



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

双足人形机器人 结构与步态规划

组长：黄一 组员：赵之也 任飞 朱骐 张堡鑫

指导老师：朱延河教授

目录 Catalogue

项目背景 01

BACKGROUND

项目方案 02

Project PLAN

项目实施进展 03

Project Progress

项目特色与创新 04

Project features and innovation

项目收获 05

Project gains



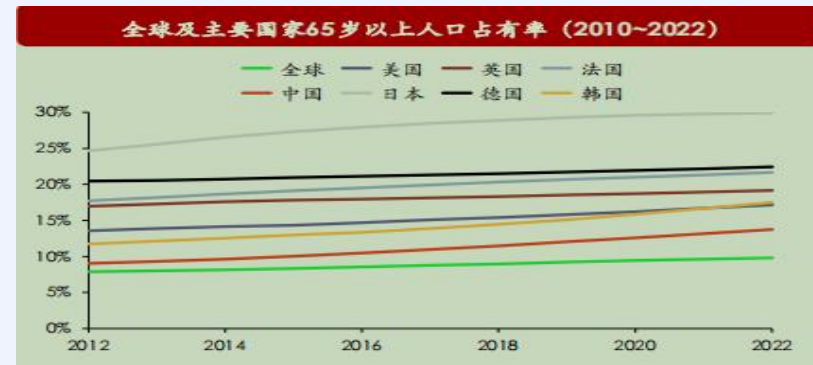
BACKGROUND

01

项目背景

人口老龄化问题日益严重：根据最新的统计数据，65岁及以上的老年人口数量已经超过1.8亿，占总人口的比例达到12.6%。随着劳动力人口的减少，劳动力成本不断上升，这不仅对传统的经济发展模式提出了新的挑战，也对现有的社会保障体系带来了前所未有的压力。

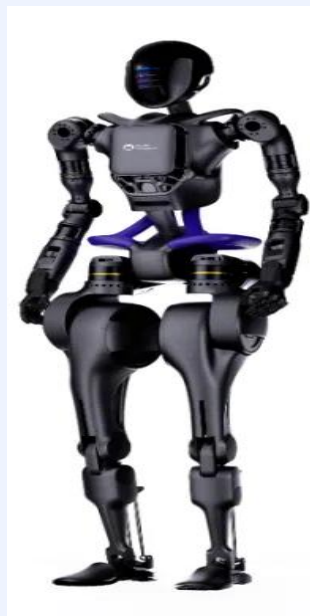
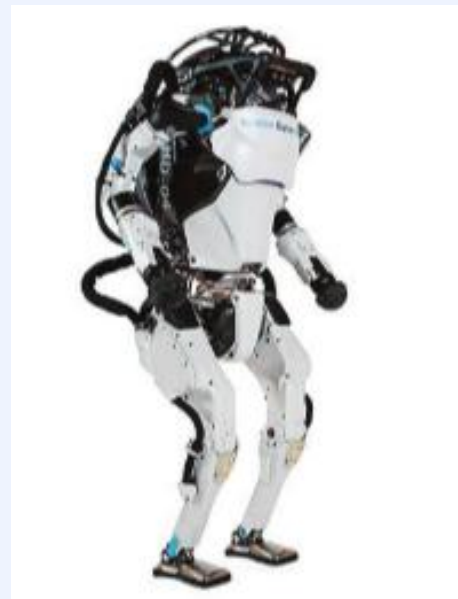
人形机器人具有独特的优势和潜力：双足机器人相较于其他类型的机器人，不仅能够提高生产效率，保障人员安全，还能够和服务领域发挥重要作用，推动人机交互和人机协同技术的发展。



研究现状 Research Status

国外研究现状：美国波士顿动力公司的Atlas机器人和日本本田公司的ASIMO机器人就是近十年来在学术界引起广泛关注的两大“网红”机器人。这些机器人不仅在技术上取得了飞速的发展，而且在运动规划和稳定性控制方面也取得了显著的成就。

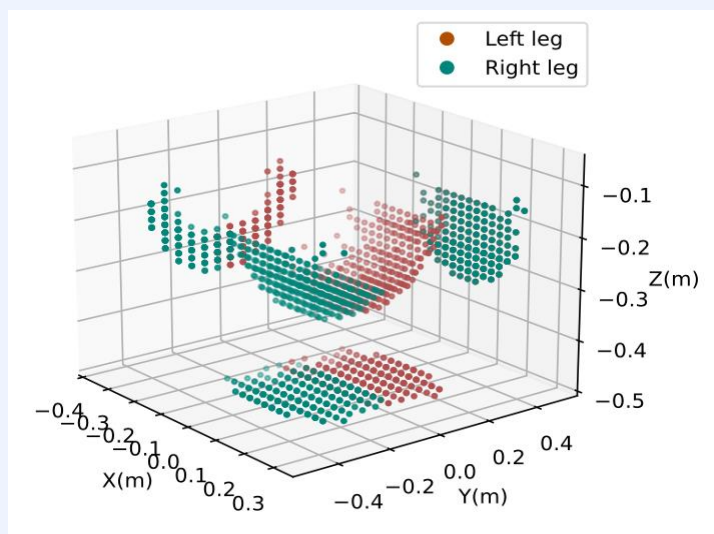
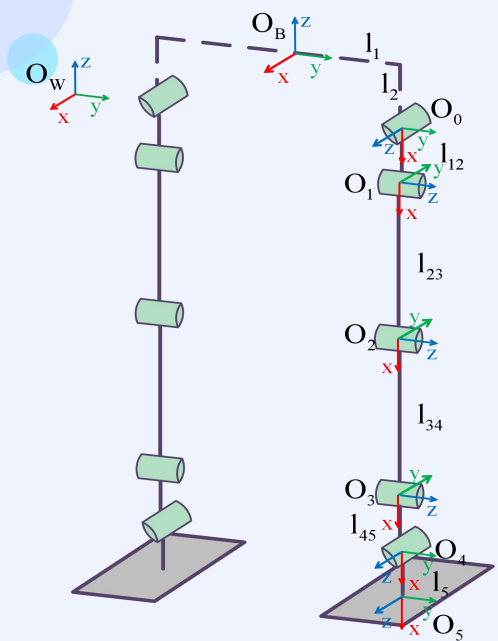
国内研究现状：中国在人形机器人产业的发展过程中，经历了从追赶到领先的转变，其中创业企业典型代表包括优必选科技、宇树、傅利叶等；高校领域则以哈尔滨工业大学研制的GoRoBoT机器人、清华大学研制的Stepper-2D机器人为代表。



Project Plan

02

项目方案



01

设计一套大型伺服双足机器人以供算法研究使用

02

研究基于二维线性倒立摆的步态规划器

03

应用基于质心期望力的线性倒立摆所得到的规划步态形成参考轨迹，使用强化学习算法，在虚拟环境中迭代训练

04

将网络模型迁移到现实机器人身上，进行 Sim to Real 的行走实验

Project Progress

03

项目实施进展

整体架构



Input: 初始化策略 π , 奖励函数 \bar{r} , 转移函数 \bar{P} , 初始状态分布 \bar{p} , 和空数据集 $\mathcal{D} = \emptyset$.

- 1: for $i = 1, 2, \dots, N$ do
- 2: 使用策略 π 在环境中采样, 得到数据集 $\mathcal{D} = \mathcal{D} \cup \{(s_i, a_i, s'_{i+1})\}$.
- 3: 通过数据集 \mathcal{D} 训练奖励函数 \bar{r} 和转移函数 \bar{P} 和初始状态分布 \bar{p} .
- 4: 在经验环境模型中优化策略: $\pi \leftarrow \arg\max_{\pi} V_{\pi}^{\mathcal{D}}$.
- 5: end for

Output:

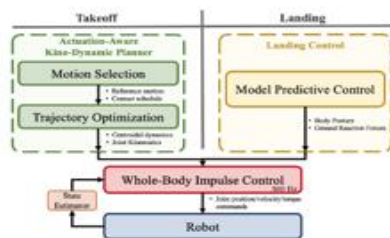
基于行为克隆的环境模仿学习



仿生学设计



实时神经网络拟合



利用 Kino 动态规划、基于 MPC 的着陆控制和 WBIC 框架实现双足机器人的动态运动

上位机 (英伟达 Jetson Xavier nx)

下位机实时全身MPC姿态解算



下位机 (自研 Stm32H750 核心板)

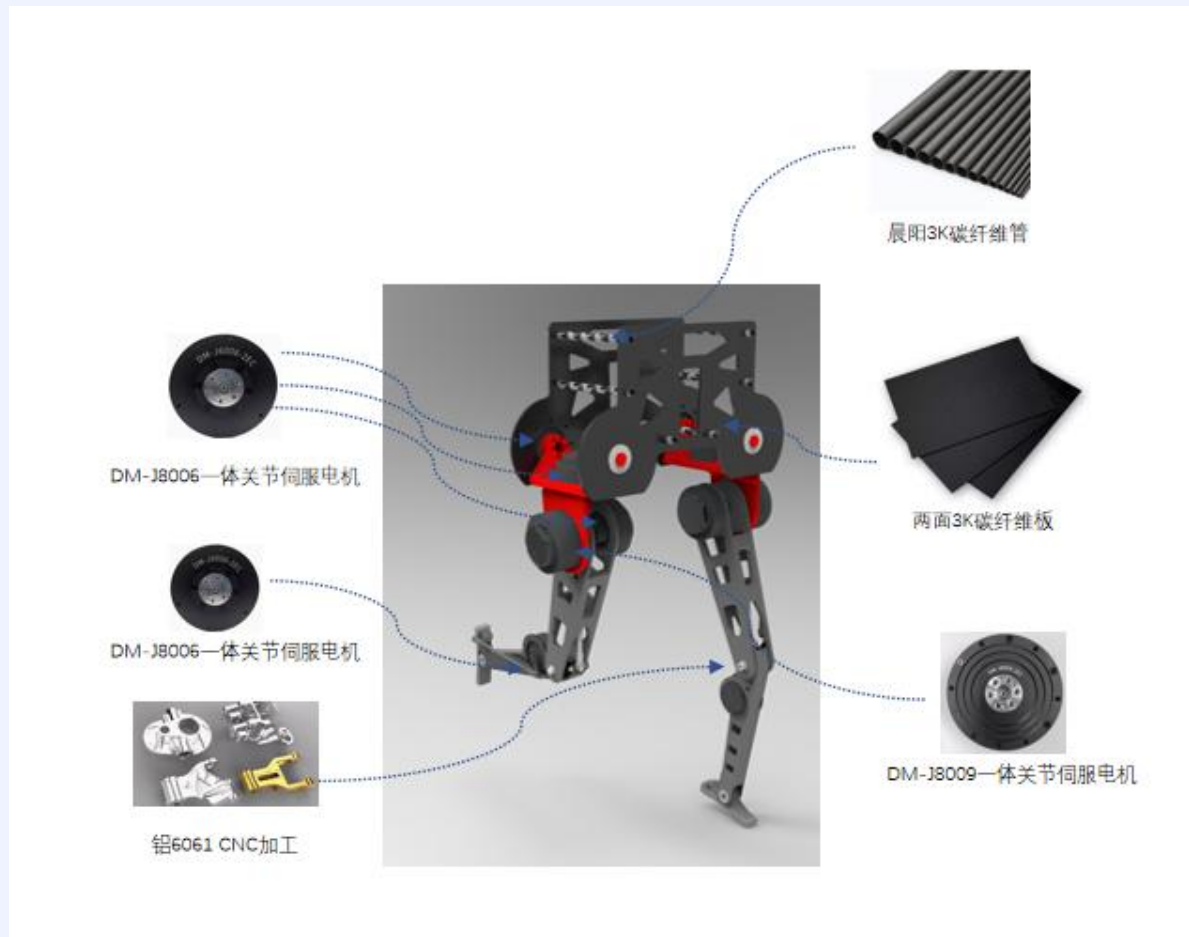
JY901 九轴IMU



软件&算法层

机械&硬件层

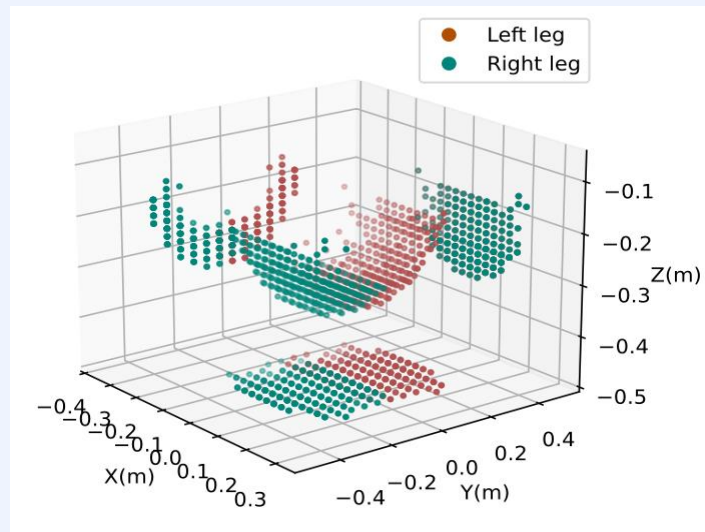
机械结构——机械总论



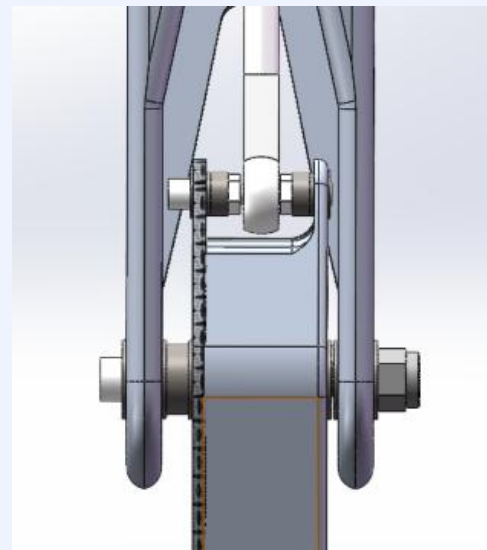
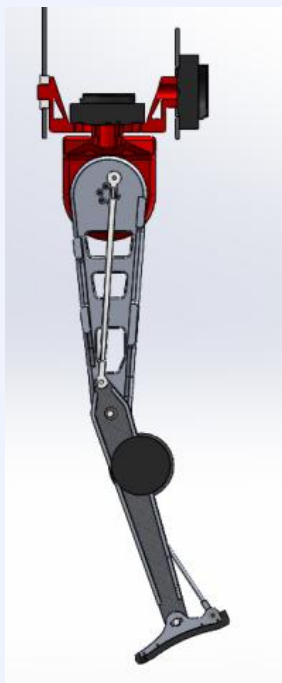
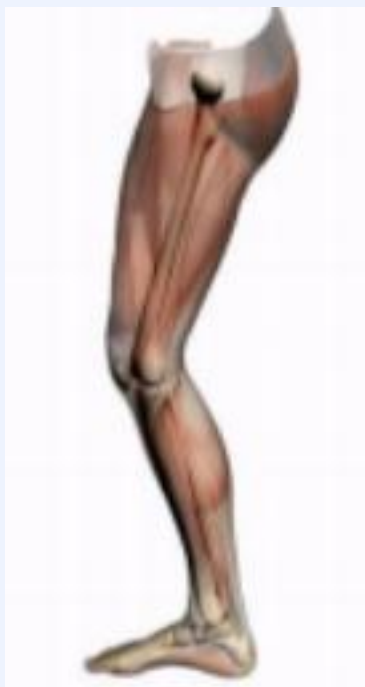
关节	自由度	角度 (rad)
髌关节	横滚	-0.345~1.222
	俯仰	-1.222~1.222
髌关节	横滚	-1.047~1.047
膝关节	俯仰	0~1.571
踝关节	俯仰	-1.047~1.047

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_3 C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & a_3 S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^{-1}T = A_2A_3A_4A_5A_6$$
$$\begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



机械结构——腿部结构仿生设计



人体腿部整体外形曲线呈上粗下细的倒三角

人体膝关节解剖图与机器人对应体

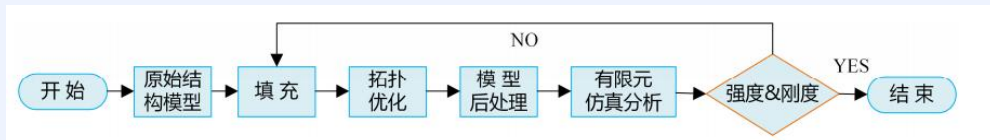
机械结构——轻量化设计



使用Altair Inspire进行二维拓扑优化



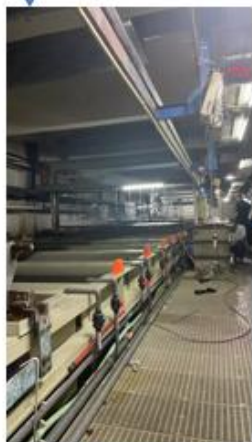
使用Altair Inspire进行三维拓扑优化



机械结构——实物展示



五轴铝CNC加工



金属阳极氧化



金属零件

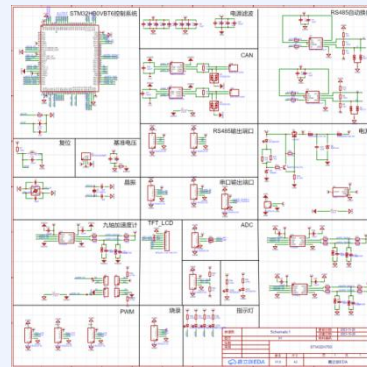
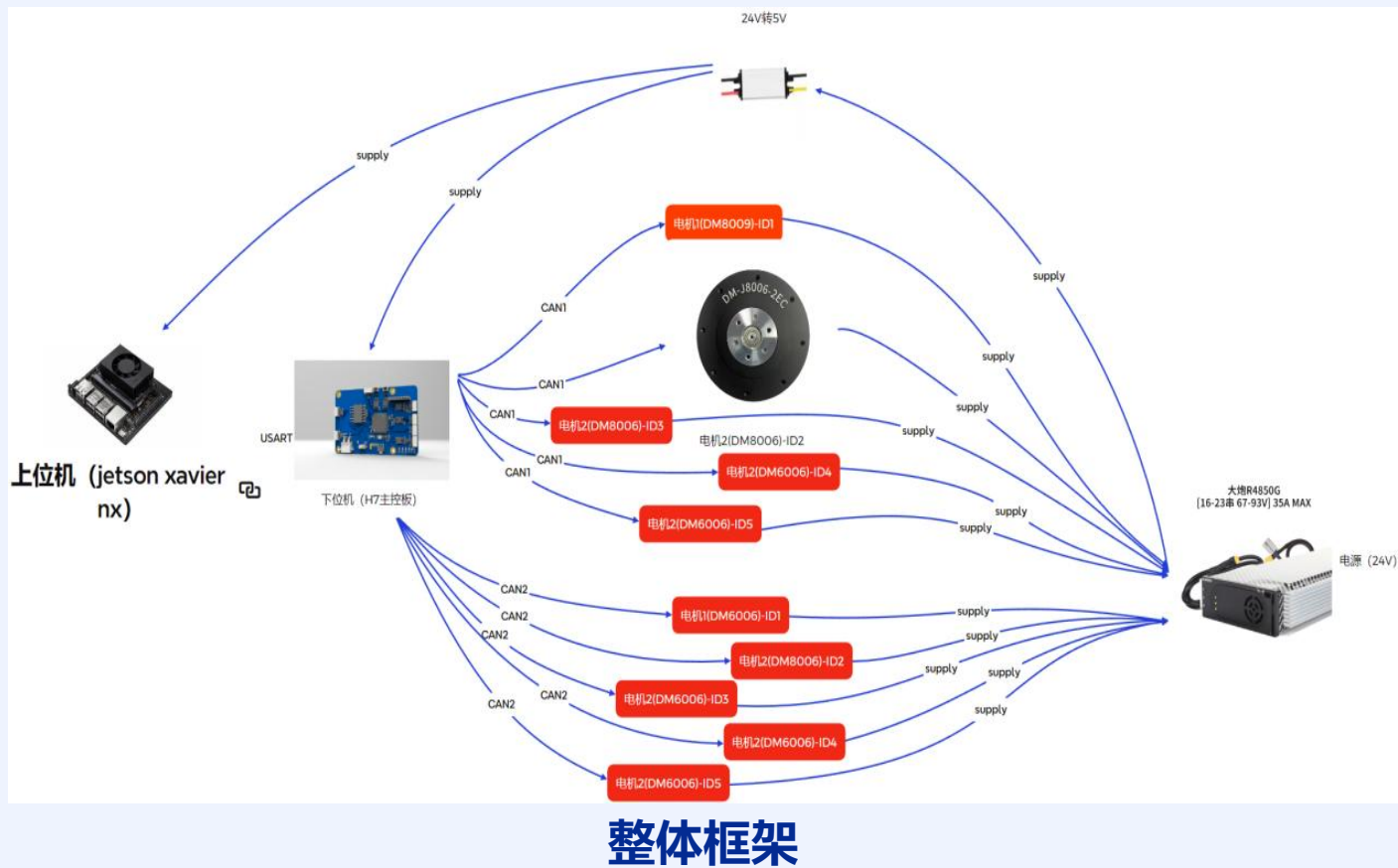


使用合适的紧固力装配保证对称

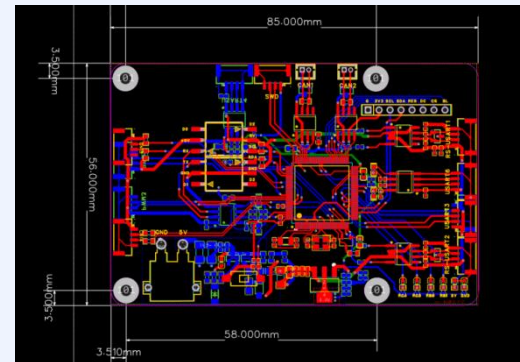


完整体双足下肢

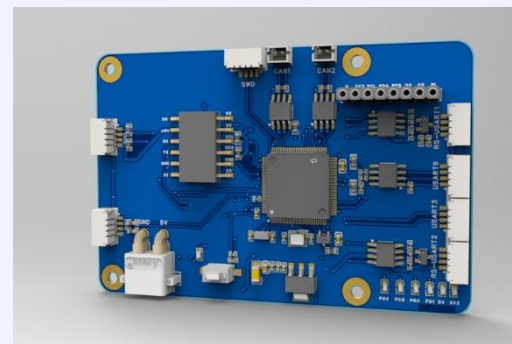
硬件设计——整体框架



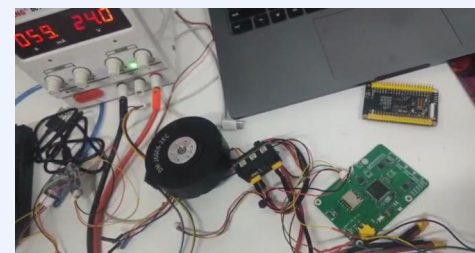
核心板原理图



核心板PCB图

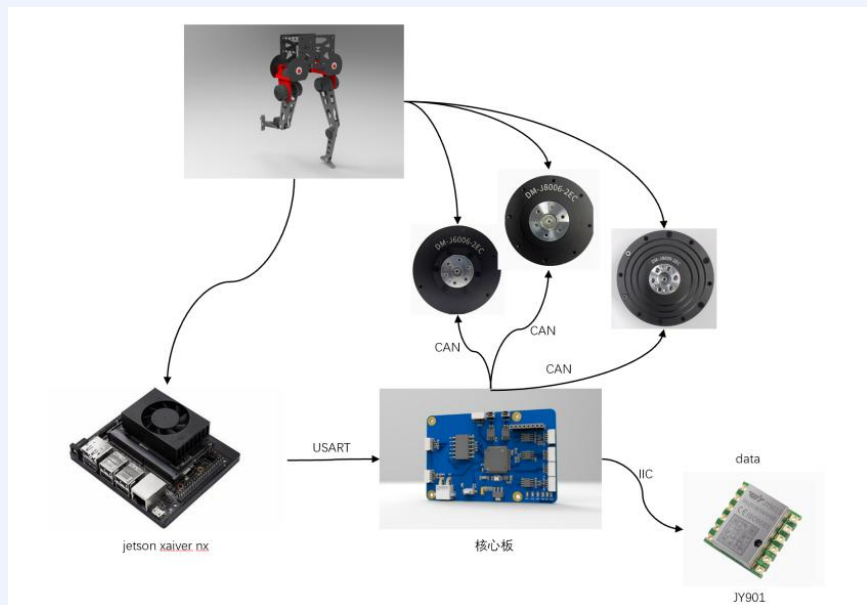


核心板

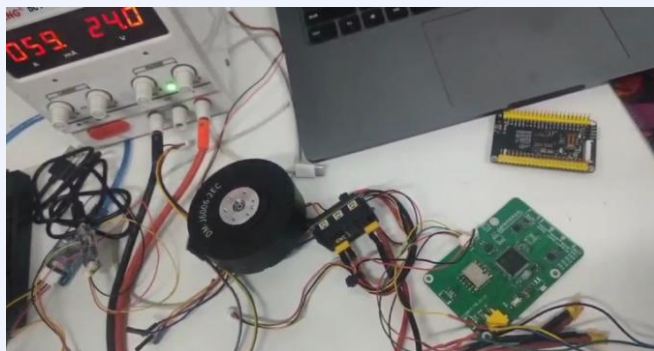


核心板调试图

硬件设计——驱动部分



控制框图



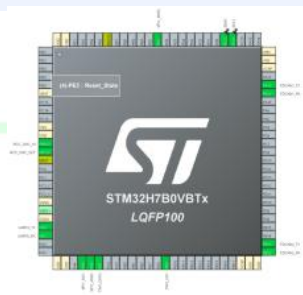
速度环控制

```
/**
 * @brief speed_ctrl: 速度控制函数
 * @param[in] hcan: 指向CAN_HandleTypeDef结构的指针，用于指定CAN总线
 * @param[in] motor_id: 电机ID，指定目标电机
 * @param[in] vel: 速度控制值
 * @retval void
 * @details 通过CAN总线向电机发送速度控制命令
 */
void speed_ctrl(FDCAN_HandleTypeDef* hcan, uint16_t motor_id, float vel)
{
    uint16_t id;
    uint8_t *vbuf;
    uint8_t data[4];

    id = motor_id + SPEED_MODE;
    vbuf = (uint8_t*)&vel;

    data[0] = *vbuf;
    data[1] = *(vbuf+1);
    data[2] = *(vbuf+2);
    data[3] = *(vbuf+3);

    canx_send_data(hcan, id, data, 0);
}
```



速度控制CAN协议代码与引脚配置

```
while (1)
{
    speed_ctrl(&hfdcan1, id, vel);
    HAL_Delay(1);
    WitReadReg(AK, 12);
    HAL_Delay(500);
    if(s_cDataUpdate)
    {
        for(i = 0; i < 3; i++)
        {
            fAcc[i] = sReg[AX+i] / 32768.0f * 16.0f;
            fGyro[i] = sReg[CX+i] / 32768.0f * 2000.0f;
            fAngle[i] = sReg[Roll+i] / 32768.0f * 180.0f;
        }
        if(s_cDataUpdate & ACC_UPDATE)
        {
            printf("acc: %.3f %.3f %.3f\r\n", fAcc[0], fAcc[1], fAcc[2]);
            s_cDataUpdate &= ~ACC_UPDATE;
        }
        if(s_cDataUpdate & GYRO_UPDATE)
        {
            printf("gyro: %.3f %.3f %.3f\r\n", fGyro[0], fGyro[1], fGyro[2]);
            s_cDataUpdate &= ~GYRO_UPDATE;
        }
        if(s_cDataUpdate & ANGLE_UPDATE)
        {
            printf("angle: %.3f %.3f %.3f\r\n", fAngle[0], fAngle[1], fAngle[2]);
            s_cDataUpdate &= ~ANGLE_UPDATE;
        }
        if(s_cDataUpdate & MAG_UPDATE)
        {
            printf("mag: %.4d %.4d\r\n", sReg[MX], sReg[MY], sReg[MZ]);
            s_cDataUpdate &= ~MAG_UPDATE;
        }
    }
}
```

九轴加速度计代码

```
/* USER CODE BEGIN CAN */
can_bsp_init();
enable_motor_mode(&hfdcan2, 2, POS_MODE);
enable_motor_mode(&hfdcan2, 1, POS_MODE);
enable_motor_mode(&hfdcan2, 3, POS_MODE);
enable_motor_mode(&hfdcan2, 4, POS_MODE);
enable_motor_mode(&hfdcan2, 5, POS_MODE);

// WitInit(WIT_PHOTOCL_I2C, 0x50);
// WitI2CFuncRegister(IICWriteBytes, IICReadBytes);
// WitRegisterCallback(CopeSensorData);
// WitDelayMsRegister(Delaysms);
// AutoScanSensor();
int i;

/* USER CODE END 2 */

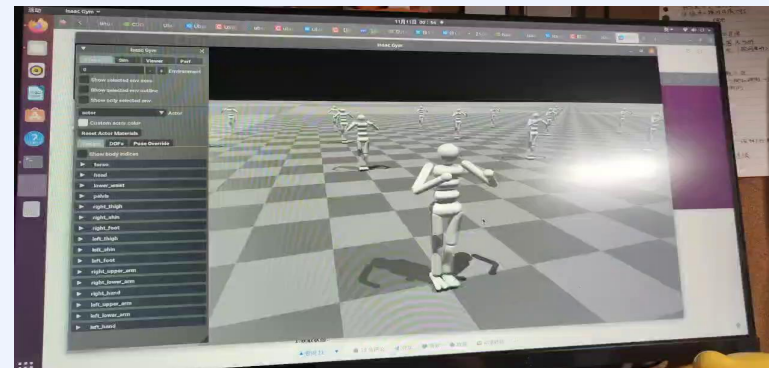
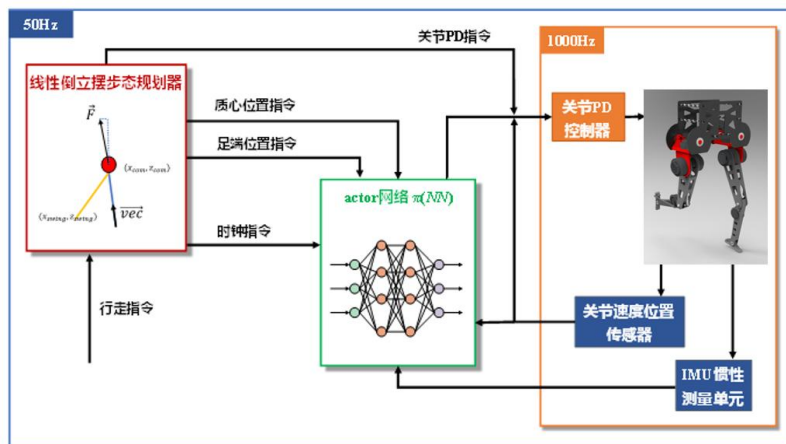
/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    enable_motor_mode(&hfdcan1, id, SPEED_MODE);
    speed_ctrl(&hfdcan2, id, vel);
    pos_speed_ctrl(&hfdcan2, 1, pos1, vel1);
    HAL_Delay(100);
    pos_speed_ctrl(&hfdcan2, 2, pos2, vel2);
    HAL_Delay(100);
    pos_speed_ctrl(&hfdcan2, 3, pos3, vel3);
    HAL_Delay(100);
    pos_speed_ctrl(&hfdcan2, 4, pos4, vel4);
    HAL_Delay(100);
    pos_speed_ctrl(&hfdcan2, 5, pos5, vel5);
    HAL_Delay(100);
    WitReadReg(AK, 12);
    HAL_Delay(500);
}
```

关节控制代码

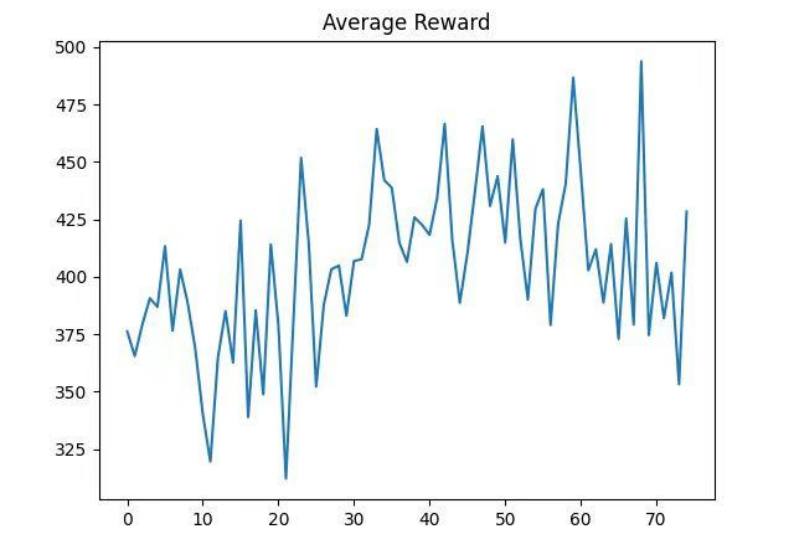


关节实物演示

神经网络框图



神经网络环境搭建



训练Reward



宇树模型强化学习训练

Project features and innovation

04

项目特色与创新

宝贝	宝贝属性	状态	服务	单价	数量
 MIT驱动无刷伺服机械臂机器人达妙科技关节电机减速双编码器DM8006  优惠券 发货时间：03月26日 10:41前发货	颜色分类：电机（含驱动）	已确认收货		¥1499.00	6
 MIT驱动无刷伺服机械臂机器人达妙科技关节电机减速双编码器DM8009  优惠券 发货时间：03月26日 10:41前发货	颜色分类：电机（含驱动）	已确认收货		¥2399.00	2
 MIT驱动无刷伺服机械臂机器人达妙科技关节电机减速双编码器DM6006  优惠券 发货时间：03月26日 10:41前发货	颜色分类：电机（含驱动）	已确认收货		¥899.00	2

商品总价：¥15590.00
 运费：¥0.00
 官方立减：-¥900.00
 店铺优惠：-¥100.00
 商家改价：-¥1590.00
 实付款：¥13000.00 元

01

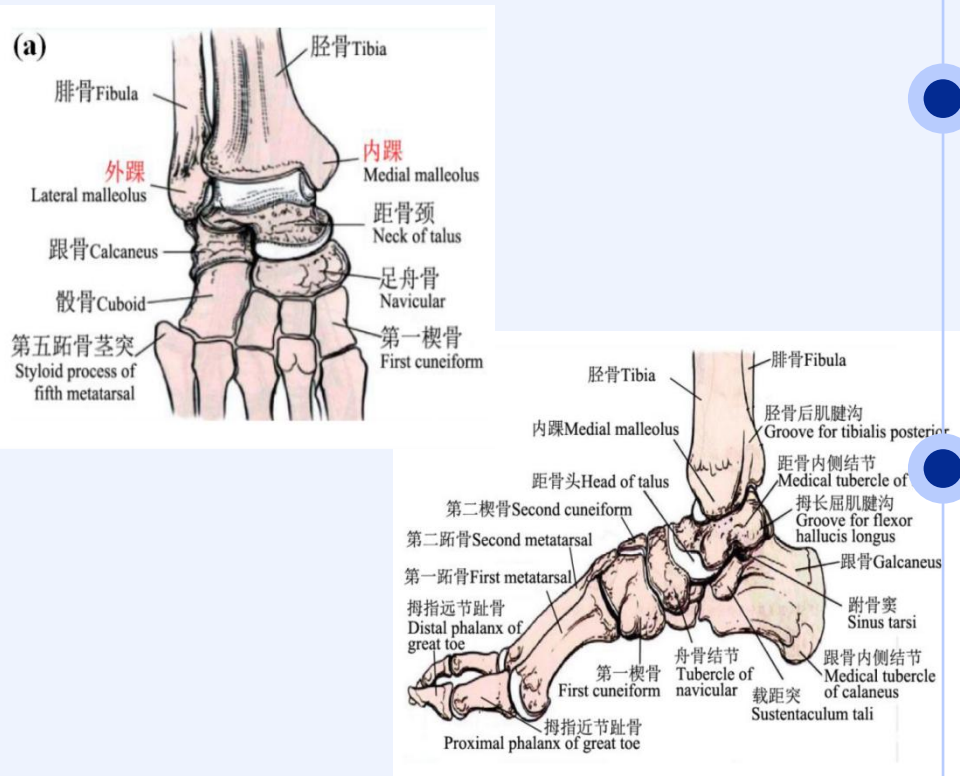
极低的成本实现较强的运动性能

02

开源属性增加社群影响力

03

腿部关节以及计划足式仿生学设计





01

极低的成本实现较强的运动性能



上万浏览量，近百硕博交流

02

开源属性增加社群影响力

目前共知道三人开始复刻，有近10套意向，但是可能不一定有空做

03

腿部关节以及计划足式仿生学设计

<https://zhuatlan.zhihu.com/p/692264591>



感谢观看!

Thanks for watching!