

文章编号: 2095-2163(2020)04-0203-06

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

基于地图匹配辅助的多惯导阵列的室内定位方法

范亚州, 管 启, 丁德锐

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 单个惯性定位导航系统(INS)在室内定位过程中的位移误差会随时间不断的积累,导致定位精度问题。本文提出了一种基于地图信息辅助的多惯导阵列室内定位算法。该方法通过抑制 INS 位移误差的发散,并辅以地图修正定位轨迹,从而提高室内定位的精度。仿真实验结果表明:加入地图辅助信息的惯导阵列室内定位方案比单个 INS 定位方案的性能明显改善,位移误差得到了有效抑制,并将平均定位误差控制在 1 m 左右。

关键词: 惯导阵列; IMU 矫正; 数据融合; 地图信息; 室内定位

Indoor Location Method Based on Map Matching and Multiple Inertial Navigation Arrays

FAN Yazhou, GUAN Qi, DING Derui

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] During the process of indoor localization, the localization error via a single inertial navigation system (INS) will accumulate over time, which results in low localization accuracy. This paper proposes an indoor localization algorithm based on map information-assisted multi-inertial arrays. The proposed method effectively improves the accuracy of indoor localization by suppressing the divergence of the INS localization errors combined with the trajectory correction based on the map. The simulation results show that the localization accuracy is prominently improved by utilizing the proposed indoor location method based on map matching and multiple inertial navigation arrays in comparison with single INS ones. Obviously, the localization error is effectively suppressed, and the average positioning error is controlled up to about 1 m.

[Key words] IMU Array; IMU calibration; data fusion; map information; indoor localization

0 引言

随着互联网的快速发展,移动机器人在服务行业的应用得到了广泛关注。例如,利用位置信息提供导航、跟踪等。移动机器人的应用服务研究主要包含两个方面:基于室外的位置信息应用服务和基于室内的位置信息应用服务。其中基于室外的定位技术已经日趋成熟,诸如美国的 GPS 定位系统、伽利略定位系统、中国的北斗定位系统等卫星定位导航系统。然而在室内环境中,由于室内的复杂环境,使得卫星定位导航系统的信号衰减严重,无法保证与室内的相关定位设备直接通信。因此,以 GPS 系统为代表的卫星定位导航系统并不适用于室内的定位。近年来,对于室内定位问题的研究主要集中在基于基础辅助设施的定位系统和全自主定位系统。文献[1]介绍了一种基于 Wifi-Fingerprint 的室内定位方法,这种方法不仅需要定位环境中有充足的

AP,而且还需要人工采集大量的训练数据,并需要建立指纹数据库。此外,还有些室内定位方法采用的是基于蓝牙、超声波、红外线、UWB、ZigBee 等技术^[2-4]。上述的定位手段主要是借助于一些基础设施,其优点是定位精度较高,缺点是不仅成本较高,而且可移植性非常低。如果定位环境缺乏相关基础设施,则无法实现定位。所以这些并不是最佳的移动机器人室内定位措施。

微电子机械系统(MEMS)技术的快速发展,使得完全依据自身定位设备的全自主定位系统成为可能。全自主定位系统最常用的方法是使用惯性测量单元进行自主的导航定位。基于惯性导航定位的技术原理是:通过一个起始点,移动机器人的前进方向、速度等信息,进而推算出当前的位置信息^[5]。文献[6]中介绍了基于惯性测量单元的定位技术,并比较了多种可用于惯性测量单元的传感器节点的

基金项目: 国家自然科学基金(61573246, 61703277); 上海市自然科学基金(18ZR1427000)。

作者简介: 范亚州(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:多传感器室内定位、视觉 slam; 管 启(1989-),男,博士研究生,主要研究方向:视觉 slam、机器人路径规划; 丁德锐(1981-),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:随机非线性系统控制与滤波、智能优化算法。

通信作者: 丁德锐 Email: deruiding2010@usst.edu.cn

收稿日期: 2019-08-22

优缺点。文献[7]介绍了GPS定位和惯性测量单元相结合定位系统。虽然基于惯性设备的定位方法不需要安装基础设施,但是这类定位方法具有累积误差和漂移误差的缺点,而且依靠单一惯性传感器定位的方法易受信号强度影响。文献[8-10]以集成式的方式描述了低成本多惯性传感器系统平台,该系统平台提高了单个惯性传感器的测量精度,增大了惯性传感器的测量范围,并且分析了多惯性传感器阵列相比单个惯性传感器的优点。根据上述分析,本文在惯性传感器阵列的数据融合室内定位算法的基础上,考虑到室内的地图信息,利用解算的Multi-IMUs-Array信息和地图信息约束,来提高定位精度。

1 惯性传感器阵列的校正

理想情况下,惯性测量单元(IMU)的三个灵敏轴是正交的。但由于IMU在制造过程中结构的不精确,导致加速度计和陀螺仪的三个灵敏轴往往是非正交的。因此,在融合来自IMU阵列的信息之前,需要对惯性传感器阵列进行校正。此外,在校正的过程中不仅要考虑单惯性传感器的比例因子误差、灵敏度轴的非正交性、偏置和噪声,还要考虑在集成制造过程中,每个惯性测量单元之间由旋转偏置造成的对齐误差。

1.1 惯性传感器阵列硬件

利用单片机和多个低成本的IMU,构建一个IMU阵列。该设备包括32个IMU和一个AVR32UC3C2512Mc芯片,如图1、2所示。



图1 嵌入式MIMU平台正面

Fig. 1 Embedded MIMU platform facade



图2 嵌入式MIMU平台反面

Fig. 2 The reverse of the embedded MIMU platform facade

其中,正面安装16个IMU,背面安装16个。每一个IMU包含三个正交加速度计、三个陀螺仪和三个磁力计。

1.2 惯性传感器阵列的校正理论

由于阵列中IMU安装的不完善,不同IMU的坐标轴不会完全对齐。为了对这些偏差进行建模,可通过参考单个惯性传感器的加速度计的校正模型,将其校正方法引入到多惯导阵列中的校正中。假设,惯性传感器阵列中第 j 个IMU加速度计三元组在方向 n 处,输出可由加速度校正模型^[11]得到:

$$F_n^{(j)} = f(\theta^{(j)}, \mathbf{u}_n^{(i)}) + \mathbf{v}_n^{(j)}, \quad (1)$$

$$f(\theta^{(j)}, \mathbf{u}_n^{(i)}) = \begin{cases} \mathbf{K}^{(i)} \mathbf{L}^{(i)} \mathbf{u}_n^{(i)} + \mathbf{b}^{(i)}, & j = i \\ \mathbf{K}^{(j)} \mathbf{L}^{(j)} (\mathbf{I} + [\xi^{(j)}]_{\times}) \bar{\mathbf{R}}_{(i)}^{(j)} \mathbf{u}_n^{(i)} + \mathbf{b}^{(j)}, & j \neq i \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{L}^{(i)} = \begin{bmatrix} \hat{\xi}_1 & -l_{yz}^{(i)} & l_{zy}^{(i)} & \hat{0} \\ \hat{0} & 1 & -l_{zx}^{(i)} & \hat{0} \\ \hat{0} & 0 & 1 & \hat{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{K}^{(i)} = \text{diag}(\mathbf{k}^{(i)})$ 表示第 i 个IMU的刻度系数矩阵; $\mathbf{L}^{(i)}$ 表示从第 i 个IMU所在实际平台坐标系,转换到理想平台坐标系的旋转矩阵; $F_n^{(j)}$ 表示第 j 个IMU在方向 n 处的输出测量值;参数 $\mathbf{k}^{(i)} = [k_x^i, k_y^i, k_z^i]^T$, $\mathbf{l}^{(i)} = [l_x^i, l_y^i, l_z^i]^T$, $\mathbf{b}^{(i)} = [b_x^i, b_y^i, b_z^i]^T$, $\mathbf{v}_n^{(i)} \in \mathbb{R}^3$,分别表示传感器增益、灵敏度轴的非正交性、偏置和噪声; $\mathbf{u}_n^{(i)} \in \mathbb{R}^3$ 为方向 n 处施加于第 i 个加速度计三元组上的真实比例; $\bar{\mathbf{R}}_{(i)}^{(j)} \in \text{SO}(3)$ 表示第 i 个IMU的理想平台坐标系旋转到第 j 个IMU理想平台坐标系的旋转矩阵; $\xi^{(j)}$ 表示第 j 个IMU所处实际平台坐标系与理想平台坐标系的对齐误差,且很小; $[\xi^{(j)}]_{\times}$ 表示对齐误差的反对称矩阵。进而, $k_x^{(i)}, k_y^{(i)}, k_z^{(i)}$ 分别表示IMU三个轴的刻度系数, $l_{yz}^{(i)}, l_{zy}^{(i)}, l_{zx}^{(i)}$ 分别表示第 i 个IMU的安装误差角, $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$ 。 N 和 M 分别为方向数和IMU的编号数。

在公式(1)中, $\theta^{(j)}$ 为需要校正的参数,所包含的参数项表示形式如下:

$$\theta^{(j)} = \begin{cases} [\mathbf{k}^{(i)}, \mathbf{b}^{(i)}, \mathbf{l}^{(i)}]^T, & j = i \\ [\mathbf{k}^{(j)}, \mathbf{b}^{(j)}, \mathbf{l}^{(j)}, \xi^{(j)}]^T, & j \neq i \end{cases} \quad (4)$$

为了估计参数 $\theta^{(j)}$,输入向量在球坐标系下重新写为:

$$\mathbf{u}_n^{(i)} = \alpha_n s(\varphi_n, \psi_n), \quad (5)$$

$$s(\varphi_n, \psi_n) = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi_n) & \cos(\varphi_n)\sin(\psi_n) & \cos(\varphi_n)\cos(\psi_n) \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

其中, φ_n, ψ_n 分别为第 i 个IMU的俯仰角和滚

转角。参数 $\{\theta^{(j)}\}_{j=1}^M$ 的极大似然估计值以及俯仰角 φ_n^{init} 和滚转角 ψ_n^{init} 初始估计值的计算可参考文献[12]。

1.3 校正方法

为了让参数 $\{\theta^{(j)}\}_{j=1}^M$ 有一个较好的估计值,应将方向 $\{s(\varphi_n, \psi_n)\}_{n=1}^N$ 尽可能的分布在单位球上,以此来平均随机和未建模的误差。但在实际过程中,本文采用一个具有20面的载体来进行惯性传感器阵列的校正,如图3所示。通过将硬件装置IMU阵列插入到这样一个正多面体中,随后将多面体(正二十面体)按顺序放置在已标记多记号的侧面,静置数秒收集数据,校正结果如图(4)所示。(注:加速度计出现负值,是因为静止放置的时候,另一面加速度计阵列校正测量的结果。)



图3 矫正装置

Fig. 3 Rectifying device

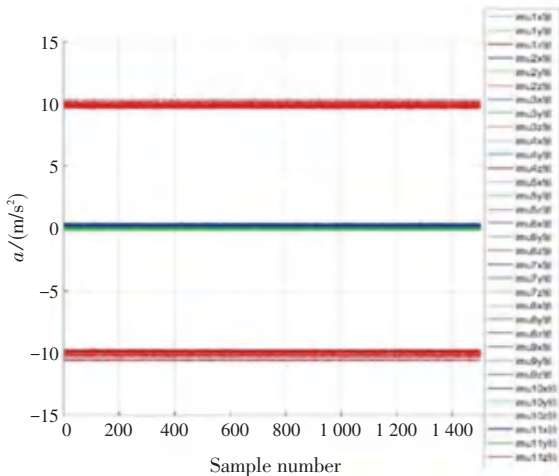


图4 矫正效果图

Fig. 4 A rendering of the correction

2 加速度计测量、模型建立及定位

2.1 加速度计模型的建立

惯性传感器的输出通常会受到测量噪声、确定

性偏差和偏差漂移等确定性和随机性误差的影响。一般加速度模型可以定义为^[13]:

$$y = a + b_d + b_v + v, \quad (7)$$

其中, y 是测量加速度值, a 是真正的加速度值, b_d 是确定性偏置误差, b_v 是随机偏差漂移, v 是导致速率随机游走(VRW)误差的测量白噪声。速率随机游走误差是由传感器测得的速率信号经积分后,在短时间内检测到的高频噪声。偏置漂移项也是传感器工作时的主要误差。本文考虑在较短的时间内可以忽略偏置漂移误差。因此,式(7)可以简化为:

$$y = a + v, \quad (8)$$

进而,通过考虑传感器的动态行为,随机游走过程是加速度计的一个典型模型,如下所示:

$$a_{k+1} = a_k + w_k, \quad (9)$$

根据式(7)-(9),可得单个加速度计状态空间模型表达式为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Fx_k + w_k, \\ Z_k = Hx_k + v_k, \end{cases} \quad (10)$$

其中 w_k 为过程噪声, v_k 为测量噪声。测量和过程噪声协方差矩阵分别具有以下特征:

$$Q = E\{w_k \cdot w_k^T\}, R = E\{v_k \cdot v_k^T\}. \quad (11)$$

2.2 融合算法

由于使用的是多个性能相同的惯性传感器,因此在实际应用,忽略传感器数据传送过程中时间戳的影响。本文采用最小均方误差(MMSE)融合,利用最小均方误差准则将测量向量、测量矩阵和测量噪声协方差矩阵结合起来。状态空间模型中的测量矩阵包含12个向量,通过使用最小均方误差,可以将测量矩阵的维数降低4倍。融合后的结果通过数据加权,使得所有传感器得到的测量向量和测量矩阵组合如下^[14]:

$$\begin{cases} \hat{R}_t = [\sum_i^{N_s} R_i^{-1}]^{-1} T, \\ \hat{Z}_t = R_t \sum_i^{N_s} R_i^{-1} y_i, \\ \hat{H}_t = R_t \sum_i^{N_s} R_i^{-1} H_i. \end{cases} \quad (12)$$

其中, R_t 、 Z_t 、 H_t 分别为 t 时刻的等效测量噪声协方差矩阵、测量向量矩阵和测量矩阵。 N_s 为惯性传感器测量单元的个数, y_i 为第 i 个惯性传感器测量单元的输出值, R_i 为第 i 个惯性传感器测量单元的测量噪声协方差矩阵。通过公式(12)的状态空间参数,三轴加速度估计值变化如下:

$$x = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T, F = I_{3 \times 3} \quad (13)$$

$$Z = [z_{tax} \quad z_{tay} \quad z_{taz}]^T, H = I_{3 \times 3}$$

2.3 使用加速度计信息实现定位

通过对惯性传感器阵列加速度数据的采集,并利用对加速度进行二重积分获得移动机器人的位置信息^[15]。为了减少积分误差及损失,采用梯形法得到采样信号的一阶近似。积分区域可由两块小的区域 Area1 和 Area2 组合而成,如图 5 及式(14)所示。为了获得连贯值,采样时间必须相同。采样时间由代表这块区域的宽来表示,同时区域的高代表采样得到的值。为了消除带有分数的乘法,假定时间为一个单位。另外,实验数据的仿真是在线下的进行的。

$$Area_n = \sum_{i=1}^n (Area_i) + \sum_{j=1}^n (Area_j) = \sum_{i=1}^n (Sample_n + \frac{|Sample_n - Sample_{n-1}|}{2} \times T_s) \quad (14)$$

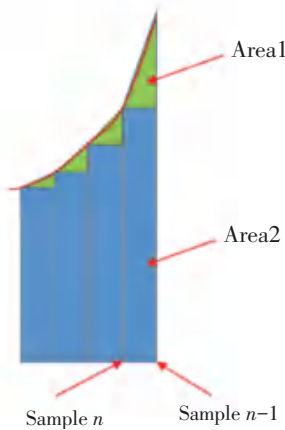


图 5 梯形法
Fig. 5 Trapezoidal method

3 地图信息辅助定位

3.1 地图匹配定义

地图匹配技术 (Map-Matching) 也称地图辅助技术。是一种通过算法利用地图信息限制定位误差,将计算得到的点坐标进行信息修正,并且呈现在数字地图上的方法。采用地图匹配技术不仅提供了移动装置位置信息在地图上实时显示的方法,而且可以提高移动装置的定位精度。

大多数情况下,采用传感器获得的移动位置信息并没有落在道路上,所以还需要由一定的地图辅助算法修正计算,得到定位点在道路上的匹配点,用该匹配点来代替不合适的定位点作为最终移动设备的估计位置。定位点以及轨迹修正示意如图 6 所示。

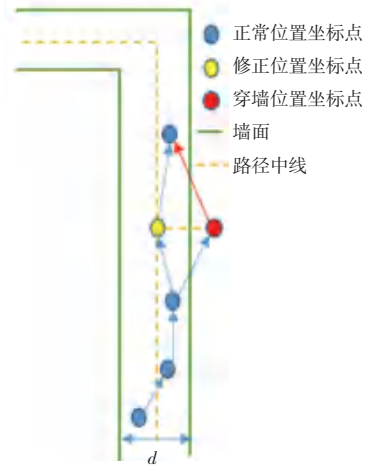


图 6 地图信息辅助以及位置修正示意图

Fig. 6 Map information assistance and location correction diagram

3.2 基于位置点的地图匹配

基于位置点的地图匹配算法的基本原理是:将解算的位置信息坐标点向附近道路作投影,投影后的坐标点作为最终修正后的位置信息。本文以地图路径的中线为参考路径,采用垂直投影的修正定位方法来修正定位信息。定位修正流程如图 7 所示。

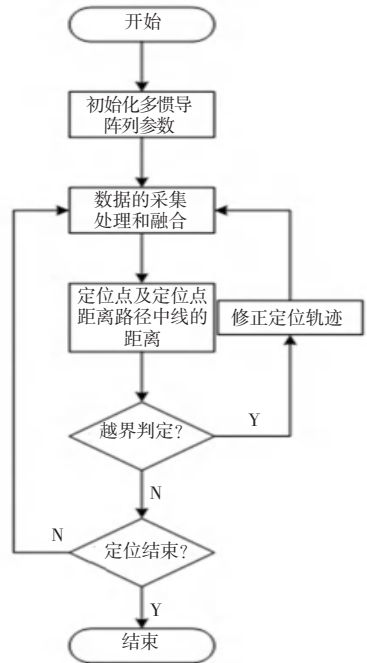


图 7 定位以及定位修正流程图

Fig. 7 Location and location correction flow chart

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验参数设定

为了验证本文提出的基于 Multi-IMUs-Array 与地图信息融合的室内定位算法,评估该算法在验证累积误差上的有效性,采用 Matlab 软件进行仿真实验,来分析算法性能的优劣。本实验相关仿真环

境及参数设置如下:假设移动机器人的运行轨迹为 30 m×30 m 的回字型环境,起点和终点坐标为(5, 5),采样时间设为 0.2 s,共分四个阶段(对应轨迹的四个边),每个阶段分为匀加速,匀速和匀减速三个阶段。本文采用平均定位误差作为定位性能的测量标准。定位误差是指实际位置和估计位置之间的欧几里得距离。为了说明该算法的有效性,从平均误差的角度比较了地图信息辅助下的 Multi-IMUs 位置信息、Multi-IMUs 位置信息以及 Single-IMU 位置信息。实验平均定位误差计算公式如下:

$$err = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_i^{ref})^2 + (y_i - y_i^{ref})^2}. \quad (15)$$

其中, N 表示采样总数, (x_i^{ref}, y_i^{ref}) 表示轨迹理想位置信息, (x_i, y_i) 表示在地图信息约束下融合后的位置信息。

4.2 实验结果分析

实验分别构建了不同传感器信息下的轨迹信息。在 Single-IMU、Multi-IMUs-Array 以及地图信息约束下,Multi-IMUs-Array 的轨迹以及平均定位误差如图 8 和表 1 所示。

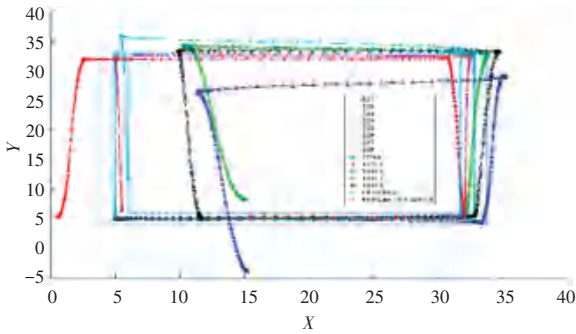


图 8 地图信息下多惯导阵列以及单个惯导位置解算轨迹

Fig. 8 The trajectory of multiple inertial navigation array and single inertial navigation position is calculated under map information

表 1 本文方法和其他方法的平均定位误差比较

Tab. 1 Comparison of average positioning error between the method in this paper and other methods

| | IMU1 | IMU2 | IMU3 | IMU4 | Multi-IMU-Array | 本文方法 |
|------|------|------|------|------|-----------------|------|
| 平均误差 | 5.35 | 4.89 | 5.01 | 4.06 | 2.94 | 1.12 |

通过仿真结果可以看出,多惯导传感器阵列结合地图信息的轨迹更加接近真实轨迹,其它两种方法均会产生较大的漂移误差。而单纯使用惯性传感器定位时,产生的漂移误差更大。从图 6 可以看出,单纯使用惯性传感器定位算法所产生的最大漂移误差达到了 13.57 m 左右;多惯导传感器阵列进行定位时所产生的最大漂移误差达到了 6.75 m 左右。

因此可以看出,通过多惯导传感器阵列的数据融合,在一定程度上减小了定位误差。此外,结合所提出的室内地图信息辅助多惯导传感器阵列的室内定位算法,将定位的平均误差降低到了 1 m 左右,且修正后的轨迹得到了较为满意的结果。实验的结果表明,所提出的基于地图信息辅助的惯导阵列的多传感器数据融合的定位算法,一方面可以平滑轨迹,另一方面,可以降低累积误差,有效地提高了整体定位精度。

5 结束语

针对单个惯性传感器定位方法存在的漂移和累积误差问题,本文提出了一种基于地图匹配方法辅助,以阵列形式排列的惯性传感器数据融合的室内定位算法。仿真实验结果表明,与单一传感器的定位算法相比较,本文提出的方法具有较高的定位精度。并且在一定范围内改善了单个惯性传感器定位的漂移效应,修正了移动轨迹,且有较强的鲁棒性,提高了整个定位系统的有效性。实验表明,多种数据信息和多传感器之间的信息融合将成为今后的研究方向和重点。

参考文献

- [1] FARSHAD A, LI J, MARINA M K, et al. A microscopic look at WiFi fingerprinting for indoor mobile phone localization in diverse environments[C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. IEEE, 2013: 1-10.
- [2] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.
- [3] GU Y, LO A, NIEMEGEREERS I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 13-32.
- [4] HOSSAIN A K M M, VAN H N, JIN Y, et al. Indoor localization using multiple wireless technologies[C]//2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. IEEE, 2007: 1-8.
- [5] COLLIN J, MEZENTSEV O, LACHAPELLE G. Indoor positioning system using accelerometry and high accuracy heading sensors[C]//Proc. of ION GPS/GNSS 2003 Conference. 2003: 9-12.
- [6] RANDELL C, DJIALIS C, MULLER H. Personal position measurement using dead reckoning [C]//Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003. Proceedings. IEEE, 2003: 166-173.
- [7] BEAUREGARD S, HAAS H. Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning[C]//Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication. 2006: 27-35.
- [8] SKOG I, NILSSON J O, HÄNDEL P. An open-source multi inertial measurement unit (MIMU) platform [C]//2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS). IEEE, 2014: 1-4.