

基于 IMU 阵列的标定方法

王创, 梁伟, 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: 微电子机械系统 (MEMS) 技术的发展使惯性传感器行业发生了革命性的变化, 这使得生产惯性传感器阵列成为可能; 然而, 低成本的惯性测量系统会受到比例因子和轴失准误差的影响, 从而造成位置和姿态估计的精度降低; 在单个 IMU 校正的基础上, 设计了一套基于 IMU 阵列的标定方法, 该标定方法为了解决传统六面法在标定 IMU 阵列过程中方向激励不足的问题, 设计了正 20 面的校正装置, 该标定方法不仅能够估计出 IMU 阵列中单个 IMU 的比例因子、轴失准误差和偏置, 还能估计出阵列中不同 IMU 之间的坐标轴对齐误差; 通过把标定结果和用户所给的校正参数进行对比, 可以得到经过文章所提的 IMU 阵列标定方法得到的标定结果能够达到工厂标定结果的 50% 以上。

关键词: 惯性传感器阵列; IMU; 标定; L-M 算法; 惯性导航

Calibration Method Based on IMU Array

Wang Chuang, Liang Wei, Guan Qi, Ding Derui

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The development of micro electromechanical systems (MEMS) technology has revolutionized the inertial sensor industry, which has made it possible to produce inertial sensor arrays. However, low-cost inertial measurement systems are affected by scale factors and axis misalignment errors, which can lead to reduced accuracy of position and attitude estimation. Based on the calibration of a single IMU, a calibration algorithm based on the IMU array is designed in this paper. In order to solve the problem of insufficient directional excitation during the calibration of the IMU array using the traditional six-sided method, a calibration device with positive 20 sides is used. This calibration algorithm can not only estimate the scale factor, axis misalignment error and offset of a single IMU in the IMU array, but also estimate the coordinate axis alignment error between different IMUs in the array. By comparing the calibration results with the calibration parameters given by the user, it can be obtained that the calibration results obtained by the IMU array calibration method proposed in this paper can reach more than 50% of the factory calibration results.

Keywords: inertial sensor array; IMU; calibration; L-M algorithm; inertial navigation

0 引言

微电子机械系统 (MEMS) 技术的发展使惯性传感器行业发生了革命性的变化, 这使大规模生产超低成本惯性传感器成为可能。今天人们可以通过花费十几块钱就能够买到一个具有几平方毫米的惯性测量单元 (IMU)。这些低成本小尺寸的 IMU, 使得构建大型的 IMU 阵列成为了可能, 科研人员通过融合来自 IMU 阵列输出的数据信息, 就能获得单个 IMU 不可比拟的性能, 有关更多 IMU 阵列系统的具体内容请参见文献[1]。

低成本的 MEMS 类型 IMU 的输出数据通常是未经校

准补偿的^[2-4]。集成电路在进行制造和封装过程中的缺陷, 往往导致 IMU 的灵敏轴没有完全对齐, 从而产生了轴失准误差和比例误差, 这些误差项的存在导致了 IMU 输出数据的不准确。因此在融合来自 IMU 的信息前, 应该对 IMU 进行校正补偿。在工业界, 对 IMU 进行标定校准需要昂贵的机械校正平台^[5-7]。在实验室级别的使用过程中, 研究者们提出了不需要旋转机的简化标定方法^[8-10]。这些方法利用重力矢量大小的先验知识来对未知参数进行估计, 但仅限于单个 IMU 的校正。

近年来, 由低成本的 IMU 组成的惯性传感器阵列受到越来越多的研究人员的关注。越来越多的研究人员把由低成本 IMU 组成的惯性传感器阵列应用在机器人的自主导航中。但是在使用由低成本 IMU 组成的惯性传感器阵列进行组合导航时, 必须对惯性传感器阵列进行标定。在对惯性传感器阵列的标定的过程中不仅要组成阵列的单个 IMU 进行标定, 还要对惯性传感器阵列中 IMU 相对与标准坐标系的偏角进行标定。对单个 IMU 的校正建模已经非常成熟, 但是对 IMU 阵列的校正模型研究比较少。

鉴于上述分析, 本文首先对单个 IMU 的校正模型进行了分析和建模, 然后在单个 IMU 校正模型的基础上, 根据

收稿日期:2020-01-15; 修回日期:2020-03-13。

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

作者简介:王创(1991-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理和多传感器数据融合方向的研究。

丁德锐(1981-), 男, 安徽合肥人, 博士, 副教授, 博士研究生导师, 主要从事随机非线性控制与滤波, 智能算法与图像处理方向的研究。

通讯作者:管启(1989-), 男, 山东莱芜人, 博士生, 主要从事视觉 SLAM 和多传感器数据融合方向的研究。

IMU 阵列的特殊性建立了惯性传感器阵列的校正模型, 该模型不仅包含了单个 IMU 的尺度、偏置和灵敏轴误差, 还包含了惯性传感器阵列中 IMU 间的坐标系非对齐误差。由于惯性传感器阵列校正模型的非线性, 本文构造了基于最小二乘法的代价函数, 采用 L-M 算法来求解校正参数。在进行非线性求解的过程中需要足够多的外部激励, 为此本文设计了一个具有 20 面的标准多面体, 该 20 面体采用 3D 打印机获取。

1 IMU 的误差模型

在理想情况下 IMU 的 3 轴加速度计和 3 轴陀螺仪使用了同一个正交三维坐标系。加速度计能感知不同方向上的加速度, 而陀螺仪能测量围绕同一轴的角速度。不幸的是, 由于 IMU 的封装过程的不准确, 导致加速度坐标系和陀螺仪坐标系形成两个不同的非正交坐标系, 见图 1。

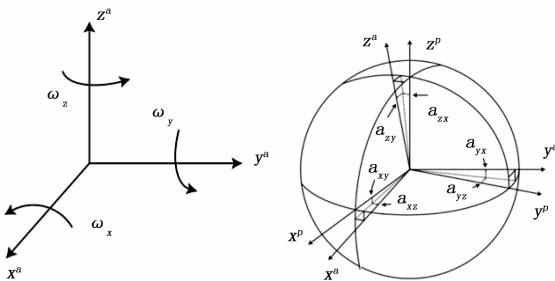


图 1 IMU 的轴失准误差

由于加速度计的 3 个灵敏轴和陀螺仪的 3 个灵敏轴与平台坐标轴的正交坐标系仅相差较小的角度, 则在加速度计坐标中的比力测量可转化为平台坐标中的比力估计值

$$s^p = T s^a, \quad T = \begin{bmatrix} 1 & -\beta_{yz} & \beta_{zy} \\ \beta_{zx} & 1 & -\beta_{xz} \\ -\beta_{xy} & \beta_{yx} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, s^p 表示平台坐标系下的加速度计的比力或陀螺仪的角速度, s^a 表示加速度计坐标系下的比力或陀螺仪坐标系下的角速度。这里 β_{ij} 是加速度计或陀螺仪的第 i 个敏感轴绕第 j 个平台正交轴的微小旋转角。

理想的平台坐标系是正交的, 通过使平台坐标轴的 x_p 和加速度计坐标的 x_a 灵敏轴重合, 则平台坐标系的 y_p 轴就会落在由 x_a 和 y_a 所成的平面上, 那么公式 (1) 中角 β_{zx} 、 β_{xy} 和 β_{yx} 变为零, 加速度计坐标系和平台坐标的关系可以重新写为如下形式:

$$s^p = T_a^p s^a, \quad T_a^p = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & \alpha_{zy} \\ 0 & 1 & -\alpha_{xz} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

公式 (1) 中的 β 表示加速度计和陀螺仪通用的误差角, 在公式 (2) 中用 α 表示适用于加速度计的情况。

如前所述, 陀螺仪和加速度计的测量应该共用相同的参考系, 由公式 (2) 可以得到陀螺仪的相关表达:

$$\omega^p = T^a \omega^a, \quad T^a = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{yz} & \gamma_{zy} \\ 0 & 1 & -\gamma_{xz} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: ω^p 和 ω^a 分别表示平台坐标系下的角速度和陀螺仪坐标系下的角速度, γ_{ij} 表示第 i 个陀螺仪敏感轴绕第 j 个平台轴的微小旋转角。

图 1 中的 x^a, y^a, z^a 表示加速度计的敏感轴, x^p, y^p, z^p 表示理想的正交轴, 理想的正交轴和加速度计灵敏轴的偏角可以表示为 $\alpha_{xy}, \alpha_{xz}, \alpha_{yz}, \alpha_{xr}, \alpha_{yr}, \alpha_{zr}$ 。

MEMS 类型的传感器输出的信息是和电压成比例的电信号, 输出电压和作用在传感器灵敏度轴上物理量之间的关系由制造商的数据表给出, 由于 MEMS 传感器的固有非线性导致输出电压和传感器测量的信号之间的真实比例不同, 我们称此不同为刻度系数误差或者比例误差。此外, MEMS 传感器的输出信号中通常会含有一个小小的偏差, 具体的表现是, 即使没有力作用在传感器上, 传感器也会有非零的输出, 称该非零输出为偏置。

对加速度计和陀螺仪都受到偏差和刻度系数误差进行如下的建模, 其中刻度系数矩阵可以表示为:

$$k^a = \begin{bmatrix} s_x^a & 0 & 0 \\ 0 & s_y^a & 0 \\ 0 & 0 & s_z^a \end{bmatrix}, \quad k^g = \begin{bmatrix} s_x^g & 0 & 0 \\ 0 & s_y^g & 0 \\ 0 & 0 & s_z^g \end{bmatrix} \quad (4)$$

偏置向量建模为:

$$b^a = \begin{bmatrix} b_x^a \\ b_y^a \\ b_z^a \end{bmatrix}, \quad b^g = \begin{bmatrix} b_x^g \\ b_y^g \\ b_z^g \end{bmatrix} \quad (5)$$

针对上述的误差进行整体的数学建模, 则完整的传感器误差模型可以用下式表示:

$$\tilde{s}^a = K_a (T_a^p)^{-1} s^p + b_a + v_a \quad (6)$$

式中, $\tilde{s}^a = (T_a^p)^{-1} s^p$ 来自式 (1) 的变形, v_a 为反映传感器测量噪声的噪声项。这里的输入 u_k 对应于加速度计模型 k 时刻的比力 s^p 或者陀螺仪模型的角速度 ω_k 。

式 (6) 是对 IMU 的确定性误差的建模, 该模型适用于所有的类型的 IMU。但是 MEMS 类型的 IMU 不仅包含式 (6) 中包含的确定性误差, 还包含由微电子结构特性造成的随机误差, 随机误差主要是指 MEMS 类型 IMU 输出数据所包含的高斯白噪声和 bias 随机游走。本文仅仅对 MEMS 类型 IMU 阵列的确定性误差进行校正。

2 IMU 阵列误差模型的构建

上一节对 MEMS 类型 IMU 的确定性误差进行了数学建模, 本小节主要对 IMU 阵列的确定误差进行了数学模型的建立。IMU 阵列所包含的误差不仅含有来自单个 IMU 的灵敏轴失准误差、偏置和刻度误差, 还包括 IMU 阵列中不同 IMU 之间的非对齐误差。

由于 IMU 阵列在安装和焊接过程中的存在不完善, 这就导致了不同 IMU 的坐标轴不会完全对齐, 称 IMU 阵列上不同 IMU 的非对齐性为 IMU 阵列的非对齐误差。为了

方便对 IMU 间的非对齐误差进行建模, 本文令 $R_{ij}^{(j)}$ 表示未知的旋转矩阵, 该矩阵描述了第 i 个 IMU 灵敏度轴和第 j 个 IMU 灵敏度轴所测量的坐标系之间的真实方向。通常在 IMU 阵列安装过程中第 j 个 IMU 的对准误差在 5 度以内, 本文用以下形式来对该对准误差进行描述 $\xi^{(j)} = [\xi_x^{(j)} \ \xi_y^{(j)} \ \xi_z^{(j)}]^T$ 。

因为 $\xi^{(j)}$ 很小, 一般低于 5 度, 所以可以对矩阵 $R_{ij}^{(j)}$ 进行一阶近似, 近似的结果如下:

$$R_{ij}^{(j)} = (I + [\xi^{(j)}]_{\times}) \bar{R}_{ij}^{(j)} \quad (7)$$

式中, I 表示单位矩阵 $[\xi^{(j)}]_{\times}$ 表示为 3×3 的斜对称矩阵。 $\bar{R}_{ij}^{(j)}$ 描述第 i 个 IMU 和第 j 个 IMU 之间的方向。如果安装过程中没有误差, 则旋转矩阵 $\bar{R}_{ij}^{(j)}$ 是已知的。

通过以上对 IMU 阵列独有的误差项的分析, 本文在单个 IMU 确定性误差模型的基础上建立了 IMU 阵列的误差模型, 在 IMU 阵列的误差模型中假设阵列中第 i 个加速度计的输出可以看做为第 j 个加速度计的输入和参数 $\theta(j)$ 的函数:

$$y_n^{(i)} = f(\theta^{(j)}, u_n^{(i)}) + v_n^{(j)} \quad (8)$$

其中:

$$f(\theta^{(j)}, u_n^{(i)}) = \begin{cases} K^{(i)} L^{(i)} u_n^{(i)} + b^{(i)}, & j = i \\ K^{(i)} L^{(i)} (I + [\xi^{(j)}]_{\times}) \bar{R}_{ij}^{(j)} u_n^{(i)} + b^{(i)}, & j \neq i \end{cases} \quad (9)$$

式中, $K^{(i)}$ 表示第 i 个 IMU 的刻度系数, $L^{(i)}$ 表示 i 个 IMU 的非正交灵敏轴, $b^{(i)}$ 表示 i 个 IMU 的偏置, $v_n^{(j)}$ 表示噪声项, $f(\cdot)$ 是第 i 个加速度计的输出做为第 j 个加速度计的输入和参数 $\theta(j)$ 的函数。

根据上述对参数的物理解释, IMU 阵列校正的参数模型表示如下:

$$\theta^{(j)} = \begin{cases} [k^{(i)}, b^{(i)}, l^{(i)}]^T, & j = i \\ [k^{(j)}, b^{(j)}, l^{(j)}, \xi^{(j)}]^T, & j \neq i \end{cases} \quad (10)$$

通过观察式 (10) 可以知道当 $j=i$ 时, 需要估计的参数就是单个 IMU 校正的参数, 此时的 IMU 阵列校正模型退化成了单个 IMU 校正; 当 $j \neq i$ 时, 校正的参数是包含 IMU 阵列不同 IMU 间的非对齐误差。

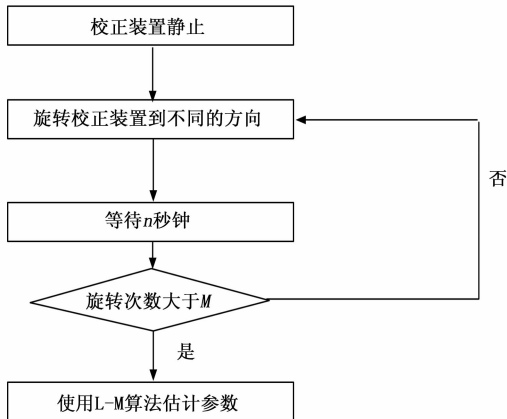


图 1 IMU 阵列校正流程

3 IMU 阵列校正算法设计

在上一节中本文建立了 IMU 阵列的误差模型, 通过公式 (10) 可以知道参数 $\theta^{(j)}, j \in (1, M)$ 包含了 IMU 阵列中单个 IMU 的轴失准误差、偏置、刻度误差和 IMU 阵列中 IMU 间的非对齐误差。通过建模分析可知校正的参数 $\theta^{(j)}$ 的维度是 15 维。传统的六面标定法显然不能够为 IMU 阵列的校正提供如此多的校正激励, 为此本文针对 IMU 阵列的校正设计了一个 20 面体校正装置, 该校正装置能够为 IMU 阵列校正提供充足的外部激励。

在 IMU 阵列误差模型和本文所设计的校正装置基础上设计了如图 1 所示的校正方案。

3.1 IMU 阵列校正函数的构建

为了估计参数 $\theta^{(j)}$, 需要对输入向量 $u_n^{(i)}$ 进行简单的变换。在 IMU 阵列标定的过程中, 当地的重力加速度是标定过程中一个合适的参考。

在 IMU 阵列静止时, 它只受当地的重力加速度作用, 则 IMU 阵列的输入 $u_n^{(i)}$ 就是当地的重力加速度 g 。实际上, 校正平台的加速度输入和 IMU 阵列的导航坐标系的重力矢量是通过旋转矩阵 R_n^i 进行转换的。旋转矩阵 R_n^i 的具体表达式如下:

$$R_n^i = \begin{pmatrix} c\psi c\varphi & s\psi c\varphi & -s\varphi \\ -s\psi c\varphi + c\psi s\varphi s\varphi & c\psi c\varphi + s\psi s\varphi s\varphi & c\varphi s\varphi \\ s\psi s\varphi + c\psi s\varphi c\varphi & -c\psi s\varphi + s\psi s\varphi c\varphi & c\varphi c\varphi \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, c 代表余弦函数, s 代表正弦函数, φ 表示偏航角、 φ 表示俯仰角、 ψ 表示翻滚角。

经过旋转矩阵 R_n^i 的变换, 则输入向量 $u_n^{(i)}$ 可以变为如下形式:

$$u_n^{(i)} = R_n^i \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} = g \begin{pmatrix} -\sin\varphi_n \\ \cos\varphi_n \sin\psi_n \\ \cos\varphi_n \cos\psi_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, φ_n 和 ψ_n 分别表示第 i 个 IMU 的俯仰角和翻滚角。 g 是当地的重力加速度。

当 IMU 阵列静止时, 输入矢量只有 2 自由度, 而每个加速度计提供了一个在 \mathbb{R}^3 中的重力矢量的估计值。这意味着 15 维的校正参数通过式 (12) 的变换, 减少了 3 维, 只要能够在校正过程中提供至少 12 个非共面的方向激励, 参数 $\theta^{(j)}$ 就能够得到估计。

假设式 (8) 中的测量噪声为高斯白噪声, 且不同 IMU 之间的噪声互不相关, 通过求解如下代价函数最小值得到参数 $\theta^{(j)}$ 的最优估计:

$$\{\hat{\theta}^{(j)}\}_1^M = \min_{\{\theta^{(j)}\}_1^M} \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \|y_n^{(j)} - f(\theta^{(j)}, g s(\varphi_n, \psi_n))\|^2 \quad (13)$$

针对式 (13) 的求解, 本文采用了 L-M 算法来对该非线性问题进行求解。为了降低最小化算法陷入局部极小值的风险, 选取合适的初始值就显得尤为重要。在本文中初始参数值应设置为 IMU 数据表中给定的标称值。对于初始角 φ_n^{init} 和 ψ_n^{init} 的计算可以采用如下的公式计算:

$$\varphi_n^{mit} = \text{atan}^2([\mathbf{y}_n^{(j)}]_y, [\mathbf{y}_n^{(j)}]_z)$$

$$\psi_n^{mit} = \text{atan}^2(-[\mathbf{y}_n^{(j)}]_x, \sqrt{[\mathbf{y}_n^{(j)}]_y^2 + [\mathbf{y}_n^{(j)}]_z^2}) \quad (14)$$

式中, $[\mathbf{a}]_k, k \in (x, y, z)$ 表示向量 \mathbf{a} 中的第 k 个元素。

3.2 IMU 阵列校正装置的设计

通过上述的分析可以知道 IMU 阵列需要校正的参数有 15 维, 经过公式 (12) 对输入的重力加速的简单变换, 使 IMU 阵列的校正激励输入从 15 维降低到了 12 维。针对 12 维的校正激励输入, 传统的六面标定法显然已经不能够满足 IMU 阵列的校正需求, 这主要是由于六面法提供的激励不能够使方程校正方程 (13) 满秩, 方程不满秩就会导致校正参数结果的不唯一, 这显然不是 IMU 阵列参数校正需要的结果。

为了保证在 IMU 阵列校正的过程中获得充足的方向激励, 本文设计了一个如图 2 所示的正 20 面球体。该球体是由 20 个平面组成, 它能够提供 20 个不同方向的平面, 每个平面都能为 IMU 阵列的校正提供方向上的激励。



图 2 IMU 阵列校正装置

多面体的提供的方向数量决定了校正的精度, 精度和校正时间符合正相关的关系。因此在标定实验过程中, 用户可以根据实际的需求来选取合适的校正方向数和静止时间。本文所设计的 20 面体另一个好处是它能够平均一些随机误差和一些未建模的误差。

4 IMU 阵列校正试验

为了验证本文所提的校正方案的有效性, 本文对如图 3

所示的 IMU 阵列进行了校正, 该 IMU 阵列集成了来自 In-sense 的 32 个 MPU-9250 型 IMU 和一个来自 Atmel 的 AT32UC3C2512 微控制器。

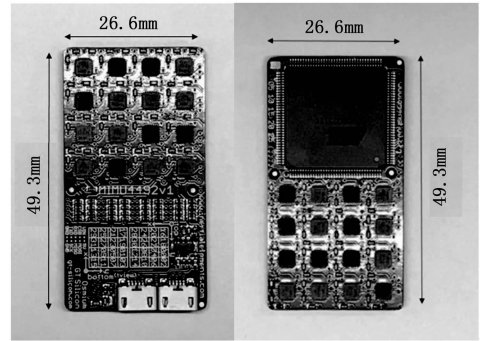


图 3 IMU 阵列单元

为了保证所设计校正算法的有效性, 本文记录了 15 个校准集, 每个校准数据集包含了利用本文设计的 20 面体所提供的 15 个不同平面上的数据, 具体的校正流程请参考图 2。从 15 个校准集中得到参数 $\hat{\theta}^{(j)}, j \in (1, M)$ 的均值和范围估计如表 1 所示。

由于选取的 IMU 阵列单元中的 IMU 个数太多, 本文只对阵列中的前 6 个 IMU 的参数做了展示。表 1 中, 刻度系数 k_x, k_y, k_z 没有单位, 加速度计偏置量 b_{ax}, b_{ay}, b_{az} 的单位为 m/s^2 , IMU 的安装误差角 l_{yx}, l_{zy}, l_{zx} 的单位为 rad , 坐标系对齐误差 ξ_x, ξ_y, ξ_z 的单位为 rad , 陀螺仪偏置量 b_{gx}, b_{gy}, b_{gz} 的单位为 rad/s 。表 1 中编号为 1 的 IMU 所在的坐标系定义为 IMU 阵列的参考坐标系。即, 编号为 1 的 IMU 没有估计 IMU 之间额外对齐误差。通过分析表 1 中的校正均值校正结果的量程值表明, 校正结果的一致性。

为了说明校正参数的准确性, 本文参考了 Invensense 公司的 MPU-9250 技术手册, 并使用了第一个 IMU 估计参数的结果和官方所给的参数进行了比较, 结果如表 2 和表 3 所示。

表 1 数据表

IMU	k_x	k_y	k_z	b_{ax}	b_{ay}	b_{az}	l_{yx}
1	0.997 512	0.999 96	1.005 537	-0.104 27	0.325 302	-0.120 96	-0.001 32
2	0.996 088	0.997 854	1.011 238	-0.210 78	0.166 577	0.011 041	-3.09E-05
3	0.996 988	0.999 626	1.006 043	-0.206 82	0.294 312	0.055 91	-0.003 43
4	0.997 547	0.999 938	1.007 016	-0.305 18	0.117 71	0.325 742	-0.000 82
5	0.996 405	1.000 411	1.001 638	-0.140 69	0.371 709	0.034 028	-0.003 4
6	0.998 661	1.005 233	1.001 406	-0.049 57	-0.099 48	-0.455 02	0.001 510 3

IMU	l_{zy}	l_{zx}	ξ_x	ξ_y	ξ_z	b_{gx}	b_{gy}	b_{gz}
1	-0.003 66	-0.005 34	0	0	0	-0.509 62	-0.390 78	0.182 876
2	2.23E-05	0.005 44	0.001 538	-0.002 66	-0.003 75	-0.190 83	-0.532 95	-1.121 76
3	-0.001 18	-0.002 39	-0.004 96	0.001 218	-0.002 17	1.385 679	-0.076 15	0.129 852
4	0.002 52	0.000 897	0.000 961	0.001 83	-0.005 22	-0.699 93	-0.462 8	-0.407 53
5	0.002 145	0.003 183	-0.002 69	0.002 173	0.000 744	-1.311 58	-0.655 98	0.840 208
6	0.008 106	0.025 504 2	0.000 581	0.002 468	-0.007 394	-0.183 96	1.006 584	0.126 783

表 2 加速度计比例因子误差

k_x	k_y	k_z
0.997 512	0	0
0	0.999 96	0
0	0	1.005 537
1.002 4	0	0
0	1.000 0	0
0	0	1.004 3

表 3 敏感轴失准误差

l_{yz}	l_{zy}	l_{xz}
-0.001 315	0	0
0	-0.003 6	0
0	0	-0.005 341
$\pm 0.002 5$	0	0
0	$\pm 0.002 5$	0
0	0	$\pm 0.002 5$

表 4 加速计和陀螺仪的偏置

b_{ax}	b_{ay}	b_{az}
-0.104 27	0	0
0	0.325 302	0
0	0	-0.120 96
-0.509 62	0	0
0	-0.390 78	0
0	0	0.182 876

表 2 和表 3 的左边是经过所提校正方案得到的校正结果, 右边是 MPU-9250 技术手册提供的加速度计的比例因子误差和敏感轴失准误差的范围, 由于 MEMS 类型的传感器受环境温度的影响, 不同的校正环境的温度会导致不同的校正结果, 但是两者的校正的数量级还在同一个级别, 这证明了所提校正方法的有效性。

对于 MEMS 型的 IMU, 它的加速度计和陀螺仪的偏置是随机游走的, 还不能针对长时间的偏置给出一个长时间的标定输出, 表 4 仅仅给出了在室温为 25 °C 的环境下, 对加速计和陀螺仪的偏置的标定结果。

5 结束语

本文首先分析了单个 IMU 的确定性误差, 并对单个 IMU 的确定性误差建立了数学模型。然后在单个 IMU 误差数学模型的基础上, 考虑到 IMU 阵列的特殊性, 设计了一套基于 IMU 阵列确定性误差的标定方案。该标定方案主要是利用当地的重力加速度作为校正过程的系统输入, 并利用该输入构造了关于 IMU 阵列校正参数最小二乘问题, 由于在求解过程中需要外接提供充足的方向激励, 本文又设计了

20 面球体, 如图 2 所示。该 20 面球体不仅能够为 IMU 阵列的校正提供充足的外部激励还能够平均一些随机误差和非建模的误差。为了测试标定的实验结果本文采用了由 32 个 IMU 组成的 IMU 阵列作为标定对象, 标定结果见表一。把经过标定的结果和 Invensense 公司的 MPU-9250 技术手册所提供的标定结果进行了比较, 结果表明本文所提的标定方案能够提供一个较好的标定结果。本文所提的标定方案不仅适合于 IMU 阵列的标定, 同时也适合单个 IMU 的标定。

参考文献:

- [1] Skog I, Nilsson J O, Handel P. An open-source multi inertial measurement unit (MIMU) platform [A]. 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) [C]. IEEE, 2014; 1-4.
- [2] Sipos M, Paces P, Rohac J, et al. Analyses of triaxial accelerometer calibration algorithms [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12 (5): 1157-1165.
- [3] Nilsson J O, Skog I, Handel P. Aligning the forces—Eliminating the misalignments in IMU arrays [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63 (10): 2498-2500.
- [4] Tedaldi D, Pretto A, Menegatti E. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments [A]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014; 3042-3049.
- [5] Cho S Y, Park C G. A Calibration Technique for a Redundant IMU containing low - grade inertial Sensors [J]. ETRI Journal, 2005, 27 (4): 418-426.
- [6] Pittelkau M E. Cascaded and decoupled RIMU calibration filters [J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2006, 54 (3/4): 449-466.
- [7] Beravs T, Podobnik J, Munih M. Three-axial accelerometer calibration using Kalman filter covariance matrix for online estimation of optimal sensor orientation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61 (9): 2501-2511.
- [8] Skog I, Nilsson J O, H? ndel P, et al. Inertial sensor arrays, maximum likelihood, and Cramér - Rao Bound [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64 (16): 4218-4227.
- [9] Syed Z F, Aggarwal P, Goodall C, et al. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18 (7): 1897.
- [10] Skog I, Handel P. Calibration of a MEMS inertial measurement unit [A]. XVII IMEKO world congress [C]. 2006; 1-6.
- [11] Fong W T, Ong S K, Nee A Y C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19 (8): 085202.