问题背景

人类的运动能力涵盖了广泛的范围 [1]，能够适应各种任务所需的不同步态，例如站立、行走、快步走、小跑、奔跑和跳跃 [2]。这种适应性甚至包括蹲姿行走，使人类能够在广泛的动作范围中表现出卓越的灵活性和机动性。幸运的是，大多数人类运动可以被视为周期性或准周期性 [3] [4]，这为人形机器人运动控制器的设计提供了极大的便利。

在过去几十年中，已经开发了许多机器人及相应的控制算法，以实现周期性步态 [5] [6] [7]。尽管取得了显著进展，人形机器人在运动范围方面仍无法与人类相提并论。因此，尤其是像跑步这样的高动态步态的实现，已引起越来越多的关注。

通常有两种方法可以生成稳定的周期性步态，其中之一是基于模型的方法 [8]。这种方法通过建立简化或精确的模型来分析运动学或动力学，从而生成理想的参考轨迹，并通过基于模型计算的反馈控制来跟踪该轨迹，以确保机器人的行走模式稳定 [9] [10]。线性倒立摆模型（LIPM）是人形和四足机器人中应用最广泛的简化模型之一 [11] [12]。Kajita等人 [13] 将机器人建模为固定高度的倒立摆，将复杂的动力学简化为一个质心点质量，并使用预览控制方法结合零力矩点（ZMP）控制。基于LIPM，Takenaka等人 [14] 将其扩展为可变高度倒立摆模型（VHIP），并分析了运动的发散分量（DCM），以生成周期性跑步步态。Han等人 [15] 结合3D弹簧加载倒立摆（3D-SLIP）模型与任务空间非线性最小二乘优化器，实现了6.5 m/s的稳定跑步。单刚体模型（SRBM）在基于优化的方法中被广泛用于质心运动规划 [16] [17] [18]。通过手动指定接触顺序，并参考SRBM在线求解优化问题，Bellicoso等人 [19] 在四足机器人上实现了多种步态及平滑过渡。García等人 [20] 提出了结合SRBM和方向变量的MPC运动控制方法。通过模仿生物体的神经机制，中央模式发生器（CPG）使用耦合振荡器模型生成可调节频率和幅度的步态周期，以响应感官反馈和环境变化 [21] [22] [23] [24]。

模型方法的一个主要缺点是，这些简化模型通常假设机器人某些关节是被动的或锁定的 [24] [25]，只允许一种或有限的步态模式。这导致运动空间仅代表了机器人全部潜力的一小部分，限制了对所有驱动关节所提供的完整运动范围和灵活性的探索和利用。

另一种实现人形机器人稳定周期性步态的方法是强化学习。在过去十年中，强化学习越来越多地应用于人形机器人，实现了如爬台阶 [25] 和后空翻 [26] 等复杂动作。这种方法不需要精确的机器人建模，而是通过智能体与环境的交互逐步学习运动控制策略 [27] [28]，从而缩短了开发周期 [29]。通过在GPU上进行大规模并行计算，平地行走的训练时间已缩短至仅5分钟 [29]。强化学习更高效地生成了周期性步态。Wu等人 [30] 表明，通过使用简单的正弦信号来获得预期的摆动-支撑时序并将其作为观测的一部分，并设计奖赏函数以跟踪该时序，机器人可以实现固定频率的行走。Li等人 [31] 提出了傅里叶潜在动力学（FLD）方法，从人类运动中提取周期特征，通过傅里叶变换将动作捕捉的关节角度转化为频域信息，并利用解码器重建这些特征，以模仿原始人类动作。即使直接在奖赏函数中引入周期性的脚部提升和落地，强化学习也能够在不依赖周期性参考信号的情况下生成自适应步态模式。尽管RL目前仅限于特定步态，覆盖了运动能力的一小部分，但其简单性和自主学习特性为探索人形机器人的运动能力和扩展步态空间提供了潜力。

研究目标

在人形机器人领域，多地形步态规划是一个复杂且关键的问题。这种人形机器人需要能够在不同的地形上稳定行走，包括但不限于平坦地面、楼梯、斜坡、不平坦的地面等。步态规划的目标是确保机器人在这些多变环境中保持平衡，同时高效地移动。

为了实现这一目标，我预期开发一套基于强化学习的步态规划算法，该算法能够自主学习并优化机器人的步态，以适应不同的地形条件。这套算法将基于机器学习的原理，通过与环境的交互来学习如何调整步态参数，如步长、步速、足部位置和姿态调整等，以实现最佳的行走效率和稳定性。

具体预期成果包括：

1. **算法开发**：开发一种基于强化学习的控制算法，能够根据机器人的传感器输入（如关节角度、姿态信息、平衡状态等）来调整步态参数。
2. **仿真验证**：在仿真环境中训练并测试这些算法，以验证它们在不同地形上的有效性。仿真环境将模拟真实世界的复杂性，包括各种地形和可能的干扰因素。
3. **实验验证**：如果条件允许，在实体机器人上实施算法，并在控制的实验环境中进行测试，以评估算法在现实世界条件下的表现。
4. **性能优化**：根据仿真和实验结果，对算法进行调整和优化，以提高机器人的行走效率和稳定性。
5. **泛化能力**：确保算法不仅在特定地形上表现良好，而且能够泛化到未见过的地形上，确保步态可以在不同的地形条件上灵活切换。

工作计划

设计研究方法和实验方案

目标：选择合适的强化学习算法，搭建步态规划的模拟环境。

时间表：第1-5周完成。

任务清单：

选择或设计适合多地形步态规划的强化学习算法。

搭建仿真环境，包括不同地形的模拟。

设计初步的实验方案。

实施研究计划

目标：进行算法开发和实验验证。

时间表：第6-12周完成。

任务清单：

开发强化学习算法。

在仿真环境中测试算法。

收集实验数据。

分析实验结果

目标：总结实验数据，撰写论文草稿。

时间表：第12-18周完成。

任务清单：

分析实验数据，提炼关键发现。

撰写开题报告。

准备论文草稿。

根据反馈进行调整

目标：优化研究方法和实验方案。

时间表：第18-22周完成。

任务清单：

根据导师的反馈调整研究方案。

优化算法和实验设计。

形成最终论文和结题报告。

风险评估

技术风险：算法开发可能遇到技术难题，需要提前规划备选方案。

时间风险：研究进度可能因各种因素延迟，需要定期检查进度并调整计划。

资源风险：仿真环境和实验设备可能不足，需要提前申请和准备。

预期创新点

 **自适应地形感知**：在不同地形上，机器人需要实时感知地面情况（如斜坡、坑洼、光滑等），并根据地形特征动态调整步态，本研究期待实现相应地形的快速判断。

**强化学习与传统步态控制算法结合**：利用强化学习方法，使机器人在多地形环境中通过机器学习算法不断优化步态生成策略。在自适应地形感知模块的准确判断下，自主调用相应地形的步态，采用PID反馈控制等传统方法进行微调。

 **光滑步态库切换**：当机器人在不同地形间行进时，需要一种步态库切换机制能够确保步态之间的平滑过渡，避免因步态切换过于突兀而导致的稳定性问题。因此本项目将针对不同地形，设计一种步态切换机制，满足不同步态库之间的平滑过渡，拟采用传统控制方法进行平滑。

实验方案

我计划使用Isaac Gym作为仿真环境来训练和验证人形机器人步态规划算法。Isaac Gym是一个由NVIDIA开发的高性能仿真框架，它提供了一个物理精确且可扩展的平台，用于开发和训练强化学习算法，Isaac Gym可以模拟复杂的多地形环境，包括平坦地面、斜坡和不平坦的地面等关键地形条件。

在实验的初期阶段，我将集中于算法的初步训练，通过Isaac Gym模拟的虚拟环境，让机器人在相对简单的地形上开始学习，逐步增加地形的复杂性，以促进算法的适应性和鲁棒性。在训练过程中，我将密切监控机器人的步态参数，包括步长、步速、足部位置和姿态调整等，这些都是实现最佳行走效率和稳定性的关键因素。同时，我会记录机器人的平衡状态和行走效率，以评估算法的性能。随着算法在仿真环境中的逐步优化，我将更加注重算法在复杂和未知地形上的表现。计划设计一系列测试场景，模拟现实世界中可能遇到的挑战，如突发的地面变化和障碍物。在这些测试中，我将评估算法的泛化能力，即其在未见过的地形上的表现，以及其对环境变化的响应速度和适应性。为了确保实验结果的准确性和可重复性，我将在Isaac Gym中设置多个实验副本，每个副本都有相同的初始条件和参数设置。通过对比不同副本的实验结果，我可以分析算法的稳定性和可靠性。此外，我将采用统计方法来处理收集到的数据，以识别任何潜在的偏差，并确保实验结果的有效性。

若条件允许，我将把在Isaac Gym仿真环境中经过充分训练和验证的多地形强化学习步态规划算法应用到实体机器人上。这一阶段的目标是评估算法在现实世界条件下的表现，并进一步调整和优化算法以适应实际的物理限制和环境变化。

仿真到现实的迁移需要确保实体机器人的传感器和执行器与算法的接口兼容，并进行必要的校准，以保证数据的准确性和指令的精确执行。在实验开始之前，我会在控制的环境中对机器人进行一系列的预测试，以确保其基本功能正常，包括传感器数据的收集、关节角度的调整、平衡状态的维持等。我将设计一系列实机实验，用以模拟多样地形条件测试场景并考虑到现实世界中的不确定性和复杂性。实验将从相对简单的地形开始，逐步过渡到更复杂的环境，如不平坦的地面和斜坡。在每个实验中，我将收集机器人的关节角度、速度、加速度、电池消耗和环境交互数据，分析机器人的行走效率、稳定性、能耗和完成任务所需的时间等关键性能指标。这些数据将用于分析算法的实际表现，并与仿真环境中的结果进行对比，以评估算法的泛化能力和适应性。

在实验结束后，我将对收集到的数据进行详细分析，识别算法在实际应用中的优势和不足。我会根据这些发现对算法进行调整，以提高其在现实世界中的性能和鲁棒性。此外，我还将考虑实验中遇到的任何意外情况，并探索如何在未来的研究中解决这些问题。

在预算和资源需求方面，我需要一台具备显卡的高性能的计算机来运行仿真环境和处理大量数据，以及必要的传感器和执行器来装备实体机器人。