

果实收获机器人关节滑模控制系统设计与试验

梁喜凤 周 涛 王斌锐
(中国计量学院机电工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对多关节果实收获机器人难以获得精确控制模型以及控制系统的抖振问题,提出基于遗传算法实时动态调整滑模参数的控制策略,设计并制作了基于 STM32 微控制器和 AS5045 位置反馈模块及 CAN 总线通信模块的关节控制系统仿真和试验平台,分别在空载与负载情况下进行了关节电机位置响应试验。结果表明,采用遗传算法动态调整滑模控制器参数能够提高关节控制系统位置跟踪的响应速度,减少外界干扰和负载变化引起的控制系统抖振的幅度与持续时间,具有较强的鲁棒性。由空载和负载试验结果可知,关节 6 实际试验控制系统的位置跟踪响应时间比理论仿真试验增加了 0.5 s,负载时控制系统的位置跟踪响应时间比空载时增加了 0.3 s,但负载对系统精度和超调量并无明显影响,系统具有良好的控制效果。

关键词: 果实收获机器人; 关节; 滑模控制; 遗传算法

中图分类号: S22; TP241.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0001-07

Design and Experiment on Joint Sliding Mode Control System of Fruit Harvesting Robot

Liang Xifeng Zhou Tao Wang Binrui
(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The control system is one of essential constitute parts of the fruit harvesting robots, which affects the work efficiency and quality of the robots. In generally, fruit harvesting robots are nonlinear spatial open chains with multi-input and multi-output and serious coupling. It is difficult to set up accuracy mathematical model for the joint control system because there are many uncertain factors during working, such as joint friction, assembly errors, etc. Sliding mode control method has more advantages to solve nonlinear problems with strong robustness, anti-disturbance, etc. To improve the control performance of the fruit harvesting robot and solve the vibration of the control system, the sliding mode control (SMC) method based on genetic algorithm (GA) optimization was proposed. In this method, the parameters of SMC algorithm were optimized by GA through adjusting the parameters of switching function and exponential approach law in real time. Simulation and experimental platforms of a joint control system were designed and manufactured based on STM32 microcontroller, AS5045 position feedback module and CAN bus communication module. Moreover, experiments on position tracking and joint control system response were conducted in unloading and loading conditions respectively. The results show that the response velocity of position tracking was increased greatly by adopting GA. The vibration amplitude and time of the control system caused by external disturbance and load changes were reduced significantly. The experiment results also showed that the response time during position tracking of joint No. 6 in the unloading condition is 0.3 s shorter than that in the loading condition. However, the position tracking accuracy and maximum deviation are not affected greatly by adding load. In addition, the controller

收稿日期: 2015-09-02 修回日期: 2015-10-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(51505454、51575503)、浙江省自然科学基金项目(LQ13E050003、LY14F030021)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA10A504)
作者简介: 梁喜凤(1976—),女,副教授,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: lxf@jlu@163.com

response time in actual experiments increases 0.5 s comparing with that of simulation experiment owing to ignoring some uncertain factors, such as joint friction, assembly errors, inertia force, etc. in the simulation experiment system. But the control system can make the joint to track the expected trajectory with satisfied accuracy and high robustness. The results can provide the foundation for the further research of the robot joints' control systems.

Key words: fruit harvesting robot; joint; slide mode control; genetic algorithm

引言

果实收获机器人是一种智能的自动化装置,能够在农作物生长环境中自主搜寻识别果实并完成收获,再将果实传输到指定位置^[1]。多年来,国内外学者对番茄^[2-4]、黄瓜^[5]、荔枝、柑橘^[6]等多种果实收获机器人的机械设计、视觉系统、控制系统等进行了研究,取得了大量研究成果。果实收获机器人通常是一种强耦合、非线性、多输入多输出的关节式空间开式链结构,其控制系统较多采用基于总线的主从分布式控制体系结构。这种结构可以将关节间具有强耦合作用的多输入多输出非线性复杂的机器人系统简化为多个单独的关节伺服控制系统,将机器人每一个关节都当作一个单独的伺服机构来处理。

控制算法方面,机器人单关节的位置伺服控制广泛采用 PID 控制算法,该算法计算简单、快速性好、控制精度高。但对于动力学耦合比较严重的多关节机器人,其各关节转轴的转动惯量随转角时变,而且存在关节摩擦、耦合等多种不确定性因素^[7],PID 控制算法难以克服机器人多种不确定因素对位置控制品质的影响而建立精确的控制模型,控制效果不理想。滑模变结构控制算法不依赖于被控对象精确的数学模型,运算简单、对系统参数不确定性及内外部干扰具有强鲁棒性,当系统受到外界干扰,系统状态偏离滑模态时,滑模控制器会自动更新控制输出结构以使状态轨迹向靠近滑模面方向运动。因此对于多关节果实收获机器人非线性控制问题,滑模变结构控制算法具有明显优势^[8-9]。近年来,滑模变结构控制方法已用于农业并联机器人^[10]、移动机器人^[11]和采摘机器人^[5]等方面,用于克服控制系统的外界干扰和负载扰动等,取得了良好的效果。

本文以一种七自由度番茄果实收获机械手为研究对象,考虑到果实收获机器人对末端位置精度、负荷以及控制系统结构方面的要求,采用遗传算法进行滑模变结构控制参数优化,并以 STM32 为主控制器,设计制作基于滑模变结构的关节控制系统,搭建控制系统试验平台,对关节的位置滑模控制及 CAN 总线通信进行试验研究。

1 滑模变结构控制算法

1.1 关节电机模型

果实收获机器人关节多采用直流伺服驱动电机,其数学模型为

$$u = \frac{JL}{K_t} \ddot{\theta} + \frac{JR + BL}{K_t} \dot{\theta} + \left(K_e + \frac{BR}{K_t} \right) \dot{\theta} + \frac{T_L}{K_t} R \quad (1)$$

式中 J ——转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

L ——电感, H

K_t ——电磁转矩系数

T_L ——负载扰动转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

B ——电机粘滞阻尼系数

R ——电阻, Ω θ ——电机转角, rad

K_e ——反电动势系数

由于果实收获机器人的关节运动速度较慢,故可忽略驱动电机黏性转矩和电感的影响^[12],简化为状态空间方程形式

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_t K_e}{JR} \dot{\theta} + \frac{K_t}{JR} u - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

1.2 关节位置滑模控制系统设计

关节位置滑模控制系统设计的主要任务是系统被控对象模型建立后的切换函数与控制器的设计。滑模控制器设计原理如图 1 所示。

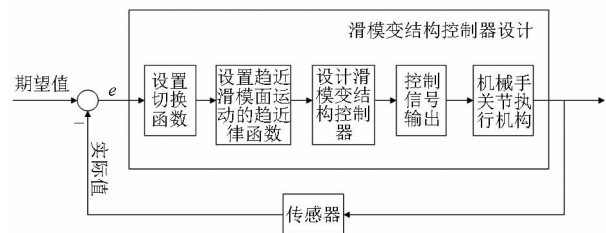


图 1 滑模控制器原理图

Fig. 1 Principle of sliding mode controller

根据图 1,同时考虑机械手的实际应用,采用基于趋近律的连续滑模控制系统的离散化来实现^[13-15]。

关节控制系统中,假设采样周期为 T ,设计离散切换函数为

$$S(k) = ce(k) + \Delta e(k) \quad (3)$$

其中 $\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$

式中 c ——切换函数参数
 $e(k)$ ——当前采样时间关节位置与期望值的误差
 $\Delta e(k)$ ——误差变化率
 假设关节电机离散化状态方程为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (4)$$

式中 $x(k)$ ——当前位置采样值
 $x(k+1)$ ——下一时刻位置值
 A, B ——系统状态方程矩阵
 $u(k)$ ——控制器输出电压

若给定期望位置为 P , 则当前关节位置误差为

$$e(k) = P - x(k) \quad (5)$$

采用指数趋近律来抑制控制器输出抖振现象, 对于指数趋近律的离散化表达式为

$$S(k+1) - S(k) = \Delta S(k) = T(-\varepsilon \operatorname{sgn}(S(k)) - KS(k)) \quad (6)$$

式中 ε, K ——指数趋近律参数
 $\operatorname{sgn}(S(k))$ ——基于 $S(k)$ 的符号函数, 当 $S(k) > 0$ 时, $\operatorname{sgn}(S(k)) > 0$

结合式(3)~(6), 可得关节离散滑模控制器输出为

$$u(k) = (cB)^{-1}(cP - cAx(k) + T\varepsilon \operatorname{sgn}(S(k)) + (TK - 1)S(k)) \quad (7)$$

同理, 上述离散化滑模控制器与连续系统一样, 要满足其滑动模态存在性与可达性条件。为证明离散化关节控制系统的稳定性, 假设李亚普诺夫函数为

$$V(k) = \frac{1}{2}S^2(k) \quad (8)$$

根据李亚普诺夫稳定性原理定义可知, 只要满足当 $S(k) \neq 0$ 时 $\Delta V(k) < 0$, 即可保证滑动模态的可达性, 即

$$\Delta V(k) = \frac{S(k+1) - S(k)}{T}S(k) = (-\varepsilon \operatorname{sgn}(S(k)) - KS(k))S(k) < 0 \quad (9)$$

因此, 关节电机位置离散滑模控制系统的李亚普诺夫条件成立。

根据上述分析, 设计针对果实收获机器人关节电机位置离散化的滑模控制程序, 程序流程如图 2 所示。

2 基于遗传算法优化的滑模控制系统

2.1 遗传算法

基于趋近律的滑模变结构控制在一定程度上能够满足控制要求, 但是对于机械手关节外界干扰严重、存在建模误差的非线性系统, 趋近阶段参数的摄

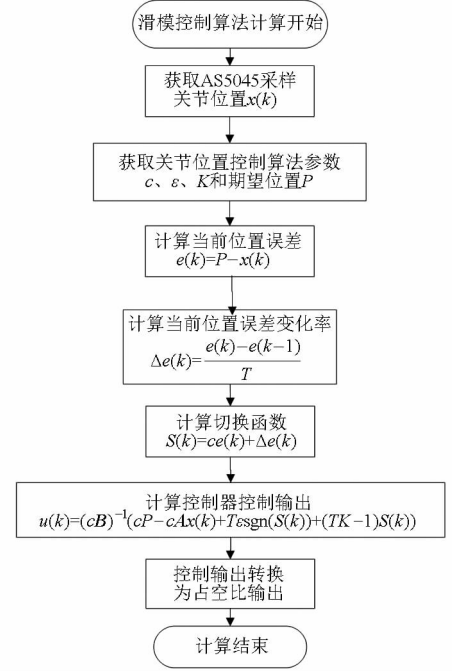


图 2 关节位置滑模控制算法子程序流程图
 Fig. 2 Procedure of sliding mode control algorithm for joint positions

动及外界干扰会对系统产生较大的影响, 而且传统滑模变结构控制的强鲁棒性只表现在滑动模态, 因此系统在滑动运动过程中仍可能会引起系统的抖振。滑模控制中对抖振及稳定性具有较大影响的参数主要包括指数趋近律参数 ε, K 及切换函数参数 c 。为改善控制系统性能, 本文采用遗传算法对上述参数进行实时动态调整^[16-17], 实时地构造最佳切换函数和指数趋近律, 其结构框图如图 3 所示。

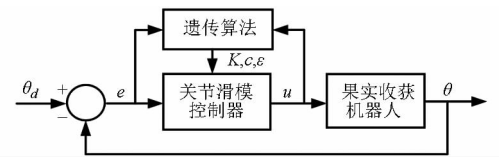


图 3 遗传算法优化的关节滑模控制系统框图
 Fig. 3 Sliding mode control system of joints based on GA

遗传算法中, 设定参数的优化范围为: $c \in (0, 20)$, $\varepsilon \in (0, 20)$, $K \in (0, 20)$, 采用实数编码。为使系统取得良好的轨迹跟踪性能并消除抖振影响, 以系统误差及控制输入变化最小为总设计目标, 目标函数设定为

$$J = e^2(t) + (\Delta u(t))^2 \quad (10)$$

式中, $\Delta u(t)$ 为系统控制输出与上一次控制输出之差, 即

$$\Delta u(t) = |u_i(t) - u_{i-1}(t)| \quad (11)$$

设置适应度评估函数为目标函数的倒数

$$f = \frac{1}{J+1} \quad (J \geq 0) \quad (12)$$

按与个体适应度成正比的概率作为选择策略,

第 i 个个体被选中的概率为

$$p_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (13)$$

式中 f_i ——第 i 个个体的适应度

$\sum f_i$ ——群体适应度总和

2.2 收获机械手结构

为验证遗传算法动态参数调整的性能,本文以一种七自由度番茄果实收获机械手为研究对象^[3],对各关节分别利用普通滑模控制器和基于遗传算法的滑模变结构控制器进行仿真试验。机械手机构简图与虚拟样机模型如图4。图中, d_1 、 d_2 为移动关节1、2的位移变量,mm; θ_i ($i=3,4,\dots,7$)为转动关节3、4、 $\dots$ 、7的角位移变量,rad; l_i ($i=1,2,\dots,7$)分别为机械手连杆1、2、 $\dots$ 、7的长度,mm。

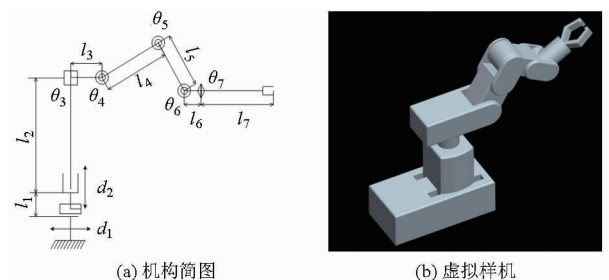


图4 番茄果实收获机械手机构简图与虚拟样机

Fig.4 Mechanism and virtual prototype of tomato harvesting manipulator

2.3 仿真试验

在 Matlab/Simulink 中利用 S-函数模块建立基于遗传算法的果实收获机器人关节滑模控制系统模型,如图5所示。图中,SMC_ctr1 为滑模控制算法模块;SMC_model1 为关节电机的动力学模型;SMC_GA 为遗传算法自适应搜索滑模控制参数的算法模块;输出框 u 和 y 分别表示控制系统中控制器的输出变量和关节电机位置变量。

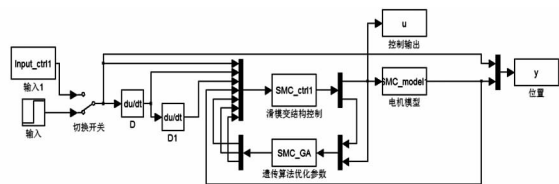


图5 基于遗传算法优化的机械手单关节滑模控制系统模型

Fig.5 Optimal simulation model of sliding mode control system for manipulator single joint based on GA

机械手末端执行器从 $P_0(0, 0.06, 0.57)$ 到 $P_1(0.85, 0.62, 0.40)$ 运动。设定果实收获机器人关节初始位置 $\theta_0 = (5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 5^\circ)$, 期望位置 $\theta_d = (275^\circ, 375^\circ, 75^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 175^\circ)$, 经过多次试验,确定滑模切换函数参数 $c=5$, 指数趋近率控制参数 $\varepsilon=5$, $K=10$ 。遗传

算法控制器中,进化代数 50 代,种群规模为 30,交叉及变异概率分别取 0.6 和 0.05。由于各关节仿真结果变化趋势类似,本文仅给出移动关节 1 和转动关节 6 的仿真结果,如图 6 和图 7 所示。

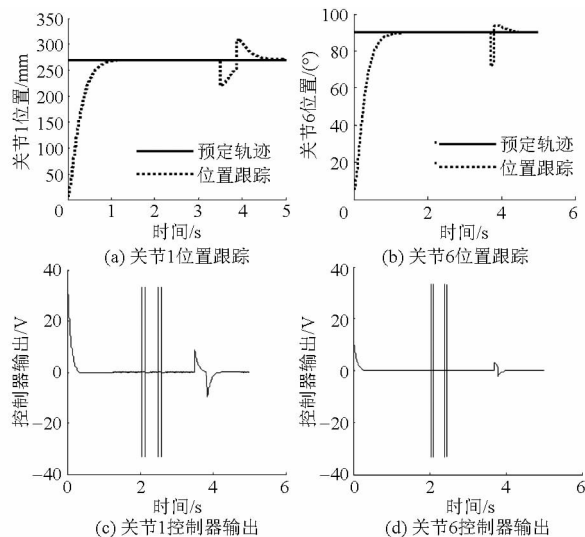


图6 普通滑模控制器机械手关节位置跟踪与系统响应

Fig.6 Position tracking and system response of manipulator joints with SMC

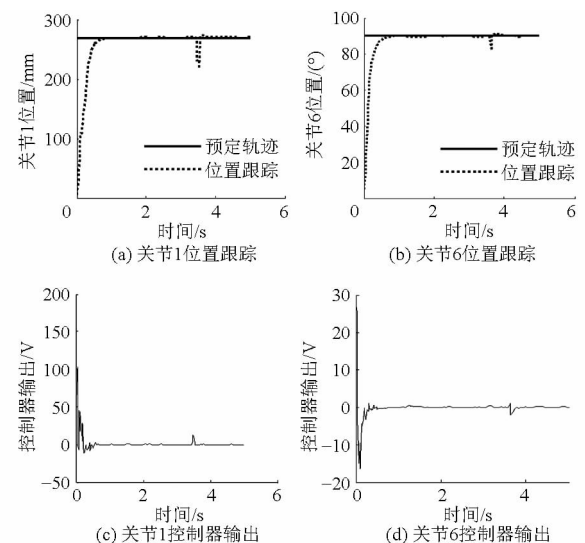


图7 遗传优化的机械手关节位置跟踪与系统响应

Fig.7 Position tracking and system response of manipulator joints with GA

由图 6a、6b 可知,普通滑模控制系统中,关节位置跟踪效果无超调,关节 1 和关节 6 分别经过 1.39 s 和 1.28 s 后完全跟踪预定轨迹。在 3.5 s 时,改变机械手关节负载,移动关节 1 出现了 $(-50.3 \text{ mm}, 39.9 \text{ mm})$ 的振荡变化,历时 1.3 s 后恢复稳定;转动关节 6 在改变机械手关节负载后出现了 $(-18.3^\circ, 3.85^\circ)$ 的振荡,历时 0.82 s 后恢复稳定。由图 6c、6d 可知,在 1.98 s 和 2.34 s 时刻,控制器加入干扰信号,系统产生了振幅达 33.3 V 的抖振,在 3.5 s 时,改变机械手关节负载,移动关节 1 控制电压输出

出现历时近 0.64 s 的不稳定抖振,振幅为(- 9 V, 9 V);转动关节 6 出现了振幅为(- 1.87 V, 3.26 V)的不稳定振荡,历时 0.3 s 恢复正常。

对比图 6 与图 7 可知,基于遗传算法优化的关节滑模控制系统中,关节 1 和关节 6 经过 1 s 和 0.78 s 后完全跟踪预定轨迹,比普通滑模变结构控制分别减少了 0.39 s 和 0.5 s。在 3.5 s 时,改变机械手关节负载,关节 1 出现了(- 40 mm, 2.9 mm)不稳定振荡,历时 0.31 s 恢复正常跟踪状态;关节 6 出现了(- 7.86°, 1.57°)的振荡,经过 0.45 s 恢复正常,振荡时间分别比普通滑模变结构控制减少了 0.99 s 和 0.37 s,且振荡幅度明显减小。控制器输出方面,在 1.98 s 和 2.34 s 时刻,加入干扰信号,系统控制输出稳定,控制电压输出未出现高频振荡。3.5 s 时,改变机械手关节负载,关节 1 控制电压输出出现历时 0.16 s 的不稳定抖振,振幅为 10.94 V;关节 6 控制电压输出出现 0.15 s 的不稳定抖振,振幅为(- 2.066 V, 1.085 V),抖振时间比普通滑模控制分别减少了 0.48 s 和 0.15 s。但在 0~0.5 s 时间段内,系统启动阶段控制电压变化幅度较大,导致系统控制电压输出不稳定,由于前期位置误差较大,启动阶段遗传算法优化参数波动较大,故导致系统控制产生较大的输出波动,但 0.5 s 后系统完全启动后对控制结果不再有影响。

综上可知,基于遗传算法优化参数的滑模控制器具有较强的消除抖振能力,并且在任意时刻突加外部阶跃干扰信号后,控制器的输出变化曲线仍能保持稳定不变,表明其对外部干扰具有很强的鲁棒性;同时,在增加关节负载变化后,控制器的输出也能够迅速恢复稳定,表明该控制器对关节负载变化的影响具有较强的抑制作用。

3 果实收获机器人关节控制试验

3.1 控制试验平台

为验证本文设计的果实收获机器人关节控制系统的实际控制效果,制作了单关节控制系统试验平台。控制试验平台采用百为公司的 STM32 开发板作为主控制器,主控制器开发板集成了串口及 CAN 收发模块,能够完成与计算机 USART 串口的数据传输和与关节控制系统的控制指令 CAN 通信。同时,主控制节点与单关节控制节点通过一对双绞线连接组成 CAN 通信网络,而单关节控制系统由关节控制器、电机驱动器、关节电机及位置反馈电路板等组成。为提高机器人关节控制系统的通用性与可扩展性,系统结构采用 STM32 最小系统、电源电路、JTAG 仿真接口电路、CAN 总线通信电路和非接触式

AS5045 磁旋编码位置反馈电路等组成,控制系统中每个关节节点的 CAN 总线通信模块采用 STM32 微控制器,自带 CAN 控制器和 SN65HVD23 收发器。关节位置控制系统结构如图 8 所示。

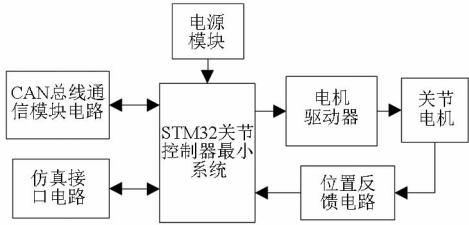


图 8 关节位置控制硬件系统结构框图
Fig. 8 Control hardware system structure for joint positions

试验以转动关节 6 为例,选取时代超群公司 57BL55S02-212TF0 型直流伺服电机作为驱动。该电机具体参数为:额定电压为 24 V,额定转速为 1 200 r/min,额定转矩为 0.15 N·m,转动惯量 $J = 9.24 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,转矩系数 $K_t = 0.125 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$,反电动势系数 $K_e = 0.0131 \text{ V} \cdot \text{r}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为增大果实收获机器人关节的输出转矩,安装传动比为 36:1 的行星减速器,使电机转矩能够达到 5.4 N·m。同时,电机驱动器选择时代超群公司配套的 ZM-6405E 型高性能驱动器,只需上位机输出 PWM 控制信号即可实现调速。机械手关节位置控制系统试验装置如图 9 所示。

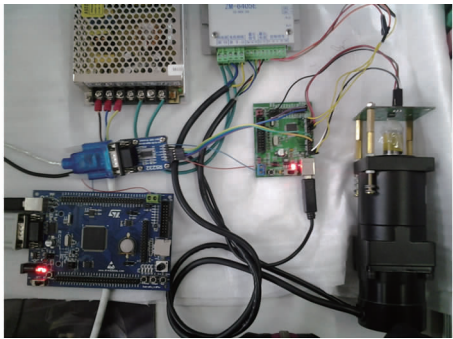


图 9 关节位置滑模控制试验装置图
Fig. 9 Experiment platform of sliding mode controller for joint position

控制系统试验装置工作时,主控制器通过串口连接计算机上串口调试程序,实现关节期望位置的传送与关节电机当前位置的返回输出;主控制器节点的 CAN 模块与关节控制系统 CAN 模块通过双绞线连接,将主控制器从计算机串口得到的期望位置值传送给关节控制系统;关节控制子系统通过 CAN 总线接收与本身 ID 相符的 CAN 通信数据帧,该数据帧代表着关节电机的期望位置。然后根据期望值采用离散化滑模控制算法获得自动调节 PWM 波,调整关节电机位置。同时,在此过程中不断向主控制器发送电机的当前位置值,以便进行实时分析。

3.2 关节位置控制试验与分析

空载试验时,关节位置由初始位置 0°到 180°变化,试验时间为 3 s,系统初始位置 0°编码为

0A00H,180°编码为 1300H,相差 2 048 个脉冲,即分辨率为 0.087 9°。关节位置变化动态响应拟合曲线如图 10 所示。

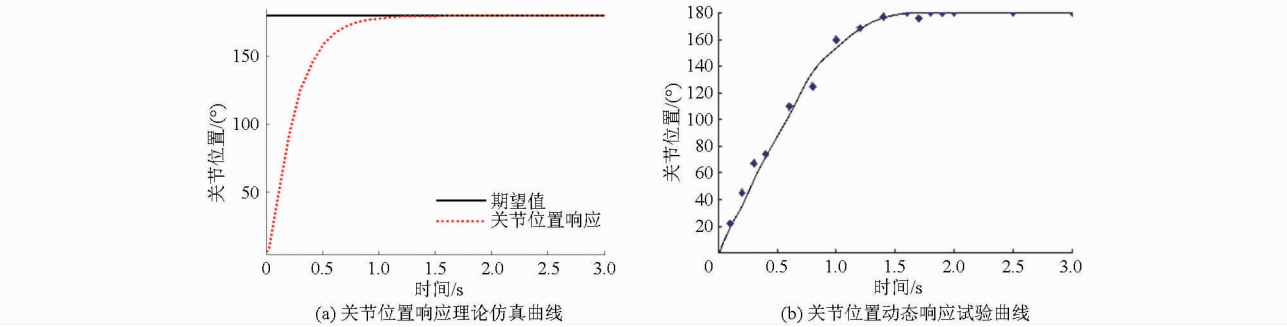


图 10 空载情况下关节位置滑模控制系统试验曲线

Fig. 10 Experiments on sliding control system in unload condition

由图 10 可知,空载时,仿真系统的关节位置跟踪响应时间为 1.2 s,而实际试验系统的响应时间为 1.7 s,比理论仿真时间增加了 0.5 s,二者均具有较高的跟踪精度。

负载试验时,将质量约为 0.1 kg 的铁环套于电机转轴上作为电机负载,测试关节电机运动半圈(180°)过程中的位置变化数据。负载条件下的位置响应试验数据结果如表 1、图 11 所示。

表 1 负载情况下关节位置滑模控制位置变化数据(0°~180°)

Tab.1 Output data of sliding mode controller of joint position in load condition (0°~180°)

时间/s	位置	时间/s	位置	时间/s	位置	时间/s	位置	时间/s	位置
0	0A00H	0.60	0CA8H	1.20	102EH	1.80	12B2H	2.40	1303H
0.06	0A40H	0.66	0D04H	1.26	106FH	1.86	12C0H	2.46	12FEH
0.12	0A82H	0.72	0D52H	1.32	10B6H	1.92	12D6H	2.52	12F1H
0.18	0AA5H	0.78	0D9EH	1.38	1103H	1.98	12E4H	2.58	12F1H
0.24	0AE0H	0.84	0DF9H	1.44	1152H	2.04	12F2H	2.64	12E6H
0.30	0B34H	0.90	0EAFH	1.50	119EH	2.10	1302H	2.70	12E6H
0.36	0B7FH	0.96	0EF0H	1.56	11FDH	2.16	1303H	2.76	12FEH
0.42	0BBFH	1.02	0F46H	1.62	124AH	2.22	1305H	2.82	1302H
0.48	0C12H	1.08	0F8FH	1.68	1282H	2.28	1315H	2.88	1303H
0.54	0C60H	1.14	0FD2H	1.74	129EH	2.34	1308H	2.94	1313H

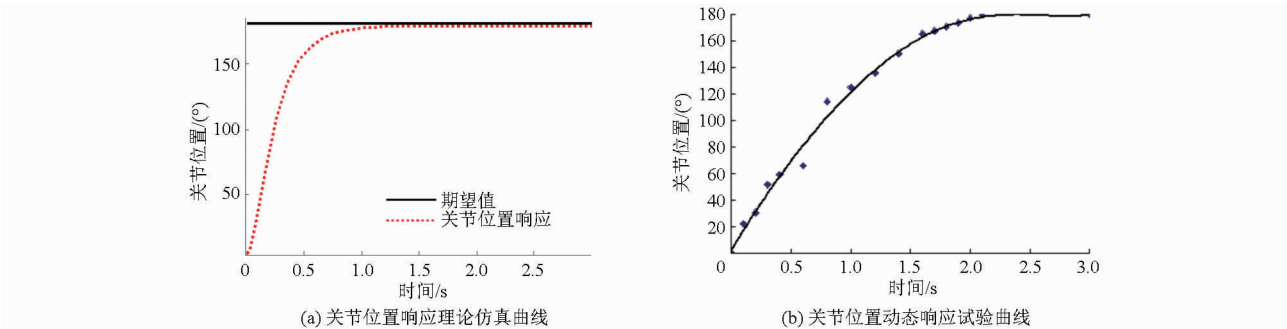


图 11 负载情况下关节位置控制试验曲线

Fig. 11 Experiments of sliding control system in load condition

由图 11 可知,负载试验时,仿真系统的关节位置跟踪响应时间为 1.5 s,而实际试验系统的响应时间为 2 s,二者均比空载时响应时间增加了 0.3 s。由表 1 和图 11b 可知,关节位置从 0°到 180°变化过程中,2 s 首次到达期望值,后逐渐趋于稳定,超调量为 0.7%。

在 2.4~2.8 s 段进入调整阶段,最大振幅为 2.1°。对比图 10 和图 11 可知,在关节电机加入负载后,控制系统仿真与实际试验系统响应时间均变长,但对关节位置控制精度影响较小,能够实现关节位置跟踪无超调的渐近稳定。

试验与仿真结果有一定差别的原因在于:理论

上的关节滑模控制系统仿真模型忽略了机器人关节的摩擦、装配误差、惯性力等外界干扰因素,而实际应用中不可能达到无外界干扰的理想条件,且上述干扰因素在负载情况下比空载时影响更明显些。但总体来看,关节系统的位置滑模变结构控制具有较高的控制精度,且具有相对较高的响应速度,控制效果良好,因此关节控制系统方案设计是可行的。

4 结论

(1)采用遗传优化算法,通过实时动态调整滑模控制参数,能够解决控制系统的抖振、外界干扰和负载扰动等问题。试验结果表明,对比普通滑模变结构控制,遗传算法优化的关节滑模控制系统中,关节1和关节6跟踪预定轨迹的时间分别减少了0.39 s和0.5 s。改变机械手关节负载,关节1和关

节6位置跟踪振荡时间分别减少了0.99 s和0.37 s,且振荡幅度明显减小,控制器输出电压的抖振时间也分别减少了0.48 s和0.15 s。加入干扰信号,控制器输出未受影响,该系统具有很强的鲁棒性能。

(2)在提出主从分布式的果实收获机器人控制系统体系结构的基础上,设计制作了基于STM32微控制器和AS5045的关节控制系统试验平台。在空载与负载情况下的关节电机控制系统试验结果表明,空载时关节电机位置控制响应快且精度较高,超调量小;而负载情况下,控制系统响应时间增加了0.3 s,且位置控制需要一定的调节时间。对比实际试验与仿真试验结果,实际滑模控制系统位置响应时间均增加0.5 s,位置滑模控制实际效果能够满足机器人控制要求。

参 考 文 献

- 1 陈磊,陈帝伊,马孝义. 果蔬采摘机器人的研究[J]. 农机化研究, 2011,33(1): 224-227.
- 2 MITSUJI Monta, NAOSHI Kondo, TING K C. End-effectors for tomato harvesting robot[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1-3):11-25.
- 3 梁喜凤,杨彝,王永维. 番茄收获机械手轨迹跟踪模糊控制仿真与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(17):16-23. LIANG Xifeng, YANG Ben, WANG Yongwei. Simulation and test of trajectory tracking control for tomato harvesting manipulator based on fuzzy logic compensation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 16-23. (in Chinese)
- 4 尹建军,武传宇, Yang Simon X, 等. 番茄采摘机器人机械臂避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):171-175,157. YIN Jianjun, WU Chuanyu, YANG Simon X, et al. Obstacle-avoidance path planning of robot arm for tomato-picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):171-175,157. (in Chinese)
- 5 杨庆华,王燕,高峰,等. 基于摆线运动的黄瓜采摘机器人终端滑模轨迹跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2009,25(5): 94-99. YANG Qinghua, WANG Yan, GAO Feng, et al. Trajectory tracking with terminal sliding mode control of cucumber picking robot manipulator based on cycloidal motion[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5):94-99. (in Chinese)
- 6 熊俊涛,叶敏,邹湘军,等. 多类型水果采摘机器人系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1):230-235,259. XIONG Juntao, YE Min, ZOU Xiangjun, et al. System design and performance analysis on multi-type fruit harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1):230-235,259. (in Chinese)
- 7 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- 8 UTKIN V I. Variable structure systems with sliding modes [J]. IEEE Transactions, on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- 9 胡立坤,马文光,赵鹏飞,等. 六自由度机械臂的非奇异快速终端滑模控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(3): 735-741. HU Likun, MA Wenguang, ZHAO Pengfei, et al. Non-singular fast terminal sliding mode control method for 6-DOF manipulator [J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(3): 735-741. (in Chinese)
- 10 高国琴,王威,丁琴琴. 农业并联机器人同步滑模控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9):173-178,196. GAO Guoqin, WANG Wei, DING Qinqin. Synchronization sliding mode control for agricultural parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 43(9):173-178,196. (in Chinese)
- 11 牛雪梅,高国琴,鲍智达,等. 基于滑模变结构控制的温室喷药移动机器人路径跟踪[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 9-16. NIU Xuemei, GAO Guoqin, BAO Zhida, et al. Path tracking of mobile robots for greenhouse spraying controlled by sliding mode variable structure[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2):9-16. (in Chinese)
- 12 杨渝钦. 控制电机[M]. 北京:机械工业出版社,1981: 85-90.
- 13 何伟,朱云龙,苏卫星,等. 模特机器人CAN总线控制系统设计与实现[J]. 机械设计与制造, 2013(11): 190-192,196.
- 14 余朝发,陶溢,程志勇,等. 基于自适应变结构滑模控制器的机器人关节用异步电机伺服控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2013(10): 2673-2675.
- 15 齐亮. 基于滑模变结构方法的永磁同步电机控制问题研究及应用[D]. 上海:华东理工大学,2013. QI Liang. Research and application of permanent magnet synchronous motor via sliding control method [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 16 NEKOUKAR V, ERFANIAN A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2011, 179(1): 34-49.
- 17 尹西杰,徐建国. 无刷直流电机的神经滑模变结构控制[J]. 计算机仿真, 2014(8): 402-406.
- 18 LIN F J, CHOU W D. An induction motor servo drive using sliding mode controller with genetic algorithm [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 64(2): 93-108.