

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.010

一种面向即插即用车载 GNSS/INS/ODO 系统的时空在线标定方法

岑益挺¹, 赖际舟¹, 吕品¹, 白师宇¹, 李金鑫²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106;
2. 中国兵器装备集团兵器装备研究所, 北京 102202)

摘要: 车载轮速里程计(ODO)辅助卫星/惯性(GNSS/INS)组合导航时需要先进行惯性传感器(IMU)与 ODO 的空间对齐, 而传统 GNSS 辅助 IMU/ODO 参数在线标定时未考虑 GNSS 时延与 ODO 时延对标定的影响, 这对于无法实现硬件时间同步而需要即插即用的车载导航应用而言, 考虑不够全面。因此, 提出了一种面向即插即用车载 GNSS/INS/ODO 系统的时空在线标定方法。该方法在传统 GNSS 辅助 IMU/ODO 参数估计模型的基础上, 增广了 GNSS 与 ODO 的时延误差, 分析了两种时延对 IMU/ODO 参数在线标定的影响, 推导并构建了完整的 GNSS 与 ODO 观测模型, 采用卡尔曼滤波器对 GNSS 时延、ODO 时延以及 IMU 与 ODO 之间的参数进行估计。实际测试结果表明, 该方法可以有效提高 IMU/ODO 在线标定的精度。

关键词: 轮速里程计; 时延; 即插即用; 在线标定; 卡尔曼滤波

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0079-08

A Space-Time Online Calibration Method for Plug-and-Play Vehicle GNSS/INS/ODO System

CEN Yi-ting¹, LAI Ji-zhou¹, LYU Pin¹, BAI Shi-yu¹, LI Jin-xin²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Weapon Equipment Research Institute, China South Industries Group Co., LTD, Beijing 102202, China)

Abstract: Odometer(ODO) assisted GNSS/INS integrated navigation systems of vehicles require calibration of the IMU-vehicle attitude/position misalignment, while traditional online calibration of the GNSS assisted IMU/ODO does not consider the negative effect of GNSS delay and ODO delay, which is not comprehensively enough for plug-and-play vehicle navigation applications that cannot achieve hardware time synchronization. Therefore, a space-time online calibration method for plug-and-play vehicle GNSS/INS/ODO system is proposed. This method augments the GNSS delay error and ODO delay error on the basis of the traditional GNSS-aided IMU/ODO parameter estimation model, analyzes the influences of the two delays on the online calibration of IMU/ODO parameters, and derives a complete GNSS and ODO observation model. The Kalman filter is used to estimate the GNSS delay, the ODO delay and the parameters between IMU and ODO. The field test results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of IMU/ODO on-

收稿日期: 2021-10-29; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61973160); 航空科学基金(2018ZC52037)

作者简介: 岑益挺(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事惯性导航及多源信息融合方面的研究。

通信作者: 赖际舟(1977-), 男, 教授, 主要从事无人系统智能感知与导航方面的研究。

line calibration.

Key words: Odometer; Delay; Plug-and-play; Online calibration; Kalman filtering

0 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)与惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)在陆地车辆组合导航中可以提供位置、速度和姿态等完备导航信息,在民用和军用领域得到了广泛的研究与应用^[1]。在组合导航系统中,GNSS通过接收卫星信号解算得到准确的三维位置和速度信息,但是由于信号容易受隧道峡谷、高楼树木等遮挡以及电磁干扰,导致GNSS无法有效地进行定位和测速;INS凭借全自主的优势,能够在短时间内提供精确的导航信息,但是其误差会随时间快速累积,需要GNSS在车辆运动过程中进行抑制。而当GNSS不可用时,需要再引入辅助信息,修正INS单独导航时的误差,如零速修正^[2]、地图匹配^[3]、激光雷达^[4]、相机^[5-6]、轮速里程计^[7-8]等。

轮速里程计(Odometer, ODO)作为另一个自主且经济、方便搭载的车载传感器,可以提供车辆的前向速度,与车辆非完整约束^[9](Non-Holonomic Constraints, NHCs)结合,可以有效提高GNSS失效时INS的导航精度,而精度提升的关键在于惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)与ODO之间参数的准确标定^[10]。通常两者之间的杆臂可以通过手动测量的方式进行补偿,但操作较为繁琐且测量精度较低,另外安装偏差角难以测量,因此研究在GNSS有效时利用其辅助IMU/ODO参数在线估计,对提升GNSS失效时INS/ODO组合导航精度具有积极意义。文献^[11]和文献^[12]分别通过卡尔曼滤波与非线性优化实现了GNSS辅助IMU/ODO的在线标定,过程中考虑了GNSS天线与IMU之间的杆臂,但是均未考虑GNSS时延与ODO时延的影响。在系统集成化较高的车载导航应用中,通常采用硬件同步的方式统一各传感器的时钟,但是对于即插即用的系统而言,每当传感器需要更新或者改变时,硬件同步会带来巨大的成本。目前,许多研究者已经对传感器时延以及软件时间同步方法开展了不少研究。文献^[13]中指出,GNSS接收机的信号处理过程给GNSS输出带来的延时达到百毫秒级别,对GNSS实时应用带来

的影响不可忽视。文献^[14]研究了GNSS/INS系统的时延估计与补偿算法。但是针对GNSS/INS/ODO系统,目前尚未有文献同时考虑GNSS与ODO的时延,且两种时延对GNSS辅助IMU/ODO参数在线标定带来的影响也尚未有文献进行研究。

针对上述问题,本文提出了一种面向即插即用车载GNSS/INS/ODO系统的时空在线标定方法。该方法分析了GNSS时延与ODO时延在车辆运动过程中对IMU/ODO在线标定的影响,在传统GNSS辅助IMU/ODO参数估计模型的基础上,推广了GNSS与ODO的时延误差,并且构建了完整的GNSS与ODO观测模型,采用卡尔曼滤波器对GNSS时延、ODO时延以及IMU与ODO之间的参数进行估计。实际测试结果表明,该方法可以有效提高IMU/ODO在线标定的精度。

1 坐标系定义

本文采用的坐标系定义如图1所示。

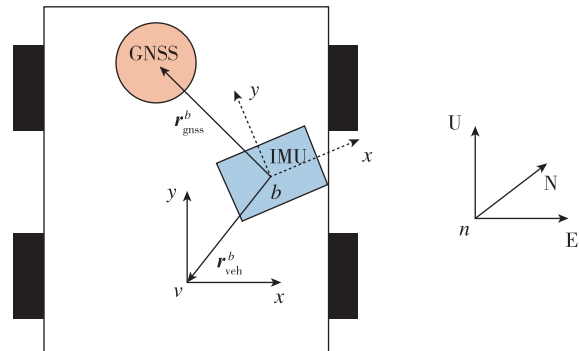


图1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate frame

1) 车体坐标系(v 系):以车体后轴中心作为坐标原点, X 轴沿车体向右, Y 轴沿车体向前, Z 轴与 X 轴、 Y 轴形成右手坐标系;

2) IMU坐标系(b 系):以IMU的中心作为坐标原点,与 v 系同为右前上坐标系;

3) 导航坐标系(n 系):为东北天(ENU)坐标系。

GNSS天线与IMU之间存在杆臂 r_{gnss}^b , IMU与ODO之间存在杆臂 r_{veh}^b 与安装偏差角 α , 其中

$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]^T$ 。车体坐标系与 IMU 坐标系之间的旋转矩阵定义如下

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_v^b &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_y & 0 & -\sin \alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_y \cos \alpha_z - \sin \alpha_y \sin \alpha_x \sin \alpha_z & \cos \alpha_y \sin \alpha_z + \sin \alpha_y \sin \alpha_x \cos \alpha_z & -\sin \alpha_y \cos \alpha_x \\ -\cos \alpha_x \sin \alpha_z & \cos \alpha_x \cos \alpha_z & \sin \alpha_x \\ \sin \alpha_y \cos \alpha_z + \cos \alpha_y \sin \alpha_x \sin \alpha_z & \sin \alpha_y \sin \alpha_z - \cos \alpha_y \sin \alpha_x \cos \alpha_z & \cos \alpha_y \cos \alpha_x \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,三角函数 \sin 和 \cos 分别用 s 和 c 表示。

由于安装偏差角 $\boldsymbol{\alpha}$ 通常为小角度,则式(1)可以近似为

$$\mathbf{C}_v^b \approx \begin{bmatrix} 1 & \alpha_z & -\alpha_y \\ -\alpha_z & 1 & \alpha_x \\ \alpha_y & -\alpha_x & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则 v 系下速度与 b 系下速度之间的关系为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{imu}^b &= \mathbf{C}_v^b \mathbf{v}_{veh}^v - \boldsymbol{\omega}_{eb}^b \mathbf{r}_{veh}^b \\ &= \begin{bmatrix} 1 & \alpha_z & -\alpha_y \\ -\alpha_z & 1 & \alpha_x \\ \alpha_y & -\alpha_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V \\ 0 \end{bmatrix} - \boldsymbol{\omega}_{eb}^b \mathbf{r}_{veh}^b \\ &= V \begin{bmatrix} \alpha_z \\ 1 \\ -\alpha_x \end{bmatrix} - \boldsymbol{\omega}_{eb}^b \mathbf{r}_{veh}^b \end{aligned} \quad (3)$$

其中, \mathbf{v}_{imu}^b 为 b 系下的速度; $\mathbf{v}_{veh}^v = [0 \quad V \quad 0]^T$ 为 v 系下的速度; V 为前向速度; $\boldsymbol{\omega}_{eb}^b$ 为车辆的角速度。

根据式(3)可知, v 系下的速度在 b 系下的分量与安装偏差角 α_y 无关,在标定时可以不作考虑。

2 改进 GNSS 辅助 IMU/ODO 参数估计滤波器设计

2.1 GNSS 时延对 IMU/ODO 标定的影响分析

对于 GNSS/INS 组合导航系统,由于 GNSS 接收机与 IMU 的采样时间不一致,且信号处理时间也不一致,导致两者存在时延且时延相对稳定。假设 GNSS 位置观测的时延为一个固定值 T_g ,则 t 时刻 GNSS 位置观测的实际值可以建模为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{p}}_G(t) &= \mathbf{p}(t - T_g) + \mathbf{C}_b^n(t - T_g) \\ &\quad T_g) \mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g) + \boldsymbol{\omega}_p \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{p}(t - T_g)$ 、 $\mathbf{C}_b^n(t - T_g)$ 、 $\mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g)$ 分别为 $t - T_g$ 时刻 INS 的位置真值、 b 系到 n 系的旋转矩阵、GNSS 天线与 IMU 之间的杆臂值; $\boldsymbol{\omega}_p$ 为位

置观测噪声。

由于 t 时刻 GNSS 的实际位置观测为 $t - T_g$ 时刻的值,因此在使用 INS 预测 GNSS 位置时,需要预测 $t - T_g$ 时刻的值

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_G(t) &= \hat{\mathbf{p}}(t - \hat{T}_g) + \hat{\mathbf{C}}_b^n(t - \hat{T}_g) \hat{\mathbf{r}}_{gnss}^b(t - \hat{T}_g) \\ &= \hat{\mathbf{p}}(t - T_g - \delta T_g) + \hat{\mathbf{C}}_b^n(t - \hat{T}_g) \hat{\mathbf{r}}_{gnss}^b(t - \hat{T}_g) \\ &\approx \hat{\mathbf{p}}(t - T_g) - \mathbf{v}^n(t - T_g) \delta T_g + \\ &\quad \hat{\mathbf{C}}_b^n(t - T_g) \hat{\mathbf{r}}_{gnss}^b(t - T_g) \\ &\approx \mathbf{p}(t - T_g) + \delta \mathbf{p}(t - T_g) - \\ &\quad \mathbf{v}^n(t - T_g) \delta T_g + \mathbf{C}_b^n(t - T_g) (\mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g) \\ &\quad + \delta \mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g)) \\ &= \mathbf{p}(t - T_g) + \delta \mathbf{p}(t - T_g) - \\ &\quad \mathbf{v}^n(t - T_g) \delta T_g + \mathbf{C}_b^n(t - T_g) \mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g) \\ &\quad + \mathbf{C}_b^n(t - T_g) \delta \mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,带“ $\hat{\cdot}$ ”符号的变量表示粗估值; δT_g 为 GNSS 与 IMU 之间残余待估计的时延值; $\delta \mathbf{r}_{gnss}^b$ 为 GNSS 天线与 IMU 之间残余待估计的杆臂; $\delta \mathbf{p}$ 为位置误差。

将 GNSS 位置的预测量与观测量作差,得到位置量测方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_p &= \hat{\mathbf{p}}_G(t) - \tilde{\mathbf{p}}_G(t) \\ &= \delta \mathbf{p}(t - T_g) - \mathbf{v}^n(t - T_g) \delta T_g + \\ &\quad \mathbf{C}_b^n(t - T_g) \delta \mathbf{r}_{gnss}^b(t - T_g) - \boldsymbol{\omega}_p \end{aligned} \quad (6)$$

根据文献[15]对 IMU/ODO 参数标定的可观测性分析可知,轮速里程计标度因数误差以及 IMU 与 ODO 之间安装偏差角的估计需要车辆的加减速机动激励,而 IMU 与 ODO 之间的杆臂估计需要至少绕 2 个轴向的角速度机动激励。而在上述机动下,GNSS 时延对 IMU/ODO 标定的影响具体如下:

1) 根据式(6)可知,GNSS 时延将与车辆速度耦合引起 GNSS 位置观测误差,从而降低滤波器对 INS 位置误差的估计精度;

2) 在 IMU/ODO 标定所需的加减速或角速度机动下,速度矢量 \mathbf{v}^n 的大小或方向发生变化,使得 GNSS 时延带来的 INS 位置误差同步改变,从而引起 INS 速度误差,影响 IMU/ODO 的参数标定。

2.2 ODO 时延对 IMU/ODO 标定的影响分析

同样假设 ODO 与 IMU 之间的时延为一个固定值 T_o ,则 t 时刻 ODO 速度观测的实际值可以建模为

$$\tilde{\mathbf{V}}(t) = (1 + \delta k) \mathbf{V}(t - \hat{T}_o) + \boldsymbol{\omega}_{odo}$$

$$\begin{aligned}
&= (1 + \delta k)V(t - T_o - \delta T_o) + \omega_{\text{odo}} \\
&= (1 + \delta k)(V(t - T_o) - a(t - \\
&\quad T_o)\delta T_o) + \omega_{\text{odo}} \\
&\approx (1 + \delta k)V(t - T_o) - a(t - \\
&\quad T_o)\delta T_o + \omega_{\text{odo}} \quad (7)
\end{aligned}$$

其中, δk 为轮速里程计的标度因数误差; δT_o 为 ODO 与 IMU 之间残余待估计的时延值; $a(t - T_o)$ 为 $t - T_o$ 时刻车辆的前向加速度; ω_{odo} 为速度观测噪声。

根据式(7)可知, ODO 时延与车辆前向加速度耦合引起轮速里程计的速度观测误差, 从而直接影响其标度因数误差的估计。

2.3 基于 GNSS 与 ODO 时延估计的 IMU/ODO 滤波模型

为降低 GNSS 与 ODO 时延对 IMU 与 ODO 之间参数估计的影响, 将 GNSS 与 ODO 时延增广到状态量中。基于 GNSS 与 ODO 时延估计的 IMU/ODO 参数估计滤波结构如图 2 所示。

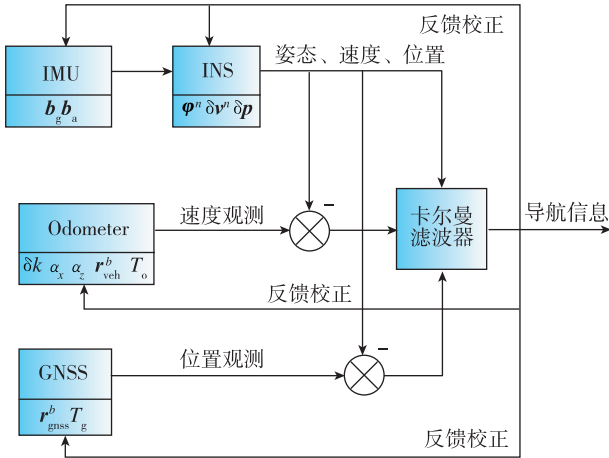


图 2 基于 GNSS 与 ODO 时延估计的 IMU/ODO 参数估计滤波结构

Fig. 2 Structure of IMU/ODO parameter estimation filter based on GNSS delay and ODO delay estimation

此时, 状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{INS}} & \mathbf{0}_{15 \times 11} \\ \mathbf{0}_{11 \times 15} & \mathbf{0}_{11 \times 11} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\text{INS}} \\ \mathbf{0}_{11 \times 6} \end{bmatrix} \mathbf{W} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{X} = [(\boldsymbol{\varphi}^n)^T, (\delta \mathbf{v}^n)^T, (\delta \mathbf{p})^T, (\mathbf{b}_g)^T, (\mathbf{b}_a)^T,$$

$$\delta k, \delta \alpha_x, \delta \alpha_z, (\delta \mathbf{r}_{\text{veh}}^b)^T, \delta T_o, (\delta \mathbf{r}_{\text{gnss}}^b)^T, \delta T_g]^T$$

其中, $\boldsymbol{\varphi}^n$ 为平台误差角; $\delta \mathbf{v}^n$ 为速度误差; $\delta \mathbf{p}$ 为位置误差; \mathbf{b}_g 和 \mathbf{b}_a 分别为陀螺和加速度计的零偏;

δk 为轮速里程计的标度因数误差; $\delta \alpha_x$ 和 $\delta \alpha_z$ 分别为绕车体侧向轴和绕车体垂向轴残余待估计的安装偏差角; $\delta \mathbf{r}_{\text{veh}}^b$ 为 IMU 与 ODO 之间残余待估计的杆臂; δT_o 为 ODO 与 IMU 之间残余待估计的时延; $\delta \mathbf{r}_{\text{gnss}}^b$ 为 GNSS 天线与 IMU 之间残余待估计的杆臂; δT_g 为 GNSS 与 IMU 之间残余待估计的时延。

式(8)中, \mathbf{F}_{INS} 和 \mathbf{G}_{INS} 为 INS 的状态转移矩阵和系统噪声矩阵, 具体形式可参见文献[16]; \mathbf{W} 为 INS 的系统噪声, 即陀螺和加速度计的白噪声。

轮速里程计与非完整约束一起构成 v 系下的三维速度观测

$$\tilde{\mathbf{v}}_{\text{veh}}^v(t) = [0 \quad (1 + \delta k)V(t - T_o) - a(t - T_o)\delta T_o \quad 0]^T \quad (9)$$

根据式(9)可以得到 n 系下的速度观测

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{v}}^n(t) &= \tilde{\mathbf{C}}_v^n(t - \hat{T}_o)(\tilde{\mathbf{C}}_v^b(t - \hat{T}_o)\tilde{\mathbf{v}}_{\text{veh}}^v(t - \hat{T}_o) \times \tilde{\mathbf{r}}_{\text{veh}}^b(t - \hat{T}_o)) \\
&\approx \mathbf{v}^n(t - T_o) + [\mathbf{v}^n(t - T_o) \times] \boldsymbol{\varphi}^n(t - T_o) + \\
&\quad \mathbf{C}_b^n(t - T_o)[(\mathbf{C}_v^b(t - T_o)\mathbf{v}_{\text{veh}}^v(t - T_o) \times) \delta \boldsymbol{\alpha}(t - T_o) + \mathbf{C}_b^n(t - T_o)\mathbf{C}_v^b(t - T_o)\mathbf{v}_{\text{veh}}^v(t - T_o)\delta k - \mathbf{C}_b^n(t - T_o)[\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{eb}}^b(t - T_o) \times] \delta \mathbf{r}_{\text{veh}}^b(t - T_o) - \mathbf{C}_b^n(t - T_o)\mathbf{C}_v^b(t - T_o)a(t - T_o)\delta T_o + \boldsymbol{\omega}_v] \quad (10)
\end{aligned}$$

而根据 INS 得到的 t 时刻的速度为

$$\hat{\mathbf{v}}^n(t) = \mathbf{v}^n(t - T_o) + \delta \mathbf{v}^n(t - T_o) \quad (11)$$

将式(10)与式(11)作差, 得到速度量测方程为

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_v &= \hat{\mathbf{v}}^n(t) - \tilde{\mathbf{v}}^n(t) \\
&= -[\mathbf{v}^n(t - T_o) \times] \boldsymbol{\varphi}^n(t - T_o) + \delta \mathbf{v}^n(t - T_o) - \\
&\quad \mathbf{C}_b^n(t - T_o)\mathbf{C}_v^b(t - T_o)\mathbf{v}_{\text{veh}}^v(t - T_o)\delta k - \\
&\quad \mathbf{C}_b^n(t - T_o)[(\mathbf{C}_v^b(t - T_o)\mathbf{v}_{\text{veh}}^v(t - T_o) \times) \cdot \\
&\quad \delta \boldsymbol{\alpha}(t - T_o) + \mathbf{C}_b^n(t - T_o)[\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{eb}}^b(t - T_o) \times] \delta \mathbf{r}_{\text{veh}}^b(t - T_o) + \mathbf{C}_b^n(t - T_o)\mathbf{C}_v^b(t - T_o)a(t - T_o)\delta T_o] \cdot \\
&= \mathbf{H}_v \mathbf{X}(t - T_o) - \boldsymbol{\omega}_v \quad (12)
\end{aligned}$$

其中, \mathbf{H}_v 为速度量测矩阵。

根据式(6)可得位置量测方程为

$$\mathbf{Z}_p = \mathbf{H}_p \mathbf{X}(t - T_g) - \boldsymbol{\omega}_p \quad (13)$$

其中, \mathbf{H}_p 为位置量测矩阵。

3 试验验证

本文开展了实际试验, 以验证所提出的算法。试验所用 IMU 的性能参数如表 1 所示, 轮速里程计的测速精度为 0.02m/s, GNSS 位置精度为 0.05m。

IMU、轮速里程计以及 GNSS 天线的安装如图 3 所示,其中 GNSS 后天线与 IMU 之间杆臂的粗略测量值为 $[0.2, -1.15, 0.5]$ m。试验轨迹如图 4 所示,试验总时长 35min,其中试验过程前 20min 用于 GNSS/INS/ODO 系统的参数在线标定,后 15min 用于验证基于 GNSS 与 ODO 时延估计的 IMU/ODO 参数在线标定方法的准确性,后 15min 行驶路程约 1380m。由于 IMU 与 ODO 之间参数的真值未知,本文采用如下两种方式间接验证:

1)方式 1:后 15min 进行 GNSS/INS 组合导航,以 IMU/ODO 在线标定的结果作为已知量,检验车辆非完整约束的满足情况。

2)方式 2:后 15min 以 IMU/ODO 在线标定的结果作为已知量,进行 INS/ODO 组合导航,以差分 GNSS 信息为位置基准,检验 INS/ODO 组合导航的定位精度。

表 1 IMU 性能参数

Tab. 1 IMU sensors specifications

性能参数	陀螺	加速度计
零偏稳定性	$18(^{\circ})/h$	$40\mu g$
随机游走	$0.5(^{\circ})/\sqrt{h}$	$1.2\mu g \cdot \sqrt{h}$



图 3 车辆试验平台

Fig. 3 Vehicle test platform

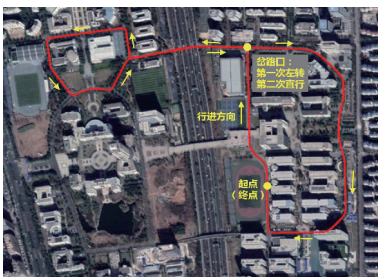
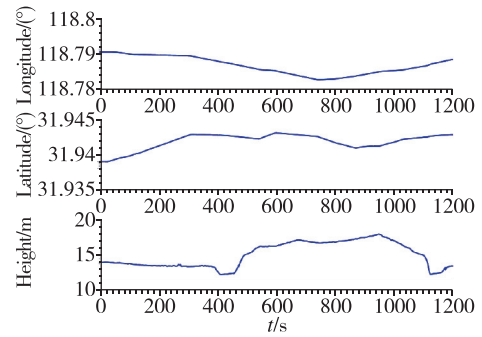


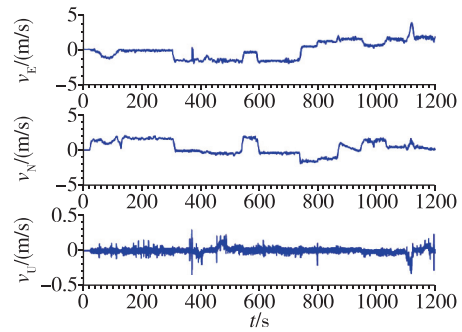
图 4 试验轨迹

Fig. 4 Track of road test

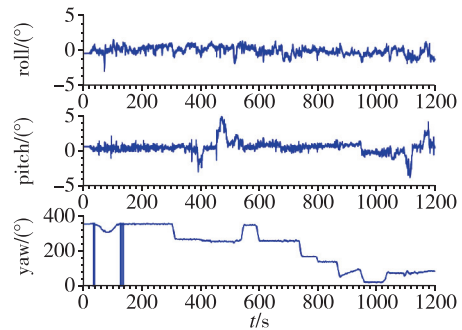
前 20min 在线标定试验过程中,位置、速度、姿态如图 5 所示。



(a)



(b)



(c)

图 5 试验位置、速度与姿态

Fig. 5 Position, velocity and attitude of road test

为了具体对比 GNSS 时延与 ODO 时延对 IMU/ODO 参数在线标定的影响,将不考虑 GNSS 时延与 ODO 时延(记为 M1)、仅考虑 GNSS 时延(记为 M2)以及本文同时考虑 GNSS 时延与 ODO 时延(记为 M3)的参数标定方法进行对比,标定结果如表 2 所示,图 6~图 8 所示为对应的标定曲线。图 9 所示为本文方法的 GNSS 时延与 ODO 时延估计曲线。图 6~图 8 中,除 δk 之外,M2 与 M3 的其余参数标定曲线几乎重合。

表 2 参数标定结果对比

Tab. 2 Comparison of parameter calibration results

	M1	M2	M3	
δk	0.0384	0.0382	0.0390	
$\alpha_x / (^\circ)$	0.428	0.480	0.480	
$\alpha_z / (^\circ)$	2.788	2.505	2.507	
r_{veh}^b / cm	x	17.8	17.5	17.1
	y	-87.9	-87.4	-87.3
	z	-36.3	-36.7	-37.2
r_{gnss}^b / cm	x	22.4	22.2	22.2
	y	-137.7	-113.4	-113.4
	z	25.8	46.3	46.2
T_g / ms	\	65.1	65.2	
T_o / ms	\	\	15.1	

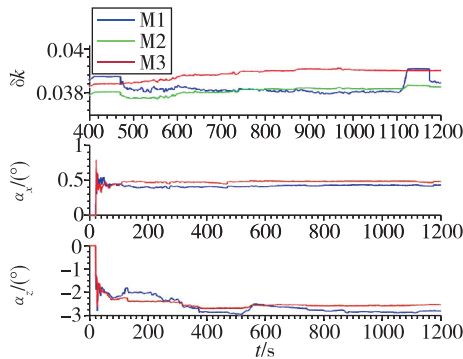
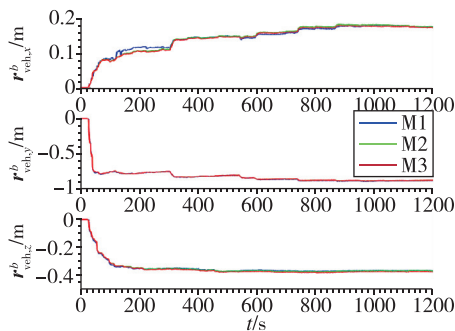


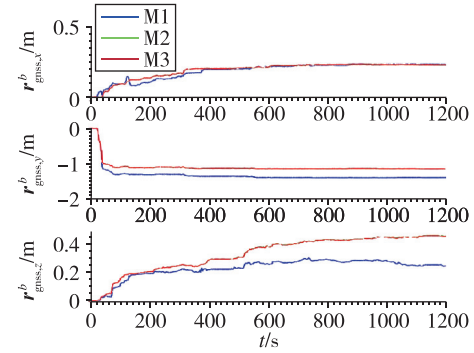
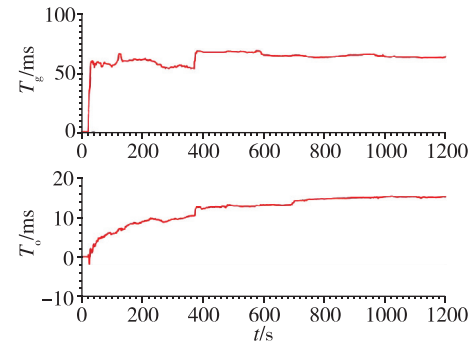
图 6 ODO 标度因数误差、IMU 与 ODO 之间的安装偏差角估计对比

Fig. 6 Comparison of ODO scale factor error and misalignment angle estimation between IMU and ODO

图 7 IMU 与 ODO 之间的杆臂估计对比
Fig. 7 Comparison of lever arm estimates between IMU and ODO

根据图 6~图 9 以及表 2 数据可以看出:

1) 本文试验中使用的 GNSS 接收机存在 65ms 左右的时延, 若如 M1 不考虑 GNSS 时延, 将造成杆

图 8 GNSS 天线与 IMU 之间的杆臂估计对比
Fig. 8 Comparison of lever arm estimates between GNSS antenna and IMU图 9 GNSS 时延与 ODO 时延估计
Fig. 9 GNSS delay and ODO delay estimates

臂 r_{gnss}^b 标定结果与手动测量值相比最大误差大于 20cm, 而 M2 与 M3 考虑后误差小于 5cm。

2) GNSS 时延对 IMU 与 ODO 之间的杆臂 r_{veh}^b 标定影响较小, 结果相差小于 1cm, 这是因为本文试验在转弯以及上下坡时角速度机动较慢, 而在角速度机动前车辆无明显加减速, 因此在角速度机动过程中由 GNSS 时延引起的 INS 速度误差较小, 从而对杆臂 r_{veh}^b 估计影响较小。

3) GNSS 时延对 IMU 与 ODO 之间的标度因数误差 δk 以及安装偏差角 α_x 、 α_z 的标定影响较大。从图 6 可以看出, 在 470s、1120s 车辆加减速时, δk 出现明显的跳变, 在 130s 时由于车辆的减速再加速, 导致 M1 与 M2 对 α_x 、 α_z 的估计结果出现较大差异, 这都是因为试验中加减速机动较为明显, GNSS 时延引起的 INS 速度误差较大所致。

4) 本文试验中使用的轮速里程计存在 15ms 左右的时延, 其主要在 470s、1120s 等车辆加减速时引起轮速里程计标度因数误差估计的跳变, 不过由于 ODO 时延量较小, 因此跳变幅度较小。

为了验证本文方法对杆臂 r_{veh}^b 以及安装偏差角 α_x 、 α_z 的标定精度,首先进行前文方式(1)所述的非完整约束检验。图 10~图 12 所示为试验后 15min 内 b 系下的速度以及经过 M1 与 M3 两种方法标定结果补偿得到的 v 系下速度,其中红色曲线为经过平移处理用于下文分析的转弯角速度。

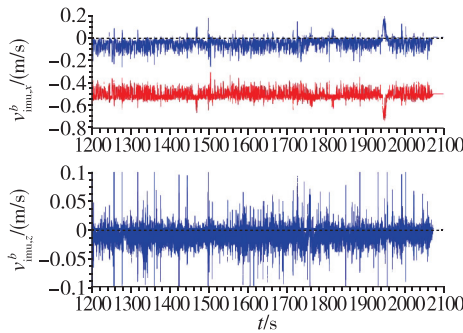


图 10 b 系下的速度
Fig. 10 Velocity in the IMU frame

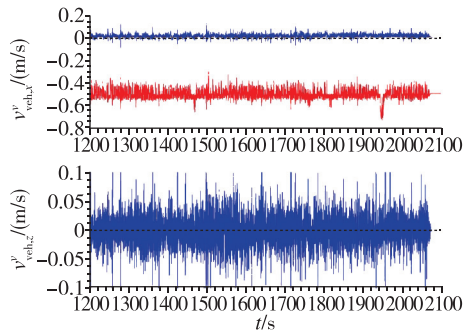


图 11 经 M1 标定结果补偿后的 v 系下速度
Fig. 11 Velocity compensated by M1 calibration in the vehicle frame

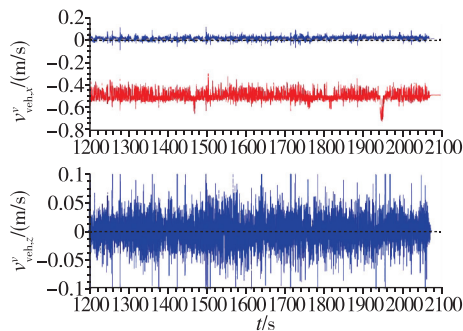


图 12 经 M3 标定结果补偿后的 v 系下速度
Fig. 12 Velocity compensated by M3 calibration in the vehicle frame

从图 10 可以看出, b 系下 x 轴与 z 轴的速度相较零均值而言存在整体的偏移,而 x 轴速度还存在

如 1950s 时与转弯角速度相对应的尖峰。根据式 (3)可知, x 轴与 z 轴速度的偏移分别由安装偏差角 α_z 与 α_x 引起,而 x 轴速度的尖峰是因为纵向杆臂在车辆转弯时引起。从图 11 和图 12 可以看出,经过杆臂 r_{veh}^b 以及安装偏差角 α_x 、 α_z 的补偿后, v 系下的速度尖峰明显消失,这间接验证了杆臂 r_{veh}^b 标定结果的准确性;速度偏移也明显较小,其中图 12 中使用本文方法 v 系下的 x 轴速度更接近零均值特性,这也验证了本文方法安装偏差角标定结果的准确性。

为了进一步体现使用本文方法对 IMU/ODO 标定补偿后 INS/ODO 组合导航系统在 GNSS 失效时的定位性能优势,开展了前文方式(2)所述的验证工作。图 13 所示为经过 M1、M2 与 M3 三种方法标定结果补偿后的 INS/ODO 组合导航系统水平位置误差与高度误差对比图,最大位置误差对比如表 3 所示。

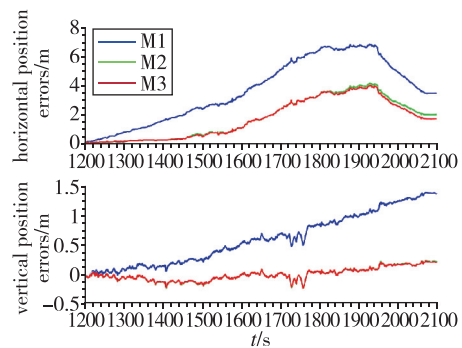


图 13 INS/ODO 组合导航系统水平位置误差与高度误差对比
Fig. 13 Comparison of horizontal and vertical position errors of INS/ODO integrated navigation system

表 3 INS/ODO 组合导航系统最大位置误差对比
Tab. 3 Comparison of maximum position errors of INS/ODO integrated navigation system

最大位置误差	水平/m	高程/m	三维/m
M1	6.84	1.42	6.93
M2	4.14	0.26	4.15
M3	3.99	0.25	4.00

从图 13 和表 3 数据可以看出,经过本文方法对 IMU 与 ODO 之间的杆臂 r_{veh}^b 以及安装偏差角 α_x 、 α_z 在线标定及补偿后,INS/ODO 组合导航系统水平位置与高程精度最高,水平位置最大误差从 6.84m 减小为 3.99m,高度最大误差从 1.42m 减小为 0.25m,三维位置精度提升了 42.3%,进一步验证了本文方

法有效提高了IMU/ODO在线标定的精度。

4 结论

本文提出了一种面向即插即用车载GNSS/INS/ODO系统的时空在线标定方法。该方法在传统GNSS辅助IMU/ODO参数估计模型的基础上,增广了GNSS与ODO的时延误差,分析了两种时延对IMU/ODO参数在线标定的影响,推导并构建了完整的GNSS与ODO观测模型,采用卡尔曼滤波器对GNSS时延、ODO时延以及IMU与ODO之间的参数进行估计。实际测试结果表明,该方法可以有效提高IMU/ODO在线标定的精度。

参考文献

- [1] Angrisano A, Petovello M, Pugliano G. Benefits of combined GPS/GLONASS with low-cost MEMS IMUs for vehicular urban navigation[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 5134-5158.
- [2] Grejner-Brzezinska D A, Yudan Y I, Toth C K. Bridging GPS gaps in urban canyons: the benefits of ZUPTs[J]. *Navigation*, 2001, 48(4): 216-226.
- [3] Chu H J, Tsai G J, Chiang K W, et al. GPS/MEMS INS data fusion and map matching in urban areas[J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 11280-11288.
- [4] Chang L, Niu X, Liu T, et al. GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1009.
- [5] Liao J, Li X, Wang X, et al. Enhancing navigation performance through visual-inertial odometry in GNSS-degraded environment[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 1-18.
- [6] 张礼廉, 屈豪, 毛军, 等. 视觉/惯性组合导航技术发展综述[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(4): 50-63. Zhang Lilian, Qu Hao, Mao Jun, et al. A survey of intelligence science and technology integrated navigation technology[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(4): 50-63(in Chinese).
- [7] Niu X, Nassar S, El-Sheimy N. An accurate land-vehicle MEMS IMU/GPS navigation system using 3D auxiliary velocity updates[J]. *Navigation*, 2007, 54(3): 177-188.
- [8] 郭楠楠, 申亮亮, 邵会兵, 等. 车载捷联惯导双里程计组合导航方法研究[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(6): 86-93.
- Guo Nannan, Shen Liangliang, Shao Huibing, et al. Research on integrated navigation algorithm with SINS and double odometers[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(6): 86-93(in Chinese).
- [9] 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.
- [10] Seo J W, Lee H K, Lee J G, et al. Lever arm compensation for GPS/INS/odometer integrated system[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, 4(2): 247-254.
- [11] Wu Y, Goodall C, El-Sheimy N. Self-calibration for IMU/odometer land navigation: simulation and test results[C]// *Proceedings of 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2010: 839-849.
- [12] 何骞, 常乐, 吴幼丝. 基于预积分的IMU/ODO外参估计[J]. *测绘通报*, 2021(4): 68-73. He Qian, Chang Le, Wu Yousi. IMU/ODO external parameter estimation based on preintegration[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(4): 68-73(in Chinese).
- [13] Hansen J M, Fossen T I, Johansen T A. Nonlinear observer design for GNSS-aided inertial navigation systems with time-delayed GNSS measurements[J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 60: 39-50.
- [14] 付廷强, 马太原, 王亚飞, 等. GPS/INS延时估计与基于残差重构的延时补偿算法[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(10): 1210-1217. Fu Tingqiang, Ma Taiyuan, Wang Yafei, et al. GPS/INS delay estimation and delay compensation based on residual reconstruction[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(10): 1210-1217(in Chinese).
- [15] Liu Z, El-Sheimy N, Qin Y. Low-cost INS/odometer integration and sensor-to-sensor calibration for land vehicle applications[C]// *Proceedings of IAG/CPGPS Joint 1st International Conference on GNSS+ (ICG+ 2016)*, 2016.
- [16] Savage P G. *Strapdown analytics*[M]. Maple Plain, MN: Strapdown Associates, 2000.

(编辑:李瑾)