

# 双磁导引轮式 AGV 路径跟踪算法的研究

尹建军,田丽芳,贺 坤

(江苏大学 现代农业装备与技术教育部重点实验室,江苏 镇江 212013)

**摘 要** 针对单磁导引轮式 AGV 转向过程中存在的横向滑移和磨损问题,以及路径跟踪过程中纠偏方向的左右不确定性,设计了一种能实现纯滚动转向从而减小轮胎磨损的行走装置,并在轮式 AGV 平台上搭建了前后双磁导引传感器系统。首先采用电动推杆实时改变横拉杆长度,使机器人运动结构符合艾克曼模型从而实现纯滚动运动,然后以双 PID 算法为导引,根据反馈的当前位置和角度偏差作为 PID 控制器的输入,前轮期望转角和车体期望速度作为输出,采用 MATLAB 进行不同路径跟踪仿真实验。仿真结果表明,AGV 在弯道上能在 2s 内以 1.5m/s 的速度快速准确跟踪到预定路径,纠偏角度保持在 $(-10^{\circ}\sim+10^{\circ})$ ,验证了双磁导引系统设计的合理性和路径跟踪算法设计的有效性。

**关键词** 纯滚动转向;双磁导引;PID 路径跟踪;轮式 AGV;MATLAB

中图分类号:TH16;TP242 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2017)12-0269-04

## A Research of Path Tracking Algorithm of Wheeled AGV Based on Double Magnetic Guide

YIN Jian-jun, TIAN Li-fang, HE Kun

(Key laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

**Abstract** For the lateral sliding and abrasion problems of single magnetic guided fruit-picking wheeled robot when steering and the uncertainty about the direction of deviation when path tracking firstly a pure rolling walking device is designed based on using electronic rod to reduce tire wear which makes the robot motion structure meets Ekman model by changing tie rod length real-time. Then before and after the double sensor of the magnetic guidance system is set up on wheeled robot platform. With double PID algorithms as guiding algorithm the feedback of current position and angular deviation as input of PID controller, the expected front wheel angle and body speed as output, different tracking curves are simulated in MATLAB. Simulation results show that the robot can track to planned route fastly and accurately in 2s with the speed of 1.5m/s keeps deviation angle between  $(-10^{\circ}\sim+10^{\circ})$  verify the validity of algorithm and double magnetic guide system.

**Key Words** Pure Rolling Steering; Double Magnetic Guide; PID; Path Tracking; Wheeled AGV; MATLAB

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2017.12.067

## 1 引言

轮式 AGV 因其具有承载大、机构简单、驱动和控制相对方便、机动灵活等优点,被大量应用于工业、农业等领域。但由于其属于非线性系统,运动稳定性与路面状况有很大关系,轮胎摩擦、路面情况等元素的干扰而生成的检测偏差均会导致 AGV 实际走过的路线与预设路线有偏差。因此,如何解决 AGV 运动时存在的摩擦和横向滑动问题,从而提高 AGV 运行平稳性和使用寿命,最终实现精确的路径跟踪控制,已成为轮式 AGV 研究的关键技术之一<sup>[1]</sup>。

现有研究成果表明,通过使用凸轮使原有四杆机构变为长度可调的五连杆机构,或对梯形结构构建误差模型进行转弯误差补偿,使车体可进行纯滚动转向的效果较为显著。介于以上方法,是通过增加机构数目和建立复杂算法模型来实现纯滚动运动,增

加了 AGV 结构的复杂性<sup>[2-3]</sup>。同时,现有的路径跟踪算法多考虑直线行驶过程,改进的算法对控制参数的选择也比较复杂<sup>[4-5]</sup>。因此,提出一种基于双磁导引的纯滚动转向轮式 AGV 路径跟踪算法,采用双 PID 算法作为导引,根据反馈的当前位置和角度偏差作为 PID 控制器的输入,前轮期望转角和车体期望速度作为输出,通过仿真实验验证双磁导引系统设计和所提算法的有效性。

## 2 纯滚动转向轮式 AGV 的双磁导引系统构建

AGV 前端磁导航传感器与目标路径位置偏差为  $e_1$ ,如图 1 所示。后端磁导航传感器与目标路径位置偏差为  $e_2$ ,车体中心与目标路径位置偏差为  $e_d$ ,AGV 与目标路径角度偏差为  $e_a$ ,前后磁导航传感器间距为  $d$ 。在图 1(a)传统单磁导引轮式 AGV 中,通过

来稿日期:2017-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475212);江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介:尹建军(1973-)男,山西大同人,博士研究生,硕士生导师,研究员,主要研究方向:机械集成设计和机器人;

田丽芳(1991-)女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向:机械设计和机器人

单一前端磁导航传感器仅可以得到 AGV 与目标路径的位置偏差,无法得到  $e_2$  和 AGV 运行方向与目标路径角度偏差,因此会产生纠偏方向的左右不确定性问题,影响纠偏效率。

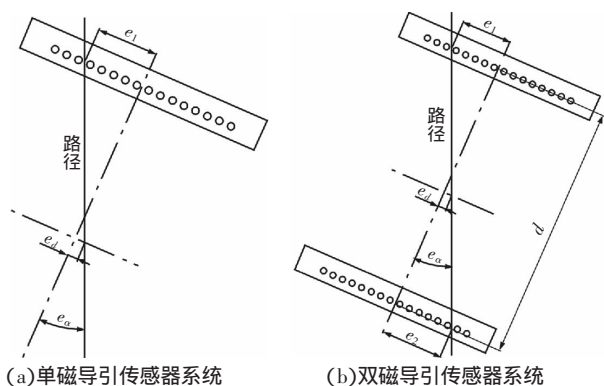


图 1 AGV 循线纠偏示意图

Fig.1 Schematic View of AGV Correction Through the Line

针对以上问题,在 AGV 平台上搭建了前后双磁导引的传感器系统,如图 1(b)所示。两个传感器均安装于车体底部中间,与磁条路径相距 25mm。由图 1(b)可以看出车体位置偏差  $e_d$  与前、后端传感器检测到的偏差关系为  $e_d = e_1 + e_2$  (1)

角度偏差  $e_\alpha$  与前后传感器检测到的偏差关系为:

$$e_\alpha = \arctan \frac{|e_1| + |e_2|}{d} \quad (2)$$

纯滚动转向轮式 AGV 的双磁导引系统包括前轮转向机构、后轮差速驱动机构、控制系统、双磁导引系统。前轮转向机构采用电动推杆实时改变横拉杆长度,使 AGV 运动结构符合阿克曼模型,实现纯滚动运动。工作时,车体前后的双磁导航传感器共同作用,根据反馈的位置偏差得到角度偏差,根据所得的角度和位置偏差值计算驱动电机的速度差,由控制系统对执行机构进行控制,结合电动推杆的控制,实现 AGV 基于电磁导航的前轮自动纠偏转向和后轮差速转动。

### 3 纯滚动转向轮式 AGV 的运动学建模

#### 3.1 AGV 运动学模型的建立

纯滚动转向轮式 AGV 行走系统属于前轮转向、后轮固定的导向驱动轮式<sup>[6-7]</sup>,如图 2 所示。

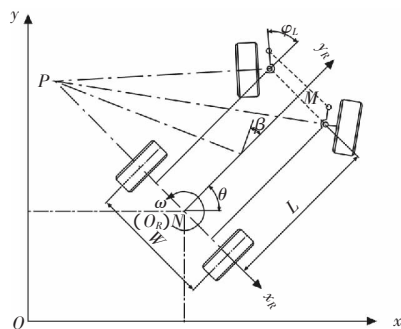


图 2 纯滚动转向轮式 AGV 运动模型简化图

Fig.2 Simplified Diagram of Pure Rolling Steering Wheeled AGV Motion Model

图中  $M, N$ —前后轮轴中心点  $\varphi_L$ —车体左前轮摆角  $\gamma$ —车体的前进速度  $\beta$ —车体中心侧偏角  $\omega$ —车体转动角速度  $\theta$ —车体的姿态角,即由大地坐标系  $\Sigma O$  的  $x$  轴到车体坐标系  $\Sigma O_R$  的  $y_R$  轴的转角 左右轮轮距  $W=550\text{mm}$  前后轮轴距  $L=870\text{mm}$ 。

设车体的实际位姿为  $P=[x \ y \ \theta]^T$ ,实际的输入控制量为  $[v \ \omega]^T$  输出控制量为车速和前轮摆角  $[v \ \varphi_L]^T$  则:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ v \cos \beta \tan \varphi_L / L \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此,可建立车体在大地坐标系  $\Sigma O$  下的运动学方程为:

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad \dot{y} = v \sin \theta \quad \dot{\theta} = v \tan \varphi_L \cos \beta / L \quad \dot{\varphi}_L = \omega \quad (4)$$

转化为矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \frac{\tan \varphi_L \cos \beta}{L} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 3.2 AGV 纯滚动前轮转向、后轮差速的运动学模型

依据阿克曼行驶机构原理,车轮作纯滚动运动,得到轮式 AGV 转向运动示意图,如图 3 所示。

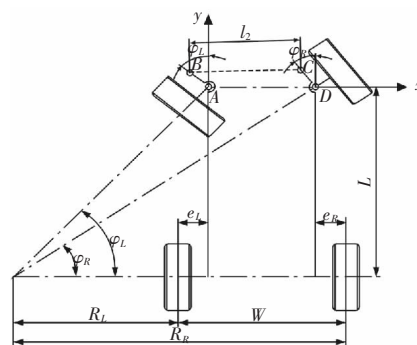


图 3 纯滚动转向轮式 AGV 转向运动示意图

Fig.3 Steering Motion Schematic of Pure Rolling Steering Wheeled AGV

$P$  点为 AGV 的速度瞬心。小车主转时,左前轮转向角为  $\varphi_L$ ,右前轮转向角记为  $\varphi_R$  据图 3 几何关系得到:

$$\tan \varphi_L = \frac{L}{R_L + e_L} \quad (6)$$

$$\tan \varphi_R = \frac{L}{R_L - e_R} = \frac{L}{R_L + W - e_R} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)得到小车主转时转向机构中左前轮转角和右前轮转角的运动学关系:

$$\varphi_R = \arctan \frac{L}{R_L + W - e_R} = \arctan \frac{L \cdot \tan \varphi_L}{L + (W - e_L - e_R) \tan \varphi_L} \quad (8)$$

同理可得小车主转时转向机构左前轮转角和右前轮转角的运动学关系:

$$\varphi_R = \arctan \frac{L}{R_L - W + e_R} = \arctan \frac{L \cdot \tan \varphi_L}{L - (W - e_R - e_L) \tan \varphi_L} \quad (9)$$

瞬时将 AGV 看做绕 AGV 的速度瞬心  $P$  点作纯滚动。车体左转时,对于左、右后轮,绕  $P$  点滚动的轨迹周长与自身滚动转过的弧长相等,则得:

$$2\pi R_L = r \cdot \theta_{BL} \quad (10)$$

$$2\pi R_R = r \cdot \theta_{BR} \quad (11)$$

式中  $\theta_{BL}, \theta_{BR}$ —左后轮和右后轮绕自身轴线的转角。

联立式(10)和式(11)得到车体左转时两后轮转角比:

$$\frac{\theta_{BR}}{\theta_{BL}} = \frac{R_R}{R_L} = \frac{L + (W - e_L) \tan \varphi_L}{L - e_L \tan \varphi_L} \quad (12)$$

同理可得车体右转时两后轮转角比：

$$\frac{\theta_{BR}}{\theta_{BL}} = \frac{R_R}{R_L} = \frac{L - (W - e_L) \tan \varphi_L}{L + e_L \tan \varphi_L} \quad (13)$$

## 4 基于双磁导引的 AGV 路径跟踪算法

### 4.1 算法设计

由轮式 AGV 运动学方程(5)分析可知,系统控制由期望转角和期望速度共同确定。依据磁导航传感器获取车体当前与预定路径位置偏差和角度偏差,通过 PID 算法计算两轮速度差  $\Delta v$ ,通过调节车速来实现对预定义路径的跟踪。

PID 算法具有稳定性、快速性和准确性的特点。PID 控制器根据给定与被控对象的反馈的差值,按照 PID 算法计算出控制器的输出量,控制执行机构去影响被控对象的变化<sup>[8]</sup>,其表达式为：

$$u(x) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (14)$$

电机转角和转速调节为采样控制,因此,先将控制量进行离散化,根据前后三次检测的误差得到控制增量：

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i e_k + K_d(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \\ &= K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e_k - K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{k-1} + K_p \frac{T_d}{T} e_{k-2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $k$ —采样次数  $u(k)$ —第  $k$  次采样时间系统控制量  $e_k, e_{k-1}$ —第  $k, k-1$  次采样时间的系统误差值。

同时,根据轮式 AGV 数学建模得到差速转向式 AGV 运动学模型为<sup>[9]</sup>：

$$\begin{aligned} e_a(k+1) &= e_a(k) + \frac{2T_s \Delta v(k)}{W} \\ e_d(k+1) &= e_d(k) - v e_a(k) T_s - \frac{v T_s \Delta v(k)}{W} \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $T_s$ —系统采样周期。

根据前面 AGV 运动学关系式(12)和式(13)可得,左、右后轮速度随车速的提高同时提高,但左右轮速度比固定不变,不会跟随车速改变。AGV 速直线行驶时,左、右后驱动轮速度相等。小车开始转弯时,磁导航传感器采集的当前偏差不为 0,首先根据驱动轮差速关系计算靠弯道的驱动轮目标转速,然后根据转速比,确定另外一个轮子的目标转,将指令发送给控制器。

在本 AGV 系统中,经过测试发现,对于前轮转向方向角的控制,当积分环节为 0 时,小车能表现出较好的性能<sup>[10]</sup>,而在跟踪路径不断纠偏过程中,小车从直线能够稳定地进入弯道,需要保证快速、稳定地减速。所以,采用双 PID 控制算法,速度和转角协调控制,既可以保证短时间内消除位置误差,又可以兼顾跟踪效率。转角控制采用 PD 算法,控制器输入为当前位置偏差,输出为车体中心线期望转角,速度控制采用 PID 算法,控制器输入为当前角度偏差,输出为车体目标速度。

### 4.2 偏差距离检测的定义

小车运动过程中,磁导航传感器中位于磁条正上面的(3~5)个连续分布的探头会被触发,产生数字信号输出。根据 16 个探头中的(3~5)路输出,能够计算出磁导航传感器相对于磁条的偏差距离。为了量化 AGV 运行过程中的偏移量,对传感器探头进行(1~16)的赋值。如果传感器没有完全脱离磁条,至少有一个探头被触发。AGV 当前位置为所有被触发的探头编号值相加之后的平均

值,为方便计算,将该平均值乘以 2,作为当前姿态值。设当前传感器姿态值为  $num$ ,则有  $num = (\text{当前被触发传感器探头编号之和} / \text{当前被触发传感器探头个数}) * 2$ ,  $num = 2, 3, \dots, 32$ 。

经实验证明,当磁条位于小车正下方时,此时  $num$  值为 17;当小车处于向左偏离状态时,右边传感器被触发,当前  $num$  值小于 17;当小车处于向右偏离状态时,左边传感器被触发,当前  $num$  值大于 17。所以定义偏差检测值为  $error$ ,  $error = 17 - num$ ,  $error$  与前后磁导航传感器检测的偏差值  $e_1$  和  $e_2$  关系为：

$$error(\text{前}) = e_1, error(\text{后}) = e_2$$

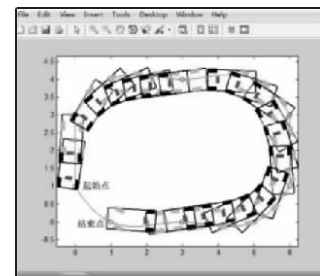
则可得偏差与姿态值关系为：

$$\begin{aligned} 2 \leq num(\text{前}) < 17, 17 < num(\text{后}) \leq 32 \text{ 时, 车体左偏;} \\ 2 \leq num(\text{前}) < 17, 2 \leq num(\text{后}) < 17 \text{ 时, 车体左偏;} \\ 17 < num(\text{前}) \leq 32, 2 \leq num(\text{后}) < 17 \text{ 时, 车体右偏;} \\ 17 < num(\text{前}) \leq 32, 17 < num(\text{后}) \leq 32 \text{ 时, 车体右偏;} \\ num(\text{前}) = num(\text{后}) = 17 \text{ 无偏差;} \end{aligned}$$

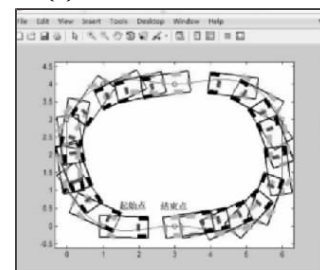
所以,可以根据  $e_1$  和  $e_2$  共同计算出车体位置偏差和角度偏差。

### 4.3 基于 MATLAB/Simulink 的 AGV 路径跟踪仿真

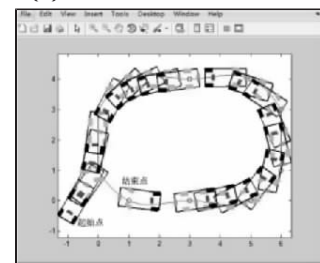
根据以上运动学分析和偏差检测算法,按照 1:1 比例在 MATLAB/Simulink 中通过 kinematics 和 sensor 函数建立基于双磁导引的前轮转向和后轮驱动的 AGV 二维模型,双 PID control 函数对偏差状态进行计算得出车体期望转角和期望速度。设计预定路线为圆曲线,并建立不同初始偏离状态下小车跟踪预定路线的仿真实验,得到跟踪效果图,如图 4(a)~图 4(c)所示。



(a)右倾初始状态跟踪效果图



(b)左倾初始状态的跟踪效果图



(c)不在预设路径初始状态跟踪效果图

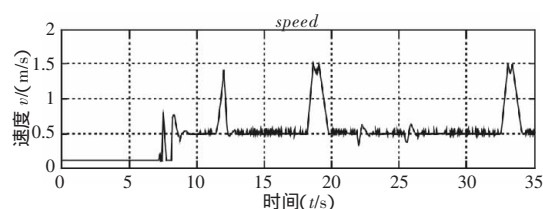
图 4 不同初始状态下的跟踪效果图

Fig.4 Tracking Renderings of Different Initial State

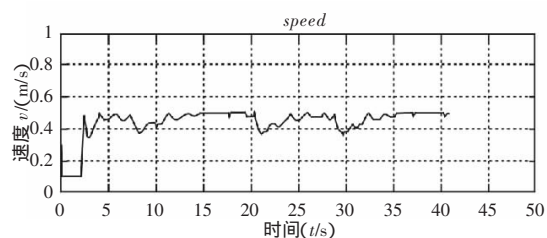


AGV 在预设路径上时,若车体处于右偏状态,则左边传感器被触发,根据纠偏控制算法,此时 AGV 应向左偏转,从图 4(a)可以看出,车前轮向左偏转一定角度,带动车体向左运动,在开始几个采样点,依然是左边传感器被触发,车体继续左转,运动几次之后,车体左偏,此时右边传感器被触发,小车开始向右偏转,直到运行到直线轨迹,偏移量为 0,车轮转角归 0,车体保持直行状态。

AGV 不在预定路径上时,如图 4(c)所示。无传感器被触发,此时控制算法控制其沿直线行驶,并在每个采样点检测一次传感器触发信号,一旦检测到传感器信号,则判断车体偏移方向并开始纠偏,从图 4(c)中可以看出,小车在直行到预设路径上后,车体呈左偏状态,此时右边传感器被触发,开始向右运动,进行纠偏动作,所得期望速度与时间关系,如图 5(a)所示。单磁导引系统在相同初始位置条件下,所得期望速度与时间关系,如图 5(b)所示。



(a)双磁导引系统期望速度与时间关系图



(b)单磁导引系统期望速度与时间关系图

图 5 期望速度与时间关系图

Fig.5 Desired Speed Versus Time Diagram

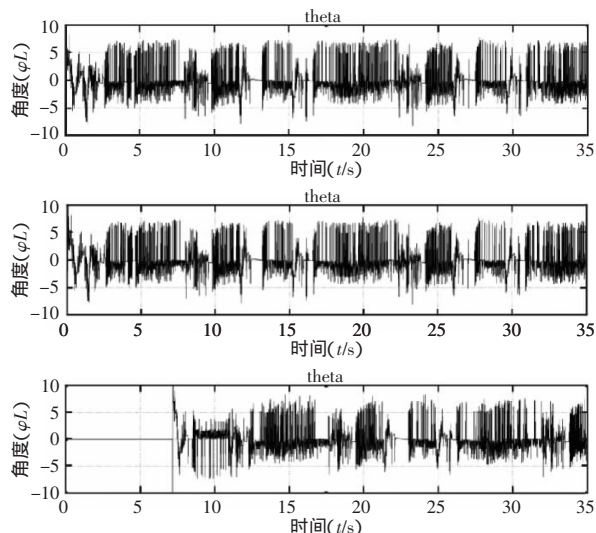


图 6 期望转角与时间关系图

Fig.6 Desired Angle Versus Time Diagram

根据图6 期望转角与时间关系图对比结果表明:在弯道路径上,基于双磁导引提出的算法能让 AGV 以 1.5m/s 的速度在 2s 内快速跟踪到预定路线,纠偏角度保持在 $(-10^{\circ}\sim 10^{\circ})$ ,纠偏效果良好。由仿真结果分析可得,无论 AGV 是否在预设路径上,无论左倾还是右倾,都能快速根据纠偏检测计算车体位置偏差和角度

偏差,根据纠偏算法进行纠偏,并且保证在弯道路径上,准确判断出纠偏向,其跟踪效果快速准确,验证了算法有效性。实验参数如轨迹弯道的半径和前后磁导航传感器安装位置对 AGV 路径跟踪结果均有影响,若轨迹弯道半径小于车体最小转弯半径时,AGV 无法进行弯道的纠偏转向。

## 5 结论

依据纯滚动转向轮式 AGV 运动特性,设计了行走系统控制方案,以双磁导航传感器为感知系统,以伺服电机和电动推杆控制为执行机构,完成硬件平台搭建。设计转角和速度双 PID 控制路径跟随系统,设定 AGV 相对于预定路线不同的初始偏离状态,在 MATLAB 中进行路径跟踪仿真,仿真结果表明:在弯道路径上,AGV 能以 1.5m/s 的速度在 2s 内快速跟踪到预定路线,纠偏角度保持在 $(-10^{\circ}\sim 10^{\circ})$ ,纠偏效果良好,验证了双磁导引系统设计的合理性和路径跟踪算法设计的有效性。

## 参考文献

- [1] Halloran D O, Wolf A, Choset H. Design of a high-impact survivable robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005(40): 1345-1366.
- [2] 冯永伟, 钱瑞明. 纯滚动汽车转向机构设计[J]. 机械设计与制造工程, 2001, 30(5): 8-9.  
(Feng Yong-wei, Qian Rui-ming. Mechanism design of pure rolling automobile steering [J]. Journal of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2001, 30(5): 8-9.)
- [3] 南景富, 刘廷斌, 牛广林. 轮式移动机器人的路径规划和跟踪控制[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 131-133.  
(Nan Jing-fu, Liu Ting-bin, Niu Guang-lin. Path planning and tracking control of wheeled mobile robot [J]. Journal of Mechanical Design and Manufacturing, 2007(8): 131-133.)
- [4] 柯海森, 叶旭东, 钱建海. 移动机器人的鲁棒自适应控制器设计[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(7): 1127-1131.  
(Ke Hai-sen, Ye Xu-dong, Qian Jian-hai. Robustness adaptive controller design of mobile robot [J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(7): 1127-1131.)
- [5] 周波, 戴先忠, 韩建达. 野外移动机器人滑动效应的在线建模和跟踪控制[J]. 机器人, 2011, 33(3): 265-272.  
(Zhou Bo, Dai Xian-zhong, Han Jian-da. Sliding effect of on-line modeling and tracking control of wild mobile robot [J]. Robot, 2011(3): 265-272.)
- [6] 谭国俊, 钱苗旺, 赵忠祥. 双电机独立驱动电动车辆电子差速控制[J]. 微特电机, 2009(6): 33-36.  
(Tan Guo-jun, Qian Miao-wang, Zhao Zhong-xiang. The electronic differential control of independent double motor drive electric vehicle [J]. Micro & Special Motor, 2009(6): 33-36.)
- [7] 葛英辉, 倪光正. 新型电动车电子差速控制策略研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005(12), 39(12): 1973-1978.  
(Ge Ying-hui, Ni Guang-zheng. The electronic differential control strategy research of new electric car [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005(12), 39(12): 1973-1978.)
- [8] 刘晓邦, 车玥玮, 童金. 基于模糊控制的智能循迹系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2011(2): 57-61.  
(Liu Xiao-bang, Che Yue-wei, Tong Jin. The design of intelligent tracking plotting system based on the fuzzy control [J]. Journal of electronic measurement technology, 2011(2): 57-61.)
- [9] 李欣源, 阮晓钢, 任红格. 柔性双轮平衡机器人的动力学建模与分析[J]. 机器人, 2010, 32(1): 138-144.  
(Li Xin-yuan, Ruan Xiao-gang, Ren Hong-ge. Dynamics modeling and analysis of flexible two-wheel balancing robot [J]. Robot, 2010, 32(1): 138-144.)
- [10] Farooq Umar, Asad Muhammad Usman, Hanif Athar. Design and implementation of a fuzzy logic controller for two wheeled self balancing robot [J]. Advanced Materials Research, 2011(403-408): 4918-4925.