

文章编号: 1001-0920(2013)08-1200-07

基于滤波反演法的参数不确定自动引导车的运动控制

崔明月^{1,2}, 孙棣华¹, 李永福¹, 廖孝勇¹

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 南阳师范学院 物理与电子工程学院, 河南 南阳 473061)

摘要: 针对参数不确定的自动引导车的运动控制问题, 应用 Backstepping 方法设计自适应控制器, 并运用 Lyapunov 稳定性理论与 Barbalat 定理证明了系统的稳定性; 同时利用进化规划算法优化控制器参数, 通过跟踪微分器对输入信号与虚拟控制信号进行滤波处理并提取微分信号, 避免了对虚拟控制信号的解析求导, 简化了控制器的设计过程. 与传统 PID 控制的对比仿真结果表明, 所提出的自适应控制策略能较好地补偿系统参数摄动的影响, 提高了自动引导车的轨迹跟踪性能和鲁棒性.

关键词: 自动引导车; 滤波反演控制; 运动控制; 参数不确定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Kinematic control algorithm for AGV with parameter uncertainties based on filtering backstepping

CUI Ming-yue^{1,2}, SUN Di-hua¹, LI Yong-fu¹, LIAO Xiao-yong¹

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Physical and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China. Correspondent: CUI Ming-yue, E-mail: cuiminyue@sina.com)

Abstract: Based on the nonlinear kinematic model of automatic guided vehicles, an adaptive Backstepping method is used to design a controller for the kinematic control of automatic guided vehicles with parameter uncertainties. The convergence of the tracking errors of automatic guided vehicles is proved by using the Lyapunov stability theory. The tracking differentiator is adopted to acquire the derivatives of virtual control and input signal without noise. Therefore, the Backstepping implementation is simplified significantly. Furthermore, the control parameters for adaptive controller are trained by evolutionary programming. Moreover, the simulation results show that the proposed method greatly compensates the effects of parameter perturbation and improves the system tracking accuracy and robustness in comparison with traditional PID control laws.

Key words: automatic guided vehicle; filtering backstepping control; kinematic control; parameter uncertainties

0 引言

自动引导车 (AGV) 亦称智能车辆或轮式移动机器人, 具有移动灵活自主、控制和机构相对简单等优点, 在现代物流、现代化国防、柔性制造等领域得到了越来越广泛的应用. 运动控制是实现其自主移动的关键技术之一. 然而, 由于 AGV 是一个强耦合、多变量、参数时变的非线性对象, 对其进行高性能轨迹跟踪控制十分不易. 先前, 在性能要求高的 AGV 运动系统中, AGV 的运动控制主要采用基于精确模型的反馈控制律^[1-6]. 在工程实际中, 由于建模和测量不够精

确, 再加上参数变化和外部扰动等因素的影响, 很难获得精确完备的数学模型, 基于精确模型的反馈控制律在实际应用中存在很大的局限性.

为了进一步提高 AGV 的运动控制性能, 有学者将非线性系统的控制方法应用于 AGV 的运动控制, 如解耦控制^[7-8]、状态反馈线性化控制^[8-9]、无源性控制^[10-11]、变结构控制^[12-15]、反演 (Backstepping) 控制^[16-17]等. 其中反演设计方法易于与自适应控制方法相结合, 能够消除系统参数变化和外界干扰的影响, 越来越受到控制工程界学者的重视. 该方法首先

收稿日期: 2012-04-20; 修回日期: 2012-07-22.

基金项目: 国家863计划项目(2006AA04A124); 重庆市科技攻关计划项目(CSTC2011AB2052); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2012JJB40002).

作者简介: 崔明月(1974—), 男, 博士生, 从事移动机器人控制等研究; 孙棣华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能交通系统等研究.

将复杂的非线性系统分解成多个阶数更低、更简单的链式子系统; 然后逐步选择适当的 Lyapunov 函数, 推导出最终的控制律和参数自适应律, 实现对参数摄动系统的全局镇定控制^[18]. 其中, 文献 [2, 4-5] 仅针对 AGV 基于路径偏差的运动学模型设计路径跟踪控制器, 建立的是近似线性化的数学模型, 应用线性系统的控制方法, 但没有考虑系统参数的不确定性对 AGV 运动性能的影响, 而实际应用中的 AGV 系统往往存在一些变化的参数. 另外由文献 [16-17] 可以看出, 反演法递推过程中需要不断地对虚拟控制信号求导, 其计算过程十分繁琐.

鉴于此, 针对参数不确定的 AGV 自适应控制问题, 本文采用滤波反演方法推导系统的控制律和时变参数的自适应律, 不但可以避免反演法递推过程中对虚拟控制信号繁琐的求导, 简化了控制器的设计, 而且避免了测量噪声对控制系统的影响; 同时控制器参数可由进化规划算法离线优化获得, 避免了控制参数整定的盲目性. 仿真结果表明, 该控制系统在 AGV 存在任意初始位姿的情况下能够快速地跟踪到给定的参考路径; 同时与常规 PID 控制律相比, 对于 AGV 系统参数的变化具有更强的鲁棒性.

1 AGV 系统的描述

AGV 运动示意图如图 1 所示^[5], 两个前轮为驱动轮, 各采用一台直流伺服电机独立驱动, 通过调节各自的输入电压来实现两驱动轮的速度差, 达到调整车体与跟踪轨迹的位置关系. AGV 的两个后轮为随动轮 (万向轮), 仅起支撑车体的作用, 无导向作用.

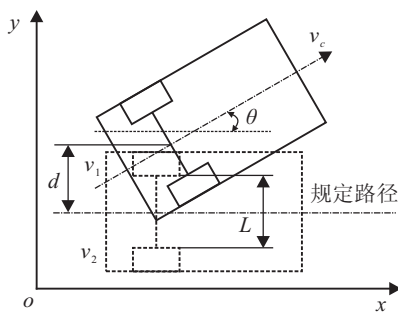


图 1 AGV 路径跟踪运动示意图

假设 1 AGV 车轮与地面间“纯滚动而无滑动”.

设 d 为 AGV 位置偏差 (AGV 两驱动轮连线的中点到路径的垂直距离, 规定路径上方为正), θ 为 AGV 方向角偏差 (AGV 两驱动轮连线的中垂线与路径的夹角, 逆时针为正), L 为两驱动轮间距, v_1 和 v_2 分别为左右轮相对于地面的线速度, AGV 在 t 时刻的前进速度 $v_c = (v_1 + v_2)/2$.

由图 1 中的几何关系和直流电机的特性可得 AGV 的运动学方程^[5]

$$\begin{cases} \dot{d} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \sin \theta = v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \frac{v_2 - v_1}{R_a} = -\frac{2}{L} \Delta v, \\ \Delta \dot{v} = -\frac{1}{T_m} \Delta v + \frac{k_s}{T_m} \Delta U. \end{cases} \quad (1)$$

其中: T_m 为直流电机负载的时间常数, k_d 为直流电机反电动势常数, r 为车轮半径, n 为减速机构传动比, $k_s = 2\pi r k_d / 60n$ 为传动系统的驱动增益, Δv 为驱动轮相对于机器人的前进速度 v_c 的变化量, ΔU 为 AGV 在跟踪路径有偏差时两个驱动轮电机上的纠偏电压控制量.

若定义系统状态向量 $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [d, \theta, \Delta v]^T$, 控制输入取为 $u = [\Delta U]$, 则由式 (1) 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_c \sin x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{2}{L} x_3, \\ \dot{x}_3 = -a x_3 + b u. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $a = 1/T_m$, $b = k_s/T_m$. 考虑到 AGV 在实际运行过程中驱动电机和传动机构参数是变化的, 所以系统参数 a 和 b 是不确定的, 即未知的.

2 自适应控制器的设计

AGV 自适应控制器的控制目标是系统 (2) 在系统参数 a 和 b 未知的情况下, 有

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} d = \lim_{t \rightarrow \infty} x_1 = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \lim_{t \rightarrow \infty} x_2 = 0, \end{cases}$$

从而实现 AGV 存在任意初始位姿误差时的镇定.

由式 (2) 可知, AGV 系统模型为参数严格反馈形式, 故适合应用 Backstepping 方法设计 AGV 系统参数 a 、 b 未知的非线性自适应控制器. Backstepping 设计方法是基于 Lyapunov 稳定性理论, 其关键是通过逐步递推选择适当的 Lyapunov 函数, 推导出实现系统状态 x_1 和 x_2 镇定的控制律与未知参数 a 、 b 的自适应律.

设 \hat{a} 为 a 的估计值, \hat{b} 为 b 的估计值, 定义估计误差 $\tilde{a} = \hat{a} - a$, $\tilde{b} = \hat{b} - b$; k_1, k_2, k_3 表示待定的正的设计参数.

假设 2 方向角偏差 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$.

注 1 此假设意味着仅考虑 AGV 朝 x 轴正向的运动, 不考虑 AGV 反方向的运动.

假设 3 AGV 前进的速度 $v_c > 0$, 且最大值有界, $v_c = 0$ 不被考虑.

假设 4 在运用 Backstepping 进行控制器设计时, 经滤波处理后的检测信号 x_1 、 x_2 和 x_3 是充分光滑的.

自适应控制器的设计步骤如下.

Step 1 对于系统(2), 考虑第1个方程(关于 x_1 的方程)镇定, 把 $\sin x_2$ 视为“控制变量”. 定义 $e_1 = x_1$, 假设检测信号 x_1 、 x_2 和 x_3 充分光滑, 则位置偏差的误差动态方程为

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = v_c \sin x_2. \quad (3)$$

定义 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$, 它沿着式(3)的轨迹的导数为

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1(k_1 e_1 + v_c \sin x_2). \quad (4)$$

将 $\sin x_2$ 视为“控制变量”, 为使式(4)满足 $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0$, e_1 渐近稳定收敛到零, 取虚拟控制量

$$\alpha_1 = -\frac{k_1}{v_c} e_1. \quad (5)$$

式(5)对时间 t 求导并考虑式(3), 得

$$\dot{\alpha}_1 = -\frac{k_1}{v_c} \dot{e}_1 = -\frac{k_1}{v_c} \dot{x}_1 = -k_1 \sin x_2. \quad (6)$$

Step 2 定义虚拟控制误差信号

$$e_2 = \sin x_2 - \alpha_1, \quad (7)$$

由式(3)、(5)和(7), 得

$$\dot{e}_1 = v_c e_2 - k_1 e_1. \quad (8)$$

式(7)两边对时间 t 求导, 得

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 \cos x_2 - \dot{\alpha}_1, \quad (9)$$

将式(6)代入(9), 得

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 \cos x_2 + k_1 \sin x_2. \quad (10)$$

将系统状态方程(2)的第2式 $\dot{x}_2 = -2x_3/L$ 以及 $\sin x_2 = e_2 + \alpha_1$, $\sin^2 x_2 + \cos^2 x_2 = 1$ 代入式(10), 并考虑假设2, 得

$$\dot{e}_2 = -\frac{2}{L} x_3 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2} + k_1(e_2 + \alpha_1). \quad (11)$$

考虑误差动态方程(8)和(11), 将 x_3 暂时作为“控制变量”实现此两式的镇定. 定义 Lyapunov 函数 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2$, 则其沿式(8)和(11)轨迹的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + (k_1 + k_2)e_2^2 + \\ & (v_c e_1 + k_1 \alpha_1)e_2 - \\ & \frac{2}{L} x_3 e_2 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

将 x_3 视为“控制变量”, 为使式(12)满足 $\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0$, e_1 与 e_2 渐近稳定收敛到零, 虚拟控制量可取为

$$\alpha_2 = \frac{L[(k_1 + k_2)e_2 + (v_c e_1 + k_1 \alpha_1)]}{2\sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2}}. \quad (13)$$

Step 3 定义虚拟控制误差信号

$$e_3 = x_3 - \alpha_2, \quad (14)$$

式(14)两边对时间 t 求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 = & -ax_3 + bu - \dot{\alpha}_2 = \\ & -a(e_3 + \alpha_2) + bu - \dot{\alpha}_2. \end{aligned} \quad (15)$$

由式(13)和(14), 可得

$$\begin{aligned} x_3 = e_3 + \alpha_2 = \\ e_3 + \frac{L[(k_1 + k_2)e_2 + (v_c e_1 + k_1 \alpha_1)]}{2\sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入(11), 得

$$\dot{e}_2 = -\frac{2}{L} e_3 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2} - k_2 e_2 - v_c e_1. \quad (17)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{1}{2\lambda_1} \tilde{a}^2 + \frac{1}{2\lambda_2} \tilde{b}^2. \quad (18)$$

其中: \hat{a} 为 a 的估计值, \hat{b} 为 b 的估计值, 估计误差 $\tilde{a} = \hat{a} - a$, $\tilde{b} = \hat{b} - b$, 可调参数 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$. 则 Lyapunov 函数(18)沿式(8)、(15)和(17)轨迹的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{b} \dot{\tilde{b}} = \\ -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + e_3 \left[\hat{b} u - \right. \\ \left. \frac{2}{L} e_2 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2} - \dot{\alpha}_2 - \hat{a}(e_3 + \alpha_2) + k_3 e_3 \right] + \\ \tilde{a} \left[\frac{1}{\lambda_1} \dot{\hat{a}} + e_3(e_3 + \alpha_2) \right] + \tilde{b} \left(\frac{1}{\lambda_2} \dot{\hat{b}} - e_3 u \right). \end{aligned} \quad (19)$$

控制律选取如下:

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{\hat{b}} \left[\frac{2}{L} e_2 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2} + \dot{\alpha}_2 + \right. \\ \left. \hat{a}(e_3 + \alpha_2) - k_3 e_3 \right], \end{aligned} \quad (20)$$

参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{a}} = -\lambda_1 e_3(e_3 + \alpha_2), \\ \dot{\hat{b}} = \lambda_2 e_3 u. \end{cases} \quad (21)$$

如果机器人系统(2)满足控制律(20)和自适应律(21), 则

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0. \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, AGV 系统在控制律(20)和参数自适应律(21)的作用下, 在 Lyapunov 意义下是稳定的.

需要注意的是, 当 $\theta = x_2 = \pm\pi/2$ 时, 式(13)会出现无穷大的奇异值. 为避免这种情况出现, 对虚拟控制量 α_2 和实际控制律 u 重新定义如下:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \frac{L[(k_1 + k_2)e_2 + (v_c e_1 + k_1 \alpha_1)]}{2\sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2}}, \\ x_2 \in (-\pi/2, \pi/2); \end{aligned} \quad (23)$$

$$u = \begin{cases} \frac{1}{\hat{b}} \left[\frac{2}{L} e_2 \sqrt{1 - (e_2 + \alpha_1)^2} + \dot{\alpha}_2 + \right. \\ \left. \hat{a}(e_3 + \alpha_2) - k_3 e_3 \right], & x_2 \in (-\pi/2, \pi/2); \\ u_0, & x_2 = \pi/2; \\ -u_0, & x_2 = -\pi/2. \end{cases} \quad (24)$$

注 2 在式(24)中, 当 $\theta = x_2 = \pi/2$ 时, AGV 朝垂直于参考路径且沿 y 轴正方向前进, 此时施加一个向右校正的系统所允许的定值控制量 u_0 , 使 AGV 尽快脱离这种状态; 当 $\theta = x_2 = -\pi/2$ 时, AGV 朝垂直

于参考路径且沿 y 轴负方向前进, 此时施加一个向左校正的系统所允许的定值控制量 u_0 , 使 AGV 尽快脱离此状态. 这在实际中是合理的, 也是可行的.

3 控制系统的稳定性分析

引理 1 (Barbalat 定理^[19]) 对于函数 $f(t): R^+ \rightarrow R$, 如果 $f(t) \in L_2 \cap L_\infty$, 并且其导数 $\dot{f}(t) \in L_\infty$, 则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$.

定理 1 AGV 系统 (2) 在控制律 (20) 和参数自适应律 (21) 的作用下, 在满足假设 2~假设 4 的条件下, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, x_1, x_2 渐近收敛到零, 即 AGV 的位置偏差 d 与方向角偏差 θ 渐近收敛到零.

证明 选取如式 (18) 所示的 Lyapunov 函数, 因为系统 (2) 在控制律 (20) 和参数自适应律 (21) 的作用下, 有

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq -k_1 e_1^2 \leq 0, \quad (25)$$

所以 V 在 $t \in [0, \infty)$ 上是单调非递增函数, 有 $V(t) \leq V(0), \forall t \in [0, \infty)$, 故 V 在 $t \in [0, \infty)$ 上是有界的. 因而 e_1, e_2, e_3 和 \tilde{a}, \tilde{b} 是有界的, 即 $e_1, e_2, e_3 \in L_\infty$.

对式 (25) 两边积分, 可得

$$\int_0^\infty k_1 e_1^2 dt < -\int_0^\infty \dot{V}_2(t) dt = V_2(0) - V_2(\infty) < \infty, \quad (26)$$

即 $e_1 \in L_2$. 同理可证 $e_1, e_2 \in L_2$, 即有 $e_1, e_2, e_3 \in L_2 \cap L_\infty$. 根据前文的假设, 系统状态 x_1, x_2 和 x_3 经滤波处理后是充分光滑连续的, 所以式 (3)、(10) 和 (15) 的右边是有界的, 从而可得 $\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3 \in L_\infty$. 根据 Barbalat 引理, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1, e_2, e_3 \rightarrow 0$. 由于 $e_1 = x_1$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x_1 \rightarrow 0$, 即 AGV 位置偏差 $d \rightarrow 0$. 由式 (5) 和 (7) 可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\sin x_2 \rightarrow 0$. 当 $x_2 \in [-\pi/2, \pi/2]$ 时, 有 $x_2 \rightarrow 0$, 即方向角偏差 $\theta \rightarrow 0$. \square

综上所述, 含有未知参数的 AGV 系统 (2) 在控制律 (20) 和参数自适应律 (21) 的作用下, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, AGV 的位置偏差 d 与方向角偏差 θ 渐近收敛到零, 即通过调整控制器增益, 存在初始位姿偏差的 AGV 能够在有限的时间内, 渐近稳定地跟踪指定轨迹.

4 滤波器的设计

在实际工程中, 传感器检测到的信号往往包含噪声. 根据前文的假设, 为使 AGV 控制系统的输入信号充分光滑, 需对 AGV 控制系统的输入信号位置偏差 $x_1 = d$ 和方向角偏差 $x_2 = \theta$ 作平滑滤波处理. 同时, 由式 (20) 和 (21) 还能看出, 控制律和自适应律表达式中都包含误差信号及虚拟控制信号对时间的导数. 经典微分器采用差分求微分算法对噪声有放大作用, 而非线性跟踪微分器能够克服常规微分器带来的噪声放大弊端, 对噪声有较强的抑制能力, 并且不依赖对象的模型, 可以从受到噪声污染的信号中快速有

效地估计出输入信号及其微分信号^[20].

另外, 由式 (13) 可以看出, 虚拟控制信号 α_2 对时间 t 的导数的表达式非常复杂, 为避免直接对虚拟控制信号 α_2 解析求导, 本文除了将输入信号进行滤波处理外, 同时也将虚拟控制信号 α_2 经过跟踪微分器得到其导数值. 在此, 采用文献 [20] 所提出的一种包含噪声的信号非线性跟踪微分算法, $v_0(t)$ 是包含噪声的被测量信号, 滤波算法的原理如图 2 所示, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = -\gamma \text{sat}\left(y_1 - v_0(t) + \frac{y_2 |y_2|}{2\gamma}, \delta\right). \end{cases} \quad (27)$$

其中: 饱和函数

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} -1, & x < -\delta; \\ \frac{x}{\delta}, & |x| \leq \delta; \\ 1, & x > \delta. \end{cases}$$

输出 y_1 跟踪输入信号 $v_0(t)$, 另一输出 y_2 是输入信号 $v_0(t)$ 的近似微分. 跟踪微分器的参数 $\gamma > 0$, 它决定着输出信号的跟踪速度, 并且 γ 越大, 跟踪越快.

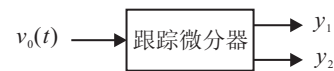


图 2 信号的滤波处理

注 3 由式 (27) 可知, 当输入信号 $v_0(t)$ 有界且 γ 足够大时, $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \int_0^T |y_1(t) - v_0(t)| dt = 0$ ^[20] (T 为任意时间常数), 所以输入信号经滤波处理后对 AGV 控制系统误差的收敛性无影响; 输入信号 $v_0(t)$ 的近似微分信号 y_2 是通过积分得到的, 能有效地避免噪声的影响.

5 控制器参数的计算

常规的控制参数整定方法往往在实验过程中反复试凑, 不仅仅费时, 而且准确性不能保证, 适应性较差. 鉴于此, 本文提出一种基于进化规划算法的控制器参数离线整定方法.

进化规划算法 (EP) 是一种基于自然选择与进化机制的功能强大的随机搜索算法^[21], 进化规划算法的操作不需要规划对象的先验知识, 只需要计算个体的适应度值. 因此, 本文应用进化规划算法来优化计算控制参数向量 $k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ \lambda_1 \ \lambda_2]^T$ 在满足受控 AGV 系统的性能指标最小约束情况下的次优值 $k^* = [k_1^* \ k_2^* \ k_3^* \ \lambda_1^* \ \lambda_2^*]^T$.

定义如下的积分平方误差 (ISE) 性能指标:

$$J(p_i) = \int_0^{t_f} (w_1 e_1^2 + w_2 e_2^2 + w_3 e_3^2 + w_4 \tilde{a}^2 + w_5 \tilde{b}^2) dt. \quad (28)$$

其中: w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 分别为 AGV 控制系统误差

e_1, e_2, e_3 及未知参数估计误差 \tilde{a}, \tilde{b} 的权值。

采用二进制编码, 适应度值选为 ISE 性能指标值。控制参数向量 $k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ \lambda_1 \ \lambda_2]^T$ 的二进制编码组成优化群体。计算步骤如下。

Step 1 利用伪随机序列产生初始群体 $P_0 = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]$ 。

Step 2 计算每一个染色体的性能指标值 $J(p_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

Step 3 群体的规模从 n 增加到 $2n$, 新个体的产生方式如下所示:

$$p_{n+i} = \begin{cases} \text{one-bit-complement of } p_i, & J(p_i) \geq \bar{J}; \\ \text{two-bit-complement of } p_i, & J(p_i) \leq \bar{J}. \end{cases} \quad (29)$$

其中: \bar{J} 是群体中所有染色体 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的 ISE 性能指标 $J(p_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 的平均值; one-bit-complement of p_i 表示系统随机选择染色体 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 中的一位, 并进行求补运算形成新的染色体; two-bit-complement of p_i 表示系统随机选择染色体 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 中的两位, 并进行求补运算形成新的染色体。

Step 4 计算每个染色体 p_{n+i} ($i = 1, 2, \dots, n$) 的 ISE 性能指标值 $J(p_{n+i})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。比较所有个体的 ISE 性能指标值 $J(p_j)$, $j = 1, 2, \dots, 2n$, 选择 n 个 ISE 性能指标值最小的个体进入下一代。

Step 5 如果 ISE 性能指标值最小的染色体的 ISE 性能指标值连续 10 代没有变化, 则寻优过程结束; 否则转 Step 3。

6 仿真分析

6.1 控制器参数的确定

为了分析系统参数变化对 AGV 运动控制系统的影响以及验证本文所提出的自适应滤波反演控制算法的正确性, 首先应用前面所设计的进化规划算法, 离线计算出自适应控制器参数 $k_1, k_2, k_3, \lambda_1, \lambda_2$ 。AGV 系统的物理参数如表 1 所示。

表 1 AGV 的物理参数

参数符号	名称	标称值
T_m	直流电机时间常数	0.021/s
k_d	直流电机反电动势常数	230/(V·s) ⁻¹
k_s	电机及传动结构的驱动增益	0.104/(V·s) ⁻¹
r	车轮半径	0.125/m
v_c	机器人前进速度	2/(m/s)
n	减速齿轮传动比	29
L	两驱动轮间距	0.5/m

选定任意初始位姿

$$[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [d(0) \ \theta(0)]^T = [0.8 \ -\pi/4]^T,$$

ISE 性能指标的误差权值 $w_i = 0.2, i = 1, 2, \dots, 5$, 参

数估计误差的初始值 $\tilde{a}(0) = \tilde{b}(0) = 0$, 跟踪微分器的参数选取为 $\gamma = 20$, 图 3 为优化指标收敛曲线。

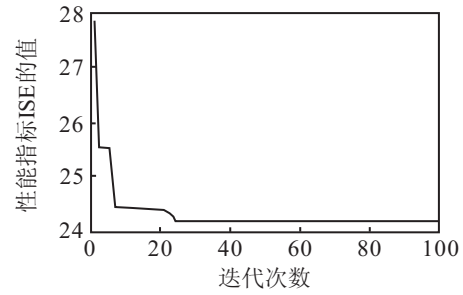


图 3 ISE 指标函数值的优化过程

由图 3 可以看出, 进化规划算法的适应度值进化到第 27 代时不再变化, 经过优化获得的最优 ISE 指标为 24.221, 优化获得的控制器参数为 $k_1^* = 8.36, k_2^* = 18.87, k_3^* = 6.19, \lambda_1^* = 10.35, \lambda_2^* = 0.86$ 。

6.2 无参数摄动时的误差收敛分析

初始位姿选为

$$[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [d(0) \ \theta(0)]^T = [1.2 \ \pi/6]^T,$$

由表 1 可知, 系统参数 $a = 1/T_m = 47.6 \text{ s}^{-1}, b = k_s/T_m = 5.0 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 无摄动, 系统输入信号 x_1, x_2 和 x_3 包含噪声 $n(t)$ ($n(t)$ 为 $[-1, 1]$ 上均匀分布的高斯白噪声信号), 经反复调试, PID 控制器的参数选取如下: $k_p = 16.13, k_i = 0.24, k_d = 0.16$, 滤波反演控制器的参数采用进化规划算法的优化结果。图 4 表示的是 AGV 在 PID 控制和滤波反演控制作用下的系统误差 $x_1(t) = d(t)$ 与 $x_2(t) = \theta(t)$ 的收敛曲线。

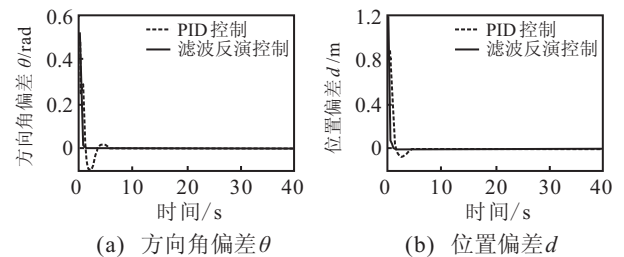


图 4 无参数摄动的系统控制结果

由图 4 可以看出, AGV 在滤波反演控制作用下, 同一初始位姿下的误差收敛时间比常规 PID 控制均大大减少, 并且无超调。

6.3 AGV 系统的自适应分析

在 AGV 实际应用中, 由于材料磨损、道路状况、环境温度、机械润滑等条件的变化, 都会引起直流伺服电机时间常数 T_m 、电机及传动机构的驱动增益 k_s 、车轮半径 r 等参数的变化, 进而引起系统 (2) 中参数 a, b 的变化。为了验证本文所设计的控制器具有较好的鲁棒性, 图 5(a) 和 (b) 分别给出了参数 a, b 变化时应用常规 PID、自适应反演控制算法时, 在相同的

初始位姿偏差条件下, 位置偏差 $x_1(t) = d(t)$ 与角度偏差 $x_2(t) = \theta(t)$ 的收敛变化曲线, 其中常规PID、自适应反演控制器参数均与6.2节中保持相同. 参数 a 、 b 变化的情况如下:

1) AGV系统参数 a 的初始值为 47.6 s^{-1} , 在 $t = 10 \text{ s}$ 时跳变为 53.6 s^{-1} ;

2) AGV系统参数 b 的初始值为 $5.0 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-2}$, 在 $t = 25 \text{ s}$ 时跳变为 $2.5 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

初始位姿 $[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [d(0) \ \theta(0)]^T = [2.0 \ \pi/3]^T$, 参数估计的初始值 $\hat{a}(0) = 47.6 \text{ s}^{-1}$, $\hat{b}(0) = 5.0 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

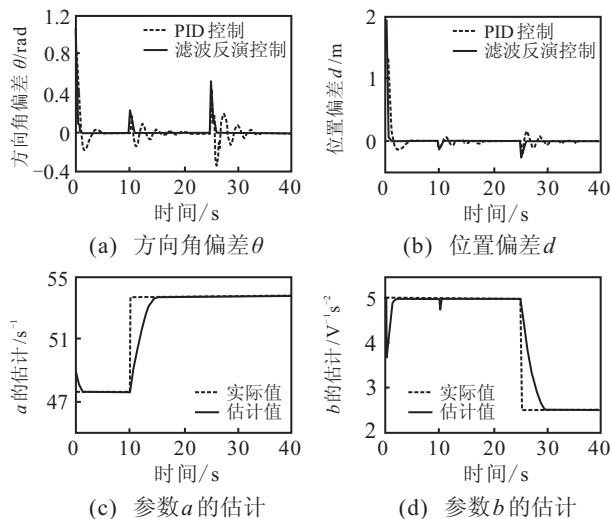


图5 有参数摄动的系统控制结果

由图5中(a)与(b)的比较可知, 当AGV系统参数 a 、 b 发生变化时, 常规PID控制与自适应滤波反演控制的控制参数均保持不变, AGV系统在常规PID控制器作用下, 方向角偏差与位置偏差的收敛曲线发生了较为剧烈的振荡, 而系统在自适应滤波反演控制器的作用下, 方向角偏差和位置偏差收敛速度较快, 并且没有发生振荡, 这是因为本文设计的滤波反演控制器具有较好的自适应能力, 其某些参数能够实时变化, 可以根据AGV在实际环境中的需求实时在线调整这些参数, 即使AGV系统的某些参数发生变化, 滤波反演控制器仍能够对发生变化的系统参数做出比较准确的估计. 因此, 从图5可以看出, 自适应滤波反演控制算法对AGV参数 a 、 b 的变化具有较好的鲁棒性和自适应能力.

图5中(c)和(d)为AGV系统参数 a 、 b 的估计值随时间变化的曲线. 可以看出, a 、 b 的估计值都能以较快的速度渐近跟踪到它们的实际值, 从而表明本文所设计的参数估计算法具有良好的性能.

7 结 论

针对参数不确定的AGV运动控制问题, 本文运用自适应滤波反演控制策略, 设计了能够补偿系统参

数摄动影响的自适应控制器. 由于跟踪微分器的应用避免了对虚拟控制信号的求导, 从而简化了控制器的设计过程. 同时在理论上证明了AGV在任意初始位姿的情况下能渐近地跟踪到期望路径. 仿真结果表明, 受控的AGV系统具有良好的路径跟踪性能, 即使系统参数 a 和 b 发生了变化, AGV滤波反演控制系统仍然具有良好的运动控制性能. 与经典的PID控制器相比, 对于AGV参数的变化具有更强的鲁棒性与自适应能力.

参考文献(References)

- [1] Normey-Rico E, Gomez-Omega J, Camacho E. A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots[J]. Robotics and Autonomous System, 2011, 59(6): 1001-1007.
- [2] 王荣本, 储江伟, 冯炎, 等. 一种视觉导航的实用型AGV设计[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 135-138. (Wang R B, Chu J W, Feng Y, et al. Design for a new type of AGV based on machine vision[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 135-138.)
- [3] Simoncelli M, Zunino G, Christensen H I. Autonomous pool cleaning: Self localization and autonomous navigation for cleaning[J]. Autonomous Robots, 2000, 9(3): 261-270.
- [4] 武星, 楼佩煌, 杨雷. 基于视野状态分析的机器人路径跟踪智能预测控制[J]. 机器人, 2009, 31(4): 357-364. (Wu X, Lou P H, Yang L. Intelligent predictive control based on state analysis of visual field for robot path tracking[J]. Robot, 2009, 31(4): 357-364.)
- [5] 饶聃, 邓岳湘, 任永益. 关于自动导向车最优控制的设计[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 838-842. (Rao D, Deng Y X, Ren Y Y. Designing of optimal control of AGV[J]. Control Theory & Applications, 1996, 13(6): 838-842.)
- [6] 吕广明, 孙立宁, 彭龙刚, 等. 自动引导车轨迹偏差的智能控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(12): 1465-1467. (Lv G M, Sun L N, Peng L G, et al. Intelligent control of route deviation of an automated guided vehicle[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(12): 1465-1467.)
- [7] 孙隼华, 崔明月, 李永福. 具有参数不确定性的轮式移动机器人自适应backstepping控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(9): 1198-1204. (Sun D H, Cui M Y, Li Y F. Adaptive backstepping control of wheeled mobile robots with parameter uncertainties[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(9): 1198-1204.)
- [8] 晁红敏, 胡跃明. 基于动态反馈线性化的无漂移力学系统控制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2000, 28(11): 10-15. (Chao H M, Hu Y M. Control of mechanical driftless

- systems via dynamic feedback linearization[J]. *J of South China University of Technology: Natrnal Science Edition*, 2000, 28(11): 10-15.)
- [9] Dongkyoung Chwa. Tracking control of differential-drive wheeled mobile robots using a backstepping-like feedback linearization[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part A*, 2010, 40(6): 1285-1295.
- [10] Dong W, Huo W. On trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators with parameter uncertainty[J]. *Automatica*, 2002, 38(9): 1475-1484.
- [11] 柯海森, 叶旭东, 钱建海. 移动机器人的鲁棒自适应控制器设计[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(7): 1127-1131.
(Ke H S, Ye X D, Qian J H. Robust adaptive controller design for mobile robot[J]. *J of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(7): 1127-1131.)
- [12] Chen Chih-Yang, Li Tzoo-Hseng S, Yeh Ying-Chieh, et al. Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(2): 156-166.
- [13] Chen Chih-Yang, Li Tzoo-Hseng S, Yeh Ying-Chieh. EP-based kinematic control and adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control for wheeled mobile robots[J]. *Information Sciences*, 2009, 179 (1/2): 180-195.
- [14] Zhang Yulin, Chung Jae H, Velinsky Stven A. Variable structure control of a differentially steered wheeled mobile robot[J]. *J of Intelligent and Robotic Systems*, 2003, 36(3): 301-314.
- [15] 晁红敏, 胡跃明. 动态滑模控制及其在移动机器人输出跟踪中的应用[J]. *控制与决策*, 2001, 16(5): 565-568.
(Chaco H M, Hu Y M. Dynamical sliding mode control and its applications to output tracking of mobile robots[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 565-568.)
- [16] Jiang Z P, Nijmeijev H. Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping[J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1393-1399.
- [17] Yoo S J. Adaptive tracking and obstacle avoidance for a class mobile robots in the presence of unknown skidding and slipping[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2011, 5(14): 1597-1608.
- [18] 洪奕光, 程代展. 非线性系统的分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 168-174.
(Hong Yi-guang, Cheng Dai-zhan. *Analysis and control of nonlinear systems*[M]. Beijing: China Science Press, 2005: 168-174.)
- [19] Slotine J, Li W. *Applied nonlinear control*[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1991: 122-126.
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术——补偿不确定因素的自控技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 46-97.
(Han J Q. *Active disturbance rejection control technique — The technique for estimating and compensating the uncertainties*[M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 2009: 46-97.)
- [21] Weng Z, Chen G, Shieh L S, et al. Evolutionary programming Kalman filter[J]. *Information Sciences*, 2000, 129(1/2/3/4): 197-210.

(上接第1199页)

- [3] Ren W. Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state[J]. *Systems and Control Letters*, 2007, 56(7/8): 474-483.
- [4] Cao Y, Ren W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via variable structure approach[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2012, 57(1): 33-48.
- [5] 席裕庚, 黄维, 李晓丽. 具有状态预测器的多智能体系统一致性研究[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 769-772.
(Xi Y G, Huang W, Li X L. Consensus of multi-agent system with state predictor[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 769-772.)
- [6] Jiang F, Wang L. Consensus seeking of high-order dynamic multi-agent systems with fixed and swiching topologies[J]. *Int J of Control*, 2010, 83(2): 404-420.
- [7] Mei J, Ren W, Ma G. Containment control for multiple Euler-Lagrange systems with parametric uncertainties in directed networks[C]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control*. San Francisco: IEEE Press, 2011: 2186-2191.
- [8] Cao Y, Ren W. Containment control with multiple stationary or dynamic leaders under a directed interaction graph[C]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control*. Shanghai: IEEE Press, 2009: 3014-3019.
- [9] Cao Y, Stuart D, Ren W, et al. Distributed containment for multiple autonomous vehicles with double-integrator dynamics: Algorithms and experiments[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2011, 19(4): 929-937.
- [10] Ren W, Cao Y. *Distributed coordination of multi-agent networks*[M]. New York: Springer, 2011: 109-144.
- [11] Ren W, Beard R. *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*[M]. New York: Springer, 2008: 55-73.
- [12] Horn R, Johnson C. *Matrix analysis*[M]. New York: Cambridge University Press, 1985: 33-166.
- [13] Godsil C, Royal G. *Algebraic graph theory*[M]. New York: Springer, 2001: 163-173.