

基于模拟样机的六足机器人双模式运动学研究

徐建兵¹, 管必萍¹, 何文君¹, 吴爱军¹, 郑紫宸¹, 范狄庆², 崔顺涛²

¹国网上海市电力公司, 上海

²上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2024年11月12日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月19日

摘要

为了提高六足机器人在多种复杂地形环境中的越障性能与效率性, 提出了一种可变换行走模式的六足机器人。建立了足式行走模式的动力学模型, 此外机器人通过发射返回的激光判断路面的平整度, 如果达到所需要的要求, 则六足机器人变换为轮式行走状态, 在特定场合运行效率得到提升。利用ADAMS软件对六足机器人模型进行了动力学仿真分析, 得到了质心的位移曲线、速度曲线、加速度曲线。结果表明, 六足机器人能在运动中保持平稳状态, 验证了双模式六足机器人模型的合理性。

关键词

六足机器人, ADAMS, 足式移动, 轮式移动

Dual-Mode Kinematics of a Hexapod Robot Based on Simulated Prototypes

Jianbing Xu¹, Biping Guan¹, Wenjun He¹, Aijun Wu¹, Zichen Zheng¹, Diqing Fan², Shuntao Cui²

¹State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai

²School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Nov. 12th, 2024; accepted: Dec. 12th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

Abstract

In order to improve the obstacle-crossing performance and efficiency of a hexapod robot in a variety of complex terrain environments, a hexapod robot with changeable walking modes is proposed. A kinetic model of the foot walking mode is established, and the robot determines the smoothness of the road surface by emitting the returned laser, and if it meets the required requirements, the hexapod robot changes to the wheeled walking state, which improves the efficiency of the operation

文章引用: 徐建兵, 管必萍, 何文君, 吴爱军, 郑紫宸, 范狄庆, 崔顺涛. 基于模拟样机的六足机器人双模式运动学研究[J]. 计算机科学与应用, 2024, 14(12): 142-152. DOI: 10.12677/csa.2024.1412248

in specific occasions. The ADAMS software was used to simulate the dynamics of the hexapod robot model, and the displacement, velocity and acceleration curves of the centre of mass were obtained. The results show that the hexapod robot can maintain a smooth state in motion, which verifies the reasonableness of the dual-mode hexapod robot model.

Keywords

Hexapod Robot, ADAMS, Foot Mobile, Wheeled Mobile

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着当今社会的发展,货物运载多足机器人在军事、工业、建筑、物流等领域已经基本实现智能化和自动化,不断地推动产业更新发展。但是如何提高通过复杂地形的效率性、智能性和地形适应能力,还是目前亟待解决的问题。

宋献章等[1]针对多足机器人在各类环境下快速移动的问题,设计了六连杆腿部机构和齿轮传动腿部机构。基于上述两种结构,设计了八足移动机器人。孙志远等[2]分析了行走步态、对角小跑步态、同侧快跑步态,推导出了四足机器人直线平动步态规划的方法。张世俊等[3]提出一种能耗最优的机器人步态优化的方法,采用了零力矩点稳定性理论的方法,保证了机身的稳定性。其次,立足于能耗指标的步态优化方法,保证了能量的消耗。结果表明,该机器人的能耗比优化前降低了14%。Zheng等[4]基于医院运输人检测和避障功能的机器人,通过深度学习的方法和跳跃距离聚类方法、自动注释实际场景中收集的数据集的方法以减少工作量实现更好的性能,并在实际环境中进行的实验证实了所提出算法的有效性。秦鹏举[5]等对机器人的步态进行研究,提出了基于双目视觉和机器学习的精准步态检测方法,使其在复杂的场景中能够平稳行进。尚哲等[6]提出了一种被动式的六轮摇臂移动机器人,基于达朗贝尔原理,建立了机器人前轮、中轮和后轮分别通过台阶类障碍的动力学模型,该机器人由六个独立电机驱动,可根据地形变换多种姿态越障。Long等[7]提出了一种新型的四杆联动可变形轮腿运动机构,它可以从圆轮移动转变为轮腿移动,反之亦然,以适应不同地形。轮腿变换设计为在接触障碍物时被动触发,或通过主动触发机构驱动。其实验结果表明,所提出的机器人融合了轮式和腿式机动性的优点,在机动性、稳定性、最大越障高度和模式切换过程方面具有优异的性能。Markus Eich等[8]描述一种用于混合多足机器人的控制架构,控制方法考虑了施加在腿上的扭矩的本体感受信息,额外的本体感觉倾斜反馈用于使同一控制器在爬楼梯能力方面更加稳健。陈程等[9]针对户外运动中所遇到的台阶、楼梯等复杂地形可攀爬楼梯的多模式全向移动机器人,通过切换运动模态,具备了越障能力和快速移动的能力。鄧耀威等[10]为了解决传统六轮机器人在转弯半径大、运动灵活性差以及地形适应性不足等问题,提出了一种新型的六轮多模式移动机器人。对机器人在不同地形条件下的运动姿态和速度进行了测试,并对多模式仿真运动与样机实验结果进行了分析。结果表明,该六轮多模式移动机器人在通过性和地形适应能力方面,优于传统的六轮机器人。张自强[11]等对着陆缓冲性能进行了深入研究,基于蝗虫的身体结构设计了一种新型的跳跃机器人。对该结构进行力学分析得出其具有良好的腿部缓冲能力。金振林等[12]基于消防工程方面,提出了一种多足并联机器人,该机器人具有新型的三自由度防护腿部机构,在救灾等场合具有良好的应用前景。王森等[13]针对单自由度闭链腿部机构足端轨迹单一的问题,导致机器人的地面适应

性不足, 提出了一种新型可调节的闭链腿部机构。该机构以 Klann 六杆机构为基础, 通过增加一个自由度, 使得机架的铰链能够进行转动, 从而实现铰链位置的调整。然后进行了腿部机构的构型设计、运动学分析, 并以最大抬腿高度为目标进行了参数优化, 最终构建了一款八足机器人, 并验证了该设计的可行性。

2. 六足机器人结构设计

本文通过借鉴生物学中的六足节肢动物的运动进行设计, 该结构包括将股节、胫节以及跗节相连构成。机器人腿采用对称式分布, 有利于机械腿的控制, 并且能有效地预防发生干涉。

2.1. 六足机器人越障模式

该机器人由六条机械腿组成, 由股关节、胫关节、跗节三个转动关节组成。股关节作为第一个转动关节与机器人主体进行连接, 第二个控制胫关节位于股关节的端部, 第三个位于胫关节的端部, 最后球铰链位于机械腿末端[14] [15]。

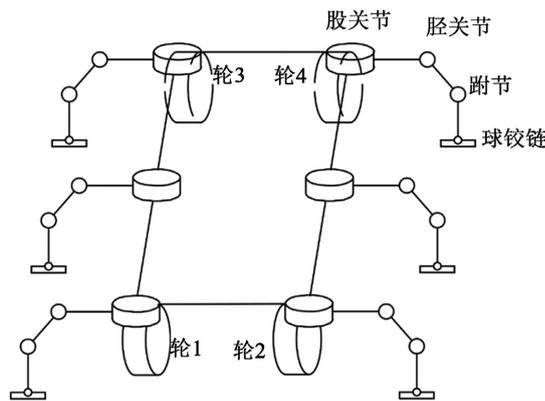


Figure 1. Structure of a hexapod robot
图 1. 六足机器人结构图

该模式下求解机械腿的自由度, 如图 1 所示。机器人支撑地面看作 1 个杆件, 机器人机身作为 1 个杆件, 机器人每条腿部有 3 个杆件, 一个球铰链和三个转动关节[16]。由此可得该模式下机器人共有 20 个杆件。根据 Grubler 自由度公式, 可得机器人六足机器人移动自由度为:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

2.2. 六足机器人快速移动模式

由于足式机器人在移动中能跨越各种阻碍, 所以更能适应一些复杂的环境和地形。但是在现实城市生活中机器人更多接触的是平坦的道路, 此时轮式机器人在移动效率上的优势则会更加明显。行业内许多机器人都是在关节处安装轮毂, 但是需要设计复杂的腿部结构, 提高了对机械腿的控制难度, 该结构也很难适应大负载的工作条件。于是在机器人的机身底部安装轮毂, 六足机器人快速移动模式如下图 2 所示。

在评估路面平整度时, 通常使用标准差 σ 作为一个重要的指标。当 σ 值较高时, 说明路面的纵剖面高差变化较大, 表明路面平整度较差。相反, 若 σ 值较低, 则意味着路面纵截面的高程差异较小, 因此路面的平整性较好。首先使用连续平整仪轮作为数据采集的工具, 用来计算平整度的标准偏差 σ , 采集沿

路固定间隔是数据，然后利用数理统计的方法，对数据进行方差分析。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=0}^{n-1} [S(x) - \bar{S}(x)]^2} \quad (2)$$

其中 $S(x)$ 为路面 x 处的高程值， $\bar{S}(x)$ 为路面高程值的平均值。

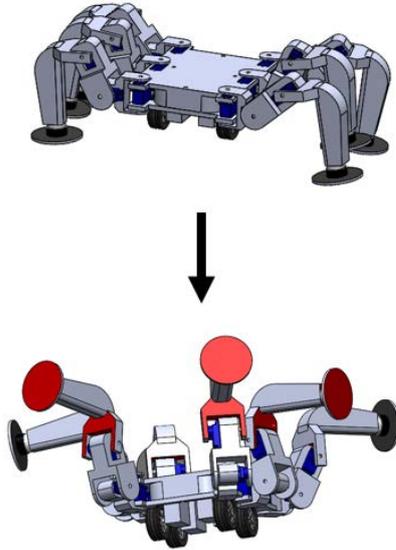


Figure 2. Mechanism deformation diagram

图 2. 机构变形图

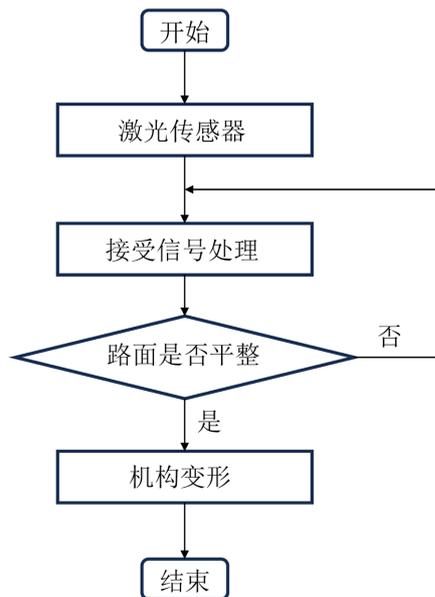


Figure 3. Flow chart of mechanism deformation

图 3. 机构变形流程图

判断路面平整度时，一般有激光传感器(激光脉冲测距技术、激光相位测距技术、激光三角测距技术)、振动传感器。激光三角测距技术法具有高精度、快速的距离检测的优点，所以本次论文选用激光三角测距法测量路面高程。激光三角法测距是一种基于激光照射在待测物体某一参考点并接收其散射光的原

理进行测量的方法。其技术原理可以概括为：通过发射一束激光，将其照射到待测物体指定参考点，激光在物体表面发生散射和漫反射。接着，这些光通过特定的透镜系统被聚焦，并投射到预设的光敏传感器位置进行接收。当待测物体发生位移时，该过程将被重新执行，即再次发射激光照射到物体的新位置，并通过光敏传感器接收变化后的散射和漫反射光。物体的位移将引起激光散射和接收路径的变化，这就是激光三角测距法的基本原理。

设定一个阈值 σ ，当 σ 值较高时，面平整度较差，此时机构变形为足式移动结构。当 σ 值较低时，面平整度较高，此时机构变形为轮式移动结构，如图 3 所示。

3. 六足机器人步态分析

三角步态是机器人一种较为常见的行走步态，常用在六足机器人。该步态是模仿“六足纲”昆虫，是将六足以三角结构分为两组交替向前移动。在行走的过程中，其中第一组支撑在地面上，用以维持机身的稳定性。另一组在第一组支撑在地面上的同时会抬起，然后定点落在下一个位置，这样交替运行机器人就能够平稳地移动，具体步骤如下图 4 所示。

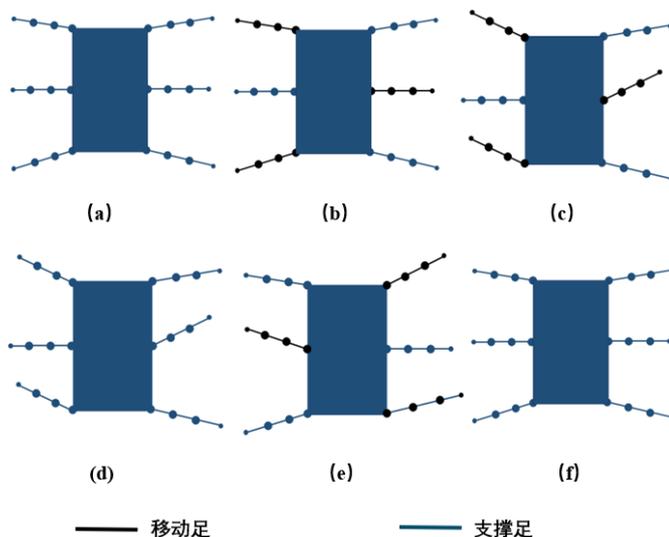


Figure 4. Triangular gait planning
图 4. 三角步态规划

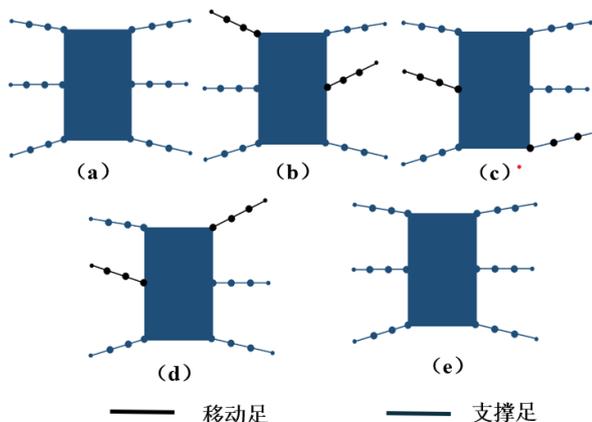


Figure 5. Four-corner gait planning
图 5. 四角步态规划

四角步态有着四条腿支撑，机器人的四角步态移动有着四条腿支撑，可以独立适应不同的地面环境，所以能让机器人有着更高的稳定性。每次运动的过程都有两只腿移动，具体可以把六条腿分为三组左前腿和右中腿；左中腿和右后腿；左后腿和右前腿，三组腿依次分别抬腿落地支撑，具体过程如图 5 所示。

五角步态有着五条腿支撑，可以有着更高的稳定性和适应性。由于五条腿支撑，提供了更多的支撑点，因此在不同的地面环境下更容易保持平衡，但是五角步态在移动的效率上有所欠缺，于是五角步态只有在特定的环境下才能发挥它的优势。具体行走过程如图 6 所示。

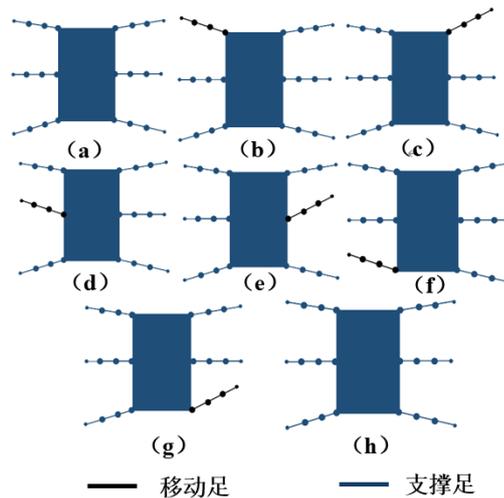


Figure 6. Pentagonal gait planning
图 6. 五角步态规划

4. 六足机器人运动学建模

通过 D-H 法建立足部关节坐标系， θ_i 为关节转角， a_i 为杆件长度， α_i 为杆件扭角， d_i 为杆件偏移量。腿部结构及运动参数如下表 1 所示。

Table 1. D-H parameter table
表 1. D-H 参数表

| 杆件 | θ_i | a_i | α_i | d_i |
|----|------------|-------|------------|-------|
| 1 | θ_1 | a_1 | α_1 | d_1 |
| 2 | θ_2 | a_2 | α_2 | d_2 |
| 3 | θ_3 | a_3 | α_3 | d_3 |

4.1. 机器人运动学正解

两相邻构件的相对关系表达式如下：

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i} \quad (3)$$

根据齐次变换，可得出足端坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵为：

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \quad (4)$$

足端在基座关节中的坐标系如下：

$$P = T_1^0 T_2^1 T_3^2 (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_x = l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_1 c\theta_2 + l_3 c\theta_1 (c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3) \\ p_y = l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_1 c\theta_2 + l_3 s\theta_1 (c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3) \\ p_z = l_2 s\theta_2 + l_3 (s\theta_2 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_3) \end{cases} \quad (6)$$

4.2. 机器人运动学逆解

运动学逆解是已知足端对于基坐标系的位姿矩阵，求机器人各关节变量的过程。将公式(4)左右两边同时左乘 $(T_1^0)^{-1}$ 得：

$$(T_1^0)^{-1} T_3^0 = T_2^1 T_3^2 \quad (7)$$

由公式(7)，进而可以求出股关节转角 θ_1 、胫关节转角 θ_2 、踝节转角 θ_3 如公式(8)所示：

$$\theta_1 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) & , p_x > 0 \\ \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) + 180^\circ & , p_x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{-p_z}{\sqrt{(l_3 c\theta_3 + l_2)^2 + (l_3 s\theta_3)^2}}\right) + \arcsin\left(\frac{l_3 c\theta_3 + l_2}{(l_3 c\theta_3 + l_2)^2 + (l_3 s\theta_3)^2}\right) \quad (9)$$

$$\theta_3 = \arccos\frac{(c\theta_1 p_x + s\theta_1 p_y - l_1)^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \quad (10)$$

5. 动力学仿真

采用 ADAMS 对机器人进行整体仿真，为机器人各个关节设置旋转副，然后在分别设置驱动参数。

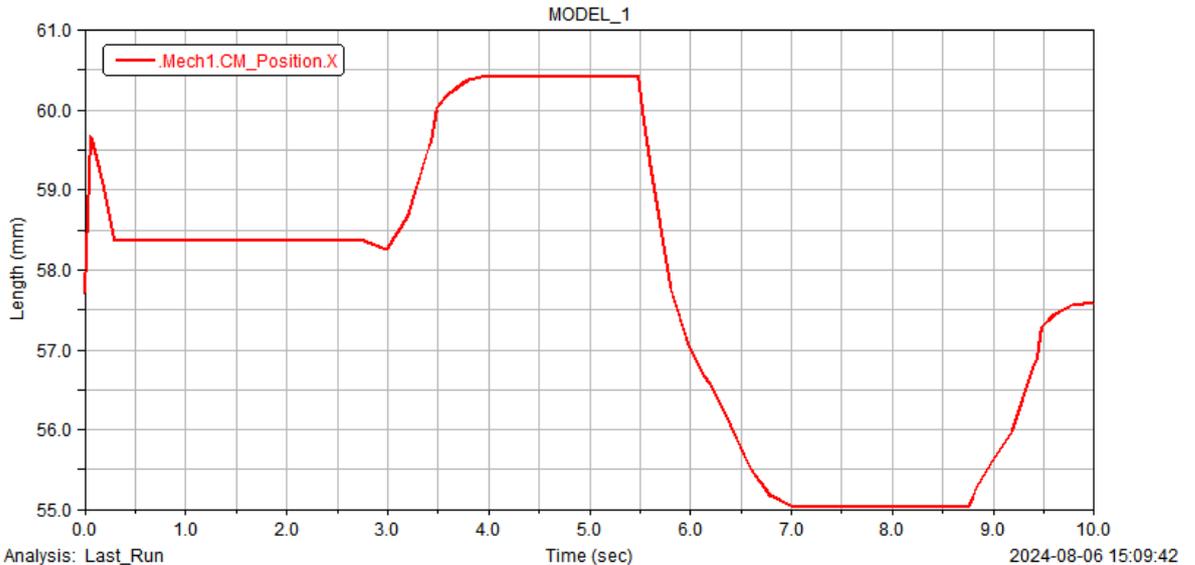


Figure 7. Centre of mass displacement curve in x-direction

图 7. 质心在 x 方向位移曲线

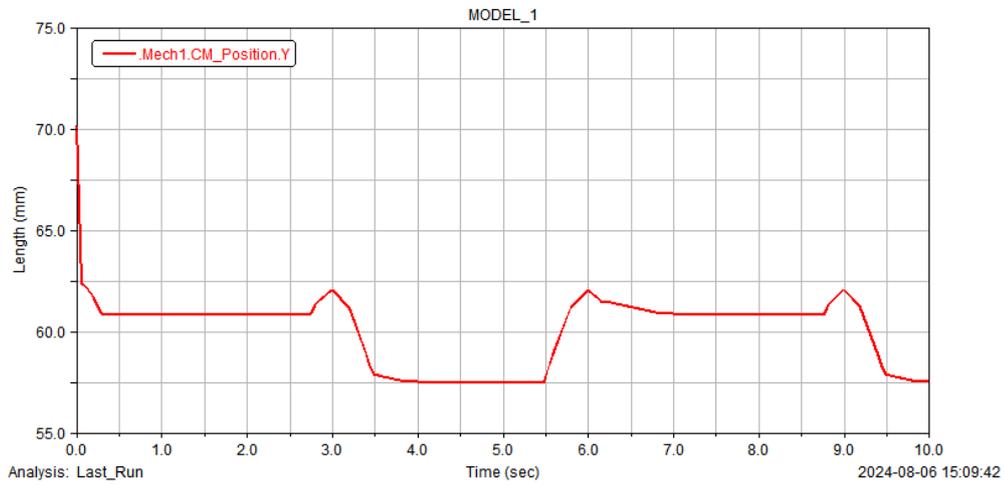


Figure 8. Centre of mass displacement curve in y-direction

图 8. 质心在 y 方向位移曲线

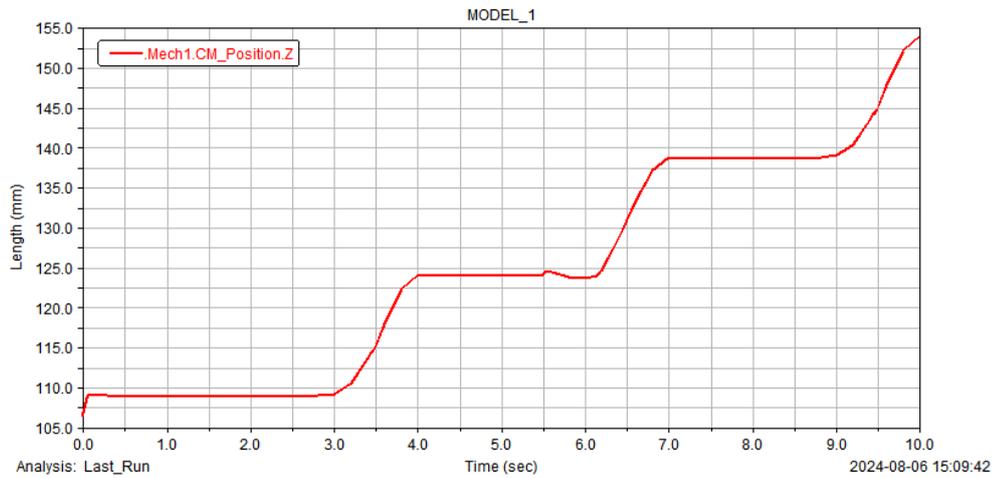


Figure 9. Centre of mass displacement curve in z-direction

图 9. 质心在 z 方向位移曲线

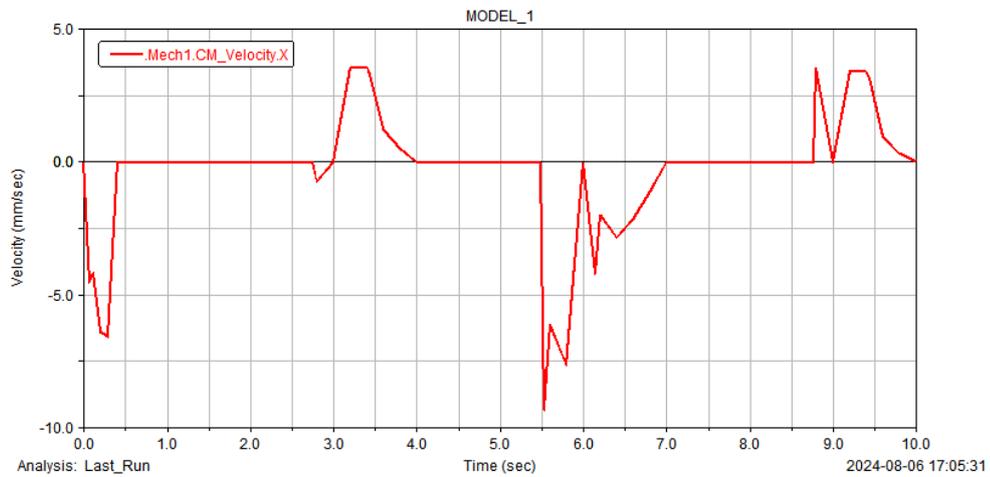


Figure 10. Velocity profile of centre of mass in x-direction

图 10. 质心在 x 方向速度曲线

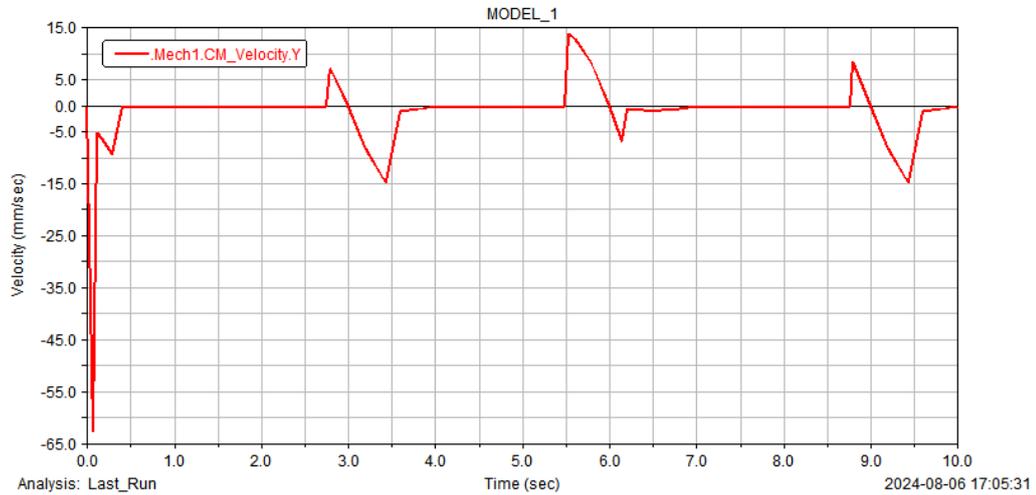


Figure 11. Velocity profile of centre of mass in y-direction
图 11. 质心在 y 方向速度曲线

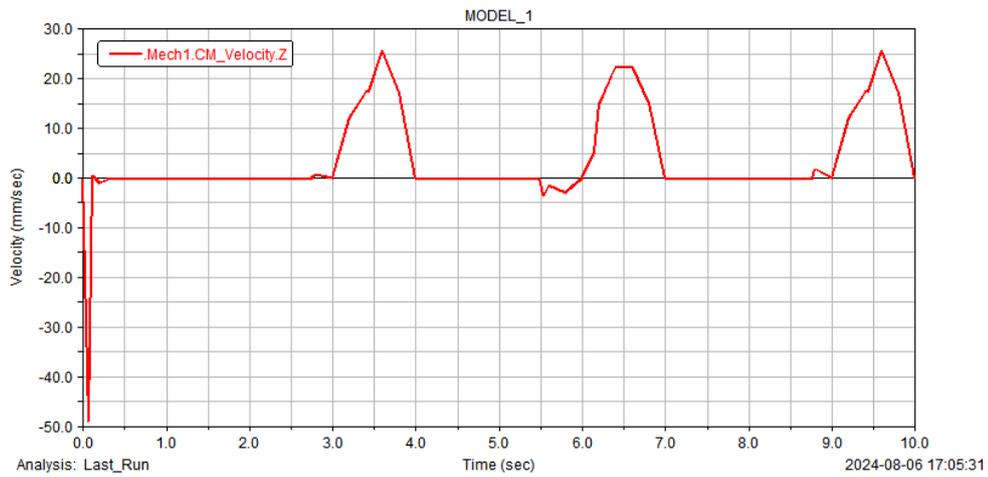


Figure 12. Velocity profile of centre of mass in z-direction
图 12. 质心在 z 方向速度曲线

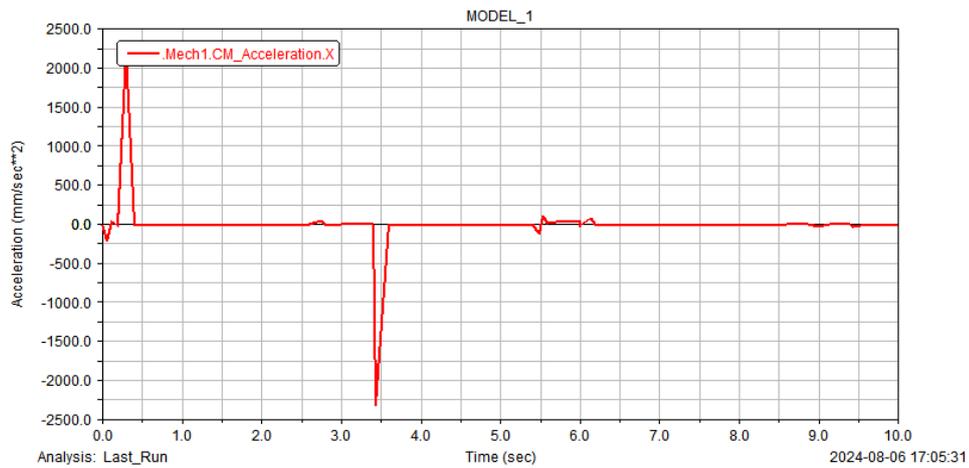


Figure 13. Acceleration curve of centre of mass in x-direction
图 13. 质心在 x 方向加速度曲线

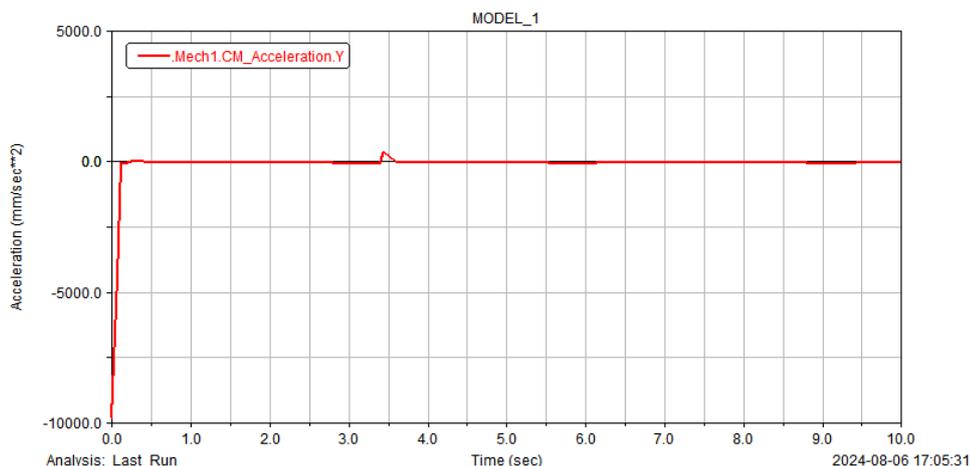


Figure 14. Acceleration curve of centre of mass in y-direction

图 14. 质心在 y 方向加速度曲线

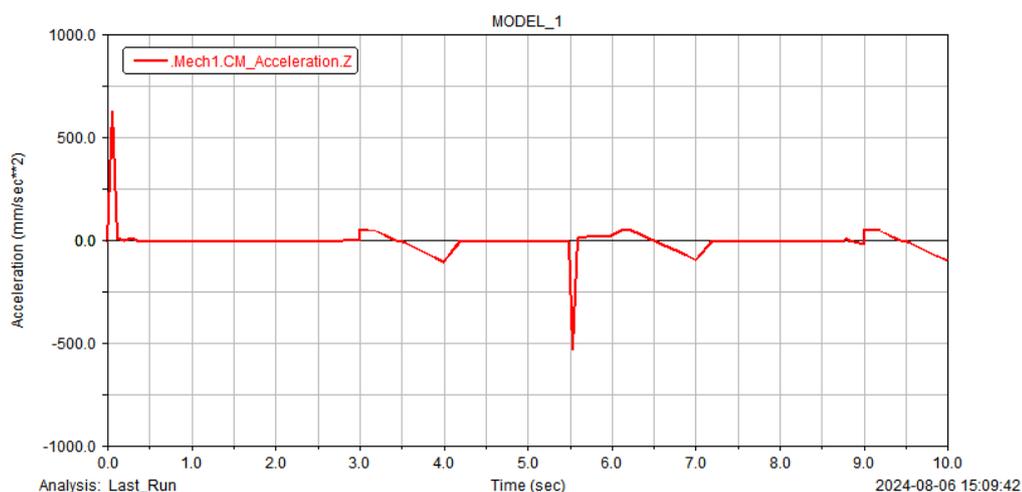


Figure 15. Acceleration curve of centre of mass in z-direction

图 15. 质心在 z 方向加速度曲线

机器人质心位置变化如图 7~9 所示, 机器人的质心在垂直位移的幅值大约为 9.5 mm, 表明在 X 与 Y 轴方向都具有稳定性。机器人也能在 Z 轴方向平稳前进, 可见机器人的质心位置变化较为平稳, 能够满足机器人行走的要求。

机器人质心速度变化曲线如图 10~12 所示, 机器人质心的速度位移呈周期性。这是由于机器腿部交替造成的。曲线峰值和谷值数值相近, 表明机器人在行走的过程中能够很好的保持平稳。

机器人机身垂直方向的加速度曲线如图 13~15 所示, 机器人在该方向的加速度曲线基本趋于平稳, 可见该机器人有着良好的平稳性。

6. 结论

本文研究了一种能够适应多种复杂地形环境的可变换行走模式的六足仿生机器人, 通过建立足式行走模式的动力学模型, 利用 ADAMS 软件对六足机器人模型进行了动力学仿真分析, 得到了质心的位移曲线、速度曲线和加速度曲线; 六足仿生机器人的质心在垂直方向的位移约为 9.5 mm, 运动过程中质心变化平稳, 通过量化数据来验证双模式六足仿生机器人模型设计的合理性。后续将在六足机器人构型变

换模式、结构性能优化等方面开展深入研究,为提高六足仿生机器人整机的越障性能及通行效率奠定基础。

致 谢

在本论文的完成过程中,我得到了许多人的支持与帮助。首先,我要衷心感谢课题组的所有老师们,感谢他们在研究过程中的指导和鼓励,提供了宝贵的建议。

基金项目

国网上海市电力公司科技项目(520935230007)。

参考文献

- [1] 宋献章, 邵千钧, 梁冬泰, 等. 八足机器人行走机构设计及其运动学分析[J]. 机电工程, 2019, 36(10): 1069-1074.
- [2] 孙志远, 杨思源. 四足机器人步态规划[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2017, 34(6): 737-741.
- [3] 张世俊, 邢琰, 胡勇. 基于能耗最优的多足机器人综合步态优化方法[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(2): 32-39.
- [4] Zheng, K., Wu, F. and Chen, X. (2021) Laser-Based People Detection and Obstacle Avoidance for a Hospital Transport Robot. *Sensors*, **21**, Article No. 961. <https://doi.org/10.3390/s21030961>
- [5] 秦鹏举, 蒋周翔, 苏瑞, 等. 基于机器学习与视觉的四足机器人步态精确监测方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 5037-5043.
- [6] 尚哲, 王挺, 徐瑶, 等. 六轮摇臂移动机器人结构与越障动力学研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(11): 3478-3488.
- [7] Bai, L., Guan, J., Chen, X., Hou, J. and Duan, W. (2018) An Optional Passive/Active Transformable Wheel-Legged Mobility Concept for Search and Rescue Robots. *Robotics and Autonomous Systems*, **107**, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.06.005>
- [8] Eich, M., Grimminger, F. and Kirchner, F. (2009) Adaptive Compliance Control of a Multi-Legged Stair-Climbing Robot Based on Proprioceptive Data. *Industrial Robot: An International Journal*, **36**, 331-339. <https://doi.org/10.1108/01439910910957084>
- [9] 陈程, 冷洁, 李清都, 等. 一种多模式全向移动机器人攀爬楼梯的步态[J]. 机器人, 2022, 44(4): 453-462.
- [10] 鄧耀威, 赵书尚, 李东林, 雷江涛. 四轮滑移转向移动机器人运动分析及轨迹跟踪控制[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(9): 277-282+306.
- [11] 张自强, 陈殿生, 陈科位. 新型缓冲腿结构设计及性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10): 2091-2098.
- [12] 金振林, 张金柱, 高峰. 一种消防六足机器人及其腿部机构运动学分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 865-871.
- [13] 王森, 姚燕安, 武建昫. 一种新型可调整闭链多足机器人的设计与分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 191-199.
- [14] 秦建华, 孔佑鹏, 尹朝坤, 等. 仿平衡囊的四足机器人机体结构设计及分析[J]. 制造业自动化, 2024, 46(3): 151-155+185.
- [15] Faigl, J. and Čížek, P. (2019) Adaptive Locomotion Control of Hexapod Walking Robot for Traversing Rough Terrains with Position Feedback Only. *Robotics and Autonomous Systems*, **116**, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.008>
- [16] 何悦, 周鹏, 杨晓帅, 等. 一种仿生八足机器人的设计与越障仿真[J]. 制造业自动化, 2018, 40(9): 150-153.