

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 9 月 16 日 (16.09.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/180128 A1

(51) 国际专利分类号:
G06T 7/73 (2017.01)

东省广州市南沙区环市大道南南沙科技创新中心, Guangdong 511458 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/080007

(72) 发明人: 刘 屹 (LIU, Yu); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(22) 国际申请日: 2021 年 3 月 10 日 (10.03.2021)

戴 磊 (DAI, Lei); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(25) 申请语言: 中文

徐瑞峰 (XU, Ruifeng); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(26) 公布语言: 中文

瞿弘毅 (QU, Hongyi); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(30) 优先权:
202010166801.0 2020 年 3 月 11 日 (11.03.2020) CN

邢玛丽 (XING, Mali); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(71) 申请人: 华南理工大学 (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。 广州现代产业技术研究院 (GUANGZHOU INSTITUTE OF MODERN INDUSTRIAL TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广

姚科 (YAO, Ke); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510640 (CN)。

(74) 代理人: 广州华进联合专利商标代理有限公司 (ADVANCE CHINA IP LAW OFFICE); 中国

(54) Title: RGBD SENSOR AND IMU SENSOR-BASED POSITIONING METHOD

(54) 发明名称: 一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法

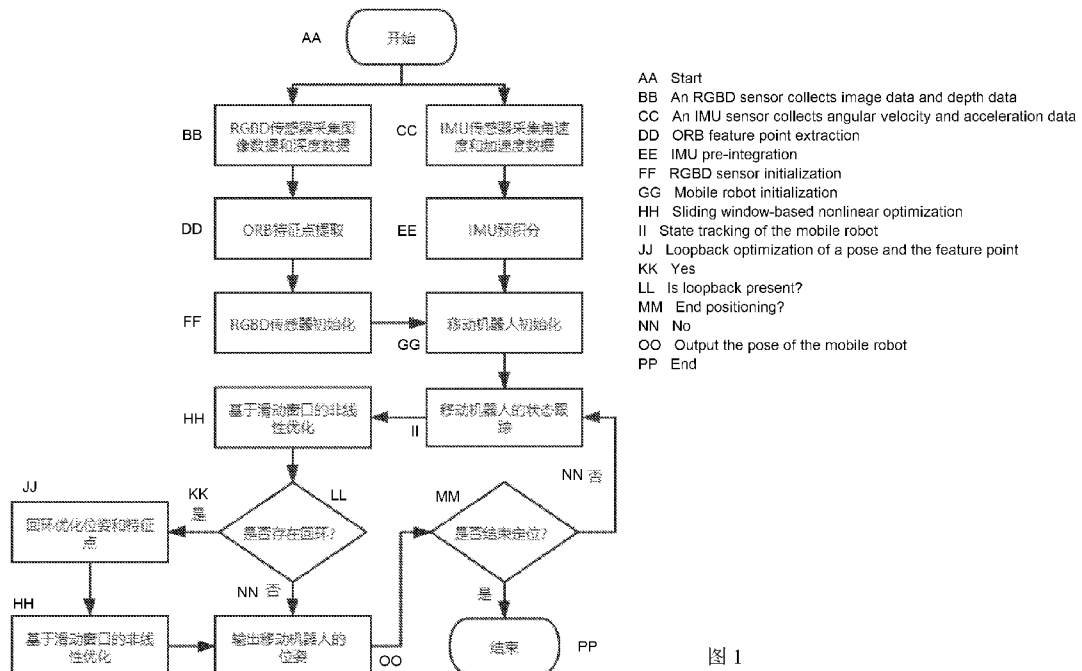


图 1

(57) Abstract: An RGBD sensor and IMU sensor-based positioning method, which is characterized in that: firstly, a mobile robot carries an RGBD sensor and an IMU sensor to collect data; then, a visual SLAM algorithm is used to initialize data of the RGBD sensor so as to obtain pose information thereof, at the same time data of the IMU sensor is pre-integrated, and the mobile robot is initialized to acquire initial state information thereof; tracking of the pose information, speed, and IMU sensor bias of the mobile robot is optimized on the basis of a re-projection error; meanwhile, a sliding window-based nonlinear optimization algorithm is used to optimize pose information and a map in real time; and loopback detection is added to avoid a situation of zero bias occurring.

广东省广州市天河区珠江东路6号4501房
(部位: 自编01-03和08-12单元) (仅限办公
用途), Guangdong 510623 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种基于RGBD传感器和IMU传感器的定位方法, 特征如下: 首先, 移动机器人搭载RGBD传感器和IMU传感器采集数据; 其次, 采用视觉SLAM算法对RGBD传感器数据进行初始化获得其位姿信息, 同时对IMU传感器数据进行预积分, 然后对移动机器人初始化获取其初始状态信息; 基于重投影误差优化跟踪移动机器人的位姿信息、速度和IMU传感器偏置; 同时, 采用基于滑动窗口的非线性优化算法, 实时优化位姿信息和地图; 加入回环检测, 避免零偏情况的出现。

一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法

相关申请的交叉引用

- 5 本申请要求于 2020 年 3 月 11 日提交中国专利局、申请号为 2020101668010、名称为“一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用并入本文。

技术领域

- 10 本申请涉及视觉 SLAM 以及传感器融合技术领域，具体涉及一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法。

背景技术

- 同时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping)简称 SLAM，最先是
15 由 SmithSelf 和 Cheeseman 在 1988 年提出来的，被认为是实现真正全自主移动机器人的关键，SLAM 问题可以描述为：机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动，在移动过程中根据位置估计和传感器数据进行自身定位，同时建造增量式地图。只通过相机获取环境信息的 SLAM 被称为视觉 SLAM，由于相机具有价格低、功耗低、重量轻、体积小、图像信息丰富等特点，所以视觉 SLAM 受到了国内外广大学者和专家的研究。
20

 IMU(Inertial Measurement unit)为惯性测量单元，一个 IMU 传感器内会装有三轴的陀螺仪和三个方向的加速度计，来测量物体在三维空间中的角速度和加速度，并以此解算出物体的姿态。IMU 传感器常用在需要进行运动控制的设备，例如汽车和机器人上。

- 25 视觉 SLAM 算法虽然可以通过相机传感器数据估计自己在三维空间中的位姿信息，但在快速运动或纯旋转时容易造成特征点跟踪丢失，同时视觉 SLAM 一般采取第一帧作为世界坐标系，估计出来的位姿信息是相对于第一帧图像的位姿信息，而不是如东北天这样的世界坐标系，而 IMU 传感器可以提供各个时刻的位姿信息，但在长时间运动中存在零漂问题，导致估计的位姿信息产生偏差，而视觉 SLAM 中的回环能很好地
30 解决这一问题。因此视觉 SLAM 和 IMU 传感器的融合能更好的估计机器人在未知空间

中的位姿信息。

发明内容

根据本申请的各种实施例，提供一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法。

本申请的目的可以通过采取如下技术方案达到：

一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，应用于搭载 RGBD 传感器和 IMU 传感器的移动机器人，实现对移动机器人的定位，所述的定位方法包括以下步骤：

S1、传感器数据采集：移动机器人搭载 RGBD 传感器和 IMU 传感器在三维空间中自由移动，采集 RGBD 传感器数据和 IMU 传感器数据；

S2、IMU 预积分：采用视觉 SLAM 算法根据 RGBD 传感器不同帧的图像数据质量选定关键帧，基于选定的关键帧，采用 IMU 预积分方程计算关键帧之间的 IMU 传感器数据的预积分值；

S3、移动机器人初始化：采用视觉 SLAM 算法对 RGBD 传感器初始化得到 RGBD 传感器的位姿信息，然后根据 RGBD 传感器的位姿信息和对应关键帧的 IMU 预积分对移动机器人初始化获取移动机器人的初始化状态信息，其中，所述的移动机器人的状态信息包括移动机器人的位姿信息、速度和 IMU 传感器的偏置；

S4、移动机器人状态的跟踪优化：采用基于重投影误差的优化算法对估计的移动机器人的状态信息进行优化跟踪，然后采用基于滑动窗口的优化算法对移动机器人的状态进行非线性优化；

S5、回环检测：根据 RGBD 传感器数据，采用基于词袋模型的回环优化算法对 RGBD 传感器的位姿信息和特征点进行回环优化，然后采用基于滑动窗口的优化算法对 IMU 传感器误差项进行优化。

进一步地，所述的 IMU 传感器的采集频率大于所述的 RGBD 传感器采集频率，IMU 传感器的采样频率为 100Hz 以上，RGBD 传感器采样频率为 30Hz 左右，由于 IMU 传感器的采样频率远大于 RGBD 传感器采样频率，因此需要通过 IMU 预积分对齐数据。

进一步地，所述的步骤 S2 中所述的步骤 S2 中采用视觉 SLAM 算法选定关键帧的规则如下：根据 RGBD 传感器所采集的当前图像帧与上一关键帧之间的帧数间隔，以及当前图像帧与之前的关键帧共视特征点的数量进行选定。

进一步地, 所述的步骤 S2 中计算 IMU 预积分, IMU 传感器测量得到加速度和角速度:

$$\begin{cases} \hat{\omega}(t) = \omega(t) + b^g(t) + \eta^g(t) \\ \hat{a}(t) = (R^{WB})^T(a(t) - g_w) + b^a(t) + \eta^a(t) \end{cases}$$

其中 $\omega(t)$ 和 $a(t)$ 分别表示角速度和加速度的真实值, $\hat{\omega}(t)$ 和 $\hat{a}(t)$ 分别表示角速度和加速度的 IMU 传感器测量值, R^{WB} 表示 IMU 传感器坐标系到世界坐标系的旋转矩阵, $b^g(t)$ 和 $b^a(t)$ 表示随时间变化的 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, $\eta^g(t)$ 和 $\eta^a(t)$ 表示随时间变化的 IMU 传感器的陀螺仪和加速度计高斯白噪声, g_w 表示在世界坐标下的重力向量;

对 IMU 传感器测量值进行积分, 并根据采样频率将其离散化, 可以得到:

$$\begin{cases} R_j^{WB} = R_i^{WB} \prod_{k=i}^{j-1} \text{Exp}((\omega_k - b_k^g - \eta_k^{gd})\Delta t) \\ v_j = v_i + g_w \Delta t + \sum_{k=i}^{j-1} \Delta R_{ik} (a_k - b_k^a - \eta_k^{ad}) \Delta t \\ p_j = p_i + \sum_{k=i}^{j-1} [v_k \Delta t + \frac{1}{2} g_w \Delta t^2 + \frac{1}{2} \Delta R_{ik} (a_k - b_k^a - \eta_k^{ad}) \Delta t^2] \end{cases}$$

其中 b_k^g 和 b_k^a 表示 k 时刻的 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, η_k^{gd} 和 η_k^{ad} 表示离散后的 IMU 传感器的陀螺仪和加速度计高斯白噪声, ΔR_{ik} 表示 i 时刻到 k 时刻的旋转矩阵, a_k 和 ω_k 分别表示 IMU 传感器测量的加速度和角速度离散值, p_i 、 v_i 、 R_i^{WB} 分别表示在 i 时刻 IMU 传感器离散后的位移、速度和旋转矩阵, g_w 表示在世界坐标下的重力向量, Δt 表示离散的时刻差。

进一步地, 为了避免上一时刻数据改变, 导致下一时刻需要重新推导的问题, 计算出两个时刻间的预积分, 并分离出 IMU 传感器加速度计偏置和陀螺仪偏置, 通过 IMU 预积分可以根据当前时刻的状态, 推算出下一时刻的状态:

$$\begin{cases} R_{i+1}^{WB} = R_i^{WB} \Delta R_{i,i+1} \text{Exp}(J_{\Delta R}^g b_i^g) \\ v_{i+1} = v_i + g_w \Delta t_{i,i+1} + R_i^{WB} (\Delta v_{i,i+1} + J_{\Delta v}^g b_i^g + J_{\Delta v}^a b_i^a) \\ p_{i+1} = p_i + v_i \Delta t_{i,i+1} + \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,i+1}^2 + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^g b_i^g + J_{\Delta p}^a b_i^a) \end{cases}$$

其中, R_{i+1}^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在 $i+1$ 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩

- 阵, v_{i+1} 、 p_{i+1} 分别表示 IMU 传感器坐标系 B 在 $i+1$ 时刻在世界坐标系下的速度和位姿信息, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器 i 时刻到 $i+1$ 时刻的间隔, b_i^g 、 b_i^a 分别表示在 i 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, g_w 表示在世界坐标系下的重力加速度, $\Delta R_{i,i+1}$ 、 $\Delta v_{i,i+1}$ 、 $\Delta p_{i,i+1}$ 分别表示 i 时刻到 $i+1$ 时刻 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置 b_i^g 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置 b_i^a 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵。

进一步地, 需要对 RGBD 传感器的位姿信息和 IMU 传感器的偏置、速度、重力向量、速度进行初始化, 所述的步骤 S3 包括:

- 10 S31、视觉 SLAM 算法对 RGBD 传感器进行初始化, 获取 RGBD 传感器的位姿信息, 过程如下:

S311、采用 ORB 特征提取算法, 提取 RGBD 传感器的图像数据的 ORB 特征点, 根据 ORB 特征点对应的 RGBD 传感器的深度数据找出对应的三维空间点, 从而根据 ORB 特征点像素坐标和空间点三维坐标获得 RGBD 传感器的位姿信息;

- 15 S312、对于某空间点 $X_k = [U_k, V_k, W_k]^T$, 其在 RGBD 传感器坐标系下的像素坐标为 $u_k = [x_k, y_k]$, 空间点坐标与像素坐标对应关系为:

$$su_k = Kexp(\xi^{\wedge})X_k$$

其中 s 表示深度图的尺度因子, K 表示 RGBD 传感器的内参矩阵, ξ 表示估计位姿信息, $\xi^{\wedge}$ 表示位姿信息所对应的反对称矩阵, k 表示特征点的序号;

- 20 S313、通过构建最小二乘问题, 优化 RGBD 传感器的位姿信息, 使其误差最小:

$$\xi^* = \underset{\xi}{argmin} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\| u_k - \frac{1}{s} Kexp(\xi^{\wedge})X_k \right\|^2$$

其中 ξ^* 表示优化后的最优位姿信息, ξ 表示估计的位姿信息, n 表示特征点的个数;

- S32、根据视觉 SLAM 算法选定的 N 个连续关键帧, 采用 IMU 预积分方程对 N 个连续关键帧之间的 IMU 传感器陀螺仪的数据进行积分, 得到 IMU 传感器在 N 个关键帧之间的旋转变换, 通过建立 N 个关键帧之间的 RGBD 传感器和 IMU 传感器旋转变
- 25

换的最小误差方程，对 IMU 传感器陀螺仪的偏置 b^g 进行估计：

$$\operatorname{argmin}_{b^g} \sum_{i=1}^{N-1} \left\| \operatorname{Log} \left(\left(\Delta R_{i,i+1} \operatorname{Exp} \left(J_{\Delta R}^g b^g \right) \right)^T R_{i+1}^{BW} R_i^{WB} \right) \right\|^2$$

其中 N 表示关键帧的个数， $R_i^{WB} = R_i^{WC} R^{CB}$ ； R_i^{WC} 是关键帧 i 由视觉 SLAM 算法得到的 RGBD 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转， R_{i+1}^{BW} 表示在关键帧 $i+1$ 时世界坐标系转换到 IMU 传感器的坐标系的旋转矩阵， R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵， $\Delta R_{i,i+1}$ 为连续两关键帧间的 IMU 积分所得的旋转矩阵， $J_{\Delta R}^g$ 表示 ΔR 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵；

S33、利用上述 IMU 传感器的陀螺仪偏置 b^g 估计的结果，对 IMU 传感器的加速度计偏置、重力向量进行估计：

10 S331、引入重力常数为 G ，IMU 传感器坐标系下重力向量 $\hat{g}_I = \{0, 0, -1\}$ ，和 IMU 传感器中测量的重力向量 g_w^* 通过 $\hat{g}_w = \frac{g_w^*}{\|g_w^*\|}$ 进行标准化，可以计算出旋转矩阵 R^{WI} ：

$$R^{WI} = \operatorname{Exp}(\vec{v}\theta)$$

其中 R^{WI} 表示 IMU 传感器在世界坐标系的方向；

$$\vec{v} = \frac{\hat{g}_I \times \hat{g}_w}{\|\hat{g}_I \times \hat{g}_w\|}, \quad \theta = \arctan(\|\hat{g}_I \times \hat{g}_w\|, \hat{g}_I \cdot \hat{g}_w)$$

15 其中 $\vec{v}$ 表示 IMU 传感器的重力和 IMU 测量的重力向量的旋转轴， θ 表示其旋转角度；

IMU 传感器重力向量可以表示为：

$$g_w = R^{WI} \hat{g}_I G$$

加入重力扰动向量 $\delta\theta$ ：

$$20 \quad g_w = R^{WI} \operatorname{Exp}(\delta\theta) \hat{g}_I G$$

其中 $\delta\theta = [\delta\theta_{xy} \quad 0]^T$ ， $\delta\theta_{xy} = [\delta\theta_x \quad \delta\theta_y]^T$

对 g_w 进行一阶近似：

$$g_w \approx R^{WI} \hat{g}_I G - R^{WI} (\hat{g}_I)_\times G \delta\theta$$

其中， $(\hat{g}_I)_\times$ 表示重力向量 $\hat{g}_I$ 的一阶近似；

25 根据 RGBD 传感器坐标系 C 和 IMU 传感器坐标系 B 之间的变换：

$$p_B^W = p_C^W + R^{WC} p_B^C$$

根据 IMU 传感器预积分计算方程可以联立下述方程：

$$p_{i+1}^c = p_i^c + v_i \Delta t_{i,i+1} - \frac{1}{2} R^{WI} (\hat{g}_l)_{\times} G \Delta t_{i,i+1}^2 \delta \theta + \frac{1}{2} R^{WI} \hat{g}_l G \Delta t_{i,i+1}^2 + (R_i^{WC} - R_{i+1}^{WC}) p_B^c + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^a b^a)$$

其中 $J_{\Delta p}^a$ 表示 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, p_B^c 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标, p_i^c 分别表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标, v_i 表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器的速度, R_i^{WC} 表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器的坐标系相对于世界坐标的旋转矩阵, R_i^{WB} 分别表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器第 i 关键帧到第 $i+1$ 关键帧时间的间隔。

根据三个连续关键帧之间的 IMU 预积分方程的递推关系, 以及 IMU 传感器坐标系和 RGBD 传感器坐标系的转换方程, 可以得到线性方程:

$$[\alpha(i) \quad \beta(i)] \begin{bmatrix} \delta \theta_{xy} \\ b^a \end{bmatrix} = \gamma(i)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha(i) &= \left[\frac{1}{2} R^{WI} (\hat{g}_l)_{\times} G (\Delta t_{12}^2 \Delta t_{23} + \Delta t_{12} \Delta t_{23}^2) \right]_{(:,1:2)} \\ \beta(i) &= R_1^{WB} J_{\Delta v_{23}}^a \Delta t_{12} \Delta t_{23} + R_2^{WB} J_{\Delta p_{23}}^a \Delta t_{12} - R_1^{WB} J_{\Delta p_{12}}^a \Delta t_{23} \\ \gamma(i) &= (p_2^c - p_3^c) \Delta t_{12} + (p_2^c - p_1^c) \Delta t_{23} + \frac{1}{2} \Delta t_{12} \Delta t_{23} R^{WI} \hat{g}_l G (\Delta t_{12} + \Delta t_{23}) \\ &\quad - (R_1^{WC} - R_2^{WC}) p_B^c \Delta t_{23} + (R_2^{WC} - R_3^{WC}) p_B^c \Delta t_{12} + R_1^{WB} \Delta v_{12} \Delta t_{12} \Delta t_{23} \\ &\quad + R_2^{WB} \Delta p_{23} \Delta t_{12} - R_1^{WB} \Delta p_{12} \Delta t_{23} \end{aligned}$$

其中 $\delta \theta_{xy}$ 为 $\delta \theta = \begin{bmatrix} \delta \theta_{xy} \\ 0 \end{bmatrix}$ 中的二阶向量, $\delta \theta$ 为重力偏差向量, b^a 表示初始化的 IMU 传感器加速度计偏置, R^{WI} 表示 IMU 传感器在世界坐标系的方向, Δt_{12} 、 Δt_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的时间间隔, G 表示重力参考值, $\hat{g}_l$ 表示在 IMU 传感器坐标系下的重力向量, $[]_{(:,1:2)}$ 表示只包含该矩阵前两列数据, R_1^{WB} 、 R_2^{WB} 分别表示关键帧 1、2 时刻 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, Δp_{12} 、 Δp_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的位移, Δv_{23} 表示关键帧 2 到关键帧 3 的速度变化, $J_{\Delta v_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{12}}^a$ 分别为 Δv_{23} 、 Δp_{23} 、 Δp_{12} 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, R_1^{WC} 、 R_2^{WC} 、 R_3^{WC} 分别表示关键帧 1、2、3 时刻的 RGBD 传感器坐标系 C 相对于世界坐标系的旋转矩阵, p_1^c 、 p_2^c 、 p_3^c 分别表示关键帧 1、2、3 时刻 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标, p_B^c 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标;

S332、通过奇异值分解求解出重力偏差二阶向量 $\delta\theta_{xy}$ 和加速度计偏置 b^a ;

S333、通过方程:

$$v_i \Delta t_{i,i+1} = p_i^c - p_{i+1}^c - \frac{1}{2} R^{WI}(\hat{g}_i) \times G \Delta t_{i,i+1}^2 \delta\theta + \frac{1}{2} R^{WI} \hat{g}_i G \Delta t_{i,i+1}^2 + (R_i^{WC} - R_{i+1}^{WC}) p_B^c + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^a b_i^a)$$

- 5 计算出 IMU 传感器的速度 v 作为初始化的 IMU 传感器速度,其中 $J_{\Delta p}^a$ 表示 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, p_B^c 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标, p_i^c 分别表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标, v_i 表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器的速度, R_i^{WC} 表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器的坐标系相对于世界坐标的旋转矩阵, R_i^{WB} 分别表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器第 i 关键帧到第 $i+1$ 关键帧时间的间隔。

进一步地,移动机器人的状态为移动机器人的位姿信息、速度和 IMU 传感器的偏置,所述的步骤 S4 过程如下:

S41、采用视觉 SLAM 算法估计 RGBD 传感器的位姿信息 ξ ;

- 15 S42、建立关键帧之间的约束关系, 根据 IMU 传感器误差项和移动机器人的位姿信息,基于重投影误差建立最小二乘关系:

$E_{proj}(k,j)$ 为位姿信息和特征点的重投影误差,表述式如下:

$$E_{proj}(k,j) = (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C)^T \Sigma_k (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C) \\ X_k^C = R^{CB} R_j^{BW} (X_k^W - p_j^B) + p_B^C$$

- 20 $E_{IMU}(i,j)$ 为 IMU 传感器的误差项,表述式如下:

$$E_{IMU}(i,j) = [e_R^T e_v^T e_p^T] \Sigma_l [e_R^T e_v^T e_p^T]^T + (e_b^T \Sigma_R e_b) \\ e_R = \text{Log} \left(\left(\Delta R_{l,j} \text{Exp}(J_{\Delta R}^g b_j^g) \right)^T R_l^{BW} R_j^{WB} \right) \\ e_v = R_i^{BW} (v_j^B - v_i^B - g_w \Delta t_{i,j}) - (\Delta v_{i,j} + J_{\Delta v}^g b_j^g + J_{\Delta v}^a b_j^a) \\ e_p = R_i^{BW} \left(p_j^B - p_i^B - v_i^B \Delta t_{i,j} - \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,j}^2 \right) - (\Delta p_{i,j} + J_{\Delta p}^g b_j^g + J_{\Delta p}^a b_j^a) \\ 25 \quad e_b = b_j - b_i$$

其中 k 表示图像的特征点序号, i 表示关键帧序号, j 表示当前关键帧序号, s 表示深度图的尺度因子, u_k 表示第 k 个特征点对应的 RGBD 传感器相机坐标下的二维坐标, K 表示 RGBD 传感器内参矩阵, $\xi^{\wedge}$ 表示 RGBD 传感器位姿信息 ξ 的反对称矩阵, X_k^C 表示

第 k 个特征点 X_k 在 RGBD 传感器坐标系 C 下的坐标, Σ_k 是特征点 X_k 和对应像素点的尺度信息矩阵, R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵, R_j^{BW} 表示在第 j 关键帧时刻世界坐标系相对于 IMU 传感器坐标系的旋转矩阵, X_k^W 表示第 k 个特征点 X_k 在世界坐标系 W 下的坐标, p_j^B 表示第 j 关键帧时刻 IMU 传感器在世界坐标系下的坐标, p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标, $\Delta R_{i,j}$ 、 $\Delta v_{i,j}$ 、 $\Delta p_{i,j}$ 分别表示关键帧 i 到关键帧 j 之间的 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时旋转到世界坐标系的旋转矩阵, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在第 j 关键帧时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, Σ_R 、 Σ_I 分别为 IMU 传感器偏置随即游走和预积分的信息矩阵, b_i 、 b_j 分别表示第 i 和第 j 关键帧的 IMU 传感器偏置, $\Delta t_{i,j}$ 表示第 i 关键帧到第 j 关键帧的时间差;

S43、对于当前关键帧 j 的移动机器人状态跟踪, 仅与相邻关键帧 $j-1$ 建立约束关系:

$$\phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(j-1, j) \right)$$

$$\phi = \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}$$

其中 ϕ 表示需要优化对象的集合, ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合, k 表示特征点的序号, j 表示当前关键帧序号, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵, p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置;

求解出当前关键帧的移动机器人位姿信息和 IMU 传感器速度、偏置的最优值作为移动机器人的状态跟踪;

S44、由于 RGBD 传感器和 IMU 传感器需要优化 9 自由度的状态, 如果对于所有共视关键帧都对所有状态量进行优化, 则运算量过大, 无法实现实时的定位, 并且 IMU 传感器存在零偏的情况, 距离当前时刻的数据时间越长, 则越不可靠。

因此采用基于滑动窗口的优化算法对移动机器人的状态进行非线性优化, 对于当

前关键帧之前的 M 帧关键帧，通过对移动机器人的位姿信息和 IMU 传感器误差项建立约束关系进行优化：

$$\phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(i, j) \right)$$

$$\phi = \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}$$

- 5 其中 ϕ 表示需要优化对象的集合， ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合， k 表示特征点的序号， i 表示关键帧序号， j 表示当前关键帧序号， R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵， p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移， v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度， b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置；

- 10 对于当前关键帧 $M+1$ 关键帧前的关键帧，仅对与当前关键帧具有共视点的关键帧位姿信息和特征点建立约束关系进行优化：

$$\psi^* = \underset{\psi}{\operatorname{argmin}} \sum_k E_{proj}(k, j)$$

$$\psi = \{R_j^{WB}, p_j^W\}$$

其中 ψ 表示需要优化对象的集合， ψ^* 表示优化后的 ψ 对象集合。

- 15 进一步地，所述的步骤 S5 过程如下：

S51、采用基于词袋模型的回环检测算法对当前关键帧的 RGBD 传感器采集图像进行判断是否有回环；

S52、如果未检测到回环，那么输出当前关键帧的移动机器人的位姿，结束回环优化步骤，然后对后续的移动机器人的状态进行跟踪；如果检测到回环，那么基于视觉

- 20 SLAM 算法对 RGBD 传感器位姿信息和特征点进行回环优化；

S53、基于滑动窗口的非线性优化算法对移动机器人位姿信息、特征点和 IMU 传感器误差项进行优化，输出当前关键帧的移动机器人的位姿。

本申请相对于现有技术具有如下的优点及效果：

- 25 本申请公开了一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，首先通过 RGBD 传感器和 IMU 传感器获取移动机器人相关数据，然后对 RGBD 传感器进行初始化和对 IMU 传感器进行预积分，进行移动机器人初始化，初始化后对移动机器人位姿信息进行跟踪和后端优化，在产生回环时进行回环处理，实现对移动机器人的定位。该定位方法综合运动 RGBD 传感器和 IMU 传感器，克服了纯视觉 SLAM 算法在旋转以及背景

单一时容易跟踪失败和 IMU 传感器在长时间运动中产生零偏现象的缺点。

附图说明

图 1 是本申请公开的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法的流程图；

5 图 2 是本申请采用的滑动窗口算法的示意图。

具体实施方式

为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的

10 范围。

实施例

本实施例公开了一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法的具体实施过程，步骤如下：

15 程，步骤如下：

S1、RGBD 传感器采用 Kinect v2 传感器，将 Kinect v2 传感器和 IMU 传感器固定到 turtlebot2 移动机器人上，通过 USB 接口将 Kinect v2 传感器、IMU 传感器和 turtlebot2 移动机器人接入移动笔记本电脑中，控制 turtlebot2 移动机器人在三维空间中进行移动，采集 Kinect v2 传感器数据和 IMU 传感器数据，IMU 传感器的采集频率大于 Kinect v2

20 传感器采集频率。

S2、通过 ORBSLAM2 算法选定关键帧，根据 RGBD 传感器所采集的当前图像帧与上一关键帧的帧数间隔，以及当前图像帧与之前的关键帧共视特征点的数量进行选定；

根据 IMU 传感器可以测量出加速度和角速度，通过 IMU 预积分由当前时刻的状态推算出下一时刻的状态，计算公式如下：

25 态推算出下一时刻的状态，计算公式如下：

$$\begin{cases} R_{i+1}^{WB} = R_i^{WB} \Delta R_{i,i+1} \text{Exp}(J_{\Delta R}^g b_i^g) \\ v_{i+1} = v_i + g_w \Delta t_{i,i+1} + R_i^{WB} (\Delta v_{i,i+1} + J_{\Delta v}^g b_i^g + J_{\Delta v}^a b_i^a) \\ p_{i+1} = p_i + v_i \Delta t_{i,i+1} + \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,i+1}^2 + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^g b_i^g + J_{\Delta p}^a b_i^a) \end{cases}$$

其中， R_{i+1}^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在 $i+1$ 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵， v_{i+1} 、 p_{i+1} 分别表示 IMU 传感器坐标系 B 在 $i+1$ 时刻在世界坐标系下的速度和位

姿信息, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器 i 时刻到 $i+1$ 时刻的间隔, b_i^g 、 b_i^a 分别表示在 i 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, g_w 表示在世界坐标系下的重力加速度, $\Delta R_{i,i+1}$ 、 $\Delta v_{i,i+1}$ 、 $\Delta p_{i,i+1}$ 分别表示 i 时刻到 $i+1$ 时刻 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置 b_i^g 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置 b_i^a 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵。

S3、对 RGBD 传感器的位姿信息和 IMU 传感器的偏置、速度、重力向量、速度进行初始化:

S31、视觉 ORBSLAM2 算法对 RGBD 传感器进行初始化, 获取 RGBD 传感器的位姿信息:

S311、采用 ORB 特征提取算法, 提取 RGBD 传感器的图像数据的 ORB 特征点, 根据 ORB 特征点对应的 RGBD 传感器的深度数据找出对应的三维空间点, 从而根据 ORB 特征点像素坐标和空间点三维坐标获得 RGBD 传感器的位姿信息;

S312、对于某空间点 $X_k = [U_k, V_k, W_k]^T$, 其在 RGBD 传感器坐标系下的像素坐标为 $u_k = [x_k, y_k]$, 空间点坐标与像素坐标对应关系为:

$$su_k = Kexp(\xi^{\wedge})X_k$$

其中 s 表示深度图的尺度因子, K 表示 RGBD 传感器的内参矩阵, ξ 表示估计位姿信息, $\xi^{\wedge}$ 表示位姿信息所对应的反对称矩阵, k 表示特征点的序号;

S313、通过构建最小二乘问题, 优化 RGBD 传感器的位姿信息, 使其误差最小:

$$\xi^* = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\| u_k - \frac{1}{s} Kexp(\xi^{\wedge})X_k \right\|^2$$

其中 ξ^* 表示优化后的最优位姿信息, ξ 表示估计的位姿信息, n 表示特征点的个数;

S32、根据视觉 SLAM 算法选定的 N 个连续关键帧, 采用 IMU 预积分方程对 N 个连续关键帧之间的 IMU 传感器陀螺仪的数据进行积分, 得到 IMU 传感器在 N 个关键帧之间的旋转变换, 通过建立 N 个关键帧之间的 RGBD 传感器和 IMU 传感器旋转变换的最小误差方程, 对 IMU 传感器陀螺仪的偏置 b^g 进行估计:

$$\operatorname{argmin}_{b^g} \sum_{i=1}^{N-1} \left\| \operatorname{Log} \left(\left(\Delta R_{i,i+1} \operatorname{Exp} (J_{\Delta R}^g b^g) \right)^T R_{i+1}^{BW} R_i^{WB} \right) \right\|^2$$

其中 N 表示关键帧的个数, $\Delta R_{i,i+1}$ 为连续关键帧 i 和 $i+1$ 间的 IMU 积分所得的旋转矩阵, $J_{\Delta R}^g$ 表示 ΔR 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $R_i^{WB} = R_i^{WC} R^{CB}$: R_i^{WC} 是关键帧 i 由视觉 ORBSLAM2 算法得到的 RGBD 传感器坐标系
5 相对于世界坐标系的旋转, R_{i+1}^{BW} 表示在关键帧 $i+1$ 时世界坐标系转换到 IMU 的传感器坐标系的旋转矩阵, R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵;

本实施例中通过两个关键帧对 IMU 传感器的陀螺仪偏置进行估计, 因此 N 取 2;
S33、利用上述 IMU 传感器的陀螺仪偏置 b^g 估计的结果, 对 IMU 传感器的加速度
10 计偏置、重力向量进行估计:

S331、根据三个连续关键帧之间的 IMU 预积分方程的递推关系, 以及 IMU 传感器坐标系和 RGBD 传感器坐标系的转换方程, 可以得到线性方程:

$$[\alpha(i) \quad \beta(i)] \begin{bmatrix} \delta\theta_{xy} \\ b^a \end{bmatrix} = \gamma(i)$$

其中

$$\begin{aligned} 15 \quad \alpha(i) &= \left[\frac{1}{2} R^{WI} (\hat{g}_i)_\times G (\Delta t_{12}^2 \Delta t_{23} + \Delta t_{12} \Delta t_{23}^2) \right]_{(:,1:2)} \\ \beta(i) &= R_1^{WB} J_{\Delta v_{23}}^a \Delta t_{12} \Delta t_{23} + R_2^{WB} J_{\Delta p_{23}}^a \Delta t_{12} - R_1^{WB} J_{\Delta p_{12}}^a \Delta t_{23} \\ \gamma(i) &= (p_2^c - p_3^c) \Delta t_{12} + (p_2^c - p_1^c) \Delta t_{23} + \frac{1}{2} \Delta t_{12} \Delta t_{23} R^{WI} \hat{g}_i G (\Delta t_{12} + \Delta t_{23}) \\ &\quad - (R_1^{WC} - R_2^{WC}) p_B^c \Delta t_{23} + (R_2^{WC} - R_3^{WC}) p_B^c \Delta t_{12} + R_1^{WB} \Delta v_{12} \Delta t_{12} \Delta t_{23} \\ &\quad + R_2^{WB} \Delta p_{23} \Delta t_{12} - R_1^{WB} \Delta p_{12} \Delta t_{23} \end{aligned}$$

20 其中 $\delta\theta_{xy}$ 为 $\delta\theta = \begin{bmatrix} \delta\theta_{xy} \\ 0 \end{bmatrix}$ 中的二阶向量, $\delta\theta$ 为重力偏差向量, b^a 表示初始化的 IMU 传感器加速度计偏置, R^{WI} 表示 IMU 传感器在世界坐标系的方向, Δt_{12} 、 Δt_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的时间间隔, G 表示重力参考值, $\hat{g}_i$ 表示在 IMU 传感器坐标系下的重力向量, $(\hat{g}_i)_\times$ 表示重力向量 $\hat{g}_i$ 的一阶近似, $[]_{(:,1:2)}$ 表示只包含该矩阵前两列数据, R_1^{WB} 、 R_2^{WB} 分别表示关键帧 1、2 时刻 IMU 传感器坐标系相对于
25 世界坐标系的旋转矩阵, Δp_{12} 、 Δp_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的位移, Δv_{23} 表示关键帧 2 到关键帧 3 的速度变化, $J_{\Delta v_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{12}}^a$ 分别为

Δv_{23} 、 Δp_{23} 、 Δp_{12} 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵， R_1^{WC} 、 R_2^{WC} 、 R_3^{WC} 分别表示关键帧 1、2、3 时刻的 RGBD 传感器坐标系 C 相对于世界坐标系的旋转矩阵， p_1^C 、 p_2^C 、 p_3^C 分别表示关键帧 1、2、3 时刻 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标， p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标；

S332、通过奇异值分解求解出重力偏差二阶向量 $\delta\theta_{xy}$ 和加速度计偏置 b^a ；

S333、通过方程：

$$v_i \Delta t_{i,i+1} = p_i^C - p_{i+1}^C - \frac{1}{2} R^{WI}(\hat{g}_i) \times G \Delta t_{i,i+1}^2 \delta\theta + \frac{1}{2} R^{WI} \hat{g}_i G \Delta t_{i,i+1}^2 + (R_i^{WC} - R_{i+1}^{WC}) p_B^C + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^a b_i^a)$$

其中 $J_{\Delta p}^a$ 表示 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置 b_i^a 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵， p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标， p_i^C 分别表示关键帧 i 时 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标， v_i 表示关键帧 i 时 IMU 传感器的速度， R_i^{WC} 表示在 i 关键帧时 RGBD 传感器坐标系相对于世界坐标的旋转矩阵， R_i^{WB} 分别表示关键帧 i 时 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵；

计算出 IMU 传感器的速度 v 作为初始化的 IMU 传感器速度。

S4、跟踪移动机器人的状态，并采用基于滑动窗口的非线性优化对移动机器人状态优化，移动机器人的状态为移动机器人的位姿信息、速度和 IMU 传感器的偏置；

S41、采用视觉 ORBSLAM2 算法估计 RGBD 传感器的位姿信息 ξ ；

S42、建立关键帧之间的约束关系，根据 IMU 传感器误差项和移动机器人的位姿信息，基于重投影误差建立最小二乘关系；

$E_{proj}(k, j)$ 为位姿信息和特征点的重投影误差，表述式如下：

$$E_{proj}(k, j) = (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C)^T \Sigma_k (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C) \\ X_k^C = R^{CB} R_j^{BW} (X_k^W - p_j^B) + p_B^C$$

$E_{IMU}(i, j)$ 为 IMU 传感器的误差项，表述式如下：

$$E_{IMU}(i, j) = [e_R^T e_v^T e_p^T] \Sigma_i [e_R^T e_v^T e_p^T]^T + (e_b^T \Sigma_R e_b) \\ e_R = \text{Log} \left(\left(\Delta R_{i,j} \text{Exp}(J_{\Delta R}^g b_j^g) \right)^T R_i^{BW} R_j^{WB} \right) \\ e_v = R_i^{BW} (v_j^B - v_i^B - g_w \Delta t_{i,j}) - (\Delta v_{i,j} + J_{\Delta v}^g b_j^g + J_{\Delta v}^a b_j^a) \\ e_p = R_i^{BW} \left(p_j^B - p_i^B - v_i^B \Delta t_{i,j} - \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,j}^2 \right) - (\Delta p_{i,j} + J_{\Delta p}^g b_j^g + J_{\Delta p}^a b_j^a)$$

$$e_b = b_j - b_i$$

其中 k 表示图像的特征点序号, i 表示关键帧序号, j 表示当前关键帧序号, s 表示深度图的尺度因子, u_k 表示第 k 个特征点对应的 RGBD 传感器相机坐标下的二维坐标, K 表示 RGBD 传感器内参矩阵, $\xi^{\wedge}$ 表示 RGBD 传感器位姿信息 ξ 的反对称矩阵, X_k^c 表示第 k 个特征点 X_k 在 RGBD 传感器坐标系 C 下的坐标, Σ_k 是特征点 X_k 和对应像素点的尺度信息矩阵, R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵, R_j^{BW} 表示在第 j 关键帧时刻世界坐标系相对于 IMU 传感器坐标系的旋转矩阵, X_k^W 表示第 k 个特征点 X_k 在世界坐标系 W 下的坐标, p_j^B 表示第 j 关键帧时刻 IMU 传感器在世界坐标系下的坐标, p_B^c 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标,

$\Delta R_{i,j}$ 、 $\Delta v_{i,j}$ 、 $\Delta p_{i,j}$ 分别表示关键帧 i 到关键帧 j 之间的 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时旋转到世界坐标系的旋转矩阵, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在第 j 关键帧时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, Σ_R 、 Σ_I 分别为 IMU 传感器偏置随即游走和预积分的信息矩阵, b_i 、 b_j 分别表示第 i 和第 j 关键帧的 IMU 传感器偏置, $\Delta t_{i,j}$ 表示第 i 关键帧到第 j 关键帧的时间差;

S43、对于当前关键帧 j 的移动机器人状态跟踪,仅与相邻关键帧 $j-1$ 建立约束关系:

$$\phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(j-1, j) \right)$$

$$\phi = \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}$$

其中 ϕ 表示需要优化对象的集合, ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合, k 表示特征点的序号, j 表示当前关键帧序号, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵, p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置;

求解出当前关键帧的移动机器人位姿信息和 IMU 传感器速度、偏置的最优值作为移动机器人的状态跟踪;

S44、采用基于滑动窗口的优化方式对移动机器人的状态进行非线性优化，对于当前关键帧之前的 M 帧关键帧，通过对移动机器人的位姿信息和 IMU 传感器误差项建立约束关系进行优化：

$$\phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(i, j) \right)$$

$$\phi = \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}$$

其中 ϕ 表示需要优化对象的集合， ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合， k 表示特征点的序号， i 表示关键帧序号， j 表示当前关键帧序号， R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵， p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移， v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度， b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置；

对于当前关键帧 $M+1$ 关键帧前的关键帧，仅对与当前关键帧具有共视点的关键帧位姿信息和特征点建立约束关系进行优化：

$$\psi^* = \underset{\psi}{\operatorname{argmin}} \sum_k E_{proj}(k, j)$$

$$\psi = \{R_j^{WB}, p_j^W\}$$

其中 ψ 表示需要优化对象的集合， ψ^* 表示优化后的 ψ 对象集合。

本实施例中 M 大小随着当前关键帧与前关键帧的时间间隔变化， M 根据距离当前关键帧 5s 内的关键帧数目变化。

S5、回环优化：

S51、采用基于词袋模型的回环检测算法对当前关键帧的 RGBD 传感器采集图像进行判断是否有回环；

S52、如果未检测到回环，输出当前关键帧的移动机器人的位姿，结束回环步骤，然后对后续的移动机器人的状态进行跟踪；如果检测到回环，那么基于视觉 ORBSLAM2 算法对 RGBD 传感器位姿信息和特征点进行回环优化；

S53、基于滑动窗口的非线性优化算法对移动机器人位姿信息、特征点和 IMU 传感器误差项进行优化，输出当前关键帧的移动机器人的位姿。

上述实施例为本申请较佳的实施方式，但本申请的实施方式并不受上述实施例的限制，其他的任何未背离本申请的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化，均应为等效的置换方式，都包含在本申请的保护范围之内。

权利要求书

1、一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，应用于搭载 RGBD 传感器和 IMU 传感器的移动机器人，实现对移动机器人的定位，其特征在于，所述的定位方法包括以下步骤：

S1、传感器数据采集：移动机器人搭载 RGBD 传感器和 IMU 传感器在三维空间中自由移动，采集 RGBD 传感器数据和 IMU 传感器数据；

S2、IMU 预积分：采用视觉 SLAM 算法根据 RGBD 传感器不同帧的图像数据质量选定关键帧，基于选定的关键帧，采用 IMU 预积分方程计算关键帧之间的 IMU 传感器数据的预积分值；

S3、移动机器人初始化：采用视觉 SLAM 算法对 RGBD 传感器初始化得到 RGBD 传感器的位姿信息，然后根据 RGBD 传感器的位姿信息和对应关键帧的 IMU 预积分对移动机器人初始化获取移动机器人的初始化状态信息，其中，所述的移动机器人的状态信息包括移动机器人的位姿信息、速度和 IMU 传感器的偏置；

S4、移动机器人状态的跟踪优化：采用基于重投影误差的优化算法对估计的移动机器人的状态信息进行优化跟踪，然后采用基于滑动窗口的优化算法对移动机器人的状态进行非线性优化；

S5、回环检测：根据 RGBD 传感器数据，采用基于词袋模型的回环优化算法对 RGBD 传感器的位姿信息和特征点进行回环优化，然后采用基于滑动窗口的优化算法对 IMU 传感器误差项进行优化。

2、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，其特征在于，所述的 IMU 传感器的采集频率大于所述的 RGBD 传感器采集频率。

3、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，其特征在于，所述的步骤 S2 中采用视觉 SLAM 算法选定关键帧的规则如下：根据 RGBD 传感器所采集的当前图像帧与上一关键帧之间的帧数间隔，以及当前图像帧与之前的关键帧共视特征点的数量进行选定。

4、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法，其特征在于，所述的步骤 S2 中计算 IMU 预积分，通过 IMU 预积分由当前时刻的状态推算出下一时刻的状态，计算公式如下：

$$\begin{cases} R_{i+1}^{WB} = R_i^{WB} \Delta R_{i,i+1} \text{Exp}(J_{\Delta R}^g b_i^g) \\ v_{i+1} = v_i + g_w \Delta t_{i,i+1} + R_i^{WB} (\Delta v_{i,i+1} + J_{\Delta v}^g b_i^g + J_{\Delta v}^a b_i^a) \\ p_{i+1} = p_i + v_i \Delta t_{i,i+1} + \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,i+1}^2 + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^g b_i^g + J_{\Delta p}^a b_i^a) \end{cases}$$

其中, R_{i+1}^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在 $i+1$ 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵, v_{i+1} 、 p_{i+1} 分别表示 IMU 传感器坐标系 B 在 $i+1$ 时刻在世界坐标系下的速度和位姿信息, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器 i 时刻到 $i+1$ 时刻的间隔, b_i^g 、 b_i^a 分别表示在 i 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, g_w 表示在世界坐标系下的重力加速度, $\Delta R_{i,i+1}$ 、 $\Delta v_{i,i+1}$ 、 $\Delta p_{i,i+1}$ 分别表示 i 时刻到 $i+1$ 时刻 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置 b_i^g 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置 b_i^a 变化方程的一阶近似的雅克比矩阵。

5、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法, 其特征在于, 所述的步骤 S3 包括:

S31、采用视觉 SLAM 算法对 RGBD 传感器进行初始化, 获取 RGBD 传感器的位姿信息, 过程如下:

S311、采用 ORB 特征提取算法, 提取 RGBD 传感器的图像数据的 ORB 特征点, 根据 ORB 特征点对应的 RGBD 传感器的深度数据找出对应的三维空间点, 从而根据 ORB 特征点像素坐标和空间点三维坐标获得 RGBD 传感器的位姿信息;

S312、对于某空间点 $X_k = [U_k, V_k, W_k]^T$, 其在 RGBD 传感器坐标系下的像素坐标为 $u_k = [x_k, y_k]$, 空间点坐标与像素坐标对应关系为:

$$su_k = K \exp(\xi^\wedge) X_k$$

其中 s 表示深度图的尺度因子, K 表示 RGBD 传感器的内参矩阵, ξ 表示估计位姿信息, $\xi^\wedge$ 表示位姿信息所对应的反对称矩阵, k 表示特征点的序号;

S313、通过构建最小二乘问题, 优化 RGBD 传感器的位姿信息, 使其误差最小:

$$\xi^* = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\| u_k - \frac{1}{s} K \exp(\xi^\wedge) X_k \right\|^2$$

其中 ξ^* 表示优化后的最优位姿信息, ξ 表示估计的位姿信息, n 表示特征点的个数;

S32、根据视觉 SLAM 算法选定的 N 个连续关键帧, 采用 IMU 预积分方程对 N 个连续关键帧之间的 IMU 传感器陀螺仪的数据进行积分, 得到 IMU 传感器在 N 个关键帧之间的旋转变换, 通过建立 N 个关键帧之间的 RGBD 传感器和 IMU 传感器旋转变换的最小误差方程, 对 IMU 传感器陀螺仪的偏置 b^g 进行估计:

$$\operatorname{argmin}_{b^g} \sum_{i=1}^{N-1} \left\| \operatorname{Log} \left(\left(\Delta R_{i,i+1} \operatorname{Exp}(J_{\Delta R}^g b^g) \right)^T R_{i+1}^{BW} R_i^{WB} \right) \right\|^2$$

其中 N 表示关键帧的个数, $\Delta R_{i,i+1}$ 为关键帧 i 和 $i+1$ 间的 IMU 积分所得的旋转矩阵, $J_{\Delta R}^g$ 表示 ΔR 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $R_i^{WB} = R_i^{WC} R^{CB}$: R_i^{WC} 是关键帧 i 由视觉 SLAM 算法得到的 RGBD 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转, R_{i+1}^{BW} 表示关键帧 $i+1$ 世界坐标系转换到 IMU 传感器坐标系的旋转矩阵, R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵;

S33、利用上述 IMU 传感器的陀螺仪偏置 b^g 估计的结果, 对 IMU 传感器的加速度计偏置、重力向量进行估计:

S331、根据三个连续关键帧之间的 IMU 预积分方程的递推关系, 以及 IMU 传感器坐标系和 RGBD 传感器坐标系的转换方程, 得到线性方程:

$$[\alpha(i) \quad \beta(i)] \begin{bmatrix} \delta\theta_{xy} \\ b^a \end{bmatrix} = \gamma(i)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha(i) &= \left[\frac{1}{2} R^{WI} (\hat{g}_I)_{\times} G (\Delta t_{12}^2 \Delta t_{23} + \Delta t_{12} \Delta t_{23}^2) \right]_{(:,1:2)} \\ \beta(i) &= R_1^{WB} J_{\Delta v_{23}}^a \Delta t_{12} \Delta t_{23} + R_2^{WB} J_{\Delta p_{23}}^a \Delta t_{12} - R_1^{WB} J_{\Delta p_{12}}^a \Delta t_{23} \\ \gamma(i) &= (p_2^c - p_3^c) \Delta t_{12} + (p_2^c - p_1^c) \Delta t_{23} + \frac{1}{2} \Delta t_{12} \Delta t_{23} R^{WI} \hat{g}_I G (\Delta t_{12} + \Delta t_{23}) \\ &\quad - (R_1^{WC} - R_2^{WC}) p_B^c \Delta t_{23} + (R_2^{WC} - R_3^{WC}) p_B^c \Delta t_{12} + R_1^{WB} \Delta v_{12} \Delta t_{12} \Delta t_{23} \\ &\quad + R_2^{WB} \Delta p_{23} \Delta t_{12} - R_1^{WB} \Delta p_{12} \Delta t_{23} \end{aligned}$$

其中 $\delta\theta_{xy}$ 为 $\delta\theta = \begin{bmatrix} \delta\theta_{xy} \\ 0 \end{bmatrix}$ 中的二阶向量, $\delta\theta$ 为重力偏差向量, b^a 表示初始化的 IMU 传感器加速度计偏置, R^{WI} 表示 IMU 传感器在世界坐标系的方向, Δt_{12} 、 Δt_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的时间间隔, G 表示重力参考值, $\hat{g}_I$ 表示在 IMU 传感器坐标系下的重力向量, $(\hat{g}_I)_{\times}$ 表示重力向量 $\hat{g}_I$ 的一阶近似, $[]_{(:,1:2)}$ 表示只包

含该矩阵前两列数据, R_1^{WB} 、 R_2^{WB} 分别表示关键帧 1、2 时刻 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, Δp_{12} 、 Δp_{23} 分别表示关键帧 1、2 到关键帧 2、3 的 IMU 传感器的位移, Δv_{23} 表示关键帧 2 到关键帧 3 的速度变化, $J_{\Delta v_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{23}}^a$ 、 $J_{\Delta p_{12}}^a$ 分别为 Δv_{23} 、 Δp_{23} 、 Δp_{12} 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅可比矩阵, R_1^{WC} 、 R_2^{WC} 、 R_3^{WC} 分别表示关键帧 1、2、3 时刻的 RGBD 传感器坐标系 C 相对于世界坐标系的旋转矩阵, p_1^C 、 p_2^C 、 p_3^C 分别表示关键帧 1、2、3 时刻 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标, p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标;

S332、通过奇异值分解求解出重力偏差二阶向量 $\delta\theta_{xy}$ 和加速度计偏置 b^a ;

S333、通过方程:

$$v_i \Delta t_{i,i+1} = p_i^C - p_{i+1}^C - \frac{1}{2} R^{WI} (\hat{g}_i)_{\times} G \Delta t_{i,i+1}^2 \delta\theta + \frac{1}{2} R^{WI} \hat{g}_i G \Delta t_{i,i+1}^2 + (R_i^{WC} - R_{i+1}^{WC}) p_B^C + R_i^{WB} (\Delta p_{i,i+1} + J_{\Delta p}^a b^a)$$

计算出 IMU 传感器的速度 v 作为初始化的 IMU 传感器速度, 其中 $J_{\Delta p}^a$ 表示 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅可比矩阵, p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标, p_i^C 分别表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器坐标系中心在世界坐标系下的坐标, v_i 表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器的速度, R_i^{WC} 表示在第 i 关键帧时 RGBD 传感器的坐标系相对于世界坐标的旋转矩阵, R_i^{WB} 分别表示在第 i 关键帧时 IMU 传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵, $\Delta t_{i,i+1}$ 表示 IMU 传感器第 i 关键帧到第 $i+1$ 关键帧时间的间隔。

6、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法, 其特征在于, 所述的步骤 S4 过程如下:

S41、采用视觉 SLAM 算法估计 RGBD 传感器的位姿信息 ξ ;

S42、建立关键帧之间的约束关系, 根据 IMU 传感器误差项和移动机器人的位姿信息, 基于重投影误差建立最小二乘关系:

$E_{proj}(k, j)$ 为位姿信息和特征点的重投影误差, 表述式如下:

$$E_{proj}(k, j) = (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C)^T \Sigma_k (su_k - K \exp(\xi^{\wedge}) X_k^C) \\ X_k^C = R^{CB} R_j^{BW} (X_k^W - p_j^B) + p_B^C$$

$E_{IMU}(i, j)$ 为 IMU 传感器的误差项, 表述式如下:

$$E_{IMU}(i, j) = [e_R^T e_v^T e_p^T] \Sigma_i [e_R^T e_v^T e_p^T]^T + (e_b^T \Sigma_R e_b)$$

$$\begin{aligned}
e_R &= \text{Log} \left(\left(\Delta R_{i,j} \text{Exp} (J_{\Delta R}^g b_j^g) \right)^T R_i^{BW} R_j^{WB} \right) \\
e_v &= R_i^{BW} (v_j^B - v_i^B - g_w \Delta t_{i,j}) - (\Delta v_{i,j} + J_{\Delta v}^g b_j^g + J_{\Delta v}^a b_j^a) \\
e_p &= R_i^{BW} \left(p_j^B - p_i^B - v_i^B \Delta t_{i,j} - \frac{1}{2} g_w \Delta t_{i,j}^2 \right) - (\Delta p_{i,j} + J_{\Delta p}^g b_j^g + J_{\Delta p}^a b_j^a) \\
e_b &= b_j - b_i
\end{aligned}$$

其中 k 表示图像的特征点序号, i 表示关键帧序号, j 表示当前关键帧序号, s 表示深度图的尺度因子, u_k 表示第 k 个特征点对应的 RGBD 传感器相机坐标下的二维坐标, K 表示 RGBD 传感器内参矩阵, $\xi^{\wedge}$ 表示 RGBD 传感器位姿信息 ξ 的反对称矩阵, X_k^C 表示第 k 个特征点 X_k 在 RGBD 传感器坐标系 C 下的坐标, Σ_k 是特征点 X_k 和对应像素点的尺度信息矩阵, R^{CB} 为标定的 IMU 传感器转换到 RGBD 传感器坐标系下的标定旋转矩阵, R_j^{BW} 表示在第 j 关键帧时刻世界坐标系相对于 IMU 传感器坐标系的旋转矩阵, X_k^W 表示第 k 个特征点 X_k 在世界坐标系 W 下的坐标, p_j^B 表示第 j 关键帧时刻 IMU 传感器在世界坐标系下的坐标, p_B^C 表示 IMU 传感器坐标系中心在 RGBD 传感器坐标系下的坐标, $\Delta R_{i,j}$ 、 $\Delta v_{i,j}$ 、 $\Delta p_{i,j}$ 分别表示关键帧 i 到关键帧 j 之间的 IMU 传感器的旋转矩阵、速度变换和位移变换的预积分, $J_{\Delta R}^g$ 、 $J_{\Delta v}^g$ 、 $J_{\Delta p}^g$ 分别表示 ΔR 、 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器陀螺仪偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, $J_{\Delta v}^a$ 、 $J_{\Delta p}^a$ 分别为 Δv 、 Δp 随 IMU 传感器加速度计偏置变化方程的一阶近似的雅克比矩阵, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时旋转到世界坐标系的旋转矩阵, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在第 j 关键帧时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, Σ_R 、 Σ_I 分别为 IMU 传感器偏置随即游走和预积分的信息矩阵, b_i 、 b_j 分别表示第 i 和第 j 关键帧的 IMU 传感器偏置, $\Delta t_{i,j}$ 表示第 i 关键帧到第 j 关键帧的时间差;

S43、对于当前关键帧 j 的移动机器人的状态跟踪,当前关键帧 j 仅与相邻关键帧 $j-1$ 建立约束关系:

$$\begin{aligned}
\phi^* &= \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(j-1, j) \right) \\
\phi &= \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}
\end{aligned}$$

其中 ϕ 表示需要优化对象的集合, ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合, k 表示特征点的序号, j 表示当前关键帧序号, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵, p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移, v_j^B 表

示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置;

求解出当前关键帧的移动机器人位姿信息和 IMU 传感器速度、偏置的最优值作为移动机器人的状态跟踪;

S44、采用基于滑动窗口的优化方式对移动机器人的状态进行非线性优化, 对于当前关键帧之前的 M 帧关键帧, 通过对移动机器人的位姿信息、特征点和 IMU 传感器误差项建立约束关系进行优化:

$$\phi^* = \underset{\phi}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_k E_{proj}(k, j) + E_{IMU}(i, j) \right)$$

$$\phi = \{R_j^{WB}, p_j^W, v_j^B, b_j^g, b_j^a\}$$

其中 ϕ 表示需要优化对象的集合, ϕ^* 表示优化后的 ϕ 对象集合, k 表示特征点的序号, i 表示关键帧序号, j 表示当前关键帧序号, R_j^{WB} 表示 IMU 传感器的坐标系 B 在关键帧 j 时刻旋转到世界坐标系的旋转矩阵, p_j^W 表示 IMU 传感器关键帧 j 时刻在世界坐标系下的平移, v_j^B 表示 IMU 传感器在第 j 关键帧时刻的速度, b_j^g 、 b_j^a 分别表示在关键帧 j 时刻 IMU 传感器陀螺仪偏置和加速度计偏置, 对于当前关键帧 $M+1$ 关键帧前的关键帧, 仅对与当前关键帧具有共视点的帧建立约束关系进行优化:

$$\psi^* = \underset{\psi}{\operatorname{argmin}} \sum_k E_{proj}(k, j)$$

$$\psi = \{R_j^{WB}, p_j^W\}$$

其中 ψ 表示需要优化对象的集合, ψ^* 表示优化后的 ψ 对象集合。

7、根据权利要求 1 所述的一种基于 RGBD 传感器和 IMU 传感器的定位方法, 其特征在于, 所述的步骤 S5 过程如下:

S51、采用基于词袋模型的回环检测算法对当前关键帧的 RGBD 传感器采集图像进行判断是否有回环;

S52、如果未检测到回环, 输出当前关键帧的移动机器人的位姿, 结束回环优化步骤, 然后对后续的移动机器人的状态进行跟踪; 如果检测到回环, 采用视觉 SLAM 算法对 RGBD 传感器位姿信息和特征点进行回环优化;

S53、基于滑动窗口的非线性优化算法对移动机器人位姿信息、特征点和 IMU 传感器误差项进行优化, 输出当前关键帧的移动机器人的位姿。

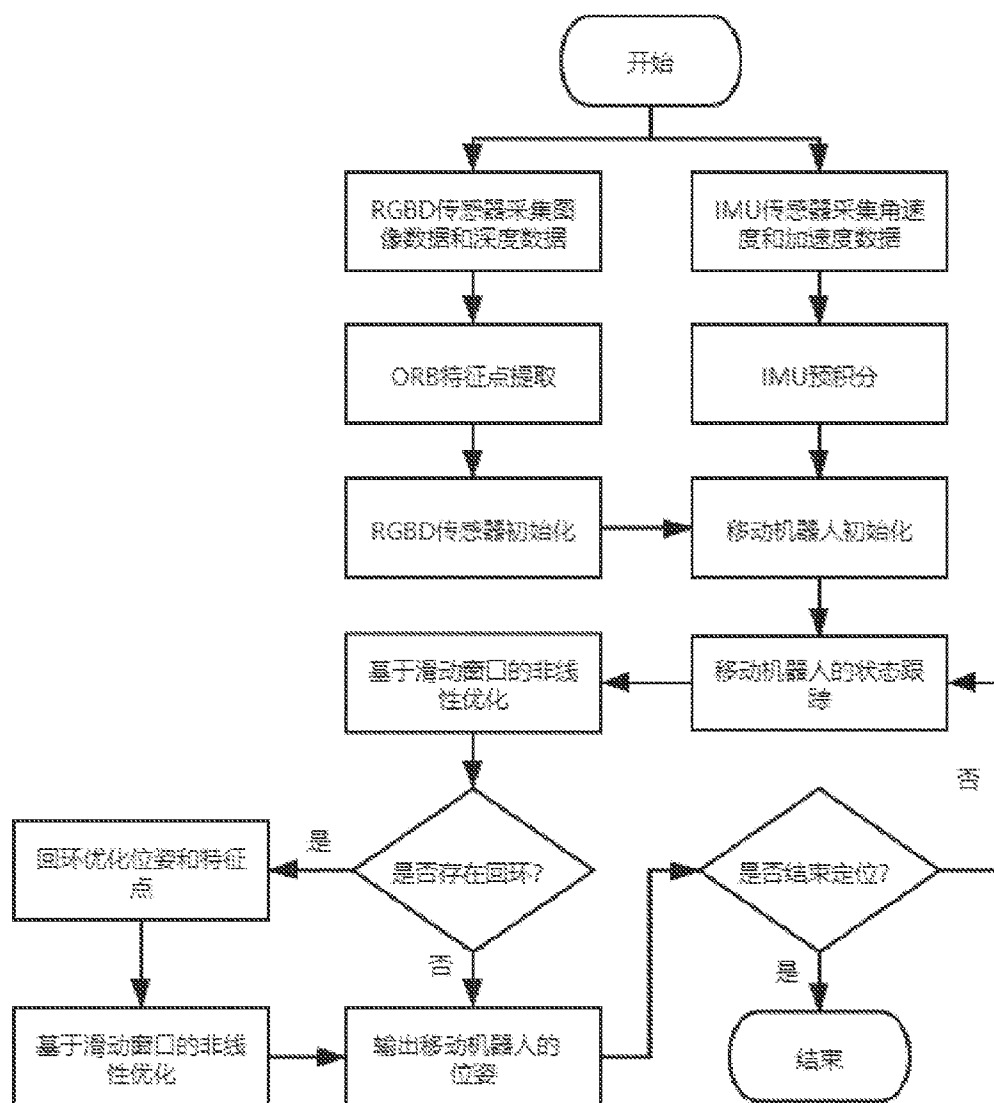


图 1

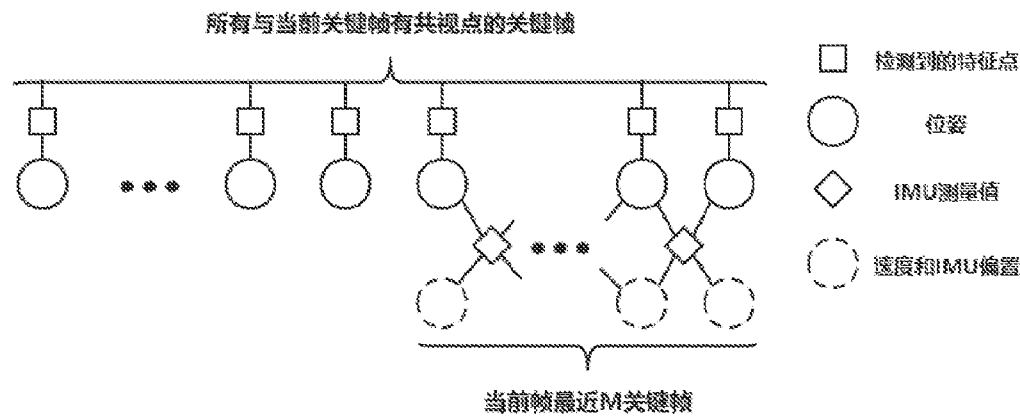


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/080007

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 7/73(2017.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, GOOGLE: 相机, 视觉, 惯性, 传感器, 测量单元, 定位, 位姿, 预积分, 初始化, 优化, 回环, camera, RGBD, RGB-D, IMU, pose, position, preintegration, initialization, optimize, loopback

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111462231 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY et al.) 28 July 2020 (2020-07-28) claims 1-7	1-7
Y	CN 109993113 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY) 09 July 2019 (2019-07-09) description paragraphs 0094-0299	1-4, 7
Y	CN 110345944 A (ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 18 October 2019 (2019-10-18) description, paragraphs 0060-0104	1-4, 7
A	CN 108846867 A (ANHUI YUNNENG TIAN INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) 20 November 2018 (2018-11-20) entire document	1-7
A	CN 109307508 A (HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES et al.) 05 February 2019 (2019-02-05) entire document	1-7
A	US 2019294903 A1 (VANGOGH IMAGING, INC.) 26 September 2019 (2019-09-26) entire document	1-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 May 2021

Date of mailing of the international search report

09 June 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/080007

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111462231	A	28 July 2020	None	
CN	109993113	A	09 July 2019	None	
CN	110345944	A	18 October 2019	None	
CN	108846867	A	20 November 2018	None	
CN	109307508	A	05 February 2019	None	
US	2019294903	A1	26 September 2019	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/080007

A. 主题的分类

G06T 7/73 (2017.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI, GOOGLE: 相机, 视觉, 惯性, 传感器, 测量单元, 定位, 位姿, 预积分, 初始化, 优化, 回环, camera, RGBD, RGB-D, IMU, pose, position, preintegration, initialization, optimize, loopback

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 111462231 A (华南理工大学 等) 2020年 7月 28日 (2020 - 07 - 28) 权利要求1-7	1-7
Y	CN 109993113 A (东北大学) 2019年 7月 9日 (2019 - 07 - 09) 说明书第0094-0299段	1-4, 7
Y	CN 110345944 A (浙江工业大学) 2019年 10月 18日 (2019 - 10 - 18) 说明书第0060-0104段	1-4, 7
A	CN 108846867 A (安徽云能天智能科技有限责任公司) 2018年 11月 20日 (2018 - 11 - 20) 全文	1-7
A	CN 109307508 A (中国科学院合肥物质科学研究院 等) 2019年 2月 5日 (2019 - 02 - 05) 全文	1-7
A	US 2019294903 A1 (VANGOGH IMAGING INC.) 2019年 9月 26日 (2019 - 09 - 26) 全文	1-7

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 5月 28日

国际检索报告邮寄日期

2021年 6月 9日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

胡丽丽

电话号码 86-(10)-53961386

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/080007

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111462231	A	2020年 7月 28日	无	
CN	109993113	A	2019年 7月 9日	无	
CN	110345944	A	2019年 10月 18日	无	
CN	108846867	A	2018年 11月 20日	无	
CN	109307508	A	2019年 2月 5日	无	
US	2019294903	A1	2019年 9月 26日	无	