

FROG-LEG 型机械手的模型预测控制研究

程 晟¹, 黄梁松², 李玉霞²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:研究了 FROG-LEG 型机械手的轨迹跟踪控制问题, 提出将基于动力学的预测控制应用于机械手的位置控制, 并利用当前时刻控制误差补偿下一周期的控制量。在分析 FROG-LEG 型机械手结构的基础上, 首先建立了机械手的等效串联结构运动学模型, 然后建立了水平和垂直方向解耦的动力学模型, 在此基础上对并联机械手进行了基于预测控制的轨迹跟踪研究。仿真实验表明: 该预测控制方案可以使得机械手有效地跟踪路径规划器给出的轨迹; 关键关节的控制效果可以通过加大其权重得到提高; 模型校正可以大大降低控制误差。

关键词:机械手; 模型预测控制; 运动学; 动力学

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)01-0104-07

Model Predictive Control of FROG-LEG Manipulator

Cheng Sheng¹, Huang Liangsong², Li Yuxia²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In this paper, track control of FROG-LEG parallel manipulator based on model predictive control was studied, and a method was proposed that the present moment control error could compensate the next cycle reference value. The structure of the FROG-LEG vacuum parallel manipulator was analyzed; its equivalent series structure kinematics model was obtained, and a dynamic model of the vacuum manipulator in level and vertical direction was established respectively. Then the manipulator control using model predictive control based on dynamic models was studied. The simulation results show that this model predictive control algorithm can effectively follow the track provided by the path controller; the control effect of key joint can be improved by enlarging its weight and model calibration can reduce the position tracking error prominently.

Key words: manipulator; model predictive control; kinematics; dynamics

硅片传输机械手是 IC(integrated circuit, 集成电路)装备的核心技术之一, 在硅片加工过程中承担着定位和传输两项关键任务, 其性能的优劣直接影响硅片的生产效率和制造质量, 体现着整个加工系统的自动化程度和可靠性。硅片传输机械手多采用直驱电机作为动力来源, 直驱方式与传统的驱动方式相比, 具有位置控制与速度控制精度高、动态响应能力强、机械耦合刚度高、低噪声和零保养等优点^[1-3]。但同时也产生了一些新问题^[4]: 一方面, 由于直驱型机械手较特殊的轴系和手臂结构设计, 以及采用了刚度较差的末端托持器和连接连杆的钢带等, 造成了机械手的机械谐振频率偏低, 机械手在运行过程中手臂极易发生抖动现象; 另一方面, 各种干扰不经过任何中间环节的衰减而直接作用到电机上, 使得电机对外界的扰动, 如转动惯量、电

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金项目(20123718120007)

作者简介: 程 晟(1993—), 男, 北京人, 主要从事机器人控制技术和嵌入式系统方面的研究。

黄梁松(1978—), 男, 山东东营人, 博士研究生, 主要从事机器人和智能控制方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: sduhls@163.com

机参数和负载转矩的变化变得敏感,可能出现较大的控制误差甚至出现不稳定状态。

文献[5]通过对 SCARA(selective compliance assembly robot arm)型硅片搬运机械手的动力学分析提出对手臂结构进行优化的方法,从而提高工作性能;文献[6]针对 SCARA 型硅片搬运机械手提出一种时间最优加/减速曲线规划方法;文献[7]给出一种使得多关节机器人具有最小振动的轨迹控制算法;为了优化 S 型轨迹,一些学者提出非对称输入的方法^[8]。以上各种轨迹生成和跟踪控制算法没有针对 FROG-LEG 型机械手的特点进行充分考虑。在硅片搬运中对 FROG-LEG 型机械手的精度有较高要求,并且要求机械手的速度较快,它的控制是一个非线性强耦合的多变量时变系统,采用传统的 PID(proportion integral derivative)控制的动态轨迹跟踪精度往往不能满足要求。如何在直驱电机作用下准确跟踪已知轨迹是本文研究的重点,为此将 FROG-LEG 型机械手动力学解耦成水平方向和垂直方向的微分方程,然后在解耦的两个方向上对相关关节进行轨迹跟踪的预测控制。

1 FROG-LEG 型机械手分析

1.1 运动学建模

FROG-LEG 型机械手为对称双连杆形式的并联结构,包括一对大臂和两对小臂,两个直驱电机分别通过两个同轴的旋转轴连接大臂,大臂末端通过四个旋转轴连接尺寸相同的两对小臂,两对小臂的末端又分别通过两个旋转轴连接硅片托持器。为得到该类机械手的运动学模型,建立对称双连杆机械手的坐标系,如图 1 所示。

图 1 中粗实线表示两个大臂 OAC 和 OEG ,细实线表示四个小臂 AB, CD, EF 和 GH 。每个大臂均连接两个小臂, OAC 连接的小臂为 AB 和 CD , OEG 连接的小臂为 EF 和 GH ,点 B, D, F, H 与 x 轴的距离恒为 k 。当一对小臂伸出时,另一对小臂缩回并附在大臂旁边跟随其一起运动。 B_x 表示机械手硅片托持器 x 轴方向移动的位移,根据机械手水平连杆结构的几何关系可得:

$$\begin{cases} B_x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ k = l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ \alpha = \theta_1 + \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: l_1 和 l_2 分别是机械手大臂连杆一侧 OA 和小臂连杆 AB 的长度; θ_1 和 θ_2 分别是这两个连杆的关节角, $c_{i\dots j} = \cos(\theta_i + \dots + \theta_j)$, $s_{i\dots j} = \sin(\theta_i + \dots + \theta_j)$ 。

$$\begin{cases} c_2 = \frac{B_x + k^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \\ s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2} \end{cases} \Rightarrow \theta_2 = \arctan(s_2/c_2) \quad (2)$$

令 $l_1 + l_2 c_2 = a, l_2 s_2 = b$, 则

$$\begin{cases} B_x = (l_1 + l_2 c_2)c_1 - (l_2 s_2)s_1 \\ k = (l_1 + l_2 c_2)s_1 - (l_2 s_2)c_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_1 = (ak - B_x b)/(a^2 + b^2) \\ c_1 = (aB_x + bk)/(a^2 + b^2) \end{cases} \Rightarrow \theta_1 = \arctan(s_1/c_1) \quad (3)$$

可以看出,支链 OCD 的关节角 θ_3 与 θ_1 相差一个固定角度 θ , 容易得:

$$\begin{cases} \theta_3 = \theta_1 + \theta \\ \theta_4 = \beta - \theta_3 \\ k = l_1 s_3 + l_2 s_\beta \end{cases} \quad (4)$$

在求得机械手末端托持器的位移与水平连杆旋转角度的关系后,将整个机械手运动结构等效为三个关节,由 D-H(Denavit-Hartenberg)方法建立基坐标系、三个关节坐标系和工具坐标系 $\{noa\}$, 运动学结构简

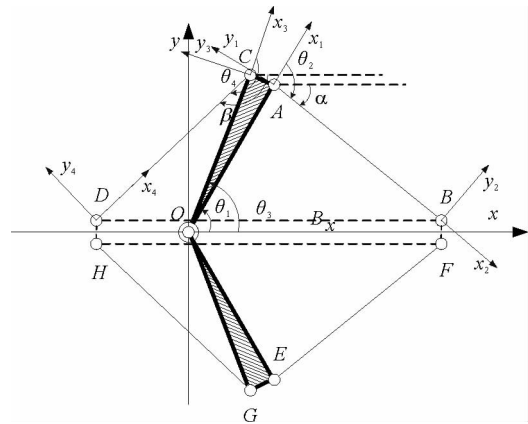


图 1 机械手坐标系定义示意图

Fig. 1 The definition of vacuum manipulator reference frame

图如图 2 所示。可以得到运动学正反解如式(5)和式(6)。

$${}^0T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_\theta & 0 & c_\theta & c_\theta B_x \\ -c_\theta & 0 & s_\theta & s_\theta B_x \\ 0 & -1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{cases} h = p_z \\ \theta = \arctan(s_\theta/c_\theta) = \arctan(a_y/a_x) \\ B_x = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, a_x p_x \geq 0 \\ B_x = -\sqrt{p_x^2 + p_y^2}, a_x p_x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

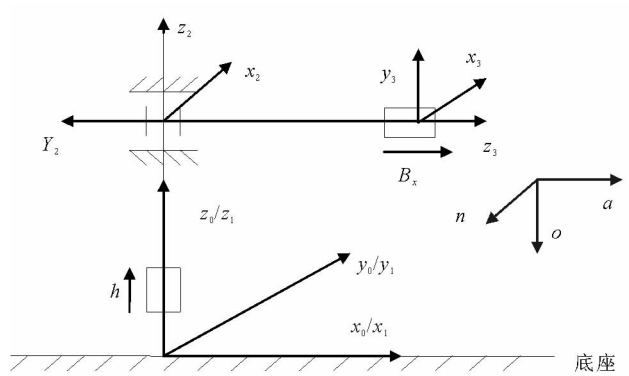


图 2 机械手运动学结构图

Fig. 2 The kinematics structure of vacuum manipulator

1.2 动力学建模

对于由 n 个单自由度关节组成的开链机械手, 由拉格朗日建模原理, 得到动力学模型为

$$D(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau. \quad (7)$$

其中: $D(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为惯量矩阵, 矩阵中的元素 d_{ii} 和 $d_{ij} (i \neq j)$ 分别为关节 i 处的有效惯量和关节 i 和关节 j 之间的耦合惯量; $V(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 表示向心力和哥氏力的作用项; $G(q) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 是重力作用项; τ 为作用于各个关节上的广义主动力。 q, \dot{q} 和 \ddot{q} 表示对应各关节的广义位置、速度和加速度。

由于 FROG-LEG 型机械手的电机驱动器系统为直接驱动, 驱动器运动方程可以近似为

$$\tau = K_U U + K_v \dot{q}. \quad (8)$$

其中, U 为驱动器的输入电压, K_U 和 K_v 为比例系数。

联立式(7)和式(8), 可以得到 FROG-LEG 型机械手关节驱动的动力学方程:

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = K_U U. \quad (9)$$

其中: $H(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q}) + G(q) - K_v \dot{q}$ 。

为了兼顾实用和准确, 将 FROG-LEG 型机械手解耦成水平方向和垂直方向的动力学模型。垂直方向的动力学模型考虑图 3 中的关节 1 和 2, 水平方向的动力学模型只考虑关节 3, 这是由于该类机械手工作时首先在垂直方向旋转和移动定位, 然后进行水平方向的硅片搬运, 这里考虑末端无硅片的动力学模型。

机械手在大臂和小臂收缩状态相对重心的转动惯量为 M , 机械手质量为 m , 垂直方向的动力学建模可以简单表示为

$$\begin{cases} \tau_1 - mg = ma \\ \tau_2 = M\dot{\theta} \end{cases} \quad (10)$$

其中: τ_1 为关节 1 处所需扭矩, a 为垂直方向加速度 (向上为正), τ_2 为关节 2 处所需扭矩, θ 为绕垂直轴的转角。

由机械手的结构可知, 将图 2 中的 O, A, B 三处的旋转关系列出, $\theta_O : \theta_A : \theta_B = 1 : -2 : 1$ 。这样水平方向的动力学问题可以等效为平面 3 转动关节操作手的动力学问题。设水平方向三段连杆质量分别为 m_1, m_2, m_3 ; 杆长为 a_1, a_2, a_3 ; 绕三关节轴的旋转惯量为 I_1, I_2, I_3 ; 质心分布于连杆正中间, 忽略耗散力, 得到水平方向的动力学公式:

$$D(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = \tau. \quad (11)$$

2 FROG-LEG 型机械手预测控制

2.1 预测模型与最优控制率

根据关节驱动的动力学方程式(9), 可以得到:

$$\ddot{q} = D^{-1}(q)[K_U U - H(q, \dot{q})]. \quad (12)$$

取 $U = K_U^{-1} [D(q)U_c + H(q, \dot{q})]$, 可以得到系统的闭环方程为 $\ddot{q} = U_c$ 。设采样周期为 T , 则可以得到离散化的方程组:

$$\begin{cases} q(k+1) = q(k) + T\dot{q}(k) + \frac{T^2}{2}U_c(k) \\ \dot{q}(k+1) = \dot{q}(k) + TU_c(k) \\ \ddot{q}(k) = U_c(k) \end{cases} \quad (13)$$

由于一个采样周期内的加速度变化较小, 可以认为 $\ddot{q}(k) = \ddot{q}(k+1)$, 即有 $\ddot{q}(k+1) = U_c(k)$ 。根据方程组(13)可以得到第 i 个关节运动关系的矩阵表示:

$$Y_i(k+1) = AY_i(k) + BU_c(k) \quad (14)$$

其中, $Y_i(k) = [q_i(k) \quad \dot{q}_i(k) \quad \ddot{q}_i(k)]$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。可以得到系数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & T & 1 \end{bmatrix}^T$$

于是, 可以得到机械手预测模型:

$$Y_m(k+j|k) = AY_m(k+j-1|k) + BU_c(k+j-1) \quad (15)$$

为了使机械手运动控制中各个关节的末端按照轨迹规划器给出的位置、速度和加速度轨迹运动, 滚动优化的指标为

$$J(k) = \min \sum_{j=1}^P \|Y_m(k+j|k) - Y_r(k+j)\|_{Q(k)}^2 \quad (16)$$

其中, $Q(k)$ 为权重矩阵, P 为预测长度, 轨迹规划器产生的期望轨迹为 $Y_r(k+j)$ 。对式(16)求控制量 U_c 的偏导, 得到在本文指标下预测控制的最优控制: $\{U_c(k), U_c(k+1), \dots, U_c(k+p-1)\}$ 。选取第一项为当前时刻的控制律, 令 $Y_m \equiv Y_m(k), Y_r \equiv Y_r(k), U_c \equiv U_c(k)$, 有

$$\begin{aligned} J(k) &= [Y_m(k) - Y_r(k)]^T Q [Y_m(k) - Y_r(k)] = [AY_m + BU_c - Y_r]^T Q [AY_m + BU_c - Y_r] = \\ &= [AY_m - Y_r]^T Q [AY_m - Y_r] + [AY_m - Y_r]^T Q B U_c + (BU_c)^T Q [AY_m - Y_r] + (BU_c)^T Q B U_c; \\ \partial J(k) / \partial U_c(k) &= 0 \Rightarrow [AY_m - Y_r]^T Q B + B^T Q [AY_m - Y_r] + 2B^T Q B U_c = 0; \\ U_c &= [B^T Q B]^{-1} B^T Q [Y_r - AY_m] \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 模型误差校正

由于建模误差和扰动的存在, 必须对以上的控制进行模型控制的校正, 设有关动力学真实参数值记做 $\hat{D}(q), \hat{H}(q, \dot{q}), \hat{K}_U$ 和 \hat{K}_v , 可以得到:

$$\begin{cases} U = \hat{K}_U^{-1} [\hat{D}(q)U_c + \hat{H}(q, \dot{q})] \\ \ddot{q} = U_c - E_m \end{cases} \quad (18)$$

其中, E_m 为模型误差。

于是可以得到包含误差模型的预测模型:

$$Y_m(k+j|k) = AY_m(k+j-1|k) + B[U_c(k+j-1) - E_m(k+j|k)]$$

同理对上式求导, 可以得到带有误差模型的最优预测控制律:

$$U'_c = [B^T Q B]^{-1} B^T Q [Y_r - AY_m - E] \quad (19)$$

其中, $E \equiv E(k+j|k) = -BE_m(k+j|k)$ 。

观察式(19), 可以得到带有误差模型的最优预测控制律, 与式(17)相比, 模型误差产生的控制量为 $[B^T Q B]^{-1} B^T Q [-E]$ 。本研究利用当前时刻的误差值, 计算当前时刻应补偿的控制量, 直接将该控制量补偿到下一控制周期中, FROG-LEG 型机械手预测控制的流程如图 3 所示。

3 机械手预测控制仿真

由于垂直方向的动力学模型较为简单, 这里重点讨论对 FROG-LEG 型机械手水平方向运动进行基于模型

的预测控制仿真。机械手的参数如下： $I_1 = 0.5, I_2 = 0.35, I_3 = 0.15$ ； $m_1 = 2, m_2 = 1, m_3 = 0.5$ ； $a_1 = a_2 = 0.6, a_3 = 0.3$ ； $g_1 = g_2 = g_3 = 0$ 。其中： $c_{i\dots j} = \cos(q_i + \dots + q_j)$ ， $s_{i\dots j} = \sin(q_i + \dots + q_j)$ ；驱动器参数 $\mathbf{K}_U = [20 \ 19 \ 21]$ ， $\mathbf{K}_v = [100 \ 190 \ 210]$ 。

机械手上位机的采样周期 $T = 20 \text{ ms}$ ，取权重矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag}[1 \ 1 \ 1]$ ，机械手期望轨迹为

$$\begin{cases} q_1 = 1.5 - 1.5e^{-10t^3} \\ q_2 = 1.3 - 1.3e^{-10t^3} \\ q_3 = 0.9 - 0.8e^{-10t^3} \end{cases} \quad (20)$$

机械手水平方向 O, A, B 处的期望轨迹曲线如图 4 所示。

利用式(16)进行机械手水平方向的预测控制，图 5 给出了关节 O 处的位置、速度和加速度的控制效果图，图中三条连续的曲线表示期望的位置、速度和加速度。同理，图 6 和图 7 给出了关节 A, B 处的位置、速度和加速度的控制效果图。

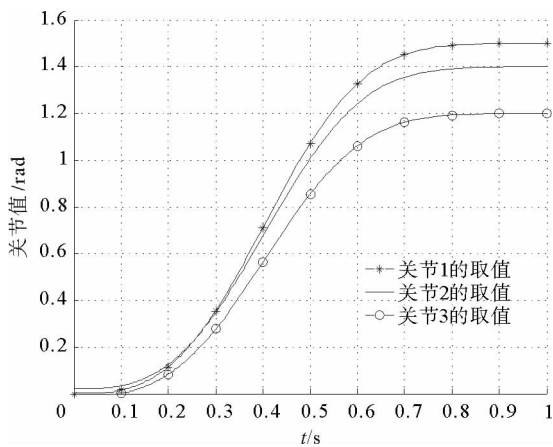


图 4 轨迹规划器给出的各关节期望路径图

Fig. 4 The expectation trajectory given by trajectory controller

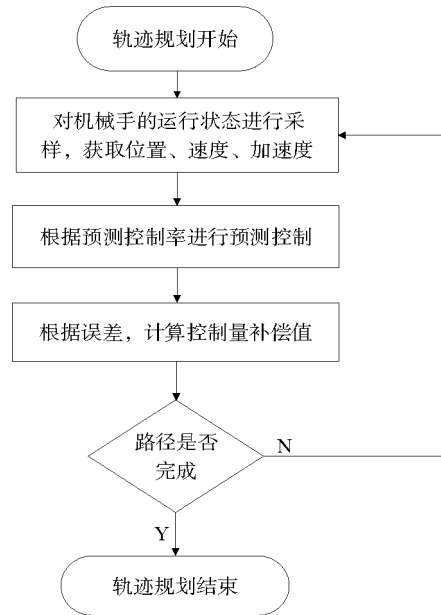


图 3 机械手模型预测控制流程图

Fig. 3 The flow chart of manipulator model predictive control

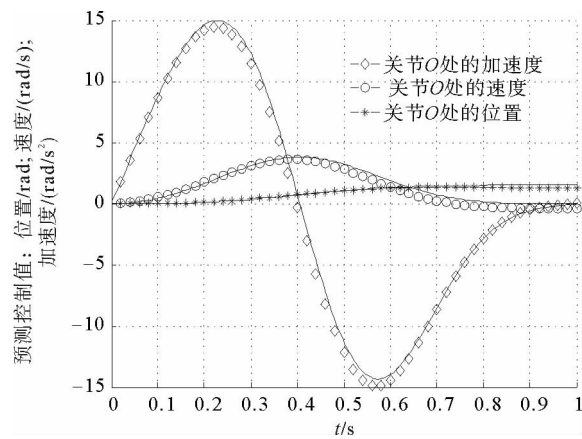


图 5 无模型校正下的关节 O 的预测控制图

Fig. 5 Model predictive control of joint O without calibration

图 8 是在不同权重下关节 O 的位置控制对比，由此可以确定权重的选取对预测控制的影响。由图 8 可知，增加 O, B 处的控制权值，可以有效减小关节 O 处的控制误差，FROG-LEG 型机械手最重要的控制是 O 处的关节，由于 B 处的关节和位置末端直接相关，可以适当增加 O, B 处的权重，并采取降低 A 处的权重来实现 O, B 处的较好控制效果。

最后，需要确定加入模型校正后对机械手控制效果的影响。图 9 是关节 O 在加入模型校正前后的位置预测控制对比，由图 9 可知加入模型校正后的控制误差明显减小。

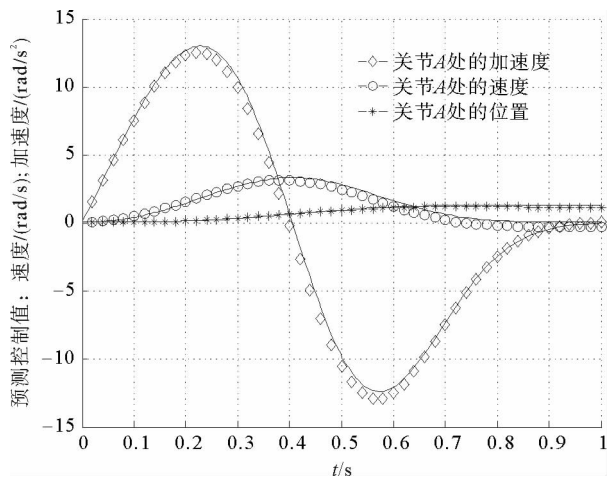


图 6 无模型校正下的关节 A 的预测控制图

Fig. 6 Model predictive control of joint A without calibration

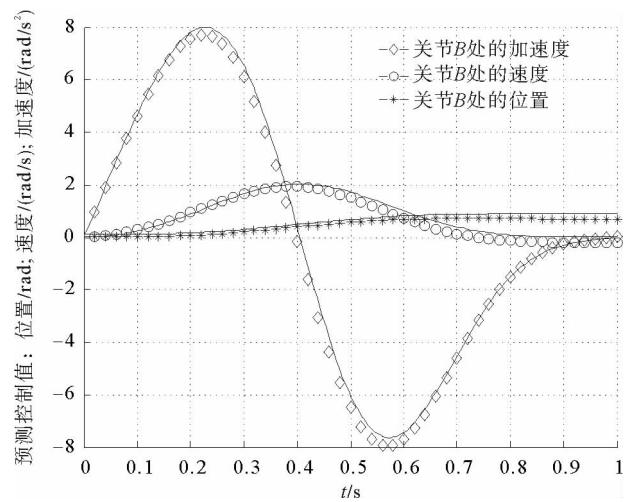


图 7 无模型校正下的关节 B 的预测控制图

Fig. 7 Model predictive control of joint B without calibration

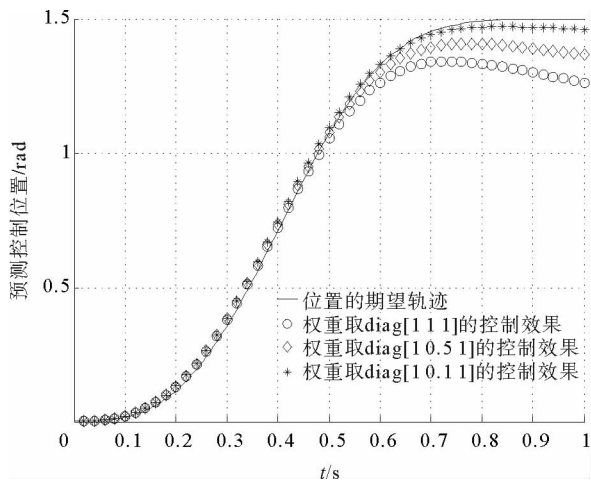


图 8 不同权重下关节 O 的位置预测控制图

Fig. 8 Position control of joint O under different weighing

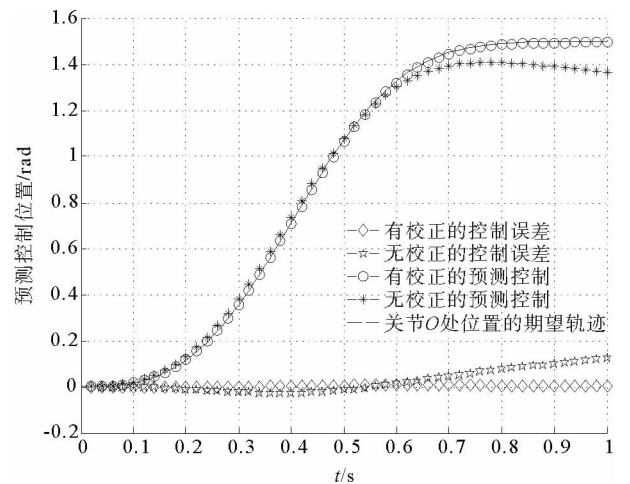


图 9 模型校正前后的预测控制对比图

Fig. 9 Compare of model predictive control before and after model calibration

4 结束语

提出运用模型预测控制解决 FROG-LEG 型机械手的精确轨迹跟踪的方案。首先,建立该类并联机械手的运动学模型,在得到水平方向运动学关系后,计算出等效串联运动学模型;然后,将 FROG-LEG 型机械手的动力学问题分解为水平和垂直方向的解耦问题,并分别建立了两个方向的动力学模型;接着,在动力学模型基础上设计了运用预测控制进行轨迹跟踪的方案;最后,对控制方案进行仿真实验,着重分析了水平方向的预测控制,阐述了权重矩阵对控制效果的影响。模型校正加入控制的优点是很好地降低了控制误差,为 FROG-LEG 型机械手的控制性能改善提供了理论依据。仿真实验结果证明了预测控制在 FROG-LEG 型机械手轨迹跟踪上的优越性。

参考文献:

- [1] Takashi K. Vacuum manipulator for semiconductor manufacturing equipment[J]. *Industrial Robot*, 2002, 29(4): 324-328.
- [2] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 315-333.
- [3] 杨庆东, 彭宝营, 张瑞乾, 等. 面向数控机床直驱电机应用测试研究[J]. *北京信息科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 28(1): 1-5.
- Yang Qingdong, Peng Baoying, Zhang Ruiqian. Application testing of direct-drive motor on CNC machine tools[J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University: Natural Science Edition*, 2013, 28(1): 1-5.
- [4] Mitsantisuk C, Ohishi K, Katsura S. Control of interaction force of twin direct-drive motor system using variable wire rope tension with multisensor integration[J]. *Industrial Electronics*, 2012, 59(1): 498-510.
- [5] 王铁军. 硅片传输机器人的动力学特性与结构优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 31-32.
- [6] 于旭. 硅片传输机器人设计及轨迹规划[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 30-40.
- [7] Qiang Y H, Jing F S, Hou Z G, et al. Residual vibration suppression using off-line learning input shaping method for a flexible joint robot[C]//10th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Beijing, July 6-8, 2012: 3858-3863.
- [8] Tsay D M, Lin C F. Asymmetrical inputs for minimizing residual response[C]//IEEE International Conference on Mechatronics. Taipei, July 10-12, 2005: 235-240.

(责任编辑: 吕文红)

(上接第32页)

- [6] 李素梅, 庞雄奇, 邱桂强, 等. 东营凹陷南斜坡特高蜡油的成因[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(4): 480-486.
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Qiu Guiqiang, et al. Origin of superhigh wax content oils in southern slope zone of Dongying Depression[J]. *Oil and Gas Geology*, 2005, 26(4): 480-486.
- [7] 宁方兴. 乐安油田地层油藏运聚过程研究[J]. *断块油气田*, 2011, 18(1): 38-42.
- Ning Fangxing. Study on hydrocarbon migration and accumulation process of stratigraphic reservoir in Lean Oilfield[J]. *Fault-block Oil and Gas Field*, 2011, 18(1): 38-42.
- [9] 陈中红, 查明. 东营凹陷烃源岩排烃的地质地球化学特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(1): 79-86.
- Chen Zhonghong, Zha Ming. Geological and geochemical characteristics of hydrocarbon-expulsion from source rocks in Dongying Depression[J]. *Geochimica*, 2005, 34(1): 79-86.
- [10] 苏朝光, 闫昭岷, 张营革, 等. 地层油藏超剥尖灭线夹角定量外推方法模型研究[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1841-1846.
- Su Chaoguang, Yan Zhaomin, Zhang Yingge, et al. The study of quantitative extrapolation model for overlap-denudation pitching-out line stratigraphic reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(6): 1841-1846.
- [11] 苏朝光, 刘怀山. 地层油气藏勘探: 以济阳拗陷为例[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2011: 45-100.

(责任编辑: 高丽华)