

仿生蜘蛛机器人机电一体化系统设计

张思远

西南林业大学 机械电子工程 云南 昆明 650224

摘要：如今进入了智能化时代，根据应用需要研制出各式各样协作人类工作的智能机器人，其中足式机器人的应用最为广泛。本文通过对蜘蛛的研究和文献的查阅，设计出一种主要针对危险、复杂的环境的仿生蜘蛛机器人。论文中包含机械结构设计，运动步态分析研究和规划，控制系统设计，移植实体样机进行验证。最终设计出来的仿生机器人能在一些救援人员难以进入和无法工作的环境中进行探测，传输图像，便于展开施救。

关键词：蜘蛛机器人；机械结构；运动步态规划；控制系统

1 引言

1.1 课题研究背景和意义

1.1 课题研究背景和意义

仿生学的兴起可以追溯到 20 世纪 60 年代的第一次仿生学会议，是生命科学与工程技术相结合的产物^[1]。仿生机器人作为机器人领域的新兴方向，致力于基于特定生物的外部结构、运动和行为特征设计机器人^[2]。目前，仿生学自动化机器人主要分为仿人机器人、仿生机器人和生物机器人^[3]。其中，仿蜘蛛机器人采用了类蛛形纲节肢动物的生物构造，模仿其运动机理和动作模拟系统，具备平衡行走、确定运动方位和感知外部刺激的能力^[4]。这种机器人在危险、复杂的区域进行探测和信息传输，特别适用于恶劣自然环境^[4]。

在国内外工程自动化机器人领域，仿生机器人研发一直是热门话题，已经涌现出 100 多种仿生物机器人。面对多变的地形和自然因素，仿生机器人在控制上面临一定难度，因此人们不断探索，使其在复杂环境中更灵活运动。特别是仿生蜘蛛机器人，由于其多个运动肢体的配合工作，需要设计和控制系统的深入研究^[4]。

当前，我的主要研究方向是仿生蜘蛛机器人的主体设计、步态规划和控制系统。随着机器人技术的迅猛发展，仿生机器人技术成为人工智能领域的热点。机器人的应用范围不断扩大，具有替代人类无法完成任务的潜力。通过对仿生蜘蛛机器人的研究，可以期待在未来在灾害救援、侦查等方面发挥重要作用。通过大学四年学习，将为我进入研究生阶段的深入研究打下基础。

2 仿生蜘蛛机器人的机械结构设计方面

2.1 功能分析

本文研究的仿生蜘蛛机器人旨在应对危险和复杂环境，主要任务是在建筑物遭受破坏、火灾等灾害后，进入救援人员难以进入和无法工作的地区，进行探测和传输图像，以支持救援计划的展开。

对机器人执行的任务和工作环境进行全面分析，提出以下性

能需求：

1. 机器人需具备负载能力，以携带可传输的摄像头。
2. 为适应复杂地形，机器人运动需要非常灵活，每只腿至少具有 3 个自由度，整体机器人理论上可到达空间的任何位置。
3. 在保证平稳运动的前提下，蜘蛛机器人应具有一定的运动速度，考虑时效性。
4. 机器人在复杂地形中需要顺利进行探测，因此需要适中大小的体型。

2.2 仿生蜘蛛机器人的总体结构设计

2.2.1 仿生蜘蛛机器人腿部结构分析

- (1) 每只腿的尺寸、结构、关节、参数应相同。
- (2) 每只腿都可以单独完成动作，并且六只腿都能够经过组合完成复杂的动作。
- (3) 拥有能够支撑起主体躯干的负载能力，保证仿生机器人的运动时的稳定性。
- (4) 每只腿的自由度为 3 个自由度，最主要能够完成直线行走和转向，使仿生机器人更加灵活。

当达到上述要求时，仿生机器人的重量也应当减轻，降低加工难度。根据以上条件，仿生蜘蛛机器人的腿部结构简图如图 2.1 所示。

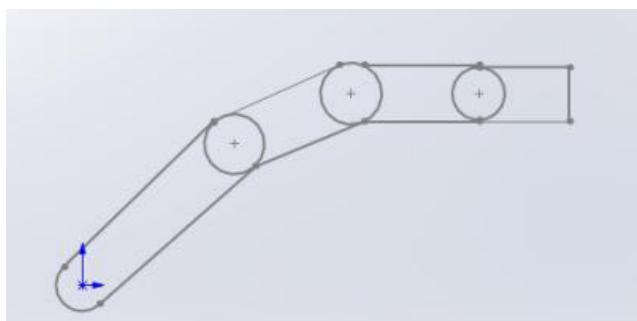


图 2.1 腿部结构简图

本设计机械腿的腿部具有三个转动自由度的关节组成，每个关节分别用舵机驱动。通过控制相应的关节的舵机转动，达

成仿生机器人直线行进和转向功能。现今，对多足机器人的研究中，一定的腿部长度比例对多足机器人的性能影响的研究还不够完善，有着许多不同方式的比例，但是每一种都有着合理道理。

2.2.2 整体结构设计

机器人的总体构造见图 2.2，它包括机械自身的形态和腿的构造。它的腿是模仿蜘蛛腿的六条腿组成的，身体也是按照蜘蛛身体的形状来设计的，是一个长椭圆，和一个圆形头部组成，遵循结构和功能仿生的原则。

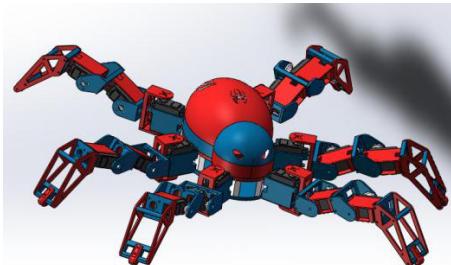


图 2.2 仿生蜘蛛机器人整体结构

多足生物的腿在躯干上的分布主要由均匀式分布和轴对称式分布其中均匀式分布如图 2.3 所示，围绕躯干呈多边形分布，该分布优点是腿间距脚大，行进起来不容易互相干涉，缺点是运动过程中每只腿的行进参数不一致，需单独对每只腿进行参数调试和控制，在控制方面增大难度。

轴对称的分布方式分布如图 2.4 所示，在机体六个对称顶点上。优点是这样的分布方式可以使机器人本体保证稳定性，加上对蜘蛛机器人的步态的分析，可使六只腿的运动参数基本一致，这样的话可使在控制方面相对简单，缺点是六只腿的行进空间有限，容易相互干涉。

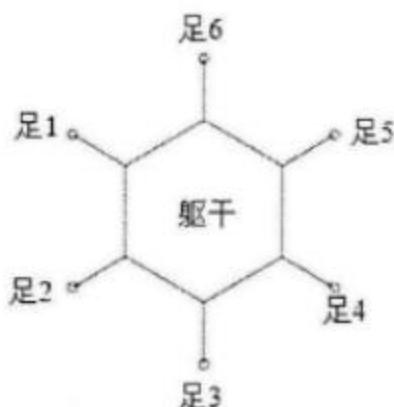


图 2.3 均匀式分布



图 2.4 轴对称的分布

根据以上两种方式的分析和比较，本设计采用轴对称方式为基本，进行形状上改良，加上椭圆形态，减少腿之间的互相干涉，如图 2.5 所示。

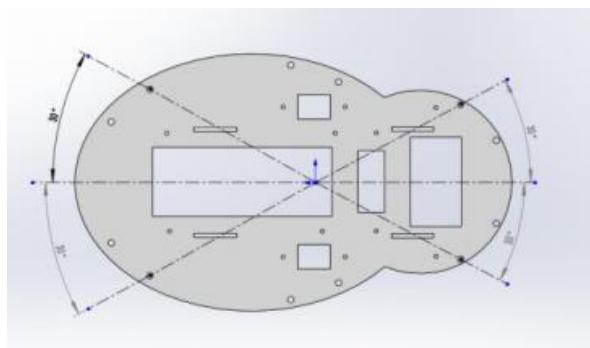


图 2.5 主体结构

2.2.5 整体参数及关键结构强度校核

仿生蜘蛛机器人整体尺寸为长 25cm、宽 20cm、高 15cm，每条腿的最大伸长度为 27cm。

如图 2.6 所示

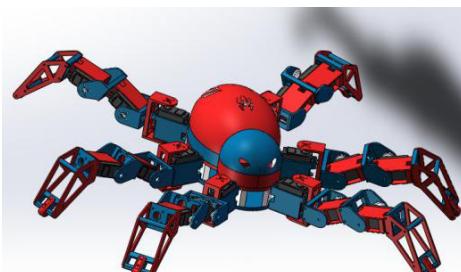


图 2.6 仿生蜘蛛机器人整体结构

具体参数如下表 2.1 所示。

表 2.1 仿生蜘蛛机器人部分参数

名称	尺寸	重量
腿节	7cm	85g
股节	7cm	85g
后断节	5.5cm	90g
躯干	20*12cm	500g
整体	25*20*15cm	2000g

本设计工作环境为较复杂的地形，所以需要进行关键结构的强度校核。下面通过对仿生蜘蛛机器人的关节驱动力矩进行

静力学分析然后使用 ANSYS 对关键结构进行强度校核。

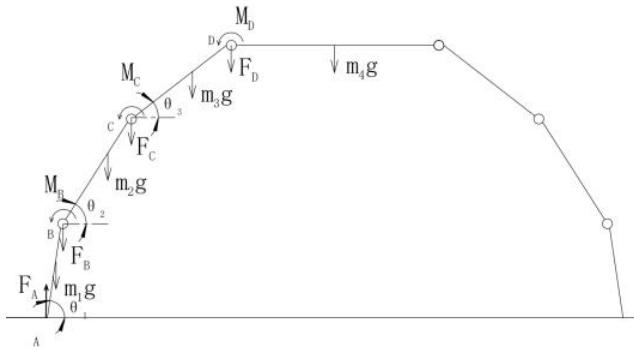


图 2.7 力学分析模型

选取机器人的中间部分腿和躯干进行分析，在图 2.7 中所示，L1、L2、L3 分别为仿生蜘蛛机器人的后跗节、胫节，腿节，L4 为仿生蜘蛛机器人的躯干。设整个机器人的每个部

分的重量分布都相同，分析 A、B、C 三点的力和力矩可得：

A 点：

$$F_A = m_1g + F_B \quad (2-1)$$

$$\frac{1}{2} m_1g \cos \theta_1 + F_B l_1 \cos \theta_1 = M_B \quad (2-2)$$

B 点：

$$F_B = m_2g + F_C \quad (2-3)$$

$$\frac{1}{2} m_2g \cos \theta_2 + F_C l_2 \cos \theta_2 = M_C \quad (2-4)$$

C 点：

$$F_C = m_3g + F_D \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{2} m_3g \cos \theta_3 + F_D l_3 \cos \theta_3 = M_D \quad (2-6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} m_4g \quad (2-7)$$

由上可得：

$$F_A = m_1g + m_2g + m_3g + \frac{1}{2} m_4g \quad (2-8)$$

$$F_B = m_2g + m_3g + \frac{1}{2} m_4g \quad (2-9)$$

$$M_B = \frac{1}{2} m_1g \cos \theta_1 + m_2g l_1 \cos \theta_1 + m_3g l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} m_4g l_1 \cos \theta_1 \quad (2-10)$$

$$F_C = m_3g + \frac{1}{2} m_4g \quad (2-11)$$

$$M_C = \frac{1}{2} m_2g \cos \theta_2 + m_3g l_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_4g l_2 \cos \theta_2 \quad (2-12)$$

$$M_D = \frac{1}{2} m_3g \cos \theta_3 + m_4g l_3 \cos \theta_3 \quad (2-13)$$

M_B 、 M_C 、 M_D 分别是各个关节所需要提供的驱动力矩。

将仿生蜘蛛机器人的表中的部分尺寸带入公式，算出数值，就得出仿生蜘蛛机器人的单腿静力学模型图 2.7。然后再用 ANSYS 导入零件后进行强度分析。得到形变图 2.8。

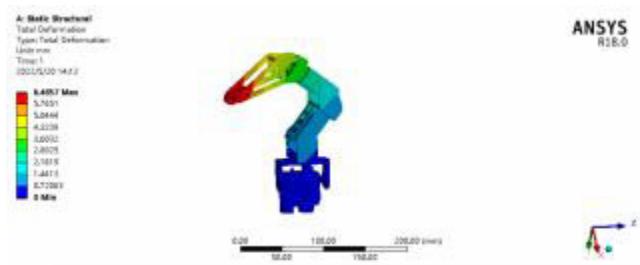


图 2.8 形变图



图 2.9 最大主应力图

已知腿部制造为 3D 打印 PLA 材质，PLA 材质的拉伸强度了 40–60MPa，对仿生蜘蛛机器人单腿结构有限元分析，由最大主应力图 9 可知，最大应力为 49.644MPa，所以每个部分设计参数都满足需求，并且拥有很大的剩余量，所以本设计满足仿生蜘蛛机器人的设计要求。

3 仿生蜘蛛机器人的运动步态分析与规划

在生物界，多足生物依靠腿部协调运动，形成各种步态。然而，并非所有步态都适用于机器人，因此需要对机器人进行步态分析以确定合适的运动方案。本设计通过对蜘蛛、蚂蚁等多足动物的比较研究和文献检索，对仿生蜘蛛机器人的步态进行分析和方案确定。本章分析了占空比、腿部运动顺序和稳定性等步态特征，为进一步研究提供了初步探索。

3.1 占空比分析

占空比原指在一个脉冲循环内，通电时间相对于总时间所占的比例^[5]。在本设计分析当中，占空比用 β 表示，指的是一个运动周期内机器人腿部抬起的只数与整个机器人所有腿数的比值，公式如下：

$$\beta = \text{腿部抬起的只数} / \text{整个机器人所有腿数} \quad (3-1)$$

根据公式 (3-1) 可以知道， β 可取范围在 $(0, 1]$ 。根据 β 值不同，仿生机器人可采用不同步态。 β 越接近 1，机器人越稳定但速度降低。选择占空比为 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $5/6$ 的步态作为设计备选，最终选择其中一种。

3.2 步态方案选取

经过以上的占空比分析，从中挑选占空比为 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $5/6$ 的三种步态进行研究。

3.2.1 占空比为 $1/2$ 时的步态

当 β 为 $1/2$ 时，仿生机器人的六只腿每一时刻都有 3 只腿没有与地面接触，在摆动，有

3只腿与地面接触，这种状态称为三足步态运动方式。

三足步态具有一定的稳定性，并且在速度方面也不慢，也是六足机器人界选用最多的一种步态，下图3.1为仿生机器人的三足步态的腿部相位图，图中的白色指的是摆动相，黑色指的是腿与地面接触相。三足步态拥有的稳定，是因为仿生机器人在进行运动的每一刻都有三只腿与地面接触，与机器人本体的躯干部分一起构成稳定的三角形支撑结构。与此同时，摆动的三只腿在抬起、摆动、落地后变成与地面接触的腿，之前的三只与地面接触的腿抬高成为摆动腿，形成另一个三角支撑结构，以此类推。这样的步态可以使六只腿均匀地分成两组，每只腿的动作就是一个单位的循环，控制也比较简单，所以被广泛使用。

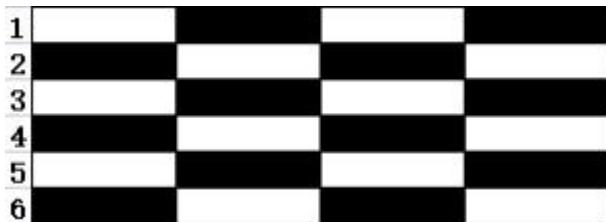


图3.1 仿生机器人的三足步态的腿部相位图

直线前进、后退和转弯的运动特征是本设计的基本要求，所以下面对三足步态的直线

前进、后退和转弯进行解析。

下图3.2是仿生机器人三足步态直线前进和后退的步态规划图。两椭圆相交形成的形状代表仿生机器人的主体躯干，直线段代表腿部，线端黑心圈代表与地面接触的足底，线端白心圈代表摆腿的足底。

(1) 图3.2-(I)为仿生机器人的初始状态，这时的腿部1、2、3、4、5、6全与地面接触。

(2) 图3.2-(II)为仿生机器人的前进第一阶段，这时的腿部2、4、6代表与地面接触，腿部1、3、5代表抬腿动作并向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿2、4、6原地接触即将运动。

(3) 图3.2-(III)为仿生机器人的前进第二阶段，这时的腿部1、3、5代表与地面接触，腿部2、4、6代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、3、5原地接触即将运动。

(4) 图3.2-(IV)为仿生机器人的前进第三阶段，这时的腿部2、4、6代表与地面接触，腿部1、3、5代表抬腿动作并向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿2、4、6原地接触即将运动。

(5) 图3.2-(V)为仿生机器人停止前进，恢复到初始状态，并且完成一个周期的前进运动。

(6) 后退进行的阶段与前进原理相同。

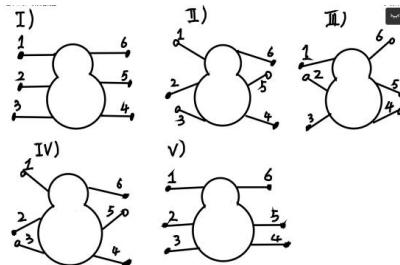


图3.2 三足步态直线运动规划图

下图3.3是仿生机器人三足步态右转弯(顺时针)的步态规划图。

(1) 图3.3-(I)为仿生机器人的初始状态，这时的腿部1、2、3、4、5、6全与地面接触。

(2) 图3.3-(II)为仿生机器人的向右转弯(顺时针)第一阶段，这时的腿部2、4、6代表与地面接触，腿部1、3、5代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿2、4、6原地接触即将运动。

(3) 图3.3-(III)为仿生机器人的向右转弯(顺时针)第二阶段，这时的腿部1、3、5代表与地面接触，腿部2、4、6代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿1、3、5原地接触即将运动。

(4) 图3.3-(IV)为仿生机器人的向右转弯(顺时针)最后阶段，停止转弯，恢复到初始状态，并且完成一个周期的定点转弯运动。

(5) 三足步态左转弯(逆时针)的步态规划图与右转弯(顺时针)原理相同，反之即可。

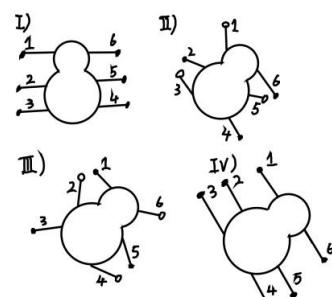


图3.3 三足步态定点转弯规划图

3.2.2 占空比为2/3时的步态

当 β 为2/3时，仿生机器人的六只腿每一时刻都有2只腿没有与地面接触，在摆动，有4只腿与地面接触，这种状态称为四足步态运动方式。

在稳定性方面，四足步态比三足步态的稳定性相对要高，但是在速度方面，四足步态劣于三足步态，比较慢，下图3.4为仿生机器人四足步态的腿部相位图。四足步态拥有的稳定，是因为仿生机器人在进行运动的每一刻都有四只腿与地面接触，与机器人本体的躯干部分一起构成稳定的四角形支撑结构。与

此同时，摆动的两只腿在抬起、摆动、落地后变成与地面接触的腿，之前的四只与地面接触的腿中又有两只腿抬高成为摆动腿，形成另一个四角支撑结构，以此类推。这样的步态可以使六只腿不同类型的组合，组合方式比三足步态多，控制起来比三足步态麻烦。



图 3.4 仿生机器人四足步态的腿部相位图

下面对四足步态的直线前进、后退和转弯进行解析。

下图 3.5 是仿生机器人四足步态直线前进和后退的步态规划图。两椭圆相交形成的形状代表仿生机器人的主体躯干，直线线段代表腿部，线端黑心圈代表与地面接触的足底，线端白心圈代表摆腿的足底。

(1) 图 3.5- (I) 为仿生机器人的初始状态，这时的腿部 1、2、3、4、5、6 全与地面接触。

(2) 图 3.5- (II) 为仿生机器人的前进第一阶段，这时的腿部 2、3、4、6 代表与地面接触，腿部 1、5 代表抬腿动作并向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿 2、3、4、6 原地接触，腿 2、4 即将运动。

(3) 图 3.5- (III) 为仿生机器人的前进第二阶段，这时的腿部 1、3、5、6 代表与地面接触，腿部 2、4 代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿 1、3、5、6 原地接触，腿 2、5 即将运动。

(4) 图 3.5- (IV) 为仿生机器人的前进第三阶段，这时的腿部 1、2、4、5 代表与地面接触，腿部 3、6 代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿 1、2、4、5 原地接触，腿 3、6 即将运动。

(5) 图 3.5- (V) 为仿生机器人的前进第四阶段，这时的腿部 2、3、4、6 代表与地面接触，腿部 1、5 代表抬腿动作并向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿 2、3、4、6 原地接触。

(6) 图 3.5- (VI) 为仿生机器人的前进最后阶段，停止前进，恢复到初始状态，并且完成一个周期的前进运动。

(7) 后退进行的阶段与前进原理相同。

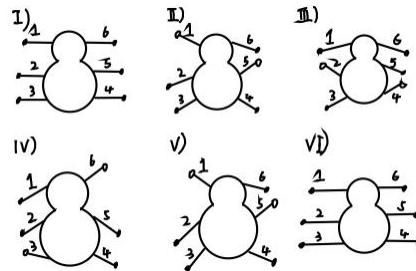


图 3.5 四足步态直线运动规划图

下图 3.6 是仿生机器人四足步态右转弯（顺时针）的步态规划图。

(1) 图 3.6- (I) 为仿生机器人的初始状态，这时的腿部 1、2、3、4、5、6 全与地面接触。

(2) 图 3.6- (II) 为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第一阶段，这时的腿部 2、3、4、6 代表与地面接触，腿部 1、5 代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿 2、3、4、6 原地接触，腿 2、4 即将运动。

(3) 图 3.6- (III) 为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第二阶段，这时的腿部 1、3、5、6 代表与地面接触，腿部 2、4 代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿 1、3、5、6 原地接触，腿 3、6 即将运动。

(4) 图 3.6- (IV) 为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第三阶段，这时的腿部 1、2、4、5 代表与地面接触，腿部 3、6 代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿 1、2、4、5 原地接触。

(5) 图 3.6- (V) 为仿生机器人的向右转弯（顺时针）最后阶段，停止转弯，恢复到初始状态，并且完成一个周期的定点转弯运动。

(6) 四足步态左转弯（逆时针）的步态规划图与右转弯（顺时针）原理相同，反之即可。

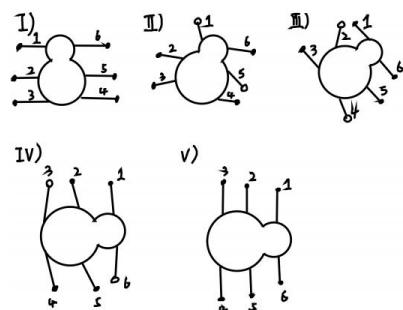


图 3.6 四足步态直线运动规划图

3.2.3 占空比为 5/6 时的步态

当 β 为 5/6 时，仿生机器人的六只腿每一时刻都有 1 只腿没有与地面接触，在摆动，有

5只腿与地面接触，这种状态称为五足步态运动方式。

五足步态又称为波动步态，是三种步态中稳定性最强、速度最慢的一种步态，下图3.7为仿生机器人的五足步态的腿部相位图。仿生机器人在进行运动的每一刻都有五只腿与地面接触，与机器人本体的躯干部分一起构成稳定的五角形支撑结构。与此同时，摆动的一只腿在抬起、摆动、落地后变成与地面接触的腿，之前的五只与地面接触的腿中又有1只腿抬高成为摆动腿，形成另一个五角支撑结构，以此类推。



图3.7 仿生机器人五足步态的腿部相位图

下面对五足步态的直线前进、后退和转弯进行解析。

下图3.8是仿生机器人五足步态直线前进和后退的步态规划图。两椭圆相交形成的形状代表仿生机器人的主体躯干，直线线段代表腿部，线端黑心圈代表与地面接触的足底，线端白心圈代表摆腿的足底。

(1) 图3.8-(I)为仿生机器人的初始状态，这时的腿部1、2、3、4、5、6全与地面接触。

(2) 图3.8-(II)为仿生机器人的前进第一阶段，这时的腿部2、3、4、5、6代表与地面接触，腿部1代表抬腿动作并向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿2、3、4、6原地接触，腿6即将运动。

(3) 图3.8-(III)为仿生机器人的前进第二阶段，这时的腿部1、2、3、4、5代表与地面接触，腿部6代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、2、3、4、5原地接触，腿5即将运动。

(4) 图3.8-(IV)为仿生机器人的前进第三阶段，这时的腿部1、2、3、4、6代表与地面接触，腿部5代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、2、3、4、6原地接触，腿4即将运动。

(5) 图3.8-(V)为仿生机器人的前进第四阶段，这时的腿部1、2、3、5、6代表与地面接触，腿部4代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、2、3、5、6原地接触，腿3即将运动。

(6) 图3.8-(VI)为仿生机器人的前进第五阶段，这时的腿部1、2、4、5、6代表与地面接触，腿部3代表抬腿动作并向前摆腿一个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、2、4、5、6原地接触，腿2即将运动。

(7) 图3.8-(VII)为仿生机器人的前进第六阶段，这时的腿部1、3、4、5、6代表与地面接触，腿部2代表抬腿动作并

向前摆腿半个步长，然后落地，整体躯干往前移，腿1、3、4、5、6原地接触。

(8) 图3.8-(VIII)为仿生机器人前进最后阶段，停止前进，恢复到初始状态，并且完成一个周期的前进运动。

(9) 后退进行的阶段与前进原理相同。

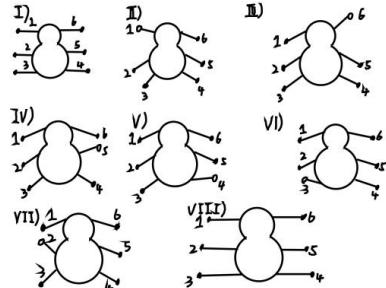


图3.8 五足步态直线运动规划图

下图3.9是仿生机器人五足步态右转弯（顺时针）的步态规划图。

(1) 图3.9-(I)为仿生机器人的初始状态，这时的腿部1、2、3、4、5、6全与地面接触。

(2) 图3.9-(II)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第一阶段，这时的腿部2、3、4、5、6代表与地面接触，腿部1代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿2、3、4、5、6原地接触，腿6即将运动。

(3) 图3.9-(III)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第二阶段，这时的腿部1、3、4、5代表与地面接触，腿部6代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿1、3、4、5原地接触，腿5即将运动。

(4) 图3.9-(IV)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第三阶段，这时的腿部1、2、3、4、6代表与地面接触，腿部5代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿1、2、3、4、6原地接触，腿4即将运动。

(5) 图3.9-(V)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第四阶段，这时的腿部1、2、3、5、6代表与地面接触，腿部4代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿1、2、3、5、6原地接触，腿3即将运动。

(6) 图3.9-(VI)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第五阶段，这时的腿部1、2、4、5、6代表与地面接触，腿部3代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿1、2、4、5、6原地接触，腿2即将运动。

(7) 图3.9-(VII)为仿生机器人的向右转弯（顺时针）第

五阶段，这时的腿部 1、3、4、5、6 代表与地面接触，腿部 2 代表抬腿动作并向顺时针摆腿相同的角度，然后落地，整体躯干跟着旋转了一定的角度，腿 1、3、4、5、6 原地接触。

(8) 图 3.9-(VIII) 为仿生机器人的向右转弯（顺时针）最后阶段，停止转弯，恢复到初始状态，并且完成一个周期的定点转弯运动。

(9) 五足步态左转弯（逆时针）的步态规划图与右转弯（顺时针）原理相同，反之即可。

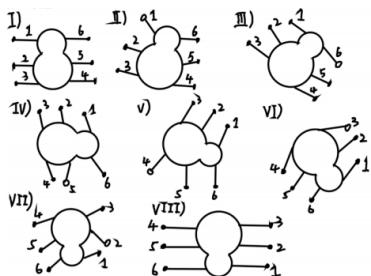


图 3.9 五足步态直线运动规划图

3.3 三足、四足、五足步态稳定性分析

本设计仿生蜘蛛机器人的运动地形是复杂的，因此在稳定性方面需要有一定的优势，下面是对三种步态的稳定性分析，并与速度等方面综合起来，确定一种方案用于本设计并加以实践验证。现在对六足仿生机器人的稳定性分析的方法有两种：动态分析、静态分析。其中静态分析方法主要有静态稳定边界法、静态稳定裕度法、能量稳定裕度法等，动态分析的方法主要有动态稳定裕度法、力-角稳定性判据法、零力矩点(ZMP)法^[6]。本设计使用静态分析方法中的静态稳定边界法进行分析。

静态稳定边界法，用来判定仿生机器人是否稳定，在运动中，当整个机体躯干的重心存在于与地面所接触腿的足点构成的封闭形状区域内，则该机器人判定为稳定，反之，机器人将发生侧翻、滑移现象。

下图 3.10-1、2、3、4、5、6 是对占空比分析所挑选出的三种步态进行静态稳定边界法分析。

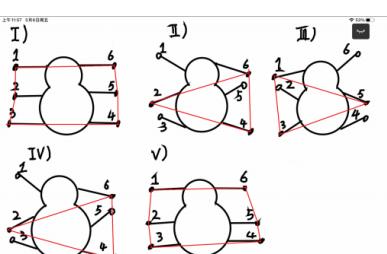


图 3.10-1 三足步态直线行走

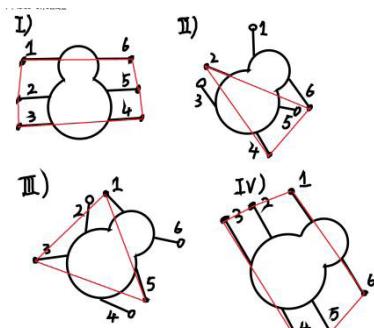


图 3.10-2 三足步态定点转弯

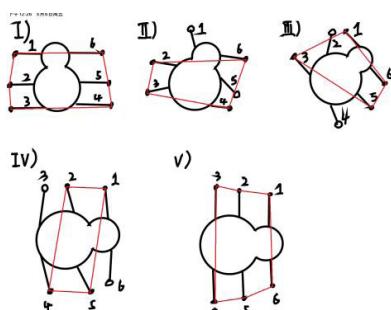


图 3.10-3 四足步态直线行走

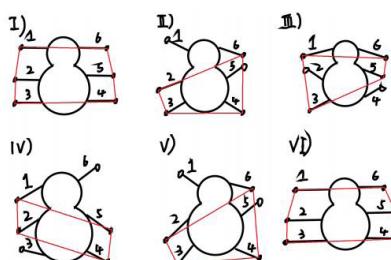


图 3.10-4 四足步态转弯

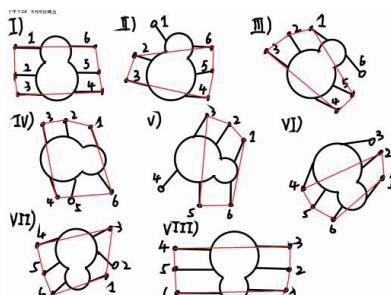


图 3.10-5 五足步态直线行走

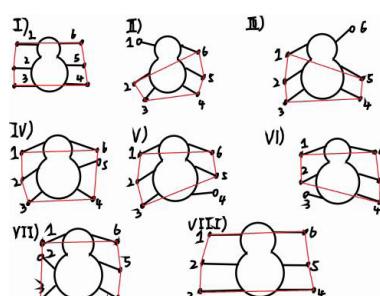


图 3.10-6 五足步态转弯

通过分析，可得，三、四、五足步态的重心都在与地面接触的腿足底所构成的多边形里面，三种步态都具有一定的稳定性。

性。大小排序为三足<四足<五足，但是在速度方面，三足优于四足、五足。由于该设计不仅需要稳定性，而且需要运动快速，所以该系统以三足步态为主。其他步态作为备用的步态，其原理得到了实际的检验。

4 仿生蜘蛛机器人的控制系统设计

仿生蜘蛛机器人需要 18 个关节（舵机）的同时工作而进行运动，在运动的过程中需要使每个关节有序控制，是让仿生蜘蛛机器人能够平稳运动的前提。因此，本设计还需设计一套符合仿生机器人的控制系统，控制系统除了满足仿生机器人能够平稳的运动的情况下，还额外增加了摄像系统。

4.1 仿生蜘蛛机器人控制系统总体结构

(1) 仿生蜘蛛机器人控制系统总体框图 4.1

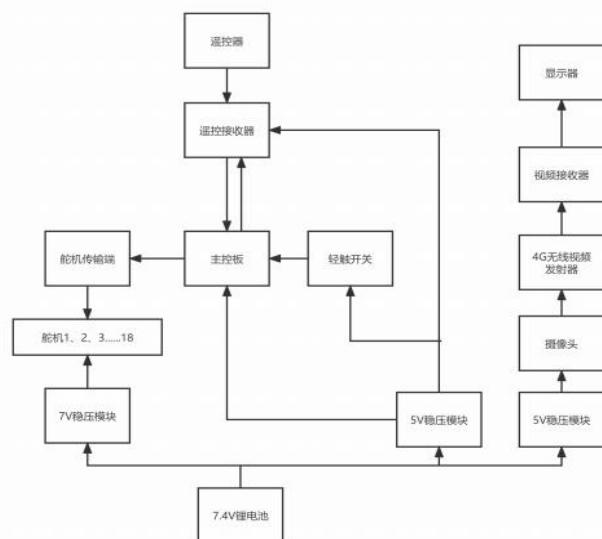


图 4.1 系统总体框图

由图可知，仿生蜘蛛机器人的控制系统分为运动模块、摄像模块、供电模块三部分。控制板和驱动构成运动模块，实现仿生蜘蛛机器人的运动，摄像头和 4G 无线传输模块构成摄像模块，实现仿生蜘蛛机器人运动中可实时监控，传输图像，供电模块则实现对整机提供电源。

4.2 运动功能的实现

实现仿生蜘蛛机器人运动的软件本设计根据控制板 Arduino mega2560，选用 Arduino IDE 作为编程开发软件，实现控制板 Arduino mega2560 和舵机、遥控接收器的信息传输，以控制仿生蜘蛛机器人的运动。

(1) 仿生蜘蛛机器人电路图 4.2

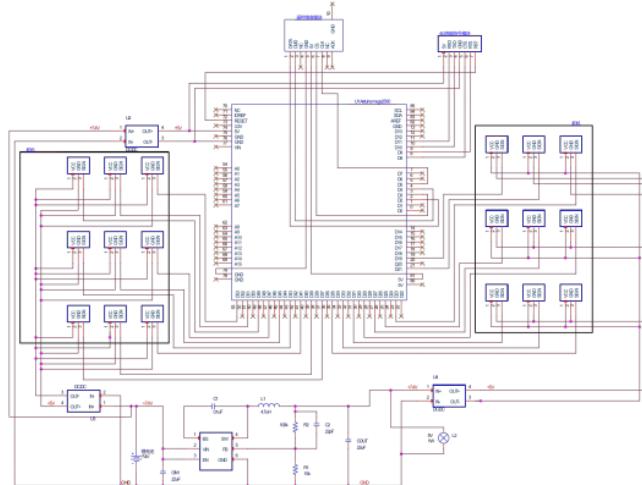


图 4.2 仿生蜘蛛机器人电路

(2) 控制板 Arduino mega2560 引脚图 4.3 和引脚功能表 4.1

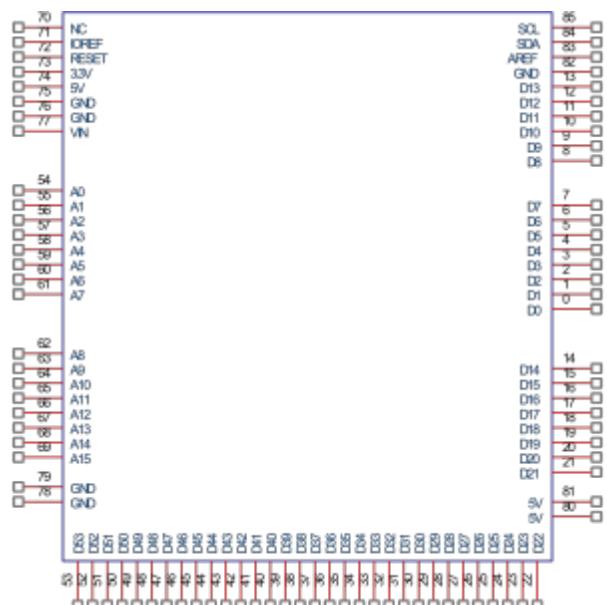


图 4.3 Arduino mega2560 引脚图

表 4.1 Arduino mega2560 引脚功能表

引脚号	引脚名	引脚功能
		接入遥控控制板 DATA，信号流向是从手柄到主机，此信号的一个 8bit 的串行数据，同步传送于时钟的下降沿。信号读取在时钟由高到低的变化过程中完成。
2	D2	接入遥控控制板 CS，用于提供发信号，在通讯期间，处于低电平。
3	D3	接入遥控控制板 CMD，信号流向是从主机到手柄，此信号和 DATA 相对，信号是一个 8bit 的串行数据，同步传送于时钟的下降沿。
4	D4	接入遥控控制板时钟信号，由主机发出，用于保持数据同步
5	D5	舵机信号输出口
19-53	D19-D53	接入降压模块电源输出端
74	5V	接入降压模块电源输出端
75	GND	电源地
76	GND	电源地
78	GND	电源地
79	GND	电源地
81	5V	接入降压模块电源输出端
82	GND	电源地

由上可知，控制板 Arduino mega2560 D2 口与遥控接收模块的 DATA 口连接，控制板 Arduino mega2560 D3 口与遥控接收模块的 CS 口连接，控制板 Arduino mega2560 D4 口与遥控接收模块的 CMD 口连接，控制板 Arduino mega2560 D5 口与遥控接收模块的 CLK 口连接，控制板 Arduino mega2560 D19-D53 口与舵机接收 SIGN 口连接，接收指令，控制舵机实现运动。

本设计运用 Arduino IDE 编写程序，程序中编写了三足、四足、五足三种步态，用来验证第三章的步态规划，本设计主要采用三足步态程序，下图 4.4 为部分主程序。

```
-----  
// Main Program 主程序  
-----  
void loop()  
{  
    //exit if no controller found or GuitarHero controller  
    if(gamepad_error == 1) || (gamepad_type == 2)  
    {  
        Serial.println("Invalid Controller!");  
        return;  
    }  
  
    //set up frame time 设置帧时间  
    currentTime = millis();  
    if((currentTime - previousTime) > FRAME_TIME_MS)  
    {  
        previousTime = currentTime;  
  
        //read controller and process inputs 读取控制器和输入  
        psk.read_gamepad(false, gamepad_vibrate);  
        process_gamepad();  
  
        //reset legs to home position when commanded 按照命令将腿复位到原位  
        if(walk_pos == true)  
        {  
            for(leg_num=0; leg_num<6; leg_num++)  
            {  
                current_X[leg_num] = HOME_X[leg_num];  
                current_Y[leg_num] = HOME_Y[leg_num];  
                current_Z[leg_num] = HOME_Z[leg_num];  
            }  
  
            reset_position = false;  
        }  
  
        //position legs using IK calculations - unless set all to 90 degrees mode 使用IK计算定位-除非所有腿设置为90度模式  
        if(mode < 99)  
        {  
            for(leg_num=0; leg_num<6; leg_num++)  
                leg_IK[leg_num] = current_X[leg_num]+offset_X[leg_num],current_Y[leg_num]+offset_Y[leg_num],current_Z[leg_num]+offset_Z[leg_num];  
        }  
  
        //reset leg lift first pass flags if needed 如果需要，重置抬腿第一次通过标志  
        if(mode != 4)  
        {  
            leg_IK_control = true;  
            leg6_IK_control = true;  
        }  
  
        //battery monitor() //battery monitor and output to LEDs 电池监视器和LED输出  
        print_debug(); //print debug data 打印调试数据  
  
        //process modes (mode 0 is default 'home idle' do-nothing mode)  
        if(mode == 0) //walking mode 步行模式  
        {  
            if(gait == 0) tritopod_gait(); //walk using gait 0 三足步态0行走  
            if(gait == 1) wave_gait(); //walk using gait 1 三足步态1行走  
            if(gait == 2) zigzag_gait(); //walk using gait 2 三足步态2行走  
            if(gait == 3) tetrapod_gait(); //walk using gait 3 三足步态3行走  
        }  
        if(mode == 2) translate_control(); //joystick control x-y-z mode 按手柄控制x-y-z模式  
        if(mode == 3) rotate_control(); //joystick control y-p-r mode 按手柄控制y-p-r模式  
        if(mode == 4) one_leg_lift(); //one leg lift mode 单腿提升模式  
        if(mode == 99) set_all_90(); //set all servos to 90 degrees mode 将所有伺服设置为90度模式  
    }  
}
```

图 4.4 部分主程序

4.3 样机原理验证

通过前几章的理论设计，最终制作出了仿生蜘蛛机器人进行了样机验证，样机如图 4.5 所示。



图 4.5 仿生蜘蛛机器人样机

本次取用前进运动和定点转弯两组模式进行了验证。图 4.6 为前进运动，图 4.7 为定点转弯。

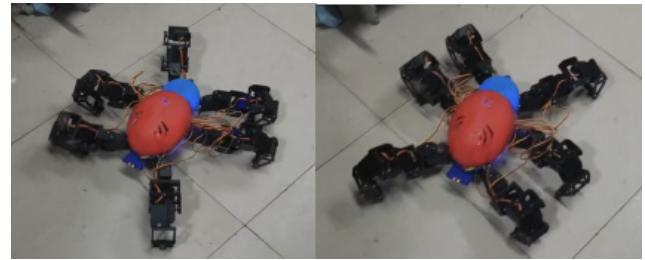


图 4.6 前进运动

由图可知，运动时采用三足步态，三腿抬起落地后往前移动，随后另外三腿抬起。



图 4.7 定点旋转

由图可知，地点转弯时，三腿同一方向旋转抬起落地，促使仿生蜘蛛机器人整体旋转起来。

通过对驱动部分舵机、控制板、遥控器、摄像部分和供电模块的设计和分析以及使用 Arduino 的编程实现机器人的整个控制部分，最后在现实中通过样机进行实践理论验证。

5 结论与展望

结论：

本文以蛛形纲节肢动物蜘蛛为研究对象，致力于设计一种仿生蜘蛛机器人，用于在建筑物遭受破坏、火灾等灾害后的荒凉或受损环境中进行探测，特别是救援人员难以进入或无法工作的场所。文章通过对仿生蜘蛛机器人的机械结构设计、步态分析规划和控制系统设计的详细分析，将理论应用于实体样机制作并进行验证，以确保设计的合理性，为仿生蜘蛛机器人的发展提供了有益的指导。

主要设计成果和创新点包括：

- 对蜘蛛的生理结构进行综合研究，设计了轴对称方式的躯干，优化了腿部设计，并采用 3D 打印和激光雕刻等现代加工方式，降低制造成本。
- 通过步态占空比分析，选择了占空比为 1/2 的三足步态为最终方案，成功验证了其稳定性。
- 在控制系统设计方面，包括舵机、控制板、摄像功能、供电模块等方面的设计，引入遥控器控制方式，提高了操作便捷性。
- 进行了最终的实体样机验证，成功演示了前进、后退、转弯等功能，验证了设计理论的可行性。

展望：

在智能机器人技术不断提升的背景下，我国的智能机器人领域取得了显著的进展。然而，相比国外仍存在一些差距，需要持续努力。未来的研究可以在以下方面进一步完善：

1. 优化整体机器人的躯干设计和腿部设计，解决实际测试中出现的微小滑移问题。
2. 引入更多步态选择，应对复杂地形，提高机器人的适应性。
3. 学习使用 STM32 等更先进的编程语言，提升控制系统的性能和拓展性。
4. 添加传感器设计，实现机器人的避障功能。
5. 利用 MATLAB-Simulink 进行数据处理，进一步完善仿生蜘蛛机器人的功能。

参考文献

[1] 霍士朋 . 液压四足机器人分布式运动控制系统设计与实现 [D]. 南京 : 南京航空航天大学 ,2017.

[2] 刘极峰 , 丁继过 . 机器人技术基础 [M]. 北京 : 高等教育出版社 , 2012.18-35

[3] 徐维超 . 小型六足机器人运动控制系统设计与实现 [D]. 华中科技大学 ,2019.

[4] 郑浩峻 , 张秀丽 . 足式机器人生物控制方法与应用 [M]. 清华大学出版社 ,2011: 34-79.

[5] 丁希仑 , 王志英 , Alberto ROVETTA. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动 性能分析 [J]. 机器人 , 2010, 32(6):7.

[6] 杨文纲 , 陆震 . 基于 D-H 表示法的多步态跳跃机器人稳定性研究 [J]. 机械设计与制造 ,2007,02: 107- 10