

农用机器人转向系统自适应内模控制*

焦俊¹ 江朝晖¹ 金瑞春² 许正荣¹ 刘波¹

(1. 安徽农业大学信息与计算机学院, 合肥 230036; 2. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

【摘要】 针对农用机器人转向系统状态和控制具有复杂、时滞和增益时变的特性,将 Adaline 神经网络(ANN)与内模控制相结合,提出一种在线调整时滞时间和控制增益的自适应控制方法。建立基于 Adaline 网络的增益与时滞的辨识算法,即通过反馈误差在线优化,适应性地调整时滞时间和增益,克服参数时变对内模控制和被控对象模型的影响。仿真和试验结果表明,与常规的 PID 控制方法相比,该方法具有较高的控制精度、较强的自适应性和鲁棒性,完全适用于农用机器人转向系统的控制。

关键词: 农用机器人 转向系统 自适应内模控制 非线性 PID 控制 Adaline 神经网络

中图分类号: TP273; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0186-06

Adaptive Internal Model Control for Agricultural Robot Steering System

Jiao Jun¹ Jiang Chaohui¹ Jin Ruichun² Xu Zhengrong¹ Liu Bo¹

(1. College of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

Aiming at the characteristics of complex, time-delay and gain time-variation of agricultural robot steering system, the Adaline neural network (ANN) was applied to internal model control (IMC). An adaptive control method for time-delay online adjusting and gain control was proposed. An algorithm based on Adaline neural networks could adjust time-delay and gain adaptively, and overcome effects of time-variation parameters on IMC and plant model by online optimizing feedback error. Simulations and experimental results verified that compared to conventional PID control method, the proposed control method possessed the advantage of high precision, great adaptability and robustness, so it is feasible for agricultural robot steering system.

Key words Agricultural robot, Steering system, Adaptive internal model control, Nonlinear PID control, Adaline neural network

引言

自动转向控制技术是农用机器人实现自动导航的基础,也是研究农用机器人的核心问题之一^[1]。受转向机构自身和环境的影响,转向系统中存在时滞和外部干扰的问题。时滞会使控制的校正作用滞后一定时间,导致被调量的最大偏差增大,也会引起系统相位滞后;干扰会降低控制的准确性。为了保

证系统的稳定性,就不得不减小控制的放大倍数,从而使得控制调节品质大大下降。

常规转向控制大都采用 PID 控制或最优控制^[2-3],常规 PID 控制是单偏差控制,很难适应转向时滞现象;最优控制一般都把被控对象简化为线性时不变系统,这将降低农用机器人的稳定性;文献[4]提出具有良好跟踪性和鲁棒性的变结构控制,但是需要通过试验确定加速度达到律中的参数

收稿日期: 2011-04-18 修回日期: 2011-06-16

* 安徽省国际科技合作计划资助项目(10080703029)、安徽农业大学引进和稳定人才基金资助项目和安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2007B080)

作者简介: 焦俊,副教授,博士,主要从事智能控制和机器人研究,E-mail: jiaojun2000@sina.com

通讯作者: 江朝晖,副教授,博士,主要从事人工智能研究,E-mail: jiangzh@ahau.edu.cn

以及有待试验验证其可靠性。

内模控制(IMC)具有良好的跟踪性能和抗干扰能力,并对模型失配具有一定的鲁棒性^[5-6]。但是当增益和时滞发生变化时,控制性能会出现不稳定、甚至变坏的现象。因此,本文提出自适应内模控制方法,根据转向系统的运行状态,利用 Adaline 神经网络(ANN),在线辨识被控对象辨识模型的转向时滞和控制增益,对模型失配或外部扰动进行超前预估,克服时滞带来的不利影响。

1 转向系统及转向模型

农用机器人的转向系统由前轮、步进电动机转向器及机械转向机构组成,系统结构如图 1 所示。

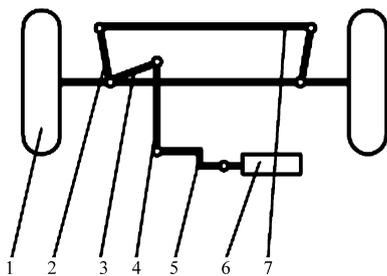


图 1 转向系统示意图

Fig. 1 Steering system

- 1. 转向轮 2. 梯形臂 3. 转向节臂 4. 转向直拉杆 5. 转向摇臂
- 6. 步进电动机转向器 7. 转向横拉杆

转向器接收到转向控制器的偏转信号后,带动转向摇臂旋转,转向摇臂使转向直拉杆作垂直方向的平动,再带动转向节臂转向,同时转向节臂带动梯形臂和左轮转动,梯形臂带动转向横拉杆作横向平移,最终使右侧的转向节臂转动,实现转向系统右轮转向。本转向系统以两相混合式步进电动机为转向器,传递函数为^[1-2]

$$G_p(s) = \frac{\theta'}{\theta} \quad (1)$$

式中 θ' ——转向器输出角度

θ ——转向器输入角度

式(1)经过微分方程转换^[7],得到转子的运动方程

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + p\phi_m i_A \sin(p\theta) + p\phi_m i_B \sin(p(\theta - \lambda)) = 0 \quad (2)$$

式中 J ——电动机折合到电动机轴上的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

f ——电动机折合到电动机轴上的粘性摩擦系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{rad}$

λ ——极距角

ϕ_m ——永磁体交链磁通

p ——转子齿数,在本转向系统中 $p = 50$

i_A 和 i_B 分别是 A、B 相电流,在 $i_A = i_B = i_0$ 的初始条件下,对式(2)进行拉普拉斯变换,得到转向系统传递函数

$$G_p(s) = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{2p^2 \phi_m I_0}{Js^2 + fs + 2p^2 \phi_m I_0} = \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{np}s + \omega_{np}^2} \quad (3)$$

式中 I_0 ——额定相电流

ω_{np} ——无阻尼固有频率

ξ ——衰减系数

由于转向系统机械结构和环境的原因,使得转向系统存在一个延时环节和增益变化的问题。因此传递函数可近似表示为

$$G_p(s) = K \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{np}s + \omega_{np}^2} e^{-ds} \quad (4)$$

其中 $\omega_{np} = \sqrt{2p^2 \phi_m I_0 / J}$ $\xi = f / (2J\omega_{np})$

式中 K ——增益 d ——延迟时间

2 基于 ANN 的增益和时滞自适应内模控制

2.1 设计思想

基于 ANN 的增益和时滞自适应内模控制系统的总体结构如图 2 所示。

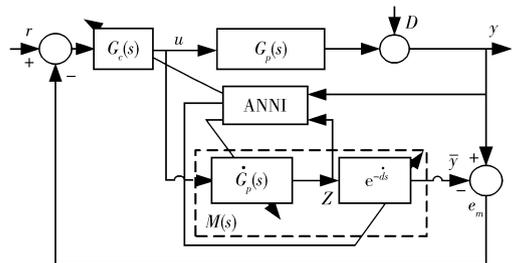


图 2 自适应内模控制原理框图

Fig. 2 Principle architecture of self-tuning IMC control

图中 $G_p(s) = \frac{K}{as^2 + bs + c} e^{-ds}$ 是传递函数,

$M(s) = \hat{G}_p(s) e^{-\hat{d}s} = \frac{\hat{K}}{as^2 + bs + c} e^{-\hat{d}s}$ 是传递函数模型,

$G_c(s)$ 是内模控制器。 r 、 u 、 e_m 、 y 、 \bar{y} 、 D 分别是系统输入、反馈控制器输出、模型误差、系统实际输出、辨识输出和干扰。辨识网络 ANN 对系统输出 y 和无时间延迟的 Z 进行采样,对被控对象的增益和时间延迟进行在线估计,并相应调整内模控制器参数,实现对转向系统的自适应控制。

2.2 基于 pade 的 IMC - PID 内模控制

传递函数式(4)可以表示为通式

$$G_p(s) = \frac{K}{as^2 + bs + c} e^{-ds} \quad (5)$$

式(5)中纯滞后环节用 $1/\text{pade}$ ^[8-9] 近似代替,成为

$$e^{-ds} = \frac{1 - 0.5ds}{1 + 0.5ds} \quad (6)$$

被控对象的辨识模型为

$$M(s) \approx \frac{\dot{K}}{as^2 + bs + c} \frac{1 - 0.5ds}{1 + 0.5ds} \quad (7)$$

将被控对象的模型分解为

$$M_-(s) = \frac{\dot{K}}{as^2 + bs + c} \frac{1}{1 + 0.5ds} \quad (8)$$

$$M_+(s) = 1 - 0.5ds \quad (9)$$

选用一阶低通滤波器

$$f(s) = \frac{1}{1 + \varepsilon s} \quad (10)$$

式中 ε ——滤波器时间常数

设计 IMC 控制器

$$G_c(s) = M_-^{-1}(s)f(s) \approx \frac{as^2 + bs + c}{\dot{K}} \frac{1 + 0.5ds}{1 + \varepsilon s} \quad (11)$$

根据内模控制器与反馈控制器关系^[10-11], 可得反馈控制器

$$C(s) = \frac{G_c(s)}{1 - \dot{G}(s)G_c(s)} \approx \frac{(as^2 + bs + c)(1 + 0.5ds)}{\dot{K}(1 + \varepsilon s)} \frac{1}{1 - \frac{1 - 0.5ds}{1 + \varepsilon s}} \approx \frac{as^2 + bs + c}{\dot{K}(\varepsilon + 0.5d)s} \quad (12)$$

采用 PID 控制器^[12]

$$C_{pid} = \frac{K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)}{T_i s} \quad (13)$$

将式(12)实现的控制算法与式(13)等效, 可得恒等式

$$\begin{cases} K_p = \frac{b}{\dot{K}(\varepsilon + 0.5d)} \\ T_i = \frac{b}{c} \\ T_d = \frac{a}{b} \end{cases} \quad (14)$$

式中 K_p ——比例系数 T_d ——微分时间

T_i ——微分时间

a, b, c ——传递函数所决定的常数

在参数整定过程中, 只有滤波器时间常数 ε, \dot{K} 和时滞 d 需要调整。

滤波器的时间常数 ε 设定为时滞时间的一半, 即 $\varepsilon = 0.5d$, 这样反馈滤波器可以保证原系统的快速性和稳定性。

3 基于 ANN 的增益和时滞辨识算法

Adaline 是一个连续时间的线性网络, 在任意时刻, 输入与输出是线性关系。权值在线调整时, 这种关系作为时间的函数是非线性的。基于 Adaline 网络辨识对象增益和时滞的模型结构如图 3 所示^[13-14]。其中: $y(nT)$ 为被控对象输出的采样值; $\hat{y}(nT)$ 为 Adaline 网络输出的采样值; $\mathbf{Z}(nT)$ 为被控对象无延时时时的采样值; $e(nT)$ 为 $y(nT)$ 和 $\hat{y}(nT)$ 之间的差值; $\mathbf{W} = [w_0, w_1, \dots, w_p]$ 为 Adaline 网络权值向量; LMS 表示 Adaline 网络权值的最小二乘学习算法; Δ 表示单位延迟单元。

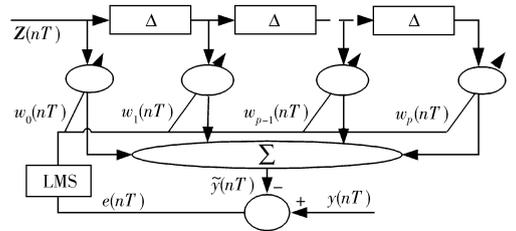


图 3 Adaline 网络结构图

Fig. 3 Structure of Adaline network

输入向量 $\mathbf{Z}(nT)$ 经过延迟单元, 其各分量被系数向量 $\mathbf{W}(nT)$ 对应的分量加权, 以和的形式输出, 其中

$$\hat{y}(nT) = \mathbf{W}^T(nT)\mathbf{Z}(nT) \quad (15)$$

$$\mathbf{Z}(nT) = [z(nT), z((n-1)T), \dots, z((n-p)T)]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{W}(nT) = [w_0(nT), w_1(nT), \dots, w_p(nT)]^T \quad (17)$$

采用最小均方学习算法 (LMS) 对权值向量 $\mathbf{W}(nT)$ 进行调整, 调整公式为^[15]

$$\mathbf{W}((n+1)T) = \begin{cases} \mathbf{W}(nT) + \frac{\alpha e(nT)\mathbf{Z}(nT)}{\mathbf{Z}(nT)^T\mathbf{Z}(nT)} & (\mathbf{Z}(nT)^T\mathbf{Z}(nT) \neq 0) \\ \mathbf{W}(nT) & (\mathbf{Z}(nT)^T\mathbf{Z}(nT) = 0) \end{cases} \quad (18)$$

式中 α ——权值修正系数, $0 < \alpha < 1$

在学习过程中, 式(18)反复迭代, 直到目标函数 J 小于给定值为止, 完成自适应功能。

$$J = \frac{1}{2}(y(nT) - \hat{y}(nT))^2 \quad (19)$$

被控对象的输出和时无滞输出分别为

$$y(nT) = \mathbf{K}g((n-\tau)T) + \boldsymbol{\theta}(nT) \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}(nT) = \mathbf{g}(nT) + \boldsymbol{\phi}(nT) \quad (21)$$

式中 T ——采样周期 τT ——延迟时间

$\boldsymbol{\theta}(nT), \boldsymbol{\phi}(nT)$ ——白噪声

$g(nT)$ 、 $g((n-\tau)T)$ ——无时滞响应信号和时滞信号

Adaline 网络的输出为

$$\hat{y}(nT) = \sum_{i=0}^p w_i(nT)Z((n-i)T) \quad (22)$$

Adaline 神经网络稳定后有

$$\hat{y}(nT) = y(nT) \quad (23)$$

将式(20)、(22)代入式(23),再进行拉氏变换^[16-18]得

$$\dot{K}e^{-s\tau T} = \sum_{i=0}^p w_i e^{-siT} \quad (24)$$

令 $s=0$, 得
$$\dot{K} = \sum_{i=0}^p w_i \quad (25)$$

式(24)两边对 s 求导,并令 $s=0$, 得

$$\tau = \frac{\sum_{i=0}^p w_i i}{\dot{K}} = \frac{\sum_{i=0}^p w_i i}{\sum_{i=0}^p w_i} \quad (26)$$

$$\dot{d} = \tau T \quad (27)$$

式(25)和式(27)分别表示 Adaline 网络权值与增益 \dot{K} 及时滞 \dot{d} 之间的关系,根据辨识结果可以改变辨识模型的增益 \dot{K} 和时滞 \dot{d} 。

4 转向系统仿真与试验

4.1 仿真分析

取转向系统参数^[1-2] $\omega_{np} = 257.4 \text{ Hz}$, $\xi = 0.524$, $K = 1$, 由式(4)可得转向系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{66\ 274.6}{s^2 + 269.6s + 66\ 274.6} e^{-ds} \quad (28)$$

利用 Z-N 整定法得到 PID 控制器参数为 $k_p = 0.442$, $k_d = 0.035$, $k_i = 1.921$ 。根据式(28)计算出 $a = 1.509 \times 10^{-5}$, $b = 0.004\ 07$, $c = 1$; 利用式(14)分别计算出 $T_i = 0.004\ 07$, $T_d = 0.003\ 707$, $K_p = \frac{0.004\ 07}{\varepsilon + 0.5\dot{d}}$, 定义滤波器时间常数 $\varepsilon = 0.5\dot{d}$ 。

设采样周期 T 为 0.01 s , 将单位阶跃信号作为自适应内模控制和 PID 控制的参考输入, 通过仿真分析放大倍数和时滞变化引起模型失配时, 不同控制方法对转向系统的控制效果。

(1) 当被控对象模型准确时

自适应内模控制 (IMC-PID) 与 PID 控制的仿真曲线如图 4, 在 $t=0$ 时加入单位阶跃信号。

设定转向系统时滞 $d = 0.03 \text{ s}$, 增益常数 $K = 1$, 自适应内模控制与 PID 控制的调节时间 t_s 和超调量 σ 分别为: $t_{s1} = 0.25 \text{ s}$, $\sigma_1 = 15.4\%$; $t_{s2} = 0.41 \text{ s}$, $\sigma_2 = 18\%$ 。虽然两种控制都具有近零稳态误差、控

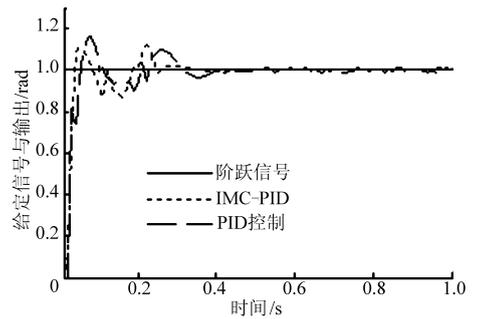


图 4 阶跃响应仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of step response

制精度较高的优点,但是自适应内模控制的响应速度更快,超调更小,稳态误差更小。

(2) 当增益 K 失配 $\pm 25\%$ 时

自适应内模控制与 PID 控制的仿真曲线如图 5, 在图 5a 中, $t=0.1 \text{ s}$ 处, K 失配 25% , 这两种控制方法的调节时间 t_s 和超调量 σ 分别为: $t_{s1} = 0.32 \text{ s}$, $\sigma_1 = 16\%$; $t_{s2} = 0.43 \text{ s}$, $\sigma_2 = 17.5\%$ 。

在图 5b 中, $t=0.1 \text{ s}$ 处, K 失配 -25% 时, 调节时间 t_s 和超调量 σ 分别为: $t_{s1} = 0.31 \text{ s}$, $\sigma_1 = 15\%$; $t_{s2} = 0.41 \text{ s}$, $\sigma_2 = 17\%$ 。可见, 本文设计的自适应内模控制调节时间短、超调量小并具有良好的增益自适应性。

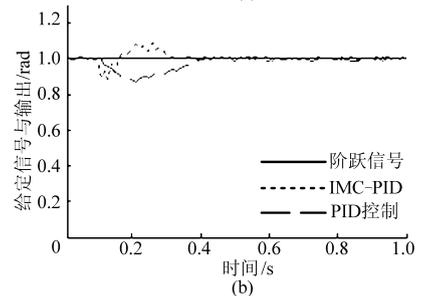
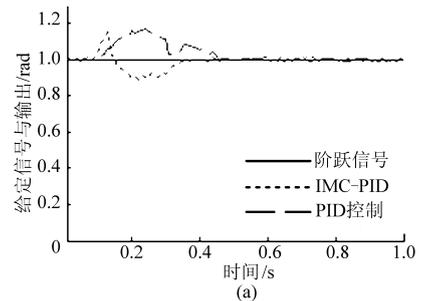


图 5 增益 K 失配时仿真曲线

Fig. 5 Simulation results of gain K mismatch

(a) 增益 K 失配 25% (b) 增益 K 失配 -25%

(3) 以幅值为 0.12 的外扰 D 干扰控制系统时

分别以 IMC-PID 和 PID 控制响应阶跃信号。稳定后, 在 $t=0.6 \text{ s}$ 处引入外扰信号 D , 同时引起增益 K 和时滞 d 失配, 仿真结果如图 6 所示。在被控对象特性发生变化后, Adaline 神经网络实时辨识变化的增益 \bar{K} 和时滞 \bar{d} , 收敛时 $\mathbf{W} = [0.998\ 7, 0.036\ 7, 0.007\ 5, 0.067\ 5, 0.030\ 2]^T$, 根

据式(25)和式(27),辨识出变化的增益和时滞为:

$$\dot{K} = \sum_{i=0}^4 w_i = 1.1406, \dot{d} = \sum_{i=0}^4 w_i i / (\dot{K}T) = 0.00327$$

自适应内模控制与PID控制的调节时间和超调量分别为: $t_{s1} = 0.23$ s, $\sigma_{s1} = 10.5\%$; $t_{s2} = 0.34$ s, $\sigma_{s2} = 11.5\%$ 。可见,Adaline神经网络可以很好的辨识出控制对象增益 K 和时滞 d 的变化,也可以看出自适应内模控制具有更好的鲁棒性。

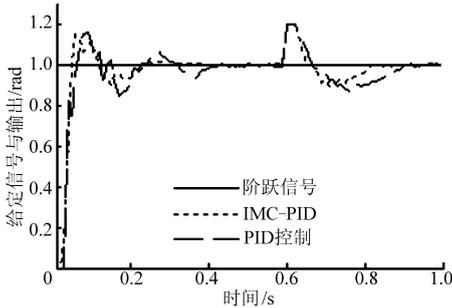


图6 时滞时间和增益失配的仿真结果

Fig.6 Simulation results of time-delay and gain mismatch

4.2 试验验证

为了检验所设计的控制方法,验证仿真结果,在自制的农用机器人上进行了实时转向控制试验。农用机器人的长度、宽度和高度分别是 1.2 m、0.7 m、0.6 m。转向控制系统如图7所示,DEC2812开发板为控制器,步进电动机和驱动器分别是85BYGH250C-2、WZM-2H090MK,细分为8,步进电动机步距角是 0.22° ,最大转速脉冲频率是2 kHz。角度传感器是AME-B002,测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,输出 0.5~4.5 V 模拟信号,控制器通过A/D转换获得角度信息。

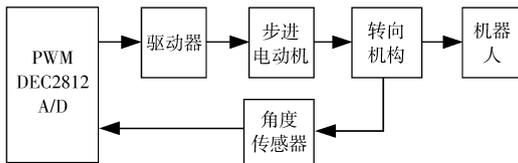


图7 控制系统结构原理图

Fig.7 Structural principle of control system

参考4.1节的PID控制参数,经过试验,确定控制器参数 $k_p = 0.455$, $k_d = 0.064$, $k_i = 1.647$ 。根据

式(28)计算出 $a = 1.509 \times 10^{-5}$, $b = 0.00407$, $c = 1$,再利用IMC-PID参数的计算式(14),计算出 $T_i = 0.00407$, $T_d = 0.003707$, $K_p = 0.00407 / (\dot{K}d)$,取滤波器时间常数 $\varepsilon = 0.5\dot{d}$ 。

试验在牧草地上进行,机器人跟踪的路径1是 $y_1 = 2\sin(x/10)$,幅度为 2.0 m;路径2是函数 $x^2 + (y-r)^2 = r^2$,设定的半径分别为 $r_1 = 10$ m, $r_2 = 5$ m, $r_3 = 2$ m的圆形路径,运行速度是 2 m/s。

机器人在IMC-PID和PID控制下跟踪正弦路径的轨迹如图8所示,从图8可以发现,在正弦的非顶点处,IMC-PID控制的跟踪轨迹比PID控制的轨迹平滑,偏差更小;在正弦路径顶点,路径的曲率变化较大,机械转向幅度相应增大,机器人的侧滑和离心力影响较为严重,产生更大的时滞和外界的干扰,但是IMC-PID控制表现出比PID控制更好的适应性。

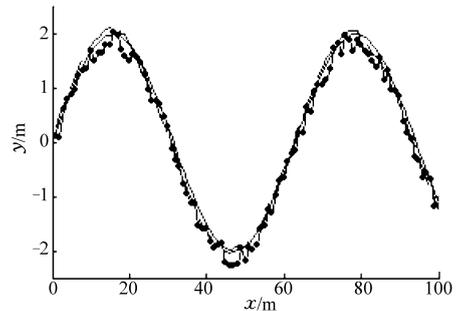


图8 正弦路径及行驶轨迹

Fig.8 Sinusoidal path and trajectory

试验进行了32 s,采集了一个正弦周期320个点数据。两种控制方式的控制效果如表1。从表1可知,IMC-PID控制效果优于PID控制。

当机器人分别在IMC-PID和PID控制下,沿半径 $r_1 = 10$ m, $r_2 = 5$ m, $r_3 = 2$ m的圆形路径行驶,分别采集一个圆周的314个点、157个点和63个点。跟踪控制效果如表2。

从表2可以看出,当机器人在IMC-PID控制下,行驶路径的曲率变大时,产生的偏差基本保持不变;而机器人在PID控制下,随着行驶路径的曲率变大产生的偏差增大,控制的稳定性较差。

表1 IMC-PID与PID控制跟踪正弦路径的偏差表

Tab.1 Deviation table of tracking sinusoidal path with IMC-PID controller and PID controller respectively m

路径	IMC-PID 控制			PID 控制		
	最大偏差	平均偏差	标准偏差	最大偏差	平均偏差	标准偏差
$y = 2\sin(x/10)$	0.200	0.081	0.038	0.251	0.169	0.098

表 2 IMC - PID 与 PID 控制跟踪圆形路径的偏差表

Tab.2 Deviation table of tracking circular path of IMC - PID controller and PID controller

m

半径/m	IMC - PID 控制			PID 控制		
	最大偏差	平均偏差	标准偏差	最大偏差	平均偏差	标准偏差
10	0.180	0.078	0.054	0.245	0.166	0.092
5	0.201	0.082	0.041	0.251	0.178	0.114
2	0.211	0.079	0.053	0.282	0.212	0.171

5 结束语

通过理论分析与试验研究可知,基于 Adaline 网络辨识增益与时滞的自适应内模控制方法,具有辨识原理清晰简单的特点。该控制不仅能够较短时间内克服稳态增益失配带来的影响,而且对于时

滞参数变化引起的模型失配有较强的适应能力。仿真与试验表明,自适应内模控制响应速度快、调节时间短、超调量小。采用这种控制方法来控制农用机器人转向系统,可以获得很好的动态性能、抗干扰能力和鲁棒性。

参 考 文 献

- 焦俊,陈无畏,王继先,等. 基于 RBF 在线辨识的 AGV 转向单神经元 PID 控制[J]. 仪器仪表学报,2008,29(7):1431~1435.
Jiao Jun, Chen Wuwei, Wang Jixian, et al. Single neuron PID control of AGV steering system based on RBF neural network on-line identification[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(7):1431~1435. (in Chinese)
- 焦俊,陈无畏,李绍稳,等. 基于改进 PSO 的智能车辆转向自适应 PID 控制[J]. 安徽大学学报:自然科学版,2008,32(6):60~64.
Jiao Jun, Chen Wuwei, Li Shaowen, et al. Self-adaptive PID control for intelligent vehicle steering system based on IPSO [J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2008,32(6):60~64. (in Chinese)
- Martinet P, Thibaud C. Automatic guided vehicles: robust controller design in image space[J]. Autonomous Robots,2000,5(8):25~42.
- 王荣本,马雷,储江伟,等. 智能车辆转向变结构控制方法的研究[J]. 汽车工程,2004,26(1):1~4.
Wang Rongben, Ma Lei, Chu Jiangwei, et al. A research on variable structure steering control method for intelligent vehicle [J]. Automotive Engineering, 2004,26(1):1~4. (in Chinese)
- 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机的自动驾驶系统[J]. 农业机械学报,2010,41(11):148~152.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):148~152. (in Chinese)
- 王建国,张井岗,赵志诚. 时滞系统增益自适应内模 PID 控制[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2004,22(4):355~358.
Wang Jianguo, Zhang Jinggang, Zhao Zhicheng. Gain self adaptation IMC tuning PID control for time-delay system[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2004,22(4):355~358. (in Chinese)
- 刘宝廷,程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- Datta A, Lei X. Adaptive internal model control: H_∞ optimization for stable plants[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999,44(11):2130~2134.
- 刘开培. 基于 Pade 逼近的纯滞后系统增益自适应内模 PID 控制[J]. 武汉大学学报:工学版,2001,34(4):93~95.
Liu Kaipei. Gain adaptive internal model control of time delay systems based on Pade approximation[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Science,2001,34(4):93~95. (in Chinese)
- 陈娟,潘立登,曹柳林. 时滞系统的滤波器时间常数自调整内模控制[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1630~1633.
Chen Juan, Pan Lideng, Cao Liulin. A filter's time parameter self-adjusting method based on the internal model control for time-delay system[J]. Journal of System Simulation, 2006,18(6):1630~1633. (in Chinese)
- Chai T Y, Ding J L, Zhao D Y, et al. Integrated automation system of minerals processing and its application[C]//16th IFAC World Congress, 2005.
- 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- 刘红军,赵鑫,薛浩洋. 采用 Adaline 神经网络实现增益自适应内模控制[J]. 系统仿真学报,2005,17(8):1955~1958.
Liu Hongjun, Zhao Xin, Xue Haoyang. Gain adaptive internal model control based on Adaline neural network[J]. Journal of System Simulation, 2005,17(8):1955~1958. (in Chinese)

- 3 敖炳秋. 轻量化汽车材料技术的最新动态[J]. 汽车工艺与材料, 2002, 16(增刊): 1~22.
Ao Bingqiu. Latest development of lightweighting automotive materials[J]. Automobile Technology & Material, 2002, 16(Supp.): 1~22. (in Chinese)
 - 4 Hisashi Hayashi, Takeo Nakagaw. Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46(3~4): 455~487.
 - 5 Stuart P K. Application and forming of higher strength steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46(3~4): 443~454.
 - 6 Khan S H, Ahmed M S, Ali F, et al. Investigation of high strength steel bending[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 128~135.
 - 7 Takahiro K, Shunichi H, Youichi M. 780 N/mm² grade hot-rolled high-strength steel sheet for automotive suspension system[J]. JSAE Review, 2003, 24(1): 81~86.
 - 8 闫康康, 郭威, 胡平. 基于冲压 CAE 软件 KMAS 的板料冲压成形回弹预示及控制、补偿技术[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 35(4): 409~414.
Yan Kangkang, Guo Wei, Hu Ping. Springback prediction and control, compensation technique in sheet metal forming based on stamping CAE software KMAS[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(4): 409~414. (in Chinese)
 - 9 Edward J, Rapacki Jr. Plasticity of a high strength steel alloy[J]. International Journal of Plasticity, 1985, 1(3): 233~242.
 - 10 王金武, 胡平, 付争春, 等. 汽车覆盖件破裂试验及基于广义成形技术仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 227~231.
Wang Jinwu, Hu Ping, Fu Zhengchun, et al. Experiment of auto panel surface fracture and simulation base on universal formability technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 227~231. (in Chinese)
-

(上接第 191 页)

- 14 王耀南. 基于单层 Adaline 网络的自适应控制[J]. 自动化与仪器仪表, 1997, 72(4): 12~15.
Wang Yaonan. Single adaline network based adaptive control[J]. Automation and Instrumentation, 1997, 72(4): 12~15. (in Chinese)
- 15 蔡忠法, 周箭, 陈隆道. 增强型 Adaline 神经网络谐波分析方法研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(1): 166~171.
Cai Zhongfa, Zhou Jian, Chen Longdao. Harmonic analysis approach using enhanced Adaline neural network[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(1): 166~171. (in Chinese)
- 16 赵大勇, 柴天佑. 自适应内模控制方法在磨矿过程中的应用[J]. 控制工程, 2009, 16(4): 426~431.
Zhao Dayong, Chai Tianyou. Adaptive internal model control method and its application to grinding process[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(4): 426~431. (in Chinese)
- 17 牛瑞燕, 赵曜. 智能二自由度内模控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 624~628.
Niu Ruiyan, Zhao Yao. Two degree of freedom intelligent internal model control[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4): 624~628. (in Chinese)
- 18 王伟, 甘艳珍, 刘桂香, 等. MFA 与 PID 控制器的实验比较研究[J]. 自动化仪表, 2008, 29(5): 27~29.
Wang Wei, Gan Yanzhen, Liu Guixiang, et al. Experimental inter-comparison between MFA and PID control[J]. Process Automation Instrumentation, 2008, 29(5): 27~29. (in Chinese)