

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.03.010

# RTK 辅助的单目视觉地图构建与恢复方法

薛源, 孙永荣, 赵科东, 赵伟

(南京航空航天大学自动化学院导航研究中心, 南京 210016)

**摘要:**针对单目视觉 SLAM 在复杂场景下跟踪失败导致地图丢失的问题,提出了一种利用 RTK 信息辅助单目视觉的自动化地图构建与恢复方法。在视觉跟踪失败后,设计了一种自动化恢复地图构建方法,基于 RTK 信息的辅助,采用坐标变换算法处理丢失前的地图并将其融合到当前地图构建中,在提高建图效率的同时,最大程度地减少了地图信息的缺失。实验仿真结果表明,该方法可以解决系统无法继续跟踪建图的问题,与原始地图相比,其融合后构建的地图在保证全局一致性和完整性的基础上,可以保持米级的估计精度。

**关键词:**视觉导航;RTK 技术;地图融合;尺度估计;坐标变换

中图分类号:TN965.8

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2020)03-0070-07



## Map Construction and Recovery Method Based on RTK-aided Monocular Vision

XUE Yuan, SUN Yong-rong, ZHAO Ke-dong, ZHAO Wei

(Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To solve the problem of map loss caused by monocular SLAM tracking failure in complex scenes, an automatic map construction and recovery method based on RTK (Real-Time Kinematic) information aided monocular vision is proposed. With the aid of RTK information, the map before visual tracking fails is processed by coordinate transformation algorithm and is integrated into the current map construction, so as to further improve the efficiency of map construction and minimize the loss of map information. Simulation results show that the proposed method can help with the problem of map loss caused by visual tracking failure. Compared with the original intact map, the integrated map preserves its consistency and integrity with meter level estimation accuracy.

**Key words:** Visual navigation; RTK technology; Map fusion; Scale estimation; Coordinate transformation

### 0 引言

视觉传感器因其丰富的测量信息和自主的导航方式,在无人驾驶汽车和小型无人机等领域得到广泛

应用<sup>[1]</sup>。视觉同步定位与建图技术<sup>[2]</sup>(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)是视觉自主导航的核心技术之一,可以对连续帧的图像信息进行提取和处理,增量式构建出与未知环境一致的视觉地图。

收稿日期:2020-02-04;修订日期:2020-02-27

基金项目:江苏省政策引导类计划(产学研合作)基金(BY2016003-16)

作者简介:薛源(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为视觉导航、计算机视觉。E-mail: xueyuan@nuaa.edu.cn

基于单目视觉的 SLAM 技术可以在户外场景完成大范围地图绘制和位置估计,且其硬件设备具有尺寸小、成本低的特点,能够满足车辆导航等应用的需求<sup>[3-4]</sup>。单目 SLAM 技术根据优化方法不同分为基于滤波<sup>[5]</sup>和基于图优化<sup>[6]</sup>两种方式,基于滤波的方法只考虑相邻两帧的关系来对当前帧进行位姿估计,需要存储当前相机位姿以及地图中特征点的均值和协方差,计算复杂度为 $O(n^3)$ ,其中 $n$ 表示状态量,且呈递增状态<sup>[7]</sup>;基于图优化的方法通过特征点对多个相机位姿进行约束的方式来构建非线性最小二乘目标函数,采用一阶泰勒展开以及梯度下降的方法进行最优值求解,计算复杂度为 $O(n)$ , $n$ 表示当前具有共视关系的多个相机位姿以及特征点<sup>[8]</sup>。因此,图优化的方法在状态量有限的前提下,可以充分利用多个相机位姿进行线性优化,精确度和实时性更好<sup>[9]</sup>。其中,单目 ORB-SLAM 系统<sup>[10]</sup>采用特征提取以及基于关键帧的图优化方式可以大范围构建稀疏的点云地图,是目前鲁棒性较高的视觉地图构建方法之一。

然而,单目 ORB-SLAM 系统在图像运动模糊、纹理不明显等特殊场景中,无法对当前图像信息进行特征提取与匹配,对大范围场景也无法使相机快速回到原始场景中进行重定位,从而导致系统跟踪失败,出现地图丢失的问题<sup>[11]</sup>。目前,为了解决无法长时间跟踪建图的问题,可以采用局部子地图法对视觉地图进行分段构建然后直接拼接,而常见的几何地图融合算法是对同一坐标尺度下的地图信息采用最近邻近迭代算法进行地图融合<sup>[12]</sup>。由于单目视觉的尺度不确定性导致前后地图尺度不一致而无法直接融合,因此仅依赖于视觉传感器常常无法满足对复杂场景的应用需求。全球定位系统(Global Position System, GPS)<sup>[13]</sup>和惯性传感器<sup>[14]</sup>等导航系统与视觉传感器具有明显的互补性,因此可以通过多传感器组合来提高视觉地图实时构建的鲁棒性和准确性,这也是当前研究的热点。其中,实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)作为新型卫星测量方法,通过载波相位动态实时差分法可以得到厘米级的定位精度<sup>[15]</sup>,为室外的地图构建提供高精度的位置基准。

本文提出了一种基于 RTK 信息辅助的自动化视觉地图构建与恢复方案。该方案对 ORB-SLAM 建图框架进行了改进,在视觉跟踪失败后,可以快速重建地图;同时基于 RTK 提供的高精度定位信

息,使丢失前的地图信息通过坐标变换算法处理后,自动融合到当前新地图构建中。该方法可以解决系统在复杂场景下跟踪失败导致地图丢失的问题,在提高建图效率的基础上,保证了视觉地图的全局一致性和完整性。

## 1 地图构建与恢复方案

### 1.1 ORB-SLAM 建图框架

单目 ORB-SLAM 系统采用特征提取和非线性优化的方式,具有很强的鲁棒性,可以构建具有几何特征的稀疏地图,在导航阶段通过地图重载的方式为视觉定位提供匹配信息。

ORB-SLAM 的建图框架如图 1 所示,采取跟踪、局部建图、闭环检测三线程并行的方式构建稀疏的点云地图<sup>[16]</sup>,地图信息包括关键帧、3D 地图点以及关键帧与关键帧之间的共视关系。跟踪线程主要对图像序列进行 ORB 特征提取与匹配,通过对极约束以及最小重投影误差的方式估计和优化当前相机运动轨迹,然后判断当前帧是否可以作为新关键帧插入地图构建中。关键帧判断准则主要根据图像与图像之间的特征匹配程度,从两方面考虑:1)算法运行困难需要尽快插入关键帧;2)删除冗余的关键帧以避免额外的计算成本。局部建图线程根据当前关键帧更新地图信息,先恢复新的三维地图点,然后删除冗余的关键帧及地图点信息。闭环检测线程通过对全局地图的误差累积进行修正,从而得到全局地图最优结构和运动的结果。

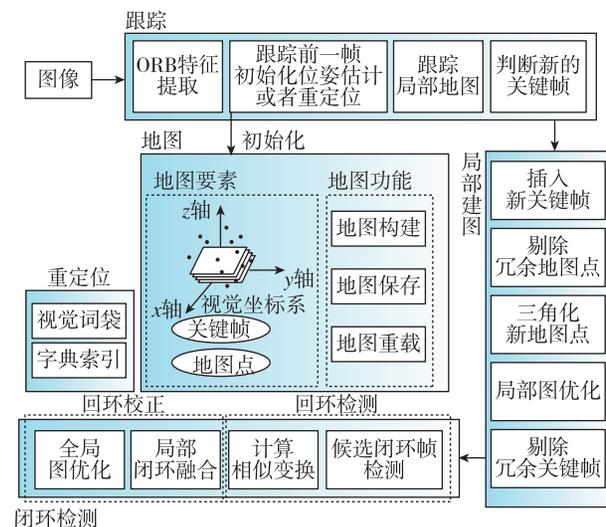


图 1 ORB-SLAM 制图模式框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ORB-SLAM mapping mode framework

基于单目 ORB-SLAM 的地图构建方法可以保证算法的实时性和地图构建的准确性。本文在此建图框架的基础上,主要对跟踪线程以及局部建图线程进行改进,设计了一种基于 RTK 地理信息约束的自动化视觉地图构建及恢复方案,进一步提高了视觉地图构建的鲁棒性。

## 1.2 地图构建改进方案

地图构建改进方案结构说明如图 2 所示,在视

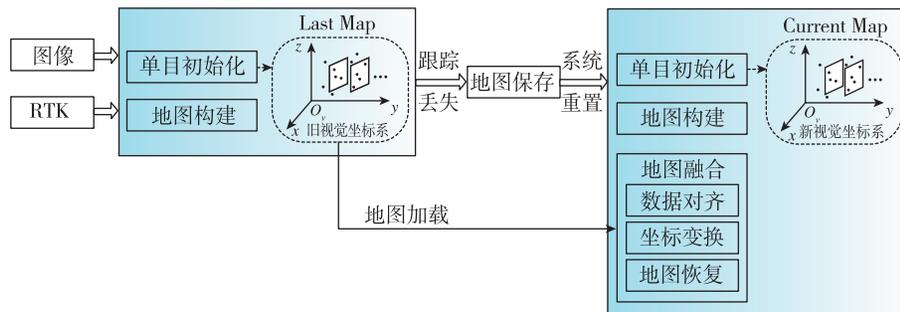


图 2 地图构建改进方案结构说明示意图

Fig. 2 Schematic diagram of map construction improvement scheme structure

基于 RTK 信息辅助的地图构建改进方案,包括以下 5 个步骤:

1) 同步采集图像序列和 RTK 数据,通过单目初始化的方式恢复地图信息,将初始关键帧的相机坐标系取为视觉坐标系进行地图构建;

2) 当建图跟踪丢失时,保存丢失前的地图并记为旧地图信息,包括关键帧、地图点位姿信息以及关键帧与关键帧之间的共视关系;

3) 清空并重置系统建图变量,重新初始化当前视觉信息,在新视觉坐标系下构建新地图信息;

4) 新地图筛选出 20 帧关键帧以及三角化恢复的地图点后,自动化加载旧地图信息;

5) 基于 RTK 提供具有地理信息的约束,采用坐标变换算法将旧关键帧以及相应旧地图点位姿信息变换到当前新视觉坐标系下,并融合到新构建的视觉地图变量中,在保证全局地图位置分布合理、物理尺度一致性的基础上,为当前系统的跟踪建图提供更冗余的地图信息。

## 2 地图恢复关键技术

### 2.1 数据对齐预处理

由于视觉传感器与 RTK 传感器的采集数据存在频率不一致的问题,需要对数据进行对齐预处

理,然后才能建立视觉坐标和地理坐标的映射关系,对视觉地图进行具有真实地理信息的尺度估计。觉跟踪失败后,该方案可以快速恢复地图重建,利用 RTK 高精度的位置坐标对视觉坐标系下的地图信息进行具有真实地理信息的相似变换参数估计并自动融合丢失地图,从而构建了尺度一致的全局地图,防止地图信息的缺失。

由于相机运动速度较慢,且关键帧提取频率与 RTK 数据采集频率大致相同,因此可以根据时间戳,采用邻域线性插值法近似将 RTK 数据与关键帧轨迹对齐。如图 3 所示,例如,已知某一关键帧的采集时刻为  $t_k$ ,需要找到该时刻对应的 RTK 数据,首先找到离  $t_k$  左右最近的 2 个 RTK 采集时刻  $t_j$  和  $t_{j+1}$ ,则关键帧在  $t_k$  时刻对应的真实地理坐标可以采用如下公式进行计算

$$\mathbf{g}(t_k) = \mathbf{g}(t_j) + \frac{\mathbf{g}(t_{j+1}) - \mathbf{g}(t_j)}{t_{j+1} - t_j}(t_k - t_j) \quad (1)$$

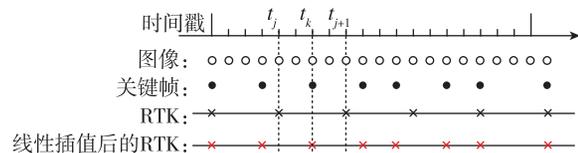


图 3 RTK 线性插值示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RTK linear interpolation

通过连接 2 个已知量的直线确定中间未知量的方法,可以近似将 RTK 数据与所有关键帧序列对齐,解决多传感器频率不一致的问题。

## 2.2 坐标变换参数估计

与真实世界地图相比,单目视觉构建出的三维地图中物体形状不变,但是存在一个旋转  $R$ 、平移  $t$  和尺度  $s$  的相似变换。因此,本节需要利用对齐 RTK 数据对丢失前后的视觉地图进行相似变换参数的最优估计,以获得真实的物理尺度。在此基础上,基于真实地理信息的约束关系,采用坐标变换算法将丢失前的地图信息变换到当前新视觉坐标系下。

如图 4 所示,  $(\mathbf{R}_1, \mathbf{t}_1, s_1)$  和  $(\mathbf{R}_2, \mathbf{t}_2, s_2)$  分别为从新旧视觉坐标系到真实地理坐标系之间的相似变换参数,  $(\mathbf{R}_{21}, \mathbf{t}_{21}, s_{21})$  为旧视觉坐标系到新视觉坐标系之间的相似变换参数。

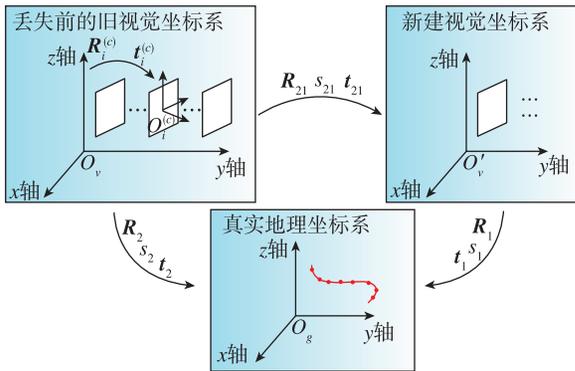


图 4 不同坐标系相似变换示意图

Fig. 4 Diagram of similar transformation in different coordinate systems

视觉地图以初始关键帧的相机坐标为当前视觉坐标系,其余关键帧位置信息均在该视觉坐标系下表示,对某关键帧在视觉坐标系下的位置记为  $\mathbf{X}_v = (x_v, y_v, z_v)^T$ ,其在真实地理坐标系下的坐标记为  $\mathbf{X}_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ ,则两者满足如下的相似变换关系

$$\mathbf{X}_g = s_{vg} \mathbf{R}_{vg} \mathbf{X}_v + \mathbf{t}_{vg} \quad (2)$$

其中,  $s_{vg}$  为尺度因子且满足  $s_{vg} > 0$ ,  $\mathbf{R}_{vg}$  为三维空间内的旋转矩阵,  $\mathbf{t}_{vg} = (t_x, t_y, t_z)^T$  为平移向量。采用最小化均方差  $e^2(\mathbf{R}_{vg}, \mathbf{t}_{vg}, s_{vg})$  计算视觉地图从视觉坐标到真实地理坐标系下的最优相似变换参数

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, s} e^2(\mathbf{R}_{vg}, \mathbf{t}_{vg}, s_{vg}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{X}_{g_i} - (s_{vg} \mathbf{R}_{vg} \cdot \mathbf{X}_{v_i} + \mathbf{t}_{vg})\| \quad (3)$$

记  $\mathbf{X}_{v_j}$  为旧地图中第  $j$  个地图点在旧视觉坐标系下的位置,根据相似变换参数  $(\mathbf{R}_{21}, \mathbf{t}_{21}, s_{21})$  可以得到  $\mathbf{X}_{v_j}$  地图点在新视觉坐标系下的坐标

$$\mathbf{X}'_{v_j} = s_{21} \mathbf{R}_{21} \mathbf{X}_{v_j} + \mathbf{t}_{21} \quad (4)$$

其中,  $s_{21} = s_1^{-1} s_2$ ,  $\mathbf{R}_{21} = \mathbf{R}_1^T \mathbf{R}_2$ ,  $\mathbf{t}_{21} = s_1^{-1} \mathbf{R}_1^T (\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1)$ 。同时,记旧地图中第  $i$  个关键帧在旧视觉坐标系下的位姿信息为  $(\mathbf{R}_i^{(c)}, \mathbf{t}_i^{(c)})$ ,根据式(5)可以将该关键帧的位姿信息转换到当前新视觉坐标系下

$$\begin{cases} \mathbf{R}_i^{(c)'} = \mathbf{R}_i^{(c)} \mathbf{R}_{21}^T \\ \mathbf{t}_i^{(c)'} = -\mathbf{R}_i^{(c)'} (-s_{21} \mathbf{R}_{21} (\mathbf{R}_i^{(c)})^T \mathbf{t}_i^{(c)} + \mathbf{t}_{21}) \end{cases} \quad (5)$$

则第  $i$  个关键帧在新视觉坐标系下的位置坐标可以表示为  $\mathbf{Y}'_{vi} = -(\mathbf{R}_i^{(c)'})^T \mathbf{t}_i^{(c)'}$ 。因此,根据式(4)和式(5)可以将旧地图中所有地图点以及关键帧位姿进行坐标变换,得到在新视觉坐标系下位置分布合理、尺度与当前新地图一致的地图信息。该方法虽然无法做到视觉与 RTK 真正的数据融合,但是可以快速地对单目视觉的真实尺度进行近似估计,规避了目前单目惯性紧组合需要长时间尺度估计以保证尺度收敛的不足之处。

## 2.3 地图恢复方法

在完成多传感器数据对齐以及视觉地图坐标变换后,需要对地图构建改进方案中的地图恢复方法进行详细设计。该方法通过对系统当前的地图构建信息进行判断及处理,对丢失地图进行自动恢复与融合,以解决跟踪失败导致地图缺失的问题,可以细分为旧地图保存、旧地图加载以及地图融合三部分,方法流程如图 5 所示。

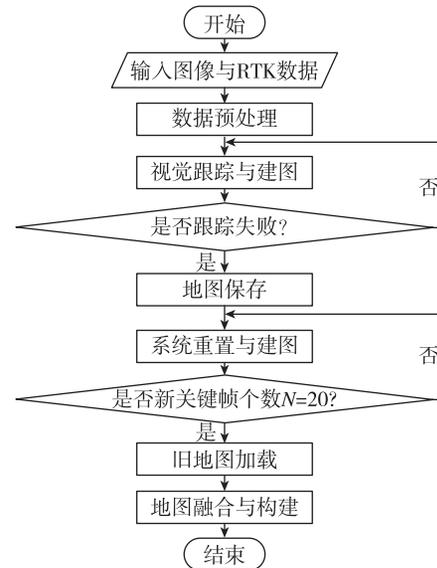


图 5 地图恢复方法流程示意图

Fig. 5 Map recovery method flow diagram

### (1) 旧地图保存

若视觉一定时间内无法继续跟踪建图,就需要

对当前构建的地图信息进行保存,防止系统重置导致地图信息的丢失,同时需要修改系统的标志信息,包括以下2个步骤:

1)判断当前关键帧序列个数  $N > 5$  是否成立,若成立,保存当前地图到相应路径,记录当前关键帧和地图点的最大序号:LastKF\_id 以及 LastMP\_id,置旧地图标志 LastMapFlag=true,若不成立,则不保存;

2)将系统有关的建图变量清空并重置,在新视觉坐标系下重新构建地图信息,新地图关键帧和地图点序号在 LastKF\_id 和 LastMP\_id 上累加,防止前后地图序号重合。

### (2)旧地图加载

在新视觉坐标系下快速重建新地图后,需要对当前地图构建信息进行判断与处理,进而加载旧地图,包括以下2个步骤:

1)由于初始化导致可用于匹配的关键帧和地图点较少,跟踪很容易再次丢失,因此选择在恢复20帧关键帧以及相应地图点信息后,再进行旧地图加载;

2)判断旧地图标志 LastMapFlag 是否为 true,若成立,自动加载该地图信息。

### (3)地图融合

加载旧地图信息后,需要将该地图信息融合到当前新地图构建中,然而前后地图坐标尺度不一致而无法直接拼接,因此需要基于 RTK 信息辅助,运行以下3个步骤:

1)将 RTK 数据与关键帧数据对齐,估计新旧视觉坐标系到真实地理坐标系的相似变换参数,基于该约束关系,将旧地图信息变换到当前新视觉坐标系下;

2)将旧地图信息添加到当前新地图构建变量中,获得满足新视觉坐标系下位置分布合理、物理尺度与当前新地图一致的关键帧以及地图点数据;

3)计算旧关键帧的视觉词袋,将相关的索引信息添加到系统变量中,使其真正参与到当前系统的地图构建中,为跟踪重定位以及回环修正提供更冗余的地图信息。

## 3 实验测试及结果分析

### 3.1 实验平台

通过搭建实验平台对本文提出的地图构建与恢复算法进行了验证,如图6所示。单目相机采用搭载在大疆经纬 M100 四旋翼飞行器上的禅思 X3 摄像头,图像分辨率为  $1280 \times 720$ ;RTK 设备采用

了 NovAtel 公司型号为 NovAtel OEM-615 接收机板卡,定位精度为 5cm,通过旋翼机上的板载处理器可以将 RTK 与相机采集的数据按照指定的格式进行保存。考虑到地图构建及恢复算法需要适用于大范围场景,为车辆的视觉导航提供匹配信息,因此本实验将飞行器以及 RTK 移动站设备固定在小车上,同步采集图像数据和 RTK 数据。为了保证图像质量和算法的处理性能,设置图像采集频率为 20Hz,RTK 采集频率为 5Hz,小车平均行驶速度大约为 1.5m/s。本实验围绕校区部分教学楼穿行,总帧数为 10000 帧。

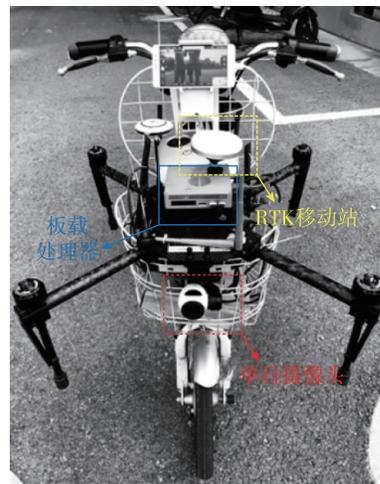


图6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

### 3.2 实验分析

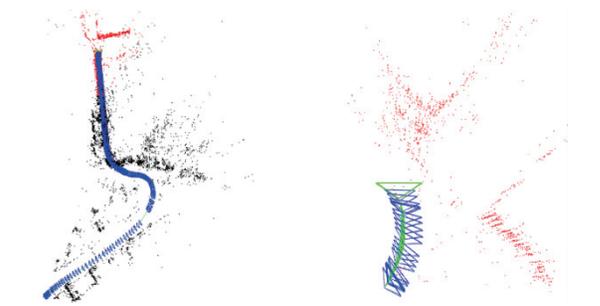
实验主要通过和跟踪未丢失的原始地图进行比较,分析本文算法的融合效果和精确性。为了测试算法的有效性,对采集数据中的某段连续15帧图像进行加噪处理,以仿真由于图像运动模糊、纹理不明显等复杂场景导致 ORB-SLAM 建图系统出现跟踪失败的情况。通过运行本文算法,基于 RTK 信息辅助,自动化重建新地图并将丢失前的地图信息融合到当前系统的地图构建中。视频序列中的若干图像见图7(a);图7(b)为系统跟踪丢失前构建的地图;图7(c)为重新初始化后构建的新地图,局部融合效果如图7(d)所示;图7(e)为同一段未经加噪处理的原始图像序列基于 ORB\_SLAM 建图系统构建的局部地图。

可以看出,本文设计的地图融合框架通过 RTK 真实地理信息约束,能够较好地将跟踪丢失前的地图信息转换到新视觉坐标系下,进而参与到当前局

部地图构建中,保证了局部融合地图的尺度一致性。

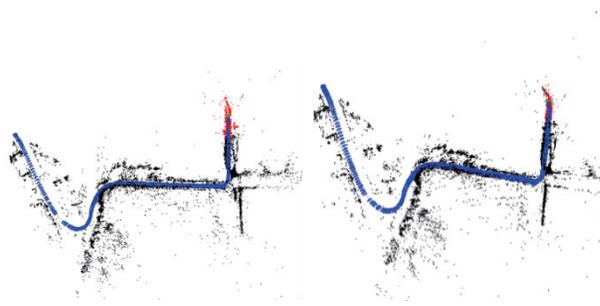


(a)



(b)

(c)



(d)

(e)

图 7 图像序列及地图融合效果示意图

Fig. 7 Snapshots of the image sequence and the diagram of map fusion effect

为了更精确地进行比较,由于 RTK 数据精度为厘米级,可以作为相机真实地理轨迹。当图像序列全部参与地图构建后,本实验通过一个全局相似变换处理,将所有关键帧轨迹与 RTK 提供的真实位置对齐,计算对齐轨迹的均值以及均方根误差,并对融合地图以及原始地图的全局轨迹误差进行比较。融合地图是指经过加噪处理的图像数据基于 ORB\_SLAM 算法出现跟踪失败后,通过运行本文算法构建的全局融合地图;原始地图是指原始图

像数据基于 ORB\_SLAM 算法构建的全局地图。

图 8 中,绿线和蓝线分别表示原始地图和融合地图的全局关键帧轨迹,红线表示 RTK 轨迹。与原始地图的轨迹相比,本文算法可以使丢失地图快速恢复到当前系统地图构建中,使得融合后构建的全局地图保持了全局一致性以及完整性。与高精度的 RTK 轨迹相比,全局位置误差如表 1 所示,融合后构建的地图轨迹精度与原始地图相近。因此,算法可以解决由于跟踪失败导致地图信息缺失的问题,在提高建图效率的同时,保证了融合地图具有较好的全局一致性以及构建精度。

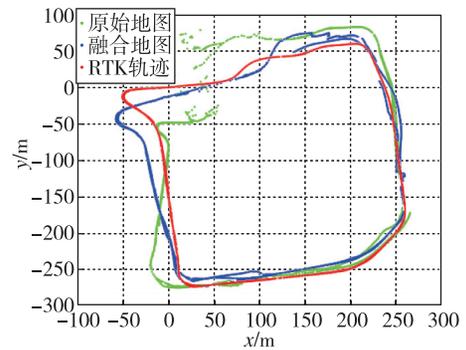


图 8 RTK 轨迹、融合地图以及原始地图的关键帧轨迹示意图

Fig. 8 RTK track, the key frame track of fused map and original map

表 1 融合地图与原始地图的全局位置误差统计

Tab. 1 Global position error statistics of fused map and original map

地图	X 轴/m	Y 轴/m	位置/m
原始地图均值(MAE)	12.5	15.0	21.0
融合地图均值(MAE)	7.8	13.4	17.0
原始地图均方根(RMSE)	17.1	21.0	27.1
融合地图均方根(RMSE)	11.4	15.8	19.5

#### 4 结论

保证视觉地图的完整性以及全局一致性是视觉导航准确匹配定位的关键,本文主要针对复杂场景导致单目 SLAM 建图系统跟踪失败且无法回到原始场景进行重定位,进而使得地图丢失的问题,提出了一种基于 RTK 信息辅助的单目视觉地图构建及恢复技术。跟踪失败后,该技术可以快速进行新地图重建,并将丢失地图信息融合到当前系统中,在提高建图效率的基础上,获得分布合理、尺度一致的全局地图。实验结果表明,本文算法构建的融合地图与跟踪未丢失的原始地图精度相近,可以

提高单目 SLAM 跟踪建图的鲁棒性。

本文提出的地图构建技术具有一定的局限性,视觉的位姿估计有较大的误差累积,而闭环检测只能在一定程度上得到抑制。接下来将 RTK 信息与视觉信息进行组合,进一步保证地图的完整性以及准确性是下一步的研究方向。

### 参考文献

- [1] 张海,吴克强,张晓鸥. 视觉导航技术的发展[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(2): 1-8.  
Zhang Hai, Wu Keqiang, Zhang Xiaou. The development of visual navigation[J]. Navigation Position and Timing, 2017, 4(2): 1-8(in Chinese).
- [2] 邸凯昌, 王文辉, 赵红颖, 等. 视觉 SLAM 技术的进展与应用[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 770-779.  
Di Kaichang, Wan Wenhui, Zhao Hongying, et al. Progress and application of visual SLAM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 770-779(in Chinese).
- [3] Endres F, Hess J, Sturm J, et al. 3-D mapping with an RGB-D camera[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1): 177-187.
- [4] 孟旭炯. 基于单目视觉的同时定位与地图重建算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
Mneg Xujiong. Research on the algorithm of monocular vision based simultaneous localization and mapping[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010(in Chinese).
- [5] Xia J, Iqbal U, Noureldin A, et al. Adaptive square-root CKF based SLAM algorithm for indoor UGVs [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2017: 1942-1946.
- [6] 董蕊芳, 柳长安, 杨国田, 等. 基于图优化的单目线特征 SLAM 算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1094-1100.  
Dong Ruifang, Liu Chang'an, Yang Guotian, et al. Line-based monocular graph SLAM algorithm[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2017, 47(6): 1094-1100(in Chinese).
- [7] 高翔. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.  
Gao Xiang. 14 lectures on visual SLAM: from theory to practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017(in Chinese).
- [8] 梁明杰, 闵华清, 罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述[J]. 机器人, 2013(4): 118-130.  
Liang Mingjie, Min Huaqing, Luo Ronghua. Graph based SLAM: a survey[J]. Robot, 2013(4): 118-130 (in Chinese).
- [9] Strasdat H, Montiel J M M, Davison A J. Visual SLAM: why filter? [J]. Image and Vision Computing, 2012, 30(2): 65-77.
- [10] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [11] 张剑华, 王燕燕, 王曾媛, 等. 单目同时定位与建图中的地图恢复融合技术[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(3): 372-383.  
Zhang Jianhua, Wang Yanyan, Wang Zengyuan, et al. Recovery of lost map for monocular simultaneous location and mapping [J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(3): 372-383(in Chinese).
- [12] Ballesta M, Reinoso O, Gil A, et al. Analysis of map alignment techniques in visual SLAM systems[C]//IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2008: 825-832.
- [13] 程见童, 张为华, 江振宇. 同时定位与制图辅助的 GPS/DR 组合导航[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 72-76.  
Cheng Jiantong, Zhang Weihua, Jiang Zhenyu. GPS/DR integrated navigation aided by simultaneous localization and mapping[J]. Journal of National Defense University of Science and Technology, 2014, 36(3): 72-76(in Chinese).
- [14] 徐晓苏, 代维, 杨博, 等. 室内环境下基于图优化的视觉惯性 SLAM 方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(3): 313-319.  
Xu Xiaosu, Dai Wei, Yang Bo, et al. Visual-aid inertial SLAM method based on graph optimization in indoor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(3): 313-319(in Chinese).
- [15] 文琳. GPS\_RTK 测量技术的应用分析[J]. 西部资源, 2019(3): 150-151.  
Wen Lin. Application analysis of GPS\_RTK measurement technology[J]. Western Resource, 2019(3): 150-151(in Chinese).
- [16] Mur-Artal R, Tardos J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for Monocular, Stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.