

面向微电机的双机器人协作工作空间分析与计算

朱苏伟,丁力平,潘国威

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为实现双机器人协同装配微电机组件的任务,需要确定双机器人协同装配工作空间。建立双机器人协同装配运动学约束关系,推导协作工作空间的定义,说明协作工作空间与双机器人布局形式的关系;采用蒙特卡洛法计算双机器人工作空间,提出一种基于空间网格划分的方法计算双机器人协作工作空间。在V-REP软件中搭建微电机自动化装配生产线虚拟仿真环境,通过编写LUA脚本计算出双机器人工作空间和协作工作空间,直观地验证了双机器人布局形式的合理性,为实际生产提供理论依据和算法支撑。

关键词:双机器人;协作工作空间;空间网格;V-REP

中图分类号:TP24 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0147-04

Analysis and Calculation of Dual-robot Cooperative Workspace for Micro-motor

ZHU Suwei, DING Liping, PAN Guowei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To realize the task of micro-motor components collaborative assembly, it is necessary to determine the cooperative workspace of dual-robots, establish the kinematic constraints of its cooperative assembly, deduce the definition of the cooperative workspace and explain the relationship between its cooperative workspace and layout, then, calculate its workspace by Monte Carlo method. So it proposes a method based on space meshing, which is used to calculate its cooperative workspace. The virtual simulation environment of micro-motor automatic assembly line is built in V-REP software. Its workspace and cooperative workspace are calculated by compiling LUA script. The rationality of the layout is verified intuitively. The theoretical basis and algorithm support are provided for the actual production.

Keywords: dual-robot; cooperative workspace; spatial grid; V-REP

0 引言

随着工业自动化的发展,机器人协同技术越来越多地出现在学术研究和工业应用领域^[1-3]。多机器人的工作空间相对单个机器人更大,并且可以利用多机器人相互协作完成单个机器人无法完成的工作,例如协同焊接、搬运、装配等,因而多机器人协作工作空间的研究是机器人协同技术的基础。

文献[4]在推导机器人运动学方程的基础上,采用蒙特卡洛法在关节运动范围内对关节值随机赋值来计算单个机器人的工作空间。文献[5-6]采用蒙特卡洛法计算双臂机器人工作空间并提取其边界,然而对于多个机器人的工作空间仅仅局限于单个机器人工作空间的叠加,并不涉及多个机器人的协作工作空间。文献[7]提出了一种基于蒙特卡洛法和网格划分法的协作工作空间求解方法。由于仅仅依赖网格划分,得到的协作工作空间跟网格划分精度密切相关,网格划分太密不利于计算效率,太疏会导致结果精度差。因而需要提出一种切实高效且精度高的多机器人协作工作空间计算方法。

本文针对某微电机自动化装配生产线上的双机器人

协同装配系统,探讨双机器人协作工作空间,提出利用空间网格划分方法求解双机器人协作工作空间的数值计算方法,并通过二次开发进行了实例验证,在三维空间内直观地展示了双机器人协作工作空间。

1 双机器人协同装配运动约束关系

某企业的微电机自动化装配生产线采用了双机器人协同装配微电机组件,双机器人采用主-从式同步控制策略,利用工业摄像头引导机器人抓取微电机组件、对双机器人之间的位置误差进行补偿并引导双机器人协同装配,其装配流程如图1所示。

对于主-从式双机器人协同装配系统,定义其坐标系如图2所示。 ${}^0\mathbf{F}$ 表示参考坐标系; ${}^{bm}\mathbf{F}$ 、 ${}^{bs}\mathbf{F}$ 分别表示主-从机器人基坐标系; ${}^{tm}\mathbf{F}$ 、 ${}^{ts}\mathbf{F}$ 分别表示主-从机器人工具坐标系。 ${}^{bm}\mathbf{H}_{bs}$ 表示从机器人基坐标系相对主机器人基坐标系的齐次变换矩阵; ${}^{bm}\mathbf{H}_{tm}$ 、 ${}^{bs}\mathbf{H}_{ts}$ 分别表示主-从机器人工具坐标系相对其基坐标系的齐次变换矩阵; ${}^{tm}\mathbf{H}_{ts}$ 表示从机器人工具坐标系相对主机器人工具坐标系的齐次变换矩阵。

选取 ${}^0\mathbf{F}$ 与 ${}^{bm}\mathbf{F}$ 重合, ${}^{bm}\mathbf{H}_{bs}$ 由双机器人基坐标系标定确定^[8],则:

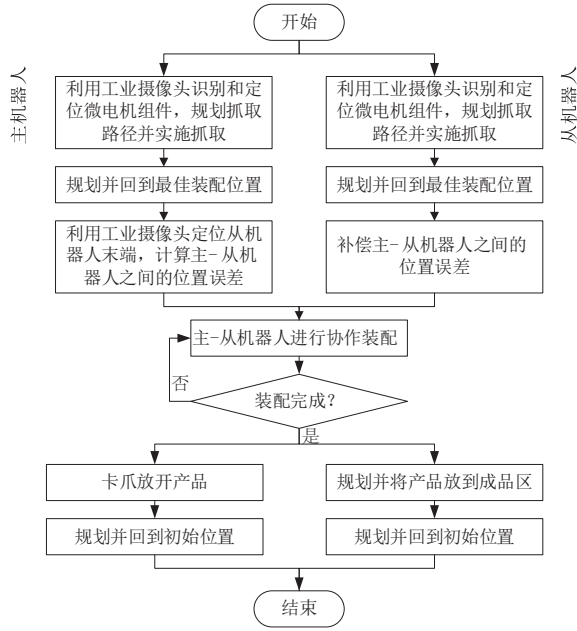


图1 双机器人协同装配微电机组件的流程图

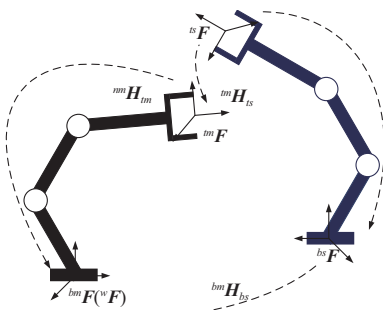


图2 双机器人协同装配系统坐标系定义

$${}^w F = {}^{bm} F = {}^{bm} H_{bs} \cdot {}^{bs} F \quad (1)$$

${}^{bm} H_{bs}$ 可表示为:

$${}^{bm} H_{bs} = \begin{bmatrix} {}^{bm} R_{bs} & {}^{bm} T_{bs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 ${}^{bm} R_{bs}$ 、 ${}^{bm} T_{bs}$ 分别是主-从机器人基坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵。

主-从机器人工具坐标系相对于其基坐标系的齐次变换矩阵可分别描述为^[9]:

$${}^{bm} H_{tm} = {}^0 T_1^m \dots {}^{n_1-1} T_{n_1}^m \quad {}^{n_1} T_{tcp}^m = \begin{bmatrix} R_m(\theta_m) & T_m(\theta_m) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^{bs} H_{ts} = {}^0 T_1^s \dots {}^{n_2-1} T_{n_2}^s \quad {}^{n_2} T_{tcp}^s = \begin{bmatrix} R_s(\theta_s) & T_s(\theta_s) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:设主-从机器人分别有 n_1 、 n_2 个关节, ${}^{i-1} T_i^m$ 、 ${}^{j-1} T_j^s$ 分别表示主-从机器人第 i 个、第 j 个连杆的齐次变换矩阵, $i=1,2,\dots,n_1,j=1,2,\dots,n_2$; ${}^{n_1} T_{tcp}^m$ 、 ${}^{n_2} T_{tcp}^s$ 分别表示主-从机器人末端到工具的齐次变换矩阵。 θ_m 、 θ_s 分别表示主-从机器人的关节变量; $R_m(\theta_m)$ 、 $R_s(\theta_s)$ 分别表示主-从机器人工具坐标系在其基坐标系下的旋转矩阵; $T_m(\theta_m)$ 、 $T_s(\theta_s)$ 表示主-从机器人工具坐标系在其基坐标系下的平移矩

阵。

双机器人协同装配属于松协调操作,主机器人夹持机壳组件固定不动,从机器人夹持绕线组件在机壳组件上进行装配操作。运动过程中,主-从机器人抓手与微电机组件之间没有相对运动,双机器人协同装配系统形成闭合的运动链,如图3所示。

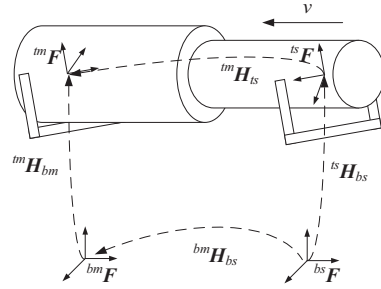


图3 双机器人协同装配运动关系示意图

双机器人之间的完全位姿约束为^[10]:

$${}^{bm} H_{bs} \cdot {}^{bs} H_{ts}(t) = {}^{bm} H_{tm}(t) \cdot {}^{tm} H_{ts}(t) \quad (5)$$

根据主-从机器人定义,主机器人轨迹已知,即 ${}^{bm} H_{tm}(t)$ 已知; ${}^{bm} H_{bs}$ 由双机器人基坐标系标定可知;在实际应用中,由于装配的工件、工序和工艺不同,故从机器人末端工具坐标系相对于主机器人末端工具坐标系的齐次变换矩阵 ${}^{tm} H_{ts}(t)$ 不同。当确定好 ${}^{tm} H_{ts}(t)$ 后,可由主机器人轨迹 ${}^{bm} H_{tm}(t)$ 确定从机器人轨迹 ${}^{bs} H_{ts}(t)$ 。

2 协作工作空间定义及数值计算方法

2.1 双机器人协作工作空间定义

主-从机器人工具坐标系的位置向量与其关节变量存在一一对应的函数关系,可以表示为:

$$T_m(\theta_m) = [f_x(\theta_m), f_y(\theta_m), f_z(\theta_m)]^T \quad (6)$$

$$T_s(\theta_s) = [g_x(\theta_s), g_y(\theta_s), g_z(\theta_s)]^T \quad (7)$$

在参考坐标系 ${}^w F$ 下,主机器人工作空间为:

$$W_m = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} x = f_x(\theta_m) \\ y = f_y(\theta_m) \\ z = f_z(\theta_m) \end{array} \right. \right\} \quad (8)$$

在其基坐标系 ${}^{bs} F$ 下,从机器人工作空间为:

$$W_s = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} x = g_x(\theta_s) \\ y = g_y(\theta_s) \\ z = g_z(\theta_s) \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

通过坐标变换,可将从机器人工作空间转化到参考坐标系 ${}^w F$ 下:

$$W_s^w = {}^{bm} R_{bs} \cdot W_s + {}^{bm} T_{bs} \quad (10)$$

双机器人工作空间是两个机器人工具中心点(tool center point, TCP)在三维空间中所能到达的所有区域,可表示为^[11]:

$$W = W_m \cup W_s^w = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} x = x_m \text{ or } x_s \\ y = y_m \text{ or } y_s \\ z = z_m \text{ or } z_s \end{array} \right. \right\} \quad (11)$$

其中: $(x_m, y_m, z_m) \in W_m; (x_s, y_s, z_s) \in W_s^w$ 。

双机器人协作工作空间是两个机器人工作空间的一部分,为双机器人 TCP 点在空间中所能达到的共同区域,可表示为:

$$W_c = W_m \cap W_s^w = \left\{ (x, y, z) \left| \begin{array}{l} x = x_m = x_s \\ y = y_m = y_s \\ z = z_m = z_s \end{array} \right. \right\} \quad (12)$$

其中: $(x_m, y_m, z_m) \in W_m; (x_s, y_s, z_s) \in W_s^w$ 。

2.2 基于空间网格划分的协作工作空间计算方法

一般采用蒙特卡洛法计算双机器人工作空间,需在主-从机器人的关节空间内随机产生大量的关节空间点,并一一映射至工作空间内,在参考坐标系下绘制出主-从机器人的工作空间即为双机器人工作空间,其流程如图 4 所示。

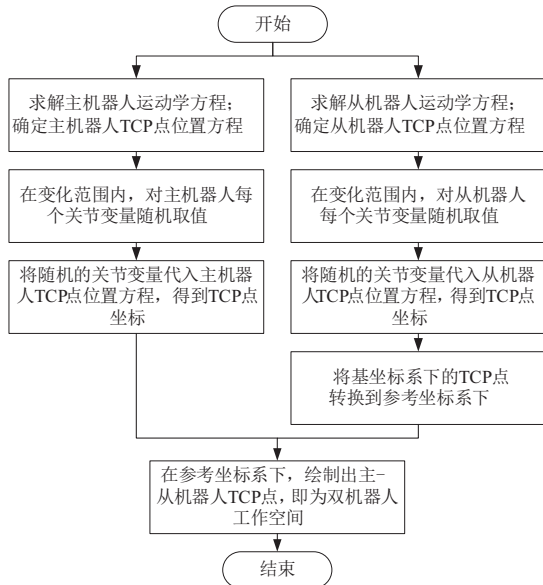


图 4 采用蒙特卡洛法计算双机器人工作空间的流程图

下面提出一种基于空间网格划分的方法用于计算双机器人协作工作空间,详细步骤如下:

1) 构建 AABB 包围盒并划分空间网格。求出双机器人工作空间在 x, y, z 方向的最小值为 $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$, 最大值为 $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$; 在 x, y, z 方向上构建主-从机器人工作空间的 AABB 包围盒,并将其均匀划分为 m, n, p 段,则划分后每段的宽度为:

$$\begin{cases} x_m = (x_{\max} - x_{\min}) / m \\ y_n = (y_{\max} - y_{\min}) / n \\ z_p = (z_{\max} - z_{\min}) / p \end{cases} \quad (13)$$

对 AABB 包围盒按 x_m, y_n, z_p 的间距进行分割,对划分的空间网格按照 x, y, z 方向从小到大依次编号为 $1-m, 1-n, 1-p$ 。构建的 AABB 包围盒和划分空间网格的结果如图 5 所示。

2) 计算 TCP 点属于的空间网格编号。遍历每个主-从机器人的 TCP 点,假设为 $P(x, y, z)$,则其属于的空间网

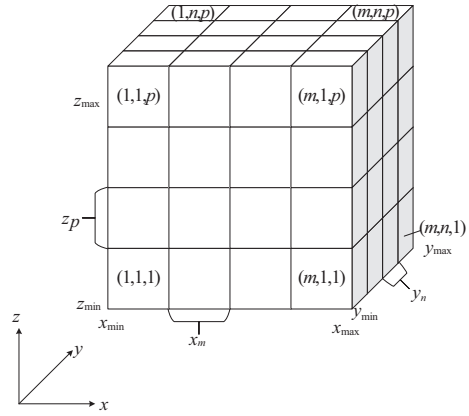


图 5 对 AABB 包围盒划分空间网格

格编号为:

$$\left(\left[\frac{x - x_{\min} + x_m}{x_m} \right], \left[\frac{y - y_{\min} + y_n}{y_n} \right], \left[\frac{z - z_{\min} + z_p}{z_p} \right] \right) \quad (14)$$

3) 定义空间网格类型。对每个空间网格遍历主-从机器人 TCP 点,找到属于该空间网格的主-从机器人 TCP 点,如果空间网格既不包含主机器人 TCP 点又不包含从机器人 TCP 点,则将其标记为非工作空间网格,如图 6(a) 所示;如果空间网格仅包含主机器人 TCP 点或从机器人 TCP 点,则将其标记为单工作空间网格,如图 6(b) 所示;如果空间网格既包含主机器人 TCP 点又包含从机器人 TCP 点,则将其标记为协作工作空间网格,如图 6(c) 所示。

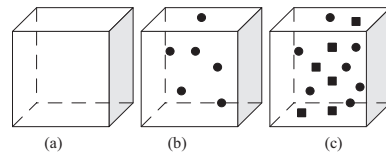


图 6 定义空间网格类型

4) 选取合适的协作工作空间点。对于上述的协作工作空间网格,对每个主机器人 TCP 点 $p_m = [x_m, y_m, z_m]^T$, 计算其到每个从机器人 TCP 点 $p_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ 的距离,选取合适的允许值 ε , 如果有:

$$|p_m - p_s| = \sqrt{(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2} \leq \varepsilon \quad (15)$$

则将线性插补点:

$$p = \frac{p_m + p_s}{2} = \left[\frac{x_m + x_s}{2}, \frac{y_m + y_s}{2}, \frac{z_m + z_s}{2} \right]^T \quad (16)$$

作为协作工作空间点并存储。

5) 绘制协作工作空间。在参考坐标系下,将得到的协作工作空间点绘制出来即为双机器人协作工作空间。

3 双机器人协作工作空间计算实例

3.1 ABB IRB 140 机器人运动学方程

本文采用的主-从机器人均是 ABB IRB 140,其是一款小型六轴多用途工业机器人,有效载荷 6 kg,工作范围为 0.81 m。

对 ABB IRB 140 机器人各关节依次标记为 1-6,各连杆依次标记为 0-6,采用 $D-H$ 参数法^[12],在各连杆处固定坐标系,得到的 $D-H$ 参数如表 1 所示。

表 1 ABB IRB140 机器人的 $D-H$ 参数表

关节 i	θ_i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	关节转动范围/ $(^{\circ})$
1	θ_1	0	0	$d_1=352$	-180~180
2	θ_2	-90	$a_1=70$	0	-90~110
3	θ_3	0	$a_2=360$	0	-230~50
4	θ_4	-90	0	$d_4=380$	-165~165
5	θ_5	90	0	0	-120~120
6	θ_6	-90	0	0	-163~163

将 $D-H$ 参数代入式(3)和式(4),得到主-从机器人 TCP 点的位置方程为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(a_1+a_2c_2-d_4s_{23}) - [c_1(c_{23}c_4s_5+s_{23}c_5)+s_1s_4s_5]d_6 \\ s_1(a_1+a_2c_2-d_4s_{23}) - [s_1(c_{23}c_4s_5+s_{23}c_5)-c_1s_4s_5]d_6 \\ d_1-a_2s_2-d_4c_{23}+(s_{23}c_4s_5-c_{23}c_5)d_6 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: c_i 表示 $\cos\theta_i$; s_i 表示 $\sin\theta_i$; c_{23} 表示 $\cos(\theta_2+\theta_3)$; s_{23} 表示 $\sin(\theta_2+\theta_3)$; $d_6=65\text{mm}$,表示末端工具的结构参数。

3.2 微电机自动化装配生产线虚拟仿真环境建立

V-REP(virtual robot experiment platform)是一款通用的动力学系统仿真平台,提供关节、轨迹、三角网格、光源、坐标系、传感器等场景对象的建模和仿真功能,提供正逆运动学、轨迹规划、动力学、碰撞检测、最小距离计算等模块^[13]。

针对微电机自动化装配生产线,利用 V-REP 软件对 ABB IRB 140 机器人、工件、设备、传感器和环境进行建模。对于工件、设备、传感器等只需导入在 Solidworks 中建立的三维模型;对于机器人和传送带等还需要定义关节和关节的动力学参数,使其具备与真实机器人相同的运动学和动力学的特性。得到的微电机自动化装配生产线虚拟仿真环境如图 7 所示。

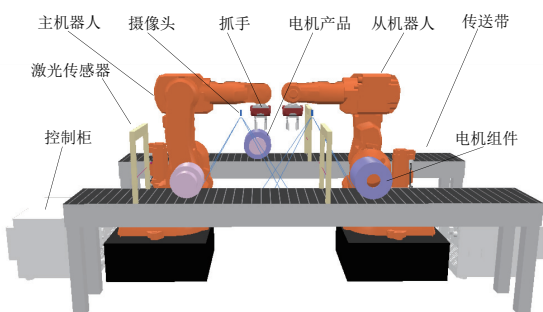


图 7 微电机自动化装配生产线虚拟仿真环境

3.3 双机器人协作工作空间计算结果

利用 3.2 节建立的虚拟仿真环境采用蒙特卡洛方法,通过编写 LUA 脚本,实现了在三维空间内获得双机器人

工作空间的功能,如图 8 所示。

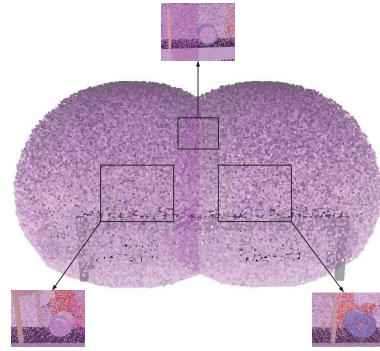


图 8 双机器人工作空间计算结果

由图 8 可以看到两条传送带均在双机器人工作空间内,两组微电机工件在双机器人工作空间内,装配完成的产品也在双机器人工作空间内,且双机器人有合适的协作工作空间,故说明双机器人的布局形式是可行的。

采用 2.2 节基于空间网格划分的协作工作空间计算方法,通过编写 LUA 脚本求出双机器人协作工作空间如图 9 所示。在该布局形式下,双机器人协作工作空间呈“纺锤形”,协作工作空间合理且适合后续的协同装配任务。

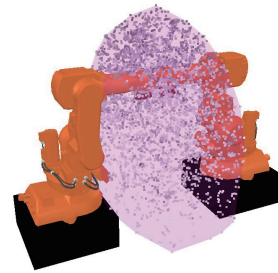


图 9 双机器人协作工作空间计算结果

4 结语

采用基于空间网格划分的方法更加有效和准确地求解出双机器人协作工作空间。在 V-REP 软件中可以实现对实际微电机自动化装配生产线的虚拟仿真。在虚拟仿真环境中直观地验证了双机器人工作空间和协作工作空间的合理性,从而证实了布局形式的可行性与合理性,为后续双机器人协同研究和生产线工程化提供理论和算法支撑。

参考文献:

- [1] 冯华山,秦现生,王润孝. 航空航天制造领域工业机器人发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 439(19):32-37.
- [2] GAN Y, DAI X, LI J. Cooperative path planning and constraints analysis for master-slave constraints analysis for master-slave industrial robots [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 88(9):1-13.
- [3] ROOKS B. ABB's multiMove fires the imagination[J]. Industrial Robot, 2004, 31(5):401-404.

(下转第 166 页)

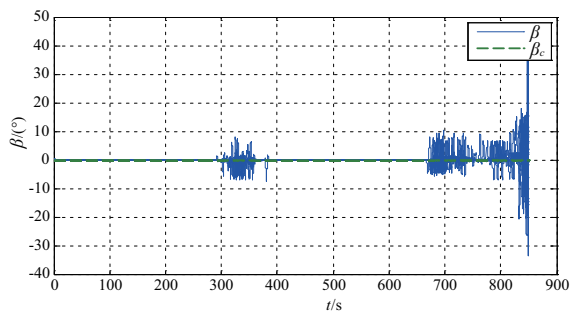
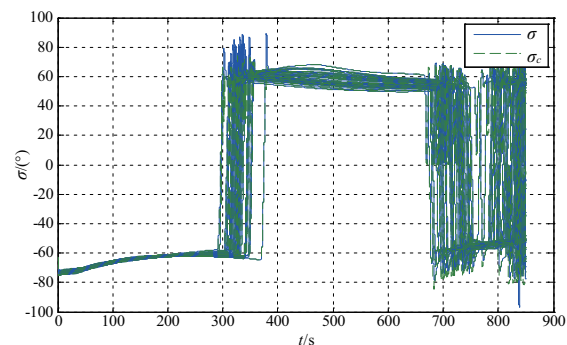
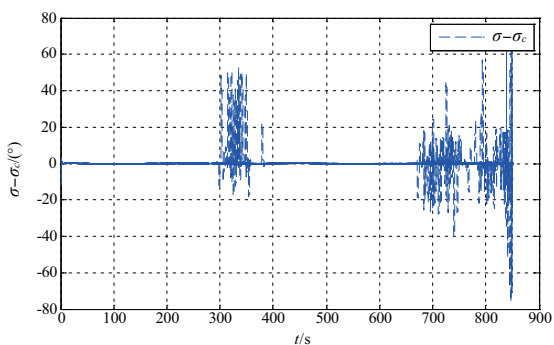


图5 侧滑角控制效果图



(a) 倾侧角跟踪图



(b) 倾侧角跟踪误差图

图6 倾侧角控制效果图

3 结语

本文针对 RLV 提出了一种通用的六自由度再入制导控制律设计方法,采用预测校正制导方法生成再入标称轨迹,并设计高阶滑模轨迹跟踪制导律以及侧向制导逻辑,结合带干扰观测器的 Backstepping 姿态控制系统,实现了 HORUS 飞行器的六自由度制导与控制。通过在扰动情况下的蒙特卡洛仿真,验证了本文设计的制导控制架构的有效性和鲁棒性。仿真显示该方法在不同的参数扰动下,表现出了良好的轨迹跟踪性能和姿态控制效果。

参考文献:

- [1] SCHIERMAN J D, WARD D G, HULL J R, et al. Integrated adaptive guidance and control for re-entry vehicles with flight-test results [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2004, 27(6):975-988.
- [2] PHILIPS T H. A common aero vehicle (CAV) model, description, and employment guide[M]. Schafer Corporation for AFRL and AFSPC, 2003: 1-27.
- [3] PARKER J T, SERRANI A, YURKOVICH S, et al. Control-oriented modeling of an air-breathing hypersonic vehicle [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2007, 30(3):856-869.
- [4] MOOIJ E. The Horus-2B reference vehicle[M]. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Memorandum M-692, 1995.
- [5] BERGSMAN M C W, MOOIJ E. Application of Taylor series integration to reentry problems [C]. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 2016.
- [6] SAGLINAL M, MOOIJ E, THEIL S T. Adaptive disturbance based high-order sliding mode control for hypersonic entry vehicles [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*. 2017, 40(3):521-535.
- [7] 沈作军, 朱国栋. 基于轨迹线性化控制的再入轨迹跟踪制导 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(11):1975-1982.

收稿日期:2019-03-04

(上接第 150 页)

- [4] 沙漠, 邓子龙. 基于 Matlab 对于 PUMA560 机器人的运动空间分析研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2016, 45(2): 156-159, 183.
- [5] KANG S, WU H, YAO L, et al. Coordinated workspace analysis and trajectory planning of redundant dual-arm robot [C]// *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. IEEE, 2016:178-183.
- [6] 周律, 周昱明, 汪亮, 等. 基于蒙特卡罗方法的双臂机器人工作空间分析 [J]. *机械传动*, 2014(6):85-87.
- [7] 田海波, 尚万峰, 马宏伟. 双臂移动机器人机械臂的协调工作空间分析 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(6):20-23.
- [8] GAN Y, DAI X. Base frame calibration for coordinated industrial robots [J]. *Robotics and Autonomous systems*, 2011, 59(7): 563-570.

- [9] 芦俊, 席文明, 颜景平. 双臂机器人轴孔装配的运动学关系分析 [J]. *机械设计*, 2001, 18(11):16-18.
- [10] 张曦. 多机器人协作焊接系统的算法研究与仿真实现 [D]. 南京:东南大学, 2015.
- [11] 芦俊, 池宏勋, 席文明, 等. 双臂机器人的协作工作空间数值计算方法 [J]. *中国机械工程*, 2001, 12(S1):125-127.
- [12] CRAIG J J. *Introduction to robotics: mechanics and control* [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [13] FREESE M, SINGH S, OZAKI F, et al. Virtual robot experimentation platform V-REP: a versatile 3D robot simulator [C]// *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*. Springer-Verlag, 2010: 51-62.

收稿日期:2019-02-09