

评分：_____



广东工业大学

机器人入门项目设计 II (2)

2019Robocon 快马加鞭方案报告

学 院 粤港机器人学院

年 级 黄埔三期

组 别 第二组

老 师 陈玮

2018 年 12 月 12 日

目录

目录	1
1 概述	1
1.1 题目背景及意义	1
1.2 比赛规则	2
图 1.1 比赛场地示意图	2
2 比赛方案综述	3
2.1 比赛流程	3
2.2 机器人功能	4
2.2.1 MR1 机器人功能	4
2.2.2 MR2 机器人功能	4
2.3 比赛目标	4
3 机器信使 1 方案设计	5
3.1 运动方式	5
3.1.1 底盘结构	5
3.1.2 驱动方式	6
3.1.3 半自动运动规划	7
3.1.4 器件选用	8
3.2 拐骨的拾取与投掷	11
3.2.1 工作流程	11
3.2.2 装置分析	12
3.3 令牌的携带与交接	12
3.4 机器信使 1 通讯方式	14
3.5 电路优化	14
4 机器信使 2 方案设计	16
4.1 功能要求	16
4.2 机构设计	17
4.2.1 机构尺寸	17
4.2.2 材料选择	18
4.3 四足机器人运动学分析	18
4.3.1 足端的位姿描述	19
4.3.2 连杆的正运动学分析（D-H 分析法）	19
4.3.3 连杆的逆运动学分析	23
4.4 四足机器人动力学分析	23
4.5 四足机器人的步态规划	25
4.5.1 规则步态说明	25
4.5.2 两种步态的运动方式及稳定性分析	26
4.6 四足机器人运动控制	27
4.6.1 足端轨迹规划	27
4.6.2 爬坡分析	28
4.6.3 舵机控制	29
4.7 视觉识别	29

4.7.1 MR2 视觉循线移动	29
4.7.2MR2 障碍识别	31
4.8 外观优化	31
5 人员安排及进度规划.....	32
5.1 人员安排	32
5.2 任务分配	32
5.3 进度规划	33

1 概述

1.1 题目背景及意义

全国大学生机器人大赛 Robocon 赛事始于 2002 年，每年举办一次。大赛的冠军队代表中国参加亚洲-太平洋广播电视联盟（Asia-Pacific Broadcasting Union, ABU）主办的亚太大学生机器人大赛（ABU Robocon）。青年学生的积极参与和众多机构的鼎力支持成就了大赛的健康发展。大赛目前已成为国内技术挑战性最强、影响力最大的大学生机器人赛事。

每年，由 ABU Robocon 的承办国制定和发布比赛的主题和规则。全国大学生机器人大赛 Robocon 赛事采用这个规则进行比赛。参赛者需要综合运用机械、电子、控制、计算机等技术知识和手段，经过约十个月制作和准备，利用机器人完成规则设置的任务。作为高技术的竞赛平台，这个比赛从一开始就吸引了大专院校学生的浓厚兴趣。我国代表队在参加过的 16 届 ABU Robocon 中表现不凡，曾获 5 次冠军，在国际上展现了我国机器人教育的卓越水平。

通过整合高校、媒体、企业和政府的资源，这项赛事已经成为我国理工科院校最具影响力的赛事，对机器人教育做出了积极贡献，为我国机器人产业及相关科技领域培育了大批卓越的企业家和工程师。

第十八届全国大学生机器人大赛 ROBOCON 以“快马加鞭”为主题,灵感来自古代传递信息的驿传制度。我国古代为接待往来官员和传递政府文书、军令建立了驿传制度以及为此而征发的徭役制度。驿传制度始于殷商。甲骨文有“骑士”、“车”、“驿传”等记载。春秋战国已有邮驿，甘肃嘉峪关魏晋墓的砖画上已有驿使快马传书的记载。秦统一后，广建驿道，邮驿发展迅速。汉承秦制，在通路上每 30 里置一驿站，供传递军事情报的官员途中食宿、换马之用。唐有车、马、船之分,设水驿、陆驿、水陆兼办三种，由兵部统辖。宋驿传由军队统管，设军邮局，置日夜兼行的急递铺，专递送军事文书，有 800 里急报之说。元代设有蒙古站赤（驿传之音译）及汉地的驿站。明代驿传有陆驿、水驿、驿站、递运所、急递铺、马快船等。清代有驿站、塘、台、所、铺等。古代驿站一般备有人夫、车马，并指办禀给、口粮，供传递文书及过境官员使用。清光绪时，随着新式邮政的建立而渐被废止。

如今，信息以光速高速传递，互联网所形成的逻辑上单一且巨大的全球化网络使我们能不受空间限制并以多种形式进行信息交换。本年度的比赛用机器人演绎古代的信息传递方式，使我们对信息与知识的共享更有信心。

1.2 比赛规则

比赛在图 1.1 所示的场地上进行，红、蓝两队各占一半。比赛最多持续 3 分钟。每支参赛队有一个名为“机器信使 1”的手动机器人和一个名为“机器信使 2”的自动机器人。手动机器人携带作为信物的令牌从“龙门驿”（手动机器人的启动区）出发。它沿森林、桥梁行进，跨过界线 1，到达“大漠驿”（自动机器人的启动区）。这时，机器信使 1 将令牌交给在大漠驿的机器信使 2。一旦机器信使 2 成功地接收到令牌，它就可以沿着大漠区行进。机器信使 2 必须像马一样有四条腿，不能用轮子移动。机器信使 2 通过沙丘和草地，向“高山驿”进发。机器信使 2 到达高山驿后，机器信使 1 可以进入投掷区投掷兽骨得分。如果机器信使 1 获得 50 或更多得分，机器信使 2 就可以登山。此后，如果它到达山顶区，举起令牌，该队获胜，这就是所谓的“登顶”。

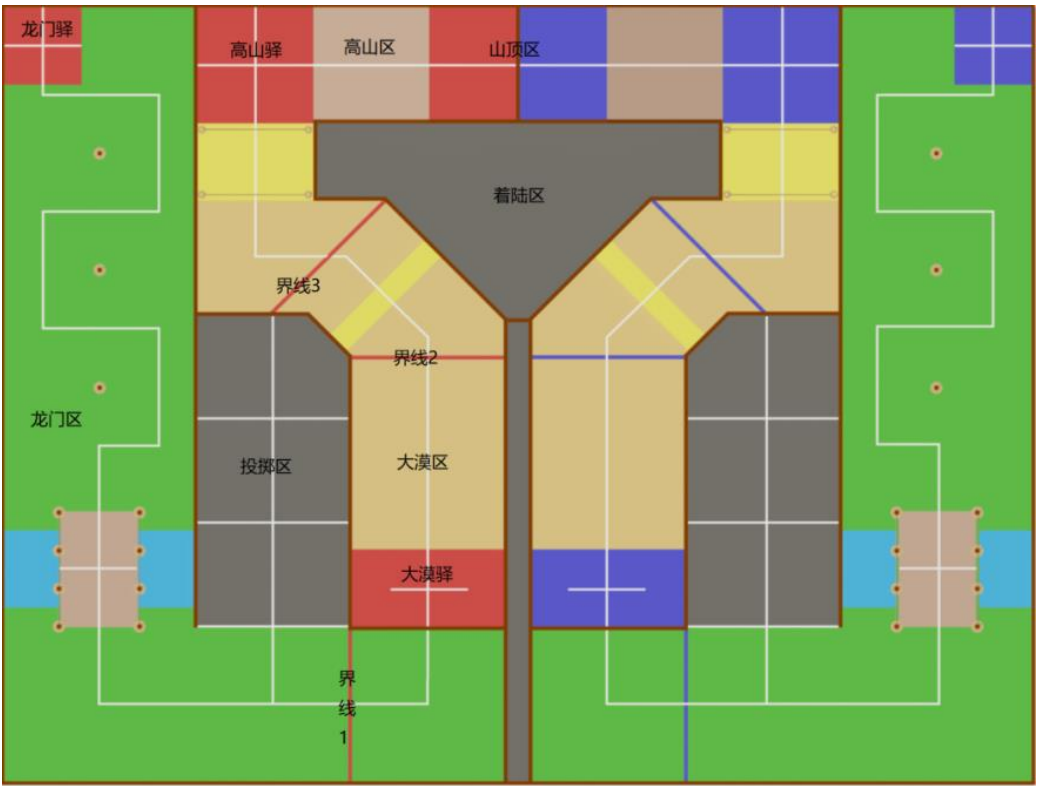
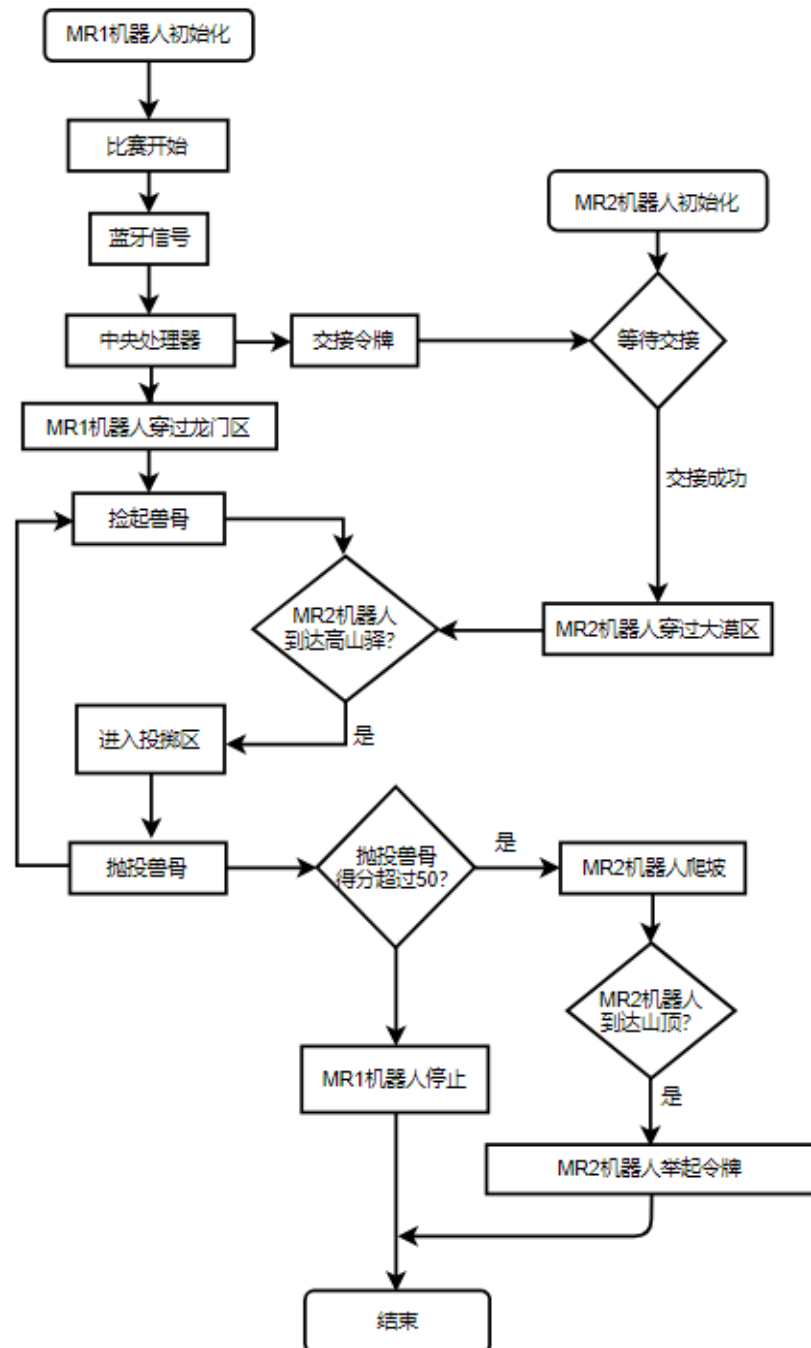


图 1.1 比赛场地示意图

2 比赛方案综述

2.1 比赛流程



2.1 比赛流程图

2.2 机器人功能

2.2.1 MR1 机器人功能

- ①快速灵活移动和旋转。
- ②拾取和抛掷兽骨。
- ③稳定递交令牌。
- ④蓝牙遥控功能。

2.2.2 MR2 机器人功能

- ①四足移动。
- ②定位。
- ③抓取并举起令牌。
- ④跨越障碍和爬坡。

2.3 比赛目标

通过对比赛难度的评估和对自身能力的认知，在这次机器人项目里我们组要达到的最终目标是 MR2 四足机器人能够到达高山驿（图 2.2 蓝色框位置），MR1 机器人能够抛投兽骨到指定地点（图 2.2 绿色框位置）。



图 2.2 任务指示图

3 机器信使 1 方案设计

3.1 运动方式

信使机器人 1 尺寸大小要求在 $1000 \times 1000 \times 1500$ (mm) 的空间内，在比赛中需要快速穿过“森林”和“桥梁”，这要求机器人具有较好的灵活性，轻巧的结构和强劲的动力。整车模型如图 3.1

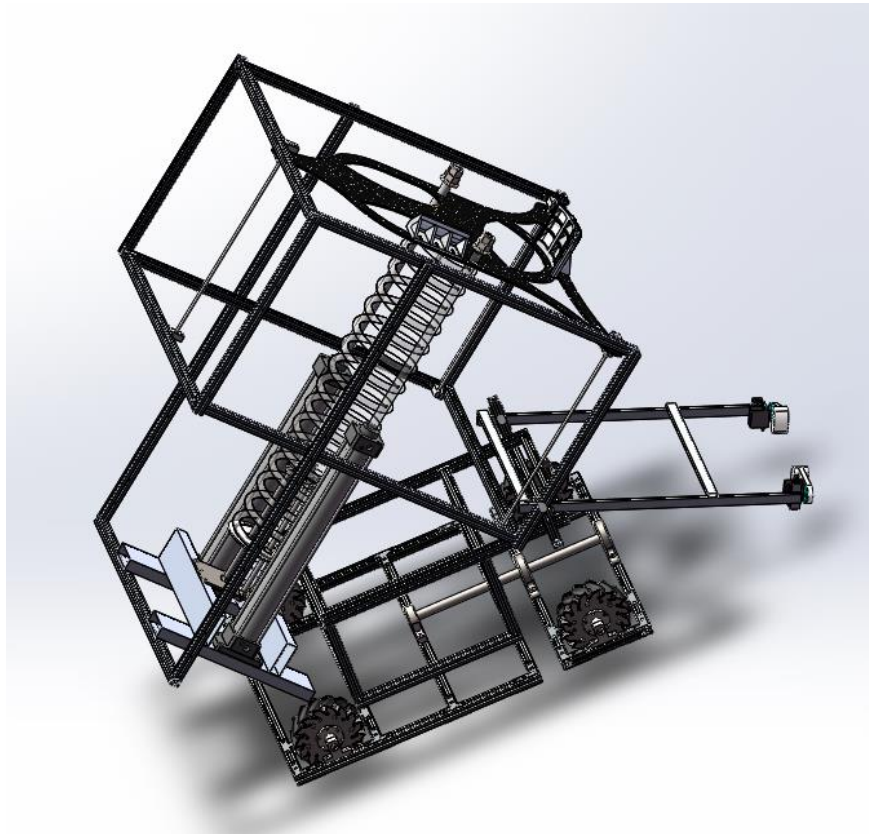


图 3.1

3.1.1 底盘结构

我组采用 4 个 maxon RE-35 24V 电机分别驱动 4 个麦克纳姆轮的移动方式(如图 3.1)。相比于 3 轮底盘，4 轮底盘的稳定性更优越，输出功率更大。相比于差速轮移动方式，4 个麦克纳姆轮可实现机器人的全方位平移，以节省在转弯时机器人自转所损耗的功率。maxon RE-35 24V 电机额定输出功率为 90w，经计算，该电机完全符合使用要求。

传统的保证 4 轮触地的方法是在每个轮子上添加悬挂装置，但我组计划采用添加一个中间旋转轴装置的方式保证 4 个轮子同时触地（如图 3.2）。该装置工作原理为：把前

面两个轮子和后面两个轮子分别作为一组轮子，组内两个轮子固定，不能相对移动，故两个轮子与地面的触点可连成一条固定的线段。倘若两组轮子相互固定，即两条线段不能相对移动，则不能保证线段的 4 个端点与地面同时接触。而在底盘中间加入一个旋转轴装置，允许前后两组轮子触点的线段成任意角，则可以保证 4 个端点都能与地面良好接触。

全向移动公式：

$$V_0 = V_X - V_Y - W * (L_1 + L_2) / (180/3.14)$$

$$V_1 = V_X + V_Y - W * (L_1 + L_2) / (180/3.14)$$

$$V_2 = -V_X + V_Y - W * (L_1 + L_2) / (180/3.14)$$

$$V_3 = -V_X - V_Y - W * (L_1 + L_2) / (180/3.14)$$

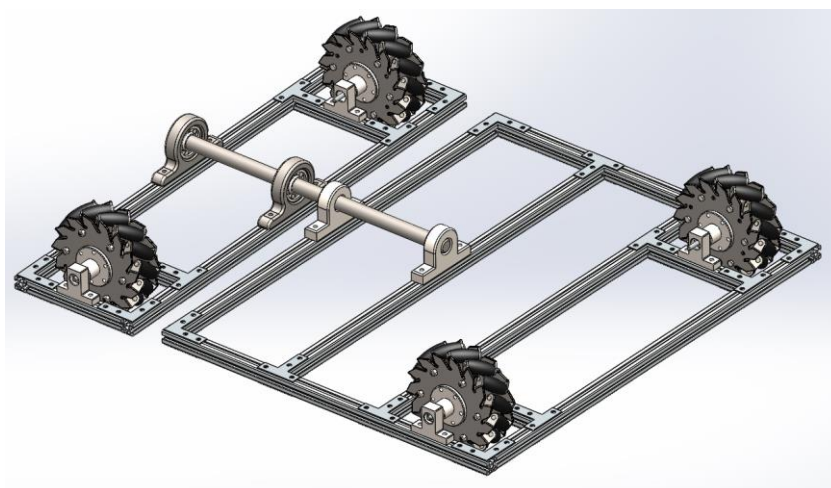


图 3.2 底盘模型

3.1.2 驱动方式

驱动方式：RM35 电机 + RMDS-107 驱动器（速度模式）

RM35 底盘电机是一款为 5kg~20kg 轮式机器人量身定做的仿造 maxon re35 电机的底盘动力电机，四轮底盘载重可达 40kg，具有高效率、低噪声的特点。

RMDS-107 驱动器带有电路保护和控制电机功能，只需选择好驱动器的工作模式，用 CAN 通讯协议发送数据给驱动器即可让驱动器发送合适的电流使电机按要求运行。



图 3.3 RM35 电机



图 3.4 RMDS-107 驱动器

3.1.3 半自动运动规划

运动追踪算法：

为了实现 MR1 机器人的自动移动功能，我们使用路径跟踪算法，它包括以下步骤：

- S1：设定移动机器人的工作路径；
- S2：根据移动机器人当前方向、当前速度及沿运动方向的尺寸设置前瞻点；
- S3：确定工作路径上距离前瞻点最近的相邻离散点；
- S4：计算前瞻点与直线之间的距离；
- S5：计算当前方向与直线之间的夹角；
- S6：根据距离及夹角计算左、右驱动轮转速差；
- S7：根据当前速度和速度变化对移动机器人的底盘进行速度调节。
- S8：间隔设定的时间后再返回步骤 S2 直到移动机器人完成工作路径跟踪。

如图 3.4 是我们组给地图设置的离散点，离散点设置的越多，需要检测位置的频率越大，避免出现漏点的情况。



图 3.5

当机器人遇到直角弯时，走曲线比走直角线更快。我们组可以人为预先给曲线设定好合适的离散点，也可以使用贝塞尔曲线算法，使机器人能够走近似曲线运动。

3.1.4 器件选用

编码器：

使用路径跟踪算法需要获取机器人的当前位置，我们组选择使用电机编码器反馈的电机运动信息来获取机器人当前的位置。

编码器把电机的角位移或直线位移转换成电信号，通过读取电信号可以得到电机转动的圈数。电机打滑、振动等因素会造成编码器读取误差。



图 3.6 编码器

如图 3.7 编码器盘上有很多光栅，通过感应经过光栅的个数获取电机旋转的圈数，光栅数越多的电机位置测量精度越高。

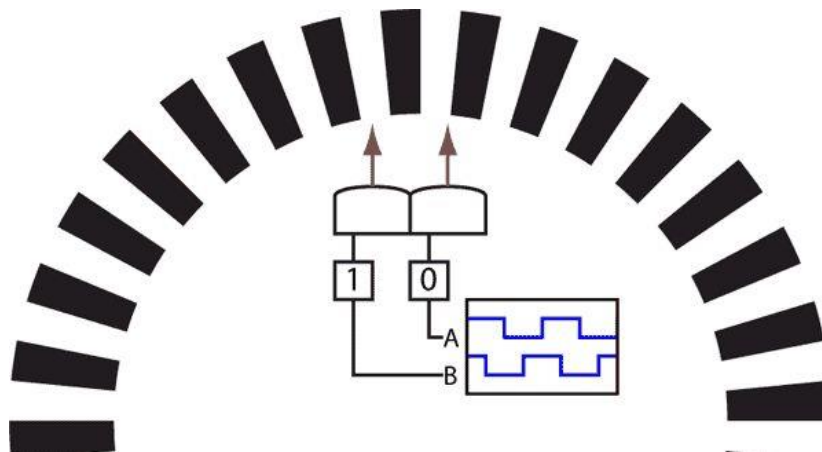


图 3.7 编码器原理图

陀螺仪角速度补偿:

使用路径跟踪算法需要获取机器人的当前姿态，陀螺仪模块可以获取机器人运动后的姿态角。陀螺仪的输出信号是一个与转动角速率基本成线性关系的模拟电压值，通过采集其输出的模拟电压值，经过 AD 转换为数字信号，对转换完的信号进行标度变换得到其转动的角速率，再积分即可得到角度值。陀螺仪易受温度影响，需要给陀螺仪模块配备温度控制，以使陀螺仪能够稳定工作。

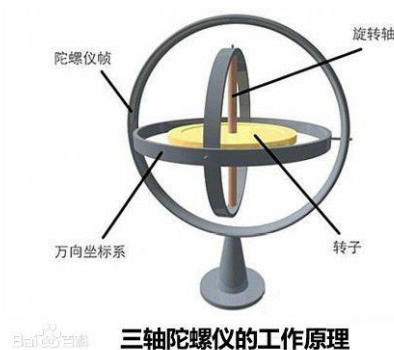


图 3.8 陀螺仪

陀螺仪由于本身精度原因，测量的角速度存在偏差，在积分过程中这个偏差会一直累加，可以利用加速度计传感器来进行修正。加速度计测得 X、Y、Z 轴的三个方向向量，并得到机体坐标系标准的重力向量，将两个向量矩阵做叉积运算，得到的这个向量叉积就是姿态误差向量，就是测量得到的角度和预测得到的角度之间的相对旋转。

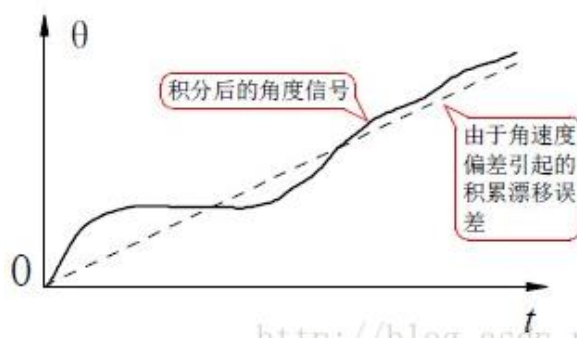


图 3.9 陀螺仪误差

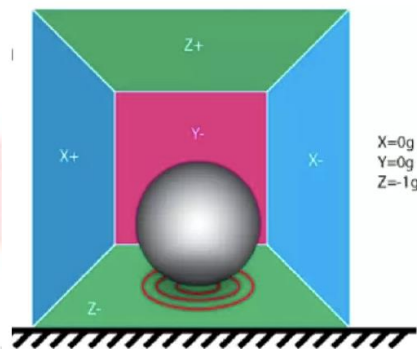


图 3.10 加速度计

单位化后的加速度计值与上一时刻预测得到的四元数做叉积运算，只要机体存在旋转也就是说只要机体姿态发生偏移，叉积结果必然不为 0，那么该“误差”值就会一直做 PI 运算对陀螺仪进行补偿，直到机体停止旋转。向量叉积得到的误差结果近似等于当期时刻相对于上一时刻旋转的角度，这个角度即是旋转角度和预测误差角度的叠加，总称为向量误差，角度越大，误差越大。我们将加速度相关量转化为角度相关量，因而可以用这个角度值乘一个系数来修正陀螺仪的角速度。

最后可使用 PI 滤波计算公式来修正角速度。

- 1、 比例增益 K_p 控制收敛到加速度计速率
- 2、 积分增益 K_i 控制陀螺仪偏差的收敛速率

如图 3.9 是用编码器和陀螺仪的原理制作的 OPS-9 全场定位模块，该全场定位模块能检测出机器人在平面上的坐标和姿态。

优点：

- 1.该模块带有悬挂系统，能与地面充分接触；辊子内置轴承，阻力较小；减少测出的数据会因为车轮打滑出现的误差
- 2.该全场定位模块采用 4096 线的编码器和九轴陀螺仪，具有高精度和高分辨率。
- 3.该模块内置 MEMS 惯导技术与磁阻位移测量技术，通过扩展卡尔曼滤波算法，互补滤波算法以及艾克申 A-Fusion 算法，保证定位的准确性和可靠性。



图 3.11

3.2 拐骨的拾取与投掷

拐骨拾取投掷装置由气缸、舵机、连杆、挡板、弹簧、支撑板等机件组成(如图 3.11)。

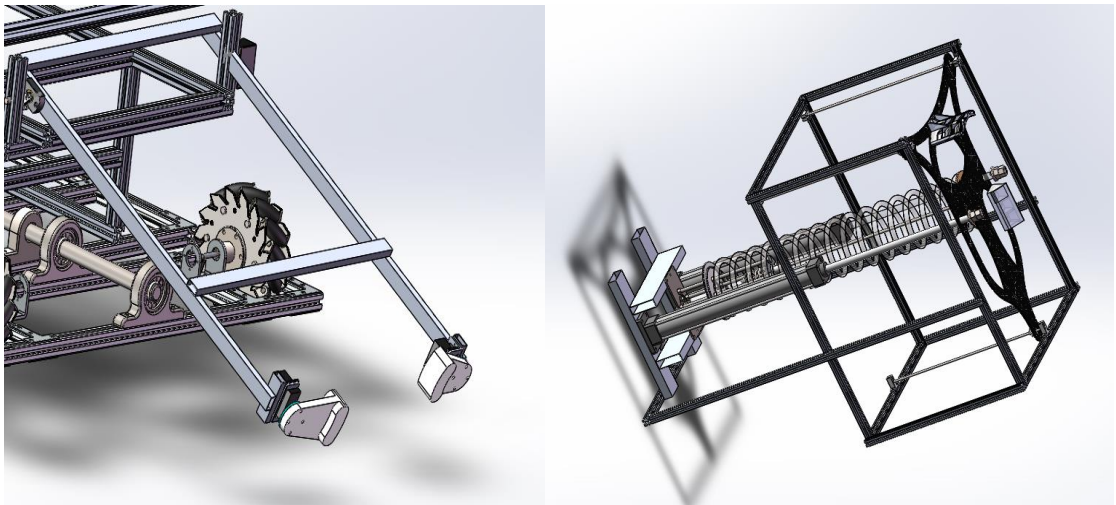


图 3.12

3.2.1 工作流程

- 1、开始时，舵机控制夹板处于松弛状态
- 2、接触兽骨时，舵机控制前面两块挡板抱住兽骨。
- 3、上方舵机旋转，将兽骨送至弹射装置内
- 4、气缸带动弹簧收缩，兽骨受重力影响随弹簧收缩
- 5、松开弹簧，发射兽骨

3.2.2 装置分析

依据规则我们设计的弹簧装置服从以下参数要求

劲度系数	线径	中径	原长	有效圈数	有效距离
1.48N/m	10mm	150mm	1000mm	16	400-800mm

飞行轨迹如图（图 3.13）所示

发射角度 40° ，速度 5.68m/s。

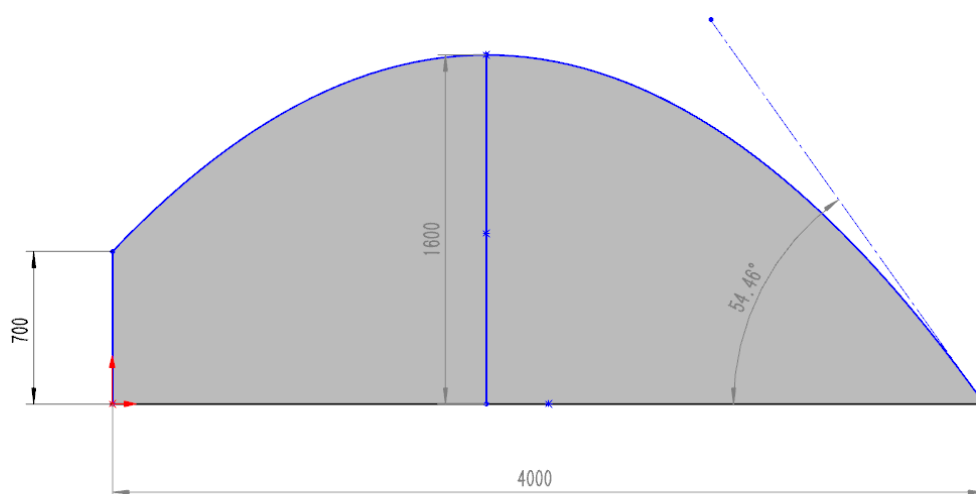


图 3.13

3.3 令牌的携带与交接

规则中，MR1 与 MR2 都需要携带令牌，且 MR1 与 MR2 间有一次令牌交接。为缩短令牌交接时间并提高成功度，我们将装置设计为令牌在 MR1 的电机带动下由引力作用自由滑落到 MR2 的承接装置上，同时 MR2 上的红外传感器收到信号，启动 MR2，并勾住令牌，交接成功。

MR2 在携带令牌时，令牌需要低于其顶部，且到达山顶区域后，需要将令牌提升至顶部，故 MR2 的令牌携带装置也需要加装一个机构升降装置，该装置为一个由电机提供动力可绕一端旋转的杠杆。该杠杆一端固定于 MR2 上，另一端为一个可勾取令牌的机构。与令牌接触的面可自由转动，以保证在抬升令牌过程中，令牌可在重力的牵引下保持竖直。（如图 3.13）

3.3.1 令牌的携带与交接流程

- 1、MR1 携带令牌并开始穿越燕然地区，MR1 上的机构①处于竖直状态。
- 2、MR1 接近 MR2，MR1 开始自动识别 MR2 交接机构位置，位于 MR1 的机构①开始下摆。
- 3、令牌滑落至 MR2 的机构②，触发红外传感器，MR2 携带令牌并穿越戈壁地区，此时，电机驱动杠杆使得令牌处于最低位置。
- 4、操作手操控 MR1 后退，并完成令牌的交接。
- 5、MR2 登上山顶后，电机驱动杠杆将令牌举起，完成举起令牌动作。

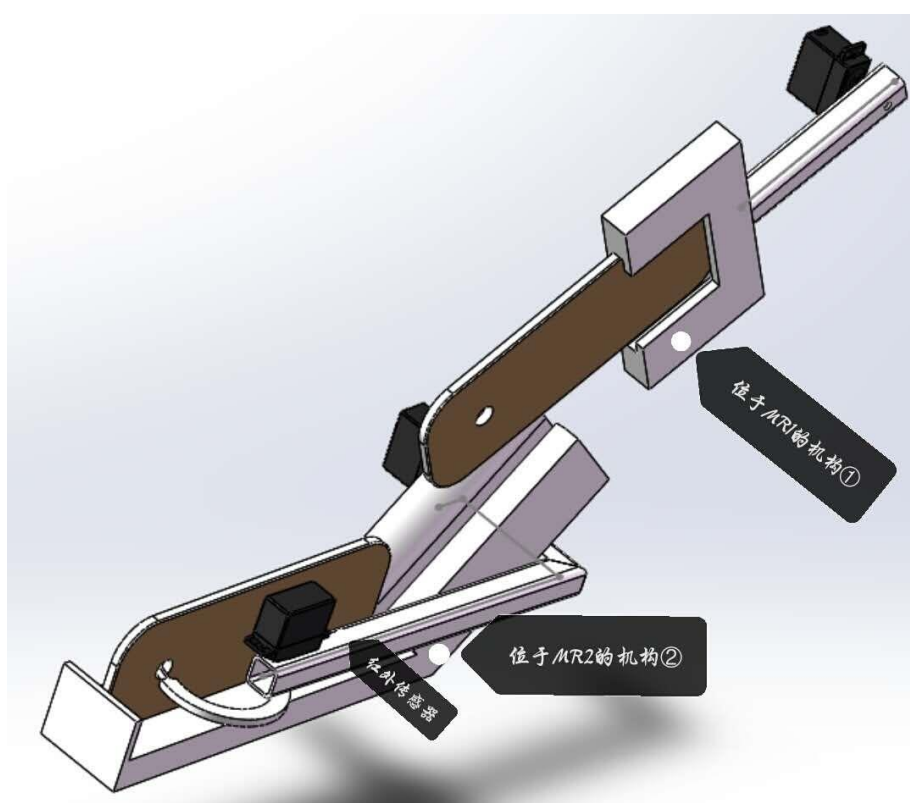


图 3.14 令牌交接模型

3.3.2 交接机器人对齐

在两台机器人进行令牌交接时，需要两台机器的相对位置较为精确才能保证交接机构正常运作。因此计划在二号机器的身上贴上一个自定义的二进制矩阵，在一号信使相应位置设置一个摄像头。通过使用 opencv 的 ARUco 库，一号信使可得到自身相对于二号信使的位姿（即相对位置与旋转矢量）。当需要对齐时，操作手按下手柄上的一个按键，便进入自动对齐模式，一号信使根据位姿数据不断进行调整，直至位姿数据与完全

对齐时的数据一致，也就可以完美实现令牌对接功能。

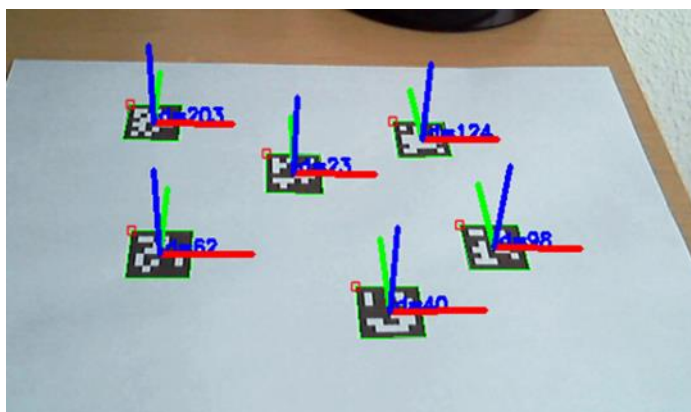


图 3.15

3.4 机器信使 1 通讯方式

为遥控 MR1 机器人，我们选择用 PS2 手柄来遥控。PS2 手柄使用 SPI 通讯协议。SPI 总线系统是一种同步串行外设接口，通常通过四根线即可实现通讯。PS2 手柄由手柄和接收器两部分组成，手柄主要负责发送按键信息；接收器与单片机相连，用于接收手柄发来的信息，并传递给单片机。



图 3.16

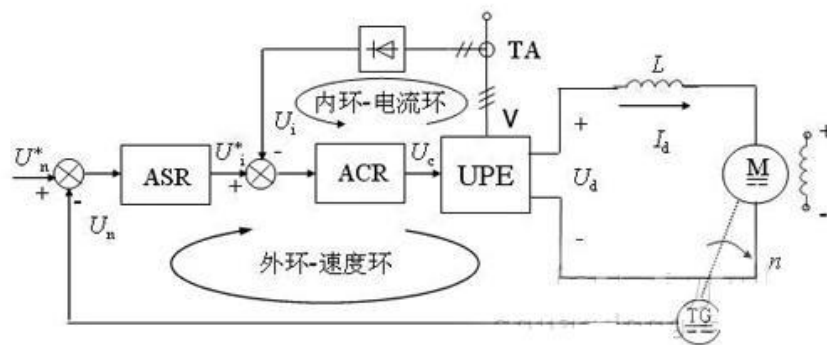
优点：发射/接收端自动连接，通道多（包括摇杆模拟值），通信协议简单，易于开发。

3.5 电路优化

电机闭环控制（PID）：

串级控制系统是改善控制质量的有效方法之一，在过程控制中得到了广泛的应用。所谓

串级控制，就是采用两个控制器串联工作，外环控制器的输出作为内环控制器的设定值，由内环控制器的输出去操纵控制阀，从而对外环被控量具有更好的控制效果。这样的控制系统被称为串级系统。PID 串级控制就是串级控制中的两个控制器均为 PID 控制器，它增强了系统的抗干扰性(也就是增强稳定性)。



4 机器信使 2 方案设计

4.1 功能要求

机器信使 2 要求为具有四条腿的全自动机器人，需要完成的主要功能有：全自动移动、交接令牌、跨越障碍及爬坡、登顶举起令牌。

(1) 沙丘 (图 4.1)

参数：高 10cm，宽 30cm

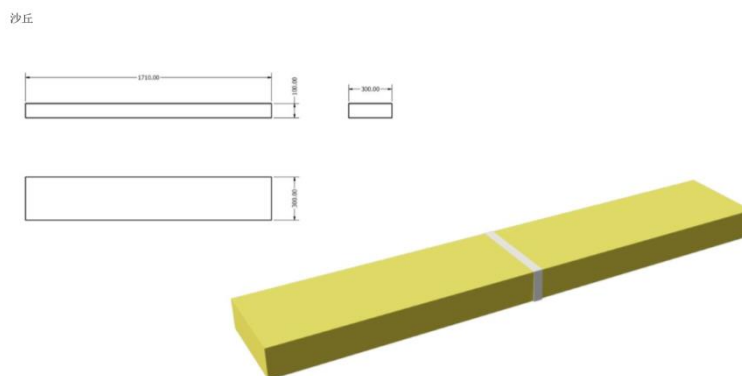


图 4.1

(2) 草地 (图 4.2)

参数：①两条绳索间距 80cm ②高度 9-20cm

③通过数学计算，以其中一个 10cm 高的基座底部为坐标原点可拟合出绳索近似符合方程： $y=0.0006372302x^2-0.0504868397x+10$ （方程图像 4.3）

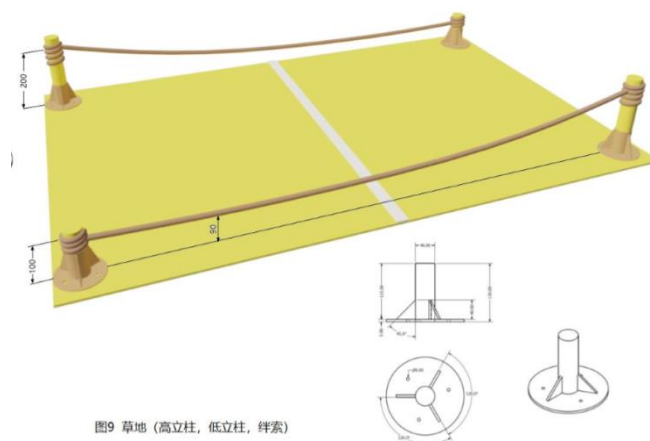


图 4.2

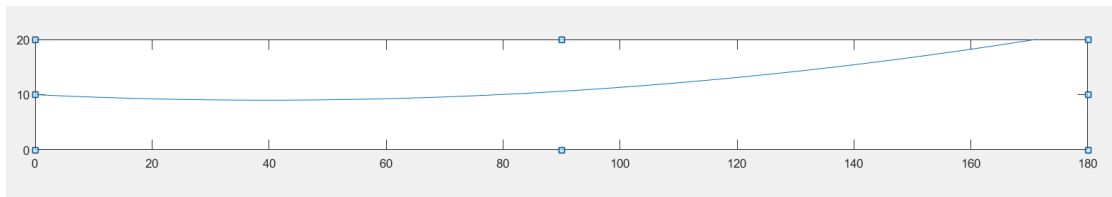


图 4.3

4.2 机构设计

机器人单腿须具有足够的自由度方能自如避障,经权衡,拟定方案为单腿三自由度鳄鱼式四足机器人。设计目标限定机器人具有一定的负载能力,计算得到每个自由度需求的减速比,理想方案为电机和减速机构重量尽可能集中在躯干或者靠近躯干,从而缩小摆腿时的转动惯量,使机器人运行尽可能平稳。但受限於减速机构的运行间隙、性价比等因素,定型为图 4.4 所示机构。

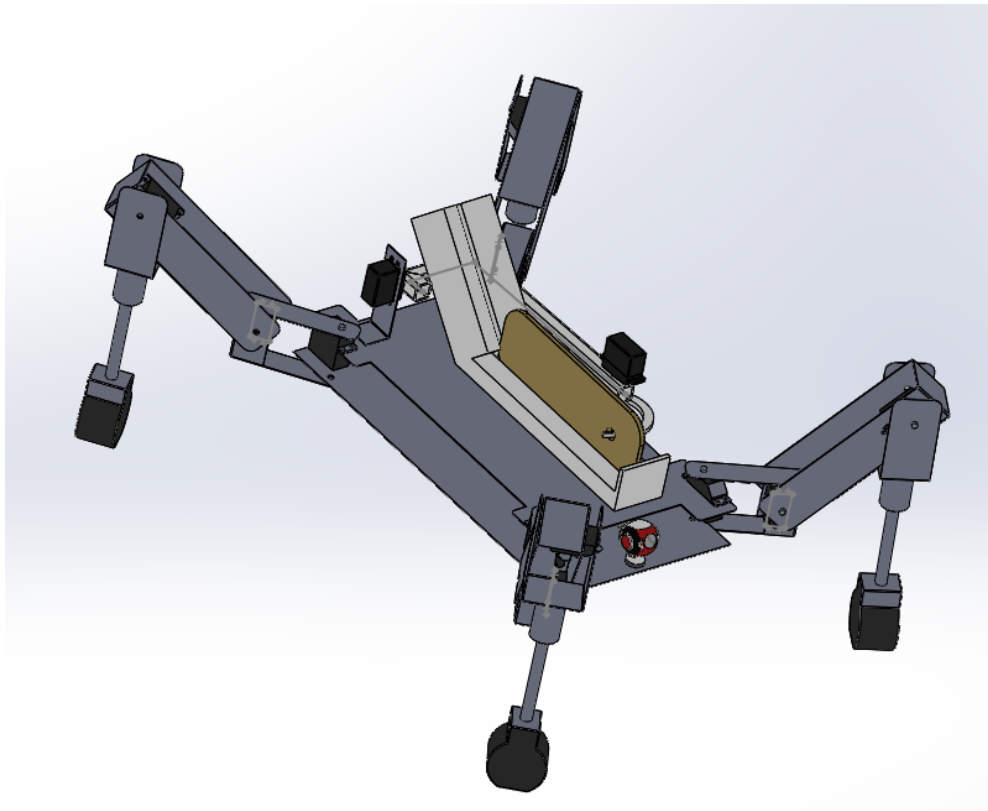


图 4.4

4.2.1 机构尺寸

依据比赛规则,MR2 的宽、长、高尺寸均不得小于 400mm。比赛中,机器人不得超过 800mm 宽、1000 mm 长、800mm 高。综合分析 MR2 需要跨越障碍物的高度可以初步确定四足机器人各个关节长度

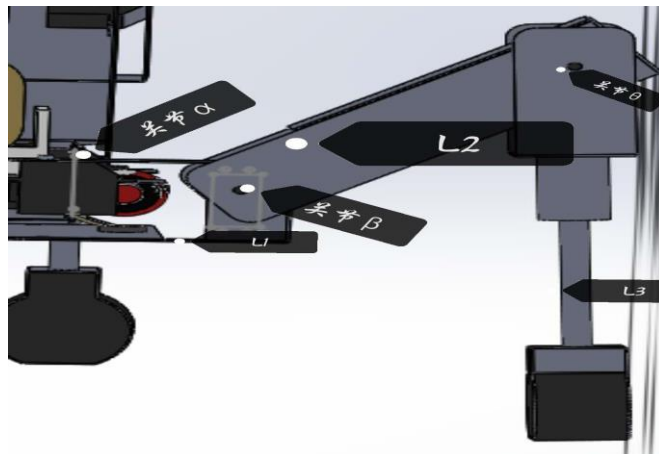


图 4.5

名称	长度	活动范围
L1	60mm	$0 < \alpha < 180^\circ$
L2	200mm	$-60 < \beta < 60$
L3	220mm	$-30 < \theta < 90$

机身需要承载一个可容纳令牌（80*225）交接的机构，结合腿部机构不能超过（800*1000）mm²，为达到每一步运动距离最大化，机身尺寸确定为长（400±20）mm，宽（200±10）mm。

4.2.2 材料选择

机身连接件选用质量轻强度大的碳纤维材料（图）。脚部选用橡胶包裹以增大接触面积和摩擦系数。

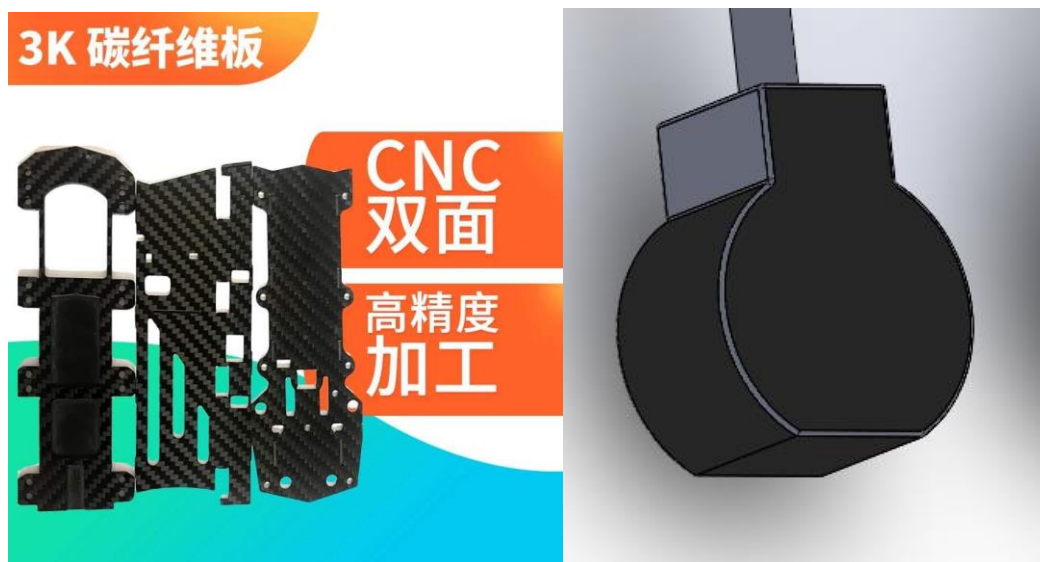


图 4.6

4.3 四足机器人运动学分析

四足机器人的运动学主要面临两个问题，分别是运动学的正问题和逆问题。MR2 采

用每条腿3个自由度来设计,运动学正问题是在已知连杆几何参数和关节变量的情况下,推导出机器人连杆末端相对于给定坐标系(本文是机身坐标系)的位姿;运动学的逆问题则是在明确连杆末端相对于机身坐标系的位姿,来推导出连杆的每个关节变量。

四足机器人一般由规则的机身以及4组连杆系统构成,可以将它们看做是刚体,这样可更好的分析机器人机身与其各个连杆系统以及地面之间的运动关系。为了表达足端与机器人参考点的位置关系,通常用足端的位姿来描述,我们主要通过坐标齐次变换法来表述足端与机器人之间的位置和姿态关系。

4.3.1 足端的位姿描述

如果将足端的位姿描述主要包括位置描述以及方位描述,位置描述是指在一个给定的坐标系{A}中任意一点的坐标,表示为 ${}^A p = (p_x, p_y, p_z)^T$, {B}的原点与{A}不重合,但是方位相同,设 ${}^A p = {}^B p + {}^A p_{B_0}$;方位描述指的是空间中有一个与刚体连接的坐标系{B}的单位主矢量用 x_b, y_b, z_b 相对于{A}的余弦值组成3*3的矩阵:

$${}^A R_B = [{}^A x_B, {}^A y_B, {}^A z_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

该矩阵中的列分别表示{B}中的t轴(t为x、y、z)相对于{A}中x、y、z的余弦值。于是{A}与{B}之间坐标的变换可以表示为。利用齐次变换法可以整合成一个变换矩阵:

${}^A p = {}^A R_B {}^B p + {}^A p_{B_0}$ 。利用齐次变换法可以整合成一个变换矩阵:

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A p_{B_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

于是 ${}^A p = {}^A T_B {}^B p$ 。

4.3.2 连杆的正运动学分析(D-H分析法)

四足机器人可以看成是由一个机身连带着四组连杆构成的,其中每一组连杆之间由

关节相互连接，每一个关节意味着一个自由度。如果将机身看做是杆件 0，第一个与机身连接的杆件为杆件 1，并且依次类推，每个连杆最多连接两个杆件，并且不会相互之间形成闭环。

每一个杆件 i 都可以用两个参数来表示，如图 所示，杆件 i 的长度为 a_i ，表示与连杆相连的关节之间的轴线最短距离；连杆 i 的扭转角为 α_i ，代表的是连杆两个关节间的轴线夹角。相邻两连杆间的相对位置和两连杆垂线的夹角分别用 d_i 和 θ_i 来表示，如图 4.7 所示。

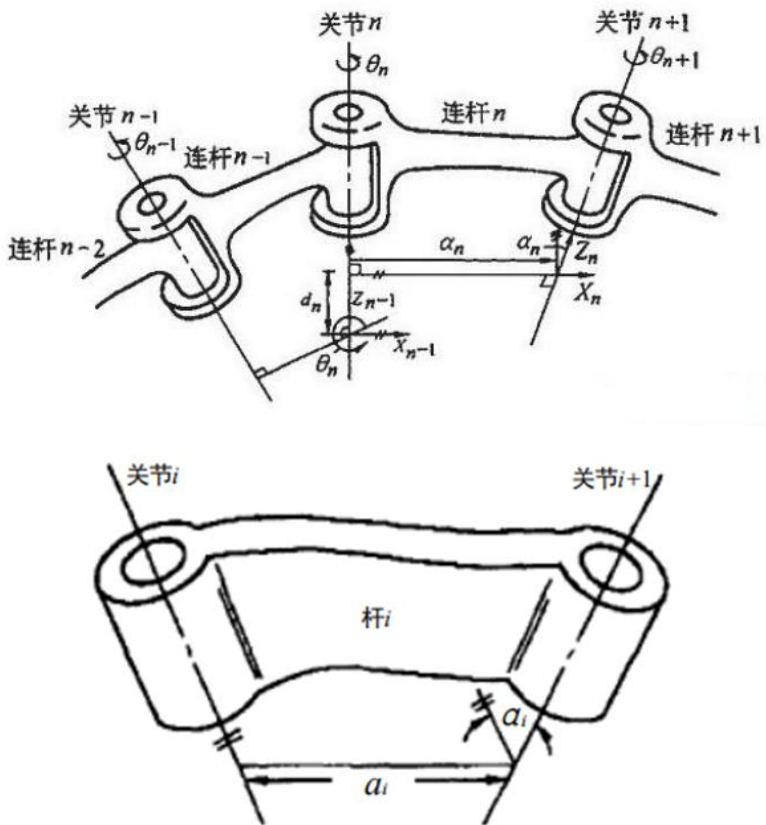


图 4.7

明确连杆之间的相关参数后，为了求得 i 系和 $i-1$ 系之间的转换关系，规定每一个 $i-1$ 系的 Z 轴都与和它相连的关节 i 的轴线重合， X 轴为相邻两个 Z 轴的公垂线， Y 轴则

可以通过右手准则来确定。如图 4.7 所示，沿 X_{i-1} 轴到 Z_{i-1} 轴的距离为 d_i ， θ_i 是 X_{i-1} 绕 Z_{i-1} 轴到 X_i 的旋转角，规定逆时针为正， a_i 和 α_i 分别是两个 Z 轴的距离以及两个 Z 轴绕 X 轴之间的转角。此时连杆 $i-1$ 到连杆 i 坐标系的转换可以通过 4 个部分来完成，首先可以绕 Z_{i-1} 轴旋转 θ_i ，然后沿着 Z_{i-1} 轴移动 d_i ，再绕 X_i 轴旋转 a_i 角度，最后沿着 X_i 轴移动 a_i ，使得两个坐标系重合。变换过程通过齐次变换矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将建立的模型用 D-H 分析法分析如下：

首先按照下图（图 4.8）所示建立坐标系，分别以 3 个关节以及足端为坐标原点建立坐标系 0、1、2、3。

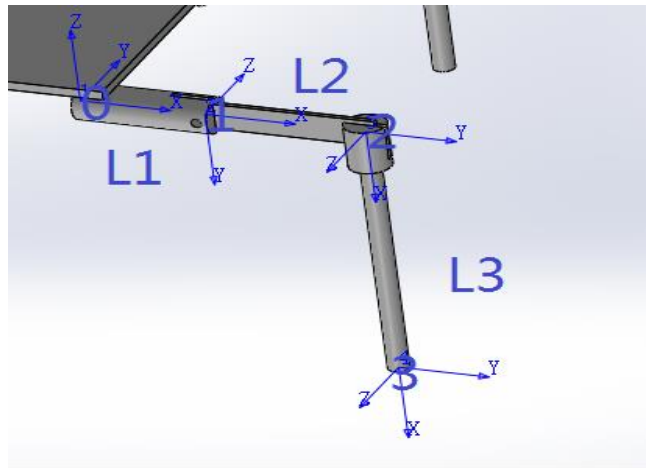


图 4.8

做出每个连杆的 D-H 参数表

连杆号 i	关节变量	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i
1	θ_1	0	L1	0
2	θ_2	90°	L2	0
3	θ_3	0	L3	0

$$A_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & L1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & L1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & L2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & L2 \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & L3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

所以从坐标轴 0 到足端坐标 3 的齐次变换矩阵为：

$$T=A_{01} \cdot A_{12} \cdot A_{23}=$$

$$\begin{bmatrix} c_3 \cdot (c_1 \cdot c_2 - s_1 \cdot s_2) & -s_3 \cdot (c_1 \cdot c_2 - s_1 \cdot s_2) & c_1 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_1 & L_1 \cdot c_1 + L_2 \cdot c_1 \cdot c_2 - L_2 \cdot s_1 \cdot s_2 + L_3 \cdot c_3 \cdot (c_1 \cdot c_2 - s_1 \cdot s_2) \\ c_3 \cdot (c_1 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_1) & -s_3 \cdot (c_1 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_1) & s_1 \cdot s_2 - c_1 \cdot c_2 & L_1 \cdot s_1 + L_2 \cdot c_1 \cdot s_2 + L_2 \cdot c_2 \cdot s_1 + L_3 \cdot c_3 \cdot (c_1 \cdot s_2 + c_2 \cdot s_1) \\ s_3 & c_3 & 0 & L_3 \cdot s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\cos \theta_i \sin \theta_i$$

式中 c_i 和 s_i 分别表示 ($i=1,2,3$)

代入

$$\theta_1 = 0, \quad \theta_2 = 0, \quad \theta_3 = -90^\circ$$

得

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & L_1 + L_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

符合图中位姿关系。至此可以得到机身底端与足端的坐标公式

$${}^A P = T^B P$$

4.3.3 连杆的逆运动学分析

利用运动学的逆问题可以计算出按照预算轨迹对应关节的角度，在得到四足机器人足端到机身坐标系的齐次变换矩阵后，通过确定足端的运动轨迹以及相对机身的位姿，我们可以反推出机器人的关节变量大小，比如转动角度。

由 $T = A_{01} A_{12} A_{23}$ 左右两边同时乘以 $A_{32}^{-1} A_{21}^{-1} A_{01}^{-1}$ ，但是这种计算方法较为复杂，且有多解。结合每个关节允许达到的最大角度，利用雅克比矩阵可以求得最优解的范围。

4.4 四足机器人动力学分析

应用机器人的动力学方程能够明确的描述机器人运动过程中的受力情况以及它们之

间的关系。四足机器人每条腿拥有三个驱动关节，三条腿着地的情况下有着 9 个关节变量需要确定，但是机器人的力学平衡方程只有 6 个。为了能够更好的进行动力学的分析，我们采用欧拉-拉格朗日动力学分析进行介绍：

欧拉-拉格朗日方程是一组用来描述机械运动系统随着时间变化的微分方程，其数学表述为：

$$\tau_k = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k}$$

式中 L 是机器人动能 E_k 与势能 E_p 的差， q_k 是动能和势能的广义坐标，当广义坐标为位移形式时， τ_k 对应的是力，当广义坐标为角度形式时， τ_k 则对应为力矩， k 表示关节量。

由于任何连杆上的一点，它的线速度和角速度都能够以导数的形式用雅克比矩阵和关节变量来表示： $v_i = J_{v_i}(q)\dot{q}$ ， $w_i = J_{\omega_i}(q)\dot{q}$ ，($i = 0, 1, 2, \dots, n$)

假设连杆 i 的质量为 m_i ，机器人连杆系统的总动能 E_k 为： $E_k = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q}$

其中

$$D(q) = \left[\sum_{i=1}^n \{m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{\omega_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{\omega_i}(q)\} \right]$$

是一个 $n \times n$ 的惯性矩阵，与位形相关。将拉格朗日微分方程代入上式得到

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - P = \frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - P(q)$$

令：

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\}$$

最后我们得到拉格朗日方程为：

$$\sum_{j=i}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + g_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

至此我们利用 MATLAB 的 Simmechanics 包，进行上面的理论计算，得到各个关节所需要的力矩，可以由此进行电机的选型。

4.5 四足机器人的步态规划

4.5.1 规则步态说明

规则步态是一组有规律的腿部运动，运动的过程中主要涉及到以下几个术语。

支撑相：机器人腿与地面接触，为机器人提供支撑力的同时产生摩擦力驱动机器人行进的状态；

摆动相：机器人腿处于悬空摆动的状态；

步态周期 T ：机器人每条腿全部完成一次支撑相和摆动相的时间；

占空比 β （占地系数）：机器人每条腿的支撑相在步态周期中的比值；

步幅 S ：机器人腿从刚开始进入支撑相到刚开始进入摆动相的时间内立足点所行进的距离。

根据四足机器人步态的占空比不同，可以将机器人步态分为对角步态、三角步态、骝蹄步态以及跳跃步态。骝蹄步态是保持同侧两条腿一同支撑或者摆动，主要应用于一些特殊路面环境的行走，由于行走时受的倾斜力较大，需要保持较快的速度以及承载更大的扭矩；跳跃步态是一种类似猎豹急速奔跑的步态，前侧腿或者后侧腿处于同一种状态，前行速度很快，要求的机器人硬件性能也很高。基于以上原因，我们选择前两种步态来进行分析比较。

步态	左前腿 (LF)	左后腿 (LB)	右前腿 (RF)	右后腿 (RB)
三角步态	0	0.75	0.5	0.25
对角步态	0	0.5	0.5	0
骝蹄步态	0	0	0.5	0.5
跳跃步态	0	0.5	0	0.5

4.5.2 两种步态的运动方式及稳定性分析

对角步态每条腿的占空比为 0.5，处于对角线位置的腿有着相同的相位，也就是同时处于支撑相或者摆动相，机器人运动的过程中至少有两条腿处于支撑状态，为了保证一定的稳定性，需要具有合适的速度，当处于一个小跑的状态时，能耗特性最好，其运动时序图如图 4.7 所示。

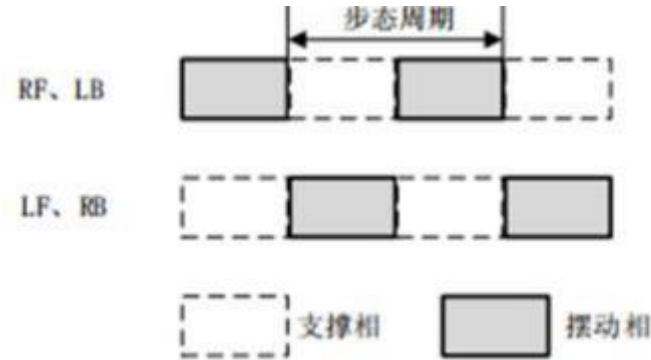


图 4.9

三角步态的占空比为 0.75，每条腿先后有四分之一一个周期的相位差，运动过程中至少有三条腿处于支撑状态，是一种慢速爬行且最具有稳定性的步态之一。根据抬腿的顺序不同，在先迈出左前腿 LF 的情况下总共有六种步态可以保持至少三条腿处于支撑相。选择不同的抬腿顺序对应的稳定裕度值也不一样[45]，它们的关系如表所示。

抬腿顺序	稳定裕度
<i>LF-RB-RF-LB</i>	$\beta - 3/4$
<i>LF-LB-RB-RF</i>	$\beta \times 2/3 - 5/4$
<i>LF-RF-RB-LH</i>	$\beta \times 2/3 - 5/4$
<i>LF-RB-LB-RF</i>	$\beta - 1$
<i>LF-LB-RF-RB</i>	$\beta - 1$
<i>LF-RF-LB-RB</i>	$\beta - 1$

由此可见当抬腿顺序为左前腿（LF）——右后腿（RB）——右前腿（RF）——左后腿（LB）时，三角步态的稳定裕度最大，其时序图如图 4.8 所示。

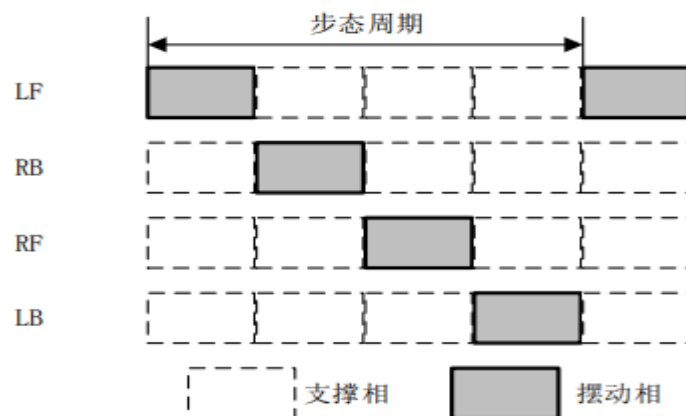


图 4.10

基于以上的分析，我们发现对角步态速度相对于三角步态来说，速度较快，但稳定性不及三角步态。所以我们决定在前面走直线以及转弯时采用对角步态，在跨越台阶以及绳子时采用三角步态。

4.6 四足机器人运动控制

4.6.1 足端轨迹规划

四足机器人之所以有着强大的环境适应能力，是因为它能够调节足端的运动情况来面对各种复杂路面，足端的摆动轨迹在机器人运动中是有一定要求的，必须考虑以下因素。

首先是足端轨迹的高宽比，它能够直接反应出运动曲线的特性，运动能力越强的机器人，高宽比就越大，但是机器人的前进速度就越差。

第二个因素是足端轨迹的弧长。如果曲线宽度是一个给定值，那么足端轨迹的曲线长度越长，那么在摆动相的时间就越长，进一步牵扯到摆动腿的抬腿速度，从而影响四足机器人的前行速度。如果曲线长度越短，对应的抬腿时间越短，四足机器人跨越障碍物的能力就越差。

第三个因素就是面对不同的路面时，需要选择不同的足端轨迹，比如在地面时速度要求较快，跨越台阶以及绳子时，要求的抬腿高度要高等。

曲线	宽	高	起始角	落地角	弧长
摆线	a	$a/\pi = 0.318a$	90°	90°	$1.273a$
抛物线	a	$0.25a$	45°	45°	未知
心形线	a	$0.65a$	90°	0°	$2a$
直线段	a	H	90°	90°	$a+2H$

目前四足机器人的步态规划中，常用的足端轨迹有摆线、抛物线、心形线以及直线段几种曲线形式。它们各自的特点如表所示。

其中摆线的特点是起始角和落地角都是直角，对一些安装有弹性装置的腿来说，拥有较强的腿交换特性和防滑特性；抛物线不仅可以运用于平地还可以适应阶梯路面，抬腿的高度可以调节，腿的起始点和落地点可变化；心形线一般取其中的一半作为轨迹曲线，这种曲线的机器人起始角度超过 90° ；直线段的特点是可以组成多种形状，较为灵活，但是缺点是在连接点处速度和加速度具有不连续性。

我们可以采用运动学逆运算的方法，由足端轨迹反推出四足机器人的驱动大小。为了针对正弦函数和半波函数作为关节驱动函数的不足之处，理想的足端轨迹应该使四足机器人行进更加平稳；没有明显的上下滚转和左右偏航的现象，而且各个关节没有较大的力矩；落地的过程中与地面没有较大的冲击力，整个足端轨迹要圆滑连续。可以采用一种复合摆线形式的足端轨迹来规划机器人足端的运动，足端在机身坐标系下的坐标定义为：

$$P_x = S \left[\frac{t}{T_m} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{T_m} \right) \right] - \frac{S}{2}$$

$$P_y = \begin{cases} 2H \left[\frac{t}{T_m} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(4\pi \frac{t}{T_m} \right) \right] & 0 \leq t < \frac{T_m}{2} \\ 2H \left[1 - \frac{t}{T_m} + \frac{1}{4\pi} \sin \left(4\pi \frac{t}{T_m} \right) \right] & \frac{T_m}{2} \leq t < T_m \end{cases}$$

其中 S 为四足机器人的步长， $T_m = 4/T$ 是摆动相的周期， H 为抬腿的高度， p_x 、 p_y 为足端在机身坐标系的坐标。

有了足端轨迹方程，我们可以利用 MATLAB 的 Simmechanics 库求解出各个关节的角度以及电机的控制曲线。有了电机的控制曲线，就可以进行进一步的仿真。

4.6.2 爬坡分析

机器人在楼梯上或不平路面的静态稳定爬行问题研究，可以通过把机器人的落脚点以及机器人各个部分的重心向水平面投影，再应用机器人平面静态行走理论进行分析研究，如图 4.所示。我们可以通过压低腿 1、2，抬高腿 3、4 达到平稳机身的目的。

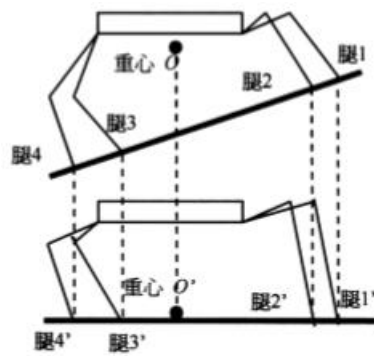
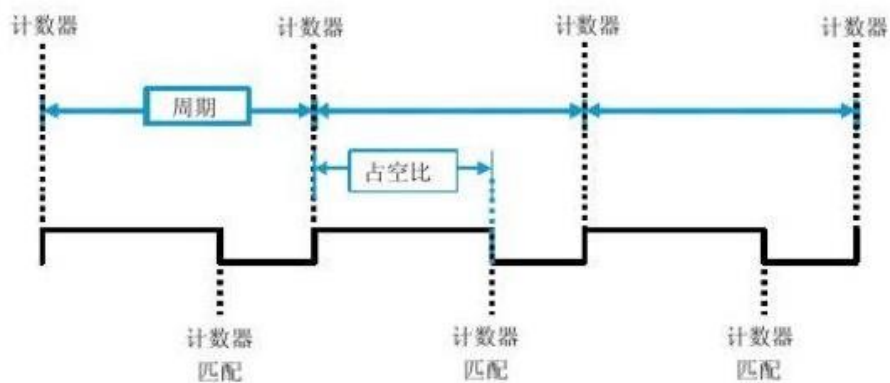


图 4.11

4.6.3 舵机控制

PWM 脉冲宽度调制:



舵机的控制一般需要一个周期为 20ms，频率为 50HZ 左右的时基脉冲，该脉冲的高电平部分一般为 0.5ms-2.5ms 范围内的角度控制脉冲部分，总间隔为 2ms。以 180 度角度伺服为例，那么对应的控制关系是这样的： 0.5ms-0°，1.0ms-45°，1.5ms-90°；2.0ms-135°；2.5ms-180°。

4.7 视觉识别

4.7.1 MR2 视觉循线移动

使用树莓派 3+树莓派摄像头进行视觉寻线

机身抖动问题:

由于考虑到四足机器人本身存在不可避免的抖动（理论上的上下振动为 $\pm 1.5\text{mm}$ ，左右为 $\pm 5\text{mm}$ ），我们计划使用三轴云台+3D 打印件将摄像头固定在竖直 MR2 机身前方，再加上防抖算法，实现最大的防抖效果。



图 4.12

图像处理：

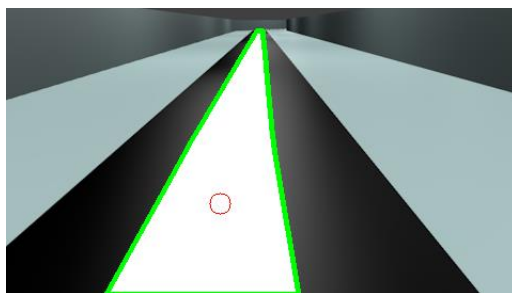
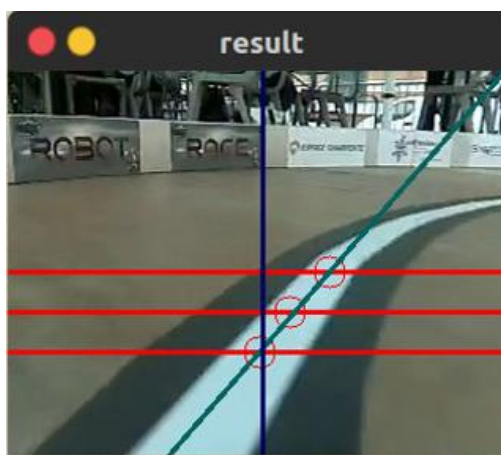


图 4.13

首先在 HSV 颜色空间中转换图像，然后根据预定义的阈值计算颜色遮罩，最终所获得的几何中心即为赛道中心。如上图，红圈表示找到的赛道中心，绿色线条对应于颜色遮罩的轮廓



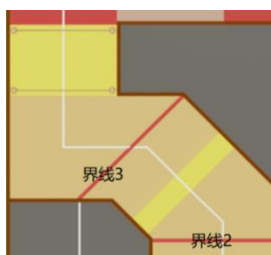
4.14

通过摄像头对三个感兴趣区域点（ROI）进行探测捕捉，并对所捕获的图像进行裁剪。然后，将一条线（上图中的绿线）拟合到所获得的三个点上，并计算此线与参考线（上图中的蓝线）之间的角度，再将该角度交给电控组使用 PID 算法，使 MR2 在前进的过程中不断贴合直线直至完全绿线和蓝线重合，最终实现 MR2 贴合直线行走。若使用防抖后振动影响仍然严重，则降低取样频率，每隔一小段时间才认为得出的偏角数据有效，这样 MR2 能正常行走，但会以 s 形行走。

4.7.2MR2 障碍识别

障碍区与普通区域有显然的颜色区别。我们使用 `openmv` 的色块检测，仅检测机身前下方的某部分区域，当视野内出现相应颜色，则可知道障碍区与 **MR2** 的相对距离，即可准备越障操作。

若色块识别实验过后效果不稳定，还可结合 `opencv` 的 `orb` 特征检测，提高障碍检测的稳定性。



4.15

4.8 外观优化

在实现机器人全部功能的前提下，我们对 **MR2** 进行外观上的优化设计，增强对机器人内部关键零件的保护。如图 4.16 所示。

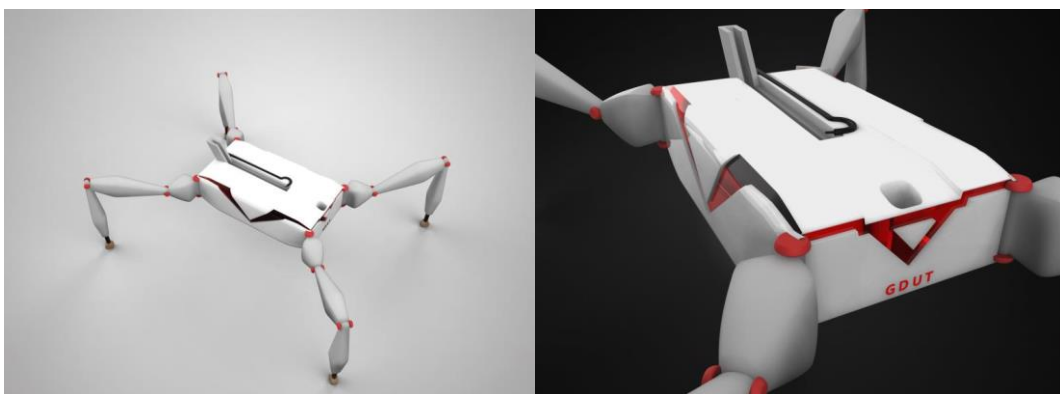


图 4.16

5 人员安排及进度规划

5.1 人员安排

首先，我们根据项目的目的及所需技术把组员分成三组，分别是机械组、电控组、定位组，如下表 5.1 所示。

序号	任务组	任务属性	成员
1	机械设计	机械	黄旭（小组长）、李卓文、刘晓煌、陈奕荣、陈锦涛
2	机器人控制	控制	罗耀华（小组长）、胡泽伟、胡志佳、陈诚、杨彭德、许恩源、刘岚涛
3	基于 slam 的定位	定位	黄永乐（小组长）、吴嘉豪、钱建洲、李咏恒

表 5.1 2018 年 12 月 10 日分组表

5.2 任务分配

小组	姓名	任务
机械组	黄旭	分配和管理机械组工作
	刘晓煌	机械仿真
	陈锦涛	机械建模
	陈奕荣	四足机械结构建模
	李卓文	电路布线和机械美化
电控组	许恩源	四足运动分析
	罗耀华	分配和管理全组工作
	胡志佳	通讯协议
	陈诚	为机器人设计 PCB 电路板

	杨彭德	机器人 MR1 控制
	刘岚涛	路径规划，速度规划
	胡泽伟	单片机系统
定位组	黄永乐	分配和管理定位组工作
	李咏恒	视觉 SLAM 和视觉应用
	钱建洲	激光雷达定位和地图构建，路径规划
	吴嘉豪	

表 5.2 人员任务表

5.3 进度规划

时间	短期	长期	
6-7 周	商讨项目方案和准备相关知识储备		1. 视觉学习和应用 2. 运动学仿真 3. 计算机系统
8-10 周	1. 机械建模和寻找完成项目所需要的物资。 2. 激光雷达初探和应用，学习蓝牙开发 3. 利用 PCB 技术对蓝牙遥控器和整合电路板等进行建模	1. 航迹推算学习：陀螺仪，加速度计传感器，编码器 2. 路径规划学习 3. 步态规划学习 4. 速度规划学习	
11-13 周	1. 购买项目所需要的物资 2. 机械仿真并改良机械结构 3. 印刷电路板打板 4. 雷达地图构建		
14-15 周		1. 搭建机械结构并改良机械结构	
15-17 周			

表 5.3 进度规划表