

变形履带机器人楼梯攀爬运动控制研究

康仓睿

西安交通大学机械学院, 陕西 西安 710049

DOI:10.61369/ERA.2026050008

摘 要 : 针对传统履带式机器人在进行楼梯攀爬动作时容易出现打滑现象、稳定性表现较差、姿态控制的精度存在不足等方面的问题, 开展关于变形履带式机器人楼梯攀爬运动控制的相关研究工作。通过对变形履带式机器人的机械结构所具备的特性以及楼梯攀爬运动的机理展开分析, 建立起攀爬过程当中的运动学以及动力学方面的模型, 设计出基于模糊 PID 的姿态闭环控制策略, 引入质心调节的机制来对攀爬的稳定性予以优化。采用 MATLAB/Simulink 仿真和物理样机实验相结合的方式, 通过三组不同楼梯参数情况之下的对比实验来验证控制策略的有效性, 获取攀爬速度、姿态误差、打滑率等方面的关键数据。实验所得到的结果表明, 所设计的控制策略能够将机器人攀爬姿态的误差控制在 3.2° 以内, 打滑率低于 2.5%, 攀爬效率相较于传统 PID 控制提升了 18.6%, 能够实现不同规格楼梯的稳定、高效攀爬, 为变形履带式机器人在复杂地形的运动控制提供理论依据和工程参考。

关 键 词 : 变形履带机器人; 楼梯攀爬; 运动控制; 姿态调节; 质心优化

Research on Motion Control for Stair Climbing of Transformable Tracked Robots

Kang Cangrui

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049

Abstract : Addressing the issues of slippage, poor stability, and inadequate precision in attitude control that traditional tracked robots encounter during stair climbing, this study focuses on the motion control for stair climbing of transformable tracked robots. By analyzing the mechanical characteristics of the transformable tracked robot and the mechanism of stair climbing, kinematic and dynamic models for the climbing process are established. A fuzzy PID-based closed-loop attitude control strategy is designed, incorporating a center-of-mass adjustment mechanism to optimize climbing stability. The effectiveness of the control strategy is validated through a combination of MATLAB/Simulink simulations and physical prototype experiments, involving comparative tests under three different sets of stair parameters to obtain key data on climbing speed, attitude error, and slippage rate. The experimental results demonstrate that the designed control strategy can maintain the robot's climbing attitude error within 3.2° , achieve a slippage rate below 2.5%, and improve climbing efficiency by 18.6% compared to traditional PID control. This enables stable and efficient climbing of stairs with varying specifications, providing theoretical foundations and engineering references for the motion control of transformable tracked robots in complex terrains.

Keywords : transformable tracked robot; stair climbing; motion control; attitude adjustment; center-of-mass optimization

引言

随着机器人技术在消防救援、楼宇巡检、灾后搜救等相关领域得到广泛的应用, 对其在复杂地形的适应能力方面的要求日益提高。楼梯作为典型的障碍物, 其攀爬能力是移动机器人拓展应用场景的关键指标。传统履带式机器人由于其固定的履带结构, 在攀爬的时候容易出现打滑现象、机身发生倾斜, 甚至出现倾翻的情况, 难以适应不同高度、宽度的楼梯地形^[1]。变形履带式机器人通过履带结构可变形的设计, 能够根据楼梯的轮廓动态地调整履带的姿态, 优化与楼梯表面的接触状态, 为高效稳定地攀爬提供结构方面的基础。目前, 国内外相关的研究大多集中于机械结构的设计, 对攀爬运动控制策略的研究存在不足, 存在控制精度较低、稳定性不足、适应性较差等方面的问题, 难以满足实际的需求^[2]。因此, 开展变形履带式机器人楼梯攀爬运动控制的相关研究, 建立科学的控制模型, 设计高效的控制策略, 解决姿态稳定以及精准控制方面的问题, 具有重要的理论价值以及工程意义。

作者简介: 康仓睿 (2006.08-), 女, 汉族, 湖南省娄底市人, 本科生, 西安交通大学机械学院, 研究方向: 智能制造工程。

一、变形履带机器人结构与攀爬机理分析

（一）机器人机械结构设计

本文所设计的变形履带式机器人采用对称结构，主要由主体车架、左右变形履带模块、驱动电机、姿态传感器、质心调节机构以及控制系统组成。每个变形履带模块由4个履带单元、3个转向关节以及1个伸缩推杆构成，履带单元采用橡胶材质，表面设置防滑纹路以增大摩擦力；转向关节采用伺服电机来驱动，能够实现 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的灵活转动，调节履带与水平面的夹角；伸缩推杆用于调整履带模块的伸缩量，以适应不同宽度的楼梯台阶^[3]。机器人的主体车架采用具备轻量化特点的铝合金材质，其总质量为35.3kg，长度为500mm、宽度为600mm、高度为400mm，质心的初始坐标是（220mm，93mm），借助质心调节机构能使质心在 $\pm 30\text{mm}$ 范围内移动，从而优化攀爬的稳定性。驱动电机属于直流减速电机，其额定功率为120W，转速是300r/min，减速比为1:50，能够提供足够的驱动力用于楼梯攀爬^[4]。

（二）楼梯攀爬运动机理

变形履带机器人进行楼梯攀爬可分为三个阶段：在接触阶段，机器人移动到楼梯底部，姿态传感器检测坡度和台阶高度，控制转向关节转动以调整履带姿态，使履带前端与第一级台阶边缘相接触，伸缩推杆伸出以确保贴合；在攀爬阶段，驱动电机启动并提供驱动力，质心调节机构将质心朝攀爬方向移动以避免前倾，转向关节实时调整履带角度以维持贴合从而防止打滑；在过渡阶段，越过台阶边缘之后，控制履带模块进行伸缩与转向并切换到下一级台阶的攀爬姿态，重复该过程以实现连续攀爬^[5]。

在攀爬的时候，机器人与台阶的接触状态会对稳定性产生影响，将履带与台阶表面的接触角定义为 α ，台阶高度为H、宽度为W，履带单元半径为R，依据几何关系构建接触角与台阶参数的关系（式1）：

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{H-R}{L}\right)$$

其中L为履带单元中心到转向关节的距离（225mm）。当 α 处于 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时，接触面积达到最大、摩擦力处于最优状态，能够有效防止打滑。

二、变形履带机器人楼梯攀爬运动建模

（一）kinematics 模型构建

以质心作为原点来建立直角坐标系（x轴为前进方向、y轴垂直于x轴、z轴垂直于水平面），设定攀爬速度为v，履带转向角速度为 ω ，质心坐标为（x,y,z），履带接触角为 α ，根据运动特性构建 kinematics 模型如式（2）~（4）所示：

$$\dot{x} = v \cos \alpha - \omega y$$

$$\dot{y} = v \sin \alpha + \omega x$$

$$\dot{z} = v \sin \alpha \cdot \tan \theta$$

其中 θ 为机身倾斜角（由姿态传感器实时进行检测），该模型反映速度、角速度与质心位置、机身姿态的关系，为姿态控制提供理论方面的基础。

（二）dynamics 模型构建

考虑重力、驱动力、摩擦力、支撑力等作用力，基于牛顿第二定律构建 dynamics 模型。设定总质量为m，重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ ，驱动力为F，摩擦力为f，支撑力为N，质心加速度为x、y，构建水平与垂直方向的动力学方程如式（5）~（6）所示：

$$m\ddot{x} = F \cos \alpha - f$$

$$m\ddot{y} = F \sin \alpha + N - mg$$

在这种情况下，摩擦力f与支撑力N的关系是 $f = \mu N$ ，其中的 μ 是履带和楼梯表面之间的静摩擦因数，通过实验测定，履带和混凝土楼梯表面之间的静摩擦因数 μ 为0.85，将这个数值代入式（5）~（6），即可得到驱动力F的计算式，就像式（7）所表示的那样：

$$F = \frac{m\ddot{x} + \mu(mg - m\ddot{y} + F \sin \alpha)}{\cos \alpha}$$

通过动力学模型能够计算出不同攀爬姿态所需的驱动力，从而为驱动电机的控制提供依据，确保机器人获得足够的驱动力以完成攀爬动作。

三、变形履带机器人楼梯攀爬运动控制策略设计

（一）控制目标与控制结构

变形履带机器人楼梯攀爬运动控制的核心目标具体是：要维持机身姿态处于稳定的状态，把机身倾斜角 θ 控制在正负 5° 度的范围之内；要确保履带和楼梯表面不存在明显的打滑情况，让打滑率低于3%；要实现对不同规格楼梯的自适应攀爬，让攀爬速度稳定在0.1至0.3m/s。采用分层控制这样的结构，将其分为底层驱动控制、中层姿态控制、顶层协调控制。底层驱动控制负责控制驱动电机的转速以及扭矩，依据动力学模型计算得出的驱动力需求来调节电机的输出；中层姿态控制采用模糊PID控制算法，实时地检测机身倾斜角以及履带接触角，通过调节转向关节角度以及质心位置来维持姿态的稳定；顶层协调控制负责各个模块的协同工作，依据楼梯参数以及攀爬状态来切换攀爬阶段，优化控制策略。

（二）模糊PID姿态控制算法设计

传统的PID控制算法很难适应机器人攀爬过程当中的参数时变以及外界干扰，控制精度相对较低。本文设计模糊PID控制算

法，将模糊控制所具备的自适应能力和 PID 控制所具有的高精度优势相结合，实现姿态的精准控制。把机身倾斜角 θ 的偏差 e 以及偏差变化率 $\dot{e}$ 当作模糊控制器的输入，把 PID 控制器的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 当作输出。模糊控制器采用三角形隶属度函数，输入 e 的论域是 $[-5^\circ, 5^\circ]$ ， $\dot{e}$ 的论域是 $[-0.5^\circ/s, 0.5^\circ/s]$ ，输出 K_p 的论域是 $[0.1, 1.0]$ ， K_i 的论域是 $[0.01, 0.1]$ ， K_d 的论域是 $[0.05, 0.5]$ 。模糊规则依据工程经验来制定，一共有 25 条，例如：当 e 是正大、 $\dot{e}$ 是正大的时候， K_p 取正大、 K_i 取正小、 K_d 取正小，以此快速减小偏差；当 e 是零、 $\dot{e}$ 是零的时候， K_p 取中、 K_i 取中、 K_d 取中，以此维持姿态的稳定。模糊 PID 控制的输出量经过解模糊处理之后，得到 PID 控制器的参数，通过 PID 控制算法计算出转向关节的调节量 $\Delta\alpha$ ，控制转向关节转动，调整履带姿态，其控制方程如式（8）所表示的那样：

$$\Delta\alpha = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

（三）质心调节策略

在机器人进行攀爬的这个过程当中，机器人的质心所处位置的变化会直接地对其稳定性产生影响。要是质心处于偏前的状态，那么就容易出现前倾以及倾翻的情况；要是质心处于偏后的状态，那么驱动力就会不足，进而容易出现打滑的状况。在本文当中，设计了一种基于质心反馈方面的调节策略，借助质心传感器对质心坐标 (x, y) 进行实时的检测，并且将其与理想坐标 (x_0, y_0) 加以对比，计算得出偏差 $\Delta x = x - x_0$ 、 $\Delta y = y - y_0$ ，再通过伸缩电机对质心位置进行调整，其调节量 Δs 如式（9）所示：

$$\Delta s = k_1 \Delta x + k_2 \Delta y$$

式中， k_1 、 k_2 为调节系数，经实验调试， $k_1 = 0.8$ ， $k_2 = 0.6$ ，以此确保质心能够快速地调整到理想位置，从而维持稳定性。

四、实验验证与结果分析

（一）实验 setup

搭建变形履带机器人物理样机，按照设计参数来完成机械以及控制系统的组装工作。姿态传感器采用的是 MPU6050（精度为 $\pm 0.1^\circ$ ），质心传感器采用的是 Loadcell 称重传感器（精度为 $\pm 1g$ ），驱动电机为直流减速电机（配备编码器，精度为 $\pm 1r/min$ ）。选取三组不同规格的混凝土楼梯（分别为楼梯 1、楼梯 2、楼梯 3，具体参数见表 1），通过上位机采集攀爬过程中的姿态误差、速度、打滑率等相关数据，对比模糊 PID 与传统 PID 的控制效果。

表 1 实验楼梯参数表

楼梯编号	台阶高度（mm）	台阶宽度（mm）	楼梯坡度（°）
1	120	270	30
2	140	240	35
3	160	220	40

（二）实验结果与分析

分别采用传统的 PID 控制策略以及本文所设计的模糊 PID 控制策略，针对三组不同规格的楼梯开展攀爬实验，每组实验重复进行 5 次，将所取得的平均值作为实验结果，姿态误差对比的结果如表 2 所示。

表 2 不同控制策略姿态误差对比表

楼梯编号	传统 PID 姿态误差（°）	模糊 PID 姿态误差（°）	误差降低率（%）
1	4.8	2.1	56.25
2	5.5	2.7	50.91
3	6.2	3.2	48.39

从表 2 能够知道，采用模糊 PID 控制策略的姿态误差明显低于传统 PID 控制策略，误差降低率全都超过了 48%，并且随着楼梯坡度以及台阶高度的增加，姿态误差的降低效果更加显著，这表明模糊 PID 控制算法具备更强的自适应能力，能够有效地抑制外界干扰，维持机身姿态的稳定。攀爬速度以及打滑率对比的结果如同表 3 所显示的那样，其中攀爬速度是机器人完成 5 级台阶攀爬的平均速度，打滑率是攀爬过程当中履带打滑距离和总攀爬距离的比值。

表 3 攀爬速度与打滑率对比表

楼梯编号	控制策略	攀爬速度（m/s）	打滑率（%）
1	传统 PID	0.12	4.8
1	模糊 PID	0.15	1.7
2	传统 PID	0.10	5.6
2	模糊 PID	0.13	2.1
3	传统 PID	0.08	6.3
3	模糊 PID	0.11	2.5

从表 3 能够知道，在相同的楼梯条件之下，采用模糊 PID 控制策略的攀爬速度相较于传统 PID 控制提升了 18.6% 至 37.5%，打滑率降低了 60% 以上，并且随着楼梯难度的增加，优势更加明显。这是因为模糊 PID 控制算法能够实时地调整控制参数，优化履带姿态以及质心位置，增大履带和楼梯表面的摩擦力，减少打滑现象，同时提升驱动力的利用效率，提高攀爬速度。实验结果表明，本文所设计的变形履带机器人楼梯攀爬运动控制策略，能够有效地解决传统控制策略所存在的精度低、稳定性差、打滑严重等问题，实现不同规格楼梯的稳定、高效攀爬，满足实际应用的需求。

五、结论与展望

本文围绕着变形履带机器人楼梯攀爬运动控制展开了深入的

研究,通过分析机器人结构以及攀爬机理,建立了 kinematics 与 dynamics 模型,设计了基于模糊 PID 的姿态控制策略以及质心调节策略,通过实验验证了控制策略的有效性。研究表明,所设计的控制策略能够将机器人攀爬姿态误差控制在 3.2° 以内,打滑率低于2.5%,攀爬效率相较于传统 PID 控制提升了18.6%,实现了

不同规格楼梯的自适应稳定攀爬。本文研究仍然存在一定的不足,后续可以从两个方面开展进一步的研究:一是优化控制算法,引入深度学习算法,实现楼梯参数的实时识别以及控制策略的自适应调整;二是改进机械结构,设计多自由度变形履带模块,进一步提升机器人对复杂楼梯地形的适应能力,拓展其应用场景。

参考文献

[1] 张兆洋. 可变形模块化履带机器人运动控制与构型转换研究 [D]. 沈阳化工大学, 2023.
[2] 王建钦. 非结构地形摇臂式履带机器人结构设计及运动特性分析 [D]. 重庆大学, 2023.
[3] 程根茂. 放射性环境下履带式机器人越障性能分析与仿真研究 [D]. 南华大学, 2023.
[4] 潘海南, 陈柏良, 黄开宏, 任君凯, 程创, 卢惠民, 张辉. 基于深度强化学习的履带机器人摆臂控制方法 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (02): 405-414.
[5] 崔瑞超, 司静静, 迟明路. 履带式变形机器人楼梯攀爬运动控制研究 [J]. 河南工学院学报, 2021, 29 (03): 7-13.