

——**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 2

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 工作背景与本阶段任务	1
第 2 章 系统架构设计细化	2
2.1 分布式硬件拓扑	2
2.2 通信接口与协议设计	2
2.3 分层控制策略	3
第 3 章 硬件选型决策与依据	4
3.1 底盘器件选型	4
3.2 云台器件选型	5
3.3 视觉器件选型	6
3.4 供电架构设计	7
第 4 章 底盘运动控制系统开发	8
4.1 电机速度闭环（最内层）	8
4.2 航向角闭环（中间层）	8
4.3 巡线偏差闭环（最外层）	9
第 5 章 云台姿态控制系统开发	10
5.1 电机总线通信（最内层基础）	10
5.2 姿态角度闭环（中间层）	10
5.3 视觉引导位置闭环（最外层）	10
第 6 章 视觉处理系统开发	12
6.1 图像采集节点（Camera Driver）	12
6.2 视觉算法节点（Vision）	12
6.2.1 图像预处理与目标检测	12
6.2.2 PnP 位姿解算	12
6.2.3 激光点位置推导（核心创新点）	12
第 7 章 Vue 前端操控界面开发	13
第 8 章 阶段性实验记录	14
8.1 底盘基本运动能力	14
8.2 自动巡线初步效果	14
8.3 云台姿态控制	14
8.4 系统整体联动	14
第 9 章 下一阶段工作计划	15
9.1 视觉定位算法完善	15

9.2 三环 PID 闭环参数整定.....	15
9.3 系统完整功能联调与性能验证.....	15

第 1 章 工作背景与本阶段任务

本项目面向全国大学生电子设计竞赛 E 题需求，目标是研制一台具备自动巡线行驶与激光瞄准能力的移动机器人。第一阶段完成了需求分析、技术调研和总体方案设计；本阶段（第二阶段）的工作重心从方案论证转向工程实现，具体完成了以下五项任务：

1. **硬件平台搭建**：完成底盘、云台、视觉三大子系统的全部器件采购与机械装配
2. **底层驱动开发**：实现直流电机 PWM 调速、霍尔编码器速度反馈、CAN 总线电机通信及多传感器数据采集
3. **ROS2 通信框架构建**：在 Jetson Orin Nano Super 上部署 5 节点 ROS2 网络（Camera Driver、Vision、Gimbal、Chassis、Web Server）
4. **模块基础功能实现**：底盘完成四向运动与初步巡线，云台完成姿态闭环与视觉指令响应，视觉完成图像采集与目标检测流水线
5. **系统联通验证**：测试“Vue 前端 → ROS2 → 单片机 → 执行器”的完整通信链路，验证了各通信接口的可靠性

第 2 章 系统架构设计细化

2.1 分布式硬件拓扑

本系统由四个物理节点构成分布式控制网络，各物理节点功能定位与主控芯片如下：

表 2.1 系统节点功能划分

名称	主控芯片	核心职责	关键外设/接口
底盘	MSPM0G3507	巡线偏差计算、航向角闭环、双电机速度闭环	8 路 ADC（寻迹）、I2C（ICM 42688）、2 路 PWM 输出、2 路编码器
云台	STM32H7	三环 PID 姿态控制、视觉误差接收与处理	CAN-FD（电机通信）、SPI（BMI088）、UART（Jetson 通信）
视觉	Jetson Orin Nano Super	目标检测、PnP 位姿解算、激光点位置推导	USB/CSI（海康相机）、UART（STM32 通信）、Wi-Fi（Web 前端）
上位机	任意浏览器	实时图传显示、键盘遥控指令发送、模式切换	HTTP（与 Jetson 双向通信）

2.2 通信接口与协议设计

各物理节点间的数据交换通过以下五条物理链路实现：

1. **Jetson 到 STM32 (UART)**: 波特率 115200bps，自定义数据帧（帧头 0xAA 0x55 + 长度 + 4B Δx + 4B Δy + 校验和），传输频率 30Hz，承载视觉误差数据及控制模式指令
2. **STM32 到达妙电机 (CAN)**: 波特率 1Mbps，标准帧格式（11 位 ID），遵循达妙电机通信协议，分别向 Yaw 轴（ID=0x200）和 Pitch 轴（ID=0x1FF）发送速度指令并接收状态反馈
3. **MSPM0 到 DRV8701E (PWM)**: 两路独立 PWM（频率 20kHz），占空比 0–100%，经 DRV8701E 双 H 桥驱动两个 MG513X 直流电机
4. **STM32 与 BMI088 (SPI)**: SPI 模式 0，最高 10MHz，读取加速度计和陀螺仪数据用于云台姿态闭环
5. **MSPM0 与 ICM 42688 (I2C)**: 标准 I2C（400kHz），读取 Yaw 角数据，用于底盘角度闭环

6. **Jetson 与浏览器 (Wi-Fi/WebSocket)**: 全双工 WebSocket 连接, 上行传输 JPEG 图像流 (30fps), 下行传输键盘指令和模式切换信号

2.3 分层控制策略

- **底盘侧**: 构建“巡线偏差环, 航向角度环, 电机速度环”三层串联闭环。外环以平均值加权算法从 8 路寻迹模拟量中估计轨迹偏差; 中环以 ICM 42688 陀螺仪 Yaw 角为反馈维持航向稳定; 内环以霍尔编码器脉冲为反馈实现双轮独立调速。
- **云台侧**: 构建“视觉位置环, 姿态角度环, 电机速度环”三环串联 PID。外环根据 Jetson 下发的靶面误差计算目标角度偏移; 中环利用板载 BMI088 六轴传感器实现空间姿态闭环; 内环由达妙驱控一体电机内部完成。控制回路中串入 Kalman 估计器 (状态预测)、一阶低通滤波器 (噪声抑制) 和饱和器 (限幅保护)。
- **视觉侧**: 采用 PnP 位姿解算 + 刚体关系推导的方案。离线阶段完成相机内参标定和相机-激光器联合标定; 在线阶段通过目标矩形 PnP 获取相机位姿, 进而将标定好的激光线参数变换至世界坐标系, 与靶面平面求交即得激光落点坐标。

如图2.1所示, 系统总体架构呈现分布式多节点协同的特点, 各节点功能清晰且通过标准化接口进行通信, 具备良好的模块化和扩展性。

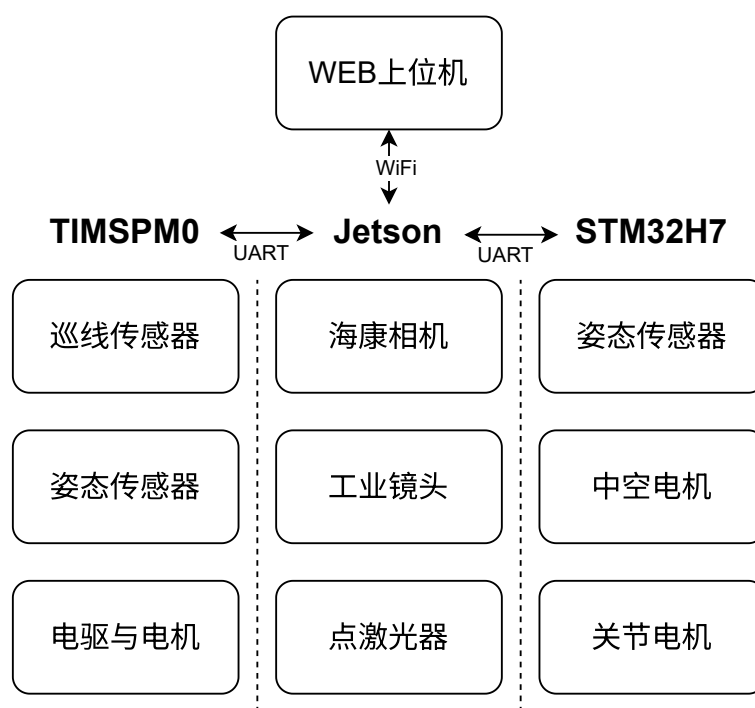


图 2.1 系统总体架构图

第 3 章 硬件选型决策与依据

- 硬件选型遵循四条基本原则：
- (1) 性能满足任务指标并有适当余量；
 - (2) 各器件供电电压与接口电平兼容，减少电平转换电路；
 - (3) 优先选择已有开发资源（例程、驱动、社区支持）的器件；
 - (4) 在满足前三条的前提下控制成本。

3.1 底盘器件选型

表 3.1 底盘硬件选型清单与决策依据

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
主控板	MSPM0G3507 及其拓展板	7.2–26V 供电	对比 STM32F103： 逐飞配套例程完善。底盘以 IO 实时操作为主，M0+ 核心足够，无需 M4/M7 的 DSP 能力
动力电机 (x2)	MG513X 直流减速电机	6–12V, 内置霍尔编码器	对比步进电机： 直流电机 + 编码器的闭环方案在同等成本下转速范围更宽，控制更容易，适合差速转向对轮速差的灵活需求
电机驱动	TI DRV8701E 双路模块	5.9–28V, 双 H 桥	对比 L298N： MOSFET 全桥导通电阻远低于 BJT 方案，发热小，单模块驱动双电机简化接线。
航向传感器	ICM 42688 六轴 IMU	SPI/I2C, 低噪声	对比 MPU6050： 更新一代工艺，零偏稳定性和噪声密度更优，封装尺寸兼容

续下页

表 3.1 （续）

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
寻迹传感器	感为 8 路模拟量模块	8 通道, 模拟输出	对比 5 路方案: 8 路提供 $\{-4, \dots, 4\}$ 索引范围, 空间分辨率提升。 对比数字开关量模块: 模拟量支持加权插值, 获得间距的偏差估计
从动轮 (x2)	万向轮	全向随动	无需驱动, 零半径转向。 对比麦克纳姆轮: 成本低且控制简单
承载板	3D 打印	PLA	对比其他型材: 灵活度高, 加工方便, 重量轻, 承载强度满足需求

3.2 云台器件选型

表 3.2 云台硬件选型清单与决策依据

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
主控板	达妙 DM-MC02	STM32H723, 550MHz, 板载 BMI088, 12-28V	对比自设计 PCB: 成品板集成 CAN 收发器和 IMU, 硬件可靠性经过验证, 缩短开发周期。 对比 STM32F4: H7 系列算力充足, 便于后续扩展 Kalman 等估计器
Yaw 轴电机	达妙 DM-G6220 中空电机	24V, 2.3A, 驱控一体, CAN	对比步进电机方案: 驱控一体省去独立驱动器, CAN 通信抗干扰且支持总线拓扑。中空结构是关键——线缆从旋转中心穿过, 配合滑环实现 360° 连续旋转而不绕线

续下页

表 3.2 （续）

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
Pitch 轴电机	达妙 DM-J4310-2EC 关节电机	24V, 3.1A, 驱控一体, CAN	与 Yaw 差异化选型：Pitch 轴仅驱动相机组件，所需转矩小，关节电机尺寸紧凑适合侧挂。通信协议与 Yaw 电机一致，软件复用度高
旋转连接器	24 路 ×2A 导电滑环	24 通道, 每路 2A	对比无线供电 + 无线通信方案：滑环结构简单可靠，成本低得多。24 路分配：2×2 路并联供电 Yaw 电机、2×2 路供电 Pitch 电机, 其余用于 CAN、UART 及备用
结构框架	FDM 3D 打印件	PLA	对比 CNC 金属加工：成本仅为后者的 1/10–1/20, 且设计迭代速度快（数小时即可重新打印）。在科研样机阶段性价比突出

3.3 视觉器件选型

表 3.3 视觉子系统硬件选型清单与决策依据

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
计算平台	Jetson Orin Nano Super	67 TOPS, 5–25W	对比树莓派 5：AI 算力优势明显，更适合 PnP 解算等数值计算密集任务。对比 Jetson Xavier NX：能效比更高（同等算力功耗更低），对电池续航更友好

续下页

表 3.3 （续）

器件	选定型号	核心参数	选型理由与替代方案对比
相机	海康 MV-CS016-10UC	全 局 快 门, 1.6MP, USB/CSI	对比卷帘快门 USB 摄像头: 机器人在运动中拍摄时, 卷帘快门逐行曝光会导致画面产生几何畸变 (果冻效应), 直接污染 PnP 解算精度。全局快门所有像素同时曝光, 从根本上消除此问题
光学镜头	工业无畸变定焦镜头	低畸变 ($< 0.1\%$)	对比普通消费级镜头: 无畸变特性使针孔相机模型假设更接近实际成像, 有利于 PnP 收敛。即使软件可补偿畸变, 无畸变镜头减少了标定参数的自由度
激光指示器	激光笔模组	可见光点	功能简单, 仅需保证与相机刚性固定的几何精度。无需特殊选型

3.4 供电架构设计

采用“单电池组 + 多路 DC-DC 稳压”的供电方案。6S 锂电池总输出经分线后接入：一路供给云台（DM-MC02 板及两电机），一路稳压至 15V 供给 Jetson（在 9–19V 的推荐范围内取中间偏上值），底盘侧的 MSPM0 拓展板和 DRV8701E 电驱模块因具备宽电压输入能力（7.2–28V）直接从电池取电。此方案的优点在于：（1）单电池简化充电管理和日常维护；（2）统一的地参考避免了多地环路引入的噪声耦合；（3）各稳压支路独立，电机突加载时的电流冲击不会传导至视觉和主控供电轨。

第 4 章 底盘运动控制系统开发

底盘控制程序运行于 MSPM0G3507 芯片，采用从底至顶逐层封装的三级闭环架构，如图4.1所示。

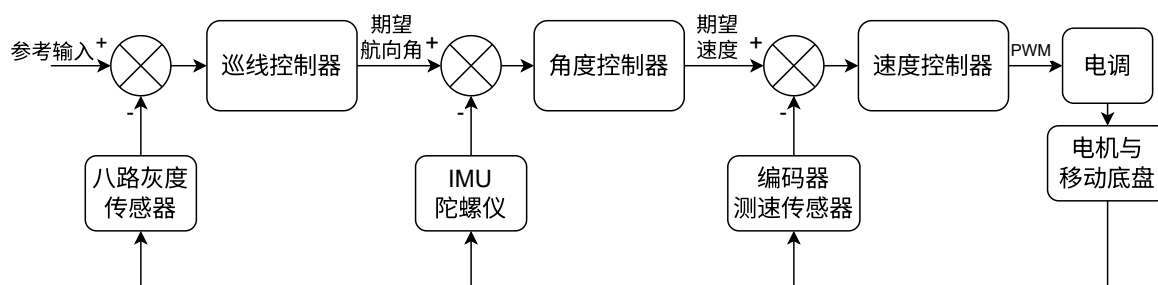


图 4.1 底盘三级闭环控制框图

4.1 电机速度闭环（最内层）

两路 MG513X 直流电机各配一枚霍尔编码器，编码器 A/B 相正交脉冲接入 MSPM0 定时器的外部计数通道。控制流程如下：

1. 每个控制周期内，读取定时器计数值并清零，换算为该周期内的平均转速（单位：脉冲/10ms）。
2. 将目标转速与实际转速之差输入增量式 PID 算式：

$$\Delta u_k = K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i e_k + K_d(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (4.1)$$

其中 $e_k = r_{\text{target},k} - r_{\text{actual},k}$ 为本周期速度误差。

3. 将 Δu_k 叠加至当前 PWM 寄存器值，进行上下限钳位后更新两路 PWM 输出至 DRV8701E 模块。左右两轮的速度环参数和输出各自独立。

4.2 航向角闭环（中间层）

该层的作用是补偿左右电机特性差异和地面局部摩擦不均所导致的偏航，使底盘具备走直线的能力：

1. 通过 I2C 总线（400kHz）从 ICM 42688 读取欧拉角中的 Yaw 分量，作为当前航向角的测量值。
2. 目标航向与实测航向之差输入一个独立的 PID 控制器，控制器输出作为“差速补偿量”。
3. 差速补偿以正向叠加至一侧电机目标转速、负向叠加至另一侧的方式执行，使两侧产生差异化的速度以修正航向偏差，整体经速度环执行。

4.3 巡线偏差闭环（最外层）

巡线功能依赖安装在底盘前部的 8 路模拟量寻迹模块实现：

1. **信号获取：**MSPM0 的 12 位 ADC 以 1ms 间隔轮询 8 个通道，各通道返回模拟量，用最大值减去各通道的返回值，得到模拟量 V_i ($i = 1, \dots, 8$)，数值大小反映该位置探头的对地反射率，黑线吸收红外光，通道返回值低，计算得到的模拟量高。
2. **偏差估计：**为 8 个通道设定位置索引 $\{-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4\}$ （间距均匀，0 表示底盘中央），计算以模拟量为权重的加权平均值作为黑线中心位置的估计值。目标位置定为 0（线与底盘中央对齐），偏差公式为：

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^8 (V_i \times Index_i)}{\sum_{i=1}^8 V_i} \quad (4.2)$$

式中的分母起归一化作用，使偏差估计不受绝对反射率变化（如不同场地底色）的影响。

3. **控制量计算与执行：**偏差 $Error$ 输入第三个 PID 控制器，其输出作为角度环的目标角增量。经角度环和速度环逐级传递，最终体现为左右轮的差速，驱使底盘向黑线方向修正。

第 5 章 云台姿态控制系统开发

云台控制程序运行于 STM32H723VGT6 (DM-MC02 板)，同样采用三层级联 PID 结构，但各层功能与底盘有所不同，如图 5.1 所示。

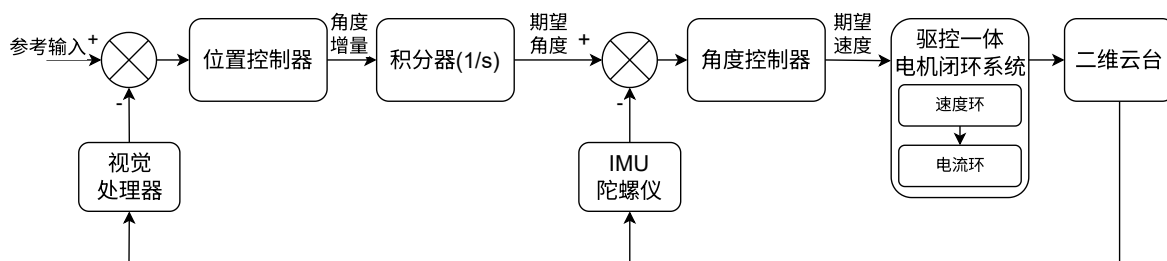


图 5.1 云台三级闭环控制框图

5.1 电机总线通信（最内层基础）

两个达妙电机（Yaw 轴 DM-G6220 和 Pitch 轴 DM-J4310-2EC）均为驱控一体型，内部已实现速度闭环。STM32 通过 FDCAN 控制器（1Mbps）按达妙协议发送速度指令帧即可控制电机运转，同时接收电机回传的状态帧（实际转速、电流、温度）。这大幅简化了云台控制软件的底层工作量——上位控制器无需处理电流环或换向逻辑。

5.2 姿态角度闭环（中间层）

利用 DM-MC02 板载的 BMI088 六轴传感器实现云台的空间姿态闭环：

- 通过 SPI 接口以 200Hz 频率读取 BMI088 的 3 轴加速度和 3 轴角速度原始数据。
- 采用互补滤波算法融合两类数据：加速度计的低频分量提供长期绝对角度参考（利用重力矢量方向），陀螺仪的高频分量提供快速动态响应。滤波系数根据实际振动环境整定。
- 目标角度（或角度偏移）与融合后的实际角度之差通过 PID 控制器运算，输出直接作为电机的速度指令值（经低通滤波和限幅处理），从而完成角度闭环。

5.3 视觉引导位置闭环（最外层）

位置闭环是云台实现自动瞄准目标的关键控制层：

- 通过 UART（115200bps, 3.3V TTL）接收 Jetson 视觉节点发送的二维误差数据包（靶面坐标系的 $\Delta x, \Delta y$ ，单位 mm）。

- 将 Δx 和 Δy 分别作为 Yaw 轴和 Pitch 轴位置环的偏差输入。两个位置环 PID 各自独立运算。
- 位置环的输出经积分后叠加至角度环的目标值上。角度环驱动电机转动，使云台向减小误差的方向运动，最终将激光点导引至靶心附近。
- 位置环的更新率受限于视觉帧率（约 30Hz），低于角度环（200Hz）。为避免这种多速率级联系统出现振荡，位置环 PID 的增益设置需留有充分的稳定裕度。

第 6 章 视觉处理系统开发

视觉系统全部部署在 Jetson Orin Nano Super 嵌入式平台上，基于 ROS2 框架组织为两个核心节点。

6.1 图像采集节点 (Camera Driver)

完成对海康 MV-CS016-10UC 全局快门相机的 Linux 驱动适配，在 ROS2 中持续以 30fps 的帧率向/camera/image_raw 话题发布 sensor_msgs/Image 消息，供 Vision 节点订阅。

6.2 视觉算法节点 (Vision)

该节点执行从原始图像到激光点误差的完整处理流水线。整体流程分为预处理、目标检测、PnP 解算和激光位置推导四个阶段。

6.2.1 图像预处理与目标检测

- 将 BGR 图像转为灰度图，施以高斯滤波平滑（核大小 5×5 ），以自适应阈值方法进行二值化。
- 在二值图上提取轮廓，以 Douglas-Peucker 多边形逼近算法进行四边形拟合，根据面积、长宽比、凸性等几何约束筛选出目标矩形。
- 对筛选出的矩形四个角点按固定顺序（左下、右下、右上、左上）排列，确保与靶面世界坐标的四个顶点形成一一映射。

6.2.2 PnP 位姿解算

- 相机内参矩阵 K 和畸变系数已通过前期标定获得（使用棋盘格 + 张正友标定法）。
- 将矩形的四个图像角点坐标（像素坐标系）和对应四个世界坐标点（靶面坐标系，已知矩形物理尺寸），输入 OpenCV 的 solvePnP 函数，求解当前相对位姿。返回的旋转向量经 Rodrigues 变换转化为 3×3 旋转矩阵 R ，平移向量记为 t 。
- R 和 t 描述了当前相机坐标系相对于靶面世界坐标系的刚体变换关系 T_{wc} 。

6.2.3 激光点位置推导（核心创新点）

本方案不通过图像处理直接检测激光光斑位置，而是基于“相机与激光器刚性绑定”这一结构不变性，利用预先标定的空间关系进行数学推导：

1. **离线联合标定：**在实验室受控环境下，采集不少于 10 组同时包含棋盘格标定板和激光点的图像。对每一帧：（a）通过 PnP 求解该帧的相机外参；（b）提取激光点像素

坐标，经 K^{-1} 转换为归一化射线；(c) 利用该帧标定板在相机坐标系下的平面方程与射线求交，得出该帧的激光点相机坐标系坐标 P_{c_i} 。收集全部 $\{P_{c_i}\}$ 后，采用最小二乘法拟合空间直线，得到激光线在相机坐标系下的单位方向向量 $\vec{d}_{cam}$ 和基准起点 O_{cam} 。

2. **在线实时解算**：对每一帧在线图像，

(a) 通过 PnP 获得当前帧的 R 和 t 。

(b) 将标定得到的激光线参数从相机坐标系变换至世界坐标系：

$$\vec{d}_{world} = R^T \cdot \vec{d}_{cam} \quad (6.1)$$

$$O_{world} = R^T \cdot (O_{cam} - t) \quad (6.2)$$

(c) 在世界坐标系中，靶面满足 $Z_{world} = 0$ 。代入射线参数方程 $L(s) = O_{world} + s \cdot \vec{d}_{world}$ 的 Z 分量，解得参数 s ，进而求得交点完整坐标 $(x, y, 0)$ 。

3. **误差发布**：计算 (x, y) 与靶面中心坐标 (x_c, y_c) 的二维偏差，通过 ROS2 自定义话题/vision/error 发布。由 Gimbal 节点订阅后经 UART 转发至 STM32。

此方案的优势在于：激光点的位置推算不依赖于在画面中可靠检测到激光光斑（光斑在远距离、过曝或与背景混淆时可能无法稳定检测），而是通过刚体标定参数 + 当前相机位姿间接计算，鲁棒性更高。

第 7 章 Vue 前端操控界面开发

上位机界面基于 Vue 3 框架开发，与 Jetson 端的 Web Server ROS2 节点之间通过 WebSocket 维持全双工通信，实现三大功能模块：

- **实时图传模块**：前端持续接收 WebSocket 推送的 JPEG 编码图像帧，以 `<img>` 标签按约 30fps 刷新渲染，延迟控制在 100ms 以内。
- **键盘遥控模块**：监听全局键盘事件实现无焦点操作。W/S 键控制底盘前进/后退（线速度），A/D 键控制左/右转弯（角速度）；方向键 $\uparrow/\downarrow$ 控制云台 Pitch 轴俯仰， $\leftarrow/\rightarrow$ 控制 Yaw 轴水平旋转。按键按下时发送对应速度指令，松开时发送零速指令。
- **模式切换模块**：界面顶层提供自动/手动模式的单选切换控件。自动模式下，底盘执行巡线闭环且云台执行视觉瞄准闭环；手动模式下，系统仅响应键盘指令，所有视觉闭环暂停。

第 8 章 阶段性实验记录

本阶段结束时对系统的各项基本功能进行了实验观察，但不代表最终结果，指标的定量测试将在第三阶段开展。

8.1 底盘基本运动能力

- 在空载平坦地面上，航向角闭环能有效维持直线行驶轨迹，左右偏航得到及时修正。
- 电机速度环使编码器反馈的实测转速稳定跟踪目标转速，空载条件下稳态误差在 $\pm 3\%$ 以内。

8.2 自动巡线初步效果

在铺设有标准黑色电工胶带轨迹线的室内场地进行了巡线测试：

- 8 路寻迹模块对黑/白色差具有充足的信号区分度（模拟量差值在 $2000+ \text{LSB}$ ），加权偏差估计算法输出稳定。
- 曲率半径较小的急弯段（估算 $R < 50\text{cm}$ ），存在脱线后无法及时找回的现象，说明当前 PID 参数和固定的控制结构对大幅值偏差的响应能力不足。

8.3 云台姿态控制

- 两个达妙电机在 CAN 指令控制下转速稳定，无明显的速度抖动或指令丢失。
- BMI088 角度数据读取连续，角度闭环可使云台定位在指定角度且稳态波动在 $\pm 0.5^\circ$ 以内。
- 以模拟视觉误差数据驱动位置环时，云台向减小误差的方向运动，表明位置闭环的框架逻辑正确。

8.4 系统整体联动

- ROS2 的 5 个功能节点在 Jetson Orin Nano Super 上同时运行，CPU 占用率维持在 35–40% 区间，内存占用正常，无节点异常退出。
- Vue 前端可实时显示相机回传图像，图传流畅度在可接受范围内。
- 控制链路从用户按键到电机转动的全路径通过验证，系统初步具备远程操控能力。

第 9 章 下一阶段工作计划

根据本阶段的进展和遗留问题，第三阶段的工作重点为算法闭环完善和系统性能优化：

9.1 视觉定位算法完善

- 执行相机-激光器离线联合标定实验，获取高质量的方向向量 $\vec{d}_{cam}$ 和起点坐标 O_{cam}
- 贯通“PnP 解算 → 坐标变换 → 射线求交 → 误差发布”的完整实时解算链路
- 针对过曝、阴影、不均匀照明等不利光照条件，改进目标矩形检测的预处理策略

9.2 三环 PID 闭环参数整定

- 完成云台 Yaw/Pitch 两轴位置环 PID 参数的实验整定
- 对控制回路中的 Kalman 估计器过程噪声协方差和低通滤波器截止频率进行实验标定
- 针对底盘急弯路段脱线问题，优化 PID 参数，改进控制策略

9.3 系统完整功能联调与性能验证

- 实现自动模式下“底盘沿轨迹线行驶 + 云台激光持续瞄准目标”的完整任务闭环
- 在 Vue 前端叠加渲染视觉解算出的预测激光落点位置，辅助用户监控系统状态
- 开展定量性能测试：目标定位精度（mm 级）、控制响应延迟（ms 级）
- 在不同场地条件和光照环境下进行适应性评估