

硕士学位论文

球铰关节交互的 半人马系统行走控制研究

**RESEARCH ON LOCOMOTION CONTROL FOR
HUMAN-CENTAUR SYSTEM WITH SPHERICAL
JOINT INTERACTION**

研 究 生：严浩耘
指 导 教 师：付成龙教授

南方科技大学
二〇二四年五月

国内图书分类号: TP242.6
国际图书分类号: 681.5

学校代码: 14325
密级: 公开

工学硕士学位论文

球铰关节交互的
半人马系统行走控制研究

学位申请人: 严浩耘
指导教师: 付成龙教授
学科名称: 智能制造与机器人
答辩日期: 2024 年 5 月
培养单位: 机械与能源工程系
学位授予单位: 南方科技大学

Classified Index: TP242.6

U.D.C: 681.5

Thesis for the Degree of Master of Engineering

**RESEARCH ON LOCOMOTION
CONTROL FOR
HUMAN-CENTAUR SYSTEM
WITH SPHERICAL JOINT
INTERACTION**

Candidate:	Haoyun Yan
Supervisor:	Prof. Chenglong Fu
Discipline:	Intelligent Manufacturing and Robotics
Date of Defence:	May, 2024
Affiliation:	Department of Mechanical and Energy Engineering
Degree-Conferring-	Southern University of Science and
Institution:	Technology

南方科技大学学位论文原创性声明和使用授权说明

南方科技大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。除了特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本人的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：严浩崧

日期：2024年5月13日

南方科技大学学位论文使用授权书

本人完全了解南方科技大学有关收集、保留、使用学位论文的规定，即：

- 按学校规定提交学位论文的电子版本。
- 学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的电子版，允许论文被查阅。
- 在以教学与科研服务为目的前提下，学校可以将学位论文的全部或部分内容存储在有关数据库提供检索，并可采用数字化、云存储或其他存储手段保存本学位论文。
 - 在本论文提交当年，同意在校园网内提供查询及前十六页浏览服务。
 - 在本论文提交当年/年以后，同意向全社会公开论文全文的在线浏览和下载。
- 保密的学位论文在解密后适用本授权书。

作者签名：严浩崧

日期：2024年5月13日

指导教师签名：孙伟华

日期：2024年5月13日

摘要

负重行走是人类日常生活中的一项常见任务。长期负重可能会损伤人体的关节或肌肉，为了增强人类的负重行走能力，研究者设计了多种可穿戴式机器人。外肢体机器人因具有能够将负载重量传递到地面与解放穿戴者四肢运动的优势，有潜力成为具有高负载能力且人机友好的负重行走机器人。然而，如何控制外肢体机器人在日常环境中跟随用户行走仍是一个具有挑战的关键问题。本文围绕外肢体系统——半人马机器人展开研究，通过设计行走规划与控制器，以实现人机系统协同行走。

系统中存在物理人机交互，为降低机器人对穿戴者的运动干扰，在机械结构方面提出了球铰关节的交互方式，以解耦人机系统之间的旋转自由度，减小机器人对穿戴者的冲击干扰。为满足腿足式系统行走的平衡稳定性需求，设计了基于降阶动力学模型的平衡控制器，以实现机器人在行走过程中的动态平衡。针对穿戴外肢体机器人时用户行走灵活度低的问题，对机器人落足点位置规划问题展开研究，提出了全向行走策略，使机器人能灵活跟随穿戴者的即时运动。为应对非平坦地形的行走的挑战，提出了在面向非平坦地形的躯干状态规划器，然后设计了地形感知与足端运动规划方法以提升半人马机器人的地形适应能力。

所提出的控制策略部署在了半人马机器人样机中。实验结果展示了半人马机器人能够在多种场景下跟随穿戴者行走。机器人能够保持其躯干姿态角平衡。全向行走策略使得机器人能够跟随用户进行转弯、前进、后退、侧向行走以及变速行走（0~0.8 m/s）。基于视觉感知的规划控制方法实现了半人马机器人跨越障碍物、上下台阶、上下斜坡以及在草地和碎石路面行走。负重对比实验数据表明，相比于刚性连接负载条件，使用半人马机器人背负 170 N 负载时能降低 35.83% 的平均负载力。实验证实了半人马机器人辅助人负重行走的有效性，并验证了机器人在多种地形下跟随用户行走的能力，为穿戴式负重机器人领域提供新的研究思路。

关键词：人体增强机器人；半人马机器人；足式行走控制；负重行走

Abstract

Load carriage is a common task in daily life. Long-term load carrying may injure human's joints or muscles. To enhance human load-carrying capacity, various of wearable robots have been proposed. Supernumerary Robotic Limbs (SRLs) have the advantages of distributing the load to the ground and being kinematically independent from human limbs, rendering them powerful and user-friendly coworkers to carry loads with human. However, how to control the SRLs to follow the human on a common environments remains a significant and challenging issue. This article focuses on the research of a specific type of SRLs, the Centaur robot, aiming to realize human-robot collaborative walking by designing a complete planning and control pipeline.

First, there exists physical human-robot interaction in the system. To reduce the robot's interference to the wearer's movement, this work proposes to use the spherical joint as a means of the human-robot interaction. Second, bipedal legged locomotion is inherent unstable. To meet the requirement of balance for the legged locomotion, this work utilizes a reduced-order model-based controller to achieve the dynamic balance. Third, to address the issue of low walking flexibility of user when wearing the SRLs, we study the footholds planning methods. An omnidirectional walking strategy is proposed to allow the robot to follow the wearer's real-time movement towards omnidirection. Finally, to cope with the challenge of walking on uneven terrain this paper study the planning strategied of torso state and swing foot trajectories. A torso state planner is proposed to handle the human-robot walking problem on non-flat terrain. The terrain mapping and swing foot motion adjustment methods are designed to improve the terrain adaptability of the Centaur robot.

The planning and control pipeline is deployed in the real world. Experimental results demonstrate the Centaur robot can walk with the human subject in various scenarios. The robot can walk with human subject while retaining its torso posture dynamic balance. The locomotion approach enables the robot to walk forward ($0\sim0.8$ m/s), backward, laterally, turn around with the wearer. The perceptive planning strategy enables the centaur robot to cross obstacle, go up and down steps, up and down slopes, and walk on grass and gravel roads. The load-bearing comparison experimental results shows that the average load force can be reduced by 35.83% when using the Centaur robot to carry a 170 N load,

Abstract

compared to the rigidly connected load condition.

The experimental results confirmed the effectiveness of the Centaur robot in assisting human load-carrying walking and verified the robot's ability to follow user in various terrains, providing a new research idea for the field of wearable load-carrying robots.

Keywords: Human-augmented robotics; centaur robot; legged locomotion control; load-carrying walking

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
符号和缩略语说明.....	VI
第1章 绪论.....	1
1.1 课题背景	1
1.2 穿戴式负重机器人研究现状	2
1.3 下肢外肢体机器人控制方法研究现状	5
1.3.1 足式系统平衡控制方法.....	5
1.3.2 下肢外肢体足端轨迹规划方法.....	6
1.4 足式系统在非平坦环境行走方法研究现状	7
1.4.1 环境地形感知技术.....	7
1.4.2 非平坦环境下足式机器人运动规划方法.....	8
1.5 研究现状简析与研究意义	9
1.6 论文内容与结构安排	9
第2章 半人马机器人结构与系统搭建.....	11
2.1 引言	11
2.2 球铰交互方式的机械结构设计	11
2.3 人机系统硬件方案	14
2.4 行走控制软件框架	14
2.5 球铰对系统影响的评估	15
2.6 人机系统的解耦运动实验	19
2.7 本章小结	19
第3章 基于降阶动力学模型的平衡控制器.....	21
3.1 引言	21
3.2 含人机交互力的降阶动力学模型	21
3.3 基于模型预测控制的足端力求解	24
3.4 基于全身运动控制的关节扭矩计算	28
3.5 人机系统直线行走实验	29
3.6 半人马机器人负重性能评估	31

3.7 本章小结	33
第 4 章 半人马系统全方向行走足端运动规划.....	34
4.1 引言	34
4.2 下肢外肢体机器人足端运动规划方法概述	34
4.3 转向控制策略.....	36
4.4 平移运动足端轨迹规划	38
4.5 全向行走方法实验评估	40
4.5.1 航向角度抗扰动实验.....	40
4.5.2 室内跑步机行走实验.....	42
4.5.3 半人马系统全向行走实验.....	44
4.6 本章小结	45
第 5 章 面向非平坦地形的半人马感知行走规划.....	46
5.1 引言	46
5.2 非平坦地形行走方法综述与框架	46
5.3 非平坦地形的行走规划方法	47
5.3.1 躯干状态参考值规划.....	47
5.3.2 地形特征感知.....	49
5.3.3 落足点调整与无碰撞轨迹生成.....	51
5.3.4 基于足端触地检测的步态规划器.....	52
5.4 感知规划方法实验评估	53
5.4.1 穿戴者垂直运动实验.....	53
5.4.2 室内跨越障碍物实验.....	55
5.4.3 户外非平坦地形行走实验.....	57
5.5 本章小结	61
结论.....	62
参考文献.....	64
致 谢.....	71
个人简历、在学期间完成的相关学术成果.....	72

符号和缩略语说明

${}^C \mathbf{r}_{AB}$	从 A 点指向 B 点的向量，在 $\{C\}$ 坐标系下表示
Φ_{AB}	从 $\{A\}$ 坐标系变换到 $\{B\}$ 坐标系的旋转矩阵
$(\gamma \ \theta \ \varphi)$	按照 z - y - x 轴旋转顺序的欧拉角 $\text{roll}(\gamma)$, $\text{pitch}(\theta)$ 和 $\text{yaw}(\varphi)$
${}^C \mathbf{v}_{AB}$	B 点相对于 A 点的速度，在 $\{C\}$ 坐标系下表示
${}^C \boldsymbol{\omega}_{AB}$	$\{B\}$ 坐标系相对于 $\{A\}$ 坐标系的角速度，在 $\{C\}$ 坐标系下表示
$(\cdot)^\top$	向量或矩阵的转置
$(\cdot)^\dagger$	矩阵的 Moore-Penrose 广义逆矩阵
$(\cdot)_\times$	向量对应的反对称矩阵
$\mathbf{1}_n$	$n \times n$ 维度的单位矩阵
$\mathbf{0}_{m \times n}$	$m \times n$ 维度的零矩阵
f	线性力
\mathbf{m}	扭矩
SRL	外肢体机器人 (Supernumeray Robotic Limbs)
FSM	有限状态机 (Finite State Machine)
IMU	惯性测量单元 (Inertia Measurement Unit)
SRBD	单刚体动力学模型 (Single Rigid Body Dynamics)
CoM	质心 (Center of Mass)
ZMP	零力矩点 (Zero Moment Point)
MPC	模型预测控制 (Model Predictive Control)
WBC	全身运动控制 (Whole-Body Control)
QP	二次规划 (Quadratic Programming)
GRF	地面反力 (Ground Reaction Force)

第1章 绪论

1.1 课题背景

携带重物行走是常见的任务^[1-2]。例如在日常生活中，学生通常会背负书包以携带书籍和文具；在户外旅行中，登山者会携带补给品和扎营工具进行徒步；在抢险救灾过程中，消防员需要背负大于 12 kg 的空气呼吸器和医用设备以进行应急搜救；在军事领域，步兵在偏远地区执行行军任务时需要携带 10-45 kg 的装备弹药和战略物资。在以上提及的户外、恶劣场景中，传统的轮式载具或手推车难以跨越非平坦、充满障碍物的地形，因此运输负载通常需要依赖人类的移动灵活能力。而长期的过重负载行走会引起人的脊柱、腰部的疼痛^[3]，给人的身体姿态发育造成不良影响^[4]。研究如何提高人的负重行走效率，增强人的负重行走能力成为重要的研究问题。

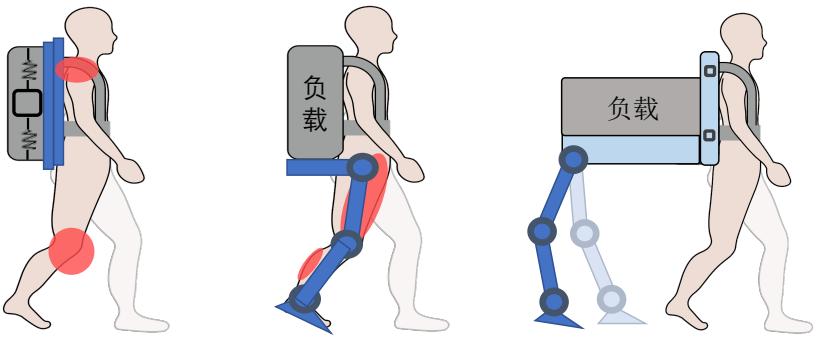
设计机器人系统以辅助人类完成繁重任务是机器人研究领域的重要目标之一。为了满足辅助人类进行制造、装配、行走和负载运输等社会需求，外肢体机器人（Supernumerary robotic limbs, SRLs）^[5-8]被研究者提出以增强人的任务表现能力。外肢体机器人属于人体穿戴式机器人，通过为人类增加额外的机械仿生肢体来加强人的运动能力。相比于外骨骼机器人，该穿戴式机器人的运动空间和关节自由度与穿戴者的肢体相互独立，对人的自然肢体运动干扰较小；相比于完全自主的移动机器人，该人机系统可以充分发挥用户的智能决策能力，降低对机器人在运动判断、决策的要求。同时，下肢外肢体机器人具有与外界环境持续进行接触的特点，能有效地将负载传递到地面^[9]。因而腿足式的下肢外肢体机器人有潜力成为强大且人机友好的人体增强型机器人，能够协助人类进行高效的负重行走任务。

目前下肢外肢体在：运输负载^[9-10]、辅助行走^[11-12]、人体支撑^[12-13]等场景得到了多方面的应用。其中，实现人机系统行走任务是下肢外肢体机器人执行其他任务的重要前提。腿足式下肢外肢体机器人具有非线性和欠驱动的特点，给人机系统的稳定性带来了挑战。同时，由于系统中存在物理人机交互，在行走运动过程中，穿戴者和机器人在躯干接触位置会产生相互干扰，可能会降低用户的舒适度。另外，当前下肢外肢体机器人行走研究大部分仅关注平坦路面环境下的行走，腿足式机器人通过复杂地形的潜力还未充分发挥。因而，探究人机系统协同跨越具有挑战性地形的方法是提升下肢外肢体机器人实用性的关键，有助于拓宽外肢体机器人的应用场景。

本课题主要研究半人马穿戴式系统的控制策略,以人机友好、稳定性、灵活性和地形适应性作为导向,为穿戴式人机系统的控制研究提供新的方案,促进人体增强型机器人的发展与应用。

1.2 穿戴式负重机器人研究现状

研究者提出了多种穿戴式机器人^[1-2]以增强人的负重行走能力。根据结构形式,本文将它们分为三类:悬浮式负重背包、下肢外骨骼机器人和外肢体机器人。本节将介绍三者的相关研究现状并分析各自的特点,如图1-1所示。



	悬浮式负重背包	下肢腿式外骨骼	外肢体机器人
负重方式	无法提供外部支撑力	刚性结构支撑负重	提供外部支撑力
对用户肢体的影响	不干扰用户肢体运动	与肢体紧密连接 影响人的自然步态运动	与肢体独立
其他特点	用户自然穿戴、 结构简单有效	主动或被动式控制	支撑多边形大、 机器人运动自由度大

图 1-1 穿戴式负重机器人种类

(1) 悬浮式负重背包。背包是简单通用、方便易用的负重行走工具。人在背负传统背包行走时,负重会随人体在垂直方向上进行加减速运动,该过程会对人产生额外的垂直惯性力。为此,研究者提出使用悬浮式负重背包(Suspended-load backpack)以调整负重与人体之间的相对运动,进而降低人的肩部负载力。Rome等^[14]通过使用弹力绳(如图1-2(a)所示),使得负载能够在垂直滑轨上自由振荡滑动,减小了负载竖直位移幅值。实验表明,相比于传统的刚性背包,所设计的弹性背包能降低82%在垂直方向上的峰值加速力,降低6.2%人体行走的新陈代谢。Yang等^[15]使用类倒立摆分析了背负弹性背包的双足行走过程,发现在人体双腿支撑相时,悬浮式负重背包的垂直冲击力有利于减小人的能量消耗。后续学者探究了背包刚度和阻尼系数对负载力的影响^[16],并启发研究者通过实时改变背包的物理系数以改进其性能。如图(b)所示, Yang等^[17]通过主动调节背包阻尼系数,改变负载的振荡方式,进而满足不同用户的生物力学需求。另外,为了解决系统参数选

择与用户行走速度匹配的问题, He 等^[18]以最小化负载惯性力为目标, 使用电机主动调节负载的垂直位置(如图1-2(c)所示), 最终减小了人负重行走过程中 11.0% 的净新陈代谢。

悬浮式背包具有结构简单、穿戴方便的优点。然而, 由于其无法为负载提供外部环境的支撑力, 仅能降低行走过程中的峰值力而非平均力^[14], 因而悬浮式弹性背包增强人负重能力是有限的。

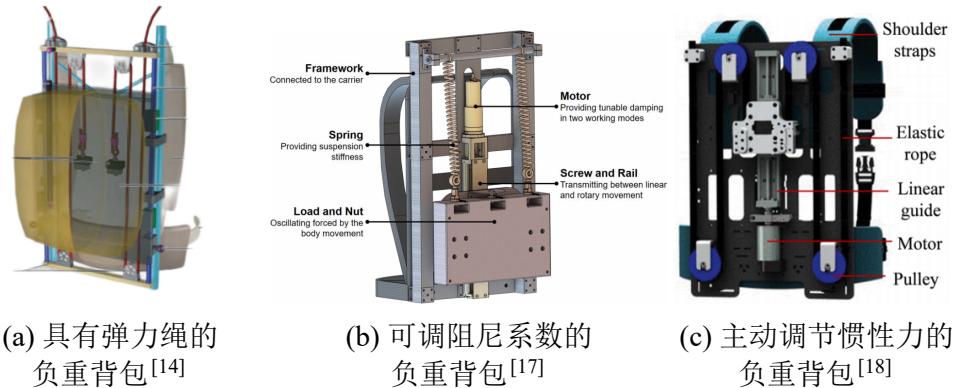


图 1-2 悬浮式弹性背包

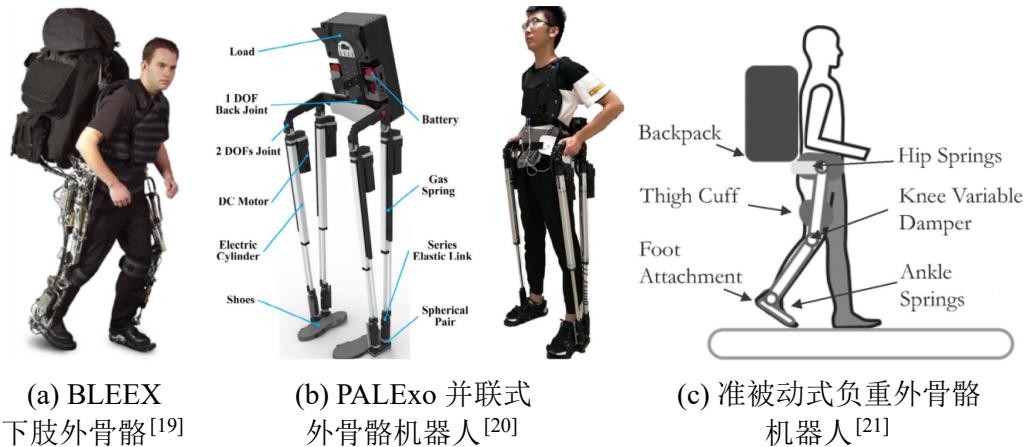


图 1-3 用于负重的下肢外骨骼机器人

(2) 辅助负重的外骨骼机器人。刚性外骨骼机器人可以构建负载到地面的通路, 可以有效将负载重量传递到地面, 以提升人的负重能力。图1-3(a)为UC Berkeley设计的下肢外骨骼机器人^[19]。该机器人是具有 7 自由度的类人腿的机构, 能够大程度上保证其运动能适应人体下肢的运动。数据表明该外骨骼能够帮助人携带最大 75 kg 负重行走, 展示了外骨骼机器人提升人体负重重量的潜力。为了避免人的下肢与机器人运动产生冲突, 提升用户下肢的灵活性, Wang 等^[20]提出了一种并联式主动下肢外骨骼(如图1-3(b)所示)。通过主动控制弹性杆件的伸缩, 该设备能够协助人在负重的同时实现站立、行走、转弯、下蹲和上楼梯, 体现了外骨骼

机器人的柔顺性和用户舒适性。由于需要复杂的驱动机构和额外的能源供给单元，上述主动式的外骨骼的自身重量较大，会给人额外的能量消耗。为此，有研究者提出被动式外骨骼的概念^[21]，该外骨骼利用髋关节和踝关节的储能元件，降低了用户带动外骨骼运动的机械能。实验表明该设备能够将36 kg负重的80%传递到地面，同时将新陈代谢消耗增长量控制到10%，证明了被动式关节结构在高效、轻量化设计方面的优势。

下肢外骨骼机器人可以通过刚性结构将负重重量传递到地面，能与人共同承担负载。但是，外骨骼机器人通常有与人腿相束缚或平行的刚性结构，这可能会导致机器人影响人肢体自然运动，增加人额外的新陈代谢。

(3) 辅助负重的外肢体机器人。相比外骨骼机器人而言，外肢体并非增强人原有肢体的能力，而是通过添加额外的机械仿生肢体来强化人的行为表现。麻省理工学院提出额外机器腿(Extra Robotic Legs, XRL)的概念^[22]，期望设计一种穿戴式双足系统，能够帮助人完成运输负载、支撑身体姿态。Hao等^[9]研制腿式外肢体，位于背包下方的两个机器腿能够将负载的重量传递地面，减轻平均负载力55.8%。Leng等^[10]提出的轮足式外肢体，通过调节机械腿的直线伸缩，保证系统能够为负载提供持续和稳定的支撑力。南方科技大学提出半人马式机器人^[23]，该机器人结合了自然界中双足动物灵活性与四足动物稳定性优势。人机系统具有较大的支撑区域，有助于负载的稳定运输。实验结果显示半人马机器人能够以0.3 m/s的速度在户外平地行走。



图1-4 用于增强负重行走能力的外肢体机器人
(a) XRL^[22,24] (b) 下肢外肢体机器人^[9] (c) 半人马机器人^[23]

半人马机器人是一种新型的外肢体机器人。相比于悬浮式背包，它能够将负载的重量通过机械腿传递到地面，持续为负载提供支撑力。相比刚性腿式外骨骼，它具有与人体肢体运动相互独立的运动空间，有利于减少对穿戴者肢体运动的干扰和限制。相比于完全自主的负重四足机器人，半人马系统可以利用穿戴者的决策能力进行移动，无需自主规划移动路径。此外，腿式系统比轮式设备更适合崎岖的地形的行走，有助于跟随穿戴者进入更广泛的应用场景。因此，半人马型机

器人提供了一种新颖的、能在通用环境中增强人类的负载能力的解决方案。

本文将围绕半人马机器人的行走控制问题展开研究，以提高系统的行走能力为目标。以下小节内容将回顾相关机器人的核心技术的研究现状。在1.3节将概述现存下肢外肢体机器人的基本控制思路；在1.4节将介绍足式系统在非平坦地形下的控制方法；最后在1.5节总结与分析研究现状；并在1.6节提出本文的内容结构。

1.3 下肢外肢体机器人控制方法研究现状

1.3.1 足式系统平衡控制方法

半人马机器人作为多关节腿足式系统，是天然不稳定的系统，具有、非线性、欠驱动的特点。通过主动控制腿部关节，保证机器人躯干姿态平衡是完成人机协作负重行走任务的前提。半人马机器人拥有与穿戴者肢体独立的躯干与机械腿，这一方面给机器人和用户都带来了更多自由的运动；但另一方面也给机器人的平衡稳定性带来了挑战。为保持半人马机器人平衡行走，先前的研究^[23]采用负反馈的方式，根据机器人的俯仰角调整机器人腿的高度。该方法是基于运动学（位置）的控制，在行走过程中会导致系统处于静态平衡而不是动态平衡^[25]。此外，基于位置的控制方式还可能降低人机交互的安全性和舒适性^[26]，因为当穿戴者和机器人运动存在矛盾和差异时，电机会产生较大的扭矩^[27]，导致机器人对外界环境或穿戴者施加干扰力。最后，该平衡方案并未考虑其他姿态状态，例如横滚角（roll）、偏航角（yaw）和躯干高度。如果这些姿态角度是由穿戴者通过物理交互来调节，可能会增加人类与机器人行走时的能量消耗。为了实现半人马机器人行走过程中的动态平衡，需要设计基于动力学模型的平衡控制器。

近年来，足式机器人领域在动力学建模、轨迹规划和控制方法上取得了显著的进展。为了简化计算同时获取系统主要的动力学信息，研究者使用单刚体动力学模型^[28-29]（Single Rigid Body Dynamics, SRBD）对机器人系统进行建模。基于该模型对机器人动力学方程进行线性化，有利于推导高效的状态空间方程，便于控制器的开发^[30]。模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）能够预测未来一段时间范围内的系统状态，在考虑物理约束下求解最优的系统输入，可以高效处理足式机器人的混合、高动态系统特性，使其成为足式机器人领域流行的规划控制方法^[30]。全身运动控制（Whole-Body Control, WBC）利用层级优化的方法完成机器人多任务目标，并且在完整准确的机器人动力学模型上计算电机扭矩，充分提高了机器人的动态性能^[31-32]。上述建模控制的方法让自主式腿足机器人实现高动态、稳定的行走，但是不适合直接在半人马式人机系统中使用。首先，系统中存在物理人机交互，半人马机器人在躯干处会受到时变的、不可预测的人机交互

力，增加了系统建模的复杂性。此外，由于机器人的躯干与人的身体背部相互连接，系统不能像自主机器人一样规划其躯干位置的运动轨迹，机器人的躯干位置应该由穿戴者的运动决定。

足式行走系统的平衡稳定是重要的研究问题。为解决当前半人马机器人仅实现静态平衡的问题，需要开发基于动力学模型的平衡控制器；为克服人机系统建模复杂的问题，需要辨识人机交互力以描述穿戴者对机器人系统的影响；为避免穿戴者与机器人运动相互矛盾，需要简化机器人的控制自由度，让机器人来控制躯干的姿态角度值，让穿戴者来决定系统的平面位置。

1.3.2 下肢外肢体足端轨迹规划方法

由于外肢体机器人具有自主运动的自由度，如何规划控制机器人肢体运动，实现人机系统协调行走是重要的研究问题。为了保证下肢外肢体机器人能提供支撑负载、跟随人的意图和节奏运动，Hao 等^[9]使用有限状态机的方法控制机器人：在机器人足端支撑期使用力反馈控制以提供恒定的负载力，在摆动期使用位置控制以跟随人步态进行摆动。有限状态机的状态转换条件由人步态周期中的足跟着地（Heel Strike）与足尖离地（Toe off）事件来确定，机器人能够根据用户自然行走的信息生成目标运动轨迹，避免了外肢体的运动干扰穿戴者的行走节奏。以辅助人行走为目标，Khazoom 等人^[11]使用惯性测量单元（Inertia Measurement Unit, IMU），根据受试者的大腿小腿长度值，估计穿戴者双腿的行走相位和脚踝的位置。并依据以上信息，以映射的方式生成外肢体末端的目标位置和地面反力。其中地面反力在垂直方向上为常数值，水平方向上会产生推动人向前移动的力，为人行走提供支撑辅助。Parietti 等^[12]根据人行走相位，分析了穿戴者和机器人足端形成的支撑多边形。以最大化人机系统的支撑多变形为目标，规划机器人足端的位置，以实现对人行走过程中进行平衡辅助。

上述外肢体行走控制方法都利用了人行走的步态信息，外肢体机器人能够根据穿戴者的行走节奏，自主生成周期性的运动轨迹。该控制策略的优势在于：提高了人机的协调性，不会破坏人自然行走的节律性；同时，人的行走意图能直接传达给外肢体，无需穿戴者使用刻意的指令来操控机器人运动，降低了人的工作负担。但是，基于人体步态的控制策略具有一定局限性：其一，该方法需要额外设计步态检测算法，增加了系统的复杂性，且降低了外肢体的可靠性。由于从人腿部检测到的角度信息^[9,11]或加速度信息^[12]噪声较大且在不同用户中存在差异，根据上述信号识别用户运动意图可能会出现误识别的情况，进而导致外肢体机器人错误地切换运动状态，影响人机系统的正常运作。其二，该方法一定程度上限制了穿戴者的移动灵活性，适用场景单一。通常步态检测方法只关注用户在矢状面

(sagittal plane)^[33]单方向的行走状态，而识别向后或侧向行走的步态需要更加复杂的步态检测算法^[34]。因而步态跟随的方法使得现存的外肢体穿戴者^[9,11-12,23]只能向正前方移动，而不能向后或者横向移动，限制了用户的行动能力。另外，执行周期性固定的运动轨迹难以发挥外肢体机器人作为独立运动个体的自主智能性。

总结而言，采取“识别穿戴者步态信息” - “映射机器人足端运动轨迹”是当前下肢外肢体足端轨迹规划的主流方法。但在该规划方法下的下肢外肢体机器人缺乏灵活移动能力，限制了穿戴者在日常环境中转弯、变速行走或后退行走的能力。针对以上问题，本文将探究新型外肢体落足点与摆动轨迹规划策略，以保证机器人能够实时适应穿戴者的灵活移动性，拓宽下肢外肢体设备的应用场景。

1.4 足式系统在非平坦环境行走方法研究现状

1.4.1 环境地形感知技术

随着应用场景的拓展，研究者期望下肢穿戴式机器人能在更具有挑战性的地形下协助人类工作。为了让机器人能够自主调整运动轨迹，在多种地形下行走，通常需要向控制系统引入视觉感知模块，以获取环境地形的特征信息。Hao^[35]使用视觉里程计和深度相机，使用同时定位和建图技术（SLAM）技术，重构了环境中的障碍物与地面信息。Zhang 等^[36]为动力大腿假肢设计了环境特征识别系统，利用相机与 IMU 的传感器信息对地形进行分类，并提取地形中坡度、楼梯宽度高度等特征信息，以实时对假肢的运动模式进行切换。Hua 等人^[37]通过飞行时间（Time of Flight, ToF）传感器，识别任意摆放的障碍物的几何特征（长、宽、高及角度）。

在自主足式机器人领域，通常使用高程图（Elevation Map）^[38-40]来构建以机器人为中心（Robot-Centric）的局部地形信息。高程图采用 2.5 维的表达格式，在每个平面像素中储存对应的高度信息。对原始的高程图进行进一步的处理后，可以得到量化的地形特征信息，如坡度、粗糙度、边缘度等^[41]，有助于指导足式系统选取合适的落足点。地图的处理往往需要大量的图像运算，为加快建图的速度和提高处理的速度，Miki 等^[42]提出了利用图像处理器（Graphics Processing Unit, GPU）的建图方法。为了简化地形表达，有学者从地图中分割提取平面信息^[43]，用凸多边形来描述机器人的可落足区域。平面分割的方法需要额外的预处理计算时间花销，但能够将环境信息高效地编码，有利于非线性模型预测控制器的设计。

理想状态下，半人马机器人应当具有在复杂的结构化/非结构化的室内/户外地形中跟随用户行走，而不能仅针对某一场景（如含障碍物地形）进行特定调节，才得以体现机器人的实用性。为此，本文将采用高程图的方式来对机器人周围的环境进行感知。机器人无需对地形种类（如楼梯和斜坡等）进行分类，而应该提取环

境中的本质特征，以量化的方式评价环境中每个位置的可落足性，以指导机器人在广义环境中选择最优的安全落足点。

1.4.2 非平坦环境下足式机器人运动规划方法

机器人需要根据环境自适应调整其运动轨迹以应对不同地形的行走。足式机器人在非平坦地形的行走方法可分为两种：无视觉感知的与有视觉感知的方法。无视觉感知的方法通常基于关节角度、关节力矩和惯性测量单元等本体传感器信息以估计当前接触地形的特征以做出运动调整。常见的流程是先对机器人足端的接触状态进行估计^[44-45]，然后根据足端的接触信息设计有限状态机（Finite State Machine, FSM）^[46]，规划不同的运动策略以应对环境地形的变化。实验展示所设计的 FSM 有助于平面双足机器人能够在无视觉感知下行走 12.5 cm 的高低起伏地形。在文献^[47]的工作中，四足机器人通过足端最近接触的信息拟合倾斜地面的角度，然后调整躯干的姿态和摆动腿的轨迹。实验展现了其机器人能够在无视觉的情况下在 17.8 cm 高，27.9 cm 宽的楼梯上行走。无视觉感知的控制方法一定程度上能通过复杂地形；但是，由于该类方法依赖足端与环境地面的碰撞信息进行运动规划，导致无视觉感知的控制策略的安全系数较低，无法预先规划不与环境产生碰撞的足端运动轨迹。

基于视觉感知的方法可以让系统主动提前获取环境的信息，机器人能够预先进行运动规划。已知障碍物位置与尺寸，Hao^[35]通过控制外肢体机械腿的膝关节角度和直线关节的回缩，以保证机械腿末端与障碍物形成足够的间隙，实现了外肢体机器人跨越 21.3 cm 的障碍物。Zhang 等^[48]基于人工势场（Artificial Potential Field）生成一个远离障碍物的排斥力，使假肢实现避障动作。自主足式机器人通过具有挑战性地形过程中，主流使用模块化控制策略，独立对机器人足端和躯干运动进行规划。给定地图信息，可通过迭代搜索^[39,41]或卷积神经网络^[49]等方法选取可行或最优的落足位置；同时，足端规划器将生成无碰撞的摆动轨迹^[50]以到达目标落足位置。然后，根据一系列的落足位置，可优化得到机器人躯干的运动位置及姿态参考轨迹。依照上述模块化控制策略，Fankhauser 等^[51]提出了基于地形信息的四足机器人运动规划器，实现 ANYmal 机器人^[52]以静态步态行走通过楼梯、斜面、动态障碍物等地形。

与下肢外骨骼^[37]和动力假肢^[48]相比，由于半人马机器人的机械腿与穿戴的肢体相独立，机器人难以直接从穿戴者的肢体中获取运动意图信息。因此半人马机器人需要独立地感知环境并自主控制其机械腿的运动，以适应不同的移动环境。与完全自主式机器人^[41]相比，半人马人机系统是一个异构的足式系统，机器人的躯干通过背板与穿戴者时刻相连接。这意味着，半人马机器人既不能规划人腿的

运动，亦不能完全决定其躯干的位置。所以，现存的自主式机器人（在复杂环境下）的躯干规划方法不能直接在半人马系统上应用，机器人的躯干俯仰值应该考虑穿戴者的位置约束。为此，本文将探究半人马机器人在非平坦地形的躯干与足端规划问题，以提升系统的地形适应能力。

1.5 研究现状简析与研究意义

（1）在所有穿戴式负重辅助机器人当中，下肢外肢体机器人具有能够将负载重量传递到地面、解放穿戴者四肢运动的优势。半人马机器人作为新型的穿戴式下肢机器人，有潜力成为强大且人机友好的负重行走设备。提高半人马机器人在多场景下跟随用户行走的能力是重要且具有挑战的问题。

（2）保持机器人躯干姿态的平衡是足式系统进行移动行走的重要前提。先前的半人马平衡方法基于反馈的（无模型的）方式，对机器人的俯仰角进行调节，难以满足动态行走过程的平衡稳定性需求。为此，需要开发基于动力学模型的平衡控制器以解决机器人行走过程中的动态平衡问题。

（3）当前下肢外肢体行走控制多采用跟随穿戴者行走步态的方案，实现了外肢体自主周期性运动。但是，该方案存在系统复杂（需要额外设计用户步态检测算法）、穿戴者移动灵活能力较低（只能往单方向前进行走）的缺点。针对负重行走任务，让机器人完全跟随穿戴者的步态同步行走不是必需的。相比而言，机器人应该在用户带领下进行全方位行走，以满足用户在日常场景下随意运动的需求。

（4）目前关于下肢外肢体的行走任务主要关注在平坦路面上的行走，适用场景单一，腿足式系统的地形适应能力未得到充分体现。探究人机系统跨越复杂地形的控制方法有助于提高半人马机器人的实用性。对于环境地形感知技术，国内外研究利用视觉传感器，实时构建了机器人周围的地形种类、参数信息。针对复杂环境下足式系统的运动规划技术，研究者使用模块化的控制策略让自主式机器人成功通过楼梯、斜坡、障碍物等地形。而半人马机器人作为穿戴式系统，不能像自主机器人一样规划其躯干位置的运动。探究如何在躯干位置不受控的情况下，优化调整机器人的躯干于足端运动，以实现人机系统协同跨越复杂地形，有利于拓宽机器人的实用场景。

1.6 论文内容与结构安排

本文将围绕新型穿戴式下肢机器人——半人马的行走控制方法展开研究。针对现存外肢体机器人用户灵活度低、适用环境单一的问题，对半人马机器人系统

建模、方向行走策略、环境感知及运动规划等关键技术进行研究，旨在为穿戴式机器人提供新的研究思路。本文主要研究内容如下：（1）半人马机器人系统搭建。为缓解机器人躯干约束和干扰穿戴者躯干活动的问题，提出使用球形铰链作为新的人机交互方式。（2）基于降阶动力学模型的平衡控制器。由机器人来控制人机系统的姿态和高度，由穿戴者来决定人机系统的水平面位置。在系统建模上，首先对人机交互力进行估计，然后采用降阶的单刚体模型对机器人进行动力学建模，以保证模型的高效简洁性。最后，基于动力学方程，设计姿态控制器以确保机器人躯干的平衡稳定。（3）全向行走策略。为了提升穿戴者的灵活移动性，本文将采取不依赖穿戴者步态信息的行走方案。根据系统的状态和人的运动意图，研究设计全向行走策略，以实现半人马机器人跟随穿戴者进行前进、后退、侧向行走和转弯动作。该部分研究内容构建了系统核心的控制器，为后续复杂地形下的运动规划打下基础。（4）面向非平坦环境的感知规划方法。针对当前下肢外肢体机器人行走地形场景单一问题，本文将研究实时地形感知技术和机器人运动规划方法。在感知方面，先对原始的点云信息进行处理：根据地形点云信息建立机器人周围的高程图；然后将分析提取地形坡度、粗糙度、边缘度等特征信息。在运动规划方面，本文将采用局部状态优化的方法，在考虑机器人位置约束的情况下，探究最优落足点选取、无碰撞摆动轨迹生成、机器人躯干姿态规划三个关键技术。

本文的结构安排如图1-5所示，在第1章回顾研究现状后；第2章对半人马机器人的机械结构与硬件系统进行介绍；第3章推导动力学模型并设计动态平衡控制器；第4章根据人的实时运动开发全方向行走的策略；第5章提出视觉感知下的非平坦地形规划方法；最后对本文进行总结并对未来研究方向进行展望。

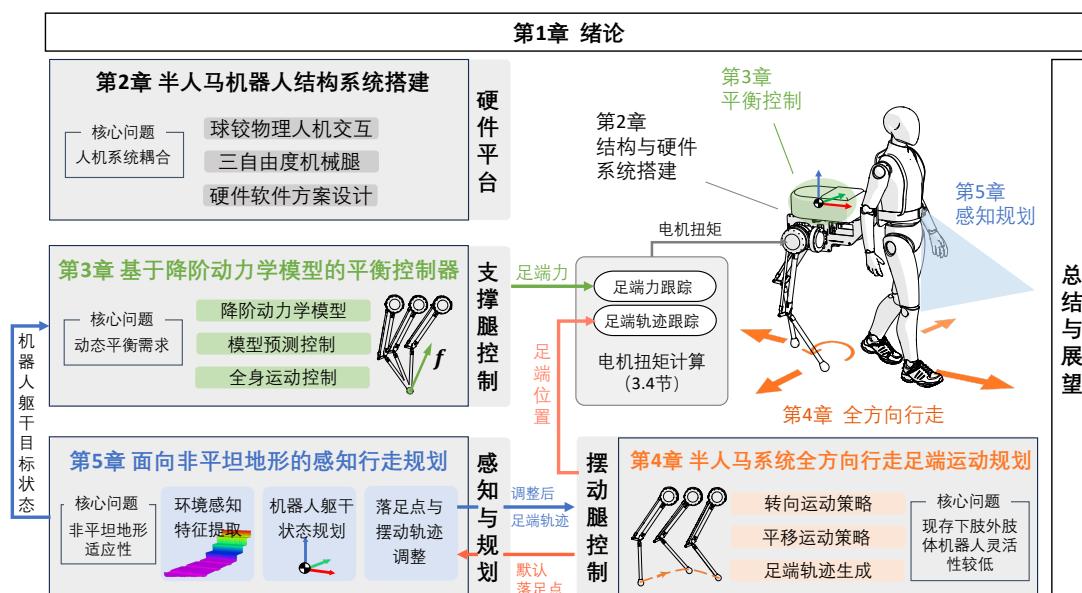


图 1-5 论文结构

第2章 半人马机器人结构与系统搭建

2.1 引言

本章将介绍半人马系统的机械结构与传感器布局。机械系统主要由三部分组成：机器人躯干、两个机械腿和一个用户穿戴的背包。在先前的半人马结构设计中^[23]，机器人的躯干通过背包与穿戴者固定连接，这可能会约束或干扰用户躯干的独立运动。另外，机械腿仅有（屈曲/伸展）髋关节与膝关节两个自由度，限制系统仅能在矢状面中行走，难以满足用户在平面环境行走的灵活性。针对上述两个缺陷，本章对半人马机器人的机械结构进行改进：使用球铰作为物理人机交互方式、为机械腿添加外展/内收的髋关节自由度。

本章内容安排如下：第2.2节提出对机器人的机械结构改进；2.3节介绍系统所使用的电机与传感器；第2.5和2.6节对所提出的交互方式（球铰）的效果进行评估。

2.2 球铰交互方式的机械结构设计

半人马机器人的主要结构如图2-1所示。机器人躯干通过背包与穿戴者进行连接。躯干用于安装电机、放置负载和电子硬件设备（如电脑控制器、惯性测量单元、力传感器和视觉传感器）。机械腿与地面接触，能够将负载重量传递到地面。相比于文献^[23]的半人马机械结构，本文提出两点主要改动。

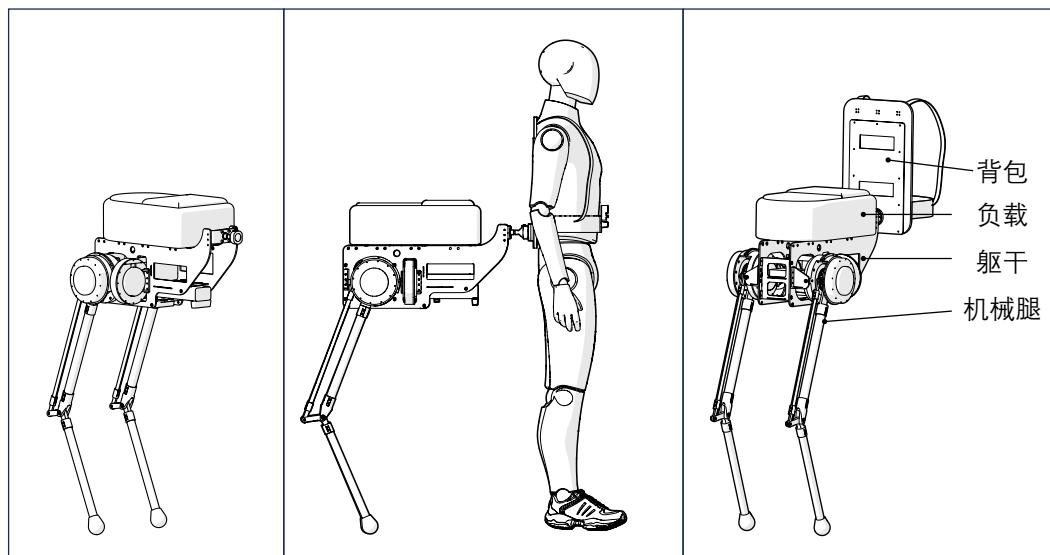


图 2-1 半人马机器人的主要结构

(1) 球形铰链作为物理人机交互方式。穿戴式机器人应当保留用户的运动范围^[53], 以避免干涉穿戴者躯干或肢体的独立运动。与外骨骼机器人^[54-55]相比, 外肢体机器人给穿戴者的四肢提供了自然活动的空间。但由于机器人会与用户的躯干存在物理交互^[9,22-23], 其仍可能干扰或限制人类躯干的运动。在足式机器人动态行走过程中, 机器人的左右足端相继与地面进行接触碰撞。这种周期性的冲击会产生机器人躯干的滚动、旋转运动。同样, 对于人类自然行走, 人体躯干角度(关于身体坐标的x,y和z轴)在每个步态周期内以大约5度的振幅进行摆动^[56]。所以, 机器人和穿戴者两者的行走都存在独立的躯干旋转运动。为了同时避免穿戴者的运动干扰到机器人的稳定性、机器人的周期运动影响人的躯干运动空间, 可以使用球形铰链关节^[57]将他们之间的旋转运动进行解耦。此外, 由于球形关节限制了两个刚体之间的三个平移自由度, 机器人的躯干前端的位置将与穿戴者的背板的位置绑定在一起。通过三个平移自由度的限制, 可以让穿戴者带领半人马机器人进行移动, 充分发挥穿戴者在人机系统中主动决策和导航的作用。球铰与穿戴者通过背包的方式连接。采取背包的是一种直接常见的背负方式, 既能将负重的重量传递到人的双肩与背部, 亦能解放穿戴者的上肢运动。

(2) 三自由度机械腿。半人马机器人可以看作一个浮动基座的多刚体系统, 其质心有六个自由度: 三个位置自由度 $\mathbf{r}_{IC} \in \mathbb{R}^3$ 和三个姿态自由度 $\Phi_{IC} \in SO(3)$ 。为了匹配系统的自由度, 应至少保证六个主动关节。为此, 两个机械腿分别拥有三个驱动关节, 三个电机可以作为系统的输入, 用于控制机器人的质心状态。另外, 为了匹配穿戴者的在平面的移动空间, 机器人足端应当能够在三维笛卡尔空间内进行运动。因此, 半人马机器人的机械腿的三个驱动关节分别为: 外展/内收髋关节、屈曲/伸展髋关节和屈曲/伸展膝关节。图2-2(c)为机器人右腿髋关节位置的结构示意图, 三个关节电机均位于躯干处。其中外展/内收髋关节电机驱动髋关节绕x轴旋转, 屈曲/伸展髋关节电机驱动大腿杆绕y轴运动。

为了减小腿部膝关节处的惯量大小, 采用四边形连杆结构以驱动膝关节的运动。图2-2(a)和(b)为机械腿的平行四边形连杆示意图。膝关节电机与髋关节电机同轴, 带动四连杆中“膝关节驱动杆”运动。如图2-2(b)所示, 根据四连杆的几何关系, 可计算电机角度 θ_1 , θ_2 与关节角度 θ_{hip} , θ_{knee} 的关系, 如下式:

$$\begin{cases} \theta_{\text{hip}} = \theta_1 \\ \theta_{\text{knee}} = \pi - (\theta_2 - \theta_1) - \theta_{\text{offset}} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中 θ_{offset} 是小腿杆与四连杆的固定偏置角度。大腿杆与小腿杆几何尺寸由穿戴者的身高确定。考虑髋关节与膝关节的关节极限值分别为: $\theta_{\text{hip}} \in [-1.03 + \pi, 1.03 + \pi] \text{ rad}$ 和 $\theta_{\text{knee}} \in [0, 1.3] \text{ rad}$, 当大腿杆和小腿杆长度分别为0.51与0.48 m时, 机

表2-1 结构的关键物理参数

名称	参数	数值
躯干质量	m_{torso}	22.4 kg
穿戴者背包	$m_{backpack}$	1.1 kg
躯干几何参数	(长, 宽, 高)	(0.62, 0.14, 0.18) m
机械腿质量	m_{leg}	2.6 kg
机械腿长度	(l_{thigh}, l_{shank})	(0.51, 0.48) m
球铰倾斜角	极限值	30°
球铰钢球尺寸	直径	0.22 m

机器人足端垂直方向的活动范围为 [0.79, 0.98] m。实验经验数据显示，当机器人躯干俯仰角度为零时，1.7 m 身高穿戴者对应的机器人髋关节高度约为 0.9 m。考虑机器人行走时足端的离地间隙为 0.08 m，机器人可以适应 0.11 m 的高度调节范围，对应穿戴者身高 1.65 至 1.76 m。同时，采用四边形连杆还有利于简化腿部结构动力学建模^[58]。表2-1展示了机器人的物理参数。

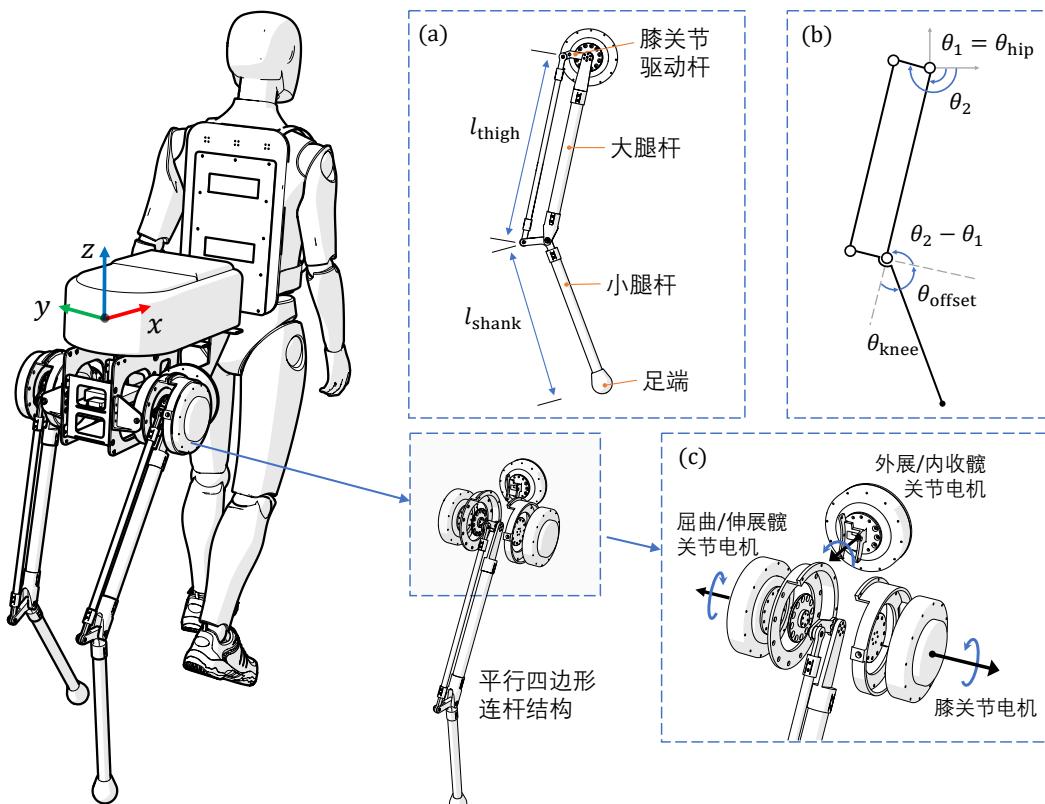


图2-2 半人马机器人机械腿
 (a) 机械腿结构示意图
 (b) 四边形连杆结构
 (c) 髋关节结构爆炸图

2.3 人机系统硬件方案

半人马系统的硬件系统如图2-3所示。机械腿的关节由3个电机(B1 Motor, Unitree Robotics, China)驱动。电机重量为1.74 kg, 能提供140 N·m峰值扭矩和93 RPM最大转速。系统使用两个惯性测量单元(MTi-630, Xsens, Netherlands):其中一个固定在机器人躯干中, 用于测量机器人的姿态角度、角速度和线加速度;另一个被用户佩戴在腰间, 用于检测人体的朝向角度。更具体地, 机器人躯干端的惯性测量单元的数据将作为状态估计器的输入^[47,59], 用作估计机器人在世界坐标系的位置、姿态、速度、角速度信息。而用户行走的朝向角度将用于生成机器人躯干的参考偏航角度, 以调节机器人位于用户的正后方。在背包和机器人躯干之间安装有六维力传感器(M3564F, Sunrise Instrument, China), 用于测量人机交互力。

机器人的主控制器软件布署于运行Ubuntu系统的板载电脑(NUC10i7FNH, Intel, USA)。控制器接收传感器的数据, 输出电机的位置、速度和扭矩指令。为帮助机器人能够在非平坦环境行走, 机器人配备了深度相机(Realsense D435, Intel, USA)。感知模块电脑(Ryzen7 4800H, Nvidia RTX 2060)接收相机检测位于机器人足端前方的点云并构建环境地形的高度信息。感知模块电脑与控制器电脑通过无线方式(Lightweight Communications and Marshalling, LCM)交换数据。

关节电机的电源使用14 S锂电池(8000 mAh, 58.8 V)。其他电子元件由6 S LiPo电池(5700 mAh, 25.2 V)或降压器驱动。



图 2-3 机器人硬件系统

2.4 行走控制软件框架

半人马机器人的软件系统框架如图2-4所示, 主要分为感知、运动规划和底层控制三部分。感知模块处理深度相机的点云数据, 生成环境的高程图^[38,40]。状态

估计器使用卡尔曼滤波器，融合惯性测量单元加速度与机器人足端位置速度，以估计机器人躯干的状态^[47,59]。本体感知利用电机编码器的数据，通过正运动学运算获取机器人实时足端位置与速度。运动规划部分使用步态规划器将机器人腿足运动划分为摆动相（Swing phase）与支撑相（Stance phase）。在摆动相，系统根据机器人状态与环境地形信息选择合适的落足点，然后通过样条插值生成足端摆动轨迹（ p_{foot} 与 v_{foot} ）。在支撑相，使用基于模型的控制器生成接触腿的地面支撑力 f_{ref} ，以调节机器人的躯干质心状态。底层控制采用全身运动控制^[25,31-32]（Whole-body control）。该控制方法对机器人全身的自由度进行优化，按层级顺序跟踪机器人的运动任务^[60]（如躯干姿态平衡任务、躯干位置控制任务、足端轨迹跟踪任务等）。最后，基于机器人的浮基动力学模型（Floating-base dynamics model），使用逆动力学方法求得最终的关节输出扭矩，确保动力学的一致性。

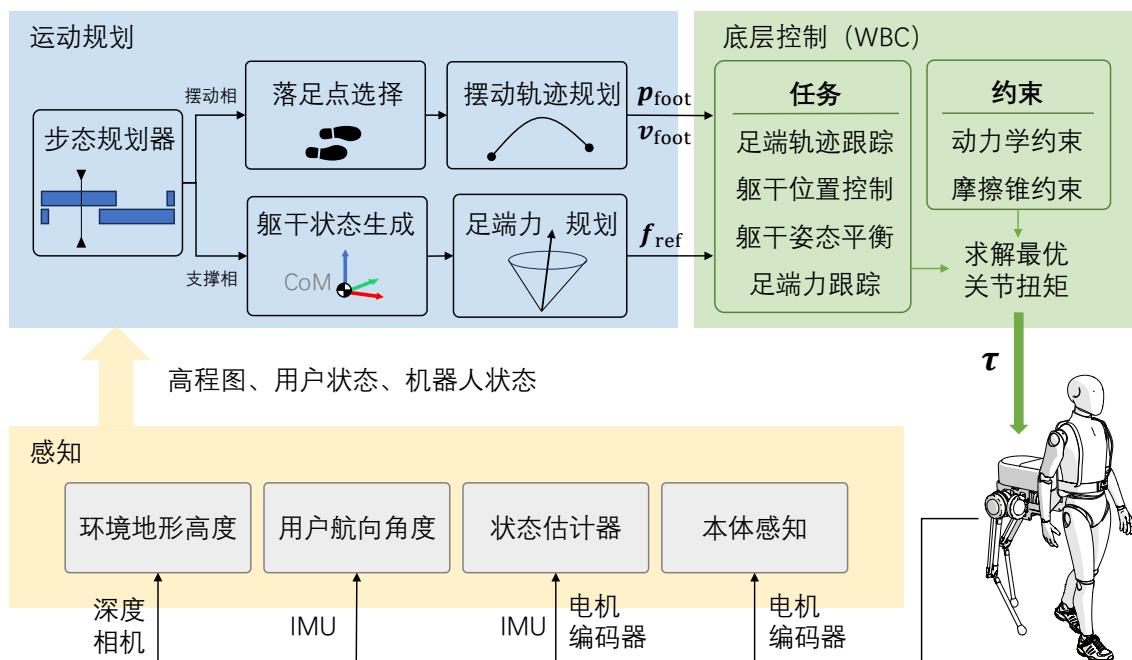


图 2-4 机器人软件系统框架

2.5 球铰对系统影响的评估

为了降低机器人对穿戴者的运动干扰，本文提出了球铰的物理人机交互方式以解耦人机系统之间的自由度。本节将从两个方面定量评估球铰交互方式的影响：1) 球铰交互方式下机器人对穿戴者的干扰和 2) 球铰交互方式对机器人的姿势平衡稳定性的影响。如图2-5所示，设计了两组对比实验：球铰人机交互方式（a）和固连方式（b）。受试者穿戴半人马机器人保持站立，而半人马机器人进行原地踏步（步态周期为 0.72 秒），两组实验各重复 3 次。

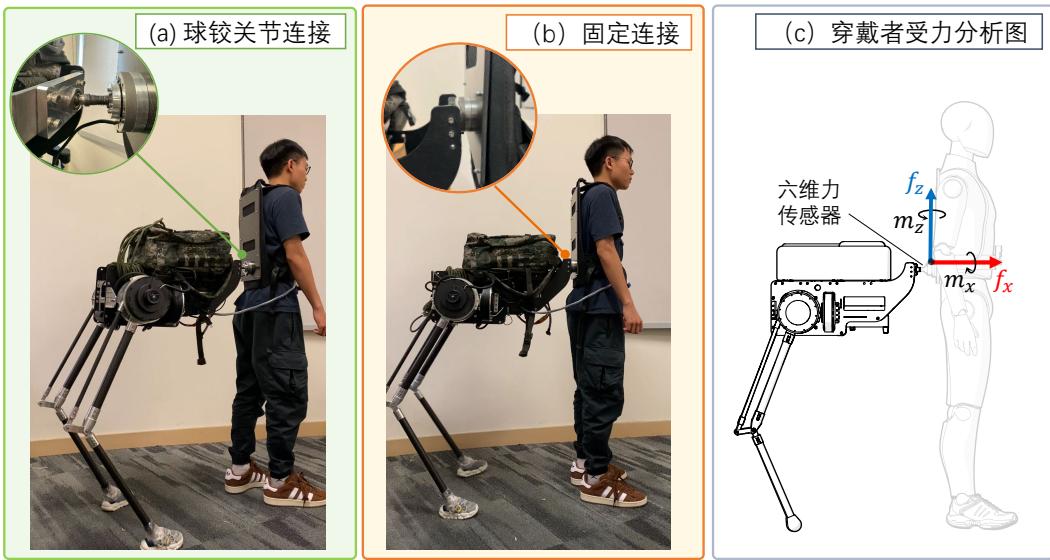


图 2-5 球铰交互与固结交互对比实验设计
(a) 球铰关节连接方式 (b) 固定连接方式 (c) 穿戴者受力分析图

本次实验假设：当机器人在穿戴者相反的方向产生拉力、推力或扭矩时，机器人会对用户产生干扰。因此，用人机交互力的大小来量化干扰量的幅度。具体而言，机器人对人体的线性和旋转干扰分别定义为人机交互线性力 f 和人机交互扭矩 m 的绝对平均值，如式 (2-2) 和式 (2-3)。

$$D_{\text{lin}} = \frac{1}{T} \int_0^T (|f_x| + |f_y| + |f_z|) dt \quad (2-2)$$

$$D_{\text{rot}} = \frac{1}{T} \int_0^T (|m_x| + |m_y| + |m_z|) dt \quad (2-3)$$

式中 D_{lin} —— 线性干扰量 (N)

D_{rot} —— 旋转干扰量 ($N \cdot m$)；

T —— 实验总时间 (s)；

f_i —— 沿 i 轴的人机交互线性力 (N)；

m_i —— 绕 i 轴的人机交互扭矩 ($N \cdot m$)。

上面两式将各个轴的力幅度累加起来，以衡量机器人对穿戴者的总干扰量。理想状态下，当人机系统内力接近零，穿戴者的行走不会受到来自半人马机器人的干扰影响，有利于提高用户的舒适度。穿戴背包与半人马躯干交互处安装的一个六维力传感器 (M3564F, Sunrise Instrument, China) 用于测量人机交互力，图2-5 (c) 展示的受力分析示意图，其中 f_x 的正方向与穿戴者受到往前的推力方向相同； f_z 的正方向为穿戴者背部受到的竖直向上的力； f_y 的正方向垂直于纸面向里。

对于机器人的姿态平衡性，随着机器人躯干倾斜角度的增加，其稳定性会降低，使其更容易跌倒。因此，本实验采用欧拉角的误差作为衡量指标。具体而言，将姿态不稳定性定义为下式：

$$P_{\text{instability}} = \frac{1}{T} \int_0^T (|e_{\text{roll}}| + |e_{\text{pitch}}| + |e_{\text{yaw}}|) dt \quad (2-4)$$

式中 $P_{\text{instability}}$ —— 姿态不稳定性 (rad)；

e —— 角度误差值 (rad)。

与干扰量（公式2-2和式2-3）的评估方法类似，姿态不稳定性定义为平均绝对角度误差。在人机半人马系统移动任务中，可以将姿态角度的参考值设置为 $\Phi^{\text{des}} = [0 \ 0 \ \varphi_{\text{human}}]^T$ 。即让机器人保持姿态水平不倾斜，同时躯干位于与穿戴者的正后方，航向角度与穿戴者角度对齐。机器人的姿态欧拉角由固定在机器人躯干上的惯性测量单元（MTi-630, Xsens, Netherlands）来记录。

最终的实验结果如下：固定关节和球铰关节的线性扰动量 D_{lin} 分别为 72.8 和 60.7 N，旋转扰动 D_{rot} 分别为 9.9 和 2.2° N · m，姿势不稳定性 $P_{\text{instability}}$ 为 5.2 和 9.4°。两组实验对比而言，使用球铰关节减少了穿戴者的线性和旋转扰动量分别为 16.6% 和 78.1%，同时增加了机器人 79.6% 的姿态不稳定性。

表2-2列出了各个指标的（三次实验）平均值。根据球铰的物理特性，它限制了两个刚体之间的线性平移运动，因此，人机交互线性力受到的影响较小。而对人机交互力矩而言，球铰显著地使其各个轴的数据都减小了，有利于降低了机器人对用户的干扰扭矩。与此同时，球铰方式使机器人的姿态稳定性下降，主要的差异在偏航角（yaw）的控制上。

表 2-2 人机交互力/扭矩与姿态角度误差在两种不同交互方式下的对比

	线性力 [N]			扭矩 [N · m]			姿态角误差 [deg]		
	f_x	f_y	f_z	m_x	m_y	m_z	e_{roll}	e_{pitch}	e_{yaw}
固定连接	8.1	10.8	53.9	2.6	6.1	1.3	1.8	2.0	1.4
球铰连接	7.9	7.2	39.6	0.1	1.8	0.3	1.8	2.1	3.9
± 增长率 [%]	-2	-33	-27	-96	-71	-75	-2	+6	+181
T-test	n.s.	n.s.	n.s.	***	**	**	n.s.	n.s.	*

双样本 T 检验统计分析: n.s. (无显著差异),
 $*(0.005 \leq p < 0.01)$, $**(0.001 \leq p < 0.005)$, $***(p < 0.001)$.

图2-6 (a)-(c)展示了其中一组对比实验的详细数据。其中 (a) 和 (b) 图分别是人机交互线性力 f 和人机交互扭矩 m 随机器人步态周期中的变化情况。一个步

态周期以机器人左脚接触地面开始，以左脚再次接触地面结束。从图中观察到，在球铰关节条件下，线性人机交互力受到的影响较小，而交互力矩显著减小了。(c)图是姿态角随时间变化的曲线。球铰让航向角度的控制误差变大了。由上述数据可推断，刚性固定的人机交互连接方式有助于稳定机器人，但有可能会牺牲穿戴者的舒适度。相比之下，使用球面关节可以显著消除了对人体躯干的旋转干扰。由于人机间的旋转自由度是解耦的，机器人不能依赖穿戴者的帮助，需要自行调节其姿态角度。因为机器人的髋部或脚踝处没有偏航方向的驱动关节，偏航角主要由与地面相切的足端力来调节，消除偏航误差也需要更长的时间，所以航向角的控制误差会有较明显的差异。然而，尽管机器人的控制误差增加了，但仍在可接受的范围内（平均误差角度 $|e_{yaw}| = 3.9^\circ$ ）。

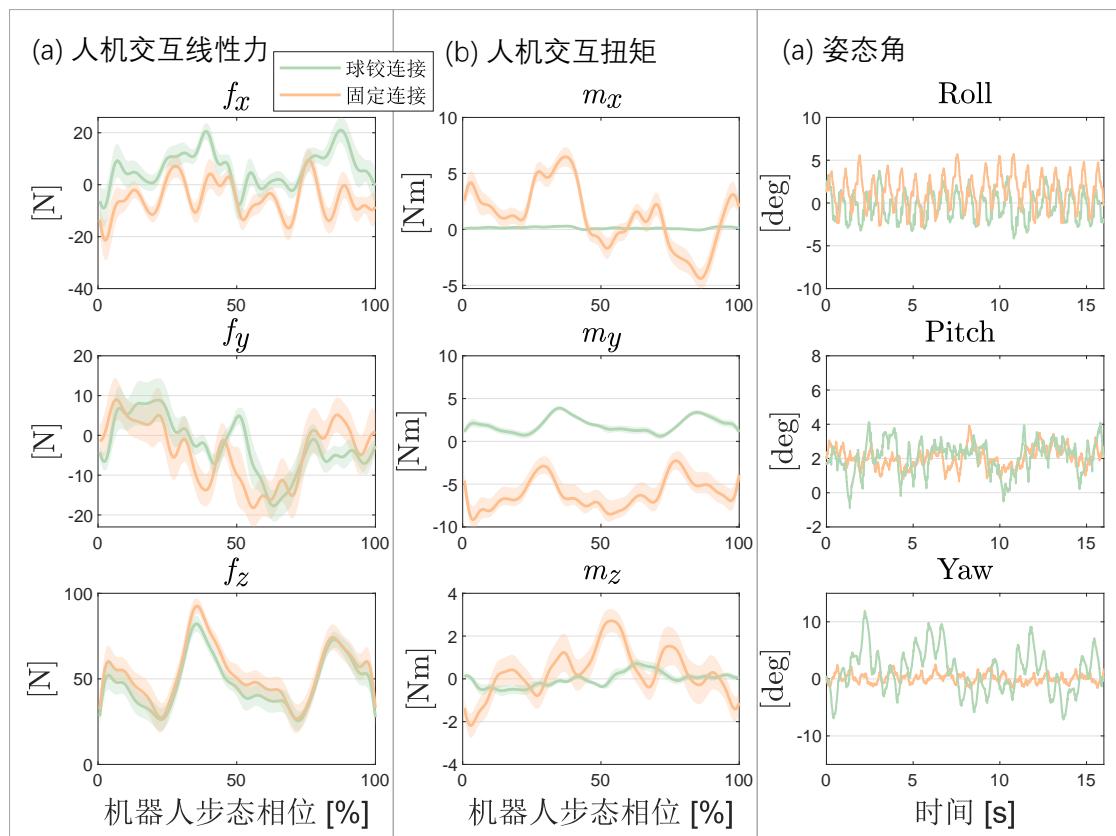


图 2-6 球铰交互与固结交互对比实验结果
(a) 人机交互线性力 (b) 人机交互扭矩 (c) 机器人姿态角

实验结果可以启发人机交互方式的设计思路。例如，可以通过改变关节的物理特性（刚度或阻尼）来寻求机器人平衡性和用户舒适度之间的最佳均衡。另外，也可以设计主动旋转的球铰来控制人机交互力或角度值，以实现更加自主的人机交互方式。

2.6 人机系统的解耦运动实验

为进一步探究球铰交互的优势，本节实验评估穿戴者与半人马机器人交互过程的解耦运动的自由度。在本次实验，受试者执行一系列躯干运动^[61]，包括：侧屈、扭转、后向伸展、前向屈曲，如图2-7所示。实验过程中机器人原地踏步，保持姿态动态平衡 ($[\phi^{\text{ref}}, r_z^{\text{ref}}] = [0, 0, 0, 0.92]$)。实验重复了三次，受试者连续进行了三组躯干运动，人体腰部的惯性测量单元记录实验过程的躯干角度变化。



图 2-7 穿戴者与半人马机器人交互过程进行的躯干运动

三次实验数据（均值 \pm 方差）如下：受试者的躯干左侧屈角度为 $-21.6 \pm 0.8^\circ$ ，右侧屈角度为 $22.7 \pm 2.5^\circ$ ，躯干左扭转角度为 $30.3 \pm 3.1^\circ$ ，右扭转角度为 $-29.0 \pm 3.1^\circ$ ，躯干前向屈曲角度为 $24.1 \pm 1.4^\circ$ ，后向伸展角度为 $-14.5 \pm 1.4^\circ$ 。其中第二次实验结果如图2-8所示。图2-8 (a) 展示了穿戴者躯干运动的幅度： $\pm 21.7^\circ$ 的躯干侧屈运动， $\pm 28.2^\circ$ 的躯干扭转运动， 23.2° 的前向屈曲和 -13.0° 的后向伸展运动。图2-8 (b) 展示半人马机器人的躯干姿态角度值：其横滚角、俯仰角和偏航角分别在 $-4.9 \sim 5.4$ 、 $-3.8 \sim 9.0$ 和 $-16.3 \sim 19.0$ 度的范围内变化。球铰交互方式使人机间的旋转自由度解耦，机器人在运动期间可给予穿戴者提供一定程度的躯干旋转灵活性。

2.7 本章小结

本章介绍了半人马的机械结构、硬件系统以及软件控制框架。相比于先前的半人马机器人结构，本章提出了两个机械结构进行改进：球铰物理人机交互以及

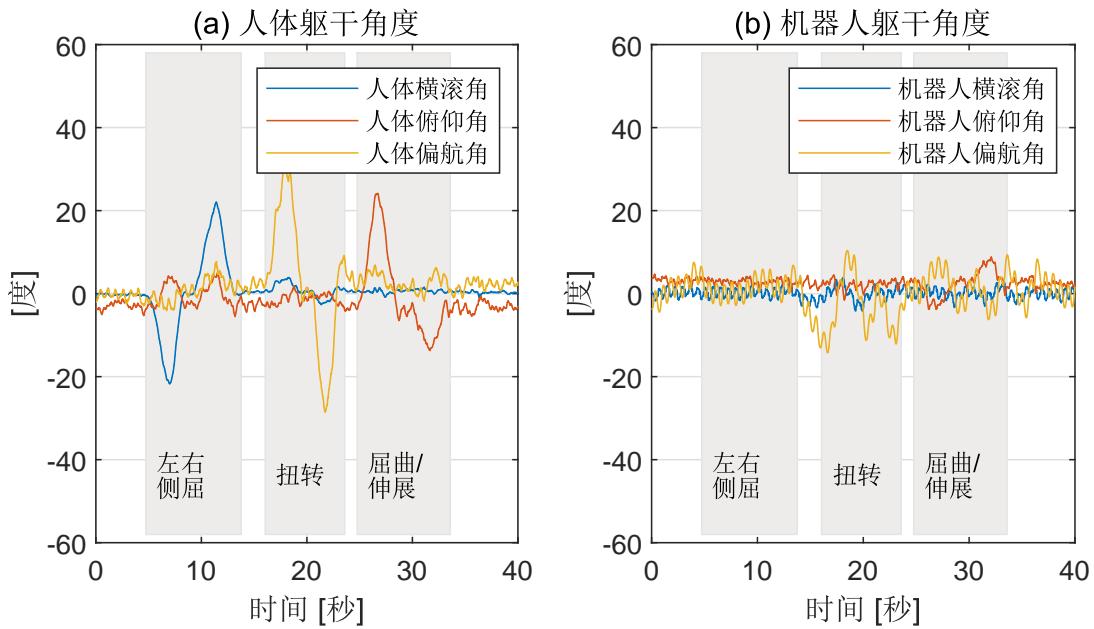


图 2-8 人机解耦运动实验结果

(a) 穿戴者躯干角度值 (b) 机器人躯干姿态角度值

三自由度机械腿。其中球铰交互可以解耦人机间的旋转运动，三自由度机械腿能让机器人足端在笛卡尔三维空间内运动，使得机器人能够同时在矢状面和横切面进行行走。本章搭建了机器人的硬件系统，机器人的关节由准直驱电机提供动力。传感器包含惯性测量单元、六维线性力/扭矩传感器以及深度相机。其中两个惯性测量单元分别检测机器人的姿态以及穿戴者的朝向角度，六维力传感器来用测量人机交互力，深度相机可以用来实时获取当前人机系统的环境点云，为后续非平坦地形的行走提供环境地图信息。最后，本节还介绍了机器人的行走控制软件框架。软件包括感知、运动规划与底层控制三个核心部件。

实验数据展示球铰的使用有利于降低机器人运动对穿戴者的干扰力：相比于固定连接的交互方式，球铰降低了 78.1% 的人机交互扭矩和 16.6% 的线性力。同时，球铰交互方式解耦了人机之间的旋转运动，实验表明机器人能提供用户独立于机器人的躯干运动自由度：包括躯干侧屈、扭转、前向屈曲和后向伸展运动。本章完成了对半人马机器人软硬件系统的搭建，为后续章节的算法的开发与部署提供了样机平台。

第3章 基于降阶动力学模型的平衡控制器

3.1 引言

半人马机器人是新型的穿戴式下肢系统，其拥有独立的躯干与机械腿。在人机行走场景下，半人马机器人^[23]或下肢外肢体机器人^[9,22,24]类似于由人类穿戴者牵引的双足负重机器人。而足式系统行走具有多关节自由度、系统非线性、欠驱动的特点，其行走过程的动力学状态是不稳定的^[62]。因此，对于足式系统负重行走任务，保证躯干动态平衡是重要的需求。在先前的半人马机器人控制中^[23]采用负反馈的方式，根据机器人躯干俯仰角的误差调节腿的垂直方向上的高度。但由于该方法是基于运动学（位置）的控制，其仅能保证系统处于静态平衡而非动态平衡^[25]，阻碍了人机系统进行动态行走。此外，先前的平衡控制器并未考虑侧倾角、偏航角和躯干高度这三个状态。如果上述机器人状态由人类通过物理接触来调节，可能会增加人类与机器人行走时的工作负荷。为了解决上述问题并实现行走动态平衡，本章将为半人马机器人设计基于动力学模型的控制器。其中建模和控制方法来源于自主足式机器人文献^[29-30,63]。同时，为了满足半人马系统的特定需求，本章对动力学模型进行修改：消除水平位置控制变量，因为它们应该由穿戴者决定；识别半人马系统中的人机交互力。

本章将基于降阶动力学模型为半人马系统设计姿态平衡控制器。其中动力学模型建立系统状态加速度与外界接触力的关系。在控制流程上，先计算机器人支撑腿与外界的接触力，然后采用电机力矩控制来产生目标的接触力，以完成对机器人状态的调节。

本章内容安排如下：第3.2节推导系统的动力学模型，3.3节使用模型预测控制求解机器人足端力，3.4节利用全身运动控制计算关节电机的输出扭矩，3.5节进行多名受试者的半人马系统的平衡行走实验，3.6节评估半人马机器人与传统背负方式的负重效果。

3.2 含人机交互力的降阶动力学模型

保证机器人行走的平衡稳定（即不摔倒），是足式系统的首要任务。机器人稳定性有多种衡量指标^[62]。一个直观的稳定裕度衡量指标是质心（Center of Mass, CoM）投影点距离支撑多边形边缘的距离。但由于该评价指标是基于静力学推导而来，其只能衡量静态平衡^[64]，适用于缓慢的足式系统运动。为衡量足式系统的

动态稳定性，研究者提出零力矩点（Zero Moment Point, ZMP）的概念^[65]，其定义为“地面反作用力力矩的水平分量为零的位置点”。为避免机器人摔倒，应该保证ZMP远离支撑多边形的边缘。但对于行走的点足式机器人（如半人马机器人）来说，其支撑多边形往往降维为点或线，导致ZMP总处于支撑多边形边缘，难以衡量机器人的平衡稳定程度。对于大部分足式系统，我们期望机器人在行走过程中保持水平直立的姿态^[66]。因为机器人躯干姿态角度越大，机器人跌倒的概率越高。本文将采用躯干姿态角度的大小来衡量半人马机器人平衡性。机器人需要通过足端与外界接触来调节自身躯干姿态角度，进而保证系统的平衡稳定。

半人马机器人可看作一个浮动基座系统，其基座的总自由度包括在世界坐标系的位置 $\mathbf{r}_{IC} = [r_x \ r_y \ r_z]^\top \in \mathbb{R}^3$ 和姿态 $\Phi_{IC} = [\gamma \ \theta \ \varphi]^\top \in SO(3)$ 。一方面，半人马机器人应该能够维持自身姿态稳定并给负载提供支撑力；另一方面，我们期望穿戴者能自由任意地在环境中运动。为了解耦人机系统，我们对人机自由度在人和机器人之间分配：机器人负责维持其姿态 Φ_{IC} 和高度 r_z 稳定；而使系统的平面位置 r_x 和 r_y 由穿戴者任意决定，如图3-1所示。

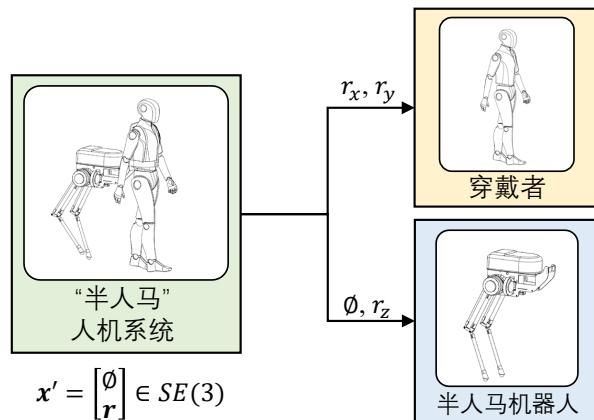


图 3-1 半人马人机系统自由度解耦

半人马机器人通过足端与地面的接触来调节机器人状态，以保证机器人的躯干的姿态稳定。因此需要对机器人进行动力学建模，采用基于模型的控制方法来求解机器人的系统输入（足端地面反力）。为确保动力学模型的高效性和简洁性，本文基于以下假设对半人马系统进行建模：

- 1) 机器人躯干的水平位置自由度由穿戴者决定；
- 2) 整个机器人系统简化成一个位于躯干位置的刚体，机械腿的质量忽略不计；
- 3) 人机交互处的球铰无摩擦与阻尼。
- 4) 用户交互时对系统的影响可以用静态力来近似。

假设 1 用于实现自由度分配，此后可以在机器人运动方程中将水平位置变量略去。

假设2用于降低多关节系统的复杂度，有助于后续将动力学模型线性化。该假设成立的原因是机械腿的质量（2.65 kg）仅占机器人总质量的9.8%，半人马系统的主要重量和转动惯量位于机器人躯干。进行该简化后，可以将机器人的动力学方程线性化，有利于在线快速求解机器人的系统输入。假设3可以将人与系统之间的作用简化建模为一个（扭矩为零的）线性力。其他建模未考虑的因素可看作系统外部的干扰，而这些干扰可以通过设计反馈控制器来进行弥补。

根据以上假设，可将半人马机器人建模为降阶的单刚体模型^[28-29,63]，且该刚体受到机器人足末端力、人机交互力的影响，如图3-2(b)所示。根据牛顿欧拉法，其动力学方程如下：

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{r}_h \times \mathbf{f}_h + \sum_{i=1}^2 \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \quad (3-1)$$

$$m\ddot{\mathbf{r}}_z = (\mathbf{f}_h + \sum_{i=1}^2 \mathbf{f}_i - m\mathbf{g}) \cdot \hat{\mathbf{e}}_z \quad (3-2)$$

式中 $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ —— 机器人躯干质心的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；

$\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^3$ —— 机器人躯干质心相对于世界坐标系的角速度 (rad / s)；

$\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_h \in \mathbb{R}^3$ —— 足端位置向量，人机交互处的位置向量 (m)；

$\mathbf{f}_i, \mathbf{f}_h \in \mathbb{R}^3$ —— 足端接触力，人机交互力 (N)；

$m \in \mathbb{R}^1$ —— 机器人躯干质心质量 (kg)

$\mathbf{g} \in \mathbb{R}^3$ —— 重力加速度向量 (m/s^2)

上式所有变量均在世界坐标系 $\{I\}$ 表示，为公式的简洁性，省略了坐标系的标示。下变量下标 $(\cdot)_i$ 表示左、右足端位置； $(\cdot)_h$ 表示人机交互处的位置。 $\hat{\mathbf{e}}_z = [0 \ 0 \ 1]^\top$ 为 z 轴（重力垂直方向）的单位向量。公式(3-2)右边使用 $\hat{\mathbf{e}}_z$ 点积运算将机器人受到的合力投影到了 z 方向，省略了方程中关于人机系统水平位置的变量 r_x 和 r_y ，因而得到的动力学模型是降阶的。

用户（穿戴者）对半人马机器人的影响被建模为一个线性的人机交互力 \mathbf{f}_h 。相比于机器人的足端地面力， f_i ，该三维力是欠驱动的，不能作为系统的输入，但是与机器人足端地面反力作用一致。为了获取主导的穿戴者对机器人的影响，本文取一个恒定值作为人机交互力，即 $\mathbf{f}_h \equiv \mathbf{F}_h$ 。值得指出的是， \mathbf{f}_h 的准确值可以通过式(3-1)和(3-2)理论计算求解；然而，由于在样机实验中难以获取精确的加速度 ($\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 和 $\ddot{\mathbf{r}}$) 与地面接触力 (\mathbf{f}_1 和 \mathbf{f}_2) 的大小，会导致估计出来的噪声过大。若将该时变的、不准确的人机交互力代入到模型中，可能会导致系统发散且不稳定。因此，本文采用准静态模型^[67]，推导出一个恒定人机交互力 \mathbf{F}_h 。我们考虑一个静态

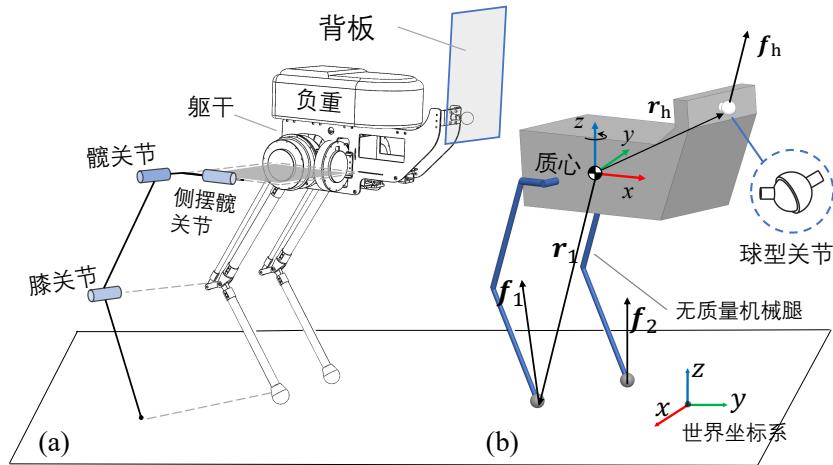


图 3-2 半人马系统示意图
(a) 结构组成示意图 (b) 简化动力学模型

场景，即穿戴者背着机器人静止站立，人机系统处于静止状态，机器人躯干重量均匀在左右两足端分配，此时 $\mathbf{f}_{1,0} = \mathbf{f}_{2,0} = \mathbf{f}_{i,0}$ 。机器人的两个足端位于各自的默认位置（髋关节正下方 0.9 米的位置）。假设机器人处于力学平衡状态，将式(3-1)和(3-2)的左边设为零，可以得到系统的准静态模型，如下式：

$$[\mathbf{r}_h]_{\times} \mathbf{f}_h + ([\mathbf{r}_{1,0}]_{\times} + [\mathbf{r}_{2,0}]_{\times}) \mathbf{f}_{i,0} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (3-3a)$$

$$\mathbf{f}_h + 2\mathbf{f}_{i,0} - m\mathbf{g} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (3-3b)$$

将上面两个方程取逆，可以计算静态的人机交互力 $\mathbf{f}_h(\mathbf{F}_h)$ ：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{i,0} \\ \mathbf{F}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{1}_3 & \mathbf{1}_3 \\ [\mathbf{r}_{1,0}]_{\times} + [\mathbf{r}_{2,0}]_{\times} & [\mathbf{r}_h]_{\times} \end{bmatrix}^{\dagger} \begin{bmatrix} -m\mathbf{g} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

式中 $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ —— 三维零向量；

$[\mathbf{r}]_{\times}$ —— \mathbf{r} 向量的反对称矩阵；

$[\cdot]^{\dagger}$ —— 矩阵的伪逆。

根据式(3-2)到(3-4)，机器人被建模为一个含人机交互力的降阶动力学模型。该模型将结合模型预测控制，求解机器人的期望足端地面反力，以调节机器人的状态到目标值。

3.3 基于模型预测控制的足端力求解

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)^[68] 由于具有最优化、基于模型、能处理非线性系统和考虑约束条件等特点，在机器人控制领域取得了广泛而成功的应用。足式机器人通过周期性的足端接触、足端摆动来产生移动，属于混合动力

学系统^[69]。而 MPC 能够根据模型推演未来有限时间段的系统状态变化情况，这种系统前瞻性的性质，使得控制器考虑到未来足式系统状态切换情况，有利于保求数大范围的系统输入轨迹。同时，足式系统的足端力应满足单边约束和摩擦锥约束，以确保足端力是有效输入、保证足端不与地面产生打滑。MPC 能将上述约束编码为线性不等式约束，并通过优化的方法求取可行的足端力。

考虑到足式机器人非线性与多自由度的系统会增大 MPC 求解的难度，本节将参考文献^[31,47]，利用单刚体动力学模型的性质，推导线性的系统状态空间方程，并最终通过二次规划（Quadratic Programming, QP）来求解最终的系统输入。

半人马机器人需要负责控制其躯干姿态和高度。将状态变量定义为 $\mathbf{x} = [\Phi^\top \ r_z \ \boldsymbol{\omega}^\top \ \dot{r}_z]^\top \in \mathbb{R}^8$ ，其中 $\Phi = [\gamma \ \theta \ \varphi]^\top \in SO(3)$ 是以 (zyx 轴旋转顺序的) 欧拉角表示的机器人质心姿态； $\boldsymbol{\omega}$ 是机器人质心在惯性坐标系下的角速度； r_z 和 \dot{r}_z 表示机器人质心高度及其变化率。机器人足端力由电机驱动控制，因而可以将其定义为系统输入 $\mathbf{u} = [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2]^\top \in \mathbb{R}^6$ 。动力学方程 (3-1) 是非线性的，这增大了求解足端力的复杂度。为此，将公式左边近似为：

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) = [\boldsymbol{\omega}]_\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} \approx \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} \quad (3-5)$$

该假设忽略了旋转刚体的进动和章动的影响^[30]，得到了欧拉角加速度 $\boldsymbol{\omega}$ 与足端力的线性关系。最终可以将半人马机器人的动力学方程写成以下状态空间模型：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi \\ r_z \\ \boldsymbol{\omega} \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{E}_R^{-1}(\Phi) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 1} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{1}_{1 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 1} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ r_z \\ \boldsymbol{\omega} \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}^{-1}[\mathbf{r}_1]_\times & \mathbf{I}^{-1}[\mathbf{r}_2]_\times \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 1} \\ \mathbf{I}^{-1}[\mathbf{r}_h]_\times \mathbf{f}_h \\ \hat{e}_z \cdot (\frac{\mathbf{f}_h}{m} - \mathbf{g}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-6)$$

式中 $\mathbf{1}_{n \times n}$, $\mathbf{0}_{m \times n}$ —— 对应维度的单位向量与零向量；

$\mathbf{E}_R(\Phi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ —— 世界坐标系下角速度与欧拉角变化率的转换矩阵，满足

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{E}_R(\Phi)\dot{\Phi}.$$

具体地，转换矩阵 $\mathbf{E}_R(\Phi)$ 可表述为^[70]：

$$\mathbf{E}_R(\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \cos(\theta) \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

该矩阵的行列式 $\det(\mathbf{E}_R) = -\cos(\theta)$, 表明当机器人质心俯仰角 $\theta \neq \frac{\pi}{2} + k\pi, \forall k \in \mathbb{Z}$ 时, 上式是(非奇异)可逆的。由于机器人躯干俯仰角的工作范围为 $\pm \frac{\pi}{2}$, 因此公式(3-6)中的状态转移矩阵总是存在的。

方程(3-6)可简化为式(3-8)。从形式上, 半人马机器人的动力学信息可由时变状态空间模型(time-varying state-space model)来表示。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\Phi)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{r}_{1,2})\mathbf{u} + \mathbf{d}(\mathbf{r}_h, \mathbf{f}_h). \quad (3-8)$$

式中 $\mathbf{A}(\Phi)$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}_{1,2})$ 和 $\mathbf{d}(\mathbf{r}_h, \mathbf{f}_h)$ 分别对应系统的转移矩阵、输入矩阵和干扰项。 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^8$ 为半人马机器人躯干的状态变量。通常地, 对于浮动基座系统(floating base system)的控制, 会选取12维的状态变量 $\mathbf{x}' = [\Phi^\top \ \mathbf{r}^\top \ \boldsymbol{\omega}^\top \ \dot{\mathbf{r}}^\top]^\top \in \mathbb{R}^{12}$ 以调节基座的线动量和角动量^[47,63]。与12维系统状态模型相比, 半人马躯干的控制状态去除了水平位置变量(r_x 和 r_y), 可看作一个降阶的单刚体动力学模型。使用该模型具有以下优势:

- 1) 降低半人马机器人对穿戴者的干扰。在人机交互处, 旋转式的干扰交互力(rotational disturbance)通过球铰方式大程度地减小了; 为进一步避免机器人产生与穿戴者相矛盾的平移运动(translation disturbance), 水平自由度 r_x 和 r_y 的控制应该由穿戴者来决定。
- 2) 为机器人躯干和负载提供支撑力。由于机器人质心高度 r_z 是唯一包含重力影响 g 的物理量, 因此控制状态变量中保留 r_z 是必不可少的。
- 3) 保证系统的可控性。与具有12个驱动关节的四足机器人^[47,52,71]和大部分具有主动驱动踝关节的双足机器人^[72-73]相比, 半人马机器人仅有6个主动驱动关节, 难以保证对状态 $\mathbf{x}' \in \mathbb{R}^{12}$ 的可控性。
- 4) 缩减优化时间。变量较少的状态空间模型降低了系统的维度, 从而显著缩短优化求解时间, 提高模型预测控制器的控制频率。

在人机系统中, “让穿戴者和机器人分别控制不同的自由度”的策略与共享控制的思想^[24]类似。文献^[24]先将穿戴者与机器人控制的自由度以不同的子空间表示, 然后让机器人控制器中“穿戴者控制子空间”的误差置零。而本文的方法通过降维的方式处理该自由度, 能缩短获取模型参数的运算时间。根据系统状态控制模型(式3-8), 采用模型预测控制求解机器人足端力:

$$\min_{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}} \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{x}_i^{\text{des}} - \mathbf{x}_i\|_Q + \|\mathbf{u}_i\|_R \quad (3-9a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{i+1} + \mathbf{d}_d \quad (3-9b)$$

$$\mathbf{A}_{\text{ineq}} \mathbf{u}_i \leq \mathbf{b}_{\text{ineq}} \quad (3-9c)$$

式中 $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^6$ —— 第 i 步控制周期时左腿和右腿的足端地面反力 (N)
 $N \in \mathbb{R}^1$ —— 模型预测控制器的预测步长;
 $\mathbf{Q}, \mathbf{R} > 0$ —— 分别为惩罚状态误差和输入幅值的权重矩阵, 均为正定矩阵;
 $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{d}_d$ —— 离散形式的系统转移矩阵、输入矩阵和干扰项。
 $\mathbf{A}_{\text{ineq}}, \mathbf{b}_{\text{ineq}}$ —— 不等式约束的矩阵与最大值向量。

式 (3-9b) 表示离散系统动力学, 系统矩阵和输入矩阵均使用前向欧拉规则进行离散化: $\mathbf{A}_d = \mathbf{A} + \mathbf{1}_3 \Delta t$, $\mathbf{B}_d = \mathbf{B} \Delta t$, $\mathbf{d}_d = \mathbf{d} \Delta t$, 其中 Δt 为控制器的运动时间间隔。足端地面反力需要满足摩擦锥约束以避免机器人足端与地面打滑。为了简化表达, 摩擦锥可以用摩擦金字塔来进行线性化^[32,60,63]。因而, 线性不等式约束 (3-9c) 可以表述为:

$$\begin{bmatrix} \mu & 0 & -1 & \mu & 0 & -1 \\ -\mu & 0 & -1 & -\mu & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_i \leq \begin{bmatrix} 0 & 0 & f_z^{\max} & 0 & 0 & f_z^{\max} \end{bmatrix}^\top \quad (3-10)$$

式中 $\mu \in \mathbb{R}^1$ 为摩擦系数。 $f_z^{\max} \geq 0$ 为垂直足端力的最大值。在支撑相时, f_z^{\max} 可由电机扭矩的最值估算得到; 在摆动相时, 该数值为 0, 以确保接触力的单边约束。

由于优化问题 (3-9) 是由二次目标函数与线性约束来描述的, 它可以进一步转化为二次规划问题。首先, 线性模型预测控制的状态空间方程的紧凑的形式可表述为:

$$X = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}_0 + \bar{\mathbf{B}}U + \bar{\mathbf{E}}\mathbf{d}_d \quad (3-11)$$

其中

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \mathbf{A}_d^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_d^N \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_d \mathbf{B}_d & \mathbf{B}_d & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \mathbf{A}_d^{N-1} \mathbf{B}_d & \mathbf{A}_d^{N-2} \mathbf{B}_d & \cdots & \mathbf{B}_d \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_N \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbb{I} \\ \mathbf{A}_d + \mathbb{I} \\ \mathbf{A}_d^2 + \mathbf{A}_d + \mathbb{I} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_d^{N-1} + \mathbf{A}_d^{N-2} + \cdots + \mathbb{I} \end{bmatrix}.$$

方程 (3-9) 可表述为下式二次规划问题:

$$\begin{aligned} \min_U \quad & \frac{1}{2} U^\top \mathbf{H} U + \mathbf{q}^\top U \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}_{\text{ineq}} U \leq \mathbf{b}_{\text{ineq}} \end{aligned} \quad (3-12)$$

表3-1 全身运动控制的任务定义

任务	表达式
躯干姿态平衡任务	$\dot{\Phi}_{IC}^{des} = [\mathbf{1}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}] \dot{\mathbf{q}}$
躯干位置控制任务	$\dot{\mathbf{r}}_{IC}^{des} = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{1}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}] \dot{\mathbf{q}}$
足端轨迹跟踪任务	$\dot{\mathbf{v}}_{foot}^{des} = [\mathbf{0}_{6 \times 3} \quad \mathbf{0}_{6 \times 3} \quad \mathbf{J}_c] \dot{\mathbf{q}}$

其中 $\mathbf{H} = \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{B}} + \mathbf{R}$, $\mathbf{q} = \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{Q} (\bar{\mathbf{A}} \mathbf{x}_0 - X_{ref} + \bar{\mathbf{E}} \mathbf{d}_d)$ 。可以借助优化求解器（例如 qpOASES^[74]、OSQP^[75]或 qpSwift^[76]）来获取模型预测控制的结果 $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_0 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \dots \mathbf{u}_{n-1}]^T$ 。根据模型预测控制的思想，只取第一步的结果作为系统的输入，即 $\mathbf{f}_{mpc} = \mathbf{u}_0$ 。

3.4 基于全身运动控制的关节扭矩计算

全身运动控制^[31-32,77]将机器人多个任务描述成等式或不等式方程，并在考虑机器人系统完整的多刚体动力学模型下计算准确的关节扭矩指令。本节将利用全身运动控制生成电机扭矩，在追踪模型预测控制的期望足端力的同时完成以下任务：平衡躯干姿态、控制躯干高度、跟踪足端轨迹。

半人马机器人的浮动基座多刚体动力学模型运动方程^[78]可表达为式(3-13)。机器人的控制任务由 $\{\dot{\mathbf{x}}_i^{des}, \mathbf{x}_i^{des}, \mathbf{J}_i\}$ 定义。其中前两项为任务的目标速度、位置；最后一项为任务变量映射到系统状态变量的雅可比矩阵，满足方程 $\dot{\mathbf{x}}^{des} = \mathbf{J}_i \mathbf{q}$ 与 $\ddot{\mathbf{x}}^{des} = \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_i \ddot{\mathbf{q}}$ 。半人马各控制任务的表达式如表3-1所示。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathcal{F} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \mathbf{J}_c^T \mathbf{f}_c \quad (3-13)$$

式中 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ —— 惯性矩阵, 科氏力矩阵, 重力项;

$\mathbf{q} = [\Phi_{IC}^T \quad \mathbf{r}_{IC}^T \quad \dot{\mathbf{q}}_j^T]^T$ —— 包括基座自由度与关节自由度的状态变量;

$\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6$ —— 关节扭矩 ($N \cdot m$);

$\mathcal{F} \in \mathbb{R}^6$ —— 基座受到的人机交互线性力 (N) 与扭矩 ($N \cdot m$);

$\mathbf{J}_c \in \mathbb{R}^{6 \times 12}$ —— 足端雅可比矩阵;

$\mathbf{f}_c \in \mathbb{R}^6$ —— 足端线性力 (N)。

全身运动控制的总体流程如图3-3所示。首先根据任务目标计算系统状态的期望加速度 $\ddot{\mathbf{q}}^{des}$ 。为实现不同任务的优先级，可使用零空间投影法进行迭代计算^[31]，以获取最终的期望加速度（见算法3-1）。然后基于多刚体动力学模型（方程3-13）使用逆动力学来获取最终的关节扭矩指令 $\boldsymbol{\tau}$ 。

算法3-1 零空间投影法迭代计算期望状态加速度

Data: n_T Tasks T_1, T_2, \dots, T_n ;
Result: Desired acceleration \ddot{q}^{des} ;

```

1  $\ddot{q}^{cmd} \leftarrow \mathbf{0}_{12 \times 1}$ ;                                ▷ 输入  $n_T$  个控制任务
2  $N \leftarrow \mathbf{1}_{12 \times 12}$ ;                                ▷ 输出期望的状态加速度
3 foreach  $T_i$  do
4    $\{\dot{x}_i^{des}, \ddot{x}_i^{des}, J_i\} \leftarrow \text{getTask}(T_i)$ ;
5    $\ddot{x}_i^{des} = K_i(x_i^{des} - x_i) + D_i(\dot{x}_i^{des} - \dot{x}_i)$ ; ▷ 使用 PD 算法计算任务变量加速度
6    $\ddot{q}^{cmd} \leftarrow \ddot{q}^{cmd} + (J_i N)^{\dagger} (\ddot{x}_i^{des} - J_i \ddot{q} - J_i \ddot{q}^{cmd})$ ; ▷ 迭代累加期望值
7    $N \leftarrow N[\mathbf{1} - (J_i N)^{\dagger} J_i N]$ ;                                ▷ 计算当前任务的零空间矩阵
8 end
9 return  $\ddot{q}^{des}$ ;
```

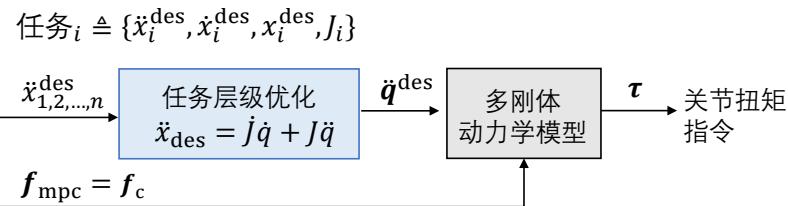


图 3-3 全身运动控制框架

3.5 人机系统直线行走实验

本节设计人机系统行走实验以评估姿态控制器的跟踪性能。五位受试者被邀请穿戴半人马机器人并进行行走任务（图3-4）。受试者以任意的速度按直线行走约 20 米距离。实验过程中机器人保持其姿态的平衡并跟踪人类航向偏航角，其躯干角度控制目标 $\Phi_{IC}^{\text{ref}} = [\gamma^{\text{ref}} \ \theta^{\text{ref}} \ \varphi^{\text{ref}}]^T = [0 \ 0 \ \varphi_{\text{human}}]^T$ ，而目标高度 r_z^{ref} 根据穿戴者的身高进行修改。



图 3-4 人机系统行走实验

最终的实验结果展示在表3-2中。控制器的横滚角（roll）、俯仰角（pitch）、偏航角（yaw）和高度（height）的平均绝对误差分别为 $1.50 \pm 0.23^\circ$, $4.20 \pm 2.39^\circ$, $5.79 \pm 2.13^\circ$, 和 0.011 ± 0.005 m。估计的系统行走速度范围为 0.39 至 0.75 m/s。表中粗体显示的数据为状态控制误差的最大值。为了评估半人马机器人对穿戴者步

行速度的影响，将每名受试者“穿戴机器人”与“不穿戴机器人”时的行走速度进行比较，其平均比率 $\text{Vel}/\text{Normal} = 60\%$ 。

表 3-2 受试者信息与半人马机器人状态跟踪性能

受试者	性别	年龄 [years]	身高 [m]	e_{roll} [deg]	e_{pitch} [deg]	e_{yaw} [deg]	e_{height} [m]	Vel [m/s]	Vel /Normal
I	男	26	1.68	1.4	2.9	4.1	0.013	0.75	74%
II	男	25	1.70	1.6	4.3	5.2	0.016	0.55	60%
III	男	26	1.75	1.5	2.0	7.8	0.008	0.39	36%
IV	女	26	1.70	1.3	5.2	5.5	0.009	0.59	56%
V	男	25	1.65	1.7	5.5	6.2	0.009	0.57	75%
平均值	-	25.6	1.70	1.5	4.2	5.8	0.011	0.59	60%
方差	-	0.55	0.04	0.2	2.4	2.1	0.005	0.13	16%

图3-5显示了受试者 II 行走过程（0 – 30 秒）半人马机器人躯干姿态角和躯干高度的控制情况。其中橙色线为目标角度，蓝色线为测量值。三个姿态角度最大的绝对误差角度分别为 1.6° , 4.3° 和 5.2° 。图中观察到机器人的期望俯仰角与测量值之间存在稳态差异。该现象可能由于期望躯干高度的设置未与受试者的身高匹配，导致机器人倾斜俯仰角以跟踪目标躯干高度。行走过程中机械腿电机扭矩轨迹如图3-6所示。

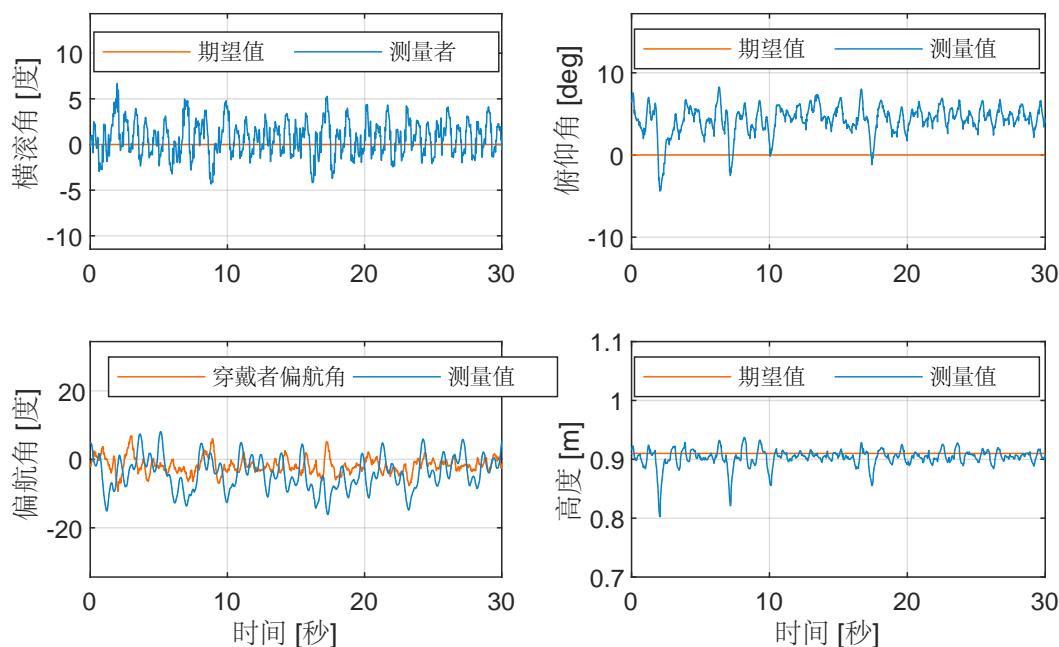


图 3-5 人机行走实验机器人姿态角度与躯干高度控制结果

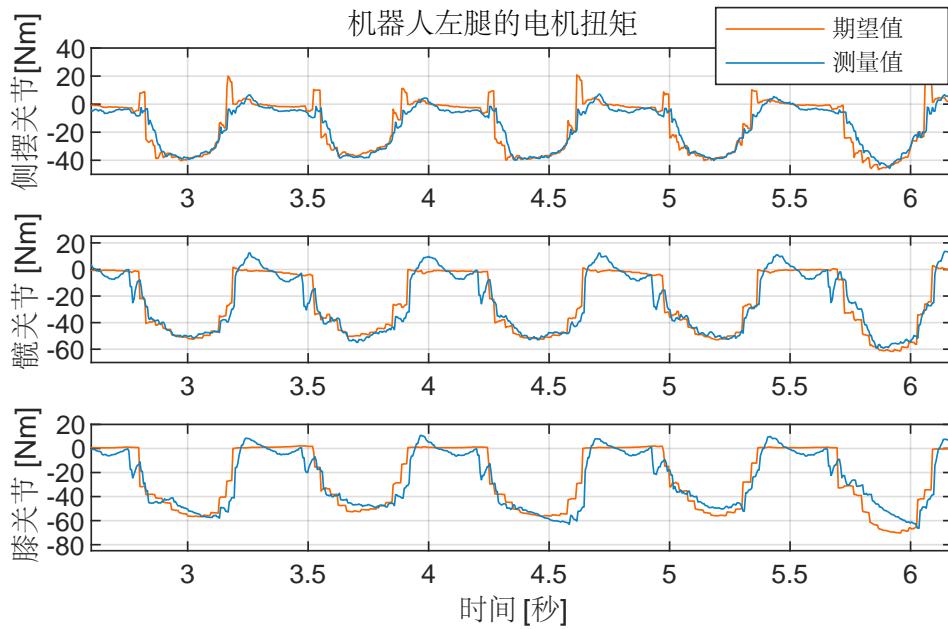


图 3-6 机器人五个步态周期的电机扭矩轨迹

3.6 半人马机器人负重性能评估

本节评估半人马机器人与传统背负方式的负重效果。设计以下三种负重实验：

- (1) 背负刚性连接的负载行走（背包 +170 N）；
- (2) 穿戴带负载的半人马机器人行走（半人马机器人 +170 N）；
- (3) 穿戴空载的半人马机器人行走（半人马机器人 +0 N）。

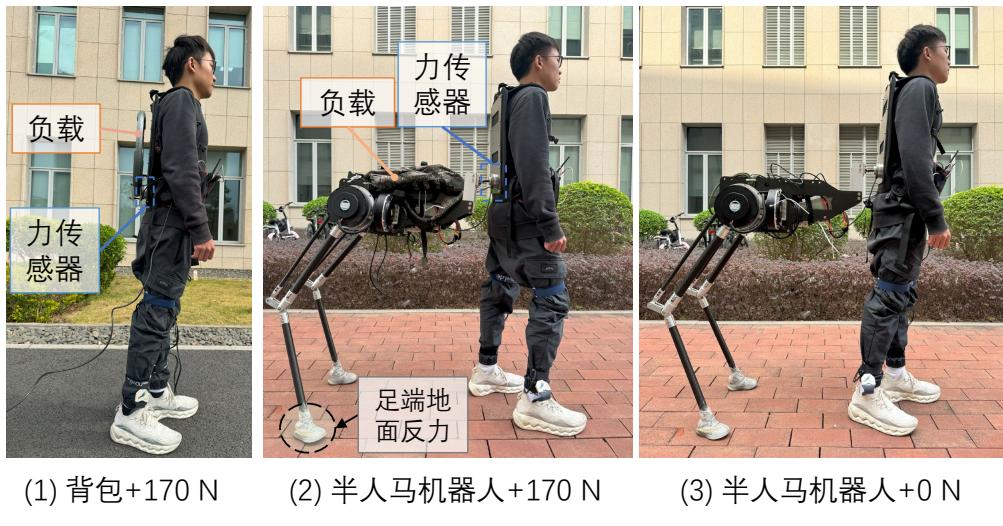


图 3-7 三种条件下的负重对比实验
记录用户的负载力和半人马机器人的足端地面反力

如图3-7所示，在条件(1)中，负载刚性连接到背板，这种情况被假设为用户用无质量的背包携带负载。在条件(2)中，负载放置在半人马机器人的躯干上。条件(3)用于评估半人马机器人自身重量对穿戴者的影响。负载的重量设置为170N。

受试者在户外以 100 步/分钟的步频（使用节拍器）进行行走实验，每组实验重复三次。使用力传感器（M3564, Sunrise Instrument, China）测量穿戴者受到的负载力^[9]。同时记录机器人足端的地面反力 \mathbf{f}_{grf} 。实验过程中根据静力学关系^[79]，使用关节电机反馈扭矩 τ 估算足端力：

$$\mathbf{f}_{\text{grf}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-T} \boldsymbol{\tau} \quad (3-14)$$

三种条件下的平均负载力结果分别为 171.90 ± 7.07 N, 110.30 ± 4.71 N 和 51.17 ± 0.87 N, 如图3-8所示。与刚性负载条件相比，使用半人马机器人背负 170 N 时减少了 35.83% 的平均负载力。当机器人躯干空载时，平均负载力为 51.13 N，表明机器人可通过机械腿支撑其自身重量（27.4kg）的 80.84%。

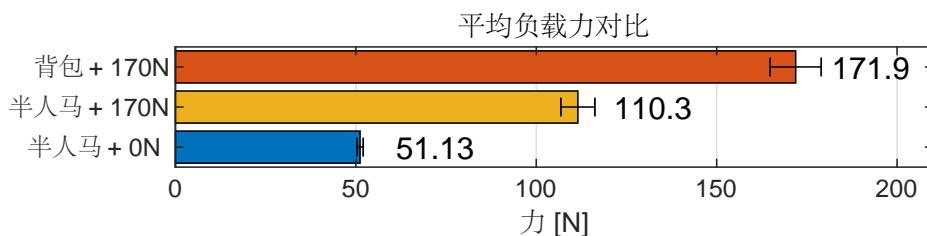


图 3-8 负载力结果对比

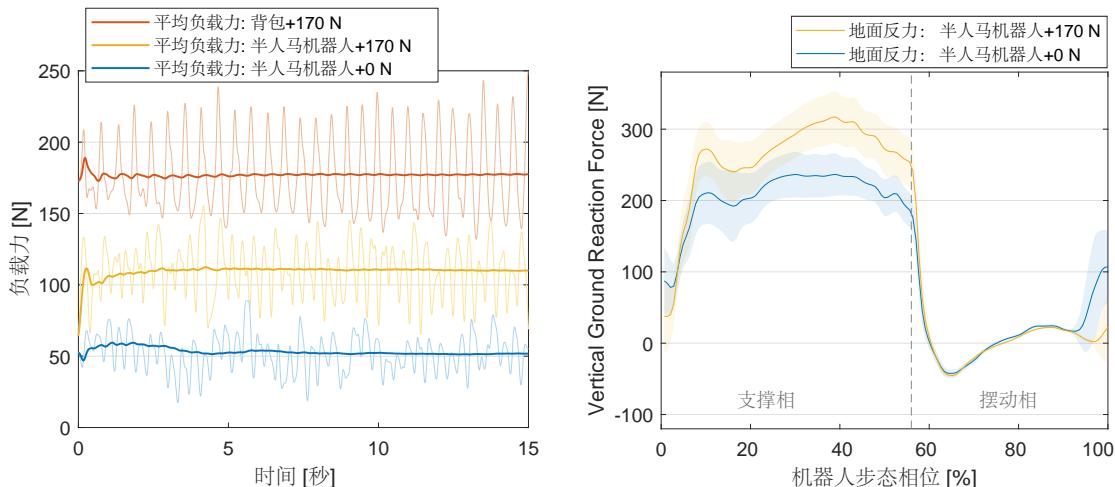


图 3-9 负重行走实验结果
(左) 用户负载力 (右) 半人马机器人足端地面反力

图3-9（左）展示了三种条件下负重行走的负载力变化情况。其中浅色曲线为经过高斯加权滤波（滑动窗口大小为 40）的负载力数据，深色曲线为负载力的平均值。图中可观察到使用半人马机器人负重行走的负载力比使用背包的负载力低。图3-9（右）展示了半人马机器人在负载和空载两种情况下的垂直地面反力随步态周期变化的情况。一个周期以左腿足端初始进入支撑相为开始，以足端再次进入

支撑相结束。其中横轴 $[0, 0.56]$ 区间为机器人左腿的支撑相, $[0.56, 1)$ 区间为摆动相。实验结果显示, 半人马机器人在负载时, 支撑相平均地面反力幅值从(空载情况的) 213.0 N 增加到 271.0 N。这表明机器人通过机械腿将负载的重量传递到地面, 以帮助穿戴者承载负重。

3.7 本章小结

为实现半人马机器人行走过程的动态平衡, 本章采用躯干姿态角度的大小来衡量机器人的平衡稳定性, 并设计了基于降阶动力学模型的平衡控制器。相比于先前的半人马机器人平衡控制方法^[23], 本章使用的控制器考虑了机器人躯干的三个姿态角度及高度; 相比于纯自足机器人的动力学模型^[30,63], 本章在模型推导过程中省略了水平位置变量, 得到了降阶的单刚体动力学模型, 以保证系统的位置由穿戴者来决定。机器人足端的地面反力由模型预测控制方法进行求解, 最终的电机扭矩由全身运动控制方法来计算。

实验结果展示半人马机器人能够与多名受试者进行行走任务, 并控制其姿态角度(横滚角、俯仰角和偏航角)误差于 $1.50 \pm 0.23^\circ$, $4.20 \pm 2.39^\circ$, 和 $5.79 \pm 2.13^\circ$; 机器人的高度控制误差为 0.011 ± 0.005 m。本章设计了半人马机器人负重性能实验, 实验数据表明, 相比于刚性连接负载条件, 使用半人马背负 170 N 负载时能降低 35.83% 的平均负载力。本章设计的平衡控制器主要用于半人马机器人支撑腿的控制, 机器人通过足端向外界施加力以调整自身躯干的状态。后续章节将探究机器人摆动足端的运动策略。

第4章 半人马系统全方向行走足端运动规划

4.1 引言

穿戴式外肢体机器人能够协助用户进行负重行走^[9-10,23-24]、行走支撑^[11-12]、生产安装^[80-82]等任务。机器人在协助穿戴者工作过程应该尽量减小对人运动的阻碍。针对行走任务，现存的穿戴式下肢外肢体大部分仅关注矢状面的行走^[9,11-12,23]，穿戴者仅能往正前方进行直线行走，而不能转弯或侧向行走。这一定程度上限制了穿戴者的灵活移动能力，降低了外肢体机器人实用性。由于半人马机器人的机械腿不与穿戴者的下肢相固定，机器人需要自主规划其足端的运动以匹配穿戴者的移动。本章将聚焦于半人马系统的落足点规划方法的研究，保证系统能够同时在矢状面（sagittal plane）和横切面（traverse plane）^[33]上行走，以实现更加灵活的人机系统移动能力。

本章内容安排如下：4.2节回顾下肢外肢体机器人足端轨迹规划方法并介绍半人马系统全向行走方法框架，4.3节提出系统转弯控制策略，4.4节规划机器人支撑腿和摆动腿的足端目标位置。4.5.1节设计抗扰动实验以验证半人马机器人对转向角度的控制能力，4.5.2节测试机器人在跑步机行走的落足点规划效果，4.5.3节设计全方向行走实验，包括原地转弯、前进、后退、侧向行走，以展示半人马系统灵活的移动能力。

4.2 下肢外肢体机器人足端运动规划方法概述

跟随穿戴者行走是下肢外肢体机器人的基本任务，半人马机器人需要往穿戴者前进方向进行迈步，以适应人的行走速度。为提高人机系统协调性，让下肢外肢体适应穿戴者的节律性行走运动，研究者通常采用“步态跟随法”来规划外肢体机器人的运动^[9,11-12]。由于该方法通常需要使用角度传感器检测穿戴者下肢的运动，并设计步态检测方法以获取穿戴者的步态信息，这会使“步态跟随法”增加系统的复杂性。事实上，对于负重行走任务而言，让机器人与穿戴者“同步态”行走不是必要的。以轮式负重机器人为例子^[10,83]，机器人在移动过程中为负载提供一个独立于人类步态信息的恒定支撑力是可以接受的。另外，从生物力学的角度上，让负载与人的躯干同步并不是最佳的解决方案。实验表明，允许负载与人体产生相对的垂直振荡可以降低人行走的能量消耗^[14]和支撑腿的机械能^[84]。最后，从机器人大学的角度上，以与人类相同的步态频率（步态周期持续时间约为 0.98-1.74

秒^[85]) 行走会增加机器人跌倒的风险，尤其是对于点足式双足机器人。在动态行走期间，机器人的质心投影点会随时间超出支撑多边形^[62]，此时让质心稳定的一个有效做法是迈步以切换支撑点^[86]，因为此做法会重新形成新的支撑多边形。因此，大多数足式机器人倾向于通过频繁改变接触足端的位置来保持系统动态平衡^[72,87]。考虑到上述情况，腿式机器人拥有独立于人类步态的步态是有益的。

在先前的半人马机器人的行走控制^[23]中，采用基于人机交互力的行走规划方法。具体而言，该方法通过人机交互力的大小 f_h 来识别穿戴者的运动意图，然后按照比例反馈的方式来修正机器人足端摆动的步长，最终达到跟随穿戴者移动速度的目的。但是，人机交互间的力数据通常是变化剧烈且含有噪声的^[88-89]。为了防止机器人调整过于频繁，从含噪声的力信息中识别穿戴者的运动意图信息，通常需要对力数据进行低通滤波处理^[27,45]。而通过滤波后的数据会对系统的控制带来滞后影响，导致机器人切换运动速度的过程时间延长。先前的结果显示^[23]机器人需要 18 秒将步长从 0.3 m 降至零，这难以满足快速适应穿戴者的运动（加速、减速和停止移动等变速运动）的需求。为提高机器人的动态响应，本节采用基于系统速度 v 和接触状态（摆动与支撑）的足端轨迹规划方法。

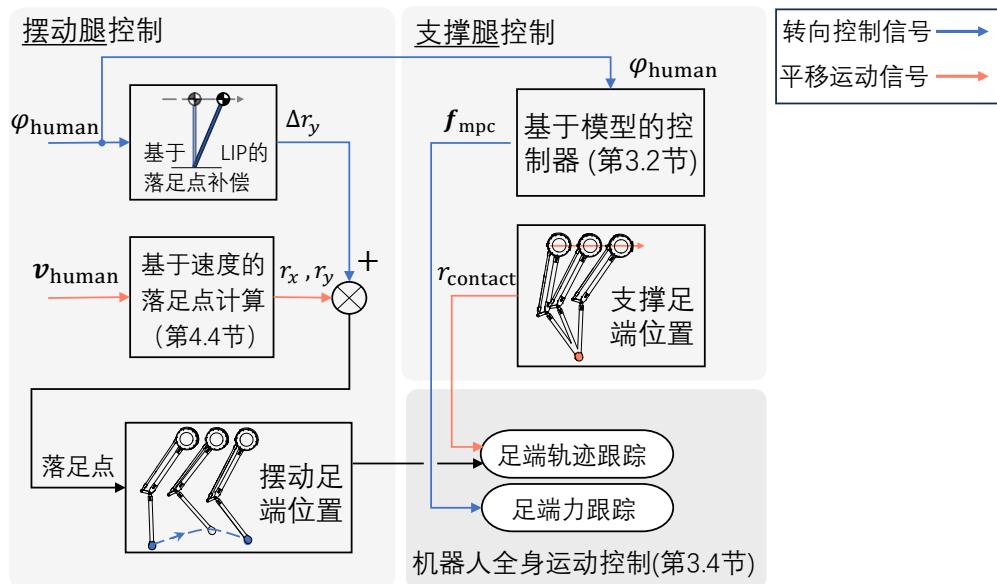


图 4-1 半人马机器人全向行走策略框架示意图

为了实现半人马机器人能够跟随穿戴者以任意方向运动，本章提出全向行走策略的框架如图4-1所示。本文将全向行走定义为转弯、前进、后退、侧向移动。二维平面上的运动可以由位置坐标 (p_x, p_y) 和角度 φ 来刻画。相对应地，全向行走控制的输入数据包括穿戴者的运动速度 v_{human} 和穿戴者的正面朝向角度 φ_{human} ，这两组数据可以用于描述穿戴者的运动方向。

根据半人马机器人机械腿与地面的接触情况，可以分为摆动腿（swing leg）与

支撑腿（stance leg）控制。摆动腿的任务为：选取合适的落足点并规划到达该目标落足点的轨迹，以实时跟随人的行走移动。支撑腿的任务为：对外界环境施加足端接触力，以调节半人马机器人躯干的航向角度；同时应该实时顺应人的位移，防止机械腿支撑时对人前进运动的拖拽。控制流程会生成机器人足端位置与足端地面反力，最后将通过半人马机器人的全身运动控制（第3.4节）来计算关节输出扭矩。

4.3 转向控制策略

转向控制的目标是使半人马机器人位于穿戴者的后方，并且躯干的偏航角与人的方向对齐。机器人的支撑相和摆动相同时对角度进行控制。在支撑相中，令机器人的角度参考值等于穿戴者的朝向角度，该参考值将通过基于模型的控制器，求解出足端地面反力以跟踪偏航角度。为保证调节的平滑性，可以利用模型预测控制的优势：根据当前状态输入一个平滑参考轨迹，如公式4-1。

$$\begin{cases} \varphi_i^{\text{ref}} = \varphi_0 + i\Delta e & (i = 1, 2, \dots, N) \\ \dot{\varphi}_i^{\text{ref}} = k_{\text{yaw}}\Delta e & (i = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (4-1)$$

式中 N —— 模型预测控制的总预测步长；

φ_i^{ref} —— 第 i 步的期望航向角度 (rad)；

φ_0 —— 机器人当前的航向角度 (rad)；

k_{yaw} —— 转弯速率的反馈增益 (1/s)；

$\Delta e = (\varphi_{\text{human}} - \varphi_0)/N$ —— 角度误差的增量值 (rad)。

在摆动相，半人马机器人将基于线性倒立摆模型，根据转向角度误差选择合适的落足点，以调节机器人的向期望角度方向收敛。图4-2展示了穿戴者和半人马机器人坐标在 x - y 平面上的投影。穿戴者和机器人的当前坐标为 $\{H\}$ 和 $\{C\}$ ，惯性参考系坐标为 $\{I\}$ 。在转弯过程中，机器人期望的位置 $\{D\}$ 被设置为位于穿戴者正后方，且偏航角度与穿戴者对齐。图中 $\Delta\varphi$ 为人机系统间的偏航角误差，半人马机器人躯干质心与人机交互位置的固定长度为 L_x 。给定半人马的位置 ${}^I\mathbf{r}_{IC} \in \mathbb{R}^3$ 和姿态 $\Phi_{IC} \in SO(3)$ ，以下将计算期望位置目标 ${}^I\mathbf{r}_{ID}$ 。

由于机器人躯干 x 方向的长度 L_x 是固定的，因此有 ${}^C\mathbf{r}_{CH} = [L_x \ 0 \ 0]^T \in \mathbb{R}^3$ 。穿戴者的位置可表达为：

$${}^I\mathbf{r}_{IH} = {}^I\mathbf{r}_{IC} + \Phi_{IC} {}^C\mathbf{r}_{CH} \quad (4-2)$$

当半人马机器人质心位于穿戴正后方 $\{D\}$ 时，位置坐标可表述为：

$${}^I\mathbf{r}_{ID} = {}^I\mathbf{r}_{IH} - \Phi_{IC} {}^C\mathbf{r}_{CH} \quad (4-3)$$

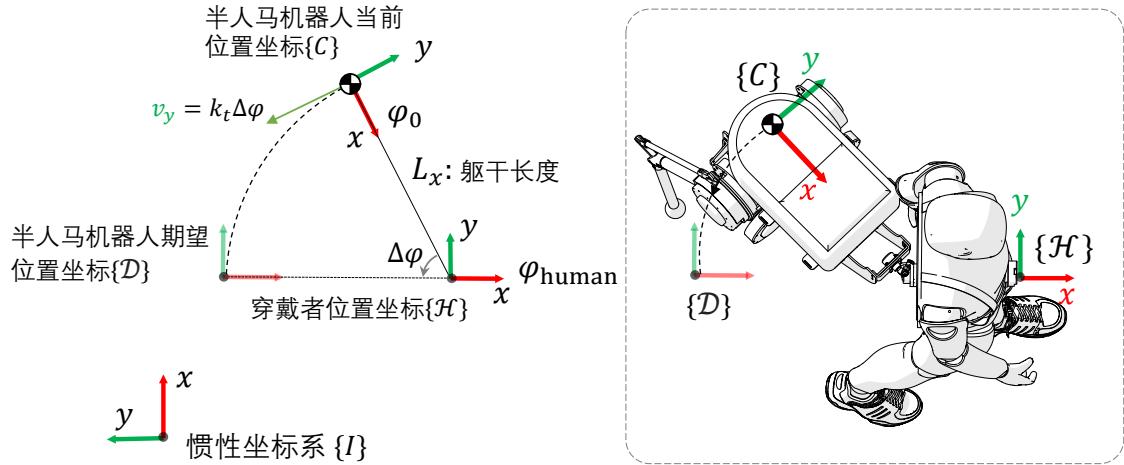


图 4-2 人机系统坐标示意图
机器人通过切向速度对航向角度进行调节

根据机器人当前与期望位姿误差，可以计算期望的切向速度 v_y^{ref} ，如式4-4。

$$v_y^{\text{ref}} = k_t(\mathbf{r}_{ID} - \mathbf{r}_{IC}) \quad (4-4)$$

式中 k_t 为位置误差反馈增益 ($1/\text{s}$)，表示通过 $1/k_t$ 秒后系统位置到达期望位置。

注意到，在半人马机器人绕穿戴者 $\{H\}$ 为轴心转弯过程中，仅在切向方向 (y) 的运动会对转弯运动的结果有影响。因此，将在 y 方向上基于线性倒立摆模型^[90]计算半人马机器人的落足点，通过落足点产生的切向速度以到达对航向角度的调节。线性倒立摆是一种简易的双足行走模型，其将机器人抽象为一个质心和一根与地面转动的杆。其主要思想为：沿杆的方向施加力以保持机器人的质心高度不变，进而避免机器人摔倒。如图4-3所示为半人马机器人 y (切线) 方向上的线性倒立摆模型， r , y , h 和 g 分别为落足点位置 (m)、质心位置 (m)、质心高度 (m) 和重力加速度 (m/s^2)。

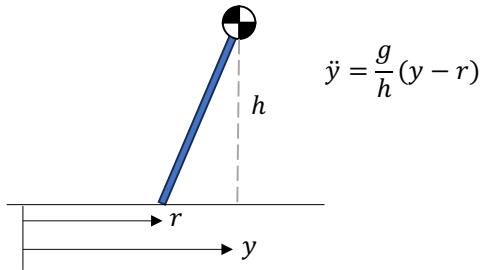


图 4-3 二维线性倒立摆模型，
其质心的动力学方程为 $\ddot{y} = \frac{g}{h}(y - r)$

倒立摆的动力学方程为二阶常微分方程，给定足式机器人的单腿支撑 (stance) 时间 T_{st} 和机器人的初始状态 y_0 , \dot{y}_0 ，可获得机器人质心运动的解析式^[31]，如式4-5：

$$y(T_{st}) = \cosh(\omega T_{st})y_0 + \frac{1}{\omega} \sinh(\omega T_{st})\dot{y}_0 + [1 - \cosh(\omega T_{st})]r \quad (4-5a)$$

$$\dot{y}(T_{st}) = \omega \sinh(\omega T_{st})y_0 + \cosh(\omega T_{st})\dot{y}_0 - \omega \sinh(\omega T_{st})r \quad (4-5b)$$

其中 $\omega = \sqrt{g/h}$ 是系统的时间常数。将半人马机器人期望的切向速度（式4-4）代入式4-5b，令 $\dot{y}(T_{st}) = v_y^{\text{ref}}$ ，可以得到机器人的切线方向上的落足位置 r_y^{LIP} ：

$$r_y^{\text{LIP}} = y_0 + \underbrace{\frac{1}{\omega} \coth(\omega T_{st})\dot{y}_0 + \frac{1}{\omega \sinh(\omega T_{st})}v_y^{\text{ref}}}_{\Delta r_y} \quad (4-6)$$

此时切向落足点位置的结果可视为系统质心平衡位置 y_0 、系统移动速度 \dot{y}_0 和期望速度 v_y^{ref} 三者的加权之和。在其中平衡位置 y_0 由机器人平移运动确定（见第4.4节），后两项为基于线性倒立摆模型的落足点补偿项 Δr_y 。

4.4 平移运动足端轨迹规划

在机械腿处于摆动状态，机器人的足端需要向人机系统的运动方向进行迈步，以产生向运动方向的移动。本节将基于系统速度来计算落足点的平衡位置。首先，需要估计穿戴者当前实时的运动速度 $\mathbf{v}_{\text{human}}$ 。在第二章介绍的半人马机器人机械结构中，使用球铰作为人机交互方式以实现人机姿态角度解耦。根据球铰的特点，交互点处两个刚体线性位移是保持固定的^[57]。此时，半人马机器人与穿戴者通过背包处进行固定连接，可以通过机器人的测量移动速度 \mathbf{v} 来估计用户的瞬时平动速度 $\mathbf{v}_{\text{human}}$ 和角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 。如图4-4所示，把半人马机器人看作一个固体，机器人质心处速度与穿戴者速度的关系可表述为：

$$\mathbf{v}_{\text{human}} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{CH} \quad (4-7)$$

其中 $(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ 是半人马机器人的线速度与角速度， \mathbf{r}_{CH} 是机器人质心到人机交互处（背包）的位置向量。

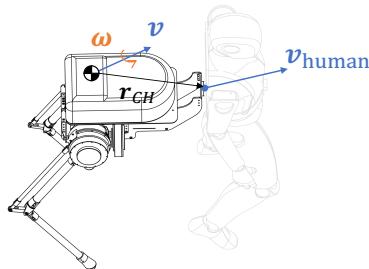


图 4-4 半人马机器人与穿戴者运动速度关系图

然后, 为了让机器人产生向穿戴者运动方向的迈步, 将目标落足点设计为默认落足点位置 \mathbf{r}_0 与穿戴者运动速度增益 $k_v \mathbf{v}_{\text{human}}$ 的线性叠加。其中默认足端位置选取在半人马机器人髋关节正下方 (沿重力加速度方向) 的位置, 即 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_{\text{hip}} + [0 \ 0 \ -r_z^{\text{ref}}]^T$ 。以提供的合适大小的支撑多边形给机器人的躯干质心。在机械腿在摆动过程中, 髋关节的位置会随着系统的运动而移动, 会导致目标落足点的计算结果不稳定, 进而影响足端摆动轨迹的平滑性。为解决该问题, 引入系统速度 \mathbf{v} 与摆动相剩余时间 $(1-s)T_{\text{sw}}$, 以估计足端落足瞬间 (即摆动相结束瞬间) 髋关节的位置, 其中 $s \in [0, 1]$ 为摆动相的百分比相位。

综上所述, 结合切线方向上的补偿位移 Δr_y (公式4-6), 最终的摆动腿的落足位置 $\mathbf{r}^{\text{foothold}}$ 计算公式为:

$$\mathbf{r}^{\text{foothold}} = \mathbf{r}_0 + (1-s)T_{\text{sw}}\mathbf{v} + k_v \mathbf{v}_{\text{human}} + [0 \ \Delta r_y \ 0]^T \quad (4-8)$$

式中 $\mathbf{r}^{\text{foothold}} \in \mathbb{R}^3$ —— 目标落足点位置 (m);

$\mathbf{r}_0 \in \mathbb{R}^3$ —— 默认落足点位置 (m);

$s \in [0, 1]$ —— 机械腿当前摆动相位;

$\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ —— 半人马质心速度 (m/s);

$\mathbf{v}_{\text{human}} \in \mathbb{R}^3$ —— 穿戴者运动速度 (m/s);

T_{sw} —— 机械腿摆动总时间 (s);

k_v —— 摆动速度增益 (1/s);

摆动相中 $\mathbf{r}_0 + (1-s)T_{\text{sw}}\mathbf{v}$ 用于估计足端接触地面瞬间的默认位置, $k_v \mathbf{v}_{\text{human}}$ 的作用是跟随穿戴者的运动速度。式 (4-8) 的落足点目标位置可看作机器人位置与速度的线性叠加。

给定当前的摆动相位 $s \in [0, 1]$, 下一步需要生成从起始点 $\mathbf{r}^{\text{start}}$ 到目标落足点 $\mathbf{r}^{\text{foothold}}$ 的摆动轨迹。对于足式系统行走, 除了保证起始点和终止点的位置约束, 摆动轨迹还需要有一定的离地间隙 (foot clearance), 以避免与地面产生碰撞。对于足端摆动轨迹生成, 可以使用贝塞尔曲线^[91], 多项式插值^[92]或五次样条曲线^[43,93]等方法。简单起见, 本章采用分段贝塞尔曲线 (Bézier Curve)^[94]生成摆动足端轨迹。

贝塞尔曲线的形状由控制点决定, 曲线经过起点和终点。为保证摆动轨迹到达预设的离地间隙 h_{swing} , 将整个轨迹分成上升和下降两段。图4-5为足端轨迹摆动的示意图。图中展示了离地间隙 $h_{\text{swing}} = 0.1$ m, 步长 $l_{\text{step}} = 0.2$ m 的二维平面轨迹。其中方形为曲线的控制点, 箭头表示所处位置的速度方向。

对于支撑腿, 接触足端需保持其 (相对于世界坐标系) 接触位置 $\mathbf{r}_{\text{contact}}$ 静止, 以保证足端不与地面产生滑移, 并避免机器人阻碍穿戴者的移动。为估计机器人相对世界坐标系的位置, 可以融合机器人惯性测量单元的加速度信息与机械腿的

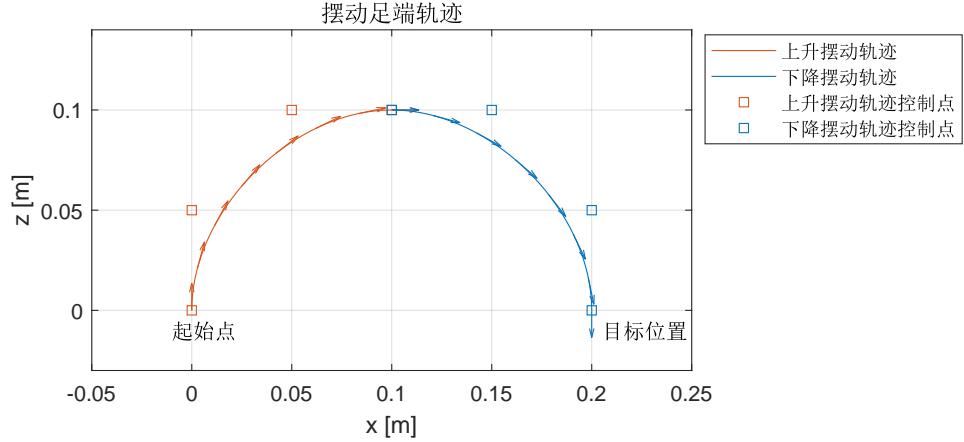


图 4-5 机器人足端摆动轨迹示意图

运动学信息，设计状态估计器^[47,59,95]。

综合上述摆动腿和支撑腿的控制方法，半人马机器人的足端目标位置可表述为式(4-9)：

$$\mathbf{r}_{\text{foot}}^{\text{ref}} = \begin{cases} B(\mathbf{r}^{\text{start}}, \mathbf{r}^{\text{foothold}}, h_{\text{swing}}, s) & , \text{for swing} \\ \mathbf{r}^{\text{contact}} & , \text{for stance} \end{cases} \quad (4-9)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{foot}}^{\text{ref}} \in \mathbb{R}^3$ —— 机器人足端目标位置 (m);

$B(\cdot)$ —— 由起点 $\mathbf{r}^{\text{start}}$ 、终点 $\mathbf{r}^{\text{foothold}}$ 、摆动高度 h_{swing} 和当前相位 s 决定的摆动位置 (m);

$\mathbf{r}^{\text{contact}} \in \mathbb{R}^3$ —— 机械腿上次摆动相结束时的足端位置 (m)。

总结而言，半人马机器人的转向控制目标是使机器人的航向角度与穿戴者的航向角度对齐。本节所提出的转向控制策略包含机器人支撑腿控制和摆动腿控制两个部分。在支撑期，机器人基于模型预测控制器生成足端力，通过与地面接触以调节航向姿态角度。在摆动期，机器人基于线性倒立摆模型生成摆动腿的落足点补偿值，通过改变切向速度来达到控制航向角度的目标。

4.5 全向行走方法实验评估

4.5.1 航向角度抗扰动实验

本小节设计半人马机器人的抗扰动实验，以验证机器人对航向角度的（转向）控制能力（对应第4.3节方法）。半人马机器人通过球铰的方式固定在支架上，航向目标角度设置为 $\varphi^{\text{ref}} = 0^\circ$ 。为避免误差过大导致的剧烈调节，系统的误差值限幅与 $[-12^\circ, 12^\circ]$ 。如图4-6所示，半人马机器人在 8.4 秒和 15.1 秒受到向左的推动（干扰）；在 23.8 秒和 33.0 秒受到向右的推动（干扰）。扰动幅度的大小通过瞬间的

速度变化量来衡量^[96]，计算得四次扰动的大小为 $+0.41$, $+0.22$, -0.34 和 -0.37 m/s。相对应的航向角度最大偏差值达到 -30.35° , -23.82° , 24.63° 和 29.00° 。

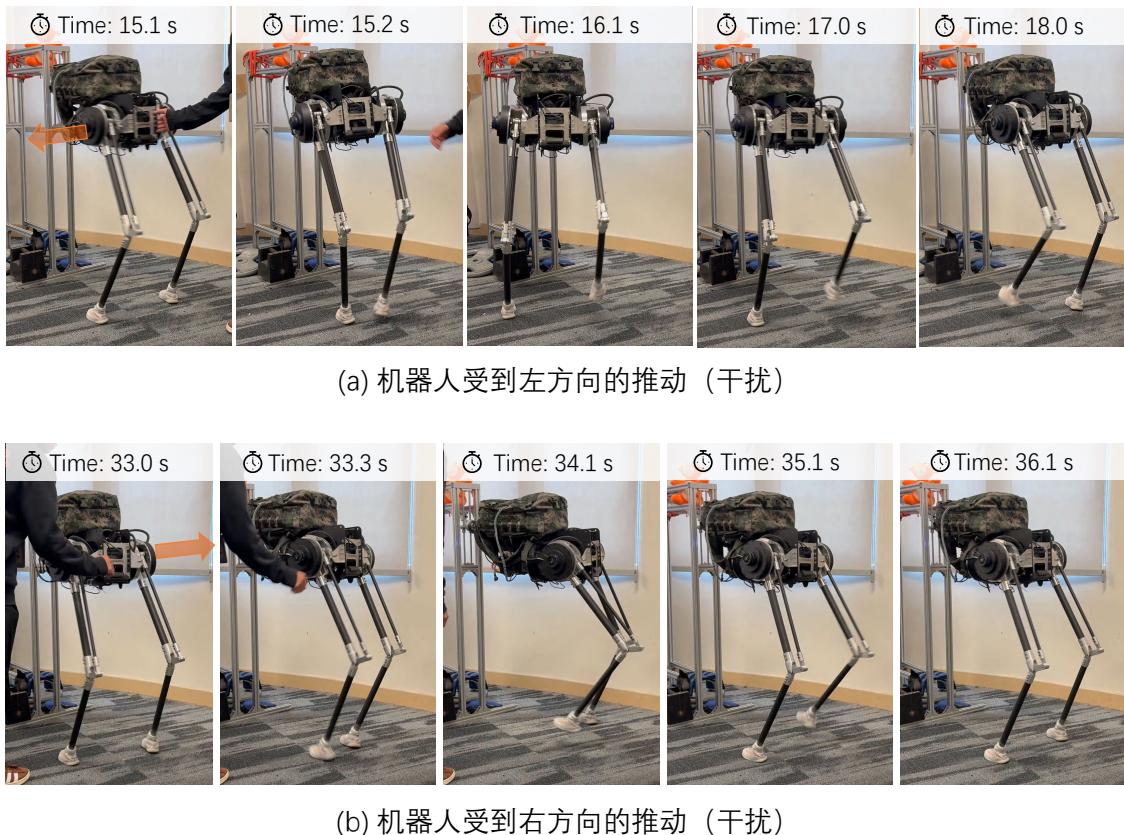


图 4-6 半人马机器人航向角抗扰动实验

图4-7展示了受扰过程半人马躯干航向角度的变化情况。机器人受扰后经过约3秒(4.2个步态周期)，航向角度值回到稳态值(小于 3.8°)。实验表明所提出的方法能帮助半人马机器人进行转向角度的控制。

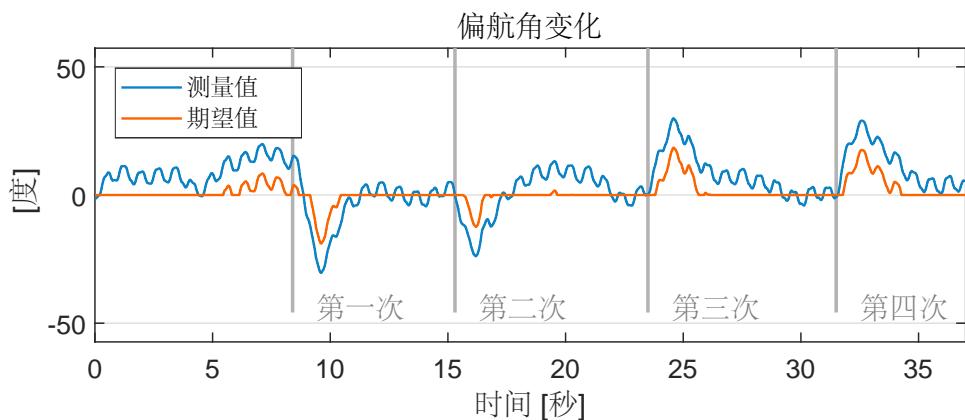


图 4-7 机器人受到四次侧向扰动下的躯干航向角度变化

图4-8记录了半人马机器人在受到扰动下的质心运动轨迹和落足点位置变化。其中左图为15.1秒时的左向扰动的情况，机器人质心朝左侧方向偏移了0.20 m。此时，左右两个落足点分别向左调整到0.60 m和0.05m，这一方面是由于当前的侧向移动速度为正 $v_y > 0$ ，另一方面是为了通过改变落足点以消除躯干航向角误差，如公式(4-8)。图中观察到机器人通过6步调整将躯干航向角度从 -30.3° 恢复到 -0.8° ；通过10步调整将躯干航向角度从 $+29.0^\circ$ 恢复到 3.8° 。

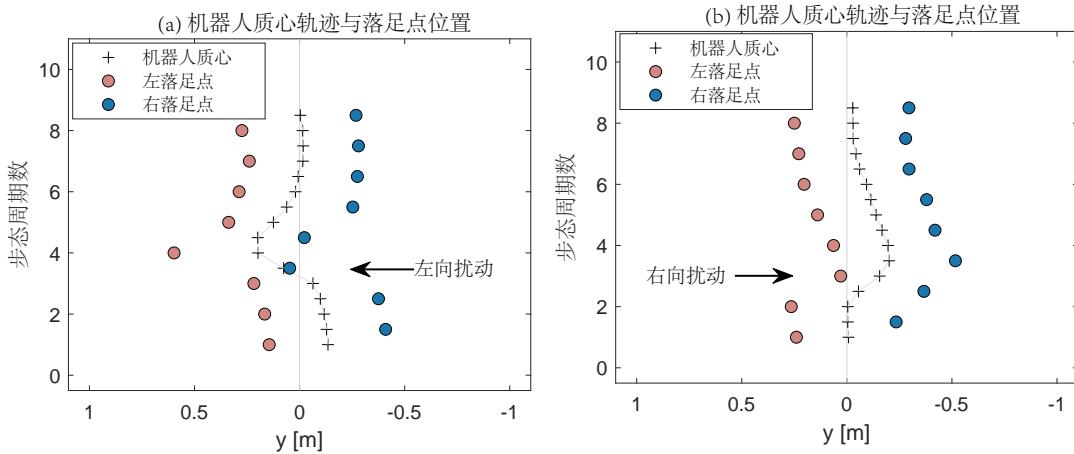


图4-8 机器人受到侧向扰动后的质心轨迹和落足点位置
(a) 15.1秒受到向左的扰动后的质心轨迹 (b) 33.0秒受到向右的扰动的质心轨迹

4.5.2 室内跑步机行走实验

本节设计半人马机器人室内跑步机行走实验，以评估平移运动的足端轨迹规划方法（对应第4.4节）。设置跑步机的速度为如下：从0 m/s开始，以 0.2 m/s^2 加速到0.4 m/s，然后以 0.2 m/s^2 加速到0.8 m/s，最后以 -0.4 m/s^2 减速至0 m/s整个过程包括原地站立、加速、匀速以及减速行走，如图4-9所示。

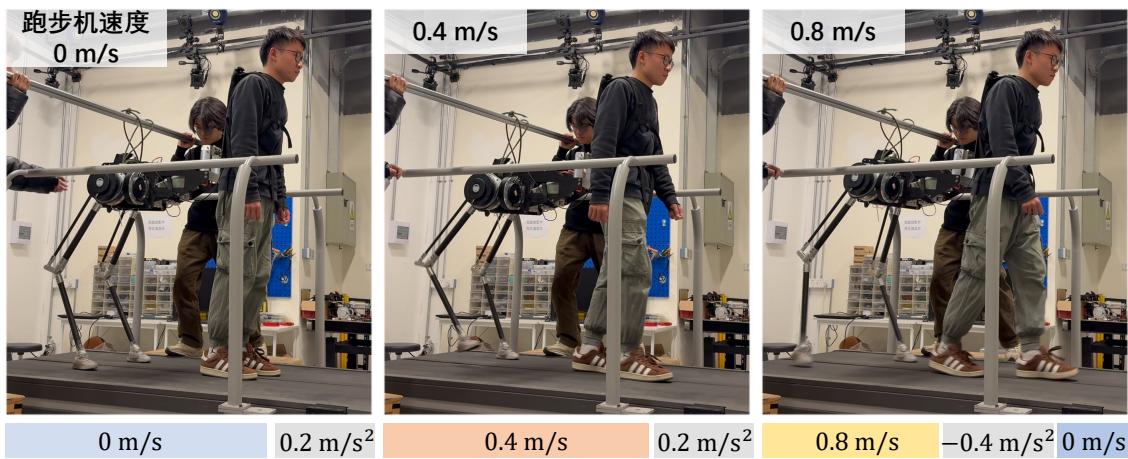


图4-9 半人马机器人室内跑步机行走实验

实验结果如图4-10所示，其中横轴为人机系统前进的位移，纵轴为系统的运

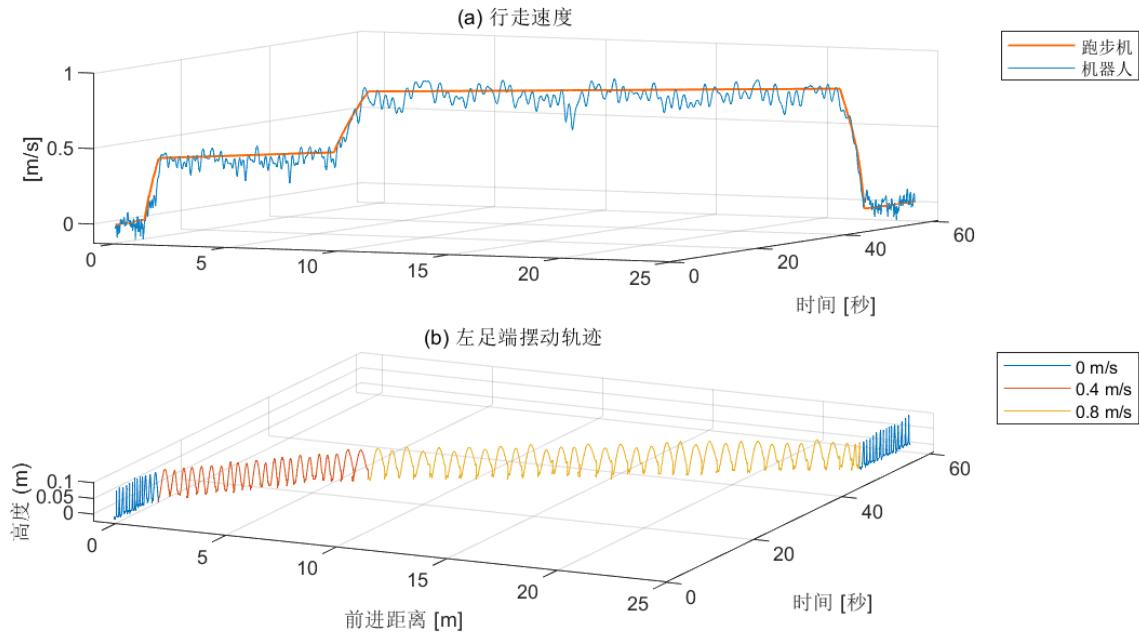


图 4-10 半人马机器人室内跑步机行走实验结果
(a) 跑步机与机器人前进速度大小 (b) 半人马机器人足端运动轨迹

行时间。图4-10 (a) 图为跑步机运行速度和半人马机器人移动的测量速度 (单位: m/s)。图中可以观察到机器人可以在迅速响应跑步机的变化速度, 在一秒时间之内将移动速度从 0.8 m/s 降至 0 m/s。这可以推断, 半人马机器人在行走过程中可以匹配穿戴者行走速度, 且具有变速行走的能力。

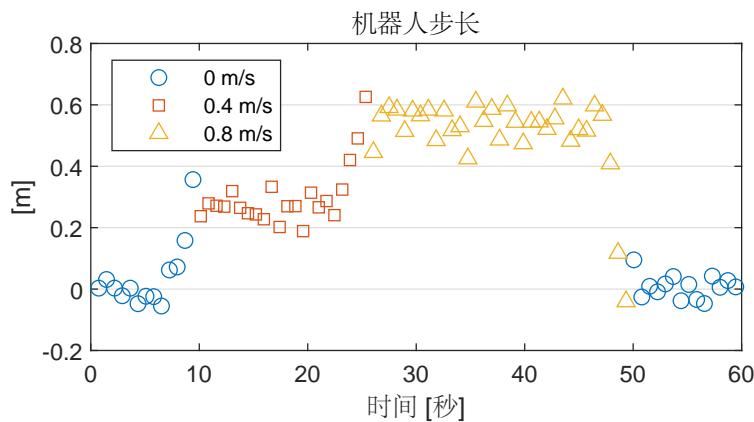


图 4-11 半人马机器人步长变化

图4-10 (b) 展示了实验过程半人马机器人足端运动轨迹, 不同颜色的曲线表示跑步机以不同的速度运行。实验结果显示, 用户和机器人共行走了约 23 米; 在用户站立阶段, 半人马机器人足端运动轨迹重合, 表明机器人处于原地踏步状态。用户开始行走时, 机器人往前进的方向进行迈步, 以跟随人行走。机器人能够根据速度的变化调整足端向前摆动的距离。

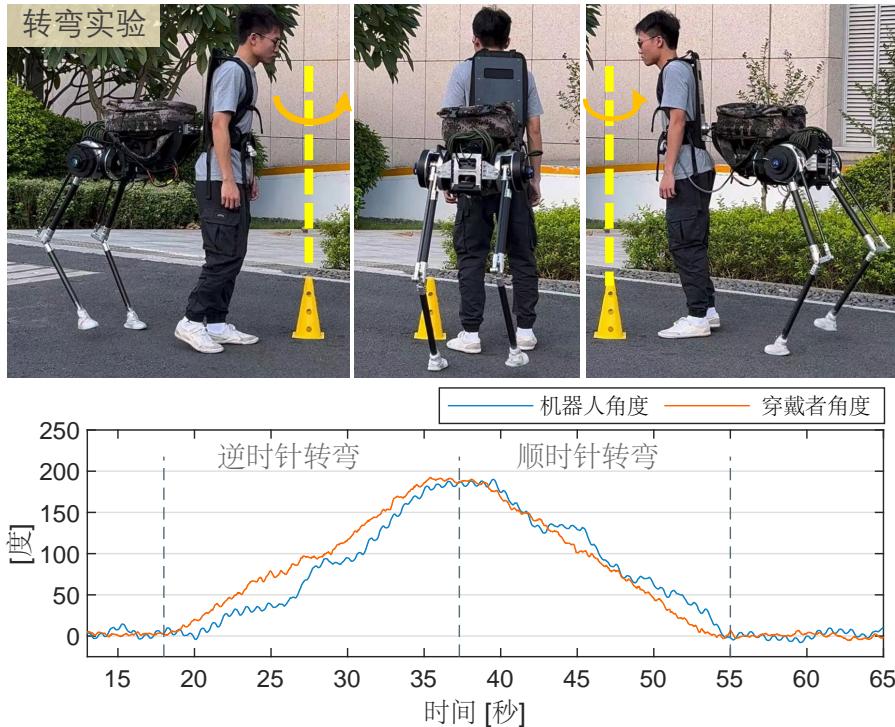


图 4-12 半人马系统原地转弯实验证：受试者先逆时针转弯，然后顺时针转弯；
下图为机器人与穿戴者航向角度的变化情况

整个行走实验过程半人马机器人左腿共行走了 84 步，机器人步长（stride length）大小如图4-11所示。图中显示，速度为 0.4 m/s 和 0.8 m/s 时的平均步长分别为 0.26 m 与 0.54 m，机器人的迈步步长运动速度呈正相关关系。这表明机器人能够适应穿戴者的不同的移动速度。

4.5.3 半人马系统全向行走实验

本文将全向行走定义为转弯、前进、后退、侧向移动。为了验证半人马系统的转弯能力，受试者与半人马机器人进行原地转弯实验。如图（4-12）所示，穿戴者首先进行逆时针原地转弯，然后进行顺时针转弯。图（4-12）下方曲线为穿戴者 IMU 航向角度与半人马机器人航向角度值。转弯过程中的航向角平均绝对误差 11.3°，平均转弯速率为 10.5°/s；完成转弯后，航向角误差降低至 5.1°。实验表明半人马机器人能够跟踪人类的航向偏航角以完成转弯。

为了进一步验证人机系统的灵活移动能力，设计以下综合性行走实验：受试者穿戴半人马机器人绕过障碍物，然后依次向前、右、后、左方向行走（见图4-13）。估计的轨迹以及障碍物位置和机器人偏航角如图4-14所示，图中蓝色线为半人马机器人运动的轨迹，橙色箭头方向为机器人的航向角度值。此行走实验的完成时间为 71 秒。实验表明，半人马人机系统可以处理大多数日常的移动场景：既能在



图 4-13 半人马系统全向行走实验快照：穿戴者与机器人依次进行
绕障碍物行走、前进、右横向移动、后退和左横向移动

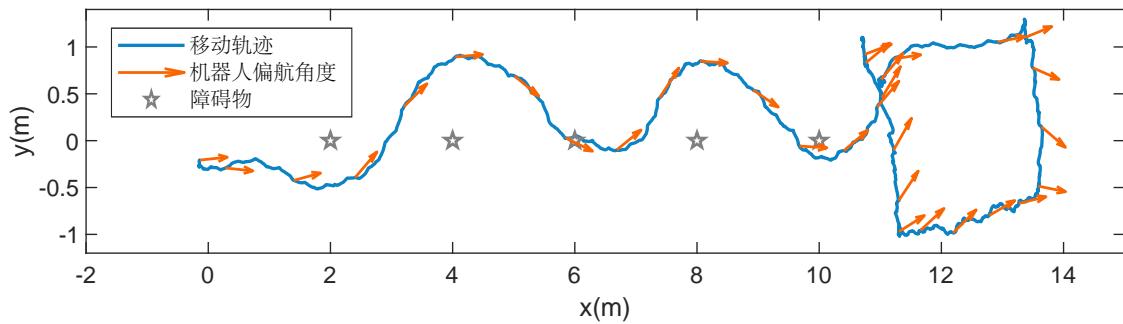


图 4-14 半人马系统全方向行走轨迹

矢状面进行行走，也能在横切面进行行走。同时，该实验也展示了半人马机器人形式的优势：能够利用穿戴者的导航决策信息在含障碍物的环境下行走，无需为机器人设计自主导航系统。

4.6 本章小结

本章的目标是让半人马机器人能够跟随穿戴者进行转弯、前进、后退和侧向行走。当前大多数关于下肢外肢体行走控制仅关注矢状面的前进行走，这有可能限制穿戴者自身的灵活移动能力。为此，本章根据用户的航向角度和运动速度状态，为半人马机器人设计了全向行走足端运动策略。其中转向控制利用了线性倒立摆模型来计算落足点的补偿值；平移运动利用系统的移动速度来规划足端的落足位置。实验表明半人马机器人能够通过改变落足点以对抗外界干扰；基于速度的落足点规划能对穿戴者的变速行走做出快速响应；所提出的策略能帮助机器人跟随用户进行前进、后退、侧向行走以及转弯运动。本章完成了半人马机器人落足点规划的研究，所生成的足端摆动轨迹用于机器人的摆动相控制。

第5章 面向非平坦地形的半人马感知行走规划

5.1 引言

相比轮式辅助负重机器人^[10,83,97]，腿足式系统可以通过选取离散的落足区域，拥有通过复杂地形的能力。半人马系统在非平坦地形下的行走面临新的挑战，例如，机器人需要在各种场景下选择安全的落足点；规划不与环境障碍产生碰撞的足端摆动轨迹；并适应穿戴者的未知的、难以预测的运动。半人马机器人作为新型的人机交互设备，处于完全自主机器人与穿戴式机器人（如外骨骼）之间。其状态既不能完全由机器人自主规划和执行，又不能作为被动设备完全由用户来决定。因此，在设计半人马机器人控制器时，需要在充分考虑穿戴者的运动条件下，对机器人的状态及机器腿的运动进行局部的规划与控制。

本章将研究半人马系统在非平坦地形下的感知规划方法。为了使半人马机器人在非平坦地形能够适应人在垂直方向上任意的运动，本章首先设计了躯干状态规划器。该规划过程将人的垂直位置作为约束条件，同时优化机器人俯仰角度和质心高度，以达到适应人运动的目标。为了让系统能够在统一的框架下适应各种非平坦地形（如有障碍物的地面、楼梯、斜坡等），将设计地形信息特征提取方法。该方法利用数字图像处理的方法，将环境中每个像素点的特征进行量化，为机器人落足点的选取过程提供依据。

本章内容安排如下：第5.2节回顾非平坦地形下的行走规划方法并介绍本文提出的方法框架；第5.3节具体介绍所提出的方法，包括躯干状态规划器、环境特征感知、足端运动调整算法、基于足端触地事件的步态调度器；最后在5.4节对所提出的方法进行实验评估。

5.2 非平坦地形行走方法综述与框架

现存下肢外肢体机器人大多数仅关注跑步机上节律性行走^[11-12]或平整地面的行走^[9]。然而，足式系统的优势在于在非平坦地形的通过能力。为展示机器人跨越障碍物的能力，Hao^[35]首先使用视觉里程计和深度相机收集系统的位姿与环境的点云信息；然后重构环境中障碍物的几何尺寸（如长、宽和高）；最后通过有限状态机的形式，根据环境信息调整机器腿膝关节角度以跨越障碍物。然而，该方法机器人的运动轨迹是预设的，应用仅针对跨越障碍物这一场景，这有可能阻碍机器人在更加广义的环境下行走。在纯自主足式机器人领域，研究者利用基于强化学

习[42,98-100]或基于模型[43,93,101]的方法使得四足机器人能够应对各种复杂地形。强化学习的方法能够保证机器人行走的鲁棒性，但由于其使用的深度神经网络的可解释性较低，难以保证用户在交互过程中的稳定性和安全性。本章将采用基于模型的方法，为半人马机器人开发非平坦行走规划策略。该通常使用轨迹优化的方法来同时规划躯干和足端运动。与自主机器人不同的是，半人马机器人由用户穿戴，其躯干的位置受人类行走的约束，因此半人马机器人的躯干状态规划需要考虑穿戴者的约束。例如，当人机系统进入倾斜地形（例如楼梯或斜坡）时，穿戴者足端与机器人足端所处的位置高度往往是不一致的；由于机器人足端工作空间的限制，机器人需要调整其躯干的俯仰角以通过倾斜地形。

本章将研究面向非平坦地形的半人马机器人行走规划方法。方法将建立于前两章全身运动控制和全向行走控制的框架之上，在考虑环境地形和穿戴者约束的条件下，对上层目标指令进行规划调整。核心模块包括四部分：机器人躯干状态参考值、环境地形感知、落足点选取和无碰撞轨迹生成、基于足端触地事件的步态调度器。本章提出的方法框架如图5-1所示。

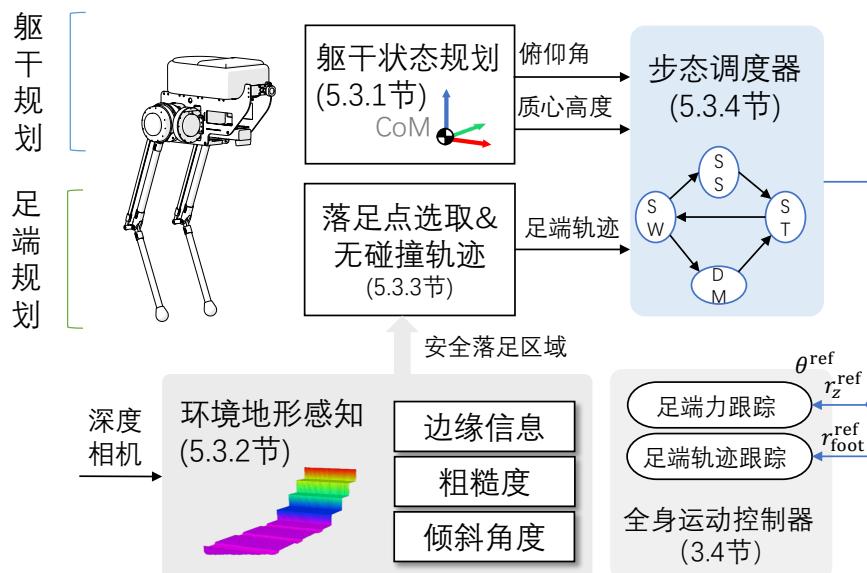


图 5-1 非平坦地形的行走规划框架

5.3 非平坦地形的行走规划方法

5.3.1 躯干状态参考值规划

在非平坦路面环境中，难以保证半人马系统每个接触点（人腿与机械腿）的地形高度完全一致。例如，穿戴者带领半人马机器人从平地切换到上楼梯（斜坡）时，穿戴者会先站在楼梯上，半人马机器人站在平地上，如图5-2所示。由于机械

腿长度的约束，半人马躯干将无法保持俯仰角为水平 ($\theta = 0$)。因此需要机器人实时调整躯干姿态与质心高度的参考值，适应用户在不同高度地形下的运动。

与完全自主的四足机器人相比，半人马系统中“穿戴者的位置”是不可控的，即半人马躯干的位置是由用户来决定的。因此，为了适应非平坦地形，需要选取部分可控的变量进行规划。

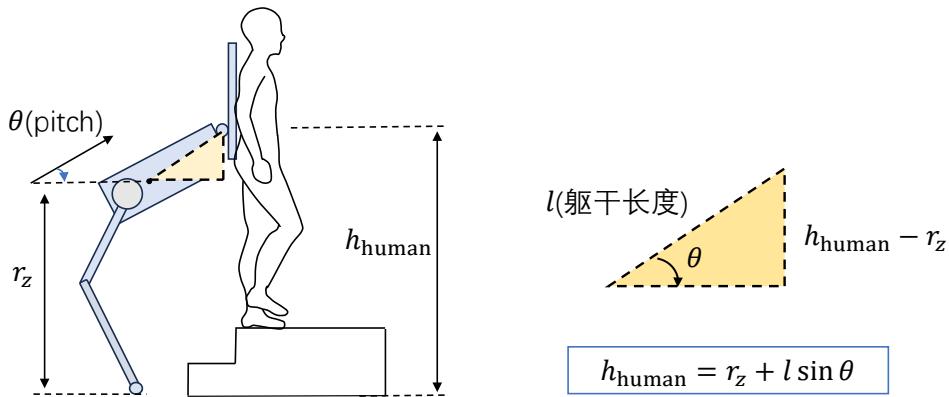


图 5-2 半人马系统在非平坦地形示意图

本节将考虑穿戴者位置约束与机器人足端运动空间约束，选取半人马躯干高度 r_z 与俯仰 θ 作为变量进行规划，以实现半人马系统的非平坦地形适应性。如图5-2所示， h_{human} 是穿戴者高度，亦可视为背板与机器人躯干交互位置的高度，该变量可以根据机器人当前质心高度与当前俯仰角度来估算。图5-2黄色三角形展示了机器人质心高度与穿戴者高度的关系。穿戴者对系统的位置约束可描述为 $h_{\text{human}} = r_z + l \sin(\theta)$ ，其中 l 为质心到人机交互处的躯干长度。为便于后续优化问题的求解，对该约束条件中在 $\theta = \theta_0$ 处进行线性化，可得 $\sin(\theta) = \sin(\theta_0) + \cos(\theta_0)(\theta - \theta_0)$ 。将上式代入穿戴者位置约束公式，可得线性化后的等式约束条件，如式 (5-1)。

$$r_z = -l \cos(\theta_0)\theta + h_{\text{human}} - l(\sin(\theta_0) + \theta_0 \cos(\theta_0)) \quad (5-1)$$

半人马机器人机械腿工作空间的约束可以近似等价为足端与质心之间的距离约束^[60]。使用式 (5-2) 作为半人马躯干质心高度 r_z 的不等式约束：

$$h^{\min} \leq r_z - h_{\text{feet}} \leq h^{\max} \quad (5-2)$$

式中 h^{\min}, h^{\max} —— 机器人足端可达高度的最小、最大值 (m)；

h_{feet} —— 当前机器人足端相对世界坐标系的高度 (m)。

足端高度取接触足的高度的最小值，如下式：

$$h_{\text{feet}} = \min(h_{\text{foot},1}, h_{\text{foot},2}) \quad (5-3)$$

最后，我们定义决策变量 $x := [\theta \ r_z]^T$ ，求解式 (5-4) 的优化问题来生成半人马

躯干状态的参考值。

$$\min_x \quad \|x_1 - 0\|_{Q_\theta} + \|x_2 - h_{\text{default}}\|_{Q_r} + \|x - x_{\text{last}}\|_R \quad (5-4a)$$

$$[l \cos(\theta_0) \quad 1]x = h_{\text{human}} - l(\sin(\theta_0) + \theta_0 \cos(\theta_0)) \quad (5-4b)$$

$$\begin{bmatrix} \theta^{\min} \\ h^{\min} + h_{\text{feet}} \end{bmatrix} \leq x \leq \begin{bmatrix} \theta^{\max} \\ h^{\max} + h_{\text{feet}} \end{bmatrix} \quad (5-4c)$$

- 式中 Q_θ, Q_r —— 对目标俯仰角度 θ 和目标高度 r_z 的优化权重；
 h_{default} —— 机器人在平坦地形的默认高度；
 x_{last} —— 上次优化结果；
 R —— 结果变化率权重；
 θ_0 —— 当前机器人的俯仰角度 (rad)；
 $\theta^{\min}, \theta^{\max}$ —— 俯仰角度最小、最大值 (rad)。

优化目标 (5-4a) 的前两项用于指定期望状态值。对于半人马系统行走任务，我们将期望俯仰角度设置为 0，即期望机器人躯干水平。期望高度 h_{default} 根据穿戴者的身高来确定。优化目标的最后一项用于惩罚优化结果的变化率 (突变值)，以达到平滑状态变化的效果。等式约束 (5-4b) 将穿戴者的位置编码进优化问题。不等式约束 (5-4c) 考虑了足端位置和俯仰角度的允许范围。

5.3.2 地形特征感知

为构建机器人周围地形特征信息，本节将采用 Miki 等^[38]研发的建图技术。该技术将里程计、机器人姿态、深度点云信息作为输入，输出以机器人为中心的栅格高程图^[40]。其中里程计信息由状态估计器获取^[47,59,95]。机器人姿态由躯干的惯性测量单元测量得到。点云信息由装配在半人马系统的 Realsense D435 相机获取。根据深度传感器的位姿，将点云投影到 $x - y$ 平面，以获取平面每个栅格的高度。最后，使用卡尔曼滤波的方式^[40]融合当前传感器的信息和多帧历史地图信息，输出一个高程图。高程图在数据结构上可看作一张 $w \times h$ 的二维灰度图 M_{height} ，像素点的坐标为地图的位置，像素点里的灰度值代表该位置的环境高度。

首先对原始环境地图进行预处理操作。为了去除数据中的离群点，将高度大于 0.7 米所在的像素点位置为空。然后使用 Navier-Stokes 法填补地图中的缺失像素点，以获得最终高程图 M_{height} 。接下来将对高程图进行运算操作，量化地图每个像素点的特征参数信息。参考文献^[41]的工作，本节将边缘度 (edges)、粗糙度

(roughness) 和坡度 (slope) 这三者作为可落足区域计算的指标。其中边缘度可检测楼梯与障碍物边缘；粗糙度可量化地形的噪点；坡度用于衡量地形的倾斜程度。具体地，使用 Sobel 算子与地图进行卷积运算以计算 x 和 y 方向的边缘^[39]：

$$\mathbf{M}_{\text{edges}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{M}_{\text{height}} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{M}_{\text{height}} \quad (5-5)$$

式中 $\mathbf{M}_{\text{edges}}$ 为边缘度地图，* 为卷积运算，前后两个矩阵分别为 x 和 y 两个方向的卷积核。关于粗糙度，使用局部方差来衡量：

$$\mathbf{M}_{\text{roughness}}(x, y) = \sqrt{\frac{\sum(\text{Submap}(x, y) - \text{mean}(\text{Submap}(x, y)))^2}{\text{size}(\text{Submap}(x, y))}} \quad (5-6)$$

式中 $\mathbf{M}_{\text{roughness}}(x, y)$ —— 坐标 (x, y) 处的粗糙度；

$\text{Submap}(x, y)$ —— 以坐标 (x, y) 为中心的 $n \times n$ 的窗口（子地图）；

$\text{mean}(\cdot)$ —— 子地图中的平均高度；

$\text{size}(\cdot)$ —— 子地图的像素总数 n^2 ；

值得指出的是，虽然粗糙度与边缘度计算的结果通常是类似的，但是前者还能用于衡量传感器多次数据的偏离程度。然后，基于主成分分析 (PCA) 法提取地形的坡度，计算公式为 (5-7) 和 (5-8)

$$[\lambda^{\max}, \lambda^{\min}] \leftarrow \text{SVD}(\text{Submap}(x, y)) \quad (5-7)$$

$$\mathbf{M}_{\text{slope}}(x, y) = \arccos(\lambda_z^{\min}) \quad (5-8)$$

式中 $\text{SVD}(\cdot)$ —— 奇异值分解，获取最大与最小特征向量 $[\lambda^{\max}, \lambda^{\min}]$ ；

$\mathbf{M}_{\text{slope}}(x, y)$ —— 坐标 (x, y) 处的倾斜角度；

λ_z^{\min} —— 最小特征向量在重力方向 z 上的分量；

从几何角度，奇异值分解后获取的两个特征向量是相互垂直的，而最小特征向量可以看作环境地形的法向量。最后，将上述三个特征地图进行加权平均运算，并用阈值来对像素点的可落足与不可落足进行分类：

$$\mathbf{M}_{\text{steppable}} = \text{threshold}(0.8, \frac{1}{3}\mathbf{M}_{\text{edges}} + \frac{1}{3}\mathbf{M}_{\text{roughness}} + \frac{1}{3}\mathbf{M}_{\text{slope}}) \quad (5-9)$$

式中 $\mathbf{M}_{\text{steppable}}$ 为可落足地图，用于指导后续机器人的运动规划。整个地图处理流程如图5-3所示。图中的示例地形是含间隙的离散地形和 15 cm 高度的楼梯，最终生成的可落足地图去除了楼梯边缘与间隙边缘区域，可落足区域为平整的地形。

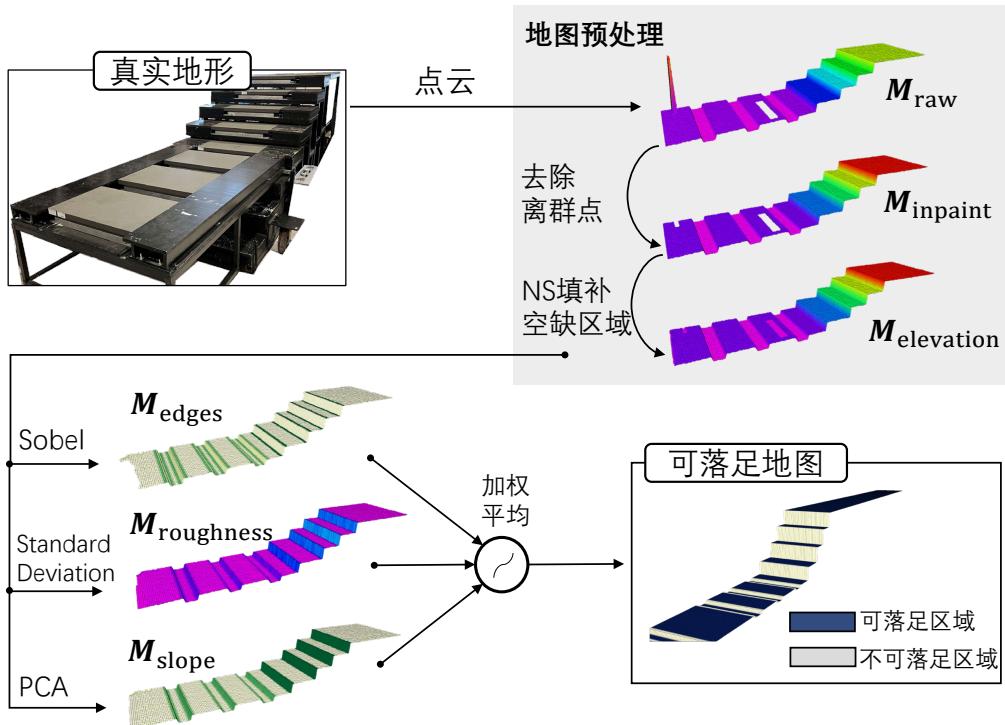


图 5-3 环境地形感知流程

5.3.3 落足点调整与无碰撞轨迹生成

获取到环境的高度和可落足区域后，下一步是选择安全的落足点并规划不与障碍物产生碰撞的摆动轨迹。该部分内容在默认的（平地环境下的）足端轨迹规划（第4.4节）基础上进行调整，以形成统一的软件框架。落足点选取的思路为寻找离默认落足点位置（nominal foothold）最近的可落足坐标。首先在默认落足点 $r^{foothold}$ 建立局部子地图，该子地图大小由足端工作空间范围决定。然后使用螺旋搜索^[39]的方法，在子地图中迭代寻找最近的可落足位置，如图5-4所示。

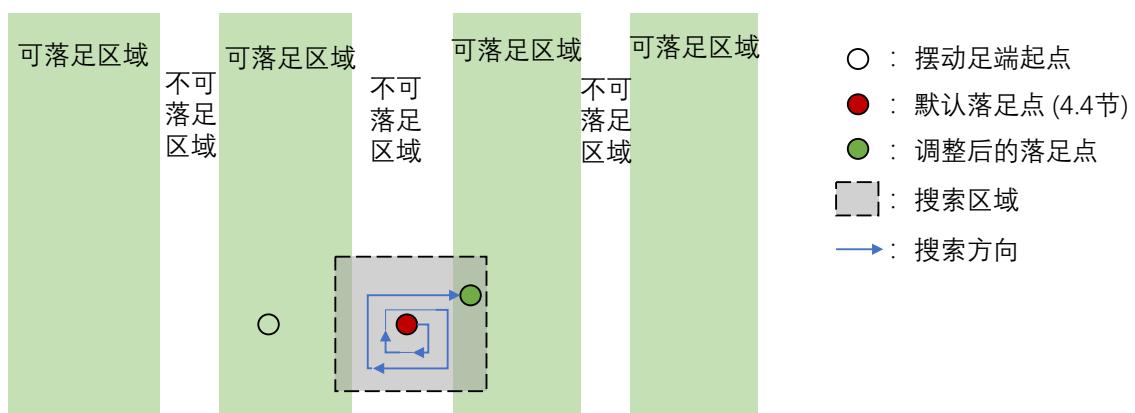


图 5-4 落足点选取示意图

接下来是根据环境地形的高度信息 $M_{elevation}$ 来规划无碰撞的摆动轨迹。在

第4.4节，摆动轨迹使用贝塞尔曲线 $B(\mathbf{r}^{\text{start}}, \mathbf{r}^{\text{foothold}}, h_{\text{swing}}, s)$ 获取。曲线包括摆动上升阶段与下降阶段，两段轨迹通过最高点 h_{swing} 连接。为避免摆动足端与环境产生碰撞，迭代增加摆动足端的抬腿高度 h_{swing} （如图5-5所示），直至足端轨迹与障碍物之间有足够的间隙。图5-5展示了随高度变化的摆动轨迹示意图，高度从 0.06 m 开始向垂直向上的方法迭代，直至轨迹与环境不产生干涉 ($h_{\text{swing}} = 0.12 \text{ m}$)。

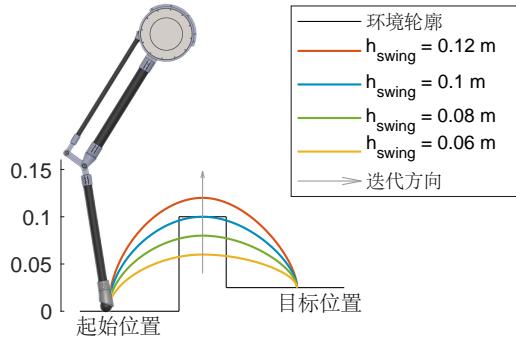


图 5-5 迭代增加抬腿高度规划的摆动轨迹

5.3.4 基于足端触地检测的步态规划器

理想状态下，在视觉感知下的控制能帮助半人马机器人在复杂地形中行走。但在现实的部署过程中，由于深度相机测量、质心位姿状态估计与机器人底层控制存在一定误差，有可能导致机器人与环境产生未知的碰撞接触。此时机器人应该切换运动状态（接触相与摆动相）以应对来自未知地形的干扰^[46]。为提高半人马机器人非平坦地形的行走能力的鲁棒性，本节将基于足端接触事件设计步态规划器（event-based gait scheduler）。参考文献^[45]的工作，图5-6（a）为半人马机器人的步态规划器，以有限状态机的形式表示，其主要功能为：

- 1) 划分足式机器人的足端运动状态：即摆动相与支撑相；
- 2) 处理非预期的接触事件：即提早接触与延迟接触。

摆动相与支撑相对应的相位为 $s_{\text{swing}} \in [0, 1]$ 与 $s_{\text{stance}} \in [0, 1]$ 。默认状态下，相位按照步态时间（time-based）周期地线性增加，足端状态按照预期相位在“摆动相”与“支撑相”之间周期切换。为了处理由于环境建模或足端轨迹控制误差造成的非预期足端接触，将步态规划器修改为基于接触事件（event-based）进行状态切换。规划器中添加了“停止摆动”和“足端向下运动”两个状态。如图5-6（b）所示，当期望落足点位于真实地形下方，机器人足端会在摆动中途 ($s_{\text{swing}} < 1$) 提前与环境进行接触。此时机器人应该终止足端摆动，将足端目标位置设置为接触瞬间的位置，以防机器人的摆动运动造成足端滑移。该状态将持续至预期摆动相结束。

当期望落足点位于真实地形上方，如图5-6（b）所示，在摆动相末期 $s_{\text{swing}} = 1$

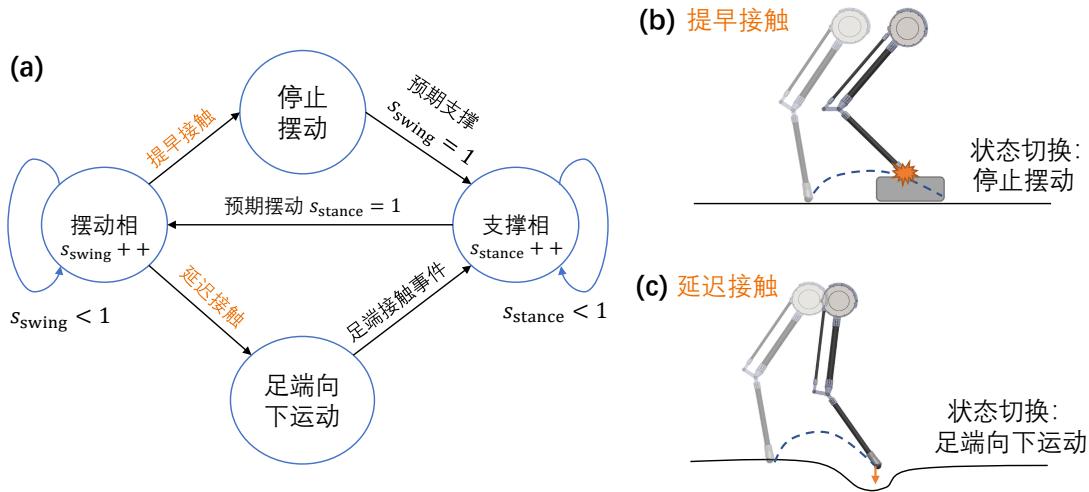


图 5-6 以有限状态机表示的步态规划器与状态示意图

(a) 步态规划器 (b) 足端提早接触后停止摆动 (c) 足端延迟接触后继续向下运动

机器人足端仍未与地面接触。如果此时摆动腿立即切换为支撑相，机器人将对会地面施加瞬时的冲击力，给机器人躯干带来较大的脉冲干扰。为避免这类干扰，步态规划器将进入“足端向下运动”状态。该状态的足端目标位置往重力垂直方向 z 向下增加，直至检测到足端再次与地面产生接触。

步态规划器基于足端触地事件以切换机器人足端的运动状态，因此还需设计足端接触事件的检测算法。通常而言，一个直接的方法是在足端安装力传感器^[52]，然后采用阈值法来判断机器人足端是否与地面产生接触。但是该方法具有成本过高、会增加足端结构复杂性的缺点，并且足端与地面的频繁冲击力容易损害力传感器^[44]。因而，根据关节速度、扭矩等本体感知信息来检测足端接触事件是更高效的方法。本节采用文献^[45]的方法，融合足端地面反力、足端垂直位置和速度信息，以估计机器人足端与地面的接触概率 $P(c|f_z, r_z^{\text{foot}}, \dot{r}_z^{\text{foot}})$ 。

5.4 感知规划方法实验评估

5.4.1 穿戴者垂直运动实验

为验证半人马机器人躯干状态规划器（第5.3.1节）的可行性，本小节设计半人马系统垂直地形自适应实验。机器人躯干默认高度 h_{default} 设置为 0.92m，优化代价函数的权重 $[Q_\theta, Q_r, R]$ 设置为 [10.0, 0.5, 4.0]。根据球铰结构的极限角度，将俯仰角的边界 $[\theta^{\min}, \theta^{\max}]$ 条件设置为 [-30, 30]；根据机器人足端垂直方向上的工作空间限制，将躯干高度的边界 $[h^{\min}, h^{\max}]$ 设置为 [0.85, 0.98]。

如图5-7所示，受试者在穿戴半人马机器人进行一系列的垂直运动：半蹲、平地站立、15 cm 高度台阶站立、30 cm 高度台阶站立。实验过程中半人马机器人在

平地进行原地踏步。

整个实验过程的半人马机器人躯干的俯仰角和高度调整变化情况分别如图5-8和5-9所示，整个过程俯仰角变化范围为 $-31.9 \sim 22.5^\circ$ ；四个状态的俯仰角平均值分别为 $19.35^\circ, 1.74^\circ, -13.50^\circ$ 和 -29.78° 。高度变化范围为 $0.83 \sim 0.98m$ ；四个状态的高度平均值分别为 $0.85, 0.91, 0.95$ 和 $0.97m$ 。实验表明机器人能够自适应调整自身躯干的俯仰角与高度，以适应穿戴者的垂直方向的运动。

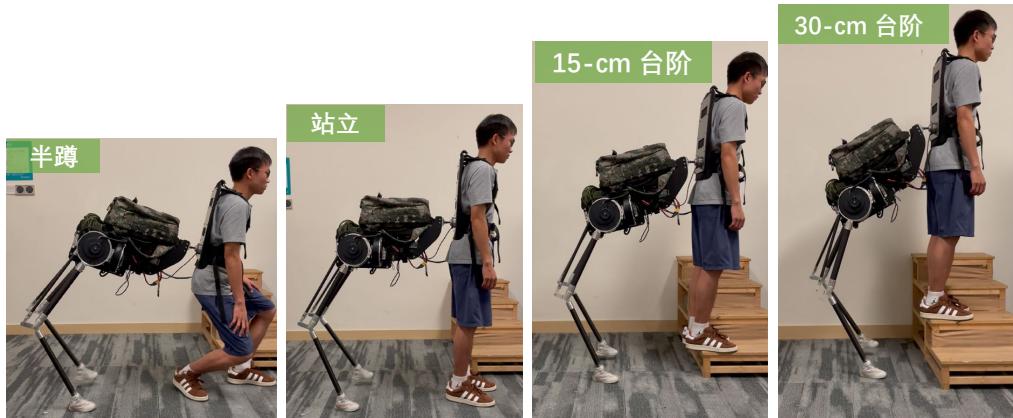


图 5-7 半人马系统垂直地形适应实验

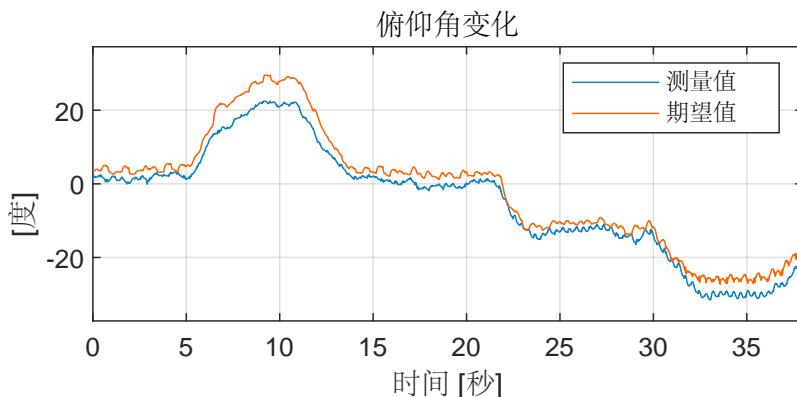


图 5-8 半人马系统垂直地形实验过程俯仰角变化曲线

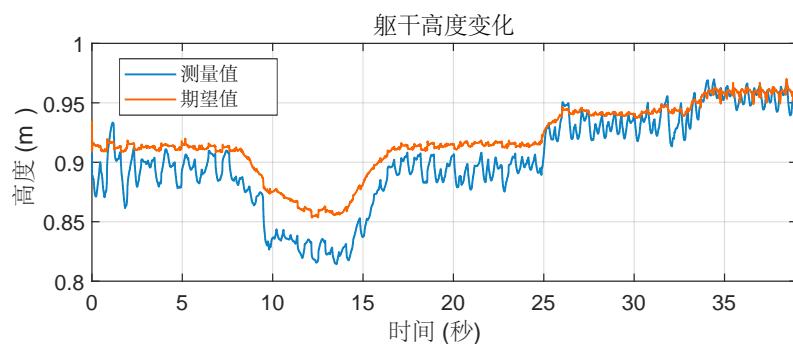


图 5-9 半人马系统垂直地形实验过程的躯干高度变化曲线

5.4.2 室内跨越障碍物实验

为验证实时环境感知算法与足端运动规划方法，本小节设计半人马系统跨障碍物实验。实验障碍物（木块）尺寸为 $8 \times 8 \times 150$ cm。深度相机（RealSense D435）佩戴在用户的腰部，用于获取人机系统前方的环境点云信息。感知规划模块电脑（Ryzen7 4800H, Nvidia RTX 2060）接收深度相机的点云数据与来自状态估计器的机器人位姿和关节角度数据，然后对环境进行实时建图（第5.3.2节）。高程图与可落足地图将用于指导机器人落足点和足端摆动高度的计算。为直观查看地图的结果和机器人的运动状态，使用 ROS RViz 软件将相应数据可视化。

运动控制器电脑（Intel, i7-10710U）位于机器人躯干，以 167 Hz 的频率运行基础运动控制器。该控制器将给视觉规划模块提供默认的落足点并实施调整后的落足位置与运动轨迹。感知规划模块电脑与运动控制器电脑通过无线方式进行数据传输。实验场景、可视化窗口与软件框架如图5-10所示。

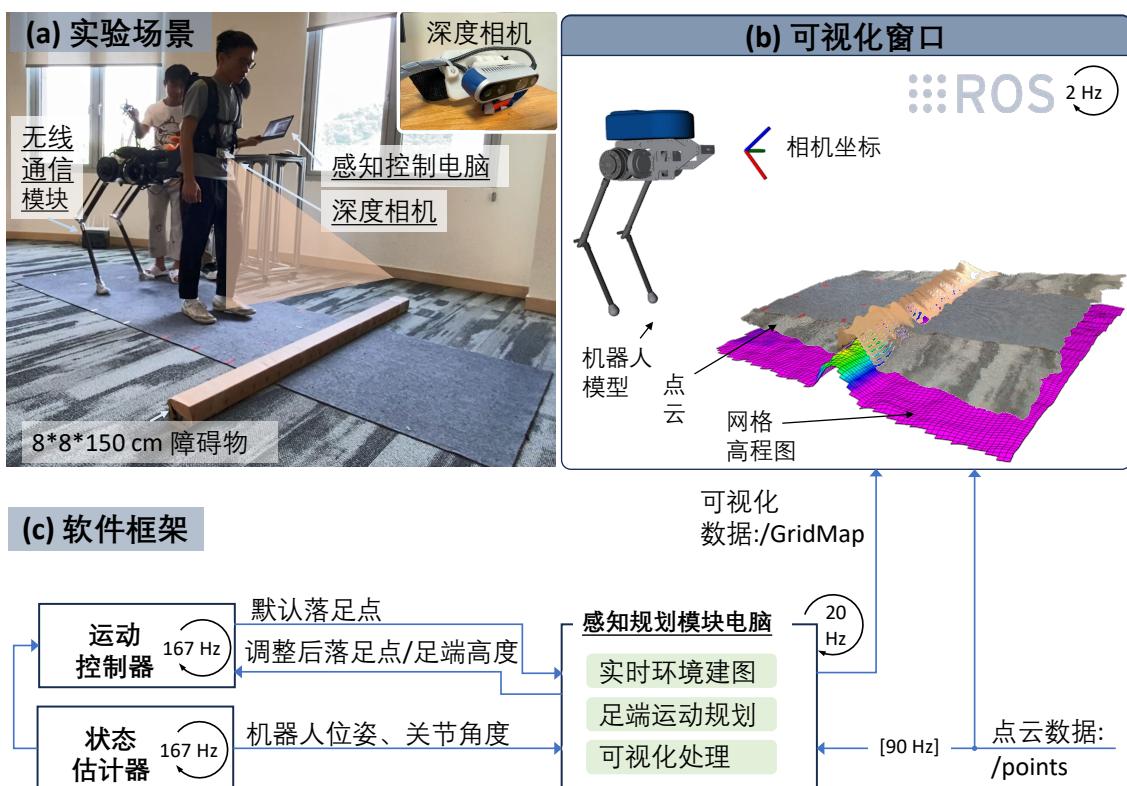


图 5-10 半人马系统跨越障碍物实验设计
(a) 实验场景 (b) RViz 可视化窗口 (c) 视觉感知与控制软件框架

实验过程机器人的步态周期设为 0.96 秒，支撑相占空比为 68.75%，对应的足端摆动时间为 0.3 秒。机器人默认落足点计算公式为式 (4-8)；默认摆动高度设为 0.08 m。高程图和可落足地图的尺寸设置为 3.6×3.6 m，更新频率为 2 Hz。首先进

行了“关闭视觉感知控制”的行走实验，由于足端摆动轨迹过低，障碍物阻挡了机器人足端的前进运动，人机系统未能通过障碍物地形。然后进行“开启视觉感知控制”的实验，实验重复了三次，半人马系统均成功通过了障碍物地形，图5-11展示了第一次实验的结果。

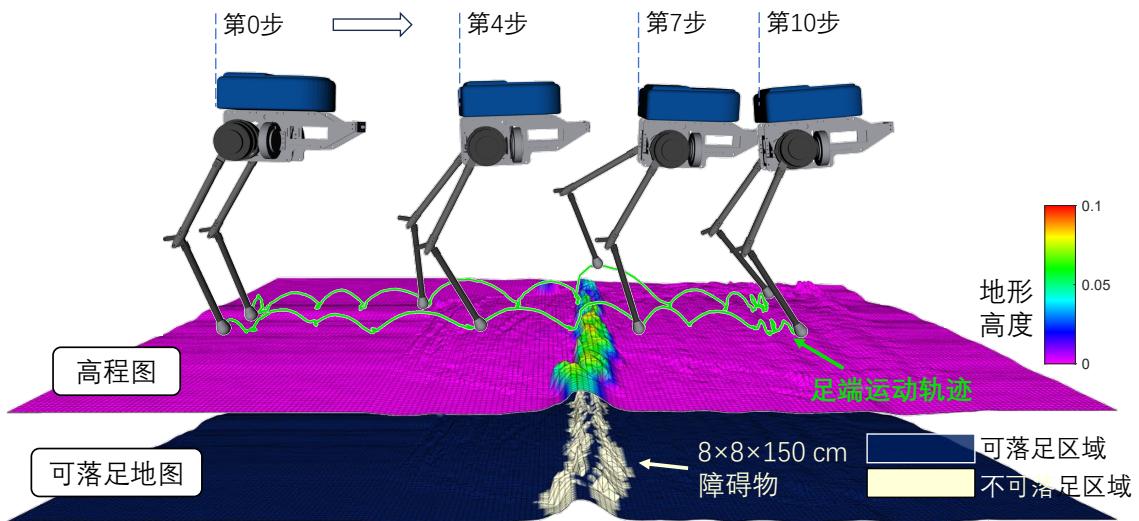


图 5-11 半人马系统跨越障碍物实验可视化结果
机器人从左到右跟随穿戴者行走；图中展示了实时感知的高程图和可落足地图

图5-11展示了实验过程中机器人的四个运动状态，机器人从左往右跟随穿戴者行走，图中的机器人以左腿的步数来表示时间戳。实时感知的高程图和可落足地图显示在图的下方。绿色的轨迹记录了机器人的足端运动轨迹。观察到半人马机器人第7步的摆动足端越过了障碍物。

图5-12展示了人机系统障碍物地形行走实验过程的快照以及足端轨迹的可视化结果。两种不同颜色的足端轨迹分别表示原始默认（天青色）和调整后的（橙色）足端规划轨迹。在第3和第4步中，由于机器人行走在平坦的地形，调整的规划轨迹与默认的轨迹重合，表示机器人采取了默认的落足点与足端摆动轨迹。机器人在第6和7步行走至障碍物前方，并分别调整了右腿和左腿的足端运动轨迹。数据显示抬腿的高度从默认高度0.08 m增加至0.165 m。重新规划的足端轨迹不与障碍物碰撞，帮助机器人成功跨越了障碍物。跨越障碍物后，机器人的落足点与摆动轨迹再次重合（第9步），恢复到默认的在平坦地形的行走规划方式。

在第二次和第三次实验，机器人规划落足点到障碍物的正上方，踏过障碍物以完成实验。这是由于在可落足地图中，障碍物（木块）正上方的区域较为平整且面积足够大，存在可落足的区域（见图5-11中展示的可落足地图）。

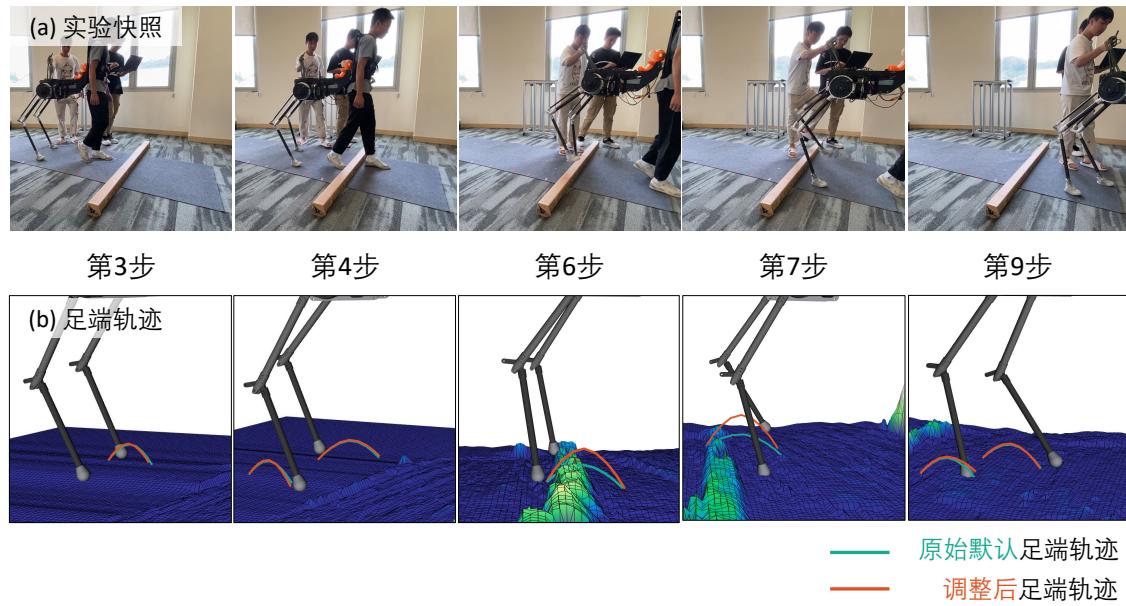


图 5-12 半人马系统跨越障碍实验结果
(a) 实验的快照 (b) 步数对应时刻的足端默认与调整后的规划轨迹

5.4.3 户外非平坦地形行走实验

为验证半人马机器人在真实地形的行走能力，本小节评估户外非平坦地形的行走性能。图5-13 (a) 为台阶行走实验的场景。台阶的高度和宽度为 12 和 30 cm。



图 5-13 台阶行走实验场景与来自相机视角的图像信息
需要去除包括用户腿或机器人腿等非环境点云

在5.4.2节的越障实验中，深度相机被用户戴在腰部。其优势在于能够获取更加广阔且干净的相机视野。但是，环境地形的精度受机器人状态估计器的影响。为避免位姿估计的飘移带来的误差，本实验将 RGBD 相机固定在半人马机器人躯干

位置，使相机能够获取机器人足端附近及时的环境信息。

实验过程发现，系统在倾斜地形（斜坡或台阶）行走时，机器人倾斜其躯干以通过地形。由于深度相机与机器人躯干固定安装，相机获取的视野会包括非环境信息，即机器腿和用户腿，如图5-13(b)所示。为去除机器腿噪声点云，可以用正运动学求解机器人腿部的位置，并将相应的边界框（bounding box）内的点云去除。为去除用户腿部的信息，利用机器人的躯干长度 l 和姿态 Φ_{IB} 估算用户相对于机器人的位置（式5-10），然后同样将其位置附近的边界框内的点云去除。

$$\mathbf{r}_{\text{HumanLegs}} = \mathbf{r} + \Phi_{IB} [l \ 0 \ -0.9]^T \quad (5-10)$$

其中 $\mathbf{r}_{\text{HumanLegs}}$ 为用户足端的中心位置； \mathbf{r} 为机器人质心位置； -0.9 为躯干质心的默认高度，由用户的身高确定。最终去噪后的点云如图5-13(c)所示。

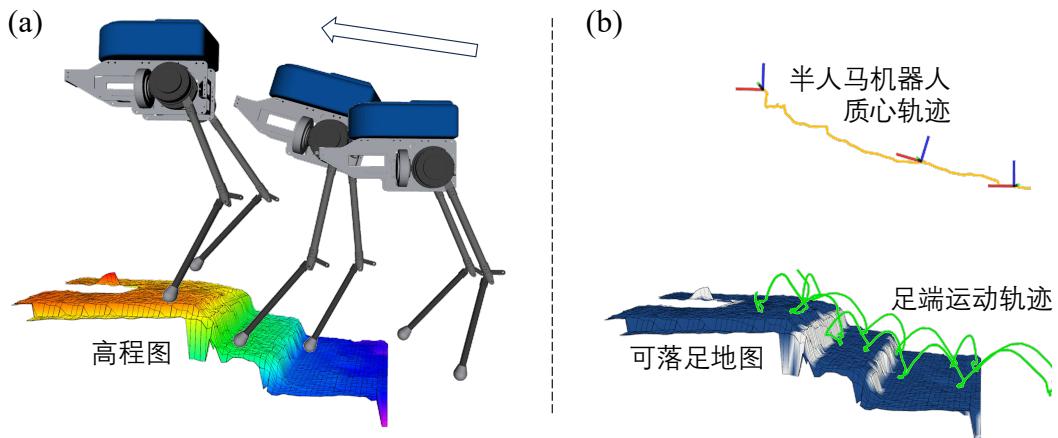


图 5-14 上台阶实验的可视化结果



图 5-15 上台阶实验过程的快照

图5-14和5-15展示了上台阶实验的结果。在上台阶实验过程中，机器人需要同时选择安全的落足点，规划不与环境碰撞的足端运动轨迹，以及调整躯干倾角。图5-14 (b)展示了实时建立的台阶的可落足地图。可以观察到，感知模块将台阶

的边缘处划分为不可落足区域，这有利于机器人选择远离台阶边缘的，平整的位置进行落足。同时，从图中可以观察到机器人足端不与台阶产生碰撞。上台阶过程的前进速度约 0.31 m/s 。人机系统行走前期（对应时刻：11:07 秒），穿戴者先站在两级台阶上，而机器人在后方站在地面，如图5-15所示。此时由于机器人的足端的运动空间限制，机器人需要倾斜其躯干行走，数据显示在 11 秒时机器人俯仰角为 -18.45° 。完成上台阶后（对应时刻：12:27 秒），机器人躯干恢复到平坦地形行走时的姿态和高度。

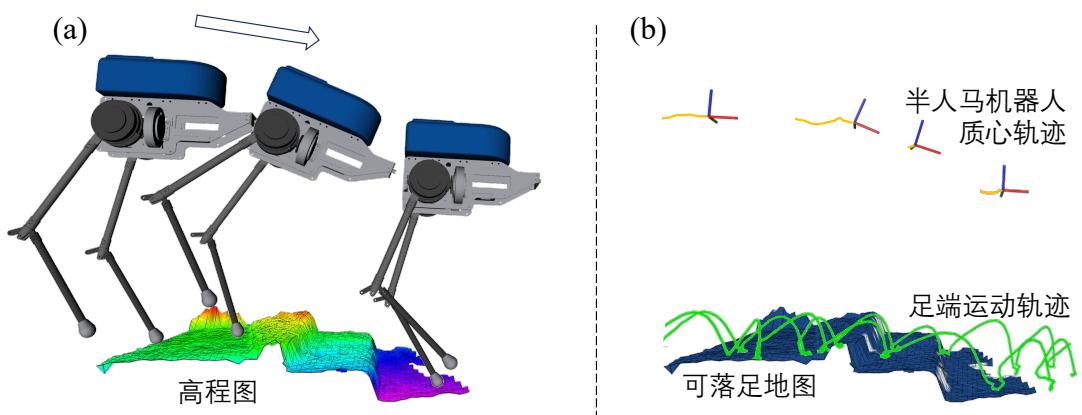


图 5-16 下台阶实验的可视化结果



图 5-17 下台阶实验过程的快照

图5-16与5-17展示了下台阶实验的结果。行走过程中的前进速度约 0.28 m/s 。与上台阶类似，在行走过程中机器人需要调整其躯干的倾斜角以通过台阶地形，数据显示在 31 秒时机器人俯仰角为 21.30° 。观察到高程图的台阶高度差较小，其原因可能是下台阶过程深度相机角度有偏差，因视野受限而丢失了部分点云数据。

图5-18展示了上台阶和下台阶实验的俯仰角的变化情况。8 ~ 15 秒为上楼梯阶段，机器人通过增大躯干俯仰角以适应穿戴者的运动，该过程的最值角度为 -18.55° 。27 ~ 35 秒为上楼梯阶段，该过程的最值角度为 22.90° 。

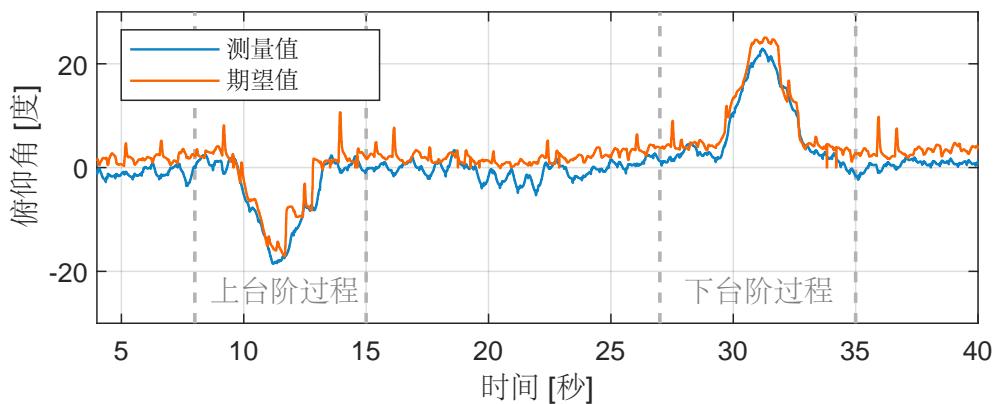


图 5-18 上下台阶实验过程的俯仰角变化

为验证半人马机器人在不平坦地形的行走能力，进行了一系列的户外环境行走实验，如图5-19所示。实验展现了半人马机器人能够在上下斜坡、草地、碎石路等自然环境地形跟随穿戴者行走。



图 5-19 半人马系统户外自然环境行走实验
(A-B) 上斜坡行走 (C-D) 下斜坡行走 (E-G) 草地和碎石路面行走

5.5 本章小结

本章旨在提高半人马机器人的地形适应能力，发挥其作为足式机器人的潜力。针对在非平坦地形中人与机器人所站高度不一致的问题，为半人马机器人提出了躯干状态参考值规划器，以生成最优的躯干俯仰和高度目标值。使用了深度相机获取人机系统的环境点云，实时建立地形的高度图。基于数字图像处理的方法，提取了高度图中的特征信息，用以划分环境地形的可落足区域和不可落足区域。利用了搜索的方法选择合适的落足点。根据高度地图，使用迭代增加的方法产生了不与环境产生碰撞的足端运动轨迹。本章根据环境信息调整机器人运动，属于高层规划部分，生成的躯干状态与足端轨迹将作为底层控制器的期望值。

实验部分首先验证了机器人躯干规划器的可行性，展示了半人马机器人能够适应穿戴者半蹲、站立、15 cm 台阶以及 30 cm 台阶的垂直运动。然后进行了室内的跨越障碍物实验，结果表明系统能够实时对环境进行感知。机器人将足端摆动高度从 0.08 m 调整至 0.165 m 以避免与环境产生碰撞。最后实验证明了半人马机器人能够跟随穿戴者上下台阶、上下斜坡以及在草地和碎石路面行走，所提出的策略能够拓宽半人马机器人的应用场景。

结论

携带重物行走在日常生活及军事领域是常见且富有挑战的任务。半人马机器人是一类新型的增强人体负重行走能力的外肢体机器人；相比于悬浮式负重背包，它能够将负载的重量通过机械腿传递到地面以减轻用户的背负压力；相比于外骨骼机器人，它具有与用户四肢独立的运动空间，能够避免机器人与穿戴者的四肢的运动产生矛盾。本文围绕半人马机器人平台展开研究，一定程度上解决了现存外肢体机器人约束用户躯干运动自由度、缺少动态行走平衡性能、影响穿戴者灵活移动能力与应有场景单一等问题。提升人机系统的实用性能并拓宽了其应用场景，增强了机器人在多场景下跟随穿戴者行走的能力。本文主要完成的工作总结如下：

(1) 完成了半人马机器人的搭建。改进了物理人机交互方式，使用球铰连接用户与机器人躯干，以解耦人机系统间的旋转运动。将二自由度的机械腿改进为三自由度，使其满足半人马机器人在三维空间内运动的需求。搭建了机器人的硬件系统，使用惯性测量单元、六维力传感器以及深度相机等传感器获取机器人的状态，使用准直驱电机驱动机器人的关节进行运动。通过设计实验以验证球铰的交互方式有利于降低机器人运动对穿戴者的干扰力；同时证明了所提出的交互方式一定程度上解耦了人机系统的旋转运动，给穿戴者提供了独立于机器人的躯干侧屈、扭转、伸展运动。

(2) 完成了半人马机器人动态平衡控制的设计。推导了半人马机器人的动力学模型。为满足穿戴者能够带领机器人在环境中任意行走的需求，消除了常规单刚体动力学模型中的位置状态变量。使用模型预测控制的方法求解机器人的足端地面对反力，并且利用全身运动控制求解最终的关节电机扭矩，以完成足端力和足端运动轨迹跟踪任务。实验结果展示了半人马机器人能够跟随多名受试者进行行走任务，并且能够保持器姿态角度的稳定。设计负重对比实验，验证了半人马机器人的负重能力。

(3) 完成了半人马机器人全向行走策略的方法研究。基于人机系统的移动速度规划了平移运动的机器人的初始落足点位置。基于线性倒立摆模型计算了系统横向的落足点补偿值以达到调节机器人偏航角的功能。使用贝塞尔曲线规划了机器人足端运动轨迹。设计了机器人抗扰动实验，验证了半人马机器人调节航向角的能力。设计跑步机的行走实验，验证了机器人具有变速行走的能力。开展了人机系统全向行走实验，证明所提出的策略能够使半人马机器人跟随受试者进行前进、

后退、侧向行走以及转弯运动。

(4) 完成了基于视觉感知的半人马机器人运动规划方法研究。提出了机器人躯干参考值规划器，以优化机器人在非平坦地形行走过程的状态。基于深度相机的点云数据，构建了实时地形特征感知的方法流程。根据环境的特征信息为机器人选择了安全的落足点。根据环境的高度信息，使用迭代法规划不与环境产生碰撞的摆动轨迹。设计了用户垂直运动实验以展示机器人能够调节自身俯仰角和高度以适应穿戴者在冠状面的运动。设计一系列非平坦地形行走实验，验证半人马机器人能够在含有障碍物地形、台阶、斜坡、草地以及碎石路面跟随用户行走。

本文的创新性工作总结如下：

- 提出使用球铰作为新型人机交互方式，以解耦人机系统间的旋转运动。
- 提出了基于降阶的动力学模型的平衡控制器，实现机器人行走的动态平衡。
- 提出了面向非平坦地形的躯干规划器，使机器人适应用户垂直方向的运动。

结合本文的内容，未来可以开展以下方面的研究工作：

(1) 优化机器人腿部结构。点足式机器人需要通过切换摆动腿以保持系统平衡，高频率的踏步运动可能会造成较高的能量损耗。未来可以设计仿人的腿式结构，设计机器人单腿平衡控制器，以实现更高效的行走模式。

(2) 研究人机交互力对人体行走的影响。本文将人机交互力仅看作是机器人对穿戴者的扰动。研究发现^[102]在行走过程中给人类质心提供前向推力可以降低人行走的新陈代谢率。未来工作可以研究人机交互力对人体生物力学的影响，揭示人机系统行走的机理，根据用户的状态优化控制器的设计。

(3) 探究基于强化学习的系统控制策略。本文基于模型为半人马机器人开发了感知、规划和控制方法。但过程过于复杂，部署到样机需要大量参数调节的过程。强化学习提供了一种不基于模型的控制思路^[42,103]，利用深度神经网络的泛化性能，能够提高半人马机器人在复杂地形行走的鲁棒性以及自适应负重的能力。

参考文献

- [1] LI T, LI Q. A systematic review on load carriage assistive devices: Mechanism design and performance evaluation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 180: 105142.
- [2] LIANG J, ZHANG Q, LIU Y, et al. A review of the design of load-carrying exoskeletons[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(9): 2051-2067.
- [3] SURI C, SHOJAEI I, BAZRGARI B. Effects of school backpacks on spine biomechanics during daily activities: a narrative review of literature[J]. *Human factors*, 2020, 62(6): 909-918.
- [4] BRZEK A, DWORRAK T, STRAUSS M, et al. The weight of pupils' schoolbags in early school age and its influence on body posture[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2017, 18(1): 1-11.
- [5] EDEN J, BRÄCKLEIN M, IBÁÑEZ J, et al. Principles of human movement augmentation and the challenges in making it a reality[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-13.
- [6] LI H B, LI Z, HE L, et al. Wearable extra robotic limbs: a systematic review of current progress and future prospects[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2023, 109(1): 16.
- [7] PRATTICIZZO D, POZZI M, BALDI T L, et al. Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives[J]. *Progress in Biomedical Engineering*, 2021, 3(4): 042005.
- [8] YANG B, HUANG J, CHEN X, et al. Supernumerary robotic limbs: a review and future outlook [J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2021, 3(3): 623-639.
- [9] HAO M, ZHANG J, CHEN K, et al. Supernumerary robotic limbs to assist human walking with load carriage[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2020, 12(6).
- [10] LENG Y, LIN X, HUANG G, et al. Wheel-legged robotic limb to assist human with load carriage: An application for environmental disinfection during COVID-19[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 3695-3702.
- [11] KHAZOOM C, CAILLOUETTE P, GIRARD A, et al. A supernumerary robotic leg powered by magnetorheological actuators to assist human locomotion[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 5143-5150.
- [12] PARIETTI F, CHAN K C, HUNTER B, et al. Design and control of supernumerary robotic limbs for balance augmentation[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 5010-5017.
- [13] PARIETTI F, CHAN K, ASADA H H. Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014: 141-148.
- [14] ROME L C, FLYNN L, YOO T D. Rubber bands reduce the cost of carrying loads[J]. *Nature*, 2006, 444(7122): 1023-1024.

-
- [15] YANG L, XIONG C, HAO M, et al. Energetic response of human walking with loads using suspended backpacks[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(5): 2973-2984.
 - [16] HOOVER J, MEGUID S. Performance assessment of the suspended-load backpack[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2011, 7: 111-121.
 - [17] YANG L, XU Y, ZHANG J, et al. Design of an elastically suspended backpack with a tunable damper[C]//2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). IEEE, 2019: 180-185.
 - [18] HE L, XIONG C, ZHANG Q, et al. A backpack minimizing the vertical acceleration of the load improves the economy of human walking[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2020, 28(9): 1994-2004.
 - [19] ZOSS A B, KAZEROONI H, CHU A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX)[J]. IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 2006, 11(2): 128-138.
 - [20] WANG T, ZHU Y, ZHENG T, et al. PALExo: A parallel actuated lower limb exoskeleton for high-load carrying[J]. IEEE Access, 2020, 8: 67250-67262.
 - [21] WALSH C J, ENDO K, HERR H. A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2007, 4(03): 487-506.
 - [22] GONZALEZ D J, ASADA H H. Design of extra robotic legs for augmenting human payload capabilities by exploiting singularity and torque redistribution[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 4348-4354.
 - [23] YANG P, YAN H, YANG B, et al. A centaur system for assisting human walking with load carriage[C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 5242-5248.
 - [24] GONZALEZ D J, ASADA H H. Hybrid open-loop closed-loop control of coupled human–robot balance during assisted stance transition with extra robotic legs[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1676-1683.
 - [25] HUTTER M, SOMMER H, GEHRING C, et al. Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(8): 1047-1062.
 - [26] ZHANG J, CHEAH C C, COLLINS S H. Torque control in legged locomotion[M]. Elsevier, 2017: 347-400.
 - [27] DE LUCA A, ALBU-SCHAFFER A, HADDADIN S, et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2006: 1623-1630.
 - [28] WINKLER A W, BELLICOSO C D, HUTTER M, et al. Gait and trajectory optimization for legged systems through phase-based end-effector parameterization[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1560-1567.
 - [29] DING Y, PANDALA A, LI C, et al. Representation-free model predictive control for dynamic motions in quadrupeds[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(4): 1154-1171.
 - [30] DI CARLO J, WENSING P M, KATZ B, et al. Dynamic locomotion in the mit cheetah 3 through convex model-predictive control[C]//2018 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2018: 1-9.

-
- [31] KIM D, JORGENSEN S J, LEE J, et al. Dynamic locomotion for passive-ankle biped robots and humanoids using whole-body locomotion control[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, 39(8): 936-956.
 - [32] BELLICOSO C D, JENELTEN F, FANKHAUSER P, et al. Dynamic locomotion and whole-body control for quadrupedal robots[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 3359-3365.
 - [33] DOLLAR A M, HERR H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(1): 144-158.
 - [34] YANG L, XIANG K, PANG M, et al. Inertial sensing for lateral walking gait detection and application in lateral resistance exoskeleton[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-14.
 - [35] 郝鸣. 穿戴式外肢体助力行走机器人关键技术研究[D]. 北京: 清华大学机械工程系, 2021: 128-130.
 - [36] ZHANG K, XIONG C, ZHANG W, et al. Environmental features recognition for lower limb prostheses toward predictive walking[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2019, 27(3): 465-476.
 - [37] HUA Y, ZHANG H, LI Y, et al. Vision assisted control of lower extremity exoskeleton for obstacle avoidance with dynamic constraint based piecewise nonlinear MPC[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 12267-12274.
 - [38] MIKI T, WELLHAUSEN L, GRANDIA R, et al. Elevation mapping for locomotion and navigation using gpu[C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 2273-2280.
 - [39] KIM D, CARBALLO D, DI CARLO J, et al. Vision aided dynamic exploration of unstructured terrain with a small-scale quadruped robot[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 2464-2470.
 - [40] FANKHAUSER P, BLOESCH M, HUTTER M. Probabilistic terrain mapping for mobile robots with uncertain localization[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 3019-3026.
 - [41] JENELTEN F, MIKI T, VIJAYAN A E, et al. Perceptive locomotion in rough terrain—online foothold optimization[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 5370-5376.
 - [42] MIKI T, LEE J, HWANGBO J, et al. Learning robust perceptive locomotion for quadrupedal robots in the wild[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(62): eabk2822.
 - [43] GRANDIA R, JENELTEN F, YANG S, et al. Perceptive locomotion through nonlinear model-predictive control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(5): 3402-3421.
 - [44] HWANGBO J, BELLICOSO C D, FANKHAUSER P, et al. Probabilistic foot contact estimation by fusing information from dynamics and differential/forward kinematics[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016: 3872-3878.
 - [45] BLEDT G, WENSING P M, INGERSOLL S, et al. Contact model fusion for event-based locomotion in unstructured terrains[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 4399-4406.

-
- [46] PARK H W, RAMEZANI A, GRIZZLE J W. A finite-state machine for accommodating unexpected large ground-height variations in bipedal robot walking[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 29(2): 331-345.
 - [47] BLEDT G, POWELL M J, KATZ B, et al. Mit cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 2245-2252.
 - [48] ZHANG K, LUO J, XIAO W, et al. A subvision system for enhancing the environmental adaptability of the powered transfemoral prosthesis[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 51 (6): 3285-3297.
 - [49] MAGANA O A V, BARASUOL V, CAMURRI M, et al. Fast and continuous foothold adaptation for dynamic locomotion through cnns[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 2140-2147.
 - [50] ZUCKER M, RATLIFF N, DRAGAN A D, et al. Chomp: Covariant hamiltonian optimization for motion planning[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(9-10): 1164-1193.
 - [51] FANKHAUSER P, BJELOMICH M, BELLICOSO C D, et al. Robust rough-terrain locomotion with a quadrupedal robot[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 5761-5768.
 - [52] HUTTER M, GEHRING C, JUD D, et al. Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot[C]//2016 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2016: 38-44.
 - [53] ZIMMERMANN Y, SOMMERHALDER M, WOLF P, et al. ANYexo 2.0: A fully actuated upper-limb exoskeleton for manipulation and joint-oriented training in all stages of rehabilitation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 2131-2150.
 - [54] HYUN D J, PARK H, HA T, et al. Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 95: 181-195.
 - [55] HUA Y, FAN J, LIU G, et al. A novel weight-bearing lower limb exoskeleton based on motion intention prediction and locomotion state identification[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 37620-37638.
 - [56] ANDERSON F C, PANDY M G. Dynamic optimization of human walking[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2001, 123(5): 381-390.
 - [57] LYNCH K M, PARK F C. Modern robotics[M]. Cambridge University Press, 2017: 16-17.
 - [58] SILICIANO B, SCIAVICCO L, VILLANI L, et al. Robotics: modelling, planning and control [M]. New York, NY, USA: Springer, 2010: 277-280.
 - [59] BLOESCH M, HUTTER M, HOEPFLINGER M A, et al. State estimation for legged robots-consistent fusion of leg kinematics and IMU[J]. *Robotics*, 2013, 17: 17-24.
 - [60] BELLICOSO C D, GEHRING C, HWANGBO J, et al. Perception-less terrain adaptation through whole body control and hierarchical optimization[C]//2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2016: 558-564.

- [61] AGHOGHOVWIA B. Curvature and movements of the vertebral column[EB/OL]. (2022-05-20)[2024-03-05]. <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/curvature-and-movements-of-the-vertebral-column>.
- [62] WIEBER P B, TEDRAKE R, KUINDERSMA S. Modeling and control of legged robots[M]// Springer handbook of robotics. Springer, 2016: 1204-1207.
- [63] FOCCHI M, DEL PRETE A, HAVOUTIS I, et al. High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots[J]. Autonomous Robots, 2017, 41: 259-272.
- [64] GARCIA E, ESTREMERAS J, DE SANTOS P G. A classification of stability margins for walking robots[J]. Robotica, 2002, 20(6): 595-606.
- [65] VUKOBRATOVIĆ M, BOROVAC B. Zero-moment point—thirty five years of its life[J]. International journal of humanoid robotics, 2004, 1(01): 157-173.
- [66] KAJITA S, HIRUKAWA H, HARADA K, et al. Introduction to humanoid robotics: Vol. 101 [M]. Springer, 2014: 159-152.
- [67] PRATT J, CHEW C M, TORRES A, et al. Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(2): 129-143.
- [68] RAWLINGS J B, MAYNE D Q, DIEHL M. Model predictive control: theory, computation, and design: Vol. 2[M]. Nob Hill Publishing Madison, WI, 2017.
- [69] WESTERVELT E R, GRIZZLE J W, CHEVALLEREAU C, et al. Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion[M]. CRC press, 2018: 124-128.
- [70] SICILIANO B, KHATIB O. Springer handbook of robotics: Vol. 200[M]. Springer, 2016: 11-12.
- [71] SHIN Y H, HONG S, WOO S, et al. Design of KAIST HOUND, a quadruped robot platform for fast and efficient locomotion with mixed-integer nonlinear optimization of a gear train[C]// 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2022: 6614-6620.
- [72] GIBSON G, DOSUNMU-OGUNBI O, GONG Y, et al. Terrain-adaptive, alip-based bipedal locomotion controller via model predictive control and virtual constraints[C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 6724-6731.
- [73] KUINDERSMA S, DEITS R, FALLON M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot[J]. Autonomous Robots, 2016, 40: 429-455.
- [74] FERREAU H J, KIRCHES C, POTSCHEKA A, et al. qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming[J]. Mathematical Programming Computation, 2014, 6(4): 327-363.
- [75] STELLATO B, BANJAC G, GOULART P, et al. OSQP: An operator splitting solver for quadratic programs[J]. Mathematical Programming Computation, 2020, 12(4): 637-672.
- [76] PANDALA A G, DING Y, PARK H W. qpSWIFT: A Real-Time Sparse Quadratic Program Solver for Robotic Applications[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3355-3362.

-
- [77] ZHANG J, WANG S, WANG H, et al. An adaptive approach to whole-body balance control of wheel-bipedal robot Ollie[C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 12835-12842.
 - [78] FEATHERSTONE R. Rigid body dynamics algorithms[M]. Springer, 2014: 10-13.
 - [79] SPONG M W, HUTCHINSON S, VIDYASAGAR M. Robot modeling and control[M]. John Wiley & Sons, 2020: 272-273.
 - [80] PARIETTI F, ASADA H H. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014: 1176-1183.
 - [81] LUO J, GONG Z, SU Y, et al. Modeling and balance control of supernumerary robotic limb for overhead tasks[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 4125-4132.
 - [82] BRIGHT L L Z. Supernumerary robotic limbs for human augmentation in overhead assembly tasks[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2017.
 - [83] XIANG Y, YAN X, SU H, et al. Powered super tail: a terrain-adaptive wheel-legged robotic limb to assist human's load carriage[C]//2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2021: 676-681.
 - [84] YANG L, XU Y, ZHANG K, et al. Allowing the load to swing reduces the mechanical energy of the stance leg and improves the lateral stability of human walking[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, 29: 429-441.
 - [85] ZIJLSTRA W, HOF A L. Assessment of spatio-temporal gait parameters from trunk accelerations during human walking[J]. Gait & Posture, 2003, 18(2): 1-10.
 - [86] PRATT J E, TEDRAKE R. Velocity-based stability margins for fast bipedal walking[M]//Fast Motions in Biomechanics and Robotics: Optimization and Feedback Control. Springer, 2006: 299-324.
 - [87] GONG Y, HARTLEY R, DA X, et al. Feedback control of a cassie bipedal robot: Walking, standing, and riding a segway[C]//2019 American Control Conference (ACC). IEEE, 2019: 4559-4566.
 - [88] SUNDARALINGAM B, LAMBERT A S, HANDA A, et al. Robust learning of tactile force estimation through robot interaction[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 9035-9042.
 - [89] CHAND P, VEER S, POULAKAKIS I. Interactive dynamic walking: learning gait switching policies with generalization guarantees[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 4149-4156.
 - [90] KAJITA S, TANI K. Study of dynamic walk control of a biped robot on rugged terrain Derivation and application of the linear inverted pendulum mode[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1991, 27(2): 177-184.
 - [91] HYUN D J, SEOK S, LEE J, et al. High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(11): 1417-1445.

- [92] KIM D, ZHAO Y, THOMAS G, et al. Stabilizing series-elastic point-foot bipeds using whole-body operational space control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1362-1379.
- [93] JENELTEN F, GRANDIA R, FARSHIDIAN F, et al. TAMOLS: Terrain-aware motion optimization for legged systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(6): 3395-3413.
- [94] MATHEWS J H, FINK K D, et al. Numerical methods using MATLAB: Vol. 4[M]. Pearson prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2004: 310-318.
- [95] HARTLEY R, GHAFARI M, EUSTICE R M, et al. Contact-aided invariant extended Kalman filtering for robot state estimation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, 39(4): 402-430.
- [96] CHEN H, HONG Z, YANG S, et al. Quadruped capturability and push recovery via a switched-systems characterization of dynamic balance[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 2111-2130.
- [97] KETKO I, PLOTNIK M, YANOVICH R, et al. Wheeled assistive device for load carriage—the effects on human gait and biomechanics[J]. *Ergonomics*, 2017, 60(10): 1415-1424.
- [98] LEE J, HWANGBO J, WELLHAUSEN L, et al. Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(47): eabc5986.
- [99] CHOI S, JI G, PARK J, et al. Learning quadrupedal locomotion on deformable terrain[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(74): eade2256.
- [100] JENELTEN F, HE J, FARSHIDIAN F, et al. DTC: deep tracking control[J]. *Science Robotics*, 2024, 9(86): eadh5401.
- [101] MASTALLI C, HAVOUTIS I, FOCCHI M, et al. Motion planning for quadrupedal locomotion: Coupled planning, terrain mapping, and whole-body control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(6): 1635-1648.
- [102] ANTONELLIS P, MOHAMMADZADEH GONABADI A, MYERS S A, et al. Metabolically efficient walking assistance using optimized timed forces at the waist[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(64): eabh1925.
- [103] HOELLER D, RUDIN N, SAKO D, et al. Anymal parkour: learning agile navigation for quadrupedal robots[J]. *Science Robotics*, 2024, 9(88): eadi7566.

个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

1998 年 11 月 21 日出生于广东省阳春市。

2017 年 9 月考入华南农业大学工程学院自动化专业，2021 年 6 月本科毕业并获得工学学士学位。

2021 年 9 月——2024 年 6 月，在南方科技大学机械与能源工程系智能制造与机器人学科学习并攻读工学硕士学位。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文

- [1] YAN H, LI J, LIU H, TU Z, YANG P, PANG M, LENG Y, FU C. Locomotion Control on Human-Centaur System with Spherical Joint Interaction[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(5):4838-4845. (SCI 收录, IF=5.2, 对应学位论文第 2,3,4 章)
- [2] YANG P, YAN H, YANG B, LI J, LI K, LENG Y, FU C. A Centaur System for Assisting Human Walking with Load Carriage[C]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Kyoto, Japan, 2022: 5242-5248. (EI 收录, 对应学位论文第 1 章)