

中国科学技术大学

第二十二届 RoboGame 机器人大赛报名表

院系	工程科学学院 计算机科学与技术学院	专业	21 级本科 20 级计算机科学与技术系		
参赛内容	<input type="checkbox"/> 冰壶机器人 <input checked="" type="checkbox"/> 变形机器人				
队伍名称	FullmetalTesseract	指导老师信息	姓 名	孙帅帅	老师签字
			电子邮箱	sssun@ustc.edu.cn	孙帅帅
参赛队信息					
职务	姓名	学号	手机	学校邮箱	备注
队长	严浩瑜	PB21051151	18666103363	yhy109@mail.ustc.edu.cn	
队员	马志远	PB21051149	18093564973	mzy021207@mail.ustc.edu.cn	
队员	郭然	PB21051158	15255595212	gr15290069812@mail.ustc.edu.cn	
队员	黄鑫	PB20061174	15056221315	hx2002@mail.ustc.edu.cn	
队员	郭轶凡	PB21111678	13365699537	ki299@mail.ustc.edu.cn	

参赛承诺：

我们保证以本承诺为有约束力的协议，遵守中国科学技术 RoboGame 组委会的有关规定，认真进行机器人的设计制作等积极与组委会交流，服从组委会的活动安排与最终裁判。

对于由本队引发的一切不良后果由本队承担相应责任。

所有参赛队员（签字）

术大学第二十二届
工作，就比赛相关问题积

黄鑫
严浩瑜
郭轶凡
马志远
郭然

备注：

- 1、请各参赛队负责填写此表格，电子版发送给 robogame@163.com。
- 2、每队参赛人员人数需在 5 名以内；
- 3、队员电子版签字用签名照片；电子版指导教师签名经过教师同意后输入姓名即可。
- 4、本次活动最终解释权归中国科学技术大学 RoboGame2022 组委会所有。

中国科学技术大学 RoboGame2022 机器人大赛组委会

2022 年 4 月 9 日

参赛计划书

队伍名称: FullmetalTesseract

系别: 工程科学学院、计算机科学与技术学院

类别:

☐ 冰壶机器人

☒ 变形机器人

承 诺 书

组委会承诺：

我们组委会保证及时解决各参赛队就比赛相关问题提出的疑问，为各参赛队的制作计划等保密，公正处理机器人比赛相关事务，选拔优秀成员担任比赛裁判，保证裁判的公正。

2022RoboGame 组委会

2022 年 4 月 9 日

参赛者承诺：

我们队承诺对本人填写的各项内容保证是本队的原创，没有抄袭他人。

我们保证以本承诺为有约束力的协议，遵守中国科学技术大学第二十二届 RoboGame 组委会的有关规定，认真进行机器人的设计制作等工作，就比赛相关问题积极与组委会交流，服从组委会的活动安排与最终裁判。

对于由本队引发的一切不良后果由本队承担相应责任。

参赛队员（签字）：严浩瑜，马志远，郭然，黄鑫，郭轶凡

2022 年 5 月 15 日

中国科学技术大学



中国科学技术大学 RoboGame 2022

FullmetalTesseract 队

参赛计划书

小组成员：严浩瑜、马志远、郭然、黄鑫、郭轶凡

学科专业：工程科学学院、计算机科学与技术学院

指导教师：孙帅帅

完成时间：5.15

目录

1. 队伍简介.....	5
1.1 队名介绍.....	5
1.2 成员介绍与分工.....	5
2. 机械部分.....	6
2.1 功能与结构概述.....	6
2.2 模块设计与选型.....	7
2.2.1 底盘设计.....	7
2.2.2 下肢机械臂设计.....	8
2.2.3 上肢机械臂设计.....	10
2.2.4 外壳设计.....	11
3. 电路部分.....	12
3.1 电路框图.....	12
3.2 主控系统.....	12
3.2.1 Stm32 最小系统板.....	12
3.3 电源系统.....	13
3.3.1 电池模块.....	13
3.3.2 降压模块.....	14
3.4 电机系统.....	15
3.4.1 舵机.....	15
3.4.2 舵机控制板.....	15
3.5 蓝牙模块.....	17
4. 控制部分.....	18
4.1 爬行控制.....	18
4.1.1 单条机械足的控制.....	18
4.1.2 多足配合实现爬行.....	20
4.1.3 实例：三足步态控制.....	21
4.1.4 机体扭动.....	25
4.2 滚动控制.....	27
4.2.1 滚动.....	27
4.2.2 转向.....	28
4.3 变形控制.....	29
4.3.1 爬行态转球态.....	29
4.3.2 球态转爬行态.....	30

4.4 无线通信模块控制.....	31
5. 宣传计划.....	32
6. 经费预算.....	33
7. 时间安排.....	34

1. 队伍简介

1.1 队名介绍

队名为 **FullmetalTesseract**，意为全金属立方体，起源于当人们想起变形机器人时，第一印象就是变形金刚，而变形金刚在变形时经常可见到有许多的金属元件在位移组合，而全金属立方体恰好就是其中一种印象感强，抽象而又极富代表性的金属元件，取 **FullmetalTesseract** 为名，即是展示组主题为变形机器人的体现，又能给观众第一印象产生较强的冲击力。

1.2 成员介绍与分工

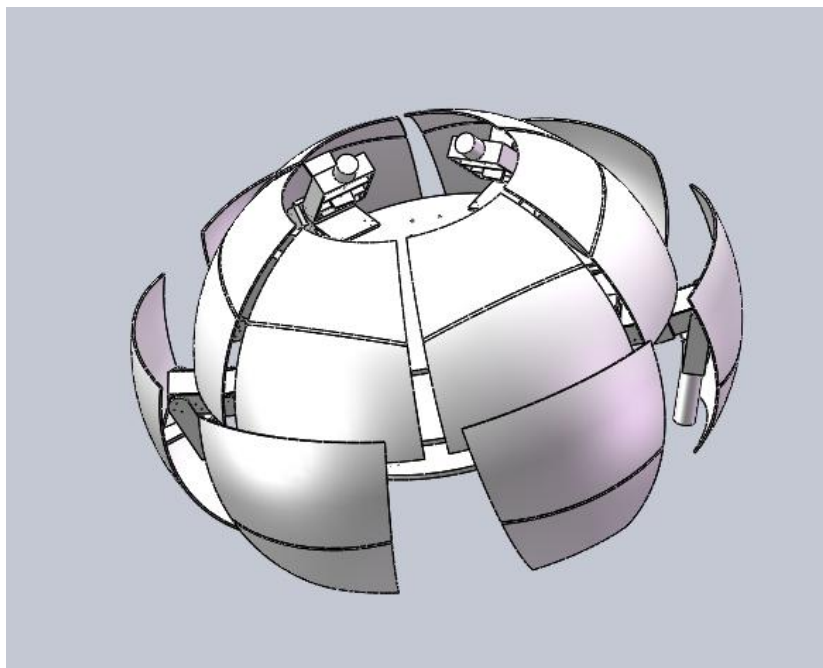
组员	分工
严浩瑜	机械设计&电路设计
马志远	机械设计&宣传
郭然	机械设计&财务
黄鑫	电路设计&单片机控制
郭轶凡	电路设计&单片机控制

2. 机械部分

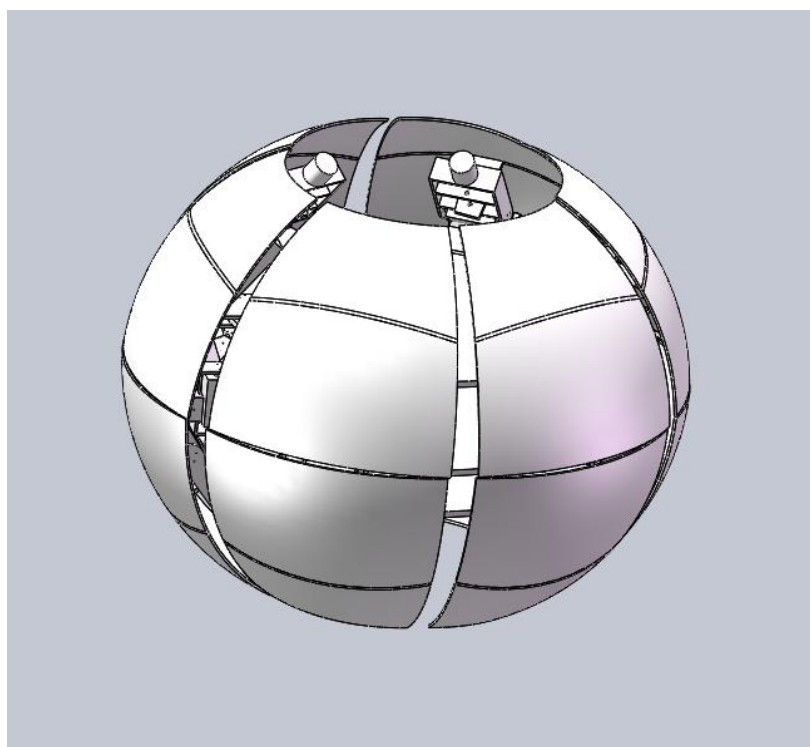
2.1 功能与结构概述

整机效果图：

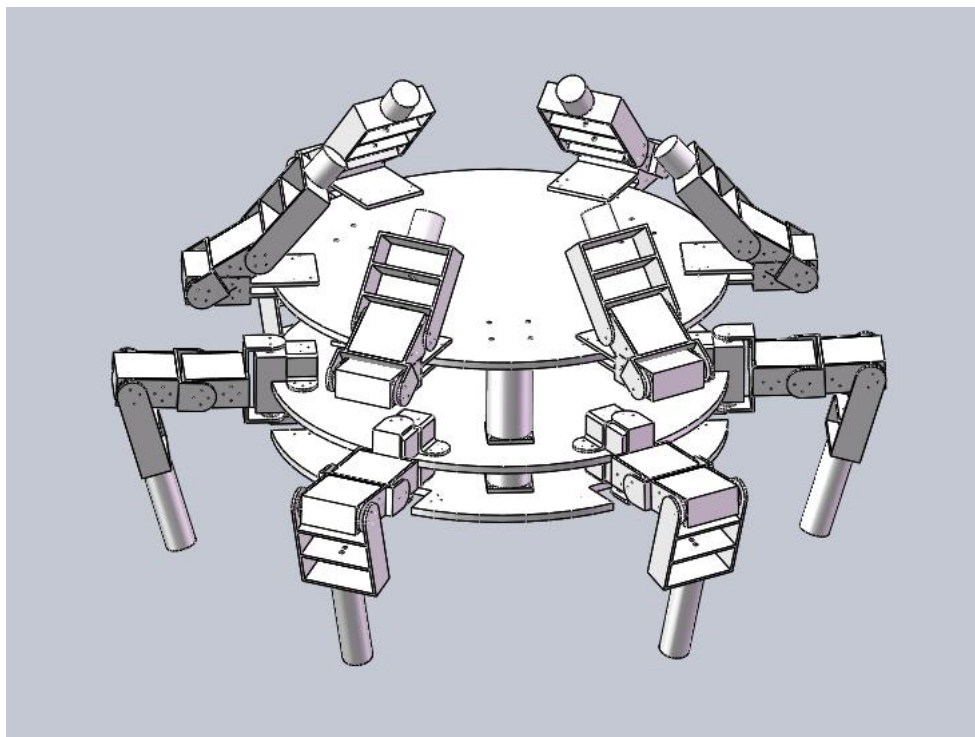
行走姿态：



球形姿态：



去壳内部效果图：

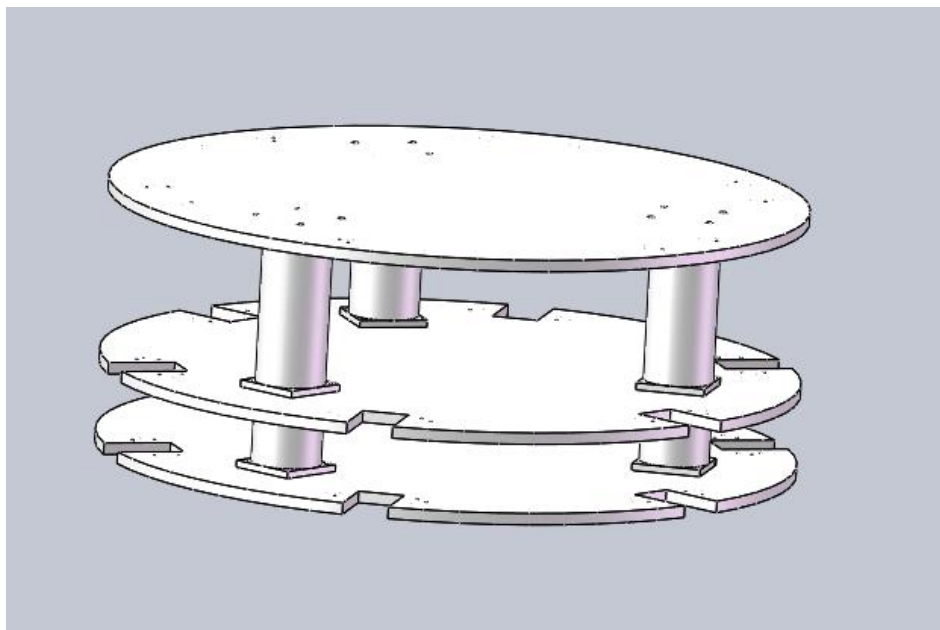


展示方案：球形机器人通过遥控侧滚进入表演场地，在指定位置调整完毕后，启动变形功能，实现由球形机器人到六足机器人的变形，变形完成后再通过遥控实现行走等功能展示，展示完成后回到指定位置完成由六足机器人到球形机器人的变形，通过遥控侧滚离开表演场地。

2.2 模块设计与选型

2.2.1 底盘设计

底盘分为三层，其中上层与上肢机械臂相连，中层与下肢机械臂相连，上、中两层之间位置预留用于安置电源等较大的器件，下层主要安放单片机、总线舵机控制板等较小的器件，同时可以使重心偏下，在滚动结束后利于回正。底板材料计划采用 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的碳纤维板加工形成，适当添加镂空结构减轻重量，同时保证在滚动的过程中不会断裂。



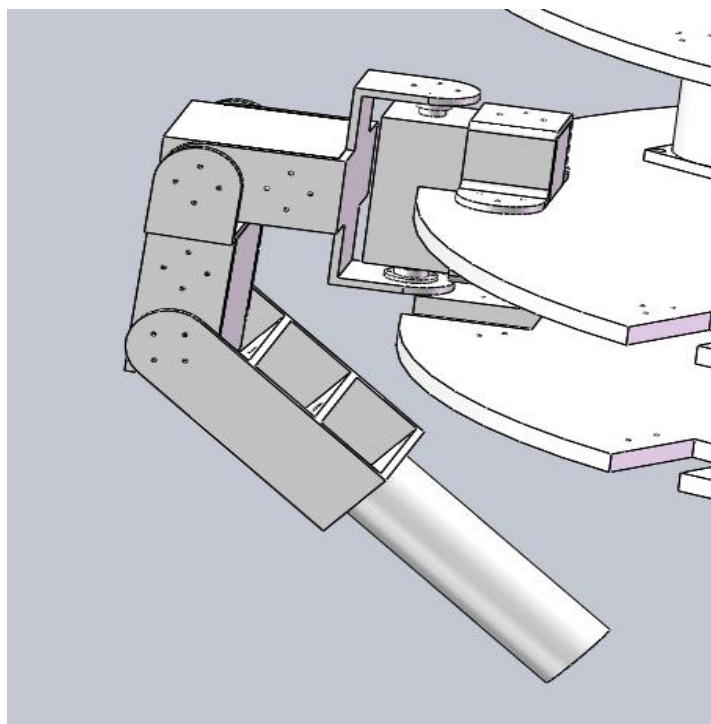
2.2.2 下肢机械臂设计

下肢机械臂为三自由度机械臂，位于靠近底盘处的关节负责控制机械臂左右的移动，剩余两处的关节负责控制机械臂的折叠与展开，机械臂的主体主要由标准件组成，部分零件需要自定义加工，舵机采用的是三端口串行总线舵机 LX-224，电压 7.4v 时扭矩为 20kg.cm，考虑到机身总体较小，采用的建构材料密度较小，质量较轻，同时有六个机械臂分担重量，经计算，扭力足够。

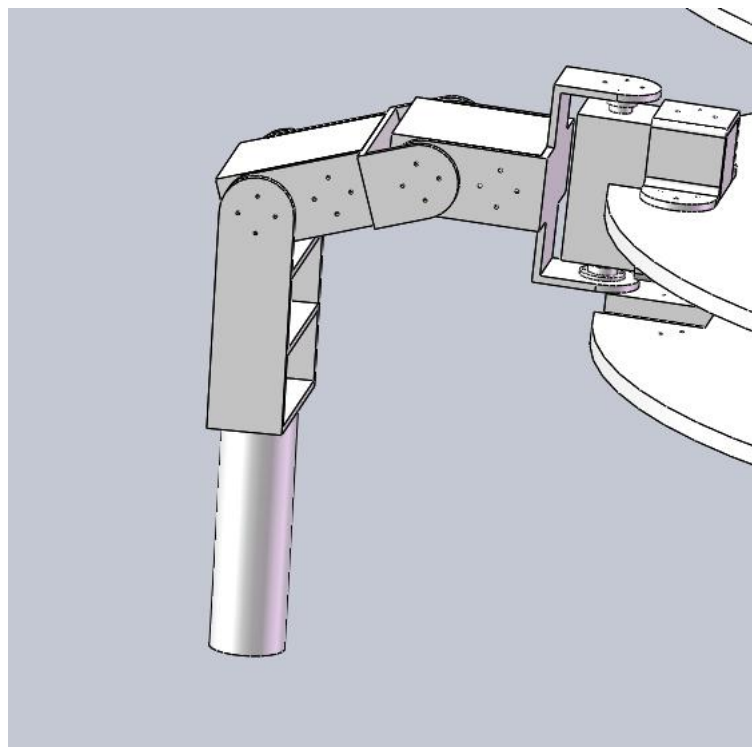
舵机参数：

产品参数 PRODUCT PARAMETERS	
产品名称：LX-224串行总线智能舵机	控制方式：UART串口指令
品 牌：幻尔	通信波特率：115200
产品重量：63g	存 储：掉电保存用户设置
产品尺寸：40mm x 20.14mm x 51.1mm	舵机ID：0~253用户可设置，默认为1
工作电压：6-8.4V	回读功能：支持角度回读
转动速度：0.20sec / 60° 7.4V	保护：堵转保护/过温保护
堵转扭矩：20kg.cm 7.4V	参数反馈：温度、电压、位置
转动范围：0°~240°	工作模式：舵机模式和减速电机模式
空载电流：100mA	齿轮类型：金属齿
堵转电流：2.4~3A	配套线长：20cm，可选其他线长
舵机精度：0.3°	接插件型号：PH2.0-3P
控制角度范围：0~1000，对应0~240°	适 用 于：各类仿生机器人关节

机械臂在伸展时，互不相邻的三个机械臂先行展开，另外三个机械臂保持折叠，起到支撑作用，当三个机械臂完成展开后，再支撑另外三个机械臂进行展开。折叠过程类似，互不相邻的三个机械臂先行折叠，另外三个机械臂保持展开，起到支撑作用，当三个机械臂完成折叠后，再支撑另外三个机械臂进行折叠。



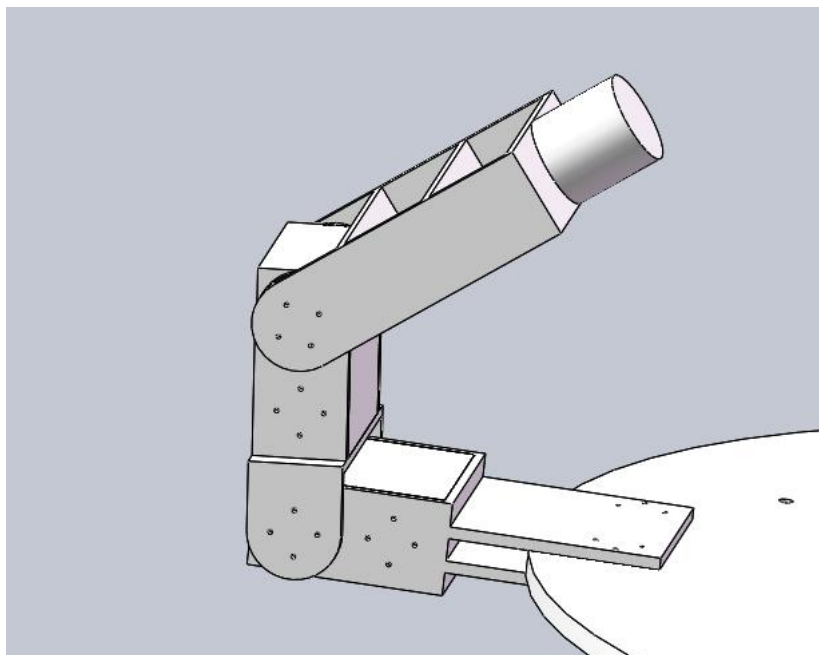
折叠状态下机械臂形态



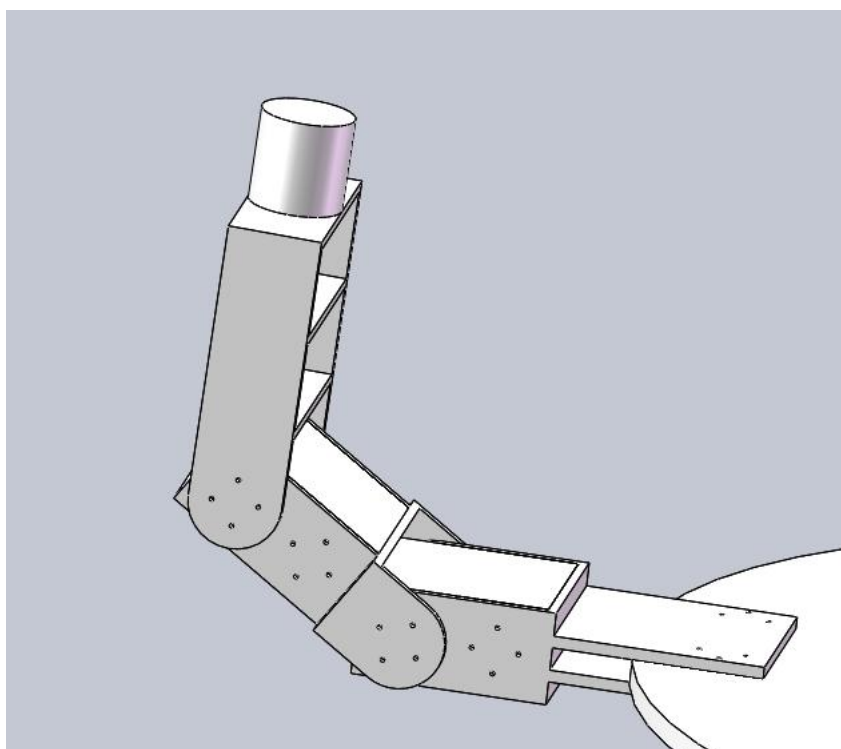
展开状态下机械臂形态

2.2.3 上肢机械臂设计

与上肢机械臂结构类似，但因为不需要前后的摆动来实现前进，所以简化为两个自由度的机械臂，主要作用为在滚动过程展开起到撑地提供推力，以及可能存在的表演作用。



折叠状态下机械臂形态



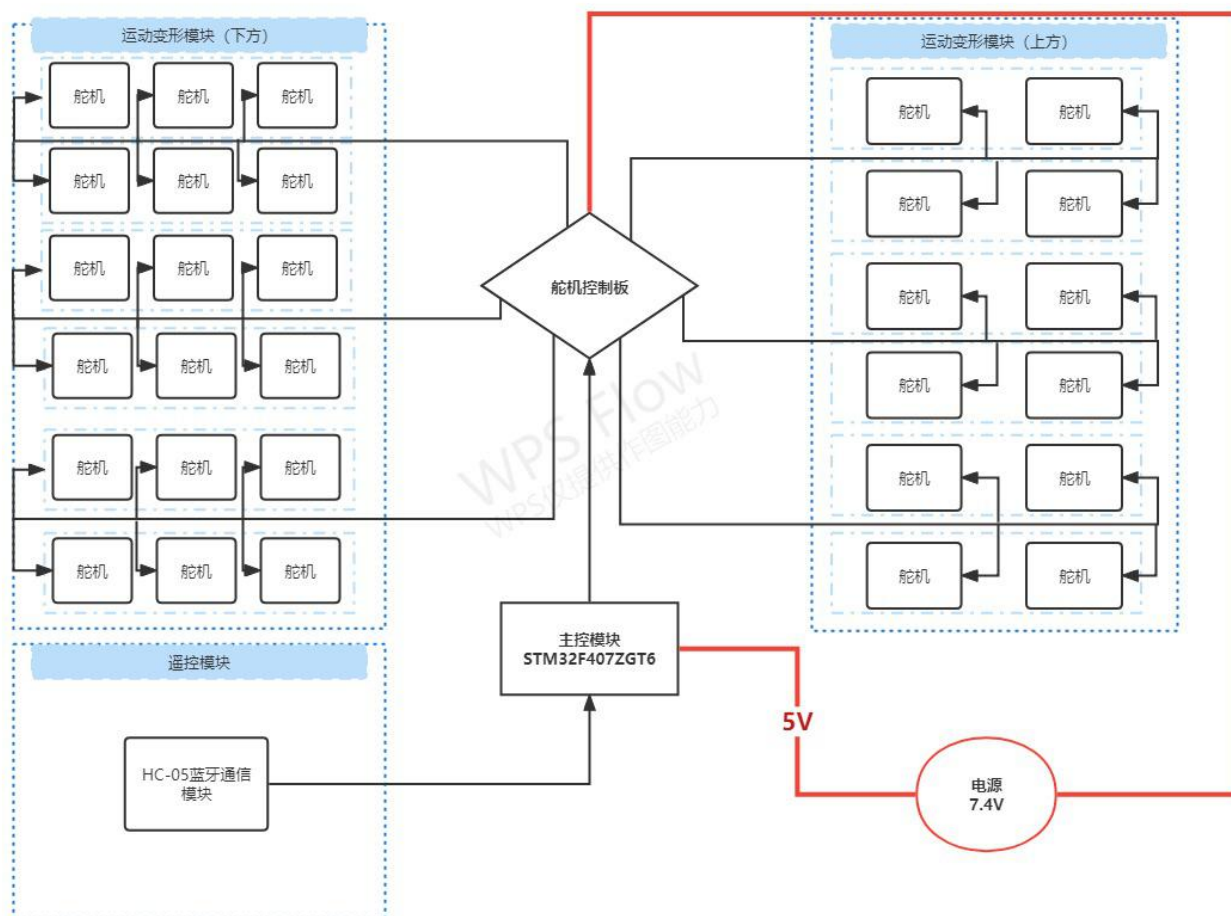
展开状态下机械臂形态

2.2.4 外壳设计

考虑到现有的加工厂商缺少该类型的加工产品，个性化加工成本过高，不太现实，所以我们计划将直径大约 300~320mm，厚度为 5mm 的球壳分割为 12 块，通过 3D 打印的方式将球壳制作出来。

3. 电路部分

3.1 电路框图

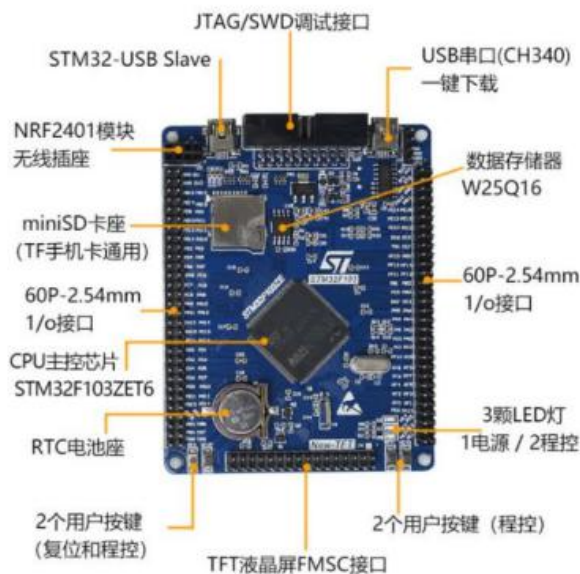


3.2 主控系统

3.2.1 Stm32 最小系统板

我们选择 STM32F103ZET6 最小系统板作为主控模块。STM32F103ZET6 最小系统板使用 32 位 ARM 微控制器，拥有 144 个引脚、512K 闪存，支持定时器、ADC、DAC、SDIO、SPI、IIC、USB、USART 等多种外设功能，满足本次机器人比赛的使用需要。

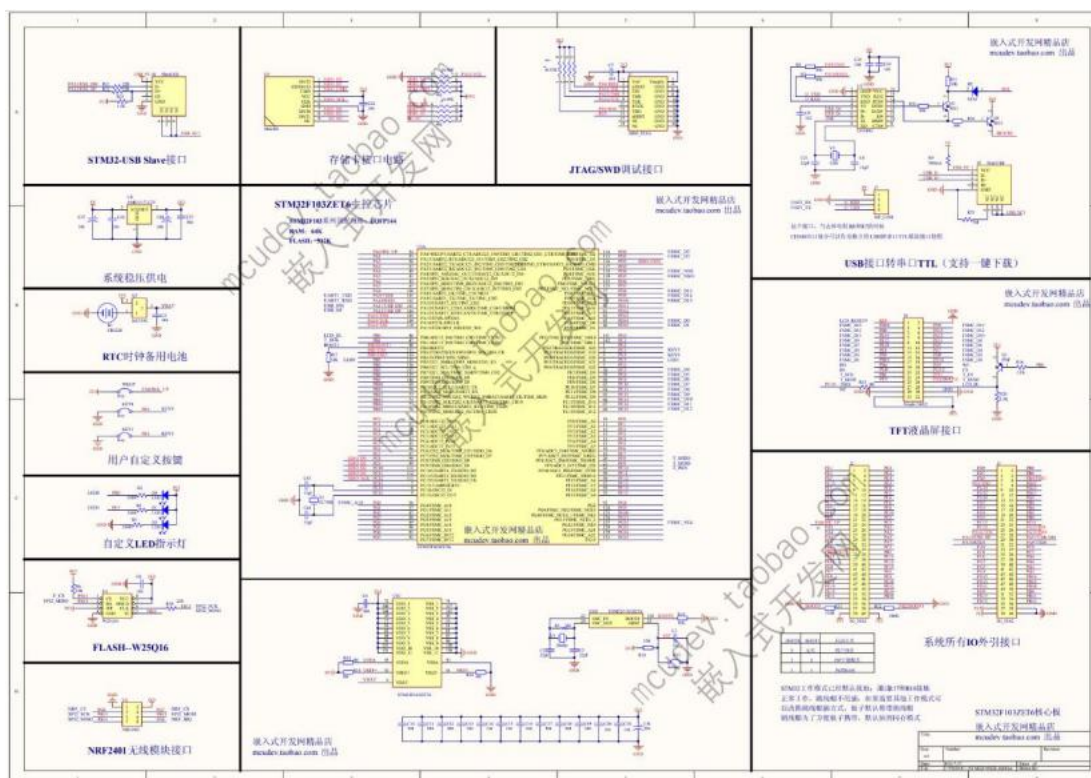
STM32F103ZET6 最小系统板实物图和相关参数如下：



产品参数

封装:LQFP144
CPU频率:72M
FLASH:512K
RAM: 64K
定时器:8个
SPI接口:3个
IIC接口:2个
UART:5个
FSMC: 1个
USB接口:1个
CAN接口:1个
SDIO:1个
ADC通道:3:21个
DAC通道:2:2个
IO接口:112个

STM32F103ZET6 最小系统板原理图如下：



3.3 电源系统

3.3.1 电池模块

我们选择的是 7.4v,5200mA 锂电池组，与舵机的正常工作电压相适配，实物图与具体参数如下：



三并 			
四并 			
两并两串 			
型号	3.7V三并电池组	3.7V四并电池组	7.4V两并两串电池组
电压	3.7V	3.7V	7.4V
容量	3600mAh 6000mAh 7800mAh 10200mAh	8000mAh 10400mAh 13600mAh	4000mAh 5200mAh 6800mAh
接头	DC5.5-2.1公头、母头各一条		
电芯	3节18650芯	4节18650芯	4节18650芯
尺寸	67*37*37mm	67*38*38mm	67*38*38mm
重量	155g	200g	200g
可持续电流	4A	4A	4A
过流保护值	8A	8A	8A



温馨提示：本产品默认配备DC5.5-2.1公头、母头各一条。

3.3.2 降压模块

由于锂电池组的额定电压为 7.4v，而电路中部分元件所需的电压低于 7.4v，在使用同一个电源的情况下，需要降压模块将 7.4v 降低供其他元件使用。

我们选用的降压模块为 LM2596S DC-DC 可调降压模块（带数显），可以将 7.4v 降至 5v 使用。

实物图与相关参数如下：

LM2596S带数表显示稳压电源模块 DC-DC可调

输入电压：2.5~35V	输出电压：1.25V~35V
输出电流：3A	转换效率：92%
输出波纹：<30mV	开关频率：150KHz
工作温度：-45℃~+85℃	尺寸大小：66*36*14mm

3.4 电机系统

3.4.1 舵机

舵机我们选取的是 LX-224 串行总线舵机，该舵机的扭矩为 20kg.cm，可旋转角度为 180 度，接线简洁，避免了 pwm 舵机造成的接线过多，影响外观。同时该类型舵机拥有堵转保护和过温保护，减少了舵机损耗。

每个舵机都可以自定义舵机 ID 号，控制器与舵机之间通过单总线方式通信，通信波特率为 115200，控制器发出的指令包含 ID 信息，只有 ID 匹配才会执行指令，实现对每个舵机的控制。

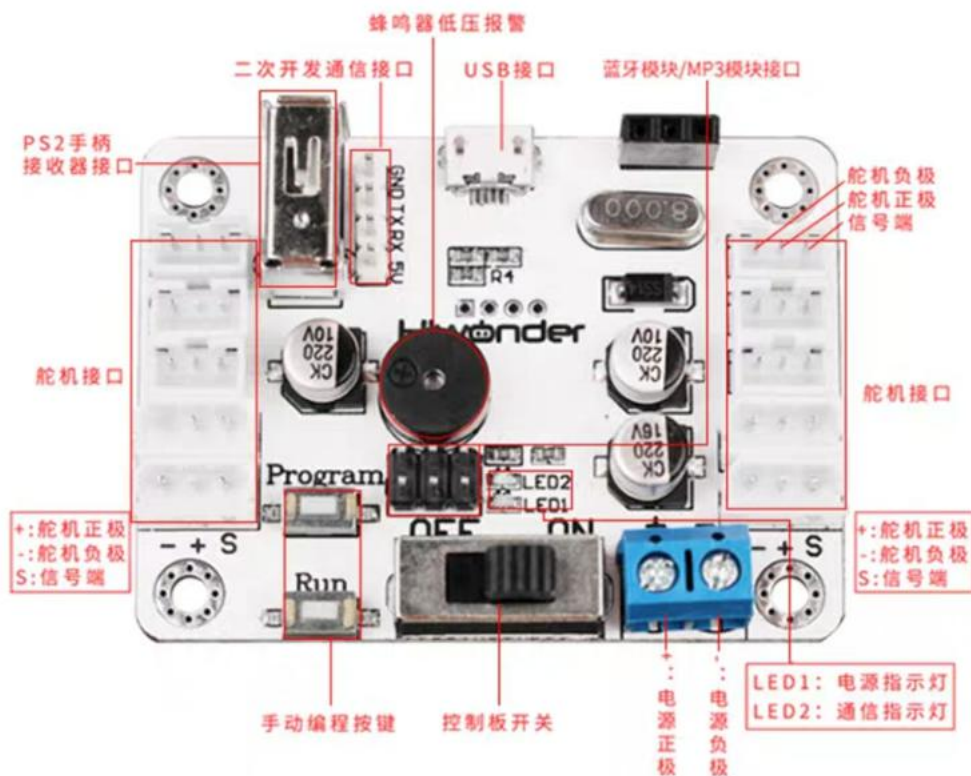
LX-224 串行总线舵机具体参数如下：

产品参数 PRODUCT PARAMETERS	
产品名称：LX-224 串行总线智能舵机	控制方式：UART 串口指令
品 牌：幻尔	通信波特率：115200
产品重量：63g	存 储：掉电保存用户设置
产品尺寸：40mm x 20.14mm x 51.1mm	舵 机 ID：0~255 用户可设置，默认为 1
工作电压：6~8.4V	回读功能：支持角度回读
转动速度：0.20sec / 60° 7.4V	保护：堵转保护/过温保护
堵转扭矩：20kg.cm 7.4V	参数反馈：温度、电压、位置
转动范围：0°~240°	工作模式：舵机模式和减速电机模式
空载电流：100mA	齿轮类型：金属齿
堵转电流：2.4~3A	配套线长：20cm，可选其他线长
舵机精度：0.3°	接插件型号：PH2.0-3P
控制角度范围：0~1000，对应 0~240°	适 用 于：各类仿生机器人关节

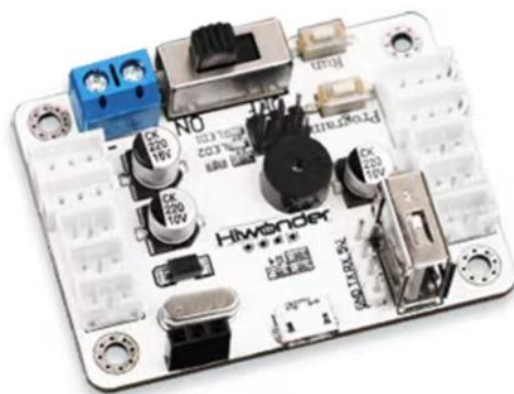
3.4.2 舵机控制板

LX-224 串行总线舵机需要使用舵机控制板对数个串联的舵机进行控制，因此我们选取与之配套的舵机控制板。该舵机控制板允许外接单片机和蓝牙模块，同时可以一次性最多控制 40 个总线舵机，符合要求。

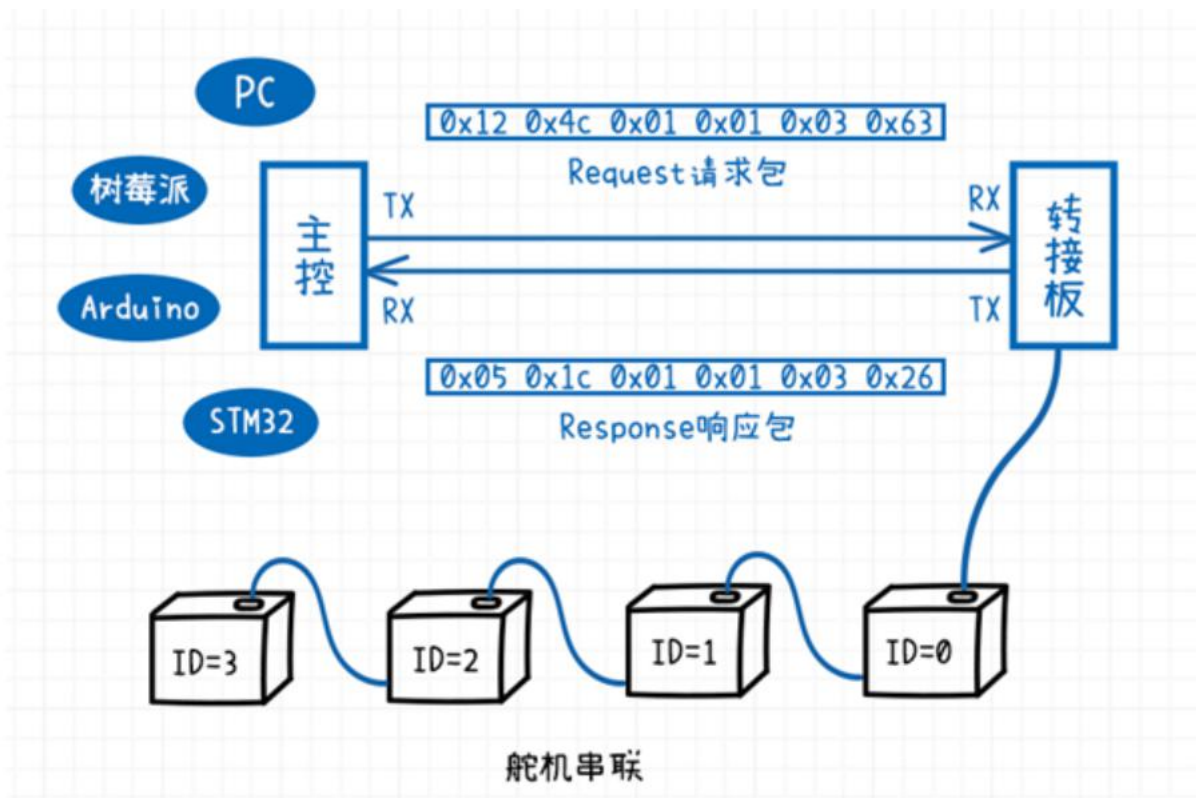
实物及具体参数如下：



外形面积尺寸	58mm*42mm
安装孔距尺寸	49mm*34mm
产品重量	21克
电脑上位机软件控制	支持
手动按键编程	支持
最多控制舵机数量	40个
存储空间	16M
PS2手柄控制	支持
外接单片机 (二次开发)	支持
低压报警	支持
开关内置	支持
电脑免驱	支持
舵机角度回读	支持
外接MP3/蓝牙模块	支持



舵机控制板的连接方式:



3.5 蓝牙模块

计划使用无线遥控的方式控制机器人的运动，实现展示过程的移动的实时化，自由化。我们选取的蓝牙模块为 JDY-31 蓝牙模块板，兼容 HC-05/06 主从机，可以与 stm32 主控板连接，从另一个蓝牙端获取信号，向 stm32 主控板输送信号，进而实现对机器人的控制。

JDY-31 蓝牙模块板实物图及相关参数如下：



4. 控制部分

4.1 爬行控制

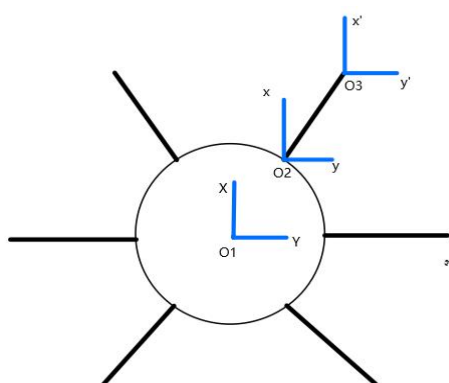
机器人的爬行态动作包括转向，直行，后退，机体扭动.它们都是通过 6 支 3 自由度的机械足相互配合实现的.

4.1.1 单条机械足的控制

每一支 3 自由度的机械足包含 3 个舵机.通过调整 3 个舵机转动到特定角度，就能控制机械足姿态，通过连续变换机械足姿态就可以实现机械足的移动.

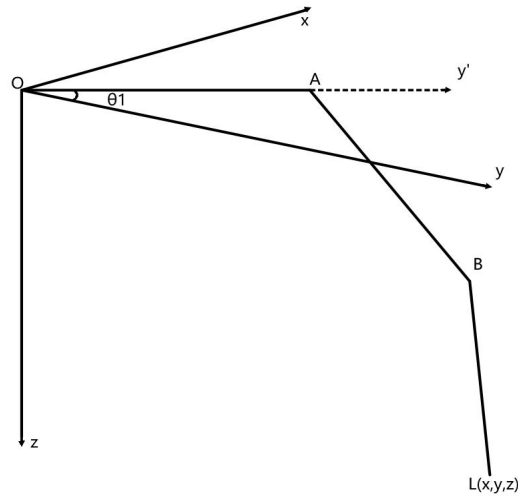
4.1.1.1 逆运动学分解

为了更精确地控制机械足的运动，我们在需要在空间坐标系中来考虑.我们将机械足的运动简化为足尖点在空间坐标系中的移动.此时我们就需要对机械足进行逆运动学分解.逆运动学分解的目的是从已知的机械足的足尖坐标反推出各机械关节旋转的角度，也就是舵机应旋转的角度.

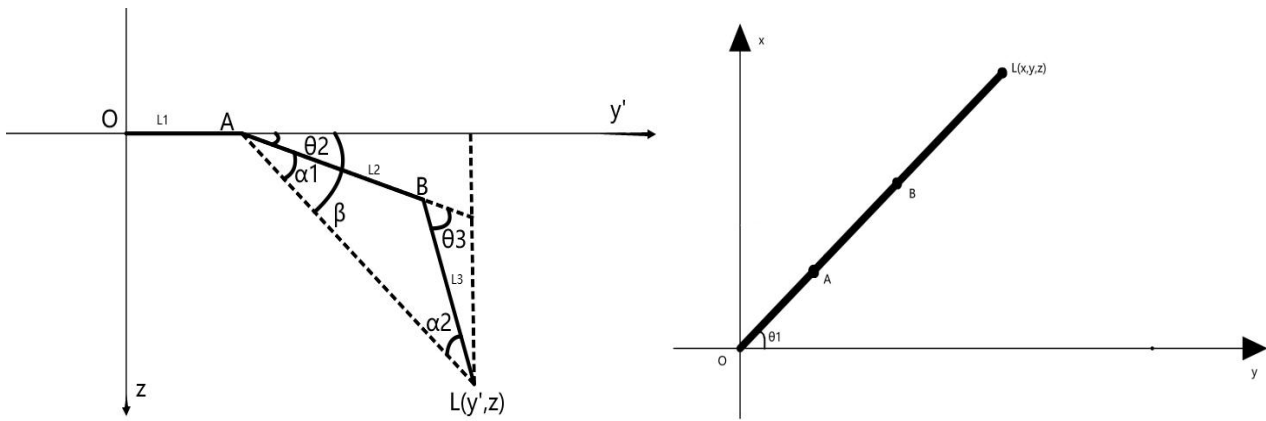


我们将机器人主体简化为圆形，以六条线段代替机械足,俯视图如上.

单独考虑每一支机械足.在各自机械足足跟为原点建立坐标系(O_2xyz),将一条机械足简化为 3 条线段, OA, AB, BL , 长度分别为 L_1, L_2, L_3 (通过实际测量可得), L 为机械足的足尖, 舵机分布在 O, A, B, L 个位置, 旋转角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.



设机械足所在平面为 $Oy'z$, θ_1 恰好为 $Oy'z$ 与 Oyz 面的夹角;而 θ_2, θ_3 的转动可以在 $Oy'z$ 内单独考虑,通过 L_1, L_2, L_3 以及 $L(y',z)$ 计算得到.



根据简单的几何原理我们可以由足尖点坐标 $L(x,y,z)$ 求得机械足舵机旋转角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} y' \cos \theta_1 = y \\ AL = \sqrt{((y' - L_1)^2 + z^2)} \\ \alpha_1 = \arccos \left(\sqrt{\frac{(L_2)^2 + AL^2 - (L_3)^2}{2L_2 * AL}} \right) \\ \alpha_2 = \arccos \left(\sqrt{\frac{(L_3)^2 + AL^2 - (L_2)^2}{2L_3 * AL}} \right) \\ \beta = \arctan \left(\frac{z}{y' - L_1} \right) \end{array} \right.$$

目标旋转角

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \arctan \left(\frac{x}{y} \right) \\ \theta_2 = \beta - \alpha_1 \\ \theta_3 = \alpha_1 + \alpha_2 \end{array} \right.$$

对于特定的足尖轨迹方程 $F(x,y,x)$;通过以上关系就可以求出对应于各关节旋转角下的轨迹方程 $F(\theta_1,\theta_2,\theta_3)$,进而可以通过控制舵机实现机械足的移动.

4.1.2 多足配合实现爬行

要实现爬行,需要确定 6 条机械足移动的配合模式和每条机械足的移动轨迹.即步态和足尖轨迹.

4.1.2.1 步态算法

步态是指通过定义每只足抬升和放置的时间和位置,同时辅以机体的六自由度运动,以便将机体从一个位置移动到另一个地方.

我们把机械腿支撑在地面的状态称为支撑相,定义腿 i 的占空比为支撑相占步态周期之比:

$$\beta_i = \frac{T_{\text{支撑相}}}{T_{\text{步态周期}}}$$

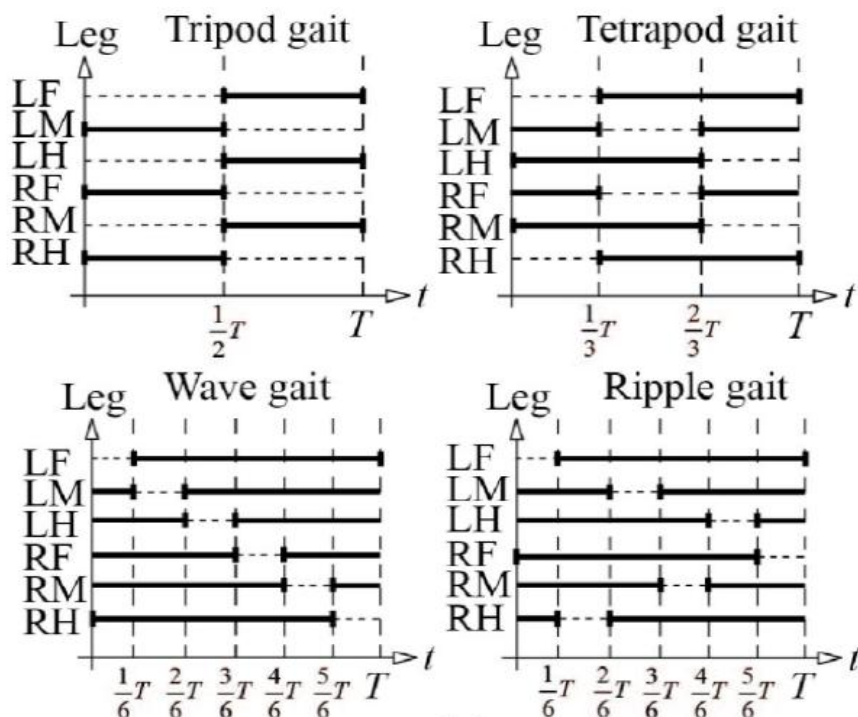
根据一个周期内各机械足占空比的不同以及各时刻处于占空状态的机械足的选取,可以区分出不同的步态模式.

对于六足机器人,我们考虑了下面四种步态模式:

- 1.Tripod Gait(三足步态)
- 2.Tetrapod Gait(四足步态)
- 3.Wave Gait(波浪步态)
- 4.Ripple Gait(叠波步态)

将 6 条机械足分为左前(LF),左中(LM),左后(LH),右前(RF),右中(RM),右后(RH)六个位置,以下为不同步态模式下,一个步态周期内的步态转化图,虚线表示该条腿处于悬空移动状态,实线表示处于支撑态.

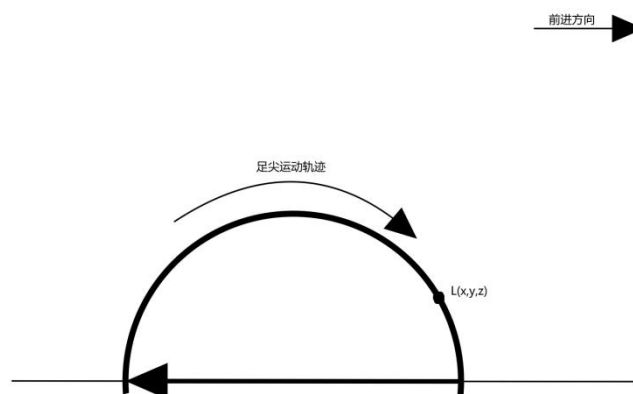
以三足步态为例,一个步态周期内,前半周期机器人的 LF,LH,RM 腿摆动,与此同时 RF,RH,LM 支撑在地,后半周期 RF,RH,LM 摆动,LF,LH,RM 腿支撑.每 3 支机械足为一组分为两组,组内机械足具有相同的运动模式



4 种步态的稳定性，速度各有优劣，我们可以实时调整步态模式。

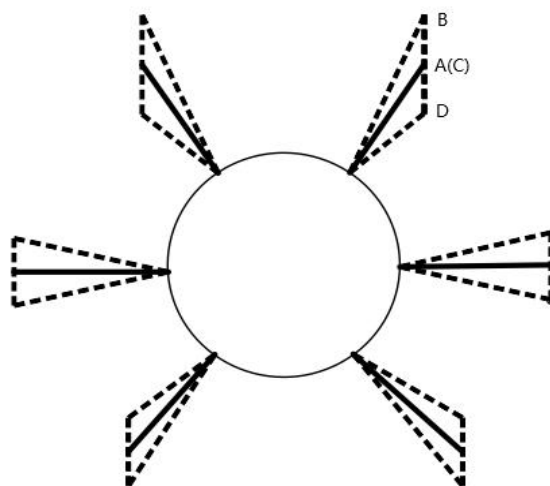
4.1.2.2 机械足足尖轨迹

首先考虑无障碍平坦的理想场地下，足尖抬升高度没有特别要求，在这样的情况下我们选择半圆形为足尖在一个步态周期中的运动轨迹。



4.1.3 实例：三足步态控制

接下来，我们以三足步态为例更详细地说明爬行的控制设计.其他步态模式只需稍微改变足部动作序列的顺序即可，与三足步态大致相同。



上图为机器人简化俯视图, 圆形代表机器人主体, 六条直线代表六条机械足(六足为着地状态), 六条机械足延长线交点为圆心, 相邻机械足延长线圆心角夹角为 60°

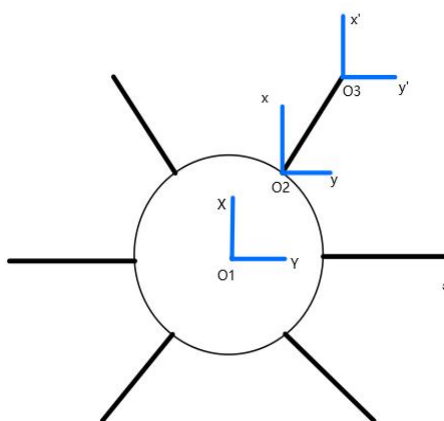
定义该状态为六足机器人的静止待命状态. 虚线代表机器人在前后方向上的(俯视)最大移动范围(需要实际调试确定).

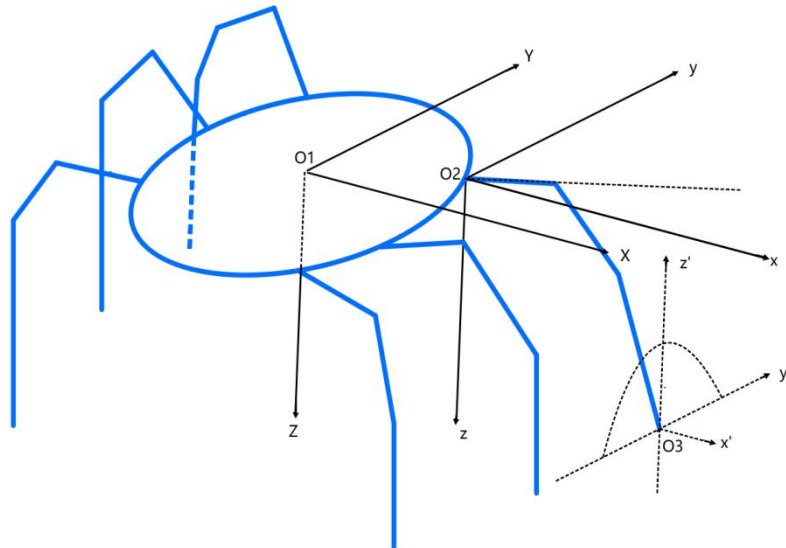
在圆心(机器人中心)建立中心坐标系 $O1XYZ$, 记为 $\Omega1$,

对每条机械足足跟处建系 $O2xyz$, 记为 $\Omega2$.

我们定义各机械足静止待命状态下的足尖位置(以图中 RF 右前腿为例, A 位置)为回中位置. 在各足的回中位置建系 $O3x'y'z'$, 记为 $\Omega3$.

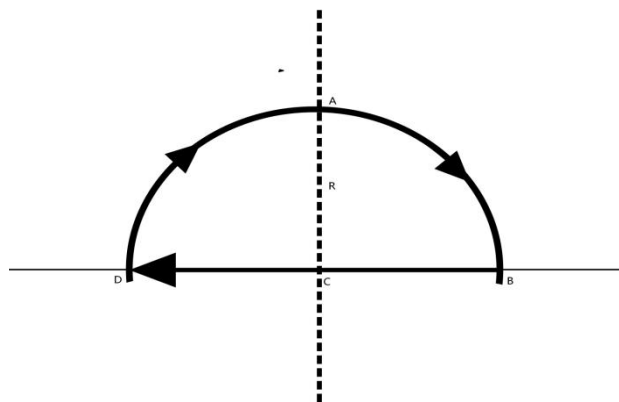
详细可见以下 RF 足为例的 3 个坐标系的示意图($\Omega3$ 中的虚曲线代表足尖的半圆运动轨迹)(三个坐标系 z 轴垂直于地面)





一个步态周期中,机械足在回中位置坐标系下的足尖运动轨迹相当于一个半圆(半径为 R , 要求保证机器足运动不冲突的条件,需要实际调试确定),我们将其分解为 4 个阶段:

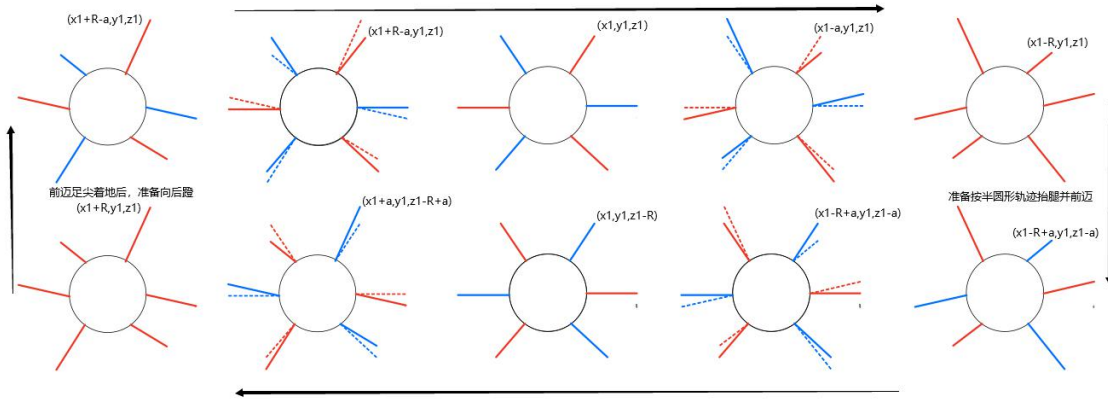
- 1.A->B:足尖由 A 位置向前向下迈到达 B 位置,足尖坐标: $L(x1,0,R) \rightarrow L(x1,R,0)$
- 2.B->C:足尖从 B 点向后蹬移动到 C 位置(全程着地),足尖坐标: $L(x1,R,0) \rightarrow L(x1,0,0)$
- 3.C->D:足尖从 C 点继续向后蹬移动到 D 位置(全程着地),足尖坐标: $L(x1,0,0) \rightarrow L(x1,-R,0)$
- 4.D->A:足尖由 C 点抬升并前迈至 A 位置,足尖坐标; $L(x1,-R,0) \rightarrow L(x1,0,R)$



每完成这 4 个阶段一次机械足就完成一次爬行迈步动作.

4.1.3.1 三足步态直行

以下为三足步态一个爬行周期的示意图.(虚线代表机械足运动前的位置,红色代表机械足处于支撑相,蓝色代表机械足悬空.)



三足步态下, 将 6 条机械足分为两组, LF, LH, RM 为一组(称为 L 组, 下同), RF, RH, LM 为一组(称为 R 组, 下同), 同一组机械足足尖半圆轨迹动作完全相同, 两组机械足交替进行支撑/抬升迈步的动作。

步态周期开始时, L 组各机械足处于足尖轨迹的 A 位置(轨迹最高点), R 组各机械足处于足尖轨迹的 C 位置。

然后 L 组机械足足尖从 A 位置移动到 B 位置, 即前迈下落, R 组机械足由 C 移动到 D, 即支撑在地面并向后蹬, 此时机器人中心向前移动距离为 R。

紧接着 L 组足尖从 B 移动到 C 位置, R 组机械足从 D 位置移动到 A 位置,

此时 R 组各机械足处于足尖轨迹的 A 位置(轨迹最高点), L 组各机械足处于足尖轨迹的 C 位置。与步态周期开始时两组机械足的情况正好相反。

按同样的规则 L, R 组机器人足足尖继续移动, 最终可以回到开始时的状态, 机器人中心总共移动距离为 2R。

机器人要后退时同理, 将半圆轨迹运动方向逆转即可。

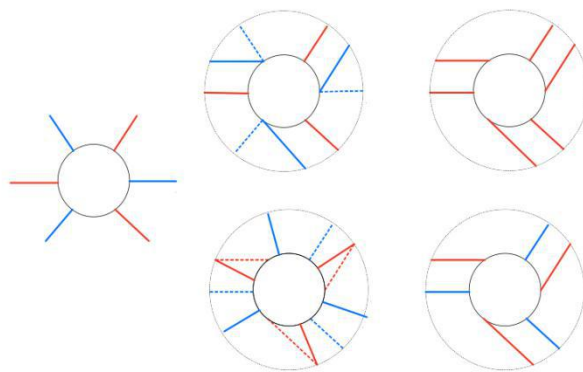
我们得到一个步态周期 T 内, 各机械足回中坐标系(Ω_3)下足尖的运动轨迹方程

$$L_{\Omega_3}(x', y', z') = \begin{cases} \left(0, R \cos\left(\frac{\pi}{2} * \left(\frac{t}{\frac{T}{4}}\right)\right), R \cos\left(\frac{\pi}{2} * \left(\frac{t}{\frac{T}{4}}\right)\right) \right), t \in \left[0, \frac{T}{4}\right] \\ \left(0, R - R \frac{\left(t - \frac{T}{4}\right)}{\frac{T}{2}}, 0 \right), t \in \left[\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}\right] \\ \left(0, R \sin\left(\frac{\pi}{2} * \left(\frac{t - \frac{3T}{4}}{\frac{T}{4}}\right)\right), R \cos\left(\frac{\pi}{2} * \left(\frac{t - \frac{3T}{4}}{\frac{T}{4}}\right)\right) \right), t \in \left[\frac{3T}{4}, T\right] \end{cases}$$

$$R_{\Omega_3}(x',y',z') = \begin{cases} \left(0, -R\frac{t}{T}, 0\right), t \in \left[0, \frac{T}{4}\right] \\ \left(0, R\cos\left(\pi * \left(\frac{t - \frac{T}{4}}{\frac{T}{2}}\right)\right), R\sin\left(\pi * \left(\frac{t - \frac{T}{4}}{\frac{T}{2}}\right)\right)\right), t \in \left[\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}\right] \\ \left(0, R - R\frac{\left(t - \frac{3T}{4}\right)}{\frac{T}{4}}, 0\right), t \in \left[\frac{3T}{4}, T\right] \end{cases}$$

通过使 L,R 组机械足足尖各自重复按照轨迹方程运动即可.我们将一个步态周期 T 等时间间隔地分为 n 份,计算出 $n+1$ 个时间点,各条机械足 Ω_3 下的坐标,通过坐标转化为相对应足跟部坐标系(Ω_2)下的坐标点,通过逆运动学分解方程求出各条机械足的舵机应旋转的角度.得到舵机运动序列.按照一定的时间间隔依次触发舵机旋转移移动足尖,就能够实现机器人六足爬行.

4.1.3.2 三足步态转向



要实现原地转向,以上图为例,全程最多只有一组机械足在运动.

首先其中一组机械足(设为 R 组)到达轨迹的 A 位置,开始旋转时,悬空足以足跟为原点,由原始位置向转向方向偏转 θ ,并保证足跟落在六条机械足的外接圆上,落地后另一组(L)机械足原地抬升,从 C 位置到达 A 位置后, R 机械足保持足尖触地不动,扭转回到 C 位置,这样机体就原地转动了 θ .

L 组机械足重复一次 R 机械足的动作后,一个旋转周期完成,机体原地旋转了 2θ .

按照三足直行等时切分动作的办法,同理可实现转向动作.

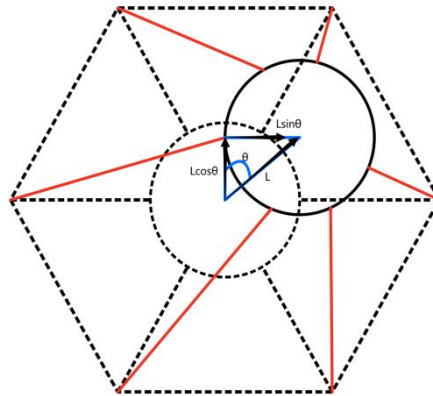
4.1.4 机体扭动

我们在以机器人中心为原点的(Ω_1)坐标系下,六足坐标点围成了一个六边形,这个六边形总是接触地面,因此可以通过对六足坐标点在空间中进行坐标变换,实现足尖六边形相对于机器人机体(相当于地面对于机器人机体)的位置变换,实现机器人的原地扭动动作.扭动动作包含以下两种.

4.1.4.1 机体高度不变，中心各向偏移

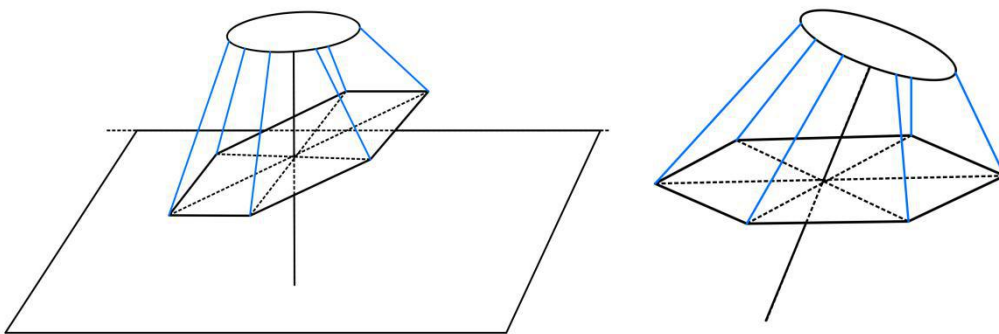
机器人机体高度不变，机器人 6 足足尖原地不动,机体向各方向偏移.

假设机器人中心向 θ 方向偏移了 L ，可以将偏移分解为 xy 方向上的偏移 $\Delta x = L \cos \theta, \Delta y = L \sin \theta$ ，将各机械足足尖坐标(在 Ω_1 下)对应的 x, y 改变 $\Delta x, \Delta y$ 后，转化为各足足跟坐标系(Ω_2)下坐标,逆运动学分解后改变舵机角度实现偏移.



4.1.4.2 向各个方向倾斜身体

如图， Ω_1 坐标系下，足尖六边形相对于机器人机体在空间中按坐标轴在空间中旋转后(左图),实际效果(右图)就是机器人机体向各方向倾斜.



通过空间旋转矩阵，将足尖六边形进行旋转变换，然后将它们转化为各足足跟坐标系(Ω_2)下坐标,逆运动学分解后改变舵机角度实现各角度倾斜.

□ X-Y-Z Fixed Angles – 由angles推算R

$$\hat{R}_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \quad v' = \hat{R}v = R_3R_2R_1v$$

先轉的放「後面」：以operator來想，對某一個向量，「以同一個座標為基準」，進行轉動或移動的操作

$$= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

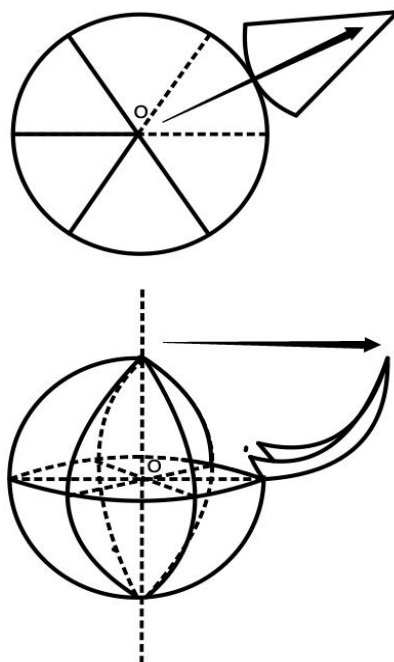
<https://blog.csdn.net/aic1999>

空间点 $L(x,y,z)$ 在绕 x 轴转动 γ ，绕 y 轴转动 β ，绕 z 轴转动 α 后的点坐标 L' 由以下公式计算:

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

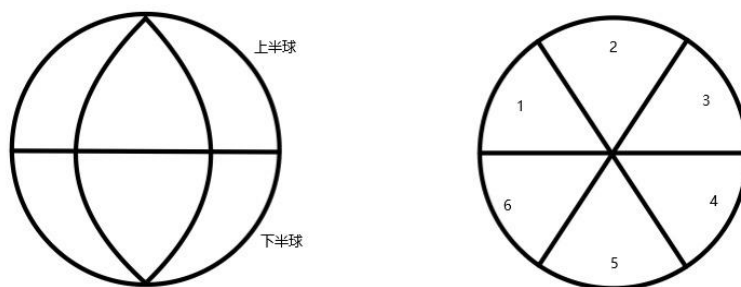
4.2 滚动控制

机器人在球态下机体机械足蜷缩,可以通过调整机器足姿态来控制上下半球的 12 瓣球壳不同程度地伸展(如图), 通过球壳伸展变换就能够推动机器人侧向滚动.

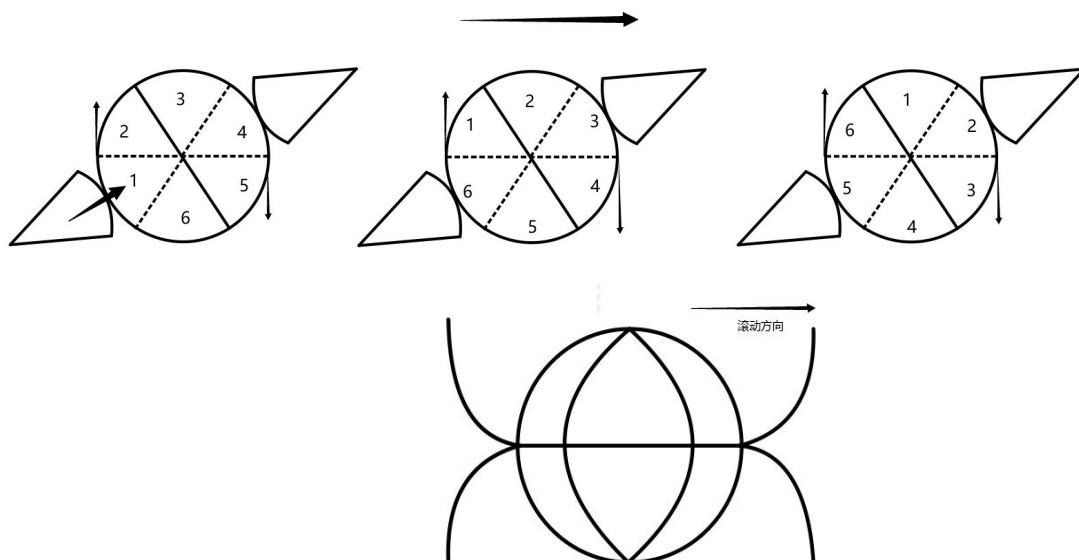


4.2.1 滚动

在机器人侧躺状态下, 从侧面(上半球)看去, 给机器足控制的球瓣按照顺时针标号.

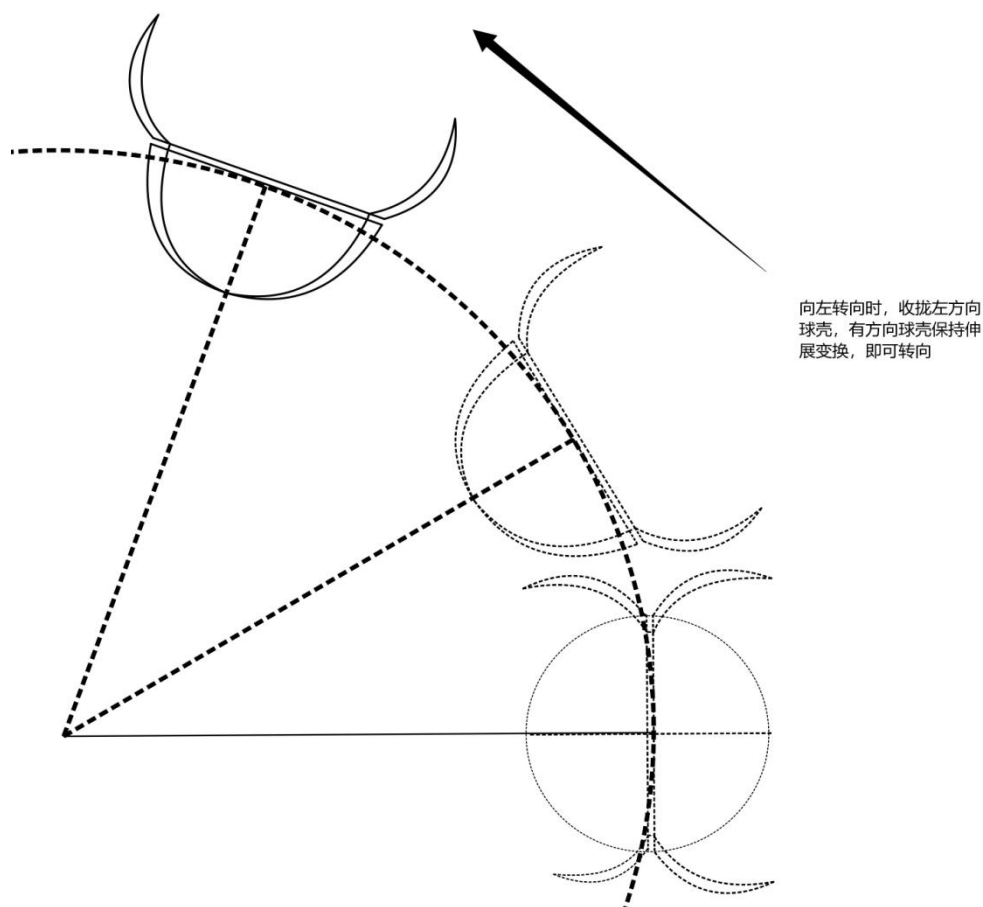


以下图(侧滚状态下前进方向的左视图,俯视图)为例,我们让上下半球位置相对的机械足展开, 近地端球壳展开时对地支撑的反作用力推动机器人滚动, 而对向伸展的球壳保证球体侧滚速度不会太快, 滚动姿态在一个可控的范围内.1, 4 号球壳完成一次展开后迅速收回, 与之逆时针相邻的 6 号球壳以及 3 号球壳在 1, 4 号收回同时开始伸展, 继续反推机器人滚动, 接下来同理.球壳的逆时针交替伸展推动了机器人侧滚(顺时针),



需要停止滚动时，停止球壳交替伸展，保持伸展的球壳不动，处于机器人侧滚方向前方的球壳会慢慢将机器人刹停。

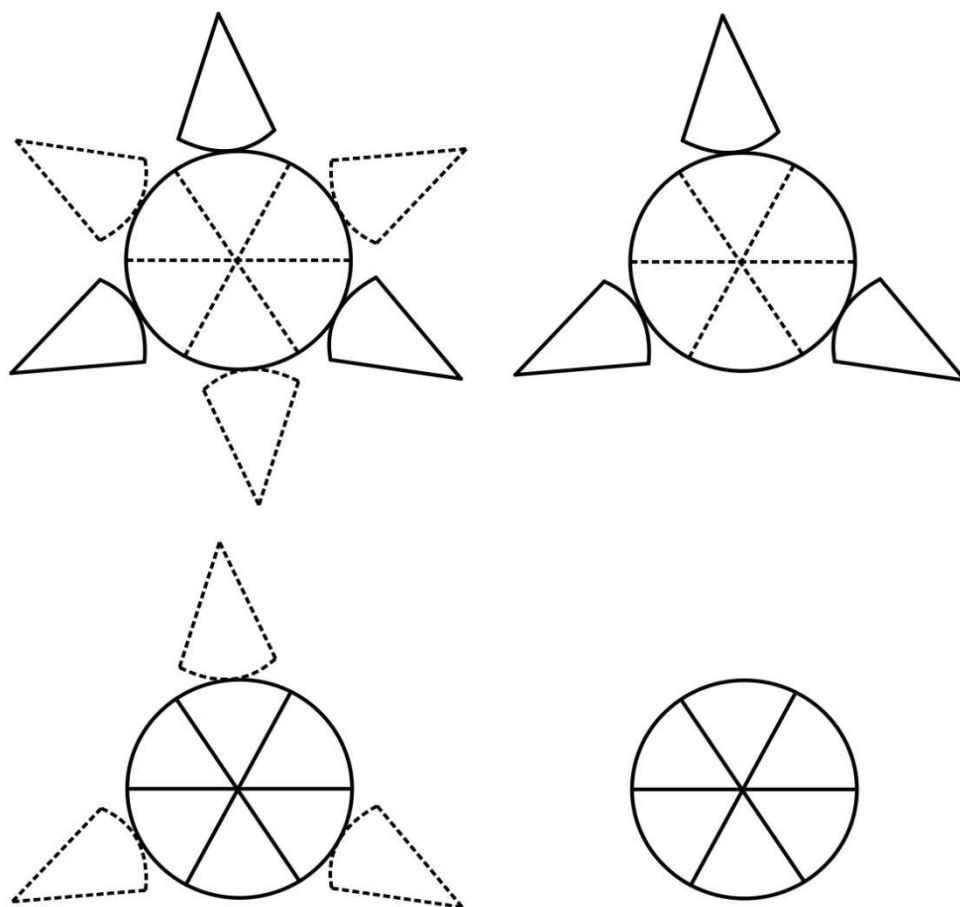
4.2.2 转向



侧滚中需要转向时，只需使转向方向半球的球壳收起即可，另一半球的球壳对地支撑的反作用力存在分力使整个机器人转向。

4.3 变形控制

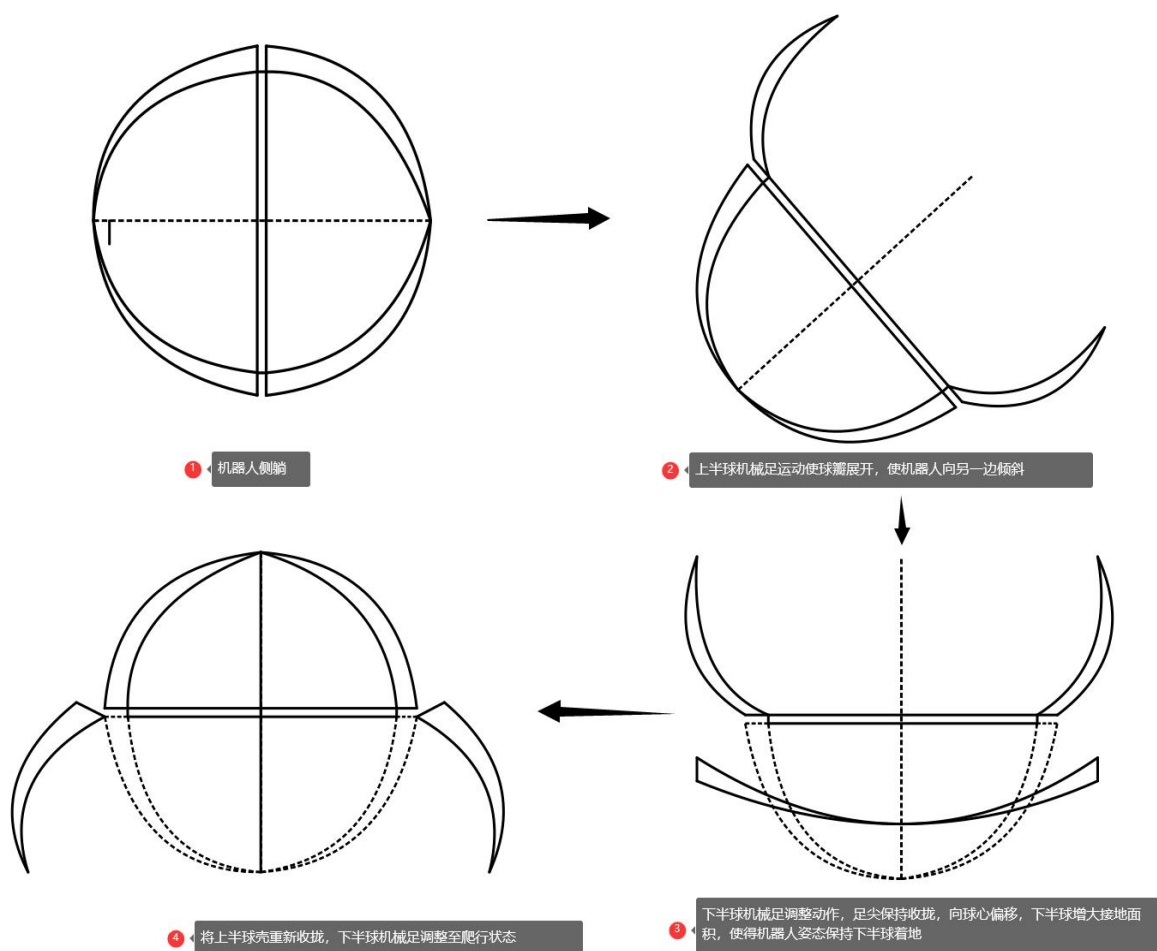
4.3.1 爬行态转球态



机器人首先完成所有爬行/转向/扭动动作后回位到静止待命状态,L 组机械足原地不动,另一组机械足蜷缩将球壳合上,而后 L 组机械足放低机体直至蜷缩起来的球壳触地, 然后 L 组机械足蜷缩, 整个机器人转化为球态.

若机器人此时需要在球态下交替展开球壳滚动, 则需要进入侧滚状态, 而球壳展开的动作会自动将机器人推至侧躺状态.故无需执行额外动作来完成这个过程.

4.3.2 球态转爬行态

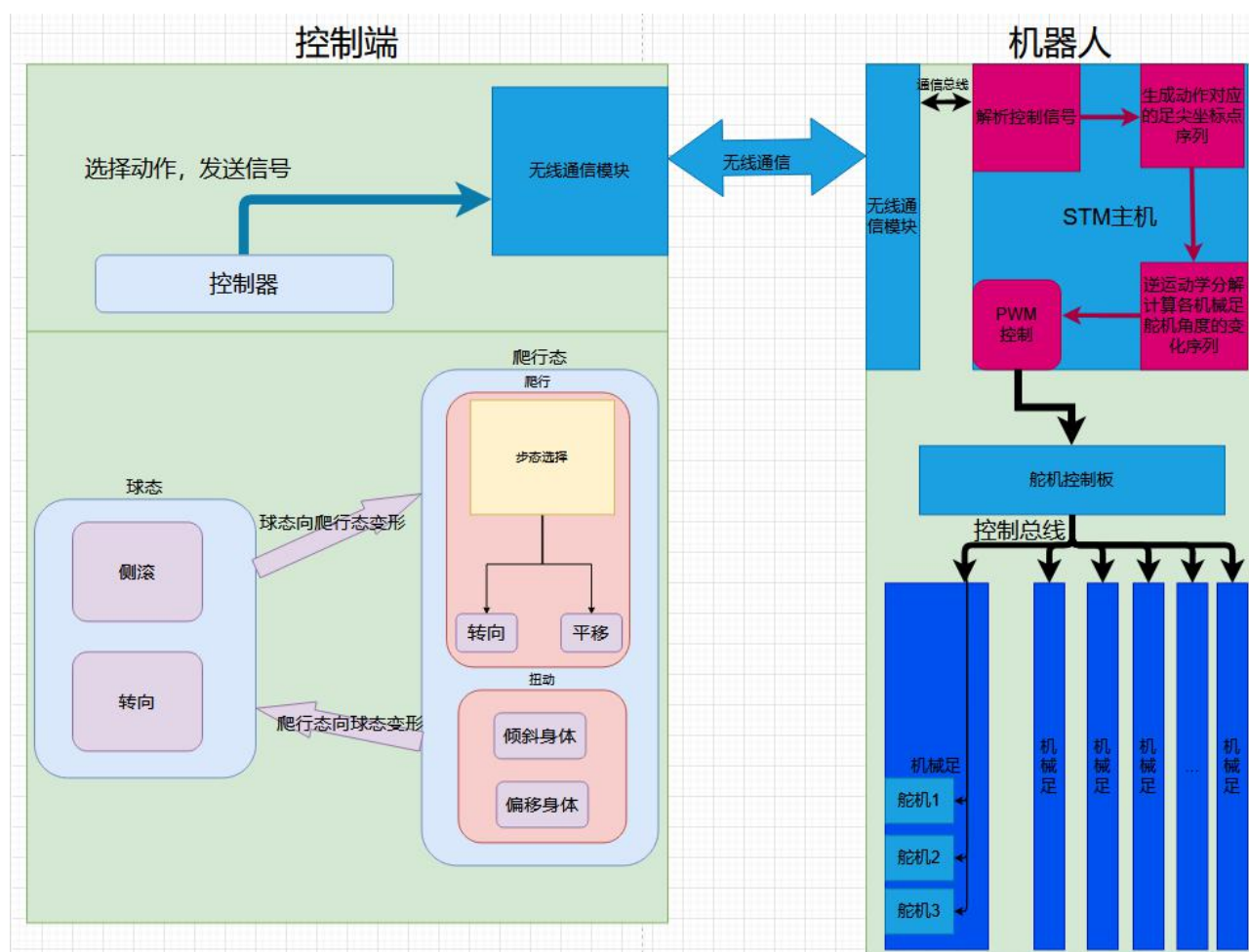


要从球态转化到爬行态, 首先确保停止侧滚状态, 将所有球壳收起后, 上半球的所有球壳按如图(图中 2)方式展开, 时机器人机体稍微倾斜, 然后下半球按图中 3 收缩, 可以使机器人下半部分平稳接地, 而后收起上半部分球壳, 下半球 L 组 R 组足分别展开并调整到静止位置, 最后恢复机体高度, 完成形态转换。

4.4 无线通信模块控制

我们使用 JDY-31 蓝牙通信模块进行无线控制。JDY-31 蓝牙基于蓝牙 3.0 SPP 设计，可以支持 Windows、Linux、android 数据透传，工作频段 2.4GHZ，调制方式 GFSK，支持用户通过 AT 命令修改设备名、波特率等指令，方便快捷使用灵活。机器人所有动作的控制信号由控制端（电脑/手机 APP）发射到机器人的蓝牙通信模块，并交由 STM 主机处理，计算相应的动作序列，生成对应 PWM 波，经由舵机控制板通过总线控制各舵机，最终实现机器人的控制。

控制结构图



5. 宣传计划

线上宣传方案：

- 1.拍摄机器人设计，制作过程的 vlog，投放在 B 站等视频平台；
- 2.通过 QQ，微信等途径进行宣传，如朋友圈，空间动态，大型群聊等；
- 3.与其他的宣传组联合投稿，在学校官方公众号或自媒体平台进行宣传。

线下宣传方案：

- 1.制作过程中，可在宿舍，食堂外等人流量较大的开阔地进行实验；
- 2.制作基本完成后，可在校园内进行展示，可同步在 B 站平台直播；

6. 经费预算

类别	单价/元	个数	总价
STM32F103ZET6 最小系统板	92	1	92
7.4v, 5200mA 锂电池组	44.5	1	44.5
LM2596S DC-DC 可调降压模块（带数显）	27.26	1	27.26
LX-224 串行总线舵机	88	30	2640
舵机控制板	159	1	159
舵机调试板	20	3	60
JDY-31 蓝牙模块板	13.93	2	27.86
铝板加工	50	3	150
连接线	50	1	50
球壳 3d 打印	150	12	1800
各类标准件、连接件、3d 打印耗材	200	1	200
万用表	22.5	1	22.5
急停开关	2.8	1	2.8
stlink 烧写器	19.8	1	19.8
总计			5295.72

7. 时间安排

时间	进度
4.10~5.15	撰写报告书，完成机械、电路、控制的初步设计。
5.15~7.31	参加培训，学习各自领域的知识； 采购，加工机械零件，完成基本的机械搭建以及部分电路搭建。
7.31~9.5	连接电路，调整机械结构，编写程序，使机器人实现基本动作。
9.5~9.25	对程序进行优化，使机器人能够流畅的完成动作； 拍摄宣传视频，进行宣传活动。
9.25~10.1	根据比赛场地调整表演方案； 优化机器人，达到最优表演效果。