

国家卓越工程师学院明月科创实验班

个性化实践报告



姓名：_____ 郝博文 _____

学号：_____ 20234021 _____

年级：_____ 23 级 _____

班级：_____ 2 班 _____

实验室：_____ 具身智能实验室 _____

日期：_____ 2026/1/13 _____

重庆大学国家卓越工程师学院 2025 年

目录

国家卓越工程师学院明月科创实验班	1
个性化实践内容	1
1. OpenArm 机械臂运动学控制	1
1.1. 项目介绍:	1
1.2. 仿真环境搭建:	1
1.3. 运动学库构建:	2
1.4. 单片机移植:	3
1.5. 单臂运动学解算与轨迹规划:	4
1.6. 运动学性能分析:	6
1.7. 半人形机器人整体控制:	9
2. “玄武”——自动化喷药喷灌一体机器人	10
2.1 底盘部分:	11
2.2 舵轮设计:	11
2.3 云台部分:	14
2.4 整车建模及实物展示:	15
3. 双自由度视觉云台跟随小车	16
3.1 赛道介绍:	16
3.2 方案设计:	17
3.3 机械工作:	17
3.4 电控工作:	18
3.5 完成效果:	19
3.6 拓展应用:	19
4. 创业团队实践:	22
4.1. 桌面调研	22
4.2. 拆机实践	22
4.3. 用户访谈	23
5. 国市创（多模态智能轮椅）:	24
6. 其它实践:	26
6.1 Xbotics 具身智能社区线上实习	26
6.2 无人机挑战赛	28
6.3 深圳科创学院实习	29
7. 下阶段规划:	30
7.1 半人形机器人的整体轨迹规划与控制	30
7.2 实物七自由度机械臂的调试控制	30
7.3 冗余机械臂的深度强化学习遥操	30
7.4 “微气候”原理样机搭建	30
7.5 全面强化个人技术栈	30
8. 个人总结与思考:	31

个性化实践内容

1. OpenArm 机械臂运动学控制

本学期，我加入了具身智能实验室，负责 OpenArm 七自由度机械臂的运动学控制与轨迹规划。期间，我独立搭建了完整的运动学解算库，完成了包括硬件在环仿真、单臂轨迹规划、半人形机器人整体控制等工作。

1.1. 项目介绍：

七自由度 S-R-S 机械臂是一种与人手臂自然结构产生的自由度一致的机械臂构型，其结构分为肩部，肘部和腕部，其中肩部，肘部与腕部分别由三个相交轴旋转副构成，可以视作一个球铰，肘部由一个旋转副组成，故称为 S-R-S 机械臂（球面铰-旋转副-球面铰）。

OpenArm 就是典型的 S-R-S 冗余机械臂，其作为一款安全、开源、高性能的人形机械臂平台，为物理 AI 研究和工业协作提供了理想解决方案。它在保证安全性的同时，提供了类人操作性能和强大的开发灵活性，使研究人员和开发者能够快速迭代和部署创新应用。



图 1.1.1 OpenArm 基本参数

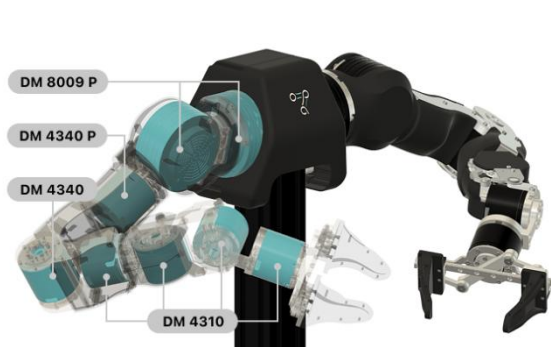


图 1.1.2 OpenArm 硬件选项

我的整体工作流程按以下思路开展：仿真环境搭建→运动学库构建→单片机移植→单臂运动学解算与轨迹规划→运动学性能分析→半人形机器人整体控制。

1.2. 仿真环境搭建：

我使用的系统是 Linux 的 Ubuntu22.04，仿真环境基于 ROS2，编译器为 VScode。此外，我选择 Rviz 作为可视化机器人模型的平台。

Rviz 是一款三维可视化工具，很好的兼容了各种基于 ROS 软件框架的机器人平台，可以使用 XML 对机器人、周围物体等任何实物进行尺寸、质量、位置、材质、关节等属性的描述，并且在界面中呈现出来。同时，rviz 可通过图形化的方式实时显示机器人传感器的信息、机器人的运动状态、周围环境的变化等。

整体的仿真环境搭建流程如下图所示：

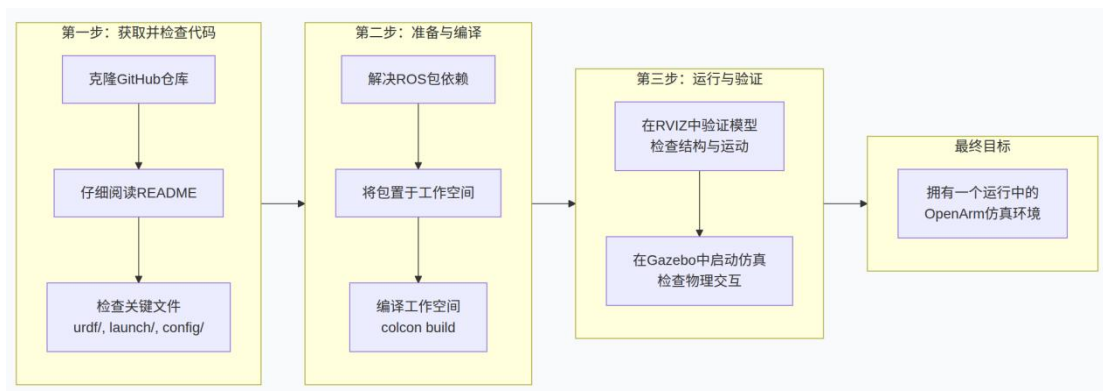


图 1.2.1 仿真环境搭建流程

我调用了 openarm_description 仓库中的 URDF 模型，通过配置启动文件将其可视化在 Rviz 中。为了验证机械臂的运动链路是否完整，我使用图形化 API——GUI 滑块对机械臂的七个关节角（Openarm_joint1~7）进行控制。

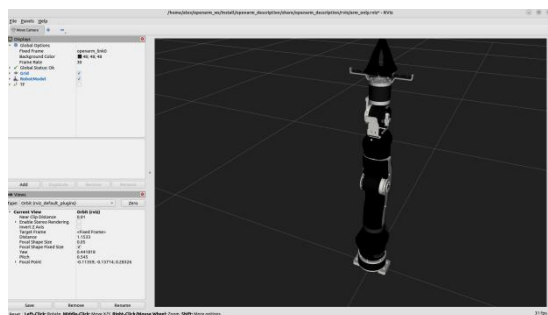


图 1.2.2 Rviz 平台可视化

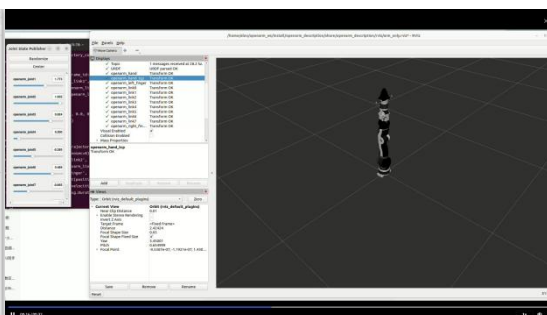


图 1.2.3 GUI 滑块控制

1.3. 运动学库构建：

为了寻找一个支持硬件在环仿真工作的运动学库，我必须使用 C/C++ 库，其中，KDL 库是一款应用较广且完整的开源库，其作为一个轻量级、跨平台的开源 C++ 库，专为关节型机器人（如机械臂）设计，提供了一套完整的工具链，用于解决机器人正逆运动学求解、雅克比矩阵计算、轨迹生成、刚体动力学分析等核心问题，是机器人开发中解决“运动规划与控制”核心问题的基础工具库，也是 ROS/ROS2 生态中运动学模块的核心依赖。

集成 KDL 进行正运动学验证是连接“关节空间”与“笛卡尔空间”的关键。然而，由于我最终要实现的目标是使用单片机进行虚拟机械臂控制，单片机无法调用基于 ROS2 的开源运动学库。因此，在验证了 KDL 库后，我对其进行解耦与

提纯，重新搭建了一个专用于单片机的运动学框架。

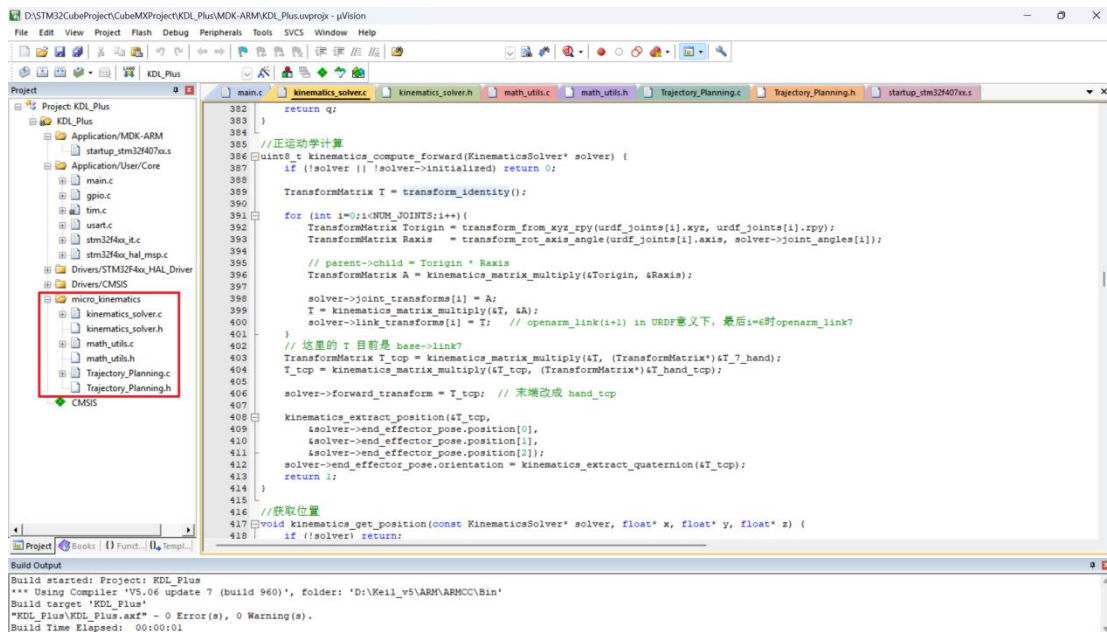


图 1.3.1 重构的 C 语言运动学库

如图 1.3.1，核心运动学文件为 kinematics_solver.c/h, math_utils.c/h, Trajectory_Planning.c/h，分别对应运动学求解器的构建、运动学解算所需的数学函数与工具、轨迹规划任务，总代码数约 1500 行。我使用结构体的形式将核心运动学函数封装在其中，便于调用，可移植性高。

1.4. 单片机移植：

基于重新构建的运动学库，我进行了单片机的算法移植。

众所周知，机械臂运动学解算是一个相对耗费算力的工程，因此我决定使用正点原子探索者开发板，其 MCU 为 STM32F407ZGT6，具有 FPU 浮点运算单元（一种集成在 MCU 中的硬件专用模块，专门用于加速浮点数运算操作）和足够的 RAM（192KB），可以高效处理浮点运算，且拥有丰富的各类接口，可以极大程度方便后续的调试。

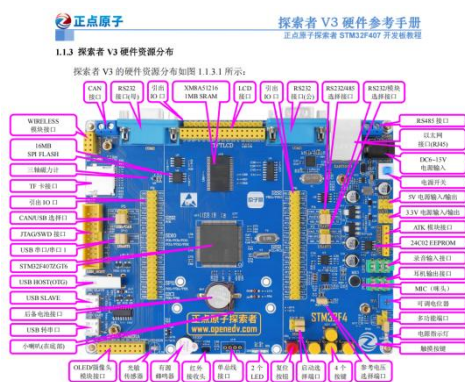


图 1.4.1 探索者 V3 硬件资源分布

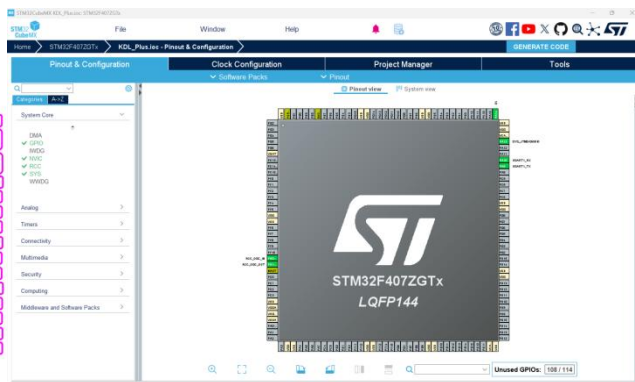


图 1.4.2 引脚资源与配置

我使用的工具链是 STM32CubeMX+Keilv5，是基于 HAL 库的 STM32 代码框架。为提高计算效率，选择使用外部高速晶振，将主频提升至 168MHz，并启用 FPU 浮点计算单元。开启 USART1，使用 DMA 传输的方式将计算结果通过 USBtoTTL 模块上传至 ROS 端。

在开始硬件在环仿真前，我首先对比了原生 KDL 库与单片机解算出的运动学数据，对单片机中的核心运动学代码进行验证，从而避免 ROS 虚拟环境迁移到嵌入式硬件中可能产生的错误，这也是现实工程中一个不可或缺的重要流程。

我在 Keil 与 ROS 中给定一致的机械臂 DH 参数和关节角指令，并用串口捕获输出的解算结果，如下图所示：

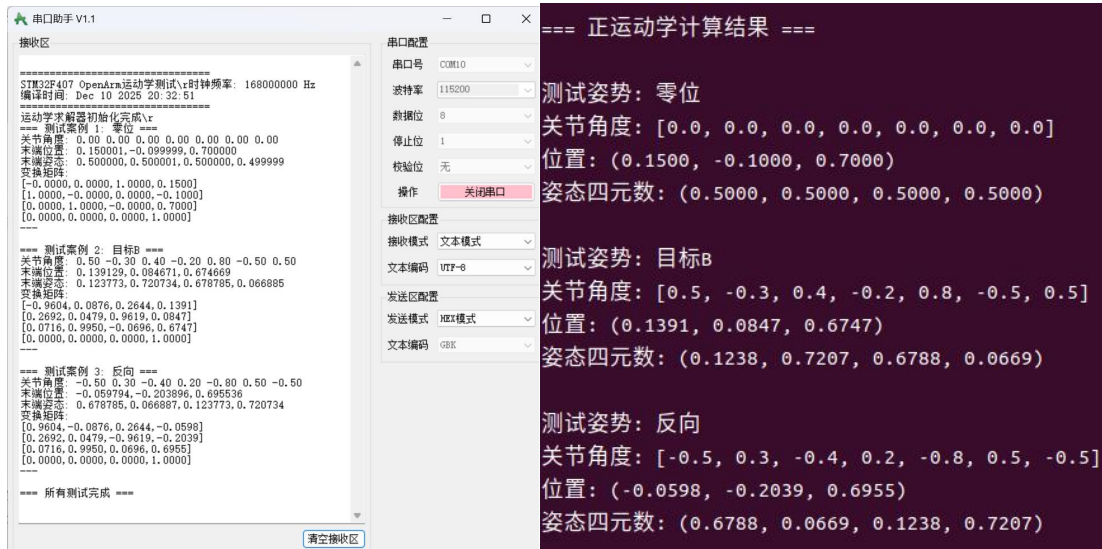


图 1.4.1 重构库的解算结果 (STM32 端)

图 1.4.2 KDL 库解算结果 (ROS 端)

通过与 ROS 端 KDL 库计算得出的结果相对比，可以发现两种方法算出的机械臂末端位姿数据完全一致，由此验证了重构库的核心运动学算法的正确性。

为了让 ROS 端能接受到 STM32 发送的数据，我创建了一个 Rviz 专用的串口节点脚本 scripts/rviz_serial_controller.py，将关节角数据以 json 格式发送至 Rviz 节点，从而实现对虚拟机械臂的控制。

1.5. 单臂运动学解算与轨迹规划：

在实现硬件在环仿真，成功打破了 STM32 与 ROS 之间的壁垒后，为了进一步加强机械臂的控制，我使用逆运动学进行机械臂的轨迹规划。

在这里，我使用了 DLS 伪逆法来处理逆运动学求解，通过引入一个阻尼系数 λ ，解决奇异性和不稳定性问题。流程是在每个迭代步骤中，计算关节的增量(dq)，并更新当前的关节角度，通过正运动学的验证与反馈不断逼近，直到达到目标位置，是冗余机械臂和高精度轨迹跟踪场景的主流解法。

$$J^+ = J^T (JJ^T + \lambda^2 I)^{-1}$$

图 1.5.1 阻尼最小二乘法雅克比矩阵伪逆公式

为了一步步实现复杂的轨迹规划，我将逆运动求解器的雅可比分为 3×7 位置版本和 6×7 位姿版本。其中，位置版本只考虑末端坐标 (x, y, z) ，位姿版本则是同时考虑坐标和姿态，相应的计算复杂度与计算速度也有算不同。

如下表所示，我为机械臂设计了其中运动模式，分别用于验证正运动学，逆运动学，测试求解器性能等。

模式ID	类型	名称	描述	作用
模式 0	正运动学	关节角正弦波	各关节独立正弦波运动	验证硬件在环是成功
模式 1	正运动学	步进测试	5个固定位置循环切换	验证正运动学精度
模式 2	正运动学	慢速平滑正弦波	低频正弦波，运动更平滑	验证正运动学动态性能
模式 3	逆运动学	末端画圆	XY平面上的圆形轨迹，Z固定	验证平面轨迹跟踪精度
模式 4	逆运动学	末端X轴往返	X方向直线往复运动	验证单轴动态性能
模式 5	逆运动学	末端Y轴往返	Y方向直线往复运动	验证单轴动态性能
模式 6	逆运动学	末端Z轴往返	Z方向直线往复运动	验证垂直方向性能

图 1.5.2 重构的 C 语言运动学库

1.5.1. 3×7 位置版本

对于位置快版本，雅可比矩阵的维度是 3×7 ，末端误差维度是 $e = [dx, dy, dz]$ ，DLS 伪逆也是 3×3 。其轨迹规划效果如下：

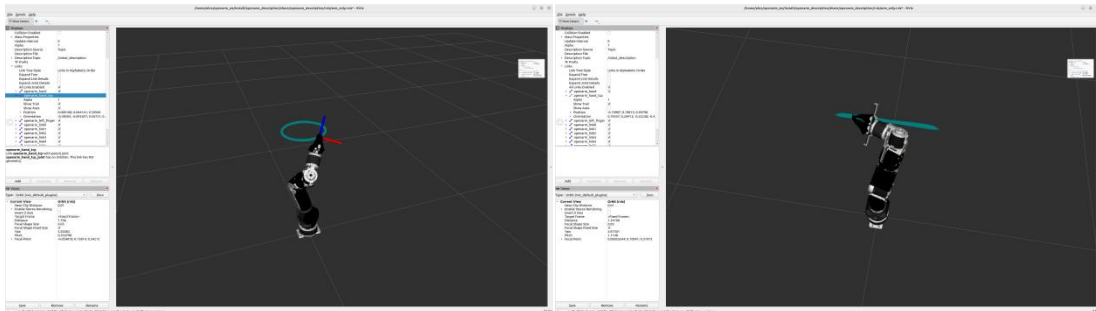


图 1.5.3 case3:XY 平面画圆

图 1.5.4 case4:沿 X 轴画直线

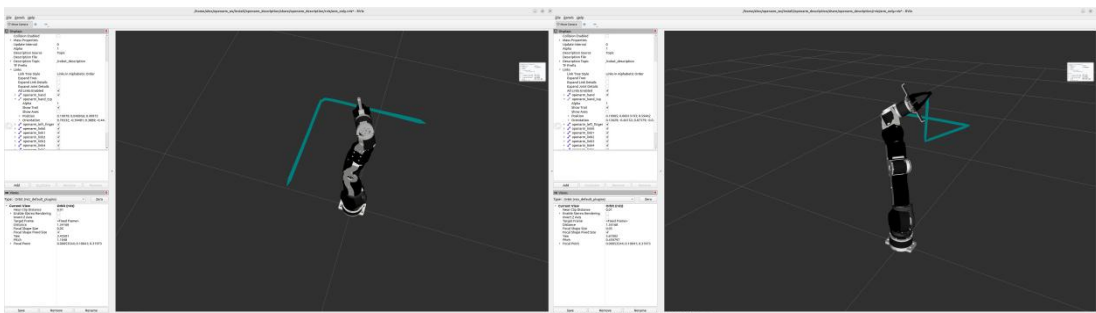


图 1.5.5 case5:沿 Y 轴画直线

图 1.5.6 case6:沿 Z 轴画直线

1.5.2. 6×7 位姿版本

3×7 位置版本只关注末端执行器的坐标，而不考虑姿态，和现实中的轨迹规划仍有差距。为了实现更加优雅的控制，我进行了算法的升级，将 3×7 坐标雅可比升级为 6×7 位姿雅可比。 3×7 位置版本到 6×7 位姿版本的核心变化只有三件事：

1. 雅可比从 3×7 变成 6×7 (线速度 + 角速度)

- 误差从 $e=[dx \ dy \ dz]$ 变成 $e=[dx \ dy \ dz \ d\theta_x \ d\theta_y \ d\theta_z]$ (姿态用“旋转向量”误差)
- DLS 伪逆从 (3×3) 逆变成 (6×6) 逆位姿版本的逆运动学控制效果如下:

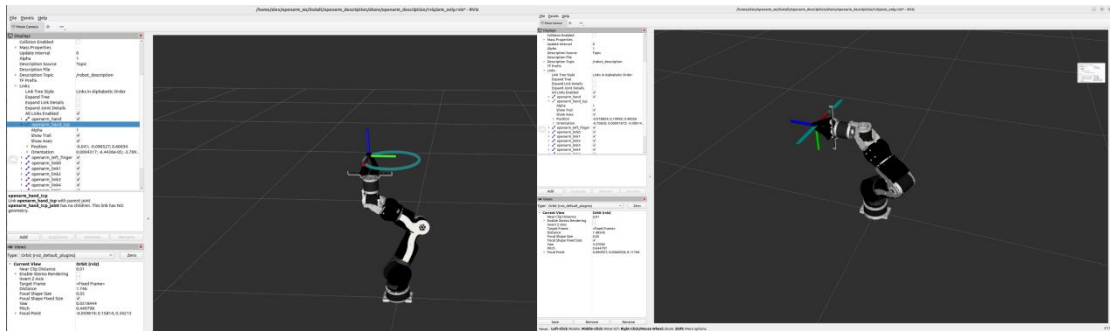


图 1.5.7 case3:XY 平面画圆

图 1.5.8 case4:沿 X 轴画直线

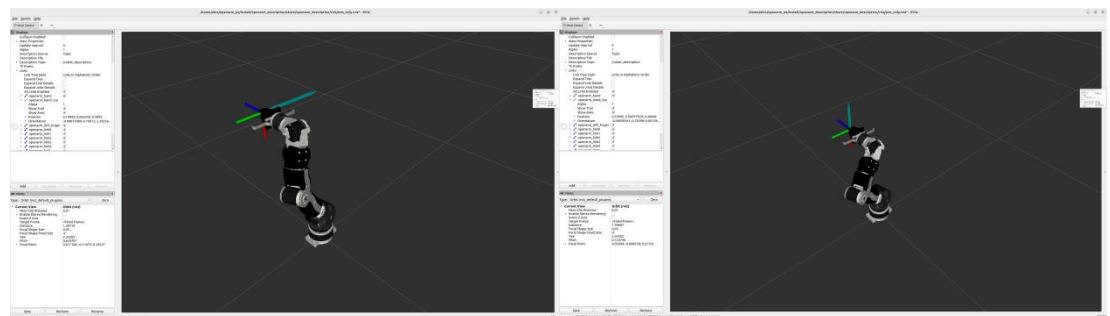


图 1.5.9 case5:沿 Y 轴画直线

图 1.5.10 case6:沿 Z 轴画直线

通过对比可以观察到, 在 6×7 位姿版本的控制下, 机械臂末端执行器的姿态会根据目标轨迹进行改变。

至此, 我实现了单个 S-R-S 机械臂的完整运动学解算与轨迹规划。

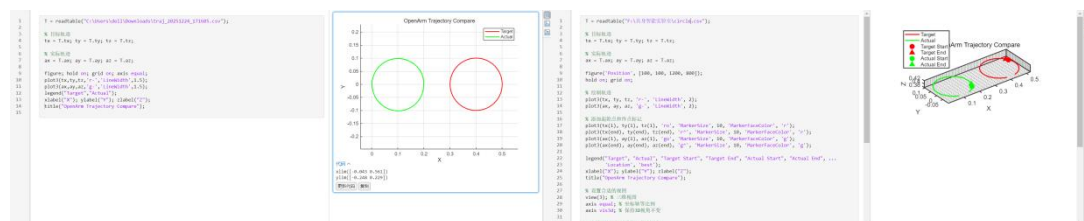
1.6. 运动学性能分析:

为了验证逆运动学算法的精度、效率等性能, 我通过记录目标轨迹和实际轨迹的数据, 将其在 matlab 上拟合进行对比, 从而观察轨迹规划的效果, 并通过 STM32 的时钟定时器测出一次逆运动学计算需要的时间来评估效率。

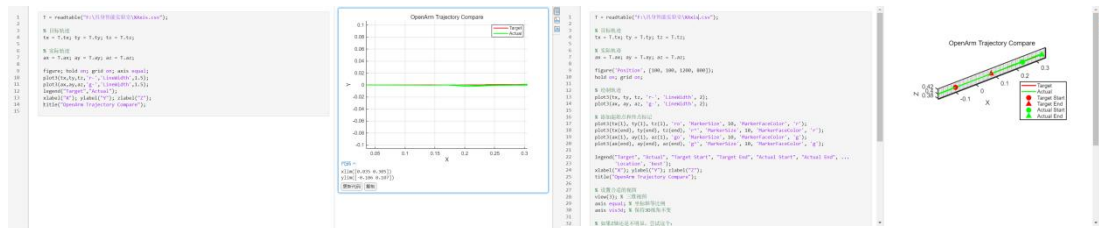
1.6.1. 轨迹精度

我在 ROS 端创建了轨迹生成模块, 将机械臂末端的理想位姿与实际位姿数据记录在 CSV 文件中。为了拟合这些数据点, 我在 Matlab 中创建了一个可视化脚本, 将提取到的数据组拟合为不同颜色的目标轨迹与实际轨迹, 拟合效果如下:

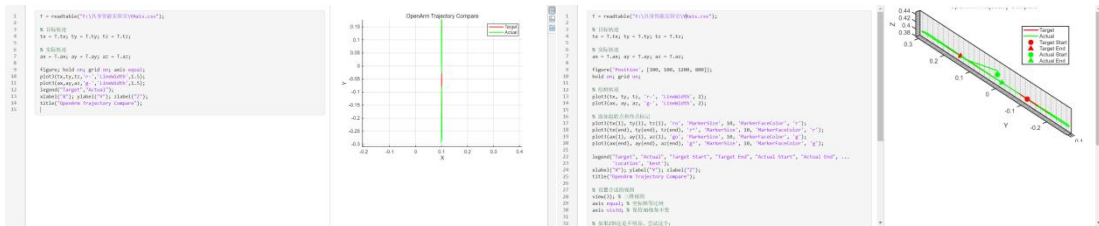
case3:在 XY 平面画圆



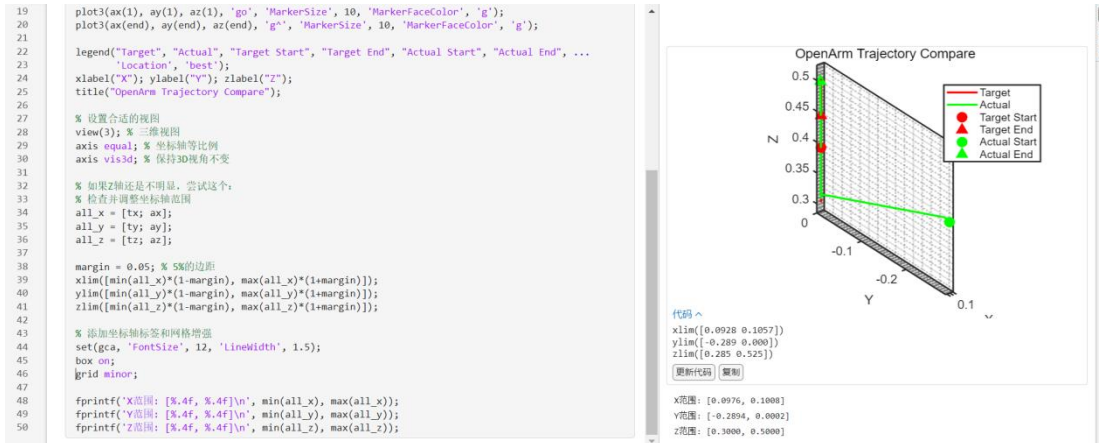
case4:沿 X 轴画直线



case5:沿 Y 轴画直线



case6:沿 Z 轴画直线



1.6.2. 计算效率

单片机都有硬件定时器，可以用于高精度地测量时间。使用硬件定时器的方法通常是精确且不受程序其他部分影响的。STM32F407 的 TIM2/TIM5 是 32 位通用定时器（计数范围 $0 \sim 0xFFFFFFFF$ ），远超 16 位定时器（ $0 \sim 0xFFFF$ ），既保证高精度又避免频繁溢出。

因此，在 STM32 端，我启用了通用定时器 TIM2，其定时器时钟最高 84MHz（APB1 时钟 $42MHz \times 2$ ），其最高精度可达到 11.9ns，完全足够满足此处的测试。

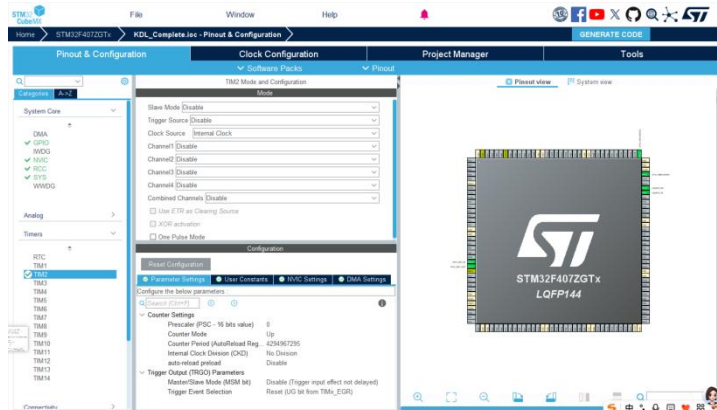


图 1.6.2.1 定时器配置

我使用的计时函数是 `_HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim2)`，其定时器计数原理由纯硬件实现，无需中断、无需 MCU 干预，计数过程和代码执行完全独立，精度为硬件级，无软件延迟。

前面我们提到，STM32F407ZGT6 具有专门用于浮点计算的 FPU，能提高浮点运算的效率。在这里为了形成对比，我用串口接收了四种条件（快（慢）版本有（无）FPU）下的逆运动学解算时间，如下所示。

3×7 坐标 IK:

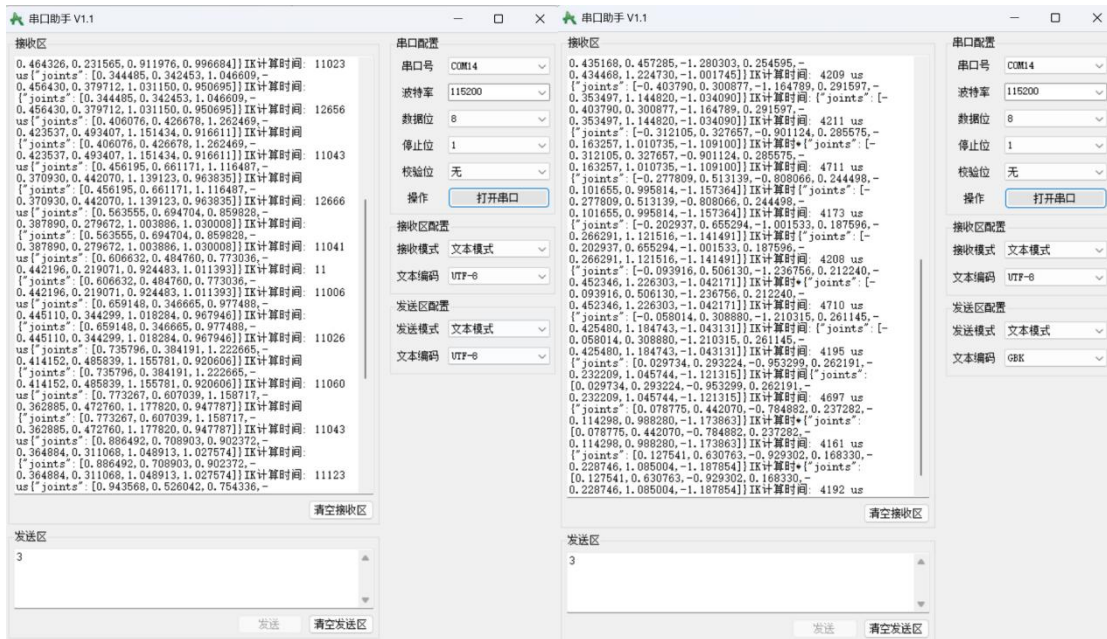


图 1.6.2.2 未启用 FPU

图 1.6.2.3 启用 FPU

6×7 位姿 IK:



图 1.6.2.4 未启用 FPU

图 1.6.2.5 启用 FPU

可以看出：

- 3×7 坐标 IK 不启用 FPU 时单次解算时间大约在 11000~12000us 间；
- 3×7 坐标 IK 启用 FPU 时单次解算时间大约在 4000~5000us 间；
- 6×7 坐标 IK 不启用 FPU 时单次解算时间大约在 14000~40000us 间；
- 6×7 坐标 IK 启用 FPU 时单次解算时间大约在 6000~8000us 间；

根据分析，3×7 坐标 IK 整体相较于 6×7 坐标 IK 更快，是因为其只需要解算位置而不用考虑姿态，维度更低，计算更简洁；而启用 FPU 与否同样对计算效率有较大影响，因为代码中的计算使用了大量的浮点数。

综上，结果符合预期。

1.7. 半人形机器人整体控制：

完成了上述的单臂解算和性能分析流程后，我开始进行完整的 OpenArm 半人形机器人的控制，其核心在于双臂解算与协同控制。我创建了一个 xacro 脚本，将完整的 OpenArm 半人形机器人模型导入 Rviz 中，经过校位和调整后的效果如下：

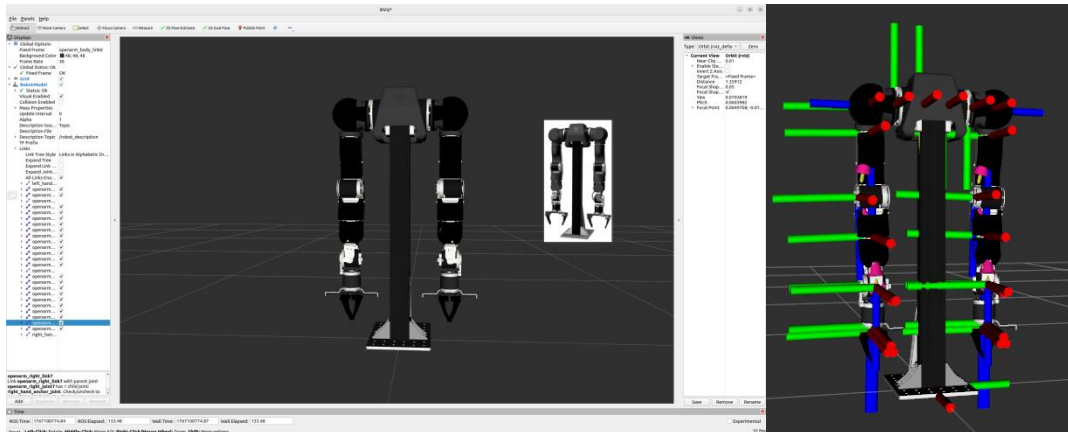


图 1.7.1 OpenArm 半人形机器人

图 1.7.2 关节轴

为了验证其结构完整性与节点是否正确，我同样在单片机控制前先启用了 GUI 滑块控制器。

由于之前在进行单臂解算时，我已经将核心运动学函数都以结构体形式封装在专门的运动学文件中，因此将其扩展为双臂控制的应用较为方便。然而，半人形机器人的整体控制并非简单的将双臂*2。在坐标对齐和双臂的协调控制上，还需要多花功夫。

为了实现对机器人双臂的实时控制，每次发送的 json 数据中需要包含 14 个关节角数据，并且我定义的发送频率为 20Hz，这样的中断频率不利于 MCU 的进程运行，并且容易造成数据丢包或覆盖的现象。于是，我启用了单片机的一个独立外设控制器——DMA（直接存储器访问），核心作用是让数据在“内存”和“外设”之间（或内存和内存之间）直接传输，不仅全程不需要 MCU 参与，还能提高数据的传输速度，非常适用于快速连续的数据传递。

随后，我创建了三个任务对其进行关节角的控制，分别是双臂同向运动、双臂镜像运动、双臂此起彼伏模拟步态运动：

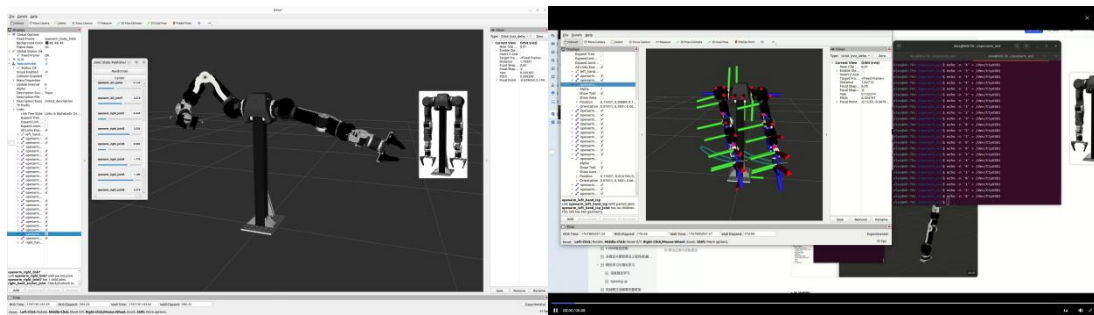


图 1.7.3 GUI 滑块控制

图 1.7.4 双臂同向运动

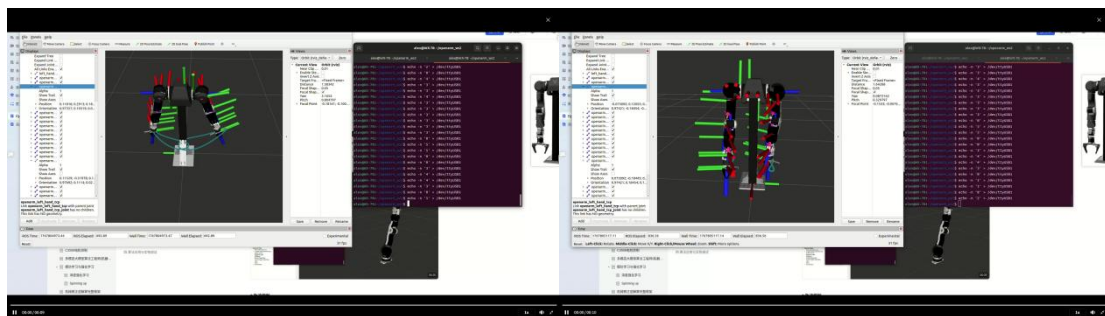


图 1.7.5 双臂镜像运动

图 1.7.6 模拟步态

后续工作中，我将继续推进半人形机器人的整体轨迹规划与双臂协同控制。

2. “玄武”——自动化喷药喷灌一体机机器人

暑假期间，我和两名队友参加了中国机器人大赛农业灌溉组，凭借“玄武一代”机器人获得了省冠军的好成绩。为了适应国赛的避障场景，我对其进行了升级迭代，由原来的四轮差速底盘改为具有更强机动性的舵轮底盘，设计了更加强大的“玄武二代”（整体建模见 2.4）。



图 2.1.1 省赛奖杯

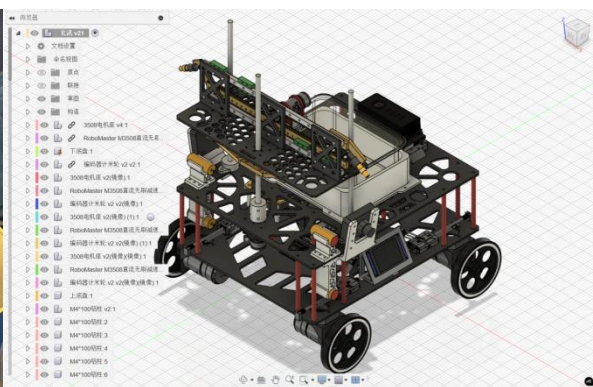


图 2.1.2 “玄武一代”整体建模

机器人搭载 Maixcam 视觉模块、红外测距传感器、TTS 语音模块、TFT 液晶显示屏等外设，可精准识别农作物生长状况与需水需求，并根据给定顺序进行有序喷灌，实现智能化、自动化的灌溉与农药喷洒作业，有效提高水资源和农药利用率，降低农业生产成本。

期间，我负责喷灌机器人的机械工作，独立设计了整车的机械结构，下面我将对我的机械工作部分进行叙述：

2.1 底盘部分：

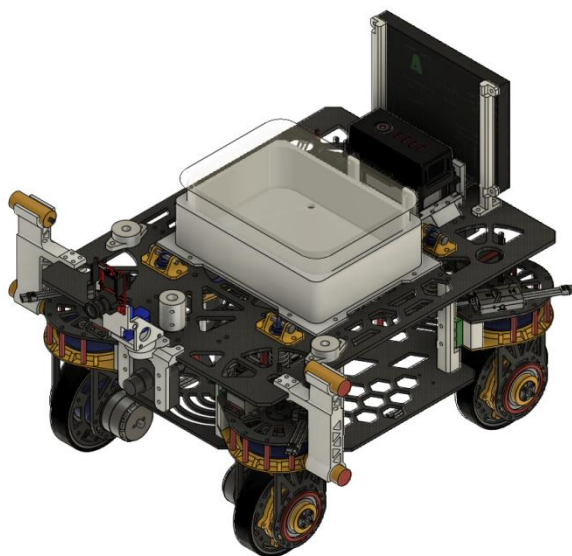


图 2.1.1 底盘建模

2.1.1 结构设计：

分为上底盘和下底盘，采用分层式结构。这种设计能将不同功能模块独立布置，将动力系统安装在下底盘，控制与视觉系统布置在上底盘，便于安装、调试和后期维护，同时减少不同模块间的干扰。

在“玄武一代”的基础上，我将其升级为舵轮底盘，搭配自适应悬挂系统，避障性能与地形适应性能优越。

2.1.2 材料选择：

底板采用碳板，质量轻，结构强度高，便于加工和安装，也便于后期增加其他功能，提高拓展性。

支撑结构采用 M5*150 铝柱，采用铝合金材质。铝合金具有密度低、强度高、抗腐蚀性能好的特点，能在保证底盘结构强度的同时，减轻整体重量，降低能耗，提高机器人的移动灵活性。

悬挂上部分结构件选用 CNC 铝件，轻量化且强度高。其余部分零件选用 3D 打印件，定制化程度高，适用于非标结构件。

2.2 舵轮设计：

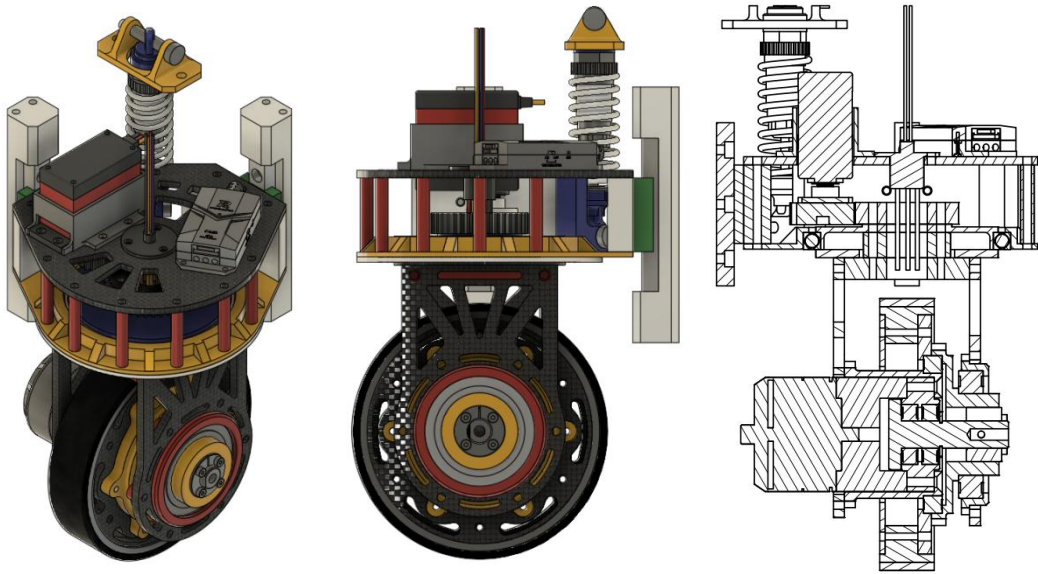


图 2.1.1 舵轮建模

2.2.1 结构设计：

舵轮为“玄武二代”的核心升级，我独立开发设计了这款集成伺服转向机构与减震系统的驱动舵轮，并发表了专利。



图 2.2.1.1 专利受理

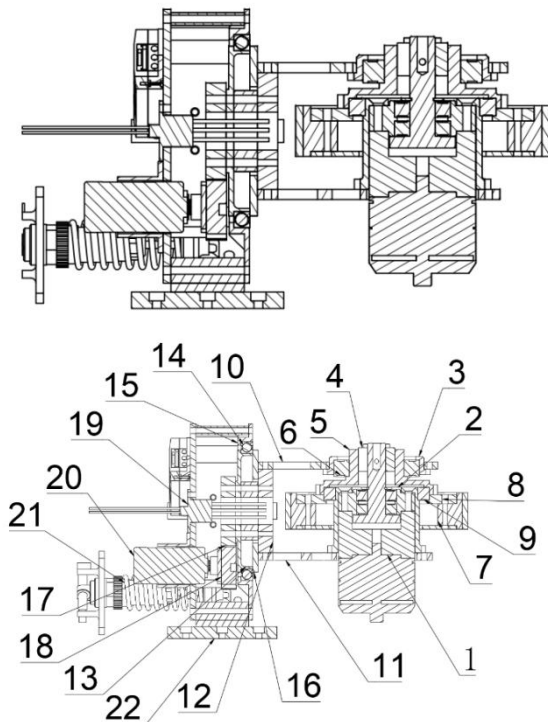


图 2.1.2 舵轮说明书

其中的核心结构包括避震器、伺服电机、无刷驱动电机、铝柱、连接架、转向齿轮和定位台。使用伺服电机搭配 1: 1.5 减速比驱动实现 360 度转向，加入

避震器连接底盘，确保车体平台在经过起伏路段时不会造成抖动和倾斜。轮毂轴系和转向轴系设计，减小转向和驱动的机械阻力。

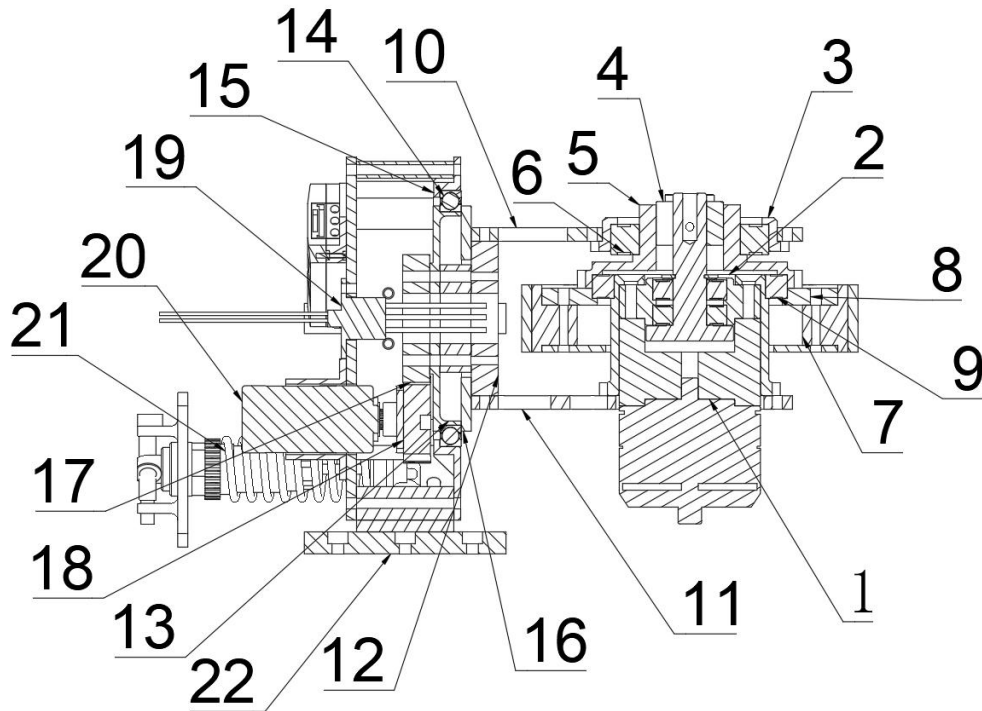


图 2.1.1.3 舵轮结构示意图

图中：1、电机；2、电机支架；3、上端轴承外支撑；4、涨套；5、输出转接件；6、上端轴承；7、轮毂；8、外侧轮辐；9、下端轴承；10、外轮支承；11、内轮支承；12、桥接件；13、舵上轴承内支撑；14、舵上轴承；15、舵上轴承外支撑；16、舵上轴承下支撑；17、从动齿轮；18、主动齿轮；19、滑环；20、伺服电机；21、避震器；22、滑轨。

电机 1（大疆 C3508）通过沉头螺丝安装在电机支架 2 上，电机支架 2 为 CNC 金属件，侧方留有一圈平台作为下端轴承 9 的内侧下支撑，电机 1 的输出轴通过涨套 4 将扭矩传递给输出转接件 5，而输出转接件 5 与外侧轮辐 8 连接，从而驱动滚轮转动。

上端轴承 6 与下端轴承 9 形成双端支撑，共同起到支撑作用。其中上端轴承 6 内侧与输出转接件 5 外侧接触，外侧与上端轴承外支撑 3 内侧接触，而上端轴承外支撑 3 与外轮支承板 10 连接，从而支撑上方重量；下端轴承 9 内侧与电机支架 2 的侧方槽接触，外下侧与外侧轮辐 8 的内侧槽接触，外上侧与输出转接件 5 内侧槽接触，从而起到对轴承的定位作用与对电机和滚轮间压力的传导作用。

外轮支承板 10 与内轮支承板 11 作为舵下轮组和舵上底盘的连接，共同起支撑作用，此二个支承板中间通过桥接件 12 连接，从而控制受力方向为纵向不发生偏移。

舵上部分由伺服电机 20 驱动，伺服电机和具有 24 齿的从主动齿轮 18 连接，具有 36 齿的从动齿轮 17 与主动齿轮 18 啮合，构成 1: 1.5 减速比（可通过调整齿轮齿数改变减速比），从而增大转向扭矩。

从动齿轮 17 与舵上轴承内支撑 13、垫块、桥接件 12 相连接，从而和舵下轮组保持一致的转动。其中舵上轴承 14 是四点接触球轴承，作为转接轴承，其内

侧与舵上轴承内支撑 13 接触，内下侧与舵上轴承下支撑 16 接触，外侧与舵上轴承外支撑 15 接触，起到对轴承的定位作用和舵上底盘与舵下轮组的支承力传导作用。

伺服电机 20、滑环 19、电调安装在上方板件，滑环 19 一端与舵下轮组的电机线相接，另一端与舵上的电调相接，从而优化走线，避免转向导致的线路缠绕或损坏。

避震器 21 上下两端均通过塞打螺丝铰接在悬挂支架，而滑轨 22 与安装在舵上垫块的滑块形成滑动配合，从而约束了避震器 21 收缩或拉伸时的行程与方向。

2.2.2 材料选择：

舵轮的整体材料由碳板、CNC 铝件、3D 打印件组成。其中碳板主要作为两侧支撑件与轮辐等受纵向应力的平直结构件，CNC 铝件主要作为轮毂、轴承支撑等立体定制化结构件，3D 打印件则主要作为不受主要负载的非标结构件。

这样选材的好处是可以最大程度利用到各个材料的特性，适合加工制造工艺。

2.3 云台部分：

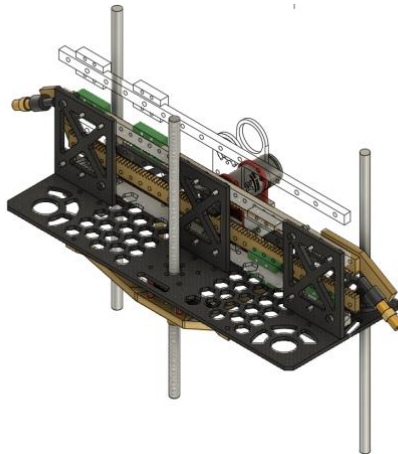


图 2.3.1 云台建模

2.3.1 结构设计：

上层有多个安装位置和支撑结构，可安装各类电子设备、传感器和执行机构等，布局紧凑且合理，预留了不同设备的安装接口和固定位置。传动部分通过丝杆、线轨、齿轮齿条等连接件将各部件、各层结构紧密连接在一起，确保整体结构的稳固性。使用丝杆螺母进行垂直方向上的移动，具有较高的定位精确性。同时，使用铝柱进行轴向限位，降低摩擦的同时提高稳定性。在横向方向上，利用齿轮齿条结构进行驱动，简单便捷，灵活性高，扩展了喷头的喷灌范围。这种结构尤其适用于动态调节喷洒高度或角度的需求，例如在靠近高秆作物时自动升高，在短矮作物上方自动降低，实现精准对位灌溉，同时降低水资源浪费。

用于安装控制主板、通讯模块、摄像头等设备，是机器人实现数据处理、信号传输、环境感知等功能的核心区域。

2.3.2 材料选择：

支撑结构采用铝柱。铝合金材料成本相对较低，加工方便；碳纤维材料强度高、重量轻，能在减轻重量的同时保证结构的稳定性，适合对重量和强度要求较高的上层设备安装支撑。

2.4 整车建模及实物展示：

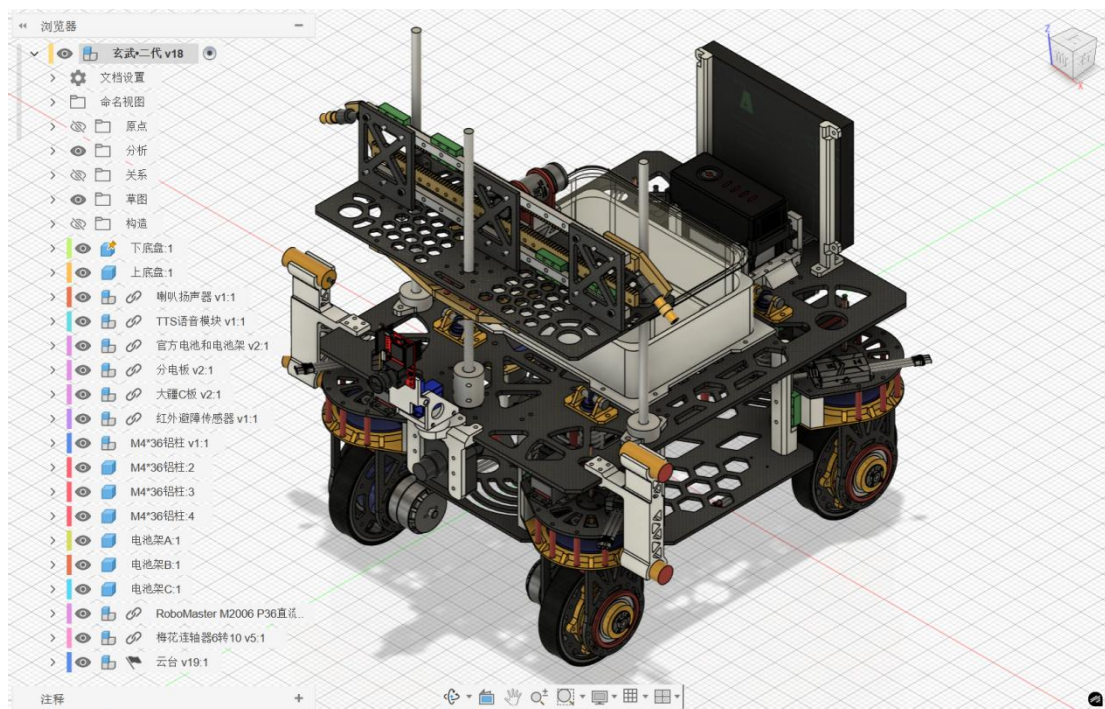


图 2.4.1 主视图

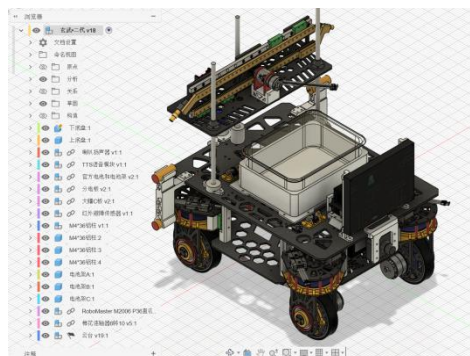


图 2.4.2 侧后方视图

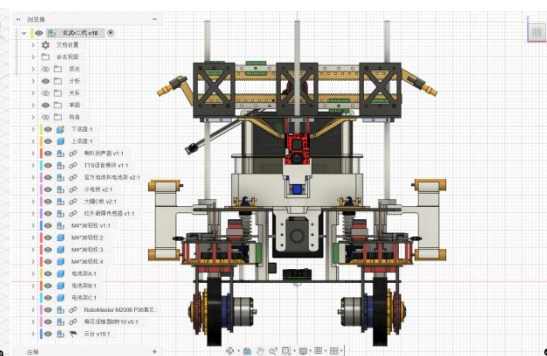


图 2.4.3 正视图

10月中旬，我们携带“玄武二代”前往石家庄参加中国机器人大赛 2025 国赛，获得了国一的好成绩。下图为“玄武二代”实物图及比赛场景：



图 2.4.4 石家庄赛场合影



图 2.4.5 “玄武二代”比赛场景

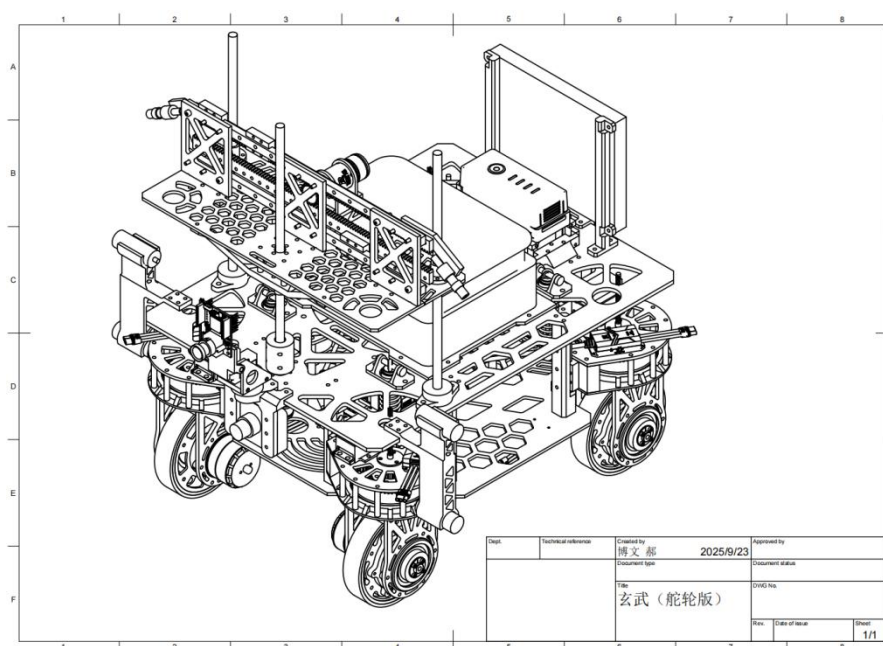


图 2.4.6 工程图

3. 双自由度视觉云台跟随小车

暑假中期，我和队友参加了全国大学生电子设计大赛，共同设计了具有双自由度视觉云台跟随功能的小车，并获得了省一等奖的佳绩。

3.1 赛道介绍：

我们选择的赛题为 E 题，要求设计制作一个“简易自行瞄准装置”，该装置包括自动寻迹小车及瞄准模块两部分。自动寻迹小车行驶必须采用 TI MSPM0 系列 MCU（简称 MSPM0）控制（包括巡迹、电机控制）；瞄准模块以小车为载体，利用二维云台控制蓝紫激光笔发射激光的方向，使激光光斑落在目标靶上，靶上

光斑直径 $\leq 0.5\text{cm}$ 。要求 MSPM0 控制器和瞄准模块的电源分别由两个独立开关控制。简易自行瞄准装置场景如下图所示：

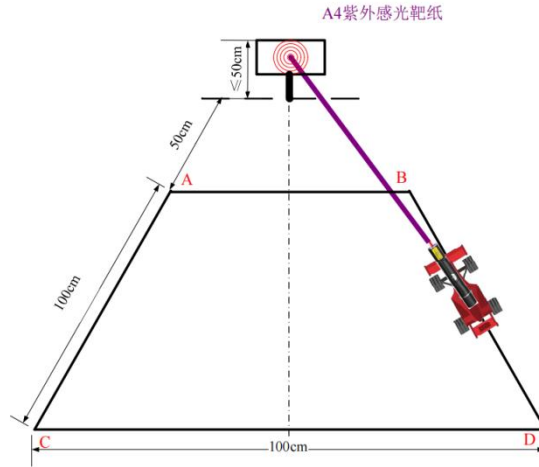


图 3.1.1 比赛场景示意图

3.2 方案设计：

关于机器人整体方案的设计，我们将其拆解为云台，视觉模块，底盘类型几个方面。在云台选型方面，我们对比了步进电机、舵机、大疆 GM6020 云台电机等；在视觉模块选型方面，我们对比了 OpenMV、Maixcam、K210 等；在底盘选型方面，我们对比了舵轮底盘、全向轮底盘、四轮差速底盘等。

通过对规则的研究与硬件参数的细致分析，我们最终选定了如下图所示的整体方案：

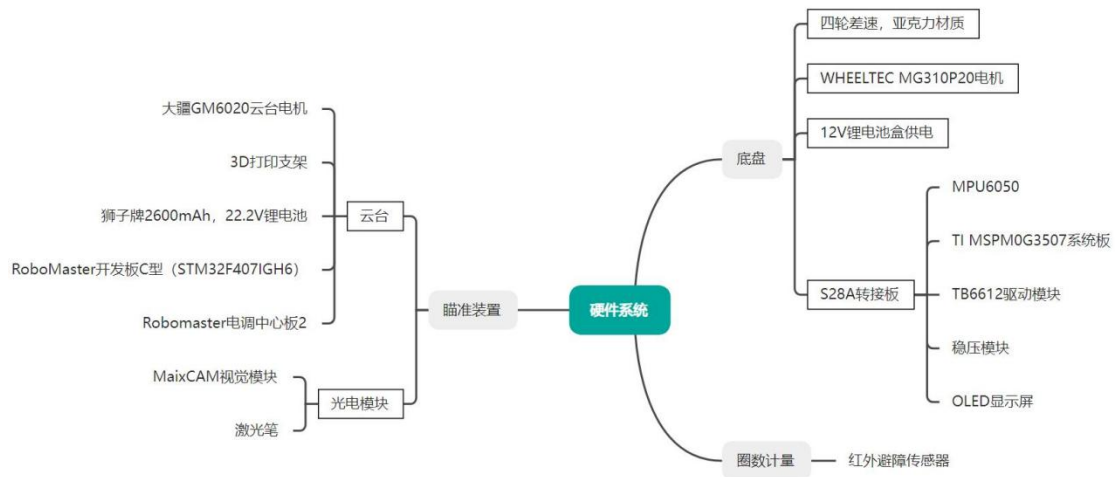


图 3.2.1 方案设计

3.3 机械工作：

机械设计的核心在于二自由度云台的协调，为了降低小车转向时 Yaw 轴带来

的转动惯量，我将云台设计在小车中心，视觉模块的摄像头在 Yaw 轴电机的空心轴中心线上，激光点的高度与靶心一致，激光笔与摄像头同轴安装，消除视觉误差。整体使用打印件设计部分转接件的建模及整车实物图如下：

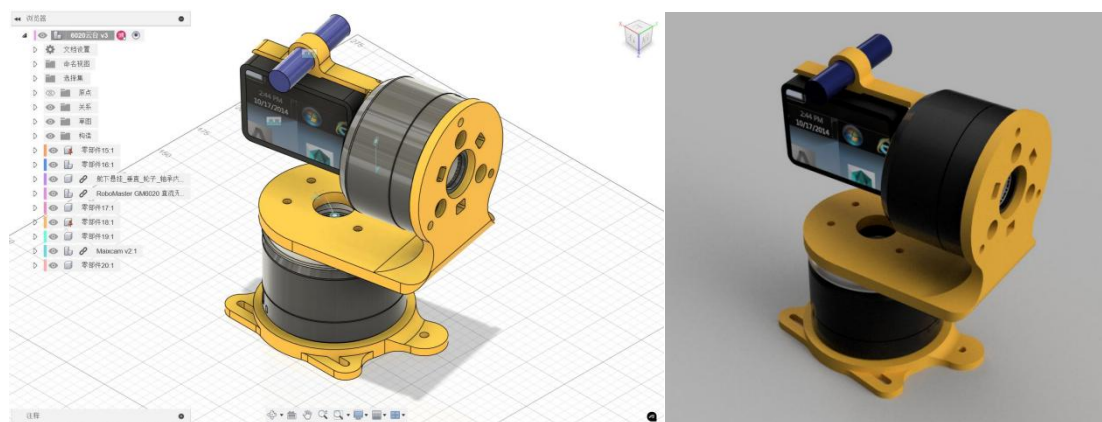


图 3.3.1 小车实物与建模

3.4 电控工作：

电控工作的核心在于底盘循迹与云台视觉追踪。

其中，底盘的循迹功能主要依赖 mpu6050 陀螺仪与八路红外循迹模块，配合 PID 误差矫正，可实现稳定的巡线功能。

而云台的视觉追踪功能则依托于 OpenCV 图像处理与深度学习识别 (YOLOv5) 相结合的方法，通过识别并提取目标，经过过滤算法与云台电机串级 PID 调控，实现视觉系统的稳定追踪，其通信架构如下图所示：

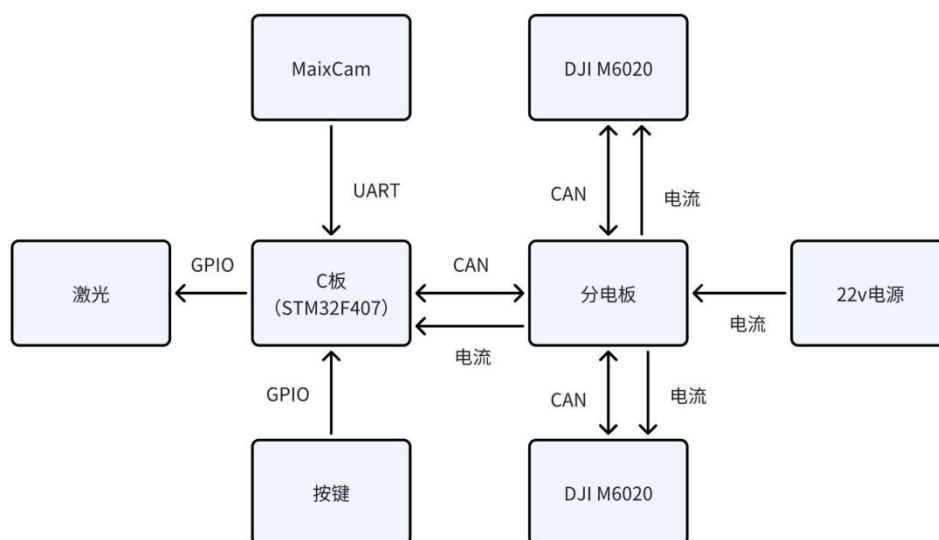


图 3.4.1 通信系统

3.5 完成效果：

测试项目	条件	测试结果	是否达标	分析
静态瞄准精度	距离 50cm	激光点平均偏移 \approx 9mm	优于题目要求的 2cm	视觉算法与云台控制良好
动态目标追踪	目标移动速度 0.3m/s	命中率 64%	还需优化	云台控制存在滞后
底盘循迹	云台断电	稳定，且能控制圈数	达标	底盘 PID 解算良好
画圆	循迹同步	偏差约为 4cm	超出题目给的误差范围	云台控制存在滞后

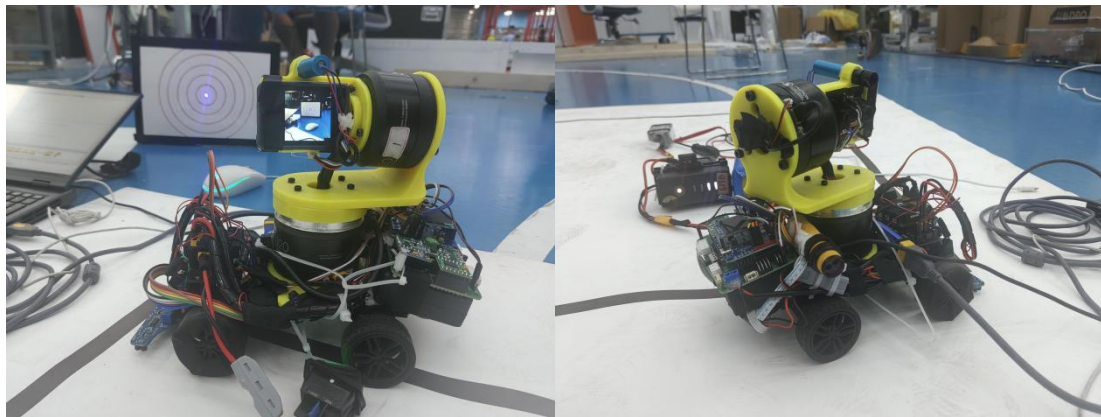


图 3.5.1 实物图

3.6 拓展应用：

本学期的自动控制原理大项目是设计一款台灯，我们决定制作一款能实现多模式交互并为使用者提供帮助的台灯小桌宠。在联想到二者具有相似的硬件系统后，我决定将其改造为多模式台灯小桌宠。

THE WELDING ASSISTANT LAMP. INTELLIGENCE MEETS PRECISION.



ADVANCED FEATURES & TECHNOLOGY

MULTI-LEVEL SOFT LIGHT ADJUSTMENT.
Custom brightness and color temperature, ensuring optimal visibility for detailed work.

AUTO-WELDING OBJECT TRACKING.
Advanced AI camera system to track welding point automatically.

GESTURE MODE RECOGNITION
Touchless control for air purification and safety during work.

FAN FOR HARMFUL GAS REMOVAL
Integrated fan system for air purification and safety.

VERSATILE USE SCENARIOS



TECHNICAL SPECIFICATIONS

- Battery Life: 12h
- Power Output: 25W
- Light Output: Adjustable up to 2000 lumens
- Noise Level: < 20dB
- Dimensions: 220 * 150 * 400mm

EFFORTLESS WELDING, THOUGHTFUL DESIGN. Designed for Professionals. Available Now.

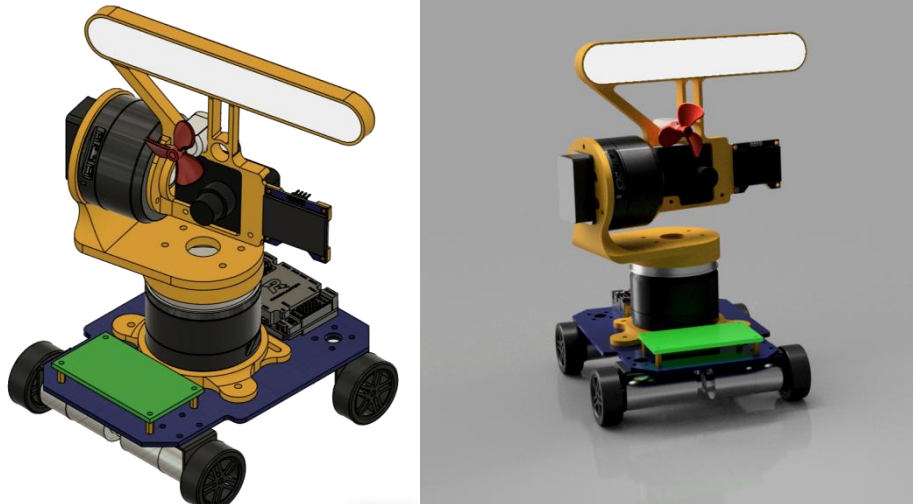


图 3.6.1 多模态台灯桌宠建模与渲染图

然而与电赛小车不同的是，台灯小桌宠的侧重点不在于目标追踪的精度，而是在于人机之间的多模态交互。这次，我为视觉模块 Maixcam 写入了三个功能程序，并为语音模块 ASRPRO 写入了语音交互程序。

功能一：使用单目标学习检测（SOT）算法 NanoTrack 实现框选目标物品并提取深度特征，其特点是无需训练，直接框选目标物品即可实现检测与跟随，适用于日常生活场景。

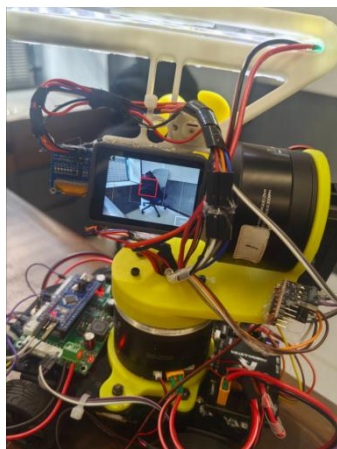


图 3.6.2 自学习（脱机）



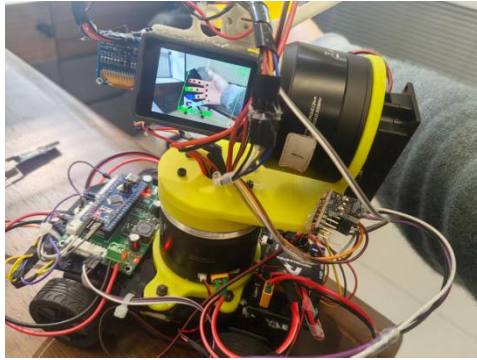


图 3.6.4 手势识别（脱机）

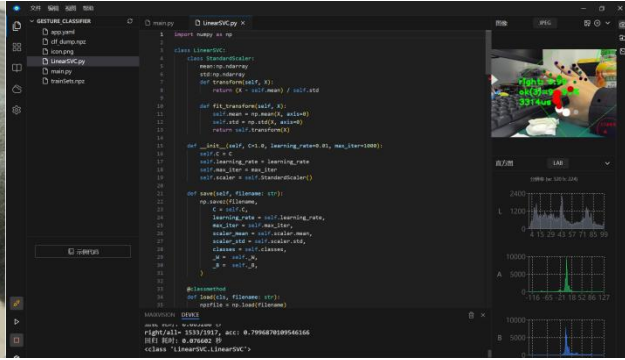


图 3.6.5 手势识别源码

功能三：使用 YOLOv8-face 模型检测人脸，将人脸裁剪为标准人脸图后，通过关键点提取与分类模型判断实现对用户情绪的检测与互动。如识别到主人高兴时，桌宠会发出欢快的蜂鸣器音效，OLED 上显示开心表情，身体左右摇摆上下起舞等。

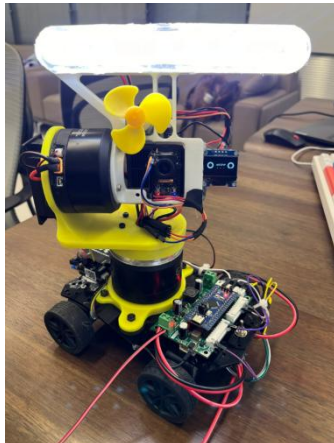


图 3.6.6 情绪识别与互动

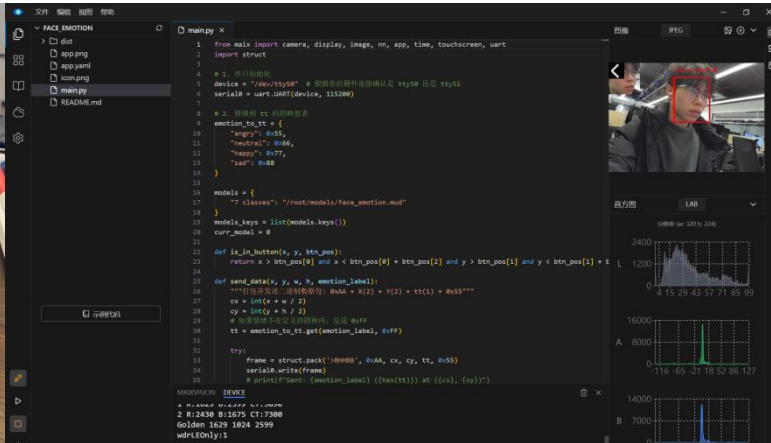


图 3.6.7 人脸情绪识别源码

功能四：通过提示词唤醒台灯小桌宠，用声音直接控制台灯亮度与风扇开关。

此外，我使用 I2C 协议实现了 OLED 小显示屏与 STM32 之间的通信，控制台灯小桌宠在不同模式下展示不同表情，为用户提供满满情绪价值。

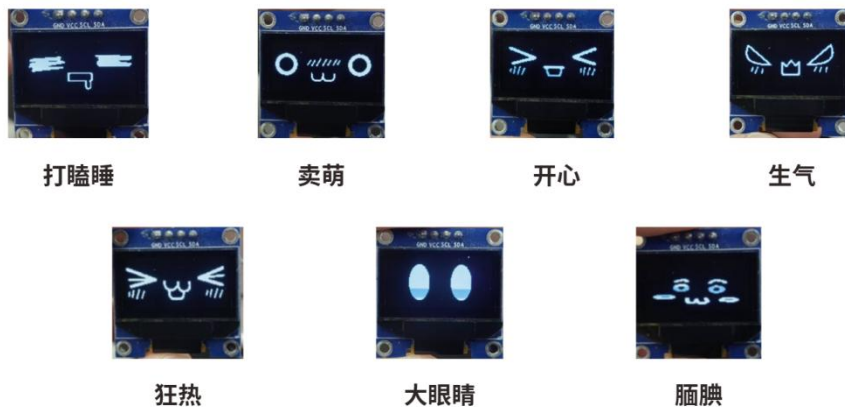


图 3.6.8 OLED 表情

4. 创业团队实践：

本学期我在“随身微气候”团队中担任核心成员，主要负责市场调研、用户访谈、痛点分析等工作。

团队四人在过往的课程项目中有过多次合作，并组队打过多个比赛，性格与技能互补。我们从本学期 10 月份开始即组成团队。我全程参与了从灵感汇报到立项汇报的各个阶段。

4.1. 桌面调研

在最开始决定走制氧方向时，我负责了需氧人群与场景的桌面调研，深入分析包括疾病人群、老年人、孕妇等群体需氧的底层逻辑，对不同场景下氧气需求的侧重点进行了对比，并通过查找文献等收集出具体数据。

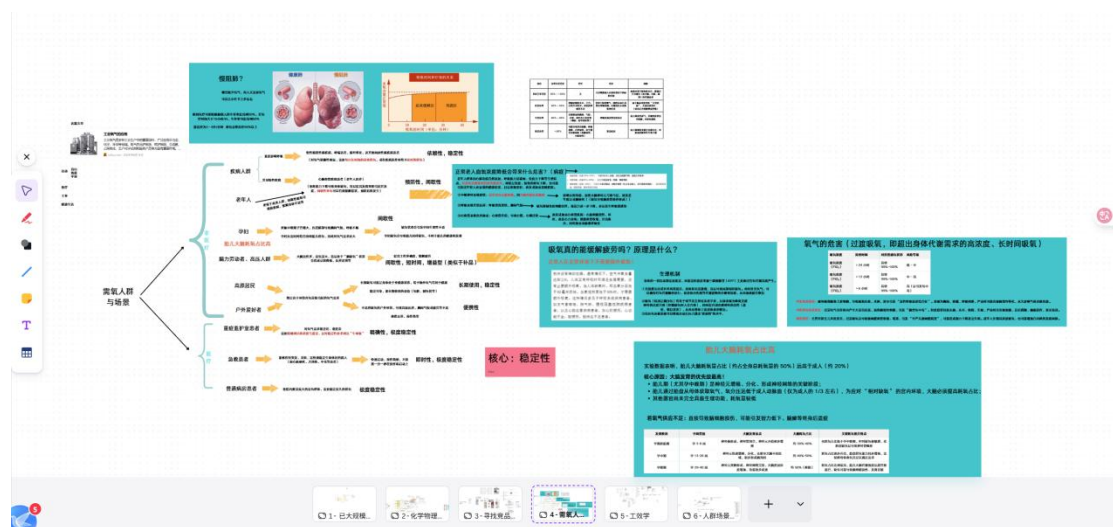


图 4.1.1 需氧人群与场景调研

4.2. 拆机实践

在团队购买了一款市面上销量较好的海尔制氧机后，我和团队成员共同进行了拆机，并记录了拆机文档，对制氧机不同模块的作用及工作原理进行深入分析，并对相关技术做了了解与学习。

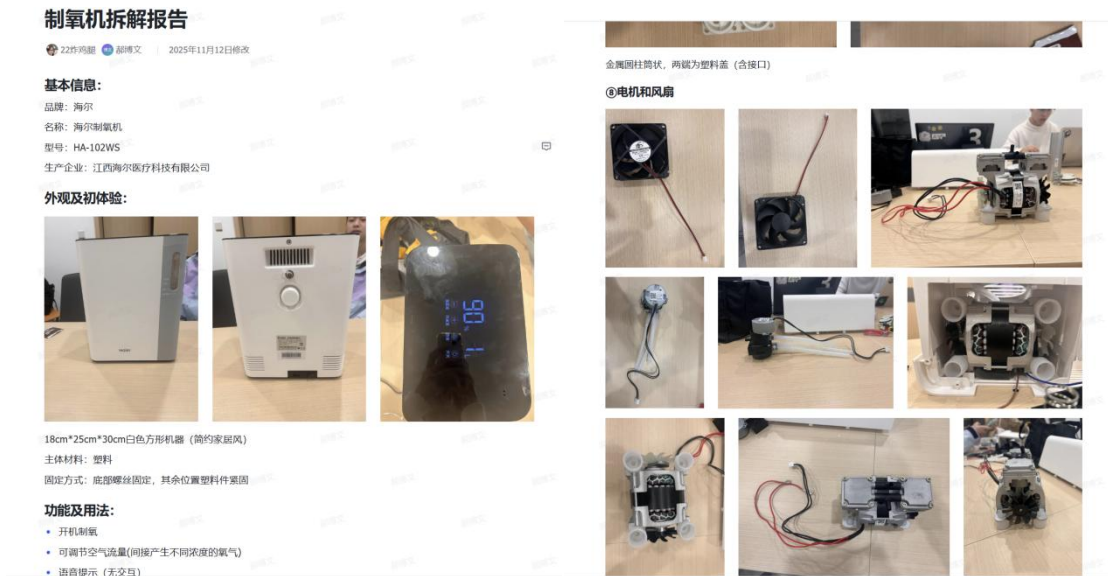


图 4.2.1 拆机文档

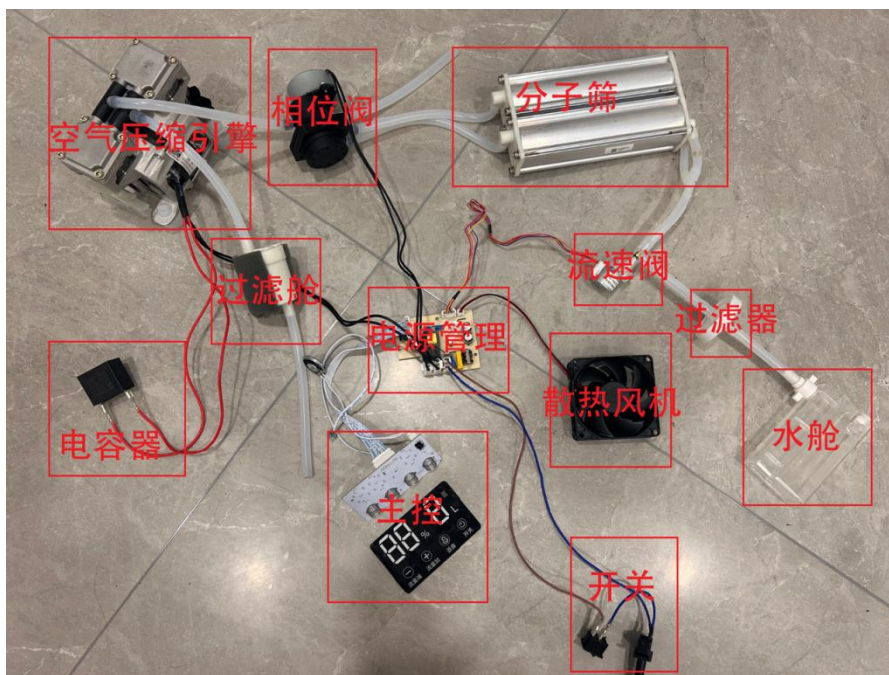


图 4.2.2 常规制氧机硬件拓扑

4.3. 用户访谈

为了验证跑者在呼吸方面的痛点是否真实存在, 我和团队成员在校园内、明月湖基地周边、南滨路等地对不同人群展开了用户访谈, 对其进行用户人群划分与痛点聚焦等。下图为部分访谈记录:

小范围确认痛点真实性、方向可行性

01 用户画像 马拉松爱好者

坚持跑步一年多 一天一跑3km 赛事全马

02 初次访谈求指教

实际跑完1km后
感冒了1周
跑步呼吸有技巧
冬天气气干燥——>不能用口呼吸

03 切入痛点

“冬天跑步呼吸会很痛，冬天就跑的比较少” “夏天不喜欢跑，又闷又热”

夏天：闷热潮湿 } 身体不适
冬天：寒冷干燥 } 极其影响跑步 激情



痛点是否具有普遍性，具体用户画像？

访谈

2025年12月5日 下午4:38 未分类

对象1:

男，27岁，云南人，较瘦，175cm，64kg
有跑步习惯，在部队待过，跑过马拉松
跑步带来快乐
一周1~2次
通常一次5/8/10km，看状态决定跑多少
下午4~5点跑步（根据作息，空闲时间）
户外跑，公园
跑步时候嗓子特别干燥，有血腥味
心率会很高
冲刺的时候（呼吸剧烈时）最容易引起这种
症状
夏天在杭州跑温度太高，几乎没法跑
自身习惯比较粗糙，不太在意这些，自身主
动去适应环境
没有特殊设备

对象2:

男，四川人，压力大的时候用于放松
21岁，167cm，60~65kg
5km，3~5km，一周1~2次，看时间安排跑

标签: 跑步 马拉松 健身 运动

图 4.3.1 情绪识别与互动

图 4.3.2 访谈记录



图 4.3.3 用户访谈片段

5. 国市创（多模态智能轮椅）：

本学期，我们继续推进国创项目——多模态智能轮椅。我们的项目采用多模态融合技术，集成视觉、语音、电信号、光信号等多种感知模态，实现了跨模态技术在轮椅产品上的创新应用。

在对轮椅建模进行完善后，我为其接入了 OpenMV 视觉模块、DY_SV8F 语音模块、红外光电传感器、温湿度传感器等器件，对周围环境与乘坐人身体状况进行实时监测与提醒。

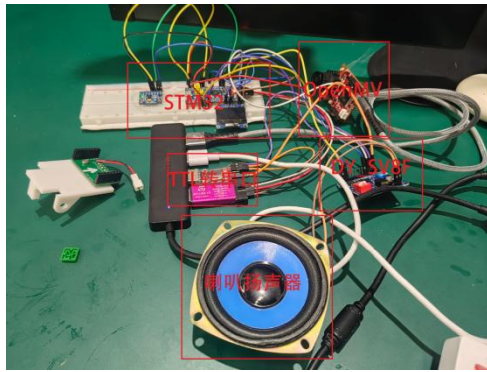


图 5.1 视听模块硬件拓扑

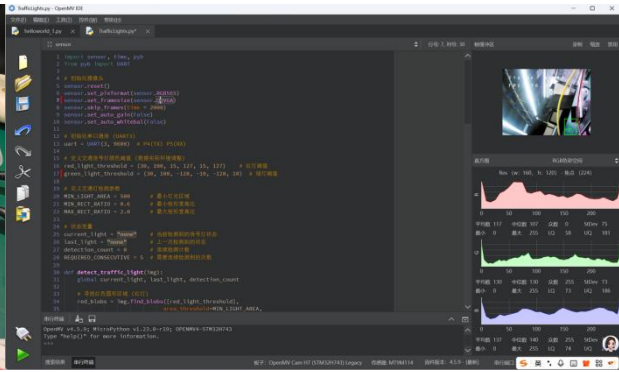


图 5.2 OpenMV 段源码

项目的一个核心功能是对乘坐者的心电信号采集与处理。原理是采集 SKX-2000 心电信号模拟仪或人体输出的心电信号，通过滤波和分析处理将波形和心率显示在 TFT 屏幕和 PC 端。通过 ADS1292 获取心电信号原始数据，直流陷波、FIR 滤波生成波形，结合 DMA 和定时器实现高效数据传输，最终基于开发板上自带的 FFT 显示屏展示结果。核心功能集中在心电信号的处理与生成。

我们将这个核心功能的具体实现发表在了 ICCEIC 会议论文中，其中包括硬件的搭建、软件滤波算法与仿真分析等。

Heart Rate Detection System Based on ADS1292 Module

Jingxun Hong^{1*}
Elite Institute of Engineering
Chongqing University
Chongqing, China
hongjxunq@163.com

Bowen Hou²
Elite Institute of Engineering
Chongqing University
Chongqing, China
2431421@qq.com

Huasheng He³
Elite Institute of Engineering
Chongqing University
Chongqing, China
256213973@qq.com

Chen Tang⁴
Elite Institute of Engineering
Chongqing University
Chongqing, China
344063788@qq.com

Abstract—This study addresses the high cost of commercially available heart rate monitoring devices by designing a low-cost detection system capable of real-time electrocardiogram (ECG) visualization. The system utilizes the ADS1292 module with electrode patches to acquire ECG signals from the human body. The raw signals are processed using a combination of HR and median filtering, and heart rate is calculated based on RR interval analysis. The processed data is transmitted via a serial port and displayed in real time using VOFA software. Test results demonstrate excellent filtering performance and real-time capability, indicating strong potential for industrial application. Future work may involve integrating high-performance microprocessors to further enhance system performance.

Keywords—ADS1292; HR filter; ECG; RR interval

I. INTRODUCTION

With the accelerating aging of China's population, the number of patients with heart disease continues to rise^[1]. The occurrence of heart disease is often closely associated with arrhythmias. The normal resting heart rate for adults ranges from 60 to 100 beats per minute, and a heart rate consistently exceeding or falling below this range is considered arrhythmic^[2]. Therefore, the detection of ECG signals and accurate assessment of heart rate are of great significance for the diagnosis and treatment of cardiovascular diseases^[3].

However, modern medical equipment for ECG detection and graphical visualization is often expensive, making long-term monitoring unaffordable for most patients. To address this issue, this paper designs a heart rate detection device based on a universal microprocessor. The system acquires ECG signals through communication between the microprocessor and the ADS1292 module, processes the raw signals via filtering, and ultimately achieves accurate heart rate assessment and real-time visual representation of ECG waveform.

II. HARDWARE PLATFORM DESIGN

The hardware platform built in this study includes the ADS1292 heart rate detection module, three electrode pads, electrode wires for configuring connection knobs, and a microprocessor.

Project 202510611004X supported by National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduate
*This author is corresponding author
*These authors contributed equally to this work.

979-8-3315-5442-225531.00 ©2025 IEEE 491

A. Basic Control Logic

This study utilizes an ADS1292 heart rate detection module connected to electrode patches for ECG signal acquisition. The captured signals are transmitted in character format to a microprocessor via SPI communication^[4]. Upon data retrieval, the microprocessor performs time-domain and frequency-domain analysis, followed by filtering and heart rate extraction on the raw signals. Finally, the processed outcomes, including the ECG waveform and estimated heart rate values, are displayed in real-time on a TFT screen interfaced with the microprocessor. The Figure 1 is the control logic diagram.

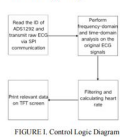


FIGURE 1. Control Logic Diagram

B. Detection and Presentation

In order to prevent in the detected data, this study detected whether the waveform roughly matched the normal human ECG waveform through the presentation of the upper computer. After successfully reading the raw ECG data, the raw data is transmitted to the upper computer through the serial port^[5], and Matlab is used to present the ECG raw signal in the upper computer. As shown in the Figure 2, at this time, the ECG signal has not been processed, so there are many waveform spikes in the image^[6], but it basically conforms to the normal human heart waveform.

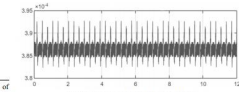


FIGURE 2. Time Domain Diagram of ECG

III. ALGORITHM IMPLEMENTATION AND OPTIMIZATION

A. Design DC Wave Limiter

At the algorithm level, this study uses fast Fourier transform^[7] to achieve time-frequency conversion of ECG. This scheme fully considers the computing power limitations of low-cost microprocessors and aims to effectively analyze the internal frequency composition of signals through frequency domain analysis. As shown in the Figure 3, the obtained frequency domain image is a spectrumgram.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn} \quad \text{for } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

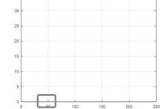


FIGURE 3. Frequency Domain Diagram of ECG

From the frequency domain diagram of ECG, it can be observed that the DC component of the original signal is significant, with a small protrusion around 50Hz, indicating the need to design a DC trap to eliminate the DC component in the signal. The overall filter structure includes a first-order IIR filter in the following form.

$$H(z) = \frac{1-z^{-1}}{1-az^{-1}}, \quad \text{and } a \approx 1 \quad (2)$$

Meanwhile, through experiments, it has been proven that at an 0.992, the frequency response of the structure is zero at 0Hz (DC^[8]), which completely suppresses the DC component.

By comparing the frequency spectrum of the original signal with that of the signal processed by the DC notch filter, it was found that the amplitude around 0Hz decreased significantly (notch), indicating that the DC component was successfully suppressed. The overall energy of the low-frequency part decreases, but other useful frequency components (such as harmonics of electrocardiogram) are basically retained. As shown in the Figure 4, there is no significant impact in the mid to high frequency range, indicating that the filter only works on DC.

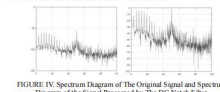


FIGURE 4. Spectrum Diagram of the Original Signal and Spectrum Diagram of the Signal Processed by the DC Notch Filter

B. Heart Rate Estimation

To accurately estimate heart rate, this article starts from the filtered ECG signal and aims to improve detection accuracy by enhancing the R-wave. Firstly, a third-order Butterworth bandpass filter (0.5-40 Hz)^[9] is used to filter out DC drift and high-frequency interference, and zero phase filtering is implemented using the built-in library function of the microcontroller to avoid R-peak misalignment. Subsequently, the signal is normalized to its maximum absolute value and smoothed using a 50 ms moving average window to suppress local spike interference.

This study uses an R-wave detection algorithm based on derivative filters. It applies the derivative filter to ECG signal to obtain the slope information of the R-wave and detects R-waves using an adaptive double-threshold method^[10]. As shown in the Table 1, the simulated ECG signal being tested is low-frequency and stable over a short period.

TABLE I. R-waves Detection Data

ECG count	Numbers of R-waves	Numbers of tests	Accuracy
1	38	34	100.00%
2	40	41	97.50%
3	31	32	96.77%
4	41	40	97.56%
5	50	50	100.00%
6	35	34	97.14%
7	42	40	95.24%

Although this method performs poorly in detecting high-frequency ECG signals, it is sufficient to support the applications of this study.

Based on the smoothed signal, the perform R-wave detection, set the minimum peak value to 35% of the maximum amplitude of the signal, and apply a minimum peak to peak distance constraint of 0.3 seconds to ensure that only one R-wave is recognized for each heartbeat. Finally, the RR interval is obtained by calculating the time interval between adjacent R waves. After removing outliers less than 0.3 seconds or greater than 1.5 seconds, the final heart rate value is calculated using the formula:

$$HR = \frac{60}{\text{average}(RR)} \quad (3)$$

Figure 5 shows the filtering and heart rate estimation results of a 1906Hz electrocardiogram signal:

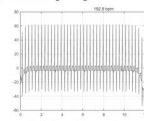


FIGURE 5. Test Signal Electrocardiogram and Heart Rate Estimation

To demonstrate that the filtering effect is good from the perspective of the frequency domain, the study performed a second spectral analysis on the filtered ECG signal by fast

图 5.3 ICCEIC 会议论文

此外，还包括使用语音播放模块实现心电信号异常报警，与 OpenMV 实现的路况监测、以及红外光电避障检测等多个功能相互配合，用于指示与监测乘坐人员。经过完善的最终轮椅模型与实物如下图所示：

二、成果展示：轮椅建模

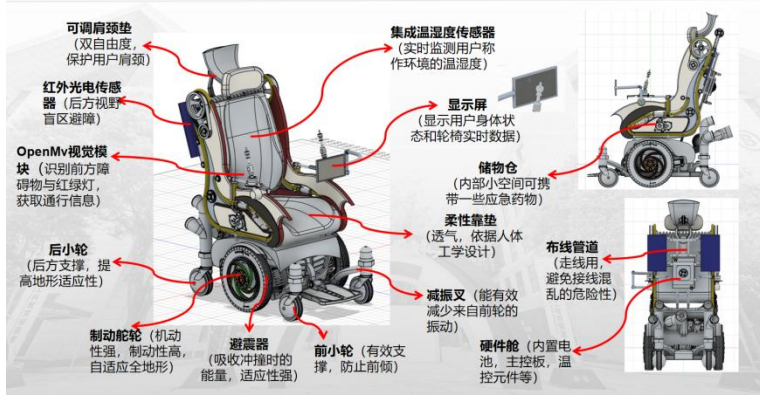


图 5.4 智能轮椅模块拆解



图 5.5 轮椅实物图

在轮椅样机完成后, 我们邀请了十余名被试者体验其功能, 并收集用户反馈, 实现完整的产品设计流程闭环, 最终获得国创优秀结项的好成绩。

三、用户体验



在完成对轮椅各部分功能的集成之后, 我们邀请了几位同学进行乘坐体验。



为试乘人员佩戴采集心电信号所需贴片

- 体验人: 俞同学
- 体验内容: 心率监测、心电图
- 体验感受: 在轮椅上监测心电信号很新鲜, 佩戴相关设备的时候**也没有不舒适感**, 让自己知晓心电图和心率正常会觉得**很安心**



为试乘人员讲解各个部分功能

- 体验人: 丁同学
- 体验内容: 心率监测、心电图、避障与信号灯识别
- 体验感受: 这些功能对于残障老人驾驶轮椅而言是非常有帮助的, 可以极大程度的**提高行驶安全**, 同时监测心电信号也很好地**保障了乘坐人员的健康**。

数位同学体验后均提到了以下几点: 驾驶**安全度提升**、健康状况 (温湿度、心率) **及时监测**、**乘坐舒适**

图 5.6 用户体验片段

6. 其它实践:

6.1 Xbotics 具身智能社区线上实习

Xbotics 具身智能社区是面向具身智能与机器人领域的专业学习与实践社区, 本学期我参与了为期三月的具身智能与嵌入式学习, 系统完成了具身智能基础理论与技术框架、具身智能相关算法与工程实践的入门训练。

实习证明

兹证明：

____ 郝博文 同学，系 ____ 重庆大学 ____ 大学 ____ 国家卓越工程师学院 ____ 专业在读学生
于 ____ 2025 年 ____ 月 ____ 日至 ____ 2025 年 ____ 月 ____ 日期间，
参加了 Xbotics 具身智能社区组织的线上实习项目。

在实习期间，该同学围绕具身智能 (Embodied AI) 方向，系统完成了以下内容的学习与实践：

- 具身智能基础理论与技术框架
- 具身智能相关算法与工程实践的入门训练

该同学在实习过程中学习态度认真，参与积极，能够按要求完成实习任务，具备良好的专业理解能力与自主学习能力，达成了线上实习的培养目标。

Xbotics 具身智能社区是面向具身智能与机器人领域的专业学习与实践社区，
依托于杭州灵纳慧启智能科技有限公司开展相关技术研究、人才培养与实践教学活动。
特此证明。

实习单位：Xbotics 具身智能社区
(依托单位：杭州灵纳慧启智能科技有限公司)

日期：____ 2025 年 ____ 月 ____ 日

(盖章)



图 6.1.1 实习证明

期间，我依照机器人基础与具身智能学习路线展开学习，整理了多个文档，包括机器人运动学、机器人轨迹规划、高阶数学工具、自注意力机制与 Transformer 等。

具身智能各方面学习路线

名称	所有者	修改时间
具身智能操作类学习路线 (3D视觉)	Xbotics-木木	2025年9月22日
具身智能操作类学习路线 (模仿学习与强化学...)	Xbotics-木木	2025年6月11日
传统运动控制路线 (基于模型)	Xbotics-木木	2025年6月11日
现代控制路线 (仿真 + 强化学习)	Xbotics-木木	2025年6月21日
大语言模型人机交互路线 (LLM-based)	Xbotics-木木	2025年6月11日
机器人定位与导航学习路线	Xbotics-木木	2025年9月20日
视觉感知阶段学习路线	Xbotics-木木	2025年6月11日
激光感知技术路线 (LIDAR-based Perception)	Xbotics-木木	2025年9月20日
机器人嵌入式控制系统开发的系统化学习路线	Xbotics-木木	2025年6月11日
灵巧手学习路线	Xbotics-木木	2025年8月5日
VLA学习路线	Xbotics-木木	2025年6月28日
Sim2real基础与学习路线	Xbotics-木木	2025年7月7日
力控和触觉感知	Xbotics-木木	2025年7月6日
具身智能入门指南 Embodied-AI-Guide	Xbotics-木木	2025年3月17日

机器人基础学习路线

1. 坐标系与位姿变换

- 目标：理解机器人运动的空间表示，掌握齐次变换矩阵的使用。
- 内容：
 - 笛卡尔坐标系与关节坐标系
 - 齐次矩阵 (4x4) 表示位姿
 - 平移、旋转 (欧拉角、四元数)
 - 坐标系之间的转换与链式计算

问题：为什么需要用一个整体的“齐次矩阵”来表示位姿，而不是分开用旋转和位移？如果一个点在 A 坐标系下有坐标，我们如何把它转换到 B 坐标系？多个关节坐标系之间的变换，最后是如何得到末端相对基座的位姿的？

2. 轨迹规划

- 目标：理解机器人从起点到终点的运动方式和路径生成。
- 内容：
 - 插值方法 (直线插值、多项式插值)
 - 笛卡尔空间轨迹 vs 关节空间轨迹
 - 时间参数化与速度/加速度约束
 - 基本规划算法 (RRT、PRM 简介)

具身智能基础——机器人轨迹规划.docx

图 6.1.2 学习文档展示

此外，我还进行了一些实战项目，比如嵌入式相关的小型任务调度系统与 Shell 命令交互、集成 KDL 运动学库的 Mujoco 机械臂仿真、Bert 模型预训练与微调等，如下图所示：

6.3 深圳科创学院实习

暑假期间，我前往深圳科创学院，担任启航营助教。期间，带领组员学习有序创业的24步法则、第一性原理、产品设计思维等，参观了多家初创企业，并带领组员完成了“拳击袋鼠”小项目。



图 6.3.1 科创营合照

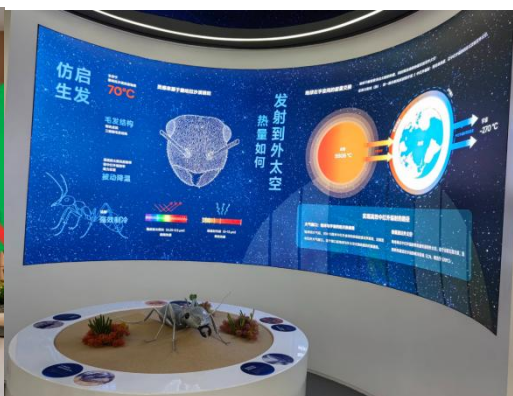


图 6.3.2 “创冷科技”公司参观

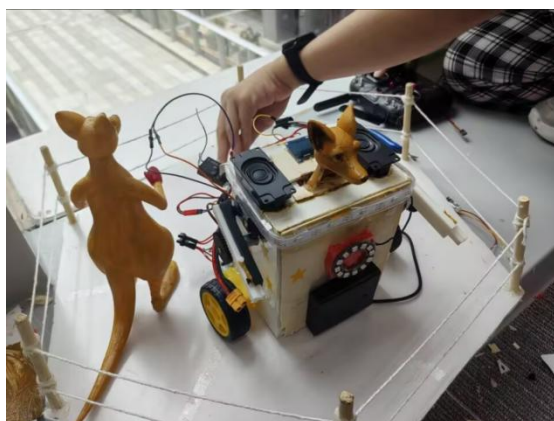


图 6.3.3 拳击袋鼠展示



图 6.3.4 整体设计

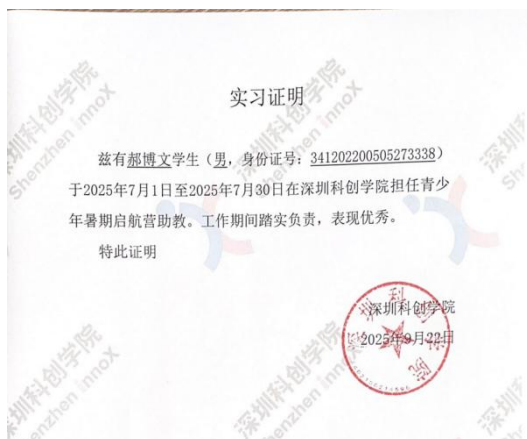


图 6.3.5 实习证明



图 6.3.6 实习奖状

7. 下阶段规划：

7.1 半人形机器人的整体轨迹规划与控制

基于现阶段的双臂运动学框架加入碰撞检测和协调控制，实现更优雅的半人形机器人整体规划与控制。

7.2 实物七自由度机械臂的调试控制

基于单臂运动学框架，调试实验室的达妙电机七自由度机械臂。

7.3 冗余机械臂的深度强化学习遥操

继续学习深度强化学习，为后续遥操控制机械臂打下基础。

7.4 “微气候”原理样机搭建

留校期间和创业团队共同完成初代样机的设计与搭建。

7.5 全面强化个人技术栈

巩固与强化现有技术，补足与完善存在短板的技术。

8. 个人总结与思考：

在报告的结尾部分，我希望对自己过去的一学期做一次认真的总结与思考。

回顾本学期，大致可以将其分为以加入实验室为分界点的两段。在前半段，我将课程以外的大多时间精力花在比赛与线上实习中，包括农业灌溉机器人的整体设计、舵轮的研发与专利申请、旅游机器人的硬件设计等，对我的机器人各方向技术都有很不错的提升；而在后半段，我基于生涯规划的考虑，选择加入具身智能实验室，负责机械臂运动学的相关工作，对我的嵌入式与算法基础有了更进一步的提升。

其实从暑假开始，我就在心里做出了决定：大三上学期的国赛将是我参加的最后一个比赛。其中最主要的原因在于比赛固然能提升个人的综合能力与技术，但在大一大二的多次比赛中，我已经逐步建立了相对完整的技术栈，对一个项目该如何开展与推进也有了清晰认知，我逐渐发觉比赛能带给我的越来越少了。因此，我愈发觉得是时候开始深入钻研某个方向了。这时候，我加入了具身智能实验室，基于我的过往经验与兴趣选择了一条合适的研究方向。这个阶段的我开展了当下人生中链路最长的一个项目——S-R-S 机械臂的运动学解算与控制。项目的推进过程中，我遇到过各种各样的问题，也曾因为一些难以解决的事情而感到焦头烂额，但和以往不同的是，我真切体会到了在一个方向上钻研或试错的通透感。那些曾经困扰过我的问题，已经在我脑海里构成了一个个的经验与底层逻辑，我能清晰感受到每个步骤的存在意义，而这正是我现阶段所不断追寻的东西。

我认为，一个技术能否实现突破的核心在于它的深度，著名的一万小时定律正是这句话的最好证明。而一名卓越工程师的卓越所在，就在于他的突破与创造。作为一名大三的学生，应当具备在项目中的某个板块独当一面、有所突破的能力。

“极限犹可突破，至臻亦不可止”，在学习之路的下个阶段，我将会继续深入强化自己的技术栈，拓展看待事物的维度，如同一名卓越工程师一样在创造与突破的路上走下去。