

2024 年全国大学生电子设计竞赛

自动行驶小车（H 题）



2024 年 8 月 1 日

修订于 2024 年 11 月 11 日

摘 要

本作品以 MSPM0 系列的 MSPM0G3507 单片机为主控制器，采用阿克曼转向结构，结合直流电机、1024 线正交编码器、IMU660RA 六轴 IMU 惯性传感器、灰度传感器、无线串口等外设，设计了一辆自动行驶小车。在有黑线引导的部分采用灰度传感器与惯性导航相结合的循迹方案，在无黑线引导的部分，采用惯性导航的方法完成循迹。我们使用互补四元数法根据 IMU 原始数据(三轴加速度、三轴角速度)进行姿态解算，得到相对稳定的欧拉角，搭配位置式 PD 控制器(方向环)和增量式 PI 控制器(速度环)，完成了惯性导航任务。本作品经过测试，完成了直线、斜线等航向角固定的惯性导航任务和黑线的循迹任务。

关键词：惯性导航；MSPM0；Myhony 姿态解算；PID 控制；

目录

一 系统方案设计	1
1.1 系统方案描述	1
1.2 论证与选择	1
1.2.1 主控制器件的论证与选择	1
1.2.2 IMU 惯性传感器的论证与选择	2
1.2.3 黑线循迹方案论证与选择	2
二、系统理论分析与计算	3
2.1 IMU 的去漂移处理	3
2.2 增量式 PI 控制器（速度环）	3
2.3 位置式 PD 控制器（方向环）	3
2.4 姿态解算的方法（互补四元数）	4
2.5 车辆轨迹控制（惯导参数的计算）	4
三、电路与程序设计	5
3.1 电路设计	5
3.1.1 稳压电路设计	5
3.1.2 驱动电路设计	5
3.2 程序设计	6
3.2.1 主程序设计思路	6
3.2.2 流程图	7
四、测试方案与结果分析	7
4.1 测试方案	7
4.2 测试结果	7
4.3 误差分析	8
参考文献	9
附录	10

自动行驶小车（H 题）

【本科组】

一 系统方案设计

1.1 系统方案描述

本系统主要由陀螺仪模块、稳压模块、驱动模块、单片机模块、电机与舵机模块、灰度传感器模块、屏幕显示模块组成，下面分别论证其中最主要的几个模块的选择。

系统结构图如图 1 所示。（图中粗线为大电流流向，细线为信号流向）

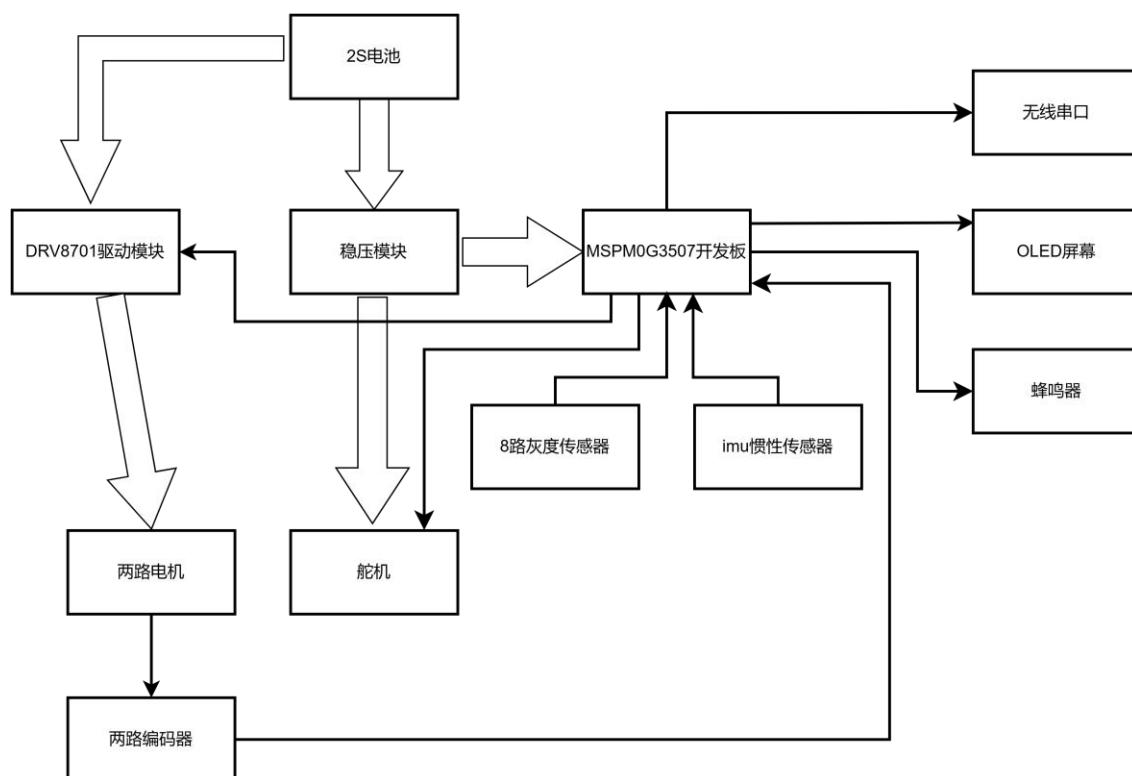


图 1 自动行驶小车组成框图

1.2 论证与选择

1.2.1 主控制器件的论证与选择

方案一：采用 MSPM0G3507 作为主控。MSPM0G3507 是一款主频为 80MHz 的高计算性能 MCU，具有 128KB Flash，32KB SRAM，60 个 GPIO，在通信方面具有 4 个 UART，2 个 I2C，2 个 SPI，1 个 CAN。丰富的外接 GPIO 与通信资源使 MSPM0G3507 能够较好地满足本题目的要求。

方案二：采用 MSPM0L1306 作为主控。MSPM0L1306 是一款功耗与性能平衡的 MCU，主频为 32MHz，拥有 64KB Flash，4KB SRAM，28 个 GPIO，在通信方面具有 2 个 UART，2 个 I2C，1 个 SPI，IO 接口与通信资源较少。

综合以上两种方案，选择方案一，使用 MSPM0G3507 作为主控。

1.2.2 IMU 惯性传感器的论证与选择

方案一：六轴姿态传感器测量的数据包括三轴加速度、三轴角速度数据。六轴传感器的数据处理和融合算法相对简单，易于实现和调试，而且无需磁力计的校准。其解算出来的俯仰角和横滚角在加速度计和陀螺仪的融合下已经比较精确，至于导航用的航向角，在同一个平面内，时间不是太长的情况下，解算出来的航向角也是可以满足题目的惯导要求的。但是要是在室外导航的话，需要结合 EKF 等算法，融合 GNSS 信息，才可以得到精准的航向角。

方案二：九轴姿态传感器测量的数据包括三轴加速度、三轴角速度、三轴磁力计数据。相比于六轴传感器，九轴传感器增加了磁力计，可以得到更为精确的航向角。但是需要对北和磁力计矫正操作，融合方法也更为复杂。而且九轴传感器收到周围磁场的影响比较大，比如电机等器件，会干扰磁力计，从而影响姿态结算精度。

综合以上两种方案，选择六轴传感器。

1.2.3 黑线循迹方案论证与选择

方案一：采用灰度传感器与惯性导航进行循迹。在黑线区域使用 8 路灰度传感器进行巡线，在无黑线的区域使用纯惯性导航（主要依靠编码器和 IMU）完成任务。虽然最高可以达到的速度可能不如单线阵 CCD 速度那么高，但是却可以发挥芯片的最好性能。

方案二：采用 TSL1401 线性 CCD，TSL1401 线性 CCD 具有 128×1 个传感器单元组织，传感器间距为 400DPI，具有高线性度和均匀性。该方案具有处理速度较快的特点。缺点是无法较好处理本赛题黑线具有大段断路的情况。但是线阵处理和 ADC 采集需要占用大量的 CPU 资源，无法保证最好的性能。

综合以上两种方案，选择方案一。

二、系统理论分析与计算

2.1 IMU 的去漂移处理

六轴 IMU 由加速度计和陀螺仪构成，尤其是陀螺仪，会存在一个比较大的常值零偏，和温度漂移，产生角度随机游走（如图 2），所以要对这两种传感器进行标定处理，由于这里我们使用的是 MEMS 惯导，精度不是太高，所以我们只进行系统级标定即可。让其静止一会，统计零飘，读取数据时减去即可。这样可以大大减少 IMU 的漂移。去零飘后，曲线如图 3（角速度单位换算后 $^{\circ}/s$ ）。

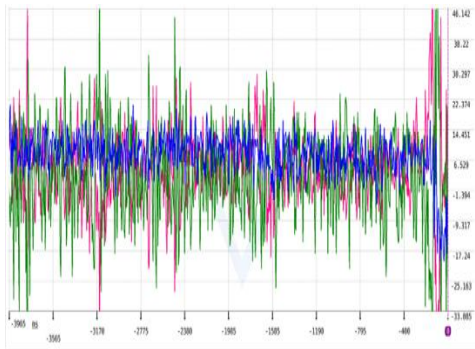


图 2 陀螺仪零飘处理、单位换算前

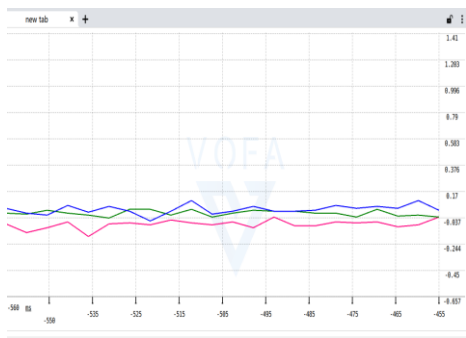


图 3 陀螺仪零飘处理、单位换算后

2.2 增量式 PI 控制器（速度环）

我们使用的 180 电机作为车辆的动力部分，使用 1024 线正交编码器通过单片机的外部中断测量速度，为了达到速度的快速响应，这里使用增量式 PI 控制器，经过大量的参数调节，最终达到了一个软硬适合的速度闭环控制。

2.3 位置式 PD 控制器（方向环）

对于三轮的话，由于已经得到了比较精确的角速度和角度值，所以为了获得更加丝滑的控制结果。我们使用的是串级 PID 的控制方案，将角度环作为外环，将角速度环作为内环，外环的输出作为内环的输入。可以显著提高系统的响应速度、控制精度和抗干扰能力，同时减少超调和振荡现象，其控制框图如下。但是四轮的话，简单 PD 控制就够了。

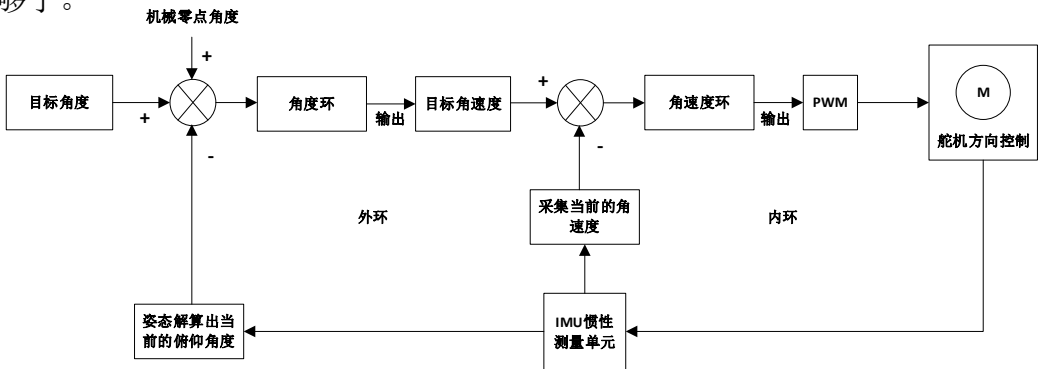


图 4 方向环串级 PID 控制框图(三轮小车可以使用，四轮小车没必要)

2.4 姿态解算的方法（互补四元数）

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ \text{asin}(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \\ \text{atan2}(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{bmatrix}$$

公式 1 欧拉角与四元数的对应关系

融合计算六轴数据的方法有多种，比如互补滤波、卡尔曼滤波等，这里我们首先计算融合四元数，进行互补滤波操作，然后将四元数结果转换成欧拉角，得到结算结果。这样不仅巧妙的避免了欧拉角的万向死锁问题，而且得到比较稳定的结果。基本结算流程和解算效果如图 5 和图 6。（注意在计算四元数的时候，要注意单片机栈的大小，和替换掉一些数学函数，否则会产生一些意外的结果）

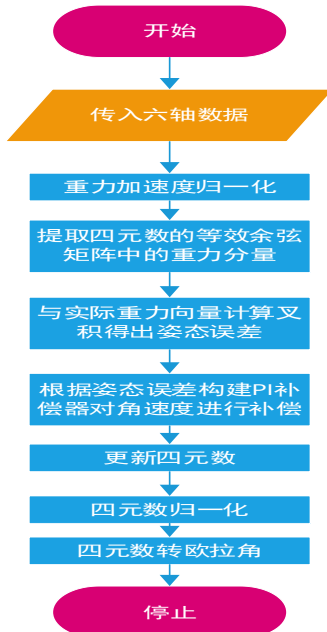


图 5 四元数计算流程图

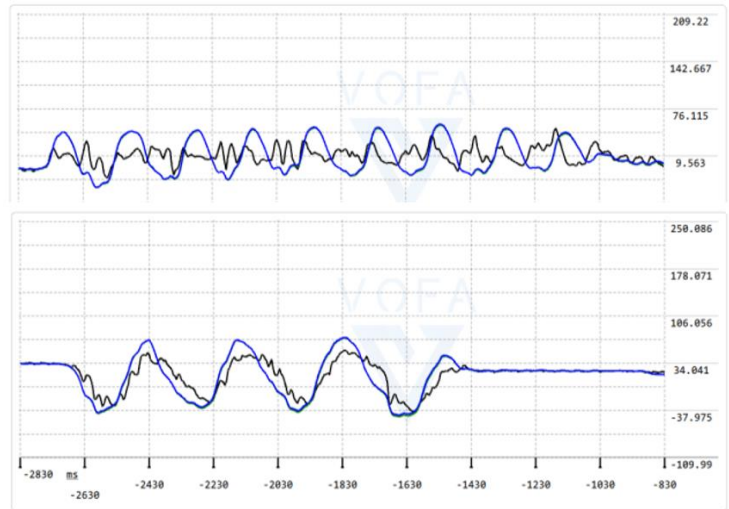


图 6 滤波结算前后的结果（以俯仰角和横滚角为例）

2.5 车辆轨迹控制（惯导参数的计算）

在黑线存在的区域，我们采用 8 路灰度传感器循迹。在黑线不存在的区域，我们使用惯性导航进行循迹。我们的惯性导航循迹思路如下，航向角直接解算，解算出来的是 -180° 到 180° 的航向角，但是在导航中，广泛使用的是 $0-360^\circ$ 的航向角，所以本次设计，我们采用 $0-360$ 航向角。这样可以避免跳变问题。由于题目比较简单，所以不需要进行航位置推算，只进行角度控制即可。直接将载体坐标系的目标航向角给到方向 PID 控制器的目标角即可。最后结合编码器的积分里程和灰度传感器的数值，结

束惯导状态。进入黑线循迹状态。

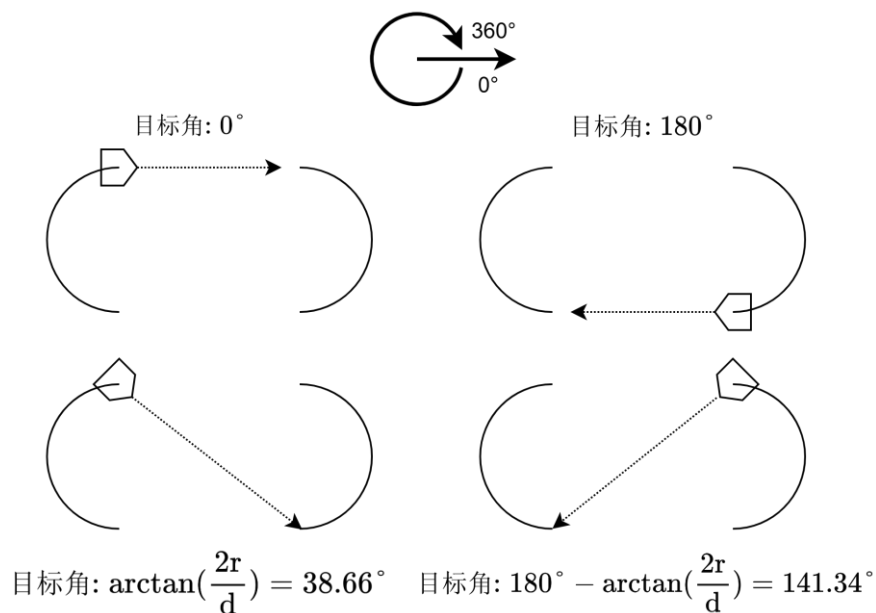


图 7 惯导循迹思路展示

三、电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 稳压电路设计

舵机稳压电路模块使用 TI 公司的 DC-DC 芯片 TPS5450，持续输出电流高达 5A，峰值输出电流达 6A。具有极好的负载和线性调节性能。宽电压、高效率和大电流可以接入舵机供电，有很高的适用性。

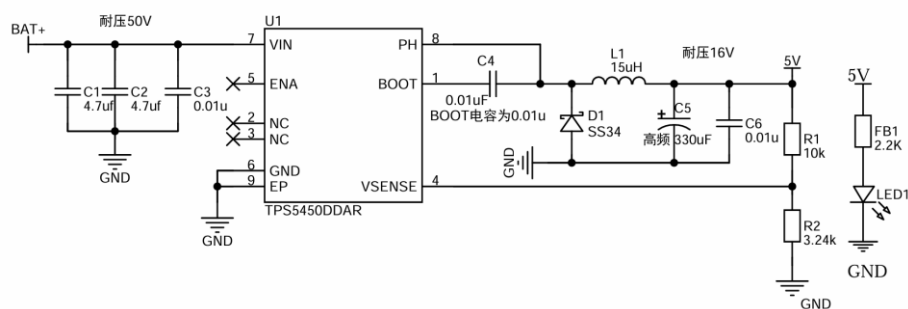


图 8 舵机稳压电路设计

3.1.2 驱动电路设计

采用 DRV8071E 芯片进行电机的驱动。DRV8071 是一款双路 H 桥直流电机驱动

器，具有多种保护功能，包括过流保护、欠压保护、过温保护等，可以有效保护电机和电路不受损坏。同时，它能够通过控制使能引脚来实现电机的开关控制。

在选择 MOSFET 时，主要考虑其耐受电压、内阻以及封装。由于我们选择 2S 锂电池作为供电电源，在考虑电机的再发电情况，所以我们将耐压限定在 16V 以上。权衡功率和大小之后，我们选择了 TPH1R403NL，其 V_{dss} 为 30V， V_{gss} 为 20V， I_d 为 60A，符合要求。

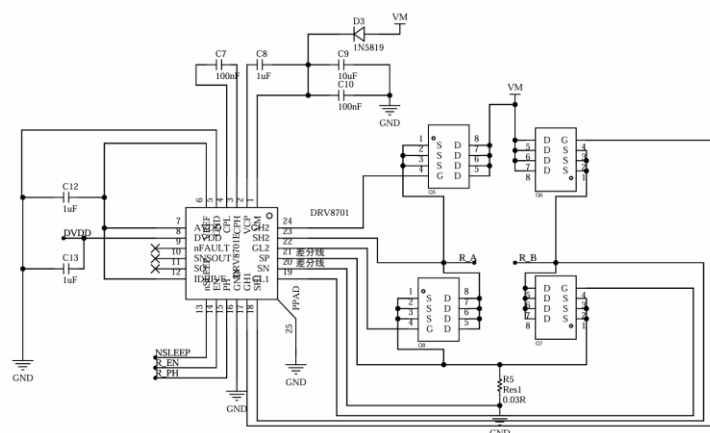


图 9 电机驱动电路设计

为了防止驱动部分电流电压对 PWM 信号产生影响，使用了缓冲芯片 SN74HC125PWR，使得微控制器传来的信号更为稳定。缓冲电路如图所示：

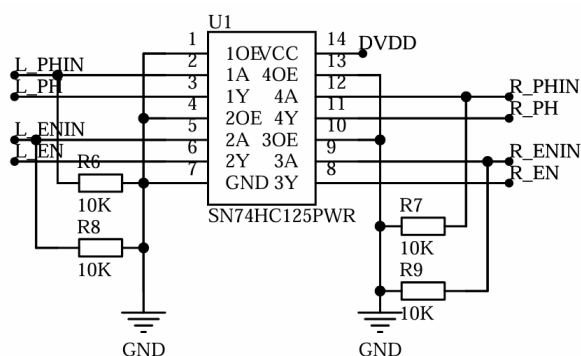


图 10 缓冲电路设计

3.2 程序设计

3.2.1 主程序设计思路

基于 MSPM0G3507 单片机，在 20ms 的定时任务中，完成 IMU 数据的读取和姿态解算、编码器数据读取、按键扫描、速度环控制等功能，在 10ms 的定时任务中完成方向内环（角速度环）的控制功能，在 30ms 的定时任务中完成方向外环的（角度环）的控制功能。在主程序中，我们基于状态机的思想进行程序设计，题目中的四个任务分别对应

四个不同的状态机。

3.2.2 流程图

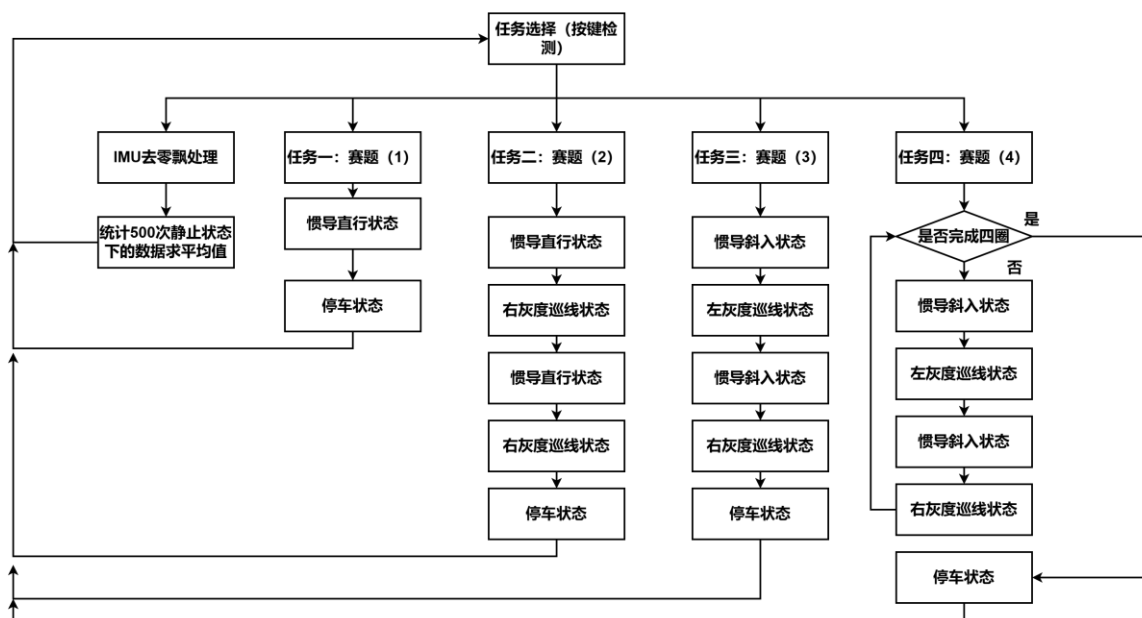


图 11 主程序流程图

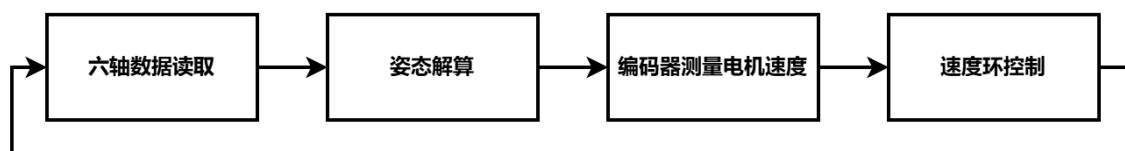


图 12 20ms 定时器任务流程图

四、测试方案与结果分析

4.1 测试方案

测试条件：在室内灯光条件下，场地使用白色哑光喷绘布，弧线使用 1.8cm 宽的黑色胶带，依次对四种不同的路径进行测试，每次测试进行多次测量。

4.2 测试结果

(1) 路径：A->B

将小车放在位置 A 点，小车能自动行驶到 B 点停车，停车时有声光提示。

表 2 第一项测试结果

测试序号	用时	是否触发声光提示	用时是否小于 15s
1	1.78s	是	是

(2) 路径：A→B→C→D→A 绕行一圈

将小车放在位置 A 点，小车能自动行驶到 B 点后，沿半弧线行驶到 C 点，再由 C 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车，每经过一个点，声光提示一次。

表 3 第二项测试结果

测试序号	用时	是否触发声光提示	用时是否小于 30s
1	6.75s	是	是
2	7.05s	是	是
3	6.94s	是	是

(3) 路径：A→C→B→D→A 绕行一圈

将小车放在位置 A 点，小车能自动行驶到 C 点后，沿半弧线行驶到 B 点，再由 B 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车。每经过一个点，声光提示一次。

表 4 第三项测试结果

测试序号	用时	是否触发声光提示	用时是否小于 40s
1	6.05s	是	是
2	6.55s	是	是
3	5.92s	是	是

(4) 路径：A→C→B→D→A 绕行四圈

将小车放在位置 A 点，小车能自动行驶到 C 点后，沿半弧线行驶到 B 点，再由 B 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点，自动行驶 4 圈后停车。

表 5 第四项测试结果

测试序号	用时	是否触发声光提示	是否偏离轨迹
1	20.15s	是	否
2	19.32s	是	否
3	18.94s	是	否

以上测试中，小车均未偏离轨迹。但是当小车连续运行圈数超过 7 圈后，就会产生比较明显的偏差。

4.3 误差分析

在测试中过程，我们发现与预期轨迹产生误差的原因主要有两个：

1. 在车模运行的过程中，由于轮子侧滑可能导致编码器积分里程计数不准确。
2. 在运行的过程中，由于没有地磁计，惯性导航的航向角会随着时间进行累计。

参考文献

- [1]Mahony R, Hamel T, Pflimlin J. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(5):1203-1218
- [2]李孟委, 徐文武, 张鹏. 基于四元数互补滤波算法的车载 MIMU[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(01):111-117. DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2019080073.
- [3]王京, 马峻, 田耘. 基于三轴加速度计的车身姿态测量与解算[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10):38-40. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2016.10.011.
- [4]王润民, 胡锦涛, 任亮, 等. 基于多传感器的智能车辆姿态解算方法[J]. 测控技术, 2016, 35(09):15-19+24. DOI:10.19708/j.ckjs.2016.09.004.
- [5]安旭. 基于阿克曼底盘的无人车自主导航研究[D]. 哈尔滨师范大学, 2023. DOI:10.27064/d.cnki.ghasu.2023.000404.
- [6]巩科. 面向阿克曼结构机器人的路径规划算法研究[D]. 华东师范大学, 2023. DOI:10.27149/d.cnki.ghdsu.2023.001034.
- [7]郭景华, 李富强, 罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(02):151-159.
- [8]明廷友. 智能汽车的轨迹跟随控制研究[D]. 吉林大学, 2016.

五、附录:



我们在 2024 年 8 月全国大学生(本科生)电子设计大赛省赛中 H 题(自动行驶小车)的工作,已经开源在 GitHub 平台和立创开源平台,开源地址如下:

ZLC 基于 MSPM0 的四轮阿克曼小车外设驱动库及完赛代码:

[https://github.com/ZhijianLi2003/ZLC MSPM0 Peripheral Library](https://github.com/ZhijianLi2003/ZLC_MSPM0_Peripheral_Library)

MSPM0G3507 Launch Pad 拓展板: [https://oshwhub.com/hurricanechen/zlc -dian-sai-mspm0g3507-launchpad-kuo-zhan-ban](https://oshwhub.com/hurricanechen/zlc-dian-sai-mspm0g3507-launchpad-kuo-zhan-ban)

作者信息:



[李志坚](#)

山东大学机电与信息工程学院电子科学与技术本科生

他已经推免至中国科学院空天信息创新研究院攻读博士学位

他的研究兴趣: 多模态遥感图像解译、多智能体协同感知

联系方式: lizhijian_sdu@163.com



陈昊然

山东大学机电与信息工程学院电子科学与技术本科生

他已经推免至东南大学集成电路学院攻读硕士学位

他的研究兴趣: 计算机体系结构、集成电路敏捷设计

联系方式: chen_haoran2003@163.com



周天宇

山东大学机电与信息工程学院通信工程本科生

他已经推免至天津大学微电子学院攻读硕士学位

他的研究兴趣: 计算机视觉与三维重建

联系方式: tianyu9029@163.com