

基于仿生蠕动的无痛肠检机器人的仿生运动算法设计

董宏宇 马巍 张韬 甄好 李玉顺

青海民族大学 青海西宁 810007

摘要: 无痛肠检对机器人推进方式提出低刺激与高顺应性的要求。为此构建一种基于仿生蠕动节律的运动算法, 以节律网络生成连续推进波形, 并利用压力反馈调节体节形变, 使其在不同摩擦与曲率条件下保持稳定前进。通过多场景仿真对波形稳定性、壁压变化与通过性进行验证, 并在离体肠管中完成真实环境测试。结果显示, 该算法能够在保证推进效率的同时有效控制壁压峰值, 具备较强的环境适应能力, 为柔性无痛肠检机器人提供了可行的运动控制方案。

关键词: 仿生蠕动; 柔性内镜机器人; 节律控制; 气动驱动; 壁压调节

肠道检查在常规诊断中应用广泛, 但传统依靠人工推送的方式容易引发牵拉痛感, 并在复杂弯曲部位出现停滞或反复调整的问题。随着柔性机器人技术的发展, 以蠕动为特征的生物运动方式逐渐成为提升肠腔适应性的重要方向。蠕动推进依托节律性收缩与形变传递, 可在狭窄且具弹性的腔道内实现连续、温和的前进模式, 适用于降低壁面压迫与摩擦波动。在气动柔性执行器不断成熟的背景下, 如何将这种生理节律转化为可控算法, 并保证在真实环境中具备稳定性和顺应性, 成为推进技术研究的关键议题。

1 肠道蠕动特征与柔性连续体启发的算法建模基础

1.1 肠道蠕动的生物运动模式分析

肠道在推进过程中依赖纵肌与环肌的节律性变化形成连续压力梯度, 使管腔内部保持稳定的推进方向。这一过程体现为相位差驱动下的形变传递, 波形沿腔道逐节扩散, 壁面压力在低幅度范围内周期性分布, 形成既温和又有效的推进方式。蠕动节律具有可预测的频率结构, 并在弯曲段中展现出较强的顺应性, 使波形在变形过程中能够自适应贴合壁面^[1]。将这种生理机制抽象为工程模型, 可得到一种基于相位耦合的序列推进规律, 使体节间关系以节律化方式构建, 为后续算法中的波形生成与推进方向控制提供动力学依据。

1.2 柔性机器人体节形变机理及仿生映射框架

气动波纹管体节在结构上具备可压缩、可伸展与可顺应接触的特性, 其形变行为由输入压力决定, 并在体节间呈现耦合关系。该特点与生理蠕动中的局部变形传递方式一致, 使得体节可以通过序列控制形成连续推进波。图1所示的柔性连续体结构展示了典型多节可控变形原理, 虽然驱动方式

不同, 但离散节段之间的受力传递方式与变形特征可为蠕动算法提供结构启发。以图1体现的分段式柔体结构为参考, 可以将气动体节抽象为可控节点, 通过压力—形变映射构建推进模型, 使体节在不同摩擦与曲率条件下保持稳定的波形输出。

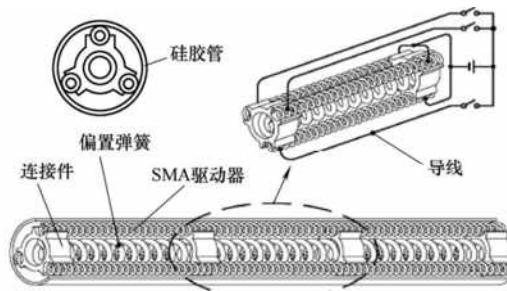


图1 多节联动式柔性连续体结构示意图

2 仿生蠕动运动算法体系构建

2.1 基于 CPG 的蠕动节律生成机制

蠕动节律的生成依托耦合振荡网络构建体节在时间轴上的相位序列, 使各体节按照固定顺序完成周期性形变。网络由若干振荡器组成, 频率参数控制蠕动节拍, 常设定在0.3~0.7 Hz区间, 使周期变化适配气动体节的响应速度与肠腔摩擦条件。振荡器之间以耦合项保持相位关系, 通过设定相位差 $\Delta\phi$ (一般为 20° ~ 40°)使蠕动波沿体节方向形成单向传播^[2]。

节律信号需映射为体节的压力指令 $P_i(t)$, 映射函数通常采用正弦或分段平滑函数, 以保证压力变化与体节形变呈线性或准线性对应。考虑气动执行器的滞后特性, 压力变化速率被限制在 $dP/dt \leq 5\text{kPa/s}$, 使体节在节律推进中保持同步。

在输出到阀控系统前，节律信号通过滤波模块进行平滑处理，以避免相位切换造成的瞬态突变。由此形成具备固定节拍、稳定相位关系的推进节律，为后续多节协调控制提供时间基础。

2.2 压力驱动下的多节协调控制方法

多节协调控制以体节间的压力分配为核心，通过对各节气腔输入进行时域与幅域双重约束，使序列变形保持连续推进关系。控制流程以 CPG 输出的相位序列为驱动主线，通过压力调制模块生成体节指令值。每个体节的压力输入被定义为：

$$P_i(t) = P_{base} + A \cdot f(\phi_i(t)) \dots (1)$$

其中 P_{base} 为维持体节基本支撑的基压， A 为幅值系数， $f(\phi_i(t))$ 为经软件整形后的相位函数，用于保证体节在序列中按既定相位完成形变。

协调控制的关键在于处理体节间的耦合关系。由于气动执行器具有可压缩性，各体节的压力变化会在管路中产生反馈，因此需要在控制环节对相邻体节建立局部补偿参数，使相位延迟保持稳定。控制器在生成最终压力指令时，对各体节的压力递增幅度进行限制，使其满足阀控响应速率与气腔容积的约束条件，通常对瞬时变化量设置固定上限，以确保波形在推进方向上保持一致。

2.3 基于环境变化的自适应蠕动调节算法

自适应调节算法以体节外壁压力、推进速度偏差与负载变化为输入，通过在线更新节律参数保持波形结构的连续性。环境判定由压力变化率、相邻体节速度差与气腔压力偏移量组成，控制器以这些量构建局部环境状态量 $E_i(t)$ 。自适应更新采用参数修正函数，使幅值、频率与相位差在控制周期内随环境变化实时调整。其核心关系可表示为：

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \alpha E_i(t) \dots (2)$$

其中 $\theta_i(t)$ 表示体节的可调参数集合（包含幅值、相位差或节律周期）， α 为调节系数，用于限制更新步长，避免破坏整体节律结构。

环境状态量由局部判断获得：当压力上升率超过设定阈值时，系统降低相应体节的幅值更新量；当推进速度偏差扩大时，通过缩短相位周期或增加幅值补偿驱动力。参数的最终分配由局部调节与全局节律共同决定，在控制周期中循环迭代，形成稳定的动态更新框架^[3]。

3 仿生蠕动算法的仿真验证与离体试验体系

3.1 多场耦合仿真平台构建

仿真平台围绕蠕动算法的节律输出、压力分布与体节变形响应展开，以气动体节的结构参数、腔体压缩特性及摩擦变化规律为建模基础。平台采用几何精简后的管腔模型，通过固气耦合方式描述体节在不同压力输入下的形变序列，并在接触层中引入摩擦系数随变形变化的动态更新规则。气腔内部采用等效容积模型表征压力传递延迟，体节与腔壁之间的接触力通过离散节点计算，使相位驱动的推进波在仿真环境中形成可追踪的时域映射。在此框架下，可对节律参数、压力输入和推进序列的对应关系进行系统验证。

3.2 蠕动算法的多场景仿真验证

多场景验证围绕节律输出、压力调制与体节顺应性展开，通过构建不同腔道条件，观察相位传播、压力分布与形变序列的对应关系。仿真中设置标准腔道、曲率突变段、摩擦波动区及局部狭窄结构，平台依据节律频率、相位差与压力变化速率对体节进行离散时序驱动，并按气腔容积与管路阻力计算压力响应延迟。

在标准场景中，利用 0.3 - 0.7 Hz 节律信号驱动体节，通过记录形变幅度、节点速度与相位序列，建立节律与实际变形之间的对应关系，用以判断相位传递的连续性。曲率突变场景基于资料中柔性体节的非线性压缩特性，以分段曲率模型描述壁面约束，通过捕捉体节在弯曲处的相位偏移量，分析耦合项在几何变化下的稳定性。摩擦波动场景依据体节压缩率影响接触摩擦的规律，动态更新摩擦系数，平台通过对比速度偏差与压力增量追踪自适应参数调整的触发条件^[4]。

局部狭窄场景设置体节最大允许直径和接触力上限，使推进序列在受到限制时出现节律传播迟滞。仿真过程中对比压力指令、形变幅度与相位序列的差异，从时域角度确认算法在受限区域中的节律重分配方式。多场景对比形成完整的参数—响应链路，为蠕动算法在后续离体试验中的测试设计提供边界条件依据。

3.3 离体肠管试验平台与测试方法

离体肠管试验平台围绕体节驱动、壁压测量与摩擦变化构建多源数据的同步采集体系，使蠕动算法在真实环境下的压力—形变—接触力关系能够形成可融合的数据流。平台由柔性气动体节、可调曲率夹具、壁压阵列、位移传感器、

摩擦调节组件以及数据采集系统构成。肠管通过低张力固定保持自然顺应性，驱动端以 0.3 – 0.7 Hz 的节律输入控制阀组，并根据腔体容积与管路阻力设置延迟补偿，使体节变形响应具备稳定的时间基准。

测试内容覆盖推进速度、壁压分布、体节同步性与弯曲通过行为。位移传感器记录体节质点的时序位置，壁压阵列以多点形式采集接触压力，摩擦调节组件通过调节腔壁湿度制造摩擦波动，并记录由此产生的速度偏差与压力补偿量。此外，肠管外壁的局部形变通过光学标记点进行捕捉，用于构建腔壁顺应性的实时估计。

数据融合采用基于时间戳对齐的方式，将三类数据（压力序列、位移序列、摩擦扰动序列）整合为统一格式的多模态时域数据集。融合过程以节律周期为窗口，将压力变化率、节点速度和摩擦状态编码为同一帧数据，用于在后续分析中追踪相位传播、局部延迟、参数修正触发条件等关键变量。该数据结构为后续实验数据分析提供必要基础^[5]。

3.4 实验数据分析与性能评价

实验数据分析以“仿真—离体”双来源序列的时间同步为基础，将压力、位移与摩擦扰动三类数据按节律周期窗口进行统一格式的融合处理。仿真阶段基于五节点节律网络生成压力指令、相位结构与体节质点运动轨迹；离体阶段由壁压阵列、位移传感器和摩擦调节模块获得对应信号。两类数据的采样频率不同，通过插值方式对齐至仿真的固定步长，使周期内的各事件点具备可比性。

压力指标通过周期极值点对齐得到峰值位置与压力变化率；位移指标通过构建质点的速度曲线与相邻体节的相位差，形成推进速度与节律传播的时域序列；摩擦扰动则以事件触发点作为锚点，将摩擦上升或下降时出现的速度偏移与压力补偿量映射入同一时间窗口。融合后的结构包含压力、速度与摩擦三组关键指标，并按周期统计量形成分析结果表，用于描述算法在真实腔道条件下的节律、压力和接触变化的基本特征。

表 1 蠕动算法实验数据分析结果

指标类别	分析内容	仿真数据（分析值）	离体数据（分析值）
压力特征	压力峰值位置（周期内）	相位 0.42 – 0.47	相位 0.40 – 0.48
压力特征	压力变化率	0.8 – 1.1 kPa/s	0.7 – 1.0 kPa/s
运动特征	推进速度	1.5 cm/s	1.5 – 1.6 cm/s
运动特征	体节相位差	110° – 130°	105° – 128°
摩擦特征	扰动响应延迟	40 – 60 ms	45 – 70 ms
摩擦特征	压力补偿量	0.2 – 0.4 kPa	0.2 – 0.5 kPa

4 结语

本研究围绕无痛肠检机器人的蠕动推进需求，构建了以节律生成、压力调制和体节协调为核心的仿生运动算法，并在多场耦合仿真与离体肠管条件下完成了结构化验证。算法在真实摩擦、顺应性与几何变化环境中形成了稳定的数据链路，使压力、位移与摩擦扰动可在统一周期窗口内进行分析，进一步明确了推进节律、体节同步与局部补偿机制的参数边界。研究所得的节律结构与参数框架可为后续软体内窥机器人在复杂腔道中的动作规划、节律调节和环境适应策略提供重要的技术基础。

参考文献：

- [1] 刘文博, 王韫, 朵有宁, 等. 基于柔性传感的软体机器人交互研究进展 [J]. 机器人, 2024, 46(02): 195–218.
 - [2] 王林杰. 仿生软体机器人设计的应用与发展研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (12): 26–28.
 - [3] 张亮, 李攀, 李博, 等. 机器人辅助冠脉介入治疗的动物实验研究 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2022, 17(12): 1557–1559.
 - [4] 周可, 陈梦梦, 付静, 等. 仿生无约束微纳米机器人在生物医学上的应用 [J]. 生物医学工程学杂志, 2021, 38(05): 1003–1009.
 - [5] 严鲁涛, 王琦, 李海源, 等. 基于 SMA 驱动的连续体手术机器人研究综述 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 138–152.
- 第一作者: 董宏宇(2006.06—), 男, 汉族, 辽宁大连, 学生, 研究方向: 人工智能。
- 第一作者: 马巍(1993.09—), 男, 汉族, 青海西宁人, 硕士, 实验师, 研究方向: 机械工程。
- 项目: 青海民族大学大学生创新创业训练计划项目资助成果。