

基于卡尔曼滤波的 AGV 惯性导航仿真研究

袁 斌,王 辉,王伟博,贾兆远,韩林廷

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

摘 要: 针对目前导航方式存在的不足和惯性导航对自动引导小车(automated guided vehicle, AGV)路径定位精度低及纠偏能力差的问题,研究了 AGV 轨迹误差形成原因及改进惯性导航在 AGV 导航上的控制策略,对 AGV 数学模型、卡尔曼滤波(Kalman filter)定位、惯性导航纠偏控制系统进行仿真研究。在 MATLAB 软件上建立 AGV 运动模型及控制模型,获得了传统控制的 AGV 行走轨迹和使用卡尔曼滤波惯性导航控制策略的轨迹,并且在惯性元件的观测上引入偏移量,极大地提高了 AGV 在短距离行驶的观测准确性。仿真结果表明:AGV 在短距离运动过程中采用卡尔曼滤波惯性导航的控制策略比传统控制策略轨迹精度提高 8 倍左右,在很大程度上提高了 AGV 定位导航能力。

关键词: AGV 纠偏;卡尔曼滤波定位;惯性导航;Simulink 仿真

中图分类号: TP242.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)03-0191-06

Research on AGV inertial navigation simulation based on Kalman filter

YUAN Bin, WANG Hui, WANG Weibo, JIA Zhaoyuan, HAN Linting

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In view of shortcomings of the current navigation mode and problems of the low positioning accuracy and the poor correction ability of the inertial navigation for the path of the automatic guided vehicle(AGV), the paper studied causes of the AGV track error and control strategies of improving the inertial navigation in the AGV navigation, simulating the AGV mathematical model, Kalman filter positioning and the inertial navigation correction control system. The AGV motion model and control model were established on MATLAB software, obtaining the traditional AGV trajectory and the trajectory using Kalman filter inertial navigation control strategy. Moreover, the offset was introduced into the observation of inertial elements, which greatly improved the observation accuracy of AGV in short distance driving. The simulation results show that the trajectory accuracy of the control strategy of Kalman filter inertial navigation in the short-range motion of AGV is about 8 times higher than that of the

收稿日期: 2020-03-25

基金项目: 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2018R415030)

通信作者: 袁 斌(1974—),男,浙江省桐庐人,副教授,硕士,主要从事自动化装备设计、智能物流装备研究。

E-mail:1174537909@qq.com。

traditional control strategy, which greatly improves the positioning and navigation ability of AGV.

Keywords: AGV correction; Kalman filter positioning; inertial navigation; Simulink simulation

自动引导小车(automated guided vehicle, AGV)作为一种柔性智能搬运设备,在制造车间、快递物流等场所应用越来越广泛,对中国制造业带来重要影响^[1]。AGV 常见的导航方式有视觉导航、激光导航、磁条导航、惯性导航等。近年由于机器视觉技术的发展,于亦奇等^[2-3]提出一种视觉导航,它可以完成粗略的导航定位,但很难满足现实需求。导航精度能满足实际需求的有车菲^[4]提出的激光导航和刘娟^[5]、李玉琪^[6]提出的磁条导航,但它们很难符合目前所提倡的柔性制造。在生产制造中我们既要导航精度也要轨迹柔性,虽然惯性导航兼顾了两方面,但它存在无法消除的累积误差,杨玉明^[7]针对惯性导航存在的累积误差对 AGV 机械机构进行改进和导航算法优化,但惯性导航的定位精度在很大程度上取决于惯性元件。为了在短距离室内导航中能使 AGV 定位达到较高精度且成本较低,本文展开了基于卡尔曼滤波(Kalman filter)^[8]的惯性导航研究,将惯性元件解算得到 AGV 的姿势进行卡尔曼最优估计,得到最优姿势,再通过 PID 控制(proportional-integral-derivative control,比例-积分-微分控制)进行姿势调节,并且引入偏置量弥补系统存在的未知偏置误差。

1 AGV 轨迹误差分析

AGV 在直线行驶过程中存在累积误差、过程噪声和观测噪声,这些都对 AGV 的导航产生一定的影响。传统控制方式的 AGV 在直线运动过程中轨迹误差累积较缓慢,但转向处误差出现突变,由于传统控制方式无法消除累积产生的误差,因此,随着 AGV 继续运行,误差越来越大。AGV 轨迹误差仿真结果如图 1 所示。

经过 Δt 时间后,AGV 角度误差 ω_e 和轨迹误差 d_e ^[9]可表示为

$$\begin{cases} \omega_e = \int_0^t \Delta\omega dt = \int_0^t \frac{V_R - V_L}{L} dt; \\ d_e = \int_0^t \Delta d dt = \int_0^t \frac{V_R + V_L}{2} \sin\omega_e dt. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta\omega$ 为角度误差增量; V_L 、 V_R 为左右轮线速度; L 为两轮之间距离; Δd 为轨迹误差增量。

根据图 1 和式(1)可知,当转角存在误差时,转角误差对后续轨迹运动影响较大,基于此,开展基于卡尔曼滤波定位及转角滤波研究,对 AGV 姿势进行实时最优估计并及时调整姿势。

2 AGV 定位纠偏控制模型

2.1 AGV 运动学模型

AGV 在行驶过程中,由卡尔曼滤波算法对 AGV 姿势做出最优估计,从而得出最优姿势,并发送给控制器,控制器通过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制电机驱动器,从而控制电机调整 AGV 姿势。本研究建立如图 2 所示的 AGV 运动模型。

AGV 在 Q 点坐标为 (x, y) ,转角为 θ ,因此 Q 点姿势 Q 可以表示为 $[x, y, \theta]^T$ 。AGV 采用差速轮驱动,左右两轮线速度 V_L 、 V_R 可以由电机转速 n_R 、 n_L 表示为

$$\begin{cases} V_L = n_L \times 2\pi r; \\ V_R = n_R \times 2\pi r. \end{cases} \quad (2)$$

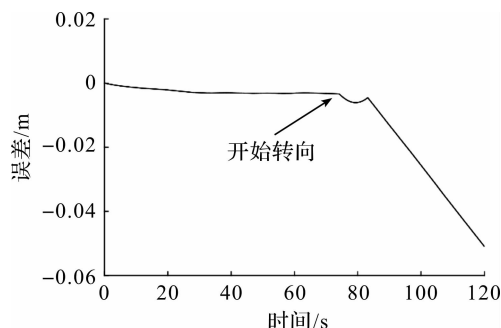


图 1 AGV 轨迹误差仿真

Fig. 1 AGV trajectory error simulation

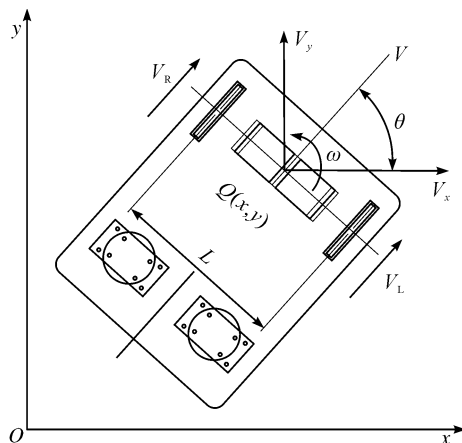


图 2 AGV 运动模型

Fig. 2 AGV motion model

AGV 的线速度 V 和角速度 ω 定义如下:

$$\begin{cases} V = \frac{V_L + V_R}{2}; \\ \omega = \frac{V_L - V_R}{L}. \end{cases} \quad (3)$$

AGV 姿势 Q 离散化后表示为

$$Q = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ V(k)\cos(\theta(k)) \\ y(k) \\ V(k)\sin(\theta(k)) \\ \theta(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x(k) \\ u_y(k) \\ u_\theta(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式(2)~(4)中: r 为轮子半径; T 为采样周期; $u_x(k)$ 、 $u_y(k)$ 、 $u_\theta(k)$ 分别为 x 、 y 、 θ 的控制量。

2.2 惯性系统误差及卡尔曼滤波定位原理

由于惯性元件的误差会随时间变化,严重影响惯性导航在 AGV 上的应用发展,因此,我们需要分析、估计误差。惯性元件主要由陀螺仪和加速度计组成,陀螺仪是一种角运动元件,它的准确性对 AGV 的转角产生直接的影响。陀螺仪的误差主要由刻度系数误差和漂移组成,刻度系数是一个随机常数,可通过标定消除,因此,陀螺仪误差^{[10]333}、加速度计误差^{[10]334}(主要包括偏置误差和随机误差)可以表示为

$$\begin{cases} \epsilon_i(t) = \epsilon_{bi}(t) + \epsilon_{ri}(t) + \omega_{gi}(t); \\ \beta_i = \beta_{bi} + \omega_{ai}; \\ i = x, y, z. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $\epsilon_{bi}(t)$ 为逐次启动漂移; $\epsilon_{ri}(t)$ 为慢变漂移(可忽略); $\omega_{gi}(t)$ 为陀螺仪白噪音; β_{bi} 为偏置误差; ω_{ai} 为加速度计白噪音。为了简化误差模型可以将惯性元件误差看成白噪音和偏置误差组成。

为了消除惯性元件的偏置误差,在观测上引入偏置,AGV 在动态过程用一般隐马尔科夫模型(hidden Markov model)表示出系统状态 A 和观测值 Z :

$$\begin{cases} A(k+1) = FA(k) + FW(k); \\ Z(k) = HA(k) + V(k) + b(k). \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: F 为状态转移矩阵; F 为噪声驱动矩阵; W 为过程噪声; H 为观测矩阵; $V(k)$ 为观测噪声; $b(k)$ 为测量偏置。

在观测方程中引入测量偏置并利用逆威沙特(normal-inverse-Wishart)分布拟合估计出偏置值^[11]。卡尔曼滤波算法主要包括预测和更新两个过程,预测根据上一次状态和控制量进行预测,更新根据本次状态和传感器数据进行高斯混合(Gaussian mixture)得到最优数据。卡尔曼滤波式子^{[12]36}如下:

$$\begin{cases} \hat{A}(k+1|k) = F\hat{A}(k|k) + Bu; \\ P(k+1|k) = FP(k|k)F^T + \Gamma Q \Gamma^T; \\ K(k+1) = P(k+1|k)H^T(HP(k+1|k)H^T + R)^{-1}; \\ \hat{A}(k+1|k+1) = \hat{A}(k+1|k) + K(k+1)(Z(k+1) - H\hat{A}(k+1|k)); \\ P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1)HP(k+1|k). \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $\hat{A}(k+1|k)$ 为状态预测; B 为系数矩阵; u 为偏置; Q 为过程噪声方差; K 为卡尔曼增益(Kalman gain); $P(k+1|k)$ 为协方差预测; R 为测量噪声方差; $\hat{A}(k+1|k+1)$ 为状态更新; $P(k+1|k+1)$ 为协方差更新。

最后将经过卡尔曼滤波的角速度进行四元数解算,可以将翻滚角 φ 、俯仰角 θ 、偏航角 ψ ^[13]用四元数表示如下:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{2(q_2q_3 + q_0q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right); \\ \theta = \arcsin(-2(q_1q_3 - q_0q_2)); \\ \psi = \arctan\left(\frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right). \end{cases} \quad (8)$$

通过一阶龙格库塔法(Runge-Kutta)迭代,可以将惯性元件测得的角速度来表示四元数,从而求得欧拉角(Euler angle):

$$\begin{cases} q_0 = q_0 + \frac{1}{2}\Delta t(-\omega_xq_1 - \omega_yq_2 - \omega_zq_3); \\ q_1 = q_1 + \frac{1}{2}\Delta t(\omega_xq_0 - \omega_yq_3 + \omega_zq_2); \\ q_2 = q_2 + \frac{1}{2}\Delta t(\omega_xq_3 + \omega_yq_0 - \omega_zq_1); \\ q_3 = q_3 + \frac{1}{2}\Delta t(-\omega_xq_2 + \omega_yq_1 + \omega_zq_0). \end{cases} \quad (9)$$

式(8)~(9)中: q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 为四元数; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为三个方向的角速度。

为了便于观察 AGV 的定位误差,在 MATLAB 软件中进行直线行走和转弯的仿真。图 3 为卡尔曼位置观测及误差,图 4 为卡尔曼角度观测及误差。

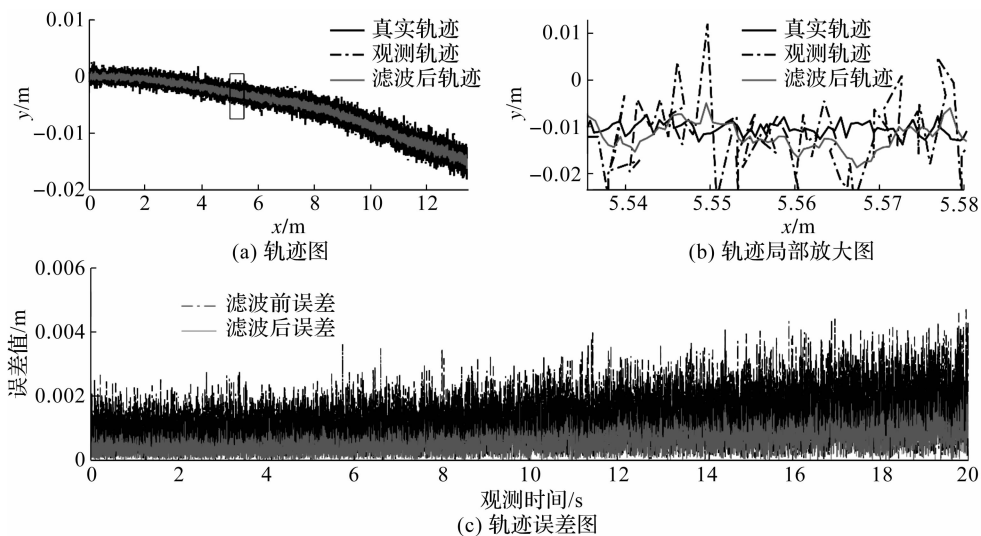


图 3 卡尔曼位置观测及误差

Fig. 3 Kalman positioning observation and error

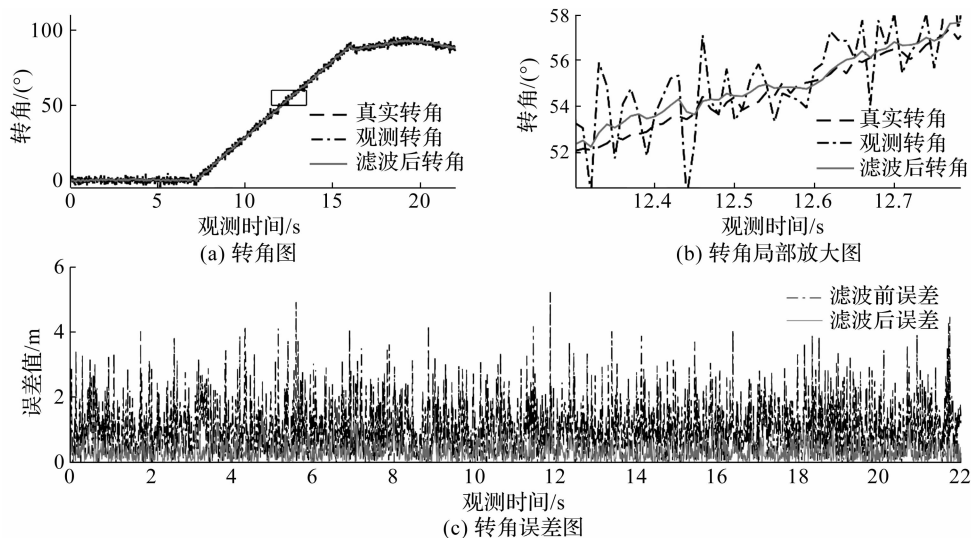


图 4 卡尔曼角度观测及误差

Fig. 4 Kalman angle observation and error chart

2.3 AGV 纠偏模型建立

通过 MATLAB 中的 Simulink 建立 AGV 纠偏控制模型,如图 5 所示。模型主要由 AGV 控制器模块、直流无刷电机模块^[14]、姿势解算模块、卡尔曼滤波器模块^[12]^[16]和其他模块组成,并且电机控制采用 MATLAB 中的 power_brushlessDCmotor 模块为基本单元。AGV 在运行过程中,卡尔曼滤波器采集惯性元件的数据进行最优估计,然后将最优姿势与控制器的目标姿势进行比对得到偏差,最后通过 PID 控制器调整 AGV 姿势。

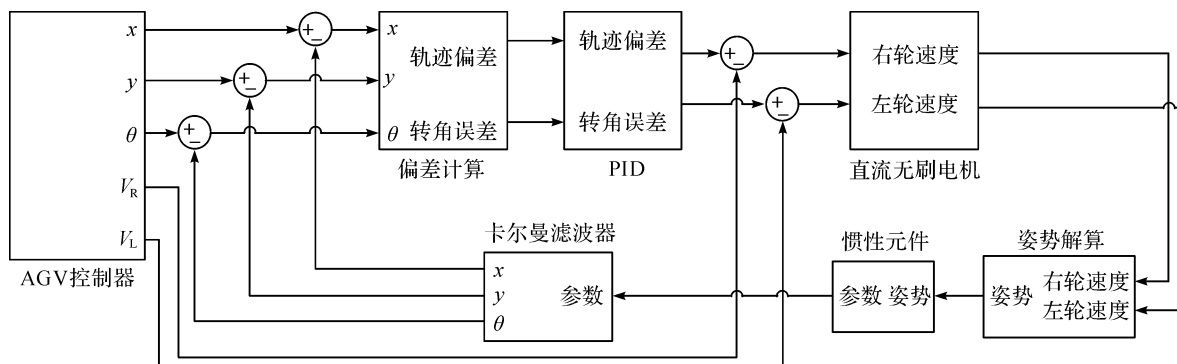


图 5 AGV 纠偏控制模型

Fig. 5 Control model of AGV correction

3 仿真与结果分析

3.1 模拟 AGV 转弯运动数据

AGV 小车先匀速直线行驶,然后进行 90° 转弯。模拟直线行驶距离为 10 m,转弯后再行驶 3 m。AGV 行驶速度、方向角初始值都为 0。模拟运动局部轨迹如图 6 所示,其行驶轨迹误差如图 7 所示。

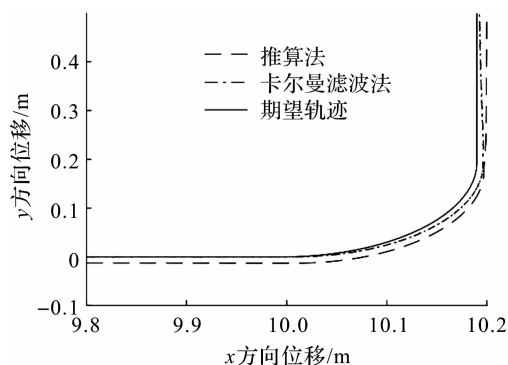


图 6 模拟运动局部轨迹

Fig. 6 Local trajectory of simulation motion

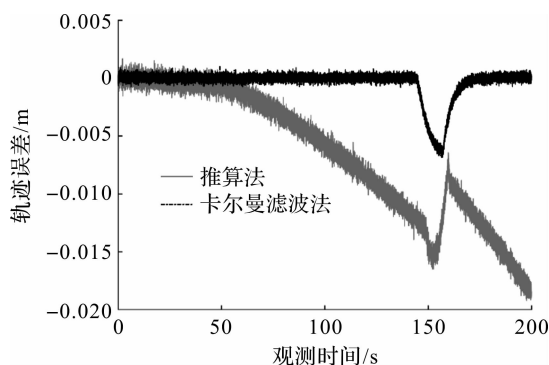


图 7 AGV 轨迹误差

Fig. 7 AGV track error

3.2 结果分析

通过两种控制方式的仿真比较,经过计算得出,在短距离内卡尔曼滤波定位惯性导航方式的轨迹均值误差为 0.000 58 m,而传统推算法为 0.004 69 m,前者导航精度比后者提高了 8 倍左右。

AGV 在运动过程中由于两轮转速存在偏差,需要不断调整自身姿势。由于卡尔曼滤波算法具有较好的实时性,因此,对于控制量频繁改变的 AGV 具有较好的适应性。

4 结 语

卡尔曼滤波定位惯性导航方式控制简单、实用,在一般场所中能满足所需的精度和稳定性要求。本文通过在惯性导航中加入带偏置的卡尔曼滤波进行轨迹预测和角度滤波,提高了惯性导航的室内定位导航能力,通过 Simulink 仿真验证了这一方法的有效性,从而为 AGV 的定位导航问题提供了一定的理论参考。

参考文献:

- [1] 王宏玉. 物流机器人(AGV)获得跨越式发展[J]. 物流技术与应用, 2018(4):71.
- [2] 于亦奇. AGV 视觉定位系统的设计与实现[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [3] 朱佳文. 基于视觉的机器人室内定位与导航方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [4] 车菲. 激光导航 AGV 在机车系统的应用[J]. 物流科技, 2018(6):65.
- [5] 刘娟. 磁导式 AGV 导航系统研究与设计[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- [6] 李玉琪. 基于 RFID 的磁导航潜伏式 AGV 设计与实现[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.
- [7] 杨玉明. 基于惯性导航的全向 AGV 定位系统研究与设计[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- [8] KAKMAN R E. A new approach to liner filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1):35.
- [9] 古世甫, 金滔, 范佩佩, 等. 基于改进模糊 PID 的自动导引车纠偏控制研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(12):50.
- [10] 秦永远, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 3 版. 西安:西北工业大学出版社, 2015.
- [11] 朱光明, 蒋荣欣, 周凡, 等. 带测量偏置估计的鲁棒卡尔曼滤波算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7):1344.
- [12] 黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用:MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2015:36.
- [13] 徐云川. 四轴飞行器姿态解算算法设计与仿真[J]. 科技视界, 2016(23):17.
- [14] 陈欢. 直流无刷电机的建模与仿真[J]. 舰船电子工程, 2010(2):123.
- [15] 肖献强, 程亚兵, 王家恩. 基于惯性和视觉复合导航的自动导引小车研究与设计[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22):2734.
- [16] 杨前明, 张君, 阮益. AGV 轨迹规划及其纠偏控制机理研究[J]. 机电工程, 2018, 35(11):1243.
- [17] 沈晔星. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的室内惯性导航系统设计与实现[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [18] 王瑞. 基于 DBN 的卡尔曼滤波算法研究及在 AGV 定位中的应用[D]. 长春:吉林大学, 2017.
- [19] 朱晓祥, 陈乃军, 殷邦革. AGV 路径纠偏控制器设计与分析[J]. 科技创新与应用, 2017(12):62.
- [20] 张越. 基于 Matlab/Simulink 的港口 AGV 运动控制仿真[J]. 新型工业化, 2016, 6(3):23.
- [21] 莫建麟. 基于卡尔曼滤波的室内定位方法设计[J]. 长春师范大学学报, 2019, 38(4):43.