



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108592952 B

(45)授权公告日 2020.10.27

(21)申请号 201810558490.5

(22)申请日 2018.06.01

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 108592952 A

(43)申请公布日 2018.09.28

(73)专利权人 北京航空航天大学  
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 李建利 刘全普 刘刚 房建成  
曲春宇 邹思远 胡佳

(74)专利代理机构 北京挺立专利事务所(普通合伙)  
11265

代理人 李鑫

(51)Int.Cl.

G01C 25/00(2006.01)

(56)对比文件

- GB 2272974 A, 1994.06.01
- CN 106482746 A, 2017.03.08
- CN 104697521 A, 2015.06.10
- CN 103363989 A, 2013.10.23
- CN 104697553 A, 2015.06.10
- CN 102620748 B, 2014.09.10
- CN 103256942 A, 2013.08.21
- CN 103245360 A, 2013.08.14
- CN 102393201 B, 2013.05.15
- CN 103630146 A, 2014.03.12

审查员 张茹

权利要求书3页 说明书12页 附图3页

(54)发明名称

基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法

(57)摘要

本发明公开一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法,对于基于微机电系统设计的微小型惯性测量系统误差主要包括确定性误差和随机性误差两部分,且安装误差相对传统的惯性测量单元较大,根据MIMU误差漂移数学模型,设计了使用无需指北的单轴速率转台和六面体工装,利用基于杆臂补偿和正反倍速率的标定方法,建立了杆臂效应误差补偿模型和应用加权最小二乘法的误差解算统计模型,实现单次标定单个或多个IMU,确定标度因数、常值漂移、安装误差等误差系数。测试设备无需对北,可抵消地速及重力的误差影响,处理计算结果统计性强。且实验设备要求低,标定时间短、标定工作量小等优点。



1. 一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、单轴速率转台安装平面调整为与地理水平面平行,其旋转轴向与地理水平面垂直,加工的六面体工装相邻两个面相互垂直;将多个MIMU安装在六面体工装上,上电后,静止预热30分钟;记录静态实验数据100秒;

步骤二、使MIMU的Z轴与转台旋转轴向平行,方向与转台正向一致,采集1分钟的静止数据,在每个方位输入不同的正反转速和一定倍数的转速,保持采集100秒匀速转动,并保证旋转整周数,分别采集每一转速下MIMU的输出数据,所述输出数据包括角速度通道的角速率、加速度通道的线加速度以及温度传感器输出,将六位置每个速率下采集的正反转数据分别求平均,求得六位置下每一转速MIMU角速度通道输出均值;

步骤三、采集完所有输出数据后,旋转转台使MIMU转动到与初始静态位置相对称的位置,采集初始静态位置下100秒的MIMU输出数据;利用六面体工装,分别设置MIMU六个位置,在每个位置重复步骤二的操作;

步骤四、根据采集的MIMU输出数据,基于杆臂效应误差补偿模型以及离心加速度降维解耦模型,去除离心加速度影响,补偿杆臂误差;

步骤五、利用加权最小二乘法的误差解算模型,计算求解出具有统计意义的陀螺及加速度计的标度因数、常值漂移、安装误差的误差系数并输出保存。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤四中的杆臂效应误差补偿模型,包括:

使用转台标定多个MIMU时,由于MIMU测量中心与转台旋转中心之间存在杆臂 $r$ ,当转台以角速率 $\omega$ 转动时,产生离心加速度 $a_\omega$ :

$$a_\omega = \omega \times r \times \omega = \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \omega_y^2 + r_y \omega_z^2 - r_y \omega_x \omega_y - r_z \omega_x \omega_z \\ r_y \omega_x^2 + r_x \omega_z^2 - r_x \omega_x \omega_y - r_z \omega_y \omega_z \\ r_z \omega_x^2 + r_x \omega_y^2 - r_x \omega_z \omega_x - r_y \omega_z \omega_y \end{bmatrix};$$

其中,杆臂 $r = [r_x \ r_y \ r_z]^T$ ,角速率 $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ ;

则加速度通道的实际输入 $a_{in}$ 为:

$$a_{in} = g + a_\omega$$

将加速度输入分解为已知加速度和未知加速度,所述已知加速度为重力加速度;所述未知加速度为离心加速度:

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} \right)$$

解算误差系数进行补偿后结果为:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{ex} \\ a_{ey} \\ a_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} \right)$$

式中: $a_x, a_y, a_z$ 分别为测量轴 $x, y, z$ 实际加速度值, $a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}$ 分别为测量轴 $x, y, z$ 由于

标定时的离心加速度引起的补偿误差;  $a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}$  与标定时测量轴  $x, y, z$  离心加速度大小分别成正比。

3. 根据权利要求1或2所述的方法, 其特征在于: 所述步骤四中的离心加速度降维解耦模型为:

翻转MIMU后, 在  $\omega_1$  和  $\omega_2$  两个  $n$  倍速率点采集数据, 取  $\omega_2 = n\omega_1$ , 则有翻转后加速度关系:

$$a_{2im} = n^2 a_{1im}$$

利用加速度关系对降维模型进行解耦, 可消除离心加速度, 得到去除离心加速度的降维模型:

$$\bar{A}'_O = (n^2 - 1)K_A A'_{I1}$$

其中,  $\bar{A}'_O$  和  $A'_{I1}$  如下, 由测量数据分解得到:

$$\bar{A}'_O = \begin{bmatrix} n^2 \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & n^2 \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & n^2 \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & n^2 \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & n^2 \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & n^2 \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ n^2 \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & n^2 \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & n^2 \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & n^2 \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & n^2 \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & n^2 \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ n^2 \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & n^2 \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & n^2 \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & n^2 \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & n^2 \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & n^2 \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$A'_{I1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ g & -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & -g \end{bmatrix} \circ$$

4. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于: 所述步骤五中的加权最小二乘法的误差解算模型, 对误差系数在去除离心加速度的降维模型两边同时乘以六方位数据的权值矩阵  $\sigma_a$ , 得到方程组:

$$\bar{A}''_O = (n^2 - 1)K_A A''_{I1}$$

式中:  $\bar{A}''_O$  和  $A''_{I1}$  乘权值矩阵  $\sigma_a$  后得到  $\bar{A}''_O$  和  $A''_{I1}$ , 其中:

$\sigma_a = \text{Diag}[\sigma_{a1} \ \sigma_{a2} \ \sigma_{a3} \ \sigma_{a4} \ \sigma_{a5} \ \sigma_{a6}]$ , 其中  $\sigma_{a5}$  为  $Z$  轴向上方位权值, 大于其他方位权值; 再使用加权最小二乘法解算得到  $K_A$ , 角速度通道误差系数解算模型为:

$$K_A = \frac{1}{n^2 - 1} (A''_{I1} A''_{I1}{}^T)^{-1} A''_{I1}{}^T \bar{A}''_O{}^T$$

角速度通道误差系数包括比力相关项, 求解未知离心加速度, 进行消元, 得到加速度输入位置离心加速度模型:

$$A'_{I2} = \frac{1}{(1 - n^2)} \bar{A}'''_O K_A{}^{-1}$$

式中:

$$\bar{A}'''_O = \begin{bmatrix} \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$A'_{I_2} = \begin{bmatrix} a_{1x1} & a_{1x2} & a_{1x3} & a_{1x4} & a_{1x5} & a_{1x6} \\ a_{1y1} & a_{1y2} & a_{1y3} & a_{1y4} & a_{1y5} & a_{1y6} \\ a_{1z1} & a_{1z2} & a_{1z3} & a_{1z4} & a_{1z5} & a_{1z6} \end{bmatrix};$$

地球自转角速度水平分量经转台旋转调制为正弦信号,整周期均值为零;根据角速度通道误差模型,标定方法中角速度通道输出与输入关系为:

$$\bar{G}_O = K_G G_I$$

式中: $\bar{G}_O$ 为数据角速度计输出矩阵, $G_I$ 为数据角速度和加速度输入矩阵, $K_G$ 为角速度通道误差系数矩阵;

$$K_G = \begin{bmatrix} \omega_{x0} & K_{gx} & E_{xy} & E_{xz} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ \omega_{y0} & E_{yx} & K_{gy} & E_{yz} & D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ \omega_{z0} & E_{zx} & E_{zy} & K_{gz} & D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\bar{G}_O = \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{x1} & \bar{\omega}_{y1} & \bar{\omega}_{z1} \\ \bar{\omega}_{x2} & \bar{\omega}_{y2} & \bar{\omega}_{z2} \\ \bar{\omega}_{x3} & \bar{\omega}_{y3} & \bar{\omega}_{z3} \\ \bar{\omega}_{x4} & \bar{\omega}_{y4} & \bar{\omega}_{z4} \\ \bar{\omega}_{x5} & \bar{\omega}_{y5} & \bar{\omega}_{z5} \\ \bar{\omega}_{x6} & \bar{\omega}_{y6} & \bar{\omega}_{z6} \\ \bar{\omega}_{x7} & \bar{\omega}_{y7} & \bar{\omega}_{z7} \\ \bar{\omega}_{x8} & \bar{\omega}_{y8} & \bar{\omega}_{z8} \\ \bar{\omega}_{x9} & \bar{\omega}_{y9} & \bar{\omega}_{z9} \\ \bar{\omega}_{x10} & \bar{\omega}_{y10} & \bar{\omega}_{z10} \\ \bar{\omega}_{x11} & \bar{\omega}_{y11} & \bar{\omega}_{z11} \\ \bar{\omega}_{x12} & \bar{\omega}_{y12} & \bar{\omega}_{z12} \end{bmatrix}^T G_I = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{i+} & 0 & 0 & g + a_{1x1} & a_{1y1} & a_{1z1} \\ 1 & \omega_{i-} & 0 & 0 & g + a_{2x1} & a_{2y1} & a_{2z1} \\ 1 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & 0 & -g + a_{1x2} & a_{1y2} & a_{1z2} \\ 1 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & 0 & -g + a_{2x2} & a_{2y2} & a_{2z2} \\ 1 & 0 & \omega_{i+} & 0 & a_{1x3} & g + a_{1y3} & a_{1z3} \\ 1 & 0 & \omega_{i-} & 0 & a_{2x3} & g + a_{2y3} & a_{2z3} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & a_{1x4} & -g + a_{1y4} & a_{1z4} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & a_{1x4} & -g + a_{2y4} & a_{2z4} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i+} & a_{1x5} & a_{1y5} & g + a_{1z5} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i-} & a_{2x5} & a_{2y5} & g + a_{2z5} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & a_{1x6} & a_{1y6} & -g + a_{1z6} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & a_{2x6} & a_{2y6} & -g + a_{2z6} \end{bmatrix}^T$$

$$\omega_{i+} = \omega_i + \Omega_e \sin(\phi), \omega_{i-} = -\omega_i + \Omega_e \sin(\phi),$$

$\hat{\omega}_{i+} = \omega_i - \Omega_e \sin(\phi), \hat{\omega}_{i-} = -\omega_i - \Omega_e \sin(\phi), \Omega_e$ 表示地球自转角速度, $\bar{\omega}_m$ 为陀螺输出原始数据, $\omega_i$ 为输入角速率, $\phi$ 为当地纬度;

应用加权最小二乘法,角速度通道输出与输入关系公式左右两边同时乘以六方位数据的权值矩阵 $\sigma_g$ ,得到方程组:

$$\bar{G}'_O = K_G G'_I$$

根据加权最小二乘法解算陀螺标度因数 $K_G$ 为:

$$K_G = (G'_I G'^T_I)^{-1} G'_I \bar{G}'^T_O$$

式中: $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ 乘权值矩阵 $\sigma_g$ 后得到 $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ ,其中 $\sigma_g = \text{Diag}[\sigma_{g1} \ \sigma_{g2} \ \cdots \ \sigma_{g11} \ \sigma_{g12}]$ , $\sigma_{g9}$ 和 $\sigma_{g10}$ 为Z轴向上方位数据权值,大于其他方位权值。

## 基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法,属于误差标定技术领域。

### 背景技术

[0002] 基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)设计的微小型惯性测量系统(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)是包含多种惯性器件和测量传感器的捷联式位置姿态测量系统,主要包括微小型陀螺仪、加速度计、气压计、电子罗盘等传感器,通过运载体运动产生角速度和加速度等惯性信息结合气压、地磁场等环境信息达到对载体运动测量的目的。

[0003] 惯性测量系统,是一种不依赖于任何外部信息,也不向外辐射能量的自主式捷联式导航系统,它不仅具有良好的隐蔽性,且其工作环境包括空中、地球表面和水中,可在个人移动终端,交通工具等领域使用,提供的导航数据十分安全,具有数据更新率高,短期精度和稳定性好的优点。这些使惯性导航系统在军事导航及民用导航领域中起着越来越大的作用。

[0004] 由于生产工艺水平限制,惯性测量单元常存在零偏误差、标度因数误差、安装角误差和比例相关项误差等,使用前需要进行标定,求解出这些误差系数并补偿,提高IMU的测量精度。研发高效简易且适合多MIMU同时标定的标定方法,可大大减少标定过程的人力物力消耗,降低成本。

[0005] 微小型惯性测量系统(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)的误差主要包括确定性误差和随机性误差两部分包括常值漂移误差、标度因数误差、安装误差及随机噪声等,其中常值漂移和标度因数误差对传感器输出误差带来的影响是最大的,由于制作工艺的原因,陀螺仪3个敏感轴并非完全正交而产生轴间非正交误差;同时传感器在安装过程中也会带来安装角误差;轴间非正交误差和安装角误差作用效果相似,可以统一规划为安装误差。其中,由于MIMU非正交装配、不等弹性变形的因素,在外部线、角运动以及温度变化等环境激励下就会产生各种确定性测量误差,确定性误差约占MIMU总误差的90%,是微小型捷联惯性导航系统的最主要误差来源。随机误差对标定结果影响较小且是一个随机小量,在标定时可忽略其影响。

[0006] 现有MIMU标定方法中,通常将加速度通道与角速度通道分立标定。位置法标定加速度通道,角速率法标定角速度通道,标定方法复杂,数据量大,由于标定MIMU高阶误差模型需要复杂的实验,而且难以精准标定出高阶系数,因此工程中常用简化的一阶误差模型。

[0007] 六方位正反速率法通过限定惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的测量中心在转台旋转轴上,来避免角速率运动对加速度通道输出的影响,仅用一组速率数据同时解算加速度和角速度通道误差系数,标定工作量较六方位24点法减少到2/5。但在MIMU标定应用中,需要单次实验标定多个MIMU, MIMU节点与转台旋转中心将存在杆臂。应用传统的六方位正反速率标定方法会受到杆臂效应引起的离心加速度影响、导致标定精度下

降。

### 发明内容

[0008] 针对上述缺陷,本发明提供了一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法,针对多IMU标定精度下降的问题,依据误差模型和杆臂效应的影响分析,针对多MIMU标定过程中杆臂效应带来标定误差的影响机理进行了分析,设计了一种六方位倍速率标定方法,并建立了杆臂效应误差补偿模型和应用加权最小二乘法的误差解算模型,通过试验验证该方法的有效性。标定设备仅需单轴速率转台和六面体工装,可单次标定单个或多个MIMU惯性测量单元的同时提高微小型惯性测量系统的误差标定测量精度,为信息融合算法提供有效准确的测量数据。

[0009] 为达到上述目的,本发明通过以下技术方案来具体实现:

[0010] 本发明提供了一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法,包括以下步骤:

[0011] 步骤一、单轴速率转台安装平面调整为与地理水平面平行,其旋转轴向与地理水平面垂直,加工的六面体工装相邻两个面相互垂直;将多个MIMU安装在六面体工装上,上电后,静止预热30分钟;记录静态实验数据100秒;

[0012] 步骤二、使MIMU的Z轴与转台旋转轴向(ZT)平行,方向与转台正向一致,采集1分钟的静止数据,分别输入一定倍数的转速如: $0^{\circ}/s$ 、 $10^{\circ}/s$ 、 $20^{\circ}/s$ 、 $40^{\circ}/s$ 、 $80^{\circ}/s$ 、 $0^{\circ}/s$ 、 $-10^{\circ}/s$ 、 $-20^{\circ}/s$ 、 $-40^{\circ}/s$ 、 $-80^{\circ}/s$ ;每个转速保持100秒,并保证旋转整周数,分别采集每一转速下MIMU的输出数据,所述输出数据包括角速度通道的3个角速率、加速度通道的3个线加速度以及温度传感器输出;

[0013] 步骤三、采集完所有输出数据后,旋转转台使MIMU转动到与初始静态位置相对称的位置,采集初始静态位置下100秒的MIMU输出数据;利用六面体工装,分别设置MIMU六个位置,在每个位置重复步骤二的操作;

[0014] 步骤四、根据采集的MIMU输出数据,基于杆臂效应误差补偿模型以及离心加速度降维解耦模型,去除离心加速度影响,补偿杆臂误差;

[0015] 步骤五、利用加权最小二乘法的误差解算模型,计算求解出具有统计意义的陀螺及加速度计的标度因数、常值漂移、安装误差等误差系数并输出保存。

[0016] 步骤二中,在每个方位输入不同的正反转速。将六位置每个速率下采集的正反转数据分别求平均,可求得六位置下每一转速MIMU角速度通道输出均值;

$$\begin{aligned}
 G(1,i,j) &= [G(1,i,j,1) + G(1,i,j,2) + \cdots + G(1,i,j,n_d)]/n_d \\
 G(2,i,j) &= [G(2,i,j,1) + G(2,i,j,2) + \cdots + G(2,i,j,n_d)]/n_d \\
 G(3,i,j) &= [G(3,i,j,1) + G(3,i,j,2) + \cdots + G(3,i,j,n_d)]/n_d \\
 G(4,i,j) &= [G(4,i,j,1) + G(4,i,j,2) + \cdots + G(4,i,j,n_d)]/n_d \\
 G(5,i,j) &= [G(5,i,j,1) + G(5,i,j,2) + \cdots + G(5,i,j,n_d)]/n_d \\
 G(6,i,j) &= [G(6,i,j,1) + G(6,i,j,2) + \cdots + G(6,i,j,n_d)]/n_d
 \end{aligned}$$

式中, 1, ..., 6 分别代表 MIMU 六个测量位置, i 代表角速度通道三个轴向的陀螺仪编号, i = X, Y, Z, j 代表 MIMU 正反转速编号, j = 0, ±10°/s, ..., ±80°/s, G(m, i, j, n<sub>d</sub>) 代表第 m 个位置 j 转速下 MIMU 中第 i 轴向陀螺仪输出数据, n<sub>d</sub> 代表采集数据的个数, 通过数据平均处理, 将任意转速下采集的 MIMU 角速度通道原始数据平均为 G(6, 3, 2)。

[0019] 所述步骤四中的杆臂效应误差补偿模型, 包括:

[0020] 使用转台标定多个 MIMU 时, 由于 MIMU 测量中心与转台旋转中心之间存在杆臂 r, 当转台以角速率 ω 转动时, 产生离心加速度 a<sub>ω</sub>:

$$[0021] \quad \mathbf{a}_\omega = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \omega_y^2 + r_x \omega_z^2 - r_y \omega_x \omega_y - r_z \omega_x \omega_z \\ r_y \omega_x^2 + r_y \omega_z^2 - r_x \omega_x \omega_y - r_z \omega_y \omega_z \\ r_z \omega_x^2 + r_z \omega_y^2 - r_x \omega_z \omega_x - r_y \omega_z \omega_y \end{bmatrix};$$

[0022] 其中, 杆臂 r = [r<sub>x</sub> r<sub>y</sub> r<sub>z</sub>]<sup>T</sup>, 角速率 ω = [ω<sub>x</sub> ω<sub>y</sub> ω<sub>z</sub>]<sup>T</sup>;

[0023] 则加速度通道的实际输入 a<sub>in</sub> 为:

$$[0024] \quad \mathbf{a}_{in} = \mathbf{g} + \mathbf{a}_\omega$$

[0025] 将加速度输入分解为已知加速度和未知加速度, 所述已知加速度为重力加速度; 所述未知加速度为离心加速度:

$$[0026] \quad \begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} \right)$$

[0027] 由于传统的六方位正反速率法的解算模型中加速度通道输入为重力加速度, 用传统方法标定多 MIMU 会带来离心加速度引起的标定误差。解算误差系数进行补偿后结果为:

$$[0028] \quad \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{ex} \\ a_{ey} \\ a_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} \right)$$

[0029] 式中: a<sub>x</sub>, a<sub>y</sub>, a<sub>z</sub> 分别为测量轴 x, y, z 实际加速度值, a<sub>ex</sub>, a<sub>ey</sub>, a<sub>ez</sub> 分别为测量轴 x, y, z 由于标定时的离心加速度引起的补偿误差; a<sub>ex</sub>, a<sub>ey</sub>, a<sub>ez</sub> 与标定时测量轴 x, y, z 离心加速度大小分别成正比。

[0030] 加速度通道误差系数解算模型是根据实验数据对加速度通道误差模型进行扩维,

得到加速度通道输出与输入关系为:

$$[0031] \quad \bar{A}_O = K_A A_I$$

[0032] 式中:  $\bar{A}_O$  为12组数据加速度计输出矩阵,  $A_I$  为12组数据加速度输入矩阵,  $K_A$  为加速度通道误差系数矩阵;

$$[0033] \quad \bar{A}_O = \begin{bmatrix} \bar{a}_{x1} & \bar{a}_{x2} & \bar{a}_{x3} & \bar{a}_{x4} & \bar{a}_{x5} & \bar{a}_{x6} & \bar{a}_{x7} & \bar{a}_{x8} & \bar{a}_{x9} & \bar{a}_{x10} & \bar{a}_{x11} & \bar{a}_{x12} \\ \bar{a}_{y1} & \bar{a}_{y2} & \bar{a}_{y3} & \bar{a}_{y4} & \bar{a}_{y5} & \bar{a}_{y6} & \bar{a}_{y7} & \bar{a}_{y8} & \bar{a}_{y9} & \bar{a}_{y10} & \bar{a}_{y11} & \bar{a}_{y12} \\ \bar{a}_{z1} & \bar{a}_{z2} & \bar{a}_{z3} & \bar{a}_{z4} & \bar{a}_{z5} & \bar{a}_{z6} & \bar{a}_{z7} & \bar{a}_{z8} & \bar{a}_{z9} & \bar{a}_{z10} & \bar{a}_{z11} & \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0034] \quad A_I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} & a_{x5} & a_{x6} & a_{x7} & a_{x8} & a_{x9} & a_{x10} & a_{x11} & a_{x12} \\ a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} & a_{y5} & a_{y6} & a_{y7} & a_{y8} & a_{y9} & a_{y10} & a_{y11} & a_{y12} \\ a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} & a_{z5} & a_{z6} & a_{z7} & a_{z8} & a_{z9} & a_{z10} & a_{z11} & a_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0035] \quad K_A = \begin{bmatrix} a_{x0} & K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ a_{y0} & M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ a_{z0} & M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix}。$$

[0036] 根据加速度通道输入输出方程, 将其中  $A_I$  分解为  $A_{I1}$  和  $A_{I2}$  (分解的  $A_{I2}$  由于含全为0的行而进行降维), 得到降维模型:

$$[0037] \quad \bar{A}_O = K_A A_{I1} + K'_A A_{I2} S$$

[0038] 式中:  $A_{I1}$  为12组数据重力加速度输入和元素1组成的矩阵,  $A_{I2}$  为12组数据离心加速度输入矩阵,  $K'_A$  为  $K_A$  的降维矩阵;

[0039] 步骤四中的离心加速度降维解耦模型为:

[0040] 翻转MIMU后, 以  $\omega_1$  和  $\omega_2$  两个  $n$  倍速率点采集数据, 且位置不变情况下  $r$  是一定的, 取  $\omega_2 = n\omega_1$ , 则有翻转后加速度关系:

$$[0041] \quad a_{2im} = n^2 a_{1im}$$

[0042] 利用加速度关系对降维模型进行解耦, 可消除离心加速度, 得到去除离心加速度的降维模型:

$$[0043] \quad \bar{A}'_O = (n^2 - 1) K_A A'_{I1}$$

[0044] 其中,  $\bar{A}'_O$  和  $A'_{I1}$  如下, 由测量数据分解得到:

$$[0045] \quad \bar{A}'_O = \begin{bmatrix} n^2 \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & n^2 \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & n^2 \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & n^2 \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & n^2 \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & n^2 \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ n^2 \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & n^2 \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & n^2 \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & n^2 \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & n^2 \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & n^2 \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ n^2 \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & n^2 \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & n^2 \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & n^2 \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & n^2 \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & n^2 \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0046] \quad A'_{I1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ g & -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & -g \end{bmatrix}$$

[0047] 步骤五中的加权最小二乘法的误差解算模型, 消除离心加速度后, 在实际应用中,

Z轴向上为MIMU最常用工作状态。增大Z轴向上方位数据的权值,有助于抑制非线性和非对称性误差,从而提高导航系统性能。对误差系数在去除离心加速度的降维模型两边同时乘以六方位数据的权值矩阵 $\sigma_a$ ,得到方程组:

$$[0048] \quad \bar{A}_O'' = (n^2 - 1)K_A A_{I1}''$$

[0049] 式中: $\bar{A}_O''$ 和 $A_{I1}''$ 乘权值矩阵 $\sigma_a$ 后得到 $\bar{A}_O''$ 和 $A_{I1}''$ ,其中:

[0050]  $\sigma_a = \text{Diag}[\sigma_{a1} \sigma_{a2} \sigma_{a3} \sigma_{a4} \sigma_{a5} \sigma_{a6}]$ ,其中 $\sigma_{a5}$ 为Z轴向上方位权值,大于其他方位权值;再使用加权最小二乘法解算得到 $K_A$ ,最终角速度通道误差系数解算模型为:

$$[0051] \quad K_A = \frac{1}{n^2 - 1} \left( A_{I1}'' A_{I1}''^T \right)^{-1} A_{I1}'' \bar{A}_O''^T$$

[0052] 加速度输入解算求解未知离心加速度,角速度通道误差系数包括比力相关项,求解未知离心加速度,进行消元,得到加速度输入位置离心加速度模型:

$$[0053] \quad A_{I2}' = \frac{1}{(1 - n^2)} \bar{A}_O''' K_A'^{-1}$$

[0054] 式中:

$$[0055] \quad \bar{A}_O''' = \begin{bmatrix} \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0056] \quad A_{I2}' = \begin{bmatrix} a_{1x1} & a_{1x2} & a_{1x3} & a_{1x4} & a_{1x5} & a_{1x6} \\ a_{1y1} & a_{1y2} & a_{1y3} & a_{1y4} & a_{1y5} & a_{1y6} \\ a_{1z1} & a_{1z2} & a_{1z3} & a_{1z4} & a_{1z5} & a_{1z6} \end{bmatrix};$$

[0057] 地球自转角速度水平分量经转台旋转调制为正弦信号,整周期均值为零;根据角速度通道误差模型,标定方法中角速度通道输出与输入关系为:

$$[0058] \quad \bar{G}_O = K_G G_I$$

[0059] 式中: $\bar{G}_O$ 为数据角速度计输出矩阵, $G_I$ 为数据角速度和加速度输入矩阵, $K_G$ 为角速度通道误差系数矩阵;

$$[0060] \quad K_G = \begin{bmatrix} \omega_{x0} & K_{gx} & E_{xy} & E_{xz} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ \omega_{y0} & E_{yx} & K_{gy} & E_{yz} & D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ \omega_{z0} & E_{zx} & E_{zy} & K_{gz} & D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

$$[0061] \quad \bar{G}_O = \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{x1} & \bar{\omega}_{y1} & \bar{\omega}_{z1} \\ \bar{\omega}_{x2} & \bar{\omega}_{y2} & \bar{\omega}_{z2} \\ \bar{\omega}_{x3} & \bar{\omega}_{y3} & \bar{\omega}_{z3} \\ \bar{\omega}_{x4} & \bar{\omega}_{y4} & \bar{\omega}_{z4} \\ \bar{\omega}_{x5} & \bar{\omega}_{y5} & \bar{\omega}_{z5} \\ \bar{\omega}_{x6} & \bar{\omega}_{y6} & \bar{\omega}_{z6} \\ \bar{\omega}_{x7} & \bar{\omega}_{y7} & \bar{\omega}_{z7} \\ \bar{\omega}_{x8} & \bar{\omega}_{y8} & \bar{\omega}_{z8} \\ \bar{\omega}_{x9} & \bar{\omega}_{y9} & \bar{\omega}_{z9} \\ \bar{\omega}_{x10} & \bar{\omega}_{y10} & \bar{\omega}_{z10} \\ \bar{\omega}_{x11} & \bar{\omega}_{y11} & \bar{\omega}_{z11} \\ \bar{\omega}_{x12} & \bar{\omega}_{y12} & \bar{\omega}_{z12} \end{bmatrix}^T \quad G_I = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{i+} & 0 & 0 & g+a_{1x1} & a_{1y1} & a_{1z1} \\ 1 & \omega_{i-} & 0 & 0 & g+a_{2x1} & a_{2y1} & a_{2z1} \\ 1 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & 0 & -g+a_{1x2} & a_{1y2} & a_{1z2} \\ 1 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & 0 & -g+a_{2x2} & a_{2y2} & a_{2z2} \\ 1 & 0 & \omega_{i+} & 0 & a_{1x3} & g+a_{1y3} & a_{1z3} \\ 1 & 0 & \omega_{i-} & 0 & a_{2x3} & g+a_{2y3} & a_{2z3} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & a_{1x4} & -g+a_{1y4} & a_{1z4} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & a_{1x4} & -g+a_{2y4} & a_{2z4} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i+} & a_{1x5} & a_{1y5} & g+a_{1z5} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i-} & a_{2x5} & a_{2y5} & g+a_{2z5} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & a_{1x6} & a_{1y6} & -g+a_{1z6} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & a_{2x6} & a_{2y6} & -g+a_{2z6} \end{bmatrix}^T$$

[0062]  $\omega_{i+} = \omega_i + \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\omega_{i-} = -\omega_i + \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\hat{\omega}_{i+} = \omega_i - \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\hat{\omega}_{i-} = -\omega_i - \Omega_e \sin(\phi)$ ,

其中  $\Omega_e$  表示地球自转角速度,  $\bar{\omega}_m$  为陀螺输出原始数据,  $\omega_i$  为输入角速率,  $\phi$  为当地纬度;

[0063] 应用加权最小二乘法, 角速度通道输出与输入关系公式左右两边同时乘以六方位数据的权值矩阵  $\sigma_g$ , 得到方程组:

$$[0064] \quad \bar{G}'_O = K_G G'_I$$

[0065] 式中:  $\bar{G}'_O$  和  $G'_I$  乘权值矩阵  $\sigma_g$  后得到  $\bar{G}'_O$  和  $G'_I$ , 其中:  $\sigma_g = \text{Diag}[\sigma_{g1} \ \sigma_{g2} \ \cdots \ \sigma_{g11} \ \sigma_{g12}]$ ,  $\sigma_{g9}$  和  $\sigma_{g10}$  为 Z 轴向上方位数据权值, 大于其他方位权值。

[0066] 根据加权最小二乘法解算陀螺标度因数  $K_G$  得到完整角速度误差系数计算模型:

$$[0067] \quad K_G = (G'_I G'^T_I)^{-1} G'_I \bar{G}'^T_O$$

[0068] 式中:  $\bar{G}'_O$  和  $G'_I$  乘权值矩阵  $\sigma_g$  后得到  $\bar{G}'_O$  和  $G'_I$ , 其中  $\sigma_g = \text{Diag}[\sigma_{g1} \ \sigma_{g2} \ \cdots \ \sigma_{g11} \ \sigma_{g12}]$ ,  $\sigma_{g9}$  和  $\sigma_{g10}$  为 Z 轴向上方位数据权值, 大于其他方位权值。

[0069] 综上, 共得到 MIMU 陀螺仪和加速度计共计 33 个误差参数。可为后续补偿和信息融合算法提供误差修正指标。

[0070] 本发明的原理:

[0071] 本发明设计了一种针对微小型惯性测量系统多 MIMU 的基于杆臂补偿与正反倍速率误差标定方法, 针对安装误差相对传统的惯性测量单元较大的问题, 根据相应杆臂效应影响机理分析并结合误差漂移数学统计模型, 应用加权最小二乘法, 设计了使用单轴速率转台和六面体工装的标定方法, 可抵消地速及重力的误差影响, 测试设备无需对北, 处理计算结果统计性强。且实验设备要求低, 标定时间短、标定工作量小, 适合同时标定多 MIMU 等优点。试验结果表明, 本文提出的标定方法简易、高效。MIMU 常用工作方位下, 加速度通道和角速度通道系统误差的补偿精度均有较大提高。

[0072] 本发明的优点在于:

[0073] (1) 解决了应用传统的六方位正反速率标定方法会受到杆臂效应引起的离心加速度影响、导致标定精度下降的问题, 使用正反倍速率使得结果较传统标定方法精度得到提

高。

[0074] (2) 可同时进行多MIMU标定,通过杆臂误差模型确定各IMU误差指标,提高标定效率。

[0075] (3) 利用加权最小二乘法,有效抑制了数据非线性和非对称性误差,加速度通道和角速度通道系统误差的补偿精度均有较大提高。

### 附图说明

[0076] 图1所示为本发明提供的一种基于杆臂补偿与正反倍速率同时标定多MIMU误差的方法的实施例一流程图。

[0077] 图2a所示为三轴惯性器件安装角误差示中陀螺仪安装角误差示意图。

[0078] 图2b所示为三轴惯性器件安装角误差示中加速度通道安装角误差示意图。

[0079] 图3a所示为六方位倍速率X轴正向标定示意图。

[0080] 图3b所示为六方位倍速率X轴负向标定示意图。

[0081] 图3c所示为六方位倍速率Y轴正向标定示意图。

[0082] 图3d所示为六方位倍速率Y轴负向标定示意图。

[0083] 图3e所示为六方位倍速率Z轴正向标定示意图。

[0084] 图3f所示为六方位倍速率Z轴负向标定示意图。

[0085] 图中:X,Y,Z为MIMU三个敏感轴,ZT为转台旋转轴向,每个方位分别以 $\omega_1$ 和相应倍速率 $\omega_2$ (其中 $\omega_2=n\omega_1$ 且 $n\neq\pm 1$ )为角速度进行匀速转动。

### 具体实施方式

[0086] 下面对本发明的技术方案进行具体阐述,需要指出的是,本发明的技术方案不限于实施例所述的实施方式,本领域的技术人员参考和借鉴本发明技术方案的内容,在本发明的基础上进行的改进和设计,应属于本发明的保护范围。

[0087] 实施例一

[0088] 本发明实施例一基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)设计的微小型惯性测量系统(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU),包含微小型陀螺仪、加速度计、气压计、电子罗盘等传感器,通过运载体运动产生角速度和加速度等信息达到对载体运动测量的目的。针对其安装误差相对传统的惯性测量单元较大的问题,根据相应杆臂效应影响机理分析并结合误差漂移数学统计模型,应用加权最小二乘法,设计了使用单轴速率转台和六面体工装的标定方法,可抵消地速及重力的误差影响,测试设备无需对北,处理计算结果统计性强。且实验设备要求低,标定时间短、标定工作量小,适合同时标定多MIMU等优点。试验结果表明,本文提出的标定方法简易、高效。MIMU常用工作方位下,加速度通道和角速度通道系统误差的补偿精度均有较大提高。具体如图1所示,该方案包括以下步骤:

[0089] 步骤一、单轴速率转台安装平面调整为与地理水平面平行,其旋转轴向与地理水平面垂直,加工的六面体工装相邻两个面相互垂直;将多个MIMU安装在六面体工装上,上电后,静止预热30分钟;记录静态实验数据100秒;

[0090] 步骤二、使MIMU的Z轴与转台旋转轴向(ZT)平行,方向与转台正向一致,采集1分钟

的静止数据,分别输入一定倍数的转速如: $0^\circ/\text{s}$ 、 $10^\circ/\text{s}$ 、 $20^\circ/\text{s}$ 、 $40^\circ/\text{s}$ 、 $80^\circ/\text{s}$ 、 $0^\circ/\text{s}$ 、 $-10^\circ/\text{s}$ 、 $-20^\circ/\text{s}$ 、 $-40^\circ/\text{s}$ 、 $-80^\circ/\text{s}$ ;每个转速保持100秒,并保证旋转整周数,分别采集每一转速下MIMU的输出数据,所述输出数据包括角速度通道的3个角速率、加速度通道的3个线加速度以及温度传感器输出;

[0091] 步骤三、采集完所有输出数据后,旋转转台使MIMU转动到与初始静态位置相对称的位置,采集初始静态位置下100秒的MIMU输出数据;利用六面体工装,分别设置MIMU六个位置,在每个位置重复步骤二的操作;

[0092] 步骤四、根据采集的MIMU输出数据,按照实验流程依次读取并处理。基于杆臂效应误差补偿模型以及离心加速度降维解耦模型,去除离心加速度影响,补偿杆臂误差;

[0093] 步骤五、利用加权最小二乘法的误差解算模型,计算求解出具有统计意义的陀螺及加速度计的标度因数、常值漂移、安装误差(见图2a、图2b)等误差系数并输出保存。

[0094] 由于系统误差严重影响MIMU测量精度,使用前必须进行标定。MIMU标定是指在已知输入条件下,进行多组测试,从而构成输入输出关系的方程组,来解算出模型中的误差系数。

[0095] 步骤二中,在每个方位输入不同的正反转速。将六位置每个速率下采集的正反转数据分别求平均,可求得六位置下每一转速MIMU角速度通道输出均值:

$$\begin{aligned}
 & G(1,i,j) = [G(1,i,j,1) + G(1,i,j,2) + \dots + G(1,i,j,n_d)]/n_d \\
 & G(2,i,j) = [G(2,i,j,1) + G(2,i,j,2) + \dots + G(2,i,j,n_d)]/n_d \\
 & G(3,i,j) = [G(3,i,j,1) + G(3,i,j,2) + \dots + G(3,i,j,n_d)]/n_d \\
 [0096] \quad & G(4,i,j) = [G(4,i,j,1) + G(4,i,j,2) + \dots + G(4,i,j,n_d)]/n_d \\
 & G(5,i,j) = [G(5,i,j,1) + G(5,i,j,2) + \dots + G(5,i,j,n_d)]/n_d \\
 & G(6,i,j) = [G(6,i,j,1) + G(6,i,j,2) + \dots + G(6,i,j,n_d)]/n_d
 \end{aligned}$$

[0097] 式中, $1, \dots, 6$ 分别代表如图3a,图3b,图3c,图3d,图3e,图3f中所示的MIMU六个测量位置, $i$ 代表角速度通道三个轴向的陀螺仪编号, $i = X, Y, Z$ , $j$ 代表MIMU正反转速编号, $j = 0, \pm 10^\circ/\text{s}, \dots, \pm 80^\circ/\text{s}$ , $G(m, i, j, n_d)$ 代表第 $m$ 个位置 $j$ 转速下MIMU中第 $i$ 轴向陀螺仪输出数据, $n_d$ 代表采集数据的个数,通过数据平均处理,将任意转速下采集的MIMU角速度通道原始数据平均为 $G(6, 3, 2)$ 。

[0098] 所述步骤四中的杆臂效应误差补偿模型,包括:

[0099] 在标定多个MIMU时,由于MIMU测量中心与转台旋转中心之间存在杆臂 $r$ ,当转台以角速率 $\omega$ 转动时,产生离心加速度 $a_\omega$ :

$$[0100] \quad \mathbf{a}_\omega = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \omega_y^2 + r_x \omega_z^2 - r_y \omega_x \omega_y - r_z \omega_x \omega_z \\ r_y \omega_x^2 + r_y \omega_z^2 - r_x \omega_x \omega_y - r_z \omega_y \omega_z \\ r_z \omega_x^2 + r_z \omega_y^2 - r_x \omega_z \omega_x - r_y \omega_z \omega_y \end{bmatrix};$$

[0101] 其中,杆臂 $\mathbf{r} = [r_x \ r_y \ r_z]^T$ ,角速率 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ ;

[0102] 则加速度通道的实际输入 $a_{in}$ 为:

[0103]  $a_{in} = \mathbf{g} + \mathbf{a}_\omega$

[0104] 将加速度输入分解为已知加速度和未知加速度,所述已知加速度为重力加速度;

所述未知加速度为离心加速度：

$$[0105] \quad \begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{\omega x} \\ a_{\omega y} \\ a_{\omega z} \end{bmatrix} \right)$$

[0106] 由于传统的六方位正反速率法的解算模型中加速度通道输入为重力加速度,用传统方法标定多MIMU会带来离心加速度引起的标定误差。解算误差系数进行补偿后结果为：

$$[0107] \quad \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{ex} \\ a_{ey} \\ a_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} \bar{a}_x \\ \bar{a}_y \\ \bar{a}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} \right)$$

[0108] 式中： $a_x, a_y, a_z$ 分别为测量轴x, y, z实际加速度值, $a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}$ 分别为测量轴x, y, z由于标定时的离心加速度引起的补偿误差; $a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}$ 与标定时测量轴x, y, z离心加速度大小分别成正比。

[0109] 加速度通道误差系数解算模型是根据实验数据对加速度通道误差模型进行扩维,得到加速度通道输出与输入关系为：

$$[0110] \quad \bar{A}_O = K_A A_I$$

[0111] 式中： $\bar{A}_O$ 为12组数据加速度计输出矩阵, $A_I$ 为12组数据加速度输入矩阵, $K_A$ 为加速度通道误差系数矩阵；

$$[0112] \quad \bar{A}_O = \begin{bmatrix} \bar{a}_{x1} & \bar{a}_{x2} & \bar{a}_{x3} & \bar{a}_{x4} & \bar{a}_{x5} & \bar{a}_{x6} & \bar{a}_{x7} & \bar{a}_{x8} & \bar{a}_{x9} & \bar{a}_{x10} & \bar{a}_{x11} & \bar{a}_{x12} \\ \bar{a}_{y1} & \bar{a}_{y2} & \bar{a}_{y3} & \bar{a}_{y4} & \bar{a}_{y5} & \bar{a}_{y6} & \bar{a}_{y7} & \bar{a}_{y8} & \bar{a}_{y9} & \bar{a}_{y10} & \bar{a}_{y11} & \bar{a}_{y12} \\ \bar{a}_{z1} & \bar{a}_{z2} & \bar{a}_{z3} & \bar{a}_{z4} & \bar{a}_{z5} & \bar{a}_{z6} & \bar{a}_{z7} & \bar{a}_{z8} & \bar{a}_{z9} & \bar{a}_{z10} & \bar{a}_{z11} & \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0113] \quad A_I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} & a_{x5} & a_{x6} & a_{x7} & a_{x8} & a_{x9} & a_{x10} & a_{x11} & a_{x12} \\ a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} & a_{y5} & a_{y6} & a_{y7} & a_{y8} & a_{y9} & a_{y10} & a_{y11} & a_{y12} \\ a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} & a_{z5} & a_{z6} & a_{z7} & a_{z8} & a_{z9} & a_{z10} & a_{z11} & a_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0114] \quad K_A = \begin{bmatrix} a_{x0} & K_{ax} & M_{xy} & M_{xz} \\ a_{y0} & M_{yx} & K_{ay} & M_{yz} \\ a_{z0} & M_{zx} & M_{zy} & K_{az} \end{bmatrix}。$$

[0115] 根据加速度通道输入输出方程,将其中 $A_I$ 分解为 $A_{I1}$ 和 $A_{I2}$ (分解的 $A_{I2}$ 由于含全为0的行而进行降维),得到降维模型：

$$[0116] \quad \bar{A}_O = K_A A_{I1} + K'_A A_{I2} S$$

[0117] 式中： $A_{I1}$ 为12组数据重力加速度输入和元素1组成的矩阵, $A_{I2}$ 为12组数据离心加速度输入矩阵, $K'_A$ 为 $K_A$ 的降维矩阵；

[0118] 步骤四中的离心加速度降维解耦模型为：

[0119] 建立离心加速度解耦模型是每次翻转MIMU后,在 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 两个n倍速率点采集数据,r是一定的,取 $\omega_2 = n\omega_1$ ,则有翻转后加速度关系：

$$[0120] \quad a_{2im} = n^2 a_{1im}$$

[0121] 利用加速度关系对降维模型进行解耦,可消除离心加速度,得到去除离心加速度的降维模型:

$$[0122] \quad \bar{A}'_O = (n^2 - 1)K_A A'_{I1}$$

[0123] 其中,  $\bar{A}'_O$  和  $A'_{I1}$  如下,由测量数据分解得到:

$$[0124] \quad \bar{A}'_O = \begin{bmatrix} n^2 \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & n^2 \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & n^2 \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & n^2 \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & n^2 \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & n^2 \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ n^2 \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & n^2 \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & n^2 \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & n^2 \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & n^2 \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & n^2 \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ n^2 \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & n^2 \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & n^2 \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & n^2 \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & n^2 \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & n^2 \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0125] \quad A'_{I1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ g & -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & -g \end{bmatrix}$$

[0126] 建立加速度通道误差系数解算方法在消除离心加速度后,12项误差系数可由18个不相关方程组解出。在实际应用中,Z轴向上为MIMU最常用工作状态。增大Z轴向上方位数据的权值,有助于抑制非线性和非对称性误差,从而提高导航系统性能。在去除离心加速度的降维模型两边同时乘以六方位数据的权值矩阵,得到方程组:

$$[0127] \quad \bar{A}''_O = (n^2 - 1)K_A A''_{I1}$$

[0128] 式中:  $\bar{A}''_O$  和  $A''_{I1}$  乘权值矩阵  $\sigma_a$  后得到  $\bar{A}'''_O$  和  $A'''_{I1}$ , 其中:

[0129]  $\sigma_a = \text{Diag}[\sigma_{a1} \ \sigma_{a2} \ \sigma_{a3} \ \sigma_{a4} \ \sigma_{a5} \ \sigma_{a6}]$ , 其中  $\sigma_{a5}$  为Z轴向上方位权值,大于其他方位权值;再使用加权最小二乘法解算得到  $K_A$ , 最终角速度通道误差系数解算模型为:

$$[0130] \quad K_A = \frac{1}{n^2 - 1} (A'''_{I1} A'''_{I1T})^{-1} A'''_{I1} \bar{A}'''_OT$$

[0131] 加速度输入解算求解未知离心加速度,角速度通道误差系数包括比力相关项,求解未知离心加速度,进行消元,得到加速度输入位置离心加速度模型:

$$[0132] \quad A'_{I2} = \frac{1}{(1 - n^2)} \bar{A}'''_O K_A^{-1}$$

[0133] 式中:

$$[0134] \quad \bar{A}'''_O = \begin{bmatrix} \bar{a}_{x1} - \bar{a}_{x2} & \bar{a}_{x3} - \bar{a}_{x4} & \bar{a}_{x5} - \bar{a}_{x6} & \bar{a}_{x7} - \bar{a}_{x8} & \bar{a}_{x9} - \bar{a}_{x10} & \bar{a}_{x11} - \bar{a}_{x12} \\ \bar{a}_{y1} - \bar{a}_{y2} & \bar{a}_{y3} - \bar{a}_{y4} & \bar{a}_{y5} - \bar{a}_{y6} & \bar{a}_{y7} - \bar{a}_{y8} & \bar{a}_{y9} - \bar{a}_{y10} & \bar{a}_{y11} - \bar{a}_{y12} \\ \bar{a}_{z1} - \bar{a}_{z2} & \bar{a}_{z3} - \bar{a}_{z4} & \bar{a}_{z5} - \bar{a}_{z6} & \bar{a}_{z7} - \bar{a}_{z8} & \bar{a}_{z9} - \bar{a}_{z10} & \bar{a}_{z11} - \bar{a}_{z12} \end{bmatrix}$$

$$[0135] \quad A'_{I2} = \begin{bmatrix} a_{1x1} & a_{1x2} & a_{1x3} & a_{1x4} & a_{1x5} & a_{1x6} \\ a_{1y1} & a_{1y2} & a_{1y3} & a_{1y4} & a_{1y5} & a_{1y6} \\ a_{1z1} & a_{1z2} & a_{1z3} & a_{1z4} & a_{1z5} & a_{1z6} \end{bmatrix};$$

[0136] 地球自转角速度水平分量经转台旋转调制为正弦信号,整周期均值为零;根据角速度通道误差模型,标定方法中角速度通道输出与输入关系为:

$$[0137] \quad \bar{G}_O = K_G G_I$$

[0138] 式中： $\bar{G}_O$ 为12组数据角速度计输出矩阵， $G_I$ 为12组数据角速度和加速度输入矩阵， $K_G$ 为角速度通道误差系数矩阵；

$$[0139] \quad K_G = \begin{bmatrix} \omega_{x0} & K_{gx} & E_{xy} & E_{xz} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ \omega_{y0} & E_{yx} & K_{gy} & E_{yz} & D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ \omega_{z0} & E_{zx} & E_{zy} & K_{gz} & D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

$$[0140] \quad \bar{G}_O = \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{x1} & \bar{\omega}_{y1} & \bar{\omega}_{z1} \\ \bar{\omega}_{x2} & \bar{\omega}_{y2} & \bar{\omega}_{z2} \\ \bar{\omega}_{x3} & \bar{\omega}_{y3} & \bar{\omega}_{z3} \\ \bar{\omega}_{x4} & \bar{\omega}_{y4} & \bar{\omega}_{z4} \\ \bar{\omega}_{x5} & \bar{\omega}_{y5} & \bar{\omega}_{z5} \\ \bar{\omega}_{x6} & \bar{\omega}_{y6} & \bar{\omega}_{z6} \\ \bar{\omega}_{x7} & \bar{\omega}_{y7} & \bar{\omega}_{z7} \\ \bar{\omega}_{x8} & \bar{\omega}_{y8} & \bar{\omega}_{z8} \\ \bar{\omega}_{x9} & \bar{\omega}_{y9} & \bar{\omega}_{z9} \\ \bar{\omega}_{x10} & \bar{\omega}_{y10} & \bar{\omega}_{z10} \\ \bar{\omega}_{x11} & \bar{\omega}_{y11} & \bar{\omega}_{z11} \\ \bar{\omega}_{x12} & \bar{\omega}_{y12} & \bar{\omega}_{z12} \end{bmatrix}^T \quad G_I = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{i+} & 0 & 0 & g+a_{1x1} & a_{1y1} & a_{1z1} \\ 1 & \omega_{i-} & 0 & 0 & g+a_{2x1} & a_{2y1} & a_{2z1} \\ 1 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & 0 & -g+a_{1x2} & a_{1y2} & a_{1z2} \\ 1 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & 0 & -g+a_{2x2} & a_{2y2} & a_{2z2} \\ 1 & 0 & \omega_{i+} & 0 & a_{1x3} & g+a_{1y3} & a_{1z3} \\ 1 & 0 & \omega_{i-} & 0 & a_{2x3} & g+a_{2y3} & a_{2z3} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & 0 & a_{1x4} & -g+a_{1y4} & a_{1z4} \\ 1 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & 0 & a_{1x4} & -g+a_{2y4} & a_{2z4} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i+} & a_{1x5} & a_{1y5} & g+a_{1z5} \\ 1 & 0 & 0 & \omega_{i-} & a_{2x5} & a_{2y5} & g+a_{2z5} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i+} & a_{1x6} & a_{1y6} & -g+a_{1z6} \\ 1 & 0 & 0 & \hat{\omega}_{i-} & a_{2x6} & a_{2y6} & -g+a_{2z6} \end{bmatrix}^T$$

[0141]  $\omega_{i+} = \omega_i + \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\omega_{i-} = -\omega_i + \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\hat{\omega}_{i+} = \omega_i - \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\hat{\omega}_{i-} = -\omega_i - \Omega_e \sin(\phi)$ ,  $\Omega_e$ 表示地球自转角速度， $\bar{\omega}_m$ 为陀螺输出原始数据， $\omega_i$ 为输入角速率， $\phi$ 为当地纬度；

[0142] 角速度通道误差系数解算：

[0143] 角速度误差模型中21项角速度通道误差系数可由36个不相关方程组解出，应用加权最小二乘法，角速度通道输出与输入关系公式左右两边同时乘以六方位数据的权值矩阵 $\sigma_g$ ，得到方程组：

$$[0144] \quad \bar{G}'_O = K_G G'_I, \quad K_G = (G'_I G'^T_I)^{-1} G'_I \bar{G}'_O{}^T$$

[0145] 式中： $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ 乘权值矩阵 $\sigma_g$ 后得到 $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ ，其中： $\sigma_g = \text{Diag}[\sigma_{g1} \ \sigma_{g2} \ \cdots \ \sigma_{g11} \ \sigma_{g12}]$ ， $\sigma_{g9}$ 和 $\sigma_{g10}$ 为Z轴向上方位数据权值，大于其他方位权值。

[0146] 根据加权最小二乘法解算陀螺标度因数 $K_G$ 得到完整角速度误差系数计算模型：

$$[0147] \quad K_G = (G'_I G'^T_I)^{-1} G'_I \bar{G}'_O{}^T$$

[0148] 式中： $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ 乘权值矩阵 $\sigma_g$ 后得到 $\bar{G}'_O$ 和 $G'_I$ ，其中 $\sigma_g = \text{Diag}[\sigma_{g1} \ \sigma_{g2} \ \cdots \ \sigma_{g11} \ \sigma_{g12}]$ ， $\sigma_{g9}$ 和 $\sigma_{g10}$ 为Z轴向上方位数据权值，大于其他方位权值。

[0149] 综上，共得到MIMU陀螺仪和加速度计共计33个误差参数。可为后续补偿和信息融合算法提供误差修正指标。

[0150] 本发明的原理：

[0151] 本发明设计了一种针对微小型惯性测量系统多MIMU的基于杆臂补偿与正反倍速

率误差标定方法,针对安装误差相对传统的惯性测量单元较大的问题,根据相应杆臂效应影响机理分析并结合误差漂移数学统计模型,应用加权最小二乘法,设计了使用单轴速率转台和六面体工装的标定方法,可抵消地速及重力的误差影响,测试设备无需对北,处理计算结果统计性强。且实验设备要求低,标定时间短、标定工作量小,适合同时标定多MIMU等优点。试验结果表明,本文提出的标定方法简易、高效。MIMU常用工作方位下,加速度通道和角速度通道系统误差的补偿精度均有较大提高。

[0152] 本发明的优点在于:

[0153] (1) 解决了应用传统的六方位正反速率标定方法会受到杆臂效应引起的离心加速度影响、导致标定精度下降的问题,使用正反倍速率使得结果较传统标定方法精度得到提高。

[0154] (2) 可同时进行多MIMU标定,通过杆臂误差模型确定各IMU误差指标,提高标定效率。

[0155] (3) 利用加权最小二乘法,有效抑制了数据非线性和非对称性误差,加速度通道和角速度通道系统误差的补偿精度均有较大提高。

[0156] 以上公开的仅为本发明的具体实施例,但是,本发明并非局限于上述实施例,任何本领域的技术人员能思之的变化都应落入本发明的保护范围。



图1

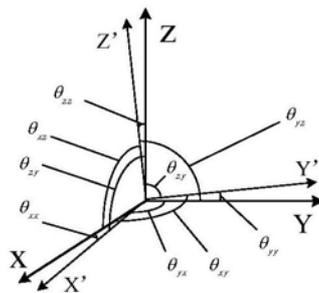


图2a

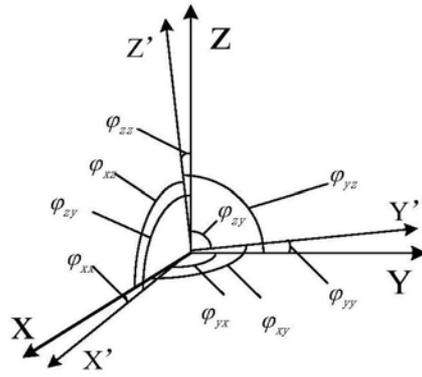


图2b

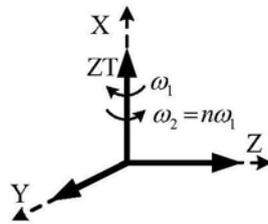


图3a

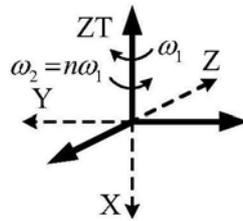


图3b

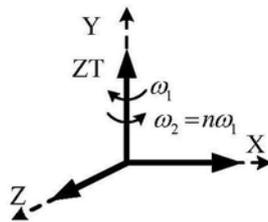


图3c

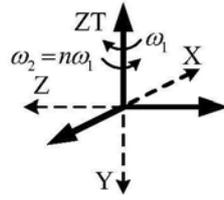


图3d

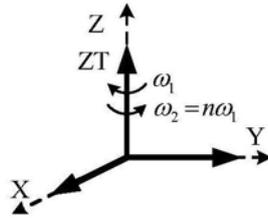


图3e

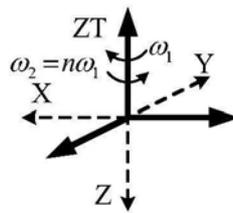


图3f