

车载 GNSS/INS 组合导航任意安装角 在线自动标定算法研究 *

张且且, 郭静茹, 赖际舟

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘要:车载惯导系统安装角的精确标定是确保 GNSS/INS 组合导航系统精度与鲁棒性的前提。针对车载惯导系统安装角未知情况下的标定问题,提出了一种车载 GNSS/INS 组合导航任意安装角在线自动标定方法。该方法通过对车辆静止、运动及快速直行状态的检测,自适应执行静态与动态对准,并分三阶段完成安装角标定。在车辆处于静止状态时执行静态粗对准;计算水平安装角,并通过静态滤波估计加速度计和陀螺仪零偏;在完成水平粗对准后,当检测到车辆处于运动状态时,执行动态对准;计算航向角,并通过动态滤波估计并分离航向安装角;最后,在车辆处于快速直行状态时,根据速度坐标系与载体坐标系之间的关系,完成安装角的精确在线标定。为验证方法的有效性与普适性,设计了基于战术级 IMU 与 MEMS 级 IMU 的两组车载实验,并与传统工程对照方法进行了安装角估计精度对比。实验结果显示,该方法在不同精度条件下均能快速收敛,安装角平均估计误差分别为 0.389° 和 0.287° ,安装角估计精度明显优于对照方法。此外,该方法适用于车载手机等任意安装角设备,可在 IMU 位置发生变化时重新标定,从而增强系统环境适应性与鲁棒性,为智能驾驶车辆的高精度自主定位提供关键技术支撑。

关键词:车载 GNSS/INS 组合导航;安装角估计;在线自动标定;运动状态检测;滤波估计

中图分类号: V249.3 TH822 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.35

Research on online auto-calibration algorithm of arbitrary installation angles for vehicle GNSS/INS integrated navigation

Zhang Qieqie, Guo Jingru, Lai Jizhou

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Accurate calibration of the installation angles of vehicle-borne inertial navigation systems (INS) is essential for ensuring the precision and robustness of GNSS/INS integrated navigation systems. To address the problem of unknown installation angles, this study proposes an online automatic calibration method for arbitrary installation angles in vehicle-borne GNSS/INS systems. The method adaptively executes static and dynamic alignment based on the detection of stationary, moving, and high-speed straight-driving vehicle states, completing the calibration in three stages. During the stationary phase, a coarse static alignment is performed to compute the horizontal installation angles and estimate the accelerometer and gyroscope biases through static filtering. After the horizontal alignment, dynamic alignment is conducted when vehicle motion is detected, calculating the heading angle and separating it through dynamic filtering. Finally, during high-speed straight driving, the precise online calibration of installation angles is achieved using the relationship between the velocity and body coordinate frames. To verify the effectiveness and generality of the proposed method, two sets of vehicle experiments were conducted using tactical-grade and MEMS-grade IMUs, and the installation angle estimation accuracy was compared with the conventional engineering reference method. Experimental results show that the proposed method achieves rapid convergence under different IMU accuracy conditions, with mean installation angle errors of 0.389° and 0.287° , significantly outperforming the reference methods. Moreover, the method is applicable to devices such as vehicle-mounted smartphones, enabling

recalibration when the IMU position changes, thereby enhancing system adaptability and robustness. This approach provides critical technical support for high-precision autonomous positioning in intelligent vehicles.

Keywords: vehicle-mounted GNSS/INS integrated navigation; installation angle estimation; online automatic calibration; motion state detection; filter estimation

0 引言

近年来,自动驾驶与智能网联汽车技术的快速发展推动了国家政策和产业布局的调整。《智能汽车创新发展战略》等政策文件相继出台,明确提出了构建高精度、高可靠导航定位体系的目标^[1]。在此背景下,车辆对精准定位、测姿及路径规划的需求日益增长。全球卫星导航(global navigation satellite system, GNSS)能够在全球范围内提供较高精度的绝对位置信息,但在城市峡谷、隧道等复杂环境中,信号易受遮挡和多路径干扰影响,导致定位精度下降;惯性导航系统(inertial navigation system, INS)具有高频更新和短时精度高的优势,属于自主导航系统,不受外部环境干扰,但存在长时间定位误差累积发散的弊端。将二者进行组合,可实现优势互补,是目前车载高精度定位测姿的关键技术之一^[2]。

在GNSS/INS组合导航系统中,惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)相对于车辆载体的安装角精度直接影响系统的导航结果。若安装角未能准确标定,会降低姿态解算与速度更新的精度,削弱系统整体性能;同时运动约束作为组合导航在复杂环境下的重要解决方案^[3-9],其有效性严格依赖安装角精度^[10]。针对该问题,研究人员提出了多种方法。传统方法主要依赖精密仪器或后处理策略。例如,严恭敏等^[11]提出利用经纬测角仪校准IMU与炮管之间的安装角度;徐策等^[12]利用隔离地基标定IMU与旋转机构的安装角,通过模型补偿抑制安装角带来的姿态角测量误差;Bao等^[13]通过处理车辆不同运动下的预采集数据校准安装角。然而,以上标定方法成本昂贵、操作复杂,不利于民用车辆的广泛应用。为提高实用性,研究人员进一步提出在线标定方法。例如,冯木榉等^[14]结合粒子滤波和卡尔曼滤波实现任意角度航向估计,试验表明其估计精度在5°左右,收敛时间为50 s左右,但该方法是以车辆与IMU水平方向对准为前提的。Lu等^[15]提出一种精确估计航向和航向安装角的方法,该方法将GNSS航向和非完整性约束(non holonomic constraints, NHC)作为附加观测量,以此估计俯仰、航向角的安装角,但该方法只能在车辆快速直行阶段应用。Zhao等^[16]和Mu等^[17]分别提出在静止阶段通过IMU加速度数据计算安装俯仰角与横滚角,并在运动阶段利用GNSS航迹角与IMU姿态航向角之差估算粗略安装航向角。此外,Chen等^[18]提出基于辅助航位推算的

方法,通过融合GNSS/INS信息,采用卡尔曼滤波实现安装角估计。该方法对俯仰角和航向角估计效果较好,在导航级IMU系统中可达到0.001°的精度,但在低成本IMU场景下,由于惯导自身的随机漂移以及GNSS在动态遮挡等复杂环境下观测数据质量会受到影响,其航向角估计的稳定性和可靠性将变差。Wang等^[19]利用IMU速度和里程计数据在线估计安装角和杆臂误差,其精度与后处理方法相当,但其安装角估计基于小角度假设进行。郭士萃等^[20]通过多重渐消因子和滤波残差卡方检验自适应调整滤波参数,实现INS初始对准在非理想条件下的鲁棒高精度姿态估计。杨希文等^[21]提出一种基于序列二次规划和滑动窗口投影统计的新型自适应降维容积卡尔曼滤波算法,可在高动态和复杂干扰条件下实现快速收敛的高精度安装角在线估计。Lin等^[22]提出了一种基于非线性优化的IMU安装角估计方法,通过最小化卫星固定解与INS组合结果的误差求解IMU安装角,并在1σ误差以内将三维定位精度降低了约30%。王甫红等^[23]在GNSS/微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)紧组合导航算法的基础上,利用载波相位时间差分构建观测方程,并采用卡尔曼滤波在线估计智能手机车载导航安装角。试验表明,该方法在较为严重的遮挡环境下可在80 s内实现大安装角初始化,并将安装角误差波动控制至在2°以内。

尽管现有研究在不同程度上提升了IMU安装角的估计精度,但在任意安装角估计方面仍存在一些局限性。部分方法依赖于小角度假设,对任意安装角估计的鲁棒性较差;而一些方法虽然能够处理较大的安装角,但往往依赖额外传感器,成本较高、系统集成复杂,限制了其实用性。针对上述问题,本研究提出了一种车载GNSS/INS组合导航任意安装角在线自动标定方法。该方法根据对车辆运动状态的检测结果,自适应执行静态和动态对准,逐步完成水平安装角和航向安装角的粗估计以及动态滤波收敛;最后根据车辆处于快速直行状态时速度坐标系与载体坐标系之间的关系,实现安装角的精确在线标定。

1 算法原理介绍

图1给出了车载GNSS/INS组合导航任意安装角在线自动标定算法框图。当车载导航系统上电后,开始执行在线自动标定算法,首先利用IMU输出的原始观测数

据(m 系下的三轴加速度和陀螺仪数据)进行车辆运动状态的检测。如果车辆处于静止状态,则执行 STEP1 静态对准过程:首先基于 IMU 在静态条件下三轴加速度分量与安装角之间的投影关系估计水平安装角,进而得到 m 系到 m_1 系之间的转换矩阵 $C_m^{m_1}$;同时采用静态模式下的滤波器估计加速度和陀螺仪零偏 b_a 和 b_g ,从而为后续动态对准提供条件。如果检测到车辆开始运动,同时静态对准过程执行完毕,则执行 STEP2 动态对准过程:首先基于 GNSS 输出的位置、速度信息(p_G, v_G)执行动态航

向粗对准,然后通过动态模式下的 GNSS/INS 松组合滤波器估计并加速航向角收敛;如果车辆尚未开始运动,则继续保持静态或等待动态对准条件满足。如果航向角满足收敛条件,同时检测到车辆处于快速直行阶段,则执行 STEP3 精确计算安装角:在车辆快速直行状态下根据速度坐标系与载体坐标系之间的关系,最终实现安装角精确标定,并为后续导航解算提供准确的初始姿态信息。如果条件未满足,则持续监测航向角收敛和车辆速度,等待条件达成后再进行精确标定。

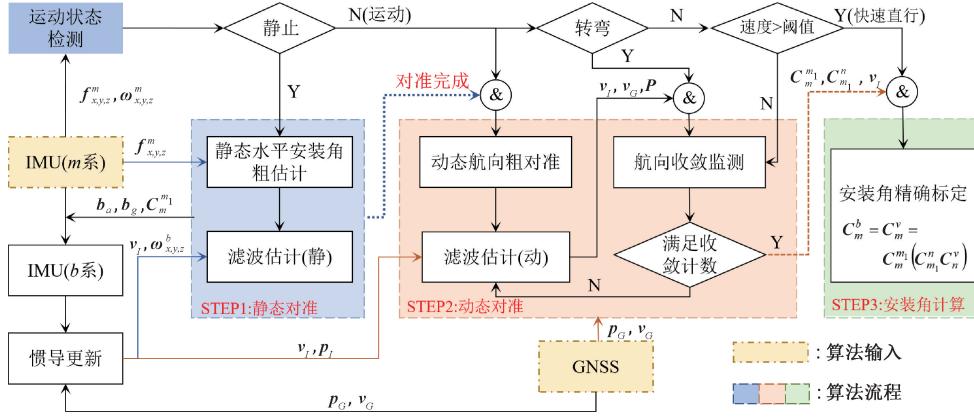


图 1 车载组合导航安装角在线自动标定算法

Fig. 1 Online auto-calibration algorithm flowchart for vehicle-mounted GNSS/INS integrated navigation

1.1 坐标系定义及转换关系

安装角在线标定方法涉及多个坐标系,包括车辆载体坐标系(b 系)、IMU 测量坐标系(m 系)、导航坐标系(n 系)、水平对准坐标系(m_1 系)以及速度坐标系(v 系),各坐标系的定义及转换关系示意如图 2 所示。

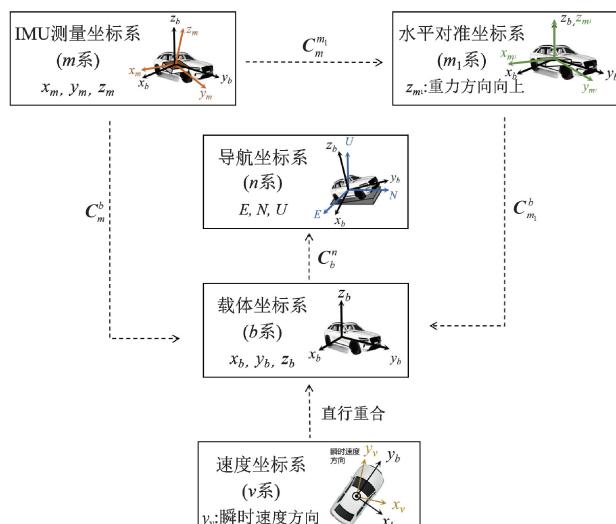


图 2 坐标系定义及转换关系

Fig. 2 Coordinate system definition and transformation

1) b 系: 坐标系固定于载体质心, x_b 轴指向载体横轴方向(右), y_b 轴指向载体纵轴方向(前), z_b 轴垂直向上(上);

2) m 系: IMU 测量坐标系固连于惯性测量单元, 其坐标轴与 IMU 的敏感轴对齐;

3) m_1 系: 以重力方向为基准对 IMU 测量坐标系进行水平对准, z 轴指向铅垂方向向上, x 与 y 轴所在的平面与地平面平行。如果车辆处于地平面, 此时 m_1 系与 b 系的 $x-y$ 平面平行, m_1 系作为 m 系与 b 系转换的中间坐标系;

4) n 系: 采用东北天坐标系, 其原点与载体初始位置重合, x_n 轴指向正东方向, y_n 轴指向正北方向, z_n 轴指向地心反方向;

5) v 系: 以载体质心速度矢量的方向为 y_v 轴, x_v 轴在 b 系 $x-y$ 平面内垂直于 y_v 指向右侧, z_v 轴满足右手定则, 指向上。当车辆载体沿直线快速行驶时, 可认为 v 系与 b 系重合。

1.2 车辆运动状态检测模型

对车辆运动状态的准确检测是实现安装角在线自动标定的前提和基础, 安装角在线标定方法基于 IMU 原始观测数据构建静态、转弯运动状态的检测模型。

1) 静态检测模型

当车辆处于静止状态时,加速度计和陀螺仪的输出均表现为稳定特征。因此,根据前期^[24]对传统模型的对比,选取基于三轴加速度和陀螺仪幅值的静态检测模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} T(f_k) < \lambda_A, & T(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \|f_i\| - g \\ T(\omega_k) < \lambda_G, & T(\omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \|\omega_i\| \end{cases} \quad (1)$$

其中, $T(f_k)$ 和 $T(\omega_k)$ 分别为当前时刻加速度计和陀螺仪模值检验统计量, $\|\cdot\|$ 表示 2 范数, f_i 和 ω_i 分别表示三轴加速度和三轴角速度数据; N 为滑动窗口的长度, 可设置为 IMU 的采样频率, 此处取 $N=100$ 。 λ_A 和 λ_C 分别为加速度和角速度模值的检验阈值。若同时满足条件则表示车辆静止, 则判定车辆处于静止状态; 否则, 判定车辆处于运动状态。

2) 转弯检测模型

车辆运动时,转弯与直行状态蕴含不同的运动特征,通常利用陀螺仪 z 轴输出判别转弯状态^[25],但在 IMU 未对准情况下,需要将陀螺仪的三轴输出考虑在内。转弯检测模型^[25]如式(2)所示。

$$T_k > \lambda_T, \quad T_k = \frac{N-1}{N} T_{k-1} + \frac{1}{N} \| \omega_k \| \quad (2)$$

其中, T_k 表示当前时刻的转弯检测量, 利用滑动窗口法统计陀螺仪模值的平均值, 以此评估转弯程度。在检测到车辆运动的前提下, 转弯检测量大于阈值 λ_T 表示当前车辆为转弯状态, 小于阈值则判定为直行状态。

1.3 静态水平安装角粗估计

水平安装角计算是根据车辆静止状态下重力加速度在水平方向投影来确定。在大多数车载应用中,通常假设车辆静止状态下处于水平地面上(即载体系 $x-y$ 平面与 n 系的水平面平行),此时 IMU 测量坐标系相对于载体系的俯仰角和横滚角如式(3)和(4)所示。

$$\vartheta_x = \arctan \frac{\bar{f}_y^m}{\sqrt{(\bar{f}_x^m)^2 + (\bar{f}_z^m)^2}}, \quad (3)$$

$$\vartheta_y = -\arctan \frac{\hat{f}_x^m}{\hat{f}_y^m}, \quad \vartheta_y \in (-\pi, \pi] \quad (4)$$

其中, \bar{f}_x^m 、 \bar{f}_y^m 、 \bar{f}_z^m 分别为 IMU 在 x 、 y 、 z 三轴经平滑处理后的加速度输出; ϑ_x 为俯仰角; ϑ_y 为横滚角。由于加速度计原始输出存在噪声和偏差, 采用 $\bar{f}_k^m = \bar{f}_{k-1}^m + \frac{1}{W}(f_k^m - f_{k-1}^m)$ 对原始加速度输出进行平滑处理。其中, f_k^m 为 k 时刻的三轴加速度计真实输出 W 为平滑因子。

般为 IMU 采样频率的 1~2 倍, 此处取 $W = 160$ 。

根据得到的水平安装角 ϑ_x 和 ϑ_y ，可计算 m 系到 m_1 系下的坐标系转换矩阵 $C_m^{m_1}$ ，从而实现静态水平姿态修正。静态对准后 IMU 输出被校正至 m_1 系下，与 b 系仅存在航向偏差角 ϑ_z 。

1.4 动态航向粗对准

在检测到车辆开始运动,且由 GNSS 得到的车辆速度大于设定的阈值时,根据当前车辆速度可计算真航向角 ψ_c ,将其作为初始时刻 IMU 航向角 ψ_t ,其计算公式如式(5)所示,示意图如图 3 所示。

$$\psi_G = -\arctan \frac{v_{GE}}{v_{GN}}, \quad \psi_G \in (-\pi, \pi] \quad (5)$$

其中, ψ_g 为当前由 GNSS 计算的车辆真航向, v_{GE} 和 v_{GN} 分别为 GNSS 解算的东向和北向速度。

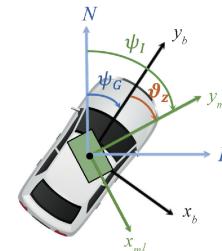


图 3 航向对准示意图

Fig. 3. Diagram of heading alignment

图 3 表示了航向粗对准的原理。从图 3 中可以看出,将 GNSS 解算的真航向角 ψ_c 作为初始时刻的 ψ_1 ,二者实际上还存在一个未知的航向安装角 ϑ ,通过后续的 GNSS/INS 松组合滤波估计,使航向角 ψ_1 收敛到一个较为准确的值,从而精准分离 IMU 测量系与载体系之间的航向安装角。

1.5 卡尔曼滤波估计

采用卡尔曼滤波实现未知参数的最优估计,离散形式的状态方程如式(6)所示 观测方程如式(7)所示。

$$X_i \equiv \Phi_{i-1} X_{i-1} + \Gamma_{i-1} W_{i-1} \quad (6)$$

$$Z_n \equiv H_n X_n + V_n \quad (7)$$

其中, X_k 为 k 时刻的状态向量, Z_k 为量测向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为 $k-1$ 到 k 时刻的系统一步转移矩阵; W_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的系统噪声, Γ_{k-1} 为系统噪声矩阵, 其具体表达式可参照文献[26]; H 为 k 时刻的量测矩阵, V 为量测噪声

安装角估计阶段取状态向量如式(8)所示

$$Y = [\delta r^n \quad \delta v^n \quad \phi^n \quad b^b \quad b^b]^T \quad (8)$$

其中, $\delta r^u = [\delta E \quad \delta N \quad \delta U]$ 分别表示东向、北向、天向误差, $\delta v^u = [\delta v_E \quad \delta v_N \quad \delta v_U]$ 分别表示东向、北向和天向速度误差, $\delta \alpha^u = [\delta \alpha_E \quad \delta \alpha_N \quad \delta \alpha_U]$ 分别表示东向、北向和天向角误差。

角和航向角误差, $\mathbf{b}_g^b = [b_{gx}^b \ b_{gy}^b \ b_{gz}^b]$ 表示陀螺仪在 x 、 y 、 z 方向的零偏, $\mathbf{b}_a^b = [b_{ax}^b \ b_{ay}^b \ b_{az}^b]$ 表示加速度计在 x 、 y 、 z 方向的零偏。

在安装角估计过程中, 分别针对静态与动态状态设计观测方程, 并依据车辆状态判别结果进行自动切换自适应调整观测信息, 以提高估计精度。

1) 静态滤波模型

水平姿态角估计完成后, 若车辆仍处于静止状态, 此时将零速度和陀螺零偏作为可靠观测量, 采用静态组合滤波估计加速度计零偏和陀螺仪零漂; 若车辆在动态对准的过程中出现静止状态, 该滤波可作为零速约束优化滤波估计。观测模型如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I^n - \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \mathbf{0} \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{X}_k + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_v \\ \boldsymbol{\varepsilon}_g \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, \mathbf{Z}_k 为观测向量; \mathbf{v}_I^n 表示 INS 系统输出的三维速度矢量; $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ 表示速度量测白噪声; $\boldsymbol{\varepsilon}_{ib}^b$ 表示陀螺仪的实时输出; $\boldsymbol{\varepsilon}_g$ 表示陀螺量测白噪声。

2) 动态滤波模型

当车辆进入运动状态时, 首先根据 1.4 节进行航向粗对准, 随后采用松组合动态滤波, 通过 GNSS 的位置和速度观测量对安装角进行收敛估计。观测模型如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_I^n - \mathbf{r}_G^n \\ \mathbf{v}_I^n - \mathbf{v}_G^n \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{X}_k + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_r \\ \boldsymbol{\varepsilon}_v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, \mathbf{r}_G^n 和 \mathbf{v}_G^n 表示 GNSS 系统输出的三维位置和速度矢量, \mathbf{r}_I^n 和 \mathbf{v}_I^n 表示 INS 系统输出的三维位置和速度矢量; $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 表示位置量测白噪声; $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ 表示速度量测白噪声。

1.6 航向收敛监测

动态航向粗对准后需通过组合滤波优化航向估计。转弯状态下航向误差可观性增强, 为准确剥离航向安装角误差, 在检测到转弯时触发航向角收敛判断。同时满足 M 次收敛条件, 则表明航向已收敛。基于误差收敛与滤波收敛的准则分别如式(11)和(12)所示。

$$\| \mathbf{r}_{GNSS} - \mathbf{r}_{GNSS/INS} \| \leq \beta T v_{GNSS} \quad (11)$$

$$\left| \frac{\sigma_{i,i}(k)}{\sigma_{i,i}(k-1)} - 1 \right| \leq \mu_i, \quad i = 9 \quad (12)$$

其中, 误差收敛准则通过 GNSS 速度和调节因子 $\beta \in (0, 1)$ 动态监测误差收敛情况, $\| \mathbf{r}_{GNSS} - \mathbf{r}_{GNSS/INS} \| = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$ 表示组合导航与 GNSS 的水平位置差值,

可以衡量水平位置精度; $v_{GNSS} = \sqrt{v_E^2 + v_N^2}$ 表示 GNSS 输出的水平速度值; T 为组合导航周期。滤波收敛准则通过误差协方差矩阵评估滤波器收敛程度, $\sigma_{i,i}(k-1)$ 、 $\sigma_{i,i}(k)$ 分别表示 $k-1$ 、 k 时刻第 i 维 P 阵对角线元素, i 取 9 表示当前元素为航向角误差方差。设定上述准则检验滤波收敛程度, 小于设定阈值 μ_i 时则认为航向角完成收敛。

1.7 安装角精确标定

实现滤波收敛和误差收敛后, 导航参数趋于稳定状态, 但航向角 ϑ_z 还未进行安装角剥离, 此时的组合导航结果中包含航向安装角 ϑ_z 。为实现航向安装角的准确剥离, 在车辆快速直行时, 瞬时速度方向即载体前进方向与载体系的 y 轴重合, 此时速度坐标系(v 系)与载体坐标系(b 系)重合, 可以根据组合导航速度输出, 再次计算当前载体的真航向角。同时, 静态对准时, 载体坐标系与水平面可能不完全重合, 在此阶段可进一步更新俯仰角。由于横滚角无法通过速度方向直接观测, 为保证姿态反映车辆真实状态, 横滚角直接采用 INS 更新的姿态结果, 从而完整估计车辆的当前姿态, 俯仰角计算如式(13)所示, 航向角计算如式(14)所示。

$$\theta = \arctan \frac{v_{IU}}{\sqrt{v_{IE}^2 + v_{IN}^2}}, \quad \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \quad (13)$$

$$\varphi = -\arctan \frac{v_{IE}}{v_{IN}}, \quad \varphi \in (-\pi, \pi] \quad (14)$$

其中, θ 、 φ 分别为车辆的俯仰角和航向角, v_{IE} 、 v_{IN} 、 v_{IU} 分别为快速直行阶段组合导航输出的东向、北向和天向速度。

利用上述姿态角可获得 n 系到 b 系的坐标变换矩阵 \mathbf{C}_n^b ; 通过静态对准, 可到 m 系到 m_1 系的坐标变换矩阵 $\mathbf{C}_m^{m_1}$; 静态对准后, 惯导输出的姿态矩阵为 $\mathbf{C}_{m_1}^n$; 根据坐标系连续变换的转换关系, 得到 m 系到 b 系的坐标变换矩阵如式(15)所示。

$$\mathbf{C}_m^b = \mathbf{C}_m^{m_1} \times \mathbf{C}_n^b \times \mathbf{C}_{m_1}^n \quad (15)$$

根据坐标变换矩阵 \mathbf{C}_m^b , 可得到最终的精确安装角如式(16)~(18)所示。

$$\vartheta_x = \arcsin(\mathbf{C}_m^b(3,2)), \quad \vartheta_x \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \quad (16)$$

$$\vartheta_y = -\arctan\left(\frac{\mathbf{C}_m^b(3,1)}{\mathbf{C}_m^b(3,3)}\right), \quad \vartheta_y \in (-\pi, \pi] \quad (17)$$

$$\vartheta_z = -\arctan\left(\frac{\mathbf{C}_m^b(2,2)}{\mathbf{C}_m^b(1,2)}\right), \quad \vartheta_z \in (-\pi, \pi] \quad (18)$$

其中, \mathbf{C}_m^b 为安装矩阵, 即 IMU 测量坐标系(m 系)与车辆载体坐标系(b 系)的变换矩阵; ϑ_x 、 ϑ_y 、 ϑ_z 分别为 x 、 y 、 z 这 3 个方向的安装角, 单位为 rad。

2 试验结果与分析

为验证所提出方法的有效性,设置了两组车载试验。试验1为校园道路场景,惯性导航设备采用战术级IMU,试验2为城市道路场景,惯性导航设备采用MEMS级IMU,通过两组实验测试所提安装角在线自动标定算法在不同车载IMU精度与不同路况下的性能表现。

2.1 试验1:基于战术级IMU的测试结果与分析

该试验基于司南M100X组合导航设备,IMU的精度等级为战术级,采样频率为100 Hz,其性能参数如表1所示。

表1 M100X导航设备IMU性能参数

Table 1 IMU performance parameters of M100X

加速度计		陀螺仪	
量程	零偏稳定性	量程	零偏稳定性
$\pm 8 \text{ g}$	0.13 mg	$\pm 500^\circ/\text{s}$	$X \text{ 轴 } 2.2^\circ/\text{h}$ $Y \text{ 轴 } 2.7^\circ/\text{h}$ $Z \text{ 轴 } 1.6^\circ/\text{h}$

由小汽车搭载M100X导航设备在南京航空航天大学校园内进行数据采集,全程约24 min,试验场景包含静止、低速直线与路口转弯等典型驾驶工况,车辆平均速度约为5 m/s。车辆运行轨迹、速度、IMU原始数据和卫星数如图4~7所示。

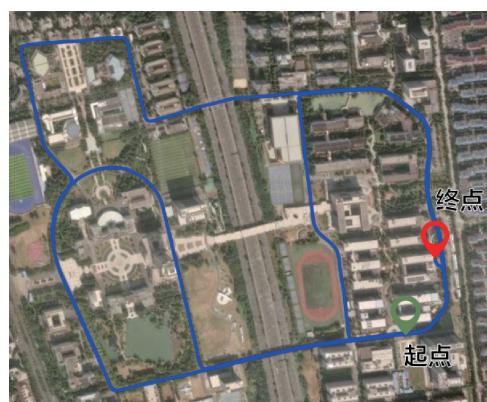


图4 车辆运行轨迹

Fig. 4 Trajectory of the vehicle

首先利用所提出的方法进行安装角估计,完成估计后系统切换至紧组合模式进行导航。在线安装角估计阶段的实时安装角、姿态角输出如图8和9所示。图8和9中以虚线划分了不同阶段,其中STEP1~STEP3分别对应图1算法框图中各阶段。

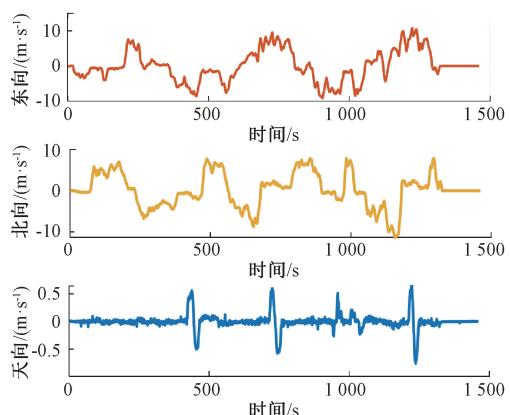


图5 车辆运行速度

Fig. 5 Vehicle velocity

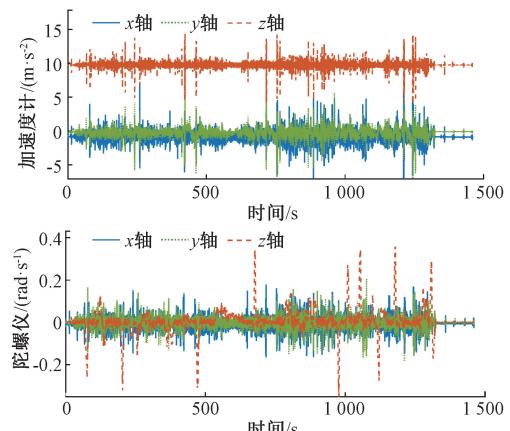


图6 IMU原始数据输出

Fig. 6 Raw IMU outputs

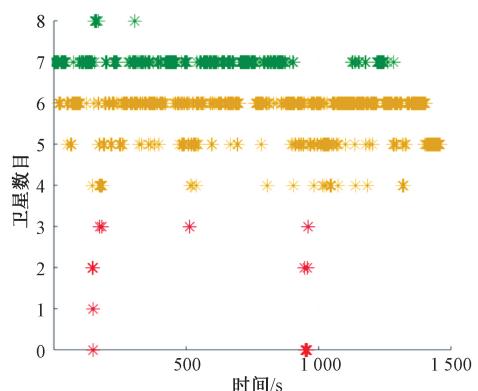


图7 各历元时刻的卫星数目

Fig. 7 Number of satellites at each epoch

由图8和9可知,该测试轨迹的安装角估计过程耗时98 s,其总时长与车辆的静止、转弯、直行阶段时长有关。为检测安装角估计的精度,采用IE(inertial explorer)软件解算的参考姿态角作为基准。IE软件是加拿大

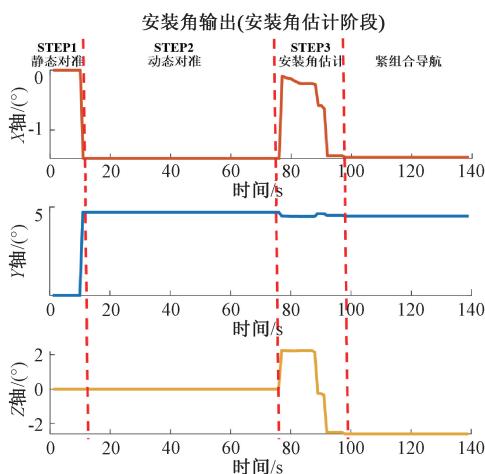


图 8 试验 1 安装角输出结果

Fig. 8 Installation angle results of experiment 1

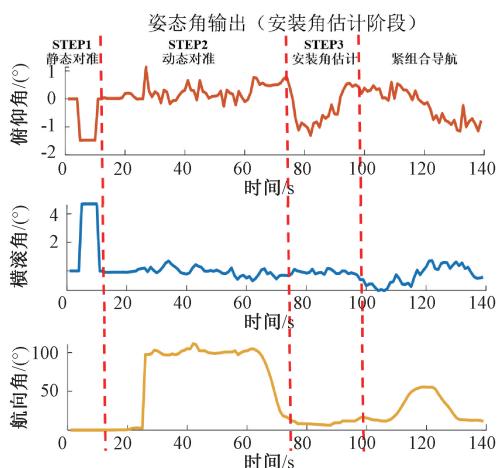


图 9 试验 1 姿态角输出结果

Fig. 9 Attitude angle results of experiment 1

NovAtel 公司开发的专业 GNSS/INS 后处理工具,能够利用多频 GNSS 观测值与高精度差分后处理策略,在优良观测条件下,其姿态解算精度可优于 0.01° (滚转、俯仰)和 0.03° (航向)。安装角估计结果如表 2 所示。此外,采用引言中 Zhao 等^[16]介绍的初始对准方法作为传统方法对照组(该方法采用静态对准结合 GNSS 辅助航向对准,目前在工程上应用较为广泛)。

表 2 试验 1 安装角估计结果

Table 2 Installation angle results of experiment 1 (°)

各轴安装角	X 轴 (俯仰角)	Y 轴 (横滚角)	Z 轴 (航向角)
IE 参考	-1.185	4.429	-1.777
传统方法	-1.475	4.702	2.249
在线标定算法	-1.457	4.491	-2.609

从表 2 中可以看出,安装角在线标定算法在三轴方向上的估计的安装角分别为 4.491° (横滚角)、 -1.457° (俯仰角)和 -2.609° (航向角),与 IE 解算的参考安装角相比,其误差分别为 0.062° 、 0.272° 和 0.832° ,相比传统方法的 0.273° 、 0.290° 和 4.026° ,在横滚角与航向角方向表现出明显的精度优势,整体估计误差降低了约 74.6%。

为了进一步验证算法的有效性,采用文献[27]中提及的验证方法(若安装角估计正确,将导航系速度投影到车辆载体系,其侧向速度分量和垂向速度分量应接近于 0)进一步分析。基于该理论,将安装角校准后的东北天速度转换至车辆坐标系,由图 10 所示。安装角估计完成后,车辆的速度集中于前向,除车辆过减速带、上下坡发生颠簸以外,垂向速度基本在 0.2 m/s 内波动,侧向速度在 0.4 m/s 内波动,进一步验证了本算法的有效性。

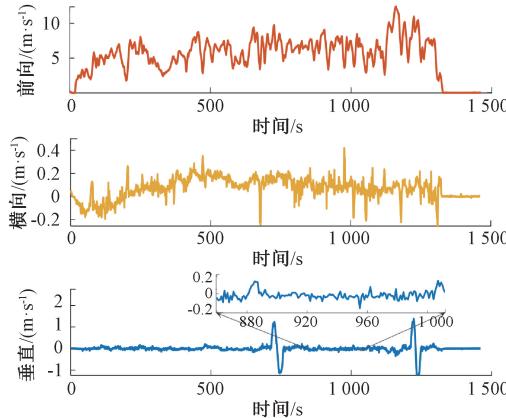


图 10 试验 1 中载体系下的速度输出

Fig. 10 Velocity output in the body frame in experiment 1

2.2 试验 2: 基于 MEMS 级 IMU 的测试结果与分析

为进一步验证算法在低精度 MEMS IMU 与复杂环境下的适应性,设计了试验 2。该试验在城市环境下采集,总时长约 25 min。试验平台采用多摩川公司低成本 IMU 设备 TAG-310N1000,其采样频率为 100 Hz,性能参数如表 3 所示。

表 3 TAG-310N1000 导航设备 IMU 性能参数

Table 3 IMU performance parameters of TAG-310N1000

量程	加速度计		陀螺仪	
	±6 g	10 mg	±200°/s	0.5°/s

试验场景包括静止状态,绕圈转弯和低速与高速直线运动,车辆平均速度为 10 m/s 。车辆运行轨迹、速度、IMU 原始数据和卫星数如图 11~14 所示。

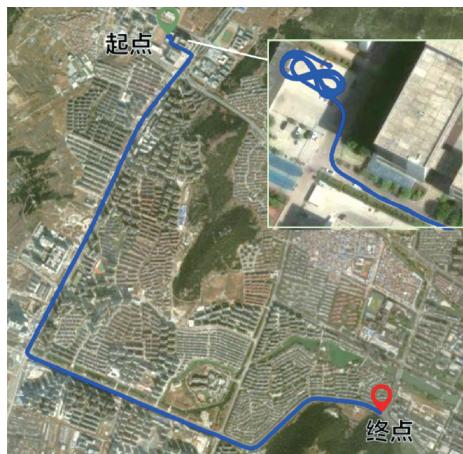


图 11 车辆运行轨迹

Fig. 11 Trajectory of the vehicle

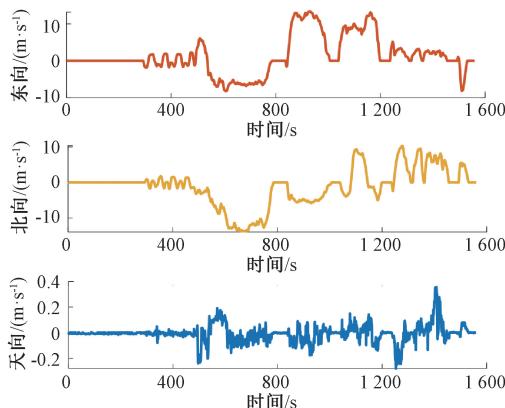


图 12 车辆运行速度

Fig. 12 Vehicle velocity

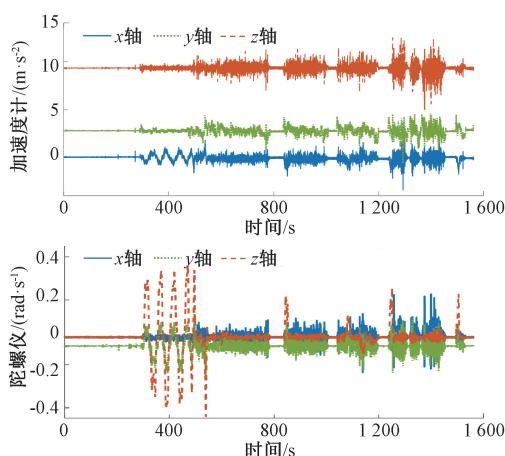


图 13 IMU 原始数据输出

Fig. 13 Raw IMU outputs

试验 2 安装角估计过程同样遵循所提算法完成, 实时输出如图 15 和 16 所示。以 IE 软件解算的参考

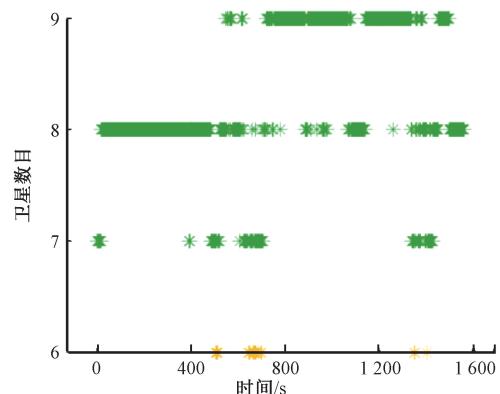


图 14 各历元时刻的卫星数目

Fig. 14 Number of satellites at each epoch

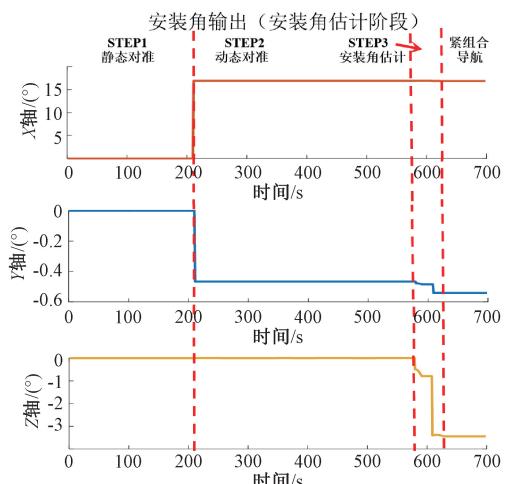


图 15 试验 2 安装角输出结果

Fig. 15 Installation angle results of experiment 2

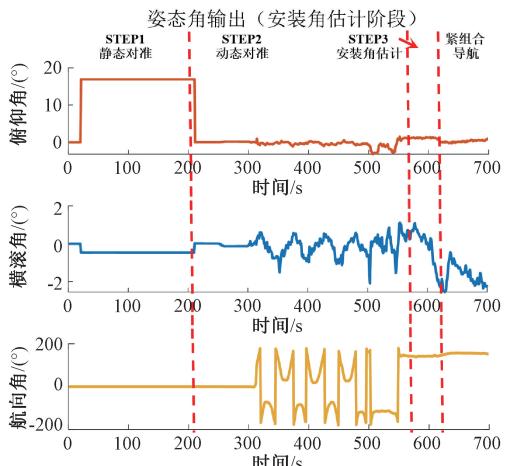


图 16 试验 2 姿态角输出结果

Fig. 16 Attitude angle results of experiment 2

姿态角作为基准, 安装角估计结果及误差对比如表 4 所示。

表 4 试验 2 安装角估计结果

Table 4 Installation angle results of experiment 2

(°)

各轴安装角	X 轴 (俯仰角)	Y 轴 (横滚角)	Z 轴 (航向角)
IE 参考	16.570	-0.649	-3.878
传统方法	16.915	-0.466	-0.786
在线标定算法	16.889	-0.541	-3.444

图 15~16 和表 2 显示, 试验 2 的安装角估计过程耗时 611 s, 其耗时较长主要受低精度 MEMS IMU 噪声以及轨迹中复杂运动持续时间较长的影响。安装角结果以 IE 软件解算的参考安装角为基准, 三轴安装误差分别为 0.108° (横滚角)、 0.319° (俯仰角) 和 0.434° (航向角), 相比传统方法的 0.183° 、 0.345° 和 3.092° , 在航向角方向表现出更明显的精度优势, 整体估计误差降低了 76.2%, 表明在线标定方法在低成本 MEMS IMU 条件下仍具备较好的估计精度与适应性。

图 17 为将安装角校准后的东北天速度转换至车辆坐标系后的载体速度输出, 车辆速度仍主要集中于前向分量, 垂向速度波动从 3 m/s 下降至 0.4 m/s 。但由于试验 2 的车辆速度较高且安装角估计精度略低, 侧向分量波动略高于试验 1。总体来看, 投影速度仍保持在合理范围内, 进一步验证了所提算法在低精度 IMU 条件下的有效性。

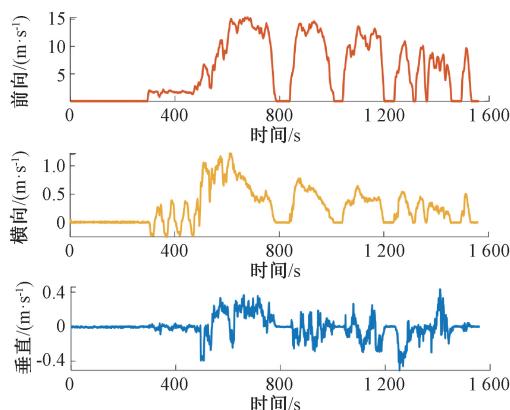


图 17 试验 2 中载体体系下的速度输出

Fig. 17 Velocity output in the body frame in experiment 2

3 结 论

针对车载 GNSS/INS 组合导航系统中惯导安装角标定依赖人工操作或特定运动约束的局限性, 提出了一种基于车辆运动状态自适应的在线自动标定方法, 实现了

任意安装角条件下的高精度自主标定。通过融合静态与动态对准策略, 分三阶段完成安装角标定。该方法适用于车载手机等任意安装角设备, 在 IMU 位置发生变化时可重新标定, 从而增强了组合导航系统的环境适应性与鲁棒性, 为智能驾驶车辆的高精度自主定位提供了关键技术支撑。未来研究可进一步探索多传感器融合标定与动态干扰补偿机制, 以提升极端场景下的标定稳定性。

参考文献

- [1] 朱俐娜. 政策引领智能网联新能源汽车产业精准发力 [N]. 中国城市报, 2025-03-24(A04). ZHU L N. Policy leads intelligent networked new energy vehicle industry to make precise efforts [N]. China City Newspaper, 2025-03-24(A04).
- [2] 陈熙源, 崔天昊, 钟雨露. 基于自适应 MCMC 的鲁棒因子图优化组合导航算法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 81-91. CHEN X Y, CUI T H, ZHONG Y L. Robust factor graph optimization integrated navigation algorithm based on adaptive MCMC [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 81-91.
- [3] 孟晓林, 潘海波, 严平海, 等. GNSS/INS 集成导航补偿方法 [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 3369131.
- [4] 陈书江, 新明哲, 杨帆, 等. GNSS/INS 集成导航系统基于 AT-LSTM 的 GNSS 故障补偿方法 [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(12): 20188-20199.
- [5] 赵海林, 刘福朝, 刘宁, 等. 基于自适应因子图的车载 GNSS/INS 组合导航方法 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 56-61. ZHAO H L, LIU F CH, LIU N, et al. Integrated navigation method for vehicle GNSS/INS based on adaptive factor graph [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 56-61.
- [6] 王亚林, 王启雄, 张海, 等. 低成本 GNSS/INS 集成方法 [J]. 测量, 2025, 240: 115518.
- [7] 徐勇, 王坤, 江成海, 等. 基于 BP 神经网络的 GNSS/INS 集成导航方法 [J]. 遥感, 2023, 34(10): 1-10.

- 15(1): 154.
- [8] CHEN H ZH, SUN R, CHENG Q, et al. GNSS/IMU/LO integration with a new LO error model and lateral constraint for navigation in urban areas [J]. *Satellite Navigation*, 2024, 5(1): 30-42.
- [9] 张强, 吴志强, 云启凡. 基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的姿态测量方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 230-239.
- ZHANG Q, WU ZH Q, YUN Q F. Research on attitude measurement method based on MIMU/magnetic sensor/dual-antenna RTK [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(5): 230-239.
- [10] SYED Z F, AGGARWAL P, NIU X J, et al. Civilian vehicle navigation: Required alignment of the inertial sensors for acceptable navigation accuracies [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3402-3412.
- [11] 严恭敏, 严卫生, 徐德民, 等. 捷联惯组与炮管之间安装误差角的标定方法[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(7): 53-56.
- YAN G M, YAN W SH, XU D M, et al. Misalignment angle calibration between SIMU and gun barrel SIMU[J]. *Fire Control & Command Control*, 2009, 34(7): 53-56.
- [12] 徐策, 尚克军, 刘峰, 等. 旋转IMU导航系统中安装误差影响分析及标定方法[C]. 中国惯性技术学会. 2010年惯性技术发展动态发展方向研讨会文集. 北京自动化控制设备研究所, 2010: 96-102.
- XU C, SHANG K J, LIU F, et al. Analysis and calibration for installation error in IMU rotating navigation system[C]. Chinese Society of Inertial Technology. 2010 Symposium on Development Trends and Dynamics of Inertial Technology. Beijing Institute of Automation Control Equipment, 2010: 96-102.
- [13] BAO Z W, LU G Q, WANG Y P, et al. A calibration method for misalignment angle of vehicle-mounted IMU[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 1853-1860.
- [14] 冯木桦, 高迪, 何文涛. 面向低成本车载IMU的安装姿态估计[J]. *测绘通报*, 2020(6): 67-70.
- FENG M J, GAO D, HE W T. A mounting-attitude estimation algorithm for low-cost vehicle IMU[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(6): 67-70.
- [15] LU Y SH, XIONG L, XIA X, et al. Vehicle heading angle and IMU heading mounting angle improvement leveraging GNSS course angle[J]. *Journal of Automobile Engineering: Part D*, 2023, 237(9): 2249-2261.
- [16] ZHAO H S, XING J H, QIU M B, et al. Estimate of initial installation angle of INS in vehicle MEMS-INS/GNSS integrated navigation system[C]. *China Satellite Navigation Conference*, 2021: 606-615.
- [17] MU M X, ZHAO L. A GNSS/INS integrated system for an arbitrarily mounted land vehicle navigation device[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 112.
- [18] CHEN Q J, ZHANG Q, NIU X J. Estimate the pitch and heading mounting angles of the IMU for land vehicular GNSS/INS integrated system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(10): 6503-6515.
- [19] WANG Q H, YAN P H, JIANG J G, et al. Online estimation of the mounting angle and the lever arm for a low-cost embedded integrated navigation module [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(16): 3064.
- [20] 郭士革, 王春雨, 常丽敏, 等. 鲁棒渐消CKF及其在SINS初始对准中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4): 98-101.
- GUO SH L, WANG CH Y, CHANG L M, et al. Robust fading cubature Kalman filter and its application in initial alignment of SINS [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(4): 98-101.
- [21] 杨希文, 常兴国, 吴峻. SRD5-CKF算法在制导炮弹空中对准中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(9): 203-212.
- YANG X W, CHANG X G, WU J. Application of SRD5-CKF algorithm in in-flight alignment of guidance projectile [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(9): 203-212.
- [22] LIN F F, WANG SH L, CHEN Y P, et al. Vehicle integrated navigation IMU mounting angles estimation method based on nonlinear optimization [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 35(3): 036304.
- [23] 王甫红, 程雨欣, 赵广越, 等. 智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 1-12[2025-04-28].
- WANG F H, CHENG Y X, ZHAO G Y, et al. Estimate the mounting angles of the IMU for the smartphone-based

- vehicular GNSS/MEMS IMU integrated system [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-12 [2025-04-28].
- [24] 张且且, 郭静茹, 赖际舟. 一种改进的车载组合导航零速检测及运动约束方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(10): 1001-1009, 1017.
ZHANG Q Q, GUO J R, LAI J ZH. An improved zero-velocity detection and motion constraint method for vehicle-mounted integrated navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(10): 1001-1009, 1017.
- [25] 胡昊杰, 朱锋, 张小红. 利用 MEMS-IMU 检测车辆运动状态的自适应方法 [J]. 导航定位学报, 2020, 8(5): 11-18.
HU H J, ZHU F, ZHANG X H. An adaptive method to detect vehicle motion state using MEMS-IMU [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8 (5): 11-18.
- [26] GUO J R, ZHANG Q Q, DUO J Y. GNSS/INS tightly integrated navigation and performance testing aided by augmented zero-velocity constraint [C]. International Conference on Guidance, Navigation and Control. Singapore: Springer, 2024: 117-125.
- [27] WAHLSTRÖM J, SKOG I, HÄNDEL P. IMU alignment for smartphone-based automotive navigation [C]. 2015 18th International Conference on Information Fusion, 2015: 1437-1443.

作者简介



E-mail: zhangqieqie@nuaa.edu.cn

Zhang Qiqie received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Henan Polytechnic University in 2011 and 2014, respectively, and Ph. D. degree from Beihang University in 2019. He is currently an associate researcher at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest includes multi-source information navigation.



郭静茹(通信作者), 2023 年于河海大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学控制工程研究生, 主要研究方向为车载组合导航。

E-mail: jingruguo_el@nuaa.edu.cn

Guo Jingru (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hohai University in 2023. She is currently pursuing her M. Sc. degree in Control Engineering at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interest includes vehicle-integrated navigation.