

一种双车协同搬运控制技术的研究

胡泊,楼佩煌,钱晓明,武星,楼航飞
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对自动导引车在运输大型复杂零部件时,存在结构强度较弱、承载不足的缺点,针对双麦克纳姆轮自动导引车平台,提出了基于 Leader-Follower 控制策略的协同搬运方法。详细介绍了麦克纳姆轮自动导引车的控制方法、主-从车轨迹跟踪误差模型以及为实时调整从车轨迹跟踪误差而提出的基于指数趋近率的自适应滑膜控制器。仿真结果表明,该控制器调整从车运动具有较高的实时性、精确性和鲁棒性。

关键词:双车协同搬运;Leader-Follower 策略;自适应指数滑膜控制器

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0169-04

Study of Two-car Cooperative Handling Control Technology

HU Bo, LOU Peihuang, QIAN Xiaoming, WU Xing, LOU Hangfei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Some disadvantages, such as weak structural strength and insufficient bearing capacity, exist in the automated guided vehicle for transporting large and complex parts. This paper proposes a cooperative handling control method based on the Leader-Follower control strategy on the platform of the dual Mecanum wheel automated guided vehicle, introduces its control method, the master-slave vehicle trajectory tracking error model, and the adaptive sliding mode controller based on the exponential approach rate proposed to the real-time adjustment of the tracking error of the vehicle trajectory. The simulation data shows that the controller can be used to adjust the real-time motion, accuracy and robustness of the vehicle.

Keywords: two-car cooperative handling; Leader-Follower strategy; adaptive sliding mode controller

0 引言

当前全球在“德国工业 4.0”、“中国制造 2025”等新兴理念影响下,智能物料输送系统应运而生,自动导引车(automated guided vehicle, AGV)已成为工业自动化和物流自动化系统的重要部分。但是当需要运输例如飞机机翼、高铁车厢等大型零部件时,单 AGV 就会暴露出结构强度较弱、承载不足的缺点。为了解决这类问题,可以通过利用现有结构简单、易于设计制造的 AGV,采用多 AGV 协同搬运大型零部件。本文提出了一种基于 Leader-Follower 控制策略的双 AGV 编队的方法^[1]和基于指数趋近率的自适应滑膜控制器,以实时调整从车轨迹跟踪误差,最终实现大型零部件的搬运。

1 双车协同搬运模型

本文使用麦克纳姆轮 AGV 作为双车协同搬运的平台,该搬运模型如图 1 所示。

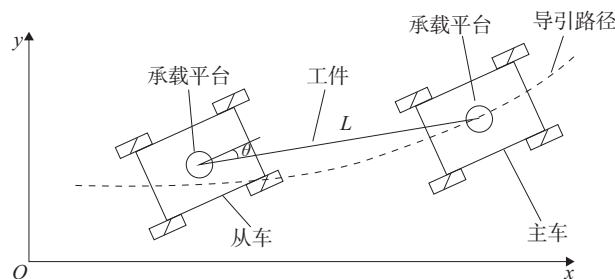


图 1 双车协同搬运模型

图 1 中主车按照既定的轨迹运行,从车和主车之间保持确定距离和角度,即主车和从车采用 Leader-Follower 编队策略,按照预设编队队形前行,共同搬运大型的零部件。主车和从车搭载着零部件承载平台,该平台可小幅旋转和移动,保证了从车在轨迹跟踪存在偏差的时候有一定的余量进行距离补偿和角度补偿。两车所搬运零件的长度为 L ,两车之间夹角为 θ 。双车协同搬运模型即保证在运输过程中保持 L 和 θ 不变。

基金项目:国家自然科学基金项目(61973154);江苏省重点研发计划项目(BE2016004-3);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20180517)

第一作者简介:胡泊(1994—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为智能制造和移动机器人。

2 运动控制分析

2.1 麦克纳姆轮 AGV 的运动模型

设麦克纳姆轮 AGV 轮距为 2 m,轴距为 $2L$ 。设第 i 个车轮的角速度为 ω_i ($i=1,2,3,4$),单位为 rad/s。当车体与世界坐标系下的夹角为 β 时,车体中心的速度为:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \Gamma(\beta) \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ l+m & l+m & l+m & l+m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Gamma(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2 主-从车轨迹跟踪误差模型

在主-从车协同搬运的过程中,主车沿着既定的路径前进,从车以主车的位姿作为参考点实时调整运动状态,以保持主-从车之间的相对位姿不变,即相对于主车,从车保持静止。因此可以将主-从车协同搬运的问题转换为从车的轨迹跟踪问题。

对于从车的轨迹跟踪,首要任务是保持从车对主车的相对静止,即以主车的几何中心为参考点,主-从车几何中心之间拥有确定的距离和角度,进而求解出从车的轨迹跟踪误差^[2]。主-从车控制模型如图 2 所示。

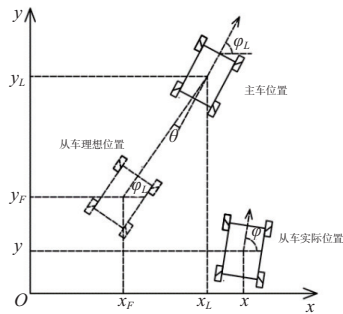


图 2 主-从车控制模型图

图 2 中,主-车几何中心与从车几何中心的距离为 L ,形成的方位夹角为 θ 。在时刻 t ,主车几何中心在广义坐标系下的坐标为 $[x_L \ y_L \ \varphi_L]^T$,则从车几何中心在此刻的期望位姿 $[x_F \ y_F \ \varphi_F]^T$ 为:

$$\begin{cases} x_F(t) = x_L(t) - L\cos[\varphi_L(t) - \theta] \\ y_F(t) = x_L(t) - L\sin[\varphi_L(t) - \theta] \\ \varphi_F = \varphi_L - \theta \end{cases} \quad (2)$$

在实际双车系统中, $\theta=0^\circ$,即 $[x_F \ y_F \ \varphi_F]^T$ 为:

$$\begin{cases} x_F(t) = x_L(t) - L\cos[\varphi_L(t)] \\ y_F(t) = x_L(t) - L\sin[\varphi_L(t)] \\ \varphi_F = \varphi_L \end{cases} \quad (3)$$

则在广义坐标系 Oxy 下,从车几何中心的理想位姿与实际位姿 $[x \ y \ \varphi]^T$ 之间的误差为:

$$\begin{cases} x_e = x_F - x \\ y_e = y_F - y \\ \varphi_e = \varphi_F - \varphi \end{cases} \quad (4)$$

至此,得出从车的轨迹跟踪误差。其中 $(x_e, y_e, \varphi_e)^T$ 是从车与其理想位姿之间的轨迹跟踪误差。于是,主-从协同搬运问题又转换为从车的运动控制器问题。控制器以 $(x_e, y_e, \varphi_e)^T$ 为输入,控制其趋近于 0,最终保持主从车的相对静止。

2.3 从车轨迹跟踪运动控制器

通过求解从车轨迹跟踪误差,主-从车协同搬运的问题转换为从车的轨迹跟踪问题。从车的轨迹跟踪控制器主要以轨迹跟踪误差为输入,输出 4 个麦克纳姆轮的角速度,以实时对从车的理想轨迹进行跟踪,使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|(x_e \ y_e \ \varphi_e)\| = 0$ 。

1) 基于指数趋近律的滑模控制器

对于从车的运动控制,因为滑模变结构能够对于非线性系统以及非连续性系统进行控制,并且响应迅速,具有较强鲁棒性,但是由于主-从车运行环境复杂以及伺服电机系统的不稳定性,滑膜趋近率的参数需要进行实时调整,因此本文采用基于指数趋近律的滑模控制轨迹跟踪控制器对从车进行控制^[3]。

在滑膜控制的过程中,需要保证系统始终运行在所设置的滑膜面 $s(t)=0$ 上。因为 PI 控制可以适应环境的变化,提高系统的稳定性,因此采用 PI 形式的滑膜面。而对于从车的运动控制,滑膜面是关于轨迹跟踪误差 $e(t) = (x_e \ y_e \ \varphi_e)^T$ 的函数,滑膜面为:

$$s(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \end{bmatrix} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (5)$$

其中: $K_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2}, K_{p3})$; $K_i = \text{diag}(K_{i1}, K_{i2}, K_{i3})$ 。

为了提高系统的稳定性,减少滑膜控制在控制过程中位于平衡点的抖动,本文采用基于指数的滑膜趋近律方法。相较于一般趋近率、等速趋近率等方法,该方法具有快速收敛的特点,能够提高从车实时控制的动态性能。基于指数的滑膜趋近律表达式如下:

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= -\lambda_i \text{sgn}[s_i(t)] - \mu_i s_i(t) \\ \lambda_i > 0, \mu_i > 0 \quad (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\dot{s}_i(t) = -\mu_i s_i(t)$, 是指数趋近项,它的解是 $s_i(t) = s_i(0) e^{-\mu_i t}$; $\text{sgn}()$ 为符号函数,其表达式为:

$$\text{sgn}[s_i(t)] = \begin{cases} 1 & s_i(t) > 0 \\ -1 & s_i(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

因为在指数趋近的过程中,趋近速度是逐渐从较大值变化到 0,虽然减少了趋近的时间,但是在趋近切换面时,趋近速率很小,导致在趋近切换面时是一个缓慢的过程,无法确定在有限的时间内到达切换面。因此增加一个等速趋近项, $\dot{s}_i(t) = -\lambda_i \text{sgn}[s_i(t)]$, 当趋近切换面时,保证趋近速率为 λ_i 而不是 0,进而可以在有限的时间内到达切换面。

符号函数 $\text{sgn}()$ 会导致趋近率趋近 0 时,在切换面附

近出现跳变,导致系统的抖动。为了缓解这种现象,引入饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$,其表达式如下:

$$\text{sat}[s_i(t)] = \frac{s_i(t)}{|s_i(t)| + \varepsilon_i} \quad (8)$$

其中 ε_i 是正小量。则趋近率为:

$$\dot{s}_i(t) = -\lambda_i \text{sat}[s_i(t)] - \mu_i s_i(t) \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

2) 基于指数趋近律的自适应滑模控制器

由于麦克纳姆轮 AGV 运行过程中,可能会遇到复杂的路面情况以及传动系统的不稳定性,指数趋近率参数需要不断地调整。为了避免后续对趋近率参数的调整,本文专门设计了自适应的基于指数的滑模控制器以提高系统的自适应性。公式(9)中的趋近率参数 μ_i 决定系统的收敛速度,因此需要为 μ_i 设计自适应率。定义 $\hat{\mu}_i$ 是 μ_i 的估计值, μ_i 是参数的名义值, $\tilde{\mu}_i = \hat{\mu}_i - \mu_i$ 。那么,基于指数的滑膜趋近率可以改成以下形式:

$$\dot{s}_i(t) = -\lambda_i \text{sat}[s_i(t)] - \hat{\mu}_i s_i(t) \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

自适应律设计如下:

$$\dot{\hat{\mu}}_i = \rho_i s_i^2 \quad (11)$$

对式(5)两端求导,可得:

$$\dot{s}(t) = K_p \dot{e}(t) + K_i e(t) \quad (12)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_1(t) \\ \dot{s}_2(t) \\ \dot{s}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{p3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\varphi}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)与式(6)相结合,可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1(t) &= K_{p1} \dot{x}_e + K_{i1} x_e = K_{p1} (\dot{x}_F - \dot{x}) + K_{i1} x_e = \\ &= -\lambda_1 \text{sat}[s_1(t)] - \hat{\mu}_1 s_1(t) \end{aligned} \quad (14)$$

即可得到轨迹跟踪误差修正后的速度:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_F + \frac{1}{K_{p1}} \{ K_{i1} x_e + \lambda_1 \text{sat}[s_1(t)] + \hat{\mu}_1 s_1(t) \} = \\ v_{Fx} &+ \frac{1}{K_{p1}} \{ K_{i1} x_e + \lambda_1 \text{sat}[s_1(t)] + \hat{\mu}_1 s_1(t) \} \end{aligned} \quad (15)$$

同理可得:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_{Fy} + \frac{1}{K_{p2}} \{ K_{i2} y_e + \lambda_2 \text{sat}[s_2(t)] + \hat{\mu}_2 s_2(t) \} \\ \dot{\varphi} = \omega_F + \frac{1}{K_{p3}} \{ K_{i3} \varphi_e + \lambda_3 \text{sat}[s_3(t)] + \hat{\mu}_3 s_3(t) \} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $[v_{Fx} \ v_{Fy} \ \omega_F]^T$ 是从车的期望速度和角速度,在主-从车协同搬运的过程中,为主车的实时速度和角速度。那么从车几何中心修正后的速度为 $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\varphi}]^T = [v_x \ v_y \ \omega_z]^T$ 。

结合式(1),即可得到4个轮子修正后的角速度:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{4}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -l-m \\ -1 & 1 & l+m \\ -1 & 1 & -l-m \\ 1 & 1 & l+m \end{bmatrix} \Gamma(\beta)^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

3 仿真与分析

为了验证第1节提出的基于指数趋近率的自适应滑膜控制器应用于麦克纳姆轮 AGV 轨迹追踪的可行性以及性能,本节对该控制器进行计算机仿真实验。

首先设计一条轨迹,通过对该轨迹的跟踪,分析控制器的性能。设计标称轨迹为

$$\begin{cases} x = \cos t \\ y = \sin t \\ \theta = t \end{cases} \quad (18)$$

即:圆心为(0,0)、半径为1的圆。轨迹的初始位置为 $[-2, 0, 0]$ 。采用基于指数趋近率的自适应滑膜控制器进行仿真,仿真测试的系数为:

$$K_p = \text{diag}(11, 12, 7), K_i = \text{diag}(3, 3, 1);$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 2;$$

$$\rho_1 = 1.5, \rho_2 = 1.5, \rho_3 = 1.5,$$

$$\hat{\mu}_i \text{ 的初始值: } \hat{\mu}_1(1) = \hat{\mu}_1(2) = \hat{\mu}_1(3) = 0$$

其仿真结果如图3-图5所示。

图3为采用基于指数趋近率的自适应滑膜控制器输出的圆弧轨迹跟踪航向角对比图。因为系统初始值与圆弧路径存在较大的偏差值,导致系统实际的航向角与理想航向角存在较大的偏差值。经过2.5s,实际航向角逐步趋近于理想航向角。图4为圆弧轨迹跟踪航向角度偏差。

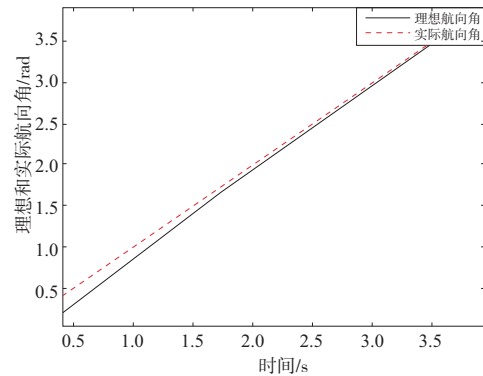


图3 圆弧轨迹跟踪航向角对比图

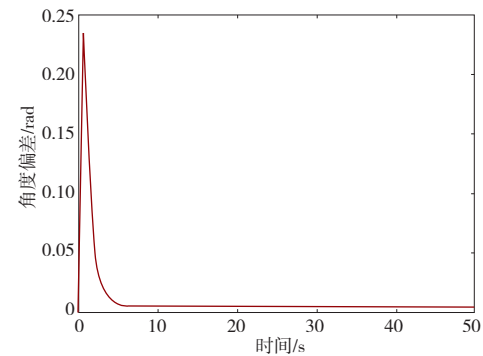


图4 圆弧轨迹跟踪航向角度偏差

图5为圆弧轨迹跟踪时,在世界坐标系下实际位置与理想位置关于x方向与y方向的误差。经过4s,误差逐步趋近于0。

图6为圆弧轨迹的位置跟踪图。从图6可以看出,采用基于指数趋近率的自适应滑膜控制器,在有较大偏差的情况下,系统很快收敛于理想路径,并在快速收敛后,系统存在较小误差,稳定于理想路径。因此该控制器具有很好的实时性、精确性和鲁棒性。

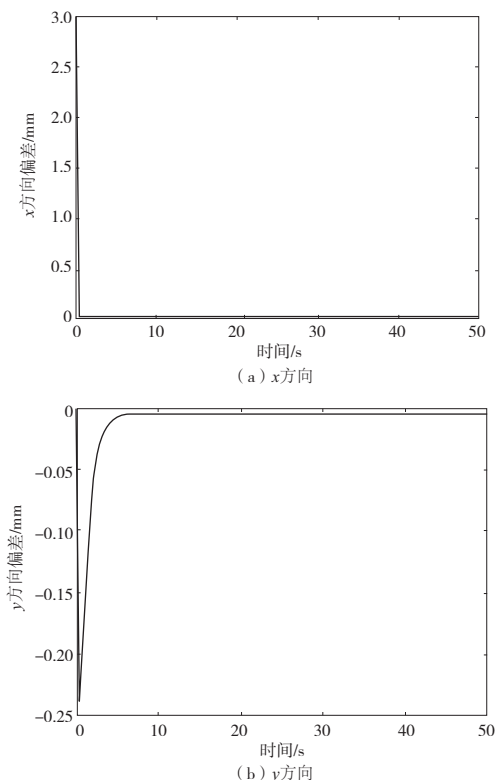


图5 圆弧轨迹跟踪距离偏差

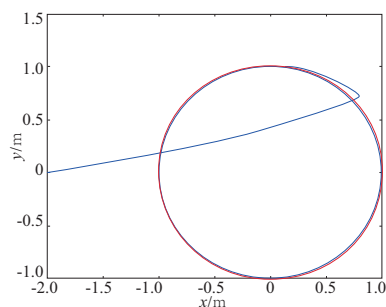


图6 圆弧轨迹的位置跟踪图

4 结语

本文提出了一种基于 Leader-Follower 编队策略的双车协同搬运方法,为解决搬运大型复杂零部件提供了一种思路。主车按照既定路线运行,从车实时跟踪主车保持理想编队队形。在实时调整轨迹跟踪误差时,本文所提出的基于指数趋近率的自适应滑膜控制器具有很好的实时性、精确性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李翰博,刘林,田彦涛. 基于 Leader-Follower 的自主车辆跟随控制器设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2016, 34(2): 55-62.
- [2] 许艳梅. 基于引导角的轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 电子世界, 2018(3): 98.
- [3] 刘金琨,孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.

收稿日期:2019-10-23

(上接第 155 页)

2 结语

工业机器人远程监测系统通过现场机器人系统采集机器人运动数据,进行现场存储并上传到云服务器中的数据库进行存储管理后,监测处理系统通过远程访问云服务器获取数据,实现应用企业在 PC 上登录客户端,方便对现场机器人进行远程监测,突破了距离的限制,能够随时随地对机器人的运动状态和工作完成情况进行监管。利用监测处理系统人机交互界面,应用企业可经过机器人运动状态数据变化曲线直观清晰地了解机器人当前的工作状态,并在历史窗口和超值窗口中查看历史数据、各项运动指标超值情况和异常数据的情况记录。整个系统结构简单且实施成本低,应用企业使用该系统远程监测机器人既不受第三方监管,也有利于提高企业的生产效益。

参考文献:

- [1] 刘磊. 工业机器人远程监控诊断服务系统的设计开发[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [2] 李烈. 我国工业机器人发展现状浅谈[J]. 科技致富向导, 2011(5): 56-57.

- [3] 郭春明,杨文月,程亮. 基于 ZigBee 的智能家居温湿度监测系统[J]. 东北电力大学学报, 2012(4): 14-17.
- [4] 骆晓娟,许力. 基于 Ajax 和 B/S 构架的实时监测系统[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(4): 64-65.
- [5] 吴灿培,胡顺豪,王海航,等. 基于 Ajax 和 SVG 的 Web 远程实时监控[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(9): 3004-3007.
- [6] 常瑞丽,韩军,崔国玮. 智能移动机器人远程监控系统研究与开发[J]. 机床与液压, 2011, 39(18): 100-102.
- [7] 赵全保. 移动机器人网络控制中的关键技术研究[D]. 天津:天津理工大学, 2006.
- [8] 赵庆涛,周翟和,虞波,等. 基于嵌入式 Web 的移动机器人安全性故障监控系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 174-176.
- [9] 周永龙,雷金奎. 基于 STM32 的数字舵机控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(1): 66-68.
- [10] 黄智宇,张晓雷,郑太雄. 电动车用永磁同步电动机 FOC 控制系统实现[J]. 电气传动, 2013, 43(12): 7-11.

收稿日期:2019-09-02