	(−0.054, 0.021, 0.971)
d /cm	19.62	19.23

利用标定出的参数及光线在多介质中的传播特性，推导出了参考图中提取出的特征点对应到右图上的曲线。在参考图像中，任取两特征点的齐次坐标(391,588)和(45,78)便可以求得对应的曲线，如图 4 所示为水下曲线约束与空气中的极线约束的对比图，曲线 a、c 为由特征点所求的水下环境的曲线，

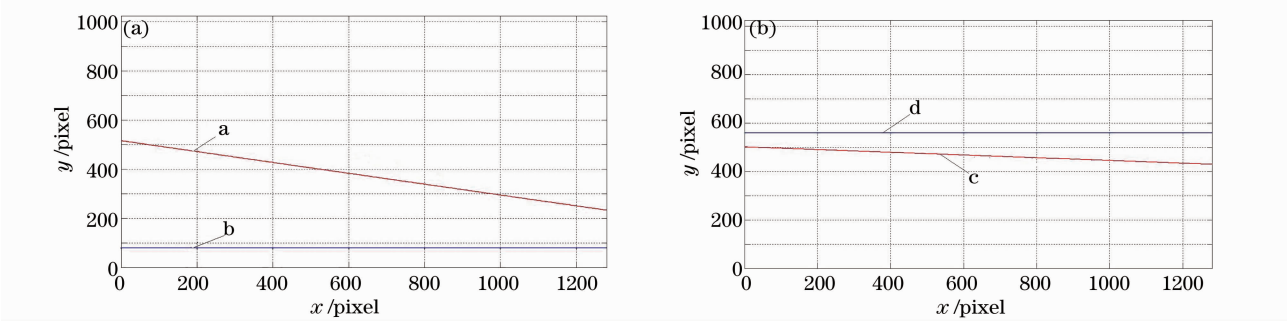

图 4　任意两点的极、曲线对比。(a) (45,78)；(b) (391,588)

Fig. 4　Contrast of epipolar and curve. (a) (45,78); (b) (391,588)

极线 b、d 为该特征点若在空气中时对应的极线，从而证明了水下图像已经不满足极线约束。

利用所获取的左右图像进行分析是为了证明本文算法的可行性。实验展示了利用 SIFT 算法与本文算法对相同场景图像处理的效果图，两组图片的大小均为 640 pixel×480 pixel。图 5 是将一个果汁盒与一个魔方置于场景中且果汁盒处于倾斜状态；图 6 为两个魔方并排放置且果汁盒竖直放在魔方上。通过两组实验的图(a)和图(b)，可看出经过曲线约束后一些误匹配点被剔除。

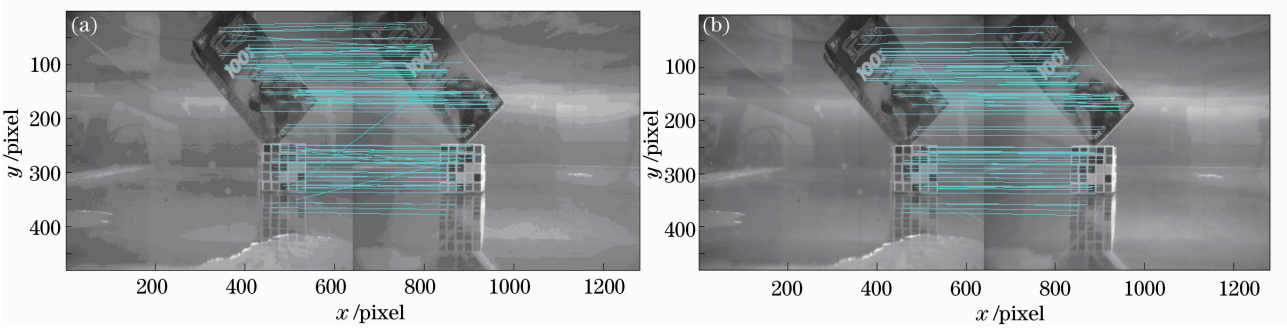

图 5　(a) SIFT 算法；(b)本文算法

Fig. 5　(a) SIFT algorithm; (b) our algorithm

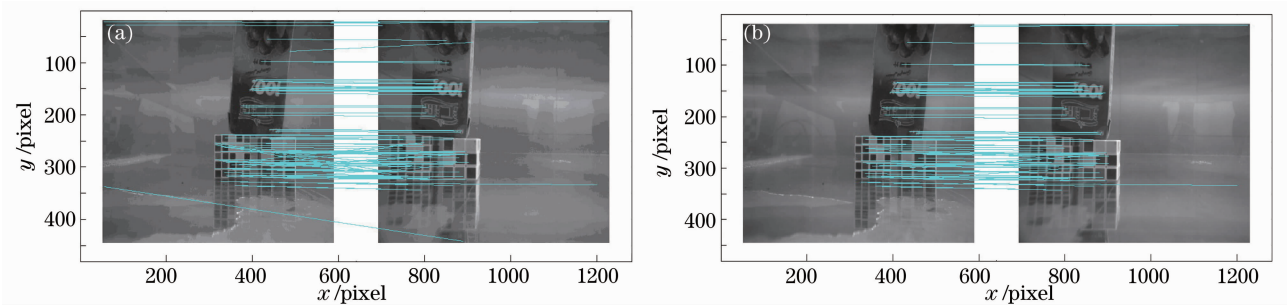

图 6　(a) SIFT 算法；(b)本文算法

Fig. 6　(a) SIFT algorithm; (b) our algorithm

3.3　实验数据分析

经过计算及统计分析，图 5 对应的阈值 τ 为 0.825，图 6 对应的阈值 τ 为 0.95。由表 2 可知，两组图像得到的总匹配对数分别为 113 对和 108 对，其中 SIFT 算法的误匹配对数分别为 35 对和 31 对，匹配精度分别为 69.0%和 71.3%。本文算法对 SIFT 算法进行了改进，误匹配对数分别为 22 对和 16 对，匹配精度分别为 80.5%和 85.2%。两组图像利用曲线约束分别剔除了 13 对和 15 对误匹配点，匹配精度分别提高了 11.5%和 13.9%。

表 2　实验数据对比

Table 2　Comparison of experiment data

Algorithm	Grade	Fig. 5	Fig. 6
SIFT algorithm	Total number of matched pairs	113	108
	Number of mismatched pairs	35	31
	Accuracy of matching /%	69.0	71.3
Our algorithm	Total number of matched pairs	113	108
	Number of mismatched pairs	22	16
	Excluded number of mismatched pairs	13	15
	Accuracy of matching /%	80.5	85.2

4　结　论

对水下双目视觉的立体匹配问题进行了研究，在考虑折射、镜头畸变等因素的情况下，提出了基于曲线约束的 SIFT 立体匹配算法，利用标定得到的摄像机参数、光的折射原理及光的可逆性原理推导出了曲线约束理论，并与 SIFT 算法成功结合。实验结果表明，在 SIFT 立体匹配算法中加入曲线约

束可以剔除掉水下双目图像的误匹配点，有效解决了水下图像因折射、镜头畸变以及水中悬浮颗粒存在等误差因素造成的匹配精度低、局限性强等问题，为水下图像的立体匹配及水下场景的三维重建提出了切实可行的方案。

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]. Proc. OCEANS'07. Europe. 2007. 1－6.

2 Arnaud Meline, Jean Triboulet, Bruno Jouvencel. A camcorder for 3D underwater reconstruction [C]. Proc. OCEANS' 10. Seattle Etats-Unis, 2010.

3 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.

4 Bian Jilong, Men Chaoguang, Li Xiang. A fast stereo matching method based on small baseline [J]. J Electronics & Information Technology, 2012, 34(3): 517－522.
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.

5 D Scharstein, R Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithm [J]. International J Computer Vision, 2002, 47(1－3): 7－42.

6 Jason Gedge. Underwater Stereo Matching and Its Calibration [D]. Edmonton: University of Alberta, 2011. 37－56.

7 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.

8 David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International J Computer Vision, 2004, 60(2): 91－110.

9 David G Lowe. Object recognition from local scale-invariant features [C]. International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece, 1999. 1150－1157.

10 Li Jinjun, Zhao Hong. Three-dimentional vision measuring technology based on multi-modal monogenic feature detecting and matching [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712007.
李进军，赵　宏. 一种基于多模式单演特征检测与匹配的三维视觉测量方法[J]. 光学学报，2011，31(7)：0712007.

11 Jiang Hongzhi, Zhao Huijie, Liang Xiaoyue, *et al*.. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2520－2525.
姜宏志，赵慧洁，梁宵月，等. 基于极线校正的快速相位立体匹配[J]. 光学 精密工程，2011，19(10)：2520－2525.

12 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.

栏目编辑：李志兰