

# 农业并联机器人同步滑模控制\*

高国琴 王 威 丁琴琴

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

**【摘要】** 农业并联机器人的多支链相对末端执行器运动的协调性、耦合性成为并联机器人运动控制的难题, 鉴于此, 提出一种将同步控制与滑模控制相结合的控制方法。仿真和实验结果表明, 该控制方法跟踪性能好, 响应速度快, 系统误差小, 具有较强的鲁棒性, 能够满足并联机器人的控制要求。

**关键词:** 并联机器人 同步控制 滑模控制

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0173-06

## Synchronization Sliding Mode Control for Agricultural Parallel Robot

Gao Guoqin Wang Wei Ding Qinqin

(School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

The coordination and coupling among agricultural parallel robot's chains relative to the end actuator became a difficult problem in parallel robot motion control. Aiming at this, a control method that combined synchronization control with sliding mode control was proposed. The simulation results show that the control method has good tracking performance, high speed responsibility, small system error and strong robustness. It satisfied the requirements of the parallel robot control.

**Key words** Parallel robot, Synchronization control, Sliding mode control

### 引言

相对于农业串联机器人, 农业并联机器人具有刚度大、结构稳定、承载能力强、精度高、运动惯性小等优点。然而, 现阶段农业并联机器人还处于发展的初级阶段, 目前工作只是进行一些基础性研究, 研究重心主要集中于设计制造适应特殊情况的并联机器人机型上, 如嫁接机器人<sup>[1]</sup>、植物幼苗移植机器人<sup>[2]</sup>等。本文研究的并联机器人除具备植物嫁接、植物种子筛选、植物注射功能外, 还可以对水果进行加工, 如水果罐头加工等。

农业并联机器人拥有多条支链, 其机械结构也比传统的农业串联机器人复杂, 是多变量、多自由度、多参数耦合的非线性系统, 使得并联机器人的运动学和动力学关系都非常复杂。而并联机构多支链

间运动的协调性问题成为并联机器人运动控制的难题, 国内外学者提出了不同的控制策略<sup>[3-8]</sup>, 但他们的控制方法不是过于复杂就是控制效果不理想。鉴于此, 本文提出一种将同步控制与滑模控制相结合的控制方法, 以下简称同步滑模控制。

### 1 平面二自由度并联机器人

本文研究的冗余并联机器人<sup>[9]</sup>是由同一个平面内的3个二杆开链机构连结而成, 末端执行器安装在开链机构相互连结的地方, 整个机构由3个分别安装在基座处的交流伺服电动机驱动, 实物结构如图1所示。

为更好地研究机构各连杆间的位移关系, 建立平面二自由度并联机器人在工作平面内的坐标(坐标单位:mm), 其系统结构如图2所示。3个基座在

收稿日期: 2011-10-13 修回日期: 2011-12-25

\* 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]6号)和镇江市农业科技支撑计划资助项目(NY2011013)

作者简介: 高国琴, 教授, 博士生导师, 主要从事并联机器人及其控制研究, E-mail: gqgao@ujs.edu.cn

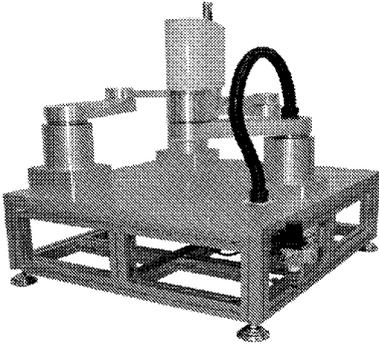


图1 二自由度并联机器人系统实物图

Fig. 1 System real figure of 2-DOF parallel robot

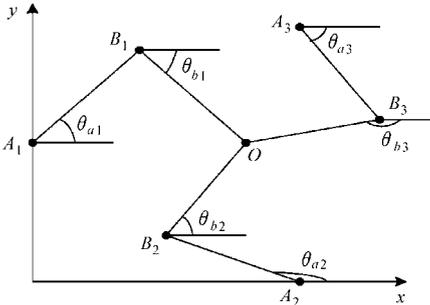


图2 二自由度并联机器人系统结构图

Fig. 2 System structure figure of 2-DOF parallel robot

坐标系中的坐标分别为  $A_1(0, 250)$ 、 $A_2(433, 0)$ 、 $A_3(433, 500)$ ，末端执行器为图中的  $O$  点，并联机器人的杆长均为  $l = 244$  mm。各个关节角度的定义如图2所示，其中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  表示3个主动关节； $\theta_{a1}$ 、 $\theta_{a2}$ 、 $\theta_{a3}$  表示3个主动关节的转角； $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  表示3个被动关节； $\theta_{b1}$ 、 $\theta_{b2}$ 、 $\theta_{b3}$  表示3个被动关节的转角。

## 2 并联机构运动学原理

### 2.1 运动学正解

正向运动学问题是指在并联机器人关节坐标已知的情况下求解所对应的末端执行器坐标。设  $A_i$  表示第  $i$  个主动关节的位置，坐标记为  $(x_{ai}, y_{ai})$ ； $B_i$  表示第  $i$  个被动关节的位置，坐标记为  $(x_{bi}, y_{bi})$ ； $\theta_{ai}$  表示第  $i$  个主动关节的转角； $\theta_{bi}$  表示第  $i$  个被动关节的转角； $O$  表示末端执行器的位置，坐标记为  $(x, y)$ ；由图2中坐标系的几何关系知

$$\begin{cases} x = x_{ai} + l \cos \theta_{ai} + l \cos \theta_{bi} \\ y = y_{ai} + l \sin \theta_{ai} + l \sin \theta_{bi} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

假设  $x_{bi} = x_{ai} + l \cos \theta_{ai}$ ， $y_{bi} = y_{ai} + l \sin \theta_{ai}$  ( $i = 1, 2, 3$ )，则由式(1)可得到一个包含3个方程的方程组

$$(x - x_{bi})^2 + (y - y_{bi})^2 = l^2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

用方程式(2)中第1个方程分别减去其他2个方程，消去二次项，可得二元一次方程组

$$\begin{cases} 2(x_{b2} - x_{b1})x + 2(y_{b2} - y_{b1})y = d_2 - d_1 \\ 2(x_{b3} - x_{b1})x + 2(y_{b3} - y_{b1})y = d_3 - d_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $d_i = x_{bi}^2 + y_{bi}^2 - l^2$  ( $i = 1, 2, 3$ )，解式(3)可以得到末端执行器的坐标

$$\begin{cases} x = \frac{d_1(y_{b2} - y_{b3}) + d_2(y_{b3} - y_{b1}) + d_3(y_{b1} - y_{b2})}{2[x_{b1}(y_{b2} - y_{b3}) + x_{b2}(y_{b3} - y_{b1}) + x_{b3}(y_{b1} - y_{b2})]} \\ y = \frac{d_1(x_{b3} - x_{b2}) + d_2(x_{b1} - x_{b3}) + d_3(x_{b2} - x_{b1})}{2[x_{b1}(y_{b2} - y_{b3}) + x_{b2}(y_{b3} - y_{b1}) + x_{b3}(y_{b1} - y_{b2})]} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 运动学反解

反向运动学是指在并联机器人末端执行器坐标已知的情况下求解所对应的关节坐标，即已知并联机构连杆末端位置  $O(x, y)$  坐标，求主动关节转角位置  $\theta_{a1}$ 、 $\theta_{a2}$ 、 $\theta_{a3}$ ，进而求解被动关节的转角  $\theta_{b1}$ 、 $\theta_{b2}$ 、 $\theta_{b3}$ 。由图2中包含的三角形  $A_i B_i O$  的几何关系，可以得到

$$\cos(\theta_{ai} - \alpha_i) = \frac{l_{A_i O}}{2l} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

其中  $\alpha_i = \arctan((y - y_{ai}) / (x - x_{ai}))$  表示直线  $A_i O$  与坐标轴  $x$  的夹角， $l_{A_i O}$  表示三角形一边  $A_i O$  的长度，从而可得到主动关节角为

$$\theta_{ai} = \arccos \frac{l_{A_i O}}{2l} + \alpha_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

因此，有被动关节转角为

$$\theta_{bi} = \arctan \left( \frac{y - y_{ai} - l \sin \theta_{ai}}{x - x_{ai} - l \cos \theta_{ai}} \right) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

显然，由式(6)可得到2个解，也就是说给定末端执行器的位置坐标，每个支链都有2组反向运动学解。由于平面二自由度并联机器人有3个支链，故整个并联机器人的反向运动学解共有8组，即对应8组运动位形。为了便于运算与分析，本文实际控制系统中选定如图2的位形。此位形对应的主动关节角为

$$\theta_{ai} = \alpha_i + \arccos(l_{A_i O} / (2l)) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

由  $\theta_{ai} \times 180 / \pi$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 可换算成角度。

## 3 并联机器人数学模型

由于并联机器人各关节之间的非线性强耦合关系，其动力学模型很复杂，基于动力学模型的控制方案很难实现，因此采用基于运动学模型的分散控制方法对并联机器人各个分支分别进行控制，从而简化并联机器人的控制结构，使控制易于实现，同时通过设计一种新型同步滑模控制方法以提高其控制性能。

由文献[9~10]可得，平面二自由度冗余驱动并联机器人各关节的驱动选用交流伺服电动机。在交流伺服电动机中，永磁同步伺服电动机性能更为卓越，应用范围更广，本系统各关节所用电动机即为

永磁同步伺服电动机。

对永磁同步伺服电动机模型作如下假设：忽略铁芯饱和；不计涡流和磁滞损耗；永磁材料的电导率为零；相绕组中感应电动势波形是正弦波。

对永磁同步伺服电动机<sup>[9]</sup>，经过 Park 变换后，其  $dq$  坐标上永磁同步电动机的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L_d & p_n \omega_r & 0 \\ -p_n \omega_r & -R/L_q & -p_n \phi_f/L_q \\ 0 & \frac{3}{2} p_n \phi_f/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d/L_d \\ u_q/L_q \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $R$ ——绕组等效电阻,  $\Omega$   
 $L_d$ ——等效  $d$  轴电感, H  
 $L_q$ ——等效  $q$  轴电感, H  
 $p_n$ ——极对数  
 $\omega_r$ ——转子角速度, rad/s  
 $\phi_f$ ——转子磁场的等效磁链, Wb  
 $T_L$ ——负载转矩, N·m  
 $i_d$ —— $d$  轴电流, A  
 $i_q$ —— $q$  轴电流, A  
 $u_d$ —— $d$  轴电压, V  
 $u_q$ —— $q$  轴电压, V  
 $J$ ——转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

为了获得线性状态方程,通常采用  $i_d \equiv 0$  的矢量控制方式得到 PMSM 的解耦状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L_q & -p_n \phi_f/L_q \\ \frac{3}{2} p_n \phi_f/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_q/L_q \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)即为 PMSM 的解耦状态方程。在零初始条件下,对永磁同步电动机的解耦状态方程求拉氏变换,以电压  $u_d$  为输入、转子速度为输出的交流永磁同步电动机系统框图如图 3 所示,其中  $K_c = p_n \phi_f$  为转矩系数。

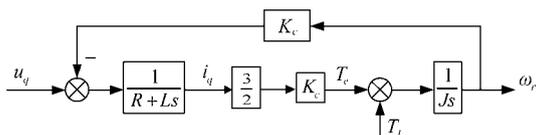


图 3 交流永磁同步电动机系统框图  
 Fig. 3 System figure of AC permanent magnet synchronous motor

图 3 为交流永磁同步电动机的系统框图,而在并联机器人系统结构中,各支路系统控制框图如图 4 所示。

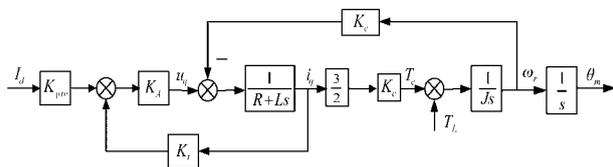


图 4 并联机器人各支路系统控制框图  
 Fig. 4 Each branch's system control figure of parallel robot

图 4 中,  $K_{pre}$  为电流信号前置放大系数(88),  $K_i$  为电流环反馈系数(2.2),  $K_A$  为电流调节器放大系数(6),  $L$  为三相绕组的电感(9.9 mH),  $T_e$  为电磁转矩。

由图 4 可得交流伺服电动机输入电流  $I_d$  与驱动轴角位移  $\theta_m$  的传递函数为

$$\frac{\theta_m(s)}{I_d(s)} = \frac{3K_{pre}K_cK_A}{2LJs^3 + 2(R + K_AK_i)Js^2 + 3K_c^2s} \quad (11)$$

代入参数并转换为状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -78410x_2 - 1707x_3 + 3622u + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbf{R}^n$  为系统状态变量,  $u, y$  分别为系统输入、输出,  $d(t)$  为外加干扰。本文研究的对象用式(12)所描述,其中外加干扰  $d(t)$  定义为 Stribeck 摩擦模型,表示为:

$$\text{当 } |\dot{\theta}(t)| < \sigma \text{ 时, 静摩擦力为 } F_f(t) = \begin{cases} F_m & (F(t) > F_m) \\ F(t) & (-F_m < F(t) < F_m) \\ -F_m & (F(t) < -F_m) \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{当 } |\dot{\theta}(t)| > \sigma \text{ 时, 动摩擦力为 } \begin{cases} F_f(t) = [F_c + (F_m - F_c)e^{-\sigma_1|\dot{\theta}(t)|}] \text{sgn}(\dot{\theta}(t)) + k_v \dot{\theta} \\ F(t) = J \ddot{\theta}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $F(t)$ ——驱动力  $F_m$ ——最大摩擦力  
 $F_c$ ——库仑摩擦力  
 $k_v$ ——粘性摩擦力力矩比例系数  
 $\dot{\theta}(t)$ ——转角速度  
 $\sigma, \sigma_1$ ——非常小的、正的常数

## 4 同步滑模控制

### 4.1 同步控制策略

同步误差代表了主动关节之间的协调关系,它不同于传统的跟踪误差。对于并联机器人来说,每个主动关节的同步误差包含了自身的误差信息,同

时也包含了相邻关节之间的误差信息<sup>[11]</sup>。下面给出并联机器人同步误差的定义。

令  $\theta_{ai}^d(t)$  为第  $i$  个主动关节的期望轨迹,则跟踪误差定义为

$$e_{ai}(t) = \theta_{ai}^d(t) - \theta_{ai}(t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

跟踪误差向量定义为

$$e_a = (e_{a1}(t), e_{a2}(t), e_{a3}(t)) \quad (16)$$

基于同步思想,各个主动关节的跟踪误差满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{a1} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a2} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a3} = 0 \quad (17)$$

式(17)可以分解为 3 个子目标,即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a1} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a2} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a2} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a3} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a3} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{a1} \end{cases} \quad (18)$$

定义 3 个主动关节中所有可能的 2 个关节之间的同步误差为

$$\begin{cases} \varepsilon_{a1}(t) = e_{a1}(t) - e_{a2}(t) \\ \varepsilon_{a2}(t) = e_{a2}(t) - e_{a3}(t) \\ \varepsilon_{a3}(t) = e_{a3}(t) - e_{a1}(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中  $\varepsilon_{ai}$ ——主动关节  $i$  的同步误差

当  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_{ai} = 0$  时,3 个主动关节的同步关系式(18)

就可以满足。传统的非同步控制方法仅考虑各自关节的控制,而这里定义的相邻主动关节的同步控制还需要满足式(18)。同步误差向量写为

$$\varepsilon_a(t) = (\varepsilon_{a1}(t), \varepsilon_{a2}(t), \varepsilon_{a3}(t)) \quad (20)$$

### 4.2 同步滑模控制器设计

根据同步控制策略,为消除各个关节差异,使各个关节达到同步运动,并结合位置误差  $e_{ai}(t)$  和同步误差  $\varepsilon_a(t)$ ,定义耦合误差

$$\begin{cases} e_{a1}^*(t) = e_{a1}(t) + r_c \int_0^t (\varepsilon_{a1}(w) - \varepsilon_{a3}(w)) dw \\ e_{a2}^*(t) = e_{a2}(t) + r_c \int_0^t (\varepsilon_{a2}(w) - \varepsilon_{a1}(w)) dw \\ e_{a3}^*(t) = e_{a3}(t) + r_c \int_0^t (\varepsilon_{a3}(w) - \varepsilon_{a2}(w)) dw \end{cases} \quad (21)$$

式中  $r_c$ ——正的耦合参数

同步误差  $\varepsilon_{ai}(t)$  以相反的方向出现在相邻 2 个主动关节的耦合误差中,这将使得相邻 2 个主动关节的耦合误差向相反的方向运动,从而有助于消除同步误差  $\varepsilon_{ai}(t)$ 。若定义同步误差之间的偏差向量

$$c_a(t) =$$

$$(\varepsilon_{a1}(t) - \varepsilon_{a3}(t), \varepsilon_{a2}(t) - \varepsilon_{a1}(t), \varepsilon_{a3}(t) - \varepsilon_{a2}(t)) \quad (22)$$

则耦合误差式(21)可写为向量形式

$$e_a^*(t) = e_a(t) + R_c \int_0^t c_a(w) dw \quad (23)$$

式中  $R_c = \text{diag}(r_c, r_c, r_c)$ ,  $r_c$  为一常数,相应的可定义耦合速度误差向量  $\dot{e}_a^*(t)$  为

$$\dot{e}_a^*(t) = \dot{e}_a(t) + R_c c_a(t) \quad (24)$$

根据滑模控制原理<sup>[12-13]</sup>,令  $e^* = e_a^*$ ,首先设计切换函数

$$s = c_1 e^* + c_2 \dot{e}^* + \ddot{e}^* \quad (25)$$

采用指数逼近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks \quad (26)$$

其中  $\varepsilon > 0, k > 0$ 。考虑系统外加干扰  $d(t)$  的影响,由式(25)得

$$\begin{aligned} \dot{s} = c_1 \dot{e}^* + c_2 \ddot{e}^* + \ddot{e}^* = c_1 \dot{e}^* + c_2 \ddot{e}^* + \ddot{r} - (-78\ 410x_2 - \\ 1\ 707x_3 + 3\ 622u + d(t)) + r_c(2\ddot{e}_1 - \ddot{e}_2 - \ddot{e}_3) \end{aligned} \quad (27)$$

式中  $r$ ——输入变量

由式(26)和(27)得到控制量

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{3\ 622} [c_1 \dot{e}^* + c_2 \ddot{e}^* + \ddot{r} + \varepsilon \text{sgn}(s) + ks + \\ 78\ 410x_2 + 1\ 707x_3 - d(t) + r_c(2\ddot{e}_1 - \ddot{e}_2 - \ddot{e}_3)] \end{aligned} \quad (28)$$

稳定性证明:定义 Lyapunov 函数  $V = \frac{1}{2} s^2$ , 则

$\dot{V} = s \dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) s - ks^2$ 。因为  $\text{sgn}(s)$  的符号与  $s$  的符号始终相同,所以  $s \text{sgn}(s) \geq 0$ ,又因为  $\varepsilon > 0, k > 0, s^2 \geq 0$ ,所以  $\dot{V} \leq 0$ ,系统稳定。

由式(28)设计平面二自由度并联机器人系统控制方案,如图 5 所示。

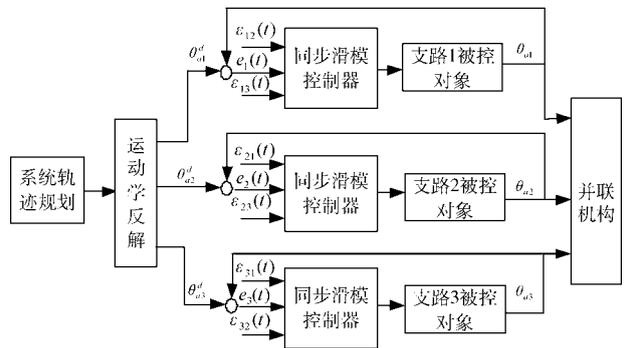


图 5 并联机器人系统控制方案

Fig. 5 System control figure of parallel robot

图 5 中,  $e_1, e_2, e_3$  为各支路的跟踪误差,  $\varepsilon_{12}(t), \varepsilon_{13}(t)$  为关节 1 相对关节 2、3 的耦合误差,  $\varepsilon_{21}(t), \varepsilon_{23}(t)$  为关节 2 相对关节 1、3 的耦合误差,  $\varepsilon_{31}(t), \varepsilon_{32}(t)$  为关节 3 相对关节 1、2 的耦合误差。

### 4.3 仿真

本文研究的机器人系统如图 6 所示,整个系统包含冗余并联机构本体、电控箱及由运动控制卡和 PC 机组成的控制平台等部分:控制平台由一台 PC

机和插在该PC机中的运动控制卡组成；电控箱主要由交流伺服驱动器、24V直流电源、运动控制器端子板、接口插座、断路器、接触器、按钮开关等组成；冗余并联机构本体包括机构平台、并联机械臂和驱动装置。

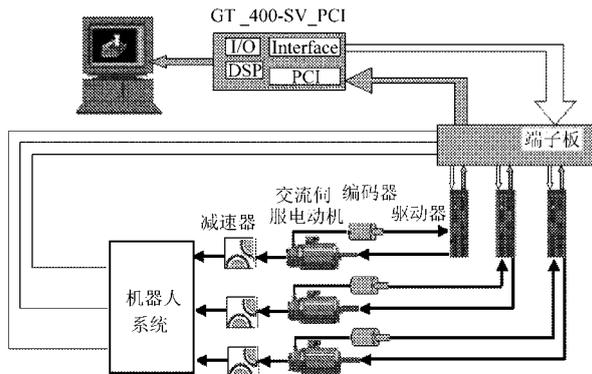


图6 并联机器人系统控制原理图

Fig.6 Control system diagram of parallel robot

为验证所设计控制系统的有效性，运用Matlab对二自由度并联机器人控制系统进行仿真<sup>[14]</sup>，并将仿真结果与基于常规误差的滑模控制仿真结果相比较。首先规划并联机构末端执行的期望轨迹，假设末端执行器C点跟踪以(290mm, 250mm)为圆心，半径为30mm的圆形轨迹，则C点的期望轨迹为

$$\begin{cases} x_d = 290 + 30\cos t \\ y_d = 250 + 30\sin t \end{cases} \quad (29)$$

式中  $t$ ——时间

设C点的起始坐标为(320mm, 250mm)，初始条件  $x(0) = (0.5, 0, 0)$ ，运动时间为6s；选取滑模面及控制器参数分别为： $c_1 = 10, c_2 = 5, \varepsilon = 33, k = 5.0, r_c = 7.77$ 。

系统仿真结果如图7~10所示。

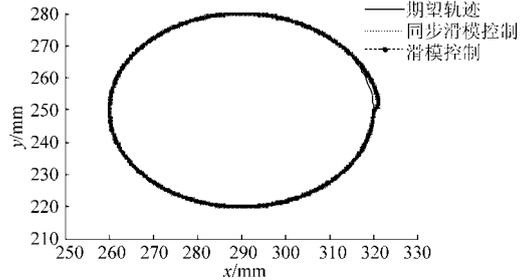


图7 末端执行器轨迹仿真结果

Fig.7 Trajectories of end actuator

图7表明，同步滑模控制比基于常规误差的滑模控制在末端轨迹跟踪控制上有更快的响应速度，更好的跟踪性能；图8为各支路跟踪轨迹的比较图，仿真结果表明在0.45s左右时，同步滑模控制系统由初始状态达到稳定状态，而基于常规误差的滑模控制系统则在0.9s左右达到稳定状态，同步滑模控制比传统滑模控制有更快响应速度，稳态性能更好；图9为3个支路的转角跟踪误差比较图，比较结果表明，同步滑模控制能够更好地抑制系统的跟踪误差，具有较强的鲁棒性；图10a为支路3转角跟踪误差比较图，图10b、10c分别为同步滑模控制、传统

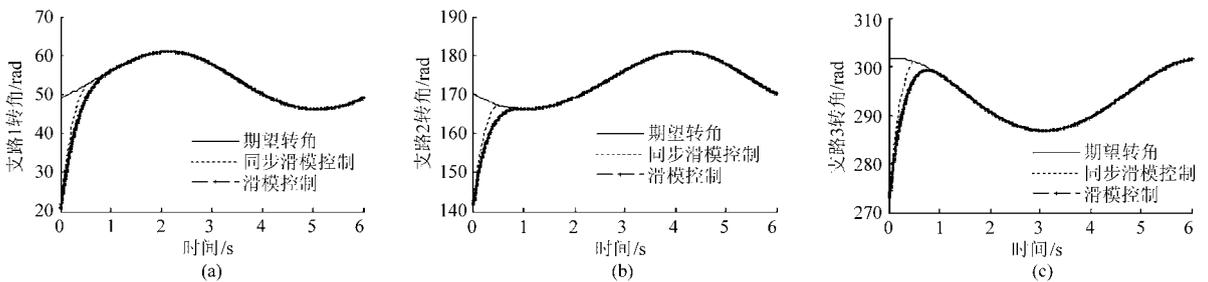


图8 支路轨迹跟踪曲线

Fig.8 Trajectory tracking of branch

(a) 支路1 (b) 支路2 (c) 支路3

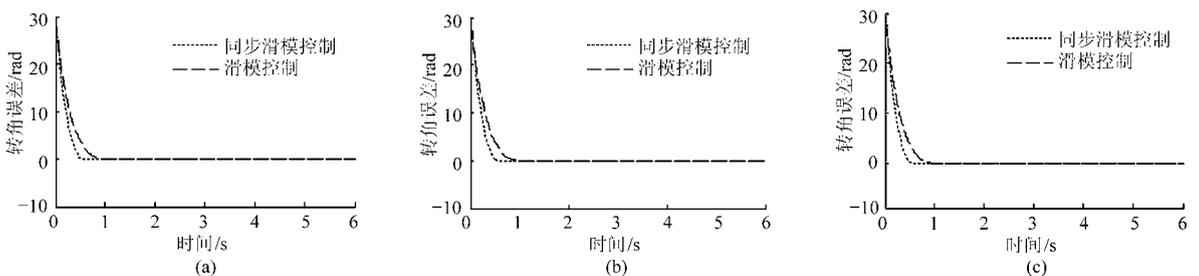


图9 支路跟踪误差曲线

Fig.9 Tracking errors of branch

(a) 支路1 (b) 支路2 (c) 支路3

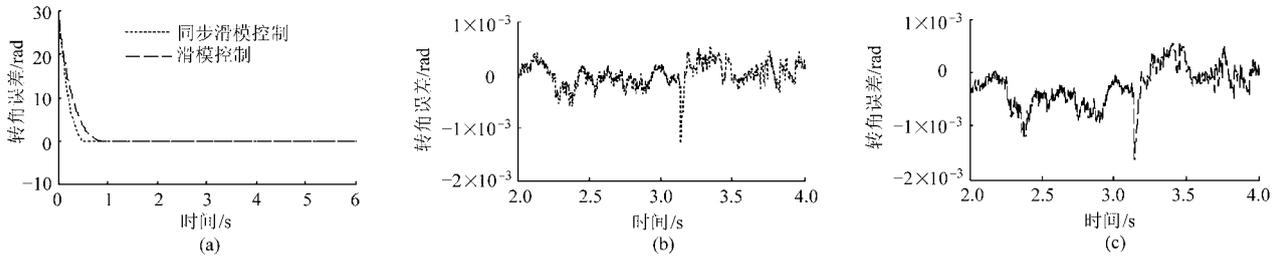


图10 支路3的跟踪误差及放大图

Fig. 10 Tracking errors of branch No. 3 and amplification figure

(a) 支路3转角误差 (b) 支路3同步滑模控制转角误差放大图 (c) 支路3传统滑模控制转角误差放大图

滑模控制下的放大图,从图中可以看出系统稳态误差的数量级达到了 $10^{-3}$ ,所设计的同步滑模控制算法有较高的跟踪精度,两图对比可以看出,同步滑模控制能够有效地减小系统的跟踪误差,同时在各支路间起到有效的协调作用。支路1和支路2的跟踪误差与支路3相似,这里不再赘述。

为进一步验证所设计控制器的有效性,在实验平台上进行实验验证。实验目标:使末端执行器在10 s内规划出一个半径为30 mm的圆,实验效果如图11所示。

从图11可以看出,所设计的控制器能够满足控制精度要求。实际运动时间略有偏差,实验结果同时也验证了所设计控制器的有效性。

## 5 结论

(1)从仿真的结果可以看出,同步滑模控制具有以下优点:收敛速度快,在0.45 s左右系统稳定;

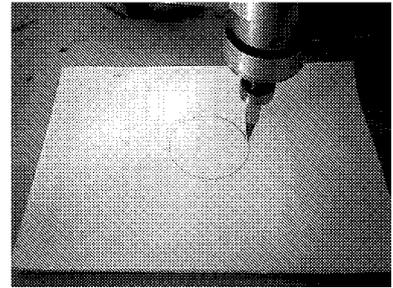


图11 实验平台末端轨迹效果图

Fig. 11 Tracking figure of experimental platform

跟踪性能好,系统误差小,系统稳态误差的数量级达到了 $10^{-3}$ ;鲁棒性强,对外部干扰有较好的调节作用,能够满足并联机器人的控制要求。

(2)同步滑模控制为解决并联机构中多支链相对末端执行器运动的协调性和耦合性问题提供了一种有效方法,仿真和实验结果表明了该方法的有效性。

(3)提出的并联机器人控制方法为农业并联机器人在实际应用中奠定了理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 Tian Subo, Xu Donglei. Current status of grafting robot for vegetable [C]. Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference, 2011: 1 954 ~ 1 957.
- 2 杨丽,刘恩托,张铁中. 组培苗移植机器人机械臂的设计[J]. 农机化研究,2009, 31(1):103 ~ 105.  
Yang Li, Liu Entuo, Zhang Tiezhong. Design on manipulator of tissue culture plantlet transplanting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(1):103 ~ 105. (in Chinese)
- 3 刘伊威,陈养彬,金明河,等. 机器人灵巧手基关节交叉耦合同步控制[J]. 机器人,2010(2):150 ~ 156.  
Liu Yiwei, Chen Yangbin, Jin Minghe, et al. Synchronized cross-coupled control for base joint of dexterous robot hand [J]. Robot, 2010(2): 150 ~ 156. (in Chinese)
- 4 Sun D, Lu R, Mills J K, et al. Synchronous tracking control of parallel manipulator using cross-coupling approach [J]. International Journal of Robotics Research, 2006,25(11):1 137 ~ 1 147.
- 5 尚伟伟. 平面二自由度并联机器人的控制策略及其性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.  
Shang Weiwei. Plane 2-DOF parallel robot control strategy and performance study [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- 6 曹玲芝,李春文,牛超,等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报,2008, 12(5): 587 ~ 592.  
Cao Lingzhi, Li Chunwen, Niu Chao, et al. Synchronized sliding-mode control for multi-induction motors based on adjacent cross-coupling [J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5):587 ~ 592. (in Chinese)
- 7 Stan S D, Maties V, Balan R. Genetic algorithms multiobjective optimization of a 2 DOF micro parallel robot [C] // 2007 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2007: 780 ~ 783.

- He Yong, Ge Xiaofeng, Yu Haihong, et al. Analyses of measurement precision of GPS for agricultural purposes and method for improving precision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 168 ~ 171. (in Chinese)
- 4 周俊, 张鹏, 宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 189 ~ 192.  
Zhou Jun, Zhang Peng, Song Baihua. Analysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 189 ~ 192. (in Chinese)
- 5 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 汽车稳定性控制系统侧偏角道路试验测试系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 1 ~ 5.  
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Sideslip angle roadway test system for vehicle stability control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 6 Martin Herrmann, Dieter Barz, Wolfgang Evers, et al. An evaluation of the mechanical properties of wheel force sensors and their impact on to the data collected during different driving maneuvers [C]. SAE Paper 2005 - 01 - 0857, 2005.
- 7 Kistler Automotive GmbH. Corveit S - 350 non-contact optical sensors, type CS350A [M]. 2011.
- 8 吴宗泽, 罗圣国. 机械设计课程设计手册 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 9 GB/T 7031—2005 机械振动道路路面谱测量数据报告 [S]. 2005.  
GB/T 7031—2005 Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data [S]. 2005. (in Chinese)
- 10 Racelogic Ltd. Frequency input module RLVBFI03 instruction manual [M]. 2010.
- 11 Trimble Navigation Limited. Getting started guide-Trimble SPS852 modular GPS receiver [M]. ver 4. 41A. 2011.
- 12 Kvaser A B. Kvaser USBcan II user's guide [M]. 2010.

~~~~~

(上接第 178 页)

- 8 Yingda Dai, Konishi M, Imai J. A cooperative motion control of 2-DOF robot arms by neuro-evolved agents [C] // ICICIC '07, Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2007: 109 ~ 111.
- 9 孙迪生, 王炎. 机器人控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- 10 Thomas Herold, David Franck, Enno Lange, et al. Extension of a D-Q model of a permanent magnet excited synchronous machine by including saturation, cross-coupling and slotting effects [C] // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2011: 1 363 ~ 1 367.
- 11 Wang Can, Sun Dong. A synchronization control strategy for multiple robot systems using shape regulation technology [C] // 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008 WCICA, 2008: 467 ~ 472.
- 12 Zhao D, Li S, Gao F, et al. Robust adaptive terminal sliding mode-based synchronized position control for multiple motion axes systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2009, 3(1): 136 ~ 150.
- 13 O-Shin Kwon, Seung-Hoe Choe, Hoon Heo. A study on the dual-servo system using improved cross-coupling control method [C]. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2011: 1 ~ 4.
- 14 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

~~~~~

(上接第 189 页)

- 16 冯建辉, 杨玉静. 基于灰度共生矩阵提取纹理特征图像的研究 [J]. 北京测绘, 2007(3): 19 ~ 22.  
Feng Jianhui, Yang Yujing. Study of texture images extraction based on gray level concurrence matrix [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2007(3): 19 ~ 21. (in Chinese)
- 17 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 24 ~ 26.  
Zhang Peng. Research on synthetic evaluation based on principal component analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science Technology, 2004: 24 ~ 26. (in Chinese)
- 18 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 152 ~ 158.
- 19 Castleman K R. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 513 ~ 515.
- 20 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉——Visual C 与 Matlab 实现 [M]. 人民邮电出版社, 2010: 287 ~ 293.
- 21 李先锋, 朱伟兴, 纪滨, 等. 基于特征优化和 LS-SVM 的棉田杂草识别 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 168 ~ 172.  
Li Xianfeng, Zhu Weixing, Ji Bin, et al. Weed identification based on features optimization and LS-SVM in the cotton field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 168 ~ 172. (in Chinese)