

# 基于预瞄模糊 PID 控制的嵌入式轮式机器人设计<sup>①</sup>

蔡耀仪

(湖南师范大学 工学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用 ARM 作为核心处理器设计了一款自动寻迹的轮式机器人并完成寻迹实验. 基于模仿人工驾驶思想将多点预瞄和模糊 PID 控制结合提出了多点预瞄模糊 PID 控制方法. 经调试, 轮式机器人能分别按照直线、虚线道路行走, 并能完成自动寻找目标道路等行为. 重点给出了控制器与硬件电路图设计. 实验表明, 机器人完全能满足性能要求, 为新型轮式移动机器人的设计提供了方案.

**关键词:** 轮式机器人; 轨迹跟踪; 多点预瞄; 模糊控制

## Preview Fuzzy PID Control System for an Embedded Wheeled Robot

CAI Yao-Yi

(Polytechnic College, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** The design of a wheeled robot with automatically tracing process based on ARM for core device is introduced. This article proposes a multiple-point preview fuzzy PID control algorithm which is based on imitating artificial driving. By debugging, the wheeled robot can track the straight lines and the dotted lines. And the wheeled robot can automatic search for roads. The design of the controller and the main hardware circuit diagram are given. Experimental results show that the robot can meet performance requirements and provide programme for the design of the new kind of wheeled robot.

**Key words:** wheeled robot; trajectory tracking; multiple-point preview; fuzzy control

## 1 引言

移动机器人(WMR)的研究开始于 60 年代斯坦福研究院, 是一种集合人工智能、图像处理、智能控制、高速信息处理技术为一体的综合系统设计. 与位置固定的机器人相比, 移动机器人的工作环境存在非结构化和不具备确定性的特点. 开发出更智能、成本更低廉的移动机器人, 能够广泛应用于工业制造、家庭服务、未知区域探测等领域, 具有极高的应用价值.

由于移动机器人工作环境的不确定性, 通常要求 WMR 通过跟踪一条已经确定好的路径, 即将移动机器人的行走问题转化成轨迹跟踪问题. 现有移动机器人控制算法较为复杂<sup>[1-3]</sup>, 多停留在理论研究阶段, 很少针对嵌入式系统进行优化与实现<sup>[4]</sup>. 在核心处理芯片方面多采用 MSC-52 或 96 系列单片机作为主控芯

片, 存在运算速度过慢, 控制精度较低等缺点.

本文选用三星公司的 S3C6440 处理器作为主控芯片, 并在嵌入式 linux 系统下实现控制界面的设计及对小车的控制. 重点针对嵌入式系统实现特点, 从仿人工驾驶角度切入, 采用多点预瞄模糊 PID 控制设计了一款具有较好寻迹效果的轮式移动机器人. 该机器人具有扩展性强、控制精度高、实时性强等优点.

## 2 系统结构

轮式机器人系统由无线遥控赛车改装完成, 分为液晶显示模块、ARM 处理模块、视频采集模块、输出信号控制模块和伺服电机驱动模块组成. 小车整体结构图如图 1 所示. 图中, 标号 1 为液晶显示模块, 用于显示系统信息与设置系统参数, 标号 2 为机器人开关, 标号 3 为输出控制信息给伺服电机的 CPLD 控制器,

<sup>①</sup> 基金项目:湖南省教育厅基金资助项目(11C0845);湖南师范大学青年基金(2110640)

收稿时间:2012-01-13;收到修改稿时间:2012-02-27

标号 4 为 ARM 处理核心, 标号 5 为云台, 用于控制摄像头转动, 标号 6 为 CMOS 摄像头, 用于采集图像信息.

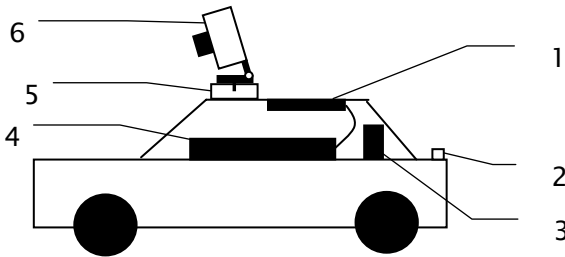


图 1 轮式机器人结构图

小车的核心处理器件为 ARM11 体系下的嵌入式开发板 S3C6440, 运算速度达到 667MHz, 板上集成有 256M DDR SDRAM 和 2GB 的 Flash. 摄像头的有效像素达到 130W, 能够满足图像采集要求.

### 3 多点预瞄模糊PID控制算法

#### 3.1 轮式机器人运动学模型

系统所采用的机器人为后轮驱动, 前轮自由转向. 机器人后轮由伺服电机驱动, 前轮为万向轮, 具有方向自校正的特点. 由于系统所设计轮式机器人多被应用于监控、探测等领域, 对速度要求并不是很高, 应用此设计具有结构简单、控制方便的优点. 系统工作原理图如图 2 所示:

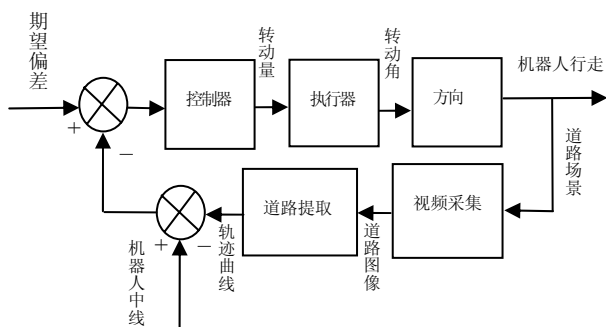


图 2 轮式机器人工作原理图

#### 3.2 多点预瞄跟随策略

预瞄跟随思想即模仿人类驾车, 使机器人提前得到前方道路信息, 进而提前计算出控制量, 提高稳定性和精确性. 预瞄跟随理论描述了一个系统根据未来所得到的输入信息进行跟随控制的特性. 根据预瞄理论, 可以将系统看成是一个预瞄器  $P(S)$  与一个跟随器

$F(S)$  串联而成. 对于人一车闭环控制系统而言, 预瞄器和跟随器满足公式 1 的关系:

$$P(S) * F(S) \approx 1 \quad (1)$$

预瞄跟随策略就是一个“信息感知—轨迹决策—操作校正”的过程. 应用预瞄跟随思想于轮式机器人设计过程中, 对小车而言, 决定能否完成路径跟踪过程的两个参数即小车的行驶速度和预瞄点的距离.

1) 小车的行驶速度取决于多个因素, 包括摄像头采集速度、ARM 处理速度、控制器与执行器的速度以及控制算法的精度. 若小车速度设置太快, 则极大可能引起道路信息提取不完全及图像处理滞后于小车控制信息的提取, 从而容易造成在路径曲率较大的地方丢失道路.

2) 对预瞄点的距离而言, 由于算法的精度取决于预瞄点的距离、预瞄点的个数和小车行驶速度. 当速度一定时, 主要取决于预瞄点的距离与个数. 预瞄点的距离过近时, 对轨迹预测程度变差, 但如果预瞄点的距离过远时, 对路径的跟踪精度降低, 稳定性变差. 对预瞄点的个数而言, 若其数量过多, 在跟踪平路和弯度不大的路径过程中会引入过多干扰信息, 从而影响车体稳定性; 反之, 达不到预瞄跟随效果.

系统控制策略采用基于横向偏差作为控制量的三点预瞄方式, 以小车中心为原点建立坐标系, 选取三个预瞄点的过程如图 3 所示. 能够有效描述车体行驶状态的变量主要有以下三个, 即横向偏差、切线角度偏差以及方位角度偏差. 图 3 中, 选取的三个预瞄点的横向角度偏差分别为  $E3$ 、 $E2$ 、 $E1$ . 对  $P3$  点来说, 其切线角度偏差即为预瞄点处路径的切线与小车车体中

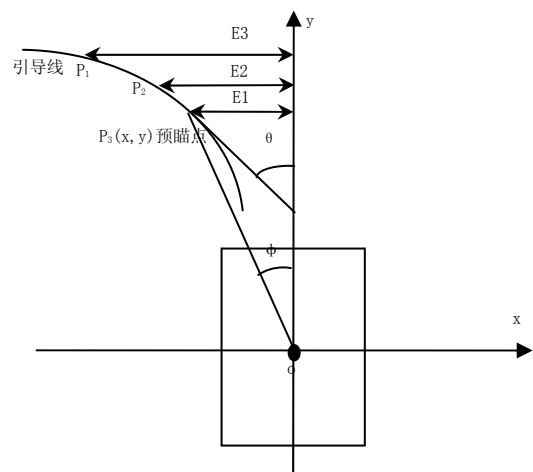


图 3 预瞄点选取图

轴线之间的夹角,即为角  $\theta$ . 而方位角度偏差即预瞄点与小车中心连线与小车中轴线之间的夹角,即为角  $\phi$ . 对三个变量而言,横向偏差与方位角度偏差均为独立的控制量,而切线角度偏差则需辅助以上两种参数进行控制. 考虑到横向偏差获取和计算较为容易,从而系统选用横向偏差作为控制量.

最终参与控制的偏差量计算取三个预瞄点偏差的加权平均均值,即最终偏差  $E = k_1 E_1 + k_2 E_2 + k_3 E_3$ , 其中  $k_1, k_2, k_3$  的取值根据偏差点距离小车当前位置的距离选择. 对小车控制量的计算需将计算所得到的加权平均值映射到小车坐标系中,若映射得到的坐标为正数,说明其横向偏差为正数,从而小车应向右转向,若映射得到的坐标为负数,则说明横向偏差为负数,从而小车应向左转向.

### 3.3 模糊 PID 控制器设计

通过三点预瞄策略得到控制量后,还需要设计模糊 PID 控制器,对小车进行闭环控制. 对视觉伺服系统而言,其 PID 控制器的表达式如公式(2)所示:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

公式(2)中,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,而  $K_d$  为微分系数,  $e(k)$  即为横向偏差值. 从而根据三个预瞄点所得到的横向偏差值,通过调节 PID 控制的比例、微分和积分三个参数达到最佳的控制效果.

单纯采用 PID 控制难以达到较光滑的控制效果. 系统结合模糊控制理论对经典 PID 控制器进行改进,设计了一种模糊 PID 控制器. 模糊控制是仿人类特点驾驶的轨迹的横向偏差  $e(k)$  和道路曲率  $\psi(k)$  是通过人眼获得模糊量. 作为机器视觉而言,其获得的轨迹信息具有一定模糊性并且混杂有噪声,而模糊控制能够容纳不确定输入信息进而产生光滑输出量.

模糊控制器的设计需进行输入模糊接口、模糊规则库、推理算法库和去模糊化接口四个部分. 控制器设计为双输入双输出接口,输入为横向偏差  $e(k)$  以及道路曲率  $\psi(k)$ ,而输出则是小车行驶速度  $v$  以及预瞄点距离  $n$ .

对模糊控制器中精确量模糊化以及建立模糊规则的过程,参考文献[5],最终通过去模糊化过程输出所需控制信息. 结合多点预瞄跟随策略,设计多点预瞄模糊 PID 控制器如图 4 所示.

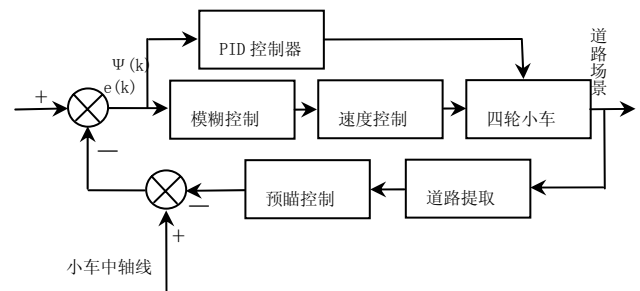


图 4 多点预瞄模糊 PID 控制器结构图

## 4 硬件设计

### 4.1 基于 S3C6440 的图像算法移植

系统对视频的采集通过移植 V4L2 视频采集开源代码,采集的视频通过 S3C6440 的 USB 接口与摄像头连接. 开发板实现完成了 Linux2.6 版本操作系统的移植,采用 QT 设计机器人操作界面. 由于开发板上携带的 ARM11 架构处理器运算速度有限,需要对算法实现进行一定程度的优化,从而提高处理效率. 优化步骤有以下几点:

- 1) 图像处理中所需数学函数采用查找表形式实现; 对处理中产生的临时图像进行存储,避免重复运算.
- 2) 对反复进行运算的数据采用静态数组形式存储,大量数据进行拷贝时,采用 DMA 模式进行内存块拷贝.
- 3) 对图像算法进行优化,采用左右移位操作替换复杂的乘除法操作.
- 4) 使用内存映射方式减少内核与用户之间数据交换,初始化时将常用数据调入内存中.

采用重采样技术能进一步减少图像信息容量而加快处理速度. 所谓重采样,即对实际采集到的图像在横轴上每隔一点采集一次,而在纵轴上每隔一行采集一次,其本质是一种隔行隔列采集方式,由于采集到的图像中,道路具有一定宽度,不会损失道路信息.

基于以上优化原则对系统进行优化后,小车处理速度能达到 18FPS@640x480 pixel,能够满足处理要求.

### 4.2 CPLD 控制器设计

对小车的控制采用脉宽调制 PWM 控制方式,其具体控制方式可见文献[6]. 这种控制方式是利用晶体管的开关特性调制固定电压的直流电源,即按照固定频率通断,并根据需要改变伺服电机电压占空比来改变平均电压大小控制电动机速度.

小车采用 ALTERA 公司的 MAX II 系列 CPLD 器件来产生 PWM 信号. 由于 CPLD 为可编程逻辑器件, 其与专用数字芯片的重要区别为其 I/O 功能可以在软件上通过编程定制, 使得对小车电机的控制变得十分简洁.

CPLD 要完成接受 ARM 开发板上 RS232 串口所发出的指令. 对串口通信而言, 其以一定波特率进行按字节的逐位传输数据, 一个位携带的信息量是有限的. 对于小车控制来说, 其控制指令需包含足够的信息, 保证控制的精度. 因此, 设计了一个四字节指令, 前两个字节为区分字节, 后两个字节为信息字节. 指令格式如表 1 所示:

表 1 控制指令结构

区分字节		信息字节	
0xff	0xaa	对象 ID	控制量

控制指令第三个字节为控制对象的标识符, 其一共可扩展为 256 路控制对象, 而第四个字节为控制量, 可以实现 256 级调速控制.

得到控制信息的同时, 设计基于 CPLD 的 PWM 信号发生器, 即从 S3C6440 发出的控制信号暂存在数据锁存器中, CPLD 中的 8 位计数器产生周期的锯齿波, 同时通过比较器将输入的控制信号中脉宽数据与产生的锯齿波相比较, 得到两路 PWM 信号输出. 其中一路用以控制小车前进速度, 另一路用于控制小车转向. 完成一次指令的解析后将计数器清零, 等待下一次指令的到来.

#### 4.3 电源模块的设计

对于驱动电路来说, 主要是根据 PWM 信号通过功率放大器驱动伺服电机工作. 驱动模块的设计应用专用驱动芯片完成. 专用驱动芯片具有较成熟的设计, 将功率单元、传感单元、逻辑单元、调节控制单元和电路保护单元进行高度集成, 从而与 CPLD 控制模块一起构成高可靠、结构紧凑、设计简单的模块.

小车设计选择 L298 作为驱动芯片, 其设计为 H 桥功率集成电路. 选择 L298 的原因是由于其结构紧凑、具有过热保护和过载保护, 且其转换效率较高. 作为小车主供电部分为车载蓄电池, 由于其耗电部分主要有以下几块: 嵌入式开发板、摄像头、CPLD 芯片以及两个伺服电机. 伺服电机的输入电压为 9V, 而 CPLD 与摄像头的输入电压为 5V, 嵌入式开发板 S3C6440 的核心处理芯片所需电压为 1.8V, 而其 I/O 接口的电压

为 3.3V. 在这些模块中, 伺服电机的耗电量是最大的, 从而在设计中单独配备 9V 的直流电源供电. 对其他部分, 采用 12V 的可充电蓄电池对嵌入式开发板、CPLD 器件以及其他电路部分供电, 摄像头由嵌入式开发板上的 USB 接口进行供电. 电压转换电路如图 5 所示.

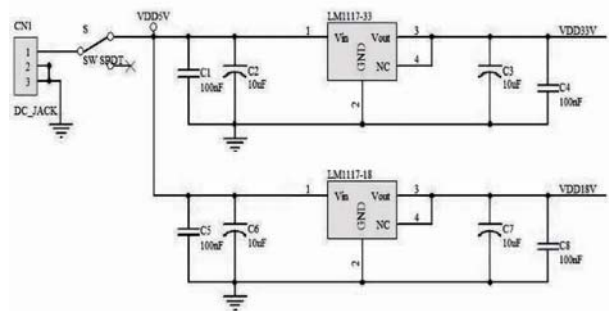


图 5 电压转换电路图

## 4 实验与分析

完成控制器的设计及小车硬件设计后, 基于多种不同场景对小车进行测试. 实际实验过程中, 保证环境光照充足, 由于实验地面为白色瓷砖, 从而采用黑色条状引导线模拟小车寻迹道路. 小车通过摄像头拍摄实时道路情况, 提取道路并通过控制器调整小车速度和转向角度, 使得小车能够沿着黑色引导线完成行驶.

由于篇幅原因, 不详细展示小车直线路径跟踪、圆形路径跟踪与环形路径跟踪, 重点考察小车在环形路径并且路径为虚线的情况下以及小车丢失路径情况下自动寻找路径的性能. 图 6 为小车在环形路径且路径为虚线情况下的寻迹实验.



图 6(a) 视频第 10 帧

(b) 视频第 20 帧



图 7(a) 视频第 1 帧

(b) 视频第 30 帧

由图 6 中实验可得, 在路径不断扩大的情况下, 小车仍旧能够顺利跟踪路径, LCD 显示屏上实时提取的路径可以得到, 模糊控制器能够拟合不完整的路径, 使得小车沿着最佳路径行驶.

小车在行驶中丢失路径的情况下, 实验如图 7 所示. 可以看出, 小车丢失路径情况下能够较好的重新寻找路径, 达到较好的控制效果. 表 2 为控制器针对 ARM 优化前后小车性能比较结果.

表 2 优化前后运行速度比较

算法比较	优化前	优化后
直道行驶	0.5m/s	1.6m/s
弯道行驶	0.3m/s	0.9m/s
自动寻路	22s	12s

通过表 2 可以明显看出, 经过优化后, 小车直道行驶和弯道行驶的速度大大增加, 在丢失路径的情况下初次寻得路径的时间大大缩短, 实时性和鲁棒性明显提高.

表 3 为采用最大偏离度、最小偏离度、平均偏离度对多点预瞄模糊 PID 控制效果与单纯的多点预瞄 PID 控制对比结果. 对比可得, 应用本文所设计的控制器控制效果远远好于采用单纯多点预瞄控制器.

表 3 控制效果评价指标比较

评价指标	$\bar{d}_p$	$d_{p\max}$	$d_{p\min}$
本文控制器	4.025	6.496	3.018
单纯多点预瞄控制器	5.686	8.245	4.358

## 5 结语

本设计在硬件上使用 S3C6440 作为嵌入式开发板, 采用视觉导航方式, 实现了一款能够自动寻迹的智能导航轮式机器人. 设计在传统预瞄控制基础上, 融合模糊控制器与 PID 控制器, 使机器人在路径缺失与路径丢失的情况下仍然能够自动寻找与拟合完整路径, 具有更强的适应性与鲁棒性. 软件上, 针对嵌入式处理器的性能, 对图像处理算法进行了优化, 使得系统完全能够满足实时处理要求.

## 参考文献

- 1 朱少平, 钱富才. 超混沌系统同步非线性反馈控制. 计算机工程与应用, 2011, 47(1): 50-52, 55.
- 2 董文杰, 霍伟. 链式系统轨迹跟踪控制. 自动化学报, 2000, 26(3): 310-316
- 3 Zhang K, Wu YX, Lu XQ. In Dynamic modeling and simulation for nonholonomic welding mobile robot. Journal of Cent South Univ Technol, 2007: 05-0679-06.
- 4 Pourboghrat F, Karlsson MP. Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints. Computers and Electrical Engineering, 2002, 28: 241-253.
- 5 Yu DY, Xue H. Application of fuzzy control method to AGV. Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. 2003. 768-772.
- 6 毛佳, 苑森淼. 嵌入式直流 PWM 伺服控制系统的设计研究. 计算机测量与控制, 2003, 6(11): 420-422.

(上接第 96 页)

- 27(10): 1615-1630.
- 4 Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. SURF: Speeded Up Robust Features. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- 5 Ling H, Okada K. Diffusion Distance for Histogram Comparison. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2006. 246-253.

- 6 Lu JY, Dorsey JL, Rushmeier H. Dominant Texture and Diffusion Distance Manifolds. EUROGRAPHICS, 2009, 28(2): 667-676.
- 7 Fawcett T. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 2006, 27: 861-874.
- 8 Ling HB. Image DataSet. <http://www.dabi.temple.edu/~hbling/data/RD-cvpr06.zip>, <http://www.dabi.temple.edu/~hbling/data/SD-cvpr06.zip>.