



摄像头寻迹平衡车



所在院系：电气与控制工程学院

作 者：刘学成 向莹光 祝文君

2015 年 6 月 13 日

摄像头寻迹平衡车设计与制作

摘 要

两轮自平衡小车是移动机器人的一个重要分支,具有体积小、运动灵活、可零半径转弯等诸多优点。并且相对于传统的四轮车,两轮车在直立行走、导航和定位方面对硬件设计、控制软件开发以及系统调试等提出了更高的要求。本文介绍了一种基于视觉导航的两轮自平衡小车系统,该系统采用 32 位微处理器 STM32f103 作为核心控制单元,配合图像传感器、姿态传感器、稳压模块、升压模块、AB 相编码器、电机驱动模块实现构成系统硬件部分。系统分车体平衡控制和摄像头寻迹两部分。通过摄像头获得道路图像信息,进行图像预处理提取出赛道中心线,获得车体的方向偏差控制量。通过对方向控制量和转向角速度进行 PD 控制来调节左右两轮的差速实现小车的转向和自主寻迹。

关键词: 自平衡; STM32; 卡尔曼滤波; PID 调节; 摄像头; 动态阈值二值化

Abstract

Two-wheeled vehicle is an important branch of mobile robots, with small size, flexible motion, zero RADIUS turning and many other advantages. And compared to traditional four-wheeled vehicles, two-wheeled vehicle upright, navigation and orientation in the hardware design, software development, and system debugging, put forward higher requirements. This paper introduces a two-wheeled vehicle based on vision navigation system, the system uses the STM32 STM32f103 microprocessor as the central control unit, combined with image sensors, position sensors, voltage regulator modules, boost module, AB photo encoder motor driver module forming part of the system hardware. System the body balance control and camera tracking in two parts. Get image information by camera, image preprocessing to extract the track centerline, gain control deviations in the direction of the body. By controlling the direction of PD control speed and steering angle to adjust the left and right wheel differential implementation of car steering and independent tracing.

Keywords: Self-balancing ;STM32 ; Kalman filtering ; PID adjusting ; Camera ; Dynamic threshold binary

1 引言

近几年来,移动机器人由于其广阔的应用前景,已经成为机器人研究领域的一个重要分支。伴随着移动机器人研究的不断深入,移动机器人的应用领域更加广泛,其所需适应的环境和执行的任务也更复杂。当要求机器人在狭窄的空间,仍然需要实现灵活机动转弯的时候,如何能够保持机器人灵活快捷的执行任务已成为现实应用上所面对的一个问题。两轮自平衡小车的概念就是在这样的需求下提出来的。两轮自平衡小车原理上是源于旋转驱动式倒立摆,它具有两轮共轴、独立驱动的特点,小车的重心位于轮轴上方,通过左右两个电机的运动保持动态平衡。由于两轮移动机器人具有特殊的结构,适应地形变化能力强,运动灵活,因此可以胜任一些复杂环境里的工作。与传统的轮式移动机器人相比,两轮移动机器人主要有如下优点

- 1 转向半径小,移动轨迹更为灵活易变,适宜狭窄空间的运动,可以在原地实现 360° 转弯;
- 2 体积小,在场地面积较小或要求灵活运输的场合十分适用;
- 3 调速效果好:由 CPU 直接控制电机驱使机器人完成启动、加速、匀速、减速等动作,无需刹车、离合等装置,运动流畅;
- 4 特殊的应用场合:可应用于步行街、广场、游乐场和大型会场等汽车无法通行、步行不便的场合,并且还环保轻型车提供了一种新的思路。

而对于机器人自主导航,由于现在机器人的工作越来越复杂,传统的红外光电传感或电磁传感的方式已不再能满足实际应用的需求。而当今,机器人视觉的应用越来越广泛。机器人通过摄像头获取环境数据,进行预降噪滤波等预处理后进行特征匹配,可实现路径规划、主动避障、防盗监测和抓取物体等高难度内容。通过图像传感和相应的图像处理算法,可为机器人增加许多实用的功能。

2 方案设计与论证

2.1 总体方案描述

本文研究并设计了一种基于视觉导航的两轮自平衡小车系统,实现了两轮小车的直立行走、自主寻迹两大功能。系统采用 STM32 系列 32 位微处理器 stm32f103 作为核心控制单元,通过增加各种传感器,设计相应电路并编写相应程序分别完成平衡控制、速度控制、转向控制和实时定位四大任务。系统需要

利用角度传感器获得车体的倾角和角速度，并对测量角度和角速度进行卡尔曼滤波融合。通过编码器获取两轮的速度信息与正反转，并对速度进行闭环控制。通过数字摄像头获得道路实时图像信息，并进行图像预处理，提取出赛道中心线，通过调节左右两轮差速实现转向和自主寻迹。通过串口调试上位机对各种参数进行实时调试。如下图 2-1、图 2-2 所示为系统平衡部分和图像寻迹部分结构框图。

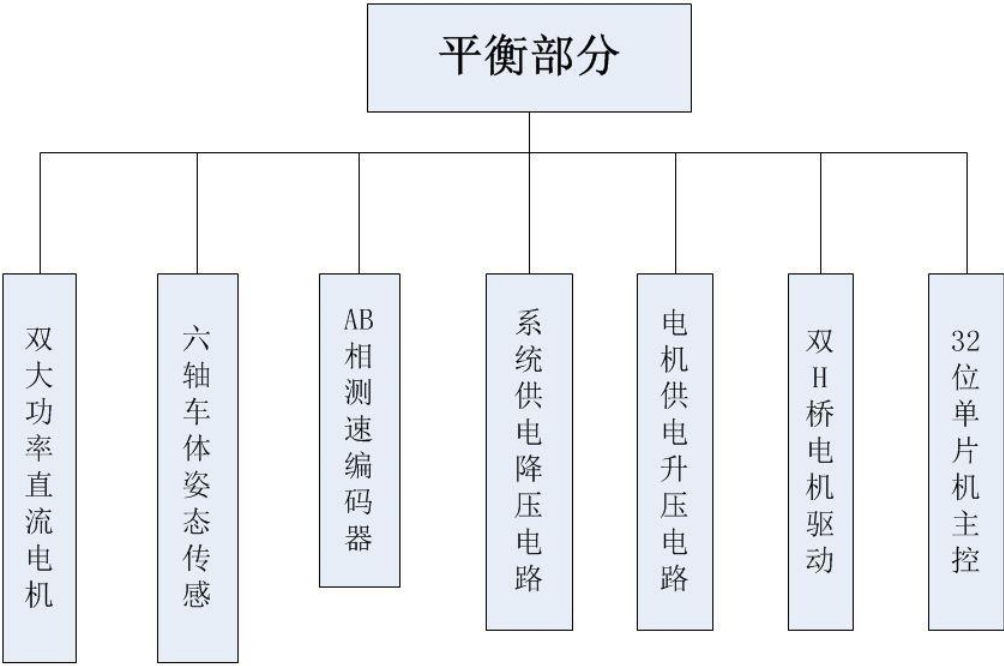


图 2-1 平衡部分系统框图

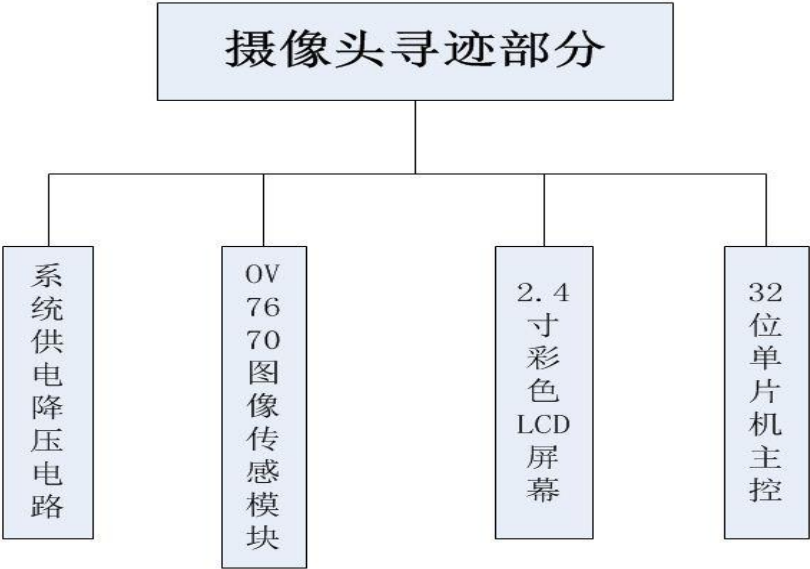


图 2-2 摄像头寻迹部分部分系统框图

2.2 姿态传感器模块的比较与论证

为实现两轮车的动态自平衡和运动控制，首先必须得到足够精确的车身倾角信息。根据机器人的应用环境，一般选择陀螺仪、加速度计、电子罗盘、超声波传感器组和光电接近探测器等传感器来采集两轮自平衡机器人的姿态信息。表 2-2 对这几种测量姿态的传感器的性能进行了比较。

传感器	被测量	优点	缺点
倾角计	对应倾角的模拟电压量	静态、低速运动性能好，精度高，无累积误差	动态响应慢，不适合跟踪高速动态运动，频带宽，更新频率慢
双轴加速度计	对应加速度的模拟电压量	加速度静态、低速运动性能精度高，更新频率快	动态响应慢，高速运动有误差，不适合跟踪高速动态运动
单轴陀螺仪	对应被测角速度的模拟电压量	角速度动态响应性能好，频带宽，更新频率快	测量姿态时存在累积漂移误差，不适于长时间单独工作
MPU6050 六轴运动传感器	对应加速度与角速度的数字量	三轴加速度与角速度传感器集成于同一芯片，通过 16 位 AD 进行模数转换，精度高，性能稳定	基本无缺点

表 2-2 常用测量姿态传感器性能比较

2.3 循迹传感器的选择

目前在移动机器人领域较为先进的导航方式有 GPS 导航，IMU 导航，超声波导航，激光雷达导航，视觉导航，光电导航，电磁导航。由于我们的导航时需要小车在任意给定的赛道上自主沿着赛道中心线稳定行驶，属于有轨迹导航。其中视觉导航、光电导航、电磁导航可以实现在任意轨迹上的自主寻迹导航。表 2.3 三种有轨迹导航方式对比

导航方式	优点	缺点
光电导航	1) 检测信息速度快 2) 软件数据处理简单 3) 占用 MCU 资源少	1) 道路参数检测精度低 2) 检测前瞻距离短 3) 占用 MCU 端口资源较多 4) 容易受外界光线影响

电磁导航	1) 成本低 2) 电路设计相对简单 3) 检测信息速度快 4) 受外界影响小	1) 道路参数检测精度低 2) 检测前瞻距离短
视觉导航	1) 检测前瞻距离远 2) 检测范围宽 3) 检测道路参数多 4) 抗干扰能力强	1) 电路相对设计复杂 2) 检测信息更新速度慢 3) 占用 MCU 资源多 4) 软件处理数据处理复杂

表 2.3 三种有轨迹导航方式对比

目前市面上常见的摄像头主要有 CCD 和 CMOS 两种。CCD 摄像头具有对比度高、动态特性好的优点，但需要工作在 12V 电压下，对于整个系统来说过于耗电且图像稳定性不高。CMOS 摄像头体积小，耗电量小，价格低廉且图像稳定性较高。因此，经过实验论证之后我们决定采用 CMOS 摄像头。对于 CMOS 摄像头分为数字和模拟两种。数字摄像头 OV7670 可以直接输出 8 路数字图像信号，使主板硬件电路的简化成为可能，且能够达到 30 帧/S 的帧速率，最终我们选择了 CMOS 数字图像传感器的方案。本设计选用 Omnivision 公司的 CMOS 图像传感器 OV7620 摄像头采集赛道信息，输出为黑白全电视信号 PAL 制式模拟信号，每秒 30 帧，电视扫描线为 625 线，奇场在前，偶场在后。OV7670 摄像头最大分辨率为 640×480 像素，内置 10 位双通道 A/D 转换器，输出 8 位图像数据；具有自动增益和自动白平衡控制，能进行亮度、对比度、饱和度、校正等多种调节功能，其视频时序产生电路可产生行同步、场同步、混合视频同步等多种同步信号和像素时钟等多种时序信号，5V 电源供电，工作时功耗 $<120\text{mW}$ ，待机时功耗 $<10\text{uW}$ 。能够满足本系统道路识别的要求。

2.4 多传感器融合技术

多传感器信息融合通过增加各类传感器信息的互补性，对环境变化的适应性，使移动机器人能够获取完成某一任务所需的完备信息，实现各种复杂、动态、不确定环境下的自主性，提高决策的正确性。具体融合算法如信息加权平均、低通平滑滤波、互补滤波、卡尔曼滤波、概率方法、模糊逻辑、信任度量、可能性度量、证据理论、神经网络、灰色系统理论等等根据各自的特点和适当的场合采用不同的方法。在测量车体倾角时，需要对加速度计和陀螺仪进行有效滤波得到精确角度和角速度。常用滤波算法有低通滤波，一阶互补滤波，二阶互补滤波，卡尔曼滤波。

低通滤波：对陀螺仪进行零飘低通滤波，取 100 次均值得到车体角速度，结合加速度计的角度值和由陀螺仪积分得到的角度值，对加速度低通滤波，20 次均值得到角度的准确值。

互补滤波：利用加速度计所获得的角度信息与陀螺仪积分后的角度进行比较，比较的误差信号经过比例放大之后与陀螺仪输出的角速度信号叠加之后再积分可以输出准确的角度。

卡尔曼滤波：卡尔曼滤波器是一种基于概率模型进行状态和参数估计的有效方法，由一系列递归数学公式描述。它们提供了一种高效可计算的方法来估计过程的状态，并使估计均方误差最小。卡尔曼滤波器应用广泛且功能强大。它可以估计信号的过去和当前状态，甚至能估计将来的状态。

低通滤波可以使角度输出更加平滑，但会使得信号无法实时反映车模倾角变化，从而减缓对于小车车轮的控制。另一方面也会将小车角速度变化的信息滤掉。互补滤波的平滑效果很好，响应也很灵敏，但是受陀螺仪温漂的影响比较大。卡尔曼滤波的收敛速度和滤波效果平衡得很好，只是运算耗的时间要长，而且卡尔曼滤波对陀螺仪的精度要求不是很高。在综合考虑之后，本设计在倾角的加速度计和陀螺仪的融合算法上采用卡尔曼滤波。

3 系统硬件与软件的实现

3.1 硬件实现

3.3.1 微处理器电路

本作品所用的 stm32f103 最小系统电路如图 3-1 所示

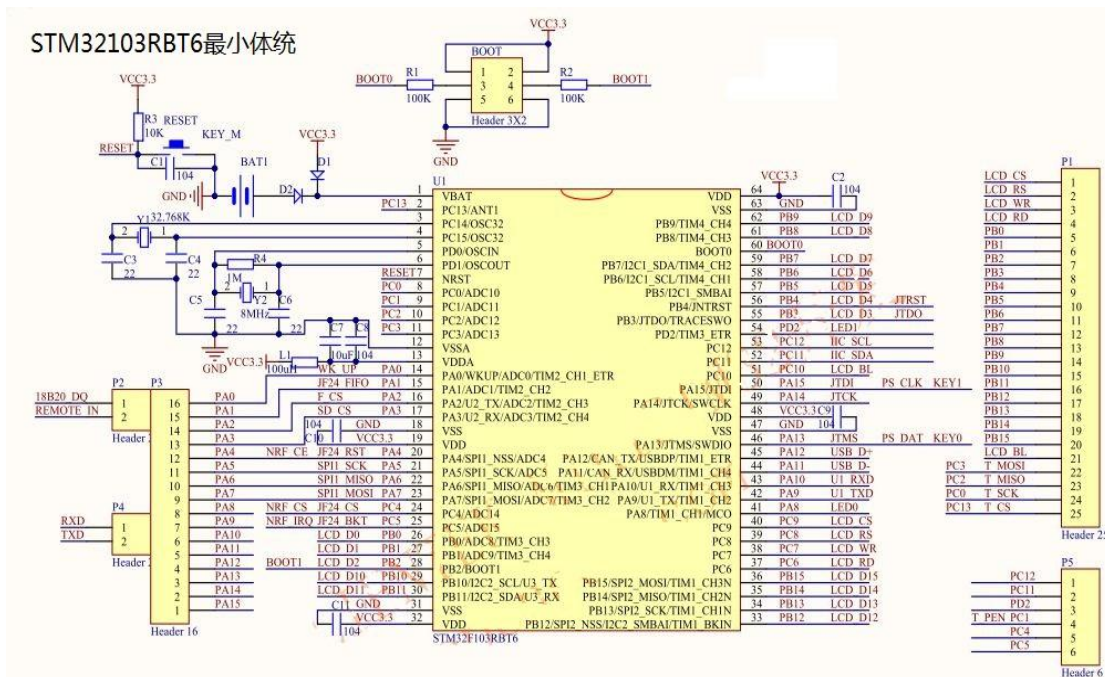


图 3-1 STM32 最小系统原理图

3.3.2 稳压电源模块

为了能使系统能正常工作 就需要对电池电压进行调节。其中单片机系统、车速传感器电路需要 5V 电压，摄像头电压工作为 5V、陀螺仪和加速度计工作电压为 3.3V。直流电机可以使用 12V 3000mAh 蓄电池直接供电。考虑到由于驱动电机引起的电压瞬间下降的现象 因此采用低压降的三端稳压器成为必然。我们采用 AMS1117 3.3 和 LM29596 5.0 作为稳压芯片。经试验电压纹波小，低压降，输出电流大，发热小，完全可以满足系统要求。

LM2596 为开关型降压稳压芯片，该电源芯片最大输出电流为 3A，压差在最大输出电流时也不会超过 500mV。它具有外围电路简单、转换效率高、波形稳定、低压差电压、瞬态响应快的优点，是小功率微处理器理想的配套件。LM2596 5.0 的稳压电路原理图如图 3-3 所示。

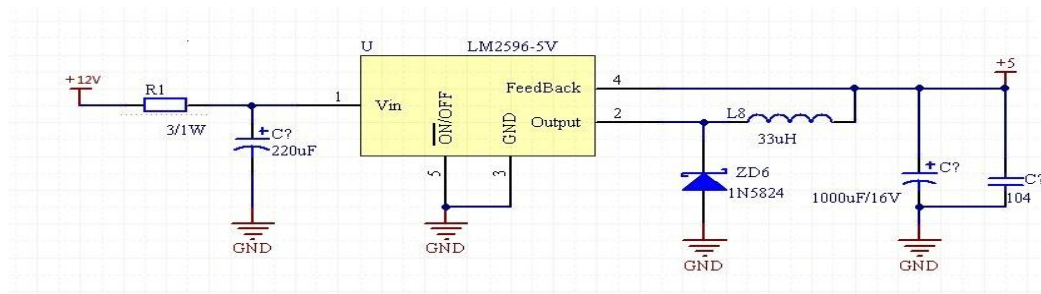


图 3-3 5v 稳压电路原理图

AMS1117-3.3 是一正向低压降三端稳压器，可以直接通过三端稳压输出固定电压 3.3V，精度为 1%，该电源芯片最大输出电流为 1A，低压差，纹波小，并内部集成过流和过热保护功能，满足系统要求。其稳压电路原理图如图 3-4 所示。

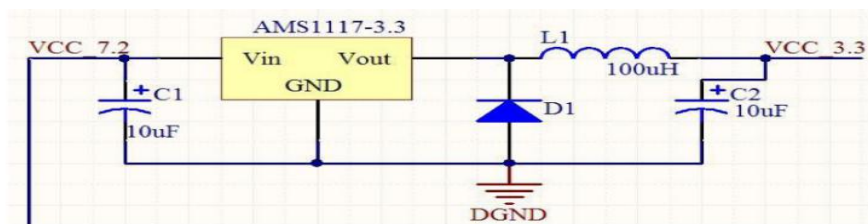


图 3-4 3.3v 稳压电路原理图

3.3.3 直流电机驱动模块

本系统选择了 BTS7970B 集成电机半桥驱动芯片构成电机驱动单元，采用 STM32 单片机的 16 位定时器输出高精度的 PWM 信号来控制直流驱动电机的转速和正反转。这样构成的 H 桥的驱动能力得到了明显的加强。并且在小车需要减速时可以通过自由停车或反向制动来实现。采用此 H 桥全桥驱动时，其响应时间约为 0.05 秒 驱动能力要明显强与由达林顿三极管构成的 H 桥驱动电路或普

通集成晶体管电机驱动模块。而且这种半桥驱动 IC 的驱动能力可以达到 70A，且其散热性能很不错。采用 STM32 集成的 16 位高精度定时器的比较器功能产生高精度的 PWM 波，每路 PWM 波的频率 12KHz，占空比调节级数可达 6000 级，可很好地满足平衡车自平衡系统对电机控制的要求。考虑到电机在稍微较高的工作电压下力量更大且反应迅速，而电池电压会由于放电而使输出电压不稳定，故使用了升压稳压器将 12V 的电池电压升至 24V，供给电机驱动电路再驱动电机，以达到较好控制电机的目的。如下图 3-5 是电机驱动部分硬件电路。

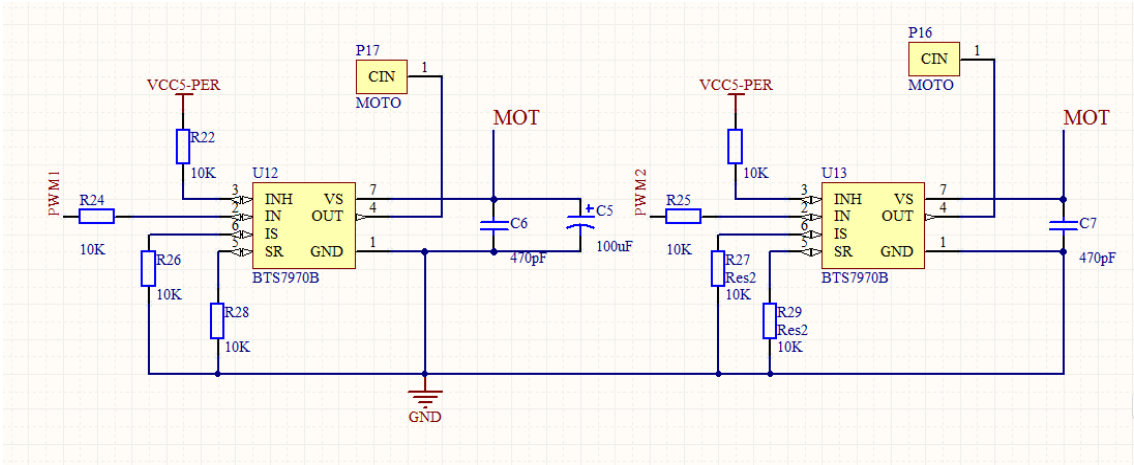
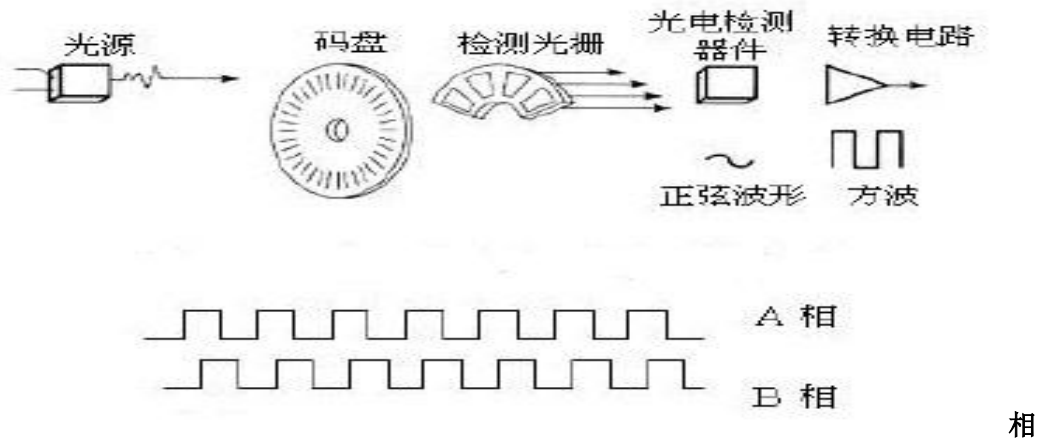


图 3-5 驱动桥电路原理图

3.3.4 双轮测速模块

本系统车速检测单元采用自制的 AB 相光电编码器作为电机转速传感元件。其精度达到车轮每旋转一周，旋转编码器产生 32 个脉冲，不仅硬件电路简单，而且信号采集速度快、精度高，满足控制精度要求。编码器的工作电压为 3.0V-5.5V，输出为 AB 相脉冲。其硬件电路如图 3-6 所示。

图 3-6 AB



编码器测速原理

E6A2-CW6C 型旋转编码器的输出方式为电平输出 且其输出为 4 线制 分别

为电源线、地线和 A 相和 B 相信号线。本系统将一个 AB 相编码器的输出接一个接到 STM32F103C8T6 的 PA0—PA3 口，通过 STM32 的定时器中断、外部中断和 IO 电平检测实现对电机的正反转检测的转速测量。

$$v = \frac{\pi d n}{200T}$$

式中 d 为小车后轮直径， n 为采样时间内旋转编码器产生脉冲数， t 为采样周期。

3.3.5 车体平衡控制部分软件流程及实现

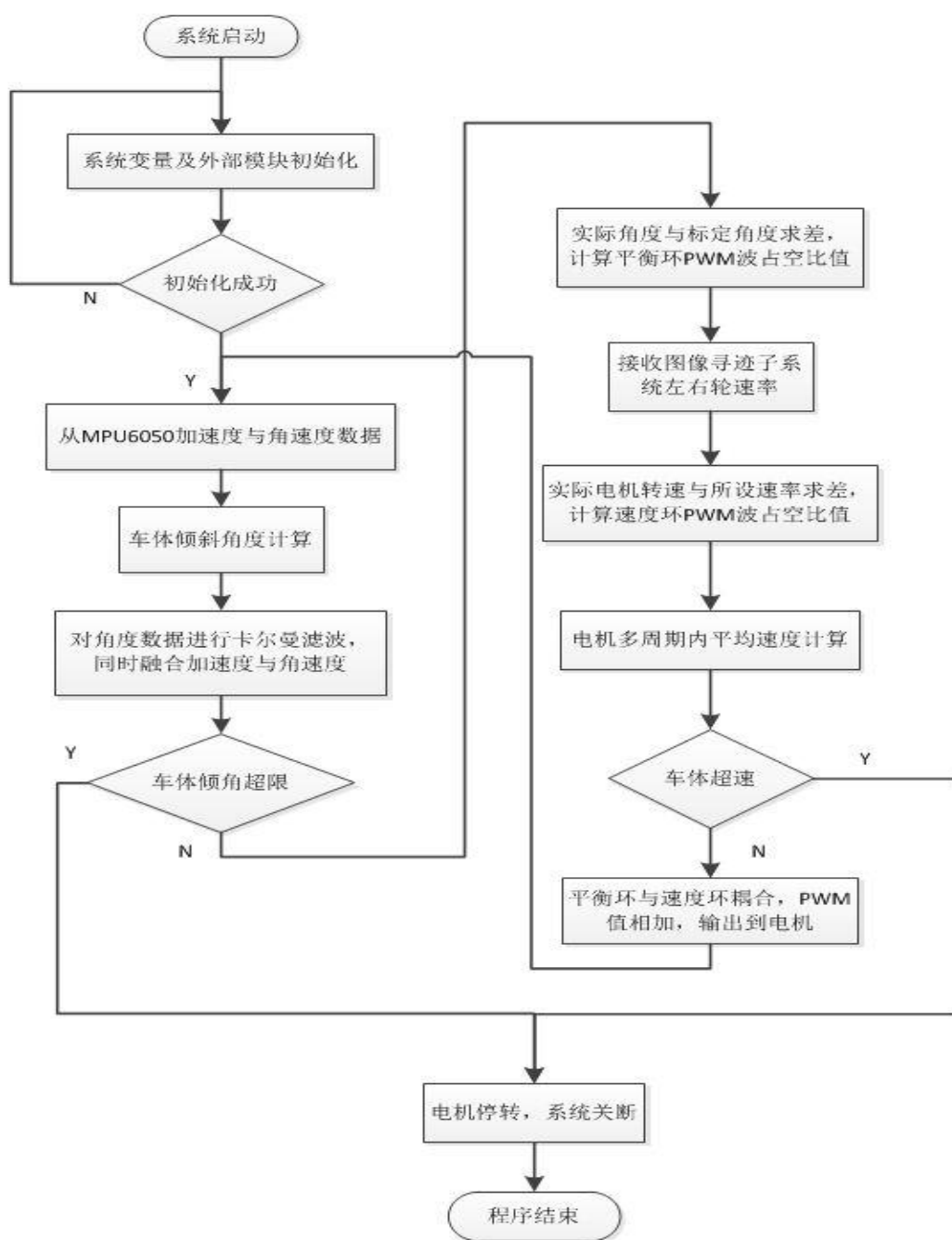


图 3-7 车体平衡控制部分软件流程图

如上图 3-7 所示，平衡部分以 MPU6050 三轴加速度三轴角速度传感器作为姿态传感器，STM32F103C8T6 作为主控，这部分主要分为角度数据采集与滤波、平衡环 PID 和速度环 PID。

从 MPU650 获取当前的 X 轴和 Z 轴重力分量，以这两个量求得加速度倾角值，然后对采回的角速度对采样时间进行积分算或得角速度倾角。由于加速易受瞬时干扰，短期内数据不稳定，而角速度短期内稳定，但长时间会因为其自身参数的飘移而导致数据误差加大。因此需对两个数据进行滤波融合，这里我们选用的是卡尔曼滤波算法。两个角度值经卡尔曼滤波器滤波融合之后，噪声明显减少，可用于控制车体平衡。

获得较准确的车体当前倾角后，若车体倾角超限，程序进入保护模式，电机输出关断。若没有，则执行后续步骤。这部分是平衡环 PID，将所算的角度与标定的平衡角求差，将差值作为 PID 调节的输入量，经过计算，获得平衡环电机 PWM 波输出量。

平衡车不光要平衡，还需要行走及寻迹，此时需要用到电机的实时转速，并将其作为速度环 PID 的反馈输入量。反馈回的是电机左右轮的转速，左右轮转速分别与左右轮转速的预设值作差，将差值输入速度环 PID，运算后分别得出左右轮的速度环 PWM 偏差量，将这两个 PWM 值与之前平衡环算出的 PWM 值相加，获得最终要向电机输出的最终 PWM 控制量。

PID 具体实现

K 参数调节: $PWM_o = K_p \Delta U_i$

D 参数调节: $PWM_{o1} = PWM_o + K_D \frac{d\Delta\theta}{dt}$

I 参数调节: $PWM_{o2} = PWM_{o1} + K_i \int_0^t \Delta\theta_i dt$

具体代码:

角度环

```
Gyro_Now=(ADC_Gyro1-Vzero)*P_G;
```

```
Angle_Cro=Present_Angle+Angle_Blance;
```

```
PWM_Angle_Out=Angle_P*Angle_Cro+Angle_D*Gyro_Now;
```

速度环

```
Speed_get=Speed_Get();
```

```
Reduce_a=(Speed_SZ-Speed_get);
```

```
Reduce_b=(Speed_SZ-Present_Speed);/*TIME_SPEED;
```

```
Speed_PWM+=Reduce_b;
```

```
Speed_Cro=Reduce_a*Speed_P+Speed_PWM*Speed_I;
```

3.3.6 摄像头寻迹部分软件流程及实现

车体的摄像头寻迹部分的传感器采用的是 OV7670 摄像头，该模块价格相对较低，图像采集帧率虽偏低，但也满足系统需求。这部分的主控采用的是 STM32RBT6，32 位 Cortex-M3 内核的单片机，运行速度很快，可以满足快速处理图像数据的要求。

这部分的原理总体上分为图像动态阈值二值化和根据取线计算斜率并进行 PID 调节输出转向值两部分。OV7670 是 CMOS 彩色摄像头，但对于寻迹来说，只需要灰度数据即可，否则会导致数据量过大，系统运行过慢。OV7670 输出帧原本为 240*320，这同样会导致数据量过大的问题，我们将其输出设置为 60*80 的帧，虽说图像尺寸只有之前的 1/4，但这样明显加快了图像采集的速度。且足够用于寻迹。图像采集完后还只是灰度数据，此时对于赛道的图像，求取图像灰度分布的灰度直方图，图 3-8 为在 VS2010 上进行算法模拟的效果。从图 3-8 中可以看出，图像有两个峰值，较高的一个代表白色区域，较小的一个代表黑线区域。以两个峰值的中间灰度值作为阈值，并以该值对灰度图像进行二值化，以这种方式进行二值化，能在很大程度上适应环境光的大范围变化，二值化的效果较好。法二值化之后，求取最近一行和中间几行的赛道中点，分别求取这几条曲线的斜率，并求平均，以获得较准确的前方赛道的斜率。将此值作为车体转向的 PI 调节参数，通过 UART 口发送到平衡调节主控。以此实现摄像头寻迹平衡车的寻迹功能。

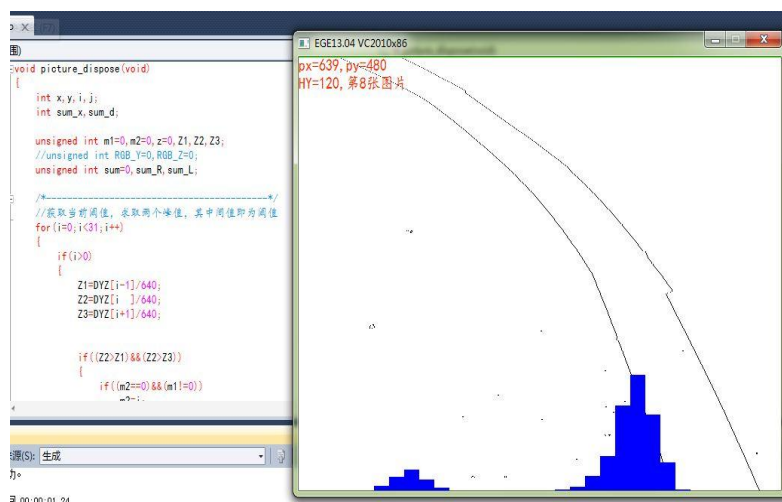


图 3-8 动态阈值二值化效果图

4 系统测试

4.1 主要测试用的仪器

4.1 测试环境及仪器

在室温条件下，测试所用仪器如下所示。

编号	型号	数量
1	数字示波器 UTD2062	1 台
2	学生电源 MPD-3303	1 台
3	万用表	1 台

4.2 测试过程

对该系统主要是对 PID 参数的调整。该系统分为三环 PID，分别为平衡环 PD 控制、速度环 PI 控制、转向环 PI 控制。对于平衡环 PD 控制器，将 P 调到 2.3 时，车体无法平稳，而将 P 调到 9.8 时则车体抖动过大，最终选取了一个让车平稳而不抖动的值 6.8。D 参数对整体的起到阻尼力的作用，在 P 过大时，增大 D 可使车体抖动减小，车体稳定性增强。速度环 PI 测试中，P 参数同样要取得合适，过大则车子跑飞倒地，过小则无法稳定速度。而转向环则不只是单纯调参，其参数还与摄像头的帧率有关，需精心调试。

4.3 测试结果

经测试，本系统在静止时具有较强的抗干扰能力，当有外界扰动时，能较快的恢复到平衡状态。当系统处于运动状态时，能很好地保持稳定。用其寻迹时，能适应不同环境光强，准确识别黑线，有效寻迹。寻迹过程中能较好避开交叉线干扰，运行过程稳定。

4.4 误差分析

经分析，本系统测量数据存在一定误差，主要是由于电机编码盘精度不高，只有 32 线，导致测得的速度与实际速度存在一定的误差，使小车在匀速前进时与给定速度存在一定差值。摄像头帧率也较低，碍于图像刷新率，同时考虑小车寻迹的稳定性，小车寻迹速度较慢。同时也因此小车寻迹时有轻微抖动。

参考文献

- [1] 黄争著.德州仪器高性能单片机和模拟器件在高校中的应用和选型指南.上海:德州仪器半导体技术(上海)有限公司大学计划部,2010.
- [2] 全国大学生电子设计竞赛组委会.全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编[M].北京理工大学出版社,
- [3] 张新喜,等.Multisim 10 电路仿真及应用[M].机械工业出版社,
- [4] 陈晓鸽,等.Altium Designer 电路设计标准教程[M].科学出版社,
- [5] 康华光.电子技术基础.(模拟部分) [M]. (5 版).高等教育出版社,2005.
- [6] 童诗白,等. 模拟电子技术基础.第 3 版[M].高等教育出版社,2001.
- [7] 沈建华等.MSP430 超低功耗单片机原理与应用(第二版)[M].清华大学出版社, 2004
- [8] 孙传友等.测控系统原理与设计(第二版)[M].北京航空航天大学出版社, 2011
- [9] 洪利等.MSP430 单片机原理与应用实例详解[M].北京航空航天大学出版社, 2010
- [10] 阎石.数字电子技术基础(5 版)[M].高等教育出版社,2006
- [11] Fahim, Amr M.时钟发生器在片上系统处理器中的应用[M].北京科学出版社, 2007
- [12]童诗白等.模拟电子技术基础.第 3 版[M].高等教育出版社,2001
- [13]黄智伟.全国大学生电子设计竞赛系统设计(第二版)[M].北京航空航天大学出版社,2011

附 录

作品实物图

