

李孟委,徐文武,张鹏.基于四元数互补滤波算法的车载MIMU[J].河南理工大学学报(自然科学版) 2021 40(1):111-117. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2019080073

LI M W, XU W W, ZHANG P. Vehicle-borne MIMU based on quaternion complementary filtering algorithm[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science) 2021 40(1): 111-117. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2019080073

基于四元数互补滤波算法的车载MIMU

李孟委,徐文武,张鹏

(中北大学 仪器与电子学院,山西 太原 030051)

摘要:针对MEMS惯性器件由于测量精度低、数据易漂移而导致车载惯性导航系统姿态解算数据不稳定和精度不高的问题,设计一种基于四元数互补滤波算法的高精度车载MEMS惯性测量单元(MIMU)。通过四元数算法降低MIMU在运行过程中的计算难度,解决姿态解算中的奇点问题。利用互补滤波算法对惯性传感器运行过程中的高低频误差进行动态补偿、数据融合,减小陀螺仪积分漂移累加,抑制加速度计振动误差,实现多传感器数据融合的MIMU姿态解算。将MIMU放置于高精度无磁转台上进行动态测试,通过设置转台运行动作模拟车载环境,采集并分析MIMU在动态环境中的各个轴向角实时数据与误差数据。试验结果表明,MIMU横滚角精度为 0.26° ,俯仰角精度为 0.23° ,航向角精度为 0.51° 。

关键词:惯性导航;四元数;互补滤波;姿态解算;MEMS器件

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1673-9787(2021)1-111-6

Vehicle-borne MIMU based on quaternion complementary filtering algorithm

LI Mengwei, XU Wenwu, ZHANG Peng

(College of Instruments and Electronics, Zhongbei University, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: In order to solve the problems of instability and low precision of attitude calculation data of vehicle-borne inertial navigation system caused by low measurement accuracy and data drift of MEMS inertial devices, a high-precision vehicle-borne MEMS inertial measurement unit(MIMU) based on quaternion complementary filtering algorithm was designed. Quaternion algorithm was used to reduce the computational difficulty of MIMU in operation and to solve the singularity problem in attitude calculation. The complementary filtering algorithm was used to compensate the high and low frequency errors of inertial sensors dynamically and to fuse the data, to reduce the accumulation of gyroscope integral drift, to restrain the vibration errors of accelerometers and to realize MIMU attitude calculation of multi-sensor data fusion. The MIMU was placed on a high-precision non-magnetic turntable for dynamic testing. The real-time data and error data of each axis angle of MIMU in the dynamic environment were collected and analyzed by setting up the turntable operation to simulate the vehicle environment. The experimental results showed that the roll angle accuracy of MIMU was 0.26° , the pitch angle

收稿日期:2019-08-22;修回日期:2019-11-28

基金项目:军委装备发展部预研基金资助项目(41403010305);装备预研兵器工业联合基金资助项目(6141B012907)

第一作者简介:李孟委(1975—),男,陕西西安人,博士,副教授,主要从事新原理MEMS惯性传感器及导航、MEMS陀螺等方面的教学和研究工作。Email:lmwprew@163.com

通讯作者简介:张鹏(1979—),男,山西运城人,博士,副教授,主要从事惯导装备标定、惯组研发等方面的教学和研究工作。Email:sxyczhangpeng@126.com

accuracy was 0.23° and the heading angle accuracy was 0.51° .

Key words: inertial navigation; quaternion; complementary filtering; attitude solution; MEMS device

0 引言

微惯性测量单元(MIMU)是一种由多个MEMS惯性传感器作为姿态测量组件,可独立工作、不依赖外界数据的姿态检测导航系统。相比于传统基于光纤陀螺、激光陀螺等大型惯性传感器设计的惯性测量单元(IMU),MIMU体积小、功耗低、移动性与操作性更强。随着惯性技术的发展,MIMU的精度得到大幅度提升,已广泛应用于车载导航系统。陶子涵等^[1]采用MEMS惯性测量器件设计的姿态测量系统,精度为俯仰轴 0.35° 、横滚轴 0.36° 、航向轴 0.51° ,满足车载MIMU使用精度。车载MIMU内置欧拉角、四元数等姿态解算算法,对惯性传感器的原始数据进行整合处理;利用互补滤波、卡尔曼滤波算法对系统输出的姿态进行耦合,提升姿态解算精度,为车辆提供高精度实时三轴姿态变化信息。

车载MIMU中的MEMS惯性传感器存在易漂移、单个器件测量精度低以及易受外界环境干扰的缺点。在求解载体姿态信息的过程中,MEMS陀螺仪通过角速度积分计算载体姿态变化,MEMS加速度计通过采集重力加速度分量获取载体姿态变化信息,两者均可独立地进行姿态解算。然而,在车载MIMU运行过程中,因MEMS惯性器件本身特性问题,会导致系统解算出的姿态数据不准确:MEMS陀螺仪存在积分漂移累积的问题,导致输出不准确姿态数据;MEMS加速度计存在因外部环境引起的振动误差,导致系统的姿态解算精度大幅度降低^[2];MEMS三轴磁力计因外界磁场干扰,导致航向角漂移。这三者易受外界温度、电磁干扰等影响,从而导致输出姿态不准。因此,MIMU应结合MEMS传感器各自的优势,对多传感器输出的数据进行融合处理。

本文在车载MIMU四元数姿态解算算法的基础上加入互补滤波算法,用以解决因惯性器件本身特性导致的解算精度较低的问题。四元数的使用可以有效降低计算的复杂度和难度,其旋转特性可以解决车载MIMU姿态解算中存在的奇异性问题。在惯性测量仪器的精度较低的情况下,使用互补滤波算法可以有效改善测量仪器精度低、数据不稳定的状况。

1 姿态解算

1.1 建立坐标系

当描述一个三维空间刚体转动时,需要选用3个独立的角度表示具有一个固定点刚体的相对位置。为了计算车辆的实时姿态变换关系与输出姿态角的表达式,建立相应的载体坐标系与导航坐标系,通过坐标系之间的角度变换公式描述载体姿态。导航坐标系采用传统的“东北天”地理坐标系,载体坐标系采用通过右手定则确立的三维笛卡尔坐标系^[3]。

求解车载MIMU运动过程中姿态角变换需要引入姿态变换矩阵。姿态变换矩阵是根据载体旋转顺序确定的变换矩阵的连乘,是一种多个运动复合后的数学表达式。通过姿态变换矩阵可以很好地描述载体的运动状态^[4]。建立如图1所示的坐标系,其中 n 系为导航坐标系, b 系为载体坐标系。载体按照 $Z_n \rightarrow X_1 \rightarrow Y_2$ 的顺序依次旋转。

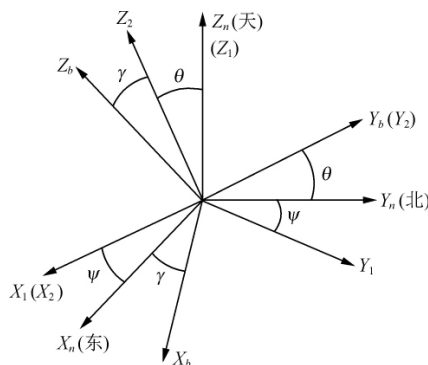


图1 导航坐标系与载体坐标系

Fig. 1 Navigation coordinate system and carrier coordinate system

各次基本旋转对应的变换矩阵为

$$C_n^1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_2^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

将式(1)~(3)连乘,可得到用欧拉角表示的任意两个坐标之间的方向余弦矩阵:

$$C_n^b = C_2^b C_1^2 C_n^1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)可简化为

$$C_n^b = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

姿态变换矩阵为单位正交阵^[5], 根据其特性可得

$$C_n^b = (C_n^b)^{-1} = (C_n^b)^T \quad (6)$$

由此可求出姿态角(欧拉角):

$$\begin{aligned} \gamma &= \tan^{-1} \left(\frac{T_{32}}{T_{33}} \right); \\ \theta &= \sin^{-1} \left(-T_{31} \right); \\ \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{T_{21}}{T_{11}} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

式中 γ θ ψ 分别为车载 MIMU 经过欧拉角姿态解算算法计算后输出的横滚角、俯仰角与航向角。

1.2 四元数法

利用欧拉角求解载体姿态的算法思想简单、编程难度低。但是, 从上面的欧拉角推理过程可以看出, 其计算过程存在大量的三角函数运算, 对主控器负担较重, 影响 MIMU 整体性能, 算法计算量较大, 而且在横滚角与航向角的求解公式中存在正切函数, 而正切函数的特性使 $\pm 90^\circ$ 位置会出现无穷大解, 导致奇点问题出现, 影响车载 MIMU 姿态解算精度。为了实现车载 MIMU 全方位的姿态解算, 避免解算过程中出现奇点问题, 本文引入

$$\begin{aligned} q_0(t+T) &= q_0(t) + \frac{T}{2} [-\omega_x(t) q_1(t) - \omega_y(t) q_2(t) - \omega_z(t) q_3(t)], \\ q_1(t+T) &= q_1(t) + \frac{T}{2} [\omega_x(t) q_0(t) + \omega_z(t) q_2(t) - \omega_y(t) q_3(t)], \\ q_2(t+T) &= q_2(t) + \frac{T}{2} [\omega_y(t) q_0(t) - \omega_z(t) q_1(t) - \omega_x(t) q_3(t)], \\ q_3(t+T) &= q_3(t) + \frac{T}{2} [\omega_z(t) q_0(t) + \omega_y(t) q_1(t) - \omega_x(t) q_2(t)], \end{aligned} \quad (9)$$

式中 ω_x ω_y ω_z 分别为陀螺仪在规定周期内完成的 3 个轴向角速度采样。在各个采样周期中, 角速度是变量, 将采样值与四元数初始值代入式(9), 就可以实现四元数的不断更新。由于四元数是一个四维单位向量, 在完成四元数的更新后, 需要将其进行单位化处理, 计算公式为

$$q^i = \frac{q^i}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}} \quad (10)$$

(4) 四元数转换为欧拉角。四元数运算过程中也需要经过姿态变换矩阵, 即用四元数常量代替三角函数运算, 求解姿态角。在完成四元数矩阵的更新之后, 需要将得到的四元数变量转换为

四元数姿态解算算法^[6]。

四元数法通过 4 个变量实时更新计算方法, 代替大量的三角函数运算表示载体姿态角的变化, 具有计算量小、算法流程简单、计算过程中解算无奇点等优点, 能使车载 MIMU 在运行过程中实现全方位完全的姿态解算^[7]。

四元数算法的运算步骤如下。

(1) 采集加速度计与陀螺仪的原始数据, 通过方向余弦矩阵思想, 求解出欧拉角的初始值。根据陀螺仪的数据推算理论上的加速度计值。将四元数的 4 个数值换算为方向余弦矩阵的第 3 列元素, 代表载体坐标系的值, 即可得到加速度计对于陀螺仪的修正量; 将修正量再进行积分, 即可得到当前时间段内的累积误差。最后用陀螺仪的数据减去误差量, 即可得到修正后的、较为准确的陀螺仪数据, 代入四元数微分方程中, 对最终运算结果的准确性起到很好的作用。

(2) 四元数初始化。初始化方程如下:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} - \sin \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} + \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \\ \sin \frac{\psi_0}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\gamma_0}{2} - \cos \frac{\psi_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\gamma_0}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过式(8)即可得到初始的四元数量。

(3) 四元数的更新及规范化。有了初始化的四元数量, 再结合姿态数据采样周期及采样数据, 即可对四元数进行更新, 从而实时更新数据, 实现姿态解算^[8]。更新方程可表示为

可以表示载体运动的方向余弦阵表达式,再转换成欧拉角^[9]。由四元数变量组成的方向余弦阵

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^2 + q_0^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_2^2 - q_3^2 + q_0^2 - q_1^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

至此,得到了只用四元数中的 4 个变量表示的载体姿态角公式:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctan \left(\frac{2(q_2q_3 - q_0q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right); \\ \theta &= \arcsin(-2(q_0q_2 + q_1q_3)); \\ \psi &= \arctan \left(\frac{2(q_1q_2 - q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

1.3 互补滤波算法

MEMS 陀螺仪与 MEMS 加速度计由于制作工艺以及自身属性的原因,输出的原始数据易受温度、电磁干扰、振动等外界因素影响。MEMS 陀螺仪容易产生因积分漂移累加所导致的低频误差;MEMS 加速度计在受到外界振动时易产生高频振动误差。若不对这些误差进行相关处理,将导致 MIMU 输出姿态数据紊乱,可信度较低。为此,引入互补滤波算法,对惯性器件工作过程中产生的高低频误差进行处理^[10]。

互补滤波算法可针对车载 MIMU 系统的具体误差组成情况设置相庆的滤波器结构。本文所设计的互补滤波算法内置高通滤波器与低通滤波器,分别用来处理 MEMS 陀螺仪与 MEMS 加速度计所产生的低频误差与高频误差^[11]。利用互补滤波算法进行姿态解算,互补滤波算法原理框图如图 2 所示。

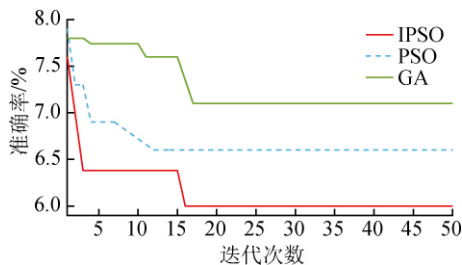


图 2 互补滤波算法流程图

Fig. 2 Flow chart of complementary filtering algorithm

为分析互补滤波算法的结构组成,利用 MEMS 陀螺仪与 MEMS 加速度计分别进行独立的姿态解算^[12]。设 x 为所得姿态角,

$$\begin{cases} x_1 = x + u_1 \\ x_2 = x + u_2 \end{cases}, \quad (13)$$

式中: x_1 μ_1 分别为 MEMS 加速度计在系统工作

如式(11)所示。

中解算的姿态角与因外界振动产生的高频噪声误差; x_2 μ_2 分别为 MEMS 陀螺仪在系统工作中解算的姿态角与自身积分漂移累加产生的低频噪声误差。

姿态角 x 的估计值 \hat{X} 可表示为

$$\hat{X}(s) = F_L(s) X_1(s) + F_H(s) X_2(s) = X(s) + F_L U_1(s) + F_H U_2(s). \quad (14)$$

式(14)为姿态角 x 的连续表达式, $F_H(s)$ $F_L(s)$ 为滤波器传递函数。为了实现互补滤波算法的编程,需要利用差分变换法将其变换为离散表达式^[13]。建立如式(15)所示方程,

$$\begin{aligned} \hat{X}(k) &= (1-f) [\hat{X}(k-1) + X_2(k) - \\ &X_2(k-1)] + fX_1(k), \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $X_1(k)$ $X_2(k)$ 分别为 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪在 k 时刻解算的角度值。

由式(14)可知,互补滤波器的结构设计简单、计算量小,对高低频误差信号均有抑制作用^[14]。根据上述算法流程进行程序编写工作,其编程思想可以描述为

$$\begin{aligned} angle &= (1-A) \times (angle_last + gyro \times dt) + \\ &A \times acc, \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $angle$ 为当前融合而成的姿态角; $angle_last$ 为上一次姿态融合结果值; $gyro$ 为当前陀螺仪测量的角速度; dt 为积分时间; acc 为加速度计解算出的姿态角。

由式(16)可以看出,互补滤波算法通过调节 MEMS 陀螺仪与 MEMS 加速度计单独解算姿态角数据的信任系数 A ,实现解算数据融合滤波。信任系数 A 可根据调试系统具体情况,对 MEMS 陀螺仪原始数据与 MEMS 加速度计原始数据进行加权平均处理,其中 $0 \leq A \leq 1$ 。从算法原理角度出发,根据所选惯性传感器本身的精度选择理论置信度。信任系数 A 对应在参数设置上应该接近于 1。这样设置信任系数 A 的意义是 MIMU 姿态解算时所用的原始数据大部分来自 MEMS 加速度计^[15]。根据所选惯性传感器的测量精度与漂移特性,经过反复比较与计算,最终选择信任系数 A 为 0.98。

2 试验

2.1 车载MIMU系统组成

车载MIMU整机采用铝合金六面体作为安装框架,确保各个电路严格正交,通过物理方法减小因MEMS惯性器件正交耦合导致的姿态信息解算误差。车载MIMU工作结构如图3所示。

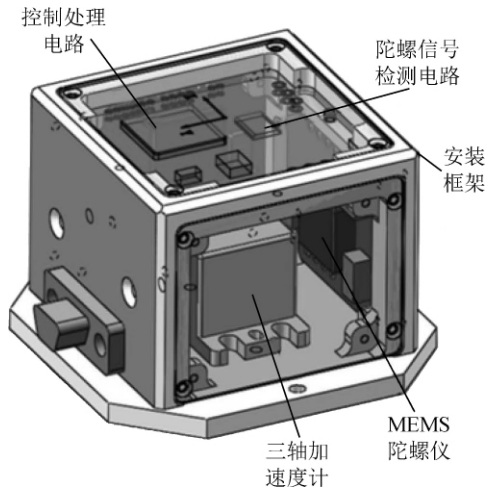


图3 车载MIMU工作结构

Fig.3 Working structure of vehicle-borne MIMU

MEMS惯性器件主要包括:3个单轴MEMS陀螺仪CRG20、三轴MEMS加表ADIS16210、三轴MEMS磁强计HMC5789。信号处理电路采用ADS1274作为处理器,将采集的原始数据进行模数转换以便于控制器更好地处理数据。

2.2 测试步骤

首先对俯仰轴进行测试:车载MIMU与无磁转台内框通过安装夹具捷联在一起;以 10° 为步长转动无磁转台,由于机械限位,俯仰轴的转动范围为 $(-90^\circ, 90^\circ)$;通过蓝牙实时传输3个电机的码盘位置,当车载MIMU数据稳定后静止采集数据10s;对所采集的数据进行存储与分析。横滚轴、航向轴的测试方法与俯仰轴测试方法相同,由于机械限位,横滚轴测试范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。

3 结果分析

将车载MIMU放置于高精度无磁转台上,由无磁转台提供高精度姿态参考信息。无磁转台的姿态精度为 0.05° ,通过对比车载MIMU解算姿态与无磁转台姿态,可以获取车载MIMU的姿态精度。图4为车载MIMU测试环境与实物图。利用MATLAB分析上述方法采集的横滚轴、俯仰轴以及航向轴的姿态角数据,得到图5~7所示的姿态角曲线。

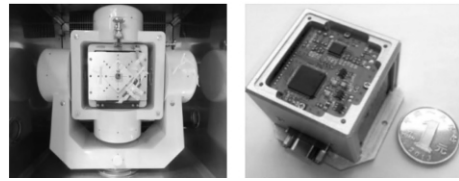


图4 车载MIMU测试环境与实物图

Fig.4 Vehicle MIMU test environment and physical chart

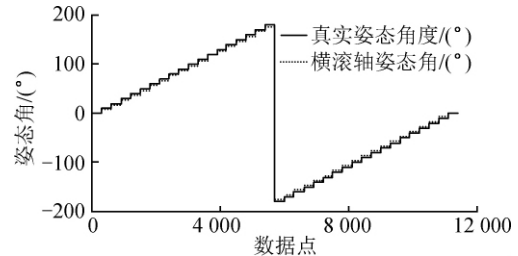


图5 横滚轴姿态角曲线

Fig.5 Attitude angle curves of rollers

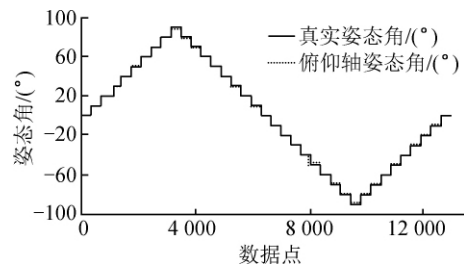


图6 俯仰轴姿态角曲线

Fig.6 Attitude angle curves of pitchaxis

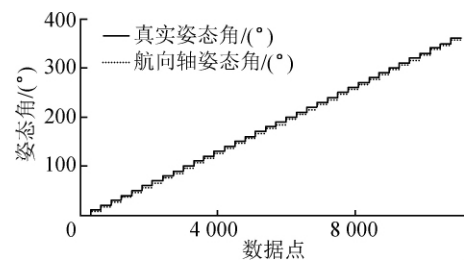


图7 航向轴姿态角曲线

Fig.7 Attitude angle curves of heading axis

从图5~7可以看出,基于四元数互补滤波算法的车载MIMU在运动过程中所得三轴姿态角与高精度无磁转台提供的参考姿态角基本一致,动态跟随效应较好。

为了具体分析车载MIMU 3个轴向姿态解算精度,分3次采集车载MIMU三轴姿态误差角数据。利用MATLAB分析采集到的俯仰轴与横滚轴的误差角数据,得到图8所示的误差图。

由图8可知,车载MIMU收到高精度无磁转台相同的位置姿态信号后,俯仰轴、横滚轴以及航向轴均有误差产生,其中俯仰轴姿态误差角在 $\pm 0.23^\circ$ 内波动;横滚轴姿态误差角在 $\pm 0.26^\circ$ 内

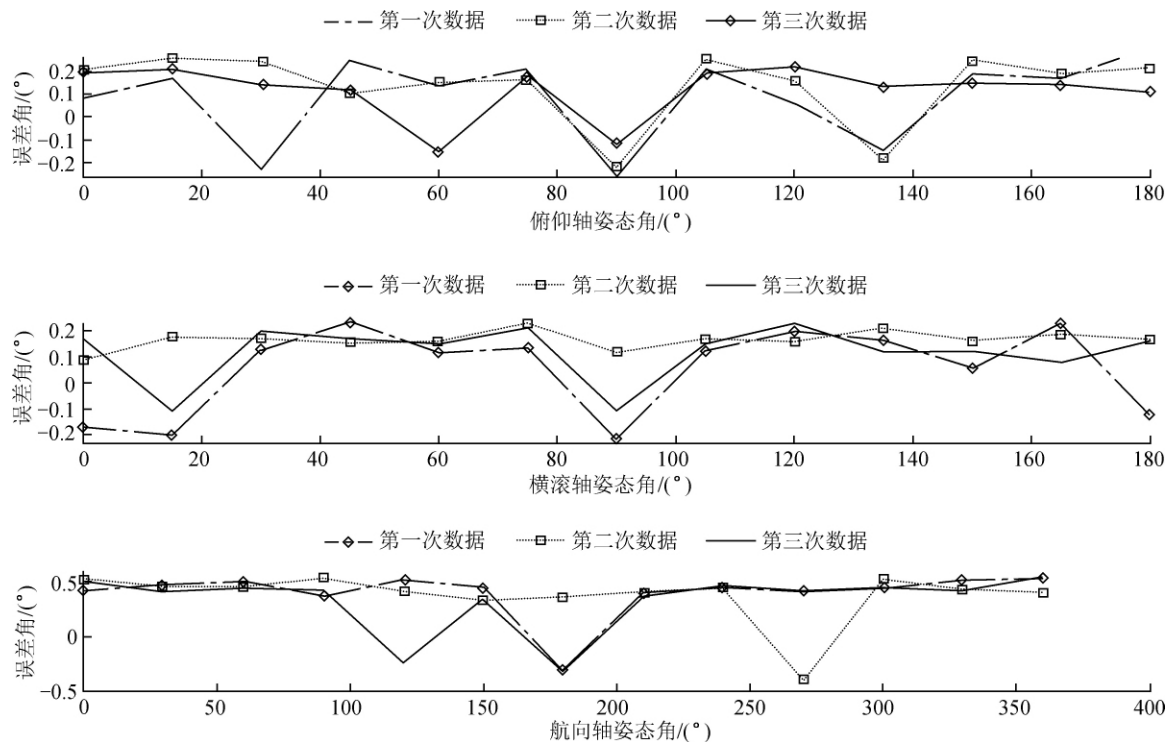


图8 车载MIMU姿态角误差图

Fig. 8 Attitude angle error diagram of vehicle-mounted MIMU

波动;航向轴姿态误差角在 $\pm 0.51^\circ$ 内波动。经过3次对车载MIMU三轴姿态误差角数据的采集与分析试验,可以得到车载MIMU实时解算的俯仰轴精度,为 0.23° ,横滚轴精度为 0.26° ,航向轴精度为 0.51° 的结论。

本文所设计的车载MIMU与文献[1]中的MIMU姿态解算精度对比情况为:俯仰轴精度提升34%,横滚轴精度提升27%,航向轴精度相等。采用此方案车载MIMU的俯仰轴与横滚轴姿态解算精度提升较大,后期可使用文献[16]中提出的有限时间一致无迹Kalman滤波器方案,实现车载MIMU姿态解算精度的提升。

4 结 语

通过采用四元数互补滤波算法,本文所设计的车载MIMU实时解算得到的俯仰轴精度为 0.23° ,横滚轴精度为 0.26° ,航向轴精度为 0.51° 。采用四元数互补滤波算法能够增强车载MIMU的动态跟随性能、提升姿态解算精度。通过试验验证了四元数互补滤波算法的可行性,满足车载导航系统惯性组件的要求。

参考文献:

- [1] 陶子涵,高国伟,徐万芝.基于MPU-6050和UKF的姿态测量系统设计[J].传感器世界,2017,23(11):17-21.
- [2] 刘佳琦.偏振光辅助定姿在组合导航中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [3] 王翔.基于多传感器的姿态检测系统设计及数据融合算法研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018.
- [4] 任孝平.汽车状态软测量和车载组合导航系统故障检测技术研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [5] 杨欢.SINS/GPS/电子罗盘组合导航系统设计[D].南昌:南昌大学,2016.
- [6] 朱科风,周庆华,王广鹏,等.基于四元数的PID改

17-21.

TAO Z H,GAO G W,XU W Z. Design of attitude measurement system based on MPU-6050 and UKF [J]. Sensor World 2017 23(11) : 17-21.

[2] 刘佳琦.偏振光辅助定姿在组合导航中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

LIU J Q. Application of polarized light assisted posture determination in integrated navigation [D]. Harbin: Harbin University of Technology 2010.

[3] 王翔.基于多传感器的姿态检测系统设计及数据融合算法研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018.

WANG X. Design of attitude detection system based on multi-sensor and research of data fusion algorithm [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology 2018.

[4] 任孝平.汽车状态软测量和车载组合导航系统故障检测技术研究[D].长沙:中南大学,2012.

REN X P. Research on soft sensing of vehicle state and fault detection technology of vehicle integrated navigation system [D]. Changsha: Central South University 2012.

[5] 杨欢.SINS/GPS/电子罗盘组合导航系统设计[D].南昌:南昌大学,2016.

YANG H. Design of SINS/GPS/electronic compass integrated navigation system [D]. Nanchang: Nanchang University 2016.

[6] 朱科风,周庆华,王广鹏,等.基于四元数的PID改

- 进型互补滤波算法[J]. 智能计算机与应用 2018 8 (3): 127-131.
- ZHU K F ,ZHOU Q H ,WANG G P ,et al. Improved complementary filtering algorithm based on quaternion PID[J]. Intelligent Computer and Application 2018 8 (3): 127-131.
- [7] 马龙,代超璠,周航,等. 多传感器互补滤波器数据融合算法设计[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39 (10): 3080-3086.
- MA L ,DAI C F ,ZHOU H ,et al. Data fusion algorithm design of multi-sensor complementary filter [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39 (10): 3080-3086.
- [8] 杨书天. 基于微惯性系统的室内定位方法研究[D]. 南京: 东南大学 2017.
- YANG S T. Indoor positioning method based on micro-inertial system [D]. Nanjing: Southeast University 2017.
- [9] 贾云亮. 基于 MEMS-GPS 的车载导航系统研究与实现[D]. 西安: 西京学院 2016.
- JIA Y L. Research and implementation of vehicle navigation system based on MEMS-GPS [D]. Xi'an: Xijing University 2016.
- [10] 滕志军,曲兆强,郭素阳,等. 基于多属性融合策略的车载导航地图匹配算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版) 2018 39(1): 14-18.
- TENG Z J ,QU Z Q ,GUO S Y ,et al. Vehicle navigation map matching algorithm based on multi-attribute fusion strategy [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition) 2018 39(1): 14-18.
- [11] 李二闯,张建杰,袁亮,等. 基于四元数互补滤波的小型四旋翼姿态解算[J]. 组合机床与自动化加工技术 2019(3): 37-39.
- LI E C ,ZHANG J J ,YUAN L ,et al. Quaternion complementary filtering based attitude calculation of small Four-rotor[J]. Combination Machine Tools and Automatic Processing Technology 2019(3): 37-39.
- [12] 田红丽,孙永全,刘洪普. 基于改进 Mahony 互补滤波算法的三维运动轨迹恢复[J]. 传感器与微系统, 2018 37(12): 118-121.
- TIAN H L ,SUN Y Q ,LIU H P. Three-dimensional trajectory recovery based on improved Mahony complementary filtering algorithm [J]. Sensors and Microsystems 2018 37(12): 118-121.
- [13] 付雷,章政,余义. 基于改进型显性互补滤波的 MEMS 姿态解算[J]. 自动化与仪表 2018 33(11): 7-12.
- FU L ,ZHANG Z ,YU Y. MEMS attitude resolution based on improved explicit complementary filtering [J]. Automation and Instrument 2018 33(11): 7-12.
- [14] 邹强,付超,莫申童. 基于激光测距传感器校正四旋翼飞行器姿态的室内组合导航[J]. 传感技术学报, 2018 31(10): 1482-1488.
- ZOU Q ,FU C ,MO S T. Indoor integrated navigation based on laser ranging sensor to correct the attitude of four-rotor aircraft [J]. Journal of Sensing Technology, 2018 31(10): 1482-1488.
- [15] 丁磊,吴蔚劼,方挺. 基于扩展卡尔曼滤波的多旋翼飞行器融合姿态解算算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版) 2018 35(3): 240-248.
- DING L ,WU W J ,FANG T. Fusion attitude calculation algorithm for multi-rotor aircraft based on extended Kalman filter [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 35 (3): 240-248.
- [16] 刘鹏,田玉平,张亚. 有限时间一致无迹 Kalman 滤波器[J/OL]. 自动化学报: 1-10 [2019-11-19]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c170726>.
- LIU P ,TIAN Y P ,ZHANG Y. Finite time uniform traceless Kalman filter [J / OL]. Acta Automatica Sinica: 1-10 [2019-11-19]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c170726>.

(责任编辑 袁兴起)