

doi: 10.7690/bgzd.2024.02.020

基于多旋翼无人机视觉惯性里程计的设计与实现

廖士楠, 王 伟, 王世勇

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对 GNSS 信号受到干扰或在拒止环境下, 多旋翼无人机的导航定位问题, 设计一种多旋翼无人机视觉惯性里程计系统。介绍系统的总体设计方案、硬件选型与设计、软件系统搭建、通信协议规定以及算法设计思路。实验验证结果表明: 该系统可以实际运行在多旋翼无人机上, 当 GNSS 信号不可用时, 仍可向飞控实时提供多旋翼无人机当前可用位姿, 为多旋翼无人机视觉辅助导航设计提供参考。

关键词: 多旋翼无人机; GNSS 拒止; 导航定位; 视觉惯性里程计

中图分类号: V249.1 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Visual Inertial Odometer Based on Multi-rotor UAV

Liao Shinan, Wang Wei, Wang Shiyong

(Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South
Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: A visual inertial odometry system for multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) is designed to solve the navigation and positioning problems of multi-rotor UAV in the case of interference or denial of global navigation satellite system (GNSS) signals. The overall design scheme, hardware selection and design, software system construction, communication protocol and algorithm design ideas of the system are introduced. The experimental results show that the system can actually run on the multi-rotor UAV, and when the global navigation satellite system signal is not available, it can still provide the current available pose of the multi-rotor UAV to the flight control in real time, which provides a reference for the design of vision-aided navigation of the multi-rotor UAV.

Keywords: multi rotor UAV; GNSS denied; navigation and positioning; visual inertial odometry

0 引言

无人机的导航定位技术是无人机关键技术之一^[1]。传统上主要以卫星导航与惯性导航融合的方式为主。此种导航定位方式严重依赖全局信息, 一旦环境中 GNSS 拒止, 无人机将无法获得可用的位姿信息。视觉辅助导航可以在卫星信号不可用情况下, 继续为无人机提供可靠的导航信息^[2]。目前, 基于视觉的导航解决方案有 MSKF^[3]、VINS_Fusion^[4]等, 它们都融合了惯性传感数据。VINS_Fusion 数据融合方面采用的是基于优化的方式, 其计算精度比较高, 相应的计算时间较长, 而 MSKF 采用的是基于滤波的方式, 其计算速度快但精度相对较低。考虑到多旋翼无人机对于导航精度及实时性的要求, 即为了满足精度上的要求, 笔者采用基于非线性优化的融合框架; 在实时性方面选择算力较高的 Nvidia Jetson 平台作为系统支撑。

1 系统总体方案

视觉惯性里程计算法的运行离不开硬件系统、软件系统等的支持。硬件系统为算法提供必要的输入以及计算平台。软件系统为算法提供基本的运行环境。其中, 基于 linux 系统的运行环境可实现算法的多线程并发, 基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)可为算法与系统中其他模块建立通信保障。笔者主要通过对搭建视觉惯性里程计的硬件系统、软件系统、通信协议以及算法设计方面进行了详细的设计与实现。多旋翼无人机视觉惯性里程计系统架构如图 1 所示。

图 1 中, 飞行控制模块负责与任务计算机进行导航数据的交互。具体负责将 IMU 信息转发给任务计算机以及获取任务计算机通过视觉惯性里程计算法计算得到的位姿。

1) 任务计算机选型与载板设计。

收稿日期: 2023-12-17; 修回日期: 2024-01-09

第一作者: 廖士楠(1997—), 男, 安徽人, 硕士。

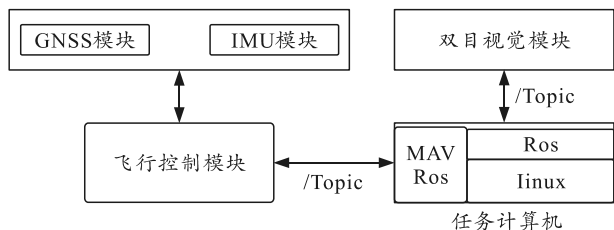


图 1 多旋翼无人机视觉惯性里程计系统架构

由于采用的是基于优化的视觉惯性里程计，因此对任务计算机的算力和实时性要求较高。此外，考虑到四旋翼飞行器对自身重力很敏感，因此任务计算机应该尽量小巧。综合上述因素，本文中选取 Nvidia jetson Xavier nx 作为核心板。该核心板的主要参数技术规格如表 1 所示。

表 1 核心板主要规格参数

项目	规格参数
处理器	6 核 NVIDIA Carmel ARM@v8.2 64 位
RAM	8 GB 128-bit LPDDR4x 51.2 GB/s
ROM	16 GB eMMC 5.1
重量/g	<60
AI 性能	14TOPS(10 w)/21TOPS(15 w)

除了核心板，还需要为其设计载板，载板主要包含电源模块，通信处理模块以及调试和存储模块等。其硬件接口主要包含飞控计算机接口、自组网接口、双目视觉接口以及 M.2 接口等。

2) 视觉传感器选型。

本文中视觉传感器采用 Intel 公司出品的 Realsense D435 双目相机。该相机属于主动近红外双目相机，并内置了专用芯片运行立体几何校正和半全局立体匹配算法直接输出深度图像，大大降低了任务计算机的运算负荷。其核心成像参数如表 2 所示。

表 2 双目相机核心成像参数

参数名称	具体描述
工作环境	室内/室外
深度技术	红外双目
测量范围/m	0.3~20, 理想 0.3~3
深度分辨率	1 280×720
深度帧率/fps	90

3) 软件系统。

本设计的任务计算机预安装 Ubuntu18.04 操作系统并在此基础上安装 ROS 环境。Ubuntu 系统为 ros 提供运行环境；为视觉惯性融合算法提供各种库的依赖、编译及运行的环境，其提供的文件系统对视觉惯性里程计系统产生的数据进行记录。ROS 提供了机器人程序开发所需要的通信机制，借助 ROS 各程序节点之间的通信可以通过话题的方式进行。

相机节点在启动后会通过一个话题发布当前采集的双目视觉数据，飞控通过 mavros 节点往另一个话题发布数据。视觉惯性里程计节点只需要订阅相应的话题，便可以获取到相应传感器的数据并用于计算。

4) 通信协议。

本文中涉及到通信实体包含飞行控制模块与任务计算机模块。两者之间的通信是基于话题的方式。笔者设计了 2 种消息，并通过不同的话题进行发布。

① 飞行控制模块到任务计算机。

GPS 在正常的情况下，飞行控制模块需要向任务计算机发送飞机当前的状态信息，定义该消息为 Flight To Visual.msg，如表 3 所示。该消息通过话题 Flight To Visual 发布。发布频率为 200 Hz。

表 3 Flight To Visual.msg 消息定义

序号	数据类型	成员变量名称	备注
1	std_msgs/Header	header	存储时间戳序号等信息
2	geometry_msgs/Quaternion	orientation	四元数形式的 3 轴姿态角
3	IMU_struct	Imu_data	IMU 数据
4	GNSS_struct	gnss_data	GNSS(经纬高)
5	bool	vis_pos_switch	true 视觉开启, false 视觉关闭

② 任务计算机到飞行控制模块。

任务计算机将视觉惯性里程计计算出来的无人机位姿发布给飞控模块。具体的发布话题为 /visual_to_flight，发布频率为 200 Hz。该话题所包含的消息类型为 visual To Flight.msg，其详细定义如表 4 所示。

表 4 visual To Flight.msg 消息定义

序号	数据类型	成员变量名称	备注
1	std_msgs/Header	header	存储时间戳序号等信息
2	geometry_msgs/Quaternion	orientation	四元数形式的 3 轴姿态角
3	GNSS_struct	gnss_data	GNSS(经纬高)
4	bool	Is Visual Vaild	视觉定位模块数据是否有效

5) 视觉惯性算法框架。

视觉惯性里程计算法采用基于改进的 VINS_Fusion 算法框架，主要的改进点在于：① 初始化模块采用半联合初始化的方式；② 考虑到飞行器飞行距离远、语义信息庞大且机载算力平台的运算能力、功耗有限，去掉回环检测与建图模块，提高计算速度。其中基于改进的初始化方法可以快速的得到视觉惯性里程计算法运行所需的初值，具

体初始化流程如下：

输入：滑动窗口内关键帧、时空对齐的 IMU 数据。

Step1：基于纯视觉信息对陀螺仪的 Bias 进行估计。

Step2：不考虑加速度计 Bias，求解方程组对尺度信息、重力向量和速度进行初步估计。

Step3：细化重力向量。

输出：相机位姿、陀螺仪 Bias、重力向量、速度。

2 实验

通过数据集仿真与真机测试的方式对本设计进行验证。

在数据集仿真方面，采用 SLAM 领域权威性较高的 EuRoC 数据集，并选用其中的 V2_03_difficult 序列作为本次测试。下面是本设计的视觉惯性里程计与原始的 VINS Fusion 算法的测试情况。

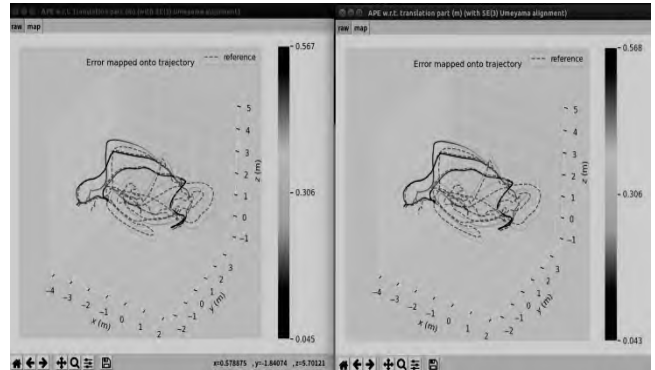


图 2 V2_03_difficult 序列上运行结果

评估 SLAM 算法精度的一大指标是定位值与真值的偏差程度。常见的有绝对轨迹误差 (absolute trajectory error, ATE)，这实际上也是每个位姿李代数的均方根误差 (root-mean-squared error, RMSE)。

常见的均方根计算公式如下：

ATE_{all} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\| \log \left(T_{gt,i}^{-1} T_{est,i} \right) \right\|_2^2}.

式中：T_{est,i} 为估计出的第 i 图像帧轨迹；T_{gt,i} 为真实的第 i 图像帧轨迹，i=1, \cdots, N。

表 5 是本文中算法与 vins_fusion 在定位结果 A 与真值偏差(ATE)的对比：

表 5 定位结果与真值偏差

数据集	RMSE(ours)	RMSE(vins_fusion)
V2_03_difficult	0.337 5	0.339 5

通过上表，可以得出本文中的算法定位结果比

vins_fusion 算法的定位精度略优。

在真机测试方面，在室外环境下，由于缺乏绝对真值，笔者将 GNSS+IMU 输出作为“真值”，将视觉惯性模块计算出来的位姿与之对比。

下面是在空旷室外下视觉导航与 RTK 实飞测试数据。其中包含了经度随时间的变化，如图 3 所示；纬度随时间的变化，如图 4 所示。

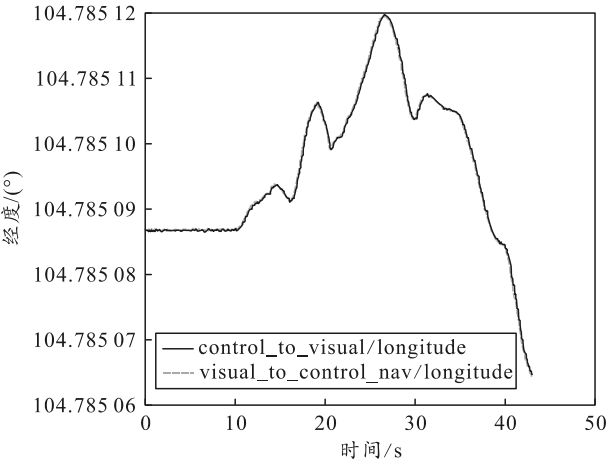


图 3 经度时间变化

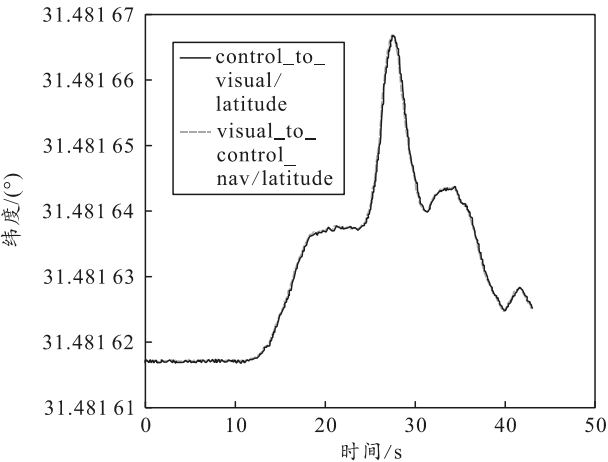


图 4 纬度时间变化

初始时刻进行初始化，将视觉坐标系与 GNSS 系对齐，之后对比两者“经度纬度”输出，其中黑实线为 RTK 值，灰色虚线为视觉导航模拟输出值，可以看到两者之间的误差精度可以达到厘米级。

3 结束语

针对基于多旋翼无人机在 GNSS 信号不可用下的导航定位问题，分析了可能的解决途径。基于改进的 VINS_Fusion 框架设计并通过对系统的硬件选型与设计、软件系统设计、通信协议设计等实现了基于多旋翼无人机视觉惯性里程计。

实验结果表明：该系统可以满足设计目标，为

无人机在面临 GNSS 信号不可用情况时的导航定位问题提供参考。

参考文献:

- [1] 刘佩林, 陈祥, 牛小明. 无人系统自主性技术研究现状与发展趋势[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 61-65.
- [2] 王世勇, 刘满, 倪峰棋, 等. 系留无人机视觉定位技术[J]. 兵工自动化, 2022, 41(11): 77-83.

(上接第 62 页)

5 结论

随着信息化联合作战力量的战略方向发展, 为实现区域防卫型向全域作战型的转变, 作为关键的作战保障力量, 在面临复杂多变的战场环境下, 对工程保障决策提出了更高的要求。笔者依据工程部队作战条令, 根据对工程保障任务理解分析, 采用基于规则的战场环境分析数据映射算法, 建立战场环境影响因素资料库和影响因素指标标准, 通过基于综合加权的战场环境综合影响系数算法完成战场环境对工程保障任务的影响分析。以道路专业为实例, 验证了所提方法的可行性与有效性, 能够为工程部队指挥员精准筹划提供经验参考, 为工程保障任务后续的高效规划和智能决策提供数据支撑。

(上接第 83 页)

- [9] YANG J, ZHANG Y, LI L W, et al. YEDDA: A Lightweight Collaborative Text Span Annotation Tool[C]// InProceedings of ACL 2018, System Demonstrations. Melbourne, Australia: Association for Computational Linguistics, 2018: 31-36.
- [10] 李春楠, 王雷, 孙媛媛, 等. sss 基于 BERT 的盗窃罪法律文书命名实体识别方法[J]. 中文信息学报, 2021, 35(8): 73-81.
- [11] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for

(上接第 88 页)

- [20] 穆秀春, 郑爽, 李娜. Multisim&Ultiboard13 原理图仿真与 PCB 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 25-114.
- [21] 吴永乐. 基于 Multisim 仿真的模拟电路教学实践[J]. 集成电路应用, 2021, 38(1): 22-23.
- [22] 张磊. 射极输出器的 Multisim 仿真分析[J]. 科技创新

- [3] MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation[C]// Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007: 3565-3572.
- [4] QIN T, PAN J, CAO S, et al. A general optimization-based framework for local odometry estimation with multiple sensors[J]. ArXiv preprint, 1901.03638, 2019.

参考文献:

- [1] 吴俊炯, 黄春蓉, 雷睿. 智能化技术在精确作战中的应用研究[J]. 战术导弹技术, 2021(6): 106.
- [2] 邓志刚. 工程兵完成多样化军事任务力量运用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 2.
- [3] 刘式宋, 邢利华. 基于精确指挥的数字化部队战斗力生成[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(10): 130.
- [4] 阮拥军, 董立宁, 刘栋. 信息化战场环境下装备精确保障探析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 54-56, 60.
- [5] 单继城, 刘蔚柯. 战场自然环境对军事行动影响[J]. 国防科技, 2017, 38(1): 108-112.
- [6] 冯柯, 郑伟, 李焕良. 基于 Agent 的工程保障分队任务规划研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 24.
- [7] 张金城. 战场环境典型数据建设问题研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2760.
- [8] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [12] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long Short-Term Memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [13] 贾猛, 王裴岩, 张桂平, 等. 面向工艺文本的命名实体识别方法研究[J]. 中文信息学报, 2022, 36(3): 54-63.
- [14] 沈同平, 俞磊, 金力, 等. 基于 BERT-BiLSTM-CRF 模型的中文实体识别研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 26-32.
- [15] 杨荣根, 王博, 龚乐君. 基于 CRF 和深度学习的病历实体识别的研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2022, 22(1): 81-85.
- [16] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [17] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [18] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [19] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [20] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [21] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [22] 王健, 王健, 王健. 基于深度学习的自然语言理解[J]. ArXiv, 2018(10): 1810.
- [23] 黄玮, 戈益坚, 董烨, 等. 双极型晶体管共基极放大电路的 Multisim 仿真与测试[J]. 电子制作, 2021(23): 88-90.
- [24] 付扬. Multisim 仿真在电工电子实验中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(4): 120-122, 126.
- [25] 付小平. 双余度力臂自动调节装置测试系统的设计与实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.