

一种多运动模式的仿生软体爬行机器人设计与性能研究

刘晓华^{1,2} 王耀南^{1,2} 冯运^{1,2}

摘要 仿生关节结构和多模式爬行机器人对复杂环境下的柔顺运动具有重要意义。针对现有爬行机器人运动模式单一的问题,首先设计一种受章鱼触腕肌肉结构启发的三腔气动关节。该关节实现模块化设计和三维空间的差异化轨迹运动。基于该关节提出并研制一种兼具多种运动模式的仿生爬行机器人。通过选择不同的气压激励方式,机器人在同一平台上实现类似蜥蜴的纵向爬行和类似螃蟹的横向爬行,分别实现 142.54 mm/min 和 90.02 mm/min 的移动速度。本文围绕关节设计原理、结构实现、制造工艺及机器人集成与运动验证进行系统研究,为气动关节设计和多模式仿生爬行机器人的开发提供新的技术途径。

关键词 软体机器人; 仿生设计; 爬行机器人; 气动关节

引用格式 刘晓华, 王耀南, 冯运. 一种多运动模式的仿生软体爬行机器人设计与性能研究. 自动化学报, 2026, 52(5): 1046-1057

DOI 10.16383/j.aas.c250680 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250680

Design and Performance Study of a Biomimetic Soft Crawling Robot With Multiple Motion Modes

LIU Xiao-Hua^{1,2} WANG Yao-Nan^{1,2} FENG Yun^{1,2}

Abstract Biomimetic joint structures and crawling robots with multiple motion modes play an important role in achieving compliant locomotion in complex environments. To address the limitation of single-mode locomotion in existing crawling robots, this study first designs a three-chamber pneumatic joint inspired by the muscular structure of octopus arms. The joint features a modular design and enables differential trajectory motion in three-dimensional space. Based on this joint, a biomimetic crawling robot with multiple locomotion modes has been designed and developed. By selecting different pneumatic excitation patterns, the robot can perform lizard-like longitudinal crawling and crab-like lateral crawling on the same platform, achieving locomotion speeds of 142.54 mm/min and 90.02 mm/min, respectively. The study systematically investigates the joint design principles, structural implementation, fabrication process, robot integration, and motion validation, providing a new technical pathway for the design of pneumatic joints and the development of crawling robots with multiple motion modes.

Keywords soft robots; biomimetic design; crawling robots; pneumatic joints

Citation Liu Xiao-Hua, Wang Yao-Nan, Feng Yun. Design and performance study of a biomimetic soft crawling robot with multiple motion modes. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 1046-1057

收稿日期 2025-12-01 录用日期 2026-03-04

Manuscript received December 1, 2025; accepted March 4, 2026

国家重点研发计划 (2023YFB4706400), 国家自然科学基金 (62522311, 62473143), 湖南省自然科学基金 (2024JJ5087), 广东省自然科学基金 (2025A1515011482), 工业控制技术全国重点实验室开放基金 (ICT2025B03), 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室开放基金 (2024FF01), 自主智能无人系统全国重点实验室开放基金 (ZZKF2025-3-3), 广东省家用电器基础技术重点实验室开放基金 (GJJZ20250103), 江西省自然科学基金 (20232BAB212024), 湖南省研究生科研创新项目 (CX20240414) 资助

Supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFB4706400), National Natural Science Foundation of China (62522311, 62473143), Natural Science Foundation of Hunan Province (2024JJ5087), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2025A1515011482), Open Fund of the State Key Laboratory of Industrial Control Technology (ICT2025B03), Open Fund of the Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education (2024FF01), Open Fund of State Key Laboratory of Autonomous Intelligent Unmanned Systems (ZZKF2025-3-3), Open Fund of Guangdong Provincial Key Laboratory of Basic Technology for Household Appliances (GJJZ20250103), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20232BAB212024), and

软体机器人是一种由柔软材料制成的机器人, 其具有高安全性、高生物相容性和高柔顺性等特点^[1-2]。气动软体机器人是一种由受压气体驱动和控制的软体机器人, 其具有响应速度快、成本低和高环境兼容性, 在医疗康复、可穿戴设备和减震降噪领域展现了巨大的应用潜力^[3-6]。气动软体关节是一种气压驱动的软体机器人, 可以在气压激励下产生期望的变形和运动。相比传统机械关节, 软体关节由柔性

Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX20240414)

本文责任编辑 贺威

Recommended by Associate Editor HE Wei

1. 湖南大学人工智能与机器人学院 长沙 410082 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心 长沙 410082

1. School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University, Changsha 410082 2. National Engineering Research Center of Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082

材料构成,能够在无刚性铰链的情况下实现连续、大范围的空间运动.因此,柔性关节成为实现软体机器人高柔顺性、多自由度与形变能力的关键执行单元.近年来,研究者普遍关注如何通过新型结构设计和驱动策略提升软体关节的运动能力、可控性及结构可靠性.经典的网格型气动软体执行器可以看成一种软体关节,通过对气室结构的精心设计, Mosadegh 等^[1]实现对执行器运动性能的优化. Connolly 等^[7]研究外部约束纤维分布角度对执行器变形性能的影响,并提出一种设计策略,实现对人类食指和拇指运动的模仿.通过周向布置多个气室, Giannaccini 等^[8]设计一种气动机械臂,并实现末端执行器位置与刚度的解耦.

近年来,仿生学理念在机器人领域深入发展,成为机器人设计的重要思想之一^[9-10].与传统机械系统不同,仿生机器人强调从自然界的结构、材料与运动机理中获取灵感^[11-12].受章鱼触腕、象鼻、鱼鳍等生物启发,人们设计多种三腔气动关节. Xie 等^[13]设计一种多自由度软体执行器,其由三个对称分布的纤维增强执行器组成,但其需要较高的工作压力. Zhang 等^[14]设计多种多自由度气动关节,均为周向分布的多腔结构.基于纤维增强的执行器,他们设计一种蛇形机械臂并应用于内窥镜等场景. Kalisky 等^[15]设计和制备一种 3D 打印的多气室软气动关节,通过使用注射器控制执行器的正负压力,可以实现关节的伸长和弯曲.总体来说,三腔气动关节通过沿圆周方向布置三个独立气室,使其在差动充气模式下产生受控的弯曲运动.典型结构多采用硅胶、热塑性聚氨酯 (thermoplastic polyurethane, TPU) 或柔性橡胶作为主体材料,通过纤维绕制、层结构设计或局部加强实现变形受控性.尽管上述工作提出多种三腔气动关节,但由于外部约束结构的特质,存在着驱动气压高的问题,这将提高结构的应力水平,有可能对执行器的工作寿命造成潜在影响.基于负压驱动的气动关节还存在无法主动伸长的问題.此外,传统基于分体浇筑的制备弹性体的方法还会造成弹性体接缝处的潜在破裂隐患,影响气动关节的一致性和稳定性.

另一方面,受爬行生物启发,研究人员设计多种软体爬行机器人.爬行运动是自然界最为普遍且高效的生物运动方式之一,广泛存在于爬行动物、软体动物及节肢动物中.仿生爬行机器人无需复杂的铰链机构即可在狭窄空间、不规则基底及柔软地面上保持稳定运动,具有结构简洁、能耗低、稳定性高、易于微型化等显著优势^[16].近年来,气压驱动软体机器人因其结构柔顺性强、环境适应性好,在爬行式运动研究中受到广泛关注^[17]. Shepherd 等^[18]设计一种由硅胶制成的五气室爬行机器人,并测试其

不同的运动步态. Grossi 等^[19]设计一种基于超材料的仿毛毛虫机器人,通过利用摩擦力实现机器人的运动. Tang 等^[20]设计一种仿尺蠖的两栖爬行机器人,通过向螺旋形的气道充气,实现机器人的可逆吸附.现有研究主要围绕仿蠕虫、仿蛇及仿节肢动物等运动模式,普遍能够实现稳定的纵向前进爬行,并通过左右气室的差异化驱动实现一定程度的转向或路径调整.然而,从运动能力的严格定义来看,这类转向行为本质上仍属于纵向运动框架下的方向调制,而非真正意义上的横向位移或侧向爬行.受限于气动软体结构的高度对称性、地面接触摩擦的非线性特征以及气动控制维度有限等因素,能够同时实现可控纵向与横向爬行运动的气压驱动软体机器人研究仍然较为有限.因此,开发一种具备多方向运动能力并兼具结构简洁与驱动高效性的爬行机器人是该领域的重要研究需求.

针对上述不足,本文首先提出一种受章鱼触腕肌肉结构启发的三腔气动关节结构,实现模块化设计和三维空间的差异化轨迹运动.之后,基于该气动关节,本文提出并研制一种具有多种运动模式的仿生爬行机器人,如图 1 所示.通过不同的气压激励策略,该机器人不仅能够实现类似四足动物(如蜥蜴、马)的纵向运动,同时也可实现类似螃蟹的横向爬行,从而在单一平台上实现自然界两类典型爬行方式的统一.该设计突破现有软体爬行机器人运动模式单一的局限,为多模式仿生运动与柔性机器人机动性提升提供一种新的技术路线.本文围绕关节设计机制、结构实现、制造工艺以及爬行机器人设计与关节集成展开系统研究,为气动关节的设计与应用提供一条可行的技术路径.本文的主要贡献如下:

- 1) 提出一种基于分区设计的气动伸长单元结构方案,有效避免弹性体内部接缝导致的伸长性能不一致问题,结合 3D 打印工艺实现伸长单元的批量化制备,提升单元的一致性与可重复性;
- 2) 设计一种受章鱼触腕肌肉结构启发的模块化气动关节,并搭建实验测试平台对其末端轨迹特性进行系统验证,证明该关节具备良好的差异化轨迹生成能力,为多运动模式机器人的实现提供结构与运动基础;
- 3) 研制一种四足仿生爬行机器人,设计并实现多种激励策略,系统分析其运动轨迹特性,通过爬行实验验证了机器人在不同激励条件下实现多运动模式切换的可行性与有效性.

1 机器人本体设计

1.1 关节运动原理分析

在大自然中,许多软体生物并不依赖刚性关节

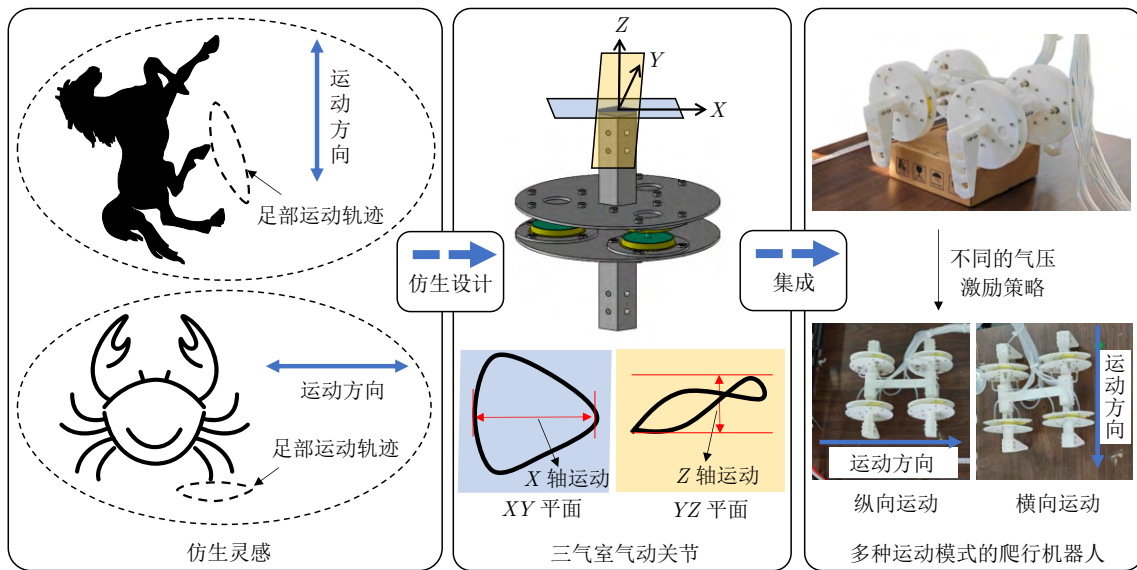


图 1 仿生爬行机器人设计思路

Fig.1 Design concept of the biomimetic crawling robot

结构, 而是通过肌肉静水骨骼实现运动. 例如章鱼的触腕、大象的鼻子和人的舌头等, 如图 2 所示. 2007 年, 北卡罗来纳大学的 Kier 等^[21] 对章鱼的肉组织和结缔组织的功能进行研究和分析. 章鱼触腕依靠周向与纵向肌群的协调激活, 在体积守恒约束下实现伸长、弯曲与扭转. 肌肉组织的三维排列既用于产生运动所需的力, 又为骨骼提供支撑. 章鱼触腕的内部肌肉组织由横向肌、纵向肌、斜向肌和环状肌构成. 当环向肌收缩时触腕直径减小, 依据体积守恒, 触腕沿轴向被动伸长; 当不同位置的纵向肌不等量收缩时, 触腕产生弯曲或扭转. 通过同时收缩左右两侧的斜向肌, 还可以增加触腕的扭转刚度. 章鱼触腕的肌肉分别如图 3 所示. 本文受章鱼触腕运动原理的启发, 设计由多个驱动单元并联组成的气动关节.



图 2 正在变形和运动的章鱼

Fig.2 An octopus that is transforming and moving

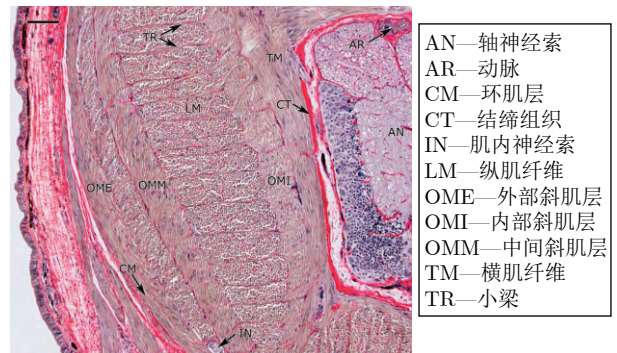


图 3 章鱼触腕的横截面 (在该切片中, 红色为结缔组织, 棕色为肌肉. 比例尺: 100 μm)

Fig.3 The cross-section of an octopus's tentacle (In this slice, red represents connective tissue and brown represents muscle. Scale: 100 μm)

1.2 气动关节设计

在本研究中, 采用气动伸长单元作为气动关节的基本驱动单元, 如图 4(a) 所示. 这是一种串联气动单元, 在轴向发生较大变形而径向受到变形约束. 这种气动伸长单元可以认为是气动波纹管型肌肉的一种. 伸长单元气室由上下两部分组成, 其结构是上下对称的, 如图 4(b) 所示. 使用 3D 打印制备的弹性结构是单元的主要变形结构和执行结构. 这种弹性结构采用热塑性聚氨酯材料制成. 弹性膜的中部预留有机械接口, 可以通过细管与其他结构连接, 如图 4(c) 所示. 弹性结构的外圈固定在支架结构中, 无法发生位移和变形. 伸长单元的顶部和底部通过上下盖板密封, 从而构成一个对称的封闭气室.

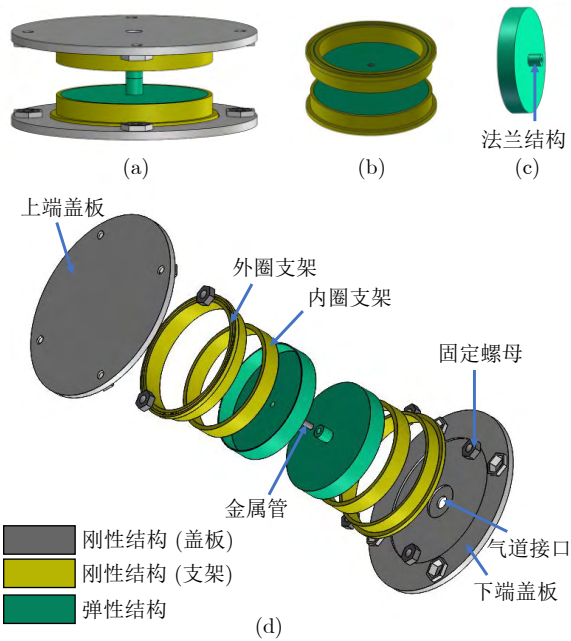


图4 气动伸长单元 ((a) 气动伸长单元结构图; (b) 单元的气室结构; (c) 弹性膜结构; (d) 伸长单元的爆炸视图)

Fig.4 Pneumatic extension unit ((a) Structure diagram of the pneumatic extension unit; (b) Structure of the air chamber of the unit; (c) Elastic membrane structure; (d) Explosion view of the extension unit)

下盖板上预留有气管接口, 通过该接口与外部气源相连. 本研究提出的气动单元采用分区设计的思路, 由硬质结构提供连接和紧固, 由弹性膜状提供期望的变形. 这避免了气动单元在非期望方向的变形. 同时, 这种非空腔式的弹性膜状结构简单, 不存在复杂的内腔结构, 更容易采用 FDM (fused deposition modeling) 技术的打印机批量制备.

气动关节如图 5 所示. 图 5(a) 为气动关节的结构图, 图 5(b) 为其爆炸视图, 图 5(c) 为气动关节的实物照片. 三个气动伸长单元圆周等间距排列, 与上下连接结构组成气动关节. 上下连接结构预留有固定孔, 通过该固定孔可以实现与其他结构的连接. 与章鱼触腕和蚯蚓体节等组织相似, 该气动关节通过差动变形实现连续柔性弯曲. 气动关节的上下连接结构的长度是可变的, 以适配不同的应用场景.

不同于 Xie 等^[13]、Zhang 等^[14] 提出的执行器, 本文所提出的气动关节变形单元采用分区设计后组装的思路, 没有采用分体浇筑然后对多个弹性体进行粘接的方式制备弹性单元, 这避免了在弹性体内部出现接缝. Kalisky 等^[15] 虽然使用 3D 打印机制备了一种三气室的气动执行器, 但这种执行器的三个气室相互连接, 在某个气室损坏后无法单独更换. 本文的气动关节所使用的气动单元相互独立, 在某

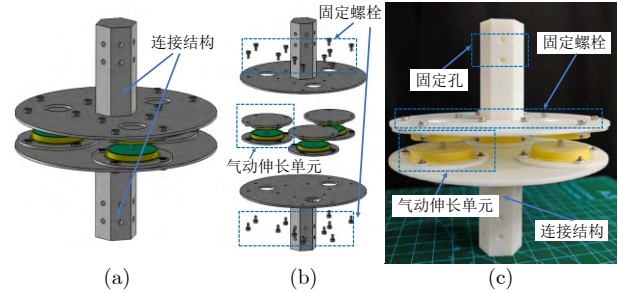


图5 仿生气动关节 ((a) 气动关节结构图; (b) 气动关节的爆炸视图; (c) 气动关节实物图)

Fig.5 Biomimetic pneumatic joint ((a) Structural diagram of the pneumatic joint; (b) Exploded view of the pneumatic joint; (c) Physical image of the pneumatic joint)

一个损坏后可相互独立地进行维修和更换. 综上, 本文所提出的气动关节采用分区设计思路, 弹性结构结构简单、易于制备; 气动伸长单元相互独立, 易于更换与维护. 这部分工作提出一种可行的气动单元设计思路.

1.3 仿生机器人设计

仿生爬行机器人的结构如图 6 所示, 其由脊柱结构、腿部结构和足部结构组成. 脊柱结构和足部结构均为实心聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 结构. 使用气动关节作为爬行机器人的腿部结构, 负责带动足部结构完成抬起和摆动动作. 爬行机器人呈左右镜像对称结构. 爬行机器人由气管进行供气, 气管的另一端连接着气源装置. 本文气动关节及爬行机器人的结构参数主要以实现稳定、多方向运动功能为目标, 在材料性能与制造工艺约束下通过多轮试制与验证确定, 并未针对参数最优性进行系统优化. 相关参数仍具有进一步优化空间, 后续工作可结合优化方法开展深入研究.

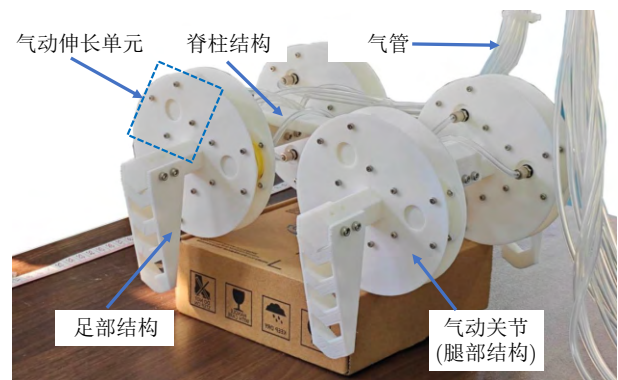


图6 仿生爬行机器人

Fig.6 Biomimetic crawling robot

2 机器人制备

2.1 材料与设备选型

本文所采用的材料如图 7 所示. 分体铸造是指将软体机器人结构拆分成多个部分分别浇注固化, 再进行粘接或二次硫化, 使其最终形成完整气腔或结构的加工方式. 虽然这种方法能够制备复杂的薄壁结构, 且模具的设计和制备比较方便. 但这种方法的多个部件的粘接界面可能成为薄弱处, 在高压或反复运动中可能出现剥离或撕裂. 利用 FDM 技术打印 TPU 来制造软体机器人是一种近年来逐渐普及的方法, 其核心特点是将热塑性弹性体按层沉积成可弯曲、可变形的结构. 该方法无需硅胶浇注、模具设计. 但是由于 FDM 工艺在加工过程中容易形成微孔等缺点, 这使得采用该方法所制备的软体机器人几何尺寸较大. 在第 1 节中, 本文提出分区设计的思路 and 一种平面弹性结构, 这降低了弹性体的打印难度, 降低了弹性结构的壁厚, 有利于执行器的变形与运动.

综上, 本研究采用市面上易购得的 TPE (thermoplastic elastomer) 材料 TPE-83A (邵氏硬度 83A, ESUN, 深圳光华伟业股份有限公司) 作为弹性结构的制备材料. TPE 材料在打印过程中具有高弹性、易形变、易“回缩”的特性. 在打印过程中需要保证材料稳定挤出、避免堵头和拉丝. 本研究选用

Ender-3 S1 Pro (深圳市创想三维科技股份有限公司) 作为制备机器. 在制备执行器的气道时, 直接打印气道的方式不仅容易造成气道的泄露, 还对弹性膜的变形造成约束. 因此, 本研究在弹性膜中部设计一种法兰结构, 中间通有微孔, 并采用注射器的针头部分 (金属管) 作为其中的空气管道. 这种内置金属管道不仅实现了气道的连接, 还为气动伸长单元提供了一定的抗扭刚度.

在机器人硬质结构的制备中, 本文采用 FDM 方式打印 PLA 材料. 与柔性材料相比, PLA 具有更高的杨氏模量和良好的结构刚度, 能够有效承担支撑、定位及运动约束等功能, 在软体机器人中作为外壳框架、连接件或限制机构具有明显优势. 在 TPU 结构与 PLA 结构的组装与密封过程中, 使用 TPU 胶水 (J-2105, 东莞市巨乐电子材料有限公司) 作为粘接剂和缝隙填充剂, 从而实现气动伸长单元的密封和连接.

2.2 气动关节与爬行机器人的制备

气动关节的制备如图 7 所示. 首先通过 3D 打印机制备弹性结构和刚性约束结构. 气动伸长单元的刚性约束结构主要包括外圈支架、内圈支架、上端盖板和下端盖板. 弹性结构采用全实心打印的方式制成. 为减少复杂结构带来的漏气问题, 弹性膜结构的主体为一个平面膜结构, 中心气道部分稍微加厚以用于固定金属管. 本文将金属管通过电烙铁

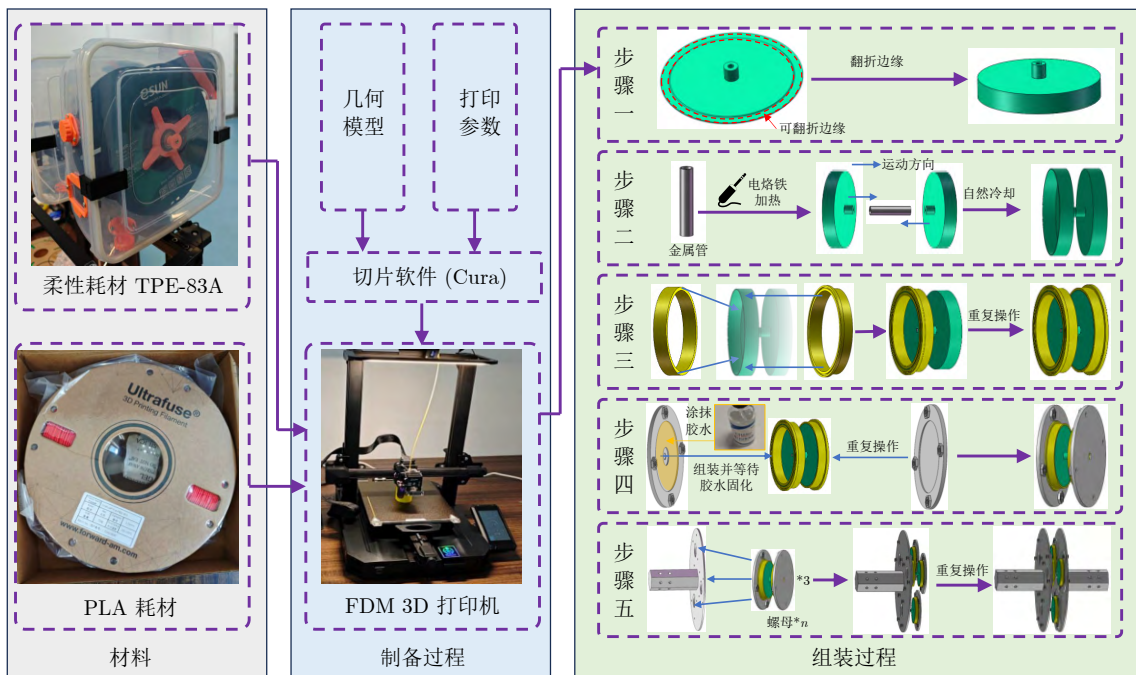


图 7 仿生气动关节的制备与组装流程

Fig. 7 Preparation and assembly process of biomimetic pneumatic joints

(电烙铁温度约 210 °C) 进行短暂加热后压入弹性膜结构的中心孔洞中。TPU 材料在该温度时出现软化和熔融现象, 等待 TPU 冷却后, 实现弹性膜和金属管的密封连接。采用同样的方式, 完成另一张弹性膜的连接和固定。完成弹性膜的连接后, 向外圈支架的内侧刷上 TPU 胶水, 将弹性膜粘于内侧, 并压入内圈支架, 实现弹性膜与支架结构的连接。之后, 向内外圈支架的缝隙刷入适量胶水, 实现完全密封。在上下盖板结构上开有螺母槽。向螺母槽压入螺母, 用于后续的机械连接。下端盖板还开有气孔, 用于与外部驱动气源的连接。最后, 将上下盖板结构分别粘于支架结构上, 完成气动伸长单元的制备。气动关节的上下连接结构也采用 PLA 制备而成。三个气动伸长单元通过螺栓模块化的连接于上下连接结构, 从而组成整个气动关节。

使用相同的 PLA 打印参数, 打印爬行机器人的脊柱结构与足部结构。并通过螺栓进行连接, 完成爬行机器人的制备。

3 气动关节性能测试

3.1 测试方案与平台

气动关节性能测试平台如图 8 所示, 主要包括: 气动关节本体、气源装置、多位气阀、气阀控制电路、气压表、上位机、多摄像头数据采集系统。气动关节按照上文提到的材料和方法进行制备, 并贴上直径为 4 mm 的圆形标记点, 用于运动数据的提取。气源装置包括空压机 (1100W-8L, 台州市奥突斯工贸

有限公司) 和精密调压阀 (IR1000-01BG, 企瑞)。空压机提供受压气源, 并通过精密调压阀实现气压的精密调节与输出。多位气阀 (H103-EL, 二位三通阀, DC12V, 宁波斯派克气动科技有限公司) 由气阀控制电路驱动和控制。气阀控制电路主要由 Arduino Nano 和多个 D4184 场效应管模块组成。通过 USB 连接电脑后, 通过上位机实现气阀的控制。气压表 (ISE30A-01, 企瑞) 通过三通歧管连接在气动关节的近端。通过将气压表安装在气阀之后靠近气动关节的一侧, 可以避免气阀等元件造成的气压损失和压降, 实现对气动关节内气压的精确读取。多摄像头数据采集系统由三个摄像头 (GF100, 1 280 × 720 P, 60 帧/s, 深圳市杰锐微通电子科技有限公司) 组成。两个摄像头和气动关节本体均固定于铝型材支架上, 其中一个安装于气动关节的上方, 另一个安装于气动关节的侧面。此外, 另一个摄像头固定于相机支架上, 用于记录整个实验过程。三个摄像头均通过 USB 连接到上位机。通过改变气压和有规律地控制气阀通断, 测试气动关节的运动性能。

3.2 末端轨迹测试

通过差异化控制三个伸长单元的气压, 气动关节末端在三维空间中生成不同形态的运动轨迹。本实验系统分析气动关节在 XY、XZ 和 YZ 三个平面方向的运动能力。如图 9 所示, 气动关节末端在不同驱动激励策略和气压水平下呈现出明显差异化的轨迹分布: 从图 9(a) 左图所示的 XY 平面提取跟

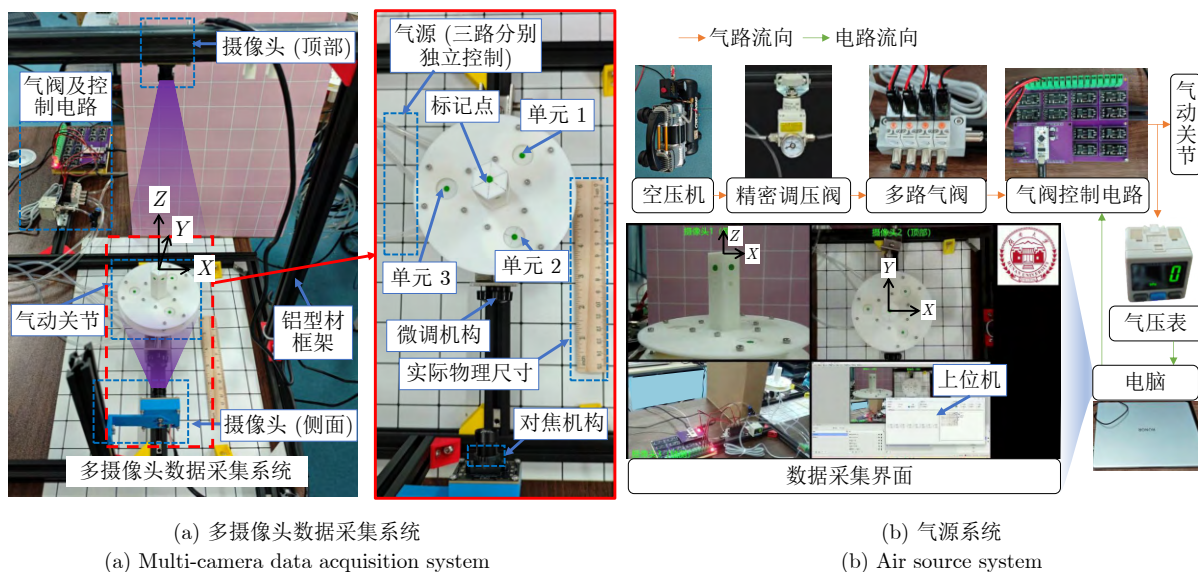


图 8 实验平台

Fig.8 Experimental platform

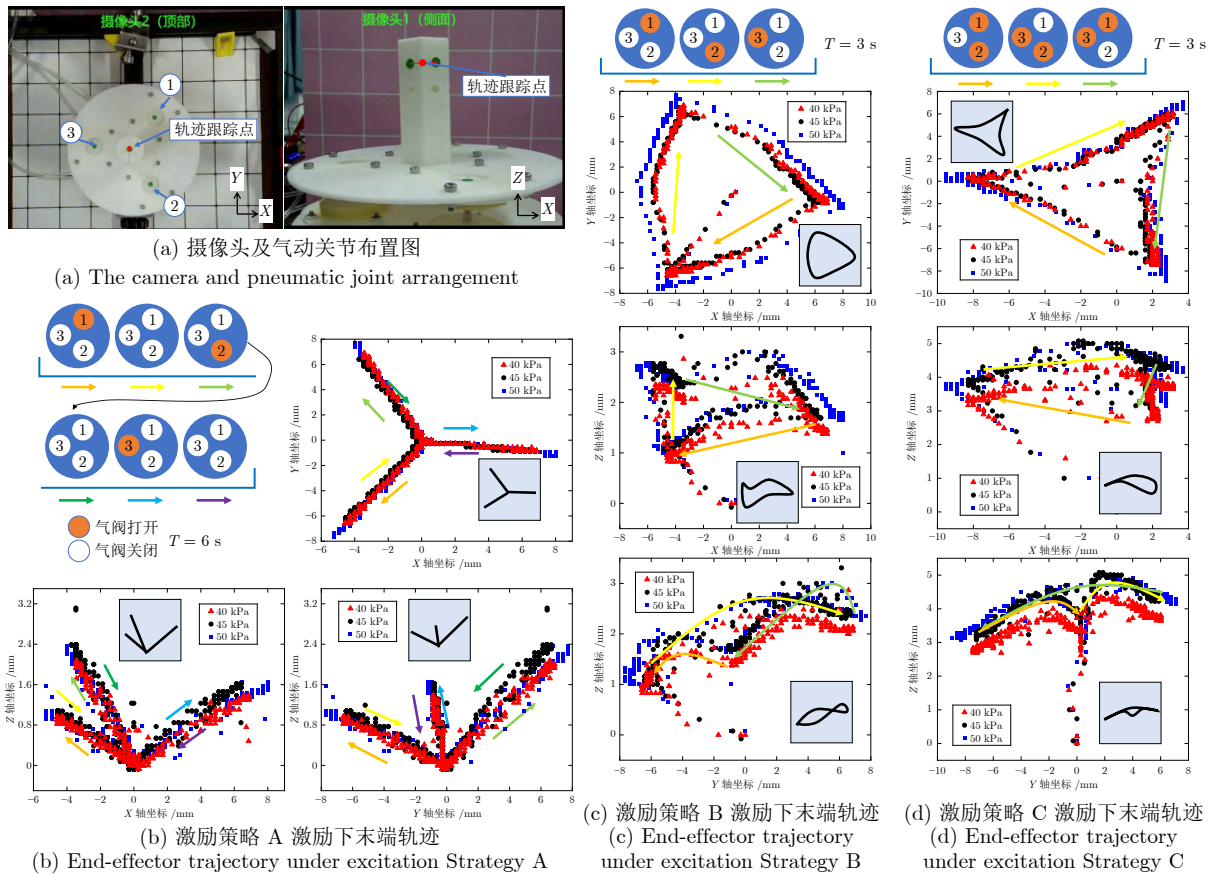


图 9 气动关节轨迹生成实验 I (图中数字为气室的编号, 每个实验持续 5 个周期, 彩色箭头表示运动顺序)

Fig.9 Trajectory generation Experiment I of the pneumatic joint (The numbers in the figures denote the indices of the pneumatic chambers, each experiment lasted for five cycles, colored arrows indicate the motion sequence)

踪点的 X 轴和 Y 轴信息, 从图 9(a) 右图所示的 XZ 平面提取跟踪点的 Z 轴信息.

对于激励策略 A (单腔周期性激励), 在 XY、XZ 和 YZ 平面上, 末端轨迹呈三向分叉状分布, 显示出良好的方向辨识性和周期一致性. 该激励策略可实现对单一方向的明确控制, 为后续多方向轨迹组合提供基础. 对于激励策略 B (三腔顺序激励) 和激励策略 C (腔室同时激励且具有相位差), 末端轨迹在三个平面上形成闭合回环形态, 表明气动关节具备稳定的周期性形变输出能力. 轨迹整体呈偏置且非对称分布, 说明通过多腔差动控制可以合成复杂的三维运动轨迹. 在 XY 平面上, Y 轴的位移变化有利于爬行机器人腿部的抬起, X 轴的位移变化有利于爬行机器人的纵向运动. 在 YZ 平面上, Y 轴的位移变化有利于爬行机器人腿部的抬起, Z 轴的位移变化有利于爬行机器人的横向移动. 上述的三维空间轨迹表明, 通过对气动关节三个气腔的可编程激励, 可以产生复杂的非对称轨迹, 这对爬行机器人的运动是十分关键的. 通过选择不同的激励方式, 同时实现 XY 平面和 YZ 平面的非对称环

形轨迹. 本研究所提出的气动关节类似于空间四杆机构, 有利于爬行机器人同时实现纵向运动与横向运动.

对比 40 kPa、45 kPa 和 50 kPa 的实验结果可见, 轨迹整体尺度随气压升高而增大, 但轨迹形状保持相似, 说明气压主要影响运动幅度, 而轨迹激励策略主要由驱动次序与时序策略决定. 此外, 三种激励策略下不同实验轨迹高度重合, 表明所提出的关节结构在动态驱动过程中具有良好的重复性与可控性. 图 9 中所显示实验的误差主要可能来源于以下几个方面: 1) 软体机器人材料本身的微小一致性差异; 2) 3D 打印过程中几何尺寸和表面精度的微小偏差; 3) 气路传输及阀控延迟造成的气压响应差异. 总体来看, 这些误差对实验结论影响有限, 但在后续规模化制造中, 需通过严格材料筛选、优化打印参数及改进气路控制策略来进一步提高一致性和可重复性.

综合来看, 本研究验证了通过多腔差动控制, 气动关节能够实现多激励策略、多方向和可调幅度的复杂末端运动轨迹.

4 仿生爬行机器人性能测试

在上文末端轨迹的基础上, 本节设计 4 种气阀激励策略, 以测试气动关节在两个平面的非对称轨迹生成能力, 最终实现爬行机器人的纵向运动和横向运动. 4 种气阀激励策略所产生的目标轨迹如图 10 所示. 图 10(a) 所示的激励策略 D 和图 10(b) 所示的激励策略 E 实现 XY 平面的差异化运动轨迹. 图 10(c) 所示的激励策略 F 和图 10(d) 所示的激励策略 G 实现 YZ 平面的差异化运动轨迹. 这种差异性的运动轨迹可以保证爬行机器人的腿部实现有效运动^[17].

本文展示的纵向运动模式和横向运动模式, 其

核心区别在于四个气动关节的气压激励相位和通断顺序的不同. 在纵向运动模式下, 同侧的前后足按顺序依次触地, 实现纵向推进; 在横向运动模式下, 对角的左右足同步抬足, 实现横向移动. 模式切换无需改变结构, 仅通过调整各气阀的激励相位和通断顺序即可完成, 保证控制策略的简洁和可靠.

4.1 纵向爬行

4.1.1 关节轨迹生成

观察图 10 结果可知, 图 10(a) 所示轨迹和图 10(b) 所示轨迹均可以实现 Y 轴方向有效移动, 但激励策略 D 每个周期需要改变 6 次激励信号, 增加了控制

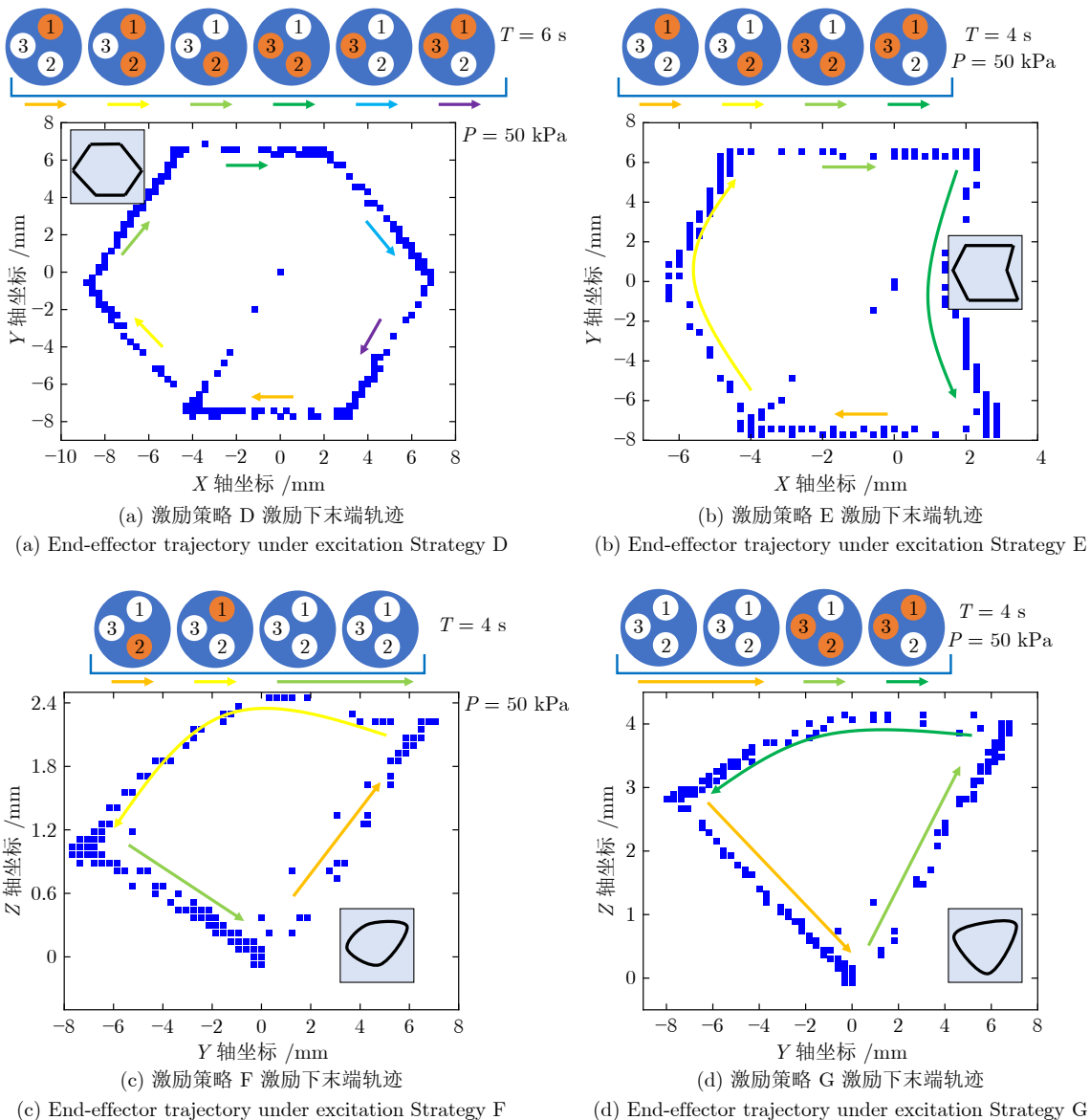


图 10 气动关节轨迹生成实验 II (图中数字为气室的编号, 每个实验持续 5 个周期, 彩色箭头表示运动顺序)

Fig.10 Trajectory generation Experiment II of the pneumatic joint (The numbers in the figures denote the indices of the pneumatic chambers, each experiment lasted for five cycles, colored arrows indicate the motion sequence)

算法的复杂性. 与图 10(a) 所示轨迹不同, 图 10(b) 所示的轨迹在保证差异化运动的基础上, 每周只需改变 4 次激励信号, 简化了控制算法.

4.1.2 爬行测试

对于一些爬行动物, 其爬行时按照对角腿同时移动的规律^[22]. 基于这一生物学启示, 本研究为软体机器人设计一种对角同步的关节驱动策略, 使机器人的各关节按照如图 11(a) 所示的时序关系进行周期性运动. 通过对四个关节运动状态的循环控制, 机器人能够在整体上形成类似爬行动物的步态模式, 从而实现稳定的纵向爬行运动, 如图 11(a) 所示. 为保证气动软体机器人的耐久性和使用寿命, 本文适当减低气室的驱动压力. 在爬行实验过程中, 气压的幅值均为 45 kPa.

实验结果表明, 在该控制策略下, 机器人成功实现对角步足同时运动的驱动模式, 并能够保持连续、稳定的向前爬行行为. 然而, 需要指出的是, 在实际运动过程中, 机器人的运动轨迹出现一定程度的偏转. 本文推测该偏转主要源于机器人与接触表面之间摩擦力分布不均、结构装配误差以及软体材料非线性变形等因素的综合影响. 在后续研究中, 可通过引入位姿反馈、压力反馈等闭环控制方法, 对机器人运动过程进行实时修正, 从而进一步提升其运动稳定性与轨迹可控性. 在当前实验条件下, 机器人的平均纵向移动速度约为 142.54 mm/min.

通过仅驱动一侧的两个气动关节, 该爬行机器人还可以实现转向运动.

4.2 横向爬行

4.2.1 关节控制策略

观察图 10(c) 和图 10(d) 结果可知, 图 10(c) 所示轨迹和图 10(d) 所示轨迹均可以实现 Z 轴方向有效移动. 但是这两种模式在 X 轴方向会产生相反的运动方向, 因此选择将这两种激励方式差异化部署到爬行机器人上.

4.2.2 爬行测试

对于螃蟹等以横向运动为主的爬行动物, 其步足在运动节律上通常呈现出高度的对称性与协同性, 多个相应步足通过成对推进的方式产生稳定的侧向驱动力, 从而实现高效的横向爬行. 受此启发, 本研究为软体机器人设计一种对角同步的针对横向运动的关节控制策略, 使各关节按照如图 11(b) 所示的控制时序进行协调运动. 通过周期性循环驱动四个关节, 机器人在整体运动形式上模拟螃蟹等横向爬行动物的基本步态特征, 如图 11(b) 所示.

实验结果表明, 尽管所采用的控制策略仅提取

并参考螃蟹步态中的关键运动特征, 而未对其复杂步态进行完全复现, 所提出的软体爬行机器人仍能够实现稳定且连续的横向移动. 这表明, 该控制策略在一定程度上具备良好的生物启发合理性和工程适用性. 在实验平台条件下, 机器人的平均横向移动速度约为 90.02 mm/min, 验证了其横向爬行能力与运动有效性.

5 分析与讨论

本文中气动关节及仿生爬行机器人的运动控制目前采用的是基于预设气压时序的开环激励策略, 其主要目的是在结构与运动层面验证多腔气动关节在多方向爬行中的运动生成能力与模式可行性. 从工程与自动化的角度来看, 该控制方式并不意味着所提出结构不具备闭环控制能力. 相反, 气动关节的结构形式与驱动特性为引入反馈控制提供了良好的基础.

本文采用的基于气阀通断的开环控制策略以实现结构简单、可靠运行为主要目标, 适用于运动模式验证、功能演示以及对环境感知与定位精度要求不高的应用场景, 如受限空间内的基础移动与形态切换. 在环境参数或外部负载变化较小的情况下, 该控制方式能够稳定地复现预期运动模式. 然而, 在复杂地形、负载显著变化或对运动精度要求较高的应用中, 开环控制难以实时补偿模型不确定性与外界扰动, 其运动一致性与鲁棒性将受到一定限制. 针对上述问题, 后续工作可在现有结构基础上引入传感反馈与闭环控制策略, 以进一步提升系统的环境适应能力.

在关节层面, 所提出的三腔气动关节具有明确的多输入驱动结构, 各气腔气压可独立调节, 控制输入维数清晰, 能够通过差动充气实现连续、可逆的空间弯曲与轴向伸长. 实验结果表明, 在相同驱动策略和气压水平下, 关节末端轨迹具有良好的一致性与重复性, 说明其压力-变形关系在准静态条件下表现出较稳定的特性. 这一特点有利于构建低阶近似模型或基于实验数据的预测模型, 从而为模型预测控制 (model predictive control, MPC) 等闭环控制方法的引入提供可行前提. 结合气压传感、末端位姿测量或关节曲率反馈, 可进一步实现对关节运动轨迹、幅值及方向的在线调节与误差修正.

在机器人系统层面, 仿生爬行机器人由多个气动关节构成, 其运动本质上是由关节周期性空间轨迹与足部-地面接触力协同作用所产生的整体位移. 由于气动驱动与柔性材料本身具有固有的顺应性, 机器人在与地面接触及环境交互过程中能够表现出

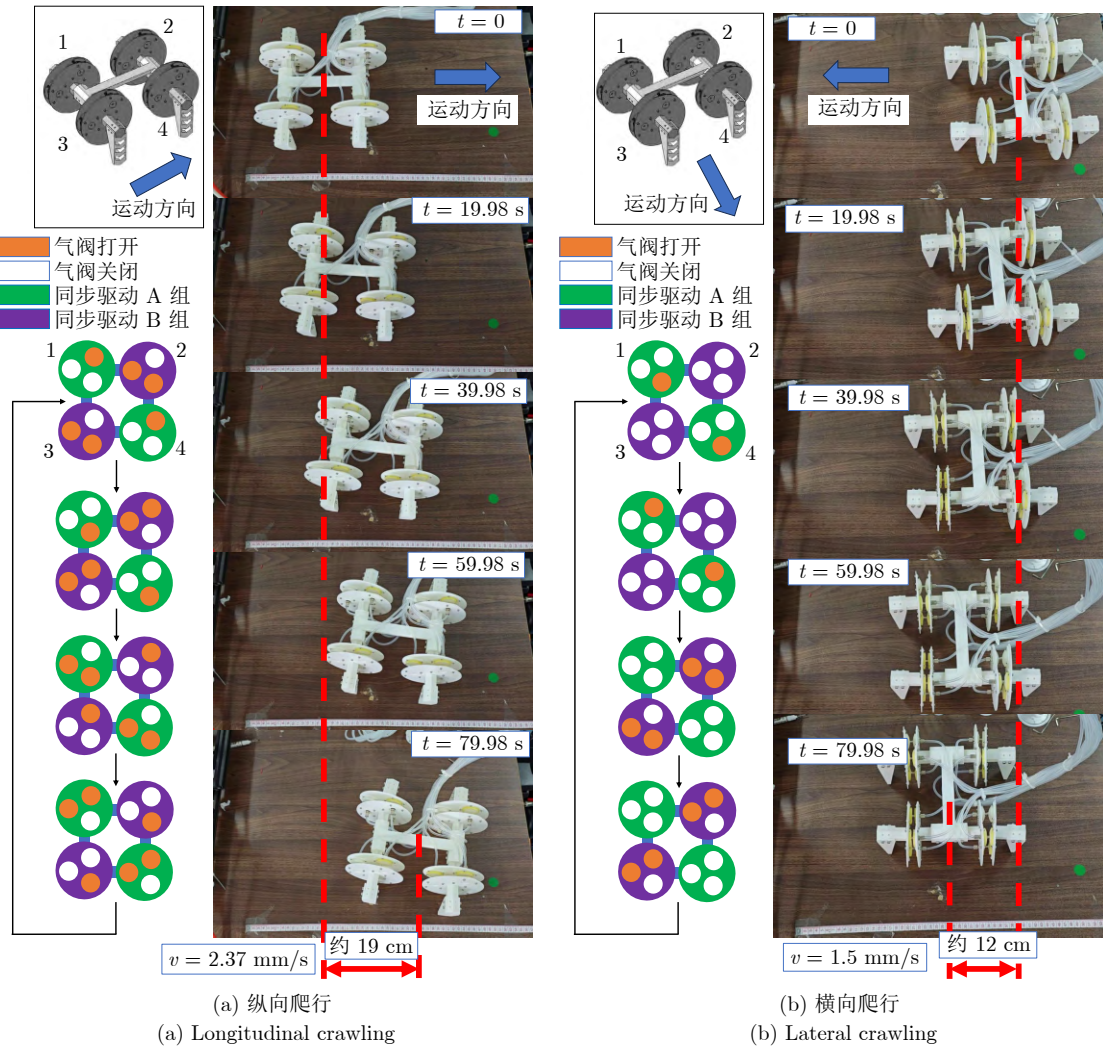


图 11 软体机器人爬行实验 (图中数字为气动关节的编号)

Fig. 11 Crawling experiments of the soft robot (The numbers indicate the pneumatic joint IDs)

良好的被动柔顺特性, 这使其在工程上天然适合采用阻抗控制或顺应控制策略. 通过调节各关节气腔的气压水平与相位关系, 可在保证运动柔顺性的同时, 对机器人整体运动速度、方向及稳定性进行调节, 从而提升其在复杂地面条件下的环境适应能力与运动鲁棒性.

综上, 尽管本文工作主要集中于结构设计、多方向运动生成及爬行性能验证, 但所提出的气动关节与爬行机器人在驱动维数、状态可观测性以及力学柔顺性等方面均具备良好的闭环控制可扩展性. 未来工作中, 结合多源传感反馈并引入模型预测控制或阻抗控制框架, 有望进一步提升该仿生爬行机器人在复杂环境中的自主运动能力与工程应用潜力.

与仅具备单一爬行模式的软体机器人相比, 本文所提出的仿生爬行机器人能够在同一平台上实现纵向爬行与横向爬行两种典型运动模式, 为其在复

杂环境中的运动适应性提供了显著优势. 在受限空间或障碍物密集环境中, 单一纵向爬行模式往往受限于前方空间尺度或局部阻挡, 难以完成姿态调整或路径修正; 而横向爬行模式可在保持主体姿态基本不变的情况下, 实现侧向位移与位置微调, 从而提升机器人在狭窄通道、管道壁面或非结构化环境中的通过能力. 此外, 在地面摩擦条件不均或存在局部障碍物的情况下, 多运动模式切换使机器人能够根据环境约束选择更合适的推进方式. 例如, 当纵向推进效率降低时, 机器人可通过横向爬行实现姿态重构或重新对准运动方向. 相比之下, 传统单一运动模式的软体爬行机器人通常依赖固定的步态与推进方向, 其运动能力高度依赖环境条件, 对复杂地形的适应性有限.

从结构实现角度看, 传统单一纵向爬行的软体机器人若需要实现侧向位移或姿态修正, 通常需要

引入额外的转向机构、非对称足端结构或多组执行单元,从而增加系统复杂度与控制难度.相比之下,本文所提出的多运动模式爬行机器人无需额外机械机构,仅通过改变气动关节的气压激励策略即可在同一硬件平台上实现纵向与横向爬行模式的切换.

因此,本文所提出的多运动模式仿生爬行机器人不仅在运动形式上实现了对自然界不同爬行策略的统一,也在工程层面为软体机器人在受限空间探测、复杂地形移动及环境自适应运动等应用场景中提供了更高的灵活性与鲁棒性.

本文所报告的爬行速度主要用于验证所提出气动关节与多运动模式爬行机器人的功能可行性与运动一致性,而非以速度性能最优为设计目标.从已有文献报道来看,多数气动软体爬行机器人在厘米每分钟量级内实现稳定运动^[20, 23-24],本文所获得的纵向与横向爬行速度均处于该典型范围之内.后续工作将结合驱动频率优化、控制策略改进及结构参数调整,进一步提升运动效率与速度性能.

6 结束语

针对现有软体爬行机器人运动模式单一、推进方向受限等问题,本文提出一种受章鱼触腕肌肉结构启发的三腔气动关节,并在此基础上设计一种具有多种运动模式的仿生爬行机器人.依托该气动关节,本文研制的仿生爬行机器人成功实现了纵向爬行和横向爬行,分别实现了 142.54 mm/min 和 90.02 mm/min 的移动速度,在单一软体机器人平台上实现了两类典型自然爬行动作的集成.本文提出的气动关节结构及其构建的多模式仿生爬行机器人为柔性机器人在复杂环境下的高机动性提供了一条可行技术路径.未来可进一步结合闭环控制、多关节协调以及智能材料优化,以提升机器人在真实应用场景中的稳定性、负载能力和环境适应性.

此外,本文所提出的多腔气动关节结构及其模块化设计,不仅适用于本研究中的纵向与纵向爬行机器人,同时也具有拓展至其他软体机器人应用场景的潜力,如复杂结构攀爬、管道检测或受限空间运载作业等.此外,未来可通过优化材料选择、改进气路布局及增强控制策略,实现更高运动效率、更强负载能力及更广适应性的多模式运动.

参考文献

- Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, Wennstedt S, Shepherd R F, Gupta U, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Advanced Functional Materials*, 2014, **24**(15): 2163-2170
- Liu X H, Chen N, Jiao J R, Liu J. Pneumatic soft phononic crystals with tunable band gap. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, **240**: Article No. 107906

- Polygerinos P, Wang Z, Galloway K C, Wood R J, Walsh C J. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **73**: 135-143
- Yi C, Liu X H, Xiao C, Liu J, Chen N. Soft phononic crystal with tunable bandgap through pneumatic actuation. *Advanced Engineering Materials*, 2024, **26**(24): Article No. 2401913
- Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, Nicolini L F, Mosadegh B, Whitesides G M, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 1512-1517
- Wakimoto S, Suzumori K. Fabrication and basic experiments of pneumatic multi-chamber rubber tube actuator for assisting colonoscope insertion. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, USA: IEEE, 2010. 3260-3265
- Connolly F, Walsh C J, Bertoldi K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(1): 51-56
- Giannaccini M E, Xiang C Q, Atyabi A, Theodoridis T, Nefti-Meziani S, Davis S. Novel design of a soft lightweight pneumatic continuum robot arm with decoupled variable stiffness and positioning. *Soft Robotics*, 2018, **5**(1): 54-70
- Wang Jiu-Bin, He Wei, Meng Ting-Ting, Zou Yao, Fu Qiang. System design of dove-like flapping-wing flying robot based on highly bionic morphological layout. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(2): 308-319
(王久斌, 贺威, 孟亭亭, 邹尧, 付强. 基于高仿生形态布局的仿鸽扑翼飞行器机器人系统设计. *自动化学报*, 2024, **50**(2): 308-319)
- Yin Zhao, He Wei, Zou Yao, Mu Xin-Xing, Sun Chang-Yin. Efficient formation of flapping-wing aerial vehicles based on wild geese queue effect. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(6): 1355-1367
(尹翌, 贺威, 邹尧, 穆新星, 孙长银. 基于“雁阵效应”的扑翼飞行器机器人高效集群编队研究. *自动化学报*, 2021, **47**(6): 1355-1367)
- Xu Fan, Wang He-Sheng. Adaptive robust visual servoing control of a soft manipulator in underwater environment. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(4): 744-753
(徐璠, 王贺升. 软体机械臂水下自适应鲁棒视觉伺服. *自动化学报*, 2023, **49**(4): 744-753)
- Feng Yu-Kai, Wu Zheng-Xing, Tan Min. Cooperative pursuit policy for bionic underwater robot based on MARL-MHSA architecture: Data-driven modeling and distributed strategy optimization. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(10): 2269-2282
(冯育凯, 吴正兴, 谭民. 基于 MARL-MHSA 架构的水下仿生机器人协同围捕策略: 数据驱动建模与分布式策略优化. *自动化学报*, 2025, **51**(10): 2269-2282)
- Xie Q, Wang T, Yao S D, Zhu Z P, Tan N, Zhu S Q. Design and modeling of a hydraulic soft actuator with three degrees of freedom. *Smart Materials and Structures*, 2020, **29**(12): Article No. 125017
- Zhang B Y, Hu C Q, Yang P H, Liao Z X, Liao H G. Design and modularization of multi-DoF soft robotic actuators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, **4**(3): 2645-2652
- Kalisky T, Wang Y Q, Shih B, Drotman D, Jadhav S, Aronoff-Spencer E, et al. Differential pressure control of 3D printed soft fluidic actuators. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, Canada: IEEE, 2017. 6207-6213
- Chen S E, Cao Y T, Sarparast M, Yuan H Y, Dong L X, Tan X B, et al. Soft crawling robots: Design, actuation, and locomotion. *Advanced Materials Technologies*, 2020, **5**(2): Article No. 1900837
- Aygül C, Güven C, Frunzi S A, Katz B J, Nemitz M P. A framework for soft mechanism driven robots. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): Article No. 1426
- Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, Morin S A, Stokes A A, Mazzeo A D, et al. Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(51): 20400-20403

- 19 Grossi B, Palza H, Zagal J C, Falcón C, Doring G. Metapillar: Soft robotic locomotion based on buckling-driven elastomeric metamaterials. *Materials and Design*, 2021, **212**: Article No. 110285
- 20 Tang Y C, Zhang Q T, Lin G J, Yin J. Switchable adhesion actuator for amphibious climbing soft robot. *Soft Robotics*, 2018, **5**(5): 592–600
- 21 Kier W M, Stella M P. The arrangement and function of octopus arm musculature and connective tissue. *Journal of Morphology*, 2007, **268**(10): 831–843
- 22 Ainla A, Verma M S, Yang D, Whitesides G M. Soft, rotating pneumatic actuator. *Soft Robotics*, 2017, **4**(3): 297–304
- 23 Branyan C, Mengüç Y. Soft snake robots: Investigating the effects of gait parameters on locomotion in complex terrains. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018. 1–9
- 24 Tolley M T, Shepherd R F, Mosadegh B, Galloway K C, Wehner M, Karpelson M, et al. A resilient, untethered soft robot. *Soft Robotics*, 2014, **1**(3): 213–223



刘晓华 湖南大学人工智能与机器人学院博士研究生。2023 年获得湖南大学硕士学位。主要研究方向为软体机器人设计、建模和控制。

E-mail: liuxh@hnu.edu.cn

(LIU Xiao-Hua Ph.D. candidate at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. He received his master degree from Hunan University in 2023. His research interests include soft robot design, modeling, and control.)



王耀南 中国工程院院士, 湖南大学人工智能与机器人学院教授。1995 年获得湖南大学博士学位。主要研究方向为机器人学, 智能控制和图像处理。

E-mail: yaonan@hnu.edu.cn

(WANG Yao-Nan Academician at Chinese Academy of Engineering, professor at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. He received his Ph.D. degree from Hunan University in 1995. His research interests include robotics, intelligent control, and image processing.)



冯运 湖南大学人工智能与机器人学院副教授, 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心研究员。主要研究方向为机器人数字孪生, 软体机器人建模与控制。本文通信作者。

E-mail: fyrobot@hnu.edu.cn

(FENG Yun Associate professor at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University, researcher at the National Engineering Research Center of Robot Visual Perception and Control Technology. His research interests include robot digital twins, and soft robot modeling and control. Corresponding author of this paper.)