

基于线拉技术的仿生机械象鼻生态修复机器人说明书

设计者：陈泽明，黄振威，何畅允，赵曦，董博雅

指导教师：吴广峰，何军

(华南理工大学，机械与汽车工程学院，广州，510640)

作品内容简介

基于本次机械创新设计主题包括仿生与生态修复，本团队以仿生线拉技术与树木修护攀爬技术为基础设计出仿生机械象鼻生态修复机器人。

在机械设计方面，机器人采用模块化设计，分别包括：陆空一体化底盘、360度旋转式云台、多自由度线驱动象鼻以及模块化末端执行机构，从而实现地面运动、攀爬、转动、象鼻灵活运动、夹取、裁剪等多项功能。在空中可采用剪刀、喷嘴实现裁剪枯枝、喷洒树木修复药剂、修补虫洞等生态修复工作，在地面上可采用模块化夹爪、灵活机械手实现垃圾拾取，清理落叶等清洁工作。

电控部分基于 STM32 芯片作为控制中心，采用直流无刷电机作为驱动模块，结合陀螺仪传感器、旋转角度传感器、光电传感器数据，实现仿生象鼻的全方位控制。软件层面采用串级 PID 算法、线拉驱动算法、卡尔曼滤波算法，通过 CAN 通信、串口通信、DBUS 通信，实现生态修复基本动作。基于状态机设计模式架构，实现机器人一键全自动运行。

考虑生态要求的低成本，低功耗，视觉模块使用树莓派 4B 作为运算平台，通过驱动工业相机进行帧流的捕获，使用 OpenCV 视觉库对其进行特征提取，并将处理的数据发给嵌入式单片机，达到视觉辅助控制的功能，通过物体捕获与定位，实现自动清理垃圾，自动高空作业等功能。

1 研制背景及意义

面对日益增长的产品需求与劳动力迅速减少的矛盾，农林业、制造业等行业有了工业机器人代替人们完成各种农活、高危劳动,改变了传统的生产模式,不仅减少了劳动力的投入,而且还提高了生产效率，无形中极大的促进了现代各产业的发展。但同时，由于工业的快速发展与广泛应用，环境污染与能源危机问题越来越严重。许多已经被破坏的环境若及时进行修复保护，可以重新恢复至初始情况，一种节能的生态修复方式则非常重要。在本次机械创新设计仿生和生态修复的主题下，本团队设计一个以仿生学主导，运用于生态修复的机器人，力求为生态修复的事业带来便利与新的活力。

2 机械设计方案

2.1 底盘机械设计

2.1.1 自适应攀爬底盘

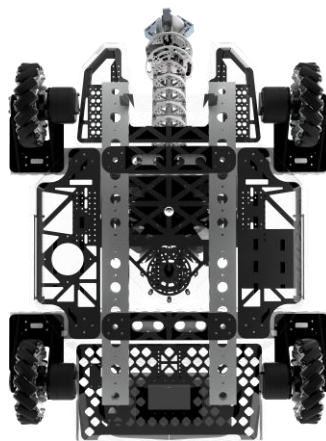
底盘模块采用四个攀爬轮组模块构造拼接而成，每个攀爬模块均由 GM12-N20 微型减速电机驱动丝杆实现轮子对攀爬物的锁紧，丝杆中会缠绕一个始终受压的挠性弹簧以增加驱动的稳定性和在通过有过渡半径的攀爬物时便于缓冲，同时底下的滑轨模块将为轮组提供直线轨道。轮组将通过 3508 电机进行对轮子的驱动，实现向上向下攀爬的功能。

支座采用成品轴支座和车铣铝件保证其运动刚度。底板采用质量高成本低的玻璃纤维板材进行搭建，中间支撑采用成型的铝合金板材，保证结构的强度和刚度，最后通过螺钉紧固件固定于底盘上。



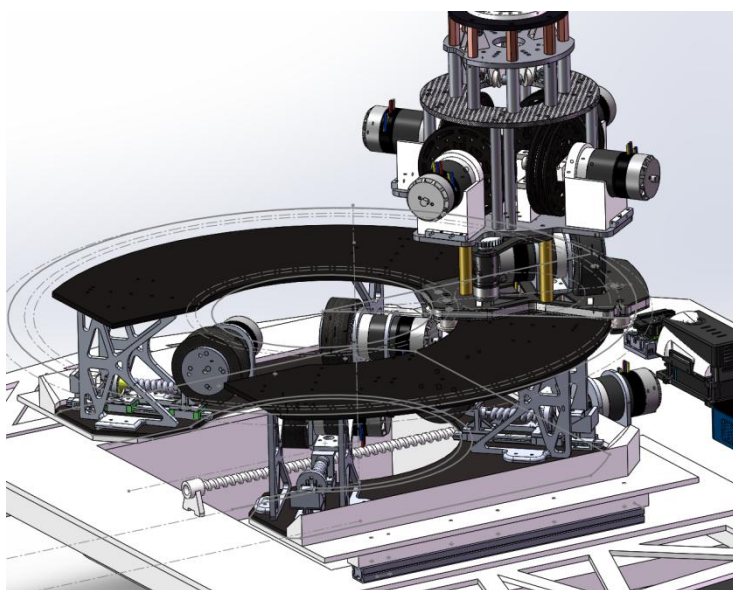
2.1.2 陆地运动底盘

陆地运动底盘以大截面铝管为主体，铝架上留有足够的安装孔，用于安装轮组、云台、布线板等所需的构件元件，使用麦克纳姆轮实现全向移动。大截面铝管结构强度高、抗弯能力强，且结构简单便于检修或拆装更换。为使此底盘更简单轻便，铝管、碳纤维板进行了大面积镂空减重处理，并舍弃了悬挂系统。



2.1.3 陆空一体化底盘

在完成了上述两种底盘的模型设计、实物测试机构的搭建与测试，确定了两种底盘的可行性后，便可开始进行一体化底盘的设计与搭建。一体化底盘由上述两种底盘结合而成，拥有大截面铝管为主体的简易地面运动底盘，其中心部位装有可自动分离的攀爬底盘模块，从而实现机器人可同时拥有陆地运动与攀爬运动的能力，有助于进一步实现机器人的自动化。



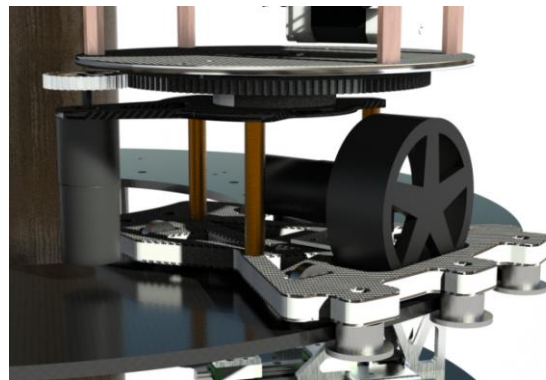
2.2 360 度旋转式云台机械设计

云台为单独一个模块。云台整体挂载在攀爬底盘上，通过一个主动轮与若干支撑用从动轮，可使云台在底盘进行环形运动。

云台拥有一个 Yaw 轴，云台上板与象鼻及末端夹爪或其他执行机构固连。云台上板与云台间可相对转动，进一步提高了象鼻的灵活度，使其适用更多的使用场景。云台 Yaw 轴使用交叉滚子轴承连接，可承载较大的轴向力。云台 Yaw 轴使用 N20 电机通过齿轮驱动，减速比为 1: 4，可以在满足正常驱动条件下提高 YAW 轴的负载。

由于本机器人需要攀爬，机器人需要较轻的重量。所以云台整体使用了较轻碳纤维板与铝合金件。碳纤维板各性能优异，密度较低，并且可以自己使用雕刻机加工降低成本。铝合金件拥有较高的强度与刚度，适用于齿轮与支撑件。

本云台仍存在较大问题，后期需要进行优化改进。改进方向：1.改变挂载轮的设计，如改为上下均有支撑轮夹紧底盘的水平板。2.结合受力分析改变支撑板件的形状、大小和镂空形状。3.优化驱动轮的形式，提高驱动效率。



2.3 多自由度线驱动象鼻机械设计

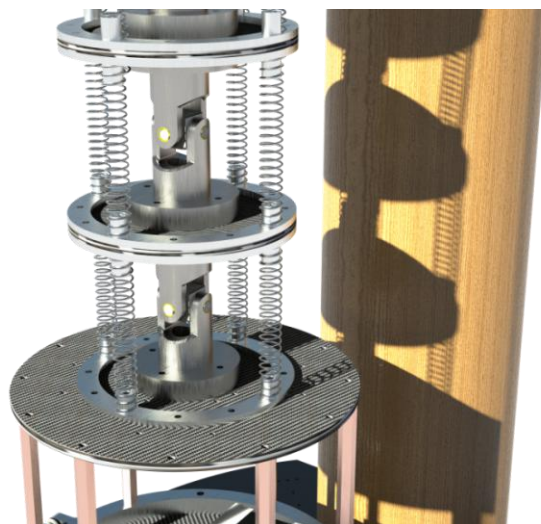
2.3.1 象鼻机构组成

象鼻模块由多节象鼻子关节组成，象鼻子关节由万向节做链接结构，通过四个压簧保证柔性的象鼻传力的效率和象鼻机构的姿态，最终通过钢绳贯穿所有关节，以实现线拉改变象鼻姿态。

同时，象鼻子关节的模块化设计，让机器人象鼻机构的长度选择十分灵活，

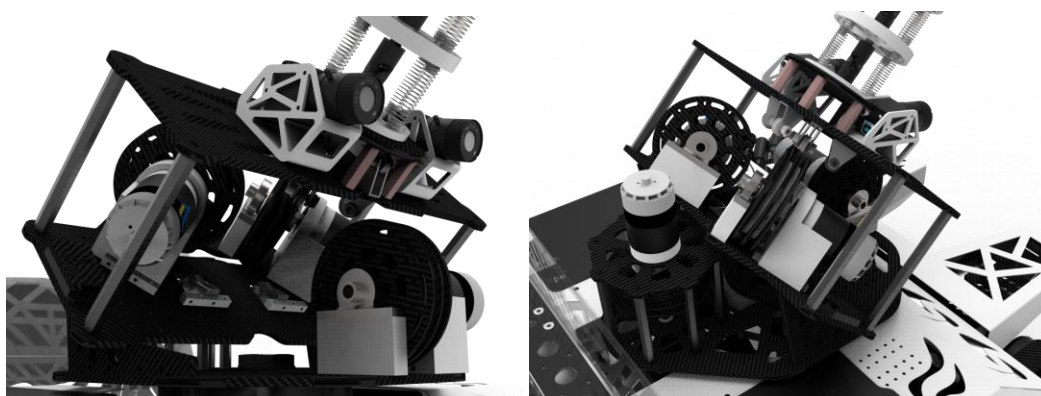
可以以实际工作场景选择子关节数目。

各底板采用密度较小的碳纤维材料，而弹簧支承架和万向节的主要部分采用 PLA 材料通过 3D 打印得到部件，以达到轻量化的目的。这样做的好处是减小底盘和 yaw 轴的传动负担，并能优化和调整机器人整体的重心。



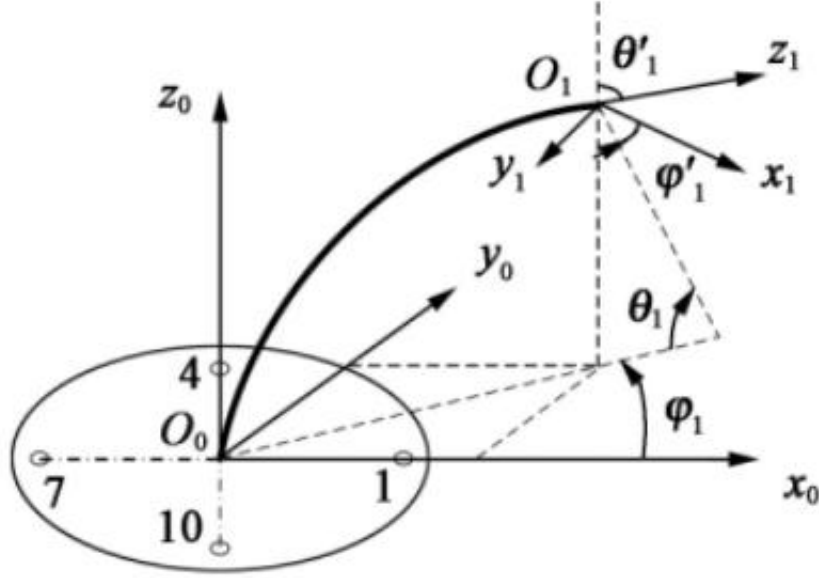
2.3.2 象鼻机构驱动原理

我们选择 3508 无刷减速电机作为象鼻机构的线拉动力，为了降低硬件拓扑的复杂度，将两支钢线通过自制绕线盘连接，使象鼻子关节直径和绕线盘直径相等，便于运动简算和钢线的张紧调整。通过 3508 无刷减速电机电机上绕线盘轮传递线拉动力，共计四组线拉机构得以实现象鼻各个方向的摆动，根据测试效果，我们将设置 8 个活动关节，其中两组绕线盘端头位于象鼻总长一半的位置，另外两头端头位于象鼻顶端，实现双线驱动控制身体姿态，同时双线驱动控制象鼻顶端姿态，实现立体的多种姿态，以适应实际复杂的工作情况和难以抓取位置的精准定位。



2.3.3 象鼻机构运动分析

为实现后续的精准确制和对视觉反馈做出相应的运动规划, 我们研究并建立了象鼻机构的运动模型。如下图是单级柔性关节的运动学模型, 在第一级柔性关节的基座关节圆盘中心和末端关节圆盘中心处分别固定基坐标系 $\{O_0\}$ 和末端坐标系 $\{O_1\}$, 两坐标系的坐标系原点分别位于两个圆盘中心处, x_0 轴和 x_1 轴分别平行于基座关节圆盘和末端关节圆盘表面并 指向第 1 条驱动线的孔中心, z_0 轴和 z_1 轴垂直于关节圆盘, 且机械臂延展的方向为其正方向, 右手定则确定 y_0 轴和 y_1 轴方向。



运动模型基于以下前提: 关节之间不发生相对周向转动; 单级线拉转动角度 θ , 将平均分配到各从动子关节。结合模型几何关系和机器人运动学分析, 得出关节弯曲量 θ_1 和侧移角度 ϕ_1 对和操作空间的映射, 其其次变换矩阵 T 为:

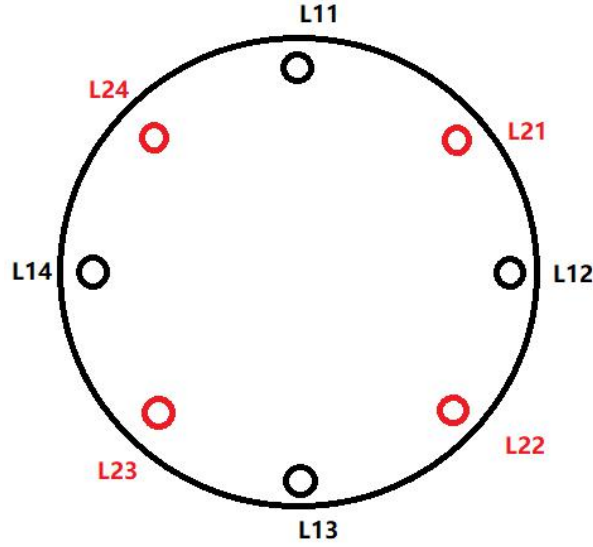
$$\text{Trans}\left(\frac{l}{\theta_1} \alpha \varphi_1 (1 - c \theta_1), \frac{l}{\theta_1} s \varphi_1 (1 - c \theta_1), \frac{l}{\theta_1} s \theta_1\right) \times \text{Rot}(z, \varphi_1) \times \text{Rot}(y, \theta_1) \times \text{Rot}(z, -\varphi_1) =$$

$$\begin{bmatrix} c^2 \varphi_1 c \theta_1 + s^2 \varphi_1 & c \varphi_1 s \varphi_1 c \theta_1 - c \varphi_1 s \varphi_1 & c \varphi_1 s \theta_1 & \frac{l}{\theta_1} c \varphi_1 (1 - c \theta_1) \\ c \varphi_1 s \varphi_1 c \theta_1 - c \varphi_1 s \varphi_1 & s^2 \varphi_1 c \theta_1 + c^2 \varphi_1 & s \varphi_1 s \theta_1 & \frac{l}{\theta_1} s \varphi_1 (1 - c \theta_1) \\ -c \varphi_1 s \theta_1 & -s \varphi_1 s \theta_1 & c \theta_1 & \frac{l}{\theta_1} s \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过链式法则，其二级线拉机构的其次选择变化矩阵为

$$T_o^2 = T_o^1 \cdot T_1^2$$

关节空间至驱动空间的映射关系为：已知机械臂柔性关节弯曲变化量关节弯曲量 θ_1 和侧移角度 ϕ_1 ，求解机械臂每根驱动线长度的变化量。对驱动线有下图定义，根据上图得出如下几何关系。



$$\Delta L_{11} = -\Delta L_{13} = r\theta_1 \cos \phi_1 \quad \Delta L_{12} = -\Delta L_{14} = r\theta_1 \cos (\phi_1 + \frac{\pi}{2})$$

$$\phi_1 = \arctan (\frac{L_{12}}{L_{11}}) \quad \theta_1 = \Delta L_{11} r \cos \phi_1$$

同理，对第二级线拉机构同样的映射关系，解耦后有如下关系：

$$\Delta L_{21} = -\Delta L_{23} = r\theta_1 \cos \phi_1 + r\theta_2 \cos (\phi_2 + \frac{\pi}{4})$$

$$\Delta L_{22} = -\Delta L_{24} = r\theta_1 \cos (\phi_1 + \frac{\pi}{2}) + r\theta_2 \cos (\phi_2 + \frac{3\pi}{4})$$

2.4 模块化末端执行机构机械设计

模块化夹爪放置在象鼻机构顶端，以实现夹取，运输等实际工况下的作用。为了减少舵机的数量和其他复杂的电气装置的使用，我们创新性地设计了一套单舵机控制的四爪夹爪，它的工作原理是通过齿轮和每只夹爪上的齿条进行啮合，并用 MG995 双头舵机带动下端齿轮转动时，四只夹爪同时开合，实现抓取效果。爪尖采用韧材料 PLA 通过 3D 打印得到，高响应的爪尖让抓取的鲁棒性增加，

同时可预留孔位更换爪端以安装剪切、喷嘴机构进一步拓宽其功能模块。如图所示，我们进一步设计了单舵机驱动的剪切机构，可对冗余树枝进行剪裁工作，其通过连杆与不完全齿轮进行动力传输，最终实现剪裁功能；此外我们还设计了欠驱动齿轮抓取机构，使其能自适应地抓取不同形状的污染物，达到治理污染的效果。



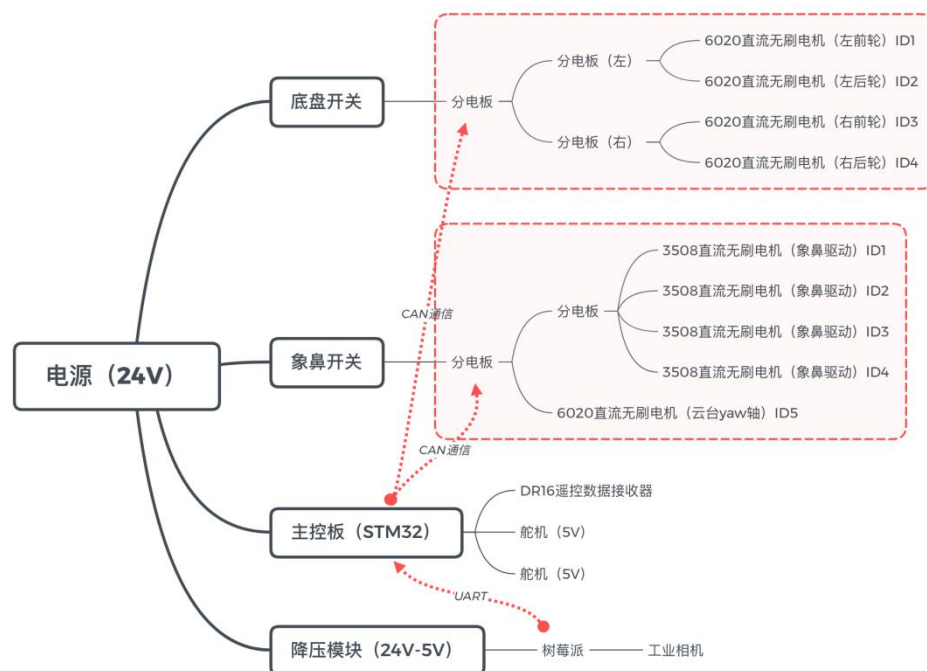
3 电控设计方案

3.1 硬件拓扑设计

电源部分采用 24V 电池进行供电，接入一分电板，通过底盘开关与象鼻开关分别控制底盘供电与上层供电，底盘由 4 个 6020 直流无刷电机进行驱动，实现前后左右自由移动，象鼻由一个 6020 直流无刷电机控制云台 yaw 轴和 4 个 3508

直流无刷电机驱动线拉机构。分电板再独立给 STM32 主控板供电，主控板供电且控制末端执行机构舵机。分电板给 24V 转 5V 降压模块给树莓派进行供电，树莓派通过 USB 给相机供电。

主控板通过 CAN 线与电机相连实现 CAN 通信, 主控板通过 USB 转 TTL 模块通过串口与树莓派进行 UART 通信。主控板直接给舵机供电输出 PWM 波控制舵机运动。主控板通过 DBUS 接口接入 DR16 遥控器接收器接收遥控器传送的数据, 并对数据进行解包处理控制机器人运动。



3.2 嵌入式底层驱动系统设计

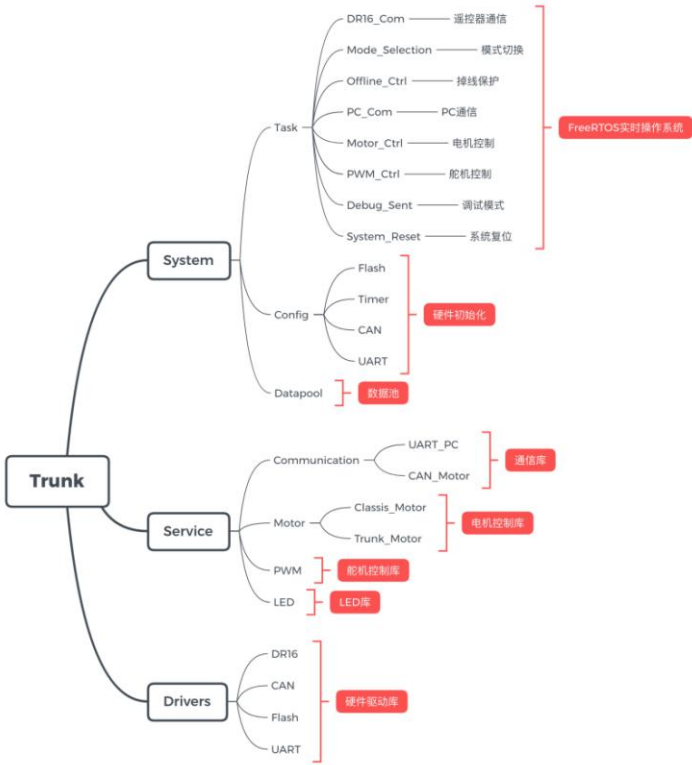
嵌入式底层驱动基于 STM32 芯片开发，采用 FreeRTOS 实时操作系统进行任务管理。系统任务包括：遥控器通信、模式切换、掉线保护、PC 通信、电机控制、舵机控制、调试模式、系统复位。对系统 Flash、Timer、CAN、UART 进行初始化。

中间层采用通信服务模块、电机控制模块、舵机 PWM 控制模块、LED 显示模块。通信模块采用 CAN 通信与电机实现全双工通信，接收电机反馈的电流值速度值，同时进行运算给电机发送控制数据；与树莓派采用串口通信，通过接收树莓派相机数据控制机器人姿态。电机控制模块采用串级 PID 算法进行位置控

制，采用卡尔曼滤波算法处理接收到的目标数据，采用线拉驱动算法实现象鼻的姿态控制。

驱动层包括 DR16 遥控器模块、CAN 通信模块、Flash 模块、UART 通信模块。DR16 遥控器模块用于将接收到的遥控机数据进行解包处理，并给对应动作标志位置一。通信模块包括通信初始化，过滤器初始化以及通信中断处理。Flash 模块包括实时数据记录，工作日志 LOG 写入。

通过模块化设计，底层驱动系统分成三大模块包括应用层、中间层、驱动层。结合不同层次的不同模块处理，最终实现机器人的姿态控制，完成制动动作，并可以实现自动动作组执行。



4 视觉算法设计方案

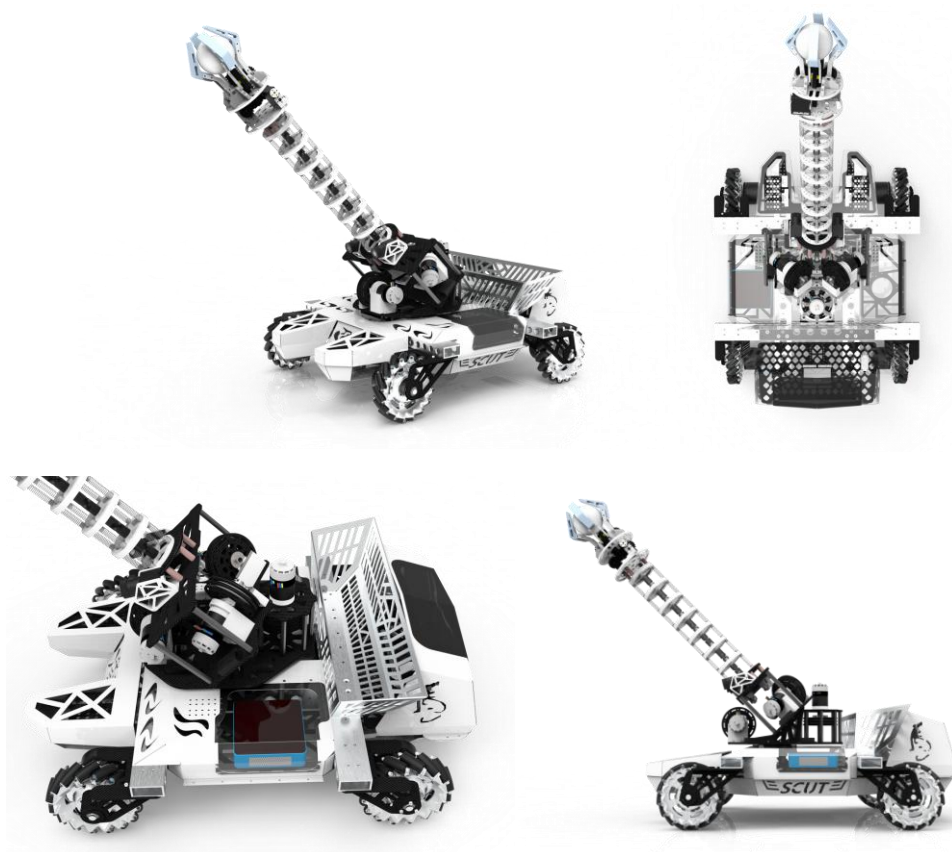
考虑其使用场景，视觉运算平台使用树莓派 Raspberry Pi 4B,相机使用 MindVision 工业相机作为其视觉的输入。作为一个实时性要求较高的机器人，我们采用 C++作为代码语言进行设计以达到较高帧率。

在视觉辅助识别中，我们使用 OpenCV 计算机视觉库作为工具，使用传统的数字图像处理算法包括但不限于阈值分割、色彩空间变换、滤波器、形态学滤波，对目标特征进行识别提取、目标筛选、追踪跟随、目标预测、决策。

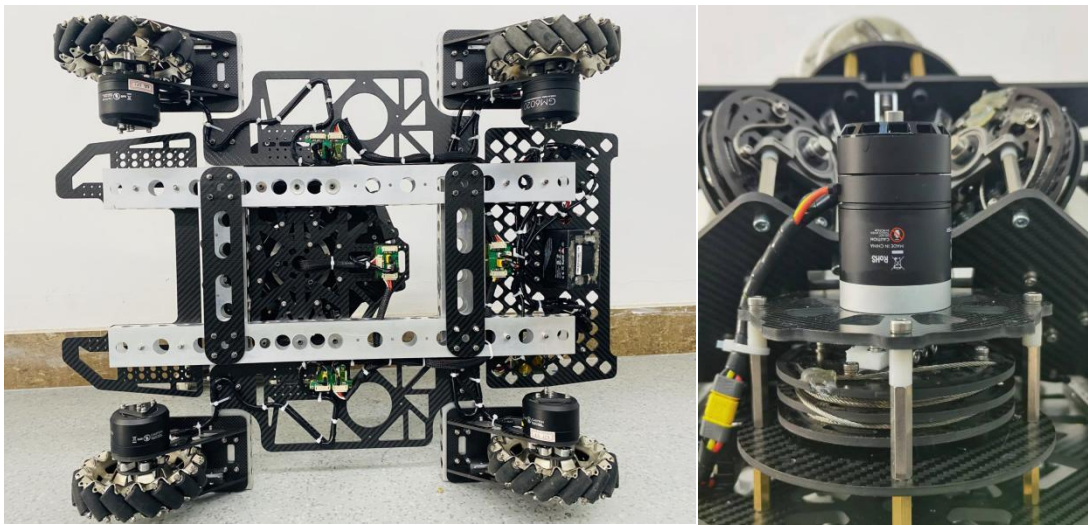
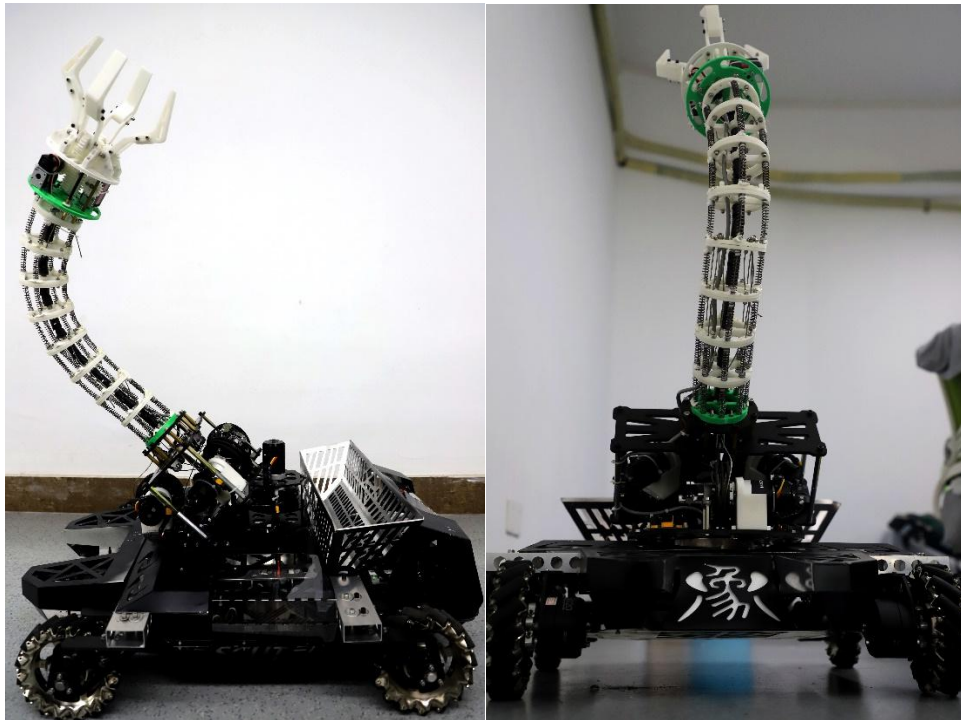
在通信上，我们使用 USB-TTL 串口通信方式进行电控-视觉的数据通信，参考计算机网络中数据链路层的通信方式，为防止数据丢包，我们采用透明传输协议进行数据通信。

5 机构模型

5.1 渲染模型



5.2 实物模型



6 设计创新点

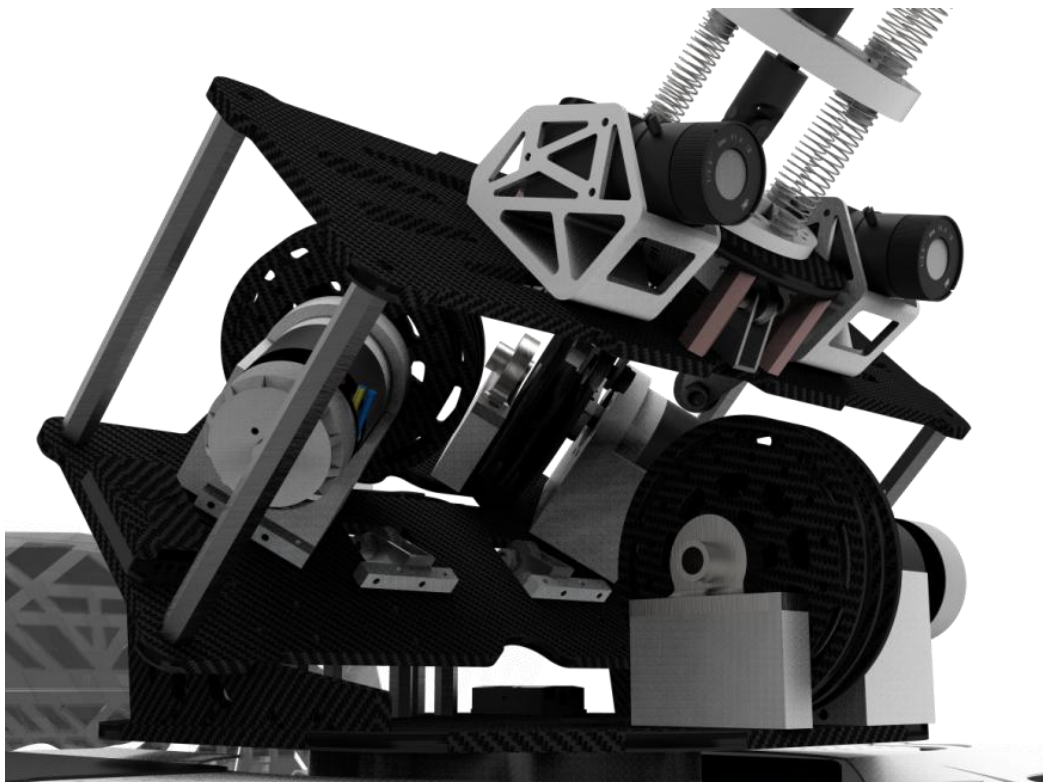
本作品的核心创新点为仿生线拉技术，与象鼻肌腱传动原理相一致符合仿生学设计要求，结合万向节实现象鼻多自由度运动。

线拉技术可以使质量比较大的电机驱动器远离末端执行机构，可以有效减轻末端执行机构的惯性，提高动态性能。且线拉技术排布灵活，适合在空间较小的

领域实现多自由度控制。此外，区别于传统的电机关节控制方案，线拉技术可极大降低线路拓扑结构，通过机械创新设计降低硬件拓扑的复杂度。其中为了线拉机构的简算和检修的便利，线拉系统需要的较大的体积用于绕线盘和钢线的摆放，为了其应用性和灵活性，我们在寻找稳定和小型化之间的平衡。

其次，基于自动化思想，底盘采用陆空一体化设计，无需人工将机器人固定在被攀爬物体上，结合视觉对准可实现地面运动与空中运动自动切换。

最后，基于模块化思想，末端执行机构可自由切换，适配不同场景，实现不同的功能，如在空中可采用剪刀、喷嘴实现裁剪枯枝、喷洒树木修复药剂、修补虫洞等生态修复工作，在地面上可采用模块化夹爪、灵活机械手实现垃圾拾取，清理落叶等清洁工作。



7 应用前景

通过模仿象鼻仿生力学传动原理的仿生学设计,机械象鼻可在减少电机驱动的同时实现多自由度运动,适用于在空间较小的领域实现灵活运动,避免传统电机关节控制中存在的关节之间相互约束的问题,实现多自由度解耦。

陆空一体化底盘、360 度旋转式云台、多自由度线驱动象鼻以及模块化末端执行机构,从而实现地面运动、攀爬、转动、象鼻灵活运动、夹取、裁剪等多项功能。

机器人可应用于裁剪枯枝、喷洒树木修复药剂、修补虫洞等生态修复工作,垃圾拾取,清理落叶等地面清洁工作,配合机器视觉辅助控制,真正实现全自动一体化作业。

参考文献

- [1] 赵智远. 线驱动连续型机械臂运动学与运动规划研究[D].中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2019.
- [2] 郭艳婕,李升,索劭轩,杨浙帅,赵志斌,陈雪峰.线驱动连续体机器人设计与实现[J].实验技术与管理,2021.
- [3] 张元兴. 自适应欠驱动手指机构研究[D].南华大学,2014.