

基于最优偏差路径的自动导引车纠偏方法*

罗 哉,唐颖奇,李 冬,王岚晶

(中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018)

摘要:针对使用二维码作为定位模块的视觉自动导引车(AGV)的轨迹跟踪问题,提出了一种基于最优偏差路径的模糊PID纠偏算法。首先建立AGV的运动学方程,将横向偏差和航向偏差作为控制系统的输入变量;其次引入Hamilton最优控制函数,得到基于最优偏差转化策略的AGV最优偏差路径和最优控制方程;最后以AGV与最优偏差路径之间的位姿偏差更新模糊PID控制器的参数,实时调节驱动轮的差速,使AGV按最优偏差路径行驶,实现AGV纠偏的最优控制。实验结果表明,该方法可以平稳、快速地消除横向和航向偏差,本文控制方法在极端偏差状态下的4种隶属度区间的横向偏差纠偏结果分别为2.38、2.54、3.29和4.43 mm,均不超过5 mm,纠偏距离小于1.2 m,跟踪精度为3.2 mm,既提高无轨导引AGV的导航精度,也能较好地满足系统运行的稳定性和伺服驱动能力。

关键词:最优偏差路径;模糊PID;自动导引车;无轨导引

中图分类号:TP273 TH741 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:460.50

AGV rectifying method based on optimal deviation path

Luo Zai, Tang Yingqi, Li Dong, Wang Lanjing

(Institute of Precision Measurement and Control, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at trajectory tracking of the vision-guided AGV with two-dimension code, a fuzzy PID rectification algorithm based on optimal deviation path is proposed. Firstly, the kinematics equation of the AGV is established, using the lateral deviation and course deviation as the input variables of the control system. Secondly, the optimal deviation path and optimal control equation are obtained based on the optimal deviation transformation strategy by introducing the Hamilton optimal control function. Finally, the fuzzy PID controller's parameters are updated according to pose error between the AGV and the optimal deviation path, to achieve the differential velocity adjusting real time. As a result, the AGV drives along the optimal deviation path, and achieves optimal control. The experimental results show that the proposed method can eliminate the lateral and course deviation smoothly and quickly. In extreme deviation, the four kinds of membership interval deviation correction results of this method are 2.38, 2.54, 3.29 and 4.43 mm. The results are all less than 5 mm, and the rectification distance is less than 1.2 m, and trajectory tracking accuracy is 3.2 mm. Not only the navigation precision improves, but also the stability of the operation and driving capability of the non-track AGV are met.

Keywords: optimal deviation path; fuzzy PID; automated guided vehicle (AGV); non-track navigation

1 引言

自动导引车是指装备有电磁或光学等自动导引装置,能够沿规定的导引路径行驶,具有安全保护以及移载功能的运输小车^[1-5],在国内外有着广泛的应用。AGV

视觉导引技术因具有最高的信息维度和导引柔性正越来越广泛地应用于工程实践。路径跟踪偏差值的矫正是视觉导引AGV实现自动导引控制的基础,也是AGV研究的核心问题^[6]。其中AGV的定位精度决定了纠偏系统的精度,吴军等人^[7]采用红外扫描激光与超声技术进行室内空间定位;张建鹏等人^[8]开发了一种多窗口实时测

距的视觉导引 AGV。而随着移动互联网的高速发展,二维码的应用已经深入到生活的方方面面^[9-11]。使用二维码作为 AGV 的定位模块来设计导引路径,同时解决了前端编码和终端解码的问题,不仅降低了 AGV 路径设计的成本,使 AGV 定位的精度达到毫米级别。同时可以大幅度地提高 AGV 的路径规划的灵活性,提高 AGV 调度系统的效率,并且降低 AGV 路径和调度系统二次设计的复杂度,实用性更强。

目前国内外对于 AGV 的纠偏控制系统的研究较多且深入。尹晓红等人^[12]提出一种串级轨迹跟踪算法,把模型转换为两个非线性时变系统,通过运用串级控制及状态微分反馈控制实现 AGV 纠偏;张经天等人^[13]提出了一种分段预测控制模型,将预测控制器分为 3 段,之后解析得到最优控制变量;郭景华等人^[14]提出了一种基于遗传算法的控制系统,但是需要经过大量的训练,并且实时性并不高,当 AGV 速度过快,可能会导致脱轨;Amit A 等人^[15]提出动态系统全局渐进稳定定理,使用双曲正切函数设计滑膜控制器的控制律,从而实现 AGV 的轨迹跟踪;Pratama D. S. 等人^[16]使用卡尔曼滤波器对多个定位传感器的数据进行融合,之后使用反向步法对给定的轨迹进行跟踪;Hung N 等人^[17]将运动控制器和滑膜控制器与外部干扰相组合,实现 AGV 以恒定速度跟踪期望轨迹。因为 PID 控制具有简单、可靠、鲁棒性强等优点,目前仍广泛应用于工业控制领域,而使用 PID 控制器^[18-20]、模糊控制器^[21]和模糊 PID^[22]等控制方法具有更强的适应性,在其所在领域均取得了比较好的控制效果。由于上述的控制方法经过修改可以较好的适应有轨导航。但是使用二维码作为定位模块 AGV 在相邻的两个二维码之间只有伺服控制系统通过里程计提供的短时位姿信息,所以上述的控制方法不适用于无轨导航 AGV。因此本文提出了一种基于最优偏差路径的方法,同时使用工业控制中稳定性、鲁棒性及易用性较好的模糊 PID 控制器来实现 AGV 的纠偏控制。

2 AGV 差速纠偏原理

根据 AGV 车体结构和刚体平动原理可知,差速转向式 AGV 的纠偏轨迹是多个不同半径和瞬心的圆弧运动的组合,AGV 纠偏运动原理如图 1 所示。

如图 1 所示, B 为导引摄像头图像主点, C 为 AGV 后驱动桥中心,定义 AGV 行驶方向与 x 轴夹角 e_θ 为航向偏差, B 点沿小车横向到 x 轴的距离 e_d 为横向偏差。假设 AGV 左轮速度 v_l 和右轮速度 v_r 和方向在很短的时间间隔 Δt 内保持不变,易求得 AGV 小车运行速度 v_c 为:

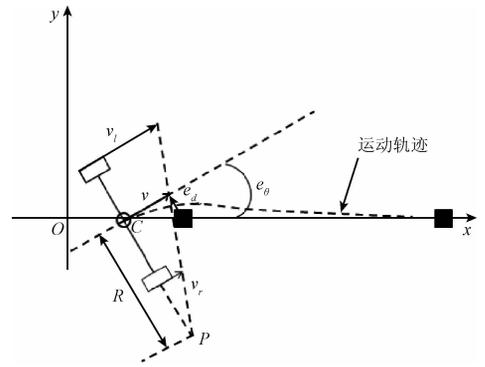


图1 AGV 纠偏运动原理

Fig. 1 Principle of AGV rectification operation

$$v_c = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (1)$$

AGV 在 t 时刻正常行驶,经过 Δt 时间后,AGV 产生的航向偏差为 Δe_θ ,横向偏差为 Δe_d ,为便于分析,假设此时 $v_l > v_r$,则根据刚体平动原理和式(1)可知:

$$\frac{\Delta e_\theta}{\Delta t} = \frac{v_c}{R} = \frac{\frac{v_l + v_r}{2}}{\frac{L}{2} \cdot \frac{v_l + v_r}{|v_l - v_r|}} = \frac{v_l - v_r}{L} \quad (2)$$

式中: L 为驱动轮间距,由几何关系可得:

$$\frac{\Delta e_d}{\Delta t} = \frac{v_r + v_l}{2} \cdot \cos e_\theta \quad (3)$$

当 Δt 趋向于 0 时,可得 Δe_θ 和 Δe_d 的微分形式:

$$de_\theta = \frac{v_l - v_r}{L} dt \quad (4)$$

$$de_d = \frac{v_l + v_r}{2} \cdot \tan e_\theta \cdot dt \quad (5)$$

假设 $\Delta v = \frac{v_l - v_r}{2}$,与式(1)联立可求得 $v_l = v + \Delta v$, $v_r = v - \Delta v$,对式(4)和(5)分别取拉布拉斯变换可得:

$$e_\theta(s) = \frac{1}{Ls}(v_l - v_r) = \frac{2\Delta v}{Ls} \quad (6)$$

$$e_d(s) = \frac{1}{2s}(v_l + v_r) \tan e_\theta = \frac{v_c \tan e_\theta}{s} \quad (7)$$

当 AGV 由于外界干扰产生轨迹跟踪偏差时,即可通过控制左右轮速度差 Δv 来修正航向偏差 e_θ 和横向偏差 e_d 。

3 纠偏控制器的设计

3.1 模糊 PID 控制器设计

AGV 差速纠偏控制系统由常规的 PID 控制器、模糊控制器、最优偏差路径控制器组成,控制器结构如图 2 所示。根据二维码在视场中的位置,计算得到 AGV 实时的

横向偏差和航向偏差,经过最优偏差路径控制器得到最优跟踪轨迹,作为PID控制器的输入信号 I 。AGV 在运行过程中,伺服控制系统不断返回 AGV 的横向偏差和航向偏差,该反馈信号与输入信号 I 相比较,输出偏差变化量 e_d 和偏差变化率 \dot{e}_d 。再经过模糊控制器实时调整PID控制器的参数,更新 AGV 差速纠偏的最佳驱动轮差速, Δv 为 AGV 实时的驱动轮差速, O 为经过伺服控制系统调整后的反馈信号。

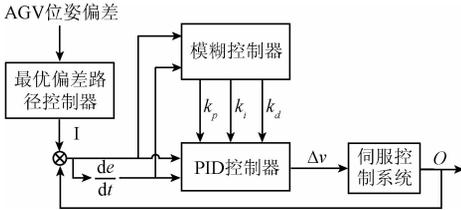


图2 AGV 纠偏系统结构
Fig. 2 AGV rectifying system structure

3.2 模糊控制器设计

将 AGV 运行过程中的横向偏差和航向偏差作为模糊控制器的输入语言变量, k_p, k_i, k_d 作为输出语言变量,模糊语言集合均为 $\{NL(\text{负大}), NM(\text{负中}), NS(\text{负小}), ZR(\text{零}), PS(\text{正小}), PM(\text{正中}), PL(\text{正大})\}$, 对应的论域为 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。使用高斯函数作为输入变量的隶属度函数:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-(x-c)^2/2\sigma^2} \quad (8)$$

式中: x 即偏差值, 参数 σ 决定了控制系统的灵敏度, 在 AGV 相对于路径的导引偏差较小的区域采用形状较尖锐灵敏度较高的隶属度函数, 而在 AGV 相对于路径的导引偏差较大的区域采用较为平缓的隶属度函数, 以增强 AGV 的稳定性和抗干扰能力。因为在纠偏控制模型中, 偏差量的权值大于偏向角, 因此偏向角的控制灵敏度应适当降低。根据以上设计要求, 设计模糊输入变量 e_d 和 e_θ 的隶属度函数分布分别如图 3(a) 所示, 使用三角函数作为输出语言变量的隶属度函数, 如图 3(b) 所示。

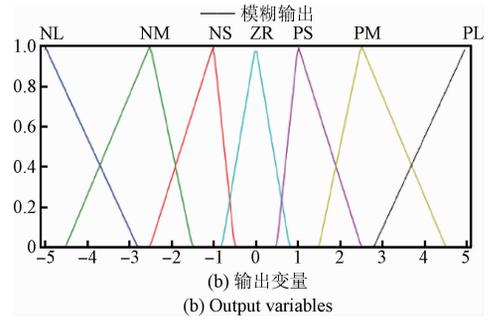
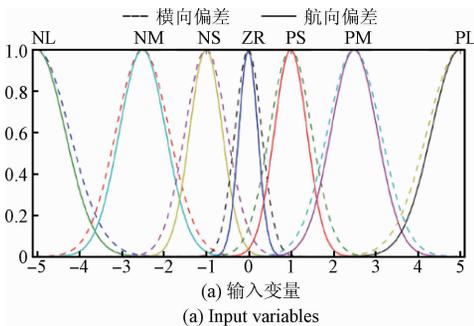


图3 输入-输出变量隶属度函数

Fig. 3 Membership function of input-output variable

3.3 基于最优偏差状态的跟踪路径

在运动控制过程中, AGV 的运行稳定性与驱动轮差速变化率、横向偏差、航向偏差是密切相关的。所以驱动轮速度差及变化率、横向偏差和航向偏差均应满足:

$$\begin{cases} |\Delta v| < \Delta v_{\max}, |\Delta a| < \Delta a_{\max} \\ |e_d| < \Delta e_{d\max}, |e_\theta| < \Delta e_{\theta\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta v_{\max}, \Delta a_{\max}, e_{d\max}, e_{\theta\max}$ 分别为最大允许驱动轮差速、最大允许驱动轮差速变化率、最大横向偏差、最大允许航向偏差。在最优偏差状态方程的约束下, 根据式(2)和(3)建立横向偏差和航向偏差的运动学方程:

$$\begin{cases} e_\theta(t+1) = e_\theta(t) + \frac{2\Delta v(t)\Delta t}{L} \\ e_d(t+1) = e_d(t) + v_c e_\theta(t)\Delta t + \frac{v_c \Delta v(t)\Delta t^2}{L} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $e_d(t), e_\theta(t)$ 分别 t 时刻的横向偏差和航向偏差。对运动学方程引入 Hamilton 最优控制函数:

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda \times \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & v_c \Delta t \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2\Delta t/L \\ v_c \Delta t^2/L \end{bmatrix} u - \dot{x} \right\} \quad (11)$$

式中: $u = \Delta v(t), \lambda$ 为待定的 2 维拉格朗日乘子矢量, $x = (e_d(t) \ e_\theta(t))^T$ 。能使纠偏控制轨迹最优的最优控制 u 需满足:

$$\begin{cases} \partial H / \partial x + \dot{\lambda} = 0 \\ \partial H / \partial \lambda + \dot{x} = 0 \\ \partial H / \partial u = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\begin{cases} \lambda A + \dot{\lambda} = 0 \\ u + \lambda B = 0 \\ Ax + Bu - \dot{x} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & v_c \Delta t \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2\Delta t/L \\ v_c \Delta t^2/L \end{bmatrix}$ 。将横向偏差和航向偏差初始值分为 4 类作为初始量, 纠偏目标 $e_d = 0, e_\theta = 0$ 作为控制量, 分别代入式(13), 得到如图 4 所示的

横向偏差 $e_d \geq 0$ 时的各种偏差状态的最优跟踪轨迹,其中虚线为相邻二维码间的理想导引路径,实线为最优跟踪轨迹。

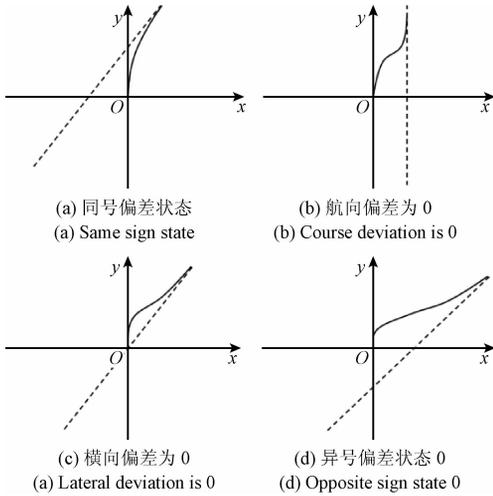


图4 AGV 最优偏差路径

Fig.4 AGV optimal deviation path

1) 同号偏差状态: e_d 和 e_θ 同时减小,AGV 运动轨迹沿圆弧曲线相切过渡到理想导引路径,偏差消除速度最快,如图 4(c) 所示。

2) 航向偏差 $e_\theta = 0$ 状态: e_d 减小的同时 e_θ 增大,AGV 运动轨迹趋向理想导引线,转化为状态 1),再按同号偏差状态,沿圆弧曲线相切过渡到理想导引路径,偏差消除过程较短,如图 4(b) 所示。

3) 横向偏差 $e_d = 0$ 状态: e_d 增大的同时 e_θ 减小,AGV 运动轨迹背离理想导引线,转化为状态 2),再按状态 2),转化为状态 1),再沿圆弧曲线相切过渡到理想导引路径,偏差消除过程较长,如图 4(a) 所示。

4) 异号偏差状态: $|e_d| > 0$,且 AGV 运动方向背离理想导引线,必须尽快将 e_θ 减小到零,同时避免 e_d 过大。使 AGV 转化为状态 2),再按状态 2) 沿最优跟踪路径过渡到理想导引路径,偏差消除过程最长,如图 4(d) 所示。

由图 4 可知,对于同号偏差状态,经过一步便可消除两种偏差。对于其他偏差状态,都需要先转化为同号偏差状态,之后才能消除两种偏差。同时,基于最优偏差路径的纠偏策略可以使 AGV 沿圆弧切线过度到理想导引线,可以有效地提高 AGV 的控制精度。

4 实验及结果分析

4.1 实验验证

为了验证上述 AGV 纠偏控制系统,自主研发了基于

视觉导引的 AGV,如图 5 所示,在实验室地面间隔 2 m 铺设类型 1,纠错级别为 H 的 QR (quick response) 码作为 AGV 的导引路径,QR 码内包含坐标信息、路径信息、工位信息等。

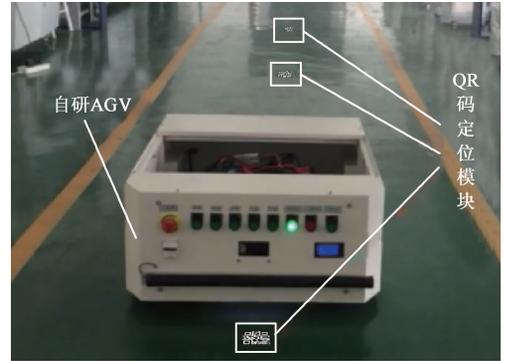
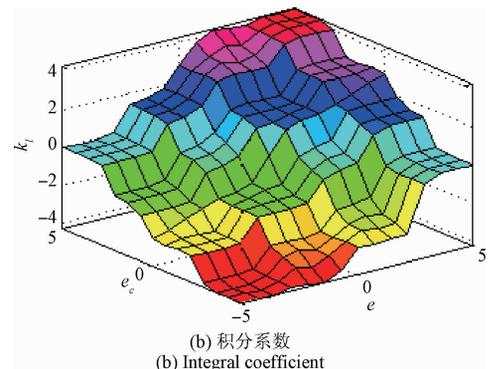
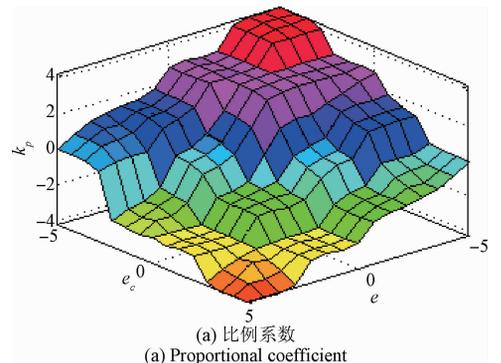


图5 纠偏实验实物

Fig.5 Rectification experiment equipment

车载控制器通过计算 QR 码在视场中位置及角度得到 AGV 此时的横向偏差和航向偏差,作为纠偏控制系统的初始输入值。在相邻的 QR 码之间,由里程计为纠偏控制系统反馈变量,与最优偏差路径控制比较后,来实时调整 PID 控制器的参数。由于横向偏差的控制权值大于航向偏差,所以选用横向偏差作为主控制量,其模糊 PID 控制器的控制曲面如图 6 所示。



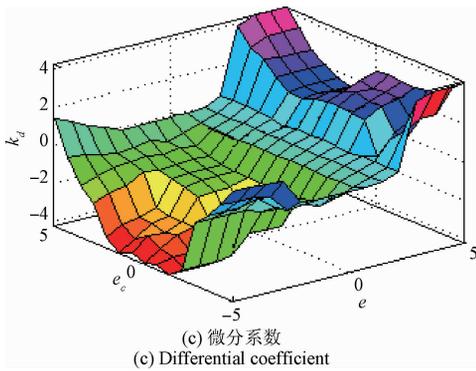


图6 模糊PID控制器曲面

Fig.6 Surface of fuzzy PID controller

为了实验 AGV 的纠偏控制效果,车载控制器将实时采集到的 AGV 运动状态。由于 AGV 的横向偏差和航向偏差为对称分布,所以本文只选用 $e_\theta \leq 0$ 偏差状态,且选择对纠偏控制最不利的异号偏差状态,此时 AGV 背离理想导引路径行驶,横向偏差快速增大,必须尽快的消除位姿偏差,否则可能会导致脱轨。因此选择横向偏差模糊语言分别为 ZR(零)、PS(正小)、PM(正中)和 PL(正大),航向偏差为最大允许偏差进行纠偏控制实验。为了兼顾纠偏系统的快速性、鲁棒性及准确性,选择超调量和调节时间作为 PID 控制器系数的评价标准,选择的初始设定值如表 1 所示。

表1 初始设定值

Table 1 Initial setting of parameters

隶属度 区间	横向偏差 e_d /mm	比例系数 k_p	积分系数 k_i	微分系数 k_d
零	0	0.35	15.42	0.045
正小	12.7	1.15	16.79	0.038
正中	25.4	1.83	17.63	0.034
正大	50.8	3.48	18.94	0.029

4.2 实验结果与分析

将服务器中保存的 AGV 运动状态信息用来分析纠偏控制系统的效果。在给定条件下的 4 种偏差状态的纠偏效果实验曲线图 7 所示。

当 e_d 和 e_θ 异号时,考虑到伺服控制系统驱动能力以及 AGV 运行的稳定性,AGV 仍要保持上一时刻的运动方向,通过逐渐增大差速来减少位姿偏差,AGV 的差速变化率随着 e_d 的增大而增大。如图 7(a)所示, $e_d = 0$ mm,只需要缓慢的增加 AGV 的差速,当 $e_d = 18.7$ mm 时进入 $e_\theta = 0$ 状态,AGV 的差速也在逐渐减小至反向增大到 -6.18 mm/s,最终在 0.9 m 处位姿偏差逐渐趋于 0,使 AGV

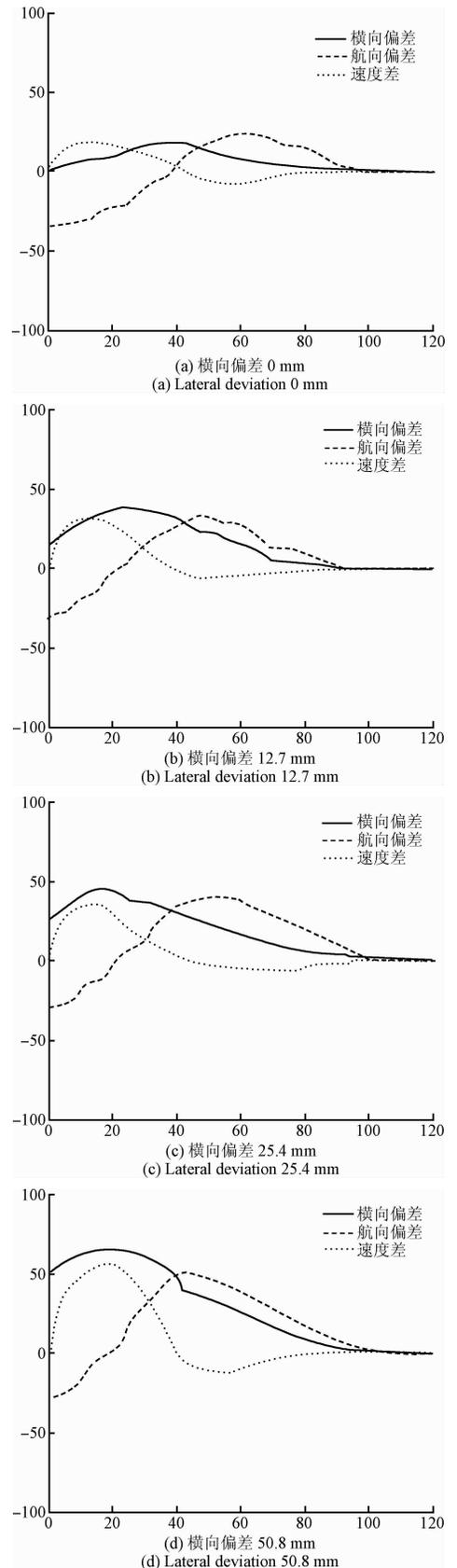


图7 AGV 纠偏运动状态

Fig.7 AGV rectification operation states

的位姿偏差也趋于0。当 $e_d = 12.7$ mm 和 $e_d = 25.4$ mm 时,需尽快使航向偏差为0,差速最高分别为 30.85 和 37.98 mm/s,当航向偏差为0时,横向偏差分别为 37.57 和 47.81 mm,此时以不同的速度差减小位姿偏差至趋于0,分别如图7(b)、(c)所示。而当 $e_d = 50.4$ mm 时,在伺服控制系统驱动能力允许的情况下,需快速增加 AGV 的差速,使 AGV 尽快进入 $e_\theta = 0$ 的偏差状态,此时 AGV 的横向偏差达到了 62.57 mm,最大差速为 55.28 mm/s,之后开始逐渐降低 AGV 的差速,使 AGV 进入同号偏差状态,反向增加 AGV 的差速,使 AGV 按照同号偏差状态的纠偏策略逐渐的过度到理想导引路径。AGV 在 1.2 m 处逐渐过度到理想导引路径,AGV 的横向偏差与航向偏差也逐渐趋于0,此时的位姿偏差不超过 5 mm,如图7(d)所示,且保持到下一个二维码定位模块处对 AGV 进行重新定位。经过多次的 AGV 纠偏测试,获得了 AGV 在不同的偏差状态下的控制精度,如表2所示。

表2 纠偏测试数据

Table 2 Rectification testing data

偏差 状态/mm	横向偏差		航向偏差		驱动轮差速	
	e_d/mm		e_θ/rad		$\Delta v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
0	18.73	2.38	0.426	$-\pi/6$	18.21	-6.18
12.7	37.57	2.54	0.549	$-\pi/6$	30.85	-6.49
25.4	47.81	3.29	0.713	$-\pi/6$	37.98	-7.22
50.8	62.57	4.43	0.963	$-\pi/6$	55.28	-15.58

由表2可知,即使在 $e_d = 50.8$ mm 的情况下,AGV 的最大控制偏差也没有使 AGV 超过最大允许偏差的 80 mm,最大差速小于 60 mm/s,纠偏距离小于 1.2 m,纠偏精度小于 5 mm,有效的避免了 AGV 的脱轨。

最后为自研 AGV 铺设宽为 6 mm 的带状导引线,对文献[6]提出的基于积分分离的有轨视觉导引 AGV 纠偏控制器和本文设计的基于最优偏差路径的无轨导引 AGV 模糊 PID 纠偏控制器在 0.5 m/s 的工作速度下进行轨迹跟踪测试,取最大轨迹跟踪误差作为轨迹跟踪精度,并与文献[4]的激光无轨导引 AGV 控制精度进行比较,得到的数据如表3所示。

表3 不同控制器轨迹跟踪精度

Table 3 Trajectory tracking accuracy of different controllers

控制方式	跟踪精度/mm
文献[4]	2.4
文献[6]	5.1
本文	3.2

文献[6]使用的积分分离控制方法根据实时反馈的位姿偏差进行反复的纠偏控制,不利于控制的稳定性,而且降低了轨迹跟踪精度。与文献[6]的控制方法不同,本文提出的最优偏差路径沿切线过渡到理想导引路径,并且保持到下一个二维码定位模块处进行校正,不断的重复这个过程最终使使轨迹跟踪精度始终保持在 3.2 mm 以内,相较文献[6]精度提高了接近 60%,仅比文献[4]中使用的激光导引低 0.8 mm,而激光导引是目前精度最高的导引方式且成本很高,证明了本文提出的方法具有较高的实用性。

5 结论

1) 根据 AGV 的初始位姿偏差,经过运动学建模后,使用 Hamilton 方程得到的最优偏差轨迹以及最优控制方程,可以同时满足 AGV 的位姿纠偏能力和速度纠偏能力。

2) 相较于使用 AGV 与理想导引路径之间的位姿偏差,使用 AGV 与最优偏差路径之间的位姿偏差实时更新模糊 PID 控制器系数可以使位姿偏差、差速、差速变化率均为渐变,最大差速小于 60 mm/s,且位姿偏差不超过 80 mm,使纠偏的过程更加平稳。

3) 基于最优偏差状态的导引路径末端与理想导引路径相切,可以有效避免蛇形前进,使纠偏精度小于 5 mm。使用二维码作为导引路径的定位模块,可以大大地提高 AGV 路径规划的灵活性、定位的精确性、系统的复用性等。

在最恶劣的偏差状态下进行的纠偏实验证明了本文提出的纠偏控制系统的有效性,也反映了自研 AGV 的高控制精度。但通过里程计提供的位姿偏差鲁棒性较差,使视觉无轨导引 AGV 的轨迹跟踪精度结果仍略低于激光无轨导引,下一步的工作是优化里程计和控制器,进一步提高视觉无轨导引 AGV 的精度。

参考文献

- [1] HERRERO-PEREZ D, MARTINEZ-BARBERA H. Modeling distributed transportation systems composed of flexible automated guided vehicles in flexible manufacturing systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(2): 166-180.
- [2] 吴斌,钱晓明,武星,等. 自动导引车骨架结构优化设计[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19): 2653-2657, 2664.
WU B, QIAN X M, WU X, et al. Optimization design on AGV frame structure [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(19): 2653-2657, 2664.
- [3] 石陈陈,楼佩煌,武星,等. 自动导引车多摄像机主动

- 导引系统的协同标定[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2589-2599.
- SHI CH CH, LOU P H, WU X, et al. Collaborative calibration of initiative multi-camera guiding system for transport automatic guided vehicle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2589-2599.
- [4] KIM J, CHO H, KIM S. Positioning and driving control of fork-type automatic guided vehicle with laser navigation[J]. International Journal of Fuzzy Logic & Intelligent Systems, 2013, 13(4): 307-314.
- [5] 贺晶晶,姜平,冯晓荣. 基于 UWB 的无人运输车的导航定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1743-1749.
- HE J J, JIANG P, FENG X R. Research on navigation and positioning algorithm for unmanned vehicle based on UWB [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11): 1743-1749.
- [6] 罗哉,刘慧平,胡晓峰,等. 视觉导引 AGV 纠偏算法研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 373-377.
- LUO Z, LIU H P, HU X F, et al. Research of vision-guided AGV deviation-rectifying algorithm [J]. Computer Simulation, 2016, 33(1): 373-377.
- [7] 吴军,于之靖,诸葛晶晶,等. 采用红外扫描激光与超声技术的室内空间定位[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2417-2423.
- WU J, YU ZH Q, ZHUGE J J, et al. Indoor positioning by using scanning infrared laser and ultrasonic technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2417-2423.
- [8] 张建鹏,楼佩煌,钱晓明,等. 多窗口实时测距的视觉导引 AGV 精确定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1356-1362.
- ZHANG J P, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology by multi-window and real-time measurement for visual navigation AGV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1356-1362.
- [9] 王红娟,王志鹏,张颖颖,等. 利用 QR 码在光学干涉多图像加密系统中实现信息高质量恢复[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 78-84.
- WANG H J, WANG ZH P, ZHANG Y Y, et al. Using QR codes in multi-image optical interference encryption system to reconstruct high quality original information[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 78-84.
- [10] 熊用,汪鲁才,艾琼龙. 基于相关匹配的 QR 码识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 571-576.
- XIONG Y, WANG L C, AI Q L. QR code recognition method based on correlation match[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 571-576.
- [11] 林威,翟信德,朱长青,等. 基于 QR 码的遥感影像数字水印算法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(1): 26-30.
- LIN W, ZHAI X D, ZHU CH Q, et al. QR code based research on digital watermark algorithm for remote sensing image [J]. Journal of Beijing University of Posts & Telecommunications, 2015, 34(7): 2306-2309.
- [12] 尹晓红,赵韩,吴焱明,等. 基于卡尔曼滤波的自动导引车串级轨迹跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 180-184.
- YIN X H, ZHAO H, WU Y M, et al. Cascade tracking control for AGV based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 180-184.
- [13] 张经天,庄植均,李忠明,等. 视觉导引 AGV 分段预测控制模型设计[J]. 北京邮电大学学报, 2014(4): 15-19.
- ZHANG J T, ZHUANG ZH J, LI ZH M, et al. Model design for the sectionalize predictive control based on vision-guided AGV[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(4): 15-19.
- [14] 郭景华,胡平,李琳辉,等. 基于遗传优化的无人车横向模糊控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 76-82.
- GUO J H, HU P, LI L H, et al. Study on lateral fuzzy control of unmanned vehicles via genetic algorithms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 76-82.
- [15] AMIT A, ILAN Z. Controllers for trajectory tracking and string-like formation in Wheeled Mobile Robots with bounded inputs[C]. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010: 1563-1568.
- [16] PRATAMA P S, GULAKARI A V, SETIAWAN Y D, et al. Trajectory tracking and fault detection algorithm for automatic guided vehicle based on multiple positioning modules [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(2): 400-410.
- [17] HUNG N, IM J S, JEONG S K, et al. Design of a sliding mode controller for an automatic guided vehicle and its implementation [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(1): 81-90.
- [18] KIM T H, MARUTA I, SUGIE T. Brief paper: Robust PID controller tuning based on the constrained particle swarm optimization [J]. Automatica, 2008, 44(4): 1104-1110.
- [19] 单尧,孙永荣,黄斌,等. 自主空中加油飞行对接演示

平台设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(12): 176-179,188.

SHAN Y, SUN Y R, HUANG B, et al. Design and implementation of a docking demonstration platform for autonomous aerial refueling[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(12): 176-179, 188.

- [20] 张青月, 王东风. 基于观测器的过热汽温状态反馈控制[J]. 中国测试, 2016, 42(5): 98-102.

ZHANG Q Y, WANG D F. Research on observer-based state feedback control for superheated steam temperature[J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(5): 98-102.

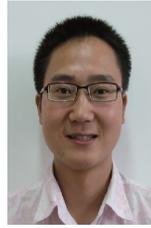
- [21] 冯超, 陈双叶. 基于模糊控制的 PAC 控制器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 47-51.

FENG CH, CHEN SH Y. PAC controller design based on fuzzy control [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(7): 47-51.

- [22] 周向阳, 贾媛. 航空遥感惯性稳定平台模糊/PID 复合控制 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2545-2554.

ZHOU X Y, JIA Y. Fuzzy/PID compound control for inertially stabilized platform in airborne remote sensing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2545-2554.

作者简介



罗哉, 分别在 2001 年和 2005 年于合肥工业大学获得学士学位和博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为汽车零部件检测、精密测试技术、坐标测量技术及应用。

E-mail: luozai@cjlu.edu.cn

Luo Zai received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from HeFei University of Technology in 2001 and 2005, respectively. Now he is a professor in China Jiliang University. His main research interests include precision detection technology, automobile parts detection and coordinate measuring technology and application.



唐颖奇, 2013 年于南京理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、移动机器人技术。

E-mail: yingqi_t@163.com

Tang Yingqi received his B. Sc. degree from NanJing University of Science and Technology in 2013. Now he is pursuing his M. Sc degree in China Jiliang University. His main research interests include computer vision and mobile robotics.