

4-14-2021

Compensation Sliding Cross Coupling Control Research of Cartesian Coordinate Robot

Wang Wei

Zhimei Chen

Zhenyan Wang

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Compensation Sliding Cross Coupling Control Research of Cartesian Coordinate Robot

Abstract

Abstract: For a typical Cartesian coordinate robot controls precision is low, based on a single-axis mathematical model, *a contour error model for a typical robot whose axes are orthogonal to each other is established. An improved double-power approach law is used to design a terminal sliding mode controller to improve the robot. The integral compensation terms are added to stably compensate the position accuracy of each axis to improve the overall trajectory tracking accuracy, and the cross-coupling control between the axes is used to eliminate the contour error between the axes.* It not only weakens the chattering of traditional sliding mode control, but also improves the response speed of the system and enhances the robustness of the system. The feasibility of the compensated sliding mode cross-coupling controller is verified by simulation experiments. The controller has practical application value in engineering.

Keywords

robot, sliding mode control, cross coupling, integral compensation

Recommended Citation

Wang Wei, Chen Zhimei, Wang Zhenyan. Compensation Sliding Cross Coupling Control Research of Cartesian Coordinate Robot[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 867-874.

直角坐标机器人补偿滑模交叉耦合控制研究

王伟¹, 陈志梅^{2*}, 王贞艳³

(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对典型直角坐标机器人控制精度低, 在单轴数学模型的基础上, 建立了针对各轴互为正交典型机器人的轮廓误差模型, 采用改进双幂次趋近律, 设计终端滑模控制器, 为提高机器人整体轨迹跟踪精度, 加入了积分补偿项, 对各轴的位置精度进行稳定补偿, 并在轴间采用交叉耦合控制来消除轴间的轮廓误差。既削弱了传统滑模控制的抖振, 又提高了系统的响应速度, 增强了系统的鲁棒性。通过仿真实验, 验证了补偿滑模交叉耦合控制器的可行性, 具有工程实际应用价值。

关键词: 机器人; 滑模控制; 交叉耦合; 积分补偿

中图分类号: TP242; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 04-0867-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0646

Compensation Sliding Cross Coupling Control Research of Cartesian Coordinate Robot

Wang Wei¹, Chen Zhimei^{2*}, Wang Zhenyan³

(School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For a typical Cartesian coordinate robot controls precision is low, based on a single-axis mathematical model, a contour error model for a typical robot whose axes are orthogonal to each other is established. An improved double-power approach law is used to design a terminal sliding mode controller to improve the robot. The integral compensation terms are added to stably compensate the position accuracy of each axis to improve the overall trajectory tracking accuracy, and the cross-coupling control between the axes is used to eliminate the contour error between the axes. It not only weakens the chattering of traditional sliding mode control, but also improves the response speed of the system and enhances the robustness of the system. The feasibility of the compensated sliding mode cross-coupling controller is verified by simulation experiments. The controller has practical application value in engineering.

Keywords: robot; sliding mode control; cross coupling; integral compensation

引言

机器人行业在政策和人工智能的影响下悄然兴起, 而其种类分为工业机器人和服务机器人两大类。我国市场侧重工业机器人, 它是一种集电气、控制、机械及人工智能多学科的自动化设备, 也是未来发展的方向。直角坐标机器人作为串联机器人的代表之一, 被广泛应用于数控机床、打印包装、雕刻机、码垛等场合。但是传统的 PID 控制, 在系统受到外扰和参数变化时, 满足

不了较高的性能要求^[1]。文献[1]在飞行器机械臂设计了滑模比例-积分-微分控制, 取得了不错效果, 但滑模趋近律带来的原点附近带状分布问题未得到较好解决。文献[2]针对移动机器人设计了改进 PID 轨迹跟踪控制器, 在外扰影响下, 系统不稳定, 鲁棒性弱。文献[3]在风电叶片打磨机器人上设计滑模控制器, 响应快, 抗扰强, 但所设计的趋近律, 参数较多, 太过复杂。文献[4]针对光伏板清扫机器人, 在双电机驱动中加入交叉耦合控制, 两侧控制器均采用传统 PID 控制方法, 鲁棒性显弱。提高直角坐

收稿日期: 2019-12-11 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 山西省自然科技研究基金(201901D111263, 201701D221108); 山西省研究生教育改革研究课题(2019JG173, 2019JG165)

第一作者: 王伟(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能控制、机电系统控制。E-mail: 175672977@qq.com

通讯作者: 陈志梅(1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向为鲁棒控制、机电一体化系统控制等。E-mail: zhimeichen400@163.com

标机器人整体轨迹跟踪性能方法：(1) 提高单轴跟踪精度；(2) 将整体轮廓误差作为被控对象，需两者兼备^[5]，同时还需兼顾相邻轴的控制信息^[6]。20世纪中后期，交叉耦合研究出现，文献[7]提出变增益的交叉耦合，适用性更强，但仍然存在复杂的计算。文献[8]采用了双迭代控制，不仅减小了跟踪误差同时也减小了轮廓误差，但未考虑不确定外扰。文献[9]采用了互补滑模同交叉耦合结合，同时加入了神经网络，应用于双驱电机系统中，取得了不错的效果。但针对正交三轴机器人，交叉耦合控制应用较少，以上研究多用于两轴机器人且存在复杂的正余弦计算。文献[10]提出三轴交叉耦合控制，而单轴采用比例控制，自身控制器未做抗扰设计。文献[11]实现对三轴运动平台的轮廓控制，但轮廓误差模型比较复杂，对控制器的设计造成较大困难，影响控制器的控制精度。滑模控制具有响应速度快，鲁棒性强，同时设计简单等优点，但存在抖振问题。文献[12-13]针对机械臂轨迹跟踪，前者在设计快速非奇异终端滑模(Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode, FNTSM)基础上，采用超螺旋(Super-Twisting, ST)算法有效抑制抖振；后者将线性滑模和分数阶控制结合，得到了分数阶趋近律，可以更好地柔化运动轨迹，具有优良的特性。在指数趋近律基础上，文献[14-15]设计了改进型趋近律，同样对抖振起到了很好抑制，并有望改进后在机器人上得到更好的应用。

滑模控制在直角坐标机器人中应用较少，本文针对典型三轴直角坐标机器人，研究设计补偿滑模交叉耦合控制器，利用改进的双幂次趋近律，弱化抖振，在各轴加入积分补偿项，提高各轴稳态精度，为了减小轴间轮廓误差，轴间设计三轴轮廓误差模型进行交叉耦合控制，整个系统的控制精度得到很大提高。



图1 单轴传动结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of single shaft drive structure

<http://www.china-simulation.com>

1 直角坐标机器人单轴数学模型建立

直角坐标机器人各轴机械结构相同，其构成一般由伺服电机、联轴器、滚珠丝杠、支撑轴承、直线导轨、工作台等组成，如图1所示。机器人轴向位移是以伺服电机的转子角位移通过导程转化为工作台的水平位移。单轴建立模型过程中，使用工程简化的思想，假设各部件连接满足如下条件^[16]：

(1) 滚珠丝杠与伺服电机的联轴器等效为刚性联接；

(2) 滚珠螺母质量忽略不计；

(3) 工作台位置的变化不影响其刚度的变化。电动机轴的输出转矩，将驱动机械传动装置。将整个机械传动装置的刚度、阻尼、惯量以及作用在它上面的干扰转矩，都归算到丝杠上。

可得动力学方程：

$$M_s = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + f_L \frac{d \theta_L}{dt} + M_{gr} \quad (1)$$

拉氏变换得：

$$\theta_L(s) = \frac{K_L \theta_M(s) - M_{gr}}{J_L s^2 + f_L s + K_L} \quad (2)$$

整理得：

$$G(s) = \frac{\theta_L(s)}{\theta_M(s)} = \frac{K_L}{J_L s^2 + f_L s + K_L} \quad (3)$$

那么控制对象可以写成：

$$G(s) = k / s^2 + as + b \quad (4)$$

式(4)可以变形表示为：

$$\ddot{\theta} = -a\dot{\theta} - b\theta + ku \quad (5)$$

式中： M_s 为丝杠转矩； θ_L 为输出转角； J_L 为转动惯量； f_L 为阻尼系数， M_{gr} 为干扰转矩； θ 为位置信号； u 为控制输入。根据机器人各轴参数确定 a ， b ， c 的值，作为被控对象。

2 直角坐标机器人轮廓误差模型

机器人轮廓误差为实际和期望轮廓的几何偏差, 相对跟踪误差是更重要的指标, 建立其任意轨迹的实时轮廓误差模型, 如图 2 所示。

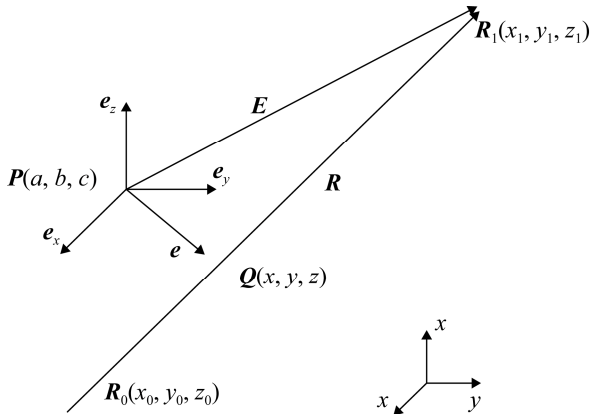


图 2 直线轮廓误差的几何关系
Fig. 2 Geometric relations of linear contour error

由几何分析可得跟踪误差向量 E 和向量 R 的表达式为:

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - a \\ y_1 - b \\ z_1 - c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = R_1 - R_0 = \begin{bmatrix} \Delta R_x \\ \Delta R_y \\ \Delta R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 R_1, R_0, Q 三点可求的直线的线性方程为:

$$L: \frac{x - x_1}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_1}{z_1 - z_0} = t \quad (8)$$

可以求得向量 PQ 的表达式为:

$$PQ = \begin{bmatrix} x - a \\ y - b \\ z - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + (x_1 - x_0)t - a \\ y_1 + (y_1 - y_0)t - b \\ z_1 + (z_1 - z_0)t - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + \Delta R_x t - a \\ y_1 + \Delta R_y t - b \\ z_1 + \Delta R_z t - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x + \Delta R_x t \\ E_y + \Delta R_y t \\ E_z + \Delta R_z t \end{bmatrix} \quad (9)$$

已知直线 PQ 与直线 R_1R_0 互相垂直, 则向量 PQ 与向量 R_1R_0 内积为 0, 可得:

$$PQ \cdot R = 0 \quad (10)$$

将式(7)和式(9)代入式(10)中, 整理得:

$$t = \frac{-(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \quad (11)$$

将式(11)求出的参数 t 代入式(8), 可得到 Q 点坐标:

$$Q = \begin{bmatrix} x_1 - \Delta R_x \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \\ y_1 - \Delta R_y \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \\ z_1 - \Delta R_z \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

则轮廓误差向量可以表示为:

$$e = Q - P = (Q_x - P_x, Q_y - P_y, Q_z - P_z) \quad (13)$$

$$e = \begin{bmatrix} E_x - \Delta R_x \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \\ E_y - \Delta R_y \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \\ E_z - \Delta R_z \frac{(E_x \Delta R_x + E_y \Delta R_y + E_z \Delta R_z)}{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据以上, 机器人系统会出现轮廓误差, 对其采用向量补偿, 如图 3 所示。

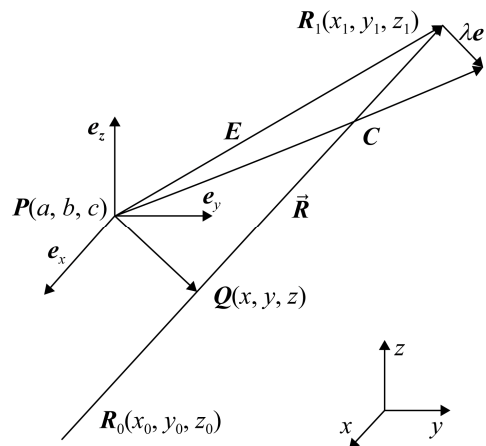


图 3 轮廓误差补偿关系图
Fig. 3 Geometric relations of contour error compensation

为了保证实际位置 P 向命令位置修正, 补偿分量为 $E_x, E_y, E_z, e_x, e_y, e_z$ 。在各轴分量可以表示为:

$$\begin{cases} C_x = E_x + \lambda e_x \\ C_y = E_y + \lambda e_y \\ C_z = E_z + \lambda e_z \end{cases} \quad (15)$$

式中： λ 为交叉耦合增益值，影响补偿速度。以上轮廓误差计算方法，适用于三维空间中的任意轮廓。可设计对应控制器，对整个三轴直角坐标机器人的末端运行轨迹进行精密轮廓控制。

3 补偿滑模交叉耦合控制器设计

单轴被控对象模型和控制结构框图见图4。

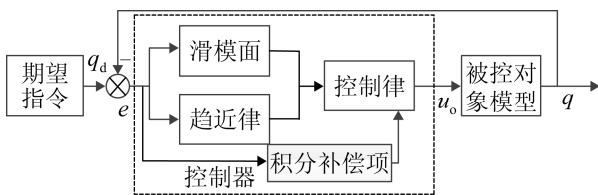


图4 单轴位置控制结构框图

Fig. 4 Single axis position control structure diagram

选取终端滑模面：

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta e^{q/p} \quad (16)$$

式中： $e = q_d - q$ ， $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ ，且 α ， β 为大于0的数，其中 p ， q 为大于0的奇数，同时满足 $q < p$ 。这类机器人工作期间均为电机轴线往复运动，工作空间为一个长方体，特别是启动初期，期望不在零位进行的跟踪控制，属于大阶跃跟踪，常选取指数趋近律来进行设计。

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (17)$$

式中： k ， ε 均为大于0的数。

根据滑模趋近律控制设计，将式(16)进行求导可得：

$$\dot{s} = \ddot{e} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{q}{p} e^{(q/p-1)} \dot{e} \quad (18)$$

将式(5)和式(17)代入式(18)，可以得到控制律：

$$u = \ddot{q}_d + 10\dot{q} + q + \alpha \dot{e} + \beta \frac{q}{p} e^{(q/p-1)} \dot{e} + ks + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (19)$$

由于滑模控制自身特点，式(19)在收敛趋近过

程中，因为符号函数的存在，会存在明显抖振现象，设计改进型双幂次趋近律：

$$\dot{s} = -k_1 |s|^{\beta_1} \operatorname{sign}(s) - k_2 |s|^{\beta_2} \operatorname{sign}(s) - k_3 |e|^{\beta_3} s \quad (20)$$

式中：式子 k_1 ， k_2 ， k_3 均为大于0的数，同时满足 β_1 ， β_2 ， $\beta_3 > 0$ ， $0 < \beta_2 < 1$ ， $\beta_1 = 2 - \beta_2$ 。

根据式(5)，(18)和(20)可以得到单轴的控制律：

$$u_{\text{smc}} = \ddot{q}_d + 10\dot{q} + q + \alpha \dot{e} + \beta \frac{q}{p} e^{(q/p-1)} \dot{e} + k_1 |s|^{\beta_1} \operatorname{sign}(s) + k_2 |s|^{\beta_2} \operatorname{sign}(s) + k_3 |e|^{\beta_3} s \quad (21)$$

根据李雅普诺夫对稳定性证明：

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (22)$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left(\ddot{e} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{q}{p} e^{(q/p-1)} \dot{e} \right) =$$

$$s(-k_1 |s|^{\beta_1} \operatorname{sign}(s) - k_2 |s|^{\beta_2} \operatorname{sign}(s) - k_3 |e|^{\beta_3} s) \leq 0 \quad (23)$$

由于各轴在系统运行过程，受摩擦和自身控制器的影响，存在稳态误差。因此，为了消除稳态误差，对式(21)进行补偿，加入积分补偿项 u_{ic} ，其中 ic 为Integral compensation。

得到总的控制律为：

$$u_o = u_{\text{smc}} + u_{ic} = \ddot{q}_d + 10\dot{q} + q + \alpha \dot{e} + \beta \frac{q}{p} e^{(q/p-1)} \dot{e} + k_1 |s|^{\beta_1} \operatorname{sign}(s) + k_2 |s|^{\beta_2} \operatorname{sign}(s) + k_3 |e|^{\beta_3} s + k_4 \int_0^t e dt \quad (24)$$

式中： k_4 为补偿项系数且大于0。

上述设计为单轴控制，误差只是自身修正而忽略了其他轴情况，缺少轴间协调，为减少轴间轮廓误差，针对上述三轴轮廓误差模型，设计交叉耦合控制器。搭建基于Matlab 2014b 64位系统，三轴采用同样型号伺服电机，联轴器，轴承和直线导轨等附件，求得被控对象参数 $a=10$ ， $b=1$ ， $k=1$ 。补偿滑模交叉耦合控制器框图如图5所示。

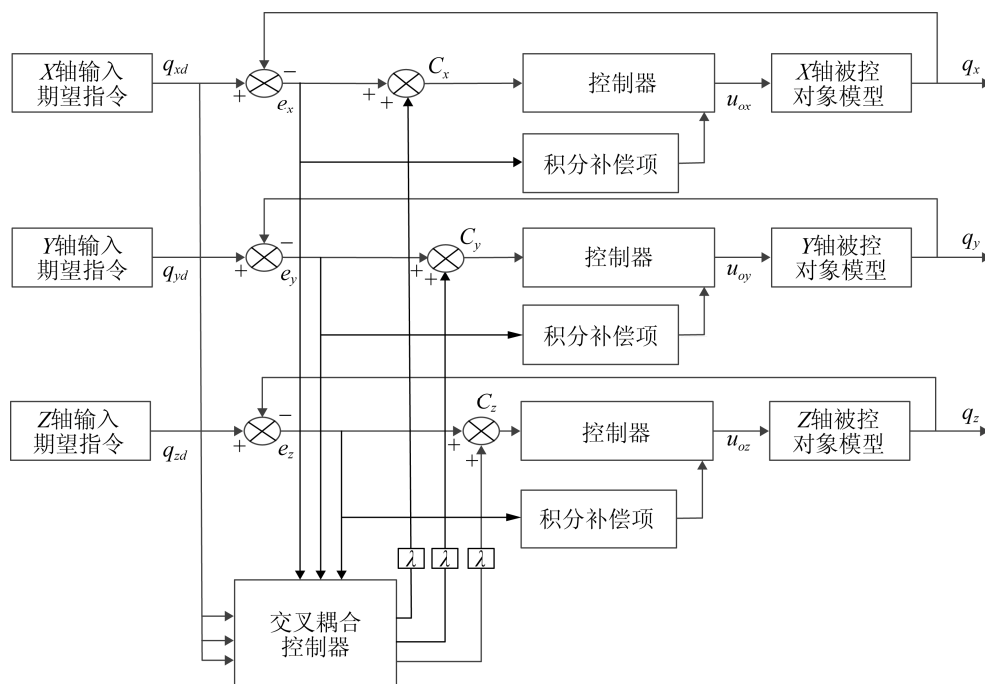


图 5 补偿滑模交叉耦合控制器框图

Fig. 5 Block diagram of compensated sliding mode cross-coupling controller

4 仿真结果与分析

4.1 单轴位置控制器仿真

在单轴控制仿真图 6~8 中, 分别表示了 3 种算法的跟踪效果, 外扰情况下偏离平衡位置的局部放大和控制输入效果。从 3 种控制器的仿真图可以看出: PID 控制在保证跟踪效果前提下, 具有一定超调, 但控制输入较平滑, 而终端滑模指数趋近律控制, 则是控制输入呈现带状, 容易激发系统高频成分和增加控制器负担, 同时结合图 8 和表 1 中抖振项, 体现了改进趋近律的优势, 较好地改善了传统指数趋近律的不足, 同时减少了抖振对系统的影响。图 6~7 中收敛速度和抗扰性能 3 种控制器的对比, PID 控制的鲁棒性较弱, 而滑模控制鲁棒性较强, 表 1 中鲁棒性指标, 是加入扰动后 10~15 s 的偏差积分性能指标 ITSE, 结合图 7 可以看出, 传统 PID 偏离平衡位置相对较远, 本文方法鲁棒性较强, 也是体现了滑模鲁棒性强的优势。整体控制性能从单轴控制性能指标表 1 中 ITSE 项, 可以看出本文方法在单轴控制性能整体优越于其他, 为后续三轴轨迹跟踪奠定了基础。

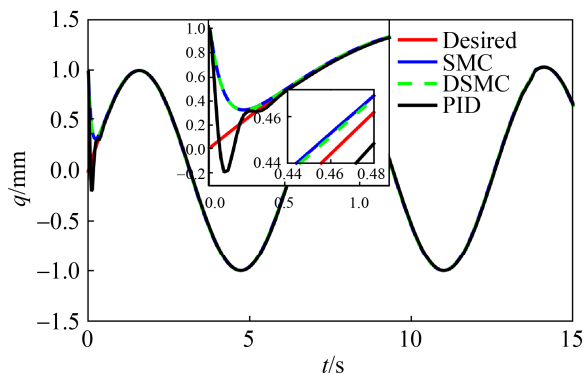


图 6 3 种控制器收敛速度比较

Fig. 6 Convergence speed of three controllers is compared

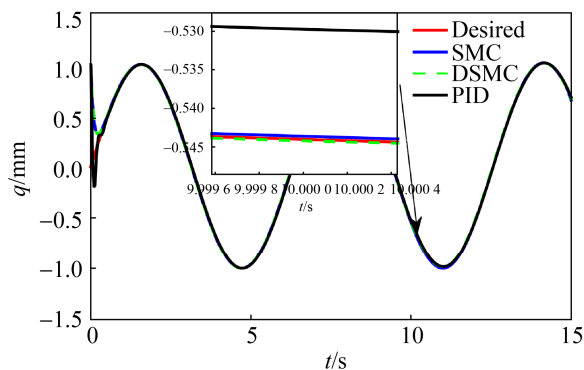


图 7 3 种控制器 10 s 加入外扰比较

Fig. 7 Three kinds of controllers 10 s add external disturbance comparison

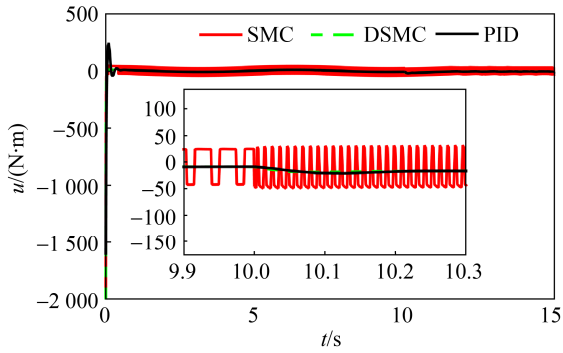


图8 3种控制器控制输入比较

Fig. 8 Three controllers control input comparison

表1 单轴控制性能指标

Tab. 1 Uniaxial control performance index

方法	ITSE	控制输入抖振	鲁棒性(10~15 s)
PID	0.024 180	弱	0.015 390
SMC	0.002 497	强	0.003 850
DSMC	0.001 816	弱	0.001 574

注: 相同部分参数一致, 其中 DSMC (Design sliding mode control) 为本文方法

4.2 传统控制器及设计控制器三轴仿真

机器人期望跟踪轨迹为空间螺旋线, 方程为:

$$\begin{cases} x = \sin t \\ y = \cos t \\ z = 5t \end{cases} \quad (25)$$

各控制器参数为表2参数, 在10 s时X轴加入10 N·m负载扰动, 三轴轮廓误差模型, 其控制补偿增益 $\lambda=0.01$ 。

传统滑模控制器参数: $c=10$, $\varepsilon=0.5$, $k=15$ 。

表2 3种控制器参数

Tab. 2 Three controller parameters

方法	参数
PID	$P=600, I=1, D=10$
SMC	$\alpha=10, \beta=1, p=9, q=5, k=200, \varepsilon=33$
DSMC	$\alpha=10, \beta=1, p=9, q=5, k_1=k_2=k_4=20, k_3=200, \beta_1=5/3, \beta_2=1/3, \beta_3=1/3$

机器人三轴共同作用, 从图9~10看出, 传统的PID控制, 在保证跟踪效果的同时, 参数调整不当, 容易产生超调(底部), 并且对外界突加干扰, 对其整体轨迹跟踪影响较大; 传统滑模控制从图11~12可以看出, 轨迹跟踪存在一定静差, 并且指数趋近律存在抖振, 对控制输入及系统均有影响,

进而设计了趋近律对其进行改善。由于抖振和静差的存在, 为提高控制器的精度, 设计了积分补偿项, 改善控制器带来的稳态误差。本文设计的控制器, 从图13~14可以看出, 在有无突加干扰情况下, 整体性能较为优越, 控制输入平滑, 改进型双幂次趋近律不仅有效弱化抖振, 还提高了收敛速度, 同时结合3种不同算法的性能指标ITSE见表3, 可以从各轴数据可看到本文方法较为优越, 且在此类机器人中得到了应用。

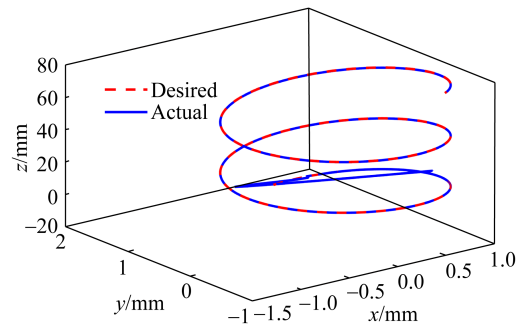


图9 机器人三轴PID控制期望值和实际值

Fig. 9 Expected value and actual value of robot three-axis PID control

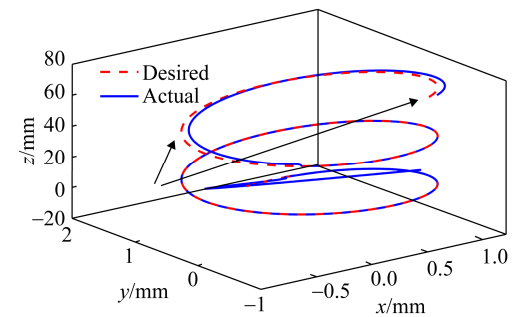


图10 机器人三轴PID控制期望值和实际值(加扰动)

Fig. 10 Expected value and actual value of robot three-axis PID control (with disturbance)

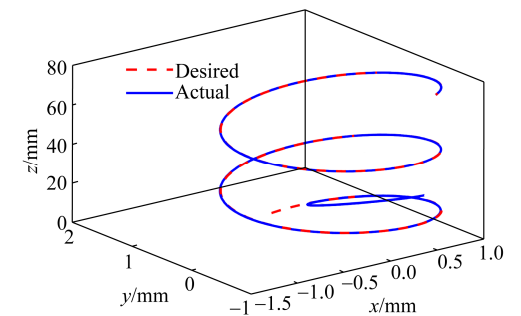


图11 机器人三轴传统滑模控制器期望值和实际值

Fig. 11 Expected value and actual value of triaxial conventional sliding mode controller

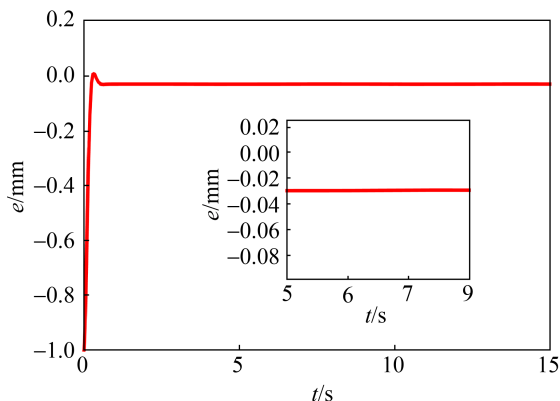


图 12 机器人三轴传统滑模控制器 x 轴误差
Fig. 12 X-axis error of the robot triaxial conventional sliding mode controller

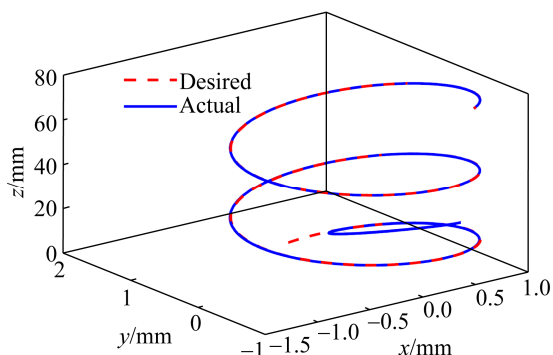


图 13 机器人三轴本文设计控制器期望值和实际值
Fig. 13 Expected value and actual value of robot triaxial design controller

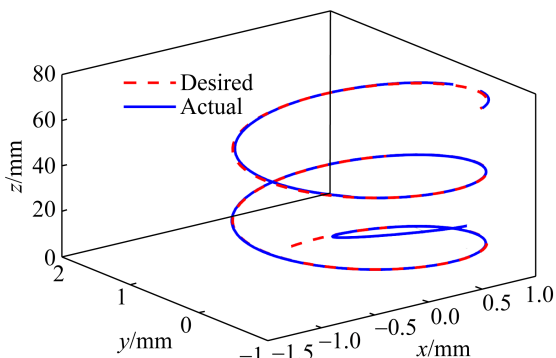


图 14 机器人三轴设计控制器期望值和实际值(加扰动)
Fig. 14 Expected value and actual value of robot three-axis design controller (with disturbance)

表 3 三轴控制性能指标(ITSE)

Tab. 3 Triaxial control performance index (ITSE)

方法	x 轴	y 轴	z 轴
PID	0.015 51	0.017 49	3.248 00
SMC (传统)	0.102 3	0.102 5	0.500 8
DSMC	0.003 805	0.004 021	0.302 300

5 结论

本文针对直角坐标三轴机器人轨迹跟踪问题, 设计了补偿终端滑模交叉耦合控制器。

(1) 将滑模控制同正交三轴机器人结合应用, 实现了响应快、鲁棒性强等优点。为了有限时间收敛为 0, 采用终端滑模控制, 改善了普通滑模渐近收敛和存在静差的问题, 同时加入积分补偿项使稳态精度得到提高。

(2) 针对滑模传统指数趋近律带状分布问题, 作为控制输入, 会激发未建模部分和控制器负担, 做出了相应改进, 弱化抖振, 取得了较好的效果。

(3) 针对三轴正交典型机器人, 建立轮廓误差模型进行交叉耦合, 减少了轴间误差, 各轴进行自身积分补偿, 提高了整体跟踪精度, 同时也减少了复杂的计算。通过仿真验证了本文设计控制器的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 刘云平. 基于滑模 PID 的飞行机械臂稳定性控制[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(5): 525-532.
Liu Yunping. Stability Control of Flight Manipulator based on Sliding Mode PID[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 42(5): 525-532.
- [2] Abdalla T Y, Abdulkarem A A. PSO-based Optimumdesign of PID Controller for Mobile Robot Trajectory Tracking[J]. International Journal of Computer Application (S0975-8887), 2012, 47(23): 30-35.
- [3] 王雨, 张慧博, 戴士杰, 等. 风电叶片打磨机器人柔性末端终端滑模力控制[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1757-1766.
Wang Yu, Zhang Huibo, Dai Shijie, et al. Terminal Sliding Mode Control of Flexible End Grinding Force of Wind Turbine Blade Grinding Robot[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(7): 1757-1766.
- [4] 闫九祥, 赵永国, 王亚丽, 等. 双履带机器人电液行走控制系统建模与仿真[J]. 液压与机床, 2019, 47(19): 120-124.
Yan Jiuxiang, Zhao Yongguo, Wang Yali, et al. Modeling and Simulation of Electro-hydraulic Walking Control System for Double Track Robot[J]. Hydraulics and

- Machine Tools, 2019, 47(19): 120-124.
- [5] Koren Y, Lo C C. Variable-gain Cross-coupling Controller for Contouring[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology(S0007-8506), 1991, 40(1): 371-374.
- [6] Wang J, Liang H, Guan D G, et al. Contour Error and Control-algorithm-in-CNC-machining-tool[C]//International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Chengdu,China: IEEE, 2012: 2351-2355.
- [7] Zhao G Y, Hong J, Zhao Q Z. Contour Error Coupled-Control Strategy based On-line Interpolation and Curve Interpolation[J]. Journal of Computers (S1796-203X), 2013, 8(6): 1512-1519.
- [8] 许万, 郑威, 杨维, 等. 基于双迭代学习-交叉耦合的双轴误差控制[J]. 合肥工业大学学报, 2017, 40(9): 1158-1263.
- Xu Wan, Zheng Wei, Yang Wei, et al. Dual-axis Error Control based on Double-iterative Learning and Cross-coupling[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(9): 1158-1263.
- [9] 金鸿雁, 赵希梅. 双直线电机伺服系统 Elman 神经网络互补滑模交叉耦合同步控制[J]. 电工技术学报, 2018, 32(21): 4971-4978.
- Jin Hongyan, Zhao Ximei. Synchronous Control of Elman Neural Network Complementary Sliding Mode and Cross-Coupled Control for Dual Linear Motors Servo System[J]. Acta Electronica Technica, 2008, 32(21): 4971-4978.
- [10] 王丽梅, 蔺威威. 三轴运动平台改进型交叉耦合轮廓控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(4): 361-366.
- Wang Limei, Lin Weiwei. Improved Cross-coupled Contour Control for Three Axis Motion Table[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(4): 361-366.
- [11] Cheng M Y, Su K H, Wang S F. Contour Error Reduction for Free-form Contour Following Tasks of Biaxial Motion Control Systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (S0736-5845), 2009, 25(2): 323-333.
- [12] 王伟, 赵健廷, 胡宽荣, 等. 基于快速非奇异终端滑模的机械臂轨迹跟踪方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 464-471.
- Wang Wei, Zhao Jianting, Hu Kuanrong, et al. Trajectory Tracking of Robotic Manipulators based on Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 464-471.
- [13] 张鑫, 李嘉欣. 基于分数阶微积分的机械臂滑模控制的研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 911-917.
- Zhang Xin, Li Jiaxin. Research on Sliding Mode Control of Robotic Arm Based on Fractional Calculus[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 911-917.
- [14] 张合新, 范金锁, 孟飞, 等. 一种新型滑模控制双幂次趋近律[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 289-292.
- Zhang Hexin, Fan Jinsuo, Meng Fei, et al. A New Double Power Reaching Law for Sliding Mode Control[J]. Control and decision-making, 2013, 28(2): 289-292.
- [15] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-502.
- Li Huijie, Cai Yuanli. Sliding Mode Control with Double Power Reaching Law[J]. Control and Decision-making, 2016, 31(3): 498-502.
- [16] 骆飞. 基于进给系统动态特性的速度前瞻规划方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
- Luo Fei. Research on Velocity Forward Planning Method based on Dynamic Characteristics of Feed System[D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2017.