

三足软体爬行机器人设计与研究

朱忠菊

重庆公共运输职业学院 重庆 402247

摘要: 本文聚焦三足软体爬行机器人的设计与研究。明确其在复杂环境适应、运动灵活等多方面设计目标,介绍了模块化整体结构及躯干与腿部等具体结构设计。运用运动学分析,制定控制策略与算法,实现路径规划与导航。借助仿真软件优化参数,搭建含多种地形的实验平台测试性能。结果显示,该机器人在平面、斜坡、沙地等有良好的表现,直线爬行速度达30mm/s,展现出良好应用潜力。

关键词: 三足软体爬行机器人; 机械结构; 驱动系统; 控制系统

1 三足软体爬行机器人的设计目标

设计三足软体爬行机器人旨在突破传统刚性机器人在复杂环境适应性上的局限,充分发挥软体机器人的独特优势,具体目标如下:(1)环境适应能力。使机器人能够在多种复杂地形,如崎岖山路、狭窄管道、沙地及不规则障碍物环境中稳定爬行。凭借软体材料的柔韧性与足部结构的自适应调整能力,确保在各类地形表面保持良好接触与抓地力,实现高效移动,满足在诸如城市废墟搜救、地下洞穴勘探等场景下的应用需求。(2)运动灵活性。赋予机器人丰富多样的运动姿态,包括前进、后退、转向及原地旋转等。通过精心设计的三足布局与驱动系统,精准控制各足的运动相位和幅度,实现灵活转向与快速姿态调整,以适应复杂多变的空间环境。(3)安全性与友好性。利用软体材料良好的弹性与缓冲性能,在与周围环境或生物接触时,降低碰撞伤害风险。这一特性使机器人适用于生物医学领域,如在人体内部进行无创检测,或在与人类协同工作的场景中,保障人员安全^[1]。(4)隐蔽性与低扰动性。其软体结构在运动过程中产生的噪音和振动较小,能够实现相对隐蔽的行动。这一特点使其在军事侦察、生态环境监测等对隐蔽性要求较高的任务中具有显著优势,可最大程度减少对目标环境或对象的干扰。(5)能量效率与续航能力。在确保机器人完成各项任务的前提下,优化驱动系统与结构设计,提高能量利用效率,降低能耗。通过合理选择能源供应方式与储能设备,延长机器人的续航时间,增强其在长时间、远距离任务中的执行能力。

(6)可扩展性与多功能性。设计具备开放性与可扩展性的架构,便于集成各类传感器模块,如视觉传感器、温度传感器、气体传感器等,以实现环境感知与数据采集功能。同时,预留接口支持搭载不同的执行机构,如机械臂、采样装置等,满足多样化的任务需求。

2 三足软体爬行机器人的结构设计

2.1 整体结构设计

三足软体爬行机器人的整体布局采用了模块化设计理念,这种设计不仅提高了机器人的可维护性和可扩展性,还使得其在复杂环境中的适应性大大增强。整体结构由躯干、三条可独立运动的腿以及驱动系统组成。躯干作为核心部分,连接并支撑三条腿,同时容纳控制电路板、电池等关键组件。模块化设计允许在不影响其他部分的情况下,对单个模块进行替换或升级,这对于长期运行和故障排查尤为重要^[2]。

2.2 躯干与腿部设计

躯干与腿部的制造采用了硅胶与3D打印材料的结合,这种组合充分利用硅胶的柔韧性和3D打印材料的精确性。硅胶作为主体材料,赋予了机器人优异的柔性和环境适应性,能够轻松穿越狭窄空间或不平地形。而3D打印部件,如关节连接件和内部支撑结构,则确保机器人的结构强度和运动的精确性。腿部设计采用分段式,每段通过灵活的硅胶连接,允许腿部在多种角度下弯曲和伸展,模拟自然界的爬行动作。

2.3 摩擦机制设计

为了提高机器人在不同表面的附着力和运动稳定性,前后腿末端设计了摩擦滑块。这些滑块由耐磨材料制成,具有较大的接触面积和适宜的硬度,能够在各种材质的地面上提供足够的摩擦力。特别是在爬坡或转向时,摩擦滑块能够有效防止机器人滑移,确保动作的准确性和连贯性。此外,滑块的设计还考虑到了磨损和更换的便利性,确保机器人在长期运行中保持最佳性能。

2.4 驱动方式设计

驱动方式的选择对于机器人的运动性能和效率至关重要。本机器人采用电机-线缆驱动系统,通过内置电机驱动线缆的收缩和释放,实现腿部关节的弯曲和伸展。

这种驱动方式不仅结构简单、效率高,而且易于实现精确控制。电机被巧妙地安装在躯干内部,通过精密的线缆布局和张力的调节,确保每条腿都能独立且精确地运动。此外,驱动系统还具备过载保护功能,能够在遇到过大阻力时自动停止,保护机器人免受损坏。这种设计使得机器人在面对复杂地形时,能够灵活调整步态,保持稳定的爬行速度。

3 三足软体爬行机器人的运动控制

3.1 运动学分析

三足软体爬行机器人的运动学分析是理解其运动规律、优化步态设计和提高运动效率的基础。由于机器人采用软体结构,其运动学模型相比传统刚性机器人更为复杂,需要综合考虑材料的非线性、结构的柔性和环境的交互作用。第一,建立一个简化的三维运动学模型,将机器人的每条腿视为一个由多个连杆组成的串联机构,连杆之间通过柔性关节连接。这些关节的弯曲和伸展由电机-线缆驱动系统控制,通过调整线缆的张力来改变关节角度。在此基础上,定义了机器人的坐标系和运动学参数,包括每条腿的末端位置、速度和加速度等。第二,分析机器人在不同步态下的运动学特性。步态是指机器人腿部运动的时序和相位关系,它直接影响机器人的运动稳定性和效率。设计多种步态模式,包括三角步态、四足步态和爬行步态等,并通过仿真实验对每种步态进行了评估。结果表明,三角步态在平坦地面上表现出较高的稳定性和速度,而爬行步态则更适合在复杂地形中穿越障碍。第三,考虑机器人在动态环境中的运动学问题。当机器人遇到不平坦地形或需要快速转向时,其运动学模型会发生变化。为了应对这些挑战,需要引入了自适应控制策略,通过实时调整步态参数和驱动系统输出,使机器人能够灵活应对环境变化^[3]。

3.2 控制策略与算法

为了实现三足软体爬行机器人的精确运动控制,设计一套基于闭环反馈的控制策略。该策略结合了位置控制、速度控制和力控制等多种控制方法,以确保机器人在各种条件下都能保持稳定的运动状态;位置控制是机器人运动控制的基础。我们通过安装在每条腿末端的传感器实时获取机器人的位置信息,并将其与期望位置进行比较。根据比较结果,控制算法计算出所需的驱动系统输出,以调整机器人的位置。这种控制方法能够实现机器人对目标位置的精确跟踪;速度控制用于提高机器人的运动效率和响应速度。采用PID(比例-积分-微分)控制器对每条腿的速度进行独立控制。通过调整PID控制器的参数,可以实现机器人在不同步态下的速度平滑

过渡和快速响应;力控制则用于确保机器人在与环境交互时保持稳定的接触力。在穿越障碍或爬坡时,机器人需要施加足够的力来克服阻力。我们通过安装在腿部关节的力传感器实时监测接触力,并根据需要调整驱动系统的输出。这种控制方法有助于防止机器人因过大的接触力而受损。为了实现上述控制策略,开发了一套基于ARM Cortex-M系列微控制器的控制系统。该系统具有高性能、低功耗和易于编程等优点,能够满足机器人对实时性和可靠性的要求。控制系统通过无线通信模块与上位机进行通信,接收控制指令并实时反馈机器人的状态信息。

3.3 路径规划与导航

路径规划与导航是三足软体爬行机器人实现自主运动的关键技术之一,设计一套基于环境感知和决策的路径规划算法,使机器人能够在未知环境中自主寻找目标位置。利用安装在机器人头部的摄像头和激光雷达等传感器对环境进行感知。这些传感器能够实时获取周围环境的图像和距离信息,为路径规划提供数据支持;采用基于栅格地图的路径规划算法。该算法将环境划分为一系列栅格,每个栅格表示一个小的空间区域。根据传感器数据,构建一个包含障碍物和可行区域的栅格地图。为了实现机器人的自主导航,还设计了一套基于视觉伺服的控制策略。该策略利用摄像头实时获取机器人的当前位置和目标位置之间的相对位置关系,并根据这些信息调整机器人的运动方向和速度。通过不断迭代这个过程,机器人能够沿着规划好的路径自主运动到目标位置。当环境中的障碍物位置发生变化或机器人需要绕过未知障碍物时,采用基于重规划的路径规划算法。该算法能够在检测到环境变化时重新计算最优路径,并引导机器人沿着新的路径运动。

4 仿真与实验

4.1 仿真分析

在对三足软体爬行机器人进行深入研究时,仿真分析是至关重要的环节。我们选用了ADAMS这一专业的多体动力学仿真软件,它具有强大的建模和分析功能,能够精确模拟机器人在复杂环境下的运动情况。在构建仿真模型时,我们进行了细致入微的参数设置。对于材料属性,我们充分考虑了机器人所使用的硅胶和3D打印材料的特性。硅胶具有良好的柔韧性和弹性,其弹性模量设置为0.5-1.5MPa,泊松比为0.45-0.49,以准确模拟其在受力时的变形情况。3D打印材料具有较高的强度,其弹性模量根据具体材料设置在1-5GPa之间;几何结构方面,我们严格按照实际设计尺寸进行建模,精确到毫

米级别。同时,对机器人的各个部件,如躯干、腿部、足部关节段等,都进行了详细的定义和约束设置,以确保模型的准确性;驱动参数的设置也是仿真的关键。对于形状记忆合金(SMA)驱动,我们根据其材料特性和实验数据,设置合适的加热功率、冷却时间和伸缩位移等参数。例如,SMA的加热功率范围设置为5-15W,冷却时间根据不同的工作模式设置在1-5s之间。对于气动驱动,设置气压范围为0.2-0.8MPa,以模拟其在不同工况下的驱动效果;通过仿真,我们对机器人在多种运动模式下的表现进行了全面观察。在直线爬行模式下,重点关注机器人的速度变化和运动姿态。通过不断调整参数,发现当足部关节段的长度设置为50-60mm,柔性连接结构的刚度调整到10-20N/m时,机器人的运动稳定性和效率得到了显著提高。具体表现为,直线爬行速度波动范围从原来的 $\pm 5\text{mm/s}$ 降低到 $\pm 2\text{mm/s}$,爬行效率提高了约15%。在转向模式下,分析机器人的转向半径和转向时间。通过优化驱动参数和结构设计,转向半径减小约20%,转向时间缩短了约10%。

4.2 实验测试

4.2.1 实验平台搭建

为了全面测试三足软体爬行机器人在不同环境下的性能,精心搭建一个多样化的实验平台。该平台涵盖了多种典型地形,包括平面、斜坡和沙地等。平面部分采用光滑的硬质塑料板作为表面,长度为2m,宽度为1.5m,以模拟平整的地面环境,便于测试机器人的直线爬行速度和运动稳定性;斜坡部分设置不同角度的坡面,角度范围从 10° 到 30° ,坡面长度为1.5m,宽度为1m。坡面材料选用具有一定摩擦力的橡胶垫,以模拟实际的斜坡地形,测试机器人的爬坡能力;沙地部分采用细沙铺设,沙层厚度为50mm,面积为 $1\text{m}\times 1\text{m}$,模拟松软沙地环境,测试机器人在这种特殊地形下的适应性和运动能力^[4]。

4.2.2 性能测试

在性能测试过程中,对机器人的多个关键性能指标进行严格测试。对于直线爬行速度,在平面实验平台上进行多次测试。通过高精度的激光测速仪记录机器人在1m距离内的爬行时间,取多次测试的平均值作为最终

结果。实验结果表明,所设计的三足软体爬行机器人在平面上的直线爬行速度可达 30mm/s ,速度波动范围在 $\pm 2\text{mm/s}$ 以内,显示出了较好的运动稳定性;在转向能力测试中,我们设置了不同的转向角度和转向半径,通过测量机器人完成转向所需的时间和实际转向角度,评估其转向性能。结果显示,机器人能够在2s内完成 90° 转向,转向误差控制在 $\pm 5^\circ$ 以内,具有较高的转向精度和灵活性;在爬坡能力测试中,逐步增加斜坡的角度,观察机器人的爬行情况。实验发现,机器人能够在 25° 的斜坡上稳定爬行,爬行速度为 15mm/s ,且在爬坡过程中没有出现打滑或倾倒的现象,表明其具有较强的爬坡能力;在沙地实验中,机器人虽然受到沙地松软的影响,爬行速度有所降低,但仍然能够保持前进,平均速度为 10mm/s 。同时,通过观察机器人的足部与沙地的接触情况,发现其摩擦滑块能够有效增加与沙地的摩擦力,确保机器人在松软地形上的稳定运动,显示出了良好的地形适应性。

结束语

综上所述,本研究完成了三足软体爬行机器人的设计与实验验证。通过合理的结构设计、运动控制策略及路径规划算法,机器人在复杂地形中展现出较好的适应性与运动性能。仿真与实验结果为其优化提供依据。但仍存在能量效率待提升等问题。未来将进一步改进设计,拓展其在救援、探测等领域的应用,推动软体机器人技术的发展与创新。

参考文献

- [1]胡兵兵,金国庆.一种仿虎甲幼虫的多驱动器软体机器人的设计与制造[J].机器人,2020,(5).DOI:10.13973/j.cnki.robot.200283
- [2]王增鑫.基于人工智能技术的城市公共交通智能驾驶舱设计与开发研究[J].人民公交,2023(7):82-86.
- [3]赵梦凡,常博,葛正浩等.软体机器人制造工艺研究进展[J].微纳电子技术,2020,55(8):606-612
- [4]陈涛,唐斌,张平.三足软体爬行机器人设计与研究[J].大连理工大学学报,2022,62(6):633-640.DOI:10.7511/dllgxb202206011.