

基于磁力计、IMU和单目视觉的自主定位方法

樊建彪^{1,2}, 孙剑^{1,2}, 樊欢欢^{1,2}, 陈伟^{1,2}

(1. 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 基于单目视觉与惯性测量单元 (IMU) 融合的 SLAM (simultaneous localization and mapping) 技术, 具有硬件成本低、体积小和消耗计算资源少等优点, 在移动机器人导航系统中得到了广泛的应用。单目视觉 SLAM 系统主要通过求解对极几何来解算位姿, 但当平移为零时 (仅存在姿态旋转运动), 存在解算漂移的问题。通过将磁力计的数据融合到单目视觉 SLAM 算法中, 不但可以解决纯旋转情况下姿态解算漂移问题, 还可以提高解算精度。物理仿真实验的结果表明, 与传统的 SLAM 算法相比, 本文提出的基于磁力计、IMU 和单目视觉融合的算法具有精度高、鲁棒性好的优点。

关键词: 自主定位; 磁力计; 单目视觉 SLAM; IMU

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 06-0039-07

A Method of Autonomous Localization Based on Magnetometer, IMU, and Monocular Vision

FAN Jianbiao^{1,2}, SUN Jian^{1,2}, FAN Huanhuan^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: SLAM (simultaneous localization and mapping) algorithm based on monocular vision and IMU has been widely used in mobile robot navigation systems, due to low hardware cost, small size, and low computational resource consumption. The Mono SLAM system can calculate the robot pose information by solving the Epipolar geometry. However, when the translation of the robot is zero (pure rotation), the solution will drift. In this paper, we propose a new method that integrates the data of the magnetometer into the monocular vision SLAM algorithm, which can not only solve the problem of the attitude solution drift under pure rotation but also improve the solution accuracy. Both simulation and real experiment results show that, compared with the traditional SLAM algorithm, the proposed algorithm has the advantages of high precision and good robustness.

Key words: Autonomous localization; Magnetometer; Mono SLAM; IMU

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-10-21

基金项目: 装发领域基金 (61404150303)

作者简介: 樊建彪 (1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉导航系统。

E-mail: fjb1615201974@stu.xtu.edu.cn

0 引言

近年来,随着社会发展和科技技术的进步,移动机器人越来越多地应用于日常生活中。导航技术不仅是移动机器人的核心技术,同时也是移动机器人自主完成任务的基础。目前移动机器人的导航系统主要依靠GPS(全球定位系统)与IMU进行融合解算位姿信息,而对于复杂环境此方案无法保证GPS信号的实时性,同时IMU模块的零偏会造成解算的位姿漂移,因此应用场景有限。

SLAM(simultaneous localization and mapping)技术依靠移动机器人自身携带的传感器对周围环境进行观测,同时通过融合算法对各传感器的数据进行处理,可以实时得到移动机器人在空间中的位姿,不依赖于外部传感器信息,是实现机器人在复杂环境下自主定位导航的关键技术。SLAM技术于20世纪80年代被提出,经过几十年的发展,已经产生多种成熟的SLAM算法。

目前主要的SLAM算法包括单目视觉SLAM^[1-5]、双目视觉SLAM^[6-8]、RGB-D视觉SLAM^[9]和激光雷达SLAM^[10]。单目视觉SLAM系统仅需一台摄像头和一套低成本IMU,其体积小、成本低、功耗小等优点引起了学术界和工业界的极大兴趣。自从基于扩展卡尔曼滤波的Mono-SLAM^[11]算法被提出以后,单目视觉逐渐流行起来。目前有众多的单目视觉解决方案,包括PTAM^[12]、SVO^[13]、ORB-SLAM2^[14]、MSCKF^[15]和VINS-SLAM^[16]等。这些方案主要是基于滤波器或者优化器来融合IMU和视觉传感器数据对位姿进行解算。而目前的单目视觉SLAM算法主要是依靠IMU数据来解决单目视觉解算过程中的尺度问题,但IMU存在漂移,其尺度解算精度不高。同时单目视觉SLAM算法主要依靠单目视觉数据进行优化得到位姿信息,但是当运动为纯旋转时,则无法通过求解对极几何来求解机器人的姿态角。该算法在实际应用中存在位姿解算漂移的问题,同时解算精度不高。

通过将三维磁阻传感器按照载体坐标系安装,磁力计可测量载体空间磁场的三维磁感应强度,据此可以计算出载体的姿态角。因此本文首次提出了基于磁力计、IMU和单目视觉传感器融合的位姿解算方法,用来对视觉尺度因子、重力、速

度、IMU参数和载体姿态进行估计,解决单目视觉在解算位姿时由于纯旋转情况而出现的不稳定情况,同时本方案具有高精确和强鲁棒的特性。

1 算法设计

本文通过融合磁力计、IMU和单目视觉传感器数据,设计能够在三维空间中实时估计移动机器人位姿的算法。所设计的扩展卡尔曼滤波器将磁力计和IMU数据进行融合,解算出机器人的姿态并对陀螺仪零偏进行了估计,之后用陀螺仪的零偏估计量修正陀螺仪数据,同时将估计的姿态量用于加速度计的积分,从而得到机器人的位置量。通过单目视觉传感器解算对极几何和PnP计算位置信息。通过图优化算法融合IMU计算的位置残差和单目视觉计算的残差,得到移动机器人的位置状态和加速度计的零偏量。用计算得到的加速度计的零偏修正加速度计数据。至此就可以估计出移动机器人的位置和姿态状态。算法流程如图1所示。

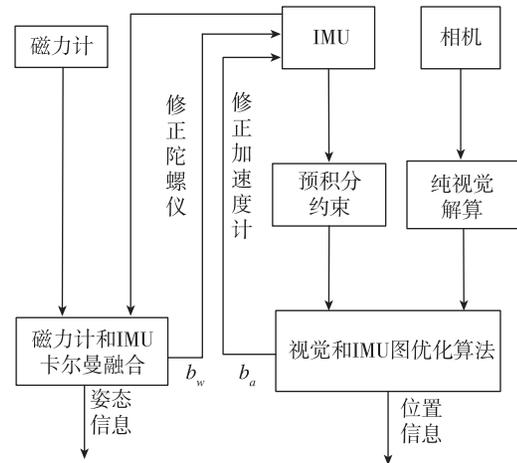


图1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

图1中, b_w 和 b_a 分别表示通过算法估计出来的陀螺仪零偏量和加速度计零偏量。通过对IMU中各传感器的零偏进行修正,可以得到更加精确的位姿信息并提高系统的鲁棒性。

1.1 磁力计与IMU卡尔曼姿态估计器

1.1.1 IMU传感器特性

IMU传感器包括三轴陀螺仪和三轴加速度计,可以测量高频的角速度和线加速度数据。但是,IMU的测量数据中包含两种测量误差,即测量噪声和零偏。测量噪声是高斯白噪声,零偏服从高

斯随机游走。因此 IMU 的测量模型如式 (1):

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{w}}_t^b &= \mathbf{w}_t^b + \mathbf{b}_{\omega t} + \mathbf{n}_\omega \\ \tilde{\mathbf{a}}_t^b &= \mathbf{a}_t^b + \mathbf{b}_{at} + \mathbf{R}_t^b \mathbf{g}^w + \mathbf{n}_a\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\tilde{\mathbf{w}}_t^b$ 和 $\tilde{\mathbf{a}}_t^b$ 为在载体坐标系下测量的角速度和线加速度, \mathbf{w}_t^b 和 \mathbf{a}_t^b 为需要估计的角速度和线加速度的真值。在陀螺仪测量模型中, \mathbf{b}_ω 和 \mathbf{n}_ω 分别为陀螺仪的零偏和测量噪声, \mathbf{n}_ω 服从高斯分布, \mathbf{b}_ω 服从高斯随机游走; \mathbf{b}_a 和 \mathbf{n}_a 分别为加速度计的零偏和测量噪声, \mathbf{n}_a 服从高斯分布, \mathbf{b}_a 服从高斯随机游走。

1.1.2 基于卡尔曼滤波器的姿态解算算法

建立基于非线性卡尔曼滤波器的姿态解算算法, 其状态方程和量测方程^[17]如下

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\omega}) + \mathbf{W} \\ \mathbf{Z} &= \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{V}\end{aligned}\quad (2)$$

式中, 状态向量 $\mathbf{X} = [q_0, q_1, q_2, q_3, b_{\omega x}, b_{\omega y}, b_{\omega z}]$, 分别表示四元数和陀螺仪的偏差, \mathbf{W} 为系统噪声, 服从高斯分布; \mathbf{V} 为测量噪声, 服从高斯分布, 四元数微分方程为

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \otimes (\boldsymbol{\omega} + \mathbf{b}_\omega)$$

对上式进行离散化可以得到如下状态转移方程

$$\mathbf{X}_{K+1} = \mathbf{A}_K \mathbf{X}_K \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{A}_K = (\mathbf{I} + T\mathbf{F}) = \mathbf{I} +$$

$$T \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z & q_{1K} & q_{2K} & q_{3K} \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y & -q_{0K} & q_{3K} & -q_{2K} \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x & -q_{3K} & -q_{0K} & q_{1K} \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 & q_{2K} & -q_{1K} & -q_{0K} \\ \hline 0_{3 \times 4} & & & & 0_{3 \times 3} & & \end{bmatrix}$$

$\mathbf{X}_K(i) = q_i, i = 0, 1, 2, 3$ 。T 为 IMU 传感器数据采集时间间隔。

对于加速度的测量数据可以通过方向余弦矩阵进行估计, 其中假设重力加速度为常数 $|g|$, 可以根据式 (4) 得到加速度计在载体坐标下的测量方程。

$$h_a(\mathbf{X}) = \hat{\mathbf{g}} = \mathbf{R}_w^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ |g| \end{bmatrix} = |g| \begin{bmatrix} 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_0q_1 + 2q_2q_3 \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{R}_w^b =$$

$$\begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过视觉和 IMU 优化模块中式 (17) 可以得到优化后加速度计的零偏估计并对加速度计进行修正, 因此修正后的测量值为

$$\mathbf{Z}_{K+1}^a = [\tilde{a}_x - \hat{b}_{ax}, \tilde{a}_y - \hat{b}_{ay}, \tilde{a}_z - \hat{b}_{az}]^T$$

其中, \tilde{a} 为加速度计的测量数值, \hat{b}_a 为式 (17) 得到的加速度计零偏估计量。

磁力计的测量方程与加速度计测量方程相同。对磁场进行归一化, 并假设其指向 y 轴。磁力计的测量方程见式 (6)

$$h_m(\mathbf{X}) = \hat{\mathbf{m}} = \mathbf{R}_w^b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2q_1q_2 + 2q_0q_3 \\ q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \\ 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过磁力计可以直接测量到地磁场的的数据, 进行归一化可以得到磁力计的测量数据 $\mathbf{Z}_{K+1}^m = [m_x, m_y, m_z]^T$

根据式 (2) ~ (6) 所得到的状态方程和测量方程进行卡尔曼更新, 求解后验状态估计和后验状态协方差矩阵见式 (7):

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}_{k+1} &= \hat{\mathbf{X}}_{K+1}^- + \mathbf{K}_{K+1}(\mathbf{Z}_{K+1} - h(\hat{\mathbf{X}}_{K+1}^-)) \\ \mathbf{P}_{k+1}^a &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{K+1}^a \mathbf{H}_{K+1}^a) \mathbf{P}_{k+1}^- \end{aligned} \quad (7)$$

根据状态估计量 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1}$ 和式 (5) 就可以求解出旋转矩阵, 同时根据估算出的陀螺仪零偏对陀螺仪数据进行修正。

1.2 基于视觉传感器和 IMU 的非线性图优化

1.2.1 IMU 测量残差

首先对 IMU 的测量数据进行积分, 为 IMU 的残差计算提供约束关系。在给定的两帧连续图像 b_k 和 b_{k+1} 之间, 可以通过加速度计、陀螺仪的测量数据和式 (7) 中解算的姿态角和陀螺仪偏差估计值计算 b_{k+1} 帧时刻的位置, 速度和姿态角信息, 见式 (8)^[16]:

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{b_{k+1}}^w &= \mathbf{P}_{b_k}^w + \mathbf{V}_{b_k}^w \Delta t_k + \iint_{t \in [t_k, t_{k+1}]} (\mathbf{R}_t^w (\tilde{\mathbf{a}}_t - \mathbf{b}_{at}) - \mathbf{g}^w) dt^2 \\ \mathbf{V}_{b_{k+1}}^w &= \mathbf{V}_{b_k}^w + \int_{t \in [t_k, t_{k+1}]} (\mathbf{R}_t^w (\tilde{\mathbf{a}}_t - \mathbf{b}_{at}) - \mathbf{g}^w) dt \\ \mathbf{q}_{b_{k+1}}^w &= \mathbf{q}_{b_k}^w \otimes \int_{t \in [t_k, t_{k+1}]} \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}(\tilde{\mathbf{w}}_t - \mathbf{b}_{\omega t}) \mathbf{q}_t^{b_k} dt\end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} -|\boldsymbol{\omega}| \times & \boldsymbol{\omega} \\ -\boldsymbol{\omega}^T & 0 \end{bmatrix}$, $|\boldsymbol{\omega}| \times$ 如下所示

$$|\mathbf{w}| \times = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_x \\ \omega_z & 0 & -\omega_y \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

Δt_k 表示连续两帧图像间 $[t_k, t_{k+1}]$ 的时间间隔。上标 w 表示由第一帧图像时刻所得位姿建立的世界坐标系。 b_{wt} 为通过式(7)估计的陀螺仪零偏量。 \mathbf{R}_t^w 表示由式(5)和式(7)得到的四元数通过转换得到的旋转矩阵。由于需要求解 b_k 和 b_{k+1} 之间的状态更新量,因此把参考坐标系从世界系转换到 b_k 帧的载体坐标系,可得到式(9):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_w^{b_k} \mathbf{P}_{b_{k+1}}^w &= \mathbf{R}_w^{b_k} (\mathbf{P}_{b_k}^w + \mathbf{V}_{b_k}^w \Delta t_k - \frac{1}{2} \mathbf{g}^w \Delta t_k^2) + \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \mathbf{R}_w^{b_k} \mathbf{V}_{b_{k+1}}^w &= \mathbf{R}_w^{b_k} (\mathbf{V}_{b_k}^w - \mathbf{g}^w \Delta t_k) + \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \mathbf{q}_{b_{k+1}}^w \otimes \mathbf{q}_{b_{k+1}}^w &= \boldsymbol{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_k} \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k} &= \iint_{t \in [t_k, t_{k+1}]} \mathbf{R}_t^{b_k} (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{b}_{at}) dt^2 \\ \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k} &= \int_{t \in [t_k, t_{k+1}]} \mathbf{R}_t^{b_k} (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{b}_{at}) dt \\ \boldsymbol{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_k} &= \int_{t \in [t_k, t_{k+1}]} \frac{1}{2} \Omega(\tilde{\mathbf{w}} - \mathbf{b}_{wt}) \boldsymbol{\gamma}_t^{b_k} dt \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,IMU积分过程选择 b_k 为参考坐标系,连续两帧图像之间的相对运动增量 $\boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k}$ 、 $\boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k}$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_k}$ 只与IMU传感器的零偏有关,因此选择这3个变量作为积分的求解对象,可以节省大量计算资源。

对于式(10)采用欧拉法进行离散处理求解积分值,同时进行泰勒一阶近似。就可以计算得到 b_k 和 b_{k+1} 之间的位移、速度和姿态角的增量,如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k} &\approx \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{b_{k+1}}^{b_k} + J_{b_a}^{\alpha} \mathbf{b}_{ak} + J_{b_{wk}}^{\alpha} \mathbf{b}_{wk} \\ \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k} &\approx \hat{\boldsymbol{\beta}}_{b_{k+1}}^{b_k} + J_{b_a}^{\beta} \mathbf{b}_{ak} + J_{b_{wk}}^{\beta} \mathbf{b}_{wk} \\ \mathbf{q}_{b_{k+1}}^{b_k} &\approx \hat{\mathbf{q}}_{b_{k+1}}^{b_k} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} J_{b_{wk}}^{\gamma} \mathbf{b}_{wk} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

\mathbf{b}_{wk} 为经过式(7)解算得到的陀螺仪的零偏估计量。 \mathbf{b}_{ak} 为加速度计的零偏估计量,初始值为0,然后通过式(17)进行更新。初始值 $\boldsymbol{\alpha}_{b_k}^{b_k}$ 和 $\boldsymbol{\beta}_{b_k}^{b_k}$ 为0, $\mathbf{q}_{b_k}^{b_k}$ 为单位矩阵。其中雅克比矩阵为

$$J_{b_a}^{\alpha} = \frac{\delta \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k}}{\delta \mathbf{b}_{ak}}$$

同样可以计算 $J_{b_{wk}}^{\alpha}$ 、 $J_{b_a}^{\beta}$ 、 $J_{b_{wk}}^{\beta}$ 和 $J_{b_{wk}}^{\gamma}$ 。至此,就可以通过迭代完成两帧图像间位姿增量积分的求解过程。

对于摄像机视频窗口内两个连续帧图像 b_k 和 b_{k+1} 之间的IMU测量数据,根据式(9)~式(11),IMU积分过程的测量残差为^[16]

$$\begin{aligned} r_B(\hat{\mathbf{z}}_{b_{k+1}}^{b_k}, \boldsymbol{\chi}) &= \begin{bmatrix} \delta \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \delta \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \delta \boldsymbol{\theta}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \delta \mathbf{b}_a \\ \delta \mathbf{b}_{wk} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_w^{b_k} (\mathbf{p}_{b_{k+1}}^w - \mathbf{p}_{b_k}^w + 0.5 \mathbf{g}^w \Delta t_k^2 - \mathbf{v}_{b_k}^w \Delta t_k) - \boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ \mathbf{R}_w^{b_k} (\mathbf{v}_{b_{k+1}}^w - \mathbf{v}_{b_k}^w + \mathbf{g}^w \Delta t_k) - \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k} \\ 2[\mathbf{q}_{b_k}^{w-1} \otimes \mathbf{q}_{b_{k+1}}^w \otimes (\boldsymbol{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_k})^{-1}]_{xyz} \\ \mathbf{b}_{ab_{k+1}} - \mathbf{b}_{ab_k} \\ \mathbf{b}_{wb_{k+1}} - \mathbf{b}_{wb_k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $[\cdot]_{xyz}$ 表示四元数中的矢量部分,代表状态误差。 $\delta \boldsymbol{\theta}_{b_{k+1}}^{b_k}$ 为四元数状态误差的三维表示方式。 $[\boldsymbol{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_k}, \boldsymbol{\beta}_{b_{k+1}}^{b_k}, \boldsymbol{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_k}]$ 通过式(11)得到。至此,就完成了IMU残差的求解过程。

1.2.2 视觉测量残差

根据针孔相机模型建立对极几何方程。通过五点法求解本质矩阵,就可以解算出两帧图像之间的旋转和带有尺度因子的位移信息。然后运用三角法和PnP算法,恢复出滑动窗口内所有帧和特征点对应的姿态和带尺度因子的位置。 $(\bar{\mathbf{p}}_{ck}^w, \mathbf{q}_{ck}^w)$ 上标 w 为世界坐标系, ck 表示第 k 帧图像相机坐标系。同时假设已经知道相机和IMU安装位置的对应关系 $(\mathbf{p}_c^b, \mathbf{q}_c^b)$, 就可以通过单目视觉求解出机器人的位姿信息,见式(13)^[16]:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{b_k}^w &= \mathbf{q}_{ck}^w \otimes (\mathbf{q}_c^b)^{-1} \\ s \bar{\mathbf{p}}_{b_k}^w &= s \bar{\mathbf{p}}_{ck}^w - \mathbf{R}_{b_k}^w \mathbf{p}_c^b \end{aligned} \quad (13)$$

式中, s 为待求的尺度因子,表示与实际移动距离尺寸相关的缩放比例。

定义单目视觉在图像平面上的重投影误差,通过将第 i 帧图像中观测到的特征点 n 重投影到第 j 帧图像中,则视觉测量残差为

$$r_C(\hat{\mathbf{z}}_n^{cj}, \boldsymbol{\chi}) = \left(\hat{\mathbf{C}}_n^{cj} - \frac{\mathbf{C}_n^{cj}}{\|\mathbf{C}_n^{cj}\|} \right) \quad (14)$$

式中, $\hat{\mathbf{C}}_n^{cj} = \begin{bmatrix} \hat{u}_n^{cj} \\ \hat{v}_n^{cj} \end{bmatrix}$ 为特征点 n 在第 j 帧图像平面上的投影。根据式(13)及相机投影关系可得

$$C_n^{cj} = R_c^b (R_b^{bj} (R_w^{bj} (R_c^b \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} u_n^{ci} \\ v_n^{ci} \end{bmatrix}) + p_c^b) + p_{b_i}^w - p_{b_j}^w) - p_c^b \quad (15)$$

式中, $\begin{bmatrix} u_n^{ci} \\ v_n^{ci} \end{bmatrix}$ 为特征点 n 在第 i 帧图像平面上的投影。

1.2.3 图优化状态方程

定义需要优化的状态向量如下

$$\mathbf{x} = [x_0, \dots, x_n, x_c^b, s, \lambda_0, \dots, \lambda_m] \quad (16)$$

式中, $\mathbf{x}_k = [p_{b_k}^w \quad v_{b_k}^w \quad b_a \quad b_w]$, $k \in [0, n]$ 分别表示第 k 帧图像时刻载体的位姿状态, 包括位置、速度、陀螺仪零偏和加速度计零偏。 $\mathbf{x}_c^b = [p_c^b, q_c^b]$, n 表示视频图像中的所有关键帧, m 表示所有关键帧内的所有特征点, λ_m 表示第一次观测到特征点 m 的逆深度, s 表示单目视觉的尺度因子。

由式 (12) 和 (14) 定义代价函数为

$$\min_{\mathbf{x}} \left\{ \sum_{k \in \mathbf{B}} \|r_{\mathbf{B}}(\hat{z}_{b_{k+1}}^b, \mathbf{x})\|^2 + \sum_{k \in \mathbf{C}} \|r_{\mathbf{C}}(\hat{z}_n^{cj}, \mathbf{x})\|^2 \right\} \quad (17)$$

式中, \mathbf{B} 为所有 IMU 测量数据的集合, \mathbf{C} 为解算关键帧内所有图像特征点的集合。通过 Ceres Solver 优化器, 对式 (17) 求解最小二乘问题, 就可以得到位置估计量、陀螺仪和加速度计零偏。至此, 完成了由视觉和 IMU 传感器求解位置的过程。

2 实验结果

2.1 实验平台

实验平台采用 optor 惯性相机、Pixhawk 飞控硬件和深圳玩智商科技有限公司生产的 Dashgo D1 移动机器人平台。optor 惯性相机带有一个 MPU-6050 模块, 集成了三轴陀螺仪和三轴加速度计, 还带有两个 30fps、分辨率为 752×480 的摄像头。用 Pixhawk 飞控中的 HMC5883L 三轴磁力计采集地磁场数据。Dashgo D1 移动机器人的移动精度低于 1%, 作为移动平台验证算法的移动精度和旋转精度。所有传感器都通过 USB 连接到 NUC 机载电脑上, 进行数据采集, 并在机载电脑上运行算法进行位姿估计, 如图 1 所示。

2.2 实验结果

通过 Dashgo D1 移动机器人搭载实验设备在室内分别沿着 XY 轴直线运动 15m 和绕 z 轴旋转 360° , 分别运行本文算法和 VINS-SLAM 算法, 进行实验并记录实验数据。将本文算法解算结果和当前解算精度高的 VINS-SLAM 算法解算结果进



图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

行对比。

首先进行沿 XY 轴直线运动的实验, 使移动机器人以 0.05m/s 的速度分别沿着 XY 轴直线匀速移动 15m。记录并对比本文算法和 VINS-SLAM 算法解算结果的误差。实验结果如图 3~图 6 所示, 横轴表示时间, 纵轴表示移动距离。

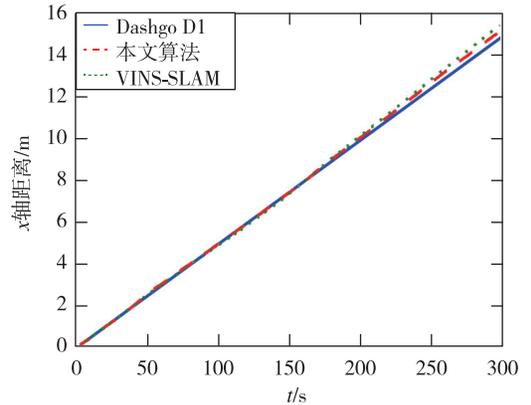


图 3 X 轴实验结果

Fig. 3 X-axis experiment results

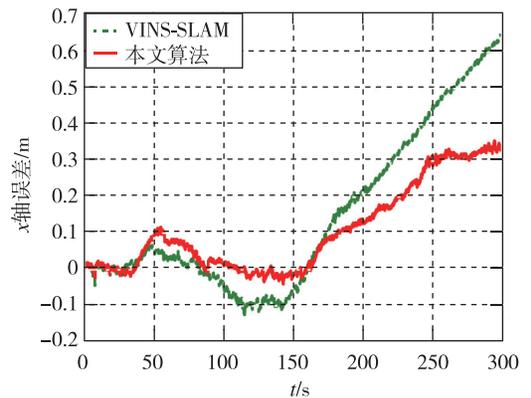


图 4 X 轴实验误差

Fig. 4 X-axis experimental error

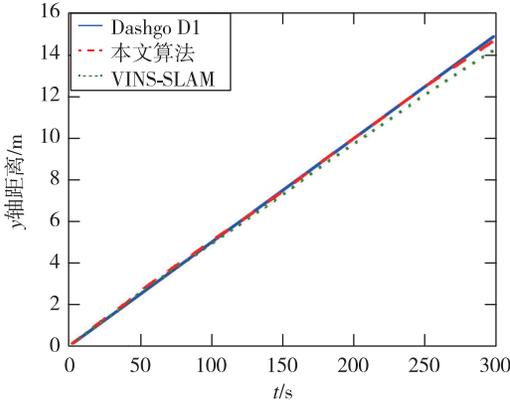


图5 Y轴实验结果

Fig. 5 Y-axis experiment results

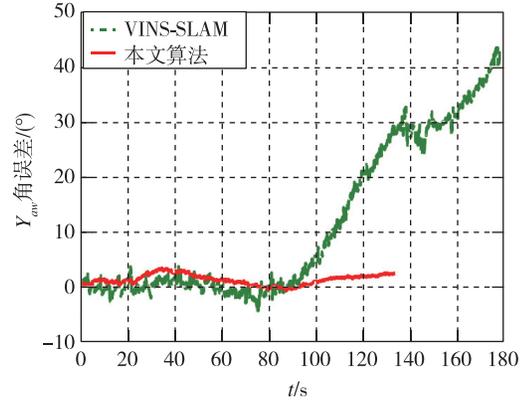
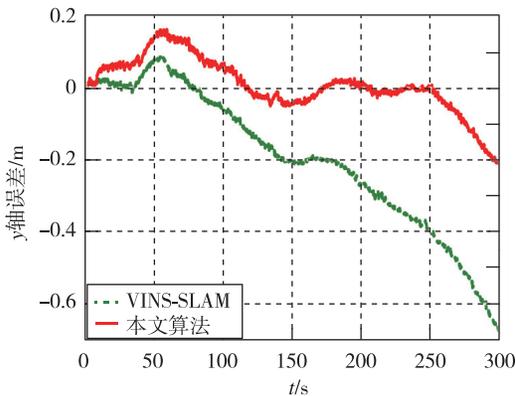
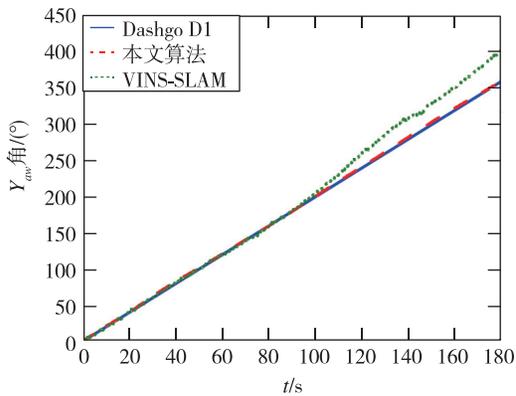
图8 Y_{aw} 角实验误差Fig. 8 Y_{aw} experiment error

图6 Y轴实验误差

Fig. 6 Y-axis experimental error

将 Dashgo D1 移动机器人绕 z 轴按 $2^\circ/\text{s}$ 匀速旋转 360° 进行 Y_{aw} 姿态角解算实验。记录并对比本文算法和 VINS-SLAM 算法解算结果的误差, 如图 7、图 8 所示。

图7 Y_{aw} 角实验结果Fig. 7 Y_{aw} experiment results

从图 (8) 可以看出, 由于 VINS-SLAM 算法只用 IMU 和单目视觉进行位姿解算, 在纯旋转的情况下, 当旋转 180° 后由于此时视觉传感器无法解算对极几何而解算失效, 此时只依赖陀螺仪积分进行姿态解算, 就会出现姿态解算漂移。而本文算法主要依靠磁力计和 IMU 进行姿态解算, 有效避免了单目视觉 SLAM 算法中存在的姿态解算漂移的问题。

表1 实验误差结果

Tab. 1 Experimental error

误差	X 轴/m	Y 轴/m	Y_{aw} 角/ ($^\circ$)
本文算法	0.4	0.37	4.8
VINS-SLAM	0.78	0.76	48.5

通过表 1 对比本文算法与不使用磁力计的 VINS-SLAM 算法可以看出, 本文算法通过使用磁力计使位置解算误差降低到 0.4m 以内。而解算的姿态角克服了 VINS-SLAM 算法中由于纯旋转情况而产生的漂移问题, 并且解算精度在 5° 以内。

3 结论

本文首次将磁力计、单目视觉和 IMU 传感器数据进行融合, 解算移动机器人位姿状态, 并通过实验对设计的算法进行验证, 与 VINS-SLAM 单目视觉算法进行对比。实验结果表明, 所设计的基于磁力计、IMU 和单目视觉的自主定位算法, 不但提高了移动机器人的位姿解算精度, 同时也克服了现有的单目视觉 SLAM 算法在纯旋转情况下姿态角解算漂移的问题。本算法由于只使用磁

力计、IMU 和单目摄像头, 具有质量小、成本低、消耗计算资源少等优点, 因此可广泛应用于小型移动机器人的自主导航系统中。

参考文献

- [1] Shen S, Mulgaonkar Y, Michael N, et al. Initialization-free monocular visual-inertial state estimation with application to autonomous MAVs [C]. *Experimental Robotics*, Springer, Cham, 2016: 211-227.
- [2] Shen S, Michael N, Kumar V. Tightly-coupled monocular visual-inertial fusion for autonomous flight of rotorcraft MAVs [C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2015: 5303-5310.
- [3] Faessler M, Fontana F, Forster C, et al. Automatic re-initialization and failure recovery for aggressive flight with a monocular vision-based quadrotor [C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2015: 1722-1729.
- [4] Yang Z, Shen S. Monocular visual-inertial state estimation with online initialization and camera-IMU extrinsic calibration [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 14 (1): 39-51.
- [5] Bloesch M, Omari S, Hutter M, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach [C]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2015: 298-304.
- [6] Leutenegger S, Lynen S, Bosse M, et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2015, 34 (3): 314-334.
- [7] Ling Y, Liu T, Shen S. Aggressive quadrotor flight using dense visual-inertial fusion [C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2016: 1499-1506.
- [8] Usenko V, Engel J, Stückler J, et al. Direct visual-inertial odometry with stereo cameras [C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2016: 1885-1892.
- [9] Huang A S, Bachrach A, Henry P, et al. Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera [M]. *Robotics Research*. Springer, Cham, 2017: 235-252.
- [10] Shen S, Michael N, Kumar V. Autonomous indoor 3D exploration with a micro-aerial vehicle [C]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2012: 9-15.
- [11] Davison A J, Reid I D, Molton N D, et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007 (6): 1052-1067.
- [12] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces [C]. *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, 2007: 1-10.
- [13] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D. SVO: fast semi-direct monocular visual odometry [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014: 15-22.
- [14] Mur-Artal R, Tardós 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.
- [15] Mourikis A I, Roumeliotis S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation [C]. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2007: 3565-3572.
- [16] Li P, Qin T, Hu B, et al. Monocular visual-inertial state estimation for mobile augmented reality [C]. 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), IEEE, 2017: 11-21.
- [17] 汪芳, 朱少华, 雷宏杰. 基于卡尔曼滤波器的数字式捷联航姿系统算法设计 [J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16 (2): 208-211.

引用格式: 樊建彪, 孙剑, 樊欢欢, 等. 基于磁力计、IMU 和单目视觉的自主定位方法[J]. *宇航总体技术*, 2019, 3 (6): 39-45.

Citation: Fan J B, Sun J, Fan H H, et al. A method of autonomous localization based on magnetometer, IMU, and monocular vision [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2019, 3 (6): 39-45.