

基于三维简化惯性模型下的（RISS）地下车库导航定位算法研究

李宁波，易海博，黄睿，李丽

深圳职业技术大学，广东 深圳 518055

DOI: 10.61369/VDE.2025100013

摘要：地下停车场是一个半封闭式的导航空间，卫星导航在车库内部属于盲区范围而无法获取定位信息。但是车辆开出车库后再空旷环境下又必须依赖卫星导航。所以，地下停车场的车辆是需要同时兼顾室外与室内导航。因为室外与室内导航需要使用不同的定位方式，所以，选择一个合理的导航定位方案尤为关键。基于 GPS 与惯性系统的组合导航，可以很好地解决车库内外导航算法切换的问题。三维简化惯性模型是仅基于惯性传感器的导航定位算法，使用更少的传感器，更简化的算法，在有限时间内可以达到全模型组合导航相同的定位效果。同时他可以极大地降低成本并提高每个传感器的利用效率。

关键词：地下车库；组合导航；简化惯性模型（RISS）

Research on Navigation and Positioning Algorithm for Underground Garages Based on Three-Dimensional Simplified Inertial Model (RISS)

Li Ningbo, Yi Haibo, Huang Rui, Li Li

Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen, Guangdong 518055

Abstract : Underground parking garages are semi-enclosed navigation spaces where satellite navigation signals are unavailable, making them blind zones for positioning. However, once vehicles exit the garage into open areas, they must rely on satellite navigation. Therefore, vehicles in underground garages need navigation systems that can handle both outdoor and indoor environments. Since different positioning methods are required for outdoor and indoor navigation, choosing a reasonable navigation and positioning scheme is crucial. The integrated navigation system based on GPS and inertial systems can effectively solve the problem of switching between navigation algorithms inside and outside the garage. The 3D reduced inertial sensor system (RISS) is a navigation and positioning algorithm that relies solely on inertial sensors. It uses fewer sensors and simpler algorithms, yet can achieve the same positioning accuracy as the full-model integrated navigation within a limited time. Meanwhile, it can significantly reduce costs and improve the utilization efficiency of each sensor.

Keywords : underground garage; integrated navigation; Reduced inertial sensor system (RISS)

一、背景

简化惯性导航模型的核心部件包括三个正交加速度计和三个正交陀螺仪的惯性测量单元（IMU）^[1]。传统上，三维加速度计获得三维特定信息。采用陀螺仪检测的三维旋转角速率来获得姿态，并将加速度计测量值从车辆变换到局部水平框架。导航信息（姿态，速度和位置）由陀螺仪和加速度计的输出计算，称为完全 IMU 机械化^[2]。然而，对于具有中值精度要求的一些应用来说，具有 6 个惯性传感器的完整 IMU 是一种昂贵的且有较高冗余度的传感器组合。实际车载系统中 6 个传感器并不需要同时使用。因此，探索一些传统惯性传感器的替换方案并提供与完整 IMU 相似的导航信息且成本更低^[3]。这样会使得 MEMS 组合传感器成本更低且每个传感器利用效率更高。在本文中，探索提供完整的 3D 导航解决方案，仅使用一个陀螺仪，两个加速度计和陆地车辆的车

辆里程表正在大致靠近水平方案^[4]。此外传统的拓展卡尔曼滤波(EKF)是一种精度较高且较为稳定的组合导航算法，在计算机或者高速运算系统上执行效果较好^[5]。然而由于卡尔曼算法公式较为复杂且浮点运算量较大。因此本文探索一种较为简单的 GNSS 与简化惯性导航组合的实时算法，此改进算法可以部分替代拓展卡尔曼滤波的位置组合定位功能，在达到相似的组合效果的前提下，这可以进一步提高组合算法的运行效率节约成本。此外，在成本以及时间的制约下，本文算法仅仅是导航系统的初期算法。下一阶段，地下车库导航在不限制成本和环境的情况下还可以引入 WIFI 定位，RFID 射频定位以及激光雷达等传感器定位方法辅助 MEMS 惯性导航，可以进一步提高地下车库导航的定位精度。^[6]

本文在第二节详细地论述了地库 RISS 简化惯性导航算法的模型建立、状态更新以及模式切换，第三节用实验验证理论的可行性和对结果分析。通过比较这两种导航场景的环境特性，选择

合适的滤波器配置，并在每种情况下使用实验场数据相互比较，证明RISS简化惯性导航与全IMU惯性导航的定位精度是否有偏差。第四节对实验结果进行综合分析，既从应用角度，也从控制的角度说明该系统的可靠性和鲁棒性。

二、RISS结构原理分析

简化的惯性传感器系统（RISS）包括一个提供方位角速率变化的方位角陀螺仪，两个用于计算水平平面中的俯仰和侧倾角的加速度计，以及一个具有接近水平平面的移动速度的里程表。^[7]

系统首先通过俯仰加速度计与倾角加速度计与本地重力加速度的角度关系中获取当前车辆的俯仰角与滚转角，而后通过航向陀螺仪与起始航向推导计算获得车辆当前的航向角^[8]。当系统获得车辆当前姿态角以后，系统利用车辆上的里程计经坐标系转换可以计算出当前车辆在地理坐标系中各个方向上的速度量。最后通过速度积分再结合地球特征量可以得到车辆最终地再地球上的经纬度。3D-RISS机械化原理图如图1所示。

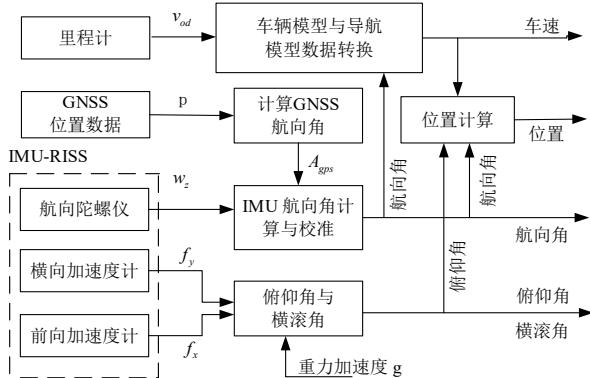


图1 3D-RISS机械化原理图

在3D-RISS机械化过程中，通过误差补偿后的前向加速度计输出信息计算车辆的俯仰角。其中 f_y 为系统俯仰加速度计输出的量， a_{od} 为车辆里程计的前后两次的速度差值也是当前的车辆瞬时加速度，g 是当前所在区域重力加速度，最终俯仰角计算公式为：

$$p = \sin^{-1} \left(\frac{f_y - a_{od}}{g} \right) \quad (1)$$

之后，通过横向加速度计信息，方位陀螺仪测量值和里程表速度信息计算移动车辆的侧倾角。 f_x 是系统侧倾角的加速度计输出值， v_{od} 是车辆里程计输出值， w_z 是系统方位陀螺仪的测量值，因此车辆系统的滚转角计算公式为：

$$r = -\sin^{-1} \left(\frac{f_x + v_{od}w_z}{g \cos p} \right) \quad (2)$$

同时，系统方位角的导数主要由陀螺仪输出量以及当地位置所决定。 w^e 是地球自转角速度， f_i 是当前所在位置的地球纬度值， v_e 是 v_{od} 经分解后的车辆东向速度值，最终方位角的导数可以通过以下方式得到：

$$\dot{A} = - \left(w_z - w^{ie} \sin \varphi - \frac{v_e \tan \varphi}{R_N + h} \right) \quad (3)$$

在姿态计算之后，系统利用航向角与车辆俯仰角分解里程计的速度 v_{od} ，可以使用以下矩阵导出局部水平框架中的3D速度：

$$v = \begin{bmatrix} v_e \\ v_n \\ v_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{od} \sin A \cos p \\ v_{od} \cos A \cos p \\ v_{od} \sin p \end{bmatrix} \quad (4)$$

最后，粗略的利用地球半径 R 与车辆所在海拔高度 h 以及当地纬度 f_i ，通过集成获得3D位置。逐步计算3D位置的产量是：

$$\dot{h} = v_u \quad (5.1)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v_n}{R + h} \quad (5.2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v_e}{(R + h) \cos \varphi} \quad (5.3)$$

根据以上方法，在手动给定系统初始经纬度位置的前提下，通过RISS简化惯性导航方案可以得到车辆的姿态速度以及经纬度位置。但是，系统若只依靠这些简单的定位方法，一段时间后简化惯性导航系统由于陀螺仪航向积分的发散性，系统航向误差将逐渐累积，定位误差将会随时间增加越来越明显。此时在室外条件下需要引入GNSS卫星导航定位系统进行系统位置的校正与更新。此时传统的方式是使用拓展卡尔曼滤波EKF，利用系统的姿态，速度和位置作为系统的状态量，用卫星导航系统的速度与位置作为系统的观测量进行系统组合导航。然而，这种较为复杂的组合导航融合方案在低成本系统中，由于系统运算能力较低，融合算法会降低系统运行效率，导致系统组合后的位置数据发送缓慢，位置更新不及时。^[9]

此时根据系统的实际需求，由于系统的姿态中除了航向角都是由加速度计获得，并不会随时间累积误差，车辆速度都是由车辆里程计提供的精确且稳定测量值。系统中存在的累积误差发生于航向角的计算，继而导致速度的在地理坐标下的分解出现误差，最终体现到系统经纬度位置的计算上。那么想要解决定位的误差的关键，只需要在一定时间内，用GNSS卫星定位系统校正系统航向角的误差，系统随时间的累积就会消失。然而卫星定位系统并不直接提供定位航向信息。利用GPS定位点方位角(Azimuth Angle of GPS point,AZP)用来表示车辆行驶的方向，该角度信息来自GPS原始定位数据，并定义为与地图北向方向沿顺时针所形成的角度计算得到 A_{gp} ，经过多次测试当使用低成本GPS模块时，系统只有一根GPS天线，使用航迹获得车辆航向角是较为简便的处理方法，但缺点是车辆一启动的时航向是不准确的。需要行驶后才能校正。将GPS航向带入系统航向角计算如公式：

$$A_t = A_{t-1} - \left(w_z - w^{ie} \sin \varphi - \frac{v_e \tan \varphi}{R_N + h} \right)$$

$$A_{gps} = \begin{cases} \theta_{t+1} - \theta_t & 0^\circ \leq t < 360^\circ \\ \theta_{t+1} - \theta_t + 360 & t < 0^\circ \\ \theta_{t+1} - \theta_t - 360 & t \geq 360^\circ \end{cases}$$

$$A = \gamma A_{gps} + (1-\gamma) A_t$$

当系统引入 GPS 卫星导航航向校正，准确的航向可以为车辆速度提供准确的分解方向得到正确的 V_n V_e V_u ，将三轴速度分解向量带入位置计算，最终消除系统位置随时间累积的误差量。

三、总结

根据 RISS 结构原理推导得出，该系统只能利用两个加速度计的测量值，一个陀螺仪和一个里程表来实现导航信息输出。尽管

系统可以在十几秒内的系统精度对于陆地车辆导航是可接受的，但是 RISS 航位推算算法超过 60s 后由于陀螺仪积累的漂移仍会在航迹定位上表现出巨大的误差。该方法的最大优点是系统的低成本与简化的算法，适合小型化的车载系统使用。速度精度主要取决于里程表输出，由于车轮的部分情况下的滑动摩擦，里程表输出通常是不准确的。此外，所使用的低精度惯性传感器的漂移是主要的误差源，一定程度上降低了整个系统的精度^[10]。

最后通过分析比较的数据综合对比，RISS 算法具有对系统传感器维度与数量要求低，成本低，算法简化易实施等多种特性。但是仅仅用 MEM 系统进行 RISS 算法行位推算会使系统定位发散，此时引入 GPS 航向数据辅助校正 RISS 航向进行组合导航，可以在不使系统复杂化的同时极大地提高系统的导航精度，稳定性及鲁棒性。

参考文献

- [1] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 冷搏, 章仁燮. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127–143.
- [2] 思岚科技. RPLIDARS1 低成本 360 度激光扫描测距雷达简介与规格书 [EB/OL]. <http://www.slamtec.com/>, 2019-04/2020-09-25.
- [3] 周砚扬, 张芮闻, 何立平, 章宇兵, 陆洲, 许维翰. 面向自动驾驶的硅基激光雷达发展和关键技术研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(07): 678–684.
- [4] 罗睿, 金琦珺. 智能汽车激光雷达感知技术现状与发展分析 [J]. 科技与创新, 2020(17):
- [5] 王兴. 停车场室内定位导航设计 [J]. 城乡建设, 2022, (01): 16–18.
- [6] 王靖宇. 一种基于机器视觉低成本地下车库寻车与智能导航系统的设计 [J]. 物联网技术, 2021, 11(03): 76–77.
- [7] 黄鑫, 张继文, 于永堂, 等. 基于北斗卫星导航系统的地下车库深基坑沉降监测与分析 [J]. 测绘通报, 2023, (09): 18–24.
- [8] 王晨源, 杨惠茹. 基于 UWB 的地下车库智慧导航系统设计 [J]. 河南科技, 2022, 41(02): 6–9.
- [9] 张洁, 于跃跃, 侯文琦, 等. 基于 Wi-Fi 技术的地下车库导航系统 [J]. 电子技术与软件工程, 2019, (10): 38–39.
- [10] 李津宁, 位浩杰, 陈梦雯, 等. 基于可见光通信原理的智能车库导航系统 [J]. 电子世界, 2017, (07): 104–105.D