

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205186

基于大动态环境下的高阶迭代姿态优化算法*

冯伟 吴英 邓义廷 康鹏川 路永乐 刘宇

(重庆邮电大学自主导航与微系统重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要:针对 MEMS 惯性导航系统大动态环境下不可交换误差问题,提出了一种改进的高阶迭代姿态优化算法。为解决大动态环境下不可交换误差对整个惯性导航系统带来的影响,推导了传统等效旋转矢量算法,针对此算法仅依靠提高子样数来提高解算精度,忽略了高阶项在大动态环境下会产生较大误差的问题。设计了快慢回路的方法,分别求得不同阶次的旋转矢量解,再通过周期性迭代算法得到快慢回路的迭代解。最后通过大动态环境仿真实验以及高精度三轴转台摇摆动态实验,验证了高阶迭代算法的性能优势。实验结果表明,大动态环境下,相较于传统算法,改进的高阶迭代姿态优化算法精度提高了两个数量级。

关键词: 惯性导航系统;不可交换误差;大动态;高阶迭代;姿态解算

中图分类号: TN961 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.35

High order iterative attitude optimization algorithm based on large dynamic environment

Feng Wei Wu Ying Deng Yiting Kang Pengchuan Lu Yongle Liu Yu

(Chongqing Key Laboratory of Autonomous Navigation and Microsystem, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem of non-commutative errors in the large dynamic environment of MEMS inertial navigation system, an improved high-order iterative attitude optimization algorithm is proposed. In order to solve the influence of non-exchangeable errors on the entire inertial navigation system in a large dynamic environment, the traditional equivalent rotation vector algorithm is deduced. For this algorithm, it only relies on increasing the number of subsamples to improve the solution accuracy, ignoring the problem that high-order terms will cause large errors in a large dynamic environment. Using the method of fast and slow loops, the rotation vector solutions of different orders are obtained respectively, and then the iterative solutions of the fast and slow loops are obtained through the periodic iterative algorithm. Finally, through the large dynamic environment simulation experiment and the high-frequency swing dynamic experiment of the high-precision three-axis turntable, the performance advantage of the higher-order iterative algorithm is verified. The experimental results show that in a large dynamic environment, compared with the traditional algorithm, the improved high-order iterative attitude optimization algorithm improves the accuracy by two orders of magnitude.

Keywords: inertial navigation system; non-commutative error; large dynamics; higher order iteration; attitude calculation

0 引言

在惯性导航系统姿态更新算法中,大动态环境下载体在不断进行高速转动,这对姿态解算算法实时性有着较高要求。刚体的转动不是矢量,其转动次序是不可交

换的,在大动态环境下,会引入较大的不可交换误差。所以在一段时间内对角速度矢量进行积分求解是没有意义的。对于惯性传感器中的陀螺仪,锥运动是最恶劣的运动环境,在锥运动环境下产生的不可交换误差影响将达到最大,因此解决大动态环境下的不可交换性误差可以转化为解决载体的圆锥误差问题。

收稿日期: 2022-02-16 Received Date: 2022-02-16

* 基金项目: 国家自然科学基金(52195531,5217053290)、重庆市教委科学技术研究基金(KJZD-M20200602)项目资助

Song 等^[1]和 Kularathna 等^[2]提出采用等效旋转矢量法对大动态环境下不可交换误差进行补偿。周召发等^[3]提出三子样四元数法,将采样数设定为 3,先求得等效旋转矢量微分方程(Bortz 方程)解,再计算四元数,最终得到载体姿态角。基于等效旋转矢量法,很多学者提出了各类不同的扩展改进算法,其中大多以增加子样数解决大动态环境下不可交换误差^[4-7]。

然而,如今越来越多的学者通过实验和仿真证明,单纯依靠提高子样数无法从根本上提升大动态环境下姿态解算精度。且随着子样数增加,算法的计算量会大幅提升。上述算法忽略了多子样算法的高阶项,在大动态环境下由高阶项所激励出的误差是不容忽略的^[8-11]。

针对以上问题,同时考虑姿态解算算法精度和计算量大小,本文推导了传统 Bortz 方程的解,在此基础上提出采用快慢回路分别求解出不同阶次的 Bortz 方程解。快回路求得低阶解,保证算法效率;慢回路求得高阶解,保证解算精度,再通过泰勒展开(Taylor)的高阶项构建迭代模型,完成两条回路的迭代。由此提出了一种高阶迭代姿态优化算法。最后设置圆锥环境进行仿真验证,再通过高精度转台摇摆实验,验证算法的动态特性。

1 多子样等效旋转矢量算法推导

等效旋转矢量算法通过载体角速度,构造 Bortz 方程,对其进行 Taylor 级数展开,并拟合出等效旋转矢量。Bortz 方程表示如式(1)所示^[12]。

$$\dot{\Phi} = \omega + \frac{1}{2}\Phi \times \omega + \frac{1}{\Phi^2} \left[1 - \frac{\Phi \sin \Phi}{2(1 - \cos \Phi)} \right] \Phi \times (\Phi \times \omega) \quad (1)$$

式中: $\dot{\Phi}$ 表示微分方程解, ω 表示角速度采样值, Φ 表示旋转矢量。对等式右侧的第 3 项进行展开可得式(2):

$$\frac{\Phi \sin \Phi}{2(1 - \cos \Phi)} = \frac{\Phi \cdot 2 \sin \frac{\Phi}{2} \cos \frac{\Phi}{2}}{2 \times 2 \sin^2 \frac{\Phi}{2}} = \frac{\Phi}{2} \cot \frac{\Phi}{2} \quad (2)$$

通常采取 Taylor 展开对 $\dot{\Phi}$ 求解^[9],因此对式(2)在 $t=0$ 处展开可得到式(3):

$$1 - \frac{\Phi^2}{12} - \frac{\Phi^4}{720} - \frac{\Phi^6}{30240} - \dots = \frac{\Phi}{2} \cot \frac{\Phi}{2} = \frac{\Phi}{2} \left[\frac{2}{945} \left(\frac{\Phi}{2} \right)^5 - \frac{1}{4725} \left(\frac{\Phi}{2} \right)^7 - \dots \right] \quad (3)$$

因为姿态更新周期很短, Φ 的值通常很小,所以在实际应用中很多学者大多忽略其高阶项,即 4 次及以上

的高阶项,整理可以得到 Bortz 方程进一步表示形式如式(4)所示。

$$\dot{\Phi} = \omega + \frac{1}{2}\Phi \times \omega + \frac{1}{12}\Phi \times (\Phi \times \omega) \quad (4)$$

由式(4)可知通过采集到的角速度 ω 可求解出等效旋转矢量,后两项积分得到的就是不可交换误差的修正项,它是忽略了 Φ^4 及以上的高阶项。但在大动态环境下,由于角速度和角加速度太大,高阶项误差会得到放大,激励出更大的误差。尽管姿态更新周期很短,大动态环境下 Φ 的值变大,并且随着周期性误差的不断引入,已经成为不容忽略的阶次。

在一个角速度更新周期内通过提高子样数实现等效旋转矢量算法的优化。在角速率更新周期 $T = t_{k+1} - t_k$ 时间段上,需要采取二次抛物线对其进行拟合:

$$\omega_b(t_k + \tau) = a + 2b\tau + 3c\tau^2 \quad (5)$$

其中, t_k 为起始时间, τ 为时间常数, $\omega_b(t_k + \tau)$ 表示 $t_k + \tau$ 周期内的角速度矢量, a, b, c 为拟合曲线系数,为待求常值。可以得到三子样等效旋转矢量算法的解^[8]如式(6)所示。

$$\Phi(t_{k-1} + T) = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \frac{9}{20}\Delta\theta_1 \times \Delta\theta_3 + \frac{27}{40}\Delta\theta_2 \times (\Delta\theta_3 - \Delta\theta_1) \quad (6)$$

其中, $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ 表示三次采样值。

由此可在每个旋转矢量更新周期内实现对旋转矢量的更新,再通过旋转矢量对变化四元数进行更新进而实现对姿态的更新^[13-16]。

2 改进的高阶迭代算法推导

完成第 1 节的推导后,基于其推导结论,本文继续建立多回路迭代模型。姿态解算更新的过程主要包括载体姿态更新和导航坐标系更新,本节提出的改进算法在此基础上引入陀螺仪角增量拟合回路以及等效旋转矢量更新回路。其中等效旋转矢量更新周期将分为两个不同长短大小的周期,分别求解出不同的解,在设定的周期内进行迭代求解,在保证实际工程算法计算效率的前提下尽可能提升姿态解算精度。

相对于姿态更新周期 H ,等效旋转矢量计算周期 h 应尽可能的小,这样能更好地消除大动态环境下的不可交换误差^[17-18]。双回路迭代中,快回路求取低阶解;慢回路以高阶曲线拟合得到改进算法的更优解,通过高阶项提升解算精度,减小不可交换误差的影响。迭代算法模型如式(7)所示。

$$\dot{\Phi}(t_k + 2nh) = \omega + \frac{1}{2}\Phi^{2nh} \times \omega + \frac{1}{\Phi^{(2n-1)h}} \times \left[1 - \frac{(\Phi^{(2n-1)h})^2}{12} - \frac{(\Phi^{(2n-1)h})^4}{720} - \frac{(\Phi^{(2n-1)h})^6}{30240} - \dots \right] \quad (7)$$

其中, $n = 1, 2, 3, \dots$, $\dot{\Phi}(t_k + 2nh)$ 表示快回路 Bortz 方程迭代解, $2nh$ 表示快回路更新周期, $(2n - 1)h$ 表示慢回路更新周期, 由于快回路省去了高阶项的求解, 因此通过迭代慢回路高阶 Bortz 方程解来提高解算精度。

在旋转矢量计算周期 h 的第 1 个更新周期 $[t_k, t_k + h]$ 内, 由第 1 节推导结果可以得到快回路计算的旋转矢量结果。慢回路引入 Φ^4 高阶项, 得到新的微分方程如式(8)所示。

$$\dot{\Phi} = \omega + \frac{1}{2}\Phi \times \omega + \frac{\Phi}{12}(\Phi \times \omega) + \frac{\Phi^3}{720}(\Phi \times \omega) \quad (8)$$

计算周期 $[t_k + h, t_k + 2h]$ 采用高阶曲线进行拟合:

$$\omega_b(t_k + \tau) = a' + 2b'\tau + 3c'\tau^2 + 4d\tau^3 \quad (9)$$

其中, a', b', c', d 表示拟合曲线系数, 为待求常值。将角速率更新周期划分为等长的 3 个时间区间 $[t_k, t_k + 4/3h]$ 、 $[t_k + 4h/3, t_k + 5h/3]$ 、 $[t_k + 5h/3, t_{k+1} + 2h]$, 由此确定角增量通式如式(10)所示。

$$\Delta\theta_i = \int_{t_k + \frac{i-1}{3}h}^{t_k + \frac{i}{3}h} \omega_b(t_k + \tau) d\tau, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

可将慢回路计算周期 $[t_k + h, t_k + 2h]$ 角增量 $\Delta\theta_4$ 、 $\Delta\theta_5$ 、 $\Delta\theta_6$ 表示如式(11)所示。

$$\begin{aligned} a' &= \frac{1}{h} \left(\frac{11}{2} \Delta\theta_4 - \frac{7}{2} \Delta\theta_5 + \Delta\theta_6 - \frac{2}{9} dh^4 \right) \\ b' &= \frac{1}{h^2} \left(\frac{9}{2} (-2\Delta\theta_4 + 3\Delta\theta_5 - \Delta\theta_6) + \frac{11}{9} dh^4 \right) \\ c' &= \frac{1}{h^3} \left(\frac{9}{2} (\Delta\theta_4 - 2\Delta\theta_5 + \Delta\theta_6) - 2dh^4 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\Delta\theta_4$ 、 $\Delta\theta_5$ 、 $\Delta\theta_6$ 为慢回路采样值。相同方法在快回路采取二次曲线进行拟合得到系数常值表达式如式(12)所示。

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{h} \left(\frac{11}{2} \Delta\theta_4 - \frac{7}{2} \Delta\theta_5 + \Delta\theta_6 \right) \\ b &= \frac{1}{h^2} \left(\frac{9}{2} (-2\Delta\theta_4 + 3\Delta\theta_5 - \Delta\theta_6) \right) \\ c &= \frac{1}{h^3} \left(\frac{9}{2} (\Delta\theta_4 - 2\Delta\theta_5 + \Delta\theta_6) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

由此可得, 快慢回路角增量表达式参数间存在如式(13)所示关系。

$$a' = a - \frac{2}{9} dh^3, b' = b + \frac{11}{9} dh^2, c' = c - 2dh \quad (13)$$

对于角速度 ω_0 , 其矢量同样也能由拟合得到, 由于其拟合多项式各阶导在 $t = 0$ 时刻, 拟合参数与角速率叉乘结果可表示如式(14)所示。

$$\begin{aligned} (i \times j) &= \frac{1}{i! j!} \omega_0^{i+j+2} \sin^2 \alpha, \\ i + j &= 2n + 1, n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (14)$$

其中, i, j 分别表示拟合曲线 i 次项和 j 次项的参数, 且必须满足 $i \neq j$, 结合上式由角速度矢量定义可表示如式(15)所示。

$$\begin{aligned} a' \times c' &= \frac{1}{6 \times 3} \omega^{(0)}(0) \times \omega^{(3)}(0) = -\frac{1}{18} \omega_0^5 \sin^2 \alpha \\ b' \times d &= \frac{1}{2 \times 8} \omega^{(1)}(0) \times \omega^{(2)}(0) = \frac{1}{16} \omega_0^5 \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (15)$$

由此可进一步得到各系数间的关系如式(16)所示。

$$b' \times d = -\frac{8}{9} a' \times c' \rightarrow d = -\frac{8}{9b'} a' \times c' \quad (16)$$

对 Bortz 方程进行求导, 得到三阶曲线在周期初始时刻 t_k 时对应的各阶导数如式(17)所示。

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}(t_k) &= a, \ddot{\Phi}(t_k) = 2b', \ddot{\Phi}(t_k) = 6c' + (a' \times b'), \\ \Phi^{(4)}(t_k) &= 24d, \Phi^{(5)}(t_k) = 36a' \times d + 12b' \times c', \\ \Phi^{(6)}(t_k) &= 120b' \times d', \Phi^{(7)}(t_k) = 360c' \times d', \\ \Phi^{(m)}(t_k) &= 0 \quad m \geq 8 \end{aligned} \quad (17)$$

将旋转矢量的各阶导数代入 Bortz 方程的 Taylor 展开式, 结合慢回路所得角增量与系数的关系式以及式(16)各参数关系表达式可以得到改进高阶迭代算法的最优解如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \Phi(t_k + h) &= a'h + b'h^2 + c'h^3 + \frac{h^3}{6} (a' \times b') + \\ &\frac{3}{10} h^5 \times (a' \times d) + \frac{1}{10} h^5 \times (b' \times c') + \\ &\frac{1}{6} h^6 \times (b' \times d') + \frac{1}{14} h^7 \times (c' \times d) \end{aligned} \quad (18)$$

综上所述, 传统算法复杂度要比改进算法复杂度低, 但高阶项的引入可以更好解决不可交换误差带来的影响, 好的算法需要综合考虑算法精度与效率^[19-20], 采用高阶迭代算法在保证解算精度的同时, 通过快慢回路的迭代思想增强了算法效率, 即使不在大动态环境下也能通过单纯的快回路实现姿态解算。该算法对算法效率与精度起到了更好的平衡作用。

3 实验验证

3.1 圆锥运动仿真

以理想的圆锥环境作为测量不可交换误差漂移量的仿真环境, 通过 MATLAB 软件对传统算法以及本文提出的高阶迭代姿态优化算法进行仿真对比。算法仿真流程如图 1 所示。

仿真环境设置如下: 圆锥运动的锥半角 $\alpha = 1^\circ$, 角速率 $\omega_0 = 3\pi$ rad/s, 运动频率设为 1 Hz, 更新周期 h 设置为

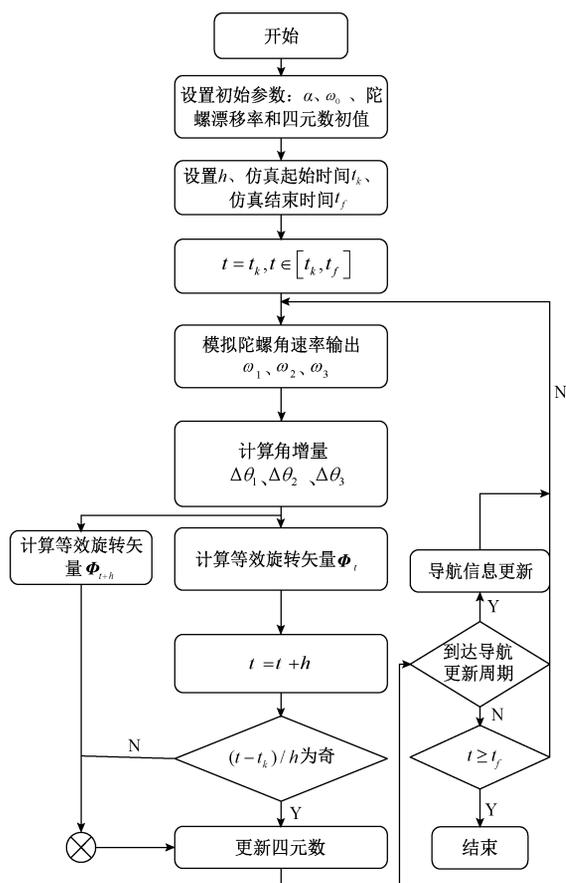


图 1 算法仿真流程

Fig. 1 Algorithm simulation flowchart

0.01 s, 仿真时间设为 60 s, 子样数为 3。仿真结果如图 2、3 所示。

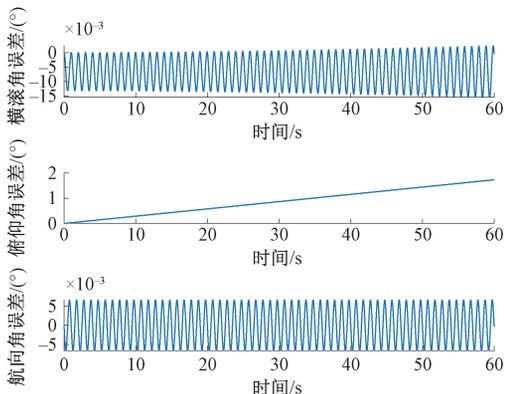


图 2 传统三子样算法仿真

Fig. 2 Simulation of traditional three-sample algorithm

由仿真结果可知,在理想的圆锥环境下,两种算法的俯仰角(Pitch)漂移误差都在随着时间的增长而逐渐变大,横滚角(Roll)和航向角(Yaw)的漂移误差呈现出周期性的变化。

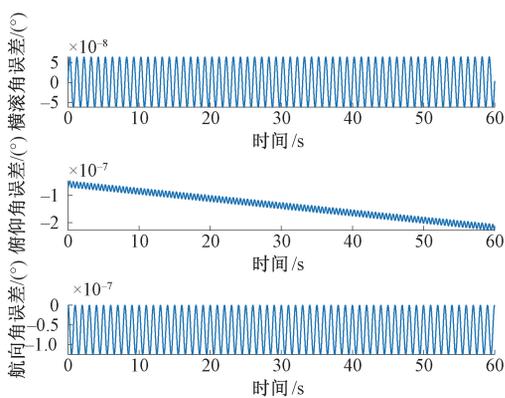


图 3 改进的高阶迭代算法仿真

Fig. 3 Improved higher order iterative algorithm simulation

相较于传统的算法,改进高阶迭代算法 3 个轴的漂移误差都要小很多,其中改进算法的 Pitch 和 Yaw 精度达到 10^{-7} , Roll 精度达到 10^{-8} 。由此可知,在条件一致的大动态理想环境下,高阶迭代算法精度要优于传统算法,能够更好地抑制不可交换误差带来的精度影响。

3.2 高精度转台大动态实验

本实验主要基于高精度三轴转台进行姿态角误差分析,将惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)用夹具固定于三轴转台的内环之上,以 z 轴向上的形式摆放。给定三轴转台一个初始位置:内、中、外环分别设置为 90° 、 20° 、 90° ,如图 4 所示。



图 4 IMU 安装示意图

Fig. 4 IMU installation diagram

将转动模式调到摇摆模式,频率设置为 1 Hz,摇摆幅度设置为 3° ,摇摆 80 s,前后各静止 10 s,采集 IMU 原始数据,以高精度三周转台的输出值作为误差参考基准。采用两种算法分别对其进行姿态解算,姿态角解算结果如图 5、6 所示。

在高精度转台摇摆实验中,由图 5 中可明显看出,传统算法得到的 3 个姿态角摇摆幅度误差不断增大,最终静止位置逐渐偏离标准位置。Roll 从 -19.88° 偏离到 -18.51° 附近, Pitch 从 70.09° 偏离到 71.36° 附近, Yaw

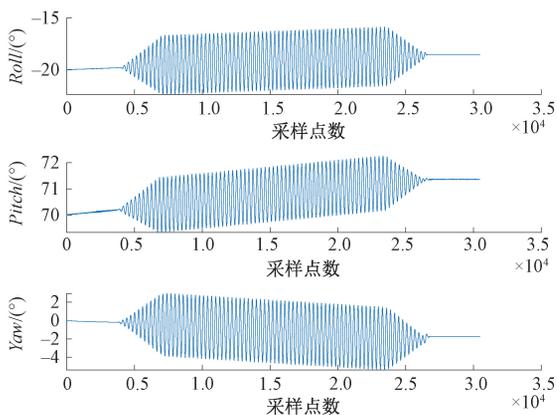


图 5 传统算法姿态角解算曲线

Fig. 5 Traditional algorithm attitude angle solution curve

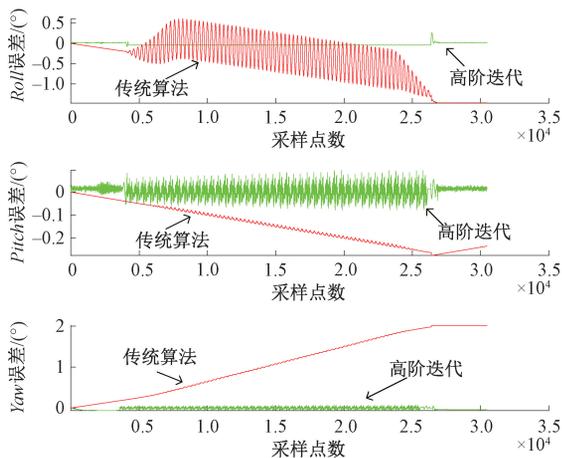


图 7 姿态角误差曲线

Fig. 7 Attitude angle error curve

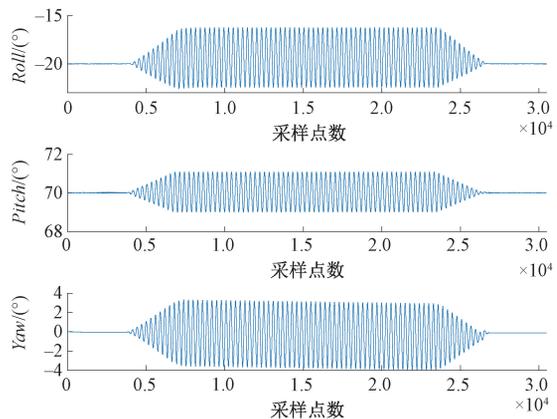


图 6 高阶迭代算法姿态角解算曲线

Fig. 6 Attitude angle solution curve of higher order iterative algorithm

由 -0.1439° 偏离到 -1.743° 。改进算法的 3 个姿态角在摇摆运动中基本保持在 $-20 \pm 3^\circ$ 、 $70 \pm 3^\circ$ 与 $\pm 1^\circ$ 范围内进行摇摆,最终静止位置与标准值误差也在千分之一以内。以三轴转台输入值作为基准,得到两种算法的姿态角误差如图 7 所示。

由上述结果图可知,高阶迭代法求解的姿态角误差即使在摇摆运动时,在 0° 左右波动,误差精度在千分级, Roll 误差为 -0.03425° , Pitch 误差为 0.0635° , Yaw 误差为 -0.0261° 。而传统算法姿态角误差随着摇摆时间的增加而增加,误差累积严重。在摇摆过程中出现周期性误差,这是因为大动态环境中,受惯性作用力影响,动态特性差, Roll 误差为 -1.4352° , Pitch 误差为 -0.2352° , Yaw 误差为 1.8810° 。改进的高阶迭代姿态优化算法在大动态环境中能够更好地抑制不可交换误差,动态跟踪性能更佳。

在相同条件下,分别采集多组数据,每组数据前后不做关机重启处理,连续进行采集,再分别采用两种算法对

其进行姿态解算,将结果进行误差分析对比,以此作为衡量标准,图 8 平滑曲线表示传统算法 3 个姿态角的误差值,带星形曲线表示高阶迭代算法 3 个姿态角的误差值(结果保留 4 位有效数字)。

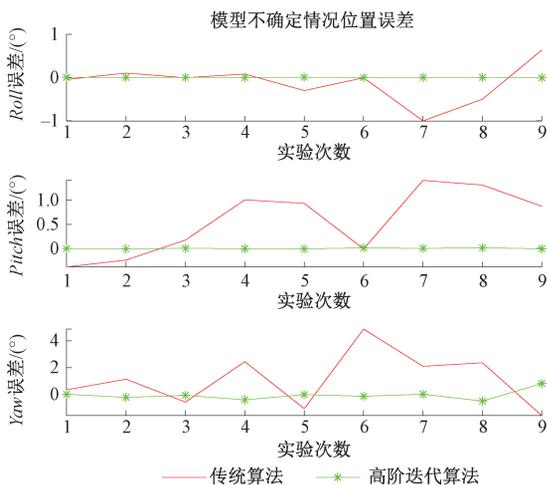


图 8 多组实验姿态角误差曲线

Fig. 8 Multiple sets of experimental attitude angle error curves

由多组实验结果可知,在考虑误差正负的情况下,高阶迭代算法求得姿态角误差在百分甚至千分之一级别。高阶迭代姿态优化算法比传统算法有两个数量级的提升,并且结合数据和解算曲线可知本文提出的算法能更好的、更实时性地捕捉到 IMU 的真实运动轨迹,姿态角解算结果更准确。

4 结论

本文针对大动态环境下不可交换误差,提出了高阶迭代姿态优化算法。设计了快慢双回路分别求解 Bortz

方程不同阶次的解,再基于 Taylor 展开迭代模型完成两个解的迭代。最后对两类算法进行了理想圆锥仿真实验,以及在高精度转台上进行了大动态摇摆实验,仿真和实验结果均表明本文提出的高阶迭代姿态优化算法能更好地抑制不可交换误差,姿态解算精度有明显提升。

参考文献

- [1] SONG J B, BYUN Y S, JEONG J S, et al. Experimental study on cascaded attitude angle control of a multi-rotor unmanned aerial vehicle with the simple internal model control method [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(11): 5167-5182.
- [2] KULARATHNA N D, PERERA S. Design of a vibration sensor based train arrival detection system to prevent elephant-train accidents in Sri Lanka [J]. *Instrumentation*, 2020, 7(4): 40-47.
- [3] 周召发, 胡文, 张志利, 等. 一种新的捷联惯性导航系统姿态四元数方程求解方法 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(3): 511-518.
ZHOU ZH F, HU W, ZHANG ZH L, et al. A new method for solving attitude quaternion equation of strapdown inertial navigation system [J]. *Journal of Military Engineering*, 2018, 39(3): 511-518.
- [4] WANG M, WU W, HE X, et al. Higher-order rotation vector attitude updating algorithm [J]. *The Journal of Navigation*, 2019, 72(3): 721-740.
- [5] 张昉申, 曹彪. 基于改进等效旋转矢量的姿态更新算法研究 [J]. *舰船电子工程*, 2017, 37(9): 30-32.
ZHANG Y SH, CAO B. Research on attitude update algorithm based on improved equivalent rotation vector [J]. *Ship Electronics Engineering*, 2017, 37(9): 30-32.
- [6] WU Y X. RodFiter: Attitude reconstruction from inertial measurement by functional iteration [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(5): 2131-2142.
- [7] CHEN H, ZHONG Y Q. Design of readout circuit with quadrature error and auxiliary PLL for MEMS vibratory gyroscope [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4564.
- [8] 储开斌, 赵爽, 冯成涛. 基于 Mahony-EKF 的无人机姿态解算算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(12): 12-18.
CHU K B, ZHAO SH, FENG CH T. UAV attitude calculation algorithm based on Mahony-EKF [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(12): 12-18.
- [9] MAHBOUB V, MOHAMMADI D. A constrained total extended Kalman filter for integrated navigation [J]. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(4): 971-988.
- [10] ZHANG L, MA Y J, LIU G Q, et al. Multi-sensor fusion quadrotor attitude and altitude estimation, 2019, 45(3): 131-137.
- [11] WANG Q, YANG C, WU S. Non-exchangeable error compensation for strapdown inertial navigation system in high dynamic environment [J]. *CMC-Computers Materials & Continua*, 2020, 64(2): 973-986.
- [12] LIU S Q, ZHU R. A complementary filter based on multi-sample rotation vector for attitude estimation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(16): 6686-6692.
- [13] ZHANG X M, YU J Y, WANG K K. Research on control method of active disturbance quadrotor aircraft [J]. *Application of Electronic Technique*, 2019, 45(3): 84-87.
- [14] 郑雪, 杨庆华, 屠晓伟, 等. 基于 Y 型 CCD 的室内运动目标定位方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 115-123.
ZHENG X, YANG Q H, TU X W, et al. Indoor moving target localization method based on Y-type CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 115-123.
- [15] 魏韡, 宋晓东, 王刚. 改进型自适应互补滤波 MEMS-IMU 姿态解算实现 [J]. *电子测量技术*, 2020, 43(24): 81-86.
WEI W, SONG X D, WANG G. Realization of attitude calculation of improved adaptive complementary filter MEMS-IMU [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(24): 81-86.
- [16] 李璜筹, 马文博, 李璐. 互补滤波在低成本四旋翼姿态解算中的应用 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(11): 157-162.
LI H CH, MA W B, LI L. Application of complementary filtering in low-cost quadrotor attitude calculation [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(11): 157-162.
- [17] LIU S Q, ZHU R. A complementary filter based on multi-sample rotation vector for attitude estimation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(16): 6686-6692.
- [18] DAVID Z. A vectorial method to derive the equivalent rotation of two successive finite rotations [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 126: 265-272.
- [19] WANG Z H, CHEN X J, ZENG Q S. Comparison of strapdown inertial navigation algorithm based on rotation vector and dual quaternion [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(2): 442-448.
- [20] MIN S, WU W Q, PAN X F. Approach to recovering maneuver accuracy in classical coning algorithms [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2013, 36(6): 1423-1427.

作者简介



刘宇(通信作者),2002年重庆大学博士研究生毕业,2009年英国 SOUTHANPTM 大学访问学者,现为重庆市高校智能传感器与微系统工程中心主任,重庆市“三百”科技创新领军人才、重庆市“巴渝学者”特聘教授、重庆市学术技术带头人。

E-mail: liuyu@cqpt.edu.cn

Liu Yu (Corresponding author) received a Ph. D. degree from Chongqing University in 2002, and was a visiting scholar at SOUTHANPTM University in the United Kingdom in 2009. Now

he is the director of the Intelligent Sensor and Microsystem Engineering Center of Chongqing University. Chongqing “Three Hundred” scientific and technological innovation leading talents, Chongqing “BAYU Scholars” distinguished professor, and Chongqing academic technology leader.



冯伟,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为传感器件与系统。

Feng Wei is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include sensor devices and systems.