

——**自动化专业综合实践** **——基于赛教/科教/产教的三融合方向**

阶段性报告 3

姓名： 李傲琦 学号： 1023009006

题目： 基于 ROS2 系统的自瞄移动机器人

赛教-依托的学科竞赛： 全国大学生电子设计竞赛

目 录

第 1 章 系统最终架构	1
1.1 底盘控制层	1
1.2 云台控制层	1
1.3 视觉算法层	1
1.4 交互通信层	1
1.5 供电系统	2
第 2 章 核心算法实现	3
2.1 底盘巡线控制算法	3
2.1.1 偏差感知与加权平均算法	3
2.1.2 分层闭环控制结构	3
2.2 云台三环 PID 控制	4
2.2.1 电机速度环	4
2.2.2 IMU 角度环	4
2.2.3 视觉位置环	4
2.2.4 工作模式设计	5
2.2.5 FreeRTOS 任务调度与模块通信	5
2.3 视觉 PnP 定位与激光解算	5
2.3.1 离线标定	6
2.3.2 在线解算	6
2.3.3 ROS2 视觉流水线部署	7
第 3 章 系统测试与验证	8
3.1 功能测试	8
3.1.1 自主巡线测试	8
3.1.2 自动瞄准测试	8
3.1.3 手动操控测试	8
3.2 性能测试	8
3.2.1 控制实时性	9
3.2.2 定位精度	9
3.2.3 连续运行稳定性	9
3.3 测试中发现的问题与优化措施	9
3.3.1 高速工况下的巡线误差	9
3.3.2 环境光照对视觉检测的影响	10

3.3.3 PID 积分饱和抑制	10
第 4 章 成果展示与后续改进方向	10
4.1 系统完成情况	10
4.2 后续改进方向	11

第 1 章 系统最终架构

在前两个阶段完成硬件选型与基础功能开发的基础上，本阶段对系统的整体架构进行了最终的集成与优化。系统延续了多主控分布式架构的设计思路，由底盘控制层、云台控制层、视觉算法层以及交互通信层四个核心部分构成，各层之间通过标准化的通信协议实现数据交换与协同工作。

1.1 底盘控制层

底盘控制层以 TI MSPM0G3507 微控制器为核心，搭载 ICM 42688 陀螺仪作为航向传感器，通过 DRV8701E 双路电驱模块驱动两个 MG513X 直流电机，并配备霍尔编码器构成速度闭环。前部安装的 8 路模拟量寻迹模块为巡线功能提供路径感知能力。底盘控制层在 ROS2 架构中作为独立的底盘执行节点运行，负责响应来自上层的运动指令并执行自主巡线逻辑。

1.2 云台控制层

云台控制层采用达妙 DM-MC02 主控板，其上搭载了 STM32H723VGT6 高性能芯片（Cortex-M7 内核，主频 480MHz）与 BMI088 六轴姿态传感器。Yaw 轴选用 DM-G6220 中空电机，Pitch 轴选用 DM-J4310-2EC 关节电机，两款电机均为驱控一体设计，内部已具备速度闭环能力。云台主控通过 FDCAN 总线与电机通信，以 1kHz 的频率实时读取 IMU 姿态数据并进行角度闭环控制，同时通过 USART 串口接收来自视觉计算单元的激光点误差信息，形成完整的三环串联 PID 控制结构。云台的机械框架采用 3D 打印技术制造，实现了轻量化与结构紧凑的设计目标。

1.3 视觉算法层

视觉算法层以 Jetson Orin Nano Super 开发者套件为计算平台，连接海康威视 MV-CS016-10UC 全局快门工业相机，装配工业级无畸变镜头，构成高质量的图像采集与处理子系统。Jetson 端运行基于 ROS2 Humble 的完整视觉流水线，包含相机驱动节点、视觉算法节点、云台控制节点以及 Web 服务节点，各节点之间通过 ROS2 话题机制实现松耦合的数据传递。

1.4 交互通信层

交互通信层以 Nginx 作为反向代理服务器，前端采用 Vue 3 框架构建单页应用，通过 rosbridge 的 WebSocket 连接实现浏览器与 ROS2 系统的实时双向通信。Nginx 在 80 端口统

一对外提供服务，将静态前端文件、MJPEG 视频流以及 HTTP API 请求分别路由至对应的后端服务。用户在浏览器中即可完成实时图传监控、键盘遥控操作以及 PID 参数在线调试等功能。

1.5 供电系统

系统供电采用单块 6S 锂电池方案，通过底盘分电板为底盘各模块供电，同时经由导电滑环将电力输送至云台分电板，再由云台分电板为云台电机、主控板及 Jetson 计算单元供电。其中 Jetson Orin Nano Super 通过 15V 稳压模块获取稳定的工作电压。整体供电链路设计充分考虑了各模块的电压容差范围与功率需求，确保系统在连续运行工况下的供电可靠性。

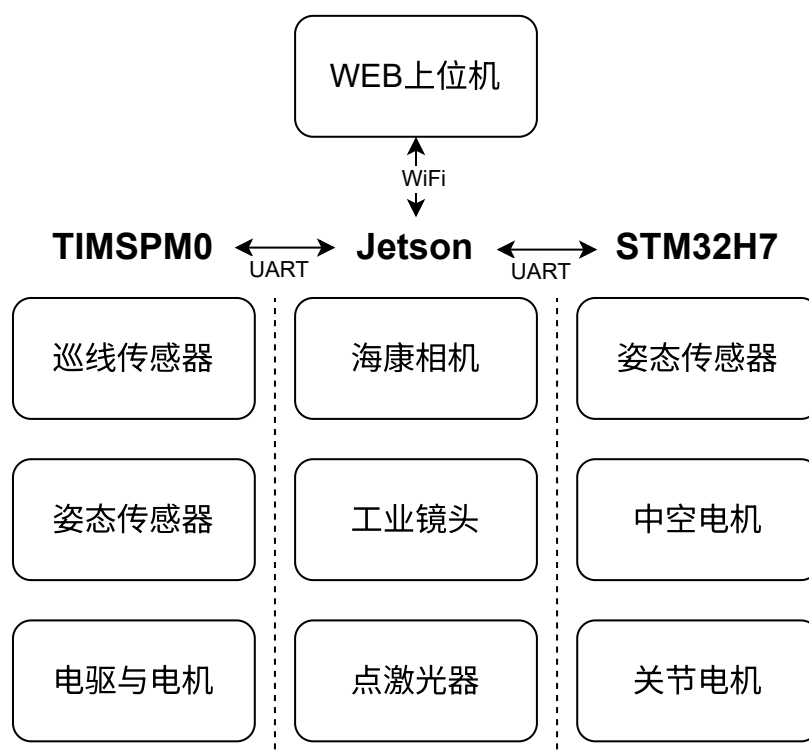


图 1.1 系统最终总体架构图

第 2 章 核心算法实现

2.1 底盘巡线控制算法

底盘的自主巡线功能依赖于一套分层闭环控制策略，该策略由 MSPM0 主控独立完成全部底层实时计算任务，确保控制的实时性与确定性。巡线算法的核心在于对路径偏差的精确感知与快速修正。

2.1.1 偏差感知与加权平均算法

在信号采集层面，安装在底盘前部的 8 路模拟量寻迹模块实时感知地面黑色轨迹相对于底盘中心线的横向偏移。每个传感器通道输出与反射光强度成比例的模拟电压信号，8 路信号共同构成一维的路径亮度分布。在偏差计算层面，系统为 8 个传感器位置分配了对称的索引值 $\{-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4\}$ ，采用加权平均算法计算底盘中心线与黑色轨迹的实时偏差。具体而言，设 8 个传感器通道的模拟量读数为 V_i ($i = 1, 2, \dots, 8$)，对应位置索引为 $I_i \in \{-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4\}$ ，则路径偏差 E 由加权平均公式给出：

$$E = \frac{\sum_{i=1}^8 V_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^8 V_i} \quad (2.1)$$

该算法的优势在于能够综合利用 8 路传感器的全部模拟量信息，而非简单的二值化阈值判断，从而获得亚传感器间距级别的偏差分辨率，为后续的 PID 控制器提供平滑、连续的误差输入信号。

2.1.2 分层闭环控制结构

偏差值 Error 随后进入 PID 控制器，控制器输出作为角度环（航向环）的目标增量。角度环利用 ICM 42688 陀螺仪获取底盘的实时偏航角，通过增量式 PID 算法计算电机转速的修正量，叠加到速度环的目标值上。电机速度环以霍尔编码器的脉冲反馈为输入，同样采用增量式 PID 算法，输出 PWM 波控制 DRV8701E 电驱模块驱动直流电机。三层闭环——巡线位置环、航向角度环、电机速度环——由外向内依次嵌套，共同保证了底盘沿轨迹线平滑、稳定地行驶，并在面对地面摩擦力不均或机械结构不对称等扰动时具备良好的抗干扰能力。

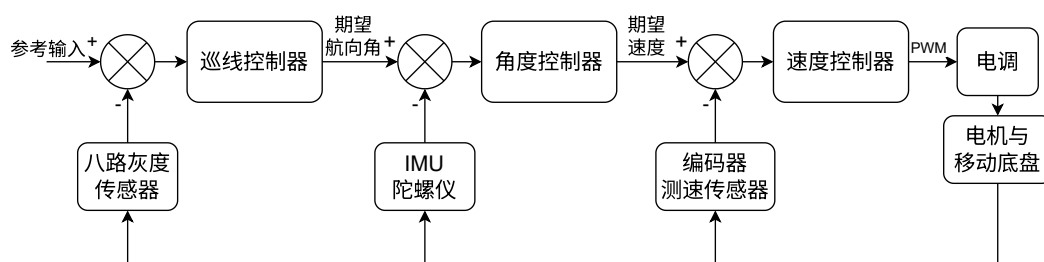


图 2.1 底盘分层闭环控制结构图

2.2 云台三环 PID 控制

云台控制系统是实现激光精确瞄准的核心执行机构，其控制性能直接决定了系统的瞄准精度与响应速度。本系统采用了经典的三环串联 PID 控制架构，由内到外依次为电机速度环、IMU 角度环以及视觉位置环，三者协同工作以实现对目标的高精度稳定追踪。

2.2.1 电机速度环

电机速度环是最内层的控制回路，由 DM 系列电机的内置驱控器完成。两款电机（DM-G6220 与 DM-J4310-2EC）均支持速度模式，云台主控通过 FDCAN 总线向电机发送目标速度指令，电机内部驱动器自行完成速度闭环调节。这一设计将高频的速度控制任务下沉至电机端，减轻了主控芯片的计算负担，使其能够将算力集中于更高层次的控制算法。

2.2.2 IMU 角度环

IMU 角度环运行在云台主控 STM32H723VGT6 上，以 1kHz 的频率读取 BMI088 六轴传感器的姿态数据。主控首先通过四元数扩展卡尔曼滤波器对原始 IMU 数据进行姿态解算，融合加速度计与陀螺仪信息，获得 Yaw 轴和 Pitch 轴的高精度角度估计值以及去偏置的角速度。角度 PID 控制器将当前角度估计值与目标角度参考值之间的偏差作为输入，计算控制量并直接映射为电机速度环的目标值。角度环采用了梯形积分、微分先行以及输出滤波等抗饱和与降噪措施，有效抑制了积分 wind-up 现象和微分冲击，同时通过饱和器限制输出幅值以防止执行器超出物理限位。

2.2.3 视觉位置环

视觉位置环是最外层的控制回路，也是实现自动瞄准功能的关键环节。视觉计算单元（Jetson Orin Nano Super）通过 PnP 位姿解算与激光模型推导，计算出激光点在靶面上的实际落点与目标点之间的像素级误差，将该误差通过 USART 串口以标准化的通信协议（0xA5 帧）发送至云台主控。主控接收到误差数据后，首先经过卡尔曼滤波器进行平滑处理以抑制测量噪声，随后视觉 PID 控制器根据滤波后的误差计算控制量，对该控制量进行积分累

加后作为角度环的目标参考值。这一积分机制使得位置偏差能够持续累积为角度偏移，驱动云台逐步消除瞄准误差。

2.2.4 工作模式设计

云台控制系统还设计了三种工作模式以应对不同的使用场景。自动模式下，视觉位置环处于激活状态，云台根据视觉反馈自主追踪目标；手动模式下，上位机通过 0xA6 帧直接下发 Yaw 轴和 Pitch 轴的目标角度值，操作者可通过前端界面的键盘控制实时调整云台指向；调试模式下，电机处于失能状态，上位机可通过 0xA8 帧在线更新视觉环和角度环共 12 个 PID 参数，无需重新编译固件即可完成参数整定。模式之间的切换由 0xA7 命令帧触发，切换到自动模式时系统会自动重置卡尔曼滤波器状态和 PID 积分项，确保模式切换过程中不产生控制量突变。

2.2.5 FreeRTOS 任务调度与模块通信

云台主控的软件系统基于 FreeRTOS 实时操作系统构建，共运行四个任务：INS 姿态解算任务以 1kHz 频率执行 BMI088 数据读取与四元数 EKF 解算；Motor 电机控制任务以 1kHz 频率执行角度 PID 计算并通过 CAN 发送速度指令；Robot 命令处理任务以 500Hz 频率处理上位机通信、模式切换与控制指令执行；Daemon 守护任务以 100Hz 频率监控各外设模块的运行状态。四个任务按照优先级由高到低依次调度，确保了姿态解算与控制指令的实时性。模块间的数据交换采用发布-订阅消息中间件实现解耦，云台控制指令、姿态反馈数据、电机使能状态以及 PID 调参数据分别通过独立的命名话题进行传递，避免了模块间的直接耦合。

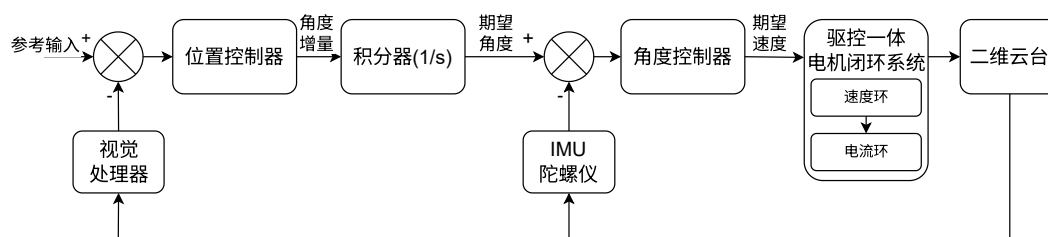


图 2.2 云台三环 PID 控制结构图

2.3 视觉 PnP 定位与激光解算

视觉定位算法是整个自瞄系统的感知核心，其任务是从相机拍摄的二维图像中恢复出目标的三维空间信息，并精确计算出激光束在靶面上的实际落点位置。本系统采用的视觉方案不依赖于对画面中激光点色块的直接识别，而是基于预先标定的相机与激光器之间的刚体几何关系，通过 PnP 位姿解算与空间射线投影的数学模型实现激光落点的高精度推导。

这一方案克服了激光点色块在复杂光照或远距离条件下难以可靠检测的固有问题，显著提升了定位的鲁棒性。

算法流程分为离线标定与在线解算两个阶段。

2.3.1 离线标定

在离线标定阶段，首先对相机进行内参标定，采用标准棋盘格标定法获取相机的内参矩阵 K 及畸变系数，这是所有后续像素坐标到空间坐标转换的数学基础。随后进行激光器与相机的联合标定：开启激光器将光点投射于平面标定板上，在保持相机与激光器相对位姿不变的前提下改变整体姿态，拍摄多组（通常 10 组以上）同时包含标定板和激光点的图像。对每张图像，利用 PnP 算法根据棋盘格角点解算相机相对于标定板的外参矩阵 T_{wc} ，同时提取激光点的像素坐标 (u, v) 。利用 K^{-1} 将像素坐标转换为归一化射线方向，再与标定板在相机坐标系下的平面方程联立求交，计算出激光点在相机坐标系下的三维坐标 $P_c^{(i)}$ 。收集所有图像对应的三维点集 $\{P_c^{(1)}, P_c^{(2)}, \dots, P_c^{(n)}\}$ ，采用主成分分析（PCA）或最小二乘法拟合这些空间点，得到相机坐标系下激光束的空间直线方程。将拟合结果参数化表示为：

$$L_{cam}(s) = O_{cam} + s \cdot \vec{d}_{cam} \quad (2.2)$$

其中 $\vec{d}_{cam} \in \mathbb{R}^3$ 为单位方向向量（ $\|\vec{d}_{cam}\| = 1$ ）， O_{cam} 为直线上选取的参考点（取直线与相机坐标系 $Z = 0$ 平面的交点）， $s \in \mathbb{R}$ 为尺度参数。这两个参数完整描述了激光束在相机坐标系下的空间几何，将作为标定常数用于在线解算。

2.3.2 在线解算

在线解算阶段的目标是根据当前相机拍摄的靶面图像，实时计算激光点的世界坐标。首先对图像中的目标矩形区域进行检测与特征提取——系统采用 Otsu 自适应阈值分割结合轮廓检测的方法定位矩形边框的四个角点。获得角点的像素坐标后，结合已知的矩形物理尺寸及角点的世界坐标，利用 PnP 算法解算出相机当前的位姿外参矩阵 T_{wc} ，该矩阵包含旋转分量 $R \in SO(3)$ 和平移分量 $t \in \mathbb{R}^3$ 。随后，将离线标定阶段获得的激光线参数从相机坐标系变换至世界坐标系。方向向量的变换仅受旋转影响，基准起点的变换受旋转与平移共同影响：

$$\vec{d}_{world} = R^T \cdot \vec{d}_{cam} \quad (2.3)$$

$$O_{world} = R^T \cdot (O_{cam} - t) \quad (2.4)$$

将变换后的参数代入世界坐标系下的激光射线方程：

$$L_{world}(s) = O_{world} + s \cdot \vec{d}_{world} \quad (2.5)$$

目标靶面在世界坐标系中位于 $Z_{world} = 0$ 平面。令射线方程 $L_{world}(s)$ 的 Z 分量为零，解出参数 s^* ，代回方程即求得激光落点的 X 与 Y 坐标。最终输出为激光点在靶面上的世界坐标 $(x, y, 0)$ ，将其与目标瞄准点的世界坐标比对即可得到瞄准误差。

2.3.3 ROS2 视觉流水线部署

整个视觉流水线在 ROS2 Humble 框架下以节点化方式运行。相机驱动节点负责海康工业相机的底层驱动与原始图像采集，将 `sensor_msgs/Image` 类型的消息发布至 `/camera/image_raw` 话题。视觉算法节点订阅该话题，依次完成图像预处理、目标检测、PnP 位姿解算以及激光位置推导，并将计算结果以 `geometry_msgs/Point` 消息类型发布至 `/vision/target` 话题，同时生成带标注的调试图像发布至 `/vision/result_image` 话题供前端显示。云台控制节点订阅目标追踪话题，将视觉误差通过 UART 串口按 0xA5 协议帧格式发送至 STM32 云台主控。

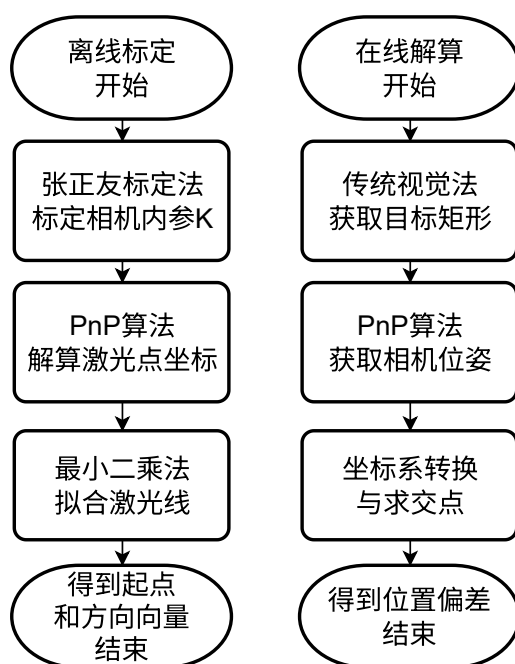


图 2.3 视觉 PnP 解算与激光定位算法流程图

第 3 章 系统测试与验证

3.1 功能测试

在完成系统各模块的开发与联调后，开展了全面的功能测试以验证系统是否达到设计目标。功能测试围绕系统的三项核心能力展开：自主巡线移动能力、自动瞄准能力以及手动远程操控能力。

3.1.1 自主巡线测试

在自主巡线测试中，底盘在标准黑色轨迹线场地内运行，轨迹包含直线段、大曲率弯道以及连续 S 形弯道等多种典型路径形态。测试结果表明，底盘能够在各种路径形态下稳定跟随轨迹线行驶，加权平均巡线算法提供的连续偏差信号使得弯道处的转向动作平滑连贯，无明显振荡或冲出轨迹的现象。角度闭环对机械不对称性及地面摩擦差异的补偿效果显著，底盘在长距离直线行驶时能够保持航向稳定，累积偏移量在可接受范围内。

3.1.2 自动瞄准测试

在自动瞄准测试中，系统被置于靶面前方不同距离和不同偏角的多个测试点位。视觉算法能够可靠地检测目标矩形边框，PnP 位姿解算结果稳定，激光点在靶面上的预测位置与实际落点的吻合度较高。云台三环 PID 控制器在接收到视觉误差后能够在合理的时间内收敛至目标位置，且稳态时无明显抖动。系统在自动模式下可完整执行“巡线行进—到达射击位—自动瞄准—激光指示”的任务流程，各环节的时序衔接正确。

3.1.3 手动操控测试

在手动操控测试中，通过 Vue 前端界面的键盘控制功能分别测试了底盘的全向移动（W/A/S/D 组合键）和云台的双轴旋转（方向键）。底盘差速驱动算法能够正确响应多键同时按下的组合指令，实现前进转向等复合运动。云台的手动控制响应灵敏，角度参考值的下发与电机的执行之间延迟在可感知范围以内。模式切换功能（自动/手动/调试）在所有测试场景中均能正确执行，切换过程中未出现控制量突变或电机异常动作。

3.2 性能测试

在功能正确性得到验证的基础上，进一步对系统的关键性能指标进行了定量测试。测试涵盖了控制响应实时性、定位精度以及系统连续运行稳定性三个维度。

3.2.1 控制实时性

控制响应的实时性是分布式系统的一项重要性能指标。通过对 ROS2 节点间消息传递的端到端延迟进行测量，从相机图像采集到云台控制指令经 UART 发出的完整流水线延迟处于毫秒量级，满足实时控制的需求。云台主控各 FreeRTOS 任务的实际执行频率与设计频率的偏差均在容许范围内，INS 姿态解算任务与 Motor 控制任务稳定运行在 1kHz，未出现任务超时或优先级反转现象。前端遥控指令从浏览器键盘事件触发到机器人执行动作的往返延迟经过了从 Vue 应用、rosbridge WebSocket、ROS2 话题转发、UART 串口传输到云台主控处理的完整链路测试，整体响应延迟在用户可接受的实时交互体验范围内。

3.2.2 定位精度

定位精度的测试通过在靶面上预设已知坐标的测试点，将系统解算出的激光落点坐标与真实坐标进行比对。在典型工作距离下（相机与靶面距离约 1 至 2 米），激光落点的定位误差均控制在厘米级以内。定位精度受到相机分辨率、标定精度、PnP 解算的数值稳定性以及环境光照条件等多方面因素的影响。在均匀光照条件下，系统的定位重复性良好，多次测量结果的一致性较高。

3.2.3 连续运行稳定性

系统连续运行稳定性测试验证了系统在长时间工作条件下的可靠性。在累计超过两小时的连续运行测试中，各硬件模块的温度处于正常工作范围（电机和电驱模块略有温升但未超过额定限值），ROS2 各节点未出现崩溃或异常退出，FreeRTOS 各任务通过 Daemon 看门狗机制保持正常运行，通信链路未出现持续中断或数据丢失现象。供电系统在电池电压从满电到接近放电截止的整个区间内均能保证各模块的正常工作电压。

3.3 测试中发现的问题与优化措施

尽管系统整体达到了设计预期，但在测试过程中也暴露出若干需要关注和优化的问题。以下就主要问题及其优化措施进行论述。

3.3.1 高速工况下的巡线误差

在高速行驶工况下，底盘巡线的跟踪误差呈现出随速度增加而增大的趋势。这一现象主要源于两个因素的共同作用：其一是高速时电机出力矩的裕度减小，对外部扰动的补偿能力下降；其二是寻迹模块的模拟量采样与 PID 控制周期固定，更高的线速度意味着在单个控制周期内底盘行驶的距离增大，导致偏差修正的延迟效应更加显著。针对此问题，系统在巡线控制回路中引入了前馈补偿机制，根据弯道曲率的预判信息提前调整速度设定

值，在进入弯道前主动减速、出弯后恢复速度，从而在不牺牲平均行驶效率的前提下保证了弯道跟踪精度。

3.3.2 环境光照对视觉检测的影响

环境光照变化对视觉目标检测的稳定性构成了一定挑战。在强侧光或光线剧烈变化的场景下，Otsu 自适应阈值分割的结果可能出现局部误判，进而影响矩形边框提取的完整性与准确性。为解决这一问题，系统在图像预处理阶段增加了自适应直方图均衡化步骤以增强图像对比度，同时在轮廓检测环节引入了基于矩形几何先验的形状筛选准则（如长宽比范围、面积阈值等），有效滤除了由光照变化引入的虚假轮廓。对于极端光照条件，系统保留了通过上位机手动切换至备选阈值参数或手动操控模式的降级运行能力。

3.3.3 PID 积分饱和抑制

云台在长时间运行后，PID 积分项可能因微小的稳态误差持续累积而接近饱和边界，导致在目标位置发生突变时出现短暂的控制超调。针对这一问题，系统在视觉环 PID 控制器中加入了积分分离与变速积分机制：当误差超过预设阈值时暂停积分累积以避免过饱和，当误差较小时恢复积分以消除稳态残差。此外，电机使能/失能切换及模式切换时自动清零 PID 状态变量的保护逻辑也在固件层面得到了实现与验证。

第 4 章 成果展示与后续改进方向

4.1 系统完成情况

经过三个阶段的迭代开发与持续优化，本课题成功完成了一套基于 ROS2 分布式架构的自瞄移动机器人系统的设计与实现。系统在硬件层面整合了 MSPM0 底盘控制单元、STM32H723 云台控制单元以及 Jetson Orin Nano Super 视觉计算单元三大处理平台，配合工业相机、DM 系列关节电机、IMU 姿态传感器以及多路寻迹模块等外设，构成了功能完备的移动机器人硬件平台。在软件层面，底盘端实现了基于加权平均算法的自主巡线功能和分层闭环运动控制，云台端实现了基于 FreeRTOS 的三环串联 PID 姿态控制与多模式切换机制，视觉端实现了基于 PnP 位姿解算与刚体激光模型的高精度目标定位算法，并在 ROS2 Humble 框架下完成了所有功能节点的集成与协同调度。在前端交互层面，基于 Vue 3 构建的 Web 控制界面通过 rosbridge 实现了与机器人系统的实时双向通信，支持实时视频监控、键盘遥控操作以及 PID 参数在线调试。

系统的整体表现达到了预期的设计目标：自主巡线功能能够适应多种路径形态，自动瞄准功能在典型工作距离下实现了厘米级的定位精度，手动遥控功能提供了低延迟的实时

操控体验，各项性能指标均满足赛教融合项目的应用需求。系统的模块化架构与标准化的通信接口设计也为后续的功能扩展与技术迭代奠定了良好的基础。

4.2 后续改进方向

针对本阶段测试中识别出的若干不足以及系统未来的发展方向，提出以下后续改进思路。在算法层面，可进一步探索基于深度学习的视觉检测方法以替代当前基于传统图像处理的目标识别流程，提升系统在复杂光照和多样化场景下的鲁棒性。在控制层面，可引入模型预测控制（MPC）或自抗扰控制（ADRC）等先进控制策略以替代当前的线性 PID 结构，在高速动态工况下获得更优的跟踪性能。在系统集成层面，可考虑增加激光雷达或深度相机等多模态传感器以实现环境感知能力的升级，将应用场景从二维平面巡线扩展至三维空间导航与避障。此外，前端界面可进一步丰富数据可视化功能，增加控制参数的实时曲线显示、系统状态的仪表盘监控以及历史数据的记录与回放功能，提升系统的可调试性与用户体验。