

三轴磁传感器在线误差补偿方法

段国文¹, 杨迪², 吕辰²

(1. 海军装备部, 北京 100071;

2. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对三轴磁传感器使用过程中容易受到自身误差、环境磁干扰影响, 而且传统磁传感器误差补偿算法对设备要求高和需要事先收集数据的问题, 提出一种基于椭球拟合递推最小二乘磁传感器误差补偿标定算法。利用三轴磁传感器误差模型, 建立了空间椭球参数与磁传感器误差参数之间的联系。通过在线递推最小二乘法计算出补偿参数矩阵, 进而完成磁传感器校准补偿。仿真与实验验证了磁传感器误差补偿算法的有效性。

关键词: 磁传感器; 椭球拟合; 递推最小二乘; 实时误差补偿

中图分类号: TP212; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2023)05-0041-04

On-line error compensation method for three-axis magnetic sensor

DUAN Guowen¹, YANG Di², LÜ Chen²

(1. Naval Equipment Department, Beijing 100071, China;

2. Collage of Intelligent Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problem that three-axis magnetic sensor is easy to be affected by its own error and environmental magnetic interference in the process of using, and that the traditional magnetic sensor error compensation algorithm requires high equipment requirements and needs to collect data in advance, a recursive least square magnetic sensor error compensation calibration algorithm based on ellipsoidal fitting is proposed. Using the three-axis magnetic sensor error model, the relationship between the spatial ellipsoidal parameters and the magnetic sensor error parameters is established. The compensation parameter matrix is calculated by the online recursive least square method, and then the magnetic sensor calibration compensation is completed. The simulation and experiment verify the effectiveness of the error compensation algorithm of magnetic sensor.

Keywords: magnetic sensor; ellipsoidal fitting; recursive least squares; real-time error compensation

0 引言

近年来, 微机电系统 (MEMS) 发展迅速, 产生了很多 MEMS 九轴传感器, 由于其低成本、小体积、低功耗等优点, 在导航领域发挥了不可替代的作用。惯性器件误差随时间积累, 不能长时间为载体提供航向。地磁场具有无源、稳定等优点, 且误差不随时间积累, 磁传感器单独使用可以为载体提供磁航向, 和惯性器件一起使用还可以估计载体的姿态, 在导航领域受到人们的广泛关注^[1-4]。磁传感器在制造过程中会产生零偏误差、非正交误差、刻度因子误差等^[5], 安装到载体上, 会有安装误差, 而且会受到载体磁场的干扰^[6]。这些误差会导致磁传感器无法正常使用, 需要设计磁传感器误差补偿算法^[7]。

传统磁传感器的误差标定算法需要事先采集磁传感器

的数据统一计算, 事先求出磁补偿参数。主要有十二位置不对北标定法^[8]、椭球拟合法^[9]、截断总体最小二乘法^[10]等。十二位置不对北标定法对实验环境和实验过程要求比较严格, 椭球拟法和截断总体最小二乘法需要事先采集磁数据统一进行计算, 对内存要求比较高。在线磁传感器误差补偿方法有扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 估计法^[11]、八航向校正法^[12]等, EKF 估计法依赖加速度计和陀螺仪提供姿态信息, 八航向校正法对磁参数校准模型建模准确性要求高, 求解准确磁补偿系数难度较大。这些方法都有各自的缺点, 极大限制了磁传感器在不同环境下的使用, 同时也增加了磁传感器的使用成本。

本文给出的磁力计误差补偿算法, 通过递推最小二乘法对椭球拟合法进行改进, 不需要转台等额外设备, 对

使用环境要求较低,灵活性较高,降低了使用成本,使磁传感器能够独立完成误差补偿工作,也使其应用范围更加广泛。

1 磁传感器误差标定原理

磁传感器的误差来源于自身误差和使用环境带来的误差,三轴磁传感器在载体坐标系下的数学模型可表示为^[13]

$$\mathbf{H}_m^b = [\mathbf{K}_s \mathbf{K}_0 \mathbf{K}_m \mathbf{K}_c]^{-1} (\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0 - \mathbf{h}_n) - \mathbf{H}_h \quad (1)$$

式中 \mathbf{H}_m^b 为当地地磁场矢量在载体坐标系下投影, \mathbf{K}_s 为三轴灵敏度矩阵, \mathbf{K}_0 为三轴不正交角带来的变换矩阵, \mathbf{K}_m 为安装误差角引起的旋转矩阵, \mathbf{K}_c 为载体磁场中的软磁干扰矩阵, \mathbf{H}_m 为磁传感器采集到的磁场矢量在传感器坐标系中的投影, \mathbf{H}_h 为载体磁场中的硬磁干扰, \mathbf{H}_0 为三轴磁传感器的零偏误差, \mathbf{h}_n 为三轴磁传感器的测量噪声。

由于硬磁干扰产生的影响与磁传感器零偏几乎相同,且不考虑噪声,模型可简化为

$$\mathbf{H}_m^b = \mathbf{M}(\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{M} = [\mathbf{K}_s \mathbf{K}_0 \mathbf{K}_m \mathbf{K}_c]^{-1}$, 此时求出 \mathbf{M} 与 \mathbf{H}_0 , 即可完成磁传感器标定。

2 椭球拟合递推最小二乘在线补偿算法

在没有磁干扰的情况下,磁传感器在一个固定区域内采集到的数据将构成一个以磁场强度为半径、球心在原点的球面

$$\begin{aligned} \|\mathbf{H}_{\text{local}}^b\|^2 &= (\mathbf{H}_m^b)^T (\mathbf{H}_m^b) = [\mathbf{M}(\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0)]^T [\mathbf{M}(\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0)] \\ &= (\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0)^T \mathbf{M}^T \mathbf{M} (\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0) \end{aligned} \quad (3)$$

椭球方程一般可表示为

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= ax^2 + by^2 + z^2 + 2dxy + 2exz + 2fyz + 2px + \\ &\quad 2qy + 2rz + g = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

令 $\xi = [a, b, d, e, f, p, q, r, g]^T$, 假设 i 时刻三轴磁力计的实测数据矩阵为

$\mathbf{H}_m = [x_i, y_i, z_i]^T, i=1, 2, 3, \dots, n$, 则 i 时刻测量数据矩阵可写为 $\alpha_i = [x_i^2 \ y_i^2 \ 2x_i y_i \ 2x_i z_i \ 2y_i z_i \ 2x_i \ 2y_i \ 2z_i \ 1]^T$, 令 $\mathbf{D} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T, \mathbf{Z}^2 = [z_1^2 \dots z_n^2]^T, \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 \dots \varepsilon_n]^T$ 结合式(4)可得

$$\boldsymbol{\varepsilon}_n = \mathbf{Z}_n^2 + \mathbf{D}_n \xi \quad (5)$$

则上式的最小二乘拟合问题为求在 $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|$ 最小化条件下的 ξ 。由递推最小二乘知识可得

$$\begin{cases} \mathbf{K}_n = \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{D}_n^T (\mathbf{D}_n \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{D}_n^T + \mathbf{R}_n)^{-1} \\ \hat{\xi}_n = \hat{\xi}_{n-1} + \mathbf{K}_n (\mathbf{Z}_n - \mathbf{D}_n \hat{\xi}_{n-1}) \\ \mathbf{P}_n = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_n \mathbf{D}_n) \mathbf{P}_{n-1} \end{cases} \quad (6)$$

根据上式可计算出椭球参数 ξ 。

将式(4)整理可得

$$\mathbf{H}_m^T \mathbf{E} \mathbf{H}_m + 2\mathbf{F}^T \mathbf{H}_m + \mathbf{G} = 0 \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{F} = [p \ q \ r]^T, \mathbf{G} = g$$

式(4)进一步改写为

$$(\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0)^T \mathbf{K} (\mathbf{H}_m - \mathbf{H}_0) = 1 \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{H}_0 = -\mathbf{E}^{-1} \mathbf{F}, \mathbf{K} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}_0^T \mathbf{E} \mathbf{H}_0 - \mathbf{G}}$$

尽量将磁传感器安装在磁场均匀对称分布的位置。此时认为 \mathbf{M} 为实对称矩阵。通过对比计算式(4)与式(3)可以求出 \mathbf{M} 与 \mathbf{H}_0 , 完成磁传感器误差补偿。

3 磁试验与结果分析

3.1 计算机仿真实验

首先,模拟车辆行驶引起姿态变化过程中磁传感器的输出,利用 IGRF 模型取地理坐标系下磁场强度为 $\mathbf{H}_n = [-47.388, 242.070, -499.743]^T$ mGs, 设置采样频率 10 Hz, 采样时间 200 s, 使用方向余弦矩阵将东北天坐标系下磁分量投影到载体系;然后,设置磁传感器噪声幅值 1 mGs。磁传感器添加灵敏度误差 \mathbf{M}^{-1} 和零偏误差 \mathbf{H}_0

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 \end{pmatrix}, \mathbf{H}_0 = [100, 100, 100]^T$$

模拟车辆姿态随时间变化如表 1 所示。

表 1 模拟车辆姿态随时间变化

时间/s	角速度/ ($^\circ \cdot \text{s}^{-1}$)	角度 变化/ $^\circ$	时间/s	角速度/ ($^\circ \cdot \text{s}^{-1}$)	角度 变化/ $^\circ$
0~10	[0,0,0]	[0,0,0]	87~97	[-1,1,1]	[-10,10,10]
10~19	[1,1,40]	[9,9,360]	97~115	[0,0,-10]	[0,0,-180]
19~29	[1,1,0]	[10,10,0]	115~125	[1,1,0]	[10,10,0]
29~39	[-1,1,1]	[-10,10,10]	125~135	[-1,1,1]	[-10,10,10]
39~49	[0,4,0]	[0,40,0]	135~145	[1,1,0]	[10,10,0]
49~59	[0,-4,0]	[0,-40,0]	145~155	[-1,1,1]	[-10,10,10]
59~77	[0,0,-10]	[0,0,-180]	155~173	[0,0,10]	[0,0,180]
77~87	[1,1,0]	[10,10,0]	173~200	[0,0,0]	[0,0,0]

用三轴磁传感器计算得到的航向角的误差大小来检验磁传感器误差补偿算法的有效性。

从图 1 和图 2 中可以看出,使用没有做过误差补偿的磁传感器数据计算航向角,误差最多可达 52.7° , 使用误差补偿算法对磁传感器补偿后,航向角误差在 $\pm 1^\circ$ 以内。表 2 列出了误差补偿算法计算出的磁传感器误差参数,与仿真设置参数接近,证明本文给出的磁传感器误差补偿算法在车辆仿真条件下是有效的。

3.2 实验分析

为了验证本文提出的磁传感器在线误差补偿算法在实际环境的有效性,使用包含三轴磁传感器的 MEMS 九轴传

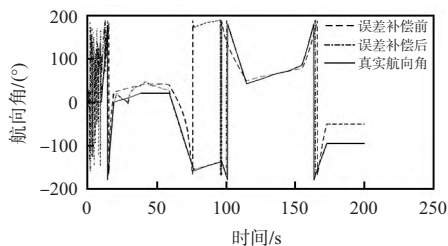


图 1 真实航向角与磁传感器误差补偿前后航向角

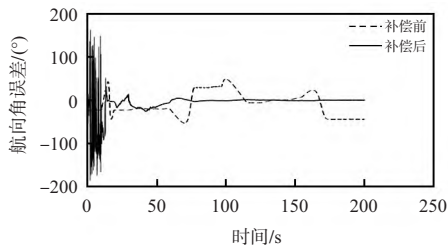


图 2 磁传感器误差补偿前后航向角误差

表 2 磁传感器误差参数

M	H_0
$\begin{pmatrix} 1.251 & 1.79 \times 10^{-4} & -2.67 \times 10^{-4} \\ 1.79 \times 10^{-4} & 1.251 & -1.15 \times 10^{-4} \\ -2.67 \times 10^{-4} & -1.15 \times 10^{-4} & 1.253 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 100.161 \\ 100.009 \\ 98.871 \end{pmatrix}$

感器(如图 3)在无磁大理石平台进行实验。实验时,首先手持九轴传感器在无磁大理石台附近的空中充分采集空间各个方向的磁数据,然后将九轴传感器放置在无磁大理石台,分别旋转 90°、180°和 270°作为参考基准,每次转动间隔 2 min。使用旋转前后的平均航向角差值与基准值做差,用来衡量磁传感器误差补偿算法的好坏。



图 3 自研 MEMS 九轴传感器

图 4 和图 5 分别为静止时磁传感器 Z 轴输出和由磁传感器输出计算的航向角,由图可知:磁传感器的噪声为 10 mGs 左右,计算的航向角标准差 0.96°。

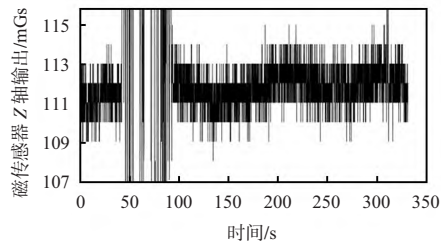


图 4 磁传感器 Z 轴输出

图 6 为实验过程中,使用磁传感器输出数据计算得到的航向角,误差补偿前 3 次转动前后航向角的平均值差值分别为 49.3°、75.0°、44.3°,最大误差为 45.7°。经过误差补偿后 3 次转动前后航向角的平均值差值分别为 88.5°、89.2°、88.8°。最大误差 1.5°。实验证明了磁传感器误差

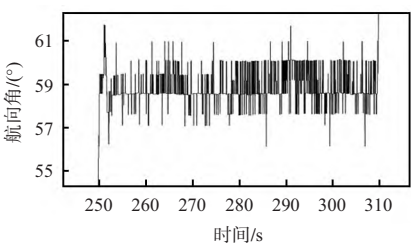


图 5 由磁传感器原始输出计算的航向角
补偿算法的有效性。

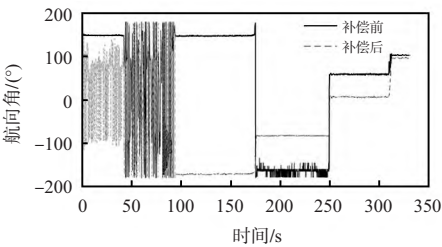


图 6 补偿前后航向角

4 结 论

本文利用地磁矢量在固定地点模值不变这一原理,建立椭球方程参数与磁传感器误差参数之间的关系,利用递推最小二乘计算出椭球参数,进而得到磁传感器误差参数。在本文设置的仿真条件下,利用经过补偿的磁力计计算的航向角误差在±1°以内。实验结果表明,经过误差补偿的磁传感器航向角误差最大为 1.5°。传统的磁传感器误差补偿算法需要事先收集磁传感器的数据,统一进行误差补偿。本文给出的磁传感器误差补偿算法克服了这个问题,减小了磁传感器的使用成本,具有很强的实用性。

参考文献:

[1] 赵敏华,石萌,曾雨莲,等. 基于地磁定轨和扩维卡尔曼滤波的导航算法[J]. 西安交通大学学报,2004,38(12):1315—1318.
ZHAO Minhua,SHI Meng,ZENG Yulian, et al. Navigation algorithms using magnetometers and augmented Kalman filtering[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University. 2004,38(12):1315—1318.
[2] 圣庆轩. MIMU/磁强计航姿参考系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009.
SHENG Qingxuan. Research of attitude heading reference system based on MIMU and magnetometer[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology,2009.
[3] 严恭敏,翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学,2019.
YAN Gongmin,WENG Jun. Strapdown inertial navigation algorithm and integrated navigation principle[M]. Xi'an: Northwest Polytechnic University,2019.
[4] SHOCKLEY J A, RAQUET J F. Navigation of ground vehicles using magnetic field variations[J]. Navigation, 2014, 61(4): 237—252.
[5] 高全明. 固定翼无人机航磁三分量系统误差校正与干扰补偿

- 技术研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- GAO Quanming, Research on system error calibration and interference compensation technology of aeromagnetic three-component survey based on fixed-wing UAV[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [6] 王婕,郭子祺,刘建英. 固定翼无人机航磁探测系统的磁补偿模型分析[J]. 航空学报,2016,37(11):3435-3443.
- WANG Jie, GUO Ziqi, LIU Jianying. Analysis on magnetic compensation model of fixed-wing UAV aeromagnetic detection system[J]. Journal of Aviation, 2016, 37(11): 3435-3443.
- [7] 吕辰,张晓明,檀杰,等. 基于遗忘因子递推最小二乘的无人机在线磁补偿技术研究[J]. 传感技术学报,2018,31(2):218-222.
- LÜ Chen, ZHANG Xiaoming, TAN Jie, et al. Research of on-line magnetic compensation technology for UAV based on forgetting factor and RLS[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(2): 218-222.
- [8] 郭鹏飞,任章,邱海韬,等. 一种十二位置不对北的磁罗盘标定方法[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(5):598-601.
- GUO Pengfei, REN Zhang, QIU Haitao, et al. Twelve-position calibrating method without north reference for magnetic compass[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2007, 15(5): 598-601.
- [9] 李翔,王勇军,李智,等. 航姿系统矢量传感器非对准误差及其校正[J]. 传感技术学报,2017,30(2):266-271.
- LI Xiang, WANG Yongjun, LI Zhi, et al. Inter-triad misalignment of vector filed sensors in attitude and heading reference system and its calibration[J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(2): 266-271.
- [10] 张滢,杨任农,李明阳,等. 基于截断总体最小二乘算法的车载三轴磁力仪标定[J]. 兵工学报,2015,36(3):427-432.
- ZHANG Ying, YANG Renrong, LI Mingyang, et al. Calibration of vehicular three-axis magnetometer via truncated total least squares algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 427-432.
- [11] LI W K, CAI H Y, ZHAO S L, et al. Real-time magnetic field calibration method based on extended Kalman Filter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1627(1): 012028.
- [12] MICHEL M, GOUDON J C, MARSY J M, et al. Process for compensating the magnetic disturbances in the determination of a magnetic heading, and devices for carrying out this process: US4414753[P]. 1983-11-15.
- [13] 安亮亮,王良明,钟阳. 弹载三轴磁强计的椭球拟合补偿方法[J]. 传感器与微系统,2020,39(12):4-6.
- AN Liangliang, WANG Liangming, ZHONG Yang. Ellipsoid fitting compensation method for three-axis magnetometer on projectile[J]. Transducer and Microsystems Technologies, 2020, 39(12): 4-6.
- 作者简介:**
- 段国文(1975-),男,硕士研究生,高级工程师,从事海洋环境总体技术研究工作。
- 杨迪(1998-),男,硕士研究生,研究方向为组合导航。
- 吕辰(1991-),男,博士研究生,研究方向为组合导航。
-
- (上接第40页)
- [11] LIANG S L, WU Y S, CHEN J F, et al. Identification of gesture based on combination of raw sEMG and sEMG envelope using supervised learning and univariate feature selection[J]. Journal of Bionic Engineering, 2019, 16(4): 647-662.
- [12] NARAYAN Y, MATHEW L, CHATTERJI S. sEMG signal classification with novel feature extraction using different machine learning approaches[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 35(5): 1-11.
- [13] 李佳妮,王云峰. 表面肌电信号的降噪处理[J]. 传感器与微系统,2017,36(7):42-44,49.
- LI Jiani, WANG Yunfeng. Noise reduction processing of surface electromyography signal[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(7): 42-44, 49.
- [14] 姚丽莎,张怡文,李春梅. 多小波融合策略的分段式指纹匹配算法[J]. 传感器与微系统,2019,38(4):128-131.
- YAO Lisha, ZHANG Yiwen, LI Chunmei. Segmented fingerprint matching algorithm based on multi-wavelets fusion strategy[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(4): 128-131.
- [15] CHEN Y M, YANG Z L, WANG J P. Eyebrow emotional expression recognition using surface EMG signals[J]. Neurocomputing, 2015, 168: 871-879.
- [16] FLANDERS M. Choosing a wavelet for single-trial EMG[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2002, 116(2): 165-177.
- [17] 王美,龙华,邵玉斌,等. 基于mRMR与因子分解机的分类模型研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2020,57(1):96-102.
- [18] CAI J, LUO J W, WANG S L. Feature selection in machine learning: A new perspective[J]. Neurocomputing, 2018(300): 70-79.
- [19] 马超. 基于FCBF特征选择和集成优化学习的基因表达数据分类算法[J]. 计算机应用研究,2019,36(10):2986-2991.
- 作者简介:**
- 冯凯(1996-),男,硕士研究生,研究方向为模式识别。
- 董秀成(1963-),男,通讯作者,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为智能信息处理,机器视觉。
- 刘栋博(1987-),男,博士,讲师,主要研究领域为智能信息处理,模式识别。