

二次传递对准方法与应用

钟润伍, 陈帅, 董亮, 余威

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: 针对非线性误差模型的状态估计精度差、收敛时间长、计算量大等缺点, 描述了一种基于双模型切换的二次传递对准方法。该方法采用了常用的基于欧拉角的线性误差模型和基于四元数的非线性误差模型。在第一次对准中采用非线性模型与扩展卡尔曼滤波, 待子惯导姿态失准角收敛到较小角度后进行模型与滤波切换; 在第二次对准中采用线性模型与常规卡尔曼滤波来完成传递对准, 从而获取更高的对准精度。通过仿真与跑车试验, 证明了该方法能够满足系统的快速性与精确性要求, 具有一定的实用性。

关键词: 传递对准; 四元数误差; 二次对准; 扩展卡尔曼滤波; 双模型

中图分类号: TN967; O221.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0086-03

A Twice Transfer Alignment Approach and It's Application

ZHONG Run-wu, CHEN Shuai, DONG Liang, YU Wei

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the problems that the state estimation of nonlinear error model has the shortcomings of long convergence time, low estimation accuracy, and large calculation cost, a twice rapid transfer alignment algorithm based on dual-model switching is presented. The commonly-used linear error model based on Euler angles and nonlinear error model based on quaternion were utilized. In the first phase, the nonlinear error model and extended Kalman filter were used. Then, when the attitude misalignment angle converges to a certain degree, the linear error model based on Euler angles and the conventional Kalman filter were adopted in the second alignment to get higher accuracy. The simulation and vehicle test results demonstrate that this method is feasible and can meet the requirements to accuracy and rapidity.

Key words: transfer alignment; quaternion error; twice alignment; EKF; dual model

0 引言

目前, 在失准角为小角度条件下的快速传递对准技术已经较为成熟^[1-2], 在快速性和精确性方面都能满足需求。然而, 在工程应用中经常会出现失准角为大角度的情况。

在这种情况下, 传统的线性误差模型将不能准确地描述惯导系统的误差传播特性, 从而会给滤波带来较大误差, 甚至导致滤波发散。针对大失准角的情况, 国内外学者使用了基于四元数的非线性误差模型和UKF等非线性滤波^[3-7], 但非线性模型下的状态估计

存在计算量大、精度差、收敛慢等缺点。针对上述问题, 本文讨论了基于双模型的二次传递对准方法^[8-9]。该方法同时兼有两种模型的优点, 既能应用于失准角为任意角度的场合, 又具有良好的快速性与精确性。

1 一次传递对准

根据国外学者提出的基于四元数的非线性误差模型, 可以得到四元数误差方程为

$$\delta \dot{Q} = \frac{1}{2} M \delta Q + \frac{1}{2} U (\varepsilon^b + W_g^b) - \frac{1}{2} Y \delta \omega_m^n \quad (1)$$

式中: δQ 为四元数误差; $M = \langle \omega_{ib}^b \rangle - [\omega_m^n]$ =

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_E - \omega_x & \omega_N - \omega_y & \omega_U - \omega_z \\ \omega_x - \omega_E & 0 & \omega_z + \omega_U & -\omega_y - \omega_N \\ \omega_y - \omega_N & -\omega_z - \omega_U & 0 & \omega_x + \omega_E \\ \omega_z - \omega_U & \omega_y + \omega_N & -\omega_x - \omega_E & 0 \end{bmatrix},$$

其中, $\omega_m^n = [\omega_E \ \omega_N \ \omega_U]$ 为地理坐标系相对于惯性坐标

收稿日期: 2014-07-07

修回日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究所联合基金(U1330133); 江苏省自然科学基金(BK20130774)

作者简介: 钟润伍(1990—), 男, 湖北荆门人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

系的角速度在地理坐标系中的投影; $\omega_{ib}^b = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 为陀螺仪的输出在载体坐标系中的投影; ε^b 为陀螺的随机常值漂移; W_g^b 为陀螺测量白噪声; $\delta\omega_{in}^n$ 为利用速度和位置信息得到的 ω_{in}^n 的误差; 矩阵 U 和 Y 分别为

$$U = \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix}。$$

式(1)的成立并没有对失准角的大小进行假设, 此式可用于任意失准角的情况, 所以能更准确地描述系统的姿态误差传播特性。

采用四元数描述的速度误差方程为

$$\delta\dot{v}^n = -2[\hat{C}_i^n \hat{f}^b] \times Y^T \delta Q + 2\hat{C}_i^n \hat{f}^b Q^T \delta Q - Y^T U \hat{f}^b + \hat{C}_i^n \nabla^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n \quad (2)$$

式中: \hat{C}_i^n 为子惯导捷联矩阵; \hat{f}^b 为子惯导加速度计输出在载体坐标系的投影; ∇^b 为加速度计在载体坐标系下的随机常值漂移; ω_{ie}^n 为地球坐标系相对于惯性坐标系的角速度在导航坐标系的投影; ω_{en}^n 为导航坐标系相对于地球坐标系的角速度在导航坐标系的投影; $v^n = [v_E \ v_N \ v_U]$ 为子惯导在导航坐标系下的东北天速度; $Y^T U \hat{f}^b$ 为速度误差方程中的非线性项。

取主子惯导系统在导航坐标系下的速度, 并相减用差值作为量测值, 即观测量为

$$Z_{ob} = v_i^n - v_m^n \quad (3)$$

扩展卡尔曼滤波(EKF)可以通过对原系统和量测做泰勒级数展开, 且舍弃二阶以上高阶项达到线性化的目的, 然后再用标准卡尔曼滤波算法对线性化后的系统进行处理。虽然无迹卡尔曼滤波(UKF)较 EKF 具有更好的精度, 但 EKF 更易工程实现, 且计算简单, 所以在一次对准中采用了 EKF^[10]。

2 二次传递对准

选取基于欧拉角的线性误差模型, 系统状态方程为

$$\begin{cases} \delta\dot{V}^n = f^n \times \varphi^n - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times V^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n + C_b^n \nabla_i \\ \dot{\varphi}^n = -\omega_{in}^n \times \varphi^n + \delta\omega_{in}^n + C_b^n \varepsilon_i \\ \dot{\varepsilon}_i = 0, \dot{\nabla}_i = 0, \dot{\lambda}_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ^n 是子惯导系统的失准角; V^n 为主惯导系统在导航系下的速度; f^n 为主惯导系统在导航坐标系下的比力; ω_{ie}^n 为地球自转角速度; ε 为子惯导系统陀螺常值漂移; ∇ 为子惯导系统加速度计常值偏置; λ_i 为安装角。

取主子惯导在导航坐标系下的速度差值, 与姿态

差值作为状态变量, 即观测变量为

$$\begin{cases} Z_{obsv} = v_i^n - v_m^n \\ Z_{obsatt} = \theta_i^n - \theta_m^n \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_m^n 为主惯导经过第一次对准所得到的失准角估计值补偿后的姿态。选取常规卡尔曼滤波即可快速完成二次对准。

3 仿真实验

通过仿真实验对基于双模型切换和基于四元数非线性模型的传递对准系统的性能进行对比与评估。设仿真飞行时间为 100 s, 飞机的初始位置为北纬 40°, 东经 120°, 高度 400 m; 飞机的初始北向速度为 100 m/s, 东向速度为 0 m/s, 天向速度为 0 m/s, 初始俯仰、滚转、偏航角均为 0°。采用的子惯导陀螺的常值漂移为 10 (°)/h, 加速度计零偏为 0.005g。设初始时刻 3 个姿态失准角分别为 10°, 20°, 30°。

仿真结果如图 1~图 2 及表 1 所示。

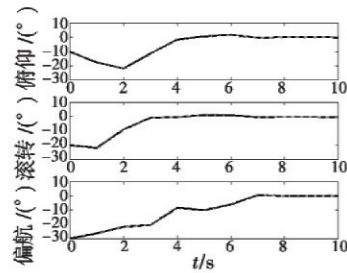


图 1 一次传递对准结果

Fig. 1 The results of the first transfer alignment

在四元数误差模型下, 经过多次仿真实验发现, 子惯导姿态失准角可在 10 s 内快速收敛到 1° 以内, 因此可将切换时间设置在第 10 s。图 1 显示了前 10 s 第一次对准的姿态角估计误差曲线。

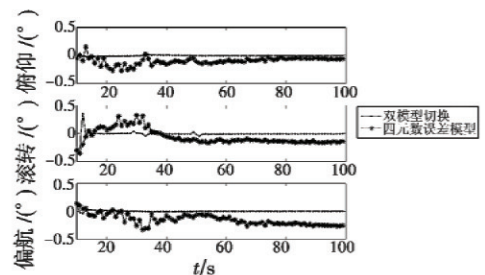


图 2 二次传递对准结果

Fig. 2 The results of the second transfer alignment

表 1 姿态角估计误差仿真结果

Table 1 Simulation results of attitude error

模型	俯仰角	滚转角	偏航角
双模型	0.03	0.01	-0.01
四元数误差模型	0.07	0.1	0.23

(°)

由图 2 与表 1 可以看出,在四元数误差模型下,3 个轴的姿态失准角收敛速度较慢。由于扩展卡尔曼滤波的线性化过程为系统引入了误差,在一定程度上影响了系统稳定性,因而系统进行滤波切换后有利于系统的稳定,由图 2 可以看出,二次对准后姿态失准角估计误差在 13 s 后快速收敛,较非线性模型下有较好的精度与稳定性,说明该方法在大失准角条件下可以有效、准确地估计出姿态失准角,完全满足传递对准算法的高精度和快速性的要求。

4 跑车试验

跑车试验中所用主、子惯导,及其安装方式如图 3 所示,图中,基座左端为子惯导,右端为主惯导。为了方便调整主、子惯导之间的安装误差角,加工多个具有一定倾角的小铝板并将其与子惯导一起固定安装。同时,在用来固定主、子惯导的基座上,打有多个螺纹孔用来调整航向的安装角。主、子惯导之间的安装角约为 $0^\circ, 5^\circ, 32^\circ$ 。

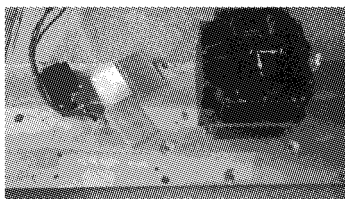


图 3 跑车设备安装

Fig. 3 Vehicle test configuration

因为主、子惯导之间的安装角已经大概知道,所以在跑车试验时可以对主惯导姿态角进行补偿后直接进入二次对准。在 3 个轴向通过补偿不同的角度后,对比对准后的姿态失准角估计值来判定该方法是否可行。

如图 4 所示,在跑车试验中设置了 3 组补偿角,分别为 $(0^\circ, -5^\circ, 32^\circ)$, $(0^\circ, -5.5^\circ, 32.5^\circ)$ 和 $(0^\circ, -6^\circ, 31.5^\circ)$ 。在 3 组不同补偿角下,姿态失准角均能在滤波下收敛,且通过多次试验发现,在 3 组不同补偿角下,姿态失准角估计值收敛精度较高,在 0.1° 以内波动,说明本方法在工程应用中具有一定的实用性。

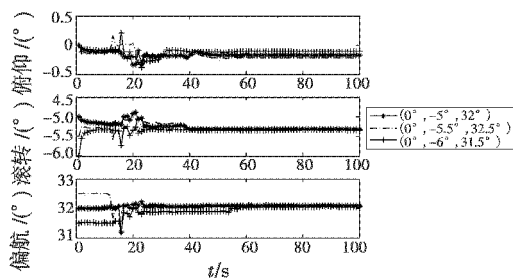


图 4 姿态失准角估计

Fig. 4 Estimation of attitude misalignment

5 结束语

该算法采用了基于四元数和基于欧拉角两种误差模型,同时兼具了两种模型的优点,即该算法既适用于大安装角场合,弥补了欧拉角误差模型只适用于小失准角场合的缺点,又克服了四元数误差模型滤波收敛时间长、精度差的缺点,吸取了欧拉角误差模型滤波收敛快、精度高的优点。该算法对大失准角条件下的快速对准具有一定意义。

参考文献

- [1] KAIN J E, CLOUTIER J R. Rapid transfer alignment for tactical weapon applications [C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Boston: MA, 1989:1290-1300.
- [2] 程向红,万德钧. 分布式系统中捷联惯性系统动基座对准研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(6):8-12. (CHENG X H, WAN D J. Initial alignment of distributed strapdown inertial system on moving base[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(6):8-12.)
- [3] 熊芝兰,郝燕玲,孙枫. 基于四元数的惯导系统快速匹配对准算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(1):28-34. (XIONG Z L, HAO Y L, SUN F. Rapid matching alignment algorithm of inertial navigation system based on quaternion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(1):28-34.)
- [4] YU M J, LEE J G, PARK H W. Comparison of SDINS in-flight alignment using equivalent error models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3):1046-1054.
- [5] SHIBATA M. Error analysis strapdown inertial navigation using quaternions[J]. Journal of Guidance, 1986, 9(3):379-381.
- [6] YU M J, PARK H W, JEON C B. Equivalent nonlinear error model of strapdown inertial navigation system [C]//AIAA, 1997:581-587.
- [7] 周卫东,吉宇人,乔相伟. 四元数扩维无迹卡尔曼滤波算法及其在大失准角快速传递对准中的应用[J]. 控制理论与应用,2011,28(11):1583-1588. (ZHOU W D, JI Y R, QIAO X W. Quaternion augmented unscented Kalman filter and its application to rapid transfer alignment under large misalignment [J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(11):1583-1588.)

(下转第 92 页)

- [7] 关新平,范正平,彭海朋,等. 扰动情况下基于 RBF 网络的混沌系统同步[J]. 物理学报,2001,50(9):1670-1674. (GUAN X P, FAN Z P, PENG H P, et al. The synchronization of chaotic systems based on RBF network in the presence of perturbation [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(9):1670-1674.)
- [8] 刘丁,任海鹏,孔志强. 基于径向基函数神经网络的未知模型混沌系统控制[J]. 物理学报,2003,52(3):531-535. (LIU D, REN H P, KONG Z Q. Control of chaos solely based on RBF neural network without an analytical model[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(3):531-535.)
- [9] 何国光,曹志彤. 混沌神经网络的控制[J]. 物理学报,2001,50(11):2103-2107. (HE G G, CAO Z T. Controlling chaos in chaotic neural network [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11):2103-2107.)
- [10] AYATI M, KHALOOZADEH H. Practical implementation of adaptive impulsive observer based chaotic synchronization scheme [J]//IEEE International Conference on System Science and Engineering(ICSSE), 2011, 44(10):367-372.
- [11] SHAN L, LIU Z, WANG Z. A new MLS chaotic system and its back stepping sliding mode synchronization control[J]. Journal of Computers, 2010, 5(3):456-463.
- [12] CHERRIER E, M'SAAD M, FARZA M. High-gain observer synchronization for a class of time-delay chaotic systems: Application to secure communications[J]. Journal of Nonlinear Systems and Applications, 2010, 1(3/4):102-112.
- [13] AYATI M, KHALOOZADEH H. Stable chaos synchronization scheme for non-linear uncertain systems[J]. IET Control Theory Applications, 2010, 4(3):437-447.
- [14] BEHESHTI S, KHALOOZADEH H. Synchronization of time-delay chaotic systems in the presence of parameters uncertainties with sliding mode observer design[C]//The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation(ICCIA), 2011:664-669.

(上接第 76 页)

- [3] GWALTNEY D A, BRISCOE J M. Comparison of communication architectures for spacecraft modular avionics systems[M]. Washington:NASA, 2006.
- [4] MATSUBARA M, KOJIMA T, SHIMAMURA K, et al. Node status monitoring and state transition mechanism for network centric X-by-Wire systems [C]//Autonomous Decentralized Systems, USA:IEEE, 2009:1-6.
- [5] BERGENHEM C, KARLSSON J. A process health status service for safety related systems using TT/ET communication scheduling[C]//Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, IEEE, 2008:122-131.
- [6] MUDALLAR V S. Verification of FlexRay membership protocol using UPPAAL[D]. Manhattan: Kansas State University, 2008.
- [7] SAE S-18 Committee. ARP 4761 guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment[M]. USA:SAE, 1996.
- [8] PFEIFER H. Formal verification of the TTP group membership algorithm [C]//Formal Methods for Distributed System Development FORTE XIII/PSTV XX, 2000:3-18.
- [9] BAUER G, PAULITSCH M. An investigation of membership and clique avoidance in TTP/C[C]//Symposium on Reliable Distributed System, 2000:118-124.
- [10] SAE International Group. TTP Communication protocol [Z]. 2011.

(上接第 88 页)

- [8] 孙枫,吴旭,王根. 舰载机大失准角的快速二次传递对准方法[J]. 华中科技大学学报,2012,40(12):65-69,74. (SUN F, WU X, WANG G. Rapid second time transfer alignment of large misalignment for carrier aircrafts[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2012, 40(12):65-69,74.)
- [9] 王司,邓正隆. 机载导弹空中二次快速传递对准方法研究[J]. 航空学报,2005,26(4):486-489. (WANG S, DENG Z L. Study on a twice rapid transfer alignment approach to missiles carried aboard in flight[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4):486-489.)
- [10] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012. (QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Theory of Kalman filter and integrated navigation[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2012.)