

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210299

复杂背景下相对运动恢复结构算法设计^{*}高梓皓^{1,2} 张巧芬¹ 王桂棠^{1,2} 温腾腾¹ 庞亮雨¹ 贾林锋¹

(1. 广东工业大学机电工程学院 广州 510006; 2. 佛山沧科智能科技有限公司 佛山 528225)

摘要: 针对运动恢复结构算法在摄像机拍摄过程中需要改变摄像机位置的问题,利用物体与摄像机的相对运动关系,获取包含物体多角度视图的图像序列。在图像序列中定位物体所在区域,约束特征点提取的适用范围,设计并实现一种相对运动恢复结构算法。实验结果表明,SFRM算法适用于摄像机固定位置的拍摄方式,能将位于物体区域的匹配对占总匹配对的比例从32%提高到84%,相较于传统的SFM算法在时间效率上得到38.29%的提升,成功扩展SFM算法的适用场景。

关键词: SFM算法;特征点提取;点云;三维重建;机器视觉

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Algorithm design of structure from relative motion in complex background

Gao Zihao^{1,2} Zhang Qiaofen¹ Wang Guitang^{1,2} Wen Tengting¹ Pang Liangyu¹ Jia Linfeng¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Cangke Intelligent Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China)

Abstract: Aiming at the problem that the structure from motion algorithm needs to change the camera position in the process of camera photographing, the relative motion relationship between the target object and the camera is used to obtain image sequences containing multi angle views of target objects. A structure from relative motion algorithm is designed and implemented by locating the region of the target object in the image sequence and constraining the applicable range of feature point extraction. The experimental results show that SFRM algorithm is suitable for the photographing mode of fixed position camera. SFRM can increase the proportion of matching pairs located in the target object area from 32% to 84% of the total matching pairs. Compared with the traditional SFM algorithm, the time efficiency is improved by 38.29%. The available scenarios of SFRM algorithm is successfully expanded.

Keywords: structure from motion; feature point detector; point cloud; 3D reconstruction; machine vision

0 引言

运动恢复结构(structure from motion, SFM)是一种根据二维多视角图像序列恢复场景的三维结构信息的三维重建算法^[1-2],对设备要求低,仅需要一部RGB摄像机在目标周围从不同角度拍摄多张图像。该算法通过提取不同图像中的特征点^[3-9]并计算图像之间特征点的匹配关系,通过RANSAC算法^[10-11]滤除错误匹配,根据正确匹配的特征点的二维像素坐标求解满足对极几何约束的基础矩阵,通过分解基础矩阵得到摄像机的位姿变化,最终通过三角化求得二维特征点所对应的空间点的深度信息,用以恢复场景的三维结构。SFM算法已在物体三维重建^[12]、大规模场景三维重建^[13-17]、工业尺寸测量^[18]、3D坐标定位^[19]、植物观

测^[20-21]等领域得到广泛的应用。

传统的SFM算法在实际拍摄过程中,摄像机需要围绕物体不断地进行位姿变化,对拍摄空间的要求高,拍摄过程复杂繁琐,且重建结果会包含过多的背景信息。当摄像机是手持拍摄时,每次拍摄过程的具体位姿变化程度难以固定,导致不同图像序列的拍摄效果存在区别,影响实验对比与复现。

针对上述问题,本文创新性提出一种相对运动恢复结构(structure from relative motion, SFRM)算法,算法使用由先验知识获取的特征点提取掩码,使特征点提取操作仅在图像中物体所在的局部区域进行,排除静态背景中特征点的干扰,使得SFM三维重建算法能在摄像机位置固定而物体旋转的情况下重建出物体的三维结构,将SFM的适用

收稿日期:2022-06-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61705045)、佛山广工大研究院创新创业人才团队计划项目(20191108)资助

场景从“摄像机运动恢复结构”扩展至“相对运动恢复结构”。

1 基于相对运动的 SFMR 算法的理论基础

1.1 摄像机与物体相对运动坐标体系

如图 1 所示,以物体质心为原点 O_o , 建立平面直角坐标系 $X_oO_oY_o$, 摄像机 C 初始位于坐标 $C(X_c, Y_c)$ 处, 与物体质心距离为 r 。摄像机初始视线为向量 $\overrightarrow{CO_o}(-X_c, -Y_c)$, 与 X_o 轴正半轴的夹角为 ϕ 。当物体固定不动, 摄像机绕物体顺时针旋转角度 θ 后, 到达新的位置 C_1 , 坐标为 (X_{c1}, Y_{c1}) , 此时摄像机视线为新的向量 $\overrightarrow{C_1O_o}(-X_{c1}, -Y_{c1})$ 。

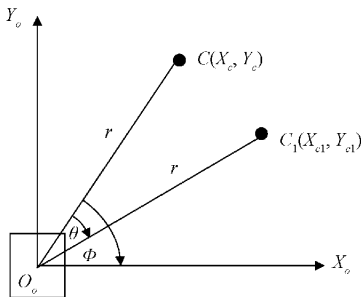


图 1 摄像机运动

结合几何关系与三角函数展开式可得下式:

$$X_{c1} = X_c \cos\theta + Y_c \sin\theta \quad (1)$$

$$Y_{c1} = Y_c \cos\theta - X_c \sin\theta \quad (2)$$

当物体固定不动, 摄像机绕物体质心顺时针旋转 θ 后, 摄像机视线转变成向量 $\overrightarrow{C_1O_o}$, 坐标表示为: $(-X_{c1} \cos\theta - Y_{c1} \sin\theta, -Y_{c1} \cos\theta + X_{c1} \sin\theta)$ 。

如图 2 所示, 当摄像机固定位置, 物体绕自身质心逆时针旋转 θ , 意味着坐标系发生了变动, 由坐标系 $X_oO_oY_o$ 变化成了新的坐标系 $X'_oO_oY'_o$, 摄像机在新坐标系下的坐标为 $C_2(X_{c2}, Y_{c2})$, 摄像机视线为新坐标系下的向量 $\overrightarrow{C_2O_o}(-X_{c2}, -Y_{c2})$ 。

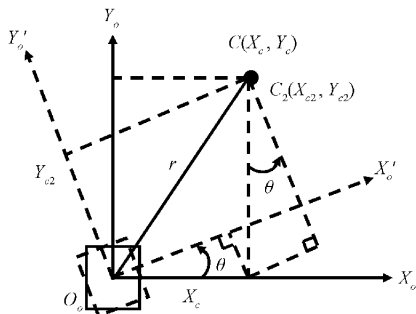


图 2 物体运动

通过几何关系可知下式:

$$X_{c2} = X_c \cos\theta + Y_c \sin\theta \quad (3)$$

$$Y_{c2} = Y_c \cos\theta - X_c \sin\theta \quad (4)$$

当摄像机固定不动, 物体绕自身质心逆时针旋转 θ 后,

摄像机视线为向量 $\overrightarrow{C_2O_o}$, 坐标表示为 $(-X_c \cos\theta - Y_c \sin\theta, -Y_c \cos\theta + X_c \sin\theta)$ 。

因此, 建立摄像机相对运动情况下的视线变化关系:

$$\overrightarrow{C_1O_o} = \overrightarrow{C_2O_o} \quad (5)$$

1.2 摄像机相对运动矩阵

式(5)表明, 当仅考虑物体区域而忽略背景区域时, 单独旋转对象或移动摄像机可以产生相同的物体视图的变化。当摄像机固定, 物体旋转时, 拍摄得到的物体视图变换等价于摄像机在三维空间中的同一水平面上, 以物体质心在此平面的投影为圆心, 作圆周运动所拍摄得到的物体视图变换。

在传统 SFM 算法中, 通过改变摄像机的拍摄位置, 如图 3 所示, 获取物体不同角度的视图, 提取图像中的特征点并匹配, 根据得到的匹配对求解出摄像机的旋转平移矩阵。

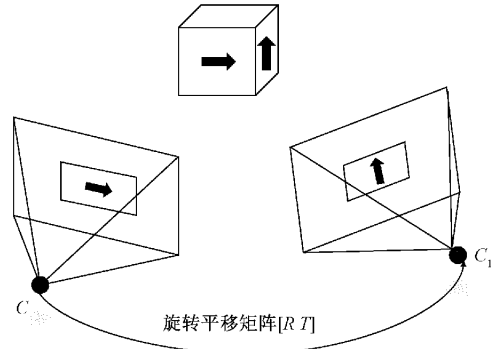


图 3 改变摄像机位置

在 SFMR 算法中, 通过固定摄像机位置, 旋转物体, 如图 4 所示, 获取物体不同角度的视图, 通过约束特征点提取的适用区域, 使其不发生在静态背景区域, 得到的特征点匹配对能求解出表征摄像机相对物体的位姿变化的摄像机相对运动矩阵, 该矩阵数值上与 SFM 算法得到的旋转平移矩阵一致。摄像机相对运动矩阵在图像序列中能用于三角化并求解出特征点的空间三维坐标, 完成三维重建。

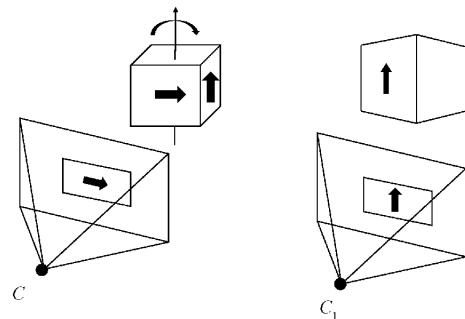


图 4 旋转物体

2 基于旋转物体的 SFMR 算法设计

2.1 获取特征点提取掩码

为保证摄像机相对运动矩阵的成功求解, 需要在特征

点提取过程中排除背景区域的干扰。为约束特征点提取的适用范围,采用如下步骤生成特征点提取掩码:

1)通过目标物体的近景图像,如图5(a)所示,定义目标物体。

2)在重建所用的图像序列中任选一张图像,如图5(b)所示,与目标物体的近景图像进行特征点提取与匹配,匹配结果如图5(c)所示。

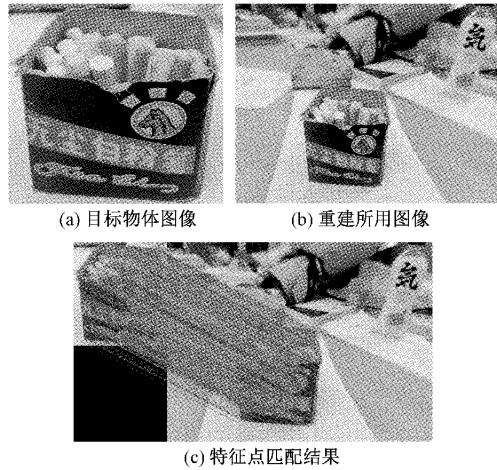


图5 目标物体图像与重建所用图像进行匹配

3)求解步骤2)中重建所用图像内与目标物体近景图像发生匹配的特征点集的最小凸多边形,在输入图像中确定目标物体所在的局部区域。

4)根据最小凸多边形对图像进行二值化,得到适用于整个输入图像序列的特征点提取掩码,如图6所示。



图6 特征点提取掩码

图5(c)是对目标物体的图像和重建所用图像进行特征点提取和匹配得到的匹配结果,借助目标物体图像内所包含的信息,在图5(b)中针对性地找到目标物体所在的局部区域,即图5(b)中发生正确匹配的特征点集围成的最小凸多边形 H 。

根据最小凸多边形 H ,通过式(6)对任意相同维度的图像矩阵进行二值化,得到如图6所示的特征点提取掩码。

$$M(x,y) = \begin{cases} 255, & (x,y) \in H \\ 0, & (x,y) \notin H \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x,y) 为摄像机拍摄得到的图像中,坐标 (x,y) 处

的像素点; H 为发生正确匹配的特征点集的最小凸多边形; M 为特征点提取掩码; $M(x,y)$ 为特征点提取掩码中坐标 (x,y) 处的值。

如图7所示,该特征点提取掩码适用于摄像机拍摄得到的图像序列中的每一副图像,能将特征点提取操作约束在目标物体所在的局部区域,阻止其在背景区域进行。

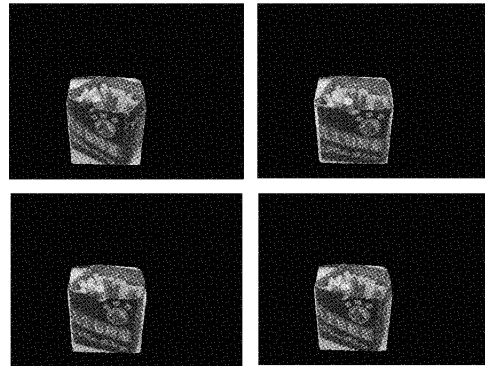


图7 部分图像使用特征点提取掩码的约束效果

2.2 应用特征点提取掩码

本文在SFM算法的基础上,将上述工作实现的特征点提取掩码应用于算法中的特征点提取步骤中,约束特征点提取操作的适用范围,使算法仅提取图像中物体所在的局部区域内的特征点,滤除背景区域中潜在特征点的干扰,在这一改进下,SFRM算法的输入能兼容由固定位置摄像机拍摄旋转物体得到的图像序列。如图8所示为在SFM基础上改进的SFRM算法的流程。

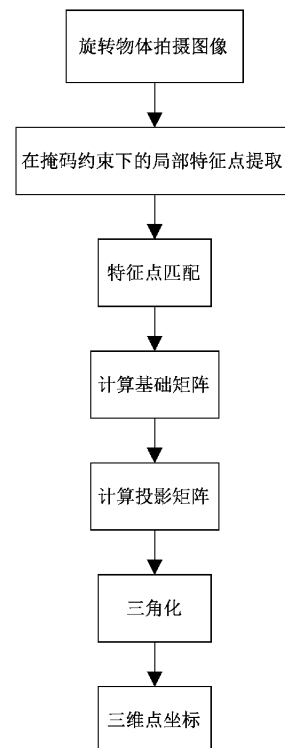


图8 SFRM算法流程

3 实验结果分析及讨论

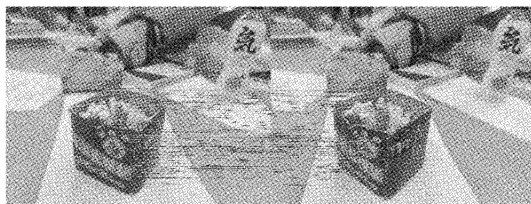
尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)^[9]是目前应用最广泛的图像特征提取算法之一,能提取稳定的特征点,所构建的特征描述子对图像旋转、平移、尺度缩放具有不变性。因此,本文采用 SIFT 局部特征描述子提取特征点并进行匹配,实验数据为一组由固定摄像机拍摄得到的图像序列,拍摄过程中通过旋转物体使得图像序列中包含物体多个不同角度的视图。

当进行特征点提取时,如果未经过特征点提取掩码的约束,图像背景处的特征点会被提取。在匹配阶段,由于图像拍摄过程中摄像机位置固定,图像序列中的背景不会发生变化,使得图像背景处的特征点几乎全部得到良好的匹配,这些匹配信息会影响摄像机相对运动矩阵的求解,从而影响三维重建性能。

当在复杂背景的环境下拍摄时,图像中背景区域的潜在特征点较多,特征点提取掩码的改进效果显得更加显著。如图 9(a)所示,展示了复杂背景下,未经过特征点提取掩码筛选,进行特征点提取并匹配得到的匹配结果,结果中大量背景区域内的潜在特征点被提取并纳入匹配中。如图 9(b)所示,是同样两幅图像在经过特征点提取掩码筛选后进行特征点提取并匹配得到的结果,相比于图 9(a),图 9(b)没有在背景区域进行特征点提取操作,复杂背景中大量潜在特征点被成功滤除,因此能进行摄像机相对运动矩阵的求解,完成三维重建任务。



(a) 复杂背景下, 未经过特征点提取掩码约束

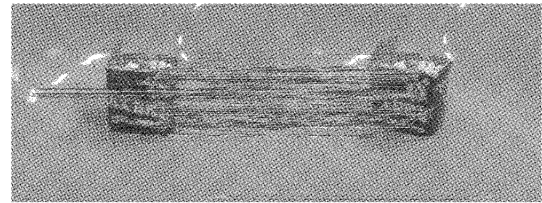


(b) 复杂背景下, 经过特征点提取掩码约束

图 9 复杂背景下,特征点提取掩码约束效果

区别于复杂背景,在实验特意定制的纯净背景拍摄环境下,由于背景简单纯净,背景区域的潜在特征点较少,背景区域处的特征点匹配对的影响较低。如图 10 所示,展示了纯净背景下,特征点提取掩码的约束效果。

为保证算法的应用场景广泛,本文所拍摄的图像序列均是在未刻意定制的常见场景下进行拍摄。区别于如图 10 所示的特意定制的拍摄环境下得到的纯净背景,本文



(a) 纯净背景下, 未经过特征点提取掩码约束



(b) 纯净背景下, 经过特征点提取掩码约束

图 10 纯净背景下,特征点提取掩码约束效果

实验所用的图像的背景中存在多个无分布规律的干扰物体,图像背景区域存在大量可能被提取的潜在特征点,因此属于复杂背景。

如图 11 所示,在使用本文的特征点提取掩码约束之前,位于物体区域的匹配对仅占总匹配对数目的 32%,本文的特征点提取掩码大幅减少了位于背景区域的匹配对的数目,并且保留了大部分位于物体区域的匹配对。在使用本文的特征点提取掩码约束之后,位于物体区域的匹配对占总匹配对数目的 84%,滤除背景区域的无效匹配信息。

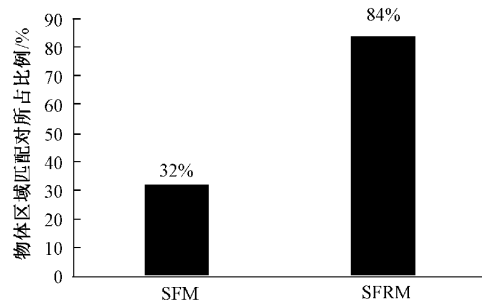


图 11 匹配对分布情况对比

经过特征点提取掩码约束后,特征点提取与匹配只发生在物体所在区域,避免静态背景区域的干扰。在摄像机拍摄过程中,通过旋转物体使得图像序列中存在物体不同角度的视图,仅就物体来说,此图像序列与传统 SFM 算法中通过变换摄像机拍摄位置得到的图像序列具有相同效果,两者都包含物体不同角度的视图信息。

本文任意选择一件物体作为实验对象,如图 12 所示。拍摄时采取摄像机位置固定不变、实验对象旋转的方式,完成 1 组图像序列的拍摄,共包含 45 张图像,选取图像序列中前 6 张用以在文中展示拍摄效果,如图 13 所示,表明图像序列中背景没有发生变化,拍摄过程中摄像机位置是固定的。

实验对比传统的 SFM 算法和所提出的 SFRM 算法,

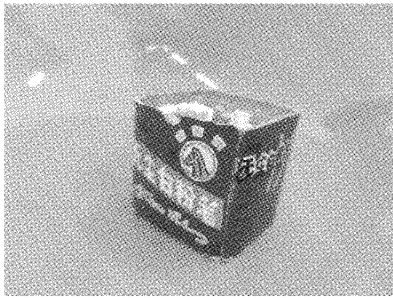


图12 实验对象

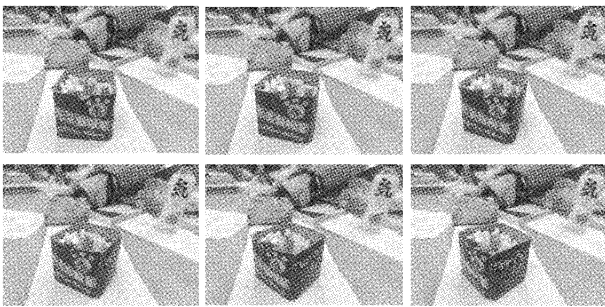


图13 部分输入图像序列

分别对拍摄得到的45张图像组成的图像序列进行稀疏三维重建实验,实验结果如图14所示。如图14(a)所示,是传统SFM算法重建得到的结果点云,结果并不能完整反映出实验对象的原有三维结构信息,且求解得到的摄像机的运动轨迹与1.2节理论推导的结果不符。因此,实验结果表明,传统SFM算法无法适用固定摄像机的拍摄方式。

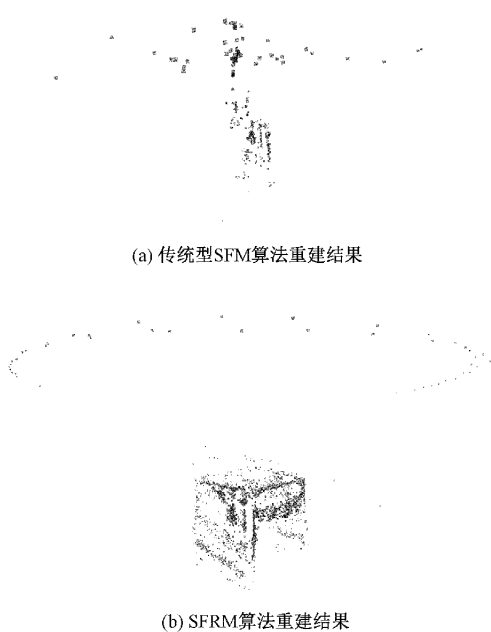


图14 稀疏重建结果

如图14(b)所示,是本文设计的SFRM算法重建得到的结果点云,重建结果已恢复实验对象的完整三维结构信

息,且求解得到的摄像机相对运动轨迹在三维空间中同一水平面上做围绕物体的圆周运动,符合理论推导。实验结果表明,本文所提出的SFRM算法能适用于由固定位置的摄像机拍摄旋转物体得到的图像序列。

本文优化设计的SFRM算法相较于传统SFM算法,具有运行时间效率上的优势。如图15所示为本文所提SFRM算法与传统SFM算法在不同图像数量下时间效率的对比,实验以重建耗时作为衡量时间效率的标准。在复杂背景下,SFRM算法的时间效率与传统SFM算法相比得到明显的提升,且特升效果随着图像数量的增加变得更为显著。实验结果表明,在仅针对物体的三维重建任务中,SFRM算法相对于传统SFM算法具有时间效率上的优势,优势大小与图像数量成正比。

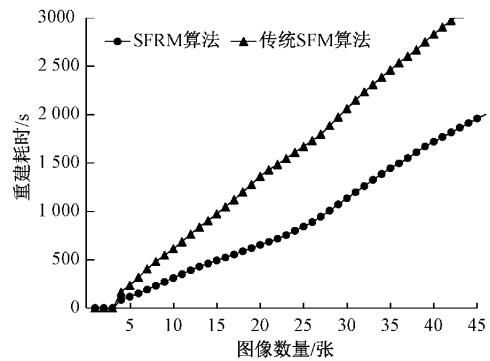


图15 改进前后重建耗时对比

本文稀疏重建得到的稀疏点云与求解得到的摄像机相对姿态变化的运动轨迹能用于多视图立体算法(multi view stereo, MVS),得到的物体稠密点云模型如图16所示。SFRM重建得到的结果点云中,大部分是来自于目标物体的局部区域的特征点所重建得到的点云,在拍摄得到的图像中,除目标物体以外的复杂背景区域并没有纳入匹配并生成点云,重建得到的结果滤除了复杂背景中的大量无用信息,只针对目标物体完成重建。

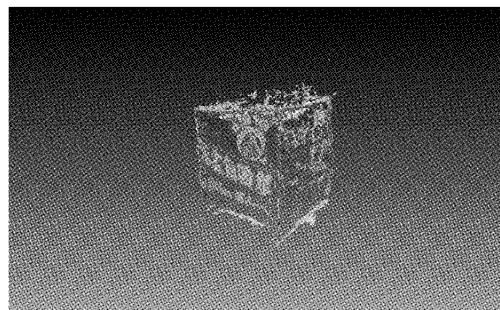


图16 物体稠密点云模型

4 结 论

本文提出一种基于特征点提取掩码的相对运动恢复结构三维重建算法,解决了传统SFM算法不适用于固定位置摄像机拍摄到的图像序列的问题,并有效地提高了三维重

建算法的性能。实验采用在复杂背景下拍摄得到的 45 张图像作为重建数据,实验结果表明,在复杂背景下的三维重建中,位于目标物体区域的匹配对占总匹配对的比例从 32% 提高到 84%,重建耗时从 3 245.97 s 降低到 2 002.77 s, SFRM 算法相较于传统的 SFM 算法在时间效率上得到 38.29% 的提升。

本文提出的 SFRM 算法对于复杂背景下的三维重建具有重大优势,能简化拍摄流程,提高空间利用率,实现针对物体的高效率、高质量的三维重建。

参考文献

- [1] WU C. Towards linear-time incremental structure from motion [C]. Proceedings of the International Conference on 3D Vision(3DV), 2013:127-134.
- [2] 王宇希,刘越.一种基于多摄像机的鲁棒运动结构重建方法[J].仪器仪表学报,2015,36(1):230-238.
- [3] 李学亮,王维.基于 CNN 和 SIFT 特征的遥感图像变化检测[J].电子测量技术,2019,42(21):87-91.
- [4] 赵云皓,贺赛先.增量式 SFM 中特征点检测与匹配方法的改进[J].激光杂志,2020,41(3):59-66.
- [5] 赵谦,童申鑫,贺顺,等.改进的 SURF-RANSAC 图像匹配算法[J].计算机工程与设计,2021,42(10):2902-2909.
- [6] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011:2564-2571.
- [7] 冯明驰,刘景林,李成南,等.一种多焦距动态立体视觉 SLAM [J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):200-209.
- [8] 朱宇韩,卜雄洙,袁培丽,等.基于改进 AGAST 角点域特征的障碍检测算法[J].国外电子测量技术,2021,40(9):54-58.
- [9] 张绍荣,张闻宇,李云,等.基于 FAST 角点和 FREAK 描述符改进的无人机景象匹配算法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(4):102-110.
- [10] JIAYUAN L, QINGWU H, MINGYAO A. Point cloud registration based on one-point RANSAC and scale-annealing biweight estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021,59(11):9716-9729.
- [11] 王凌云,尹海波,王琪. SURF 和 RANSAC 在图像拼接中的应用[J].电子测量技术,2016,39(4):71-75.
- [12] 杨会君,王瑞萍,王增莹,等.基于多视角图像的作物果实三维表型重建[J].南京师大学报(自然科学版),2021,44(2):92-103.
- [13] 陈辉,马世伟,ANDREAS N. 基于激光扫描和 SFM 的非同步点云三维重构方法[J].仪器仪表学报,2016,37(5):1148-1157.
- [14] 张瑞,颜青松,曲英杰,等.融合 SFM 先验信息的城市三维线段重建算法[J].测绘科学,2021,46(8):55-62,119.
- [15] LIN W Y, LIU S, JIANG N, et al. RepMatch: Robust feature matching and pose for reconstructing modern cities [C]. Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision (ECCV), 2016,9905:562-579.
- [16] 陈武,姜三,李清泉,等.无人机影像增量式运动恢复结构研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1662-1674.
- [17] 姜三,许志海,张峰,等.面向无人机倾斜影像的高效 SfM 重建方案[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(8):1153-1161.
- [18] 郑如新,孙青云,肖国栋.基于机器视觉的工件尺寸测量研究[J].电子测量技术,2021,44(16):110-115.
- [19] 王启超,张维光,任永平.基于全景相机的 3D 坐标测量方法[J].电子测量技术,2017,40(12):203-208.
- [20] 孙英伟,林文树.基于 SFM 算法的单木结构参数提取研究[J].西北林学院学报,2020,35(5):180-184,218.
- [21] 王小玲,宋坤,王子斐,等.基于 SfM 的城市树木参数提取研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(6):139-148.

作者简介

高梓皓,硕士研究生,主要研究方向为三维重建及可视化、数字图像处理、计算机图形学。

E-mail:974725965@qq.com

张巧芬(通信作者),副教授,主要研究方向为导波光学与光通信技术、成像光学、机器视觉。

E-mail:zhqf@gdut.edu.cn

王桂棠,教授,主要研究方向为嵌入式控制、智能制造、机器视觉。

E-mail:wanggt@gdut.edu.cn

温腾腾,博士后,主要研究方向为智能感知。

E-mail:wentt@gdut.edu.cn

庞亮雨,硕士研究生,主要研究方向为导波光学与光通信技术。

E-mail:1215841672@qq.com

贾林锋,硕士研究生,主要研究方向为音频信号处理。

E-mail:846526132@qq.com