

# 基于惯性信息多级辅助的视觉导航方法研究

古翠红 李光燕 王梦霞

(山东协和学院 山东济南 250107)

摘要: 针对 IMU 足部安装方式的微惯性行人导航系统的航向角误差较大的问题, 本文研究了足部惯性信息辅助的视觉导航定位方法。首先, 本文研究了躯干安装的视觉/惯性组合导航系统工作原理。通过建立 IMU 观测模型、IMU 预积分、视觉惯性信息融合优化的方式将视觉信息与惯性信息紧密的融合在一起, 弥补了纯视觉导航由于环境变化容易丢失特征点进而无法定位的不足, 提高了视觉定位系统的鲁棒性。其次, 针对微惯性行人导航系统的航向角误差无法修正的问题, 本文研究了一种在某种行走方式下使用视觉/惯性组合导航系统的航向角修正足部惯性导航系统的航向角的方法。针对视觉/惯性组合导航系统中的惯性测量组件器件误差较大的问题, 本文以足部惯性导航系统的位置信息为观测量, 通过卡尔曼滤波器估计出视觉/惯性组合导航系统中惯性测量组件的器件误差, 扣除该器件误差, 达到提高视觉/惯性组合导航系统的定位精度的目的。

关键词: 行人导航; 机器学习; 虚拟惯性测量组件; 视觉/惯性组合导航

## 1. 行人导航定位技术研究现状

行人导航系统因其基于多个位置的应用而受到了广泛的关注。对于大多数现有的行人导航系统, 行人定位是通过全球定位系统 (GPS) 获得的。但是, 在茂密的森林, 高楼林立的城市区域和室内环境中, GPS 通常不可用。而基于基础设施来获取定位的方法, 例如红外光, 超声和超宽带, 则需要建立光源这一初始条件<sup>[1-2]</sup>。上述基于基础设施的定位方法中有一个缺点是它们的成本过高。此外, 由射频识别读写器和标签组成的射频识别技术利用有限的射频来发送和接收测量结果, 这一技术也可用于室内定位应用<sup>[3]</sup>。但是, 传输范围的限制以及使用大量读写器和标签用于精确定位的必要性限制了射频识别在定位应用中的广泛性。无线局域网 (WLAN) 是室内定位的另一种基础设施, 但由于其位置检测精度是由接收信号强度决定的, 因此需要大量的接入点<sup>[4]</sup>来加强信号强度。

无基础设施的定位系统通常基于航位推算原理进行定位。在过去 20 年中, 研究者们研究过多种几种不同的解决方案, 例如启发式行人航位推算 (PDR) 方法<sup>[5-6]</sup>和足部安装的惯性导航系统<sup>[7-8]</sup>。文献 [9] 对 PDR 类型的行人导航系统进行了全面的综述。这项技术在实际应用中的主要困难是, 在具有显著磁场干扰的环境中, 不能可靠地估计航向 (特别是在不规则运动期间, 如侧向、向后或爬行)。

上述研究表明, 国内外众多研究者对行人导航方法已进行较为深入的研究, 主要思路是通过微惯性导航系统进行零速修正, 或航位推算的方式实现导航定位, 但目前多数的研究基于人体的平稳步态, 在人体复杂运动状态下的导航定位方法是需要进一步研究的重点。

## 2. 视觉导航定位研究现状

同时定位与地图构建技术 (Simultaneous Localization and Mapping, 简称 SLAM) 指在没有提前了解环境信息的情况下, 携带特定传感器的主体, 在移动过程中建立环境的模型, 同时对自身的运动信息进行估计, 在机器人、无人机导航定位领域有着举足轻重的作用。利用视觉传感器采集环境信息进行定位的 SLAM 叫做视觉 SLAM。将视觉传感器安装在行人身上, 同样可以用来估计行人的运动状态。

Raul Mur-Artal 等人组成的研究团队在 2015 年研究的 ORB-SLAM 系统, 是一个基于特征点法的单目 SLAM 系统, 可在室内环境下实时工作。该系统对较大的运动波动具有鲁棒性, 允许宽基线环路闭合和重定位, 并包括自动初始化。在近年来已有的算法的基础上, 该研究团队设计了一个新的系统, 该系统对所有 SLAM 任务使用相同的流程: 跟踪、建图、重定位和环路闭合。对特征点和关键帧的筛选使得系统具有更强鲁棒性, 并生成一个紧凑且可跟踪的地图, 只有在相机采集到的图像信息变化时地图才会更新。该团队从公用数据集中对 27 个序列进行了详尽的评估。该 ORB-SLAM 定位系统是当前最为完善的视觉导航系统之一。

有效地估计行人的运动状态是保证其自主定位的基础。视觉里程计 (VO) 作为视觉 SLAM 的前端, 通过视觉传感器估计运动主体的运动状态, 在导航定位领域得到了广泛的关注和应用。近几年, 提高视觉里程计性能的方式主要有以下两种: 使用多个视觉传感器采集视觉信息 (即多摄像机视觉里程计) 和视觉/惯性组合导航。多摄像机由于视野更大, 可以提供丰富的环境信息和丰富的视觉特征, 从而大大提高 VO 在复杂环境下的性能。尽管如此, VO 的性能还是很容易受到运动模糊问题的影响。IMU 可以提供高频率的精确运动信息, 弥补视觉跟踪运动模糊的问题。

香港科技大学建立的单目视觉/惯性组合导航系统及便携式视觉/惯性组合导航系统可以应用于基于 IOS 系统的移动手机终端和基于 Ubuntu 系统的电脑端, 该组合导航系统通过视觉里程计跟踪图像、对视觉和惯性数据进行预处理、视觉惯性联合初始化、基于 BA 的联合优化、回环检测和全局优化等步骤进行定位。实验结果表明, 该视觉/惯性组合导航系统的初始化速度比双目视觉/惯性组合导航系统的初始化速度加快约 30%, 是目前主流的基于优化的视觉惯性紧耦合导航系统。

综上所述, 视觉/惯性组合导航系统受到国内外众多研究者的重视, 通过视觉惯性耦合的方式进行定位, 能够有效提高视觉 SLAM 的鲁棒性。

## 3. 惯性信息多级辅助的 ORB SLAM 方案设计

采用足部惯性测量组件进行行人定位时, 由于航向角误差的可观测性很差, 卡尔曼滤波器不能精确的将航向角误差估计出来, 由于陀螺仪的漂移, 导致航向角最终会发散, 故该方案仅适用于短时轨迹跟踪。利用磁力计获取航向角的方法会由于磁力计存在误差且易受干扰, 易将误差扩散至俯仰角与横滚角, 从而影响整个姿态角的解算精度。视觉/惯性组合导航系统通过相机图像读取、视觉里程计、后端优化和回环检测等步骤后可以获得比较准确的航向角。

另外, 视觉/惯性组合导航系统的 IMU 多为低精度传感器, 其加速度偏差较大。IMU 初始化阶段, 若忽略加速度偏差, 将其加到重力加速度中, 容易导致重力加速度发散, 进而导致初始化失败, 视觉/惯性组合导航系统不仅无法获得准确的初始位姿, 还会为非线性优化带来错误的 IMU 约束, IMU 的器件误差很有可能导致视觉/惯性组合导航系统无法定位。

针对以上问题, 本文研究了基于惯性信息多级辅助的视觉导航方法。具体方案如图 1 所示。

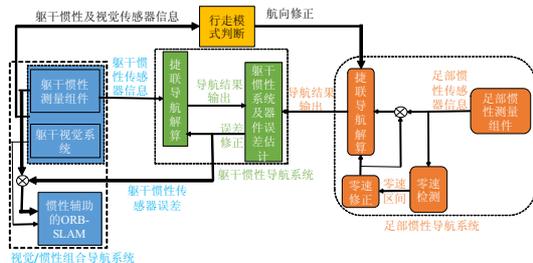


图 1 基于 INS 和 VINS 相互辅助的定位系统工作流程图

如图 1 所示, 蓝色部分为视觉/惯性组合导航系统。由安装于躯干的惯性测量组件和视觉传感器分别采集惯性信息、视觉图像信息。该系统采用紧耦合的非线性优化方式耦合惯性信息, 包含了五个功能模块, 分别是: 数据预处理、初始化、后端非线性优化、闭环检测, 以及闭环优化。黄色部分为足部惯性导航系统, 该系统以捷联惯性导航为主提供导航信息, 通过行人足部运动信息进行零速检测触发基于卡尔曼滤波器的零速修正, 补偿导航系统误差, 从而获得比较准确的位置信息。

为了提高视觉/惯性组合导航系统中的 IMU 器件精度, 本文以躯干惯导误差方程作为状态方程, 其状态量与足部 INS 相同。行人行进过程中每当系统输出位置信息, 以足部 INS 位置信息作为基准, 将 VINS 中的惯性信息捷联解算得到的位置与足部 INS 位置信息作差

值即为位置误差观测量，建立卡尔曼滤波器。

卡尔曼滤波器的量测：

$$Z_k = [\delta L \ \delta \lambda \ \delta h] \quad (1)$$

式(1)中， $\delta L$ 、 $\delta \lambda$  和  $\delta h$  分别代表经度、纬度和高度误差观测量。

时间更新：利用视觉/惯性组合导航系统中的加表和陀螺仪采集的惯性信息进行导航解算，更新 15 维状态量和相应的四元数，根据状态量和四元数推算出卡尔曼滤波器的状态转移和协方差矩阵。量测更新：计算卡尔曼增益，每当足部惯性导航系统和躯干 IMU 经导航解算后输出位置信息时，将二者的位置差作为系统的位置误差观测量，同时修正躯干 IMU 捷联导航解算后的姿态转移阵、速度及位置误差和躯干 IMU 的器件误差。通过提高躯干 IMU 的器件精度，扣除加速度计的零偏，使视觉/惯性组合导航系统能成功初始化，获得准确的初始位姿并且在非线性优化阶段提供正确的 IMU 约束。

针对足部惯性导航系统的航向角精度差的问题，本文通过视觉/惯性组合导航系统的图像信息和惯性信息判断行人的行走方式，当行人为直线行走时，用视觉/惯性组合导航系统的精度较高的航向角替代足部惯性导航系统的低精度航向角。

#### 4. 惯性/视觉导航改进方案的性能验证实验



图2 行人导航系统行进实验环境图

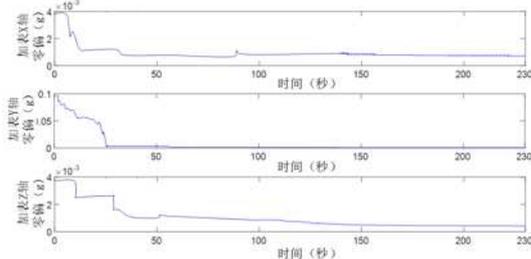


图3 视觉/惯性组合导航系统的加速度计零偏的协方差曲线

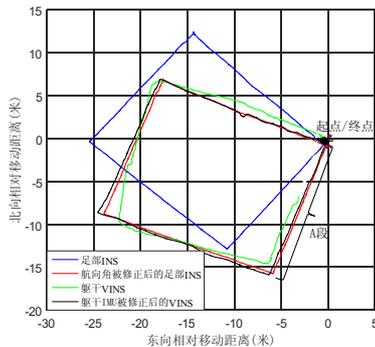


图4 各行人导航方案定位结果对比图

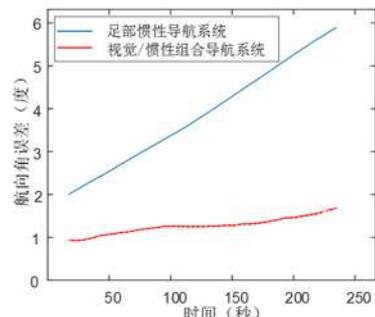


图5 各行人导航方案的航向角误差曲线

为验证上述行人导航方案的在行人导航定位系统中应用的可行性，将惯性测量组件 XSENS MTI-300 安装于行人足部，视觉惯性传感器小觅 S1000-120-ir 安装于行人躯干部位。并同时足部 IMU 惯性信息采集和躯干视觉惯性信息采集。为了获取足部惯性导航系统的定位误差，本文在某地下车库选取了一条闭合路线，实验环境及行进路线如图 2 所示。实验总路程约 230m，其中行人常规步行速度约 1m/s，行进总时间约 230s，除了拐弯处，其他路段均保持直线行走。为了验证单目 VINS 的 IMU 器件误差被修正后的导航系统在复杂环境条件下的定位鲁棒性，本文设置的环境条件为行人行进过程中一直有人在视觉传感器前面晃动，并且在 A 段路程下环境特征点较少，实验场景如图 2 所示。为了验证本文所提出的修正躯干 IMU 的加速度计零偏误差的方法是否有效，画出躯干 IMU 的加速度计零偏误差曲线如图 3 所示。行人导航系统定位结果如图 4 所示。为了验证本文修正足部惯性导航系统航向角方案的有效性，本文以数字地图记录的航向角为基准，记录实验过程中的足部航向角误差变化曲线、视觉传感器的航向角误差变化曲线，如图 5 所示。

由图 4 可知，绿色曲线为 VINS 的定位曲线，由于单目 VINS 的器件误差较大，导致初始化失败，初始化阶段无法获得准确的初始位姿，非线性优化阶段的 IMU 约束为单目 VINS 带来较大的误差，在行进过程中，在视觉摄像头前面一直有行人在晃动，容易出现特征点误匹配，并且在 A 段路线特征点较少，无法实现相邻的两帧图像的特征点的匹配，最大的定位误差为 10 米，占总行进路程的 4.3%。以足部惯性导航系统的位置信息为观测量，估计 VINS 中的 IMU 的加速度计零偏，零偏的协方差如图 3 所示，加速度计零偏逐渐收敛，说明本文所提出的方案可以有效估计加速度计零偏。VINS 中的加速度计零偏被扣除后，加速度计的精度得到提高，定位曲线如图 4 中黑色曲线所示，即使在环境特征点较少和存在物体晃动的环境下，单目 VINS 仍能够靠惯性信息实现短时间定位，最大定位误差为 3 米，占总行进距离的 1.3%。

足部惯性导航系统的航向角被修正之前的定位曲线如图 4 中蓝色曲线所示，其航向角误差随时间的变化曲线如图 5 所示，由图 5 可知，足部惯性导航系统的航向角被修正之前，其航向角误差较大，并且随着时间的延长逐渐增大，最大航向角误差为 6°。单目 VINS 的航向角误差较小，且随时间的延长，其误差增长较小。在直线行走阶段，利用单目 VINS 的航向角替代足部惯性导航系统的航向角，定位曲线如图 4 中红色曲线所示，最大航向角误差为 1.8°，说明本文所提出的航向角修正方法可有效提高足部惯性导航系统的航向角精度。

#### 5. 总结

针对足部惯性导航系统的航向角误差逐渐累积导致的航向角误差较大的问题，提出了在某种行走方式下，通过单目视觉/惯性组合导航系统的航向角替代足部惯性导航系统的航向角的方法。首先研究了单目 ORB-SLAM 的结构和其工作流程，针对单目 ORB-SLAM 定位鲁棒性差的问题，对系统初始化和视觉惯性非线性优化方法进行了研究，研究了单目视觉/惯性组合导航系统；将单目 ORB-SLAM 和单目视觉/惯性组合导航系统的定位性能在特殊试验条件下进行对比，说明了本文所研究的初始化和非线性优化方案能够提高单目 ORB-SLAM 的定位性能；针对上述方案存在的单目视觉/惯性组合导航系统的 IMU 器件精度差的问题，本文以足部惯性导航系统的位置信息为观测量，构建卡尔曼滤波器，以估计并修正单目视觉/惯性组合导航系统的 IMU 器件误差，设计了惯性信息多级辅助的 ORB-SLAM 方案；最后设计了惯性/视觉导航改进系统的性能验证实验，综合验证了本文研究方案的有效性。

#### 参考文献：

- [1]林钦永. 光学手术导航引导的肝癌消融精准定位和穿刺方法研究[D]. 华南理工大学, 2016.
  - [2]周建波. 导航机器人运动机构及控制系统设计与实现[D]. 北京工业大学, 2019.
- 注：2021 年度山东省统计科学应用研究课题，项目名称：基于深度学习和多源数据融合的行人定位系统研究，项目编号：2021TJYB021