

〈系统设计〉

基于自适应几何约束 ORB 的红外双目测距方法

李淮周, 王帅军, 王 宏, 曹祥红, 白振鹏, 李 森
(郑州轻工业大学 建筑环境工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对传统特征匹配算法计算效率低、误匹配率高和双目视觉测量精度不足等问题, 提出了一种基于自适应几何约束和随机抽样一致性方法的 ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) 红外双目测距方法。首先, 通过 FAST (Features from Accelerated Segment Test) 算法与 BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) 算法检测并描述关键点, 采用快速最近邻搜索的算法完成特征点初始匹配。然后, 根据初始匹配点对的斜率与距离选择相应的阈值, 构建基于斜率与距离的几何约束, 剔除明显错误匹配点对。最后利用随机抽样一致性方法去除异常点完成精匹配, 结合热像仪标定参数计算出目标物体的距离。实验结果表明, 改进的 ORB 算法与传统算法相比, 具有较好的特征点质量和较高的测量精度, 测距平均绝对误差为 1.64%, 具有较好的实用价值。

关键词: ORB 算法; 热红外; 双目测距; 自适应阈值; 几何约束

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2024)07-0831-07

Infrared Binocular Ranging Method Based on Adaptive Geometrically Constrained ORB

LI Huaizhou, WANG Shuaijun, WANG Hong, CAO Xianghong, BAI Zhenpeng, LI Sen
(College of Building Environmental Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An ORB infrared binocular ranging method based on adaptive geometric constraints and the random sampling consistency method is proposed to address the issues of low computational efficiency, high mismatching rates, and insufficient accuracy in binocular vision measurements by traditional feature matching algorithms. First, key points are detected and described using the FAST and BRIEF algorithms, and the initial matching of feature points is performed using the fast library for approximate nearest neighbors (FLANN) algorithm. Then, based on the slope and distance of the initial matching pairs, appropriate thresholds are selected, and geometric constraints based on these parameters are constructed to eliminate incorrect matching pairs. Finally, a random sample consensus (RANSAC) method is used to remove anomalous points and complete the fine matching. The distance of the target object is calculated by combining the thermal camera calibration parameters. Experimental results show that the improved ORB algorithm yields higher quality feature points and greater measurement accuracy compared to traditional algorithms, with an average absolute error of distance measurements at 1.64%, demonstrating its practical value.

Key words: oriented fast and rotated brief(ORB), thermal infrared, binocular distance measurement, adaptive threshold, geometric constraints

0 引言

随着计算机视觉的发展, 双目立体视觉技术广泛应用于各种领域, 例如无人驾驶^[1]、智能机器人^[2]、无人机^[3]等领域。该技术通过二维图像来获取深度, 具有

收稿日期: 2023-04-16; 修订日期: 2023-04-28.

作者简介: 李淮周 (1987-), 男, 河南周口人, 博士、讲师, 主要研究方向: 图像处理与智能控制。E-mail: lihuaizhou@zzuli.edu.cn.

通信作者: 李森 (1987-), 男, 河南遂平人, 博士、副教授, 主要研究方向: 从事火场环境侦测技术研究。E-mail: lisen@zzuli.edu.cn.

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102220071, 212102210535, 232102321021); 河南省高等学校重点科研项目 (22A470014); 郑州轻工业大学博士科研基金项 (2018BSJJ053)。

成本低、实现简单、可在非接触条件下测距等优点^[4]。基于可见光的测距系统对光照的要求较高，而红外线的环境适应能力比可见光强，搭建双目热红外相机系统可以弥补可见光相机在夜间、烟雾等特殊环境下难以正常工作的不足。

左右图像的匹配是双目立体视觉系统的关键^[5]，其匹配结果会直接影响测量精度^[6]。匹配算法主要分为基于区域的匹配算法和基于特征的匹配算法。基于特征的匹配算法相比基于区域的匹配算法，算法的计算效率和匹配的鲁棒性都有较大的提高，是图像匹配领域的研究热点之一，不同学者纷纷提出了各种经典的特征匹配算法。Lowe^[7]提出的 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法，在物体发生旋转、缩放时具有较好的稳定性和不变性，但计算量大难以满足工程实践的实时性要求^[8]。Bay^[9]提出了 SURF (Speeded Up Robust Features) 算法，SURF 算法引入了积分图和近似 Hessian 矩阵，降低了计算量，但仍需较长时间计算特征描述子。Rublee 等人^[10]提出了 ORB 算法，它结合并改进了 FAST^[11]特征点检测和 BRIEF^[12]特征描述子，提高了算法的旋转不变性，匹配速度比 SIFT 快 1 个量级^[13]。但是 ORB 算法尺度性较差，容易产生冗余特征点，匹配精度欠佳。针对 ORB 算法存在的问题，许多学者提出不同的改进方案。党宏社等人^[14]提

出了一种基于加权网格运动统计的改进 ORB 算法，通过区域划分和加权网格运动统计的方法对算法进行优化，提高了匹配准确率。谷学静等人^[15]提出一种基于四叉树分解法的 ORB 算法，利用四叉树筛选特征点检索域，提升了检索速度和特征点的质量。焦嵩鸣等人^[16]提出了一种自适应阈值的 ORB 特征点提取算法，改善了光照突变时特征点匹配数目较少、适应性较差的问题。

目前的特征匹配算法在结果和效率上已经取得了很大的进步，但特征匹配算法在搜索特征点时，容易忽视特征点在图像平面的空间关系，造成特征点错误匹配^[17]。将几何约束应用到特征匹配算法中，能剔除明显错误匹配。固定阈值常常难以达到较好效果，取值太小会错失匹配的点对，取值太大容易造成误匹配，进而影响最终的匹配点数以及匹配正确率^[18-19]。因此本文提出了一种基于自适应几何约束的 ORB 算法，针对不同的图像动态选择几何约束的阈值，消除误匹配的点对，提高匹配的准确度。

1 自适应几何约束 ORB 算法

本文所设计的自适应几何约束 ORB 算法流程如图 1 所示。

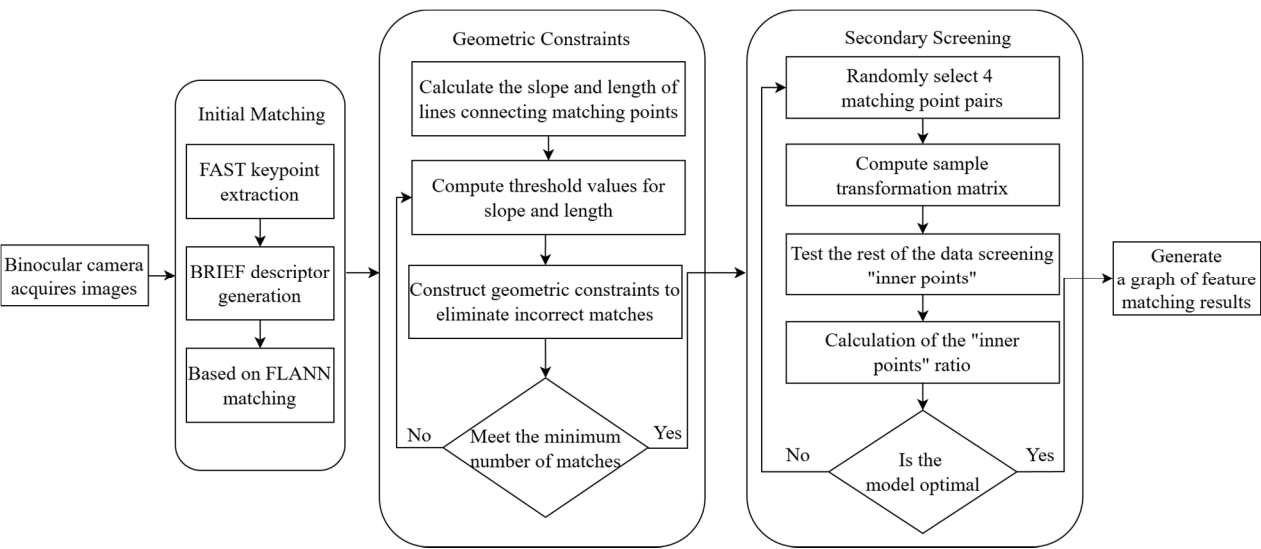


图 1 自适应几何约束 ORB 算法
Fig.1 Adaptive geometric constrained ORB algorithm

主要包括 3 个部分：

1) 初始匹配。采用 FAST 算法检测特征点，并为每个关键点生成一个 BRIEF 描述子。BRIEF 描述子由一个固定大小的二进制码组成，描述关键点周围的图像特征。FLANN^[20] (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors) 算法可以在两张图像的 BRIEF 描

述子之间寻找最近的匹配，从而实现关键点的匹配。

2) 几何约束。通过统计匹配点对的斜率与距离信息，动态调整几何约束的阈值，剔除明显错误的匹配点对。

3) 二次筛选。在匹配的特征点中随机取 4 对匹配点对，通过计算变换矩阵和不断迭代，寻找到最优

的参数模型。在这个最优模型中, 能匹配上的特征点最多, 从而进一步提高匹配精度。

1.1 初始匹配

1.1.1 FAST 特征点提取

FAST 算法是一种具有高计算效率的特征点提取算法^[21], 可以快速找到图像中明显变化的位置, 比如边缘、角点等。FAST 算法的基本思想是对图像中的每个像素进行测试, 判断该像素邻域的像素点是否明显不同于该像素。FAST 算法以像素点 p 为圆心, 取半径为 3 像素圆环上的 16 个像素点, 如图 2 所示。

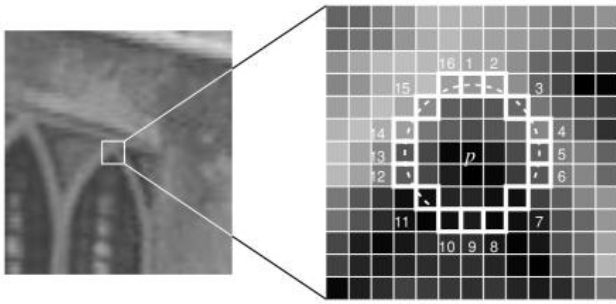


图 2 FAST 特征点提取示意图^[11]

Fig.2 FAST feature point extraction diagram^[11]

设阈值为 T , 圆环上的像素点灰度值为 I_i , 若有连续 12 个点的灰度值都满足:

$$|I_i - I_p| > T, i=1, 2, \dots, 16 \quad (1)$$

则圆心像素点 p 为角点。为了减少计算量, 加速特征点的提取速度, 可优先对 1 和 9, 以及 5 和 13 四个位置上的灰度值进行判断, 这 4 个位置为中心点圆周上的对称位置, 且相对于中心点的距离最远, 能够有效地检测到各种角点形态, 更容易区分角点和非角点。首先检查图像中 1 号和 9 号像素的灰度值是否在阈值范围内, 如果都在, 则认为点 p 不可能是角点。如果仍然怀疑点 p 可能是角点, 则会继续判断 5 号和 13 号像素的灰度值。当点 p 真的是角点时, 则至少有 3 个像素点超出阈值范围^[11]。只有满足这些条件, 才会进一步判断其余像素点的灰度值是否符合要求, 否则就排除掉点 p 。这样的设定可以提高算法速度, 同时保证检测结果的准确性。

1.1.2 BRIEF 描述子生成

首先, 在关键点 p 的周围选定一个正方形邻域, 用高斯核卷积平滑该邻域, 以消除一些噪声。然后, 在该邻域内随机选择 n 对点坐标, 比较二者像素的大小, 进行如下二进制赋值。

$$\tau(p(x), p(y)) = \begin{cases} 1, & \text{if } p(x) < p(y) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p(x)$ 和 $p(y)$ 分别是随机点 x 和 y 的像素灰度值。

最后, 将 n 个比较结果组合成一个 n 位的二进制编码, 得到该关键点的 BRIEF 描述子。

$$f_{n_d}(p) := \sum_{1 \leq i \leq n_d} 2^{i-1} \tau(p(x), p(y)) \quad (3)$$

式中: n_d 为点对数 (描述子位数), 一般取 128、256、512。

1.1.3 基于 FLANN 的匹配

快速近似最近邻查找算法 (FLANN) 是二维特征点匹配常见的特征粗匹配算法。FLANN 匹配的原理是基于近似最近邻搜索算法, 它将匹配问题转化为一个搜索问题。首先, FLANN 将所有的描述子都放入一个数据结构中, 称为 KD 树 (K-Dimensional Tree)。然后, 对于查询图像中的每个描述子, FLANN 将在 KD 树中搜索相似的描述子, 直到找到一个近似最近邻。这个过程可以通过对 KD 树进行递归遍历来实现。最终, FLANN 将返回一个最近邻的列表, 列表中的第一个元素是最近的匹配, 而其他元素则是次近的匹配。

相比暴力匹配, FLANN 匹配是一种更快速的匹配方法。它采用了一种近似最近邻算法, 可以在高维空间中快速找到近似的最近邻。FLANN 匹配的优点是速度快、效率高, 适用于大型数据集。

1.2 几何约束

在进行初始特征匹配后, 可能会存在误匹配的情况, 导致匹配连线不准确。在双目相机拍摄的情况下, 如果目标离相机的深度相同, 那么匹配点在左图像和右图像上的位置可以相互对应。正确的匹配点对之间有两个几何特点: 它们之间的距离相等, 连线的斜率相等。

图 3 中蓝色线段为正确的匹配点对, 红色线段的斜率明显不同于蓝色线段, 可以通过斜率约束进行剔除。黄色线段的长度明显短于蓝色线段, 可以通过距离约束进行剔除。通过利用斜率与距离这两个几何特点, 可以进行几何约束, 从而得到更准确的匹配连线。考虑到实际计算中不能提前设置固定的阈值, 为提高算法的灵活性, 本文提出了自适应阈值下的几何约束误匹配剔除算法。

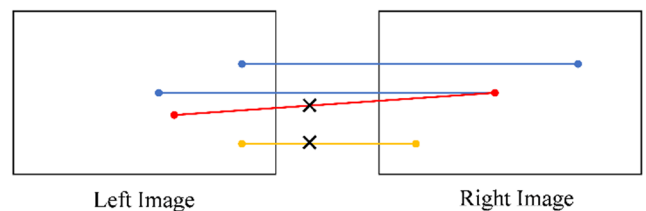


图 3 几何特征关系图

Fig.3 Geometric feature relationship diagram

自适应阈值下的几何约束误匹配剔除算法:

- 1) 设有 n 个匹配点对, 点对之间连线长度的数组为 distances , 斜率数组为 slopes 。统计每对匹配点对连线的长度 d 、斜率 k , 并分别存入到 distances 与 slopes 中。
- 2) 对 distances 与 slope 中的元素进行排序。计算出 distances 与 slopes 的下四分位数与上四分位数。设 distances 与 slope 的下四分位数为 D_{\min}, K_{\min} 。 distances 与 slope 的上四分位数为 D_{\max}, K_{\max} 。
- 3) 当 $D_{\min} \leq d \leq D_{\max}$, 且 $K_{\min} \leq k \leq K_{\max}$ 时, 保留该匹配点对连线, 否则删除;
- 4) 统计约束后的匹配点对个数, 若小于设置的最低特征点匹配数量, 则适当扩大 d 和 k 的范围, 重复 3)、4) 操作, 避免条件过于苛刻, 匹配点对数量较少。

1.3 二次筛选

经过几何约束实现对错误特征匹配点对的初始筛选后, 将通过随机抽样一致性算法对已经处理过的特征匹配点对进行二次筛选, 进一步改善匹配的结果。Fischler 在 1981 年^[22]提出了随机抽样一致性算法(Random Sample Consensus, RANSAC), 它是一种经典的误匹配剔除算法, 具有较好的鲁棒性。Fischler 将数据集分为内点和外点, 并通过迭代方式求解数据集的模型参数, 其中符合模型的数据点被称为内点, 视为正确匹配点。不符合模型的数据点称为外点, 并进行剔除。RANSAC 算法线性拟合的示例如图 4 所示, 其中红色的点则为外点。

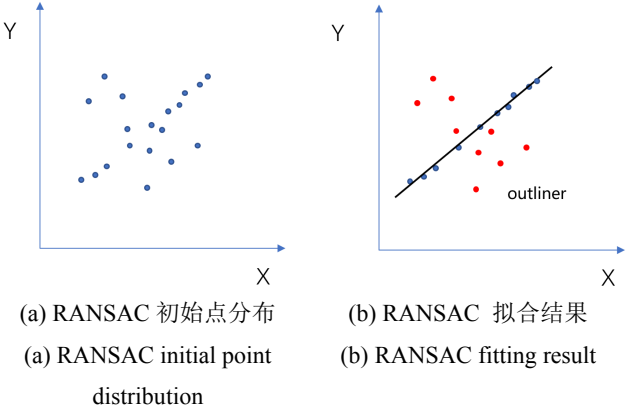


图4 RANSAC 线性拟合
Fig.4 RANSAC linear fit

RANSAC 算法是通过反复选择数据集去估计模型, 一直迭代到认为模型最优。利用 RANSAC 算法可以去除图像匹配中异常值导致的虚假匹配, 提高特征匹配准确率^[23], 其算法主要步骤为:

- 1) 从匹配数据集中随机抽取 4 个样本。
- 2) 根据抽取的样本计算单应性矩阵, 得到模型参数。

- 3) 利用模型参数测试所有数据。
- 4) 计算满足模型的内点数和投影误差。
- 5) 重复上述步骤若干次, 选择内点数最多或投影误差最小的模型作为最优模型。

2 分析与讨论

2.1 双目标定及参数

红外热像仪的成像原理与可见光相机不同, 可见光相机的标定板无法产生明显的温度差异。本文针对红外热像仪无法获取可见光标定板特征坐标的问题, 利用陶瓷加热片与酚醛层压纸板制作了一种可供红外热像仪标定的标定板。通过对陶瓷片进行加热, 使加热区域与非加热区域产生明显的温度差异, 图 5 为红外热像仪下的标定板图像, 特征点明显, 能够满足摄像机标定需求。

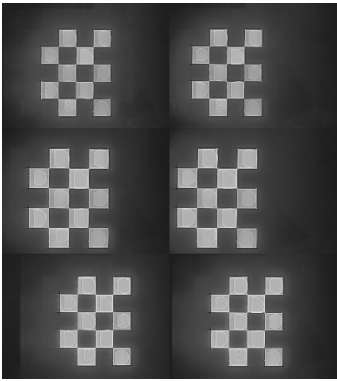


图5 标定板图片
Fig.5 Calibration board image

本文采用张正友^[24]提出的标定方法, 利用 Matlab 进行标定操作。该方法操作简单, 易实现且精度较高, 可以满足大部分场合。标定板方格的尺寸为 40 mm×40 mm, 相机采取 15 组分辨率为 384 pixel×288 pixel 的标定板照片, 标定得到的参数如表 1 所示。

表1 双目标定结果

Table 1 Binocular calibration results		
	Left camera	Right camera
Focal length (f_x, f_y)	(785.0543, 795.8341)	(793.0270, 798.7419)
Principal point coordinates (u, v)	(212.2896, 127.0004)	(232.9362, 124.3936)
Rotation matrix	$\begin{bmatrix} 0.9997 & -0.0008 & 0.0225 \\ 0.0007 & 1.0000 & -0.0025 \\ -0.0225 & 0.0025 & 0.9997 \end{bmatrix}$	
Translation vector	[-59.3119, 0.0486, -5.6672]	

2.2 几何约束对比实验

为了验证几何约束算法是可靠的，将对图片进行不同条件的约束进行对比，具体结果如图 6 所示。

通过比较不同组图像可以发现，使用基于斜率与距离的约束能够有效地去除大部分错误的匹配。这样

能够减少后续 RANSAC 算法的计算量，并避免一些特殊情况下的失败，例如当样本中含有过多的外点或共线点时^[25]。通过去除这些误匹配，可以显著提高最终匹配的准确性和鲁棒性。

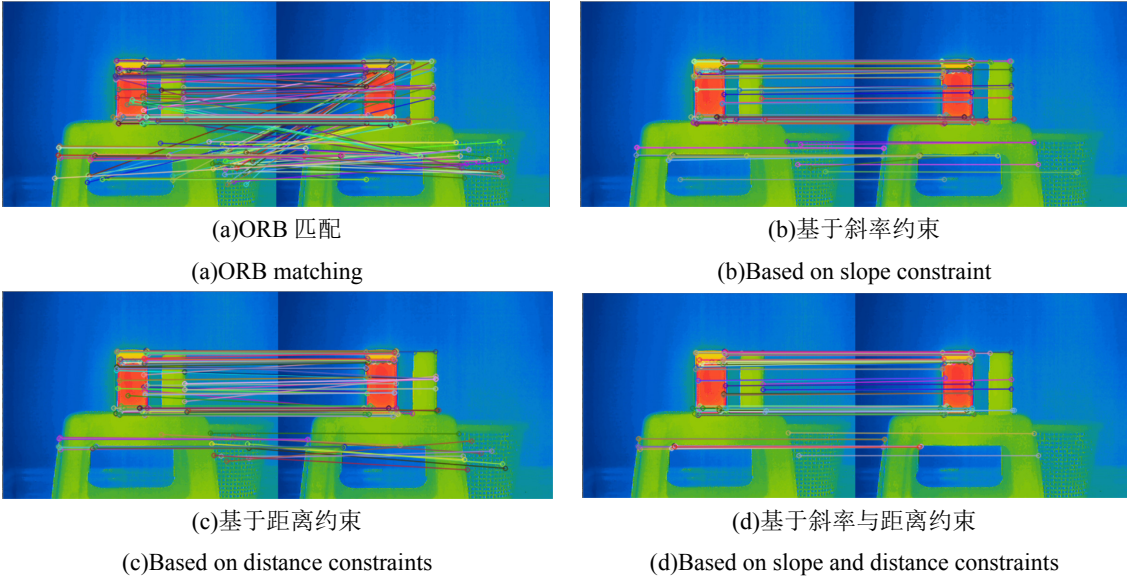


图 6 不同约束的特征匹配结果

Fig.6 Feature matching results with different constraints

2.3 改进算法效果对比

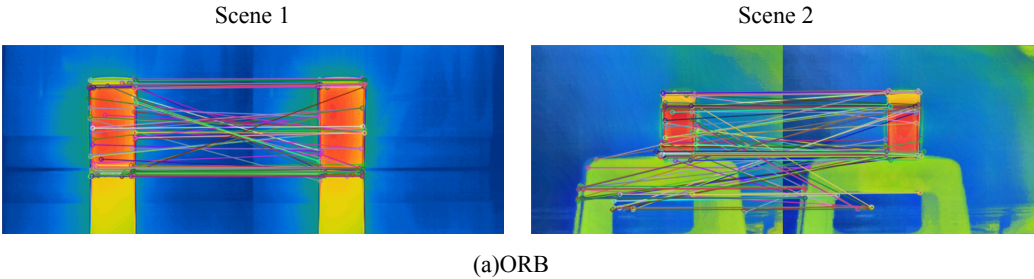
为了验证本文的特征匹配算法，将本文算法同 ORB 算法和 ORB-RANSAC 算法进行对比。在同一实验环境下，使用 ORB 算法、ORB-RANSAC 算法和本文算法分别对 2 组场景图片进行特征匹配，匹配结果如图 7 所示，几何约束前后特征点数量及运行时间对比如表 2 所示，约束后斜率与长度信息如表 3 所示。

经过对比实验，从表 3 可以发现，基于几何约束的特征匹配算法在速度和匹配准确率方面具有优越性。相比 ORB-RANSAC 匹配算法，它具有更快的响应速度和更低的平均斜率，针对不同场景平均斜率分别降低了 85%和 13.3%。本文算法能够更好地处理图像之间的特征匹配。

表 2 几何约束对比

Table 2 Geometric constraints comparison

Constraint conditions	Initial matched points	Matched points after constraints	Running time/s
No constraint	212	212	0.168
Slope constraint	212	126	0.151
Distance constraint	212	126	0.159
Slope and distance constraint	212	91	0.134



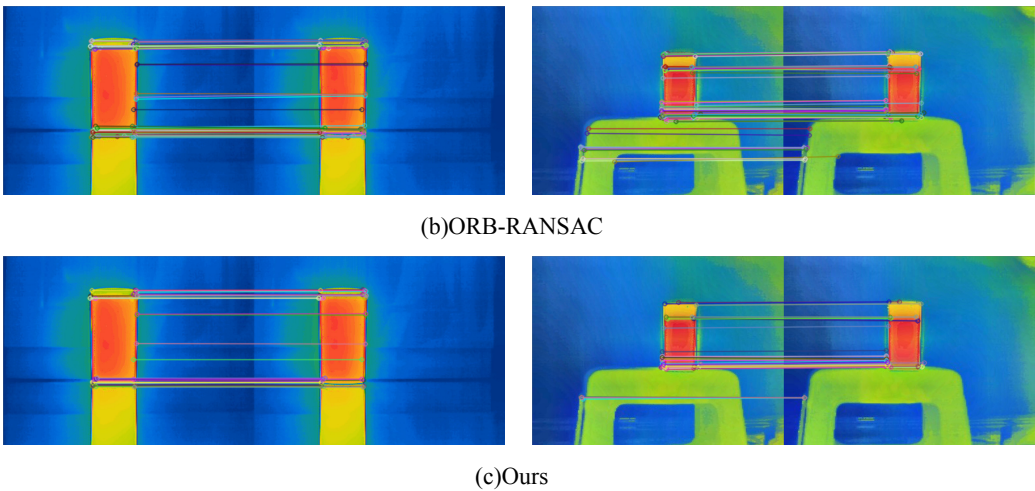


图 7 各种算法的匹配结果对比

Fig.7 Comparison of matching results of various algorithms

表 3 各种算法数据结果对比

Table 3 Comparison of data results of various algorithms						
Scene	Algorithm	Mean slope	Max slope	Mean distance/pixel	Max distance/pixel	Running time/s
Scene 1	ORB	0.02022	0.36751	45.14567	159.77012	0.146
	ORB-RANSAC	0.00112	0.01486	34.31680	40.00000	0.143
	Our algorithm	0.00017	0.00426	34.58159	36.20497	0.139
Scene 2	ORB	-0.00451	0.58498	67.30733	293.21835	0.141
	ORB-RANSAC	0.00384	0.02436	42.07100	46.40000	0.140
	Our algorithm	0.00333	0.01403	42.76380	47.01064	0.133

2.4 实验结果

为了验证实验的可行性，双目测距实验以水杯为测量目标，在不同距离放置目标物，并在没有辅助光照的情况下拍摄。实验在热像仪清晰成像的范围内，分别取 900~1100mm 等 5 组距离间隔为 50 mm 不同的位置放置目标物，比较 3 种特征匹配算法的匹配结果，并通过三角测量公式求出测量距离。最后将测量距离与实际距离进行对比，分析平均绝对误差。算法测距结果如表 4 所示，图 8 为测距方法精度比较。

表 4 算法测距结果

Table 4 Algorithm distance measurement results				
Number	Actual distance/mm	ORB/mm	ORB+RANSAC/mm	Our algorithm/mm
1	900	760.85	936.82	922.61
2	950	825.97	960.21	943.55
3	1000	861.55	995.18	996.32
4	1050	805.70	1052.85	1053.48
5	1100	929.40	1151.27	1147.48

通过实验结果发现，在有效的测量范围内 ORB、ORB+RANSAC、本文算法的平均运行时间分别为 0.176s、0.180s、0.171s，平均绝对误差分别为 16.23%、2.12%、1.64%，本文算法在测量精度和计算效率方面均得到了改进。

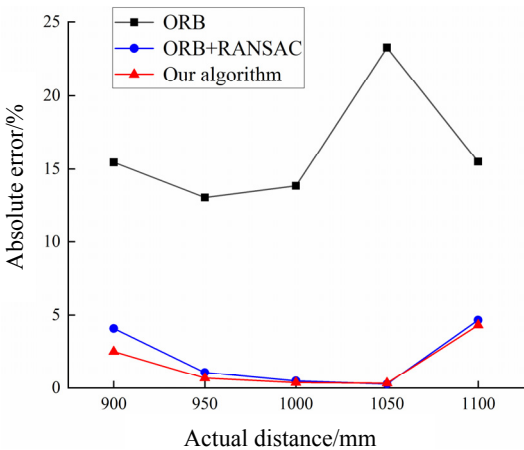


图 8 测量精度对比

Fig.8 Measurement accuracy comparison

3 结论

本文基于 ORB 算法提出了一种自适应几何约束的红外双目测距方法。主要通过构建斜率与距离阈值自适应的几何约束,从而有效地剔除错误匹配,实现匹配结果的预提纯。接着在此基础上结合 RANSAC 算法以随机抽取、筛选、剔除的方式,进一步优化匹配结果,提高图像的匹配精度,为准确获得目标距离提供了条件。最后根据双目热像仪采集的图像,结合热像仪标定参数,将检测的特征距离应用到三角测量理论中,得到目标物体的距离信息。通过与其他测距方法进行实验对比发现,经过自适应几何约束和随机抽样一致性方法的优化,本文所提出的方法具有更高的效率和更优越的准确度,平均绝对误差为 1.64%,实现不依赖光照有效地测量热红外下目标物体距离,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Zaarane A, Slimani I, Hamdoun A, et al. Vehicle to vehicle distance measurement for self-driving systems[C]//*Proceedings of the 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2019: 1587-1591. DOI: 10.1109/CoDIT.2019.8820572.
- [2] JIANG Chengfu, GAO Yuanlou, YANG Pingfa. Research on target ranging of mobile robot based on binocular vision[C]//*Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Robotics and Computer Vision (ICRCV)*, 2021: 1-6, DOI: 10.1109/ICRCV52986.2021.9546971.
- [3] MA Yunpeng, LI Qingwu, CHU Lulu, et al. Real-time detection and spatial localization of insulators for UAV inspection based on binocular stereo vision[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(2): 230.
- [4] SU Chang, TAN Gongquan, LUO Yufeng. Research on stereo matching technology based on binocular vision[J]. *OALib*, 2019, **6**(9): 1-10.
- [5] LI Jun, WANG Haihui, ZHANG Liubin, et al. The research of random sample consensus matching algorithm in PCA-SIFT stereo matching method[C]//*Proceedings of the 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2019: 3338-3341.
- [6] 付元辰, 马鸣庸, 丁龙阳. 面向室内视觉定位的点特征提取算法比较[J]. *导航定位学报*, 2022, **10**(1): 36-40.
FU Yuanchen, MA Mingyong, DING Longyang. Comparative research on point feature extraction algorithms for indoor visual positioning[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2022, **10**(1): 36-40.
- [7] Lowe David G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**: 91-110.
- [8] FENG Yuping, LI Shuguang. Research on an image mosaic algorithm based on improved ORB feature combined with SURF[C]//*Proceedings of the 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018: 4809-4814.
- [9] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, **110**(3): 346-359.
- [10] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//*2011 International Conference on Computer Vision*, 2011: 2564-2571.
- [11] Rosten E, Porter R, Drummond T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**(1): 105-119.
- [12] Calonder M, Lepetit V, Strecha C, et al. BRIEF: binary robust independent elementary features[C]//*Proceedings of the Computer Vision-ECCV*, 2010: 778-792.
- [13] ZHANG Yingying, ZHANG Jiangzhou, ZHANG Lu, et al. Research on panorama reconstruction technique of uav aerial image based on improved ORB algorithm[C]//*Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE)*, 2019: 1252-1256.
- [14] 党宏社, 李俊达, 张选德. 基于加权网格运动统计的改进 ORB 算法[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, **40**(1): 182-187.
DANG Hongshe, LI Junda, ZHANG Xuande. Improved ORB algorithm based on weighted grid motion statistics [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2022, **40**(1): 182-187.
- [15] 谷学静, 郭俊, 刘海望, 等. 基于四叉树分解法改进的 ORB 特征匹配算法[J]. *激光杂志*, 2021, **42**(6): 56-61.
GU Xuejing, GUO Jun, LIU Haiwang, et al. An improved ORB feature matching algorithm based on quadtree decomposition method[J]. *Laser Journal*, 2021, **42**(6): 56-61.
- [16] 焦嵩鸣, 钟宇飞, 姚鑫, 等. 一种改进自适应阈值的 ORB 算法研究[J]. *激光杂志*, 2022, **43**(6): 85-90.
JIAO Songming, ZHONG Yufei, YAO Xin, et al. Research on an improved ORB algorithm of adaptive threshold [J]. *Laser Journal*, 2022, **43**(6): 85-90.
- [17] SUN Mingchun, HUA Chunjian, PAN Rui. Binocular ranging based on improved ORB-RANSAC[C]//*Proceedings of the 2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, 2022: 6216-6221.
- [18] 宁小娟, 李洁茹, 高凡, 等. 基于最佳几何约束和 RANSAC 的特征匹配算法[J]. *系统仿真学报*, 2022, **34**(4): 727-734.
NING Xiaojuan, LI Jieru, GAO Fan, et al. Feature matching algorithm based on optimal geometric constraints and RANSAC[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, **34**(4): 727-734.
- [19] 李珊, 李浩, 余兰, 等. 基于动态自适应调整阈值的 SURF 改进匹配算法[J]. *地理空间信息*, 2017, **15**(3): 100-102.
LI Shan, LI Hao, YU Lan, et al. Improved SURF matching algorithm based on dynamic adaptive threshold adjustment[J]. *Geospatial Information*, 2017, **15**(3): 100-102.
- [20] Muja M, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]//*Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2009: 331-340.
- [21] CAI Zhiming, OU Yiwen, LING Yufeng, et al. Feature detection and matching with linear adjustment and adaptive thresholding[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 189735-189746.
- [22] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Commun ACM*, 1981, **24**: 381-395.
- [23] Ramadan M, El Tokhey M, Ragab A, et al. Adopted image matching techniques for aiding indoor navigation[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, **12**(4): 3649-3658.
- [24] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [25] LI Chao, JIA Yongxing, WANG Huali, et al. Improved ORB algorithm based on binocular vision[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2019: 1739-1743.