

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.012

基于磁导航的全向 AGV 定位技术研究

高雪松^{1,2}, 李宇昊^{1,2}, 张立强^{1,2}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;
2. 上海拓璞数控科技股份有限公司, 上海 201111)

摘要:在智能车间中,自动导引车(AGV)需要一定的定位精度,而传统的驱动轮很难满足定位要求。针对定位精度问题,考虑成本控制,课题组提出了一种基于多磁导引的全向自动导引车定位方法。首先利用磁传感器实时获取自动导引车当前位置与定位标识点的偏差;然后,采用模糊PID控制生成控制量;最后,将控制量结合全向自动导引车的运动模型实现最终定位。实验结果表明:采用磁导引并结合模糊PID控制,自动导引车的运动稳定性好,定位精度可达 ± 5 mm,同时有效地降低了硬件成本。本研究可实现自动导引车的高效、高精度定位。

关键词:自动导引车;磁导航;多磁导引;模糊PID控制;定位

中图分类号:TP391.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0065-05

Research on Omni-Directional AGV Positioning Technology Based on Magnetic Navigation

GAO Xuesong^{1,2}, LI Yuhao^{1,2}, ZHANG Liqiang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Top Numerical Control Technology Co., Ltd., Shanghai 201111, China)

Abstract:In the intelligent workshop, Automated Guided Vehicle (AGV) requires certain positioning accuracy, while traditional driving wheels are difficult to meet the positioning requirements. Aiming at this problem and cost control, a omni-directional AGV location method based on multi-magnetic navigation was proposed in this paper. First, the magnetic sensor was used to get the real time deviation between the AGV position and the positioning point. Then, the fuzzy PID control was used to generate the control quantity. Finally, the control quantity was combined with the omni-directional AGV motion model to achieve the final positioning. The experimental results show that, with the use of magnetic navigation and fuzzy PID control, the motion stability of AGV is good, the positioning accuracy is up to ± 5 mm, and the cost of hardware is reduced effectively. It is of practical significance and innovation.

Keywords:AGV(Automated Guided Vehicle);magnetic navigation;multi-magnetic navigation;fuzzy PID control;location

自动导引车指能够沿着磁性或光路自动引导路径行驶,并配备安全设备,具有编程调试、停车选择等多种功能的无人运输车^[1],是自动物流运输系统和柔性制造系统的关键设备之一^[2]。近年来,随着自动化水平的提高,产业升级以及技术进步,AGV 越来越被广泛应用于各个生产行业中^[3-4]。

AGV 作为物料运输装备,停车精度及停车效率是其重要的性能指标,如何在保证停车效率的同时具有

一定的停车精度,仍然是诸多学者的研究课题。其中 J. F. Zumberge 等^[5]提出了一种基于 GPS 导航的非差精密单点定位方法,该方法的定位精度较低;何珍等^[6]提出了一种结合激光扫描与视觉定位信息,利用无迹卡尔曼滤波算法进行多传感器信息融合,实现定位的方法,该方法虽然定位精度较高,但结构较为复杂,工业应用中很难实现;李照等^[7]提出了一种基于视觉导引的 3 点定位法,利用 3 点定位获取二维码轮

收稿日期:2018-08-10;修回日期:2018-11-08

基金项目:上海特种数控装备及工艺工程技术研究中心项目:大飞机机身数字化对接数控定位系统研发(15DZ1161002);上海特种数控装备及工艺工程技术研究中心项目:航天器结构件智能制造新模式应用(17DZ2283200)。

第一作者简介:高雪松(1992),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人。E-mail:gaoxuesong@topnc.com.cn

廓,并基于中心点偏移计算误差实现定位,该方法定位精度不高,且易受到光线的影响;魏明明等^[8]提出了一种导航信标定位的方法,利用摄影机识别地面铺设特定的定位标识符,发送停车信号,该方法缺少信息反馈,定位精度没有可靠的保证;梁延德和刘大维^[9]提出了一种基于到达时间差异的超声波 AGV 定位,该方法对外界环境要求极高。

课题组针对以上情况提出了一种基于磁导引的 AGV 定位的方法,利用磁导引结合模糊 PID 闭环控制实现 AGV 定位。采用该方法定位,结构简单,成本较低,且有效地提高其定位效率并具有一定的定位精度。

1 全向 AGV 运动模型

1.1 麦克纳姆轮模型构建

麦克纳姆轮是瑞典麦克纳姆公司的专利,在它的轮缘上斜向分布着许多小滚子,故轮子可以横向滑移。小滚子的母线很特殊,当轮子绕着固定的轮心轴转动时,各个小滚子的包络线为圆柱面,所以该轮能够连续地向前滚动^[10]。如图 1 所示,麦克纳姆轮与主框架采用刚性连接,并且运动坐标系以 AGV 的旋转中心为原点,根据该模型可得

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} R \tan \gamma & -R \tan \gamma & -R \tan \gamma & R \tan \gamma \\ R & R & R & R \\ -2R \tan \gamma & 2R \tan \gamma & -2R \tan \gamma & 2R \tan \gamma \\ l_1 + l_2 & l_1 + l_2 & l_1 + l_2 & l_1 + l_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: R 为麦克纳姆轮的半径; γ 为滚轴与轮轴之间的夹角; l_1, l_2 为轮轴之间的距离, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为 4 个轮子的旋转角速度; (v_x, v_y, ω) 为 AGV 的运动向量。

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为系统控制的 4 个输入量,而被控量 (v_x, v_y, ω) 只有 3 个,且矩阵 J 的秩为 3,所以该系统完全可控;同时,被控量 (v_x, v_y, ω) 中的每一个分量都是相互独立的。

由式(1)转化为

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R \cdot \tan \gamma} & \frac{1}{R} & -\frac{l_1 + l_2}{2R \cdot \tan \gamma} \\ -\frac{1}{R \cdot \tan \gamma} & \frac{1}{R} & \frac{l_1 + l_2}{2R \cdot \tan \gamma} \\ \frac{1}{R \cdot \tan \gamma} & \frac{1}{R} & -\frac{l_1 + l_2}{2R \cdot \tan \gamma} \\ -\frac{1}{R \cdot \tan \gamma} & \frac{1}{R} & \frac{l_1 + l_2}{2R \cdot \tan \gamma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

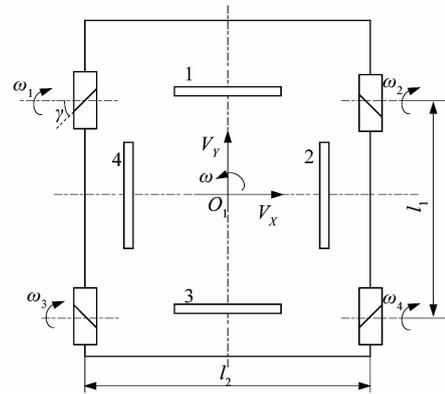


图 1 AGV 结构模型

Figure 1 AGV structure model

可以得到 AGV 运动模型的逆运动学方程,通过对 (v_x, v_y, ω) 不同的赋值,AGV 不仅可以在不改变姿态的情况下沿任意方向移动,而且可以实现原地旋转运动。

1.2 磁导引模型构建

课题组采用磁传感器感应地面磁条的位置信息的方式导引 AGV 的运动。磁传感器垂直于磁条安装在 AGV 的底部,并调整磁传感器高度及灵敏度至合适值;磁传感器上的采样点均匀排列,每个采样点输出相应的开关量信号,值为 1 的时候表示该采样点正下方有磁信号,值为 0 则表示无磁信号,根据采样点相对于磁传感器的物理尺寸可以获取到磁条到磁传感器中点的水平距离。如图 1 所示,每个传感器到运动坐标系原点的垂直距离都相等,且中点分别在 X, Y 轴上,1 和 3 号传感器可采集到 Y 轴方向上的磁条位置信息,2 和 4 号传感器可采集到 X 轴方向上的磁条位置信息。

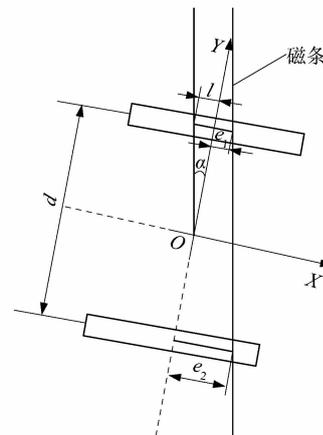


图 2 磁导航模型

Figure 2 Magnetic navigation model

AGV 的 2 对磁传感器采用相同的型号,安装方式相同,所以 X, Y 轴相对于磁条的偏差算法相同。一对

磁传感器的模型如图 2 所示,根据磁传感器输出的采样点信号可以求得每个磁传感器中点到磁条的水平偏差 e_1, e_2 ,从而求取 AGV 运动控制量:

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{e_2 + e_1}{2}; \\ \tan \alpha &= \frac{2(e_2 - e_1)}{d}; \\ e_c &= \frac{de}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: d 为 2 个传感器之间的距离; e 为 AGV 偏差量; e_c 为偏差变化率; α 为 AGV 需要旋转的角度。

2 模糊 PID 运动控制设计

文中上位机、传感器、运动控制器之间的通信采用现场总线通信,磁传感器获取到的信号参数发送给上位机,上位机利用模糊 PID 算法计算出的麦克纳姆轮 4 个控制量发送给运动控制器以实现 AGV 的运动控制。模糊 PID 控制^[11]是对传统 PID 控制的一种改进,如图 3 所示,在传统 PID 控制的基础上加入了 1 个模糊控制器,通过模糊控制器实现对 k_p, k_i, k_d 的修改。

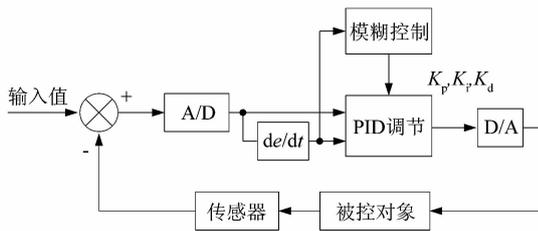


图 3 模糊 PID 控制原理

Figure 3 Fuzzy PID schematic

2.1 模糊化

模糊控制是由扎德首次提出的一种由模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理等组成的智能控制。这里模糊控制设计采用二维模糊控制器^[12],如图 4 所示,系统输入量为 e, e_c ,输出量为 k_p, k_i, k_d 。

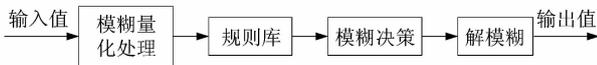


图 4 模糊控制原理

Figure 4 Fuzzy control schematic

模糊化是指把输入及输出量映射到相应的论域中,课题组把论域分为 7 个等级,分别为 NB, N, NS, ZO, PS, PM 和 PB,对应为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。且有

$$\left. \begin{aligned} U_e &= \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}; \\ U_{k_p} &= \{-0.4, -0.25, -0.1, 0, 0.1, 0.25, 0.4\}; \\ U_{k_i} &= \{-0.03, -0.026, -0.01, 0, 0.01, 0.026, 0.03\}; \\ U_{k_d} &= \{-0.022, -0.016, -0.01, 0, 0.01, 0.016, 0.022\}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: U_e 为偏差和偏差变化率的实际值归一量化后的论域; $U_{k_p}, U_{k_i}, U_{k_d}$ 分别为 k_p, k_i, k_d 的论域,由实验测得。

获取论域后,需要选择合适的隶属度函数,从隶属度函数中可以得出真实值与语言相符合的程度,即一个具体的数值在多大程度上可以用该语言进行描述。课题组采用三角型隶属度函数(如图 5 所示)。与高斯型、正态分布型相比,三角型隶属度函数结构简单,不占用过多内存。三角型隶属度函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b); \\ \frac{x-c}{b-c}, & x \in (b, c). \end{cases} \quad (5)$$

式中: a, b, c 为模糊域常数; $\mu(x)$ 为隶属度函数。

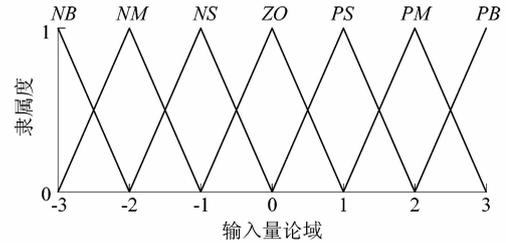


图 5 输入量隶属度

Figure 5 Membership degree of input

2.2 模糊推理及解模糊

模糊规则以及模糊推理是模糊控制的核心部分。文中, k_p 增大时,系统的超调量增大、系统响应快; k_i 增大时,系统的回调比例增大,系统稳定性减弱; k_d 增大时,稳定性增加,根据这些特性,结合专家经验可以获取控制量:

$$C = (A \times B) \circ R. \quad (6)$$

其中: A 为 e 的论域模糊子集; B 为 e_c 的论域模糊子集; R 为 e, e_c 分别与 k_p, k_i, k_d 的关系矩阵。

$$R_{k_p} = \begin{pmatrix} 0.400 & 0.400 & 0.250 & 0.250 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.400 & 0.400 & 0.250 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0.100 \\ 0.250 & 0.250 & 0.250 & 0.100 & 0 & -0.100 & -0.100 \\ 0.250 & 0.100 & 0.100 & 0 & -0.100 & -0.100 & -0.250 \\ 0.100 & 0.100 & 0 & -0.100 & -0.250 & -0.250 & -0.250 \\ 0.100 & 0 & -0.100 & -0.250 & -0.250 & -0.400 & -0.400 \\ 0 & 0 & -0.100 & -0.250 & -0.250 & -0.400 & -0.400 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$R_{k_1} = \begin{pmatrix} -0.030 & -0.030 & -0.026 & -0.026 & -0.010 & 0 & 0 \\ -0.030 & -0.030 & -0.026 & -0.010 & -0.010 & -0 & 0.010 \\ -0.026 & -0.026 & -0.026 & -0.010 & 0 & 0.010 & 0.010 \\ -0.026 & -0.010 & -0.010 & 0 & 0.010 & 0.010 & 0.026 \\ -0.010 & -0.010 & 0 & 0.010 & 0.026 & 0.026 & 0.026 \\ -0.010 & 0 & 0.010 & 0.026 & 0.026 & 0.030 & 0.030 \\ 0 & 0 & 0.010 & 0.026 & 0.026 & 0.030 & 0.030 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$R_{k_2} = \begin{pmatrix} 0.010 & -0.010 & 0.016 & -0.022 & -0.022 & -0.016 & 0.010 \\ 0.010 & -0.010 & -0.022 & -0.016 & -0.016 & -0.010 & 0.010 \\ 0 & -0.016 & -0.016 & -0.016 & -0.010 & -0.010 & 0 \\ 0 & -0.010 & -0.010 & -0.010 & -0.010 & -0.010 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & -0.010 & 0.010 & 0.010 & 0.010 & 0.010 & 0.022 \\ 0.022 & 0.016 & 0.016 & 0.016 & 0.016 & 0.010 & 0.022 \end{pmatrix} \quad (9)$$

获取的控制量为一个模糊集合,需要解模糊操作才能获得精确的输出量。为了获取较为精确的输出量,需要解模糊过程能较好地表达输出隶属度函数的计算结果,课题组采用加权平均法,该方法在工业控制中效果较好。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (10)$$

式中: x_i 为隶属度值; $\mu(i)$ 为输出模糊变量,为加权平均判决结果。

由加权平均法得到的判决结果,还需要乘以一个输出量化因子,才能适应控制要求,从而求得最终输出量:

$$\left. \begin{aligned} y &= kx; \\ k &= \frac{y_u}{l} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: y 为最终输出量; k 为量化因子; y_u 可从实际输出论域 $[-y_u, y_u]$ 中获得; l 可从输出模糊子集论域 $[-l, l]$ 中获得。

2.3 PID 控制设计

PID 控制是将设定值与实际输出值进行比较构成控制偏差,并将其比例、积分和微分通过线性组合构成控制量。PID 控制原理如图 6 所示,其控制规律有:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

式中: $u(t)$ 为输出量; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $e(t)$ 为当前时刻的误差值; k_p 为比例系数。

实际控制为非线性离散控制需要对 PID 控制进行

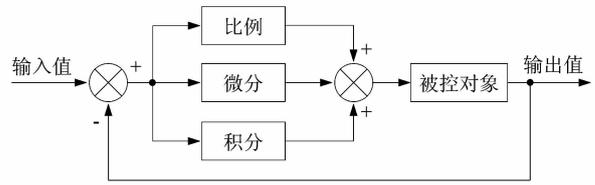


图 6 PID 控制原理

Figure 6 PID control schematic

离散化,课题组采用数字式增量 PID 控制,用求和代替积分、用后向差分代替微分,使模拟 PID 离散化为差分方程。增量式 PID 控制输出为控制量的增量值,而且只需要获取前 3 个时刻的偏差值,有效减小了累积误差。增量式 PID 控制算法:

$$\Delta u_k = k_p (e_k - e_{k-1}) + k_i e_k + k_d (e_k - e_{k-1} - e_{k-2}) \quad (13)$$

式中: Δu_k 为输出增量; e_k 为 k 时刻的误差值; k_p, k_i, k_d 由模糊控制器中获得。

3 实验结果与分析

文中的实验平台为自主开发的全向重载 AGV,采用磁传感器,如图 7 所示。工控机用于算法分析处理,磁传感器采集磁条信息发送给工控机生成运动控制量,然后将控制量发送给运动控制器。地面铺设的磁条为十字式磁条, X 轴与 Y 轴的定位采用相同的控制方法,通过交替生成运动控制量来控制 AGV 的运动实现最终定位。为了验证本文的方法能否较好地运用于工业车间,以及达到预期的定位精度和定位鲁棒性,实验选择在地面为环氧树脂的工业车间中进行。



(a) 自动引导车



(b) 磁传感器

图 7 自动引导车与磁传感器

Figure 7 AGV and Magnetic sensor

AGV 轮轴之间的距离分别为 $l_1 = 2\ 230\ \text{mm}$, $l_2 = 2\ 050\ \text{mm}$, 麦克纳姆轮滚轴与轮轴之间的夹角 $\gamma = \pi/4$, 半径 $R = 182\ \text{mm}$ 。

实验中,为了验证该方法具有较好的定位效率,采用了传统的增量式 PID 控制与之对比;其中,经实验对比,取增量式 PID 控制的 3 个参数 $k_p = 0.25$, $k_i = 0.01$, $k_d = 0.01$ 。综合考虑电机分辨率以及其它误差,AGV 的 X 轴方向的阈值设为 $\Delta x = \pm 5$ mm, Y 轴方向的阈值设为 $\Delta y = \pm 5$ mm, 旋转角度阈值设为 $\Delta\theta = \pm 3^\circ$ 。同一工位,200 次重复定位实验结果如图 8 所示。

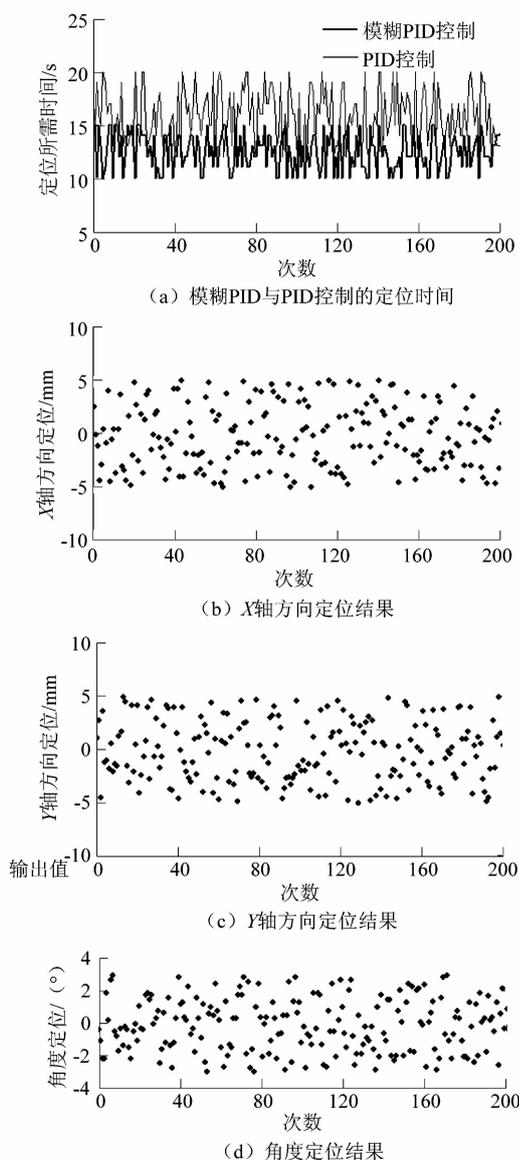


图 8 实验数据

Figure 8 Experimental data

通过实验结果分析可知,利用该定位方法,在普通的工业车间中,其定位鲁棒性较好,精度也在设定的阈值范围内波动;定位效率方面,采用模糊 PID 控制方法明显优于 PID 控制。

4 结语

课题组提出一种基于磁导航的全向 AGV 定位方法,通过模糊 PID 闭环控制实现 AGV 定位控制。首先,实时获取 AGV 当前位置与磁条的偏差量;然后,将偏差量及偏差变化率作为输入量,利用模糊控制器生成 PID 控制中的相关参数;最后,利用增量式 PID 控制生成控制量并结合全向 AGV 运动模型实现定位。实验结果表明,采用课题组提出的定位方法,硬件成本低,AGV 的运动稳定性好,定位时间短,精度达到 ± 5 mm,可实现 AGV 的高效、高精度定位。

参考文献:

- [1] 王铮,赵晓,余宏杰,等. 基于双目视觉的 AGV 障碍物检测与避障[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(2):400.
- [2] 白彪才,马殿元. 组合导航的 AGV 定位精度的改善[J]. 测控技术,2018,37(4):138.
- [3] 苏永华. 全方位移动式 AGV 技术研究[J]. 制造业自动化,2014,36(15):10.
- [4] 吴鹏,李东京,负超. 一种惯性传感器与编码器相结合的 AGV 航迹推算系统[J]. 机电工程,2018,35(3):310-316.
- [5] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network[J]. Journal of Geophysical,1997,102(B3):5005-5017.
- [6] 何珍,楼佩煌,钱晓明,等. 多目视觉与激光组合导航 AGV 精确定位技术研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(11):2830-2838.
- [7] 李照,舒志兵,严亮. 基于模糊路径纠偏的 AGV 视觉精确定位研究[J]. 电子技术应用,2018,44(4):81-85.
- [8] 魏明明,汪焰恩. 基于计算机视觉反馈的 AGV 定位停车研究[J]. 机床与液压,2011,39(15):35-37.
- [9] 梁延德,刘大维. 基于到达时间差异的超声波 AGV 定位[J]. 组合机床与自动化加工技术,2007,4(4):66-69.
- [10] 闫国荣,张海兵. 一种新型轮式全方位移动机构[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001(6):855.
- [11] DU Xinyu,ZHANG Naiyao,YU Na. Structure analysis and function evaluation of a kind of fuzzy PID controllers[J]. Chinese Journal of Electronics,2004,13(4):654-659.
- [12] 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.