

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

项目名称：全地形适应四足机器人

项目负责人：宋炳榕

学号：

联系电话：

电子邮箱

专业集群：航天与自动化

辅导员

指导教师：魏承

职称：博士生导师

联系电话：

电子邮箱

学院及专业：航天学院 航空宇航科学与技术

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期：2020 年 11 月 01 日

一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
宋炳榕	女	航天与自动化			
陈家玥	女	航天与自动化			
杨嘉杰	男	航天与自动化			
苏雨恒	男	计算机与电子通信			

二、指导教师意见

签 名：_____		
年 月 日		

三、项目专家组意见

批准经费：	元	组长签名：_____（ 学部盖章 ）
年 月 日		

四、立项报告

全地形适应四足机器人

（一） 立项背景（研究趋势、现状、意义等其它有关背景材料）

1. 研究趋势

近年来，随着计算机技术和机器人控制技术的研究和应用，全球包括中国在内的机器人工业表现出了强劲的发展势头和广阔的发展前景。科学技术的发展，让人们逐渐意识到机器人技术的重要性，**并着重致力于仿生足式机器人的探索研究。**

四足机器人的研究是以对四足哺乳动物的运动分析为基础展开的。作为陆地上进化完善、富有特色的生物种群，四足哺乳动物在运动属性方面有着**高动力性、高适应性、高稳定性、高负载能力**等众多优点，它们几乎可以到达地球陆地上的任何区域。四足哺乳动物优异的运动属性使越来越多的科学工作者对其开展仿生学研究，希望能够设计、制作出同样具备类似四足动物强大运动能力的仿生四足机器人，并使这些机器人在军事侦察、资源勘测、物资运输和灾难救援等众多领域发挥作用。

总的来说，四足机器人从 20 世纪 60 年代研究工作刚刚起步，到了 20 世纪 80 年代，现代四足步行机器人的研制工作进入了广泛开展阶段，而到现在，**越来越多的科学工作者认为 2020 年是四组机器人发展的元年**，相信通过技术的不断革新，四足机器人将在人类的生活中普及开来。

四足机器人的发展前景呈向好态势，而全地形适应四足机器人更是研究的重点。众所周知，四足机器人可以作为全地形探测工具，在某些地形复杂的危险环境如地震灾区、战场中，有许多地区需要勘探，但人力难以到达。而四足机器人依靠其不同的传感器，以应对复杂环境下不同的挑战，其能力远超一般意义的搜救犬、军犬，因此，四足机器人的研制工作一直受到世界各国的重视，**对四足机器人的研究具有非常重要的意义和应用价值。**

2. 研究现状

四足步行机器人机构简单且灵活，承载能力强，稳定性好，在抢险救灾、探险、娱乐及军事等许多方面有很好的应用前景，其研制工作一直受到国内外的重视。

2.1 国外研究现状

国外对足式机器人的研究工作开展的比较早，成功研制出很多性能优异的足式机器人。研究机构主要包括：麻省理工、波士顿动力公司、东芝公司、德国人工智能研究中心等。

2006年Boston Dynamics专门为美国军方研发设计出一款机器人，名为Big Dog，如图1-1所示。它设计的主要目的为**在车辆无法通行的复杂崎岖地形中，配合步兵运送战备物资。**其通过trot步态可以在雪地和斜坡完成原地变换方向等动作，并且有一定抗侧踹能力，具有自主运动能力、较大的有效载荷能力及静态和动态机动能力。Big dog采用汽油机驱动液压系统带动关节，每条腿都具有三个自由度，由处理器统一协调控制。该机器人长1.1m，高1m，宽0.3 m，自重109kg，平地有效负载为154kg。其本体拥有 50多个传感器，包括力、速度、位

置、压力、接触、视觉等传感器和 GPS 以及陀螺仪等，分布在关节、油箱、发动机和机身等部位，用以检测自身状态和环境地形信息。

且 MIT 等机构利用 Little dog 作为研究四足机器人学习能力的实验平台，Little dog 每条腿都安装了三台电动机，可控制腿部按三个自由度运动，机载 PC 级控制器可以实现姿态感知、电机控制和通信等功能。Little dog 的传感器可以测量关节转角、电机电流、躯体方位和足底触地等信息，并通过无线通信实现遥控操作^[1]。



图 1-1 Big Dog 示意图

2010年，IIT设计开发了HyQ机器人。如图1-2所示。这款机器人的设计目的是，**在地震发生时，机器人能够穿越复杂狭窄的地形空间，为抗震救灾出力**，这是全地形适应机器人的一类。HyQ体长约1m、宽0.5m、高0.9m、体重90kg，四条腿上的液压传感器能实时监测适用于地形条件的压力，及时调整控制行进的方向和力度。其完全采用主动柔性控制，使机器人的控制更加平稳，**能够快速稳定地通过崎岖地形**。且四足机器人HyQ实现了**对角小跑以及跳跃**等步态，在碰到障碍物时能够快速反应以免摔倒。

2012年，Big dog的升级版LS3面世，如图1-3所示。与Big dog相比，LS3的有效负载从150 kg增大到约180 kg；行走能力由19 km增大到24 km；增加奔跑、跳跃及跨越障碍功能，**能够在冰面上保持稳定性，能穿过杂乱的石堆，并且可以爬斜坡**，噪声减小近十倍。并且其通过计算机视觉或GPS可实现自主导航，这是四足机器人的一大进步。



图1-2 HyQ示意图



图1-3 LS3示意图

2013年，美国NASA设计生产出athlete六足全地形机器人，如图1-4所示。这款机器人的设计目的是：**进行外太空探测，搭载货物在月球、火星等外星体表面进行探索、行进、运送货物、搜集外星体物质等**。其腿部采用足式加轮式的复合结构，**在平坦路面应用轮式结构提高速度，复杂路面应用足式结构加强避障能力**，时速可达10km/s。且此机器人由两个三足机器人组合实现，机器人腿部能够实现钻孔等实用功能，并采用太阳能电池板供电。

2016年，美国费城的Ghost Robotics公司发布了四足机器人Ghost Minitaur 如图1-5所示。其安装了锂聚合物高性能电池，能够完成基本行走、简单跳跃等动作，**甚至能够在冰面及布满岩石的崎岖地面行走**^[2]。



图1-4 athlete示意图



图1-5 Ghost Minitaur

在2020年7月，福特公司宣布已采用两台波士顿动力公司出品的机器狗如图1-6所示，勘察其 Van Dyke 变速箱工厂，**采用机器狗对工厂进行3D数字扫描**，可以协助工程师更好地完成任务。Spot机器狗凭借其激光扫描和成像能力，将能够制作出高度详细和准确的地图，福特工程师便可以使用这些地图来对设施进行现代化改造和重新装备。



图1-6 Spot机器狗

2.2 国内研究现状

国内对于足式机器人的研究较晚，但进入二十一世纪后，四足机器人领域有了突飞猛进的发展，取得了一定的成果，主要集中在各工业院校和相关研发企业，包括清华大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学和浙江大学以及蔚蓝企业等。

哈尔滨工业大学从 2002 年开始研制一种复合运动方式的四足机器人 HIT-HYBTOR，如图 1-8 所示。**该机器人在各足上都安装有滚动轮，结合了轮式机器人和足式机器人在不同地形中的优势**。当在平坦地形等状况允许的情况下机器人可利用足底轮滚动向前运动，此时速度大约为 0.4m/s 到 0.7m/s；当遇到台阶等不平坦地形时，机器人将四个足底轮锁定，通过四条腿以一定的步态迈步前进。



图 1-8 HIT-HYBTOR 机器人

2013 年，山东大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京理工大学、上海交通大学均

开发了一台液压驱动的四足机器人，如图 1-9 到图 1-13 所示。由于采用液压驱动这些机器人相比传统电机驱动的四足机器人其负载能力强，可携带至少 50Kg 的负重，且速度较快，具有一定的地形适应能力，能够上下 10° 的斜坡，穿越沙石底面，并且能够跨越一定高度的障碍物。^[2] 且哈尔滨工业大学李满天教授带领的机器人团队在对国内外四足机器人的研究经验进行总结的基础上，研制出液压驱动的仿生机器人。该团队利用弹簧负载倒立摆模型（SLIP）对所设计机器人的动力学进行了控制模型等效。在基于 SLIP 模型的运动控制方法下，实现机器人在平坦和非结构环境下稳定的对角小跑运动^[3]。

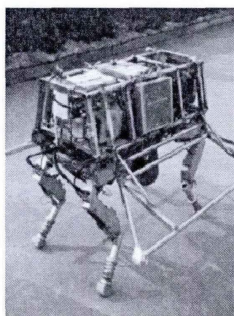


图 1-9 山东大学四足机器人



图 1-10 国防科技大学四足机器人

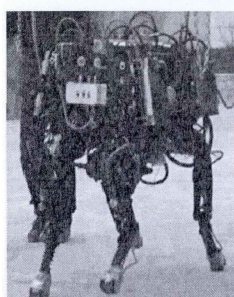


图 1-11 哈尔滨工业大学四足机器人



图 1-12 北京理工大学四足机器人

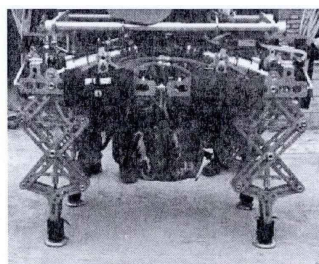


图 1-13 上海交通大学四足机器人

不仅有各大高校参与了四足机器人的研究和开发，相关企业也加入进来。2020 年，国内知名机器人研发企业蔚蓝科技，正式发布了新款第二代高性能仿生四足机器人，“大狗” Alpha Dog E400L。据悉，“大狗”专为解决行业应用而研发，在动力、速度、续航、兼容性、拓展性等方面较上一代都有较大提升，同时具有业内领先的负载能力。

3. 研究意义

四足机器人模仿四足动物运动，它既有超于双足机器人的高负载能力、高平稳性，又具备了比多足机器人更大的腿部移动空间，同时减小机构的冗余性和复杂度；即其既能以静态步行方式在复杂地形上缓慢行走，又能以动态步行方式实现高速行走，在[抢险救灾、反恐排爆、军事运输、野外勘探、星球探测、农业生产、教育及娱乐](#)等诸多方面都有极其诱人的应用前景，因此四足机器人的应用场景广泛，其研究意义更是十分重大。以下是四足机器人的具体应用方面。

(1) 协同士兵作战

美国波士顿动力学工程公司推出的第一款四足机器人，是为美国军队研究设计的，其不仅能够爬山涉水，还能承载较重的负荷重物，并能根据环境的变化调整姿态，在作战过程中，能协助士兵完成各种行动。事实也确实如此，该四足机器人一经研发出，便被美军应用在阿富汗的战争试验场。所以，未来四足机器人继续被应用在战争中，是有很大的可能性的。

(2) 安防巡逻和应急救援

随着四足机器人性能和功能的提升，到目前为止，大部分有名的四足机器人都有基于视觉的自主跟随功能和自主避障功能。有的四足机器人就有主动红外立体深度技术、1080P的相机分辨率和高精度激光雷达，不仅能对视觉范围内的人、特定移动物体等目标，进行实时跟随并呈现出清晰的画面，还能对视觉范围0.8米内的障碍物的分布情况，进行地图构建、自主定位、实时监测和导航规划。因此，四足机器人也经常被应用在安防巡逻和应急救援过程中，相对于人力来说，成本更低、更安全，效率也更高。

(3) 协助安检工作

此外，四足机器人还能够在火车站、机场、广场等公共场所协助安检人员完成安检工作。因为四足机器人能使用高清相机进行往来人员进行辨识，定位，使用包括光谱监测仪对人员携带的物品进行危险品检测。

(4) 厂区检验

因为四足机器人能在空间狭小、具有台阶的厂区内部进行自主行走，因此其还能做包括气体检测，仪表读取，设备温度，声音频谱分析等工作，实现对厂区的无人化巡检。

除了以上的作用，四足机器人还在诸多领域有着广泛应用。并且，随着技术的发展，相信，它的应用范围还会越来越广，因此，四足机器人的研制工作一直受到各国的重视，对四足机器人相关理论和技术的研究具有重要的理论意义和实际应用价值^[4]。

(二) 项目研究内容及实施方案

本项目的研究内容如下：

(1) 四足机器人的结构设计：

- a) 四足机器人的单腿运动学模型设计及计算
- b) 四足机器人的步态规划
- c) 四足机器人的控制程序设计

(2) 四足机器人的全地形适应能力设计：

- a) 可翻转能力设计
- b) 视觉传感器的添加与调试

(3) 四足机器人的制备与试验测试：

- a) 根据模型制备四足机器人
- b) 四足机器人的全地形运动试验测试

下面根据研究内容详细论述实施方案：

(1) 四足机器人的结构设计

a) 四足机器人的单腿运动学模型设计及计算

四足机器人的腿部结构可参考四足动物，为了增强其对地形条件的适应能力，使其在复杂地形中具有更高的灵活性、可控性，需要借助**仿生学**对机器人进行必要的改进。机器人的腿部结构可参考四足动物的腿部结构，如下图 2-1 所示。我们根据全地形需要设计的四足机器人**满足仿昆虫腿部结构**。

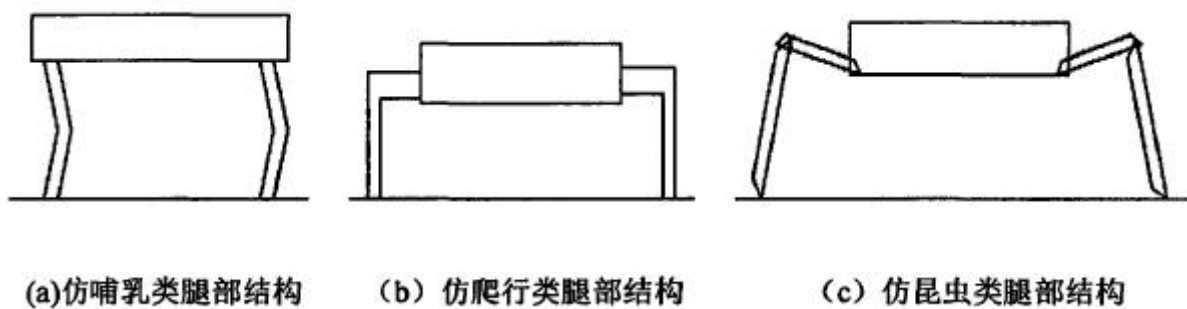


图 2-1 仿生机器人腿部结构示意图

四足机器人运动学模型有如下特点：

四足机器人可以分解为基体及四条腿，基体可以表征为单刚体，即基体上所有点的姿态均为刚体姿态；四足机器人四条腿的运动可以设计不同的步态形式，但每条腿都是支撑相和摆动相周期切换，只是时序不同；支撑腿的运动能够控制基体的姿态和位置，也就是说基体

的姿态和位置移动靠控制支撑腿来实现;摆动腿的运动本质上只是为了找下一次变为支撑腿时的有利落点。我们将基于此对四足机器人的运动学模型进行设计。

我们将在魏承导师设计的 RipiDog 四足机器人如图 2-2 所示的基础上, 对其腿部关节进行倾斜设计, 以更好的适应全地形环境, 并且可在空地上灵活的运动^[5]。

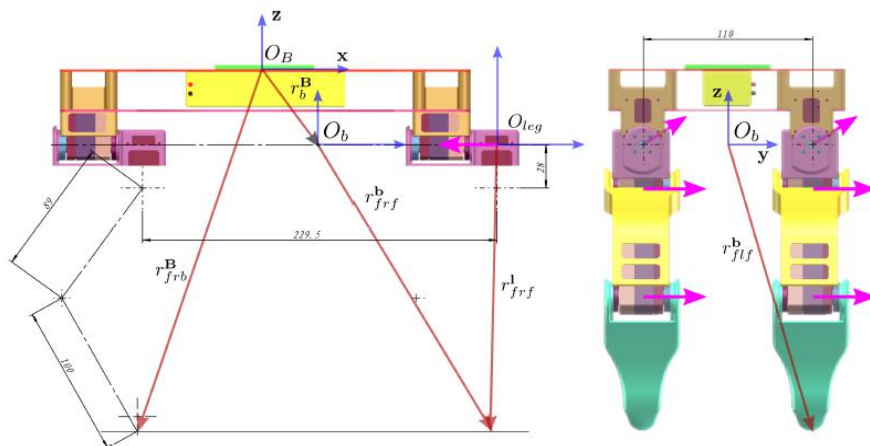


图 2-2 RipiDog 结构图

我们初步设计每条腿三个自由度, 根据仿昆虫腿部结构的设计思路, 设计出机器人自由度结构简图和其腿部结构简图如图 2-3 所示。

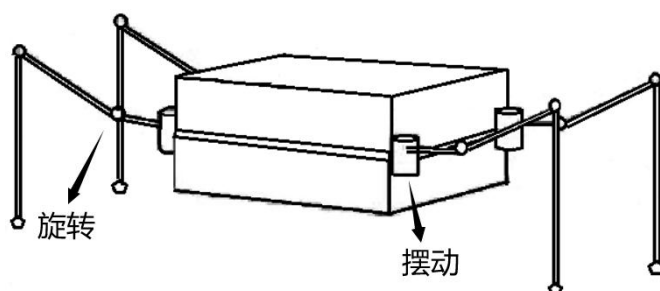


图 2-3 自由度结构简图

目前, 四足机器人运动学建模的方法包括D-H方法、李代数方法以及螺旋理论等。其中, D-H方法是较为常用的方法, 该方法能够解决具有任意自由度机构正向运动问题。同时, 在使用D-H方法求解机器人的运动学逆解时也存在一定的缺点, 即当自由度数较多时, 会出现多组解和无法获得逆运动学解析解的情况。另外, 随着机器人自由度数的增加, 在运动学计算时, 需要频繁地进行矩阵的求逆, 计算量大, 有时很难保证运动学求解的实时性。由于本项目设计的机器人单腿只有3个自由度, 自由度数较少, 因此, 使用D-H方法建立四足机器人运动学方程较为适合。

由于四足机器人的结构完全相同, 因而只需要求解其中一条腿的运动学方程即可。不妨以右前腿为例建立坐标系, 对其进行运动学求解。如图2-4所示^[6]。

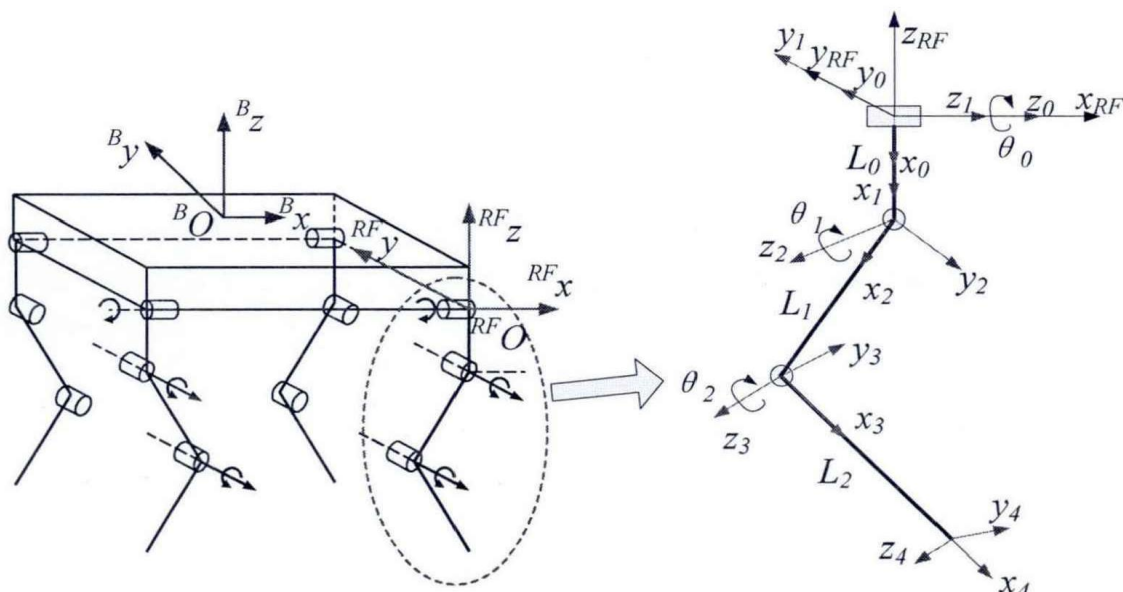


图2-4 四足机器人腿部结构

b) 四足机器人的步态规划

四足机器人的步态规划可根据雅可比矩阵设计。四足机器人的雅可比矩阵表示的是机器人足端与各关节间的微分关系，是其关节空间向操作空间运动速度传递的线性关系。雅可比矩阵是四足机器人运动学分析中重要组成部分，在机器人运动速度规划、静力分析、足端运动灵活性等分析中都必须用到雅可比矩阵。因此，必须准确地求解四足机器人的雅可比矩阵。根据雅可比矩阵的定义，对四足机器人运动学正解的左右两侧求导，即可得到机器人的雅可比矩阵。相反地，如果已知足端运动空间的运动速度则可通过雅可比矩阵求得关节空间的关节角速度。进而对四足机器人的运动做出规划。

其具体姿态调整模式如下：

1. 给出期望基体姿态 \mathbf{q}'_{bd}
2. 通过IMU姿态信息及IMU安装信息获取基体姿态 \mathbf{q}'_b
3. 计算得出每条腿腕节点与期望位置的误差 $\mathbf{e}_H = (\mathbf{A}'_{bd} - \mathbf{A}'_b) \mathbf{r}^{bH}$ ，其中 \mathbf{r}^{bH} 为腕节点在本地坐标系下的安装位置
4. 基于雅可比矩阵控制关节使得腕节点跟踪期望位置 $\mathbf{V}_F = -\mathbf{K}_{inf} \mathbf{e}_H$ Video Test

c) 四足机器人的控制程序设计

本次项目的四足机器人将使用 **Matlab 与 MBDyn 联合进行程序控制**，以下为大体程序控制框图（图 2-5）^[7]。由于四足机器人的机械结构比较复杂,因此本项目利用 **SolidWorks 建立各组成部分的三维模型**，以方便后续对模型参数进行修改。

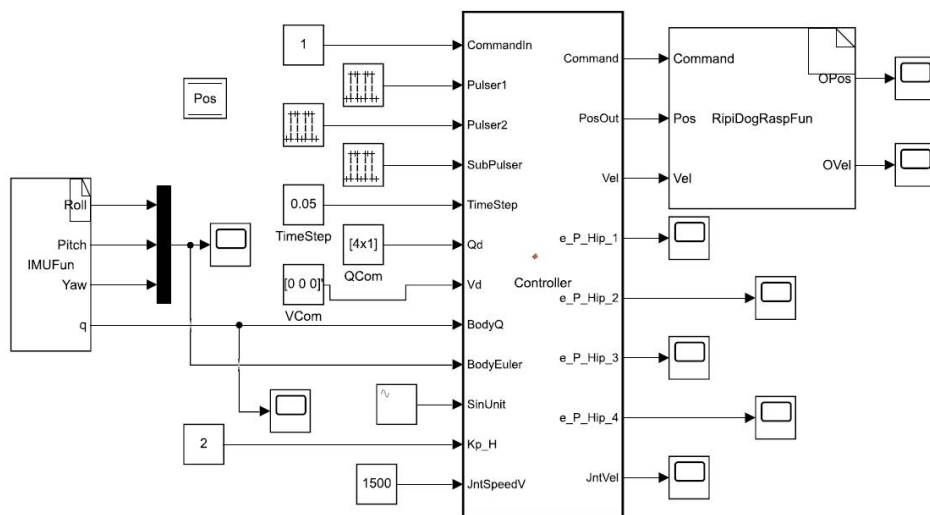


图 2-5 Matlab/Simulink 程序框图

控制器件主要包括控制器，测量器件（IMU 或视觉），执行机构（关节电机）。控制器通过接收控制终端的指令来控制机器狗移动，控制指令包括控制模式及小狗期望的姿态与速度。以下为四足机器人的控制流程图（图2-6）^[8]。

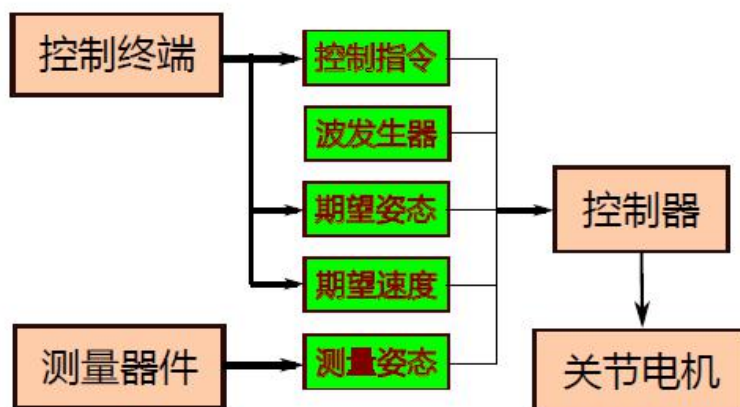


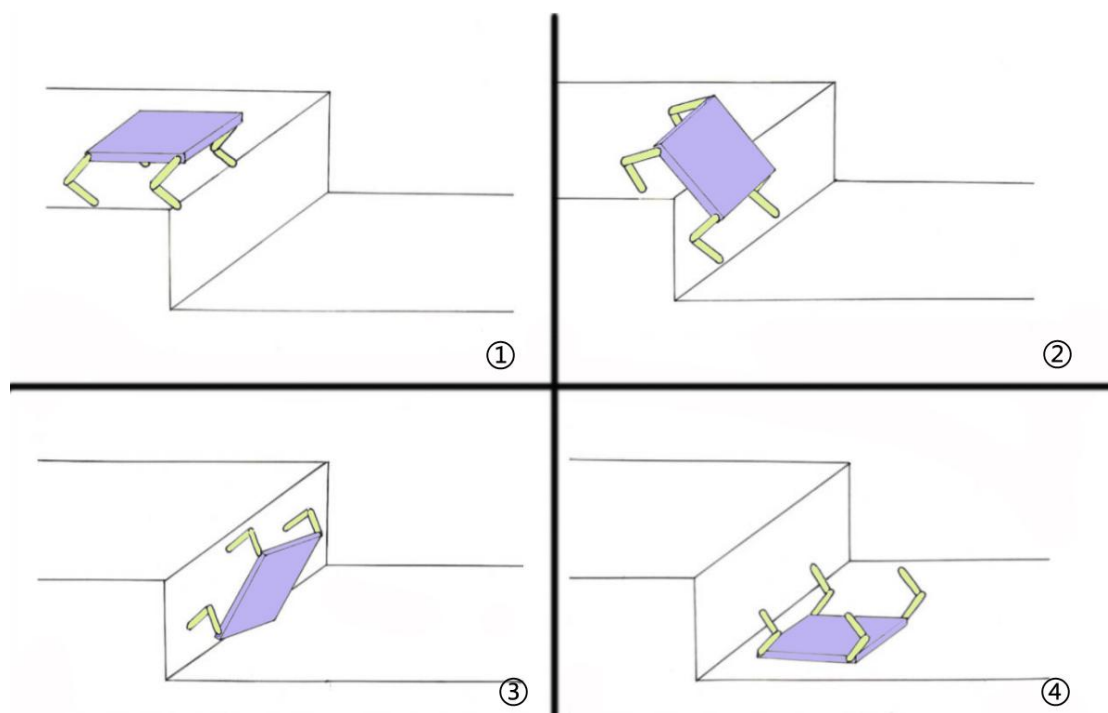
图 2-6 四足机器人控制流程框图

我们计划首先利用两大软件模拟出四足机器人的具体结构，再使用 Solidworks 对该机器人所需的各零件进行细致的刻画，最终定制制作机器人的相关材料，利用导师提供的硬件进行四足机器人的制备，额外零件可到网上购买。

（2）四足机器人的全地形适应能力设计：

a)可翻转行走能力设计

四足机器人在山坡、废墟、峭壁等复杂环境中行走时，**常会遇到高台（假设此高度不会使机器人本体受到损坏）坠落情况发生**，如若四足机器人在空中来不及调整，则会导致机器人背部撞落在地面上。倘若机器人可以进行姿态调整进而让自己的主体进行翻转，实现四足着地的姿态，那么机器人可以继续正常行走完成相关任务，**但这种“翻转”必定会消耗大量时间，且具有许多不确定因素的存在；倘若机器人不具备翻转自身的能力，那么机器人将会被困在相应地形中，进而导致任务失败**（如图 2-7 所示）。

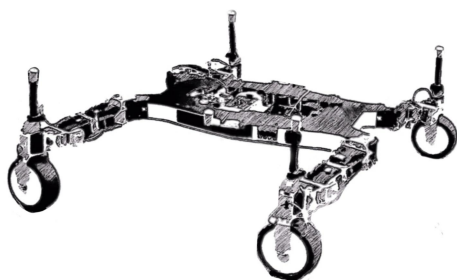


2-7 普通四足机器人坠落演示

于是，我们小组基于四足机器人的这个弊端，计划设计一种**具备翻转行走能力的四足机器人**，其模型如图 2-8 所示。即**四足机器人既可以在地面上正常行走，也可将自身翻转过来行走**，这样的设计加强了其对阶梯式地形的适应能力，更避免了它在高台坠落后任务失败的情形发生。

并且我们考虑到，普通四足机器人利用其四足可以在复杂地形中稳定行走，但机器人若是到了平坦的地面上，这种交替行走的足反而成了它的弱势，大大降低了其在平面运动时的速度。**因此我们计划给四足机器人添加轮式结构**，用以实现平坦地面上的快速前进，而其背部向下时的足式结构则使自身更好地适应复杂地形。

我们初步计划将其腿部扭转为水平姿态，达到降低重心、保持平稳的目的，且机器人自身高度的降低更有助于其在废墟等复杂地形中进行穿梭，从而实现其运动的平稳性、灵活性。



(i) 正向姿态



(ii) 反向姿态

2-8 可翻转轮组一体式四足机器人结构设计

b) 视觉传感器的添加

由于四足机器人在现实中的应用主要是地形勘测，厂区勘测，所以“眼睛”对于四足机器人来说是不可或缺的一部分。基于此，我们决定给四足机器人添加**视觉模块**，以实现图像的接受、信息的传递。从而更好地进行“全地形”应用。

而视觉传感器则是指通过对摄像机拍摄到的图像进行图像处理，来计算对象物的特征量（面积、重心、长度、位置等），并输出数据和判断结果的传感器。视觉传感器的主要功能是获取足够的机器视觉系统要处理的最原始图像。为了让四足机器人更好的实现勘测功能，可以让其携带视觉传感器，在传感器捕获图像之后，可将其与内存中存储的基准图像进行比较，将其捕获的图像资料传输给控制终端，以做出分析。例如，若视觉传感器被设定为辨别正确地插有八颗螺栓的机器部件，则传感器知道应该分辨只有七颗螺栓的部件，或者螺栓未对准的部件，此外，无论该机器部件位于视场中的哪个位置，无论该部件是否在 360 度范围内旋转，视觉传感器都能做出判断。这样就实现了简单的厂区勘测。

本项目将利用 OpenCV 实现计算机视觉算法，用 C 语言和 C++语言编写，结合视觉传感器 openMV4 如图 2-9 所示和树莓派辅助四足机器人进行全地形勘测。



图 2-9 openMV4 视觉传感器

(3) 四足机器人的制备与试验测试

a) 制备

本项目最终设计的四足机器人结构参数如下表所示：

部件名称	参数名称	数值（mm）
杆件 1	长度	60
杆件 2（大腿）	长度	100
杆件 3（小腿）	长度	120
轮子	直径	68
机体（躯干）	长*宽*高	400 * 250 * 50

且我们设计的机器人腿部各处关节由伺服舵机驱动，整机由 12 个舵机共同驱动来实现工作空间内的灵活运动。其中的伺服舵机采用了 RDS 系列舵机，尺寸为 40×20×40.5mm，舵机结构以及舵盘构形如图 2-9 所示。

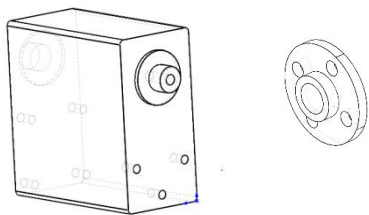


图 2-9 舵机、舵盘机构机械结构

b) 试验测试

1) 基础运动测试

测试目的：通过手机终端控制四足机器人的行走，以检验其基本运动功能是否正常。

测试内容：让四足机器人在摩擦力较大的平整地面上以足式结构进行以0.2m/s速度的简单直行，随后进行简易的转向操作，检验其是否可在地面上灵活稳定行走；翻转机器人，使其用轮式结构驱动前进，速度定为1m/s，并重复上述操作；**设置目标点坐标**，测量其到达目标点的时间是否与理论计算一致。如若测试过程中出现问题，检查相应程序与零件，进行修改与调试。

2) 全地形模拟测试

测试目的：模拟简易的复杂地形，检验四足机器人是否能在废墟中稳定行走。

测试内容：首先制造不平整的粗糙地面与简易障碍物，随后将机器人以足式结构着地放置在“模拟废墟”中，降低其重心高度，以避免翻倒等状况发生。通过手机终端控制四足机器人进行直行，转向等动作，**测试其灵敏度与稳定性**是否达到理论标准；利用视觉传感器与红外传感器模块，对此复杂地形做出勘测，记录勘测数据并控制机器人进行简易的避障操作；搭建简易高台，**模拟坠落情形**，以检验机器人在高台坠落后是否仍能利用其反向的四足进行运动。如若机器人的运动与预期出现较大偏差，则应总结问题，作出进一步的调试工作，直至达到最终预期。

3) 测试总结

整理各项测试指标，对每次测试的不同项目进行评估与总结，对于测试过程中遇到的问题进行总结归纳，各组员共同探讨，最终制定出可行的解决方案，**并重复测试，直至接近预期目标**。

(三) 进度安排

任务序号	任务名称	开始时间 (月-周)	结束时间 (月-周)	持续时间 (周)	2020.11				2020.12				2021.1					2021.2				2021.3				2021.4					2021.5			
					1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4
A	学习并熟练掌握matlab,solidworks等软件	11-1	5-4	30																														
B	制定项目规划，完成立项报告与立项答辩	11-1	11-1	4																														
C	搜集四足机器人资料、学习相关理论原理	11-1	1-2	10																														
D	学习机器人运动学，雅可比矩阵，了解单腿运动原理及步态规划	11-1	3-2	19																														
E	利用软件设计出可做简易运动的四足机器人	12-1	3-2	15																														
F	购买视觉传感器、舵机舵盘等实验部件	1-4	1-5	2																														
G	与导师交流，对机器人做进一步修改	1-5	1-6	1																														
H	添加机器人的轮式结构并调试驱动	2-1	2-3	3																														
I	学习视觉传感器，并安装在机器人上进行简单调试	2-4	3-1	2																														
J	完善机器人，使之能全地形适应，确定总体构型，制定中期报告	3-1	3-2	2																														
K	制作简易小型废墟	3-3	3-21	1																														
L	购买并制备相应部件	3-3	3-4	2																														
M	制备成型机器人，并进行性能测试	4-1	4-5	4																														
N	记录并分析测试数据，进行调试与优化	5-1	5-3	3																														
O	优化机器人外观，制定结题报告	5-3	5-4	2																														

（四）中期及结题预期目标

中期目标:

提出详细且完善可行的理论模型，并使用Matlab结合MBDyn设计出四足机器人的大体结构，提出其在复杂地形中如何进行运动和勘测的解决方法。

结题目标:

对全地形适应四足机器人的结构设计达到细致可行的程度，制作出携带视觉与红外传感器的全地形适应四足机器人的实物，且实物的各项功能接近预期。

（五）经费使用计划

序号	经费类别	经费具体使用去向及金额	经费预算
1	资料费	知网相关论文下载 90元 机器人杂志购买 25元 应用机器人学书籍购买 36.9元	151.9元
2	印刷费	报告、相关资料打印 10.2元	10.2元
3	材料费	机器人控制器 98元 舵机*12、舵盘 480元 OpenMV4视觉传感器 299元 机器人轮胎*4 23.2元 机器人结构模块 1000元	1900.2元
总计	2062.3元		

（六）主要参考文献

- [1] By Caitlin Fairchild. MIT's New Cheetah Robot Navigates While 'Blind'[J]. Nextgov.com (Online),2018.
- [2] 贾红玉. 具有复杂环境适应能力的四足机器人系统关键技术[D]. 北京:北方工业大学, 2018.
- [3] 张帅帅. 复杂地形环境中四足机器人行走方法研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
- [4] Jiang Z, Li M, Guo W. Running control of a quadruped robot in trotting gait[C]// Robotics, Automation and Mechatronics. IEEE, 2011:172-177.
- [5] 杨钧杰, 孙浩, 王常虹, 陈晓东. 四足机器人研究综述[J]. 导航定位与授时, 2019,6(5):69-71.
- [6] 魏承. 小型四足机器人 RipiDog 设计与控制实践[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [7] 张太辉. 四足机器人单腿控制算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
- [8] 那奇. 四足机器人运动控制技术研究与实践[D]. 北京:北京理工大学, 2015.