

磁带导引 AGV 的自抗扰循迹控制方法^①

尹 姝^{②*} 周海海^{**} 仇 翔^{**}

(* 浙江工业大学电工电子中心 杭州 310023)

(** 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 本文研究了磁带导引自动导引小车(AGV)的循迹控制问题,设计了一种线性自抗扰控制器,以达到 AGV 精准循迹、抗干扰能力强的控制要求。首先,建立了磁带导引 AGV 循迹误差系统的数学模型,将循迹控制系统的不确定动态描述为系统的加性总和干扰,通过设计扩张状态观测器对这些干扰量进行实时估计,进一步,设计线性自抗扰控制器对这些干扰进行动态线性化补偿,从而降低 AGV 循迹模型的不确定性及循迹过程中外部随机干扰对循迹控制性能的影响。最后,搭建了磁带导引 AGV 实验平台,并在该平台上验证了所提出方法的有效性和优越性。

关键词 自动导引小车(AGV), 磁带导引, 循迹控制, 线性自抗扰控制, 抗干扰

0 引 言

自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)是指经电磁、激光、惯性等导引装置引导并沿设定路径行驶,能够自主导航的移动机器人,其主要作用为运输和移载货物,具有自动化程度高、调度管理简单便捷、性能安全可靠等优点^[1,2]。近年来,AGV 作为自动化程度极高的机器人被广泛应用于柔性制造、仓储管理、货运码头等场景。AGV 实现自主运动的关键在于导航,而其中的磁带导航因为高性价比、高可靠性和灵活性在实际中获得广泛应用。

磁带导引 AGV 的导航控制问题已经有许多研究成果。陈谦益、李季等^[3,4]采用开环控制实现 AGV 的循迹控制,但其导航可靠性差。黄胄^[5]采用 PID 实现 AGV 循迹的闭环控制,但易出现循迹抖振现象,动态响应效果差。杨先龙^[6]对 AGV 的偏差和偏差变化率进行模糊化,通过决策逻辑实现 AGV 循迹的模糊控制,但模糊控制规则需要大量的实践经验和数据支持,会受到人主观因素影响而不能完全

归总,且因缺乏“自我学习”的能力很难消除稳态误差^[7]。王琳华、陈盈等^[8,9]将 PID 与模糊控制相结合,采用模糊规则对 PID 控制参数进行在线调整,虽然具有一定的鲁棒性,但对复杂多变的应用环境适应性较差。陈俊^[10]提出的自适应反演滑模控制方法具有响应快、良好的瞬时性能和鲁棒性,但易出现抖振现象,直接影响控制效果^[11]。此外还有预测控制^[12]、自适应控制^[13,14]、神经网络控制^[15]、 H_{∞} 算法^[16]以及其他智能控制方法^[17-21]。

综上所述,磁带导引 AGV 的循迹控制方法有很多,且有各自的适用场合。本文将自抗扰控制方法应用于磁带导引 AGV 循迹控制系统,将循迹控制系统的不确定动态描述为系统的加性总和干扰,通过设计扩张状态观测器对这些干扰量进行实时估计;进一步地,设计线性自抗扰控制器对这些干扰进行动态线性化补偿,从而降低 AGV 循迹模型的不确定性及循迹过程中外部随机干扰对循迹控制性能的影响,实现磁带导引 AGV 循迹的高性能控制。最后,搭建了 AGV 循迹控制实验平台,并通过实验研究验

① 浙江省公益项目(2016C31065)和浙江省自然科学基金(LR16F030005,LZ15F030003)资助项目。
② 女,1983 年生,硕士生;研究方向:移动机器人定位,网络化系统;联系人,E-mail: syin@zjut.edu.cn
(收稿日期:2018-01-05)

证了所提出控制方法的有效性和优越性。

1 AGV 自抗扰寻迹控制

1.1 磁带导引 AGV 循迹误差模型

本文考虑两轮差速轮式 AGV,对 AGV 的机械结构进行简化,得到如图 1 所示的磁带导引 AGV 循迹误差模型。如图所示,差动 AGV 两前轮作为驱动轮,实现差速转向,两后轮作为从动轮,起支撑作用。

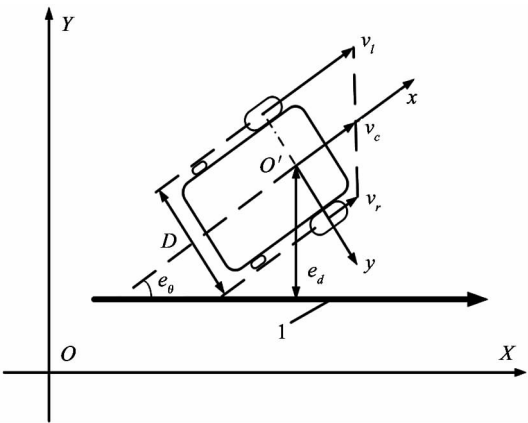


图 1 磁带导引 AGV 循迹误差模型示意图

图中各符号说明如下:

- O' —— AGV 两驱动轮中心点;
- D —— AGV 两驱动轮中心之间的距离;
- v_l —— AGV 左驱动轮速度;
- v_r —— AGV 右驱动轮速度;
- v_c —— AGV 移动速度;
- 1—— 导引磁带;
- e_θ —— AGV 中轴线与磁带中心线的夹角;
- e_d —— AGV 质心与磁带中心线的垂直距离;

假设 AGV 质地均匀,质心为两驱动轮中心点,且 AGV 运动过程中左右驱动轮与地面纯滚动无滑动。基于该假设,磁带导引 AGV 的循迹误差模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{e}_\theta = u/D \\ \dot{e}_d = v_c \sin e_\theta \end{cases} \tag{1}$$

令 AGV 左右驱动轮轮速差 $\Delta v = v_l - v_r$ 为系统控制输入 u ,其正负表征为 AGV 中轴线相对于磁带中心线左偏或右偏,设定 AGV 移动速度 v_c 为常值。令系统输出 $y = e_d$,则可将式(1)转换为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u) \\ y = h(x) \end{cases} \tag{2}$$

其中, $x = [e_\theta \ e_d]^T$ 为系统状态量。从式(1)可知该循迹模型为非线性的。

当 AGV 在做转向运动时,其瞬间运动可近似为直线运动。假设采样时间为 T ,获取 AGV 的里程计模型为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_c T \cos(\theta + \Delta\theta/2) \\ v_c T \sin(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中, $\Delta\theta = \frac{|v_l - v_r| T}{2D}$ 。根据里程计模型可以实时估算 AGV 的位置信息。

对式(1)中的两个等式分别积分得:

$$\begin{cases} e_\theta(t) = \frac{1}{D} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau + e_\theta(t_0) \\ e_d(t) = v_c \int_{t_0}^t \sin e_\theta(\tau) d\tau + e_d(t_0) \end{cases} \tag{4}$$

其中, t_0 为初始时刻, $e_\theta(t_0)$, $e_d(t_0)$ 为系统初始状态。

当 $e_\theta(t_0) = 0$, $e_d(t_0) = 0$ 时,取 $u(t) = 1$,则

$$\begin{cases} e_\theta(t) = \frac{t - t_0}{D} \\ e_d(t) = -Dv_c \cos \frac{t - t_0}{D} + Dv_c \end{cases} \tag{5}$$

由式(4)可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = \infty$,当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统输出状态为等幅震荡的余弦函数,不是收敛的,所以系统的 BIBO 稳定性是不稳定的。

当 $e_\theta(t_0) \neq 0$, $e_d(t_0) \neq 0$ 时,取 $u(t) = 1$,则

$$\begin{cases} e_\theta(t) = e_\theta(t_0) \\ e_d(t) = v_c \sin e_\theta(t_0) (t - t_0) + e_d(t_0) \end{cases} \tag{6}$$

由式(5)可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = e_\theta(t_0)$, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_d(t) = \infty$,即当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统输出状态为无穷大,不是收敛的,所以系统本质不稳定。

考虑如式(2)所示的非线性系统,给出其定义域 $D_x \times D_u$ 为

$$\begin{cases} D_x = \left\{ e_\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), e_d \in \left(-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right) \right\} \\ D_u = \{ u \in [0, v_c] \} \end{cases} \tag{7}$$

系统在定义域内是连续可微的,系统的平衡点有且只有一个。对式(1)在原点处线性化,可得线性化的系统模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\theta \\ \dot{e}_d \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_\theta \\ e_d \end{bmatrix} + Bu \quad (8)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ v_c & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{D} & 0 \end{bmatrix}^T$, 则

$$\begin{aligned} \text{rank}(Q_c) &= \text{rank}([B \ AB]) \\ &= \text{rank}\left(\begin{bmatrix} 1/D & 0 \\ 0 & v_c/D \end{bmatrix}\right) = 2 \end{aligned} \quad (9)$$

从式(8)可知线性化后的系统是可控的。系统的输出方程为

$$y = C[e_\theta \ e_d]^T \quad (10)$$

其中 $C = [0 \ 1]$, 则

$$\text{rank}(Q_o) = \text{rank}\left(\begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}\right) = \text{rank}\left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ v_c & 0 \end{bmatrix}\right) = 2 \quad (11)$$

从式(10)可知线性化后的系统是可观的,故可设计线性输出反馈控制器使得闭环系统稳定。

1.2 控制器设计

本文所要求是对 AGV 质心相对于磁带中心线的垂直距离 e_d 的控制,系统的输入是 AGV 左右驱动轮的轮速差 Δv , 则磁带导引 AGV 循迹系统可看成是单输入单输出(SISO)系统。通过输出反馈实现原非线性系统的稳定性,是基于状态观测器来设计控制器的。自抗扰控制的扩张状态观测器不仅对系统不可测状态进行估计,而且能对系统的内外扰动实时估计,并对含有总和扰动的部分动态线性化补偿。

做如下变换:

$$\begin{cases} z_1 = e_d \\ z_2 = v_c \sin e_\theta = \dot{e}_d \end{cases} \quad (12)$$

则 z_1 和 z_2 满足:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{v_c}{D} u \cos e_\theta \end{cases} \quad (13)$$

其中,非线性项可以通过控制 $u = \frac{D}{v_c \cos e_\theta} \dot{z}_2$ 消去,当 $-\frac{\pi}{2} < e_\theta < \frac{\pi}{2}$ 时,式(12)有明确定义。要求出新

坐标系 (z_1, z_2) 中的状态方程,可通过逆变换,即用 (z_1, z_2) 表示 (e_d, e_θ) 。

$$\begin{cases} e_d = z_1 \\ e_\theta = \arcsin\left(\frac{z_2}{v_c}\right) \end{cases} \quad (14)$$

在式(13)中,当 $-v_c < z_2 < v_c$ 时有定义。变换后的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{v_c}{D} \cos\left(\arcsin\left(\frac{z_2}{v_c}\right)\right) u \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)可知,通过变换状态变量,系统转换为积分串联系统,进而可采用标准自抗扰控制方法设计控制器。线性自抗扰控制的结构框图如图2所示。

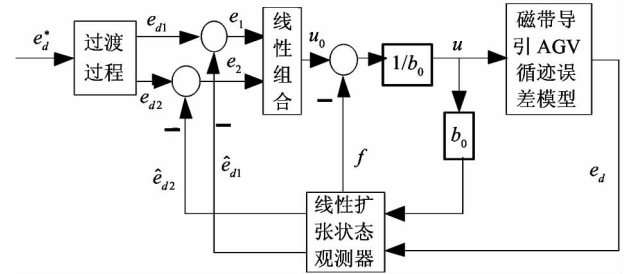


图2 线性自抗扰控制框图

由磁带导引 AGV 循迹系统模型可知该系统是二阶系统,故线性扩张状态观测器估计的状态有3个,分别是垂直距离 e_d 的估计值 $\hat{e}_{d1}$ 、 e_d 变化速率的估计值 $\hat{e}_{d2}$ 及总和扰动的估计值 f 。

第一部分为过渡过程的设计,为参考输入 e_d^* 安排过渡过程并提取其微分信号。则跟踪微分器(TD)为

$$\begin{cases} \dot{e}_{d1} = e_{d2} \\ \dot{e}_{d2} = -r(e_{d1} - e_d^*) - 2re_{d2} \end{cases} \quad (16)$$

其中 r 为决定跟踪速度的速度因子。

第二部分为扩张状态观测器的设计,线性扩张状态观测器(LESO)为

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_{d1} = \hat{e}_{d2} - \beta_1(\hat{e}_{d1} - e_d) \\ \dot{\hat{e}}_{d2} = \hat{e}_{d3} - \beta_2(\hat{e}_{d1} - e_d) + b_0 u \\ \dot{f} = -\beta_3(\hat{e}_{d1} - e_d) \end{cases} \quad (17)$$

其中 b_0 为补偿因子。式(17)所示的线性扩张状态观测器的特征方程为

$$s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = 0 \tag{18}$$

设式(17)的理想特征方程为 $(s + w)^3 = 0$, 则有 $[\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T = [3\omega \ 3\omega^2 \ \omega^3]^T$, ω 为扩张状态观测器的带宽, 其中 ω 根据系统带宽的要求确定或在线整定, 一般情况下 ω 的适应范围很宽, 因此比较容易调整出合适的 ω 。

第三部分是控制律的设计, 其形式如下:

$$\begin{cases} u_0 = k_1(e_{d1} - \hat{e}_{d1}) + k_2(e_{d2} - \hat{e}_{d2}) \\ u = (u_0 - f)/b_0 \end{cases} \tag{19}$$

其中 k_1 和 k_2 分别为比例和微分控制增益。

1.3 仿真研究

考虑如式(1)所示的磁带导引 AGV 循迹误差模型, 取 AGV 两轮中心之间的距离 D 为 0.4m。设定 AGV 与磁带中心线的期望误差 $e_\theta^* = 0, e_d^* = 0$, 以及 AGV 的移动速度为 $v_c = 1\text{m/s}$ 。另外, 式(1)是在假设 AGV 做纯滚动且无外部扰动下得到的循迹误差模型, 为了验证所设计控制器的抗干扰能力, 人为地加入扰动项 $n(t)$, 仿真时给定 $n(t)$ 为每 5s 加入一次强度为 0.5 的脉冲信号来模拟轮胎打滑等干扰。取 $e_\theta(t_0) = \pi/50\text{rad}$, $e_d(t_0) = 0.05\text{m}$, 并将设计的线性自抗扰控制器 (LADRC) 与传统 PID 控制器进行循迹效果对比, 以验证所设计控制器的优越性。其仿真控制参数分别为: PID 控制参数为 $k_p = 8, k_i = 5, k_d = 0.2$, LADRC 控制参数为 $r = 5, b_0 = 1, \omega = 50, k_1 = 5, k_2 = 5$ 。磁带导引 AGV 对圆周路径的循迹效果如图 3 和图 4 所示, 其对应的垂直距离偏差跟踪图如图 5 和图 6 所示。

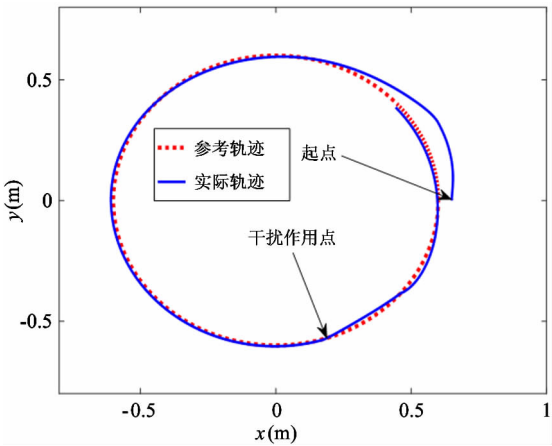


图 3 PID 控制的圆周路径循迹图

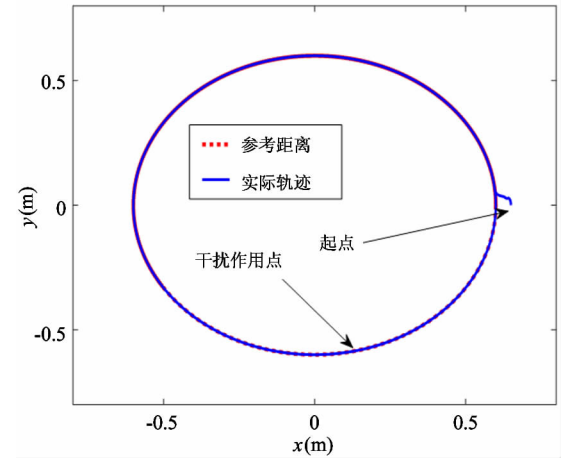


图 4 LADRC 控制的圆周路径循迹图

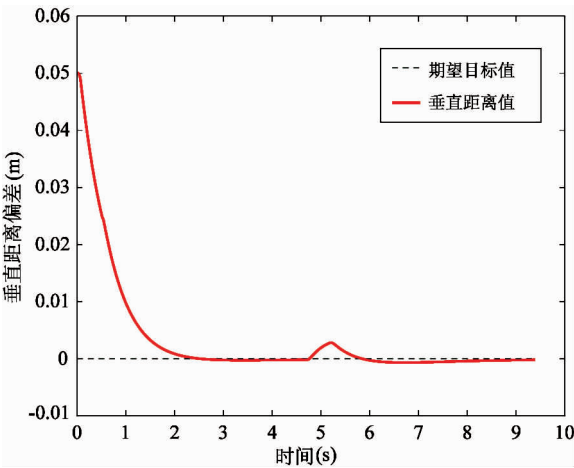


图 5 PID 控制垂直距离偏差跟踪图

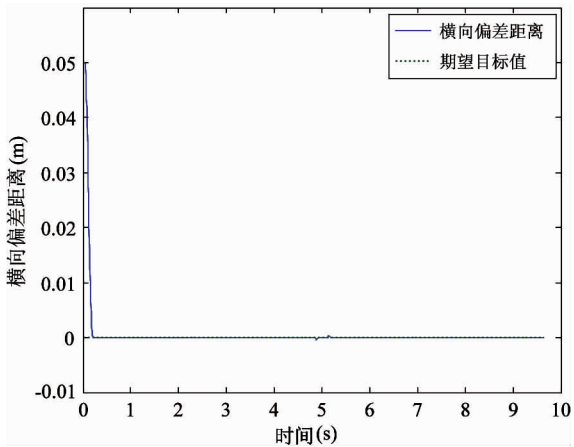


图 6 LADRC 控制垂直距离偏差跟踪图

1.4 实验研究

在实验中, 为了获取 AGV 的定位信息, 通过 AGV 内部的左右驱动电机的里程计数据来得到其

位置信息,对轮子打滑、初始误差等因素引起的里程计累积误差,利用磁导引传感器信息周期性地对累积误差进行修正,以获取较为准确的 AGV 位置信息。底层运动控制的实现采用 STM32F4 系列的控制芯片,完全能满足信息的采集、处理、发送等操作,上层在 VS/MFC 平台下编写上位机程序,以获取 AGV 的实时定位信息及发送控制信息,直观地体现 AGV 的动态性能。AGV 将左右驱动轮的速度、位置、垂直偏差等信息通过无线蓝牙的方式传送给上位机,通过里程计定位模型得到精准定位信息。然后将磁导引传感器得到的垂直偏差送给线性自抗扰控制器进行 AGV 的循迹控制。由此,AGV 每个周期通过磁导引传感器采集偏差信息,然后经过自抗扰控制器计算后得到左右驱动轮的速度值,接着采集左右电机的速度、位置信息,进而通过蓝牙将相关信息传送给上位机显示,如此反复更新位置数据来得到 AGV 的最终位置,其中 AGV 的起始位置和初始偏差已经给定。图 7 为磁带导引 AGV 的实验平台。

实验时,磁带轨迹为闭环跑道,由两段 3m 的直线轨迹和两段半径为 1m 的半圆轨迹组成。一旦确定 AGV 的起始位置,就可以通过里程计数据不断更新 AGV 的位置信息。以下给出 PID 控制和 LADRC 控制下 AGV 偏差距离的数据对比。实验过程中记录两者在直线轨迹和圆周轨迹中的最大偏差距离值。表 1 为偏差距离数据对比结果。

从图 5、图 6 和表 1 的对比可以看出,LADRC 控制较 PID 控制有更好的循迹效果,且在圆周轨迹的循迹过程中表现得更加明显。在直线轨迹循迹过程

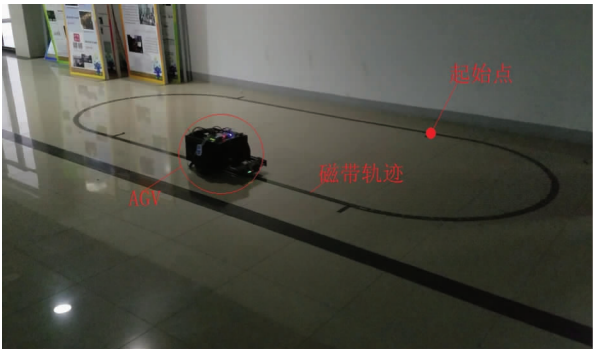


图 7 磁带导引 AGV 实验平台

表 1 AGV 偏差距离数据对比

控制算法	循迹路径	最大偏差距离	最小偏差距离
PID	直线	0.96cm	0.26cm
	弯道	6.78cm	3.40cm
LADRC	直线	0.53cm	0.14cm
	弯道	2.82cm	1.47cm

中,LADRC 的最大偏差为 0.53cm,而 PID 为 0.96cm;在圆周轨迹循迹过程中,LADRC 的最大偏差为 2.82cm,而 PID 为 6.78cm,由此可以看出 LADRC 具有更好的跟踪效果和抗扰能力。

2 结 论

本文研究了磁带导引 AGV 的循迹控制问题。针对不同的应用场景,需要对磁带导引 AGV 循迹控制系统的数学模型以及系统的抗干扰能力做出分析,进而设计其相应的控制方法。针对磁带导引 AGV 的循迹控制问题,首先需要建立磁带导引 AGV 的循迹误差模型,根据系统误差模型设计了一种自抗扰循迹控制方法。特别地,考虑到 AGV 实际运动过程中存在的轮子侧滑、地面不平以及摩擦等带来的不确定干扰,线性自抗扰控制方法将循迹控制系统的不确定动态描述为系统的加性总和干扰,通过干扰观测器可在线实时估计干扰并加以补偿,因此取得了良好的控制效果以及抗干扰能力。最后为验证所提出算法的有效性,设计了一种基于磁带导引的 AGV 实验平台。通过实验结果不难发现,相比 PID 算法,所设计的线性自抗扰控制算法具有更快的响应速度和更优的循迹控制效果。

参考文献

[1] Vis I F A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 170(3): 677-709

[2] Berman S, Schechtman E, Edan Y. Evaluation of automatic guided vehicle systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 125(3): 522-528

[3] 陈谦益. 磁带导引 AGV 小车中央控制系统的设计[D]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2014

[4] 李季. 磁带导引 AGV 的设计[D]. 济南: 山东大学现代物流研究中心, 2013

- [5] 黄胄. 基于 PLC 控制的 AGV 技术研究及其应用[D]. 上海: 华东理工大学机械电子工程学院, 2013
- [6] 杨先龙. 磁导航式差速 AGV 的结构及控制设计[D]. 合肥: 合肥工业大学机械工程学院, 2014
- [7] Chwa D. Fuzzy adaptive tracking control of wheeled mobile robots with state-dependent kinematic and dynamic disturbance[J]. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 2012, 20(3): 587-593
- [8] 王琳华. 磁导式 AGV 自动导航车控制系统的设计[D]. 长沙: 长沙理工大学电气与信息工程学院, 2013
- [9] 陈盈. 磁导引自动导航小车控制系统的设计[D]. 武汉: 湖北工业大学机械工程学院, 2013
- [10] 陈俊. 基于磁导航的 AGV 转弯和纠偏算法研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学检测技术与自动化装置系, 2013
- [11] Liang Y M, Xu L H, Wei R H, et al. Adaptive fuzzy control for trajectory tracking of mobile robot[C]. In: Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, China, 2010. 4755-4760
- [12] Teatro T A V, Eklund J M, Milman R. Nonlinear model predictive control for omnidirectional robot motion planning and tracking with avoidance of moving obstacles[J]. *Journal of Electrical & Computer Engineering Canadian*, 2014, 37(3): 151-156
- [13] Park B S, Yoo S J, Jin B P, et al. A simple adaptive control approach for trajectory tracking of electrically driven nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1199-1206
- [14] Yoo S J. Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(10): 2109-2119
- [15] Su K H, Chen Y Y, Su S F. Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot[J]. *Neurocomputing*, 2010, 73: 2478-2488
- [16] Chen H, Ma M M, Wang H, et al. Moving horizon H_∞ tracking control of wheeled mobile robots with actuator saturation[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2009, 17(2): 449-457
- [17] Xu D, Zhao D B, Yi J Q, et al. Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators: robust neural network-based sliding mode approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2009, 39(3): 788-799
- [18] Hwang C L, Chang L J. Trajectory tracking and obstacle avoidance of car-like mobile robots in an intelligent space using mixed H_2/H_∞ decentralized control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(3): 345-352
- [19] Khalaji A K, Moosavian S A A. Robust adaptive controller for a tractor: trailer mobile robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(3): 943-953
- [20] Yang S X, Zhu A, Yuan G F, et al. A bioinspired neuro dynamics-based approach to tracking control of mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8): 3211-3220
- [21] Kayacan E, Kayacan E, Ramon H, et al. Towards agrobots: trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 287-298

An ADRC approach to trajectory tracking control of tape guided AGV

Yin Shu^{*}, Zhou Haihai^{**}, Qiu Xiang^{**}

(^{*} Center of Electrician and Electronics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(^{**} College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

This paper investigates the trajectory tracking control problem for tape aided automated guided vehicle (AGV), and a linear active disturbance rejection controller (ADRC) is designed for accurate trajectory tracking and good disturbance rejection control. First, a tracking error system model is established for the tape guided AGV, and the uncertainties are described as an additive bounded disturbance. Then, an extended state observer is designed to estimate the lumped disturbance, and the estimated disturbance is rejected from the system by dynamic linearization compensation. The effects of the model uncertainties on the tracking control performance are thus reduced. Finally, an experiment platform of the AGV system is established, and the effectiveness of the proposed design method is verified by experiments.

Key words: automated guided vehicle (AGV), magnetic tape guidance, tracking control, linear active disturbance rejection control, disturbance rejection