

向复杂环境适应的仿生结构软体机器人设计研究

陈予坤 胡文强 刁洋

成都工业学院宜宾校区 四川 宜宾 644000

【摘要】：伴随机器人技术持续进步，传统刚性机器人于复杂环境里的适应能力渐渐受到约束。软体机器人依靠其柔性结构、连续变形特性，在狭窄空间、不规则地形这类复杂环境中呈现出优势。本文针对面向复杂环境适应的仿生结构软体机器人设计予以研究，就仿生设计原理、结建立模方法、驱动系统设计、控制策略优化等方面展开系统剖析，进而建立软体机器人整体设计框架。研究显示，借助多模态驱动机制与智能控制方法的融合，能够提高软体机器人的环境适应能力和运行稳定性。本文研究成果对推进软体机器人在复杂环境中的应用有着重要参考价值。

【关键词】：软体机器人；仿生结构；复杂环境；柔性驱动；智能控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.001

引言

随着复杂环境任务需求日益增多，机器人技术朝着高适应性、高灵活性的方向不断发展。传统刚性机器人鉴于结构方面存在限制，于非结构化环境里展现出明显的局限性。与之形成对比的是，软体机器人借助柔性材料搭建而成，能够达成连续形变，进而更加良好地适应复杂环境。仿生学为软体机器人的设计给予了关键思路，借助对自然界生物结构、运动方式加以模拟，能够有效提高机器人性能。所以，对仿生结构软体机器人设计展开研究，对于拓宽机器人应用领域有着重要价值。

1 仿生结构软体机器人的理论基础

1.1 仿生设计原理

仿生设计乃是借助对自然界生物结构、功能予以模仿，进而把它们转化为工程应用的一种途径。比如说，章鱼触手所具备的柔性结构、蛇类的爬行方式、蚯蚓的蠕动机制，都为软体机器人的设计给予了关键的参考依据。对这些生物结构展开分析以后，能够从中提取出它们的运动规律、力学特性，并且应用到机器人设计里，以此达成高效运动。

1.2 软体机器人结构特征

软体机器人主要是由弹性材料所构成的，这种结构在连续性、柔性这两个方面具备一定优势，进而在运动方式、环境适应能力方面展现出独特特点。连续结构能够减少传统关节连接造成的限制，让机器人在受力的时候产生平滑形变，在复杂环境里实现更为灵活的运动。高自由度特性使其能够于多个方向上进行动作调整，弯曲、伸缩、扭转等多种运动形式能够在同一结构中达成。形变能力的增强让机器人在接触外界物体的时候具备较好的适应性，能够依据受力情况自动调整姿态，降低损伤风险。材料性能在这一过程当中发挥着关键作用，弹性与强度的合理匹配能够确保结构在多次变形之后依旧维持稳定。

1.3 复杂环境适应需求分析

在复杂环境当中运行的机器人需同时拥有灵活的运动能力、良好的稳定性，以此来适应多变的作业条件。狭窄空间里

的操作要求机器人拥有较高的柔性，能够借助连续形变达成空间穿越，进而完成传统刚性结构难以做到的任务。不规则地形给机器人提出了更高的适应性要求，在运动过程里要依据环境变化做出姿态调整，从而保持稳定的运行状态。不同环境对于性能的侧重点有所不同，这致使设计过程要进行综合权衡。

2 仿生结构软体机器人设计的关键问题

2.1 结构设计复杂性

在软体机器人的结构设计进程里，要全面考量材料特性、形变机制、力学性能等诸多方面的因素，这些因素彼此相互作用，致使设计过程展现出颇高的复杂性。材料的挑选对机器人的柔性表现、承载能力有着直接的影响，不同的材料在弹性、强度、耐久性方面存在着差异，必须依据具体的应用来进行合理的匹配。形变机制的设计与机器人的运动方式相关，其结构在变形过程中要维持稳定，以此来防止出现失控或者损伤的状况。力学性能分析能够为结构设计给予理论依据，让机器人在承受外部作用时保持可靠的状态。柔性 with 稳定性之间存在着一定的矛盾，过高的柔性有可能削弱结构的支撑能力，而稳定性的增强又可能会限制形变幅度。怎样在两者之间达成平衡，是设计过程中的关键问题。借助优化结构布局、材料组合，能够在确保基本强度的基础上提高柔性表现，使机器人在复杂环境中达成高效运行。

2.2 驱动方式选择问题

不同驱动方式于软体机器人系统里存在着差异，会对其运动特性、应用效果产生影响。气动驱动依靠压缩气体达成形变，有着响应速度较快且柔性不错的特性，能让机器人在复杂环境中完成大幅度动作，适用于需要高灵活性的场景。电驱动是以电机或电致动材料作为基础，在控制精度方面比较突出，可以实现比较精细的运动控制，适用于对动作稳定性要求较高的任务。驱动方式在能量转换效率、结构复杂程度、控制难度等方面同样存在差异，这些因素在实际应用里要综合考量。任务需求对驱动方式的选择起着决定作用，不同工作环境与功能要求

对应不同技术方案。合理选择驱动形式，有利于发挥机器人性能优势，使系统在运行期间保持较高效率与稳定性。通过对驱动技术予以优化，能够进一步提高软体机器人的应用能力，进而拓展其在多领域的使用范围。

2.3 控制策略实现难度

软体机器人在结构方面具有能够连续形变的特性。其运动过程与刚性关节的离散变化不同，不存在限制，呈现出多自由度、高度非线性的动态行为。该特性给控制模型的建立带来了极大困扰，传统基于刚体假设的控制方法无法精确描述其形变过程、受力状态。模型在表达实际运动规律时容易出现偏差，进而影响控制精度及稳定性。复杂形变产生的耦合效应，使系统运行时对外界环境变化比较敏感，控制策略需具备较强适应能力。面对此种情形，引入先进算法成为重要的发展方向，借助数据驱动方法与智能优化技术，能够对系统状态进行更为精细的建模与预测。算法在持续学习和调整的过程中，有利于提高控制效果，使机器人在复杂环境中稳定运行。优化控制方法不但能提高运动精度，还可拓展软体机器人的应用范围，推动相关技术持续发展。

3 仿生结构软体机器人设计方法

3.1 基于生物运动机制的结构建模方法

在仿生结构设计进程里，对生物体运动规律展开系统解析乃是达成高性能软体机器人的关键根基。自然界中的柔性生物体一般借助分段驱动、连续变形、局部刚度调节来达成高效运动。所以在建立结构模型时，需运用运动分解方式，把生物的复杂运动划分成若干基本运动单元，再借助数学建模予以抽象表达。在实际操作中，能够运用连续体力学模型来描绘软体结构的弯曲、伸长、扭转行为，同时结合有限元仿真来剖析其受力状况，进而优化结构参数配置。而且为了提高模型适应性，要引入参数化设计方法，让结构能够依据不同环境需求实施动态调整，比如通过调节曲率分布或者刚度梯度，来实现对复杂地形的适应。这种方法不但提高结构设计的科学性，还为后续控制系统设计奠定了基础。

3.2 多模态驱动系统设计方法

处于复杂环境里，单一的驱动方式常常没办法满足多样化的运动需求，所以多模态驱动系统成了软体机器人设计当中的重要方向。多模态驱动主要是借助整合气动、液压、电驱动、形状记忆材料驱动等方法，来达成多种运动模式的协同控制。在具体的设计进程中，得先剖析不同驱动方式的响应速度、输出力、能耗特性，依据应用需求展开组合配置。比如，要是需要大变形运动，那就优先选用气动驱动，而要是需要精细控制，那就结合电驱动做补偿。同时，要通过驱动模块化设计，让各驱动单元可以独立控制还能协同工作，进而提高系统灵活性。另外，要借助能量优化算法降低系统能耗，提高整体效率，使

得机器人在复杂环境中拥有更长时间的持续运行能力。

3.3 柔性结构与智能控制系统协同设计方法

软体机器人因其结构具备高度非线性的特性，致使传统刚性机器人的控制方法无法直接拿来应用。所以在进行设计工作时，要达成结构与控制系统的协同优化。第一步要建立依据非线性动力学的控制模型，用以描述机器人的形变过程，借助模型预测控制方法达成精确调节。第二步需引入多传感器融合技术，借助实时采集形变、压力、环境信息，对机器人的状态实施动态监测。基于此，能够采用自适应控制算法，促使系统可以依照环境变化自行调整控制参数。另外，通过引入机器学习方法，能让机器人在反复运动过程里调整控制策略，进而提高运动精度和稳定性。这种协同设计方法能够有效处理柔性结构控制方面的难题，为复杂环境应用给予技术支持。

4 复杂环境适应能力提升策略

4.1 优化材料性能与结构稳定性设计

在复杂环境当中，材料性能对于软体机器人的耐久性、可靠性起着直接的决定作用。所以在材料选择这一方面，需要优先去考虑那些具备高弹性、高耐疲劳性、良好抗环境干扰能力的材料。比如说采用复合材料结构，能够在确保柔性的情况下提高强度。而且还应当借助结构优化设计来提高整体的稳定性，像采用多腔体结构或者分层结构，这样能让机器人在局部出现受损状况时依旧可以保持功能的完整。要结合实际环境的特征，对结构展开针对性的优化，比如在高摩擦环境里增强表面附着能力，在高湿环境中提高防水性能，以此来提高适应能力。

4.2 构建智能感知与环境交互机制

要让软体机器人在复杂环境里达成自主运行，就得建立完备的感知系统。把多种传感器集成起来，像压力传感器、视觉传感器、温度传感器，就能实现对环境信息的全面获取。数据处理时，利用信息融合技术，把不同传感器的数据整合起来，提高环境识别精度。还要建立环境交互机制，让机器人依据感知到的信息动态调整运动策略。举例来说，检测到障碍物就自动改变路径，地形有变化就调整驱动模式。通过这种动态交互机制，能够有效提高机器人在复杂环境中的适应能力、运行效率。

4.3 提升系统鲁棒性与可靠性设计

在复杂环境里，系统稳定性、抗干扰能力是非常关键的。所以在设计流程中要着重提高系统鲁棒性。首先要借助引入鲁棒控制算法，让系统在参数不确定还有外界干扰状况下能维持稳定运行。其次要运用冗余设计方法，借助设置备用驱动单元或者传感器，提高系统容错能力。并且要借助实时监测机制，对系统运行状态展开持续评估，在出现异常的时候及时调整控制策略，以此降低故障风险。经过多层次优化，能够提高软体

机器人在复杂环境中的可靠性。

5 仿生结构软体机器人发展方向

5.1 提升系统智能化与自主决策能力

未来软体机器人会朝着智能化方向持续迈进。在此进程里，要借助引入人工智能技术，让机器人拥有自主决策的能力。比如采用强化学习方法，能让机器人在复杂环境中经过试错学习来优化运动策略。并且要增强系统对环境的理解能力，使其依据不同场景挑选最优行动方案。还要建立知识库，使机器人可借助历史经验进行决策，进而提高整体性能。

5.2 推动多学科融合与技术协同创新

软体机器人技术向前发展需要多学科融合给予支持。今后要强化材料科学、机械工程、控制理论、人工智能等领域的协同创新。好比运用新型智能材料，能提高机器人的柔性还有响应能力，引入先进控制算法，可优化运动控制性能。同时要加强实验研究跟理论分析的结合，借助多学科交叉推动技术取得突破，达成软体机器人性能的全面提高。

5.3 拓展应用场景与工程化发展路径

伴随技术逐渐成熟，仿生结构软体机器人会在更多的领域得以应用。比如说，在医疗领域当中，它能够用来辅助进行微

创手术，在救援领域里，它可以用于复杂环境的探测工作，在工业领域内，它能够承担精细操作任务。要达成工程化应用，需要强化系统集成、标准化设计，提高产品的可靠性与可维护性。要推进产业化发展，借助技术转化达成规模应用，进而推动软体机器人技术不断进步。

结论

仿生结构软体机器人在复杂环境当中具备不错的适应能力，其柔性结构能够让它在狭窄空间、不规则环境里完成各类任务。对理论基础、设计方法、实现路径展开系统分析，能够明确这类机器人在工程应用中的发展方向。仿生设计理念借鉴生物体的结构特征，让机器人在运动方式、环境交互方面更加灵活，提高整体性能。结构设计优化能够改善机器人受力与变形时的稳定性，使其运行保持较高效率。驱动系统在功能实现过程中有关键作用，不同驱动方式的选择会影响机器人的运动精度与响应速度。控制策略改进有助于提高系统协调性，让机器人在复杂环境中实现更精准的动作。多方面技术共同发展，促使软体机器人在应用领域不断拓展。持续推进技术创新、应用研究，能够进一步提高其性能表现，推动软体机器人在实际场景中广泛应用。

参考文献：

- [1] 王强. 软体机器人结构设计研究[J]. 机械工程学报,2021(05).
- [2] 李明. 仿生机器人技术发展综述[J]. 自动化学报,2020(08).
- [3] 张伟. 柔性驱动技术在机器人中的应用[J]. 机器人技术与应用,2022(03).
- [4] 陈华. 智能控制在软体机器人中的应用[J]. 控制工程,2021(06).
- [5] 刘洋. 仿生机器人设计方法研究[J]. 机械设计,2023(02).