

# 基于惯性测量和 LSTM 算法的四足机器人上坡足端姿态控制

姚学恒<sup>1</sup>, 邢海青<sup>1</sup>, 杨子赫<sup>2,3</sup>, 吴海腾<sup>2,3</sup>, 邹治银<sup>2,3</sup>, 郭玉光<sup>2,3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市余杭区供电公司; 2. 杭州申昊科技股份有限公司;  
3. 浙江省智能运维机器人重点实验室, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为避免四足机器人在上坡过程中产生倾覆或滑倒, 研究基于惯性测量和 LSTM 算法的四足机器人上坡足端姿态控制方法。利用配置加速度计和陀螺仪的惯性测量单元采集四足机器人足端上坡运动时的加速度和角速度数据, 经四元数法以及积分运算获取机器人上坡足端姿态数据, 将其作为 LSTM (长短期记忆网络) 模型的输入, 预测机器人期望运动速度与位置; 将其与惯行测量单元获取的实时足端位置与速度共同输入模型预测控制 (MPC) 器中, 通过计算四足机器人摆动腿的关节力矩, 结合其运动学模型, 不断获取机器人坐标系下摆动腿足端的位置, 完成四足机器人在上坡过程中的足端姿态控制。实验结果显示: 该方法应用下, 可以保障四足机器人顺利通过坡底到坡面、坡面到坡顶的过渡阶段, 不产生打滑现象, 保障上坡过程稳定。

**关键词:** 惯性测量; LSTM 算法; 四足机器人; 足端姿态; 模型预测控制; 坐标系统

中图分类号: TP242

文章编号: 1000-0682(2025)02-0076-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.014

## Attitude control of quadruped robot uphill foot end based on inertial measurement and LSTM algorithm

YAO Xueheng<sup>1</sup>, XING Haiqing<sup>1</sup>, YANG Zihe<sup>2,3</sup>, WU Haiteng<sup>2,3</sup>, ZOU Zhiyin<sup>2,3</sup>, GUO Yuguang<sup>2,3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company Hangzhou Yuhang Power Supply Company;

2. Hangzhou Shenao Technology Co., Ltd.; 3. Zhejiang Key Laboratory of Intelligent

Operation and Maintenance Robot, Zhejiang Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** To avoid tipping or slipping of quadruped robots during uphill climbing, a foot end attitude control method for quadruped robots based on inertial measurement and LSTM algorithm is studied. Using an inertial measurement unit equipped with accelerometers and gyroscopes to collect acceleration and angular velocity data of a quadruped robot during uphill motion, the robot's uphill foot posture data is obtained through quaternion method and integration operation, and used as input for the LSTM (Long Short Term Memory Network) model to predict the expected motion speed and position of the robot. It is input into the Model Predictive Control (MPC) system along with the real-time foot position and velocity obtained from the inertial measurement unit. By calculating the joint torque of the swinging leg of the quadruped robot and combining it with its kinematic model, the position of the swinging leg foot in the robot coordinate system is continuously obtained to complete the foot posture control of the quadruped robot during uphill climbing. The experimental results show that under the application of this method, the quadruped robot can smoothly pass through the transition stages from the bottom of the slope to the slope surface and from the slope surface to the top of the slope without slipping, ensuring the stability of the uphill process.

**Keywords:** inertial measurement; LSTM algorithm; quadruped robot foot posture; model predictive control; coordinate system

收稿日期: 2024-07-18

第一作者: 姚学恒 (1984—), 男, 汉族, 浙江安吉人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网自动化运维、设备智能巡检等。

## 0 引言

四足机器人作为一种具备卓越的环境适应性和运动稳定性的机器人,在复杂地形探索、搜救任务、军事侦察等领域展现出巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。特别是在面对复杂多变的上坡地形时,四足机器人的足端姿态控制成为确保稳定行走和高效执行任务的关键技术之一<sup>[2]</sup>。传统的四足机器人姿态控制方法多依赖于精确的动力学模型或预先设定的步态模式,但在复杂多变的上坡环境中,这些方法的适应性和鲁棒性往往受到限制,通过探索精确的足端姿态控制,使得四足机器人能够根据不同坡度的地形调整其足端位置、角度和姿态<sup>[3]</sup>,从而保持身体平衡,避免倾覆或滑倒,使其更加适应上坡等复杂地形的需求,提升整体行动通过性<sup>[4]</sup>。

赵杰亮等人为了应对四足机器人在上坡过程中过渡区域出现的足端打滑和运动不连续问题,将研究重点聚焦于机身俯仰位姿的动态调控。建立上坡不同阶段(坡底、坡面、坡顶)精细的准静态力学模型,并将打滑指数和稳定性边界作为衡量爬坡性能的量化指标,建立机身位姿与爬坡性能参数之间的直接关联模型。机器人能够根据实时反馈,动态调整其机身的俯仰角度,控制上坡过程中的足端姿态,增强爬坡的稳定性和效率。但是该方法缺少实时姿态信息的反馈,机器人在面对上坡过程中的突发情况或地形变化时,可能无法迅速做出响应和调整。这会导致机器人在动态环境中的响应滞后,降低其爬坡的灵活性和稳定性<sup>[5]</sup>。

梁启星等人通过惯性测量单元(IMU)测得姿态参数,并以此为基础通过设计“虚拟斜坡”,实现四足机器人在斜坡上的足端姿态精准控制,提升爬坡稳定性与效率。但是该方法在优化机器人上坡过程中的决策时可能受到较大限制,无法充分探索和利用可能的策略空间,难以找到最优或接近最优的足端姿态和躯干姿态调整方案<sup>[6]</sup>。

Biswal P 等人提出基于有效脚力分布的四足机器人上坡姿态控制方法,通过 D-H 参数建立四足机器人动力学模型,结合欧拉-朗格朗日理论求解关节运动,通过优化脚部力分布实现上坡时足端姿态的精准控制,确保机器人稳定爬坡。但是当四足机器人的两个旋转轴近乎平行时,使用 D-H 表示方法可能会产生病态矩阵,导致计算的精度下降,影响机器人控制的稳定性和准确性<sup>[7]</sup>。

宫赤坤等人研究方法通过力阻抗控制精准跟踪

摆动相轨迹并保障腿部柔顺,上坡时,机器人需要克服重力沿斜坡向下的分力,这增加了动力学的复杂性。基于阻抗和虚拟模型的控制方法虽然能够处理一定的动态变化,但在极端坡度或土壤条件下,可能无法充分应对上坡时产生的额外力和力矩,导致控制效果受限<sup>[8]</sup>。

惯性测量单元(IMU)作为四足机器人感知自身运动状态的重要传感器,能够实时提供角速度、加速度等关键信息,为姿态控制提供了丰富的数据支持。长短期记忆网络(LSTM)具有处理时间序列数据优势,在序列预测、模式识别等领域表现出色。为此该文提出基于惯性测量和 LSTM 算法的四足机器人上坡足端姿态控制方法,将惯性测量和 LSTM 算法引入四足机器人的姿态控制中,确保机器人在上坡过程中能够保持稳定的姿态和高效的行走能力。

## 1 四足机器人上皮足端姿态控制

### 1.1 基于惯性测量的四足机器人姿态解算

为实现四足机器人姿态数据采集,采用四个惯性测量单元(IMU),分别安装在机器人的四条腿上,其中每个 IMU 传感器节点均配置了一个加速度计和一个陀螺仪,采集加速度和角速度数据。IMU 均通过微控制器 MSP430F149 采集数据,其 CPU 时钟频率大小选取 1.0 MHz,并通过 2.4 GHz 无线信道将采集到的机器人各腿在运动过程中的详细动力学信息,实时回传到 PC 端进行姿态解算<sup>[9-10]</sup>。

PC 端采用具备计算量小、不会产生奇异点与退化问题的四元数法,结合惯性测量单元获取角速度信息,通过解算获取四足机器人姿态,包括俯仰角、翻滚角、航向角。

通过四元数形式描述四足机器人姿态变换矩阵,表达式为:

$$C_b^a = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $q_0, q_1, q_2, q_3$  分别用于描述姿态变换矩阵的四元素。

公式(1)的微分表达式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ , 分别用于描述导航坐标系下惯性测量单元中传感组件陀螺仪获取的角速度在载体坐标系  $x, y, z$  三个方向的投影。  $q_0, q_1, q_2, q_3$  的数值可通过公式(2)计算获取。

则四足机器人的姿态角计算公式为:

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left[ \frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right] \\ \arcsin [2(q_0 q_2 - q_1 q_3)] \\ \arctan \left[ \frac{2(q_1 q_2 + q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:  $\gamma, \theta, \varphi$  分别用于描述四足机器人足端俯仰角、翻滚角、扭转角。

同时 PC 端通过对惯性测量单元中传感组件加速度计获去的加速度信息进行一次积分运算, 获取机器人速度值。

## 1.2 基于 LSTM 的四足机器人足端期望位置、速度预测

LSTM(长短期记忆)神经网络是以 RNN(循环神经网络)为基础而设计的, 凭借其独特的结构设计, 捕捉并学习时间序列中的长期依赖关系<sup>[11-12]</sup>。通过 1.1 小节惯性测量可以获取一系列的四足机器人姿态数据, 将这些数据作为 LSTM 模型的输入, 通过训练 LSTM 网络, 使其学习到姿态数据与足端期望位置、速度之间的映射关系, 预测得到四足机器人上坡过程中的足端期望位置、速度, 用于推断四足机器人在上坡过程中足端何时与坡面接触, 助力后续完成四足机器人上坡足端姿态控制。LSTM 神经元结构见图 1。

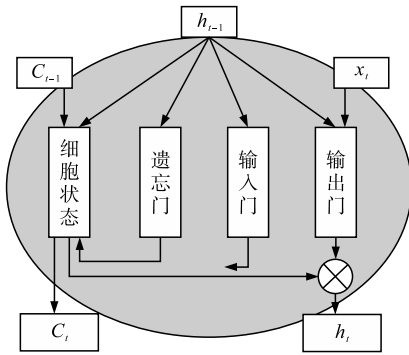


图 1 LSTM 神经元结构

其中, 遗忘门  $f_t$  可通过公式(4)描述:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot ([h_{t-1}, x_t] + b_f)) \quad (4)$$

其中:  $x_t, h_{t-1}$  分别用于描述遗忘门输入、上一时间步的输出;  $\sigma, W_f$  和分别用于描述 sigmoid 函数、遗忘门权值和偏置。

前一细胞到当前细胞的状态变化过程中信息穿

的数量由遗忘门衡量, 更新前后的细胞状态表达式分别为:

$$\bar{C}_t = \tanh(W_c \cdot ([h_{t-1}, x_t] + b_c)) \quad (5)$$

$$\bar{C}_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \bar{C}_t \quad (6)$$

其中:  $\bar{C}_t, \bar{C}_t$  分别用于描述更前前后的细胞状态;  $i_t, W_c, b_c$  分别用于描述输入门、细胞状态权值、偏置。

遗忘门和细胞状态的引入便是使 LSTM 最大程度区别于传统 RNN 的关键, 同时可以避免 RNN 的梯度爆炸问题, 并且可以有效学习惯性测量获取一系列四足机器人足端姿态时间序列数据, 实现更好的四足机器人足端期望位置、速度预测。

鉴于四足机器人足端期望位置、速度是后续完成四足机器人足端姿态控制的关键, 为保障预测结果的精度, 通过随时间的反向传播机制及时修正 LSTM 的误差, 则将误差函数  $E$  视为 LSTM 的目标函数, 表达式为:

$$E = h_t - y_t \quad (7)$$

其中:  $y_t$  用于描述输入样本序列对应的真实四足机器人足端接触序列。

定义误差随时间反向传播过程中的偏差为  $\delta_t = \frac{\partial E}{\partial h_t}$ , 由于细胞状态中涵盖了多个时间节点的足端姿态信息, 因此其偏差也随时间推移而累计, 表达式为:

$$\delta'_{c_t} = \delta_{c_t} + \delta_{h_t} \cdot o_t \cdot (1 - \tanh^2 C_t) \quad (8)$$

其中:  $o_t$  为输出门。

LSTM 中细胞状态以及其他门结构的偏差表达式为:

$$\begin{cases} \delta_{i_t} = \delta_{c_t} \cdot \bar{C}_t \\ \delta_{f_t} = \delta_{c_t} \cdot \bar{C}_{t-1} \\ \delta_{\bar{C}_t} = \delta_{c_t} \cdot i_t \\ \delta_{c_{t-1}} = \delta_{c_t} \cdot f_t \end{cases} \quad (9)$$

以公式(9)为依据, 得到各权值的偏差:

$$\begin{bmatrix} \delta_{W_f} \\ \delta_{W_i} \\ \delta_{W_o} \\ \delta_{W_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{f_t} \cdot f_t \cdot (1 - f_t) \\ \delta_{i_t} \cdot i_t \cdot (1 - i_t) \\ \delta_{o_t} \cdot o_t \cdot (1 - o_t) \\ \delta_{\bar{C}_t} \cdot (1 - C_t)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{t-1} \\ x_t \end{bmatrix} \quad (10)$$

依据公式(7)~(10)的误差随时间反向传播方式, 令 LSTM 可以不断修正预测值与实际值之间的偏差, 使其具备更优质的时间序列学习能力, 实现精

准的四足机器人足端期望位置、速度预测,用于后续足端姿态精准控制。

### 1.3 基于模型预测控制的四足机器人上坡足端姿态控制

#### 1.3.1 四足机器人上坡足端位置调整

四足机器人上坡过程中,斜坡上各个坐标系下足端位置关系见图 2。

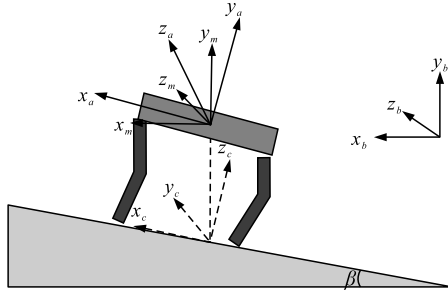


图 2 斜坡上各坐标系之间的关系

分析图 2 可知,一共包含 4 个坐标系, $a, b, m, c$  分别为机器人、世界、前进、斜面坐标系, $a$  坐标系与  $m$  坐标系的原点均为四足机器人质心位置, $c$  坐标系原点为投影点<sup>[13]</sup>。 $\beta$  用于描述斜坡坡度。

通过图 2 所示的坐标系之间的旋转、平移可以获取如下表达式:

$$\mathbf{p}_t^{bh} = \mathbf{R}_x(\mathbf{v}_{ad})\mathbf{R}_y(\vartheta_{ad})(\mathbf{p}_t^{ch} + \mathbf{p}_h^c) - \mathbf{p}_h^m \quad (11)$$

其中: $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y$  分别用于描述  $m$  与  $c$  坐标系绕水平垂直两个方向的旋转矩阵; $\mathbf{v}_{ad}, \vartheta_{ad}$  分别用于描述坐标系  $m$  到  $c$  转换过程中水平和垂直两个方向的调整角度。 $\mathbf{p}_t^{bh}$  和  $\mathbf{p}_t^{ch}$ 、 $\mathbf{p}_h^c$  和  $\mathbf{p}_h^m$  分别用于描述  $b$  和  $c$  坐标系中机器人足端与髋关节之间的相对位置、 $c$  和  $m$  坐标系中机器人髋关节与质心之间的相对位置。

经坐标系之间的关系获取足端位置表达式为:

$$\mathbf{p}_t^{ah} = \mathbf{R}'_x(-\mathbf{v}_{ref})\mathbf{R}'_y(-\vartheta_{ref})\mathbf{R}'_z(-\varphi_{ref})(\mathbf{p}_t^{bh} + \mathbf{p}_h^m) - \mathbf{p}_h^a \quad (12)$$

其中: $\mathbf{R}'_x, \mathbf{R}'_y, \mathbf{R}'_z$  为旋转矩阵;对应坐标系  $m$  到  $a$  的三个方向转变过程; $\mathbf{v}_{ref}, \vartheta_{ref}, \varphi_{ref}$  对应转换过程中的三个方向的俯仰、翻滚、扭转角; $\mathbf{p}_h^a, \mathbf{p}_t^{ah}$  分别用于描述髋关节位置以及足端相对于其的位置,均对应于  $a$  坐标系<sup>[14]</sup>。

四足机器人上坡过程中,机器人俯仰与翻滚角与坐标系之间的相对位置变化对应,那么则有:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{ad} = \mathbf{v}_{ref} = \gamma \\ \vartheta_{ad} = \vartheta_{ref} = \theta \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\gamma, \theta$  分别对应惯性测量单元获取的足端俯仰角与翻滚角。

简化并合并公式(11)(12)后获取:

$$\mathbf{p}_t^{ah} = \mathbf{p}_t^{ch} + \mathbf{R}''_x(-\gamma)\mathbf{R}''_y(-\theta)\mathbf{p}_c^m \quad (14)$$

其中: $\mathbf{R}''_x, \mathbf{R}''_y$  分别用于描述  $a, b$  坐标系下绕水平垂直两个方向变换的旋转矩阵, $\mathbf{p}_c^m = [0 \ 0 \ -H]$  用于确保  $c$  坐标系原点在  $m$  坐标系中为常数,其中  $H$  表示四足机器人质心高度。

通过公式(14)获取的四足机器人在机器人坐标系中的位置,可用于后续上坡足端姿态控制中。

#### 1.3.2 机器人上坡足端姿态的模型预测(MPC)控制

设计基于 MPC 的四足机器人上坡足端姿态控制器,其结构框图见图 3。

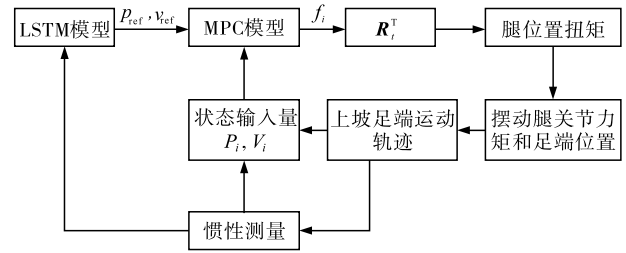


图 3 基于 MPC 的四足机器人上坡足端姿态控制结构图

控制过程具体为:将 1.1 小节惯性测量单元结合四元数姿态解算获取的四组机器人上坡足端姿态时间序列,作为 1.2 小节构建的 LSTM 模型的输入,预测并输出四足机器人上坡足端期望位置  $p_{ref}$ 、速度  $v_{ref}$ 。将期望位置  $p_{ref}$ 、速度  $v_{ref}$ ,以及惯性测量单元获取的上坡过程中处于世界坐标系的实际足端速度  $v_i$  与位置  $p_i$ ,共同作为模型预测控制器输入,控制器基于四组机器人的离散动力学模型通过计算获取最优足端控制力  $f_i$ ,据此可以计算获取四组机器人支撑腿的关节扭矩:

$$\Psi_i = \mathbf{J}\mathbf{R}_i^T f_i \quad (15)$$

其中: $\mathbf{R}_i^T, \mathbf{J}$  分别用于描述坐标转换矩阵、雅克比矩阵。

则摆动腿的关节力矩表达式为:

$$\Pi_i = \mathbf{J}_i^T [K_p(p_{ref} - \mathbf{p}_t^{ah}) + K_d(v_{ref} - v_i) + \tau_{i,f}] \quad (16)$$

其中: $\tau_{i,f}, \mathbf{J}_i^T [K_p(p_{ref} - \mathbf{p}_t^{ah}) + K_d(v_{ref} - v_i)]$  分别用于描述足端上坡姿态的前馈及反馈力矩。将  $\Pi_i$  与运动学模型相结合,便可以按照 1.3.1 小节所示,不断获取机器人坐标系下摆动腿足端的位置<sup>[15]</sup>。最终完成四足机器人在上坡过程中的足端姿态控制。

## 2 实验分析

该次实验旨在研究四足仿生机器人在上坡过程中的足端控制策略。实验平台由实验室自主搭建,

每台四足机器人均具备高度灵活的腿部结构和先进的控制系统,能够模拟真实环境下的上坡运动,并实时调整足端姿态以确保稳定前行。所选取四足机器人见图 4,详细参数见表 1,实验平台的核心控制系统以 Upboard 控制板为中心,负责接收来自上位机或控制手柄的指令,并进行算法计算以实时调整机器人姿态,确保机器人能够准确感知自身状态并作出相应调整。此外,STM32F446 电机驱动板作为驱动装置,通过 CAN 信号与 Upboard 控制板实时通信,根据计算出的力矩控制无刷直流电机的转角,从而实现机器人的精确运动。同时按照图 5 设计的斜坡进行试验设计。

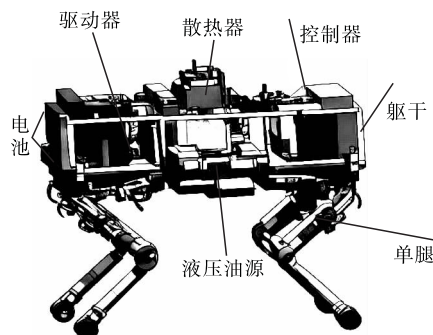


图 4 四足机器人结构

表 1 四组机器人参数

参数名称	数值	单位	参数名称	数值	单位
躯干质量	95	kg	驱动器类型	无刷电机	-
小腿质量	2.45	kg	电池容量	50	Ah
前后髋关节距离	1.2	m	电池电压	48	V
髋部侧摆长度	0.075	m	液压油源容量	5	L
左后髋关节距离	0.55	m	腿部自由度数量	4	-
大髋关节距离	0.4	m	最大行走速度	2	m/s
髋部侧摆质量	2	kg	最大爬坡角度	30	°
小髋关节长度	0.36	m	整机重量(估算)	约 120	kg

表 2 惯性测量单元(IMU)参数详情

惯性测量单元	加速度计	陀螺仪
型号	LIS344ALH	LY530AL
轴数	3	1
测量区间	$\pm 8\text{ g}$	$\pm 1250^\circ/\text{s}$
输出	电压	电压
灵敏度	650 mV/g	3.5 mV/( $^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ )

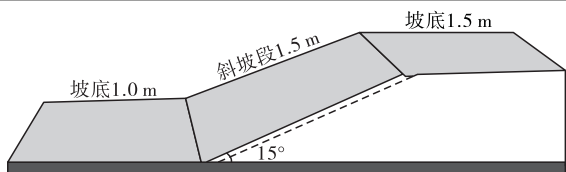
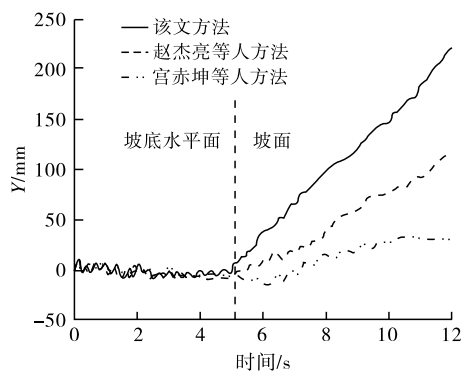
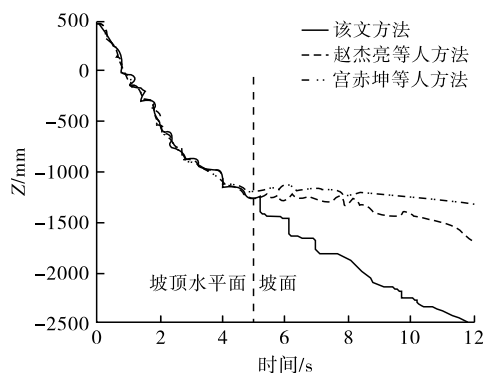


图 5 实验用斜坡设计

为验证该文方法的四足机器人上坡过程中的足端姿态控制效果,在按照图 5 所设计的斜坡上开展实验,对坡底和坡顶两个阶段的运动情况进行分析,同时选取赵杰亮等人提出的俯仰位姿调整控制方法以及宫赤坤等人提出的基于阻抗和虚拟模型控制方法为对比,统计不同方法控制下坡底、坡顶两个阶段,四足机器人质心竖直方向以及左前足端行进方向的位置变化情况。结果如图 6、图 7 所示。

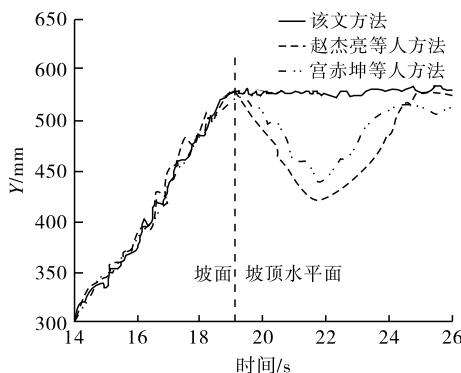


(a) 四足机器人质心竖直方向位置变化

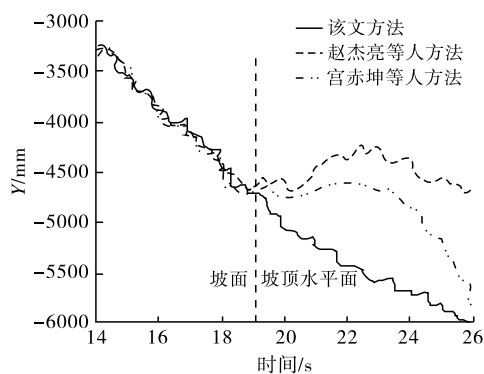


(b) 四足机器人左前足端行进方向的位置变化

图 6 坡底阶段控制效果分析



(a) 四足机器人质心竖直方向位置变化



(b) 四足左机器人前足端行进方向的位置变化

图7 坡顶阶段控制效果分析

分析图6发现,在该文方法作用下,四足机器人可以顺利地通过坡底水平面与坡面的过渡阶段,同时在上坡过程中未产生打滑现象,这表明该文方法在处理复杂地形过渡时的稳定性和适应性较强。而在赵杰亮等人以及宫赤坤等人方法控制下,在坡底到坡面的过渡阶段均产生了不同程度的打滑现象,这种打滑现象不仅影响了四足机器人的稳定性,还导致质心在竖直方向上产生了显著的位移变化,增加了上坡过程中的不确定性和难度。分析图7可知,在由坡面行进至坡顶平面过程中,该文方法依据可以稳定地控制四组机器人足端姿态,保障器顺利登顶,未形成侧翻及打滑现象,在赵杰亮等人以及宫赤坤等人方法控制下亦可顺利登顶,但均产生不同程度打滑,因此该文方法具备较为显著的上坡足端姿态控制效果。

### 3 结论

该文利用高度灵活的腿部结构和先进的控制系统,模拟了真实环境下的上坡运动,并实时调整了足端姿态以确保机器人的稳定前行,在处理复杂地形(如坡底水平面与坡面的过渡阶段)时,表现出了较强的稳定性和适应性,有效避免了打滑现象的发生,从而保持了机器人质心在竖直方向上的平稳变化。

#### 参考文献:

- [1] 余捷,刘绪清,于超,等. 基于模型预测控制的四足机器人面向复杂地形自适应调整算法与实现[J]. 机电工程技术,2024,53(05):122-128.
- [2] 赵江波,龚思进,王军政. 四足机器人步态参数优化及探索性行走策略[J]. 北京理工大学学报,2022,42(04):407-414.
- [3] 李姗姗,王洪波,陈建宇,等. 新型四足并联军用机器人步态控制算法及仿真[J]. 兵工学报,2023,44(03):895-909.
- [4] 刘帅,赵慧,刘清宇. 四足机器人软硬地面稳定过渡的腿部主动变刚度调节策略[J]. 工程科学学报,2022,44(03):420-429.
- [5] 赵杰亮,邢晋,牛群. 基于俯仰位姿调整的四足机器人爬坡运动策略[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(06):10-15+22.
- [6] 梁启星,李彬,李志,等. 基于模型预测控制的四足机器人斜坡自适应调整算法与实现[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(03):37-44+51.
- [7] Biswal P, Mohanty P K. Modeling and Effective Foot Force Distribution for the Legs of a Quadruped Robot[J]. Robotica, 2021,39(8):1504-1517.
- [8] 宫赤坤,吴浔炜,袁立鹏. 基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法[J]. 系统仿真学报,2022,34(10):2152-2161.
- [9] 许鹏,邢伯阳,刘宇飞,等. 基于扩张状态观测器和模型预测方法的四足机器人抗干扰复合控制[J]. 兵工学报,2023,44(S2):12-21.
- [10] 王银浩,颀潭成,徐彦伟,等. 四足机器人侧摆型 trot 步态的运动学分析及仿真研究[J]. 现代制造工程,2022(05):24-29.
- [11] 于建均,李晨,左国玉,等. 基于 LSTM 神经网络的仿人机器人循环步态的生成方法[J]. 北京工业大学学报,2020,46(12):1335-1344.
- [12] 初未萌,杨今朝,邬树楠,等. 基于 LSTM 的空间机器人系统惯性张量在轨辨识[J]. 航空学报,2021,42(11):307-316.
- [13] 张秀丽,王琪,黄森威,等. 一种多模型融合的仿猎豹四足机器人复杂运动控制方法[J]. 机器人,2022,44(06):682-693+707.
- [14] 陈光荣,郭盛,侯博文,等. 基于扩展雅可比矩阵的冗余液压驱动四足机器人运动控制[J]. 控制理论与应用,2021,38(02):213-223.
- [15] 马秀峰,张奇峰,孙英哲. 仿生六足机器人步态设计与运动仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(02):255-260+269.