**东 北 大 学**

**机械工程与自动化学院**

**硕士学位论文**

**中期检查报告**

学 号： 2000373

姓 名： 刘国帅

专 业： 机械工程

导 师： 陆志国

基层组织： 机械电子工程研究所

论文题目： 仿灵长类高机动机器人跳跃

　　　　　与摆荡渡越运动的仿真研究

考核时间： 2022 年 11 月 7 日

**硕士学位论文中期检查报告填写要求**

一、硕士学位论文的中期检查是加强研究生论文工作过程管理的重要环节，

是对研究生学位论文工作的阶段性检查。

二、硕士学位论文中期检查报告由研究生本人如实填写，首先由导师对报告

内容进行审核并给出评价，然后由考核小组给出综合评价意见，最后由基层学术

组织统一交学院教学办审查备案。学院对各个基层学术组织按 20%的比例抽查硕士学位论文中期检查报告。

三、中期报告应包括下列主要内容

1.主要研究内容及实际进度情况概述。

2.目前已完成的研究工作、创新点及成果（重点介绍本人已独立完成的具

体研究内容、创新点及取得的成果，切忌泛泛地将某某理论、原理、方法之类内

容填充在此部分，列出主要参考文献 30 篇以上，其中外文文献不少于三分之一；

本部分不得少于 4000 字）。

3.存在的问题及可能的解决思路。

4.后期拟完成的研究工作及进度安排。

5.如实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分，请说明其原因。

6.培养方案中要求的学术研究成果完成情况。

7.按期完成学位论文的可能性。

8.主要参考文献。

四、排版要求

报告内容须按《东北大学硕士学位论文排版打印格式》排版。

**提 纲**

1．中期报告计划的主要研究内容及实际进度情况概述。

2．目前已完成的研究工作、创新点及成果（重点介绍本人已独立完成的具体研究内容及取得的成果，切忌泛泛地将某某理论、原理、方法之类内容填充在此部分，列出主要参考文献 30 篇以上，其中外文文献不少于三分之一；本部分不得少于 4000 字）。

3．存在的问题及可能的解决思路。

4．后期拟完成的研究工作及进度安排（包括下一步的研究内容和研究思路、研究进度安排、拟取得的预期成果及其可行性分析）。

5．如实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分，请说明其原因。

6．培养方案中规定的学术研究成果完成情况（如完成，请说明完成的条款，其中论文、发明专利、软件著作权等，须按《东北大学硕士学位论文排版打印格式》参考文献格式列出；如还未完成，需说明在学位论文送审前能否完成）。

7．按期完成学位论文的可能性。

8. 主要参考文献。

目 录

[第1章 主要研究内容及实际进度 1](#_Toc117778538)

[1.1 主要研究内容 1](#_Toc117778539)

[1.1.1 机器人设计与仿真平台搭建 1](#_Toc117778540)

[1.1.2 机器人运动模式与控制算法研究 1](#_Toc117778541)

[1.2 实际进度概述 1](#_Toc117778542)

[第2章 已完成的研究工作、创新点及成果 3](#_Toc117778543)

[2.1 机器人仿真平台的设计与实现 3](#_Toc117778544)

[2.1.1 机器人仿真平台搭建 3](#_Toc117778545)

[2.1.2 机器人仿真环境搭建 4](#_Toc117778546)

[2.1.3 机器人模型设计 4](#_Toc117778547)

[2.2 机器人摆荡渡越研究 5](#_Toc117778548)

[2.2.1 摆荡渡越控制器设计 5](#_Toc117778549)

[2.2.2 摆荡渡越仿真实验 8](#_Toc117778550)

[2.3 机器人跳跃运动研究 9](#_Toc117778551)

[2.4 机器人奔跑运动研究 11](#_Toc117778552)

[2.5 课题创新点及成果 12](#_Toc117778553)

[2.5.1 课题创新点 12](#_Toc117778554)

[2.5.2 课题成果 13](#_Toc117778555)

[第3章 存在的问题及可能的解决思路 15](#_Toc117778556)

[第4章 后期拟完成的研究工作及进度安排 17](#_Toc117778557)

[4.1 后期拟完成的工作 17](#_Toc117778558)

[4.2 后期进度安排 17](#_Toc117778559)

[第5章 实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分 19](#_Toc117778560)

[第6章 培养方案中规定的学术研究成果完成情况 21](#_Toc117778561)

[第7章 按期完成学位论文的可能性 23](#_Toc117778562)

[参考文献 25](#_Toc117778563)

第1章 主要研究内容及实际进度

仿灵长类机器人具有较强的环境适应能力和较高的机动性能，在救灾、服务等领域应用前景广阔。本课题从仿生学角度出发，设计了一款仿灵长类机器人。同时，基于Webots机器人仿真软件，搭建了仿灵长类机器人的仿真平台，完成了机器人摆荡渡越、跳跃、奔跑等三种运动模式的控制器设计与仿真验证。

1.1 主要研究内容

1.1.1 机器人设计与仿真平台搭建

机器人本体是机器人进行各种运动模式的基础，本课题中，基于灵长类动物的身体结构与运动特点，设计了一款仿灵长类机器人，其具有结构紧凑、自由度多等特点，适合进行多种运功模式的研究。机器人仿真平台是验证机器人控制算法的捷径，本课题中，基于Webots机器人仿真软件搭建了仿灵长类机器人仿真平台，基于该平台进行了课题中控制算法的验证，进一步验证了机器人的高机动性能与环境适应能力。

1.1.2 机器人运动模式与控制算法研究

本课题对仿灵长类机器人摆荡渡越、跳跃、奔跑等三种基本运动模式展开了研究。摆荡渡越运动是仿灵长类动物特有的运动模式，可将机器人的活动空间从地面扩展到了空中。根据仿灵长类动物摆荡渡越的运动特点，采用滑模控制算法对该运动模式进行控制器设计，并在仿真环境中进行实验验证。另外，跳跃、奔跑也是展现机器人高机动特点的运动模式。本课题中，分别采用质心动力学、动量分解控制算法来进行跳跃、奔跑这两种运动模式的控制器设计与仿真验证。

1.2 实际进度概述

(1) 已完成仿灵长类机器人的设计与机器人仿真平台的搭建;

(2) 已完成仿灵长类机器人摆荡渡越运动模式的控制器设计与仿真验证；

(3) 已完成仿灵长类机器人跳跃运动中起跳阶段的控制器设计与仿真验证；

(4) 已完成仿灵长类机器人奔跑运动模式的控制器设计与仿真验证。

第2章 已完成的研究工作、创新点及成果

2.1 机器人仿真平台的设计与实现

2.1.1 机器人仿真平台搭建

|  |
| --- |
|  |
| 图2.1 机器人仿真硬件平台 |
| Fig. 2.1 Hardware platform for robot simulation |

本课题中所使用的硬件平台如图2.1所示，其主要参数如下：CPU为Threadripper3970X；核心数为32；内存为DDR4、32GB；主频为3.9GHz；显卡为RTX4000、64GB。

|  |
| --- |
|  |
| 图2.2 机器人仿真软件平台 |
| Fig. 2.2 Software platform for robot simulation |

本课题中，基于Webots进行了仿真平台的搭建，如图2.2所示。Webots是由瑞士联邦技术研究院研制的一款集建模，编程和模拟功能为一体的专业机器人模拟器，拥有开源的物体引擎ODE和原型环境，支持用户创立包含质量，摩擦系数，力等物体特征在内的3D虚拟世界。同时，通过添加相应的节点，用户可以在此环境中添加机器人模型，从而实现对机器人相关功能的开发。因此，Webots能够充分满足本课题中对仿真平台的需求。

2.1.2 机器人仿真环境搭建

本课题中，基于Webots机器人仿真软件进行了仿真环境的搭建。首先，在其中创建基本环境，包括背景、光源及仿真参数等，通过节点对其进行设置。机器人仿真环境具有平地、斜坡、凸台、竖梯和横梯等多种复杂地形，如图2.3所示，其中斜坡高0.21 m、坡度为；凸台高0.12 m、宽0.22 m；竖梯高3.60 m，每级为直径0.02 m的圆柱，间隔0.2 m；横梯相邻两级间隔1.10 m。该仿真环境为验证仿灵长类机器人的多运动模式与高机动性能提供了条件，并为本课题中机器人算法的验证及优化提供了平台。

|  |
| --- |
|  |
| 图2.3 机器人仿真软件平台 |
| Fig. 2.3 Software platform for robot simulation |

2.1.3 机器人模型设计

本课题中，设计了仿灵长类机器人，如图2.4(a)所示，其高度为1.2 m，质量为22 kg，具有30个自由度，其中双腿各有6个自由度，双臂各有5个自由度，双手各有3个自由度，以及腰部具有2个自由度。该机器人的简易连杆关节模型以及相关尺寸如图2.4(b)所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 仿真模型 | (b) 模型简图 |
| 图2.4 机器人仿真模型 | |
| Fig. 2.4 Robot simulation model (a) Simulation model (b) Model diagram | |

在仿灵长类机器人设计完成后，需要将机器人模型导入到仿真环境中，进行机器人各种运动模式的仿真研究。首先，在Solidworks软件中完成机器人三维模型的建立，并进行质量、转动惯量等物理属性的设定。然后，通过VRML格式文件，将Solidworks中的机器人三维模型导入到Webots仿真环境中。最后，在Webots仿真环境中对机器人进行相关配置，包括对Robot节点的创建，机器人的机械结构、关节、传感器等子节点的配置，主要子节点包含躯干、肩关节、肘关节、髋关节、膝关节和踝关节等，需对这些子节点进行命名以及物理参数的设定，来完成仿真环境中机器人模型的搭建。

2.2 机器人摆荡渡越研究

2.2.1 摆荡渡越控制器设计

摆荡渡越运动是仿灵长类动物特有的运动方式，通过双臂交替摆荡、抓握树枝来实现连续的向前移动。仿灵长类机器人具备摆荡渡越运动能力，能够扩展机器人的活动空间，丰富机器人的运动模式。同时，非线性、欠驱动系统下，控制算法的开发对丰富和发展机器人控制理论具有重要意义。本课题中对仿灵长类机器人的摆荡渡越运动进行了仿真研究。

首先，进行模型简化。根据摆荡渡越运动的特点，将仿灵长类机器人简化成三连杆结构，如图2.5所示。将左右双臂各简化为一个连杆，将躯干、下肢及双脚简化为一个连杆。同时，为了简化控制器的设计，将机器人简化为平面模型，如图2.6所示，其物理属性见表2.1。

|  |
| --- |
|  |
| 图2.5 机器人摆荡渡越运动模型简化 |
| Fig. 2.5 Simplification of Brachiation motion model of robot |
|  |
| 图2.6 机器人摆荡渡越运动简化模型 |
| Fig. 2.6 Simplified model of robot Brachiation motion |

表 2.1 机器人摆荡模型参数

Table 2.1 Parameters of robot swing model

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 1 | 3.42 | 0.880 | 0.547 | 1.304 | 0 |
| 2 | 3.42 | 0.880 | 0.333 | 0.661 | 50 |
| 3 | 15.65 | 0.885 | 0.545 | 1.591 | 50 |

其次，通过分析灵长类动物摆荡渡越运动，对机器人进行运动规划，如图2.7(a)所示。整个摆荡渡越过程分为姿态调整、张开夹爪、摆荡过程和闭合夹爪等四个阶段。第一步，对机器人进行姿态调整，当两个夹爪同时闭合时，机器人与杆形成冗余约束，因此，该阶段需对机器人进行精确的位置控制来为接下来的摆荡过程做准备。第二步，张开夹爪并进入摆荡过程。第三步，机器人从初始位置摆荡到目标位置，该过程中机器人处于欠驱动状态，控制器通过滑模控制对机器人进行力矩控制，如图27 (b)所示。第四步，当机器人到达目标位置时，闭合夹爪，完成单次摆荡运动。之后，机器人可进行下一个单次摆荡运动来实现连续摆荡运动。

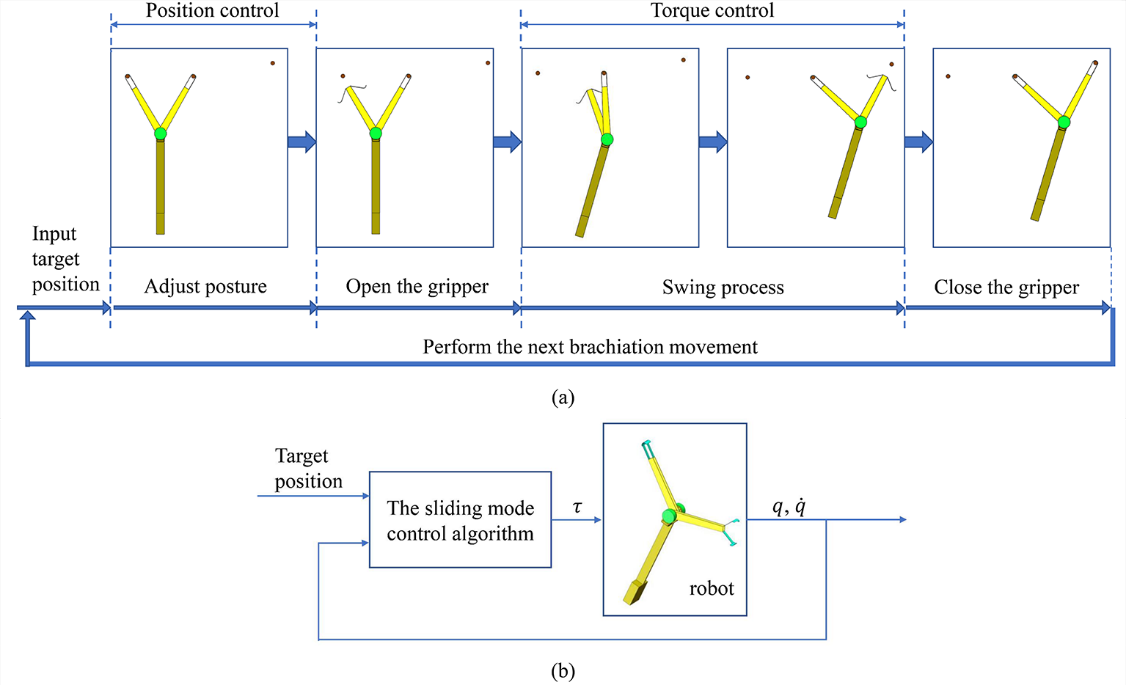


图2.7机器人连续摆荡渡越运动控制流程图

Fig. 2.7 Control Flow Chart of Continuous Brachiation Motion of the Robot

然后，针对摆荡运动过程，基于滑模控制算法进行控制器设计。滑模控制具有鲁棒性及快速响应能力，符合机器人摆荡运动快速响应的控制需求。

建立机器人拉格朗日动力学方程：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

根据机器人运动的目标位置，选择滑模面方程为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

将式(2.1)带入式(2.2)，得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

其中，，，，，和为中的元素。再结合选用的快速趋近率：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

最后，可得到控制扭矩：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5) |

2.2.2 摆荡渡越仿真实验

在Webots仿真环境下进行仿灵长类机器人摆荡渡越动力学仿真，图2.8为机器人在连续摆荡运动阶段所处的仿真环境，四根均匀分布的横杆间距为1.10 m。如图2.9所示，机器人完成了连续的三次摆荡渡越运动，单次摆荡距离为1.10 m，其中，图2.9(a)为机器人摆荡渡越运动的初始姿态，图2.9(b)中机器人完成了第一摆荡运动，图2.9(c)中机器人完成了第二摆荡运动，图2.9(d)中机器人完成了第三摆荡运动。

|  |
| --- |
|  |
| 图2.8 机器人摆荡渡越运动仿真环境 |
| Fig. 2.8 Simulation environment of Brachiation motion model of robot |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a)初始姿态 | (b)第一次摆荡 |
|  |  |
| (c) 第二次摆荡 | (d)第三次摆荡 |
| 图2.9 机器人摆荡渡越运动仿真实验  Fig. 2.9 Simulation of Brachiation motion model of the robot | |

2.3 机器人跳跃运动研究

跳跃运动是仿灵长类机器人跨越障碍，通过非连续介质时，一种不可或缺的运动模式。本课题中，基于质心动力学对机器人的跳跃运动进行了仿真研究。

首先，将仿灵长类机器人简化为平面五连杆模型，如图2.10所示。将双臂简化为一个连杆，将躯干简化为一个连杆，将左右大腿简化为一个连杆，将左右小腿简化为一个连杆，将左右脚简化为一个连杆，简化模型的物理参数见表2.2。

|  |
| --- |
|  |
| 图2.10 机器人跳跃运动模型简化  Fig. 2.10 Simplification of jumping motion model of robot |

表2.2 机器人跳跃模型参数

Table 2.2 Parameters of robot jumping model

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Link (*i*) |  |  |  |  |
| torso (0) | 6.00 | 0.54 | 0 | 0.26 |
| thigh (1) | 4.59 | -0.31 | 0 | -0.14 |
| shank (2) | 3.85 | -0.30 | 0 | 0.22 |
| foot (3) | 1.20 | 0.06 | 0.01 | -0.05 |
| arm (4) | 6.83 | 0.91 | 0 | -0.34 |

然后，基于质心动力学进行跳跃运动的控制器设计。第一步，通过五次多项式规划出机器人质心在竖直方向上的运动轨迹：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.6) |

使机器人在起跳前获得垂直向上的初速度。

第二步，根据设计出的质心轨迹可计算出机器人期望的质心动量变化率，如下：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7) |
|  | (2.8) |
|  | (2.9) |

第三步，根据机器人状态与质心动量之间的关系：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.10) |

得到机器人状态与质心动量变化率之间的关系：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.11) |

由此，可以根据机器人实时的状态得到实际的质心动量变化率。

第四步，结合前两步分别求出的机器人期望和实际的质心动量变化率，通过二次优化得到关节的角加速度：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.12) |

并通过拉格朗日动力学方程得到控制扭矩，对机器人进行扭矩控制。

最后，在Webots环境下进行跳跃运动的动力学仿真，如图2.11所示，图2.11(a) 为机器人起跳运动的初始姿态，图2.11(b)为机器人跳跃运动的上升阶段，图2.11(c)为机器人跳跃运动的下落阶段，图2.11(d)为机器人跳跃运动的着地阶段，在该仿真实验中，机器人从平地跳到了高0.12 m，宽0.22 m的凸台，使机器人具备了跨越此障碍的运动能力。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | | |
| (a) 初始位姿 | (b) 上升 | (c) 下落 | (d) 着地 |

图2.11 机器人跳跃运动仿真实验

Fig. 2.11 Simulation of jumping motion model of the robot

2.4 机器人奔跑运动研究

奔跑是实现仿灵长类机器人快速移动性能的一种运动模式。本课题根据规划的步态轨迹，基于动量分解控制算法，使机器人具备了奔跑模式的运动能力。

首先，进行动量分析。机器人的线动量*P*和角动量*L*可表示为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.13) |

其中，为机器人的总质量，为机器人关于质心的惯性张量，为的单位矩阵，为机器人质心在机器人基座标系中的位置，分别为基座标系的线速度与角速度，为机器人左右腿上各关节的角速度，表示关节速度分别对的影响程度。另外，机器人双脚的速度可表示为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.14) |

其中，为各脚相对于基座标系的位置，为各腿的雅可比矩阵。此时可以得到：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.15) |

将式(2.15)带入式(2.13)中整理可得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.16) |

由上式(2.16)可以看出，通过规划机器人的动量和双脚的速度可以的得到机器人基坐标的速度，并带入式(2.15)中得到各关节的角速度，完成控制量的计算。

然后，规划机器人奔跑的轨迹，将机器人的奔跑速度设计为，则机器人的动量可设计为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.17) |

同时，根据机器人移动的速度和步幅，规划出双脚的速度。

最后，进行仿灵长类机器人奔跑的动力学仿真，如图2.12所示。图2.12 (a)中机器人左脚着地，右脚抬起，图2.12 (b) 中机器人右脚前摆，图2.12 (c) 中机器人左脚抬起，处于腾空阶段，图2.12 (d) 中机器人右脚着地，图2.12 (e) 中机器人左脚前摆，图2.12 (f) 中机器人右脚抬起，处于腾空阶段，图2.12 (g) 中机器人左脚着地，此过程为一个完整的运动周期。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | |
| (a)  左脚  落地 | (b)  右脚  前摆 | (c)  双脚  腾空 | (d)  右脚  落地 | (e)  左脚  前摆 | (f)  双脚  腾空 | (g)  左脚  落地 |

图2.12 机器人跑仿真实验

Fig. 2.12 Simulation of running motion model of the robot

2.5 课题创新点及成果

2.5.1 课题创新点

1. 设计了一款仿灵长类高机动机器人。该机器人结构紧凑，自由度充足，能够完成多种运动模式，包括摆荡渡越、跳跃、奔跑、爬梯子、四足爬行、双足行走、跌倒保护。同时，该机器人能够在平地、斜坡、凸台、横梯、竖梯等多种复杂的地形环境中进行运动，充分展现了机器人复杂环境适应能力及其高机动运动性能。另外，基于Webots搭建了机器人仿真平台，该平台融入了平地、斜坡、凸台、横梯、竖梯等多种复杂地形环境，为验证仿灵长类机器人的多运动模式与高机动性能提供了条件。

2. 为仿灵长类机器人开发设计了摆荡渡越、跳跃、奔跑等三种运动模式，提高了仿灵长类机器人的机动性能。其中，基于滑模控制算法，为仿灵长类机器人设计出了摆荡渡越运动控制器，使其单次摆荡的距离能够达到1.10m，并能够实现连续摆荡，大大提高了机器人的摆荡效率；基于质心动力学控制算法，为仿灵长类机器人设计了跳跃运动控制器，使其具备了跳跃能力，能够实现非连续介质上的移动；基于动量分解控制算法，为仿灵长类机器人设计了奔跑运动控制器，使其具备了奔跑能力，能够实现快速移动。

2.5.2 课题成果

1. 设计了一款仿灵长类机器人，其具有30个自由度，高1.2 m，重22 kg。

2. 基于Webots机器人仿真软件，为机器人设计了具有平地、斜坡、凸台、横梯、竖梯等多种复杂地形的仿真环境。

3. 基于滑模控制算法，为仿灵长类机器人设计出了摆荡渡越运动控制器，使其单次摆荡的距离能够达到1.10 m，并能够实现连续摆荡。

4. 基于质心动力学控制算法，为仿灵长类机器人设计了跳跃运动控制器，使其能够跳跃到高0.12 m，宽.0.22 m的凸台。

5. 基于动量分解控制算法，为仿灵长类机器人设计了奔跑运动控制器，实现了以0.25 m/s的奔跑运动。

第3章 存在的问题及可能的解决思路

存在的问题：

在跳跃运动的腾空阶段中，需要调整机器人的空中姿态，来为机器人的平稳落地做准备。该阶段中，机器人处于无接触力状态，由此增加了对机器人的控制难度。

可能的解决思路：

拟采用微分动态规划算法对机器人腾空阶段进行调整，使机器人的躯干保持直立状态，并将机器人质心投影到机器人双脚的支撑面内，为机器人的平稳落地做准备。

第4章 后期拟完成的研究工作及进度安排

4.1 后期拟完成的工作

(1) 进行机器人跳跃运动中腾空阶段的控制器设计与仿真验证；

(2) 对本课题中的控制算法进行优化改进；

(3) 撰写毕业论文并准备答辩材料。

4.2 后期进度安排

(1) 2022.11-2023.1完成机器人跳跃运动腾空阶段的控制器设计与仿真验证；

(2) 2023.2-2023.3 对本课题中的控制算法进行优化改进；

(3) 2023.4-2023.6 撰写毕业论文并准备答辩材料。

第5章 实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分

暂无

第6章 培养方案中规定的学术研究成果完成情况

已发表SCI论文两篇：

1. Lu Z G, **Liu G S**, Zhao H B, Wang R C, Liu C, Swing control for a three-link brachiation robot based on sliding-mode control on irregularly distributed bars[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(2): 1073-1081.
2. **Liu G S**, Lu Z G, Wang R C, Zhao H B, Liu C, Shi X H. Jumping Motion Based on Momentum Optimization Control and Differential Dynamic Programming for a Multilocomotion Robot[J], Advanced Theory and Simulations, 2022, 5(5).

第7章 按期完成学位论文的可能性

目前课题已完成70%，完成了仿灵长类机器人的设计与仿真平台的搭建，进行了摆荡渡越、跳跃、奔跑三种运动模式的控制器设计与仿真验证。下一步工作重点为控制算法的优化与学位论文的攥写。一切按进度安排正常进行，可以在规定日期前正常完成学位论文。

参考文献

1. Doi M, Kojima S, Matsuno T, Fukuda T. Analytical Design Method of Brachiation Controller on the Irregular Ladder[C]. Proceedings of The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006, 887-892.
2. Fukuda T, Kojima S, Sekiyama K, Hasegawa Y. Energy Efficient Swing-Back Control for Brachiation Robot[C]. Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on MicroNanoMechanical and Human Science, 2006, 1-6.
3. Kajima H, Doi M, Hasegawa Y, Fukuda T. Energy Based Swing Control of a Brachiating Robot[C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, 3670-3675.
4. Kajima H, Hasegawa Y, Doi M, Fukuda T. Energy based swing-back control for continuous brachiation of a multilocomotion robot[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(9):1025-1043.
5. Meghdari A, Lavasani S, Norouzi M, Mousavi M. Minimum control effort trajectory planning and tracking of the CEDRA brachiation robot[J]. Robotica, 2013, 31:1119-1129.
6. 张大松. 仿人机器人快速动态作业平衡算法研究[D], 浙江大学, 2014.
7. 张大松, 熊蓉, 吴俊, 褚健. 基于分解动量的仿人机器人手臂高速运动实时平衡控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(03):316-323.
8. Nakanishi J, Fukuda T, Koditschek D E. Preliminary studies of a second generation brachiation robot controller[C]. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 1997, 3:2050-2056.
9. Nakanishi J, Fukuda T, Koditschek D E. Experimental implementation of a “target dynamics” controller on a two-link brachiating robot[C]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 1:787-792.
10. Nguyen K, Liu D. Robust control of a brachiating robot[C]. Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017, 6555-6560.
11. Nguyen K, Liu D. Gibbon-inspired Robust Asymmetric Brachiation along an Upward Slope[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2019, 17(2):2647-2654.
12. Saito F, Fukuda T, Arai F. Swing and locomotion control for two-link brachiation robot[C]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, 2:719-724.
13. Tashakori S, Vossoughi G, Yazdi E A. Geometric control of the brachiation robot using controlled Lagrangians method[C]. 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, 2014, 706-710.
14. Tashakori S, Vossoughi G, Yazdi E A. Control of the CEDRA Brachiation Robot Using Combination of Controlled Lagrangians Method and Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Iranian Journal of Science and Technology, 2020, 44:11-21.
15. Wu W G, Huang M C, Gu X D. Underactuated control of a bionic-ape robot based on the energy pumping method and big damping condition turn back angle feedback[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 100:119-131.
16. Young K D, Utkin V I, Ozguner U. A control engineer’s guide to sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7:328-342.
17. Lu Z G, Sekiyama K, Aoyama T, Hasegawa, Y, Kobayashi T, Fukuda T. Energetically efficient ladder descent motion with internal stress and body motion optimized for a Multilocomotion robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62:4972-4984.
18. Raibert M H, Brown H B. Experiments in Balance With a 2D One-Legged Hopping Machine[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1984, 106:75-81.
19. 周雪峰, 孙广彬, 刘晓光, 黄丹, 蒋晓明, 朱富贵. 应用扩展零力矩点预观控制和分解动量控制的仿人机器人全身运动规划方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12):58-63.
20. Hyon S H, Emura T. Energy-preserving control of a passive one-legged running robot[J]. Advanced Robotics, 2004, 18:357-381.
21. Nji K, Mehrandezh M. Low energy body design and nonlinear control of balance in a one legged robot[C]. IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 311-316.
22. Poulakakis I, Grizzle J W. The Spring Loaded Inverted Pendulum as the Hybrid Zero Dynamics of an Asymmetric Hopper[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54:1779-1793.
23. Miyadaira A N, Madrid M K. Robot’s Weight Distribution Influence on Angular Momentum Produced by a Standing Vertical Jump[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14:1669-1676.
24. Ugurlu B, Kawamura A. Real-time Jumping Trajectory Generation for a One-Legged Jumping Robot[C]. IEEE Industrial Electronics, Orlando, 2008, 10-13.
25. Ugurlu B, Kawamura A. Eulerian ZMP resolution: Real-time jogging and jumping trajectory planning for bipedal robots[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent, 2009, 150-155.
26. Ugurlu B, Kawamura A. ZMP-Based Online Jumping Pattern Generation for a One-Legged Robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57:1701-1709.
27. Ugurlu B, Kawamura A. On the Backward Hopping Problem of Legged Robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61:1632-1634.
28. Tian D, Gao J, Liu C, Shi X. Simulation of Upward Jump Control for One-Legged Robot Based on QP Optimization[J]. Sensors, 2021, 21:1-19.
29. Ahn D, Cho B K. Optimal Standing Jump Trajectory Generation for Biped Robots[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21:1459-1467.
30. Dai H, Valenzuela A, Tedrake R. Whole-body motion planning with centroidal dynamics and full kinematics[C]. 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2014, 295-302.
31. Orin D E, Goswami A, Lee S H. Centroidal dynamics of a humanoid robot[J]. Autonomous Robots, 2013, 35:161-176.
32. Chatzinikolaidis I, Li Z. Trajectory Optimization of Contact-Rich Motions Using Implicit Differential Dynamic Programming[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6:2626-2633.
33. Mayne D Q. Differential Dynamic Programming: A Unified Approach to the Optimization of Dynamic Systems[J]. Control and Dynamic Systems, 1973, 10:179-254.
34. Li H, Wensing P M. Hybrid Systems Differential Dynamic Programming for Whole-Body Motion Planning of Legged Robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5:5448-5455.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **课程学习完成情况** | | （本栏由研究生填写）  已修课程学分： 学位课学分：  待修课程学分： 课程不及格情况：  是否完成培养方案中课程要求：  需要说明的情况： | | | |
| **研究生签字栏** | | 本人声明所呈交的《硕士学位论文中期检查报告》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果，内容填写真实准确。  **签名： 日期： 年 月 日** | | | |
| **导**  **师**  **评**  **语** | | （需说明本报告是否真实准确，实际论文工作与计划对比情况，并对研究进展、阶段性成果、下一步工作计划以及存在的问题进行客观评价）  **签名： 日期： 年 月 日** | | | |
| **考核小组成员** | **姓 名** | | **职 称** | **工 作 单 位** | **本人签名** |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
| **考核小组评价** | （是否按开题报告预定的内容及进度安排进行；已完成的研究内容及成果；论文按时完成的可能性；是否符合东北大学硕士学位论文的基本要求等进行评价）  **论文工作进展： 提前完成 按计划进行 基本按计划进行 拖延 无实质进展**  **综合评价意见： 优 秀 合 格 不合格**  **综合评价成绩（百分制）：**  **考核小组评语：**  **考核小组组长签字： 日期： 年 月 日** | | | | |
| **学院抽查结果** |  | | | | |