

机器人楼梯环境重心自调整策略研究

李宗奇¹, 李艳杰¹, 卜春光^{2,3}, 范晓亮^{2,3}

(1. 沈阳理工大学机械工程学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169)

摘要: 针对移动机器人在楼梯环境中的运动稳定性问题, 通过分析双摆臂移动机器人的运动学特性, 建立相应的运动学模型。在此基础上, 提出一种基于稳定锥模型和梯度搜索法相结合的重心自调整策略, 能够根据机器人当前的姿态和环境条件实时优化质心位置, 从而增强其在不同构型和复杂地形中的稳定性。Matlab 与 ROS 联合仿真结果表明, 在运动过程中重心调整策略能有效地调整质心位置, 显著提高了机器人在楼梯环境中的稳定性, 降低了倾覆风险。

关键词: 运动学仿真; 稳定锥; 重心自调整策略

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.03.003

Research on Self-adjustment Strategy of Center of Gravity in Robotic in Staircase Environment

LI Zongqi¹, LI Yanjie¹, BU Chunguang^{2,3}, FAN Xiaoliang^{2,3}

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Innovation Institute of Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: To address the motion stability problem of the mobile robot in the staircase environment, a corresponding kinematic model is established by analysing the kinematic characteristics of the double swing arm mobile robot. On this basis, a self-adjustment strategy of the center of gravity based on the combination of the stability cone model and the gradient search method is proposed, which is able to optimize the position of the center of mass in real time according to the robot's current attitude and the environmental conditions, so as to enhance its stability in different configurations and complex terrains. The joint simulation results of MATLAB and ROS show that the proposed centre of gravity adjustment strategy can effectively adjust the position of the center of mass during the motion process, which significantly improves the stability of the robot in staircase environments and reduces the risk of tipping over.

Key words: kinematic simulation; stability cone; center of gravity self-adjusting strategy

随着机器人技术的快速发展, 机器人正逐步应用于各种复杂的非结构化环境, 如山地、草原和楼梯等, 复杂环境中的不确定性会增加机器人倾覆的风险^[1]。因此, 为应对复杂环境的挑战, 进一

步提升机器人的运动稳定性至关重要^[2]。机器人的运动稳定性不仅直接影响机器人抵抗外界干扰的能力, 还决定了其在复杂环境中持续执行任务的可靠性与表现^[3], 尤其是抗倾覆能力, 成为确保

其安全高效执行任务的关键^[4]。

机器人的运动稳定性受多种因素的影响,主要包括结构设计、环境条件和质心位置等^[5],通过优化结构设计和调整质心位置能够提升机器人在复杂环境中的稳定性。

机器人稳定性是评价机器人性能的重要指标^[6]。目前,倾覆稳定性分析的研究内容主要包括倾覆稳定性仿真分析和倾覆临界点分析两方面^[7]。王振华等^[8]通过稳定锥判别方法,针对双摆臂移动机器人在越障过程中的稳定性分析,得到了越障的临界条件。魏扬帆等^[9]通过零力矩点(ZMP)判别方法,对四足机器人在坡面上的行走稳定性问题进行了研究。白阳^[10]利用稳定锥方法对全方位运动轮椅机器人进行了重心稳定性研究,实现了重心自调整功能。臧剑南^[11]针对铰接型移动机器人,基于稳定锥方法构建了机器人极限姿态的稳定模型并提出其临界倾翻条件。谢哲东等^[12]以ZMP理论为依据对外骨骼机器人进行稳定性分析,得出适用于下肢外骨骼机器人的稳定性判据。

本文提出一种针对双摆臂移动机器人的重心自调整算法,结合不同环境下的构型姿态,构建各阶段相应的稳定锥模型,以稳定锥判别方法作为理论依据,实时计算不同构型策略下的稳定裕度角,通过重心调整机构实时优化重心位置,以增强机器人在复杂环境中的运行安全性与稳定性。

1 移动机器人整体结构

机器人整体结构如图1所示,该机器人由底盘车体、摆臂机构和重心调整机构组成。两摆臂位于主体前端,通过调整摆臂的旋转角度辅助机器人实现越障功能;采用滑轨系统来调整其质心位置,以优化在不同地形条件下的稳定性。

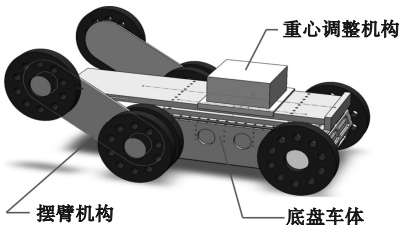


图1 机器人整体结构

Fig.1 Overall structure of the robot

2 机器人质心运动学分析

设机器人底盘车体的质量为 m_1 , 机器人摆臂

质量为 m_2 , 重心调整机构质量为 m_3 。以机器人底盘后侧轮轴为原点构建坐标系 $x_{o_1}y$, 以摆臂后侧轮轴为原点创建坐标系 $x_{o_2}y$, 以重心调整机构原点创建坐标系 $x_{o_3}y$, 如图2所示。图中: G_1 为底盘车体的质心; L_0 为底盘前后轮之间距离; G_2 为摆臂质心; L_1 为摆臂前后轮之间的距离; G_3 为重心调整机构质心; θ_1 为摆臂的旋转角度; L_2 为机器人坐标系与重心调整机构坐标系沿 x 方向的距离; L_3 为机器人坐标系与重心调整机构坐标系沿 y 方向的距离。

底盘车体的质心 G_1 在坐标系 $x_{o_1}y$ 中的齐次坐标见式(1); 摆臂部分的质心 G_2 在坐标系 $x_{o_2}y$ 中的齐次坐标见式(2); 重心调整机构的质心 G_3 在坐标系 $x_{o_3}y$ 中的齐次坐标见式(3)。

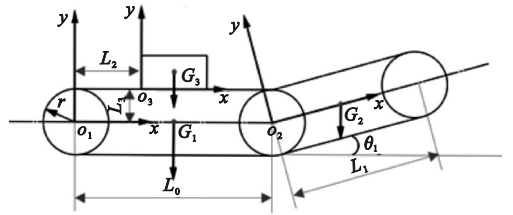


图2 机器人坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of robot coordinate system

$${}^1G_1 = \begin{bmatrix} L_0/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$${}^2G_2 = \begin{bmatrix} L_1/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$${}^3G_3 = [x_3 \quad y_3 \quad 0 \quad 1]^T \quad (3)$$

摆臂坐标系 $x_{o_2}y$ 相对于机器人坐标系 $x_{o_1}y$ 的齐次变换矩阵为

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & L_0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

重心调整机构坐标系 $x_{o_3}y$ 相对于机器人坐标系 $x_{o_1}y$ 的齐次变换矩阵为

$${}^1T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $L_2 = x_3 + s$, s 表示重心调整机构的位移, 运动范围为 $0 \sim 0.7$ m。

通过齐次变换得到机器人摆臂质心 G_2 和重心调整机构质心 G_3 在机器人坐标系 $x_{o_1}y$ 下的位置分别见式(6)、式(7)。

$${}^1G_2 = {}^1T_2 \cdot {}^2G_2 \quad (6)$$

$${}^1G_3 = {}^1T_3 \cdot {}^3G_3 \quad (7)$$

机器人质心运动学模型为

$$\begin{cases} G_x = \sum_{i=1}^n (m_i x_i) / \sum_{i=1}^n m_i \\ G_y = \sum_{i=1}^n (m_i y_i) / \sum_{i=1}^n m_i \\ G_z = \sum_{i=1}^n (m_i z_i) / \sum_{i=1}^n m_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: G_x 、 G_y 、 G_z 是整体质心位置的三维坐标; x_i 、 y_i 、 z_i 表示构件 i 质心的三维坐标; m_i 表示构件 i 的质量; n 为系统内构件总数。

经推导可得机器人的质心运动学齐次模型为

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_0 m_1 + L_1 \cos \theta_1 m_2}{2m} + \frac{L_0 m_2 + x_3 m_3 + L_2 m_3}{m} \\ \frac{\sin \theta_1 L_1 m_2}{2m} + \frac{L_3 m_3 + y_3 m_3}{m} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $m = m_1 + m_2 + m_3$ 。

3 构型稳定性分析

在机器人构型变换过程中, 机器人质心的位置、速度及姿态等因素共同影响机器人的稳定性。因此, 选择合适的目标构型成为关键问题之一^[13]。为了分析机器人运动过程的稳定性, 引入稳定锥模型并结合质心投影法进行分析。当质心投影在支撑多边形内部时, 支撑区域为接触稳定性提供了必要条件, 此时机器人处于稳定状态^[14]。鉴于机器人的结构具有左右对称性, 其稳定性分析可简化为在二维坐标系中进行。

在楼梯环境中, 履带机器人与台阶的接触情况较为复杂, 涉及多个接触点和复杂的力学计算。为简化分析, 将其运动转化为轮式机器人在斜坡上的简化模型。该模型能够有效地反映重心调整对稳定性的主要影响, 同时避免了复杂的几何建模和多点接触计算。通过这种简化方法, 不仅可保留稳定性的关键特征, 还可显著提高计算效率, 使得仿真分析更加直观和高效, 并为后续优化提供便利条件。

3.1 驶入楼梯阶段

根据稳定锥原理, 构建该阶段稳定锥模型如图3所示。稳定锥坐标系 $x_{o_w}y$ 的原点设在底盘

后轮与地面的接触点处。图中: O 为机器人整体的质心位置; A 和 B 为机器人与地面的接触点; r 为机器人底盘后轮轴与地面接触点的距离; φ 为车体与地面之间的倾角; θ 为机器人坐标系与稳定锥坐标系之间的夹角; α 为楼梯的倾斜角度; β 为辅助角; γ_1 、 γ_2 表示稳定锥的边线与重力方向之间的夹角。

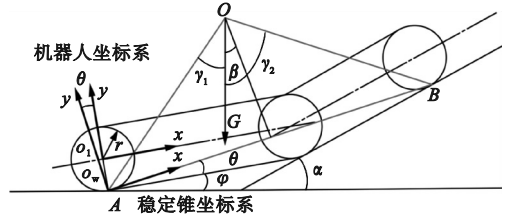


图3 地面-楼梯过渡阶段稳定锥示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stabilizing cone for the ground-staircase transition phase

根据几何关系, 可得机器人坐标系与稳定锥坐标系的夹角 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{L_0 \sin \varphi + L_1 \sin \alpha}{L_0 \cos \varphi + L_1 \cos \alpha}\right) - \varphi \quad (10)$$

已知 θ , 可得机器人坐标系到稳定锥坐标系的变换矩阵为

$${}^wT_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & r \cdot \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & r \cdot \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

稳定锥坐标系下机器人的质心坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^wG_x \\ {}^wG_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot {}^1G_x + \sin \theta \cdot {}^1G_y + r \cdot \sin \theta \\ \cos \theta \cdot {}^1G_y - \sin \theta \cdot {}^1G_x + r \cdot \cos \theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

基于稳定锥理论, 支撑边缘与重力方向之间的夹角定义为边线稳定角, 用于评估机器人在当前构型下的稳定性, 其计算式为

$$\gamma_1 = \arctan \frac{{}^wG_x}{{}^wG_y} - \beta \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{\frac{L_0 \sin \varphi + L_1 \sin \alpha}{\sin \beta} - {}^wG_x}{{}^wG_y} + \beta \quad (14)$$

机器人的稳定角 γ 定义为 γ_1 、 γ_2 的最小值, 一般情况下, 稳定角越大, 机器人运动稳定性越好。当 $\gamma < 0$ 时, 表示质心所受重力位于稳定锥之外, 处于不稳定状态; $\gamma = 0$ 时, 处于临界稳态。若要保证机器人的稳定性, 质心投影必须落在底面凸多边形内部, 即 $\gamma > 0$, γ 越大说明质心可变

化的范围越大,机器人稳定性越强。

3.2 楼梯-平台过渡阶段

根据当前阶段构型策略,稳定锥的底面由摆臂与地面的接触点确定。以质心为顶点,连接底面各接触点,构建完整的稳定锥结构。为简化分析,将坐标系原点设在摆臂后轮与地面的接触点处,构建的稳定锥模型如图4所示。

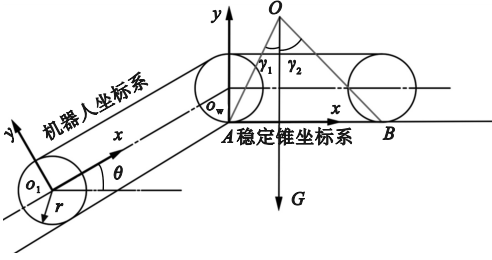


图4 楼梯-平台过渡阶段稳定锥示意图

Fig.4 Schematic diagram of the stabilization cone for the staircase-platform transition phase

机器人坐标系到稳定锥坐标系的变换矩阵为

$${}^w T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & -L_0 \cdot \cos\theta - r \cdot \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & -L_0 \cdot \sin\theta + r \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

稳定锥坐标系下机器人质心坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^w G_x \\ {}^w G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & -L_0 \cos\theta - r \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & -L_0 \sin\theta + r \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1 G_x \\ {}^1 G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

楼梯-平台阶段的临界稳定角计算式为

$$\gamma_1 = \arctan \frac{{}^w G_x}{{}^w G_y} \quad (17)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{L_1 - {}^w G_x}{{}^w G_y} \quad (18)$$

3.3 平台-楼梯过渡阶段

为确保机器人平台-楼梯过渡阶段的稳定性,根据该阶段构型策略,前摆臂水平接触斜坡,重心调整机构前移,使整体质心和摆臂位于一侧。由摆臂接触点和楼梯斜面的其他支撑点构成稳定锥的底面,并通过质心与这些接触点的连线,构建的稳定锥模型如图5所示。

机器人坐标系到稳定锥坐标系的变换矩阵为

$${}^w T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & -L_0 \cdot \cos\theta - r \cdot \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & -L_0 \cdot \sin\theta + r \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

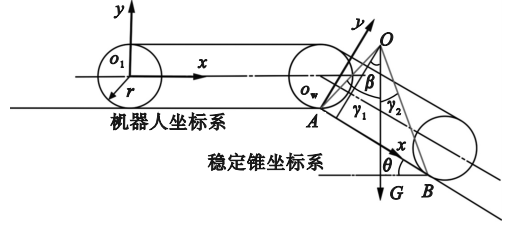


图5 平台-楼梯过渡阶段稳定锥示意图

Fig.5 Schematic diagram of stabilizing cone for the platform-staircase transition phase

式中 θ 表示机器人坐标系与稳定锥坐标系的夹角, $\theta = \varphi - \alpha$ 。

稳定锥坐标系下机器人质心坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^w G_x \\ {}^w G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & -L_0 \cos\theta - r \cdot \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & -L_0 \sin\theta + r \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1 G_x \\ {}^1 G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

平台-楼梯阶段的临界稳定角计算式为

$$\gamma_1 = \arctan \frac{{}^w G_x}{{}^w G_y} + \beta \quad (21)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{L_1 - {}^w G_x}{{}^w G_y} - \beta \quad (22)$$

3.4 驶离楼梯阶段

依据稳定锥原理建立如图6所示的稳定锥模型,该模型的坐标系原点设定在底盘后轮与地面的接触点上,图中 ρ 表示稳定锥坐标系与地面之间的夹角。根据几何关系有

$$\begin{aligned} \theta &= \varphi - \rho \\ &= \varphi - \arctan \left(\frac{L_0 \cdot \sin\varphi}{L_0 \cdot \cos\varphi + L_1} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

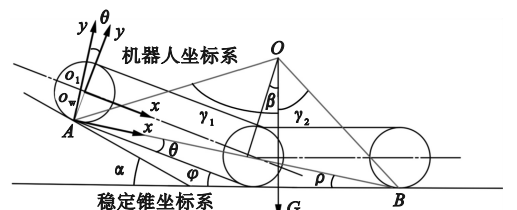


图6 楼梯-地面过渡阶段稳定锥示意图

Fig.6 Schematic diagram of stabilizing cone for staircase-ground transition phase

机器人坐标系到稳定锥坐标系的变换矩阵为

$${}^w T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & r \cdot \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & r \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

稳定锥坐标系下质心坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^w G_x \\ {}^w G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & r \cdot \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & r \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1 G_x \\ {}^1 G_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

驶离阶段的临界稳定角计算式为

$$\gamma_1 = \arctan \frac{{}^w G_x}{{}^w G_y} + \beta \quad (26)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{L_0 \sin\varphi / \sin\rho - {}^w G_x}{{}^w G_y} - \beta \quad (27)$$

4 仿真分析

4.1 仿真环境建立

基于 ROS 框架,在 Gazebo 中搭建仿真环境模型,如图 7 所示。

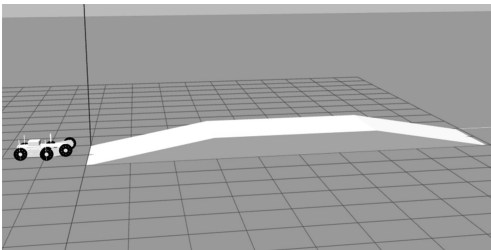


图 7 机器人仿真环境

Fig. 7 Simulation environment of robots

Matlab 与 ROS 联合仿真中,数据交互通过 ROS 的发布-订阅机制实现。Matlab 通过订阅来自 Gazebo 的传感器数据,实时处理后进行控制决策。将生成的控制指令反馈至 Gazebo 环境,用于驱动机器人各关节执行相应的动作。Matlab 和 ROS 信息交互的原理如图 8 所示。

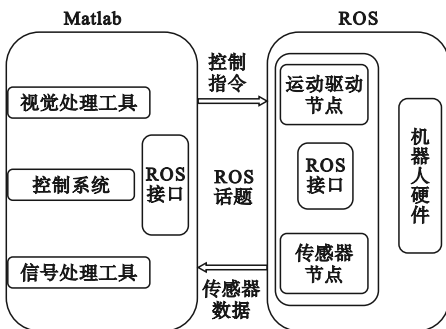


图 8 Matlab-ROS 通信原理图

Fig. 8 Matlab-ROS communication schematic diagram

4.2 仿真结果

对机器人各构型阶段进行稳定性分析,利用 Matlab 和 ROS 进行联合仿真,对重心自调整策略进行验证。

机器人由地面过渡到楼梯阶段时,重心调整机构静止时底盘位移与稳定角的关系如图 9 所示。重心调整机构作用下,底盘位移与稳定角的变化关系如图 10 所示。重心调整机构的位移与稳定角的关系如图 11 所示。

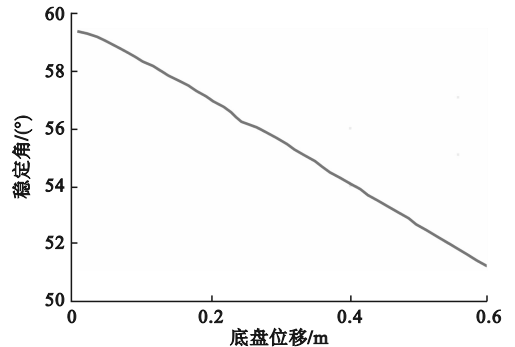


图 9 地面-楼梯阶段重心调整机构静止时稳定角变化图

Fig. 9 Plot of angular of stability variation of the center of mass adjusting device at rest during the ground-staircase phase

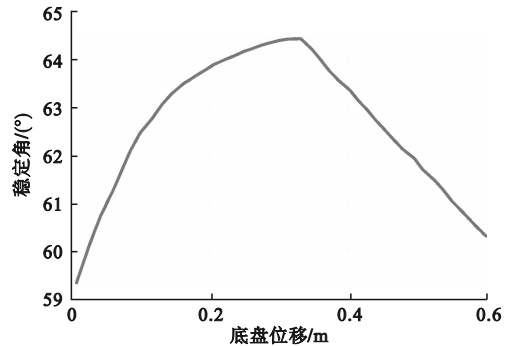


图 10 地面-楼梯阶段重心调整机构作用下的稳定角变化图

Fig. 10 Plot of angular of stability variation with the effect of the center of mass adjusting device in ground-staircase phase

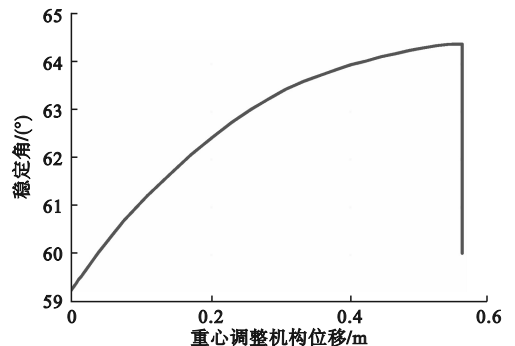


图 11 地面-楼梯阶段重心调整机构的位移与稳定角变化图

Fig. 11 Plot of displacement of center of mass adjusting device versus stability angle for ground-staircase phase

仿真结果显示,当重心调整机构保持静止时,随着底盘位移的增加,稳定角逐渐下降,整体的抗倾覆能力随之减弱。在重心调整机构运动初期,通过调整重心位置,稳定性得到显著提升,使机器人在该阶段具备较高的抗倾覆能力。当重心调整至一定范围后,尽管稳定角有所下降,但系统整体仍能维持较高的稳定性,从而确保机器人的平稳运行。

机器人由楼梯过渡到二层平台的过程中,重心调整机构静止时,底盘位移与稳定角的关系如图 12 所示。重心调整机构作用下,底盘位移与稳定角之间的关系如图 13 所示。重心调整机构的位移与稳定角的关系如图 14 所示。

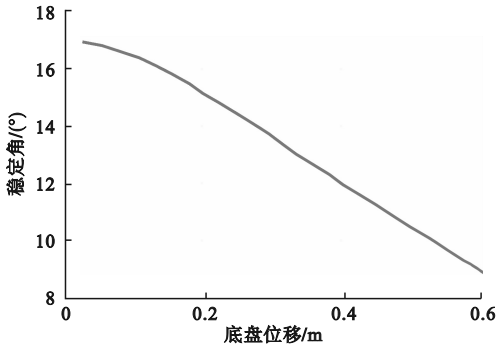


图 12 楼梯 - 平台阶段重心调整机构静止时稳定角变化图

Fig. 12 Plot of angular of stability variation of the center of mass adjusting device at rest during the staircase-platform phase

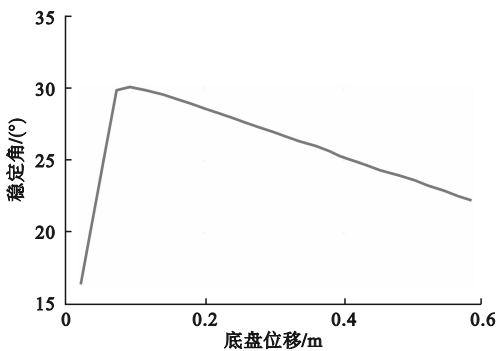


图 13 楼梯 - 平台阶段重心调整机构作用下的稳定角变化图

Fig. 13 Plot of angular of stability variation with the effect of the center of mass adjusting device in staircase-platform phase

由图 12 ~ 14 可知,机器人从楼梯过渡至二层平台的过程中,若未进行重心调整,随着底盘位移的增加,稳定角逐渐减小,系统的抗倾覆能力显著下降,尤其在边缘位置,机器人面临较高的倾覆风

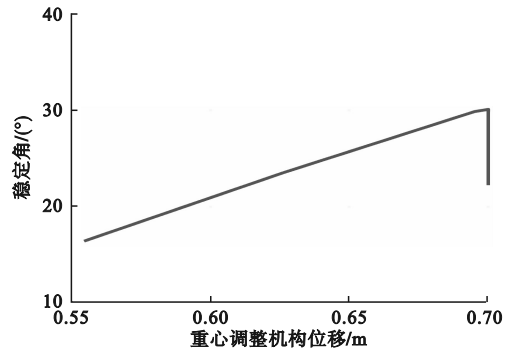


图 14 楼梯 - 平台阶段重心调整机构的位移与稳定角变化图
Fig. 14 Plot of displacement of center of mass adjusting device versus stability angle for staircase-platform phase

险。重心调整后,稳定角显著提升,增强了运动过程中的稳定性。当重心调整机构达到最大调节限度时,尽管稳定角会有所下降,但系统的稳定性仍保持在安全范围内,可满足机器人在该阶段的运动稳定性。

机器人从二层平台过渡至楼梯阶段时,若质心仍保持在机器人整体中间位置,其位移与稳定角的关系如图 15 所示。重心调整机构作用下,位移与稳定角之间的关系如图 16 所示。重心调整机构的位移与稳定角之间的关系如图 17 所示。

由图 15 ~ 17 可知,未进行重心调整时,系统的稳定角随着底盘位移的增加而降低,抗倾覆能力显著减弱,尤其在地形变化时,机器人倾覆的风险大幅增加。重心调整机构作用时,系统的稳定角得到显著提升,尤其在调整初期,有效增强了机器人由平台向楼梯过渡阶段的稳定性。当重心调整机构运动至极限位置时,系统的稳定性仍然维持在较高的安全裕度内,确保机器人的运动安全。

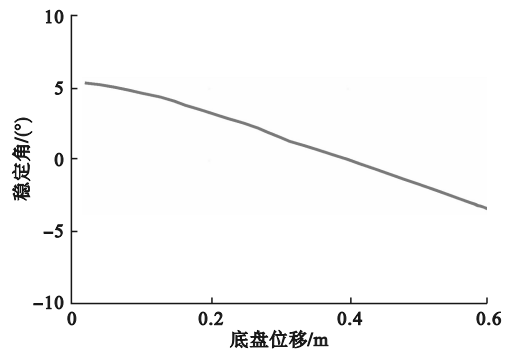


图 15 平台 - 楼梯阶段重心调整机构静止时稳定角变化图
Fig. 15 Plot of angular of stability variation of the center of mass adjusting device at rest during the platform-staircase phase

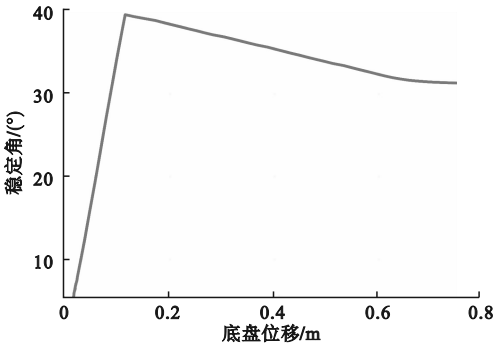


图 16 平台 - 楼梯阶段重心调整机构作用下稳定角变化图

Fig. 16 Plot of angular of stability variation with the effect of the center of mass adjusting device in platform-staircase phases

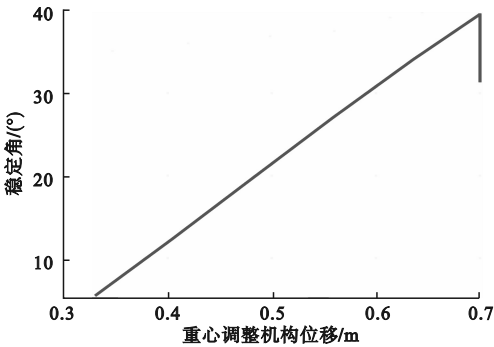


图 17 平台 - 楼梯阶段重心调整机构的位移与稳定角变化图

Fig. 17 Plot of displacement of center of mass adjusting device versus stability angle for platform-staircase phases

当机器人完全处于斜坡上时,质心靠近摆臂一侧,摆臂旋转角度为 0° ,此时车体与斜坡表面平行。重心调整机构保持静止时,底盘位移与稳定角之间的关系如图 18 所示,稳定角维持在较高水

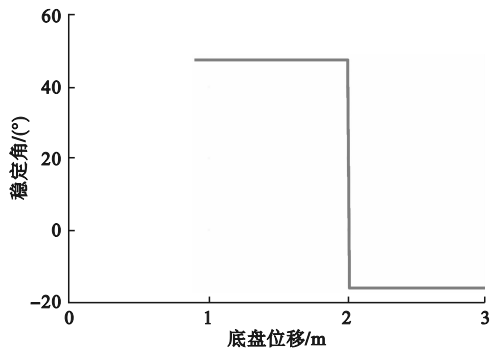


图 18 楼梯 - 地面调整阶段重心调整机构静止时稳定角变化图

Fig. 18 Plot of angular of stability variation of the center of mass adjusting device at rest during the staircase-ground adjustment phase

平。然而,当机器人逐渐接近斜坡底端并准备过渡至地面时,摆臂开始上抬以适应地形变化,这一动作导致质心逐渐偏离支撑域的投影范围,进而破坏了系统的平衡,导致机器人倾覆。

相较之下,在重心调整机构作用时,底盘位移与稳定角的关系如图 19 所示,重心调整机构的位移与稳定角之间的关系如图 20 所示,稳定角逐步增大,稳定性显著提升。尽管摆臂运动会导致稳定角短暂下降,但重心调整机构能够及时介入,从而确保机器人在调整过程中的稳定和安全。

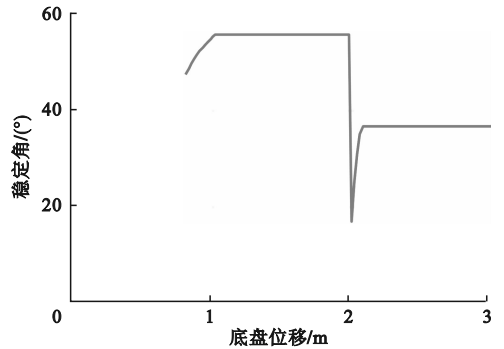


图 19 楼梯 - 地面调整阶段重心调整机构作用下稳定角变化图

Fig. 19 Plot of angular of stability variation with the effect of the center of mass adjusting device in staircase-ground adjustment phase

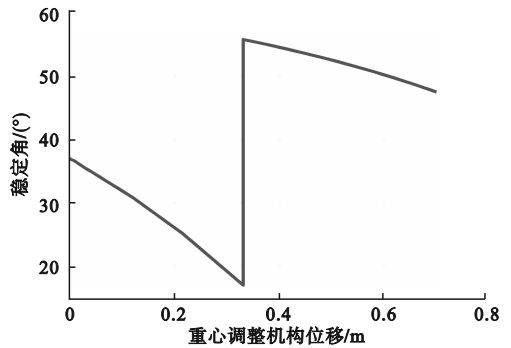


图 20 楼梯 - 地面调整阶段重心调整机构位移与稳定角变化图

Fig. 20 Plot of displacement of centre of mass adjusting device versus stability angle for staircase-ground adjustment phase

5 结论

本文依据稳定锥原理在双摆臂移动机器人上增加了滑块系统,通过滑块的移动实现了机器人的重心自调整。构建了机器人不同构型阶段的稳定锥模型并对所提出的重心自调整策略进行了仿

真验证。仿真结果显示,各个阶段机器人的稳定性均有所提升:在地面-楼梯阶段,稳定角提升了约 6° ;在楼梯-平台阶段,稳定角增加了约 10° ;在平台-楼梯阶段,稳定角提升了约 30° ;在楼梯-地面过渡阶段,稳定角提升了约 20° 。表明该策略能够显著提升机器人在复杂地形中的运动稳定性,减少倾覆现象的发生,确保其安全运行。

参考文献(References):

- [1] HAN Y Y, LIU G P, LU Z Y, et al. A stability locomotion-control strategy for quadruped robots with center-of-mass dynamic planning [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2023, 24(6): 516-530.
- [2] XING H X, LI T J, LIU J Y. Working space planning for wheeled robot overturning stability [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2842(1): 012103.
- [3] 纪兆俊,李艳杰,卜春光,等. 伤员运载机器人楼梯环境运动稳定性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 267-273.
- JI Z J, LI Y J, BU C G, et al. Environmental motion stability of the staircase of the casualty carrying robot [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 267-273. (in Chinese)
- [4] 宗成国,刘纪新,于岩,等. 关节式双履带移动机器人越障稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4004-4008.
- ZONG C G, LIU J X, YU Y, et al. Stability analysis of obstacle-crossing for articulated dual-track mobile robot [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 4004-4008. (in Chinese)
- [5] 邹树梁,周龙,张德. 关节履带式核应急机器人越障性能研究[J]. 机械设计与制造, 2024(8): 350-354.
- ZOU S L, ZHOU L, ZHANG D. Research on obstacle crossing performance of joint crawler nuclear emergency robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(8): 350-354. (in Chinese)
- [6] KONG L H, ZHAO D, WANG J Y, et al. Stability analysis of multi-legged wheel robot [J]. Journal of Physics: Conference

Series, 2022, 2343(1): 012015.

- [7] 嵇建成,王玉峰,付建军,等. 康复助行机器人倾覆稳定性分析[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2): 70-72.
- JI J C, WANG Y F, FU J J, et al. Tip-over stability analysis of an omni-directional robotic walker [J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(2): 70-72. (in Chinese)
- [8] 王振华,孟广耀,黄居鑫,等. 双摆臂履带可变形机器人的稳定性研究[J]. 机电工程, 2019, 36(12): 1331-1336.
- WANG Z H, MENG G Y, HUANG J X, et al. Stability analysis of double pendulum arms transformable track robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(12): 1331-1336. (in Chinese)
- [9] 魏扬帆,周川,郭健,等. 基于CPG的四足机器人坡面稳定行走控制研究[J]. 控制工程, 2021, 28(6): 1055-1060.
- WEI Y F, ZHOU C, GUO J, et al. CPG-based stable walking control of the quadruped robot on the slope [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(6): 1055-1060. (in Chinese)
- [10] 白阳. 重心自调整的全方位运动轮椅机器人技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- [11] 臧剑南. 铰接型移动机器人结构与性能分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11465-11471.
- ZANG J N. Structural design and performance analysis of an articulated mobile robot [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(26): 11465-11471. (in Chinese)
- [12] 谢哲东,李斌,陈晨,等. 基于ZMP理论的下肢外骨骼机器人稳定性分析[J]. 机械工程师, 2022(5): 1-5.
- XIE Z D, LI B, CHEN C, et al. Stability analysis of lower limb exoskeleton robot based on ZMP theory [J]. Mechanical Engineer, 2022(5): 1-5. (in Chinese)
- [13] 冯婷婷,谭钊钰,谷世超,等. 构形可变移动机器人的构形评价、优选及变换规划[J]. 机器人, 2022, 44(2): 167-175.
- FENG T T, TAN J Y, GU S C, et al. Configuration evaluation, selection and transformation planning of a mobile robot with variable configurations [J]. Robot, 2022, 44(2): 167-175. (in Chinese)
- [14] BRECELJ T, PETRIĆ T. Zero moment line-universal stability parameter for multi-contact systems in three dimensions [J]. Sensors, 2022, 22(15): 5656.

(责任编辑:徐淑姣)

(上接第15页)

- [23] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6): 1137-1149.
- [24] WU T H, WANG T W, LIU Y Q. Real-time vehicle and distance detection based on improved yolo v5 network [C]//

2021 3rd World Symposium on Artificial Intelligence. Singapore: IEEE, 2021: 24-28.

- [25] JIANG X, ZHUANG X T, CHEN J S, et al. YOLOv8-MU: an improved YOLOv8 underwater detector based on a large kernel block and a multi-branch reparameterization module [J]. Sensors, 2024, 24(9): 2905.

(责任编辑:和晓军)