

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.05.038

四足步行机器人的结构及运动仿真分析*

龚金锭,王 远,蔡心远,楼航飞,马鲁洁,陈紫月

(西南林业大学 机械与交通学院,云南 昆明 650024)

摘要:随着科技的不断进步,机器人的设计和应用逐渐成为当今科技领域研究的热点,机器人产业得到了快速发展。为了增强四足步行机器人的环境适应性和灵活性,发挥其在众多领域的关键作用,该文在分析当前研究现状及传统步行机构局限性的基础上,参考契贝谢夫四足步行机构,采用平面六杆机构,对四足步行机器人的结构进行分析和优化,利用 AutoCAD 2023 和 SolidWorks 软件进行三维建模和运动仿真分析,验证了所设计结构的合理性和可行性。

关键词:四足步行机器人;六杆机构;结构分析;运动仿真

中图分类号:TG156.1

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)05-0148-03

Kinematic and Dynamic Analysis of the Quadruped Walking Robot's Structure and Movement Simulation

GONG Jin-ding, WANG Yuan, CAI Xin-yuan, LOU Hang-fei, MA Lu-jie, CHEN Zi-yue

(School of Mechanical and Traffic Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650024, Yunnan, China)

Abstract: With the continuous advancement of technology, the design and application of robots have gradually become a hot topic in the field of technology research, and the robotics industry has developed rapidly. In order to enhance the environmental adaptability and flexibility of quadruped walking robots so as to play a crucial role in various fields, this article analyzes the current research status and limitations of traditional walking mechanisms; on this basis, referring to the combination of Chebyshev's quadruped walking mechanism, the structure of the quadruped walking robot is analyzed and optimized with a planar six-bar mechanism. The 3D modeling and motion simulation analysis are conducted by using AutoCAD 2023 and SolidWorks software to verify its rationality and feasibility.

Key words: quadruped walking robot; six-bar mechanism; structural analysis; motion simulation

0 引言

在科技进步和现代社会发展的推动下,高新技术产业迎来了繁荣发展的新时代。其中,人工智能和机器人技术也在工业生产以及社会生活中的各个领域得到了广泛的应用,彰显出非凡的影响力^[1]。足式步行机器人,尤其是四足步行机器人作为机器人研究领域的关键分支,已在全球范围内引起了众多学者的广泛关注^[2]。作为新型步行机器人形态的代表,四足步行机器人凭借其出色的环境适应性和运动灵活性等特点^[3],在复杂环境中展现出广泛的应用优势。此类步行机器人能够执行抢险救灾、探险、娱乐、军事等多样任务,同时其跋涉沼泽、跳跃障碍、攀登阶梯、反恐防爆等动作均游刃有余^[4]。然而,当前步行机器人研究尚处于起步阶段且存在一定局限性。

为充分挖掘四足步行机器人的发展潜力,笔者在梳理现有结构设计的基础上,对机器人结构及运动仿真展开深入探讨。重点对传统四足步行机器人的常用结构进行分析,在此基础上参考契贝谢夫四足机构,采用六杆机构和曲柄滑块机构,进行了四足步行

机器人的结构优化,并对其运动轨迹进行了仿真分析,实现了较为稳定和理想的输出轨迹,验证了采用六杆机构和曲柄滑块机构进行结构优化的合理性,期望所研究内容能为步行机器人领域的相关研究提供有益借鉴。

1 四足步行机器人研究现状

在人类漫长的历史长河中,古三国时期的“木牛流马”以及由 Rygg 在 19 世纪 60 年代所设计的“机械马”,均属于早期的足式步行机器人探索。跨入 20 世纪,美国 Mosher 于 1968 年设计的四足步行机器人 Walking Truck,如图 1 所示,成为当时该领域的一个典型代表^[5]。该机器人模拟了四足生物的行走,但因其仿生程度较低且形体笨重,环境适应性和运动效率均不高;日本 Shigeo Hirose 教授于 1976 年成功制造出 KUMO-I,成为世界上首例能够实现自主行走的现代足式机器人,其结构如图 2 所示。它能够稳定地行走在凹凸不平的地面上,并有足够的能力跨越较小的障碍物^[6]。紧随其后,我国清华大学于 1998 年研制出了采用平面四杆缩放机构、能应对复杂地形条件

* 收稿日期:2024-01-22

作者简介:龚金锭(2003-),男,福建泉州人,研究方向:智能机器人及机械设计。

的“QW-1”型四足全方位步行机器人^[5],实现了稳定的节律运动。其具体结构如图3所示。此外,众多发达及发展中国家(如德国、新加坡、韩国等)也在该高新技术领域展开部分研究,并取得了一定的研究成果。尽管这些步行机器人都具有一定的应用优势和价值,且具备其他机器人所未有的特点。然而,受限于控制策略与步行结构设计的独特性和局限性,此类机器人尚未在工程实践中得到广泛应用。



图1 Walking Truck 模型 图2 KUMO-1 模型 图3 QW-1 模型

2 四足步行机器人结构分析

2.1 机器人结构对步行轨迹的影响

四足步行机器人在实现人们期待的目标方面受到结构和控制方式的制约,只能在特定场景下表现良好。一方面,步行机构对其轨迹产生了制约。由于输出轨迹固定,且传统的平面四杆机构存在运动死点,因此导致机器人只能采用固定的跨步轨迹来通过特定的障碍。而开环关节步行机构则拥有更灵活的输出轨迹,但却未能拥有更高的负载能力,同时此机构对控制系统的要求也逐步提高^[7]。另一方面,步行机器人的整体构造使其控制系统受到了一定的限制。传统步行机器人的驱动方式使其控制系统多暴露于工作环境中,在恶劣环境下,控制系统易受严重破坏,导致其无法正常工作^[7]。因此,如何在保证机器人稳定性和灵活性的同时克服这些限制,是当前研究的重要课题。

2.2 四足步行机器人结构设计优化

通过对传统四足步行机器人结构的分析,并结合设计的具体要求进行四足步行机器人的设计优化分析。首先结合人的步行步态运动图(见图4)以及相同类型机构、不同尺寸杆件产生的运动轨迹图^[8](见图5),模拟出四足机器人行走的腿部步态图,再采取平面曲柄摇杆和连杆机构来设计四足步行结构。虽然四杆机构结构的设计制造方便,但是由于传动角、极为夹角、形成速度变化系数等会使其性能有所缺陷,因此采取六杆结构及曲柄摇杆机构来设计此步行机构。此设计可以使机构运动占据的空间更小,并且可获得更大的传动角^[9];同时,还能大幅度提高跨步能力,使得机器人适应行走环境的能力提高,从而使输出轨迹变得可调,保证了步行机器人具有一定的灵

活性和良好的避障功能。结合契贝谢夫四足步行机构^[8],利用 AutoCAD 2023 软件画出结构简图,如图6所示。最后根据所画结构简图,利用 SolidWorks 软件进行三维建模,得出结构装配图如图7所示。

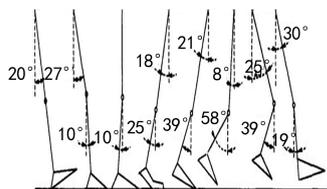


图4 人的步行步态运动图

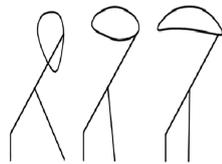


图5 运动轨迹图

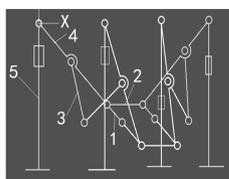


图6 运动结构简图

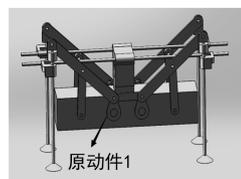


图7 结构装配图

以上机器人的结构设计优化主要基于传统四杆机构并参考契贝谢夫四足步行机构进行改进,引入更为稳定的六杆机构,并结合曲柄滑块机构进行整体优化。然而,与真实的人类行走相比,机器人存在许多不同之处,因此无法始终如一地保持身体平衡和运动稳定^[4]。在实际制作过程中,还需不断进行调试与优化,以确保机器人的稳定性能。

3 四足步行机器人运动仿真分析

借助 SolidWorks 软件对图7中的原动件1进行运动分析。在原动件1处添加马达,并设定为等速运动,速度为 10 r/min。运动仿真完成后,输出零件仿真结构,得到原动件1在 XYZ 方向上的线性位移、线性速度和线性加速度图像,如图8~10所示。

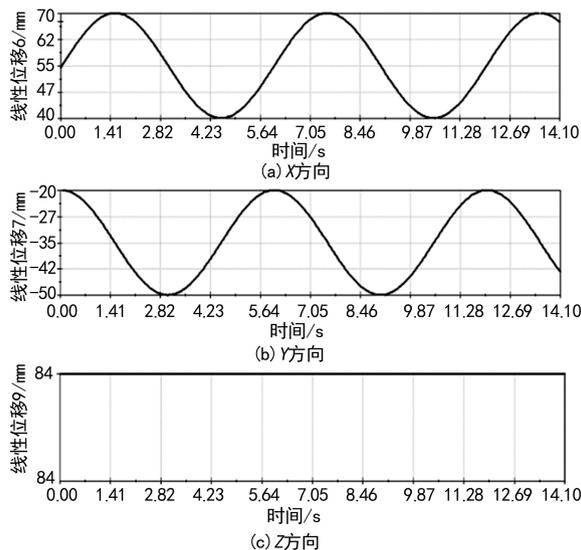


图8 沿 XYZ 分量的线性位移

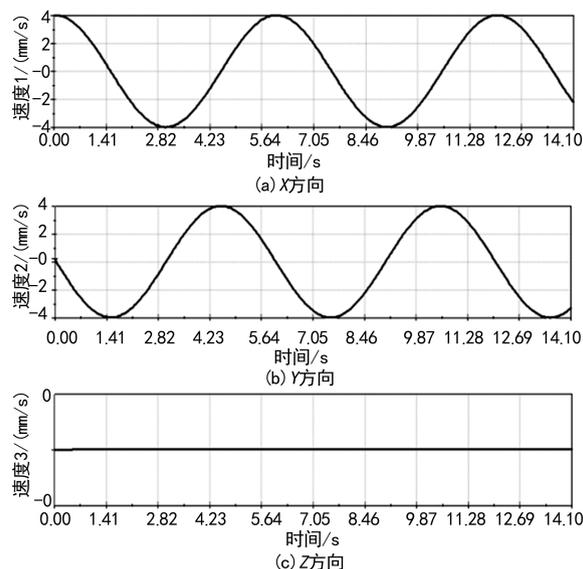


图9 沿XYZ分量的线性速度

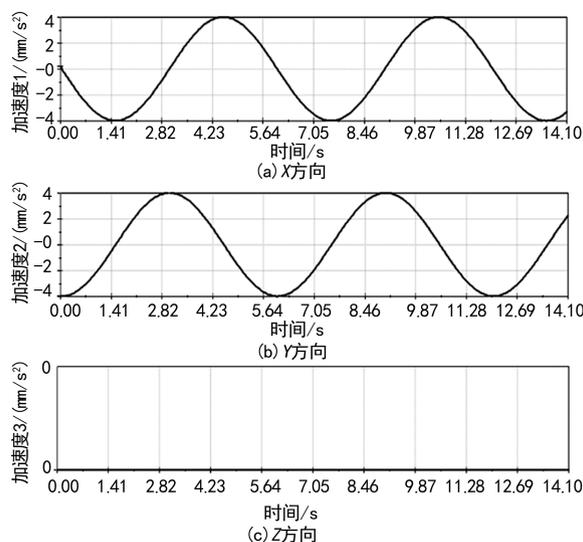


图10 沿XYZ分量的线性加速度

根据上述仿真结果,可以进一步分析原动件1在不同方向上的运动特性。在XYZ三个方向上,原动件1的线性位移、线性速度和线性加速度的变化规律如下。

(1) 在X方向上,原动件1的线性位移呈现出周期性波动,波动幅度较大。线性速度和线性加速度则呈现出与线性位移相似的波动特征,但波动幅度与其相比相对较小。这表明在X方向上,原动件1的运动较为剧烈。

(2) 在Y方向上,原动件1的线性位移、线性速度和线性加速度呈现出较大的波动,且波动周期与X方向相同。这表明在Y方向上,原动件1的运动特性与X方向相似,也具有一定的不稳定性。

(3) 在Z方向上,原动件1的线性位移、线性速度和线性加速度均保持直线运动,未呈现出较大幅值的波动特征。这说明在Z方向上,原动件1的运动

相对稳定。

综上所述,原动件1在X方向和Y方向上的运动较为剧烈,而在Z方向上的运动相对稳定。为了优化原动件1的运动性能,可以考虑对X方向以及Y方向的运动进行调整,降低其波动幅度。

然后,根据运动仿真输出部分零件的运动轨迹。选择结果中的跟踪路径,再选择合适的参考点和参考面,便可得出运动轨迹,如图11所示。由图11可知,采用六杆机构和曲柄摇杆机构所优化的四足机器人的腿部运动轨迹大概与相同类型机构、不同尺寸杆件产生的运动轨迹相似,符合设计要求。同时安装马达的原动件1输出轨迹为一个圆,根据分析,符合

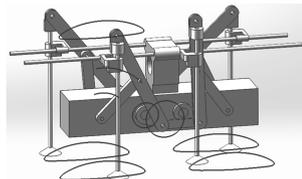


图11 运动轨迹图

原动件曲柄的整周输出轨迹。同时,结构中的各曲柄和摇杆部分输出轨迹均符合理想输出轨迹。由此可知,对初始结构进行的结构优化和运动分析合理。

4 结语

为了解决传统四足机器人结构存在的不足,文章对其部分结构进行了适当优化设计和深入分析。该设计巧妙地将平面六杆机构与曲柄滑块机构的应用原理相结合,为步行机器人的结构赋予了更高的灵活性。这种创新设计使得机器人更具柔韧性,使其步行灵活性和障碍跨越能力得到大幅度提升。所研究成果可为未来四足步行机器人研究的关键领域提供有益的参考和借鉴,也可从事相关技术研究的开发者提供相关参考资料。

参考文献:

- [1] 王丽君.四足机器人的结构设计[C].中国职协2017年度优秀科研成果获奖论文集(一二等奖).广东省机械高级技工学校,2018:7.
- [2] 孔祥瑞.四足机器人轨迹规划与运动学仿真分析[D].郑州:华北水利水电大学,2017.
- [3] 胡家信,秦海鹏,朱小明.四足机器人腿部结构设计与分析[J].大众科技,2022,24(11):1-5.
- [4] 沈为清.一种交叉足步行机器人的设计[J].机电工程技术,2020,49(12):95-96+154.
- [5] 孟健,刘进长,荣学文,等.四足机器人发展现状与展望[J].科技导报,2015,33(21):59-63.
- [6] 李岩.四足步行机器人结构设计分析[J].山东工业技术,2019(10):138.
- [7] 马彪.一种四足步行机器人结构设计与分析[D].北京:北京交通大学,2007.
- [8] 肖晓萍,李自胜.契贝谢夫四连杆机构的优化设计与应用[J].机械设计与制造,2011(9):63-65.
- [9] 李学刚,张丽娟,冯立艳,等.二自由度六杆机构轨迹综合的代数求解[J].机械设计与制造,2023(8):27-33.