

昏暗环境下自适应 ORB-SLAM2 算法研究

马哲伟 周福强 王少红

(北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘 要: 本文针对 ORB-SLAM2 算法在黑暗环境或纹理较少的环境下提取特征点少,从而导致 SLAM 系统定位精度不高、匹配对数较少,进而导致系统崩溃的问题,提出了一种基于自适应阈值的特征点提取算法与改进的四叉树均匀化策略。首先基于图像的亮度进行基于自适应阈值的 FAST 特征点提取,之后通过改进的四叉树均匀化策略对图像的特征点进行剔除与补偿,完成特征点选取。实验结果表明,与原算法相比,改进后的特征点提取算法在黑暗环境与纹理较少的环境下,匹配对的数量提升了 17.6%,SLAM 轨迹精度提升了 49.8%,有效的提升了 SLAM 系统的鲁棒性和精度。

关键词: FAST 角点;特征提取;四叉树分解法;SLAM

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on adaptive ORB-SLAM2 algorithm in dark environments

Ma Zhewei Zhou Fuqiang Wang Shaohong

(Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A feature point extraction algorithm based on adaptive threshold and an improved quadtree homogenization strategy are proposed to address the issue of low positioning accuracy or low matching logarithms of the SLAM system caused by the ORB-SLAM2 algorithm extracting fewer feature points in dark environments or environments with fewer textures, resulting in system crashes. Firstly, based on the brightness of the image, FAST (Features from Accelerated Seed Test) feature points are extracted using adaptive thresholds. Then, an improved quadtree homogenization strategy is used to eliminate and compensate the feature points of the image, completing feature point selection. The experimental results show that the improved feature point extraction algorithm increases the number of matching pairs by 17.6% and SLAM trajectory accuracy by 49.8% compared to the original algorithm in dark and textured environments, effectively improving the robustness and accuracy of the SLAM system.

Keywords: FAST corner;feature extraction;quadtree decomposition method;SLAM

0 引 言

同步定位与建图算法(simultaneous localization and mapping, SLAM)^[1-2]是移动机器人的核心技术之一,广泛应用于军事^[3]和民用^[4]。SLAM 系统通过传感器获取数据来进行位姿推算与地图构建。目前典型的 SLAM 技术主要使用基于视觉^[5]和激光雷达^[6]的传感器。视觉传感器主要为相机,凭借其低成本和高性能越来越受到人们的重视。

近年来,基于特征点法的 ORB-SLAM(oriented FAST and rotated BRIEF SLAM)^[7-8]系列算法成为视觉定位的主流算法之一。虽然 ORB-SLAM 系列算法在正常环境有较强的鲁棒性,但在黑暗环境与纹理较少的环境下,从图像中提取到的特征点较少,匹配对数不足导致定位失败,稳定性

不足。针对这一不足,国内外众多学者提出了许多不同的改进方案。Ma 等^[9]提出一种基于图像亮度特征的自适应视觉同时定位与地图构建(SLAM)定位方法。该方法通过利用平均亮度阈值法检测光照干扰图像,并对其进行饱和度和增强,从而得到有利于 ORB 特征提取的图像,一定程度上提高了 SLAM 系统的鲁棒性与准确性。Chen 等^[10]提出了一种特征图像基准数据库构建方法,采用一种结合尺度不变特征变换尺度空间优化 ORB 特征提取算法,提升了特征匹配的速度与性能。Bao 等^[11]提出了一种基于特征点数量的自适应阈值以及校正策略,能够在自动获取初始阈值的基础上,根据角点是否能够达到初始角点的要求实时校正以达到适当值,利用 SUSAN 算法剔除伪角点,有效的提

高了提取角点的数量与准确性。Jiao 等^[12]提出了一种全局自适应阈值与局部自适应阈值相结合的方式改进算法,根据图像的灰度分布判断亮度变化情况,针对亮度进行自适应阈值的计算,完成 FAST(features from accelerated segment test)角点的提取。该算法能够在光照变化的情况下有效的提升特征点的提取效率与匹配对的准确率。Chen 等^[13]提出了一种低纹理环境下的导航改进方法,通过对相机输入图像的预处理,筛选出低纹理图片,使用不同算法对数据进行处理输出最终位姿,大大提高了系统的鲁棒性。Xing 等^[14]提出了一种改进的四叉树均匀化策略,对图像的高曝光区域与低曝光区域进行判断,对特征点采集过少、光照不均的区域进行图像增强处理,重新补充提取特征点,使高曝光区域或低照度区域也能提取到足够的关键点,有效的增强了 ORB-SLAM 在复杂场景的匹配精度。Wang 等^[15]使用去除某一像素点周围最大像素值与最小像素值,计算其余像素值与像素均值的误差平方和再乘以系数得到自适应阈值,该方法能有效的提取到更多的图像特征。Yang 等^[16]提出了一种局部自适应阈值的特征点提取算法,能够在光照变化的环境中动态调整提取阈值,提升了系统的鲁棒性。Gu 等^[17]提出了一种改进的四叉树分解法,对处理过的原始图像经过四叉树分解法剔除掉灰度变化不明显的区域,然后在进行 FAST 特征检测,有效的提升了算法的匹配精度。Cui 等^[18]提出一种划分深度自适应的方法对四叉树算法进行改进,防止四叉树过度划分,算法性能有明显提升。其中的不足在于并未对于特征点进行有效的补偿的方法。

针对于上述问题,本文提出了一种基于图像亮度的自适应阈值与改进的四叉树均匀化相结合的特征点提取算法,首先基于图像的亮度进行全局阈值的调整,然后通过改进的四叉树均匀化策略对局部特征点进行剔除与补偿,提高图像在纹理较少的环境下提取的特征点提取数量与匹配对数,实验结果表明,本文算法能够有效提升恶劣环境下特征点的提取数量与 ORB-SLAM 系统的鲁棒性和精度。

1 ORB 算法及其改进

1.1 ORB 特征点的提取步骤

ORB 特征点实际上是由关键点(Keypoint)和描述子(Descriptor)两部分组成。关键点是指该特征点在图像中的位置,描述子是用来量化描述该关键点周围的像素信息的。ORB 的关键点在 FAST 角点的基础上增加了主方向,成为 Oriented FAST。

1) FAST 角点

FAST 角点的思想是如果一个像素和周围的像素灰度差别较大(超过设定的阈值),并且达到一定数目,那么这个像素就很有可能是角点。具体的检测过程如下:

- (1) 遍历图像中的每个像素 p , 将它的灰度值记为 IP 。
- (2) 设定一个阈值 T , 用于判断两个像素灰度值的差异

大小。为了能够适应不同的图像,一般采用相对百分比,比如设置为 IP 的 20%。

(3) 以像素 P 为中心,选取半径为 3 的像素上的 16 个像素点,选取方式如图 1 所示。

(4) 如果 16 个像素点中有连续的 N 个点的灰度大于 $IP+T$ 或者小于 $IP-T$ 时,就可以将像素点 p 确定为关键点。为了加速,可以把第 1, 5, 9, 13 个像素点当作锚点,只有当这 4 个锚点有 3 个及以上锚点的灰度值同时大于 $IP+T$ 或者小于 $IP-T$ 时,当前像素才能作为一个关键点,否则就可以排除掉,这大大加快了关键点的检测速度。

(5) 遍历途中每个像素点,循环执行以上 4 个步骤。

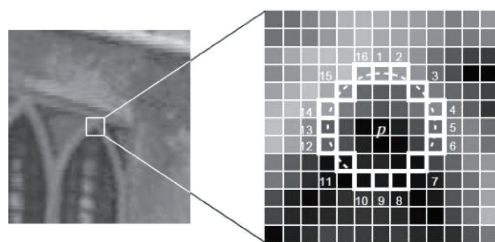


图 1 FAST 关键点

此外,由于 FAST 角点容易扎堆出现,因此第一次遍历完图像后还需要用到非极大抑制,在一定范围内保留响应值最大的值作为该范围的 FAST 关键点。

2) 灰度质心法

在提取到 FAST 特征点后,ORB 特征点使用灰度质心法来实现旋转不变性。先计算出每个关键点的主方向,然后统一将像素旋转到这个主方向上,使得每个特征点的描述子不在受旋转的影响。计算方法如下:

(1) 定义一个图像的矩为:

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y), p, q = \{0, 1\} \quad (1)$$

式中: p, q 取 0 或 1, $I(x,y)$ 表示在像素坐标 (x,y) 处图像的灰度值; m_{pq} 表示图像的矩。

(2) 在半径为 R 的圆形区域,沿两个坐标轴的 x, y 方向的图像矩分别为:

$$m_{10} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R x I(x,y) \quad (2)$$

$$m_{01} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R y I(x,y) \quad (3)$$

图形内所有像素的灰度值总和为:

$$m_{00} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R I(x,y) \quad (4)$$

(3) 计算图像的质心为:

$$C = (c_x, c_y) = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (5)$$

(4) 计算关键点的主方向。关键点的旋转角度为:

$$\theta = \arctan2(c_x, c_y) = \arctan2(m_{01}, m_{10}) \quad (6)$$

在完成 FAST 提取之后,使用 BRIEF 对提取的关键点信息进行量化计算。自此就完成了 ORB 特征提取的全过程。

1.2 算法改进

传统的 ORB-SLAM 算法当环境因素发生变化时,会导致系统跟踪失败,极不稳定。其原因是由于当图像亮度发生变化时或者图像纹理较少时,前端提取到的特征点较少,导致特征匹配后的匹配对数减少,一定程度上会影响 SLAM 的定位精度,若匹配对数小于算法设定值,则导致算法定位失败。针对于这一情况提出一种基于亮度的自适应阈值与改进的四叉树均匀化算法。算法整体流程如图 2 所示。

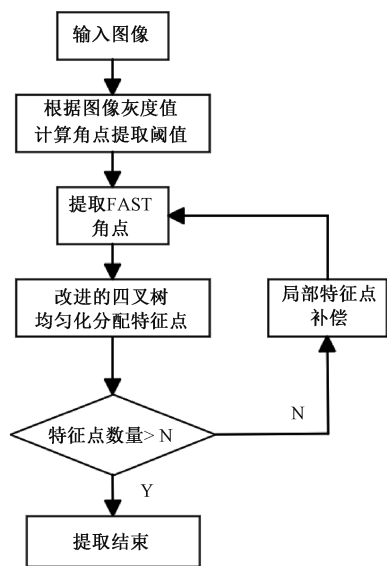


图 2 算法流程图

1) 基于亮度的自适应阈值特征点提取算法

传统的 FAST 角点提取算法采取固定阈值,无法在亮度变化的环境中提取到足够的特征点。而在 ORB-SLAM 算法中,采用固定阈值与最小阈值的方式提取 FAST 角点,这种人为设定阈值的方法,其虽然在整体亮度变化的情况下能够起到一定作用,但当处理非均匀光照下获取的图像时,仍无法高效的提取特征点。为此,本文根据当前像素点灰度值,计算特征点自适应阈值,能有效提高特征点的提取精度。

算法的具体步骤如下:

(1) 遍历图像中的每个特征点,对于图像中的每个像素 p ,去除图像中像素灰度值最大和最小的像素点,计算其余点像素值与像素均值的误差按平方和再求均值,得到自适应阈值 T ,计算公式如下:

$$T = \frac{\alpha}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} (I(x_i) - \overline{I(x)})^2 \quad (7)$$

其中, α 为自适应参数,通过实验寻求合适值, $I(x_i)$ 表示像素 p 周围点 x_i 灰度值, $\overline{I(x)}$ 表示周围像素点的平均值, n 为周围的像素点的数量,为定值 16。

(2) 提取 p 周围 1、5、9、13 个像素值,计算这 4 个像素值与 p 的关系。当有 3 个及以上像素点与当前的灰度差大

于阈值,才可能是一个关键点,否则剔除。

(3) 计算之间的其余点,并根据阈值判断是否为角点。

通过以上方法能够提取到更多的特征点,便于后续的特征匹配,能够一定程度提升 ORB-SLAM 的定位精度。

2) 改进的四叉树均匀化策略

在 ORB-SLAM 算法中,采用四叉树均匀化策略来避免在纹理丰富的区域发生特征点聚集的现象,其主要功能为剔除冗余的特征点,实现图像特征点的均匀化。

算法首先将图像作为根节点,所有的特征点都属于该节点。然后将该节点分裂为 4 个节点,按照图像的宽度和高度均匀分为四等分,分别为左上、右上、左下和右下,将区域内的特征点分配给每个节点。如果该节点的特征点数为 0,则删除该节点。如果该节点的特征点数目等于 1,则停止分裂。如果该节点的数目大于 1,则判断所有节点的特征点数目是否满足要求,不满足则继续分裂,直至退出。算法如图 3 所示。

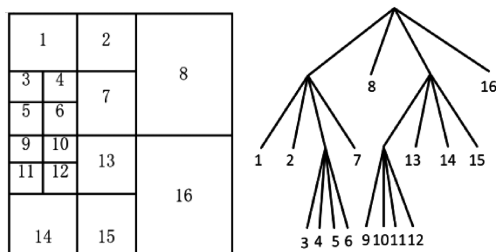


图 3 四叉树均匀化

原始的四叉树均匀化算法在存在无纹理区域或黑暗环境导致部分特征点较少的条件下,由于总体特征点数量不够,在特征点密集的区域提取到的特征点依然密集,特征点稀少的区域依然稀少,整体的均匀化效果不好。针对这一情况,本文设置最大划分深度来限制密集区域的特征点分裂,同时,在无特征点区域设置局部特征点补偿,来提高特征点分配的均匀度。

(1) 依据图像尺寸设置四叉树划分最大深度 d_{\max} ,计算方式如下:

$$d_{\max} = \log_2 \lfloor \min(H, W) / \min P \rfloor \quad (8)$$

其中, H, W 分别为图像的高度和宽度; $\min P$ 为四叉树划分后最小节点的像素尺寸,由实验效果可知,取 $\min P = 16$ pixels 时,均匀度效果最好。

(2) 特征点补偿策略

针对于每个特征点为 0 的节点,其可能因素有两点,第 1 是由于局部亮度变化导致该区域未提取到特征点,第 2 是由于该区域纹理较少而无法提取特征点。针对于第 1 种情况,本文对每个节点区域进行基于特征点数量的自适应阈值角点提取,对于未达到数量要就的节点,将其阈值调整为原来的 $2/3$,以提取更多的角点。对于第 2 种情况,本文考虑直接在中心区域认为设定该点为特征点,以牺牲些许精度的方式,换取整个 SLAM 系统的鲁棒性。由实验可

知,纹理丰富的环境下对精度的影响很小,而在无纹理环境导致特征点提取较少的情况下能够大大提升 SLAM 系统的鲁棒性。效果如图 4、5 所示。



图 4 四叉树划分之前



图 5 四叉树划分之后

2 实验验证

2.1 亮度对比实验

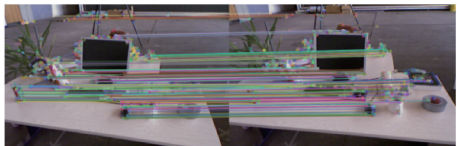
对图像进行亮度调整,对比其在不同亮度环境下的特征点数量与匹配对数。实验采用分别对 100%亮度、90%、60%亮度与 30%亮度的图像进行对比。匹配效果如图 6 所示。



(a) 100%亮度下原算法



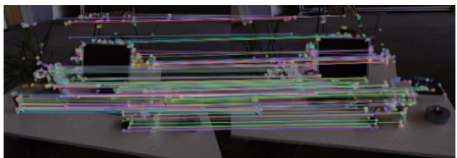
(b) 100%亮度下本文算法



(c) 90%亮度下原算法



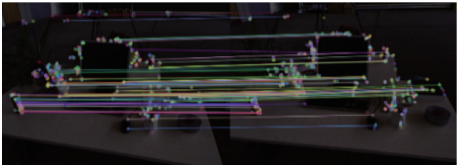
(d) 90%亮度下本文算法



(e) 60%亮度下原算法



(f) 60%亮度下本文算法



(g) 30%亮度下原算法



(h) 30%亮度下原算法

图 6 匹配效果对比图

可以看到,当系统处于不同程度的黑暗环境下,改进后的算法能够提取到更多的特征点,匹配对的数量也有所提升。具体的数据对比如表 1 所示。

表 1 不同亮度下提取特征点及匹配对数对比

亮度变化	原算法(特征点)			改进算法(特征点)		
	左图	右图	匹配对	左图	右图	匹配对
初始	1 968	1 974	388	1 980	1 984	385
90%	1 869	1 879	346	1 972	1 962	372
60%	1 732	1 753	300	1 937	1 944	350
30%	766	832	95	1 460	1 548	221

由表 1 可知,本文改进后的算法在 100%亮度的原始图像中,特征点数目与原算法所提取的特征点数目基本一致,但匹配对的数量相对比原算法略少一些,原因可能是本文算法在自适应阈值的作用下可能会降低特征点的质量,导致匹配率下降。在亮度有所下降的环境中,本文算法所提取的特征点和匹配对均有所提升。在 30%亮度的环境下,由于 ORB 算法提取特征点不足,因而使用系统设定的最低阈值,提取特征点依然不足,而本文算法依然能够提取

较多的特征点,以确保系统的正常运行。在匹配对数上,本文算法相比于原算法约提升了 17.6%。

2.2 SLAM 精度分析

为验证本文算法对 SLAM 系统的有效性,实验采用自采数据集与公开数据集相结合的方式。自采数据集使用双目相机进行数据采集,测试半黑暗灯光环境下 SLAM 的定位精度,开源数据集采用正常环境下的数据集测试,以得到在不同环境下算法的定位效果。

1) 自采数据集实验

实验设计为用装载双目相机的无人车在夜晚灯光环境下运行 5 m,每隔 1 m 停留 10 s,分别测试 5 个间隔 1 m 算法的计算结果。实验环境如图 7 所示。



图 7 实验环境

表 2 自采数据集精度分析

	真值	原算法	本文算法	原算法误差	本文算法误差
d_1/m	1.000 0	1.213 6	1.091 9	0.213 6	0.091 9
d_2/m	1.000 0	1.125 9	1.062 0	0.125 9	0.062 0
d_3/m	1.000 0	1.038 5	1.069 1	0.038 5	0.069 1
d_4/m	1.000 0	1.112 6	1.046 7	0.112 6	0.046 7
d_5/m	1.000 0	1.169 1	1.061 3	0.169 1	0.061 3
$d_{\text{total}}/\text{m}$	5.000 0	5.659 7	5.331 0	0.659 7	0.331 0

从表 2 中的数据可以看出,5 个 1 m 间隔改进后的算法相比原算法定位精度均有提升,总体的定位误差减小了约 49.8%。实际建图效果如图 8 所示。实验表明,在特定黑暗环境与部分纹理较少的环境下,本文改进算法相较于

原算法有着更高的定位精度与鲁棒性。

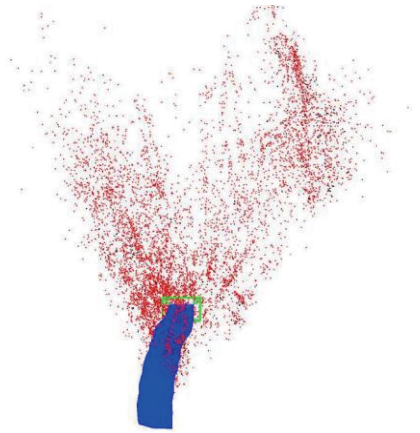


图 8 建图效果

2) 公开数据集实验

数据集采用 EuRoC 数据集进行实验测试,EuRoC 数据集是一个广泛使用的用于视觉的机器人研究的数据集。使用的传感器为视觉(双目)相机,搭载无人机进行视频录制。数据集录制环境为工厂环境,特征点丰富,能够验证本文算法在特征点丰富的环境中算法精度是否存在精度下降的情况。轨迹对比如图 9 所示,从图中可以看出,本文改进算法在正常环境下仍能保持比较好的精度。表 3 为与真实轨迹的绝对误差对比(Ape)与相对误差对比(Rpe)。

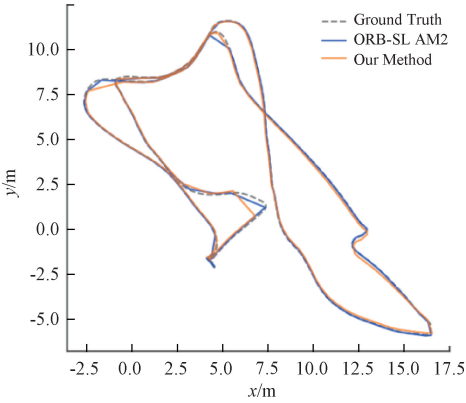


图 9 轨迹对比

表 3 误差分析

		最大值	平均值	中间值	最小值	均方根	标准差
原算法	Ape/m	16.342	9.521	9.831	4.363	10.106	3.388
	Rpe/%	2.092	0.519	0.408	0.021	0.628	0.353
改进算法	Ape/m	16.166	9.459	10.149	4.379	10.056	3.413
	Rpe/%	2.489	0.494	0.411	0.005	0.602	0.344

由表 3 的数据可以看出,本文改进后的绝对误差平均值与相对误差平均差均有所下降,表明了本文算法在正常环境下的有效性。此外,在误差最大值与误差最小值有这些许波动,可能是由于本文所计算的自适应阈值在某一时刻

可能效果不如系统所设定的固定阈值。但从总体来看,本文算法对绝对轨迹误差的平均值减少了,有效的减少了 SLAM 系统的轨迹误差。

综合上述实验,本文所改进的算法在黑暗环境与纹理

较少的环境能够有效提升定位精度,在正常环境下也能够总体保持原本算法的定位精度。同时,本文改进算法在部分原算法无法运行的环境中能够正常运行,说明本文算法能够在提升系统鲁棒性的同时兼顾系统精度。

3 结 论

针对于 ORB-SLAM2 在黑暗环境与低纹理环境下建图时,由于所提取的特征点数量不足而导致匹配对数减少,进而导致系统精度下降或者崩溃的问题,提出了一种基于自适应阈值与改进的四叉树均匀化算法相结合的特征点提取算法。首先基于像素灰度值进行阈值的计算,以消除亮度对图像特征点的影响,然后对提取的特征点进行均匀化,针对密集区域的特征点设置四叉树最大深度以防止过度密集,对特征点稀少的区域进行特征点补偿,满足系统对特征点的提取要求。经实验验证,本文所提出的方法在实验验证环境下,匹配对的数量提升了 17.6%,SLAM 轨迹精度提升了 49.8%。本文基于黑暗环境与纹理较少环境进行研究,在正常环境下,存在部分误差高于原算法误差的问题,且由于特征点补偿,增加了误匹配对的数量。在未来的工作中,可以着手于减少误匹配对的数量来进一步提升算法的精度。

参考文献

- [1] 马志艳,邵长松,杨光友,等.同步定位与建图技术研究进展[J].电光与控制,2023,30(3):78-85,106.
- [2] 王朋,郝伟龙,倪翠,等.视觉 SLAM 方法综述[J/OL].北京航空航天大学学报:1-9[2023-10-23].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0376>.
- [3] 张一凡,缪远东,陈畅宇,等.户外增强现实军事仿真系统[J].光学技术,2019,45(5):622-628.
- [4] 叶鲁斌,刘皓月,张纪元,等.家居环境中的智能扫地机器人设计[J].计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(2):262-272.
- [5] 贾嫣晗,邹风山,徐方,等.完全在线的双目直接法视觉 SLAM 算法[J].控制与决策,2023,38(11):3093-3102.
- [6] 郭钰,杨永明.3 维激光扫描技术在历史建筑保护中的应用[J/OL].激光技术:1-9[2023-10-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20230914.2039.004.html>.
- [7] MUR-ARTAL R, TARDÓSJUAN D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [8] CAMPOS C, ELVIRAR, RODRÍGUEZ J J G, et al. Orb-slam3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap slam [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [9] 马运涛,刘飞,王坚,等.顾及图像亮度特征的自适应视觉 SLAM 定位方法[J].测绘科学,2023,48(8):42-50.
- [10] 陈明强,张勇,冯树娟,等.一种基于改进 ORB 特征匹配的无人机视觉导航方法[J/OL].电讯技术:1-9[2023-10-21].<https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.230627004>.
- [11] 包家汉,孙德尚,黄建中,等.基于自适应阈值的型钢精确角点 FAST 检测算法[J/OL].上海交通大学学报:1-25[2023-10-22].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.276>.
- [12] 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.
- [13] 陈继清,桂海宁,王志奎,等.基于特征点法的自适应 SLAM 改进方法[J].广西大学学报(自然科学版),2022,47(6):1611-1625.
- [14] 行芳仪,徐成,高宏伟.高效高精度光照自适应的 ORB 特征匹配算法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(7):140-147.
- [15] 王晨强.基于特征点优化的视觉 SLAM 前端方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [16] 杨弘凡,李航,陈凯阳,等.亮度变化下室外场景图像特征点提取方法[J].河南科技大学学报(自然科学版),2020,41(1):18-23,5.
- [17] 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.
- [18] 崔建国,孙长库,李玉鹏,等.基于 SURF 的快速图像匹配改进算法[J].仪器仪表学报,2022,43(8):47-53.

作者简介

马哲伟,硕士研究生,主要研究方向为多传感器融合 SLAM。

E-mail: 1256603559@qq.com

周福强(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为智能电网系统智能感知与控制。

E-mail: fuqiangzhou@126.com