

一种基于双轴位置转台的现场标定方法

李 政, 张志利, 周召发

(火箭军工程大学 二系, 陕西 西安 710025)

摘 要:针对激光陀螺捷联惯性测量单元(LSIMU)的系数会随时间变化的问题,基于双轴位置转台提出一种激光陀螺的现场标定新方法。该方法在3个位置对激光陀螺进行标定,根据其标定模型建立9个方程,通过正反转消除地球自转角速度在非转动轴上的影响,以及常值漂移在各个输出轴上的影响,最后求解出激光陀螺的标度因数和安装误差。实验结果表明,该方法可在缺乏高精度速率转台的条件下完成激光陀螺的标定,其精度与传统实验方法精度相当,缩短了标定时间。

关键词:激光陀螺惯性测量组合(LSIMU);双轴位置转台;加速度计;激光陀螺;标定

中图分类号: TN06; U666.1

文献标识码: A

A Novel Field Calibration Method Based on Two-axis Position Turntable

LI Zheng, ZHANG Zhili, ZHOU Zhaofa

(The Second Dept., Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In view of the problem that the coefficient of laser gyro strapdown inertial measurement unit (LSIMU) will change with the time, a novel field calibration method of laser gyro is presented based on the two-axis position turntable. The method gathers the output signals of LSIMU at three different positions, then nine equation formula are established based on the calibration model. The effect of the rotational-angular velocity of the earth on the non-rotation axis is eliminated through the positive and negative rotations, and the effect of constant drift on the each output axis is also eliminated. The scale factor and the installation error of laser gyro are finally solved. The experiment results show that the proposed three-position calibration method can calibrate laser gyroscope without high precision turntable and is almost on the same accurate level precision with the traditional method, and can obviously reduce the calibration time.

Key words: laser gyro strapdown inertial measurement unit(LSIMU); two-axis position turntable; accelerometer; laser gyroscope; calibration

0 引言

激光陀螺在长时间使用过程中会积累一定的误差,在使用前必须通过标定实验确定出陀螺的各项误差系数,并在捷联惯导系统中进行补偿^[1-2]。

传统陀螺标定法为速率法^[3-6],由转台提供水平基准和角速度激励,通过解析法^[7]可得陀螺的标度因数和安装误差。文献[8]提出了一种激光陀螺捷联惯导系统的九位置现场标定方法,实现了陀螺安装误差的标定,但不能标定出陀螺的标度因数。文献[9]提出一种基于可观测性分析的射前自标定方案,针对加速度计误差参数进行标定,但没有考虑激光陀螺的标定。文献[10]提出了一种基于最优估计

的现场标定方法,但仅能标定出陀螺的常值漂移。本文针对此问题,结合双轴位置转台,设计了一种新的标定方案,在无需精确定向的情况下,仅需3个位置就可标定出陀螺的标度因数和安装误差。

1 标定误差模型

假设陀螺的静态输入输出模型^[4]为

$$N_{gi}/K_{gi} = \omega_i + E_{gik}\omega_j + E_{gij}\omega_k + D_{i0} \quad (1)$$

式中: N_{gi} , K_{gi}^{-1} , ω_i , E_{gij} , D_{i0} 分别为陀螺采样输出、标度因数、角速率输入、安装误差和常值漂移。其标定模型为

$$\omega^b = K_G N_G + \epsilon^b \quad (2)$$

式中: b 系为载体坐标系; $\omega^b = [\omega_x^b \quad \omega_y^b \quad \omega_z^b]^T$;

收稿日期:2015-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41174162),青年科学基金资助项目(41404022)

作者简介:李政(1992-),男,河南南阳人,硕士生,主要从事定位定向与基准传递技术的研究。E-mail: 377102710@qq.com。张志利(1965-),男,河南濮阳人,教授,博士,主要从事定位定向与基准传递技术的研究。

$$\mathbf{K}_G = \begin{bmatrix} K_{Gx} & K_{Gx}E_{Gxy} & K_{Gx}E_{Gxz} \\ K_{Gy}E_{Gyx} & K_{Gy} & K_{Gy}E_{Gyz} \\ K_{Gz}E_{Gzx} & K_{Gz}E_{Gzy} & K_{Gz} \end{bmatrix}; \mathbf{N}_G = [N_{Gx} \quad N_{Gy} \quad N_{Gz}]^T; \mathbf{g}^b = [\epsilon_x^b \quad \epsilon_y^b \quad \epsilon_z^b]^T; \omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b \text{ 为 } b \text{ 系下的陀螺输入}; \epsilon_x^b, \epsilon_y^b, \epsilon_z^b \text{ 为 } b \text{ 系下的等效常值漂移}; K_{Gx}, K_{Gy}, K_{Gz} \text{ 为陀螺的标度因数}; E_{Gxy}, E_{Gxz}, E_{Gyx}, E_{Gyz}, E_{Gzx}, E_{Gzy} \text{ 为陀螺的安装误差系数}; N_{Gx}, N_{Gy}, N_{Gz} \text{ 为陀螺的输出脉冲}。$$

2 陀螺的标定

2.1 传统标定法——速率法

在初始位置时, x 轴指向东向; y 轴指向北向; z 轴指向天向, 分别绕 z 、 y 、 x 轴以 $\pm 30^\circ$ 的角速度正反转 1 周。位置编排方案如图 1 所示。

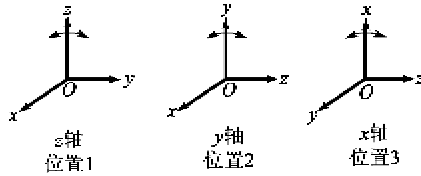


图1 速率法示意图

在位置 1, x 、 y 、 z 轴的角速率分别为 ω_x 、 ω_y 、 ω_z , 其中

- 1) 位置 1: $\omega_{x1} = \omega_{y1} = 0, \omega_{z1} = \omega + \omega_{ie} \sin \varphi$ 。
- 2) 位置 2: $\omega_{x1} = \omega_{z1} = 0, \omega_{y1} = \omega + \omega_{ie} \sin \varphi$ 。
- 3) 位置 3: $\omega_{y1} = \omega_{z1} = 0, \omega_{x1} = \omega + \omega_{ie} \sin \varphi$ 。

则陀螺惯性绕 z 轴正向旋转 n 周时有

$$\begin{cases} N_{gx1}(t+)/K_{gx} = -\omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + E_{gxz} \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + E_{gxy}(\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{x0} \\ N_{gy1}(t+)/K_{gy} = -E_{gyz} \omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + E_{gyx}(\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{y0} \\ N_{gz1}(t+)/K_{gz} = -E_{gzy} \omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + E_{gxz} \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + (\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{z0} \end{cases} \quad (3)$$

绕 z 轴反向旋转 n 周时有

$$\begin{cases} N_{gx1}(t-)/K_{gx} = -\omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + E_{gxz} \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + E_{gxy}(-\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{x0} \\ N_{gy1}(t-)/K_{gy} = -E_{gyz} \omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + E_{gyx}(-\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{y0} \\ N_{gz1}(t-)/K_{gz} = -E_{gzy} \omega_{ie} \cos \varphi \cos \omega t + E_{gxz} \omega_{ie} \cos \varphi \sin \omega t + (-\omega_z + \omega_{ie} \sin \varphi) + D_{z0} \end{cases} \quad (4)$$

则陀螺的标定因数为

$$K_{gz} = (N_{gz1}(t+) - N_{gz1}(t-)) / 2\omega_z \quad (5)$$

$$E_{gxy} = (N_{gx1}(t+) - N_{gx1}(t-)) / (2\omega_z \cdot K_{gz}) \quad (6)$$

$$E_{gxz} = (N_{gy1}(t+) - N_{gy1}(t-)) / (2\omega_z \cdot K_{gz}) \quad (7)$$

同理, 可得

$$K_{gy} = (N_{gy1}(t+) - N_{gy1}(t-)) / 2\omega_y \quad (8)$$

$$E_{gxy} = (N_{gx1}(t+) - N_{gx1}(t-)) / (2\omega_y \cdot K_{gy}) \quad (9)$$

$$E_{gxz} = (N_{gy1}(t+) - N_{gy1}(t-)) / (2\omega_y \cdot K_{gy}) \quad (10)$$

$$K_{gx} = (N_{gx1}(t+) - N_{gx1}(t-)) / 2\omega_x \quad (11)$$

$$E_{gxy} = (N_{gy1}(t+) - N_{gy1}(t-)) / (2\omega_x \cdot K_{gx}) \quad (12)$$

$$E_{gxz} = (N_{gz1}(t+) - N_{gz1}(t-)) / (2\omega_x \cdot K_{gx}) \quad (13)$$

2.2 现场标定法——三位置法

标定光纤陀螺的标度因数时, 通过转台转动为光纤陀螺提供角速度激励, 记“东北天”地理坐标系为 n 系(导航坐标系)。在 0 位置时, p 系(平台坐标系)与 b 系坐标轴平行, 则 b 系(载体坐标系)相对于 i 系(惯性坐标系)的角速度(即陀螺的实际角速度激励)可分解为

$$\omega_b^b = \omega_{ie}^b + \omega_{ep}^b + \omega_{pb}^b = \mathbf{C}_p^b \mathbf{C}_n^p \omega_n^b + \omega_{pb}^b \quad (14)$$

式中: $\omega_{ie}^b = 15.041 \text{ } 1(^{\circ})/\text{h}$ 为地球自转角速度; ω_{ep}^b 为转台基座相对于地面的转动角速度, 一般 $\omega_{ep}^b = 0$; ω_{pb}^b 为转台台面相对于基座的角速度; $\mathbf{C}_p^b$ 为转台基座至台面的变换矩阵; $\mathbf{C}_n^p$ 为 n 系至基座的变换矩阵。

将陀螺惯组固定在转台上, 此时记为位置 0, b 系与 p 系平行, 陀螺在 T_0 到 T_1 时刻绕 z 轴逆时针转动 180° , 转至位置 1, 对式(11)左右进行积分可得

$$\sum_{T_0}^{T_1} \omega_b^b = \sum_{T_0}^{T_1} \mathbf{C}_p^b \mathbf{C}_n^p \omega_n^b + \sum_{T_0}^{T_1} \omega_{pb}^b \quad (15)$$

在 T_2 到 T_3 时刻绕 z 轴顺时针转动, 回到位置 0, 其中 $T_1 - T_0 \approx T_3 - T_2$, 可得

$$\sum_{T_2}^{T_3} \omega_b^b = \sum_{T_2}^{T_3} \mathbf{C}_p^b \mathbf{C}_n^p \omega_n^b + \sum_{T_2}^{T_3} \omega_{pb}^b \quad (16)$$

式中: $\sum_{T_0}^{T_1} \omega_{pb}^b = 180^\circ$, $\sum_{T_2}^{T_3} \omega_{pb}^b = 180^\circ$, 且

$$\sum_{T_0}^{T_1} \mathbf{C}_p^b \mathbf{C}_n^p \omega_n^b + \sum_{T_2}^{T_3} \mathbf{C}_p^b \mathbf{C}_n^p \omega_n^b = 0。 \text{ 由于 } \omega_b^b = \mathbf{K}_G \mathbf{N}_G -$$

ε^b , 对其两边积分可得

$$\sum_{T_0}^{T_1} \omega_{\varepsilon}^b = \sum_{T_0}^{T_1} K_G N_G + \sum_{T_0}^{T_1} \varepsilon^b \quad (17)$$

$$\sum_{T_2}^{T_3} \omega_{\varepsilon}^b = \sum_{T_2}^{T_3} K_G N_G + \sum_{T_2}^{T_3} \varepsilon^b \quad (18)$$

式(14)与式(15)相加得

$$[0 \quad 0 \quad 360]^T = \sum_{T_0}^{T_1} K_G N_G + \sum_{T_2}^{T_3} K_G N_G + \sum_{T_0}^{T_1} \varepsilon^b + \sum_{T_2}^{T_3} \varepsilon^b \quad (19)$$

式中: ε^b 为常值漂移(假设为 $0.1(^{\circ})/h$); $T_1 - T_0 = T_3 - T_2 \approx 18 \text{ s}$; $\sum_{T_0}^{T_1} \varepsilon^b + \sum_{T_2}^{T_3} \varepsilon^b$ 很小, 可忽略; 式(16)可简化为

$$[0 \quad 0 \quad 360]^T = K_G \sum_{T_0}^{T_1} N_G + K_G \sum_{T_2}^{T_3} N_G = K_G \left(\sum_{T_0}^{T_1} N_G + \sum_{T_2}^{T_3} N_G \right) \quad (20)$$

对陀螺输出脉冲进行累加求和, 可得到一组关于 K_G 的方程, 同样地, 绕 x 、 y 轴进行角位置实验, 共可得到 9 个方程。联立以上 9 个方程就可解算出 K_G , 也就标定出了陀螺安装误差和标度因数。

3 两种方法标定结果的对比

图 2~5 为激光陀螺捷联惯性测量单元 (LSIMU) 的输出信号。图 2 为沿 x 、 y 、 z 轴旋转时, 旋转轴的输出信号。图 3 为旋转 x 轴时, y 、 z 轴的输出信号。图 4 为旋转 y 轴时, x 、 z 轴的输出信号。图 5 为旋转 z 轴时, x 、 y 轴的输出信号。其中单位 P 表示计数值——脉冲数。

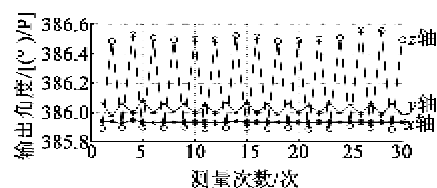


图 2 转动轴的输出

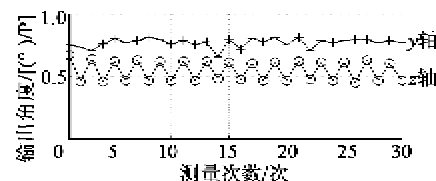


图 3 x 轴转动时, y 、 z 轴输出

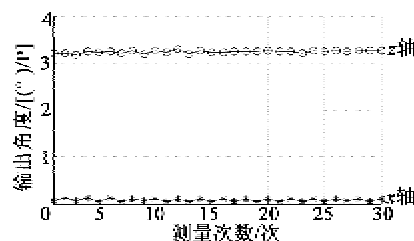


图 4 y 轴转动时, x 、 z 轴输出

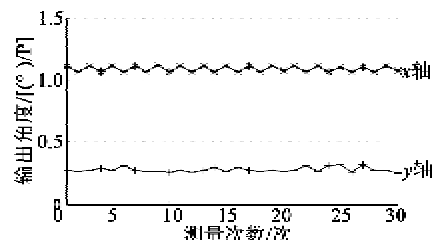


图 5 z 轴转动时, x 、 y 轴输出

将角位置法所得到的标定模型系数转换为误差模型参数, 其结果如表 1 所示。

表 1 SIMU 标定模型误差参数真值及标定值

K_G				
速率法	x	2.144 080 00	-0.000 322 11	0.003 123 44
	y	0.001 190 00	2.1445 916 30	0.001 135 27
	z	-0.001 740 00	-0.000 793 50	2.143 684 41
位置法值	x	2.143 940 000	-0.002 002 080	0.001 414 740
	y	0.000 201 414	2.1446 091 200	0.008 399 930
	z	-0.002 817 797	-0.000 715 240	2.1455 888 600
误差	x	4.06×10^{-8}	2.52×10^{-5}	7.14×10^{-5}
	y	9.02×10^{-5}	4.44×10^{-8}	3.59×10^{-5}
	z	2.69×10^{-4}	1.95×10^{-4}	9.42×10^{-3}

由图 2~5 可得旋转轴向输出稳定, 正反旋转时旋转轴的偏差一致, 这反映了激光陀螺的标度因数稳定; 非转动轴的输出信号理论上应为 0, 其输出反

映了安装误差的大小, 可得出在 y 轴旋转时, z 轴陀螺的输出最大, 也即 K_{Gyz} 最大, 与表 1 标定结果一致。由表 1 可得, 位置标定法的精度与传统标定法

一致,能用来对激光陀螺进行现场标定。

4 结束语

双轴位置转台相对于速率转台,成本低、角位置精度高、工作稳定、操作简单。本文基于双轴位置转台提出了一种现场标定方法,在有效标定出加速度计和陀螺误差参数的同时,降低了标定的成本,减小了标定所需的时间,且标定结果与传统标定方法相比,误差较小,能满足使用要求。

参考文献:

- [1] LO P H, DONALD S, HERBERT T C. Low cost fiber optic rate sensor inertial measurement unit [C]//CA, USA: IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1998: 256-263.
- [2] CUREY R K, ASH M E, THIELMAN L O, et al. Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards [C]// CA, USA: IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2004: 83-90.
- [3] 罗超. FOG 捷联惯导系统标定和误差补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [4] DONGK Y L, SANGCHUL L, SANGHYUK P, et al. Test and error parameyer estimation for MEMS-based low cost IMU calibration [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12 (4): 597-603.
- [5] 严恭敏. 惯性仪器测试与数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [6] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 王宇. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的初步探索 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [8] 贾继超, 秦永元, 张波, 等. 激光陀螺捷联惯导系统外场快速标定新方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 23-25.
- [9] JIA Jichao, QIN Yongyuan, ZHANG Bo, et al. New fast systematic calibration method for RLG-SINS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 23-25.
- [9] 贾继超, 秦永元, 张波, 等. 激光捷联惯导系统的射前快速标定技术 [J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 24-26.
- [10] JIA Jichao, QIN Yongyuan, ZHANG Bo, et al. Fast calibration technique of before launch RLG-SINS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1): 24-26.
- [10] 尚捷, 顾启泰. 捷联惯导现场最优标定方法研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 18-21.
- [11] SHANG Jie, GU Qitai. Field optimal calibration for strapdown inertial navigation [J]. Journal of Inertial Technology of China, 2005, 13(4): 18-21.
- [5] 王玉林, 曹金荣, 先锋等. 声表面波射频识别无源电子标签 [J]. 固体电子学研究与进展, 2007, 27(1): 109-114.
- [6] WANG Yulin, CAO Jinrong, QIAN Feng, et al. SAW RFID passive tags [J]. Research & Progress of Sse, 2007, 27(1): 109-114.
- [6] 李庆亮. 声表面波射频识别标签与系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [7] 吴展翔, 刘文, 卢小荣. 声表面波温度传感器的仿真与设计 [J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 8-11.
- [8] WU Zhanxiang, LIU Wen, LU Xiaorong. Simulation and design of SAW temperature sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(1): 8-11.
- [8] 郡芬, 崔新友, 余菲, 等. 声表面波温度传感器的信号检测方法 with 实现 [J]. 测控技术, 2013, 32(6): 9-14.
- [9] YAN Fen, CUI Xinyou, YU Fei, et al. Methods and implementation of signal detection for surface acoustic wave temperature sensor [J]. Measurement and Control Technology, 2013, 32(6): 9-14.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2226-2002, 铁道客车用集中轴温报警器技术条件 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3057-2002, 机车轴承温度监测报警装置技术条件 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [11] 任宪勇. RFID 阅读器在基于 SAW 传感器的 TPMS 中的研究与应用 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
- [12] 胡建学, 赵俊, 何利松. 基于声表面波技术的高压开关柜温度监测系统 [J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 214-216.
- [13] HU Jianxue, ZHAO Jun, HE Lisong, et al. Temperature Monitoring system for switchgear based on surface acoustic wave [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(2): 214-216.
- [13] Xteam 软件技术有限公司. QT 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(上接第 307 页)