

空间细胞机器人接管非合作目标时的交互式参数辨识方法

常海涛^{1,2}, 黄攀峰^{1,2}, 鹿振宇^{1,2}, 孟中杰^{1,2}, 张夷斋^{1,2}

(1. 西北工业大学航天学院智能机器人研究中心, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学航天飞行动力学技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 为应对日益复杂和多样的在轨服务需求, 本文提出利用空间细胞机器人实施对非合作目标的接管控制。针对非合作目标接管控制中的惯性参数辨识问题, 考虑到常用的递推最小二乘法依赖中心节点及计算量过大等不足, 提出了一种适用于空间细胞机器人系统的交互式参数辨识算法, 建立了质量、质心位置和惯性张量等惯性参数的辨识模型, 利用细胞机器人之间的少量数据交互实现分布式和异步式的参数辨识。仿真结果表明, 算法能够实现辨识结果的收敛性和一致性, 辨识精度较高。最后分析了噪声、链路断开、拓扑结构和交互策略等因素对算法收敛性和一致性的影响, 结果表明算法在噪声和链路断开等情况下仍能保证辨识结果的有效性。同时通过仿真分析验证了异步交互策略的优越性。

关键词: 空间细胞机器人; 接管控制; 非合作目标; 惯性参数; 分布式; 交互式参数辨识

中图分类号: V448

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-02-0129-10

Interactive Parameter Identification of Cellular Space Robots for Non-cooperative Spacecraft Takeover Control

CHANG Haitao^{1,2}, HUANG Panfeng^{1,2}, LU Zhenyu^{1,2}, MENG Zhongjie^{1,2}, ZHANG Yizhai^{1,2}

(1. Research Center for Intelligent Robotics, School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to execute diversified and complicated on-orbit service tasks, the cellular space robot (CSR) is proposed to perform takeover control for non-cooperative targets. To identify inertial parameters of the non-cooperative spacecraft in takeover control, an interactive parameter identification method for CSRs is proposed to reduce the central node dependency and huge computation requirement of the recursive least squares method which is commonly used. The parameter identification models for mass, center-of-mass and inertia tensor are presented respectively. The method presented is distributed and asynchronous, and requires only a few data interaction. Simulations are conducted to validate the convergence and consensus of the identification results, and high-accuracy identification is realized. More simulations show that the method proposed can achieve convergence and consensus under the influence of measurement noises, communication disconnection, communication topologies and interaction strategies, and obtain accurate results in the case of noises and disconnection. Meanwhile, the simulations validate the superiority of the asynchronous interaction over the synchronous interaction.

Keywords: cellular space robot; take-over control; non-cooperative target; inertial parameter; distributed; interactive parameter identification

1 引言 (Introduction)

随着空间技术的发展以及各类航天器的广泛应用, 目前在轨运行的航天器数量逐年增加, 但仍难以满足日益增长的需求。目前航天器的设计模式需要大量测试工作, 研制成本高、研制周期长^[1]; 另外, 目前大多航天器没有针对在轨服务进行合作化设计, 若为数量庞大、类型众多的航天器定制对应的服务航天器将带来时间和成本上的巨大消耗。

为解决目前航天器设计周期长、研制成本高以及在轨服务困难等问题, 国内外学者从航天器细胞化和在轨装配入手, 提出了不同的概念和方案: Tanaka 提出了 CellSat 的概念^[2-3]; DARPA (美国国防部高级研究计划局) 的凤凰计划提出利用细胞卫星 Satlet 回收废弃卫星可用组件, 为此 Jaeger^[4] 设计了 Satlet, Barnhart 等^[5-6] 分析了航天器细胞化的经济效益; DLR (德国宇航中心) 的 iBOSS 计划从可接受在轨服务航天器的角度出发, 提出了智能建

造块的概念^[7-8]. 国内黄攀峰等^[9]对航天器细胞化研究进行了综述, 并在此基础上提出一种新型的航天器设计模式——空间细胞机器人^[10] (CSR): 通过打破目前航天器的架构, 将航天器按照典型子系统拆分为多个标准化、物理独立、功能独立、采用标准接口相互连接的细胞机器人. 仿照多细胞生物组织, 将细胞机器人进行组织和结合, 形成满足多种功能需求的空间细胞机器人群落. 通过改变细胞群落中细胞机器人的组成和数量可以调整细胞群落的功能和性能, 系统具有较高的灵活性, 能够适应多种复杂的在轨服务任务.

目标接管控制是空间细胞机器人实施在轨服务任务的典型方式. 通过空间细胞机器人与目标航天器结合, 利用空间细胞机器人自身的控制系统, 接管目标航天器的姿轨控制, 实现控制系统失效的目标航天器的延寿. 在非合作目标接管控制任务过程中, 由于目标惯性参数未知, 因此需要辨识其质量等惯性参数, 以实现精确控制.

关于航天器的惯性参数辨识, 目前已有大量研究, 主要分为 2 类, 一类基于动量守恒^[11], 另一类基于欧拉动力学^[12]. 常用的辨识方法主要有最小二乘法或递推最小二乘法, 但上述算法并不能较好适用于空间细胞机器人系统: 在空间细胞机器人系统中, 由于细胞数量大, 测量数据维数高, 采用最小二乘法或递推最小二乘法需要进行大矩阵求逆运算, 计算量较大; 另外, 上述方法均需要中心节点完成辨识计算, 而空间细胞机器人则是通过数据接口进行数据交互, 系统具有分布式和去中心化的特点, 因此上述辨识算法应用在空间机器人系统上会带来较大的计算压力和通信压力.

为此, 有学者提出分布式参数辨识算法, Ding 等^[13]提出了一种可以应用于分布式系统的 C-LS (coupled least squares) 算法, 但只适用于环形拓连接和数据单向、顺序传递的情况, 并且需要传递协方差矩阵, 数据传输量大. 另外, Pakzad^[14]提出了 IMID (interactive model identification) 算法, 无需传递协方差矩阵. 本文结合 C-LS 和 IMID 提出了交互式参数辨识算法, 算法不需要中心节点, 不依赖特定拓扑, 可实现去中心化、异步化的参数辨识.

本文以空间细胞机器人实施接管控制为任务背景, 建立了目标质量、质心位置辨识模型和惯性张量辨识模型. 针对空间细胞机器人的分布式特性, 提出了一种交互式参数辨识方法, 实现了分布式辨识, 最后进行了仿真校验和参数影响分析.

2 系统描述 (System description)

接管控制是空间细胞机器人的一种典型在轨服务任务, 为实现对 GEO (地球静止) 轨道卫星等大型非合作目标的接管控制, 需要在目标航天器上附着多个细胞, 如图 1 所示. 按照功能划分, 空间细胞机器人可以分为测量细胞、执行细胞、控制细胞、通信细胞等. 细胞与细胞之间通过标准化的机械接口、电接口和数据接口互连, 协同完成目标航天器的接管控制. 各个执行细胞通过控制分配来输出期望的合力和合力矩^[10].

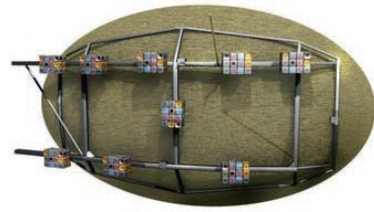


图 1 凤凰计划空间细胞机器人接管控制示意图

Fig.1 Illustration of takeover control using CSR in Phoenix Project

将目标航天器及细胞机器人的组合体视为刚体 B , 测量细胞视为固连于其上的质点, 设系统配备 n 个测量细胞, 测量细胞的集合用 $C = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示, 为描述其相对关系, 定义如下固连坐标系:

(1) 测量细胞坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ ($i \in C$): 与测量细胞 i 固连;

(2) 本体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$: 本体坐标系是其他固连坐标系的几何参考基准, 不失一般性, 本文令其与测量细胞 1 的固连坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 重合;

(3) 质心坐标系 $O_{cm} X_{cm} Y_{cm} Z_{cm}$: 原点位于系统质心, 方向与 $O_b X_b Y_b Z_b$ 坐标系平行.

测量细胞的安装示意图如图 2 所示, 其中 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 为惯性坐标系, r_i 表示测量细胞 i 安装位置相对于本体系的位移矢量, r_{cm} 表示系统质心相对于本体系原点的位移矢量.

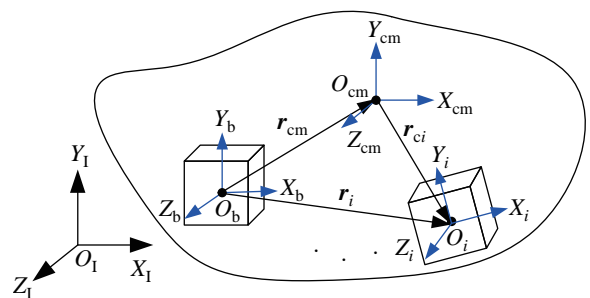


图 2 测量细胞安装示意图

Fig.2 Schematic illustration of the sensor cell installation

本文中向量的参考坐标系用左上标表示, 若参

考系为惯性坐标系则左上标可省略, 例如上文中的 \mathbf{r}_i 即为 ${}^I\mathbf{r}_i$. 后文中如无特殊说明, 无左上标的向量均为在惯性系中表示.

3 参数辨识模型 (Parameter identification models)

3.1 质量、质心位置辨识模型

假设每个测量细胞配置有三轴加速度计, 根据刚体运动学, 测量细胞 i 的加速度测量值为

$$\mathbf{a}_i = \frac{\mathbf{F}_e}{M} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^\times \mathbf{r}_{ci} + \boldsymbol{\omega}_i^\times \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{r}_{ci} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_e \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为系统所受合外力, 由多个执行细胞合成输出^[10]; M 为组合航天器的质量; \mathbf{r}_{ci} 为测量细胞 i 的安装位置相对于质心的位移; $\boldsymbol{\omega}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为测量细胞 i 测得的角速度; $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 为角加速度; \mathbf{a}^\times 表示 3 维向量 $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ 的反对称矩阵:

$$\mathbf{a}^\times = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

将 \mathbf{r}_{ci} 在本体系下表示为

$$\mathbf{r}_{ci} = \mathbf{A}_b ({}^b\mathbf{r}_i - {}^b\mathbf{r}_{cm}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{A}_b 表示本体系相对于惯性系的旋转矩阵, ${}^b\mathbf{r}_i$ 和 ${}^b\mathbf{r}_{cm}$ 分别为向量 \mathbf{r}_i 和 \mathbf{r}_{cm} 在本体系中的表示.

组合航天器质量 M 和质心位置 ${}^b\mathbf{r}_{cm}$ 为待辨识量. 假设各测量细胞连接构型已知, 则其相对于本体坐标系的位姿已知, 因此 ${}^b\mathbf{r}_i$ 可根据细胞机器人的连接构型得到, \mathbf{A}_b 可由下式计算:

$$\mathbf{A}_b = \mathbf{A}_i ({}^i\mathbf{A}_b) \quad (3)$$

式中: \mathbf{A}_i 为测量细胞 i 相对于惯性坐标系的旋转矩阵, 由姿态测量器件测得; ${}^i\mathbf{A}_b$ 为本体坐标系相对于 i 固连坐标系的旋转矩阵, 由连接构型得到.

结合式 (1)、(2), 可以得到如下线性回归方程:

$$\mathbf{y}_m = \boldsymbol{\Phi}_m^T \boldsymbol{\theta}_m \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^2 & \alpha_{12}^2 & \alpha_{13}^2 & 2\alpha_{12}\alpha_{13} & 2\alpha_{13}\alpha_{11} & 2\alpha_{11}\alpha_{12} \\ \alpha_{21}^2 & \alpha_{22}^2 & \alpha_{23}^2 & 2\alpha_{22}\alpha_{23} & 2\alpha_{23}\alpha_{21} & 2\alpha_{21}\alpha_{22} \\ \alpha_{31}^2 & \alpha_{32}^2 & \alpha_{33}^2 & 2\alpha_{32}\alpha_{33} & 2\alpha_{33}\alpha_{31} & 2\alpha_{31}\alpha_{32} \\ \alpha_{21}\alpha_{31} & \alpha_{22}\alpha_{32} & \alpha_{23}\alpha_{33} & \alpha_{22}\alpha_{33} + \alpha_{23}\alpha_{32} & \alpha_{21}\alpha_{33} + \alpha_{23}\alpha_{31} & \alpha_{21}\alpha_{32} + \alpha_{22}\alpha_{31} \\ \alpha_{31}\alpha_{11} & \alpha_{32}\alpha_{12} & \alpha_{33}\alpha_{13} & \alpha_{12}\alpha_{33} + \alpha_{13}\alpha_{32} & \alpha_{11}\alpha_{33} + \alpha_{13}\alpha_{31} & \alpha_{11}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{31} \\ \alpha_{11}\alpha_{21} & \alpha_{12}\alpha_{22} & \alpha_{13}\alpha_{23} & \alpha_{12}\alpha_{23} + \alpha_{13}\alpha_{22} & \alpha_{11}\alpha_{23} + \alpha_{13}\alpha_{21} & \alpha_{11}\alpha_{22} + \alpha_{12}\alpha_{21} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m &= \mathbf{a}_i - (\dot{\boldsymbol{\omega}}_i^\times \mathbf{A}_b + \boldsymbol{\omega}_i^\times \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{A}_b) {}^b\mathbf{r}_i \\ \boldsymbol{\Phi}_m^T &= \left[\mathbf{F}_e \quad -(\dot{\boldsymbol{\omega}}_i^\times \mathbf{A}_b + \boldsymbol{\omega}_i^\times \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{A}_b) \right] \in \mathbb{R}^{3 \times 4} \\ \boldsymbol{\theta}_m &= \begin{bmatrix} M^{-1} \\ {}^b\mathbf{r}_{cm} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 1} \end{aligned}$$

3.2 惯性张量辨识模型

组合航天器在外力矩作用下的姿态动力学为

$$\mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{T}_e \quad (5)$$

式中: $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为组合体惯性张量; $\mathbf{T}_e \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为系统所受合外力矩, 由多个执行细胞合成输出^[10].

设 ${}^b\mathbf{I}$ 为系统相对质心系的惯性张量, 并定义待辨识变量 $\boldsymbol{\theta}_1$:

$$\boldsymbol{\theta}_1 = \begin{bmatrix} {}^bI_{xx} & {}^bI_{yy} & {}^bI_{zz} & {}^bI_{yz} & {}^bI_{xz} & {}^bI_{xy} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

结合式 (6), 将式 (5) 转化为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_e &= \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}_i \\ &= \mathbf{A}_b ({}^b\mathbf{I}) \mathbf{A}_b^T \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i^\times \mathbf{A}_b ({}^b\mathbf{I}) \mathbf{A}_b^T \boldsymbol{\omega}_i \\ &= (\mathbf{M}_{wd} + \mathbf{M}_w) \mathbf{M}_a \boldsymbol{\theta}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{M}_{wd} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x & 0 & 0 & 0 & \dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ 0 & \dot{\omega}_y & 0 & \dot{\omega}_z & 0 & \dot{\omega}_x \\ 0 & 0 & \dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 6} \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_w = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x \omega_z & -\omega_x \omega_y \\ -\omega_y \omega_z & 0 & \omega_x \omega_y \\ \omega_y \omega_z & -\omega_x \omega_z & 0 \\ \omega_y^2 - \omega_z^2 & -\omega_x \omega_y & \omega_x \omega_z \\ \omega_x \omega_y & \omega_z^2 - \omega_x^2 & -\omega_y \omega_z \\ -\omega_x \omega_z & \omega_y \omega_z & \omega_x^2 - \omega_y^2 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{3 \times 6} \quad (9)$$

式中: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为 ω 的元素, $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ 为 $\dot{\omega}$ 的元素, $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}, \alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33}$ 为旋转矩阵 A_b 的元素:

$$A_b = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

式 (7) 可以写为如下形式的线性回归方程:

$$y_I = \varphi_I^T \theta_I \quad (11)$$

式中:

$$y_I = T_e$$

$$\varphi_I^T = (M_{wd} + M_w) M_a$$

4 交互式参数辨识方法 (Interactive parameter identification)

上文建立了空间细胞机器人的参数辨识模型, 得到了线性回归方程 (4) 和 (11), 完成线性回归方程的求解即可分别得到待辨识参数 θ_m 和 θ_l .

对于形如 $y(t) = \varphi^T(t)\theta + \delta(t)$ 的线性回归方程, 其中 $\theta \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ 为待辨识参数, p 为待辨识参数维度; $y(t) \in \mathbb{R}^{q \times 1}$ 为输出向量, q 为输出维度; $\varphi^T(t) \in \mathbb{R}^{q \times p}$ 为回归信息矩阵, $\delta(t) \in \mathbb{R}^{q \times 1}$ 为测量噪声. 对于式 (4), $p = 4$, $q = 3$; 对于式 (11), $p = 6$, $q = 3$. 为综合 n 个细胞机器人的测量数据, 构成如式 (12) 所示的线性回归方程, 常用的方法有:

(1) 汇总 t 时刻各测量细胞的测量值到中心节点, 然后在中心节点进行计算, 建立线性回归方程;

(2) 各节点分别根据自身的测量信息计算其输出向量和回归信息矩阵, 并传输到中心节点进行组合形成线性回归方程.

通常可综合考虑两种方式对中心节点的通信压力 and 第 (1) 种方法给中心节点带来的额外计算压力, 选用合适的方法.

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^T(t) \\ \varphi_2^T(t) \\ \vdots \\ \varphi_n^T(t) \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} \delta_1(t) \\ \delta_2(t) \\ \vdots \\ \delta_n(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

上式可写做 $Y(t) = \Phi^T(t)\theta + \Delta(t)$, 其中 $Y(t) \in \mathbb{R}^{nq \times 1}$, $\Phi^T(t) \in \mathbb{R}^{nq \times p}$, $\Delta(t) \in \mathbb{R}^{nq \times 1}$, 然后采用递推最小二乘法进行求解:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)(Y(t) - \Phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \\ L(t) = P(t-1)\Phi(t)(E_{nq} + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t))^{-1} \\ P(t) = (E - L(t)\Phi^T(t))P(t-1) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $L(t) \in \mathbb{R}^{p \times nq}$ 为增益矩阵, $P(t) \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为协方差矩阵, E_{nq} 为 nq 阶单位矩阵.

然而, 对于空间细胞机器人而言, 采用式 (13) 所示的递推最小二乘法存在如下问题:

(1) 需要中心节点: 需要某个细胞作为中心节点, 接收所有测量细胞的数据并进行辨识计算, 对中心节点可靠性要求较高;

(2) 通信压力过大: 各测量细胞需要将测量信息或输出向量及回归信息矩阵传输到中心节点, 数据量过大, 且随着测量细胞的增多, 中心节点的通信压力急剧增加;

(3) 计算量过大: 式 (13) 中 $L(t)$ 的计算需要进行一次矩阵求逆运算, 综合 n 个细胞机器人的测量数据后, 式 (13) 中矩阵 $E_{nq} + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)$ 为 $nq \times nq$ 维矩阵, 随着测量细胞个数的增加, 计算量急剧增加, 可能超出单个细胞的运算能力.

产生上述问题的主要原因是递推最小二乘法是一种集中式辨识算法, 而空间细胞机器人之间通过数据接口互相联通, 集中式算法与其分布式系统结构不符.

为解决分布式参数辨识问题, Ding 提出了 C-LS^[13] 参数辨识方法, 其数据传递如图 3 所示, C-LS 只适用于环形拓扑, 同时需要依次向后一节点顺序传递估计值 $\hat{\theta}_i(t)$ 和协方差矩阵 $P_i(t)$, 数据传递顺序固定, 数据传输量大. 而 IMID 无需传递协方差矩阵.

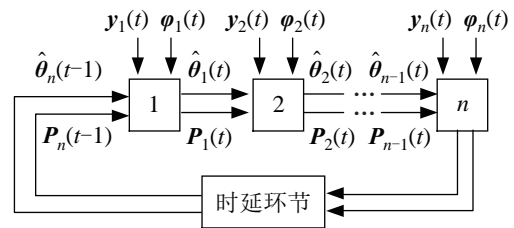


图 3 C-LS 法中的数据传递

Fig.3 Data transmission in C-LS algorithm

本文结合 C-LS 和 IMID, 提出一种适用于空间细胞机器人系统的分布式、去中心化的, 基于交互的参数辨识算法.

首先, 本文算法不依赖环形拓扑结构, 采用图论中的无向图来描述测量细胞之间的通讯链路, 图的顶点为测量细胞, 边为通信链路. 设图的邻接矩阵为 $G \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 若细胞 i ($i \in C$) 和细胞 j ($j \in C$),

$j \neq i$) 之间互联, 则 $g_{ij} = 1$, 否则 $g_{ij} = 0$; 在无向图中 $g_{ii} = 0$, $g_{ij} = g_{ji}$.

另外, 本文算法中细胞 i 与其相邻细胞之间的数据交互如图 4 所示, 细胞 i 相邻细胞集合为 $N_i = \{j | g_{ij} = 1\}$, 相邻细胞的个数即为节点 i 的度 d_i . 细胞 i 和其所所有相邻细胞 $j \in N_i$ 进行数据交换, 且仅需要传递己方参数估计值 $\hat{\theta}_i(t)$ 即可.

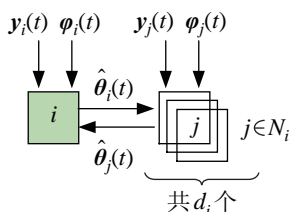


图 4 细胞 i 与其相邻细胞之间的数据交互

Fig.4 Data interaction between the cell i and cells adjacent to it

交互式参数辨识算法的具体步骤如下:

(1) 初始化参数, 对于所有细胞 $i \in C$, 设 $\hat{\theta}_i(0) = 1_{p \times 1}/p_0$, $P_i(0) = p_0 E_p$. 其中, p_0 为足够大的值, 如 $p_0 = 1 \times 10^5$, E_p 为 p 阶单位矩阵.

(2) 测量细胞 i 分别记录其在 t 时刻的测量值得到 $y_i(t)$ 和 $\phi_i^T(t)$.

(3) 细胞机器人 i 根据式 (14) 计算其估计值 $\hat{\theta}_i(t)$, 并传递给相邻细胞:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i(t) = \bar{\theta}_{ai} + L_i(t)(y_i(t) - \phi_i^T(t)\bar{\theta}_{ai}) \\ L_i(t) = P_i(t-1)\phi_i(t)(E_q + \phi_i^T(t)P_i(t-1)\phi_i(t))^{-1} \\ P_i(t) = (E - L_i(t)\phi_i^T(t))P_i(t-1) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\bar{\theta}_{ai}$ 为 i 的所有相邻细胞发送来的估计值的平均值, $L_i(t) \in \mathbb{R}^{p \times q}$ 为细胞 i 的增益矩阵, $P_i(t) \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为细胞 i 的协方差矩阵; E_q 为 q 阶单位矩阵.

(4) 达到循环终止条件则结束辨识过程, 否则, 返回步骤 (2).

式 (14) 为本文基于交互的参数辨识算法的更新公式, 与递推最小二乘法相比每个细胞在计算 $L_i(t)$ 时仅需对 $q \times q$ 维矩阵求逆, 计算量大幅减小.

另外, 式 (14) 中并未指定 $\bar{\theta}_{ai}$ 所对应的时刻, 根据相邻细胞估计值的估计时刻是否相同, 可以将细胞交互策略分为同步交互和异步交互两种情况:

(1) 同步交互: 各细胞所采用的 $\bar{\theta}_{ai}$ 均基于邻近细胞在 $t-1$ 时刻的估计值, 见式 (15), 因此需要将接收到的所有估计值缓存至 t 时刻同步更新.

$$\bar{\theta}_{ai} = \frac{1}{d_i} \sum_{j=1}^n g_{ij} \hat{\theta}_j(t-1) \quad (15)$$

(2) 异步交互: 各细胞在计算 $\bar{\theta}_{ai}$ 时不限制邻近细胞估计值的时刻, 假设估计值计算快于细胞 i 的

细胞的集合为 V_i^{fast} , 估计值计算慢于 i 的细胞的集合为 V_i^{slow} , 则邻近细胞估计值的平均值为

$$\bar{\theta}_{ai} = \frac{1}{d_i} \left(\sum_{j \in V_i^{\text{fast}}} g_{ij} \hat{\theta}_j(t) + \sum_{k \in V_i^{\text{slow}}} g_{ik} \hat{\theta}_k(t-1) \right) \quad (16)$$

交互式参数辨识算法在环形拓扑情况下可实现一致和收敛^[13]. 同时, 在强联通拓扑下, 由于可以获得所有节点的信息, 此交互式辨识算法等效为式 (13) 所示的递推最小二乘法. 根据一致性理论, 直链拓扑和环形拓扑是收敛速度较差的拓扑结构之一, 因此本文采用的一般化的拓扑结构, 介于二者之间, 辨识过程是收敛和一致的. 后文将对同步交互和异步交互情况进行分析对比. 此外, 根据式 (15) 和式 (16) 可知, 当细胞个数 $n = 1$ 时将不存在交互过程, 只能取 $\bar{\theta}_{ai} = \hat{\theta}_i(t-1)$, 此时算法退化为递推最小二乘法.

5 仿真校验 (Simulation)

本文以多个空间细胞机器人接管非合作目标为任务背景, 目标航天器惯性参数选取为典型 GEO 卫星参数, 配置测量器细胞 16 个, 参数设置如下:

1) 质量: $M = 1700 \text{ kg}$.

2) 质心位置: ${}^b r_{\text{cm}} = [-583.9 \quad 1094.2 \quad 1056.3]^T \text{ mm}$.

3) 惯性张量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$):

$${}^b I = \begin{bmatrix} 3505.1 & -124.7 & 362.3 \\ -124.7 & 3130.7 & -861.0 \\ 362.3 & -861.0 & 2264.2 \end{bmatrix}$$

4) 仿真步长: 0.1 s .

5) 仿真时间: 100 s .

6) 联通拓扑: 两两之间以 $p_L = 3/16$ 的概率联通, 随机生成测量细胞之间的联通拓扑, 如图 5 所示.

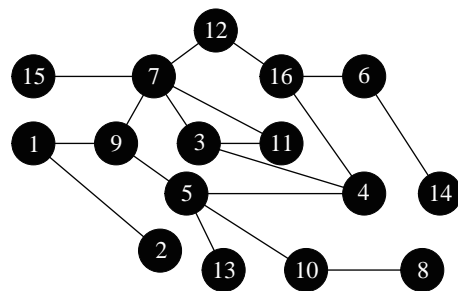


图 5 细胞空间机器人通信链路拓扑示意图

Fig.5 Schematic of the communication topology of the CSRs

7) 安装位置: 随机生成各测量细胞的安装位置相对于本体坐标系的位移, 如表 1 所示.

表 1 各测量细胞相对于本体坐标系的安装位置

Tab.1 Docking positions of the sensor cells w.r.t. the base

frame	
i	${}^b\mathbf{r}_i/\text{m}$
1	[0.0000, 0.0000, 0.0000]
2	[-0.2912, -2.0742, 0.3128]
3	[-0.2600, -2.0589, 0.3997]
4	[-0.2399, 0.4044, -2.0284]
5	[-0.1169, -2.0746, -1.7223]
6	[0.0052, -0.0090, -1.9229]
7	[1.8891, -2.0412, -1.6531]
8	[0.0200, 0.3443, -1.7435]
9	[1.9509, 0.2132, -1.7693]
10	[-0.0563, 0.0663, -1.5852]
11	[-0.2176, -0.0850, 0.2749]
12	[1.7172, -1.8939, -1.6851]
13	[0.0835, -1.6848, -1.9253]
14	[0.0241, -1.8276, -1.8067]
15	[-0.1483, 0.1426, -2.0334]
16	[1.8327, 0.2556, 0.2744]

8) 细胞交互策略: 同步交互.

9) 质量和质心位置辨识时, 合外力 \mathbf{F}_e 如图 6 所示. 惯性张量辨识时, 合外力矩 \mathbf{T}_e 如图 7 所示.

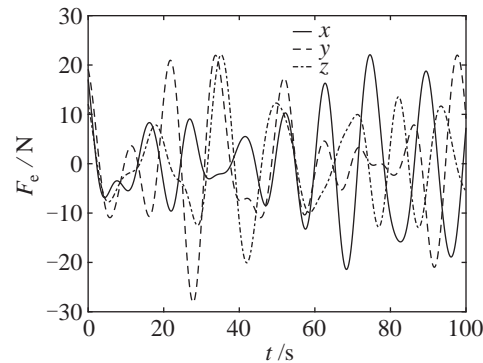


图 6 质量和质心位置辨识时系统所受外力
Fig.6 External force during mass and center-of-mass identification

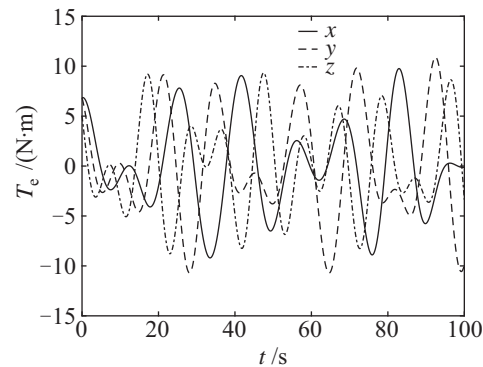


图 7 惯性张量辨识时系统所受外力矩
Fig.7 External torque during inertia tensor identification

采用交互式辨识算法分别对线性回归方程 (4) 和 (11) 进行辨识计算, 将 16 个测量细胞的最终估计结果求平均值, 得到组合航天器的质量、质心位置和惯性张量的辨识结果, 如表 2 所示. 为方便表示, 质心位置 ${}^b\mathbf{r}_{cm}$ 的坐标值分别写做 R_x 、 R_y 、 R_z . 可见辨识结果误差在 1% 以内, 辨识精度较高.

各测量细胞质量和质心位置辨识结果如图 8 所示, 惯性张量辨识结果如图 9 所示, 可见各测量细胞的辨识结果趋于一致并收敛于真值附近, 图 10 和图 11 所示为各测量细胞的估计值的标准差, 最终都趋于 0, 进一步表明各测量细胞估计值趋于一致.

表 2 参数辨识结果

Tab.2 Parameter identification results

参数	真实值	辨识结果	相对误差 /%
M/kg	1700	1699.73	0.016
R_x/m	-0.5839	-0.5835	0.080
R_y/m	1.0942	1.0930	0.107
R_z/m	1.0563	1.0548	0.145
${}^bI_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3505.1	3505.7	0.016
${}^bI_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3130.7	3129.4	0.041
${}^bI_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2264.2	2264.3	0.006
${}^bI_{yz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-861.0	-861.2	0.026
${}^bI_{xz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	362.3	361.6	0.210
${}^bI_{xy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-124.7	-124.4	0.193

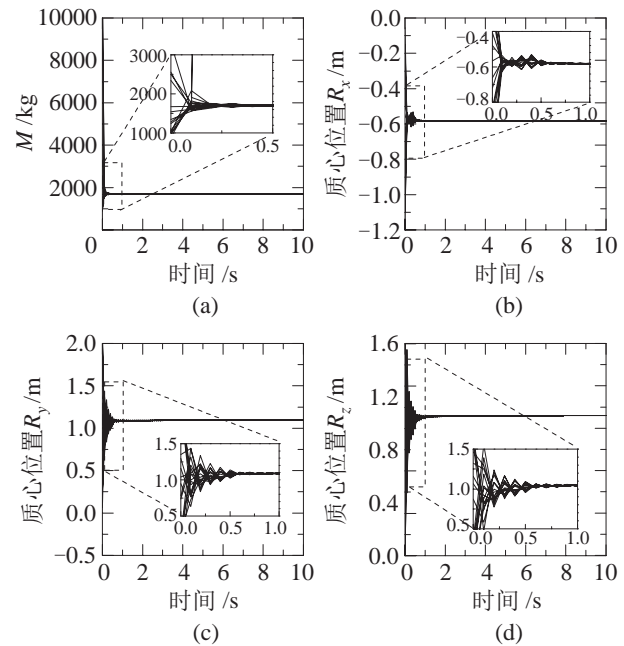


图 8 各测量细胞质量和质心位置辨识结果
Fig.8 Identification of mass and center-of-mass for the sensor cells

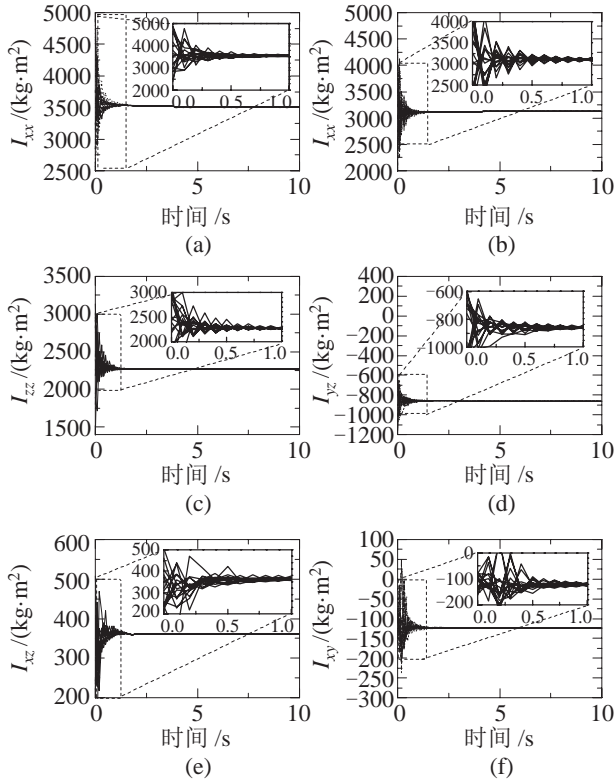


图 9 各测量细胞的惯性张量辨识结果

Fig.9 Identification of the inertia tensors for the sensor cells

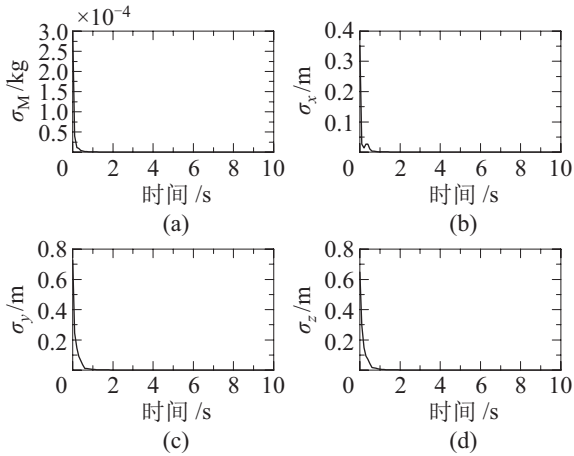


图 10 各细胞的质量和质心位置辨识标准差

Fig.10 Standard deviation of the mass and center-of-mass identification of the cells

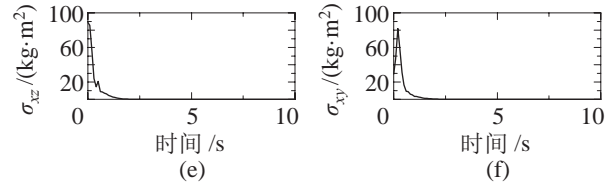
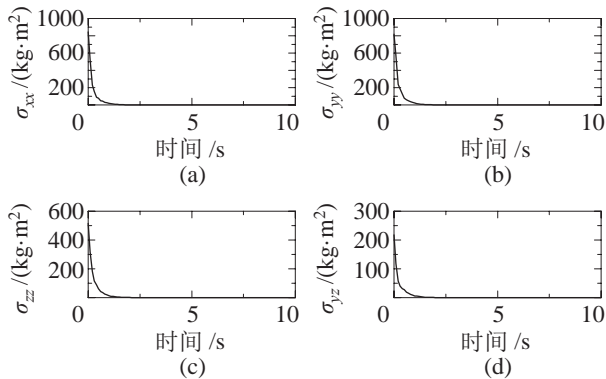


图 11 各细胞的惯性张量辨识结果的标准差

Fig.11 Standard deviation of the inertia tensor identification of the cells

6 参数影响分析 (Parameter influence analysis)

上述仿真校验验证了本文提出的交互式辨识算法的收敛性和一致性, 为分析算法特性, 下文将改变仿真参数设置, 分析测量噪声、链路断开、拓扑结构、交互策略等对辨识结果的影响. 限于篇幅, 以质量和质心位置辨识为例进行分析.

为评估上述参数对本文算法性能的影响, 选取以下两种性能指标进行分析:

(1) 各细胞估计值的平均值: $\bar{M}(t)$ 、 $\bar{R}_x(t)$ 、 $\bar{R}_y(t)$ 、 $\bar{R}_z(t)$, 对应参数为质量和质心位置分量;

(2) 各细胞估计值的标准差: $\sigma_M(t)$ 、 $\sigma_x(t)$ 、 $\sigma_y(t)$ 、 $\sigma_z(t)$, 对应参数为质量和质心位置分量.

根据平均值分析其收敛性, 根据标准差分析其一致性.

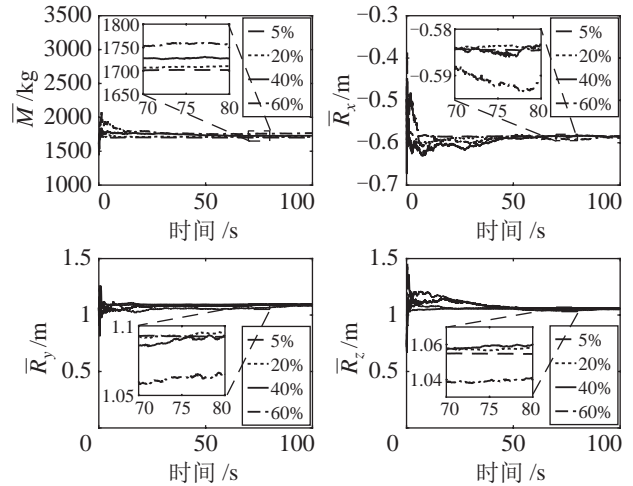


图 12 不同噪声下各细胞辨识结果的平均值

Fig.12 Mean value of the cell identification results with different noises

6.1 测量噪声

测量噪声在实际应用中不可避免, 为分析噪声对辨识结果的影响, 分别在加速度、姿态角等测量值中加入了均值为 0 的高斯噪声 $\delta \sim N(0, \sigma^2)$, 其中 σ 为高斯分布的标准差. 根据 3σ 原则, 噪声的

3σ 值可以作为衡量噪声水平的标准。以测量数据 $x(t)$ 为例, 设仿真过程中的 $|x(t)|$ 所达到的最大值为 $\lambda(x)$, 令对应测量数据 $x(t)$ 的噪声的 3σ 值分别为 $\lambda(x)$ 的 5%、20%、40%、60%。保持其他参数不变, 不同噪声下各细胞辨识结果的平均值和标准差分别如图 12 和图 13 所示。

通过图 12 可见, 本文所述的算法能够有效消除测量噪声的影响, 在较高水平的噪声影响下仍能保证辨识的收敛性; 通过图 13 可见, 随着测量噪声的增大, 各细胞辨识结果的标准差收敛速度减慢, 即辨识的一致速度减慢。

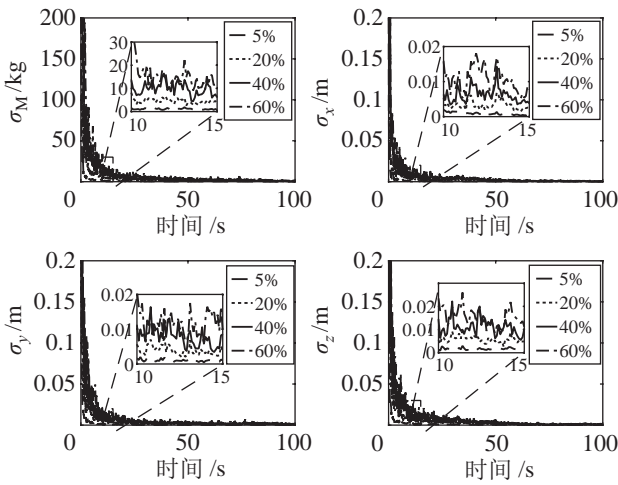


图 13 不同噪声下各细胞辨识结果的标准差

Fig.13 Standard deviation of the cell identification results with different noises

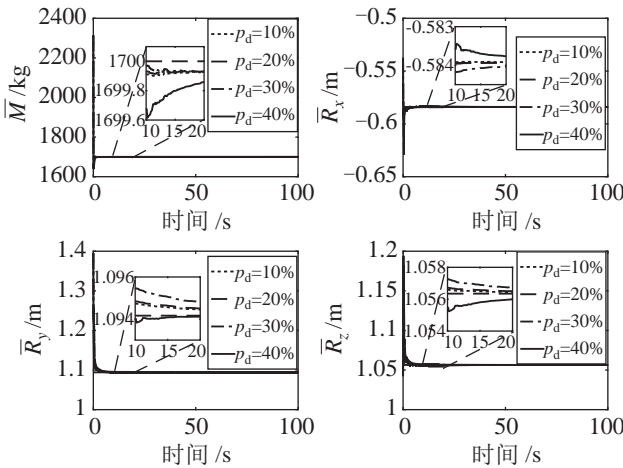


图 14 不同断路概率下各细胞辨识结果的平均值

Fig.14 Mean value of the cell identification results with different disconnection possibilities

6.2 链路断开

为分析链路断开对辨识结果的影响, 分别设置链路断开概率 $p_d = 10\%$, 20% , 40% , 80% , 其他参数

不变, 得到不同断路概率下各细胞辨识结果的平均值和标准差, 分别如图 14 和图 15 所示。

由图 14 和图 15 可见, 随着链路断开概率的升高, 由于无法获取相邻细胞的交互数据, 辨识结果的收敛速度和一致速度有所下降, 但总体影响较小, 因此本文算法不需要时刻保持拓扑联通。

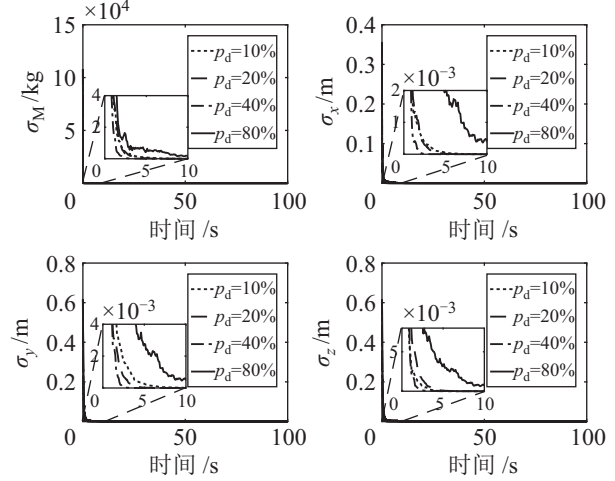


图 15 不同断路概率下各细胞辨识结果的标准差

Fig.15 Standard deviation of cell identification results with different disconnection possibilities

6.3 拓扑结构

为分析系统拓扑结构对辨识结果的影响, 分别取连接拓扑为星形拓扑、直链拓扑和强联通拓扑等, 其他参数保持不变, 各细胞辨识结果的平均值和标准差分别如图 16 和图 17 所示, 图中随机拓扑为第 5 节中所生成的拓扑, 如图 5 所示。

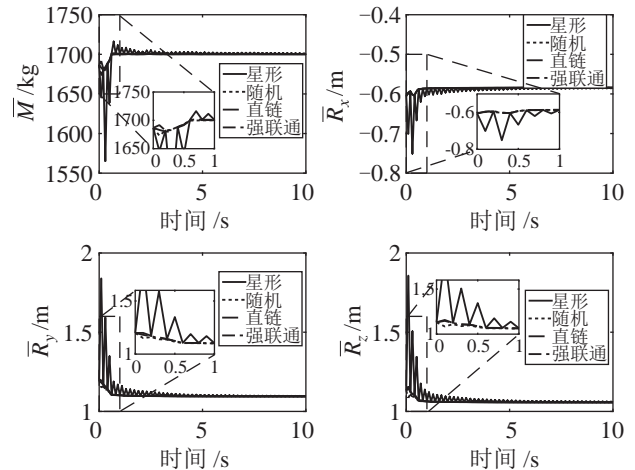


图 16 不同拓扑结构下各细胞辨识结果的平均值

Fig.16 Mean value of the cell identification results with different topologies

由图 16 可知, 在星形拓扑下, 各细胞辨识结果的平均值存在长时间震荡, 具体原因在 6.4 节分

析. 图 17 中, 不同拓扑下均可保证各细胞估计值趋于一致, 一致速度强联通拓扑最快, 直链拓扑最慢.

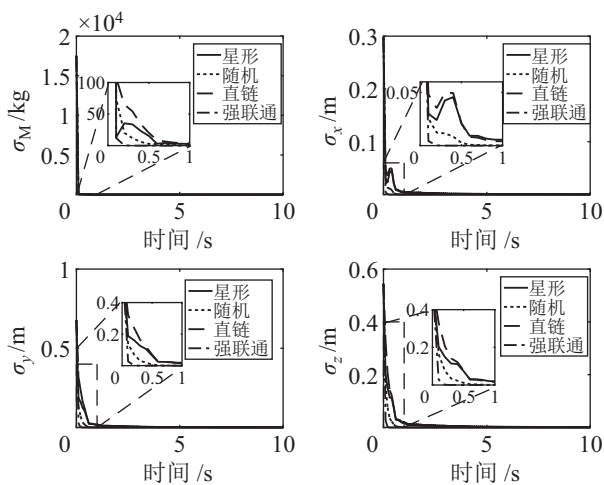


图 17 不同拓扑结构下各细胞辨识结果的标准差

Fig.17 Standard deviation of the cell identification results with different topologies

6.4 交互策略

本文提出的辨识算法可以采用两种交互策略, 同步交互见式 (15), 异步交互见式 (16).

多种拓扑下同步交互和异步交互的对比仿真表明, 异步交互由于提前引入了较新的估计值, 辨识结果能够更快地实现收敛和一致. 值得一提的是, 在星形拓扑下的仿真结果更具有典型性, 星形拓扑下采用不同交互策略的辨识结果如图 18 和图 19 所示.

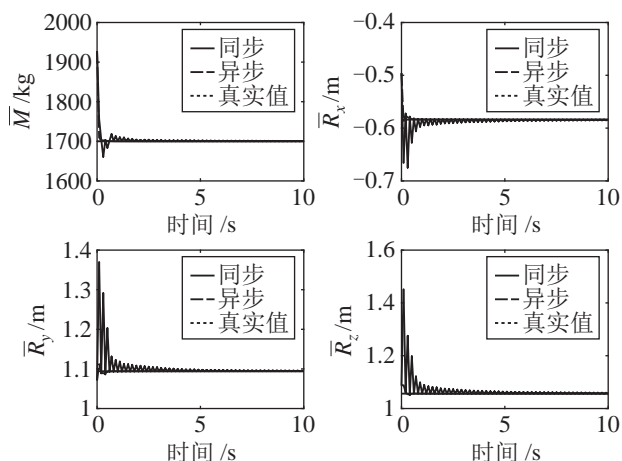


图 18 不同交互策略下各细胞辨识结果的平均值

Fig.18 Mean value of the cell identification results using different interactive strategies

由图 18 和图 19 可知, 星形拓扑下采用异步交互策略时各细胞估计值均值和标准差收敛更快, 即

收敛性和一致性更好. 与 5.3 节相比, 同样是在星形拓扑下, 采用异步交互时各细胞估计值能够更平顺地收敛到其真值附近. 可能的原因如下:

采用同步交互策略, 不妨设星形拓扑的中心节点编号为 c , 由式 (14) 和 (15) 可知, 中心节点 t 时刻的估计值 $\hat{\theta}_c(t)$ 是在所有周边节点在 $t-1$ 时刻的估计值 $\hat{\theta}_j(t-1)$ ($j \neq c$) 的均值的基础上修正而来; 而周边节点在 $t-1$ 时刻的估计值均是在中心节点 $t-2$ 时刻的估计值 $\hat{\theta}_c(t-2)$ 的基础上修正而来. 依此类推, 中心节点和周边节点两次相邻时刻所接收到数据的主要来源不同, 而每间隔一次交互, 主要信息来源一致. 而这将造成节点的辨识结果的周期震荡.

而采用异步交互, 中心节点和周边节点可以在任意时刻接收周边节点的估计值, 因此信息传递更加无序化, 避免了数据来源的周期变化.

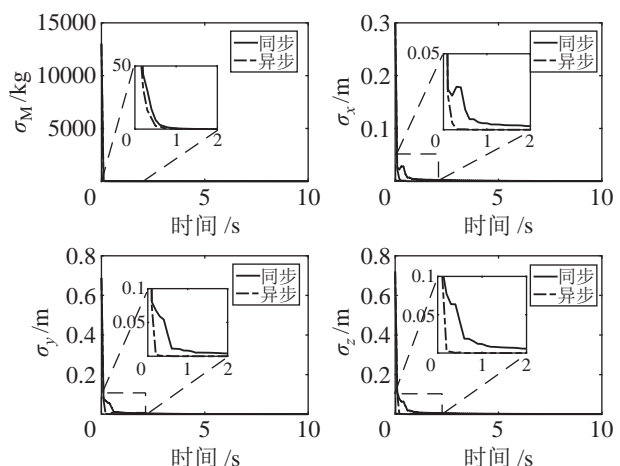


图 19 不同交互策略各细胞质量/质心位置辨识标准差

Fig.19 Standard deviation of the cell identification results using different interactive strategies

7 结论 (Conclusions)

本文提出了一种利用多个空间细胞机器人实施接管控制的方案, 建立了空间细胞机器人的动力学模型和质量、质心位置和惯性张量等惯性参数的辨识模型, 并针对多个空间细胞机器人的分布式特性, 提出了一种适用于此类系统的交互式参数辨识算法. 通过仿真校验, 验证了本文所提出的交互式参数辨识算法的收敛性和一致性, 能够实现组合航天器的质量、质心位置、惯性张量的辨识. 通过参数分析发现如下规律:

(1) 在噪声较小、异步交互、链路断开概率较低的情况下算法的收敛速度和一致速度较快, 反之收敛速度和一致速度较慢;

(2) 算法能够有效适应噪声和链路断开等情况, 在较高的测量噪声水平或链路断开概率的情况下, 仍能保证辨识结果的收敛性和一致性;

(3) 在星形拓扑下, 同步交互容易引起辨识结果的震荡, 采用异步交互可以有效消除震荡.

考虑到异步交互无需各细胞的缓冲等待, 因此实现难度更低, 综合其效果和实现难度, 采用异步交互策略更优.

参考文献 (References)

- [1] Benedict B L. Rationale for need of in-orbit servicing capabilities for GEO spacecraft[C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. Reston, USA: AIAA, 2013: 10pp.
- [2] Tanaka H, Yamamoto N, Yairi T, et al. Reconfigurable cellular satellites maintained by space robots[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2006, 18(3): 356-364.
- [3] Tanaka H, Yamamoto N, Yairi T, et al. Precise assembly by autonomous space robot using skill acquisition learning[C]//8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Paris, France: ESA, 2005: 609-616.
- [4] Jaeger T, Mirczak W. Satlets – The building blocks of future satellites – And which mold do you use?[C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. Reston, USA: AIAA, 2013: 10pp.
- [5] Barnhart D, Hill L, Turnbull M, et al. Changing satellite morphology through cellularization[C]//AIAA SPACE 2012 Conference and Exposition. Reston, USA: AIAA, 2012: 9pp.
- [6] Barnhart D, Hill L, Fowler E, et al. A market for satellite cellularization: A first look at the implementation and potential impact of satlets[C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. USA: AIAA, 2013: 11pp.
- [7] Weise J, Brieß K, Adomeit A, et al. An intelligent building blocks concept for on-orbit-satellite servicing[C]//International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Paris, France: ESA, 2012: 8pp.
- [8] Goeller M, Oberlaender J, Uhl K, et al. Modular robots for on-orbit satellite servicing[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 2018-2023.
- [9] 黄攀峰, 常海涛, 鹿振宇, 等. 面向在轨服务的可重构细胞卫星关键技术与展望 [J]. 宇航学报, 2016, 37(1): 1-10. Huang P F, Chang H T, Lu Z Y, et al. Key techniques of on-orbit service-oriented reconfigurable cellularized satellite and its prospects[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(1): 1-10.
- [10] 常海涛, 黄攀峰, 王明, 等. 空间细胞机器人接管控制的分布式控制分配研究 [J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2864-2873. Chang H T, Huang P F, Wang M, et al. Distributed control allocation for cellular space robots in takeover control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2864-2873.
- [11] 徐文福, 何勇, 王学谦, 等. 航天器质量特性参数的在轨辨识方法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1906-1914. Xu W F, He Y, Wang X Q, et al. On orbit identification of mass characteristic parameters for spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1906-1914.
- [12] 张海博, 王大轶, 魏春岭. 空间非合作目标质量特性在轨辨识 [J]. 航天控制, 2015, 33(3): 23-28. Zhang H B, Wang D Y, Wei C L. On-orbit identification of mass properties of non-cooperative space target[J]. Aerospace Control, 2015, 33(3): 23-28.
- [13] Ding F. Coupled-least-squares identification for multivariable systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2013, 7(1): 68-79.
- [14] Pakzad S N, Rocha G V, Yu B. Distributed modal identification using restricted auto regressive models[J]. International Journal of Systems Science, 2011, 42(9): 1473-1489.

作者简介:

常海涛 (1987-), 男, 博士生. 研究领域: 空间细胞机器人, 在轨操作, 航天器接管控制.

黄攀峰 (1974-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 空间机器人, 在轨服务, 空间绳系操作, 空间遥操作, 导航、制导与控制, 机器视觉等.