

DOI:10.16136/j.joel.2019.09.0052

# 基于 Census 变换和多扫描线优化的半全局立体匹配算法

朱荣华<sup>1</sup>, 葛广英<sup>1</sup>, 张广世<sup>1</sup>, 申哲<sup>1</sup>, 孙群<sup>2\*</sup>

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252000; 2. 聊城大学 机械与汽车工程学院, 山东 聊城 252000)

开门见山, 针对什么问题, 提出什么算法 (论文题目)

描述算法的流程

**摘要:** 为了解决局部匹配算法误匹配率高的问题, 提出一种基于 AD-Census 变换和多扫描线优化的半全局匹配算法。首先, 通过绝对差 AD 算法与 Census 变换相结合作为相似性度量函数计算初始匹配代价, 并构建动态交叉域聚合匹配代价; 然后在代价聚合计算阶段, 将一维动态规划的代价聚合推广到多扫描线优化, 利用上下左右四个方向逐次扫描进行匹配代价聚合的计算, 并引入正则化约束以确保匹配代价聚合的一致性, 大大减少初始代价中的匹配异常点; 最后, 运用简单高效的胜者为王策略选出像素点在代价聚合最小时对应的视差, 并在视差细化阶段, 采用左右一致性检测和抛物线拟合方法进行后续处理以提高立体匹配的正确率。实验结果证明, 该算法可获得高匹配率的视差图并且耗时较少。

**关键词:** 半全局立体匹配; AD-Census 变换; 匹配代价; 动态交叉域; 正则化; 多扫描线优化; 视差图

**中图分类号:** TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2019)09-0978-07

用事实说明算法的有效性

## Semi-global stereo matching algorithm based on AD-Census transform and multi-scan line optimization

ZHU Rong-hua<sup>1</sup>, GE Guang-ying<sup>1</sup>, ZHANG Guang-shi<sup>1</sup>, SHEN Zhe<sup>1</sup>, SUN Qun<sup>2\*</sup>

(1. School of physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high mismatch rate of local matching algorithm, a semi-global matching algorithm based on AD-Census transform and multi-scan line optimization is proposed. Firstly, the initial matching cost is calculated by combining the absolute difference AD algorithm with the Census transform as the similarity measure function. At the same time, building dynamic cross-domain is to aggregate matching cost. Secondly, matching cost aggregating for one-dimensional dynamic programming is extended to the multi-scan line optimization. The calculation of matching cost aggregation is performed by successive scanning in four directions of up, down, left, and right, and introducing a regularization constraint algorithm is to ensure consistency of matching cost aggregation, which can reduce the a large number of matching abnormal points of the initial matching cost in the cost aggregation calculation stage. Finally, the Winner-Takes-All algorithm is used to select the parallax corresponding to the pixel when the cost aggregation is minimal, and the left and right consistency detection algorithm and parabola fitting algorithm are used for subsequent processing to improve the correct rate of stereo matching in the parallax refinement stage. Experimental results show that the algorithm proposed in this paper can obtain dense disparity map with high matching rate and less time consuming.

**Key words:** semi-global stereo matching; AD-Census transform; matching cost; dynamic cross-domain; regularization; multi-scan line optimization; disparity map

\* E-mail: 1045104740@qq.com

收稿日期: 2019-03-19 修订日期: 2019-06-17

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金计划资助项目

## 1 引言

近年来,双目立体视觉一直是机器视觉研究领域中的热点,立体视觉技术被广泛应用于移动机器人<sup>[1]</sup>、无人机视觉导航<sup>[6]</sup>、3D-SLAM 地图重建和三维物体建模<sup>[7]</sup>等众多领域。其中立体匹配是双目视觉最重要也是最难的一环<sup>[8]</sup>,从立体图像对中获取稠密视差图的质量直接影响着空间目标三维信息恢复的精确度,获取视差图的速度对重建物体的三维轮廓及三维表面也具有重要意义,因此如何快速的获取高匹配率稠密视差图是双目视觉领域的研究难点。到目前为止,立体匹配方法大致可分为三类:全局立体匹配,传统的局部匹配以及二者相结合形成的半全局立体匹配。全局匹配算法试图求解全局内的最优解,主要有动态规划(DP)<sup>[1]</sup>、置信度传播算法(BP)<sup>[8]</sup>、图分割法(GC)<sup>[10]</sup>和斜面参数优化算法<sup>[11]</sup>等,全局算法虽然在遮挡区域和弱纹理区域情况下能够获取高质量的视差图,但是由于参数设置复杂度过高、计算效率低,难以满足实时性要求。常见的局部立体算法有归一化互相关算法(NCC)<sup>[12]</sup>、平方差之和算法(SSD)和绝对误差和算法(SAD),由于局部匹配算法仅考虑匹配点邻域内像素对匹配的影响,通过比较待匹配点局部性进行匹配,十分依赖于匹配窗口的合理性,使得在噪声和光照变化等复杂干扰因素的影响下极易产生误匹配,因此对于弱纹理区域和视差不连续区域处理一直是局部立体匹配算法的难点。

综合考虑当前立体匹配算法的优缺点,本文提出一种基于 AD-Census 变换和多扫描线优化的立体匹配算法。该算法通过构建动态交叉域,其支持窗口区域不是矩形而是会根据匹配点邻域的灰度值而改变,并利用局部像素点附近灰度值的差异性,进一步通过绝对差 AD 与 Census 变换相结合作为目标函数完成图像中所有像素点初始匹配代价的计算;将一维动态规划的聚合值计算推广到 4 个方向的多扫描线优化,即采用多扫描线优化算法进行匹配代价聚合,并引入正则化约束以确保聚合代价的一致性,进一步消除和纠正初始代价的匹配异常点,降低误匹配率;最后通过胜者为王策略取得初始视差图,利用左右一致性检测方法消除遮挡点影响,运用抛物线拟合方法进行视差细化以获得亚像素级的稠密视差图。经过大量实验验证,该算法实现简单高效,在噪声、视差不连续等复杂情形下能获得高匹配率的视差图。

## 2 算法原理

半全局立体匹配算法(semi-global stereo matching)<sup>[12]</sup>是全局算法和局部算法的一种结合,利用局部匹配的思想计算初始匹配代价,再利用全局匹配的动态规划思想从不同方向的扫描线上进行匹配代价的聚合,选择最小聚合代价得到最终的视差<sup>[14]</sup>。

### 2.1 匹配代价计算

Census 变换是一种非参数的局部变换,通过对局部区域进行编码,能较好地检测出图像中的局部结构特征。基本实现原理:在参考图像中定义一个以像素  $p$  为中心的矩形窗口  $W(p)$ ,并设  $p$  为参考像素,在矩形窗口中将中心像素  $p$  外的每一点都与  $p$  进行灰度值大小的比较,并规定灰度值小于或等于中心像素  $p$  的像素记为 0,大于中心点灰度值的像素记为 1。最后将得到的 1/0 字节按位连接成序列,作为该中心像素  $p$  的 Census 序列。Census 变换的计算公式为:

$$\begin{cases} C_{cen}(p) = q \in N^p \otimes \zeta[I(p), I(q)] \\ C(p, d) = C_{cen}^L(p) \oplus C_{cen}^R(p-d) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\zeta[I(p), I(q)] = \begin{cases} 0, I(p) > I(q) \\ 1, I(p) < I(q) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p$  是中心像素,  $q$  是窗口中心像素以外的其他像素,  $I(*)$  代表像素点  $*$  处的灰度值;符号  $\otimes$  表示按位连接,  $N^p$  代表支持窗口内  $p$  的邻域;  $C(p, d)$  表示参考图像像素  $p$  在视差  $d$  下的初始匹配代价,  $\oplus$  表示求汉明距离,即将左右视图中相应两参考点的 Census 序列进行逐位异或运算,计算结果中 1 的个数作为像素点匹配程度,汉明值越小相似度越高。实现过程如图 1 所示。

由图 1 可知, Census 变换是单一的用 0/1 位字符串表示邻域窗口中两像素点之间的灰度差异,通过窗口强度值的相对顺序描述中心点,而不是强度值本身,在一定程度上对重复区域和纹理丰富区域匹配性能较低。所以在构建匹配代价目标函数时,以 Census 变换作为相似性度量不能很好的表征匹配相似性。

针对 Census 变换算法存在的缺陷,将绝对差 AD 结合 Census 变换作为计算初始代价的相似性度量。AD 对差异性比较敏感,在复杂纹理区域能够反应像素点的灰度变化,具有良好的匹配效果。所以为了提高算法稳定性,将 AD 算法、Census 变换产生

的代价相结合作为计算初始代价的相似性度量,其

最终的匹配代价计算模型如下:

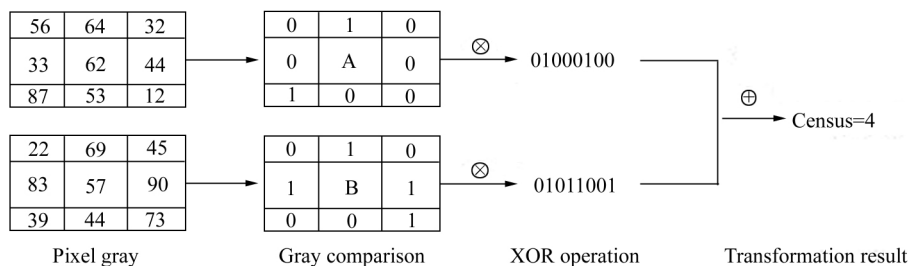


图 1 Census 变换示意图

Fig. 1 Census transformation diagram

$$\begin{cases} C_{AD}(p, d) = \frac{1}{3} \sum_{i=R, G, B} |I_i^{Left}(p) - I_i^{Right}(pd)| \\ C(p, d) = \rho(C_{Census}(p, d), \lambda_{Census}) + \rho(C_{AD}(p, d), \lambda_{AD}) \\ \rho(c, \lambda) = 1 - \exp(-\frac{c}{\lambda}) \end{cases} \quad (3)$$

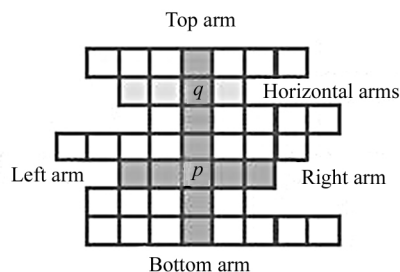
式中,  $C_{AD}(p, d)$  表示在左右图像 RGB 三通道分别对两个对应像素求差的绝对值, 再对三个绝对值求平均;  $I(\ast)$  表示第  $\ast$  个通道, 公式 (3) 后两个式子定义了 AD-Census 匹配代价。  $C(p, d)$  为 AD-Census 变换的相似性度量函数;  $\lambda_{Census}$ 、 $\lambda_{AD}$  分别为 Census、AD 方法对匹配成本计算的影响参数;  $\rho(c, \lambda)$  将 AD 和 Census 代价归一化, 是参数  $c$  的鲁棒函数, 使得匹配代价计算结果范围在  $[0, 1]$ , 并通过参数  $\lambda$  来调节 AD 与 Census 两种方法对匹配成本计算的影响。

## 2.2 支持域获取

由于代价计算阶段只考虑了单像素局部的相关性, 简单的一对一像素的匹配代价准确度不高且对噪声非常敏感, 无法直接用来计算最优视差, 所以有必要在像素点的周围建立一个窗口, 让像素块和像素块之间进行比较。根据支持域具有相似视差的原则, 本文采用动态交叉域算法, 其支持窗口区域不是矩形而是会根据匹配点邻域的灰度值而改变, 如图 2 所示, 该算法通过计算每对像素的灰度变化和空间距离, 可得到像素点分别沿着上下左右 4 个方向延伸的像素数。设一像素点  $p(x, y)$ , 其动态支持域  $U_p$  的构建方式如下:

$$\begin{cases} |I(x, y) - I(x_i, y_i)| < \tau_1, |I(x_i, y_i) - I(x_i + 1, y_i)| < \tau_1 \\ D(p, p_i) < l_1 \\ |I(x, y) - I(x_i, y_i)| < \tau_2, |I(x_i, y_i) - I(x_i + 1, y_i)| < \tau_2 \\ l_2 < D(p, p_i) < l_1 \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 第一个条件表示  $p$  与  $p_i$ 、 $p$  与其相邻前一个像素之间的灰度变化要小于阈值  $\tau_1$ ; 第二个条件表示  $p$  与  $p_i$  的臂长要小于最大臂长  $l_1$ ; 第三个条件表示  $p$  与  $p_i$ 、 $p$  与其相邻前一个像素之间的灰度变化要小于阈值  $\tau_2$ , 最后一个条件表示在臂长计算过程中,  $p$  与  $p_i$  的臂长要小于最大臂长  $l_1$  且大于臂长  $l_2$ 。



考虑左右两图, 则最终的联合支持区域为:  $U_d(p) = \{q | q \in U^{Left}(p), q - d \in U^{Right}(p - d)\}$ 。

## 2.3 基于多扫描线优化的代价聚合

代价聚合是半全局算法立体匹配过程最重要的一个步骤, 代价聚合策略的好坏直接关系到最终视差图的质量。多扫描线优化方法改进的是 Semi-global Matching<sup>[16]</sup> 的能量函数求解方法, 属于一种半全局能量最优化算法, 通过最小化自身的能量方程来求得对应像素的视差。定义能量函数  $E(D)$  如下:

$$E(D) = \sum_{q \in N^p} C(p, D_p) + \sum_{q \in N^p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N^p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (5)$$

式中: 第一项是数据项,  $C(p, D_p)$  表示 AD-Census 相似性度量函数计算得到的匹配代价; 后两项是正则化约束 (也称平滑项), 指的是当前像素  $p$  和其邻域内所有像素  $q$  之间的约束: 若  $p$  和  $q$  视差变化量为 1, 给定惩罚因子  $P_1$  (常量), 若大于 1, 那么惩罚  $P_2$ ,

且保证  $P_2 > P_1$ , 即所谓的机器学习中常用算法——正则化约束;  $T[\cdot]$  为截断函数, 当括号里的条件为真时,  $T[\cdot]$  为 1, 否则为 0。

如果在 2D 图像上直接利用动态规划算法求解  $E(D)$  是不可能的, 需要沿着每一行或者每一列求解, 但是又完全考虑不到行间的约束, 求优效果很差。因此, 本文采用多扫描线优化算法, 运用分而治之的方法, 使用一维路径聚合的方式来近似二维最优, 进一步沿着一圈多个方向进行匹配代价的聚合。根据实际效果本实验选用 4 条路径, 即通过上下左右 4 个扫描方向逐次优化进行匹配代价的聚合, 得到像素点  $p$  在视差  $d$  下最终的代价聚合值  $S(p, d)$ , 即:

$$S(p, d) = \frac{1}{4} \sum_r C_r(p, d) \quad (6)$$

多扫描线优化方法能够将支持域窗口像素的代价总和作为中心像素的代价, 使聚合后的代价值相比单一像素代价匹配的结果精度更高, 能够更准确的反应像素之间的相关性。

#### 2.4 视差选择与细化

在视差选择阶段, 采用胜者为王 (Winner-Takes-All)<sup>[17]</sup> 策略选出代价聚合最小值对应的视差作为初始视差, 进一步获得初始视差图。图像像素点的视

差获取公式为:

$$d_p = \arg \min_{0 \leq d \leq d_{\max}} S(p, d) \quad (7)$$

式中  $d_p$  表示代价聚合值最小时对应的视差;  $d_{\max}$  表示最大视差范围。通过视差选择得到的视差  $d_p$  是整数级的, 所以在视差细化阶段, 通过抛物线拟合法<sup>[18]</sup> 达到亚像素分辨率。由于初始视差图存在许多误匹配点和无效视差, 为进一步提高匹配精度, 采用左右一致性检测<sup>[19]</sup> 和深度不连续区域边缘修正法<sup>[20]</sup> 等优化策略, 最终可获得高匹配率的稠密视差图。

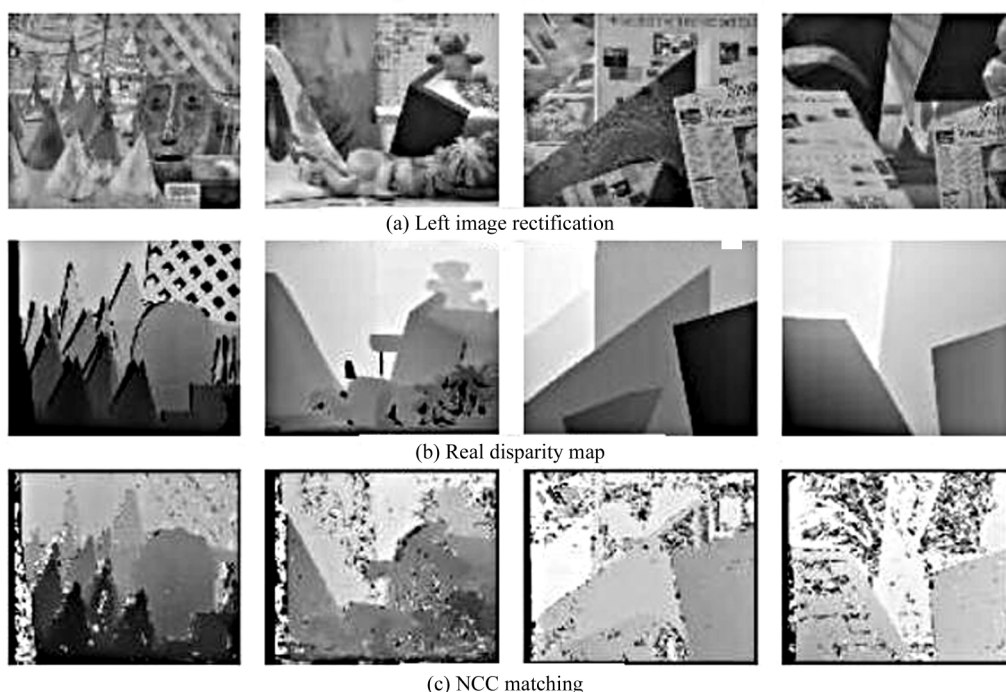
### 3 实验结果与分析

为验证本文算法的有效性, 采用 Middlebury Stereo Dataset2<sup>[21]</sup> 立体评估测试平台提供的标准立体图像进行实验, 表 1 给出了各测试图像的大小及视差搜索范围。实验验证利用的计算机操作系统和配置分别为 Windows7、Intel Core i3-3120M CPU、2.50 GHz、4 GB 内存; 利用的软件环境为 HALCON17.0。将本文算法分别与传统的基于 NCC 灰度相关匹配方法和多重网格匹配方法比较, 具体匹配视差效果图如图 2 所示。表 2 和表 3 为三种不同算法误匹配率和运算时间的比较结果。

表 1 测试图像的大小及视差范围

Tab. 1 The size of test image and their disparity ranges

Parameter	Cones	Teddy	Poster	Venus
Image Size	450×375	450×375	435×383	434×383
Disparity range	[-54, -8]	[-53, -12]	[-41, -6]	[-40, -6]



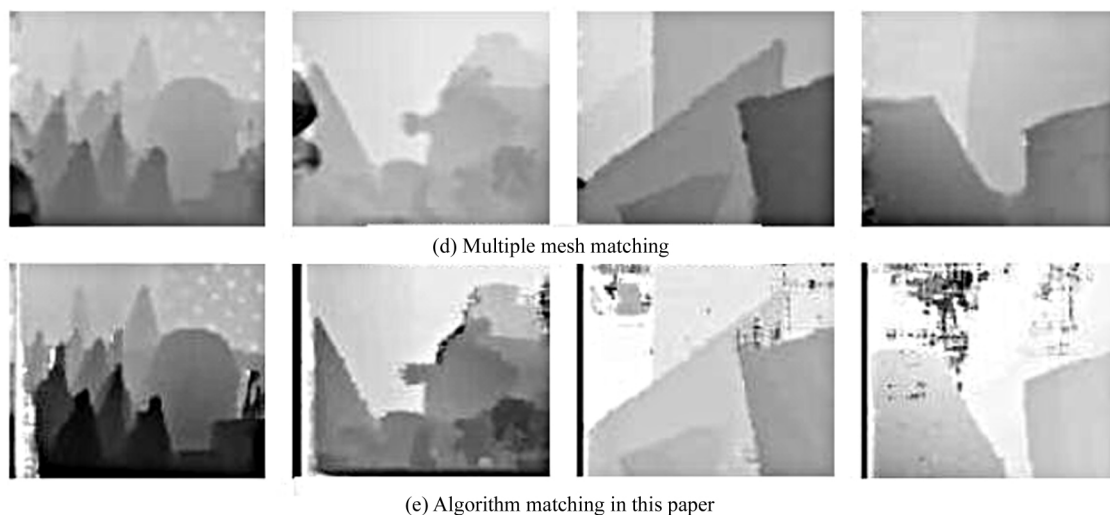


图 2 三种算法的视差匹配结果

Fig. 2 Disparity matching results of three algorithms

表 2 三种算法误匹配率的结果比较

Tab. 2 Comparison of results of mismatch rate between three algorithms (%)

Algorithm	Cones	Teddy	Poster	Venus
NCC method	20.41	33.74	30.21	38.73
Multi-grid method	10.79	23.75	18.76	26.64
Algorithm of this paper	4.52	10.86	10.07	11.90

表 3 运算时间比较

Tab. 3 Comparison of computing time (s)

Algorithm	Cones	Teddy	Poster	Venus
NCC method	0.28	0.19	0.41	0.12
Multi-grid method	0.98	0.81	0.70	0.75
Algorithm of this paper	0.51	0.51	0.45	0.50

由表 2 和图 2 可以看出,采用本文算法进行匹配具有较高的正确率,且误匹配率相较于传统的相关性匹配方法和多重网格匹配方法有所提高。基于灰度相关的立体匹配在纹理丰富的区域重建效果较好,对于没有足够纹理的区域不能重建,如图 2 所示,出现了大量白色区域匹配失败的点;虽然多重网格匹配方法可以为不包含纹理的图像部分重建,分辨率高于相关性匹配,但是仅对灰度值变化部分不变,且从图 2(c)明显看出对图像边缘的重建存在严重模糊。相较于对比算法,本文基于多扫描线优化的半全局匹配算法,在弱纹理区域可获得较高精度的重建,白色区域的错误匹配点明显减少且视差图变的平滑,并保留了多重网格算法模糊不清的视差

不连续性,对边缘的重建有一定改善,可取得较高精度的稠密视差图。

由表 3 可看出,本文算法在匹配运行时间上优于多重网格算法,但是相比相关性匹配算法运行时间消耗上相对较高,还需进一步研究针对性的有效方法以提高匹配的的运行时间,总体上本文算法能够较好的兼顾实时性与视差精度。

此外,为体现算法的实用性,本文通过采集大量的实拍图像进行了验证。由于实拍图像不满足平行立体视觉原理和外极线约束条件,所以需事先采用张正友标定法<sup>[21]</sup>实现双目系统标定。又因为采集的实拍图像中存在噪声、光照变化等复杂干扰的因素更多,需要对实拍图像进行预处理,进一步将实拍图像校正为标准的立体图像对。通过整个算法流程最后获取视差图的总体效果也很好,在验证过程中,其中三组实拍图像对的校正结果图以及视差图如图 3 所示,获取视差图的运行时间分别为 3.814 s、4.172 s 和 4.548 s。

## 4 结 论

本文提出的基于 AD-Census 变换和多扫描线优化的半全局匹配算法,是全局算法和局部算法的一种结合。先是利用局部思想,采用 AD-Census 变换完成图像中各像素点初始匹配代价的计算,通过确定匹配过程的搜索区域进行匹配代价的聚合。然后再结合全局匹配的动态规划思想,在一维平滑约束的最佳路径搜索基础上,从不同方向的扫描线上进

行代价聚合值的优化,适合并行运算且显著降低了运算量,提高了运算速度。同时,考虑到像素之间的制约关系,图像会受到光照、噪声等因素的影响,半全局算法引进正则化约束使得视差图平滑且边缘信息保持的更好。最后在视差选择阶段,采用误匹配点检测、抛物线拟合等优化方法得到亚像素级的稠

密视差图。实验结果表明,基于 HALCON 的双目视觉技术,整个流程通过软件算法能得到高匹配率的稠密视差图,且对噪声和光照变化等干扰具有较好的鲁棒性。本文算法有效的实现了对于视差精度的提升,直接影响着对目标物体深度信息获取的精确度,并对场景的三维重建技术具有一定的现实意义。

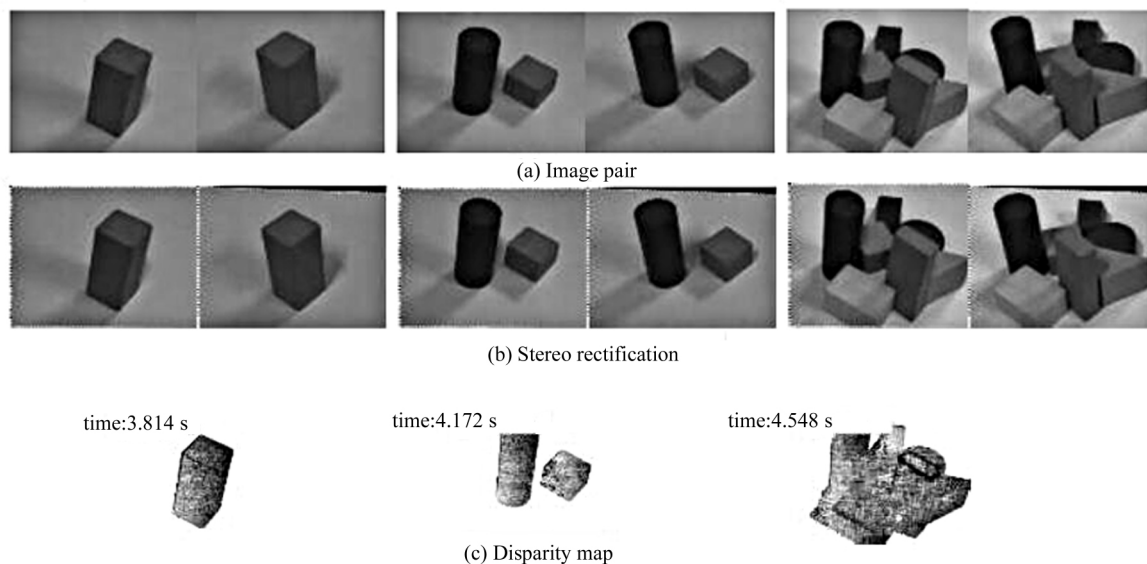


图3 实拍图像的匹配结果

Fig. 3 Matching result of the actual captured image

## 参考文献:

- [1] YU Duo, WANG Yao-nan, MAO Jian-xu, et al. Vision-based object tracking method of mobile robot[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, **40**(1): 227-235.  
余铎, 王耀南, 毛建旭, 等. 基于视觉的移动机器人目标跟踪方法[J]. 光电子·激光, 2019, **40**(1): 227-235.
- [2] LIU Ai-chao, SHE Hao-ping, YANG Qin-ning, et al. Visual navigation method in drone aerial docking[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, **6**(1): 28-34.  
刘爱超, 余浩平, 杨钦宁, 等. 无人机空中对接中的视觉导航方法[J]. 导航定位与授时, 2019, **6**(1): 28-34.
- [3] ZHANG Xiao-dong, WU Bin. Research on three-dimensional information acquisition technology of small field using integral imaging[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, **28**(11): 1240-1245.  
张晓东, 吴斌. 小视场集成成像三维信息获取技术研究[J]. 光电子·激光, 2017, **28**(11): 1240-1245.
- [4] LI Su-mei, LI Yong-da, ZHU Dan. Research on the disparity range of stereo image comfort based on depth perception and subjective evaluation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, **28**(9): 1045-1054.  
李素梅, 李永达, 朱丹. 基于深度感知和主观评价的影响
- [5] WANG Yun-feng, WU Wei, Yu Xiao-liang, et al. A stereo matching system with the adaptive weight AD-Census[J]. advanced engineering sciences, 2018, **50**(4): 153-160.  
王云峰, 吴炜, 余小亮, 等. 基于自适应权重 AD-Census 变换的双目立体匹配[J]. 工程科学与技术, 2018, **50**(4): 153-160.
- [6] XIAO Jin-sheng, TIAN Hong, ZOU Wen-tao, et al. Stereo matching based on convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2018, **38**(8): 179-185.  
肖进胜, 田红, 邹文涛, 等. 基于深度卷积神经网络的双目立体视觉匹配算法[J]. 光学学报, 2018, **38**(8): 179-185.
- [7] MEN Yu-bo, MA Yu, ZHANG Guo-yin, et al. A stereo matching algorithm based on census transform and improved dynamic programming[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, **47**(3): 60-65.  
门宇博, 马宇, 张国印, 等. 非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, **47**(3): 60-65.
- [8] HUANG Chang-qiang, ZHAO Ke-xin, HAN Bang-jie, et al. Maneuvering decision-making method of UAV based on

- approximate dynamic programming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, **40**(10): 2447-2452.
- 黄长强, 赵克新, 韩邦杰, 等. 一种近似动态规划的无人机机动决策方法[J]. 电子与信息学报, 2018, **40**(10): 2447-2452.
- [9] Bessef, Rotherc, Fitzgibbon A, et al. PMBP: patch match belief propagation for correspondence field estimation[J]. International Journal of Computer Vision, 2014, **110**(1): 2-13.
- [10] CHEN Hua-rong, QIAN Kang-lai, WANG Bin. Temporal coherent video segmentation with support vector machine and graph cut[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, **29**(8): 1389-1395.
- 陈华榕, 钱康来, 王斌. 结合支持向量机和图割的视频分割[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, **29**(8): 1389-1395.
- [11] CAO Xiao-qian, SUN Lian-shan, LI Jian. Stereo matching based on global optimization of slant-plane[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, **54**(17): 198-201 + 213.
- 曹晓倩, 孙连山, 李健. 斜面参数优化全局立体匹配算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, **54**(17): 198-201 + 213.
- [12] ZHANG Ru-ru, GE Guang-ying, QIN Teng-fei, et al. Measuring dimension of parts of binocular vision based on halcon[J]. Computer Measurement & Control, 2018, **26**(1): 59-63.
- 张如如, 葛广英, 申哲, 等. 基于 HALCON 的双目立体视觉工件尺寸测量[J]. 计算机测量与控制, 2018, **26**(1): 59-63.
- [13] Cvisic I, Petrovic I. Stereo odometry based on careful feature selection and tracking[C]. European Conference on Mobile Robots. Lincoln: ECMR, 2015, 1-6.
- [14] XIR Y, ZENG S, CHEN L. A novel disparity refinement method based on semi-global matching algorithm[C]. IEEE International Conference on Data Mining Workshop, IEEE, 2015, 1135-1142.
- [15] XIAO Jin-sheng, TIAN Hong, ZOU Wen-tao, et al. Semi-global matching algorithm based on improved slanted plane smoothing[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, **46**(8): 1835-1841.
- 肖进胜, 田红, 邹文涛, 等. 基于斜平面平滑优化的半全局立体匹配[J]. 电子学报, 2018, **46**(8): 1835-1841.
- [16] Hirschm & amp H, Ller. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, 807-814.
- [17] YAN Deng-tao, HUO Zhi-yong, DAI Wei-da, et al. Stereo matching algorithm based on fully-connected neural network and edge-aware disparity propagation[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2018, **38**(3): 83-88.
- 严邓涛, 霍智勇, 戴伟达, 等. 基于全连接神经网络和边缘感知视差传播的立体匹配算法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, **38**(3): 83-88.
- [18] WEN Guan-hua, TENG Zhao-sheng, LIN Hai-jun, et al. A liquid-level detection method for capillary viscometer based on lagrange parabolic interpolation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, **39**(1): 47-51.
- 温冠华, 滕召胜, 林海军, 等. 基于拉格朗日抛物线插值的毛细管粘度仪液位检测方法[J]. 计量学报, 2018, **39**(1): 47-51.
- [19] Tippetts S, Lee D J, Lillywhite K, et al. Review of stereo vision algorithms and their suitability for resource-limited systems[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016, **11**(5): 5-25.
- [20] YANG Xiao-rui, GE Guang-ying, ZHU Rong-hua, et al. Remote sensing image processing of meteorological satellite[J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2018, **31**(4): 18-26.
- 杨晓蕊, 葛广英, 朱荣华, 等. 基于小波变换的卫星遥感图像融合与分割[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, **31**(4): 18-26.
- [21] Scharstein D, Szeliski R, Hirschmueller H. Middlebury stereo benchmark[OL]. [2017-05-17]. <http://vision.middlebury.edu/stereo/>.
- [22] ZHANG Jun-yong, WU Shi-qian, CHEN Bin, et al. Binocular vision based multi-dimensions on-line measuring system for workpieces[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, (10): 75-80.
- 张俊勇, 伍世虔, 陈斌, 等. 基于双目视觉的零件多尺寸在线测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2018, (10): 75-80.

#### 作者简介:

朱荣华 (1994—), 女, 山东菏泽人, 硕士, 主要从事图像处理方面的研究。