

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.004

模块化压电驱动多足式微爬行机器人

贾慧洲, 曾潇丰, 尹灿辉, 吴宇列, 肖定邦

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 目前基于智能复合微结构(Smart composite microstructure, SCM)工艺的压电式多足微爬行机器人一般采用整体设计、整体组装的方式,虽然结构紧凑、集成度高,但结构间相互耦合严重,并且装配和维护困难。针对该问题,提出一种模块化制造、自由式组装的多足微爬行机器人设计方法,并据此研制一种水平布置的四足模块化微爬行机器人。首先提出了整机的模块化设计方案,开展了多自由度腿的结构设计。其次研究了压电驱动模块、微角运动模块以及二自由度腿的具体加工和组装流程,完成了对各模块的加工与测试。然后开展了机器人的整体装配,并基于Trot步态利用Adams进行了机器人的运动仿真。最后对机器人进行了实际的运动测试,初步验证其运动性能,为后续优化设计以及更多形式的模块化微爬行机器人的开发奠定基础。

关键词: 微爬行机器人;压电驱动;多足运动;智能复合微结构工艺;模块化设计

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)03-0429-12

Modular Micro-crawling Robots Actuated by Piezoelectric with Multi-legged Locomotion

JIA Huizhou, ZENG Xiaofeng, YIN Canhui, WU Yulie, XIAO Dingbang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: At present, piezoelectric actuated multi-legged micro-crawling robots manufactured by smart composite microstructure (SCM) technology typically employ an integral design and assembly approach. Although this results in a compact structure of the robots with high integration, it leads to significant coupling in structure and challenge in assembly and maintenance. To address this issue, this paper proposes a design method reflecting in modular-manufacturing and free-assembly for multi-legged micro-crawling robots, and develops a quadruped micro-crawling robot with horizontal-modular layout feature accordingly. First, the modular design scheme for the entire robot system and the specific structure of multi-degree-of-freedom leg are presented. Second, the manufacturing and assembly processes of the piezoelectric actuating module, the angular-motion micro module, and the two-degree-of-freedom leg are analyzed, and the actual manufacturing and testing for each module are completed. Third, a micro-robot prototype is assembled, and its locomotion simulation based on the Trot gait is analyzed by using Adams software. Finally, the locomotion testing of the micro-crawling robot is conducted to preliminarily validate the corresponding performance. It provides a foundation for subsequent optimization design and the development of more versatile modular micro-crawling robots.

Key words: micro-crawling robot; piezoelectric actuating; multi-legged locomotion; smart composite microstructure (SCM) technology; modular design

基金项目: 国防基础科研资助计划(JCKY2023210C002)。

收稿日期: 2025-03-08; 修订日期: 2025-05-05

通信作者: 吴宇列, 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: ylwu@nudt.edu.cn。

引用格式: 贾慧洲, 曾潇丰, 尹灿辉, 等. 模块化压电驱动多足式微爬行机器人[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(3): 429-440. JIA Huizhou, ZENG Xiaofeng, YIN Canhui, et al. Modular micro-crawling robots actuated by piezoelectric with multi-legged locomotion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(3): 429-440.

微爬行机器人的尺寸通常在几毫米到几厘米之间、质量从几毫克到几十克不等^[1],并且大多数模仿自然界中的昆虫或其他小型爬行动物的运动方式,采用多足结构的步态实现协调运动,能够在狭小空间、复杂地形中灵活运动^[2-4]。另外,通过集成传感、控制和能源等模块,微爬行机器人能够实现实时状态感知、高精度运动控制以及长时间独立运动,从而更好地满足开展复杂任务的需求^[5-6]。微爬行机器人的这种体小质轻、灵活机动的特点使得它们在探测检修、灾难救援和军事侦察等领域具有独特优势^[7-10],具有巨大的应用潜力。

基于逆压电效应的压电驱动器具有结构简单、响应速度快和控制精度高等优点^[11],被广泛地应用于微爬行机器人的开发。国外采用压电陶瓷驱动的机器人中最具代表性的是哈佛大学 Wood 教授团队研制的 HAMR 系列爬行机器人。其中, HAMR-I 首次利用智能复合微结构(Smart composite microstructure, SCM)工艺进行制造^[12]; HAMR-V 将腿的数量减少为 4 个,提高了运动可控性和制造简易性^[13]。文献[14]利用了弹出式书籍(Pop-up book)制造方法,不同于以往的全单片加工,其允许腿和驱动器的模块化,这种并行工艺提高了制造方便性和运动性能。文献[15]则在 HAMR-VP 的基础上进行了进一步的结构小型化研究。与 HAMR-VP 的模块化不同,科罗拉多大学博尔德分校在 2023 年设计的微机器人是将单腿作为模块,4 个相互铰接的模块构成整机,使身体能够横向适应^[16]。国内的研究机构也在压电式微爬行机器人方面取得了诸多进展。例如,西北工业大学在 2021 年研制了一款三足爬行机器人,机器人主体本身和弹性足为同一构件,驱动元件和执行元件融为一体,利用摩擦实现运动^[17]。同样基于摩擦驱动,西北工业大学在 2023 年又设计了一种足腿一体化的四足爬行机器人^[18],并讨论了几种不同类型摩擦力的驱动足。清华大学在 2023 年将一种带有倾斜微三棱柱结构的仿生足垫与柔性压电驱动薄膜匹配,研制了一种具有环境自适应性的多功能攀爬机器人 PiezoClimber,它能在角度变化为 60°的表面上完成自过渡攀爬,具备优秀的越障能力^[19]。上海交通大学对压电驱动微爬行机器人的设计理论、力学分析和加工测试等方面进行了系统研究^[20-21],在 2024 年提出一种采用并联机构作为传动并具有增强型基底的压电四足机器人,其压电模块采用铜包焊盘制作,增强了压电驱动器连接可靠性^[22]。

微爬行机器人技术取得了诸多进展,尤其是 Wood 教授团队提出的 Pop-up book 微米/毫米级

组装工艺为微型机器人的制造提供了实用方法,可以实现从二维到三维的一体化制造与装配^[23],具有结构紧凑的优点。但是,完全利用此工艺进行整体制造的微型机器人仍存在问题亟待解决:首先需要额外配备驱动器,增大了装配难度。其次局部的损坏难以单独维修,增加了维护成本。最后是机器人各部分之间机械参数耦合严重,难以独立调整,当运动过程中的干扰因素较多时,容易导致控制精度下降和失稳问题。

针对一体化装配的问题,结合现有机器人的模块化思路,本文首先提出了一种模块化微爬行机器人的整体设计思路,其特点是通过模块的相互连接、分离和重组,形成不同形态或功能的机器人。然后将模块分为微角运动模块、压电模块和支撑模块 3 种类型,分别详细介绍了各模块加工过程和方法,每种类型具有特定的功能,均能实现独立的加工。从模块到腿部,从局部到整体,对每个环节进行了理论或仿真分析,并完成了实物的加工组装以及测试,其组装过程体现出了易于装配和维修的特点。一体化机器人受干扰易失稳,主要是由于紧密集成的机械结构使各自由度(Degrees of freedom, DOF)之间存在强动力学耦合,当受到负载突变、地面振动等外部干扰,或受到驱动器性能下降、传感器噪声等内部干扰时,干扰会通过耦合关系传递到机器人整个系统,导致全局控制精度下降。模块化机器人则可以通过其分布式控制、硬件冗余和干扰隔离能力有效抑制局部干扰的全局传播,因此在复杂干扰条件下更具稳定潜力^[24]。最后对一种水平结构双放大形式的模块化机器人进行了实物样机的运动测试,初步验证其运动能力,为后续运动控制工作做铺垫。

1 微爬行机器人模块化设计方案

模块化机器人是由多个标准化的、可独立运行的子模块所组成的机器人系统,这些模块可以相互连接、分离以及重组。该设计方法的核心思想是通过模块的灵活组合,形成不同形态或功能的机器人,用以适应多样化的任务需求^[25-26]。

模块化微爬行机器人的整机设计思路和结构示意图如图 1 所示,将压电微爬行机器人的总体构成分解为压电模块、微角运动模块和支撑模块,这些模块分别具备特定的运动和固定的功能,并且有独立完整的加工步骤。微角运动模块作为最基本的模块,可以进行组合以形成多自由度的运动模块,如图 1(c)所示。微角运动模块具有单微角运动模块和多自由度运动模块两种类型,如图 1(c,d)所

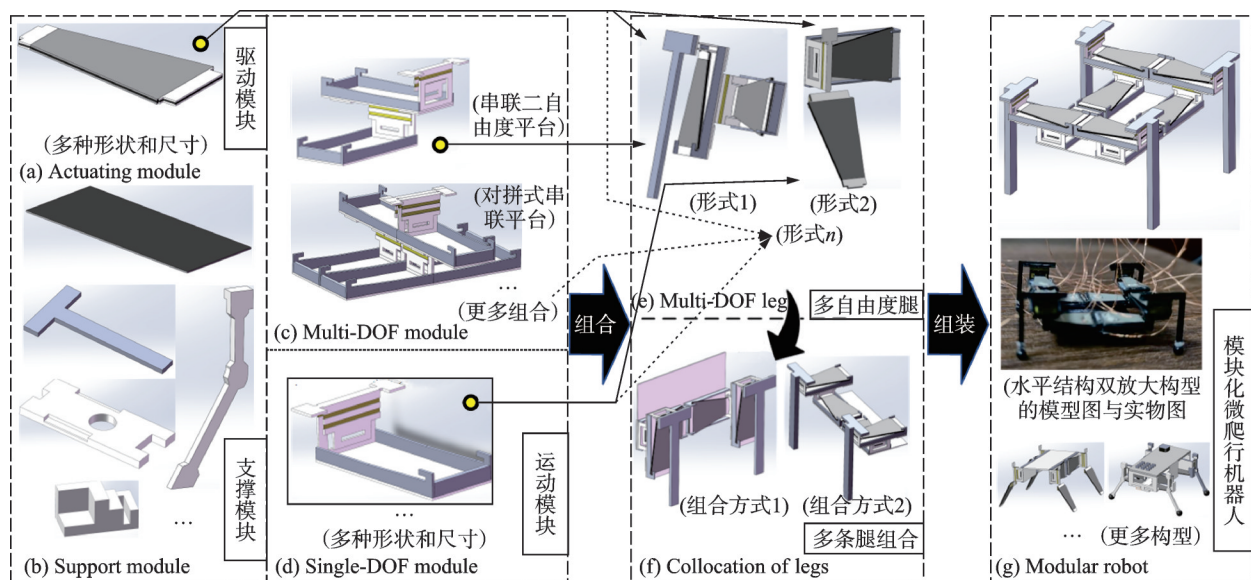


图1 模块化微爬行机器人结构示意图

Fig.1 Structural diagrams of modular micro-crawling robot

示。微角运动模块、压电模块和支撑模块自由组合可以形成多自由度腿,如图1(e)所示。例如,通过组合两个微角运动模块,可以实现串联二自由度平台,再与压电模块相结合,得到机器人的一种二自由度腿部结构,如图1(e)中形式1所示。或者将单微角运动模块和驱动模块组合,构成如图1(e)形式2所示的二自由度腿。这些腿部结构可以实现抬腿和迈腿两个动作,从而为机器人的多足运动能力构建提供基础。

将二自由度的4条或6条腿与支撑模块进行组合,可形成多种构型的模块化微爬行机器人,实现机器人的多足运动。在完成机器人的结构设计后,进行系统集成与优化,通过集成传感器、控制器等模块,实现机器人的高度集成化和智能化。同时,可以对机器人的结构、驱动方式等进行优化设计,提高机器人的整体性能和可靠性。在此模块化构造的方法基础上,具体对图1中水平结构双放大构型的机器人进行了加工、装配以及测试研究。

2 多自由度腿的设计

为了实现机器人向前行走,其腿部需要进行抬腿和迈腿动作,即足端实现空间曲线轨迹,这要求腿部能够实现最基本的两个自由度。根据模块化的思路,可以将这两个自由度解耦,利用两组微角运动模块和驱动模块分别实现抬腿和迈腿的动作,即可以利用平面四杆机构设计的压电微角运动模块实现平面转动。

2.1 微角运动模块的设计

由图1中微角运动模块和压电模块组合可以得到压电微角运动模块,如图2所示。作为微爬行

机器人的核心模块,其作用是将压电模块的微小位移放大(PZT-5H压电陶瓷片长度为9 mm,驱动电压为300 V交流电压,端部输出位移为亚毫米级),从而更好地实现抬腿和迈腿动作。

压电微角运动模块是基于压电模块的尺寸,结合平面四杆放大机构进行设计^[27],机构简图如图2(c)所示。微角运动模块的运动原理是,压电模块尾部固定于基座上形成悬臂梁结构,其端部输出形变位移通过两个柔性铰链传递至上平台,使其依靠固定于基座的柔性铰链产生旋转运动。

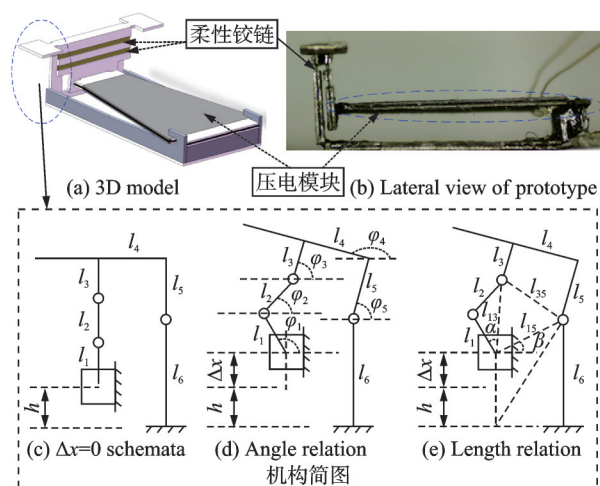


图2 微角运动平台

Fig.2 Micro-angular motion platform

将压电片端部位移简化为仅沿高度方向的线性位移 Δx ,最大端部位移所引起的最大角位移为 ϕ ,压电驱动模块固定端高度为 h ,微型角运动四杆机构各杆件长度分别为 l_1 到 l_6 ,则由图2(c,d)可知几何位置关系为

$$\begin{cases} h + l_1 + l_2 + l_3 = l_5 + l_6 \\ \sum_{i=1}^3 l_i \cos \varphi_i - \sum_{i=4}^5 l_i \cos \varphi_i = l_4 \\ h + \Delta x + \sum_{i=1}^3 l_i \sin \varphi_i - \sum_{i=4}^5 l_i \sin \varphi_i = l_6 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varphi_3 = \varphi_5, \varphi_4 - \varphi_5 = \frac{\pi}{2}, \varphi_4 = \phi$ 。

由图 2(e) 中虚线三角形, 可得几何关系为

$$\begin{cases} \cos\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{l_6^2 + l_4^2 - l_{15}^2 - (h + \Delta x)^2}{-2l_{15}(h + \Delta x)} \\ \cos(\varphi_1 - \alpha - \beta) = \frac{l_{13}^2 + l_{15}^2 - l_{35}^2}{2l_{13}l_{15}} \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} l_{35}^2 = (l_3 - l_5)^2 + l_4^2 \\ l_{13}^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos(\varphi_2 + \pi - \varphi_1) \\ l_{15}^2 = (l_6 - h - \Delta x)^2 + l_4^2 \\ \alpha = \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_{13}^2 - l_2^2}{2l_1l_{13}}\right) \\ \beta = \arccos\left(\frac{l_6 - h - \Delta x}{l_4}\right) \end{cases} \quad (3)$$

通过确定最大角位移, 可以得到 φ_4 的值。考虑后续平台的装配, 为了实现尽可能大地放大系数, l_4 尽可能取较小值。确定驱动器的尺寸, 可以得到驱动器的最大输入位移 Δx 。考虑到驱动器末端的刚度对于平台整体刚度的重要影响, 其固定端高度 h 不宜过大, 只需保证大于端部最大半行程并且方便装配即可, 因此也可优先确定。至此确定了 $\varphi_4, l_4, \Delta x, h$ 。式(1~3)中有 10 个方程, 16 个未知量。一般为了运动的对称性, 令 $l_3 = l_5$, 考虑平台总高度尺寸, 可优先确定 l_6 的值。至此方程组具有唯一解, 则可以得到微角运动模块的结构。

2.2 二自由度腿的结构设计

设计出微角运动模块后, 由于单微型角运动模块只有一个方向的运动, 而机器人需要抬腿和迈腿两个方向的运动, 因此设计出单腿结构如图 1(e) 所示, 单腿结构由上下两个交叉组合的微角运动模块以及一个支撑模块组成。机器人的一条腿受两个压电模块控制, 分别控制腿的抬起与迈步, 例如图 1(e) 形式 1, 左面的微角运动模块控制腿抬起, 右面的微角运动模块控制腿的迈步。两个压电模块之间配合驱动, 即可完成一条腿前进的运动。

设计时, 调整下方微角运动模块末端输出杆的尺寸, 使上方微角运动模块能够粘接在下方模块的输出杆上, 再将长腿结构的支撑模块装配在上平台上, 使其可以支撑起机器人。机器人在运动时, 下面的微角运动模块控制腿抬起时, 上面的微角运动

模块控制腿的迈步, 此时机器人抬腿和迈步同步完成, 可提高运动效率, 并且其单腿结构运动轨迹是一条弧线。给定起点、终点以及期望的抬腿高度之后, 利用特定的曲线方程或者插值方法可以求解摆动轨迹的所有点坐标。足端轨迹规划需要满足摆动相抬腿和落地时刻均没有较大冲击, 速度和加速度无突变, 且无拖地现象^[28]。针对平坦地面, 摆线函数可基本满足摆动相要求^[29], 则得到摆动轨迹坐标 (x_{sw}, y_{sw}, z_{sw}) 为

$$\begin{cases} x_{sw} = (x_f - x_{i0}) \frac{\varphi - \sin \varphi}{2\pi} + x_{i0} \\ y_{sw} = (y_f - y_{i0}) \frac{\varphi - \sin \varphi}{2\pi} + y_{i0} \\ z_{sw} = \Delta h_d \frac{1 - \cos \varphi}{2} + z_{i0} \end{cases} \quad (4)$$

式中 Δh_d 为期望的抬腿高度 (曲线弧顶高), 并且有

$$\varphi = 2\pi t / T_{sw} \quad (5)$$

式中: T_{sw} 为摆动相的持续时间, $t \in [0, T_{sw}]$ 为摆动运动的时间并在每次抬腿时刻重设为 0。开展 Adams 仿真, 得到腿部末端运动轨迹如图 3 所示。

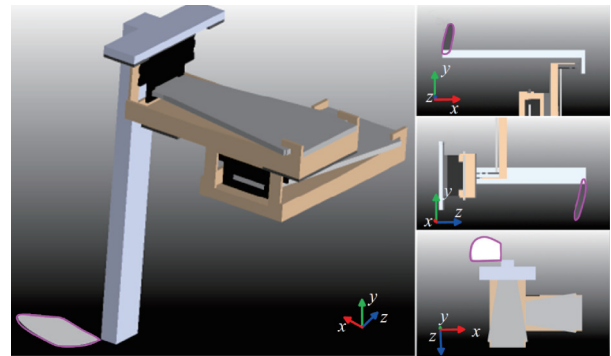


图 3 腿部 Adams 仿真

Fig.3 Adams simulation for the leg

3 多自由度腿的加工与测试

3.1 压电模块的加工与测试

压电模块由压电材料锆钛酸铅 (PZT-5H)、预浸料、玻璃纤维、包漆铜线和导电银浆组成, 如图 4 所示。整个驱动器加工流程分为材料制备与切割、胶合、释放 3 大步骤, 如图 5 所示。

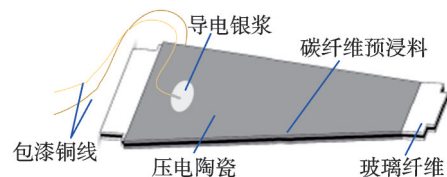


图 4 压电驱动模块

Fig.4 Module of piezoelectric actuator

(1) 准备材料与激光切割: 预先剪切好玻璃纤维、碳纤维预浸料、压电陶瓷片, 并设计好图纸; 利用高功率飞秒激光依次对 3 种材料进行切割; 压电

陶瓷片切割完成后用记号笔在压电片正极面上做标记,再人工分离出每一个压电片。

(2) 胶合:利用对准夹具将切割好的玻璃纤维和碳纤维预浸料进行定位装配,并按照一致的极性将压电片放入玻璃纤维的槽中。再将黏附好的3层结构在 120℃高温环境下加压热烘 90 min。热烘之前利用高温胶带将上下层胶封。

(3) 释放:热烘完成后的3层结构已经紧实,撕下高温胶带,按照图纸二次定位并用激光释放,释放完成后即可得到最终实际使用的压电驱动器。

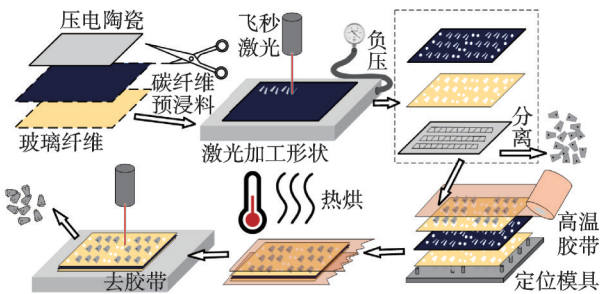


图 5 压电驱动器加工流程示意图
Fig.5 Schematic diagram of piezoelectric actuator processing flow

主体部分加工完成后,对其进行连接线。采用直径 0.04 mm 的直焊型紫铜漆包线,剪取合适长度后,用焊锡熔化端部表层,露出铜芯。再用导电银浆将线端粘接到正反面的压电片上,并放入烘箱在 80℃下热处理 30 min,使银浆完全固化。

驱动模块对于机器人的运动性能具有重要影响,因此需要对其进行检测。打开压电驱动测试仪器和控制上位机,将仪器一个通道的两路输出共地,正极分别连接到铜线的两个端口。采用两路相位差为 180°的 300 V 正弦交流电,观察驱动器的工作状态,如图 6 所示。由于激光切割以及组装过程中可能会产生残次品,表现为运动位移小(700 μm

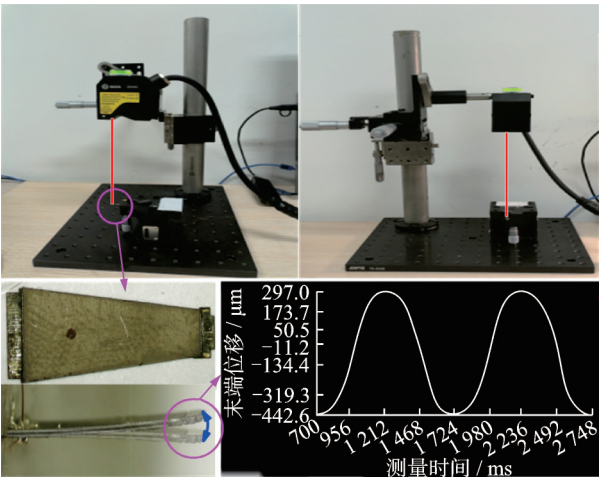


图 6 压电驱动模块测试
Fig.6 Piezoelectric drive module test

以下)、运动不顺滑(正弦曲线不光滑)、有裂纹(力的传递性变差)、有火花(正反两面短路)、不对称(两面摆动位移相差3倍以上)。因此,通过测试可以选择运动性能较好的驱动器。将驱动器利用图 6 中的激光测距仪进行测量,可以得到如图 6 所示的驱动器端部的位移变化,可以看出运动位移达标,摆动顺滑,基本可以满足使用要求。

3.2 单微角运动模块的加工与组装

单自由度运动模块的加工流程主要包括背胶、激光切割、胶合和释放 4 个步骤,如图 7 所示。

(1) 背胶:为实现聚酰亚胺薄膜(PI膜)与碳纤维的贴合,需将热熔胶平整粘贴在碳纤维板背面,粘贴后需用刮板将气泡排除,防止影响紧密结合的效果;并在 160℃且真空加压的状态下,持续 5 min。

(2) 激光切割:将碳板、PI膜分别先后置于加工平台,并利用空气压缩机抽取负压,使其紧密贴合在平台上;根据图纸,使用高功率飞秒激光对碳纤维板材进行结构的去材制造。

(3) 胶合:利用对准夹具将碳纤维板-PI膜-碳纤维板进行定位装配;稍加贴合后取出,置于热板上加温加压(220℃、5 min),使 3 层结构紧密贴合;接着利用图纸和显微图像完成二次定位后,进行激光切割释放。

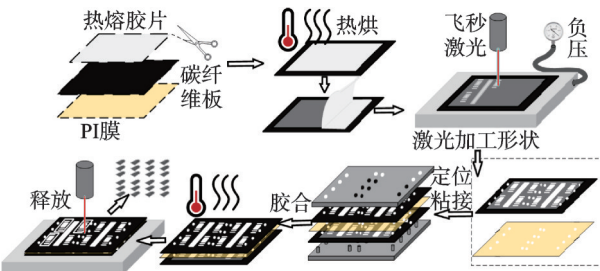


图 7 单自由度运动模块加工流程示意图
Fig.7 Diagram of single-DOF motion module processing flow

加工后的微角运动模块在组装之前是二维平面的形式,如图 8 右侧部分所示。通常利用人工手动装配从二维平面结构折叠成三维结构,这是在样机开发阶段最为简便的方法,但由此带来的装配误差影响着运动平台的精度和性能。为保证组装效果,需要设计限位结构,以便对齐直角部位,如图 8 部分Ⅲ上端所示的槽可以固定压电模块端部的凸起,并且利用显微镜观察,确保结构为直角之后,再等待胶水干燥固定成型(可行性实验完成后,后续大量的组装可采用设计模具的方式,提高装配一致性)。根据放大机构的运动学分析,理论上输出杆可以达到±30°的摆动角度。由于装配和驱动器性能误差的存在,允许一定的误差,若最终组装完成

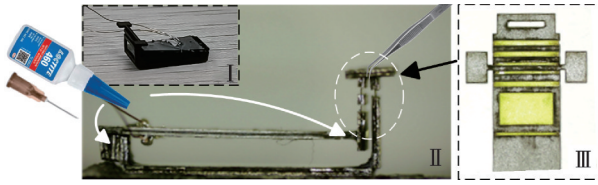


图 8 单自由度运动模块组装

Fig.8 Single-DOF motion module assembly

的摆动幅度可以达到单侧 29° 以上,总的摆角可达 50° 以上,认为满足运动要求。

装配时,首先利用镊子将如图 8 部分 III 所示的二维平面折成“n”字形,如图 8 部分 II 所示,折叠时确保直角垂直后,用 4.5 号针头蘸取强力瞬干胶均匀涂于缝隙处,用镊子保持“n”字形的夹紧,直到胶水凝固。同理,平台前端和末端以及和压电片的连接处,也采用镊子保持垂直,涂胶完成后确保凝固成型再释放。利用该组装方式,一个单自由度运动模块被粘结为一个整体,其中包含压电驱动器,无需组装完成机器人整体之后再连接驱动器,从而便于装配,并且单个自由度的模块可以独立调整。将多个单自由度运动模块组装为一个机器人整体之后,当某部位发生损坏时,只需利用解胶剂溶胶拆卸后,更换对应的单自由度模块即可,降低了维修成本。

3.3 单微角运动模块与多自由度腿的测试

固定驱动电压频率为 1 Hz,改变驱动电压幅值,测试了微角运动模块输出角度的 6 组数据,如表 1 所示,分别记录了不同电压下单侧摆动的最大角度和总的摆动角度。此处测试的对象是加工、组装效果较好的 9 mm 压电驱动器长度的单微角运动模块,测试目的是分析角度随电压的变化关系,便于后续的仿真等效(压电驱动器的长度和性能差异、组装效果差异和 PI 膜厚度的差异,会使得不同微角运动模块的输出角度产生差异)。

表 1 驱动电压幅值与最大角度关系

Table 1 Relationship between amplitude of driving voltage and the maximum angle

电压/V	300	250	200	150	100	50
单侧/ $^\circ$	44.5	38.5	35.5	26.5	15.5	9
总角/ $^\circ$	67	63	54	41	21	13

由表 1 可知,当驱动电压幅值增大时,微型角运动平台输出的最大角度增大,但不是线性关系,200 V 相较于 300 V,电压增大了 1.5 倍,输出角度增大了约 1.25 倍。由于微角运动模块组装和压电模块性能的原因,单侧最大角度与总的最大角度并不是严格的两倍关系。

利用显微镜测量,如图 9(a,b)所示,此单自由

度运动模块摆动输出达到了 58.5° ,基本满足运动要求。在此基础上,可以对单自由度运动模块、驱动模块和支撑模块进行组合,并利用胶水粘结,形成二自由度腿,即如图 1(e)中形式 1 或形式 2 所示。对二自由度运动进行测试,用相机记录结果如图 9(c~f)所示,其中图 9(c,e)所示为迈腿角度,可达 52.7° ,图 9(d,f)所示为抬腿角度,可达 47.9° 。相较于摆腿,抬腿角度较小的部分原因是串联单微角运动模块导致其负载的增大,由于平地测试,抬腿幅值不需要太大,因此基本满足后续运动需求。

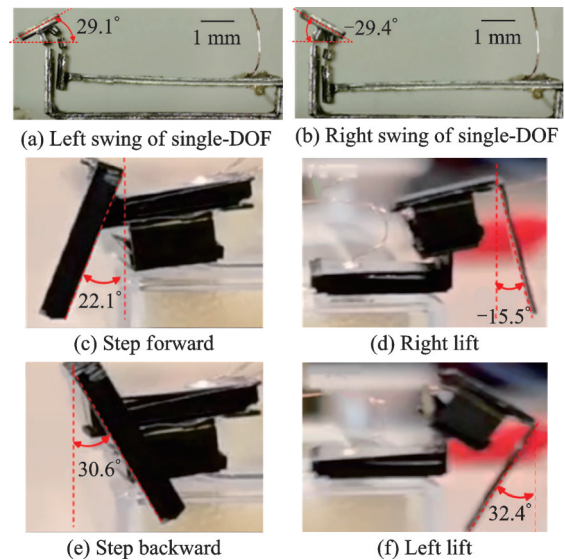


图 9 单自由度运动模块和二自由度腿运动测试

Fig.9 Tests of single-DOF motion module and two-DOF leg motion

整个运动过程中,抬腿角度和迈腿角度随时间的变化如图 10 所示,在取点有限的情况下以及测量误差允许的范围内,机器人单腿抬起和迈步的角度变化曲线与施加电压波形类似,均近似为正弦曲线,运动频率为施加的电压频率 1 Hz。根据单腿结构中腿长 l 为 14 mm、抬腿的单侧最大角度 α 为 32.4° 以及迈腿的单侧最大角度 β 为 30.6° ,可计算得到抬腿高度 h 、运动步距 s 为

$$\begin{cases} h = l - l \cos \alpha \\ s = l \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

计算得抬腿高度为 2.17 mm,运动步距约为 7.12 mm。腿静止时足尖着地位置为原点,腿迈步方向为 x 轴,腿抬起水平方向为 y 轴,竖直向上为 z 轴,一个周期内单腿足尖运动轨迹如图 10 所示(此时仅对单腿的性能测试,不涉及步态,采用如图 10 所示的压电陶瓷驱动电源,将幅值 300 V,频率 1 Hz,相位差 180° 的正弦电压施加到压电驱动模块的两面,并分别施加给两个单微角运动模块,由于电压同时连续产生,因此抬腿和迈腿运动模块同时同频受到控制)。

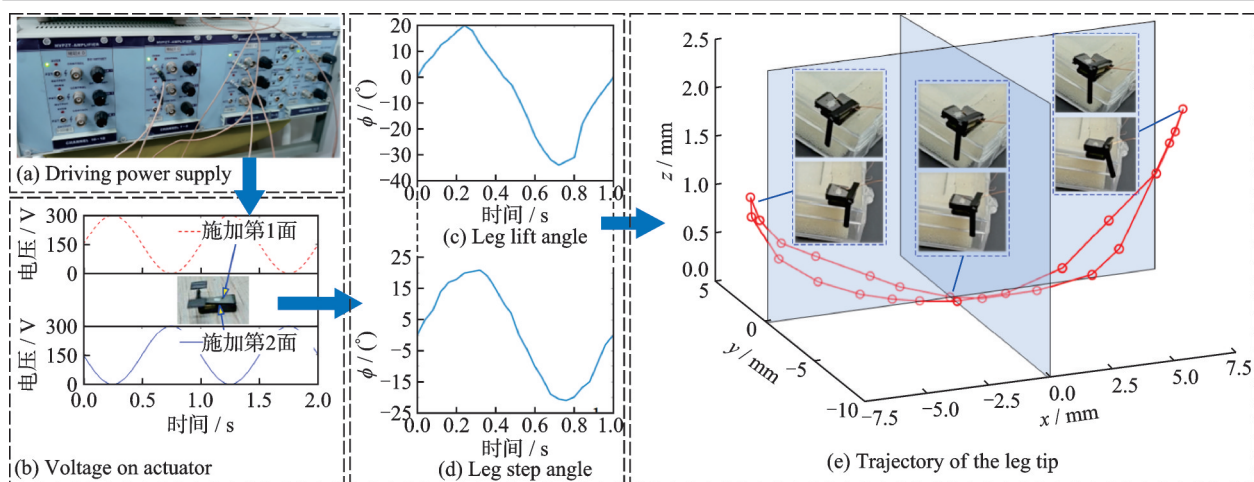


图10 单腿测试的整个运动过程

Fig.10 Entire movement process of the single-leg test

4 微爬行机器人装配与运动测试

4.1 机器人的整体装配

在完成机器人单腿结构的装配后,将单腿用胶水固定于机器人基板上,如图11所示。为防止在装配过程中人为原因导致驱动器的损坏,利用仪器再次测试驱动器能否正常工作,确保驱动器未损坏后,完成整个机器人的装配。根据图1所示的模块化思路,腿部的多种组合方式使得整体装配可以有多种形式。此处利用串联二自由度运动模块、驱动模块、支撑模块组合,设计了水平结构双放大形式的腿部,如图11中的单条腿部组装所示,再结合支撑结构,构建了水平双放大结构的模块化微爬行机器人。

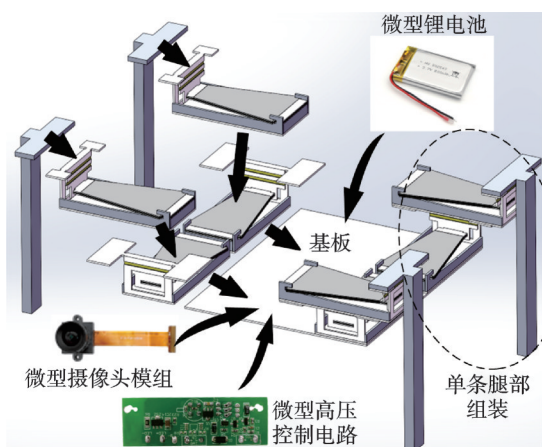


图11 模块化机器人整体装配示意图

Fig.11 Diagram of modular robot overall assembly

微爬行机器人的具体组装过程如图11所示,将双自由度运动模块组装完成后,安装一个长杆状的支撑腿。将两条腿以镜像的关系安装在基板的角,用镊子和限位结构确定位置,用强力瞬干胶粘结,另外两条腿与已安装的两条又构成镜像关

系。最后,还可以将电路板和摄像头搭载在基板上,实现控制和传送图像的功能。

4.2 步态规划

Trot步态是四足机器人运动常用的步态之一,该步态适用于中低速跑动,具有较大的运动速度范围,并且在中等速度下Trot步态具有最高的能量效率。Trot步态的特征是对角的两条腿成对运动,即腿1和腿3为一组,腿2和腿4为一组,理想情况下对角腿同时抬起并同时着地。Trot步态同样具有左右对称性,各腿的相位差为

$$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0.5, \varphi_3 = 0, \varphi_4 = 0.5 \quad (7)$$

理论上Trot步态的占空系数 ρ 可以取 $0 < \rho < 1$ 中任意值,以 $\rho = 0.5$ 为分界,当 $\rho < 0.5$ 时存在四足腾空相;当 $\rho > 0.5$ 时则存在全支撑相,其时序图如图12所示(T 为周期)。

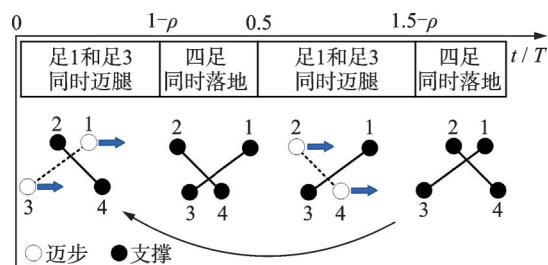


图12 具有全支撑相的Trot步态时序图

Fig.12 Trot gait timing diagram with full support phase

在Adams中对整体样机进行步态仿真模拟,由于驱动器以悬臂梁结构进行上下摆动,类似于固定端为轴心、驱动模块的长度为半径的小幅转动。为简化建模,减轻仿真计算成本,同时保留压电运动的基本特征,对压电驱动模块的逆压电效应采用正弦式摆动等效。如图13(a)所示的4条曲线分别表示一个周期下施加给腿1和腿3的抬腿、腿1和腿3的迈腿,腿2和腿4的抬腿、腿2和腿4的迈腿4对压电片的驱动信号时序变化图,左侧坐标为应输

入的电压幅值,右侧坐标对应为仿真时采用的正弦式摆动的幅值,根据 Trot 步态可知,此处仿真采用 $\rho = 0.75$ 的占空系数。得到各个时刻的结果如图

13(b~e)所示。得到 Adams 中的足部运动轨迹如图 13(f)所示,从上到下依次为 x 、 y 、 z 3 个方向的位移在一个周期内的变化量。

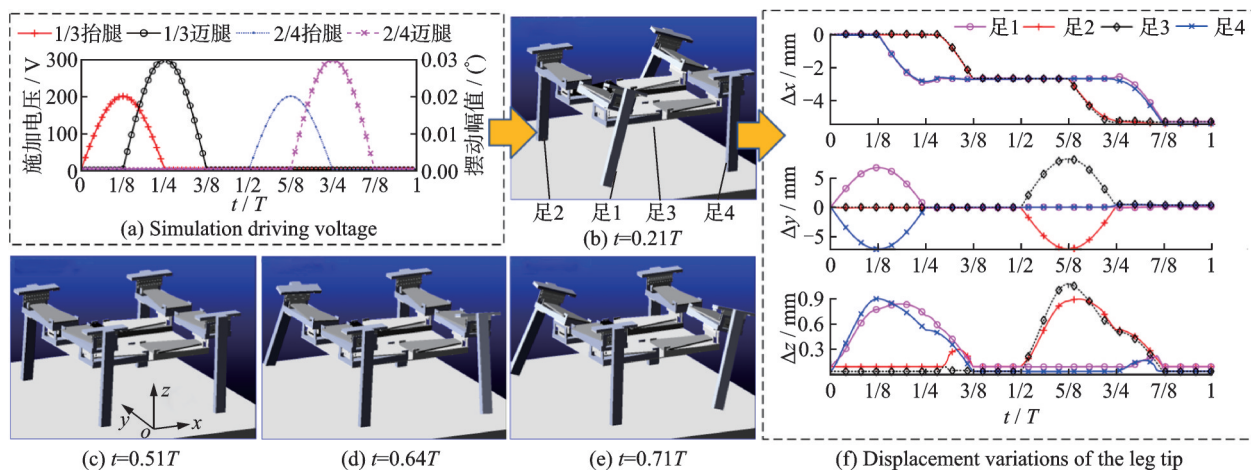


图 13 样机进行步态仿真模拟

Fig.13 Prototype simulated by gait simulation

4.3 测试平台

为了分析微爬行机器人的运动能力,搭建了机器人运动测试平台,主要包括控制部分和运动记录部分,如图 14(a,b)所示。运动记录部分是利用高速相机进行录像记录并捕捉微爬行机器人运动过程的瞬态,从而记录机器人各时刻的运动。为了更加方便地表征机器人的运动位移,采用 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的测量板作为机器人的行走地面,测量机器人的爬行距离(测量板每个格子的长宽均为 1 cm ,测量精度为 1 mm),结合高速相机实时图像信息,可以计算出微机器人的爬行速度,如图 14(a)所示。

压电驱动器需要交变信号的高压电控制,机器人运动时用到的高压电发生装置是预加载功率压电执行器,如图 10(a)所示的驱动电源,驱动电源与上位机之间使用 USB 接口连接,如图 14(a)所示,可以设置输出电压的波形、幅值、频率、偏置电压和相位角等。实验中,偏置正弦交变电压的幅值为 300 V ,对单个驱动器的作用如图 10(b)所示。由于驱动器电压同时连续产生,因此将腿 1~腿 3 和腿 2~腿 4 两组压电片的驱动相位相差 180° ,形成占空系数 $\rho = 0.5$ 的 Trot 步态,对 8 个压电驱动器作用如图 14(a)所示。根据 Trot 步态,两个对角腿为 1 组(即第 1 条和第 3 条腿的抬腿连接 C-A 控制区,迈腿连接 C-C 控制区;第 2 条和第 4 条腿的抬腿连接 C-B 控制区,迈腿连接 C-D 控制区),施加相位差为 180° 的电压。

利用测试线将具有不同信号的驱动电压从各控制区中引出,将测试线的鳄鱼夹固定在测试台面上之后,分别对应夹持标有各功能标签的漆包铜线,

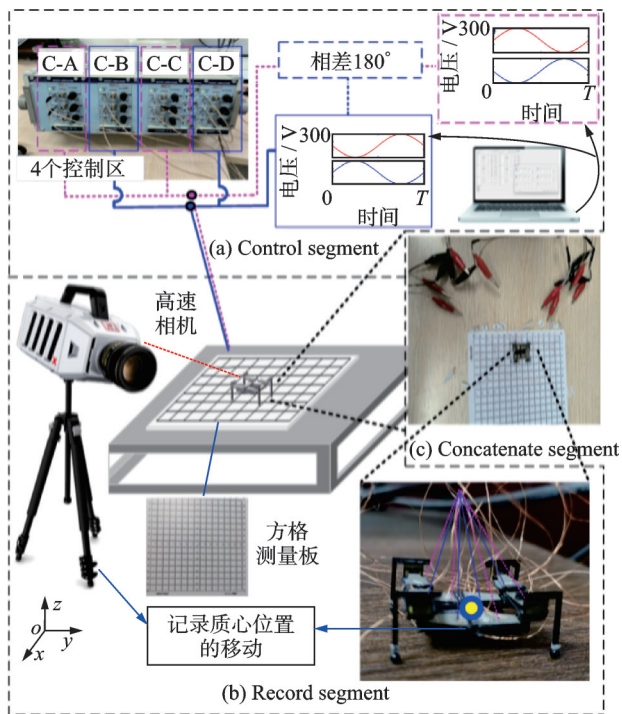


图 14 测试平台搭建

Fig.14 Test platform construction

并将机器人置于初始位置,且注意保持铜线松弛。

4.4 运动测试

对水平结构双放大形式的微爬行机器人样机在空载条件下进行测试,电压频率为 1 Hz ,机器人在 11.3 s 内爬行的起点位置和终点位置如图 15(a,b)所示,此时机器人爬行了 25 mm ,机器人爬行速度为 2.21 mm/s 。机器人质心的运动轨迹如图 15(c)所示(开环条件下,受装配精度和线缆干扰等影响,其运动轨迹不是一条笔直的直线)。机器人在该时间段内不同时刻的爬行状态如图 15(d~g)所示。

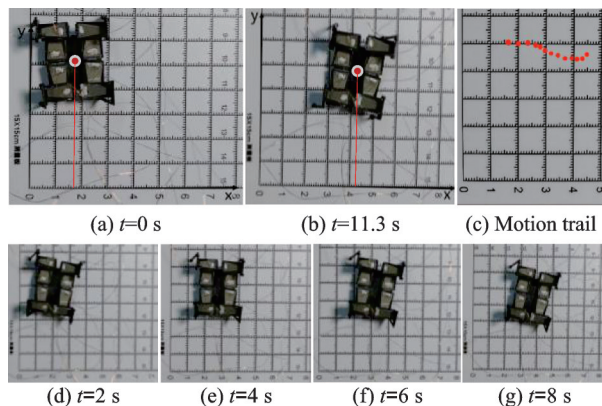


图15 微爬行机器人样机运动测试效果

Fig.15 Effect of motion test on the prototype of micro-crawling robot

保持驱动电压的幅值 300 V、偏置值 150 V 不变,改变电压频率,测量 0.5、1、2、5 和 10 Hz 这 5 种不同电压频率下微机器人的爬行位置随时间的变化。在机器人爬行过程中,由于装配误差,4 条腿存在一定程度的尺寸差异,并且运动后期会受到线缆的干扰,机器人不能严格按照直线行走,实际测量的爬行位移是机器人运动路程在 x 方向上的投影,因此机器人在实际爬行时笛卡尔坐标下的速度大于此时计算的速度(但是此处只关注 x 方向上的有效前进位移分量)。这种投影计算的方式既为了便于测量,又可以表征机器人运动的稳定性。

当驱动频率为 0.5 Hz 时,机器人运动的速度约为 1 mm/s,近似于图 16 中斜率 k 为 1 的虚线,其位移-时间曲线呈“锯齿状”,这是由于 0.5 Hz 的低频条件导致机器人腿部完整运动周期为 2 s,大于采样周期。当频率为 1 Hz 时,机器人 12 s 内的爬行位移为 30 mm,平均速度为 2.5 mm/s,与前述 1 Hz 下 2.21 mm/s 的测试结果基本一致(受线缆、摩擦和运行时间等影响,两次测试速度不会完全相同)。

当驱动频率为 2 Hz 时,机器人的平均速度为 2.75 mm/s,前期速度较快(前 4 s 的曲线在斜率 $k=5$ 的虚线以上),后期速度减慢。这种现象主要是由于空载机器人运动频率的提高使其步伐不稳健,增大了振动的影响,在光滑的测试板上更容易产生打滑。同时,运动位置的变化使得线缆的质量分布和张力的状态发生变化,更进一步加剧了打滑现象。这种诱因在 5 和 10 Hz 时的运动效果中表现得更为明显。

在前 3 s 良好的初始位姿和松弛的线缆张力状态下,机器人运动位移达到 37.5 mm 时,5 和 10 Hz 频率下分别用时 3、7.5 s,速度为 12.5 和 5 mm/s。然而,后续机器人单周期步态初始位姿的不稳定和线缆的聚集对运动造成了极大的影响,使机器人运

动轨迹偏移较大或原地踏步。另外,4 条腿的装配一致性差带来的运动误差在高频下被放大,是导致轨迹偏移的重要原因。

由图 16 中前 3 s 可以看出,随着驱动频率的提高,机器人的摆腿频率加快,运动速度逐渐增大。然而前 3 s 的运动效果是建立在良好的初始状态上的(线缆松弛使影响小、位姿稳定使误差积累少),由于随着高频运动导致状态快速改变,且加剧放大了装配带来的误差,因此 5 和 10 Hz 频率下的机器人后期运动形态变差。这主要体现在本体稳健性变差(高频振动不打滑)和抗干扰变弱(受线缆影响小)两个方面,运动形态量化体现在图 16 中的速度变化。根据斜率可知,5 和 10 Hz 跨越 3 个速度区域,速度变化较大,因此整个运动过程速度的不稳定现象更明显;0.5 Hz 速度稳定,但较为缓慢;对于 1 和 2 Hz,其中 1 Hz 速度变化更小,运动曲线更平滑,运动趋势保持得更好。因此综合来看,从速度变化的角度,电压频率为 1 Hz 时,机器人爬行效果较好。

高频受困和不稳定现象的产生为后续机器人版本的优化设计提供了 3 个方面的改进路线:

(1) 优化腿部结构,使其能够有效吸收高频振动带来的冲击和噪声,例如,改变运动模块的布置方式。

(2) 从微观优化足部结构,增大其向前运动时的摩擦力,从而增强机器人抵抗线缆等干扰的能力。

(3) 采用直径更小的线缆,或将高压电路和电池集成到机器人上,减轻线缆质量分布和张力的影响。

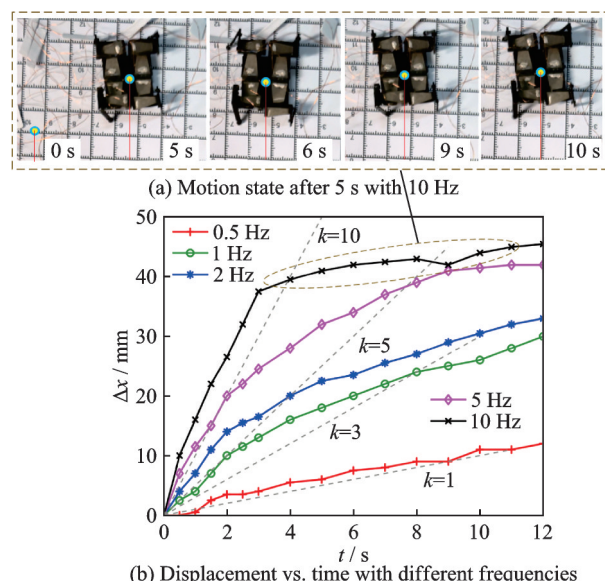


图16 不同频率下位移随时间变化的关系

Fig.16 Relationship between displacement and time at different frequencies

微爬行机器人在实际应用中应具有独立运动和自主决策等能力,因此需要集成电池、电路以及多源传感模组,这要求机器人具有一定的负载能力,所以需要测量微爬行机器人携带负载时的运动能力。无负载时机器人本体质量为 1.784 g,通过搭载垫片、螺母模拟电池、电路以及传感负载,分别测试了携带 1.072、1.461 和 2.237 g(目前电源、电路集成后的总质量可做到 1 g 左右,进一步集成传感模组后的总质量可做到 2 g 左右)3 种不同负载下的运动情况。3 组测量均采用 300 V、频率 1 Hz 的偏置正弦交变电压。携带 1.072 g 负载时机器人的运动如图 17(a)所示,此时机器人的爬行速度为 4.7 mm/s,相比空载 2.5 mm/s 提升了 88%,该现象是由于在负载的作用下机器人与地面间的摩擦力增大从而减弱了足端的滑动,增大了摩擦作用的有效行程。因此在适当负载下的低频运动会产生速度提升的现象。携带 1.461 g 负载机器人的运动如图 17(b)所示,机器人爬行速度为 3.8 mm/s,相较 1.072 g 负载增加了 36%,速度衰减了 29%。携带

2.237 g 负载的运动如图 17(b)所示,机器人爬行速度为 2.2 mm/s,由于机器人受力导致腿部变形,抬腿幅度明显变小,运动效果变差。

负载实验结果为本文模块化微爬行机器人在刚度和承载能力方面的版本优化设计提供了经验和思路,主要体现在 3 个方面:

(1) 优化腿部材料和结构,减轻腿部受力变形,如采用交叉编织形式的碳纤维板代替单一方向的碳纤维板,采用工字形微结构改进支持模块。

(2) 改变模块化布局,如将本文水平结构双放大的构型改为采用竖直结构双放大形式的布局。

(3) 增强各模块之间的联系,如腿、基板等支撑模块设计限位结构,使各模块之间粘接牢固,且能够控制弯曲坍塌的极限形态。

5 结 论

本文提出了一种基于压电驱动模块化多足式微爬行机器人,完成了整体结构设计、关键模块设计与加工、机器人的装配和测试,具体研究如下:

(1) 提出了模块化微爬行机器人的整体设计方案,将模块根据功能划分为微角运动模块、压电模块和支撑模块 3 种类型,可由单微角运动模块实现两自由度腿,再实现 4 条腿,最终组合形成整机。

(2) 3 种类型的模块具有独立且完整的加工流程,详细介绍了压电模块、微角运动模块的加工和组装流程,以及整机的组装方式。

(3) 对压电模块,微角运动模块进行了实物测试,其结果验证了加工组装的模块能够满足运动要求。

(4) 对于腿部运动研究,基于 Trot 步态分析了腿部末端的轨迹规划,针对水平结构双放大形式的微爬行机器人,利用软件 Adams 对单条腿和整机的运动步态进行了仿真,为样机控制奠定基础。

(5) 搭建了微爬行机器人测试平台,完成了水平结构双放大形式的微爬行机器人样机,开展了机器人运动测试,分别测试了不同频率,不同负载下的运动状态。在 300 V、1 Hz 交流电驱动下,负载 1 g 时机器人的速度可达 4.7 mm/s。

综上所述,本文提出的基于压电驱动的模块化微爬行机器人设计方案具有显著的优势和应用潜力。本文给出了一种水平结构双放大机构的微爬行机器人的实物测试,后续可以进一步优化并开展其他模块化构型的实物加工组装和测试。另外,2 g 左右的负载为后续携带电源、控制电路和摄像模组等进行脱线运动奠定基础。未来可以进一步搭载传感器脱线独立运动,探索其在探测检修、灾难救

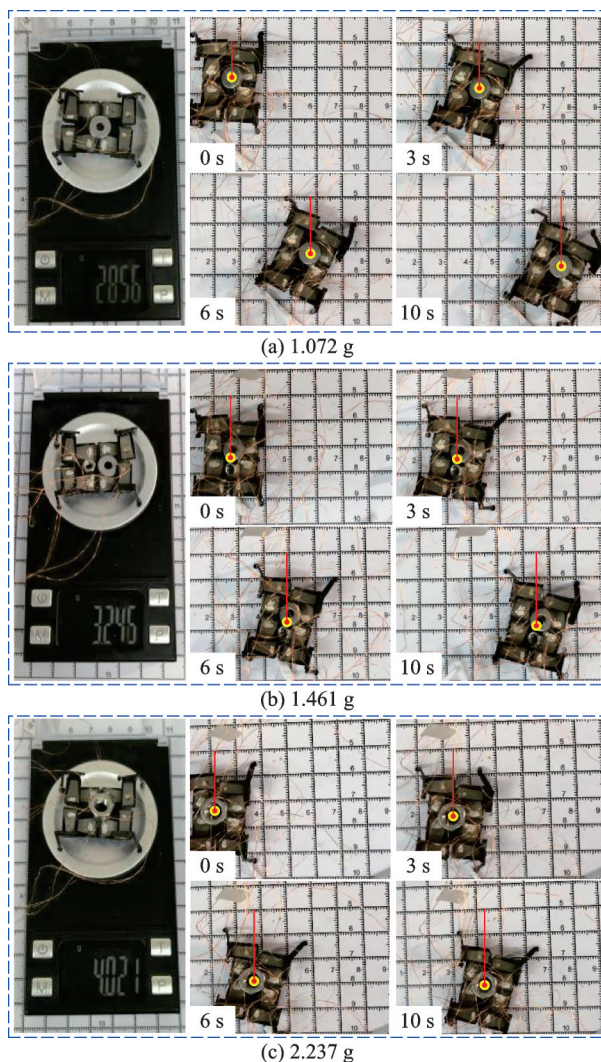


图 17 机器人负载行走测试

Fig.17 Load walking tests for the robot

援和军事侦察等领域的应用前景,并不断完善和优化其设计方案以提高其整体性能和可靠性。

参考文献:

- [1] LI Jing, DENG Jie, ZHANG Shijing, et al. Developments and challenges of miniature piezoelectric robots: A review[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(36): 2305128.
- [2] FIROUZEH A, ROBOGAMI P J. A fully integrated low-profile robotic origami[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2): 021009.
- [3] XU Yi, JIN Yanzhou, ZHANG Weitao, et al. Design and optimization of a miniature locust-inspired stable jumping robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(8): 4673-4680.
- [4] KALN M A I, AYGUL C, TURKMEN A, et al. Design, fabrication, and locomotion analysis of an untethered miniature soft quadruped, SQUAD[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 3854-3860.
- [5] BANDARI V K, SCHMIDT O G. System-engineered miniaturized robots: From structure to intelligence[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(10): 2000284.
- [6] 曾潇丰, 尹灿辉, 刘青, 等. 昆虫级微型爬行机器人的研究综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(3): 387-406.
ZENG Xiaofeng, YIN Canhui, LIU Qing, et al. Research review of insect-class micro-crawling robot[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 56(3): 387-406.
- [7] TANG Chao, DU Boyuan, JIANG Songwen, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale[J]. *Science Robotics*, 2022, 7: 8597.
- [8] LI Jing, DENG Jie, ZHANG Shijing, et al. An untethered tripodal miniature piezoelectric robot with strong load capacity inspired by land motion of seals[J]. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(1): 85-96.
- [9] ASKARI M, UGUR M, MANKAM N, et al. Control and study of bio-inspired quadrupedal gaits on an underactuated miniature robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2023, 18(2): 026004.
- [10] JI Xiaobin, LIU Xinchang, CACUCCILOLO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37): 6451.
- [11] 胡冰蕊, 张欣宇, 付裕. 基于MFC压电纤维复合材料的智能小翼驱动性能研究[J]. *航空兵器*, 2023, 30(2): 53-58.
HU Bingrui, ZHANG Xinyu, FU Yu. Research on driving performance of intelligent winglet based on MFC piezoelectric fiber Composite [J]. *Aeronautical Weapons*, 2023, 30(2): 53-58.
- [12] BAISCH A T, WOOD R J. Robotics research[M]. Berlin, Germany: Springer, 2011: 715-730.
- [13] OZCAN O, BAISCH A T, WOOD R J. Design and feedback control of a biologically-inspired miniature quadruped[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo, Japan: IEEE, 2013: 1438-1444.
- [14] BAISCH A T, OZCAN O, GOLDBERG B, et al. High speed locomotion for a quadrupedal microrobot [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(8): 1063-1082.
- [15] JAYARAM K, SHUM J, CASTELLANOS S, et al. Scaling down an insect-size microrobot, HAMR-VI into HAMR-Jr[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, France: IEEE, 2020: 10305-10311.
- [16] KABUTZ H, JAYARAM K. Design of CLARI: A miniature modular origami passive shape-morphing robot[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(12): 2300181.
- [17] 高煜斐, 周生喜. 一种压电驱动的三足爬行机器人[J]. *力学学报*, 2021, 53(12): 3354-3365.
GAO Yufei, ZHOU Shengxi. A piezoelectric driven three-legged crawling robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Mechanics*, 2021, 53(12): 3354-3365.
- [18] 何世界, 吴医博, 周生喜. 一种谐振式压电爬行机器人的设计与实验[J]. *力学学报*, 2023, 55(9): 1983-1999.
HE Shijie, WU Yibo, ZHOU Shengxi. Design and experiment of a resonant piezoelectric crawling robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Mechanics*, 2023, 55(9): 1983-1999.
- [19] ZHENG Mingjie, WANG Dongkai, ZHU Dekuan, et al. PiezoClimber: Versatile and self-transitional climbing soft robot with bioinspired highly directional footpads[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(6): 2308384.
- [20] 李一帆, 张卫平, 邹阳, 等. 压电式微型仿生六足分节机器人结构设计与加工工艺研究[J]. *机械设计与制造*, 2017(S1): 213-216.
LI Yifan, ZHANG Weiping, ZOU Yang, et al. Structure design and machining technology of piezoelectric micro-bionic hexapod segmented robot[J]. *Machine Design & Manufacture*, 2017(S1): 213-216.
- [21] 夏祥峰, 张卫平, 赵佳欣, 等. 基于增强型基底压电驱动器的微型四足机器人的设计和制造[J]. *无人系统技术*, 2022, 5(3): 87-96.

- XIA Xiangfeng, ZHANG Weiping, ZHAO Jiaxin, et al. Design and manufacture of micro-quadruped robot based on enhanced substrate piezoelectric actuator[J]. Unmanned Systems Technology, 2022, 5(3): 87-96.
- [22] WU Guangping, WANG Ziyang, WU Yuting, et al. Development and improvement of a piezoelectrically driven miniature robot[J]. Biomimetics, 2024, 9(4): 226-242.
- [23] WHITNEY J P, SREETHARAN P S, MA K Y, et al. Pop-up book MEMS[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(11): 115021.
- [24] 张岩, 王晴, 康永霖, 等. 模块化自重构机器人关键技术综述及研究展望[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43(6): 602-612.
- ZHANG Yan, WANG Qing, KANG Yonglin, et al. Review on key technologies of modular self-reconfigurable robots[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(6): 602-612.
- [25] 陶广宏, 耿世雄, 赵嘉琪, 等. 模块化机器人结构设计及运动特性分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 45-52.
- TAO Guanghong, GENG Shixiong, ZHAO Jiaqi, et al. Structural design and kinematic characteristic analysis of modular robot[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2024, 52(5): 45-52.
- [26] 闵剑, 刘朝雨, 王江北, 等. 模块化软体机器人多模式运动分析[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 126-133.
- MIN Jian, LIU Chaoyu, WANG Jiangbei, et al. Multi-mode motion analysis of modular soft robot[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 126-133.
- [27] LU Xiang, XI Xiang, LU Kun, et al. Miniature ultra-light deformable squama mechanics and skin based on piezoelectric actuation[J]. Micromachines, 2021, 12(8): 969.
- [28] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 39-44.
- WANG Lipeng, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. Gait control strategy of hydraulic quadruped robot based on foot trajectory planning algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 39-44.
- [29] SAKAKIBARA Y, KAN K, HOSODA Y, et al. Foot trajectory for a quadruped walking machine[C]// Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications. Ibaraki, Japan: IEEE, 1990.

(编辑:陈珺)