

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0035

基于航位推算的车载组合导航系统 NHC 杆臂估计算法

邓成剑, 陈起金*, 张提升, 牛小骥

(武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079)

摘 要: 车辆运动的非完整性约束 (NHC) 可用作车载组合导航系统的速度观测信息, 能够有效抑制惯性导航系统 (INS) 的误差累积。充分发挥 NHC 的约束作用需要准确估计和补偿 IMU 安装角和 NHC 杆臂。因此对 NHC 杆臂进行研究, 通过三维航位推算 (dead reckoning) 及扩展卡尔曼滤波器, 在没有里程计的情况下, 同时估计 IMU 安装角和 NHC 杆臂。实验结果表明, 本算法能够同时准确估计高精度惯导和低精度 MEMS 惯导的安装角和 NHC 杆臂, 安装角估计误差小于 0.1° , 使用估计的 NHC 杆臂投影点比 IMU 中心更符合 NHC 约束条件, 能够明显提高 NHC 约束的辅助效果, 提升车载组合导航系统的性能。

关 键 词: 车载组合导航系统; 航位推算; 非完整性约束; NHC 杆臂; IMU 安装角

中图分类号: V249.32

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)02-0668-08

传统组合导航使用全球导航卫星系统 (GNSS) 和惯性导航系统 (INS) 进行组合定位, 在开阔环境下能够提供高频率、高精度的车载位置、速度和姿态。然而, GNSS 信号容易受外界影响, 出现定位精度变差甚至 GNSS 信号丢失的情况, 从而影响组合导航的定位精度。面对复杂场景的应用, 一般会采用非完整性约束 (NHC)、里程计辅助等缓解车载组合导航系统在 GNSS 信号中断时的精度发散^[1-5]。在理想条件下, NHC 成立点只有前向速度不为零, 侧向速度和高程速度被约束为零^[3]。然而, IMU 坐标系与车体坐标系一般存在安装角, IMU 中心所在位置不一定满足 NHC 条件, 与 NHC 成立点存在 NHC 杆臂。已有研究表明^[6-8], 补偿 IMU 安装角和 NHC 杆臂能够显著地改善 NHC 辅助在组合导航中的效果。但是 IMU 的安装角和 NHC 杆臂会随着安装位置的变化而变化, 且 IMU 安装角无法直接测

量, NHC 成立点具体位置也无法提前设定。因此, 可进一步研究通过算法估计的方式解决 NHC 杆臂和 IMU 安装角无法直接测量的问题。

前人的相关研究工作中, 部分研究者仅在线估计安装角, 直接忽略了 NHC 杆臂的影响, 或者假定 NHC 成立的位置为车体后轮轮轴的中点, 或者在加入里程计传感器时, 将 NHC 成立点假定为车后轮与地面接触点, 也有研究者将 NHC 杆臂考虑到里程计杆臂中, 并对杆臂误差的影响进行了分析^[9]。

自 2009 年以来, Wu 等^[10]首先对 IMU 安装角和里程计杆臂的可观性进行了分析, 指出横滚角在安装角中不可观, 此研究基于理论分析, 且表明需要里程计数据。在 2010 年, Wu 等^[6]利用高精度惯导系统来估计 IMU 安装角和里程计杆臂, 认为 NHC (非完整约束) 成立的位置在后车轮轴中心, 并通过车载实验进行了验证。2018 年, Li 等^[11]在线

收稿日期: 2023-02-06; 录用日期: 2023-04-29; 网络出版时间: 2023-05-18 00:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230517.1509.002

基金项目: 国家自然科学基金 (41974024)

* 通信作者. E-mail: chenqijin@whu.edu.cn

引用格式: 邓成剑, 陈起金, 张提升, 等. 基于航位推算的车载组合导航系统 NHC 杆臂估计算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (2): 668-675. DENG C J, CHEN Q J, ZHANG T S, et al. NHC lever arm estimation algorithm for vehicle-integrated navigation systems based on dead reckoning [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (2): 668-675 (in Chinese).

标定里程计误差, 将 IMU 安装角和里程计杆臂均视为里程计误差的一部分, 并通过车载实验进行验证。2020 年, Zhang 等^[9]使用 MEMS 惯导研究了 NHC 杆臂测量精度对 NHC 的影响, 指出前向杆臂的影响最大, 当杆臂精度达到亚分米级时, 对位置精度的影响可以忽略, 且认为 NHC 成立点在车后轮与地面接触点。同年, Chen 等^[12]基于航位推算, 采用后处理方式精准估计 IMU 安装角, 这一方法适用于不同精度等级的惯性组合导航系统, 并通过仿真和车载实验进行了验证, 此方法不依赖里程计。2021 年, Liu 等^[13]考虑车辆转弯时的侧滑角, 导致 NHC 条件遭到破坏, 因此在估计 IMU 安装角的同时考虑了侧滑角, 且认为 NHC 成立点为车体的重心, 并通过仿真和车载实验进行了验证。Hwang 等^[14]在同年使用 MEMS 惯导在线估计安装角和侧滑角, 认为高速运动的车辆 NHC 成立条件差, 且认为 NHC 成立位置在后车轮轴中心, 并通过仿真和车载实验进行了验证。Zhang 等^[15]运用不同等级的惯导, 使用加权最小二乘估计里程计/NHC 杆臂, 且认为 NHC 成立点在车后轮与地面接触点, 但估计的里程计杆臂均比车后轮与地面接触点靠前。2022 年, Wen 等^[16]从阿克曼转向模型分析, 认为 NHC 成立点在后轮轴上, 并使用 NHC 作为观测, 估计高精度惯导的安装角和 NHC 杆臂, 也不依赖里程计数据。同年, Yan 等^[17]考虑了阿克曼转向模型, 认为 NHC 成立点在车后轮轮轴上, 使用里程计构造速度观测, 估计 MEMS 惯导的安装角和里程计杆臂。

在存在里程计传感器的条件下, 部分论文同时估计了安装角和杆臂, 但是需要真实的里程计提供速度观测, 有些甚至没有直接给出估计的结果并进行精度分析, 只是在卡尔曼滤波器的状态量中进行估计, 或者只是针对战术级以上的高精度惯导; 在没有里程计传感器的条件下, 前人研究工作中对 NHC 杆臂估计的研究较少。文献 [12] 采用航位推算的方式, 使用组合导航的位置结果作为观测, 对安装角进行精确的估计并做了详细的分析, 但未对 NHC 杆臂进行估计和分析。本文将在文献 [12] 的基础上, 通过改进算法, 使用三维 DR 航位推算并结合卡尔曼滤波器, 在不需要真实里程计的情况下, 构造虚拟的里程增量, 估计并补偿 IMU 安装角和 NHC 杆臂, 充分发挥 NHC 约束的作用, 提高车载组合导航系统的性能。

1 算法设计

IMU 安装角、NHC 杆臂和相关坐标系如图 1

所示。车体坐标系使用右下 $(x^v y^v z^v)$ 坐标系, 记为 v 系; IMU 坐标系以 IMU 几何中心为坐标系的原点, 使用前右下 $(x^b y^b z^b)$ 坐标系, 记为 b 系。

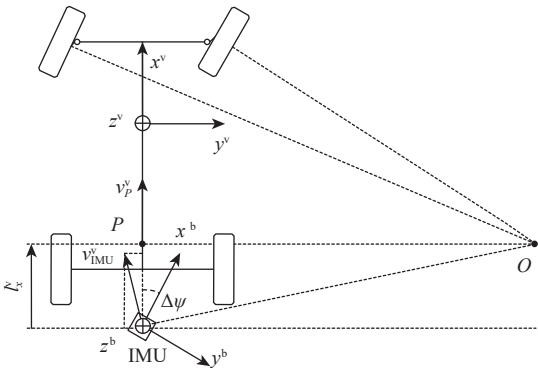


图 1 IMU 安装角和 NHC 杆臂示意图
Fig. 1 IMU stagger angle and NHC lever arm

图 1 中, 当车体坐标系与 IMU 坐标系未对齐时, 将存在安装角, $\Delta\psi$ 为航向安装角。NHC 杆臂定义为 IMU 几何中心指向 NHC 成立点 P 的向量, l_x^v 为 NHC 杆臂的 x 分量。点 O 为车体转向的圆心, 车体速度均沿同心圆的切线方向, v_{IMU}^v 为 IMU 中心在车体坐标系下的速度, 明显存在 y 轴速度分量, 即 IMU 中心不满足 NHC 约束条件。直线 OP 与车体坐标系的 x 轴垂直, 所以 P 点的速度在车体坐标系下 y 轴速度为零, 满足 NHC 约束条件。

1.1 算法框架

IMU 安装角和 NHC 杆臂估计算法框图如图 2 所示。算法估计可分为两个阶段。第一阶段的目的 在于解算一个精度较高的姿态 $\hat{C}_b^n$ (上标 n 表示导航坐标系) 和位置 $\hat{r}$, 并构建虚拟里程增量 $\Delta\hat{S}^v$, 用于第二阶段; 当补偿的安装角不正确, 且 NHC 杆臂所指向的点 NHC 不成立时, 反向平滑算法 (Rauch-Tung-Striebel, R-T-S 算法) 解算的位置观测 $\hat{r}$ 与航位推算得到的位置信息 $\hat{r}$ 存在差值, 此时扩展卡尔曼滤波器 (extended Kalman filter, EKF) 会对估计的状态量 $\delta\hat{x}$ 进行校正, 再用校正后的状态量对安装角和 NHC 杆臂进行修正, 收敛后得到 IMU 安装角中的俯仰角 $\Delta\hat{\theta}$ 、航向角 $\Delta\hat{\psi}$ 及 NHC 杆臂中的 x 分量 l_x^v 、 y 分量 l_y^v 。

1.2 卡尔曼滤波器之状态量

在 IMU 安装角和 NHC 杆臂估计中, 卡尔曼滤波器的状态向量包含三维位置误差 $\delta\mathbf{r}^n$ 、安装角误差 α 、三维姿态误差 ϕ ^[18-19]、NHC 杆臂误差 $\delta\mathbf{l}$ 、里程增量比例因子误差 δk , 其中安装角的横滚角不具有可观性和 NHC 杆臂的 z 分量可观性较弱, 未对其进行估计, 所以状态向量共 11 维, 定义如下:

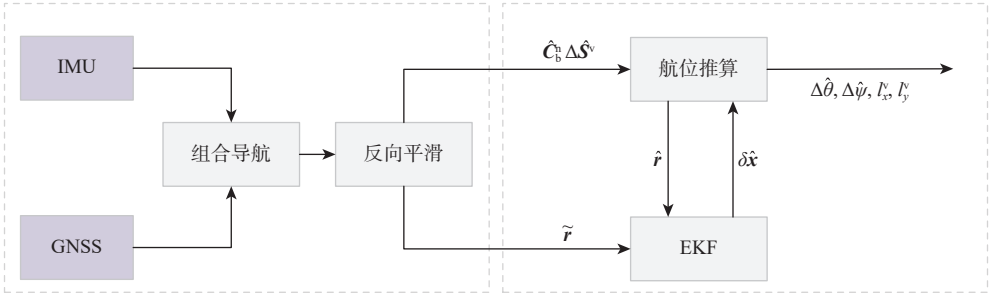


图2 IMU 安装角和 NHC 杆臂估计算法框图

Fig. 2 Block diagram of IMU stagger angle and NHC lever arm estimation algorithm

$$\delta \mathbf{x} = [(\delta \mathbf{r}^n)^T \quad \alpha^T \quad \phi^T \quad \delta \mathbf{l}^T \quad \delta k]^T \quad (1)$$

式中: T 为转置。各项误差定义如下:

$$\delta \mathbf{r}^n = \hat{\mathbf{r}}^n - \mathbf{r}^n \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_b^v = [\mathbf{I} - ([0 \quad \alpha^T]^T \times)] \mathbf{C}_b^v \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_b^n = [\mathbf{I} - (\phi \times)] \mathbf{C}_b^n \quad (4)$$

$$\delta \mathbf{l} = \hat{\mathbf{l}} - \mathbf{l} \quad (5)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{S}}^v = (1 + \delta k) \Delta \mathbf{S}^v \quad (6)$$

式中: $\delta \mathbf{r}^n$ 为导航坐标系下航位推算得到的位置减去位置真值; $\mathbf{C}_b^v$ 为安装角对应的方向余弦矩阵; $(\times)$ 为向量对应的反对称矩阵; $\hat{\cdot}$ 为含有误差的量; $\mathbf{I}$ 为相应维数的单位矩阵。

1.3 航位推算

车体坐标系下各时间历元的前进距离为 Δs , 假设 NHC 条件成立, 在车体不发生侧滑和弹跳的情况下, y 轴和 z 轴位置增量为零^[20], 若用下标 k 表示当前时刻, 则当前时刻的里程增量 ΔS_k^v 为

$$\Delta S_k^v = [\Delta s \quad 0 \quad 0]^T \quad (7)$$

已知平滑解算后的位置, 将其由大地坐标系转化到地心地固坐标系 $\mathbf{r}^e$, 将短时间内的位移计算到同一个方向上, 可视为车体坐标系下各时间历元的前进距离:

$$\Delta s = \|\mathbf{r}_k^e - \mathbf{r}_{k-1}^e\| \quad (8)$$

利用当前时刻的姿态以及安装角, 可将车体坐标系下的里程增量转换到导航坐标系下:

$$\Delta \mathbf{S}_k^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{C}_v^b \Delta \mathbf{S}_k^v = [\Delta s_{N,k} \quad \Delta s_{E,k} \quad \Delta s_{D,k}]^T \quad (9)$$

用下标 $k-1$ 表示上一时刻, 则在导航坐标系下由上一时刻推算当前时刻位置的 DR 位置更新算法为

$$\mathbf{r}_k^n = \mathbf{r}_{k-1}^n + \mathbf{C}_{b,k-1}^n \mathbf{C}_v^b \Delta \mathbf{S}_k^v \quad (10)$$

因此, 由公式(9)和式(10)可得到大地坐标系下纬度、经度、高程的更新式为

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \varphi_{k-1} + \frac{\Delta s_{N,k}}{R_M + h} \\ \lambda_k &= \lambda_{k-1} + \frac{\Delta s_{E,k}}{(R_N + h) \cos \varphi} \\ h_k &= h_{k-1} - \Delta s_{D,k} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: φ 、 λ 分别为纬度、经度, ($^\circ$); h 为高程, m; R_M 、 R_N 分别为相应位置的子午圈曲率半径、卯酉圈曲率半径。式(11)即为在补偿安装角的前提下, 使用车体坐标系下的里程增量和反向平滑后的姿态进行航位推算位置更新的方法。

1.4 卡尔曼滤波器状态误差模型

1) 位置误差模型: 式(10)为无误差的 DR 航位推算位置更新算法, 使用误差扰动得到位置误差递推公式为

$$\delta \mathbf{r}_k^n = \delta \mathbf{r}_{k-1}^n + (\mathbf{C}_{b,k-1}^n \mathbf{C}_v^b \Delta \mathbf{S}_k^v) \times \phi - \mathbf{C}_{b,k-1}^n \mathbf{C}_v^b \mathbf{M} \alpha + \mathbf{C}_{b,k-1}^n \mathbf{C}_v^b \Delta \mathbf{S}_k^v \delta k \quad (12)$$

其中, $\mathbf{M}$ 为矩阵, 计算式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\Delta s \\ \Delta s & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2) 其他误差模型: 已有研究表明^[12], 安装角误差、姿态误差和里程增量比例因子误差均可通过添加噪声, 建模为随机游走模型。由于减震系统的存在、承重位置的不同, NHC 杆臂可能会发生变化, 但一般不会有太大的幅度变化, 所以杆臂也可以建模为随机游走模型。

3) 系统状态误差模型总结: 对以上误差模型进行总结, 离散时间的状态方程可以表示为

$$\delta \mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1} \delta \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_{k-1} \omega_{k-1} \quad (14)$$

式中: $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}_{k-1}$ 为系统噪声驱动矩阵; $\omega_{k-1} \sim N(0, \mathbf{Q}_{k-1})$; $\mathbf{Q}_{k-1}$ 为系统噪声协方差矩阵^[12]。

1.5 观测方程

DR 航位推算获得的三维位置 $\mathbf{r}_k^n$ 与平滑解算的三维位置 $\hat{\mathbf{r}}_k^n$ 之差构成卡尔曼滤波器的观测方程:

$$\delta \mathbf{z}_{\text{IMU},k} = \delta \mathbf{r}_k^n - \mathbf{C}_{b,k-1}^n (\hat{\mathbf{r}}^b \times) \phi - \mathbf{C}_{b,k-1}^n [\delta \mathbf{l}^T \quad 0]^T + \mathbf{e}_k \quad (15)$$

式中: $\mathbf{e}_k$ 为观测噪声向量; $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T]$, $\mathbf{R}_k$ 为观测噪声协方差矩阵, 是一个 3×3 对角阵, 可由 GNSS/INS 组合导航的位置误差状态对应的协方差矩阵获得。

离散时间状态的位置观测方程可表示为

$$\delta \mathbf{z}_{\text{IMU},k} = \mathbf{H}_k \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{e}_k \tag{16}$$

式中: $\mathbf{H}_k$ 为观测矩阵, 计算式为

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & -\mathbf{C}_b^n(\mathbf{l}^b \times) & -\mathbf{U} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \tag{17}$$

式中: $\mathbf{U}$ 为姿态矩阵 $\mathbf{C}_b^n$ 的第 1 列和第 2 列元素组成的 3×2 维矩阵。

2 车载实验与结果分析

2.1 实验描述

通过车载实验来测试和验证本文的算法, 测试车辆和设备安装图如图 3 所示。在测试车中同时安装了一款高精度导航级惯导 (POS620) 和两款不同精度的 MEMS IMU (ADIS16465 和 HG101), 惯导的主要器件参数如表 1 所示。



图 3 车载实验的设备安装图

Fig. 3 Equipment installation of vehicle test

表 1 IMU 基本参数				
Table 1 Basic parameters of IMU				
IMU 型号	角度随机游走/ ((°)·h ^{-1/2})	速度随机游走/ ((m·s ⁻¹)·h ^{-1/2})	陀螺零偏/ ((°)·h ⁻¹)	加表零偏/ (m·s ⁻²)
PO620	0.03	0.003	0.01	0.000 15
ADIS16465	0.10	0.100	50.00	0.000 50
HG101	0.30	0.200	15.00	0.002 00

测试场地位于武汉市佛祖岭地区, 测试区域开阔无遮挡, GNSS 信号观测条件良好。测试轨迹图如图 4 所示, 包含了直线轨迹和丰富的转弯动作, 以增强杆臂的可观性。测试车上搭载了高精度测量型 GNSS 接收机和天线, 在测试区附近架设了 GNSS 基站, 与车载 GNSS 接收机和惯导同步采集原始数据。

设备与载体固连, 独立开展 3 次重复实验, 分别记作实验 A、B、C, 每次实验的车辆动态时长大于 20 min。每次实验的开始阶段, 将车辆静止 5 min 以上, 静止时段采集的数据用于高精度惯导的初始对准。

2.2 NHC 杆臂估计

实验 A 包含 3 款惯导设备, 分别对应的杆臂估



图 4 测试轨迹图

Fig. 4 Test trajectory

计曲线如图 5 所示。由图 5 可知, NHC 杆臂估计算法能在 60 s 内收敛。为了验证杆臂的可重复性, 将使用实验 A、B、C 的 3 组数据估计的 NHC 杆臂值进行纵向对比, 如表 2 所示。由表 2 可知, 对于参与测试的 3 款 IMU, 不同实验下 NHC 杆臂值估计的重复性误差不大于 2 cm, 说明 NHC 杆臂估计的一致性较好, 结果可信。

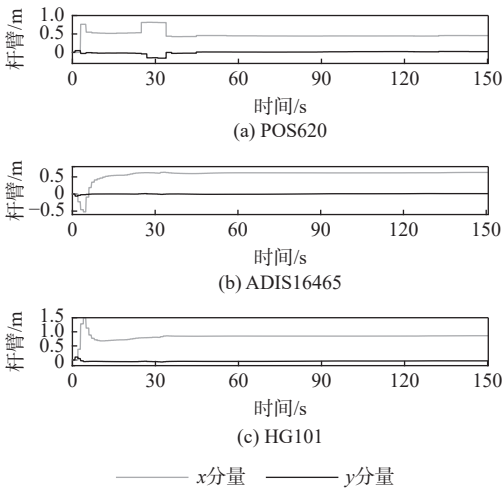


图 5 NHC 杆臂估计曲线(来自实验 A 数据)

Fig. 5 NHC lever arm estimation curve (from the data in experiment A)

3 款 IMU 的 NHC 杆臂 y 轴分量(侧向)估计值均接近 0, 这与图 1 中 NHC 杆臂定义相符, 即在直线 OP 上均满足 NHC 约束条件。在 x 轴方向(前向), 对于同一辆车, 通过 3 款 IMU 所测数据估计的 NHC 杆臂, 确定的 NHC 成立点应在图 1 中同一直线 OP 上。通过 3 款 IMU 之间的相对位置关系, 将 3 款 IMU 估计的 NHC 杆臂 x 分量的起点换算到 POS620 的中心, 如表 3 所示。

由表 3 可知, 对于 3 款 IMU 估计的 NHC 成立点位于同一直线附近, 最大差异不大于 2 cm。课题组前期研究表明^[9], 如果 NHC 杆臂误差控制在亚分米级内, 对组合导航位置精度的影响可忽略。因此, 本文方法估计的 NHC 杆臂对于普通车载组合

表 2 NHC 杆臂估计值
Table 2 Statistics of estimated values of NHC lever arm

实验组别	x轴分量			y轴分量		
	POS620	ADIS16465	HG101	POS620	ADIS16465	HG101
A	0.412	0.560	0.777	0.000	0.015	-0.016
B	0.396	0.556	0.774	-0.002	0.017	-0.018
C	0.416	0.573	0.793	0.020	0.022	-0.013

表 3 NHC 杆臂 X 轴分量估计值横向对比结果
Table 3 Lateral comparison results of estimated values of X-axis component of NHC lever arm

实验组别	x轴分量		
	POS620	ADIS16465	HG101
A	0.412	0.375	0.397
B	0.396	0.371	0.394
C	0.416	0.388	0.413

导航的应用足够精确。

2.3 安装角估计

实验 A 数据 3 款 IMU 对应的安装角估计曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 3 款 IMU 的安装角估计结果均能够在短时间内收敛, 3 款 IMU 对应的收敛值不一样, 这是因为 3 个 IMU 的实际安装角不同。

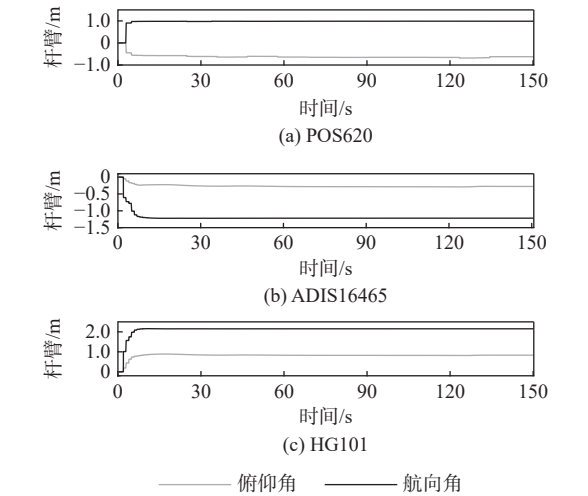


图 6 IMU 安装角估计曲线(来自实验 A 数据)
Fig. 6 Estimation curve of IMU stagger angle (from the data in experiment A)

根据图 1 中对安装角与 NHC 杆臂的定义, GNSS/INS 组合导航结果在补偿安装角并通过 NHC 杆臂投影到 NHC 成点时, y 轴(侧向)和 z 轴(垂向)速度应在零附近波动, 即如果车体坐标系下 y 轴与 z 轴速度均值均为零, 则间接表明安装角和 NHC 杆臂估计准确。以 POS620 为例, 对比了在不补偿安装角和 NHC 杆臂、补偿安装角但不补偿 NHC 杆臂、补偿安装角和 NHC 杆臂 3 种策略下的 y 轴速度和 z 轴速度曲线, 以此来说明本文估计的 IMU 安装角和

NHC 杆臂的有效性, 如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知, 在未补偿安装角和 NHC 杆臂时, 车辆 y 轴方向的速度不为零; 仅补偿安装角, 能有效消除侧向的速度偏置, 说明航向安装角估计准确; 但在车辆转弯时 y 轴仍会出现较明显的速度, 进一步补偿 NHC 杆臂, 转弯时 y 轴速度明显减小, 证明 NHC 杆臂的 x 分量估计准确。由图 8 可知, 在未补

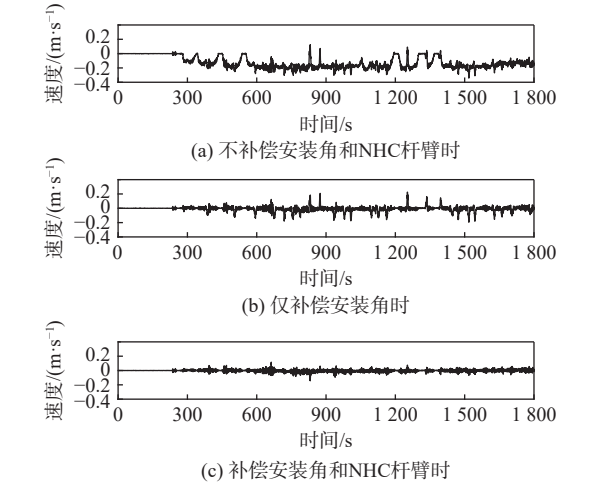


图 7 参考系统(高精度惯导 POS620)的 y 轴速度
(来自实验 A 数据)
Fig. 7 y-axis velocity of reference system (high-precision INS POS620) (from the data in experiment A)

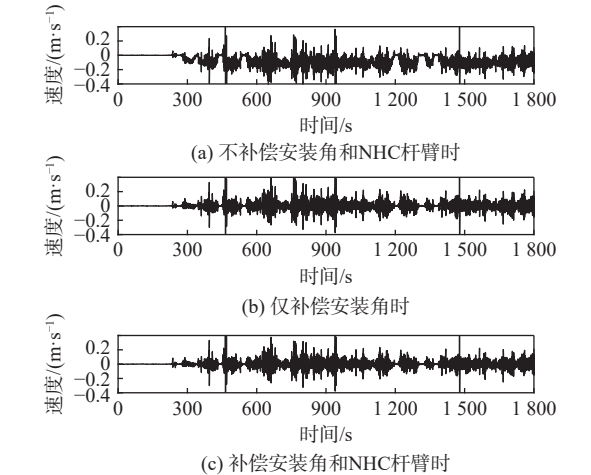


图 8 参考系统(高精度惯导 POS620)的 z 轴速度曲线
(来自实验 A 数据)
Fig. 8 z-axis velocity of reference system (high-precision INS POS620) (from the data in experiment A)

偿安装角和 NHC 杆臂时, 车辆 z 轴速度存在偏置, 补偿安装角后, z 轴速度偏置明显减小, 表明估计的俯仰安装角是准确的。总体说明了估计的安装角和 NHC 杆臂的准确性。图 8 中补偿 NHC 杆臂对 z 轴速度影响较小, 图中观察效果不明显, 是因为补偿安装角后的 z 轴速度受减震系统、加减速等影响较大, 随机噪声成为主要影响因素。

POS620 为高精度惯导, 可将其姿态补偿安装角后作为 MEMS IMU 的参考真值, 验证估计算法对 MEMS IMU 安装参数估计的正确性。ADIS16465 和 HG101 的姿态误差曲线如图 9 和图 10 所示, 并与估计的安装角收敛值进行对比。

由图 9 和图 10 可知, IMU 安装角估计的精度与姿态精度相关, ADIS16465 和 HG101 后处理的姿态精度均在 0.1° 的量级。姿态误差在安装角附近波动, 姿态误差的常偏即为安装角, 可知 ADIS16465 和 HG101 的俯仰角和航向角的安装角估计精度均高于 0.1° 。

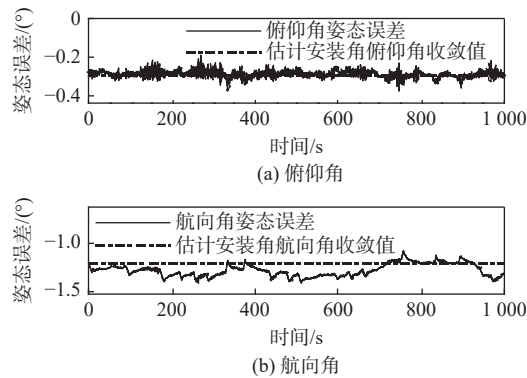


图 9 MEMS IMU(ADIS16465)姿态误差曲线
(来自实验 A 数据)
Fig. 9 Attitude error curve of MEMS IMU (ADIS16465)
(from the data in experiment A)

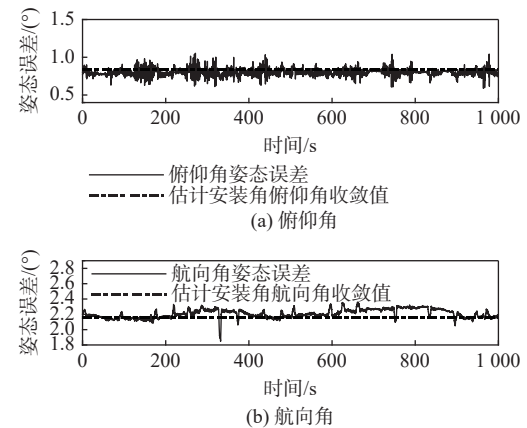


图 10 MEMS IMU(HG101)姿态误差曲线(来自实验 A 数据)
Fig. 10 Attitude error curve of MEMS IMU (HG101)
(from the data in experiment A)

2.4 估计参数对 NHC 约束的改善效果

从车载组合导航结果进一步验证估计参数的有效性, 将估计的参数用于 NHC 约束辅助组合导航, 并模拟 GNSS 1 min 中断, 统计每个中断区间位置漂移误差最大值的均方根值。

在不补偿安装角和 NHC 杆臂(方案 1)、只补偿安装角(方案 2)、同时补偿安装角和 NHC 杆臂(方案 3)3 种方案下, 3 款 IMU 进行组合导航 GNSS 中断模拟的位置漂移误差统计结果如表 4 所示, 每款器件模拟中断次数均为 20 次, 结果具有统计意义。

表 4 GNSS 中断时的位置漂移误差统计
Table 4 Position drift error statistics during GNSS outages

IMU型号	方向	位置发散误差统计值/m		
		方案1	方案2	方案3
POS620	北向	0.525	0.468	0.395
	东向	0.825	0.821	0.607
	高程	0.425	0.262	0.266
ADIS16465	北向	6.902	5.266	3.464
	东向	10.079	6.205	3.503
	高程	1.364	0.621	0.454
HG101	北向	11.922	8.145	3.991
	东向	16.476	3.857	3.095
	高程	3.730	0.614	0.387

由表 4 可知, 补偿安装角和 NHC 杆臂对高精度惯导位置误差漂移有一定的约束作用, 但不如 MEMS 惯导明显。因为 POS620 为导航级高精度惯导, 在 1 min 内纯惯导推算的导航误差也较小, 在短时间 GNSS 中断期间, NHC 约束未起到约束作用。对于 MEMS 惯导, 误差发散较快, 此时 NHC 约束能发挥较大的作用, 由表 4 结果还可知, 补偿安装角能够较大幅度提升 NHC 约束的效果, 进一步补偿 NHC 杆臂能够再一次明显提高 NHC 约束的效果, 说明补偿本文算法估计的 NHC 杆臂有助于提高在 GNSS 中断时的组合导航性能。

3 结 论

本文通过改进算法, 利用三维航位推算(DR)技术结合卡尔曼滤波器, 实现了在不依赖真实里程计的情况下, 通过构造虚拟里程增量来估计和补偿 IMU 的安装角以及 NHC 杆臂。通过理论分析和实验测试, 得出以下结论:

- 1) 本文算法能够在没有里程计等额外传感器的情况下, 同时有效估计 IMU 的安装角和 NHC 杆臂。
- 2) 本文算法适用于高精度惯导系统和低精度

MEMS 惯导系统。

3) 本文算法估计精度较高: 安装角的估计误差小于 0.1° , 通过算法估计的 NHC 杆臂能够准确投影到 NHC 的成立点。

4) 在补偿安装角和 NHC 杆臂时, 算法能够更充分地发挥 NHC 约束的作用, 显著提高车载组合导航系统在 GNSS 中断时的性能。

参考文献 (References)

[1] KIM S B, BAZIN J C, LEE H K, et al. Ground vehicle navigation in harsh urban conditions by integrating inertial navigation system, global positioning system, odometer and vision data[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(8): 814.

[2] ILYAS M, YANG Y C, QIAN Q S, et al. Low-cost IMU/odometer/GPS integrated navigation aided with two antennae heading measurement for land vehicle application[C]// 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 4521-4526.

[3] DISSANAYAKE G, SUKKARIEH S, NEBOT E, et al. The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(5): 731-747.

[4] NIU X J, LI Y, ZHANG Q, et al. Observability analysis of non-holonomic constraints for land-vehicle navigation systems[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2012, 11(1): 80-88.

[5] ZHU K, GUO X, JIANG C H, et al. MIMU/odometer fusion with state constraints for vehicle positioning during BeiDou signal outage: testing and results[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2302.

[6] WU Y X, GOODALL C, EL-SHEIMY N. Self-calibration for IMU/Odometer land navigation: simulation and test results[C]// Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. San Diego : the Institute of Navigation, 2010: 839-849.

[7] GAO K, REN S Q, CHEN X J, et al. High precision SINS/OD dead reckoning algorithm considering lever arm effect[C]// IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2017: 3731-3735.

[8] 牛小骥, 丁龙阳, 旷俭, 等. 基于 MEMS IMU 和运动约束的共享单车定位算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2021, 29(3): 300-306.

[9] NIU X J, DING L Y, KUANG J, et al. A MEMS IMU and motion constraint-based positioning algorithm for shared bicycles[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(3): 300-306 (in Chinese).

[10] ZHANG Q, HU Y Q, NIU X J. Required lever arm accuracy of non-holonomic constraint for land vehicle navigation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8305-8316.

[11] WU Y X, WU M P, HU X P, et al. Self-calibration for land navigation using inertial sensors and odometer: observability analysis[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2009: AIAA 2009-5970.

[12] LI L L, SUN H X, YANG S, et al. Online calibration and compensation of total odometer error in an integrated system[J]. *Measurement*, 2018, 123: 69-79.

[13] 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*, 2021, 22(10): 6503-6515.

[14] LIU Z B, WANG L J, WEN F, et al. IMU/vehicle calibration and integrated localization for autonomous driving[C]// 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 4013-4019.

[15] HWANG Y, JEONG Y, KWEON I S, et al. Online misalignment estimation of strapdown navigation for land vehicle under dynamic condition[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2021, 22(6): 1723-1733.

[16] ZHANG Q, HU Y Q, LI S S, et al. Mounting parameter estimation from velocity vector observations for land vehicle navigation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 4234-4244.

[17] WEN Z Y, YANG G L, CAI Q Z. An improved SINS/NHC integrated navigation algorithm based on Ackermann turning geometry[J]. *Measurement*, 2022, 192: 110859.

[18] YAN M, WANG Z C, ZHANG J. Online calibration of installation errors of SINS/OD integrated navigation system based on improved NHC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12602-12612.

[19] ROGERS R M. Applied mathematics in integrated navigation systems[M]. third ed. Reston, Virginia: AIAA, Inc. , 2007.

[20] TITTERTON D, WESTON J L, WESTON J. Strapdown inertial navigation technology[M]. 2nd ed. London: the Institution of Engineering and Technology, 2004: 17.

[21] YANG Z H, LI Z K, LIU Z, et al. Improved robust and adaptive filter based on non-holonomic constraints for RTK/INS integrated navigation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 105110.

NHC lever arm estimation algorithm for vehicle-integrated navigation systems based on dead reckoning

DENG Chengjian, CHEN Qijin^{*}, ZHANG Tisheng, NIU Xiaoji

(GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The non-holonomic constraint (NHC) of vehicle motion can be used as the velocity observation information for the vehicle-integrated navigation system, which can effectively suppress the error accumulation of the inertial navigation system (INS). To fully exert the constraint function of NHC, it is significant to accurately estimate and compensate for the inertial measurement unit (IMU) stagger angle and NHC lever arm. This paper researched the NHC lever arm and estimated the IMU stagger angle and NHC lever arm simultaneously by three-dimensional dead reckoning and Kalman filter without an odometer. The results show that the proposed algorithm can accurately estimate the stagger angle and NHC lever arm of the high-precision INS and low-precision micro-electro-mechanical system (MEMS) INS, and the stagger angle error is less than 0.1° . The estimated NHC lever arm projection point is more in line with the NHC constraint condition than the IMU center, and it can significantly improve the auxiliary effect of NHC constraint and strengthen the performance of the vehicle-integrated navigation system.

Keywords: vehicle-integrated navigation system; dead reckoning; non-holonomic constraint; NHC lever arm; IMU stagger angle

Received: 2023-02-06; Accepted: 2023-04-29; Published Online: 2023-05-18 00:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230517.1509.002

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41974024)

^{*} Corresponding author. E-mail: chenqijin@whu.edu.cn