

基于机械臂的空间大型光学载荷姿态确定研究^{*}

成方圆^{1,2} 赵黎平¹ 王蜀泉¹

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094; 2. 中国科学院大学 北京 100094)

摘要: 大型光学载荷是空间应用的重要领域,针对一类天基大型光学载荷的姿态确定展开研究。假设该载荷安装在空间站上,并由空间三轴机械臂控制。在轨期间进行空间应用任务时,大型光学载荷的姿态确定精度是其完成相关任务的重要指标。建立了机械臂坐标系,设计了机械臂、星敏感器和光纤陀螺组合的姿态确定方案,采用联邦滤波的姿态算法,并进行仿真研究。仿真结果表明,该方案有效提高了大光学姿态确定的精度。

关键词: 空间机械臂;姿态确定;星敏感器;光纤陀螺;光学载荷

中图分类号: V249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.2030

Attitude determination of a large optical facility installed on a space station through a space manipulator

Cheng Fangyuan^{1,2} Zhao Liping¹ Wang Shuquan¹

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Space optical facility is an important application of space technology. This paper investigates the attitude determination of a large space optical facility. It is assumed that the optical facility is installed on a space station and is controlled by the space manipulator. The precision of the attitude determination is important for the performance of the optical facility. The space manipulator's coordinate system is presented, the attitude determination scheme of combination of the space manipulator, star sensors and optical fiber gyro is developed, the federal filtering algorithm is adopted, which effectively improve the precision of space optical facility's attitude determination.

Keywords: space manipulator; attitude determination; star sensor; optical fiber gyro; optical facility

1 引言

大型光学载荷是空间站应用的重要组成部分,主要进行多色成像深度巡天等任务^[1]。大型光学载荷计划安装于空间站外部,由三轴空间机械臂连接在空间站上,并控制其定位。

空间机械臂目前在航天中的应用非常广泛,如加拿大为美国航天飞机建造的遥控机械臂系统(SRMS)和其为国际空间站建造的遥操作机械臂系统(SSRMS)等。美国对空间机器人的研究,主要代表性的有 FTS 和轨道快车项目。FTS 空间机器人是具有两个臂的类人机器人,主要为了辅助和替代自由号空间站的宇航员进行舱外活动;轨道快车项目由美国 DARPA 牵头,目的是研发具有自主性的低成本卫星在轨服务系统,主要由机械臂进行在轨卫星捕获和维护操作^[2-3]。

以上针对空间机械臂的研究都集中于空间操作机械臂的研究,这种机械臂大多为多关节空间机械臂且质量较轻,主要进行在轨捕获和维修的操作^[4]。本文研究的机械臂是一端固定在空间站平台上,而另一端与大型光学载荷固连并控制光学载荷运动,以期完成光学载荷的巡天任务。相比于空间操作机械臂,控制大型光学载荷的机械臂具有关节短、质量大的特点,末端固连大质量光学载荷以致对其运动稳定性要求非常高。

主要研究空间站上大型光学载荷的姿态确定系统。姿态确定是姿态控制的基础,是大型光学载荷实现高精度对天对地观测等任务的重要技术支撑^[5]。姿态确定主要利用各种测量敏感器的测量信息,并结合姿态确定算法来获取卫星姿态^[6]。为了提高精度,减少计算量,Carlson 于 1988 年提出了联邦滤波理论,该理论采用的是信息分配方法,使其与传统的卡尔曼滤波在概念上面区别开来^[7]。它只对子

滤波器的估计信息采用信息分配原则,通过对系统信息进行不同的分配,从而获得最优的估计结果^[8]。

针对上述问题,本文首先利用 D-H 方法建立空间机械臂的坐标系^[9],设计了基于机械臂、星敏感器和光纤陀螺组合的姿态确定方案,采用联邦滤波的姿态算法,进行了相关仿真研究,有效提高了大光学姿态确定的精度,为大型光学载荷的在轨巡天任务提供有效的定位支持。

2 机械臂坐标系定义

利用 D-H 方法建立机械臂的运动学模型是机械臂运动学问题研究的标准方法。其具体方法为:针对每个关节轴设定一个参考坐标系;确定相邻两个坐标系间的关系;得到机械臂末端至基坐标系的转换矩阵。

2.1 建立机械臂连杆坐标系

本文研究对象是一个安装在空间站上、末端固连大型光学载荷的三自由度机械臂。假设机械臂所有关节角为零位时为初始位置,如图 1 所示使用 D-H 方法建立各个关节坐标系。

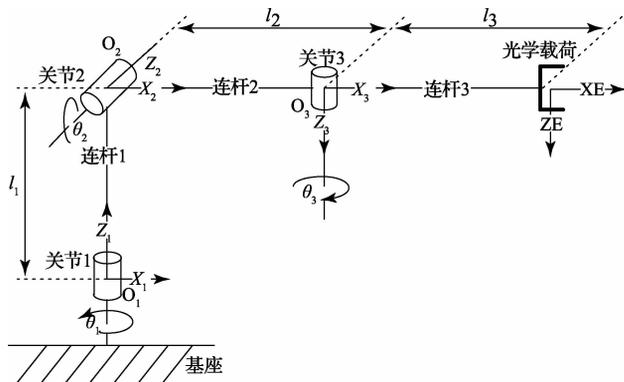


图 1 连杆坐标系示意

2.2 机械臂坐标转换矩阵

建立连杆坐标系之后,根据相邻连杆坐标系间的关系确定连杆参数表,如表 1 所示。其中, a_i 为连杆长度,表示关节轴 i 与关节轴 $i+1$ 之间公垂线长度,即沿 X_i 轴,从 Z_i 移动到 Z_{i+1} 的距离; α_i 为连杆转角,表示关节轴 i 与关节轴 $i+1$ 之间的夹角,遵循右手定则; d_i 为连杆偏距,表示从公垂线 a_{i-1} 与关节轴的交点到公垂线 a_i 与关节轴 i 的交点的有向距离,即沿 Z_i 轴,从 X_{i-1} 移动到 X_i 的距离; θ_i 为关节角,表示绕 Z_i 轴,从 X_{i-1} 旋转到 X_i 的角度, θ_i 为变量。

表 1 机械臂连杆参数

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$+90^\circ$	0	θ_1
2	l_2	$+90^\circ$	0	θ_2
3	0	0°	0	θ_3

依上述方法建立坐标系后,可以得到相邻两连杆坐标系的齐次转换矩阵为:

$${}^{i-1}T_i = Trans_z(d_i)Rot_z(\theta_i)Trans_x(a_i)Rot_x(\alpha_i) = \begin{bmatrix} c_i & -\alpha_i s_i & s\alpha_i s_i & a_i c_i \\ s_i & c\alpha_i c_i & -s\alpha_i c_i & a_i s_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s_i \triangleq \sin\theta_i, c_i \triangleq \cos\theta_i, s\alpha_i \triangleq \sin\alpha_i, c\alpha_i \triangleq \cos\alpha_i$ 。

将各连杆坐标系的参数代入上式,可以得到光学载荷至基坐标系的齐次转换矩阵为:

$${}^0T_E = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 T_E = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 & -c_1 c_2 c_3 & c_1 s_2 & l_3(c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) + l_2 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3 & -s_1 c_2 c_3 & s_1 s_2 & l_3(s_1 c_2 s_3) + l_2 s_1 c_2 \\ s_2 s_3 & -s_2 s_3 & -c_2 & l_3 s_2 c_3 + l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

取齐次变换矩阵左上 3×3 的部分,即是大型光学载荷的姿态转换矩阵:

$${}^0A_E = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3 & -c_1 c_2 c_3 + s_1 c_3 & c_1 s_2 \\ s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3 & -s_1 c_2 c_3 - c_1 c_3 & s_1 s_2 \\ s_2 c_3 & -s_2 s_3 & -c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 系统状态方程

四元数姿态运动学方程为:

$$\dot{q}_{bo} = \frac{1}{2} \bar{q}_{bo} \otimes \bar{\omega}_{bo}$$

式中: $\bar{\omega}_{bo} = [0 \quad \omega_{bo}^T]^T$ 为扩展角速度矢量,根据定义,有:

$$\omega_{bo} = \omega - A_{bo}(\bar{q}_{bo}) \omega_{oi} \quad (4)$$

式中: ω 为本体系相对于地心惯性系的角速度在本体系中的坐标; ω_{bo} 为本体系相对于当地轨道系的角速度在本体系中的坐标; $\omega_{oi} = [0 \quad -\omega_0 \quad 0]^T$ 为当地轨道系相对于地心惯性系的角速度在当地轨道系中的坐标, ω_0 为轨道角速度; $A_{bo}(\bar{q}_{bo})$ 为当地轨道系到本体系的转换矩阵。

定义真实四元数 \bar{q}_{bo} 与估计四元数 \hat{q}_{bo} 之间的误差四元数为:

$$\Delta \bar{q}_{bo} = [\Delta q_0 \quad \Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]^T = [\Delta q_0 \quad \Delta \mathbf{q}^T]^T$$

误差四元数的增量表达式为: $\Delta \bar{q}_{bo} = \hat{q}_{bo}^{-1} \otimes \bar{q}_{bo}$ 。根据四元数的逆的定义,可以得到四元数的状态方程:

$$\Delta \dot{\bar{q}}_{bo} = \hat{q}_{bo}^{-1} \otimes \dot{\bar{q}}_{bo} + \hat{q}_{bo}^{-1} \otimes \dot{\bar{q}}_{bo} = -\frac{1}{2} \hat{\omega}_{bo} \otimes \hat{q}_{bo}^{-1} \otimes \bar{q}_{bo} + \hat{q}_{bo}^{-1} \otimes \left(\frac{1}{2} \bar{q}_{bo} \otimes \bar{\omega}_{bo} \right) = -\frac{1}{2} \hat{\omega}_{bo} \otimes \Delta \bar{q}_{bo} + \frac{1}{2} \Delta \bar{q}_{bo} \otimes \bar{\omega}_{bo} \quad (5)$$

式中: $\hat{\omega}_{bo}$ 是由 $\hat{\omega}_{bo}$ 定义的扩展的角速度矢量。令 $\Delta \omega_{bo} = \omega_{bo} - \hat{\omega}_{bo}$,则扩展的角速度矢量也有关系式 $\Delta \bar{\omega}_{bo} = \bar{\omega}_{bo} - \hat{\omega}_{bo}$,代入式(15)可以得到:

$$\Delta \dot{q}_{bo} = \frac{1}{2} \Delta \bar{q}_{bo} \otimes \hat{\omega}_{bo} - \frac{1}{2} \hat{\omega}_{bo} \otimes \Delta \bar{q}_{bo} + \frac{1}{2} \Delta \bar{q}_{bo} \otimes \Delta \bar{\omega}_{bo} \quad (6)$$

根据四元数相乘的定义,有:

$$\frac{1}{2} \Delta \bar{q}_{bo} \otimes \hat{\omega}_{bo} - \frac{1}{2} \hat{\omega}_{bo} \otimes \Delta \bar{q}_{bo} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta q \times \hat{\omega}_{bo} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于误差四元数为小量,即:

$$\Delta \bar{q}_{bo} = [\Delta q_0 \quad \Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]^T \approx [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \text{ 所以有:}$$

$$\frac{1}{2} \Delta \bar{q}_{bo} \otimes \Delta \bar{\omega}_{bo} = \frac{1}{2} \Delta \bar{\omega}_{bo} + \Delta(|\Delta \bar{q}_{bo}| |\Delta \bar{\omega}_{bo}|) \quad (8)$$

由于误差四元数为小量,有:

$$\mathbf{A}_{bo}(\Delta \bar{q}_{bo}) = \begin{bmatrix} 1 & 2\Delta q_3 & -2\Delta q_2 \\ -2\Delta q_3 & 1 & 2\Delta q_1 \\ 2\Delta q_2 & -2\Delta q_1 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{I}_{3 \times 3} - 2[\Delta q \times] \quad (9)$$

将式(8)、(7)代入式(6)中,忽略式(8)中的二阶小量,有:

$$\begin{cases} \Delta \dot{q}_0 = 0 \\ \Delta \dot{q} = \Delta q \times \hat{\omega}_{bo} + \frac{1}{2} \Delta \bar{\omega}_{bo} = -[\hat{\omega}_{bo} \times] \Delta q + \frac{1}{2} \Delta \bar{\omega}_{bo} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(4),可以得到:

$$\omega_{bo} = \omega - \mathbf{A}_{bo}(\bar{q}_{bo})\omega_{oi}, \hat{\omega}_{bo} = \hat{\omega} - \mathbf{A}_{bo}(\hat{q}_{bo})\omega_{oi}, \text{ 则有:}$$

$$\Delta \bar{\omega}_{bo} = \omega_{bo} - \hat{\omega}_{bo} = \Delta \omega + 2[\Delta q \times] \mathbf{A}_{bo}(\hat{q}_{bo})\omega_{oi}.$$

根据以上各式,可以得到关于误差四元数的线性状态方程:

$$\begin{cases} \Delta \dot{q}_0 = 0 \\ \Delta \dot{q} = -[\hat{\omega} \times] \Delta q - \frac{1}{2} \Delta d - \frac{1}{2} \Delta b - \frac{1}{2} \mathbf{n}_g \end{cases} \quad (11)$$

根据误差四元数的推导,取滤波器的状态变量为降阶的误差四元数、陀螺随机漂移估计误差和常值漂移估计误差: $\mathbf{X}_{9 \times 1} = [\Delta q^T \quad \Delta d^T \quad \Delta b^T]^T$. 则滤波器状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t) \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} -[\hat{\omega} \times] & -0.5\mathbf{I}_{3 \times 3} & -0.5\mathbf{I}_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -\mathbf{D}_\tau & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{9 \times 9},$$

$$\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} 0.5\mathbf{n}_g \\ \mathbf{n}_d \\ \mathbf{n}_b \end{bmatrix}$$

将状态方程离散化可得到:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1}$$

其中: $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的一步转移阵,可用下式

来计算: $\Phi_{k,k-1} = \mathbf{I}_{9 \times 9} + \mathbf{F}T + \frac{\mathbf{F}^2 T^2}{2}$, 其中 T 为滤波器周期,

\mathbf{W}_{k-1} 为系统噪声序列, \mathbf{W}_k 满足: $E[\mathbf{W}_k] = 0$, $E[\mathbf{W}_k \mathbf{W}_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj}$, 其中 \mathbf{Q}_k 为系统噪声方差阵,有 $\mathbf{Q}_k = \text{diag}(0.25\sigma_g^2, \sigma_d^2, \sigma_b^2)$.

$\sigma_b^2)$.

4 系统测量方程

4.1 陀螺测量方程

陀螺模型中考虑陀螺的高频噪声、指数相关的漂移和常值漂移,模型为:

$$\omega_g = \omega + d + b + n_g$$

式中: $\omega_g = [\omega_{gx} \quad \omega_{gy} \quad \omega_{gz}]^T$ 为陀螺输出角速度在光学载荷本体体系上的坐标; $\omega = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ 为光学载荷相对惯性空间的转速在本体系上的坐标; $\omega = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ 为陀螺漂移中的指数相关部分,通常被描述为一阶马尔柯夫过程: $\dot{d} = -\mathbf{D}d + n_d$, 其中, n_d 为高斯白噪声,有 $E\{n_{di}(t)n_{di}^T(\tau)\} = \sigma_d^2 \delta(t-\tau)$ ($i = x, y, z$), \mathbf{D}_τ 是由相关时间常数 τ_i ($i = x, y, z$) 构成的对角阵: $\mathbf{D}_\tau = \text{diag}\left(\frac{1}{\tau_x} \quad \frac{1}{\tau_y} \quad \frac{1}{\tau_z}\right)$, $b = [b_x \quad b_y \quad b_z]^T$ 为陀螺漂移中的常值部分, $n_g = [n_{gx} \quad n_{gy} \quad n_{gz}]^T$ 为测量噪声,假设为高斯白噪声,有 $E\{n_{gi}(t)n_{gi}^T(\tau)\} = \sigma_g^2 \delta(t-\tau)$, ($i = x, y, z$).

4.2 星敏感器测量方程

本文使用两个星敏感器观测光学载荷姿态,两个星敏感器的光轴夹角为 110° (安装,两个星敏感器的光轴在光学载荷本体坐标系内的坐标为 l_{iz1} 和 l_{iz2} , 星敏感器测量方程^[10]为:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} l_{iz1} \\ l_{iz2} \end{bmatrix}_{6 \times 1} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + V(t) \quad (13)$$

式中: l_{iz1} 、 l_{iz2} 为两个星敏感器的光轴在地心惯性坐标系中的坐标,其中:

$$l_{iz1} = (\mathbf{A}_{bo}(\bar{q}_{bo})\mathbf{A}_{oi})^T l_{iz1} = \mathbf{A}_{io}\mathbf{A}_{bo}^T(\bar{q}_{bo})l_{iz1},$$

$$l_{iz2} = (\mathbf{A}_{bo}(\bar{q}_{bo})\mathbf{A}_{oi})^T l_{iz2} = \mathbf{A}_{io}\mathbf{A}_{bo}^T(\bar{q}_{bo})l_{iz2}, \mathbf{A}_{bo}(\bar{q}_{bo})$$
 为当地轨道坐标系到本体坐标系的转换矩阵; \mathbf{A}_{io} 为 \mathbf{A}_{oi} 的逆,是轨道坐标系到惯性坐标系的转换矩阵:

$$\mathbf{A}_{io} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} R_z(-\Omega)R_x(-i)R_z(-\omega - f)$$

式中: i 、 ω 、 f 、 Ω 分别为轨道倾角、近地点幅角、真近点角和升交点赤经; \bar{q}_{bo} 是四元数,且 $\bar{q}_{bo} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T = [q_0 \quad \mathbf{q}^T]^T$; v_1 、 v_2 为测量噪声矢量,假定为高斯白噪声。

将测量方程围绕最优估计值 $\hat{\mathbf{X}}(t)$ 以采样周期 T 线性化和离散化:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (14)$$

式中: 测量矩阵 \mathbf{H}_k 为:

$$\mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{h}[\mathbf{X}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{X}(t_k)} \right|_{\mathbf{x}(t_k) = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial \Delta q} & 0_{3 \times 6} \\ \frac{\partial h_2}{\partial \Delta q} & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix}_{6 \times 9} =$$

$$\begin{bmatrix} -2\mathbf{A}_{io}\mathbf{A}_{bo}^T(\hat{q}_{bo})[l_{iz1} \times] & 0_{3 \times 6} \\ -2\mathbf{A}_{io}\mathbf{A}_{bo}^T(\bar{q}_{bo})[l_{iz2} \times] & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4.3 机械臂测量方程

根据姿态四元数表示法得到姿态转换矩阵为：

$${}^0\mathbf{A}_E(q) =$$

$$\begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_0q_3 + 2q_1q_2 & -2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ -2q_0q_3 + 2q_1q_2 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_0q_1 + 2q_2q_3 \\ 2q_0q_2 + 2q_1q_3 & -2q_0q_1 + 2q_2q_3 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

结合式(3)和式(16),可以得到机械臂测量方程：

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{2q_0q_1 + 2q_2q_3}{-2q_0q_2 + 2q_1q_3}\right) + \Delta\theta_1 \\ \theta_2 = -\arccos(2q_0^2 + 2q_3^2 - 1) + \Delta\theta_2 \\ \theta_3 = -\arctan\left(\frac{-2q_0q_1 + 2q_2q_3}{2q_0q_2 + 2q_1q_3}\right) + \Delta\theta_3 \end{cases} \quad (17)$$

式中：

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \frac{q_3}{q_0^2 + q_3^2}\Delta q_0 + \frac{-q_2}{q_1^2 + q_2^2}\Delta q_1 + \frac{q_1}{q_1^2 + q_2^2}\Delta q_2 + \frac{-q_0}{q_0^2 + q_3^2}\Delta q_3 \\ \Delta\theta_2 = \frac{2q_0}{\sqrt{(q_0^2 + q_3^2)(q_1^2 + q_2^2)}}\Delta q_0 + \frac{2q_3}{\sqrt{(q_0^2 + q_3^2)(q_1^2 + q_2^2)}}\Delta q_3 \\ \Delta\theta_3 = \frac{q_3}{q_0^2 + q_3^2}\Delta q_0 + \frac{-q_2}{q_1^2 + q_2^2}\Delta q_1 + \frac{q_1}{q_1^2 + q_2^2}\Delta q_2 + \frac{-q_0}{q_0^2 + q_3^2}\Delta q_3 \end{cases} \quad (18)$$

5 联邦滤波

联邦滤波理论采用分散化滤波思想。在联邦滤波器结构中,包含有若干个子滤波器和一个主滤波器,是分块估计、两部级联的分散化滤波方法,如图 2 所示。主滤波器与每个子滤波器通过卡尔曼滤波器分别构成一个组合子系统,各子系统之间相应的输出量一起构成组合导航子系统滤波器的量测量。各个子滤波器是平行结构,每个子滤波器可以得到的是系统状态的局部估计,通过在主滤波器里对各子滤波器的局部估计进行融合处理,即可得到系统全局最优估计^[11]。

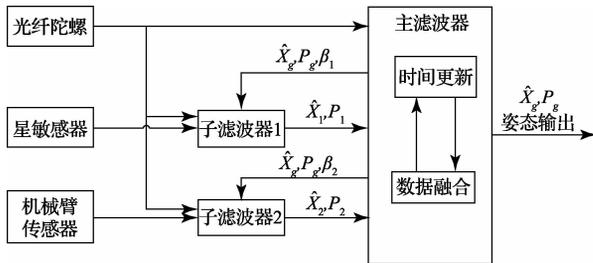


图 2 联邦滤波结构

联邦滤波的主要思路有以下 4 个过程。

1) 信息分配,将系统的过程信息按照信息分配原则在

各子滤波器和主滤波器之间分配：

$$\begin{aligned} P_{i,k-1} &= \beta_i^{-1} P_{k-1} \\ Q_{i,k-1} &= \beta_i^{-1} Q_{k-1} \\ X_{i,k-1} &= X_{k-1} \end{aligned}$$

式中:根据信息守恒定律, $\sum_{i=0}^n \beta_i = 1$ 。

2) 时间更新,将系统状态与估计误差协方差按系统转移矩阵进行转移,在子滤波器和主滤波器中独立进行：

$$\begin{aligned} \hat{X}_{i,k/k-1} &= \Phi_{i,k/k-1} \hat{X}_{i,k-1} \\ P_{i,k/k-1} &= \Phi_{i,k/k-1} P_{i,k-1} \Phi_{i,k/k-1}^T + \Gamma_{i,k-1} Q_{i,k-1} \Gamma_{i,k-1}^T \end{aligned}$$

3) 量测更新,根据新的量测信息对系统状态及估计误差协方差进行更新,因为主滤波器没有量测量,所以量测更新只在子滤波器中进行：

$$\begin{aligned} K_{i,k} &= P_{i,k/k-1} H_{i,k}^T R_{i,k}^{-1} \\ \hat{X}_{i,k} &= \hat{X}_{i,k/k-1} + K_{i,k} (Z_{i,k} - H_{i,k} \hat{X}_{i,k/k-1}) \\ P_{i,k} &= (I - K_{i,k} H_{i,k}) P_{i,k/k-1} \end{aligned}$$

4) 估计融合,这是联邦滤波的核心,将各个子滤波器的局部估计进行最优融合：

$$\begin{aligned} \hat{X}_g &= P_g \sum P_{i,k}^{-1} \hat{X}_{i,k} \\ P_g &= \left(\sum P_{i,k}^{-1} \right)^{-1} \end{aligned}$$

获得全局最优估计 $\hat{X}_g(k)$ 后,主滤波器对姿态四元数和角速度的预测值修正为：

$$\Delta \hat{q}(k) = \left[(\Delta \hat{q}(k))^T \quad \sqrt{I - (\Delta \hat{q}(k))^T \Delta \hat{q}(k)} \right]^T \quad (19)$$

由 $\hat{q}(k) = \hat{q}(k, k-1) \otimes \Delta \hat{q}(k)$, $\hat{b}(k) = \hat{b}(k, k-1) + \Delta \hat{b}(k)$ 得到时刻 k 的估计值,然后再修正角速度值。

6 仿真分析

仿真实验条件：

1) 陀螺参数,测量噪声标准差 $\sigma_g = \frac{0.01(^{\circ})}{h}$; 相关漂移白噪声标准差 $\sigma_d = \frac{0.3(^{\circ})}{h}$; 相关漂移初值 $d(0) = [0.1 \quad 0.1 \quad 0.1]^T \circ/h$; 相关时间常数 $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 1h$, 陀螺常值漂移 $b = [1.0 \quad 1.0 \quad 1.0]^T \circ/h$, 常值漂移白噪声标准差 $\sigma_b = 0.03^{\circ}/\sqrt{h}$ 。

2) 星敏感器观测精度 0.0003° ; 星敏感器光轴安装夹角为 110° ;

3) 机械臂关节轴传感器精度 0.0001° ;

4) 理论姿态初始值

$$\bar{q}_{bo}(0) =$$

$$\left[\cos(2^{\circ}) \quad \frac{\sqrt{3}}{3} \sin(2^{\circ}) \quad \frac{\sqrt{3}}{3} \sin(2^{\circ}) \quad \frac{\sqrt{3}}{3} \sin(2^{\circ}) \right]^T;$$

5) 信息分配因子设定: $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$;

仿真结果如图 3 和 4 所示。

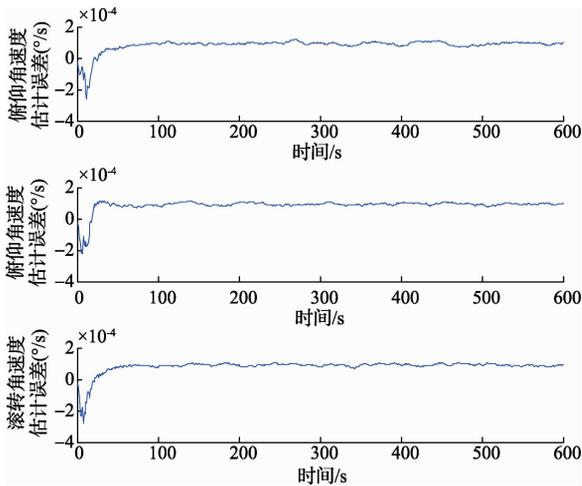


图3 姿态角速度估计误差曲线

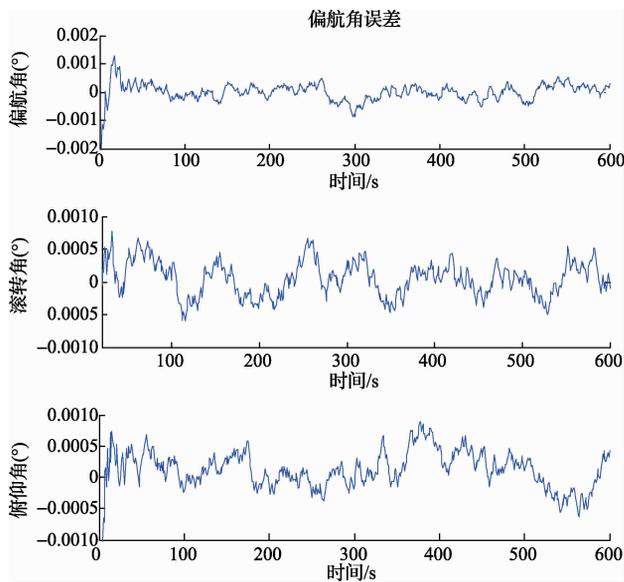


图4 姿态角估计误差曲线

由仿真结果可知:当仿真达到稳态后,姿态角速度估计值误差达到 $0.0002(^{\circ}/s)$,姿态角估计误差达到了 0.001° ;定姿精度优于 0.001° ,并且对陀螺的角速度的估计误差进行了很好的修正。

7 结 论

针对空间站上大型光学载荷的姿态确定问题,提出了一种结合空间机械臂的姿态确定方案。研究了基于空间三轴机械臂的大型光学载荷的姿态确定系统。建立了空间三轴机械臂的运动学模型,星敏感器和光纤陀螺的测量模型,

推导了误差四元数的状态方程,采用了联邦滤波算法,并进行了仿真实验。通过仿真可知,相比传统的“星光组合”定姿,联邦滤波算法提高了大型光学载荷的姿态确定系统的定姿精度,并且减少了系统的计算量。设计的结合空间机械臂的多信息融合姿态确定方法对大型光学载荷的高精度定姿方案提供了一种参考。

参考文献

- [1] 王小勇,陈晓丽,苏云.当代高分辨率光学载荷前沿技术[J].国际太空,2013(5):13-18.
- [2] 张文辉,叶晓平,季晓明,等.国内外空间机器人技术发展综述[J].飞行力学,2013(3):198-202.
- [3] 赵莹,石为人.一种空间机械臂末端接触力建模与算法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1780-1788.
- [4] 宁远明,刘晏,明建.基于反演设计的机器人动态滑模控制理论对月表机械臂模型的分析[J].仪器仪表学报,2013,34(增刊1):78-82.
- [5] 葛益明,矫媛媛,王炯琦,等.基于联合滤波的卫星姿态确定[J].上海航天,2013(6):23-27,51.
- [6] 乔相伟.基于四元数非线性滤波的飞行器姿态确定算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [7] SUN X J, GAO Y, DENG Z L, 等. Multi-model information fusion kalman filtering and white noise deconvolution [J]. Information Fusion, 2010, 11(2): 163-173.
- [8] 谢宁,毕俊熹,娄小平,等.融合多传感信息的仿人机器人姿态解算[J].电子科技,2015(1):150-154.
- [9] 李显凌.多节柔性主动导管的弯曲控制及位置跟踪测量[J].电子测量与仪器学报,2013,27(7):633-639.
- [10] 张欢,吴玲玲.星敏感器光学系统设计[J].国外电子测量技术,2014,33(12):61-64.
- [11] 袁克非.组合导航系统多源信息融合关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

作者简介

成方圆,硕士研究生。主要研究方向为航天器动力学、控制与仿真。

E-mail:chengfangyuan@csu.ac.cn

赵黎平,研究员。主要研究方向为有效载荷总体设计、空间飞行器动力学与控制技术。

王蜀泉,副研究员。主要研究方向为动力学与控制、编队飞行。