

文章编号: 2095-2163(2019)05-0180-07

中图分类号: TN967.2

文献标志码: A

基于松耦合 IMU 阵列导航系统中时间同步的研究

王 创, 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: 传感器融合算法通常假设传感器时钟之间具有完美的时间同步, 然而在实际的传感器融合过程中不可避免地存在时间同步误差, 从而导致传感器融合中的系统误差。本文首先分析了惯性传感器阵列中的时间步的机理, 然后将时间同步误差作为待估计的状态, 借助于扩展卡尔曼滤波实现时间同步误差的在线估计, 进而利用互补反馈滤波器来融合惯性阵列系统的数据。在此基础上, 本文进一步提出了使用分数延迟滤波器来实现延时数据的时间移位, 从而保证不同传感器的时间同步。仿真结果表明, 所提出时间同步误差的估计方法可以将得到的时间同步误差精确到毫秒级。

关键词: 松耦合; 惯性传感器阵列; 时间同步; 分数延迟滤波器

Time synchronization in loosely coupled IMU array navigation systems

WANG Chuang, GUAN Qi, DING Derui

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

[Abstract] Sensor fusion algorithms are usually based on the assumption of perfect time synchronization between sensor clocks. However, time synchronization errors in the actual sensor fusion process are inevitable, which results in the systematic error of sensor fusion. This paper thoroughly analyzes the mechanism of time-steps in the inertial sensor array, then takes the time synchronization error as the state to be estimated. As such, the online estimation of time synchronization errors is obtained by means of extended Kalman filters, and such an estimated value is utilized to realize data fuse of inertial array systems via the complementary feedback filter. In light of the above results, this paper further handles the time shift of the delayed data via the fractional delay filter to ensure the time synchronization of different sensors. The simulation results show that the proposed estimation method can accurately obtain the time synchronization error at the millisecond level.

[Key words] loose coupling; inertial sensor array; time synchronization; fractional delay filter

0 引 言

与传统单个惯性测量单元(IMU)相比,惯性传感器阵列是由多个IMU组合的产物,这主要归功于微电子惯性传感器(MEMS)的发展。对惯性传感器阵列的研究主要源于其可提供单个惯性测量单元(IMU)所不具备的优势:更高的精度和更高的可靠性^[1],具有更高的动态测量范围,还能够从加速度数据中估计角速度和角加速度^[2-3]。因此,近年来惯性传感器阵列受到了学者的广泛关注。

在使用惯性传感器阵列和其它传感器进行数据融合时,使用的融合算法通常假设惯性传感器阵列内的惯性测量单元(IMU)具有完美的时间同步,但在实际的使用中,这是很难实现的。造成惯性传感

器阵列时钟不同步的因素有很多,例如,测量采集时间、预处理时间、通信传输时间、缓冲时间、计算机调度时间、制造工艺和环境因素影响等。

目前,解决时间同步误差问题主要有3类方法:硬件实现、软件实现和软硬件实现。其中,在处理GPS/INS组合导航中,研究人员通过硬件检测1PPS(Pulses Per Second)脉冲的方法解决SINS/GNSS的时间同步问题^[4-5]。也有基于高精度定时器的时间同步方案^[6],但这些方法都需要增加额外的硬件。软件实现方法是采用同步的外推算法^[7],该方法运算量较大。此外,软硬结合的方法则是利用多项式拟合^[8-9],该方法同样需要计算大量的数据点。

本文是在惯性传感器阵列校正^[10]的基础上,研究了惯性传感器阵列中惯性测量单元(IMU)存在时

基金项目: 国家自然科学基金(61573246)。

作者简介: 王 创(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理、视觉SLAM、多传感器数据融合;管 启(1989-),男,博士研究生,主要研究方向:数字图像处理、视觉SLAM、多传感器数据融合;丁德锐(1981-),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:随机非线性控制与滤波,智能算法、图像处理。

通讯作者: 丁德锐 Email:deruiding2010@usst.edu.cn

收稿日期: 2019-07-12

间同步误差的问题。并在由惯性传感器阵列构成的闭环松耦合反馈系统中研究了时间同步误差对系统性能的影响。本文提出把时间同步误差作为一个待估状态,将其看作是扩展到卡尔曼滤波器状态向量实现在线估计,进而将估计出来的时间同步误差反馈到导航解算回路中,并在分数延时滤波器中完成数据的时间同步。

1 惯性阵列导航系统基本模型

在本文研究的时间同步问题中,设 T_d 表示时间延时, T_s 为 IMU 的采样周期,且系统中时钟之间的偏置和漂移率已经得到补偿,只有时钟之间的初始偏置量未知,即认为时间同步误差为常数。对此拟展开研究论述如下。

1.1 惯性传感器阵列系统方程建立

在惯性传感器阵列组成的导航系统中,本文选择了以各个导航子系统间的误差量作为状态量,建立基于卡尔曼滤波器的间接法滤波。

具体地,卡尔曼滤波器的输入为 2 个惯性导航系统对同一导航参数测量输出的差值,经过迭代的滤波计算,估计出各误差量。若惯性导航系统误差的估计值被用于校正惯性导航系统输出的导航参数称为输出校正;若使惯性导航系统误差的估计值反馈到系统的内部,称为反馈校正。

本文采用反馈校正的系统。状态向量 \mathbf{x}_k 为:

$$\mathbf{x}_k = [\delta \mathbf{m}_k^T \quad \delta \mathbf{b}_k^T]^T, \quad (1)$$

其中, $\delta \mathbf{m}_k$ 由惯性导航系统的位置误差 δs 、速度误差 δv 、姿态角误差 $\delta \psi$ 组成; $\delta \mathbf{b}_k$ 为 IMU 传感器的误差,由加速度计的比力误差 δf 和陀螺仪偏差 δw 共同构成。

惯性导航系统的误差状态空间表达式为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{e}_k, \quad (2)$$

其中, Φ_k 是状态转移矩阵; \mathbf{G}_k 是过程噪声增益矩阵; \mathbf{e}_k 是惯性传感器测量噪声;协方差矩阵为 $\mathbf{Q} = E\{\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T\}$ ($E\{\cdot\}$ 表示期望)。

借助于导航系统的解算可以得到惯性阵列中惯导系统对位置的估计。进而,利用惯性阵列中任意 2 个惯导系统的位置估计的差,可得间接滤波法中的观测方程为:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k, \quad (3)$$

其中,测量矩阵 \mathbf{H}_k 为:

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{I}_i \quad \mathbf{0}_{i,j-i}]. \quad (4)$$

这里, i 和 j 分别为位置向量 \mathbf{z}_k 和状态向量 \mathbf{x}_k

的维数。

1.2 含有时间同步误差的系统方程

在实际工程中,惯性阵列中 IMU1 与 IMU2 不可避免地存在时间同步误差。在本文中,记采样时刻之间的差为 T_d ,采样时刻间的未对准量是恒定的,记为 $T_d^{[11]}$ 。假设载体的轨迹方程为 $s(t)$,则 IMU2 在采样瞬间 k 时的位置估计值为:

$$\hat{s}_k^{IMU2} = s(kT_s - T_d) + w_k, \quad (5)$$

其中, w_k 为 IMU2 的位置估计误差,协方差为 $R = E\{w_k w_k^T\}$ 。因为 T_s 相比 T_d 是一个小量,可以在 $t = kT_s$ 附近对 $s(kT_s - T_d)$ 进行二阶泰勒展开为:

$$s(kT_s - T_d) \approx s_k - v_k T_d + a_k \frac{T_d^2}{2}, \quad (6)$$

其中, s_k 、 v_k 、 a_k 分别表示瞬时 k 采样时载体平台位置、速度、加速度。将式(6)代入式(5)得到:

$$\hat{s}_k^{IMU2} = s_k - v_k T_d + a_k \frac{T_d^2}{2} + w_k, \quad (7)$$

基于上式,反馈给闭环系统的真实观测值 z_{dk} 可以描述为:

$$\begin{aligned} z_{d,k} &= \hat{s}_k^{IMU2} - \hat{s}_k^{IMU1} \approx \\ & s_k - v_k T_d + a_k \frac{T_d^2}{2} + w_k - \hat{s}_k^{IMU1}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, \hat{s}_k^{IMU1} 表示 IMU1 在采样时刻 k 处的位置估计。

定义 $H_k x_{f,k} = s_k - \hat{s}_k^{IMU1}$,其中 $x_{f,k}$ 设定为引入的辅助变量。将其代入公式(8)可得关于同步误差系统的观测描述,即:

$$z_{d,k} \approx H_k x_{f,k} + d_k + w_k, \quad (9)$$

其中,位置误差偏移向量 d_k 定义为:

$$d_k = -v_k T_d + a_k \frac{T_d^2}{2}. \quad (10)$$

对比式(9)和式(3)可知,实际观测测量不仅包含位置误差 $H_k x_{f,k}$ 和 IMU2 的估计误差 w_k ,还包含一个位置偏置项 d_k 。显而易见,该位置偏置项不仅依赖于时间同步误差 T_d ,还依赖导航系统的动态特性。

2 惯性阵列时间同步模型的建立

基于前文建立的模型,本节将建立惯性阵列时间同步模型。为此,首先把时间同步误差作为状态变量引入到状态空间模型中,其次采用分数延时滤波器对采样的数据进行时间上的移位。具体地,在惯性传感器阵列组成的导航系统中,记时间同步误

差 T_d 的估计为 $\hat{T}_{d,k}$ 。进而,导航解算过程中 $\hat{T}_{d,k}$ 用于控制 IMU 数据的移位操作。为此,文中将推得研究阐述如下。

2.1 对系统的时间同步误差建模

为了建模的方便,记扩展后的状态向量 $\mathbf{x}_{d,k}$ 为:

$$\mathbf{x}_{d,k} = [\mathbf{x}_k^T \delta T_{d,k}]^T, \quad (11)$$

其中, $\delta T_{d,k} = T_d - \hat{T}_{d,k}$ 表示在 k 时刻估计的延时误差。因而,系统的空间表达式为:

$$\mathbf{x}_{d,k+1} = \Phi_{d,k} \mathbf{x}_{d,k} + \mathbf{G}_{d,k} \mathbf{e}_k, \quad (12)$$

其中:

$$\Phi_{d,k} = \begin{bmatrix} \Phi_k & 0_{\alpha,1} \\ 0_{1,\alpha} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_{d,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_k \\ 0 \end{bmatrix},$$

观测方程是由 IMU1 和 IMU2 估计位置的差给出的,表示形式如下:

$$\begin{aligned} z_{d,k} &= \hat{s}_k^{IMU2} - \hat{s}_{d,k}^{IMU1} = s(kT_s - T_d) + w_k - \hat{s}_{d,k}^{IMU1} = \\ &= s(kT_s - \hat{T}_{d,k} - \delta T_{d,k}) + w_k - \hat{s}_{d,k}^{IMU1}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\hat{s}_{d,k}^{IMU1}$ 为假设 IMU1 数据延时 $\hat{T}_{d,k}$ 秒的位置解算结果。

在 $kT_s - \hat{T}_{d,k}$ 处对 $z_{d,k}$ 进行二阶泰勒展开,可得:

$$z_{d,k} = s_{d,k} - \hat{s}_{d,k}^{IMU1} - v_{d,k} \delta T_{d,k} + a_{d,k} \frac{\delta T_{d,k}^2}{2} + w_k, \quad (14)$$

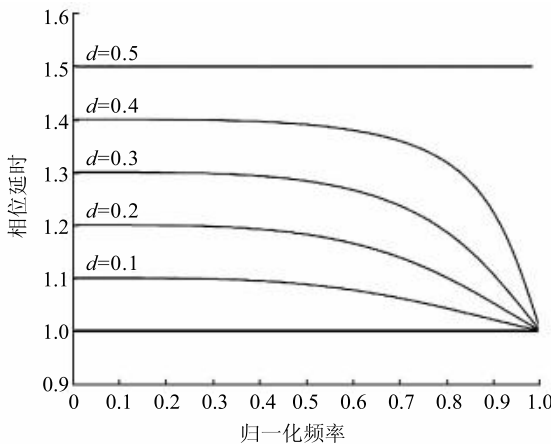
观测矩阵 $\mathbf{H}_{d,k}$ 定义为:

$$\mathbf{H}_{d,k} = [\mathbf{H}_k - \mathbf{v}_k], \quad (15)$$

则观测方程可以进一步表示为:

$$\mathbf{z}_{d,k} = \mathbf{H}_{d,k} \mathbf{x}_{d,k} + \mathbf{w}_k + \mathbf{d}'_k. \quad (16)$$

其中, $\mathbf{d}'_k = a_{d,k} \frac{\delta T_{d,k}^2}{2}$ 。



(a) 相位响应
(a) Phase response

2.2 延时数据的移位

上一节假设了 IMU1 的数据可以在任意时间上进行任意数量的移位。然而,受硬件时间戳的限制,这是不能实现的。为了这一目的,本节将使用分数时滞(FD)滤波器对得到的 IMU1 数据进行了时间移位处理。分数延迟的理想频率响应由线性相位全通滤波器求出,即^[12-13]:

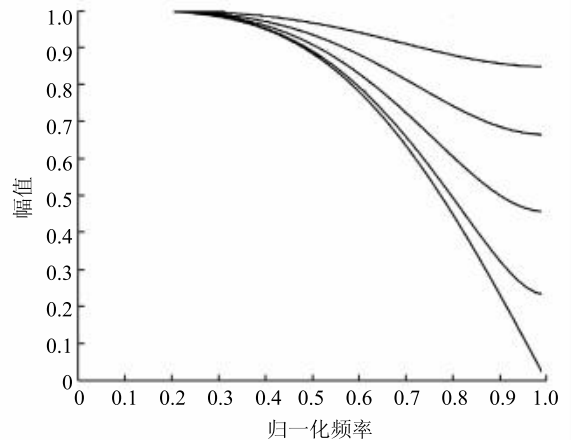
$$H(e^{j2\pi v}) = e^{j2\pi v D} - \text{normalized frequency}. \quad (17)$$

其中, j 是虚数单位, v 是归一化频率。该系统的脉冲响应是一个移位(因子 $D = \hat{T}_d/T_s$) 和采样 sinc 函数。值得一提的是,该滤波器是一个无限脉冲响应的非因果滤波器,不可能在实际应用中实现。为此,不得不对理想分数延迟滤波器采取近似处理,有关分数延迟滤波器的设计及其使用的过程详述,请参见文献[13]。

拉格朗日插值法是分数阶延迟滤波器设计中最常用的技术,其中分数阶延迟有限脉冲响应(FD-FIR)滤波器的滤波系数可由式(18)计算得到^[13]:

$$h(n) = \prod_{k=0, k \neq n}^N \frac{D-k}{n-k} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

这里, $D \in [(N-1)/2, (N+1)/2]$ 是得到的延迟, N 是滤波器的阶数。当延迟大于 $D = (N+1)/2$ 时,可以在分数阶延迟有限脉冲响应(FD-FIR)滤波器之前添加适当的单位延迟来解决这一问题。这里,就以 $N=3$ 为例,研究得到了3阶拉格朗日插值分数延时滤波器的幅值和相位响应,如图1所示。考虑到 IMU 具有低通特性,因此利用拉格朗日插值器的低通特性作为 IMU 数据的理想分数延迟滤波器的近似是较好的选择^[13]。



(b) 幅值响应
(b) Amplitude response

图1 拉格朗日 FD FIR 的幅值和相位响应

Fig. 1 Amplitude and phase response of Lagrange FD FIR

3 时间同步算法

为了使惯性阵列导航系统中每个惯性单元达到理想的时间同步, 本文构造了如图 2 所示的闭环松耦合反馈框架。首先, 把时间同步误差作为状态包含在 EKF 的状态空间模型中, 然后将由 EKF 估计的时间同步误差反馈到分数延时滤波器中, 同时用分数延时滤波器对 IMU 的数据进行时间的移位, 并把延时后的 IMU 数据进行误差补偿, 最后把经过时间移位且补偿后的数据输入到导航方程中进行导航求解。

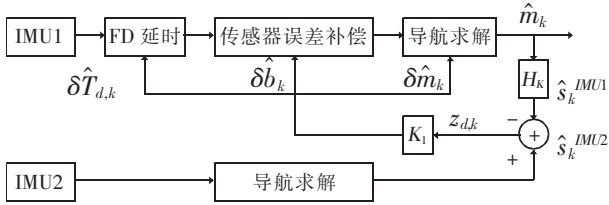


图 2 含有时间同步误差的闭环松耦合反馈系统

Fig. 2 Closed-loop loosely coupled feedback system for time synchronization error

在该算法中, 上标“ $\hat{\cdot}$ ”表示估计, 上标“ \sim ”表示测量, 上标“-”表示预测。 \hat{m}_k , \hat{b}_k 和 \hat{u}_k 分别表示被估计的导航状态、被估计的传感器误差和 IMU 的测量。函数 $f(\cdot)$ 表示导航方程, $d(\cdot)$ 表示分数 FD 延时滤波函数, $g(\cdot)$ 表示 IMU 误差补偿。至此, 研究得到的算法的伪代码见如下。

算法: 时间同步算法

初始化: 初始状态 $\hat{x}_{d,k} = E\{x_{d,0}\}$, 协方差矩阵

$P_0^- = P_0$, 时间延迟估计初值 $\hat{T}_{d,0}$

1. 卡尔曼增益更新:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1}$$

2. 卡尔曼滤波器增益更新:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1}$$

3. 计算位置估计的差:

$$z_{d,k} = \hat{s}_k^{IMU2} - \hat{s}_k^{IMU1}$$

4. 估计状态误差:

$$\hat{x}_k = [\delta \hat{m}_k \quad \delta \hat{b}_k \quad \delta \hat{T}_{d,k}]^T = K_k z_{d,k}$$

5. 对 IMU1 数据进行分数延时滤波移位:

$$\hat{T}_{d,k} = \hat{T}_{d,k} + \delta \hat{T}_{d,k}, \hat{u}_{d,k} = d(\hat{T}_{d,k}, \hat{u}_k)$$

6. IMU1 误差补偿:

$$\hat{b}_k = \hat{b}_k^- + \delta \hat{b}_k, \hat{u}_k = g(\hat{u}_{d,k}, \hat{b}_k)$$

7. 协方差更新:

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k^- \Phi_k^T + G_k Q G_k^T$$

8. 导航状态更新:

$$\hat{m}_k = \hat{m}_k^- + \delta \hat{m}_k, \hat{m}_{k+1}^- = f(\hat{m}_k, \hat{u}_k)$$

算法输出: \hat{m}_k 和 $\hat{T}_{d,k}$

4 仿真实验和结果分析

在实验阶段, 首先对惯性传感器阵列进行校准, 并给出了校准后的结果。然后利用 Matlab 模拟了具有时间同步误差的惯性阵列的运动情况, 利用提出的时间同步算法估计 Matlab 模拟惯性阵列中的时间同步误差, 并给出了时间误差补偿后的导航结果。为了进一步说明提出算法的有效性, 在 Matlab 仿真中又刻意增加了各个 IMU 的延时时间, 仿真结果表明该算法仍能很好地估计出所延时的时间。

在惯性传感器阵列校正阶段, 为了平均随机误差和未建模的误差, 采用一个具有 20 面的校正载体, 在校正过程中能够提供 20 个均匀的方向, 这就在相当程度上平均了惯性传感器阵列中的随机误差和未建模的误差。图 3 展示了将惯性传感器阵列插入校正固体中的情况, 随后将多面体的每个面静止数秒 (取 5 s 即可) 来收集数据, 最后利用高斯牛顿法对校正参数求解。



图 3 校准装置

Fig. 3 Calibration device

惯性传感器阵列加速度计和陀螺仪校准后的输出如图 4 所示。图 4 中, 数据是惯性传感器阵列经过校准后, 让惯性传感器阵列静止正面朝上采集的数据。由于惯性传感器阵列嵌入式板子的正反面都嵌有惯性测量单元, 因此输出的数据是关于 X 轴对称的。从图 4 中可以看出, 经过校准后陀螺仪的输出误差为 0 ~ 2 deg/s, 加速度计在静止情况下的 Z 轴的输出为 9.9 m/s², X 和 Y 轴的输出接近 0 m/s²。

接下来, 对含有 4 个 IMU 的惯性传感器阵列进行运动状态的仿真估计。仿真过程中假设 4 个 IMU 之间存在不同的时间延时。研究中, 将以 IMU1 作

为惯性传感器阵列的时间基准,假设 IMU1 延时 0 s ,继而假设 IMU2 具有 0.01 s 的时间延时,IMU3 具有 0.015 s 的时间延时,IMU4 具有 0.02 s 的时间延时。仿真结果如图 5 所示。图 5 展示了各个 IMU 对实际运动的估计,不难看出随着时间的增长,估计值已

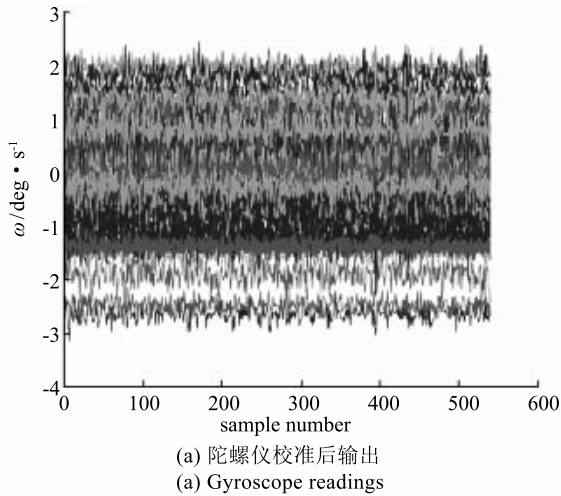


图 4 校准后的惯性传感器阵列输出

Fig. 4 Inertial sensor array output after calibration

经远远地偏离真实的轨迹。利用提出算法对 IMU2、IMU3、IMU4 的延时估计结果如图 6 所示。从图 6 中可以看到,该算法不仅具有良好的收敛特性,同时估计的精度也达到了毫秒级别。

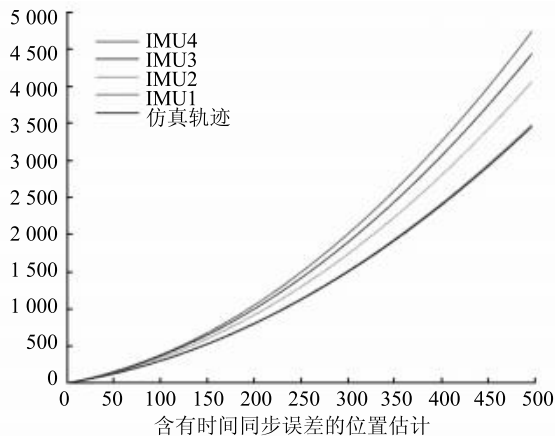


图 5 惯性传感器阵列的运动状态仿真

Fig. 5 Motion state simulation of an inertial sensor array

在前文基础上,后续仿真实验中,采用所提出的闭环松耦合反馈系统分别对由 IMU2、IMU3 和 IMU4 与 IMU1 所构成的闭环导航系统中的运动状态求得位置估计。使用提出算法前后得到的运动状态估计如图 7 所示。其中,IMU12、IMU13、IMU14 分别表示 IMU2、IMU3、IMU4 和 IMU1 构成的闭环松耦合反馈系统对运动状态的位置估计。在图 8 中,红线是惯性传感器阵列中采用提出算法得到运动状态位置估计的均值结果,蓝线则是惯性传感器阵列中没有考虑时间同步问题的运动状态位置估计的均值。从图 8 可以看到,时间同步误差对系统的导航性能影响

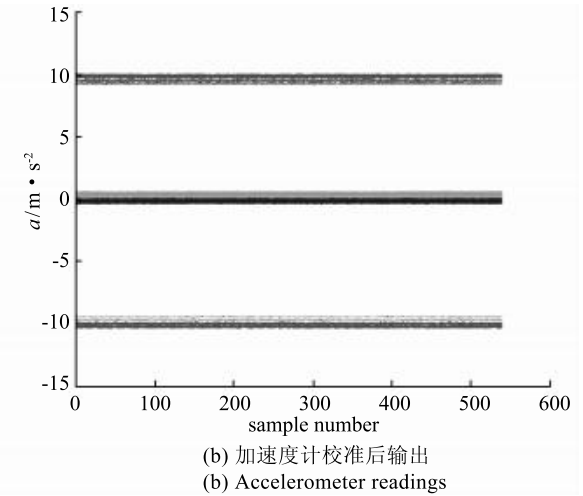


图 6 IMU 延时估计

Fig. 6 IMU delay estimation

还是很大的,本文提出方法在一定程度上减小了由于传感器的时间不同步造成的导航精度下降。

为了测试所提出算法对惯性传感器阵列中时间同步误差的估计,在仿真中又专门增加了不同 IMU 之间的时间同步误差的数值。对 IMU2 进行 0.02 s 和 0.03 s 的延时,对 IMU3 进行 0.025 s 和 0.05 s 的延时,对 IMU4 进行 0.03 s 和 0.09 s 的延时。对 IMU 进行不同数量延时的估计如图 9 所示。从图 9 中可以看出,所提出的方法不仅对时间延时的估计有很好的收敛特性,还能对所估计的延时取得良好的估计效果,同样达到了毫秒级别的估计精度范围。

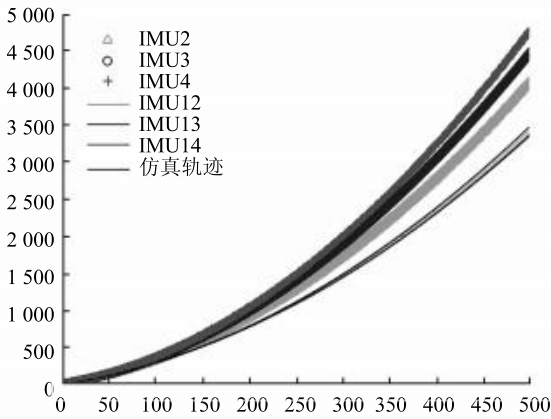


图7 时间同步误差补偿前后位置估计

Fig. 7 Position estimation before and after synchronization error compensation

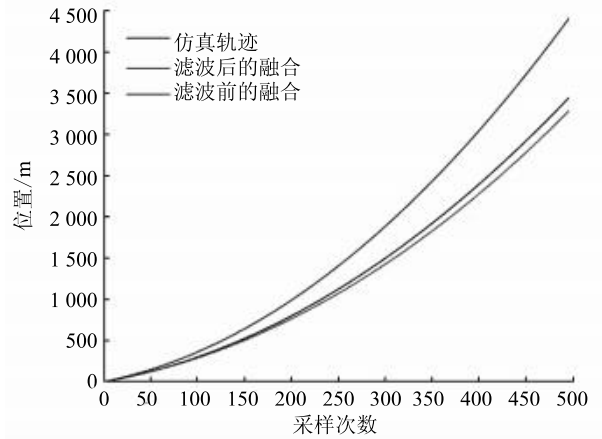
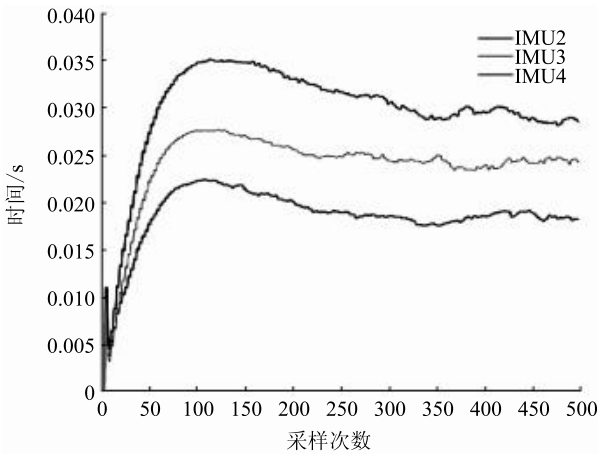


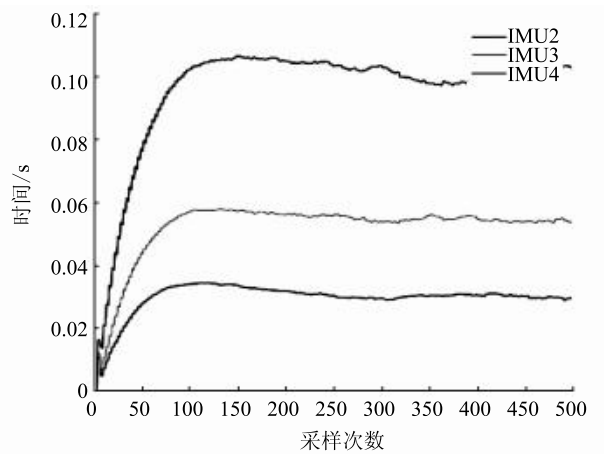
图8 融合前后位置估计比较

Fig. 8 Comparison of position estimation before and after fusion



(a) 不同延时组合 1

(a) Different delay combination 1



(b) 不同延时组合 2

(b) Different delay combination 2

图9 对IMU进行不同数量延时的估计

Fig. 9 Estimation of different number of delays for the IMU

5 结束语

本文将针对惯性传感器阵列系统中时间同步误差的问题进行研究。故而,具体选择了以惯性阵列组合导航系统中导航子系统的误差量作为状态量的间接滤波法。给出了以误差作为卡尔曼滤波状态变量的空间表达式和观测方程。提出了将时间同步误差作为状态包含在导航滤波器中,并通过EKF滤波器来估计时间同步误差。在得到时间同步误差的基础上,采用了分数延迟滤波器对IMU数据进行时间移位插值的方法来保证不同IMU采集数据的时间同步。经过仿真实验可以得到,该算法不仅能有效地估计不同传感器的时间同步误差,还能实现数据的时间同步,从而提高了惯性传感器阵列的导航精度。

参考文献

- [1] SKOG I, NILSSON J O, HÄNDEL P, et al. Inertial sensor arrays, maximum likelihood, and cramer - rao bound[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(16): 4218-4227.
- [2] BRÁS S, ROSA P, SILVESTRE C, et al. Fault detection and isolation in inertial measurement units based on bounding sets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 60(7): 1933-1938.
- [3] YANG C K, SHIM D S. FDI using multiple parity vectors for redundant inertial sensors [J]. European Journal of Control, 2006, 12(4): 437-449.
- [4] LI Binghao, RIZOS C, LEE H K, et al. A GPS-slaved time synchronization system for hybrid navigation[J]. GPS Solutions, 2006, 10(3):207-217.
- [5] DING Weidong, WANG Jinling, LI Yong, et al. Time synchronization error and calibration in integrated GPS/INS systems[J]. ETRI Journal, 2008, 30(1):59-67.