

协同搬运系统中的麦克纳姆轮 AGV 运动控制研究

李彦文,楼佩煌,楼航飞,翟晶晶

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:基于麦克纳姆轮 AGV 组成的搬运系统在路径跟踪过程中,由于距离偏差和角度偏差会导致搬运系统不稳定以及定位不准确。针对此问题,通过建立单台 AGV 在路径跟踪过程中的运动学模型,分析影响偏差的主要参数,提出了模糊 PID 控制方法。通过采集视觉传感器实时反馈的角度偏差和距离偏差,在线调整 PID 控制参数来实现对 AGV 的运动补偿控制。由仿真实验可知,与传统 PID 控制相比,该控制方法在路径跟踪过程中有较高的稳定性和实时性。

关键词:麦克纳姆轮;稳定性;路径跟踪;模糊 PID 控制

中图分类号:TP273+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)06-0224-04

Research on Motion Control of Mecanum Wheel AGV in Cooperative Transport System

LI Yanwen, LOU Peihuang, LOU Hangfei, ZHAI Jingjing

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

Abstract: With regard to unstable handling system and inaccurate positioning due to the distance deviation and the angle deviation in the path tracking process of the handling system based on the AGV of Mecanum wheels, a fuzzy PID control method is proposed by establishing a kinematic model of a single AGV in the path tracking process and analysing the main parameters affecting the deviation. By collecting the real-time feedback of the angle deviation and distance deviation of the vision sensor, the PID control parameters are adjusted online to realize the motion compensation control of the AGV. It is known from the simulation experiment that the proposed control method has higher stability and better real-time performance in path tracking process in comparison with the traditional PID control one.

Keywords: mecanum wheel; stability; path tracking; fuzzy PID control

0 引言

随着智能物流的提出,多 AGV 协同搬运技术的研究逐渐成为此领域的研究热点^[1]。协同搬运的目的是使被搬运工件稳定到达工位点,其关键技术在于选取合适的控制方法来保证系统内 AGV 在路径跟踪过程中能够稳定运行。本文基于麦克纳姆轮 AGV 作为协同搬运的运动平台,利用运动学建模分析偏差产生的主要因素,运用模糊 PID 控制算法实时调整 PID 参数,快速平稳地消除系统内 AGV 路径跟踪过程中产生的角度偏差和距离偏差,提高了搬运系统的稳定性。

1 麦克纳姆轮 AGV 运动学模型分析

基于麦克纳姆轮结构的全向 AGV 由于其运动控制灵活,在智能化运输车间得到广泛应用^[2],通过对麦克纳姆轮系有规律地布局,AGV 可以在平面内任意自由度运动。本文通过建立 AGV 车体速度与电机实际转速的矩阵分配方程,将系统的整体运动控制转换成各轮的运动控制。

如图 1 所示,建立全局坐标系 $Oxy-z$,车轮坐标系 $O_i x_i y_i z_i$,设 AGV 的速度为 v_x, v_y ,角速度为 ω_z ;车轮的转速为 ω_i ,半径为 R ,辍子的线速度为 v_{ir} ,则车轮的线速度为 $v_{iw} = \omega_i R$; L_1, L_2 分别为垂直、水平方向上轮距的一半,辍子偏置角 α 为 45° ,由图 1 可得四驱麦克纳姆轮 AGV 的正运动学方程为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{L_1+L_2} & \frac{1}{L_1+L_2} & -\frac{1}{L_1+L_2} & \frac{1}{L_1+L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

J 为全方位 AGV 系统的雅可比矩阵, $\text{rank}(J) = 3$, 所以 v_x, v_y, ω_z 相互独立^[3]。由式(1)可知:

- 1) 当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega$ 时, $v_x = 0, v_y = R\omega, \omega_z = 0$, 小车沿 y 方向平移。
- 2) 当 $\omega_1 = -\omega_2 = -\omega_3 = \omega_4 = \omega$ 时, $v_x = R\omega, v_y = 0, \omega_z = 0$, 小车沿 x 方向平移。
- 3) 当 $\omega_1 = -\omega_2 = \omega_3 = -\omega_4 = \omega$ 时, $v_x = 0, v_y = 0, \omega_z = \frac{R\omega}{L_1+L_2}$, 小车绕 z 轴原地旋转。

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20190516)

第一作者简介:李彦文(1995—),男,山西介休人,硕士研究生,研究方向为智能制造、多 AGV 协同控制。

其中: v_x 、 v_y 和路径跟踪的距离偏差 e_d 以及沿轨迹的切线速度 v_τ 相关; ω_z 与路径跟踪的角度偏差 e_θ 相关, 为提高搬运系统内 AGV 路径跟踪的稳定性奠定基础。

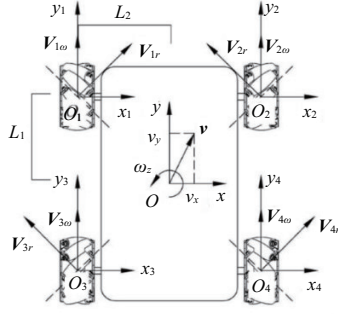


图1 全方位移动机器人运动学模型

2 AGV 路径跟踪运动学模型分析

AGV 路径跟踪过程中的距离偏差 e_d 和角度偏差 e_θ 如图 2(a) 所示, θ 为 AGV 实际运行速度 v 与车身方向的夹角, v_τ 为 AGV 在路径跟踪过程中的期望切线速度。 v_x 、 v_y 、 v_τ 和 v 存在如下关系:

$$\begin{cases} v_x = v \sin \theta \\ v_y = v \cos \theta \\ v_\tau = v \cos(\theta - e_\theta) \end{cases} \quad (2)$$

设 t 时刻角度偏差为 $e_\theta(t)$, 经过控制周期 T 到达 $t+T$ 时刻的角度偏差为 $e_\theta(t+T)$ 。由于控制周期极短, ω_z 可看作固定值, 此时 AGV 转过的角度为 $\omega_z T$, 则有

$$e_\theta(t+T) = e_\theta(t) + \omega_z T \quad (3)$$

采用几何方法计算距离偏差^[4], 假设当前状态下 $\sum xOy$ 不随 AGV 运动, 观察 AGV 运动到下一个时刻的距离偏差变化情况, 如图 2(b) 所示, 假设当前 t 时刻 AGV 相较于轨迹线的距离偏差为 $e_d(t) = l_{OE}$, 经过控制周期 T 到达 $t+T$ 时刻的距离偏差为 $e_d(t+T) = l_{BD}$ 。由于控制周期 T 很短, 角度偏差变化量较小, AGV 运动轨迹可近似看作直线 OB , 且 $l_{OB} = vT$ 。距离偏差的减小量 AB 为 $l_{AB} = v_x T$, 距离偏差的增加量 CD 为 $l_{CD} = l_{CE} \tan e_\theta = v_y(t) \cdot T \tan e_\theta(t)$ 。由于 $l_{BD} = l_{OE} + l_{CD} - l_{AB}$, 可得下一时刻距离偏差 $e_d(t+1)$ 为

$$e_d(t+1) = e_d(t) + v_y(t) T \tan e_\theta(t) - T v_x(t) \quad (4)$$

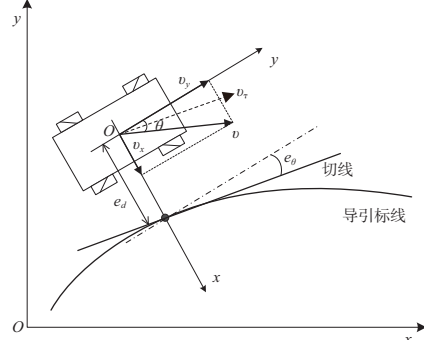
由于在小角度偏差情况下, $e_\theta(t)$ 很小, 由式(2)可知, $v_y = v_\tau - v_x e_\theta$, 代入式(4)并结合式(3)可得控制周期为 T 的路径纠偏下 AGV 的运动学偏差模型为

$$\begin{cases} e_\theta(t+T) = e_\theta(t) + \omega_z T \\ e_d(t+T) = e_d(t) + v_\tau T e_\theta(t) - v_x(t) T \end{cases} \quad (5)$$

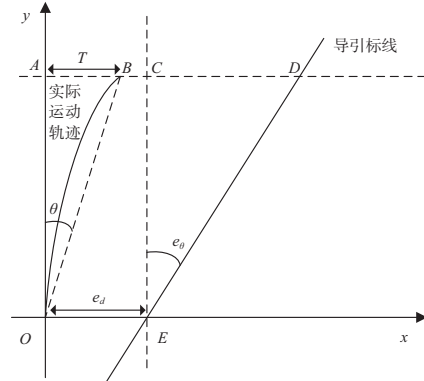
根据式(5)可知, 角度偏差 $e_\theta(t+T)$ 的变化完全取决于 ω_z , 距离偏差 $e_d(t+T)$ 的变化不仅取决于 v_x , 还与前一状态的角度偏差 $e_\theta(t)$ 有关, 因此本文通过控制 v_x 和 ω_z 来消除这两种偏差, 调整位姿状态。

3 模糊 PID 控制方法

传统 PID 控制被广泛应用在自动化领域, 但存在响



(a) AGV路径跟踪运动学模型



(b) 几何运动学模型

图2 AGV 路径跟踪的偏差分析

应速度较慢、鲁棒性差、不具备在线整定 K_p 、 K_i 、 K_d 控制参数等缺点, 无法保证系统在不同偏差情况下实时稳定运行的要求^[5]。而模糊控制具有抗干扰能力强、响应速度快、对系统参数变化有较强的鲁棒性等特点, 适合于非线性、时变的系统控制。通过将两者结合, 在线整定 K_p 、 K_i 、 K_d 控制参数, 不仅使机器人系统具有 PID 控制的控制精度高, 也拥有模糊控制的适应性强特点^[6]。

本文采用模糊 PID 控制器在 AGV 路径跟踪过程中, 通过传感器采集到的距离偏差 e_d 和角度偏差 e_θ 及其变化率在线改变 PID 控制参数, 从而提高对 v_x 和 ω_z 控制的动态性, 提高 AGV 在路径跟踪过程中的稳定性, 其原理图如图 3 所示。

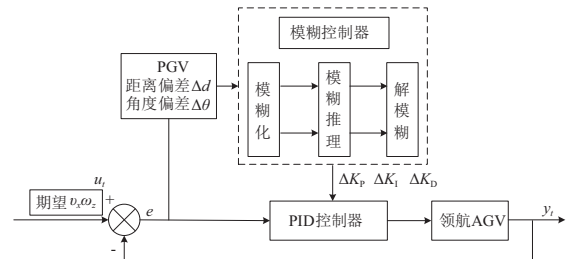


图3 模糊 PID 控制原理图

3.1 输入变量模糊化

将距离偏差 e_d 和角度偏差 e_θ 及其变化率作为模糊控制的输入量, 语言变量 E_d 、 EC_d 、 E_θ 、 EC_θ , 基本论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。PID 控制器中各参数的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为模糊控制的输出量, 语言变量为 U_p 、 U_i 、 U_d , 基本论域分别为 $(-0.5, 0.5)$ 、 $(-0.1, 0.1)$ 、 $(-0.5, 0.5)$ 。

输入与输出的模糊子集都设定为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},即负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。考虑到系统的实时性,输入隶属度函数以及输出隶属度函数选择三角函数。

3.2 建立模糊规则

本文基于 AGV 路径跟踪过程中产生的距离偏差和角度偏差,设计了两个模糊 PID 控制器。依据大量实验结果,结合 AGV 应用场景,建立了以下输出变量的模糊规则:

1) 当距离偏差 e_d 或角度偏差 e_θ 较大,且偏差变化率较大时, K_p 应较大幅度纠偏,加快 AGV 响应速度,为避免出现超出许可范围的超调现象,应减小 K_i 、 K_d 的取值。

2) 当距离偏差 e_d 或角度偏差 e_θ 和偏差变化率为中等时,为保证响应速度, K_p 应较大幅度纠偏,为防止出现过大的超调, K_i 、 K_d 应较大幅度纠偏。

3) 当距离偏差 e_d 或角度偏差 e_θ 较小,且偏差变化率较大时, K_i 应较大幅度纠偏,尽可能提高 AGV 的稳态性能, K_d 应较大幅度纠偏。

以 e_d 为例,列出输出规则见表 1, e_θ 也可以类似地推算出来。

表 1 模糊控制规则表

序号	e_d	$\dot{e}_d$	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
1	NB	NB	PB	NM	NB
2	NB	NM	PB	NM	NB
3	NB	NS	PM	NS	NM
4	NB	ZO	PM	ZO	ZO
5	NB	PS	PM	PS	PM
6	NB	PM	PB	PM	PB
7	NB	PB	PB	PM	PB
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
46	PB	ZO	NM	PM	PM
47	PB	PS	NM	PM	NS
48	PB	PM	NB	PB	PS
49	PB	PB	NB	PB	PB

3.3 去模糊化

通过上述的模糊推理过程得到两控制器输出的模糊集,此时还需要将模糊量转换为精确量,即去模糊化。常用的解模糊算法有最大隶属度法、质心法和加权平均法,本文选用加权平均法去模糊化,其公式如下:

$$\mu = \frac{\sum \mu(\mu_i) \cdot \mu_i}{\sum \mu(\mu_i)} \quad (6)$$

通过上式离线计算得到的去模糊化后的精确控制量存放在系统控制决策表中,在程序运行过程中通过查表读取当前状态下模糊控制器的输出数据 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,与前一状态的控制参数相加即为 PID 控制器更新后的参数。利用此方法可以优化计算时间,提高实时性。

4 实验分析

为验证本文提出的模糊 PID 控制器对提高搬运系统稳定性的有效性,搭建 AGV 协同搬运系统,在此平台上进行实验验证。其中 $L_1 = 400 \text{ mm}$, $L_2 = 280 \text{ mm}$, $R = 120 \text{ mm}$,色带宽度为 30 mm。当平台沿固定色带运行时,设定初始的期望参数为 $v_x = 0$, $\omega_z = 0$, $v_y = v_r = 0.5 \text{ m/s}$,实验结果的有效性通过其中一台 AGV 车底中心的 PGV 传感器反馈的偏差数据来印证。由于平台存在初始位置摆放偏差,所以起始偏差较大,AGV 在模糊 PID 控制下的路径跟踪偏差如图 4 所示,在传统 PID 控制下的路径跟踪偏差如图 5 所示。

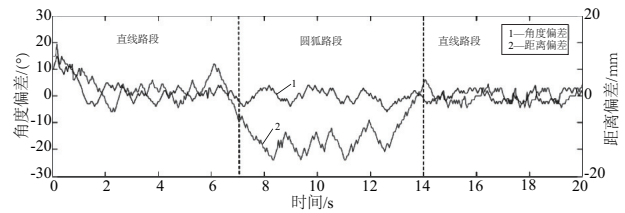


图 4 模糊 PID 控制下的偏差

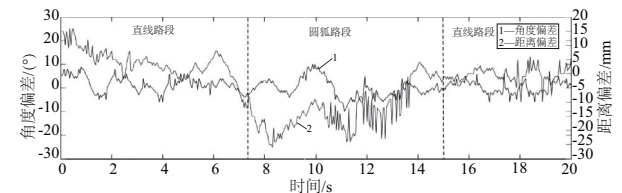


图 5 传统 PID 控制下的偏差

对比两种控制下 PGV 反馈的偏差数据可以得出,AGV 在直线路段路径跟踪过程中,模糊 PID 控制下的距离偏差相对传统 PID 控制较小,且响应时间较快,波动较小;当 AGV 行驶在圆弧路段时的距离偏差都比行驶在直线时的距离偏差较大,且模糊 PID 控制下的距离偏差相对波动平缓,提前结束圆弧路段;对于角度偏差,模糊 PID 控制相比传统 PID 控制偏差较小。综上所述,本文针对 AGV 设计的模糊 PID 控制算法能使协同搬运系统稳定运行。

5 结语

随着机器人应用场景的复杂化、大型化,多机器人协作搬运是机器人技术发展的必然趋势。多机器人系统可以有效提高单机器人在功能、效率以及负载能力等方面的不足,日后多机器人系统的协作能力也会成为智能机器人技术的重要衡量指标^[7]。本文针对协同搬运系统内的 AGV 在路径跟踪过程中产生的距离偏差和角度偏差,设计了模糊 PID 控制器,通过在线调整 PID 控制参数,提升了协同搬运系统的稳定性,仿真实验结果验证了该算法的有效性。

参考文献:

[1] 于赫年. 仓储式多 AGV 动态调度系统研究[D]. 哈尔滨:哈

- 哈尔滨工业大学,2019.
- [2] MOHD SALIH J E, RIZON M, YAACOB S. Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel [J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(5): 1831-1835.
- [3] 陈华. 基于 Leader-Follower 策略的跟随 AGV 运动控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [4] 武星. 视觉导航的轮式移动机器人运动控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [5] 张忠民,郑仁辉. 基于模糊 PID 的麦克纳姆轮移动平台的控制算法[J]. 应用科技,2017,44(6): 53-59.
- [6] 华铁丹,张少雷. Mecanum 轮全向机器人运动误差补偿方法[J]. 工业控制计算机,2016,29(10): 25-27.
- [7] 王帅,周乐来,李貽斌,等. 多移动机器人编队领航跟随方法研究进展[J]. 无人系统技术,2019,2(5): 1-8.

收稿日期:2020-11-20

(上接第 223 页)

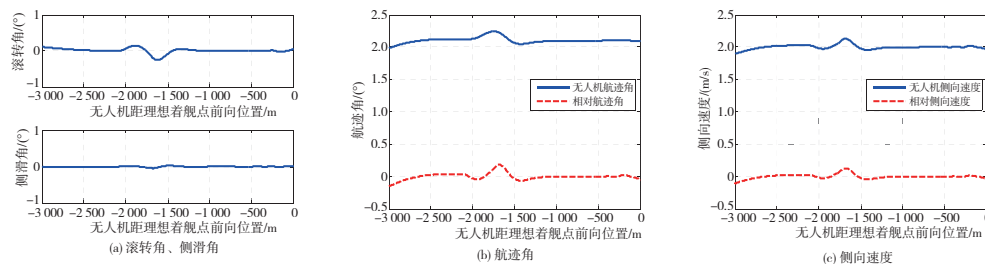


图 12 平静大气环境下着舰滚转角、侧滑角、航迹角、侧向速度曲线

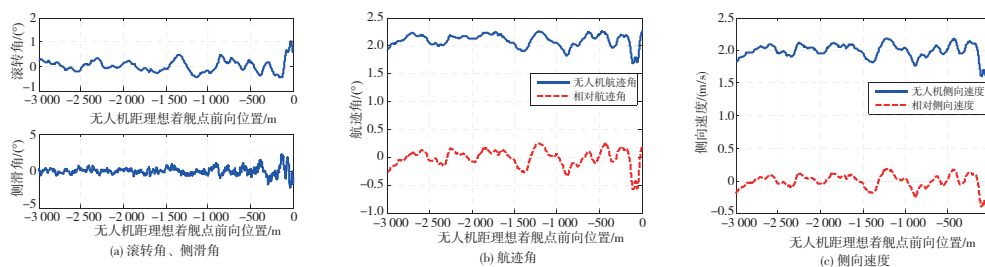


图 13 穿越舰尾流下着舰滚转角、侧滑角、航迹角、侧向速度曲线

6 结语

本文针对舰载无人机着舰过程中姿态与空速控制问题,首先设计了航向增稳控制律,解决了横侧向荷兰滚模态不稳定的问题;其次基于自适应动态逆理论设计了滚转角控制律,使滚转角控制变得准确、稳定;最后设计了以航迹角控制器和侧向速度控制器,实现了平动轨迹的精确跟踪。

仿真结果表明:该控制方法可以满足着舰落点误差的要求,且对舰尾流有一定的抑制效果,对舰研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] SINGH L, MIOTTO P, BREGER L S. L1 adaptive control design for improved handling of the F/A-18 class of aircraft [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston, MA. Reston, Virginia: AIAA, 2013.
- [2] WHITTENBURY J. Configuration design development of the navy UCAS-D X-47B [C]//AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress". Virginia Beach, VA. Reston, Virginia: AIAA, 2011.
- [3] 沈林成,朱华勇,牛铁峰. 从 X-47B 看美国无人作战飞机发展[J]. 国防科技,2013,34(5): 28-36.
- [4] 王鑫. 飞翼布局无人机自主着舰控制[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [5] 杨恩泉,高金源,李卫琪. 多目标非线性控制分配方法研究[J]. 航空学报,2008,29(4): 995-1001.
- [6] 杨一栋. 无人直升机着舰制导与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [7] 甄子洋,王新华,江驹,等. 舰载机自动着舰引导与控制研究进展[J]. 航空学报,2017,38(2): 127-148.
- [8] 李春涛,胡盛华. 基于动态逆的无人机飞行控制律设计[J]. 兵工自动化,2012,31(5): 1-4,8.
- [9] 王鑫,陈欣,李继广. 飞翼无人机自主着舰控制技术的综述[J]. 微型机与应用,2017,36(4): 7-9,13.
- [10] LAVRETSKY E, WISE K A. Robust and adaptive control[M]. London: Springer London, 2013.
- [11] URNES J, HESS R, MOOMAW R, et al. Development of the navy H-dot automatic carrier landing system designed to give improved approach control in air turbulence [C]//Guidance and Control Conference. Boulder, CO, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1979: 451-455.

收稿日期:2020-11-25