

基于递推最小二乘法的捷联惯导与 里程计组合导航系统标定

罗强力, 韩军海

(北京航天控制仪器研究所, 北京, 100039)

摘要: 里程计刻度系数和惯导的安装误差的标定是影响捷联惯导与里程计组合导航精度的重要因素, 针对这一问题, 提出基于递推最小二乘的标定方法。标定实验表明: 在 50 s 左右即可得到较准确的估计值, 20 min 标定的里程计刻度系数结果优于 5 min 标定的结果, 且在跑车过程中真实里程计刻度系数是有变化的; 相对于弯曲路线, 平直路线中安装误差角的估计更准确。最后通过跑车试验, 以 GPS 实测数据为参考, 50 min 跑车约 40 km, 航位推算位置误差在 50 m 以内, 验证了标定结果的准确性, 说明所用标定方法有很强的工程应用价值。

关键词: 捷联惯导; 里程计; 标定; 递推最小二乘; 航位推算

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Calibration of Strapdown Inertial Navigation System/Odometer Integrated Navigation System Based on Recursive Least Square Method

Luo Qiangli, Han Junhai

(Beijing Institute of Aerospace Control Device, Beijing, 100039)

Abstract: Calibrations of odometer's scale factor and the installation error between SINS and odometer are crucial factor which impact the accuracy of Strapdown Inertial Navigation System/Odometer (SINS/OD) integrated navigation system. As to this issue, a calibration method based on recursive least square (RLS) is presented. The results of calibration experiments show that accurate estimates can be gained in approximately 50 s, and calibration results of 20 min outgoes the calibration results of 5 min, and the real scale factor of odometer is variational during the journey. In addition, compared with the estimation of curving route, the estimation of the installation error between SINS and odometer in flat route is more accurate. At last, field tests are carried out, the GPS data is regarded as reference, the vehicle runs 40 km in 50 min, and the position error of dead reckoning is less than 50 m which proves the exactness of the calibration, and indicates that the calibration method is valuable in engineering application.

Key Words: Strapdown inertial navigation system; Odometer; Calibration; Recursive least square; Dead reckoning

0 引言

捷联惯导 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 是一种完全自主的导航系统, 具有纯自主、导航信息全面、抗干扰能力强等特点, 同时也有误差随时间积累的局限性, 通常将其与其它信息源进行组合导航。SINS/GPS 组合是一种常见的组合形式, GPS 误差不随时间积累但易受环境影响, 抗干扰能力差。里程计 (Odometer, OD) 可用来测量车辆行驶速度, 其测量误差不随行驶时间积累, 自主性和抗干扰能力强,

故 SINS/OD 组合导航系统在导弹发射车定位定向技术中得到广泛的应用^[1]。

里程计传感器输出与车辆行驶路程成比例的脉冲数刻度系数的准确程度直接影响了里程计测得速度的精度。惯导坐标系和车体坐标系间不可避免地存在安装误差, 在组合导航之前需对其进行标定补偿。本文主要通过递推最小二乘法对里程计刻度系数和惯导与里程计间的安装误差进行标定, 并用实际跑车试验对标定结果进行验证。

1 标定方法

导航系 n 取东北天坐标系, 惯导坐标系 b 以惯导壳体标注为准, 里程计坐标系 d 与车体坐标系重合, 3 个坐标轴分别指向载车右前上。

1.1 里程计刻度系数的标定方法

经典的里程计刻度系数标定方法是选取一段比较平直的路段跑车, 记录里程计传感器输出的脉冲总数 P , 通过 GPS 或其他方法测得跑车的路程 l , 则里程计刻度系数 k_D 为

$$k_D = l/P \quad (1)$$

这种标定方法要求车体行进方向尽可能是一条直线, 否则会造成较大的误差, 而实际行车过程很难保持一个方向。为减小误差, 将整个路程划分为很多小段, 如每秒的直线距离为一个小区段, 从而更接近真实的路程长度; 然后采用递推最小二乘法估计刻度系数, 可以有效减小由于车体打滑、路面不平整、传感器干扰等情况下脉冲的误差积累, 得到更准确的估计结果^[2-4]。

跑车过程中, GPS 每秒输出一次速度和位置, 假设在这 1 s 内, 车体从 A 点运动到 B 点, 由 GPS 可以测出 A 点经度、纬度和高度分别为 λ_A , L_A 和 h_A , B 点经纬度和高度分别为 λ_B , L_B 和 h_B , 则 A , B 两点间的距离在东向和北向及高度方向的投影分量分别为

$$l_{ix} = (R+h)\cos L_A \sin(\lambda_B - \lambda_A) \quad (2)$$

$$l_{iy} = (R+h)\sin(\lambda_B - \lambda_A) \quad (3)$$

$$l_{ih} = h_B - h_A \quad (4)$$

可算出两点之间的直线距离 l_i :

$$l_i = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{ih}^2} \quad (5)$$

式中 R 为地球半径; h 为高度。

假设车体从 A 点到 B 点里程计传感器的脉冲增量为 P_i , 则有:

$$l_i = k_D P_i \quad (6)$$

采集一段时间的数据, 用递推最小二乘法便可以估计出刻度系数 k_D 。

1.2 惯导与里程计安装误差的标定方法

在组合导航中, 通常将里程计测得的速度投影到惯导坐标系 b , 而实际应用中里程计坐标系 d 和惯导坐标系 b 常不重合, 存在安装误差, 需对其进行标定并补偿^[5-6]。假设里程计坐标系 d 与惯导坐标系 b 之间的转换矩阵为 C_b^d , α , β , γ 分别表示里程计坐标系 d 相对于惯导坐标系 b 的俯仰角、横滚角和航向角。则有:

$$C_b^d = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & -\sin\beta\cos\alpha \\ -\cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha \\ \sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

在 3 个安装误差角均为小角度的情况下, 式 (7) 可简化为

$$C_b^d = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

令 $\phi = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$, 则有:

$$C_b^d = (C_b^d)^T = (I + \phi \times) \quad (9)$$

式中 I 为单位矩阵; $\phi \times$ 表示 ϕ 的各分量构造的叉乘反对称矩阵。

在标定出里程计刻度系数后, 可算出每段时间内里程计测量的即时速率 v_D , 在里程计坐标系 d 中为

$$v^d = [0 \ v_D \ 0]^T \quad (10)$$

v^d 在惯导坐标系 b 上的投影为

$$v^b = C_b^d v^d = (I + \phi \times) v^d = v^d + (\phi \times) v^d \quad (11)$$

整理可得:

$$v^b - v^d = (-v^d \times) \phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_D \\ 0 & 0 & 0 \\ v_D & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi \quad (12)$$

而

$$v^b = C_b^n v^n \quad (13)$$

载车在导航系中的速度 v^n 可以由 GPS 输出获得, 姿态变换矩阵 C_n^b 从惯导输出中取得。将式 (12) 中等号左边的量作为量测量, ϕ 作为待估计量, 可采用递推最小二乘法估计出相应的状态。值得注意的是只能估计出俯仰安装误差角和航向安装误差角, 横滚安装误差角是没有估计效果的, 这一点在式 (12) 中等式右端的矩阵中也可以体现出。

2 标定实验及分析

惯导安装固定在车上的安装基座上, 使安装误差尽可能的小。选择不同路段进行标定实验, 实验所用惯导中激光陀螺零偏稳定性标称值为 $0.01(^{\circ})/h$, 加速度计零偏稳定性标称值为 $5 \times 10^{-5} g$, GPS 水平定位误差在 10 m 以内。

2.1 里程计刻度系数的标定

选取车辆启动后 5 min 的数据标定, 其中一组实验的行驶路线和里程计刻度系数标定结果分别如图 1 和图 2 所示。

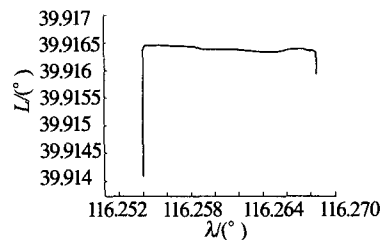


图 1 行驶路线

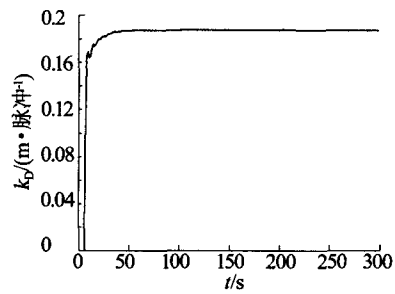


图2 里程计刻度系数标定结果

从图2可见,即使是弯曲的路线,采用递推最小二乘法也能在50 s左右估计出比较稳定的刻度系数结果。

实际上,若是取起动后20 min的数据进行标定,由于行驶的路程更长,获得的有效信息增加,环境干扰、GPS定位误差等的影响将更小,标定结果相互间更接近,总共5组标定实验的结果列于表1。

表1 里程计刻度系数标定结果(20 min)

标定实验	里程计刻度系数估值/(m·脉冲 ⁻¹)	
	5 min 标定结果	20 min 标定结果
第1组	0.188217	0.187872
第2组	0.188440	0.187919
第3组	0.188206	0.187945
第4组	0.188126	0.188122
第5组	0.187818	0.188041
均值	0.188161	0.187980
均方差	2.2×10^{-4}	1.0×10^{-4}

从3次跑车试验中提取前40 min的数据,均分成2段20 min的数据分别进行估计,结果列于表2。观察发现,第2段的标定结果比第1段的结果稍大,说明随着跑车路程的增加,真实里程计刻度系数是有变化的。这与车胎充气温度变化、运动轨迹、路面状况和里程计传感器受到的环境干扰都是有关系的^[7-8]。

表2 里程计刻度系数标定结果(前40 min)

标定实验	里程计刻度系数估值/(m·脉冲 ⁻¹)	
	第1段(20 min)	第2段(20 min)
第1组	0.187945	0.188039
第2组	0.188122	0.188794
第3组	0.188041	0.188650

2.2 惯导与里程计安装误差的标定

标定出里程计刻度系数后可进行惯导与里程计安装误差的标定,利用车辆起动后5 min的数据标定出的结果如图3所示。

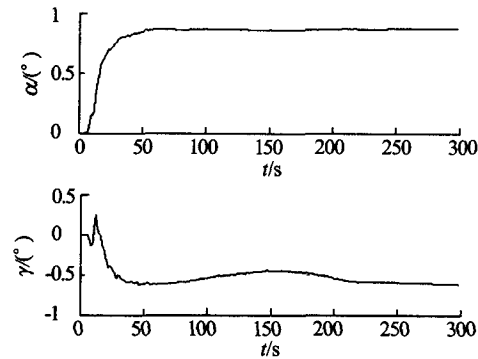


图3 弯曲路线安装误差角估计结果

显然俯仰安装误差角的估计效果较好,而航向安装误差角的估计波动较大,其原因是该标定方法将每秒车体运动近似为直线运动,而拐弯时这样的近似会导致车体速度误差太大,进而影响航向安装误差角的估计效果。

选择较为平直的路线进行估计,结果如图4所示。显然,航向角安装误差的估计得到极大的改善,两个安装误差角在50 s内能收敛到稳定值。

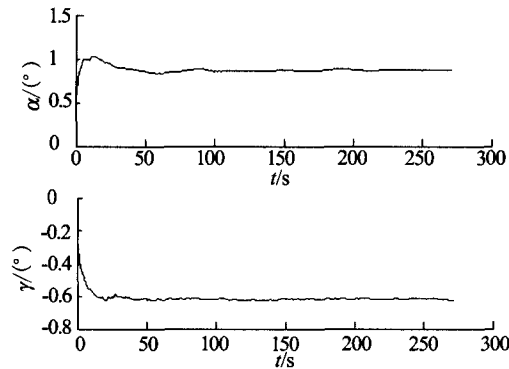


图4 平直路线安装误差角估计结果

5组标定实验的结果列于表3。分析可知,相对于弯曲的路线,在平直的路线中,惯导与里程计安装误差角能得到较好的估计,且俯仰安装误差角的估计优于航向安装误差角。

表 3 安装误差角标定结果

标定实验	俯仰安装误差角/(°)		航向安装误差角/(°)	
	弯曲路线	平直路线	弯曲路线	平直路线
第 1 组	0.8280	0.8461	-0.1746	-0.5141
第 2 组	0.8745	0.8708	-0.8073	-0.6148
第 3 组	0.8843	0.8717	-0.3848	-0.6242
第 4 组	0.8703	0.8486	-0.6220	-0.6295
第 5 组	0.8639	0.8846	-0.5615	-0.5463
均值	0.8642	0.8644	-0.5100	-0.5858
均方差	0.0216	0.0165	0.2407	0.0523

3 跑车试验

标定出里程计的刻度系数和惯导与里程计间的安装误差后,可以由式(10)、式(11)得到车体速度在惯导坐标系 b 中的投影,结合惯导输出的姿态信息可以用航位推算实现车体的定位,这里用航位推算来验证标定的结果。

航位推算(Dead Reckoning, DR)的基本原理如下:

载车由 (x_0, y_0) 运动到 (x, y) , 把路程分成许多小线段,每个小线段长度为 Δd_i , 车辆航向角为 ψ_i , 俯仰角为 θ_i , 则 (x, y) 的计算公式为

$$\begin{cases} x = x_0 + \sum_{i=0}^n \Delta d_i \cos \theta_i \sin \psi_i \\ y = y_0 + \sum_{i=0}^n \Delta d_i \cos \theta_i \cos \psi_i \end{cases} \quad (14)$$

如果已知起始点坐标,路程增量由里程计测得,航向角和俯仰角由惯导提供,载车即可实现自主定位。

根据 5 min 标定结果,选取 $k_D = 0.188161$, $\alpha = 0.8644^\circ$, $\gamma = -0.5858^\circ$, 用航位推算对标定结果进行验证,其中一次的跑车路线如图 5 所示。

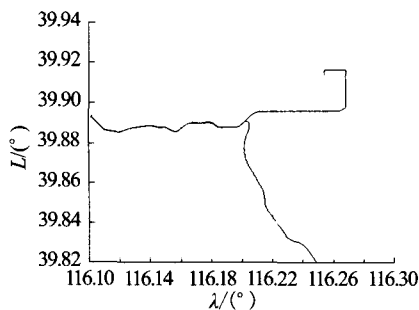


图 5 跑车路线

以 GPS 实测数据为参考,每隔 1 s 进行航位推算,将解算的速度和位置与 GPS 实测的速度和位置求差,得到误差结果如图 6~8。可见航位推算解算的速度和位置与 GPS 实测值接近。其中的毛刺是由于 GPS 遮挡时失效,以及 GPS 位置信息与里程计计数不同步、车体拐弯等原因引起的。除去毛刺的影响,约 49 min 跑车 37.9 km,航位推算的纬度误差小于 0.0001° (约 10 m),经度误差小于 0.0001° (约 10 m),高度误差小于 7 m。

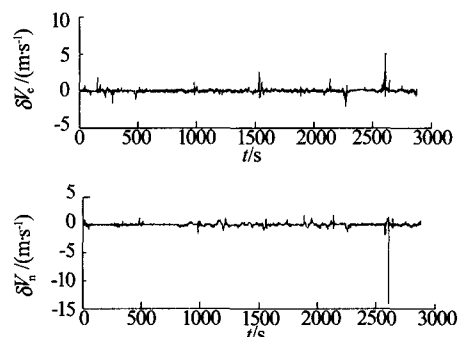


图 6 航位推算水平速度误差

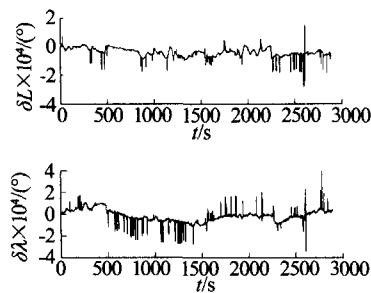


图 7 航位推算水平位置误差

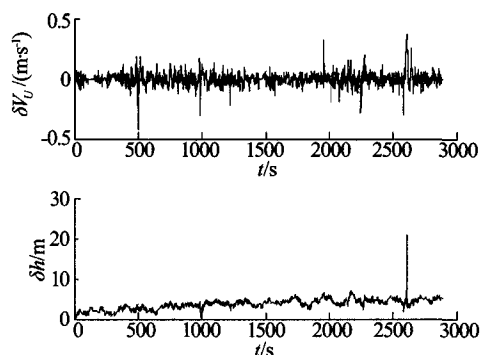


图8 航位推算天向速度和高度误差

总共4次跑车试验的航位推算位置误差最大值情况如表4所示。整体来看,利用标定结果进行航位推算后得到的位置误差较小,在 4×10^{-4} (°) (约50 m)以内,间接反映了标定结果的准确性。

表4 航位推算水平位置误差情况

跑车试验	纬度误差/ (°)	经度误差/ (°)
第1次	4×10^{-4}	3×10^{-4}
第2次	1×10^{-4}	1×10^{-4}
第3次	1×10^{-4}	1×10^{-4}
第4次	2×10^{-4}	2×10^{-4}

4 结 论

本文针对车载SINS/OD组合导航系统中里程计刻度系数和惯导安装误差的标定的问题,研究了基于递推最小二乘的标定方法,利用GPS提供的速度、位置信息及SINS输出的姿态信息,对里程计刻度系数和惯导安装误差进行了标定。多次标定实验的结果表明,递推最小二乘法能在50 s左右快速估算出较准确的结果;20 min标定的里程计刻度系数结果的重复性优于

5 min标定结果的重复性,且在跑车过程中真实里程计刻度系数是有变化的;在平直路线中安装误差角的估计要优于在弯曲路线中的估计。最后通过跑车试验,用航位推算结果验证了标定结果的准确性,说明该标定方法有很强的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 张金余, 刘伟. 捷联惯导与里程计组合导航系统标定方法研究[J]. 导航与控制, 2011, 10(2): 8-12.
- [3] 赵长山, 秦永元, 夏家和. 车载惯导里程计组合导航系统安装误差标定研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(10): 1393-1395.
- [4] Zhang Hongliang, Wu Wenqi, Hu Xiaoping. A new online-identification algorithm for odometer's scale factor[C]. Changsha: Proceedings of the 2007 Chinese Control Conference, 2007: 115-119.
- [5] 严恭敏, 秦永元, 杨波. 车载航位推算系统误差补偿技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 26-30.
- [6] Zhao Changshang, Qin Yongyuan, Yan Gongmin. On the move alignment for strapdown inertial navigation system[C]. Xi'an: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, 2008: 1428-1432.
- [7] Zhu Libin. Influence of tire temperature on odometer's scale factor[C]. Changsha: Proceedings of the Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2012: 690-693.
- [8] 朱立彬, 王玮. 轮胎充气温度对光电里程仪标度因数影响的标定算法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 190-193.

安塔瑞斯火箭执行首次国际空间站商业补给任务

美国东部时间2014年1月9日13时07分,美国轨道科学公司的安塔瑞斯110型火箭搭载天鹅座飞船从中大西洋地区的沃勒普斯发射场发射,首次正式执行国际空间站货运补给服务。起飞9分54 s后,火箭分离,天鹅座飞船进入预定轨道。

1月12日,空间站上的宇航员使用加拿大2号机械

臂捕获天鹅座飞船。飞船成功与国际空间站对接,并为其送去约1.26 t的物资,其中包括食物、硬件和实验设备。轨道科学公司总裁大卫·汤普森用“完美”来形容此次任务。任务原定于2013年12月20日发射,但先后因国际空间站冷却系统故障、极寒天气影响以及太阳辐射流等问题而多次推迟。

(龙雪丹 供稿)

word版下载: <http://www.ixueshu.com>

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
