

基于电子氟化液的光控软体跳跃机器人

周喆祈

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

随着科技的迅速发展, 光控软体机器人吸引了越来越多国内外研究者的兴趣。本文灵感主要来自最常见的果蝇幼虫的跳跃运动机制, 制备并提出了一种使用电子氟化液加入小型腔室封装后, 拥有跳跃运动能力的光控软体机器人器件。使用功率约为1 W的远程红外激光, 对封装了电子氟化液的腔室进行照射, 一段时间后, 由于内部液体气化为气体, 腔室内部体积迅速膨胀并使腔室整体发生形变, 从而产生较大的膨胀应力。通过这一膨胀应力, 软体机器人(长: 5厘米; 宽: 0.9厘米; 重: 0.75克)的两边磁铁间的距离会逐渐变大, 直到两边的磁铁无法吸附在一起, 软体机器人的头部与尾部迅速解开, 尾端会对基底进行快速、较大力量的拍打, 软体机器人在4秒的时间内, 能够跳跃至约40厘米高的位置。基于电子氟化液的光控软体跳跃机器人在智能运动器件、无线操控机器人领域拥有很大的应用价值, 本文提出的特殊结构的光控腔室制备方法也验证了连续激光热解技术用于制作小型柔软器件的可行性和便捷性。

关键词

光控, 电子氟化液, 跳跃运动, 软体机器人, 远程控制

Light-Controlled Soft Jumping Robot Based on Electronic Fluorinated Liquid

Zheqi Zhou

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 10th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

In the era of rapidly advancing technology, light-controlled soft robots have garnered increasing attention from researchers. Inspired by the jumping mechanism of gall midge larvae, this study proposes a light-controlled soft robotic device based on electronic fluorinated liquid that exhibits

remarkable jumping capabilities. When irradiated by a remote infrared laser (power: ~1 W) targeting the liquid-filled chamber containing electronic fluorinated fluid, the photo-responsive chamber undergoes rapid expansion and deformation within milliseconds, generating substantial expansive stress. Driven by this stress, the distance between the magnetic components (length: 5 cm; width: 0.9 cm; weight: 0.75 g) at both ends of the soft robot progressively increases, causing instantaneous disengagement between the head and tail sections. The subsequent forceful impact of the tail against the substrate surface propels the robot to achieve rapid jumping motion, reaching a vertical height of approximately 40 cm within 4 seconds. The developed light-controlled soft jumping robot demonstrates significant potential for applications in soft robotics and actuator systems. Furthermore, the proposed fabrication method for the photo-responsive chamber validates the feasibility and efficiency of continuous laser pyrolysis technology for manufacturing miniaturized functional devices.

Keywords

Light-Controlled, Electronic Fluorinated Liquid, Jumping Motion, Soft Robot, Remote Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,通过远程光控制器件运动的驱动方式在软体机器人领域获得了广泛关注,其独特的远程精准传热特性为软体机器人驱动提供了新的解决方案。通过将具有不同热膨胀系数的柔性薄膜材料进行巧妙组合与结构设计,许多研究人员已经成功制作出能够实现抓取[1]、爬行[2]、滚动[3]、跳跃[4][5],甚至是游泳[6]、飞行等多种运动模式的软体机器人。除此以外,通过将机械不稳定性策略加入软体机器人的结构设计中,这些光控软体跳跃机器人的运动速度还能够得到明显地提升。在此基础上,研究人员们进一步通过优化光热响应薄膜、湿度敏感薄膜和电活性材料的复合结构,制备出了许多具有优异运动性能的多功能远程操控型软体机器人[7]-[9]。然而,受限于轻量化和小型化的设计要求,现有光控软体机器人通常只能实现力量所需较小的运动行为,实现快速远程驱动的同时,提高器件的环境适应能力,增长器件使用寿命仍是迫切需要解决的问题。

在提升运动性能的研究中,研究者们尝试将柔性薄膜与磁性材料相结合以实现跳跃功能,但这种方式往往导致整体器件尺寸过大[10][11]。对于需要承载重物的大尺寸软体机器人,研究人员们大多都会采用刚性材料与柔性材料相互组合的设计方案,但这种设计方式通常会大大降低机器人的移动灵活性。相比之下,传统的气体驱动软体机器人虽然能较好地实现承载并搬运重物的功能,但其必须连接气动软管和相对尺寸较大的气泵装置[12],这严重限制了气体驱动软体机器人在复杂场景中的应用。通过对气泵充放气频率的操控,这些气体驱动的软体机器人可以完成包括物体抓取和定点运输在内的多种类型任务[13]。尽管气体驱动方式具有实时可控性高、环境适应性强和响应灵敏度优异等特点[14],但复杂的连接软管常常会导致整体结构笨重、移动不便等问题的出现。为克服这一限制,研发光控与气体驱动相组合的驱动方式已成为当前重要的研究方向。

最新研究表明,将光控驱动与气体驱动相结合的新型混合驱动方式,在软体机器人的研究中展现出独特优势[15]。这种混合驱动方式不仅保留了光控驱动的远程操控特性,还通过气体驱动显著提升了驱动效率和驱动应力,为开发高性能软体机器人提供了新的驱动方式。

2. 基于电子氟化液的光控软体跳跃机器人

2.1. 制备方法

该软体跳跃机器人的仿生设计借鉴了果蝇幼虫独特的弹跳机制，如图 1。研究发现，果蝇幼虫通过弯曲自己的身体，使首尾两边的微小毛发结合在一起，相互接触用于储存弹性势能，随后通过毛发的快速分离，以及尾部对地面的拍击作用，实现在空中进行翻转跳跃。基于这一生物力学原理，本研究突破传统光控软体机器人的结构设计范式，创新性地开发出一种新型光响应跳跃结构。利用远程光控触发气体驱动腔室的快速膨胀，实现了模仿果蝇幼虫的高效跳跃运动行为。

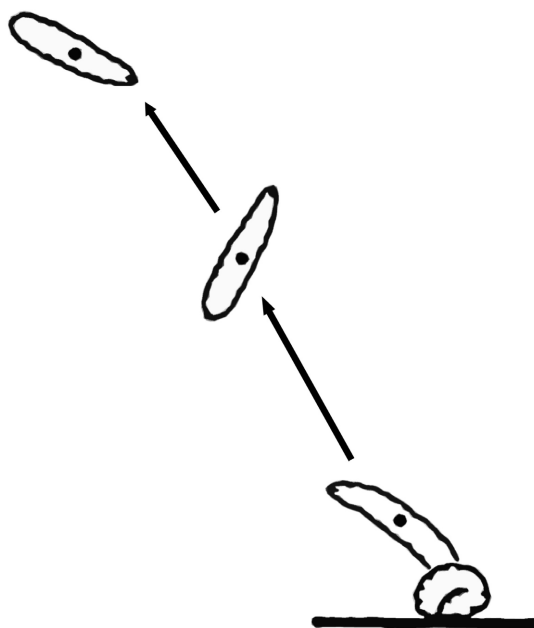


Figure 1. Jumping mechanism of drosophila larvae

图 1. 果蝇幼虫的跳跃运动原理图

在软体跳跃机器人的材料选择与制备过程中，主要对以下三个关键因素进行考虑：制作方式的简易性、材料的机械性能以及跳跃功能的实现要求。传统光控薄膜的溶液制备，通常需要混合多种化学试剂，部分材料甚至存在一定毒性，这不仅使制备过程复杂化，也使实验过程更加不安全。为此，本实验选用了具有优异耐高温特性和绝缘性能的聚酰亚胺薄膜，作为制作软体机器人身体使用的材料。经过对不同长度、宽度、厚度薄膜的跳跃可行性分析，最终确定采用长度为 50 毫米，宽度为 9 毫米，厚度为 0.25 毫米尺寸的薄膜制作。通过使用波长为 1064 纳米的激光对材料进行切割，可准确快速地加工出特定尺寸的矩形软体机器人身体。为实现类似果蝇幼虫的蓄能、释放并跳跃，在聚酰亚胺薄膜两端对称粘贴了两块小磁铁。这种设计使得整个器件经过人为弯曲后，能够由于两块小磁铁相互吸附作用，保持稳定弯曲，有效储存弹性势能。跳跃动作的触发则通过调整控制磁铁间距来实现：当间距较小时，磁铁间的吸力使整体结构保持弯曲闭合；当间距增大超过临界值时，磁力减弱导致结构无法保持稳定弯曲闭合，快速进行打开，通过尾部拍击地面，进行跳跃运动。考虑到要实现远程光控触发，创新性地将其中一块小磁铁集成于硅橡胶材质的气体驱动腔室内。当腔室受到光照时，腔内液体气化导致腔室膨胀，从而增大磁铁间距。这种将聚酰亚胺薄膜、小尺寸磁铁和硅橡胶气体驱动腔室三者有机结合的设计方案，不仅简化了制备流程，还实现了软体机器人的光控快速跳跃功能。如图 2，展示了该小型腔室的实物图。

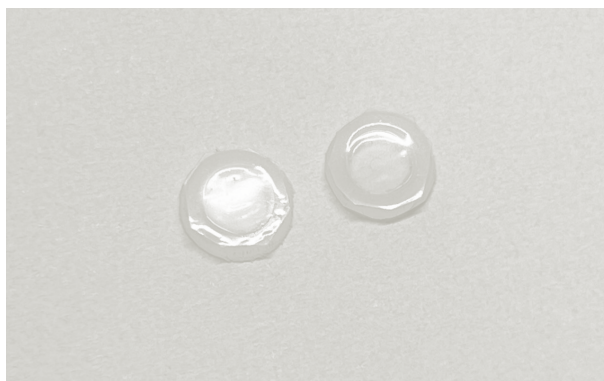


Figure 2. Schematic diagram of small chamber
图 2. 小型腔室实物图

软体跳跃机器人的制备过程采用连续激光热解加工和分层组装工艺。首先使用 1064 纳米激光雕刻机加工特定尺寸大小的软体机器人身体，在基底上依次铺设 0.1 毫米铝箔和 0.25 毫米聚酰亚胺薄膜，铝箔优异的导热性能可显著提升加工质量。激光参数优化为 1 W 功率、60%雕刻深度和 4k 精度，通过软件导入设计图案完成高精度激光切割。选用的 0.25 毫米的聚酰亚胺薄膜拥有适合的刚度、抗疲劳性、耐高温和绝缘特性。随后采用二氧化碳激光雕刻机(5 W 功率，150 mm/s 速度，1 毫米步长)在 2 毫米厚硅橡胶薄膜上加工腔室，以铝板为基底，重复雕刻八次后，可获得完整结构，并使用无水乙醇超声清洗 3 分钟去除激光雕刻残留在腔体表面的粉末，气体驱动腔室为小圆环结构，内直径为 8 毫米，外直径为 10 毫米，壁厚为 1 毫米。组装时，先在腔室下侧环面和一颗小磁铁的一侧都涂覆一层有机硅酮胶，小磁铁放置在圆环腔室中央位置，粘接至软体机器人身体的一端，在腔室上侧环面上粘贴一层 0.1 毫米厚的硅橡胶薄膜完成对腔室的封装。软体机器人身体另一端对称粘接极性相反的磁铁以实现手动弯曲后稳定吸附。将针管从侧面扎入腔室，抽真空后注入电子氟化液与黑色碳粉的混合溶液，软体跳跃机器人的制备就完成了，如图 3。



Figure 3. Picture of soft jumping robot
图 3. 软体跳跃机器人实物图

2.2. 激光加工技术

连续激光热解作为一种非接触式精密加工技术，在柔性小型器件制备领域展现出独特优势。本研究采用 1064 纳米连续激光雕刻机，在 2 毫米厚硅橡胶薄膜上实现高精度圆环腔结构的加工。加工过程中，

激光光束通过透镜聚焦后,在硅橡胶表面形成直径约 50 微米的光斑,通过精确控制激光功率和扫描参数,实现材料的局部精准热解。如图 4,当激光功率设置为 5 W、扫描速度控制在 150 mm/s 时,可获得边缘整齐、热影响区域宽度小于 100 微米的加工效果。针对圆环腔室结构设计的特殊要求,加工系统采用步进电机控制平台移动,配合激光束的移动进行雕刻,实现内直径为 8 毫米,外直径为 10 毫米,环宽 1 毫米的同心圆环结构加工。加工过程中,硅橡胶材料在激光作用下发生热解,被雕刻位置碳化化为粉末,主要产物为二氧化硅和碳化物,通过氮气辅助形成气流可有效清除加工残留粉末。



Figure 4. Schematic diagram of continuous laser pyrolysis processing technology

图 4. 连续激光热解加工技术示意图

该技术的创新性体现在三个方面:首先,通过优化激光功率实现了硅橡胶材料的选择性去除,实现对特定结构腔室的高效制作;其次,采用多次激光加工策略(每次去除深度约 0.2 毫米),有效控制了热量积累;最后,开发了专用的环形路径规划算法,确保加工轨迹的几何精度(圆度误差小于 20 微米)。与传统机械加工技术相比,该技术具有加工效率高(单个加工时间小于 10 分钟)、可加工复杂结构等优势。

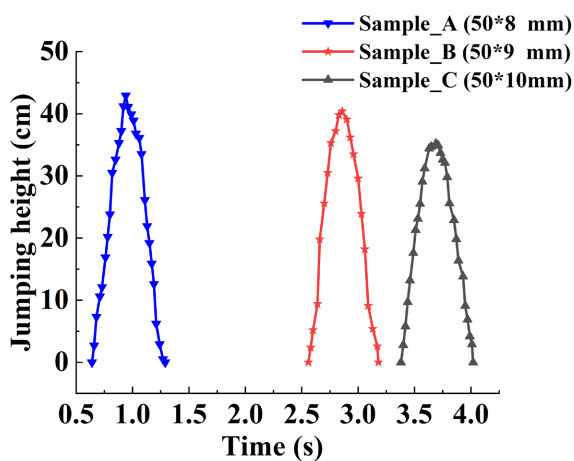


Figure 5. Analysis of jumping performance of 50 mm thin films with different width

图 5. 不同宽度的 50 毫米长薄膜跳跃性能分析

如图 5，对软体机器人器件的长宽比对跳跃性能的影响进行研究。当使用宽度更小的薄膜制作器件时，尽管通过 1W 激光照射，软体机器人的响应速度会变得更快速，跳跃高度有一定提高，但是软体机器人的弯曲应力会变大，有时经过弯曲后无法保持稳定弯曲状态。当使用宽度更大的薄膜制作器件时，软体机器人的响应速度会变慢，且跳跃高度也会降低。不仅如此，对软体机器人的长度也进行了实验测试，更长的软体机器人的响应速度会明显增长，更短的软体机器人则无法使用现有磁铁搭配保持稳定吸附。0 对比 0.1 毫米、0.25 毫米、0.5 毫米这三种厚度的聚酰亚胺薄膜，0.25 毫米厚的聚酰亚胺薄膜拥有相对适合的刚性和柔性。综上所述，使用激光雕刻技术制作长为 50 毫米，宽为 9 毫米，厚度为 0.25 毫米的聚酰亚胺薄膜制作软体机器人的身体是最佳的。

3. 实验结果分析

3.1. 磁铁尺寸影响

Table 1. Relationship between magnet diameter, thickness and mass
表 1. 磁铁直径，厚度以及质量的关系

磁铁序号	直径(mm)	厚度(mm)	质量(g)
1	4	0.5	0.051
2	4	1	0.098
3	5	0.5	0.068
4	5	1	0.151
5	6	0.5	0.115
6	6	1	0.221

本研究通过实验测试了不同尺寸磁铁组合对软体跳跃机器人运动性能的影响。分别选用直径 4 毫米、5 毫米、6 毫米，厚度 0.5 毫米、1 毫米的钕铁硼磁铁，以不同组合方式装配在聚酰亚胺薄膜两端。如表 1，首先对各规格磁铁的质量参数进行了测量和记录。实验发现，当任意一侧使用 0.5 毫米厚磁铁时，无论直径大小，均无法维持软体机器人手动弯曲后稳定弯曲的状态。将靠近地面侧定义为软体机器人的尾部，另一侧定义为软体机器人的头部。当头部使用 5 毫米*1 毫米，尾部使用 4 毫米*1 毫米的磁铁分别粘贴在软体机器人身体上时，虽然可实现基本跳跃功能，但由于磁吸力不足，会导致吸附不稳定，且头部质量过大，使跳跃高度大幅度降低。当使用 6 毫米*1 毫米尺寸的小磁铁用于制作软体机器人时，整体质量会比较大，不适合用于制作该类器件。

通过多次实验发现，采用双侧均为 5 毫米*1 毫米的小磁铁进行粘贴时，软体机器人展现出相对优异的运动性能。该小磁铁组合能够使薄膜经过手动弯曲后，保持较为稳定的弯曲状态。这一发现为软体跳跃机器人的磁力系统优化设计提供了重要依据，通过将最佳尺寸组合的小磁铁粘贴在聚酰亚胺薄膜的两侧，可以使软体跳跃机器人的性能最优化。

近年来，许多软体气动机器人也采用两边吸附小磁铁的方式完成跳跃运动，将小磁铁放置在气动软管控制的气囊身体两侧。在一般情况下，两边小磁铁吸附在一起，使身体弯曲，当使用气泵一次性注入大量气体时，磁铁间的气囊进行膨胀，使磁铁解开进行跳跃。但是，利用这一原理制作的软体气动机器人的跳跃高度往往非常低，一方面是因为气动软管的存在，限制了跳跃高度的提高，另一方面是因为气动软机器人的尺寸往往非常大，需要预留气体注入通道。因此，将适合的小磁铁搭配与气动腔室组合是一种提高器件跳跃性能的有效途径。

3.2. 腔室性能分析

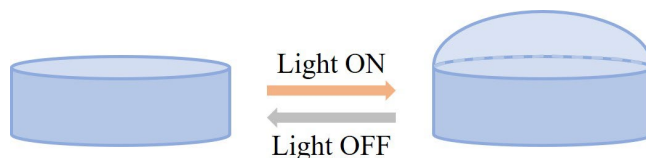


Figure 6. Schematic diagram of optical control chamber before and after laser irradiation

图 6. 光控腔室在激光照射前后变化的示意图

本研究旨在满足光控气动腔室的小型化需求，创新性地提出了一种创新的小型气动腔室加工方案。如图 6，该腔室具有独特的光控形变特性，能够在进行可逆的形态变换。其工作原理主要基于常见的光热转换机制：当特定波长的激光作用于腔室时，内部封装的功能性液体吸收光能并产生瞬时温升，促使液体发生快速相变转化为气态。这一相变过程导致腔内介质体积急剧膨胀，产生的气体在压力梯度作用下向腔室顶部区域聚集，从而推动磁铁上方的腔室结构产生显著的向上凸起变形，实现从左图初始状态到右图激活状态的形态转换。值得注意的是，该过程具有完全可逆性，当终止激光照射后，随着腔内气体温度的降低，气体重新液化为液体，腔室在弹性回复力作用下可完全恢复至初始的平面构型。

为了更加细致地分析该气动腔室的热力学特性，通过红外热成像技术系统研究了硅橡胶腔室在激光照射作用下的温度变化特性。如图 7，在持续 3 秒的激光照射期间，腔室表面温度呈现快速上升趋势，最高温度可达 115.7℃。而在激光关闭后的 2 秒冷却阶段，腔体表面温度呈现指数衰减特征，最终恢复至接近环境温度。将掺杂 20 纳米黑色碳粉的混合溶液，与未掺杂的纯 7100 电子氟化液进行对比，掺杂后的溶液具有显著增强的热响应性能。掺杂后的溶液能够实现更加快速的温度变化，整个加热 - 冷却循环周期可缩短至 5 秒内。这种增强的热转换效率特性为研制快速响应的小型软体机器人提供了重要的技术基础。

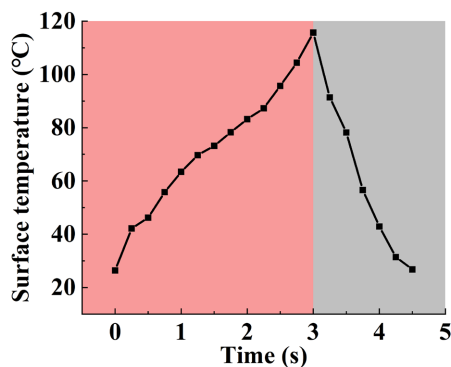


Figure 7. Surface temperature variation diagram of optical control chamber under 1 W power laser irradiation

图 7. 光控腔室在 1 W 功率激光照射下的表面温度变化图

3.3. 跳跃性能分析

当器件受到波长为 808 纳米的近红外激光照射时，腔内封装的相变液体迅速吸收热能，溶液温度不断上升，从液体气化为气体，这一过程使腔室产生显著的内部体积膨胀变化。随着腔室膨胀程度的增加，原本相互吸附的两块磁铁之间的间距逐渐增大。当这一间距超过临界距离时，磁体间的吸引力急剧减弱，导致软体机器人两边突然无法吸附在一起。此时，预先储存在结构中的弹性势能瞬间转化为软体机器人

的动能，驱动其实现快速的跳跃运动。整个能量转换过程遵循经典的力学原理，具有高度可控性和可重复性。

如图 8，清晰地展示了该器件的跳跃运动行为。在持续 3.22 秒的激光照射后，两边磁铁接触吸附，软体机器人尾部快速地拍打地面，在 3.23 秒时正式进入跳跃阶段，并在飞行过程中完成了多次完整的 360 度轴向旋转，最终在 3.73 秒时实现快速着陆。这种基于内部相变液体驱动气动腔室变形的机制，不仅简化了整体结构，同时也实现了软体机器人的快速高效运动，在软体机器人领域展现出广阔的应用前景。

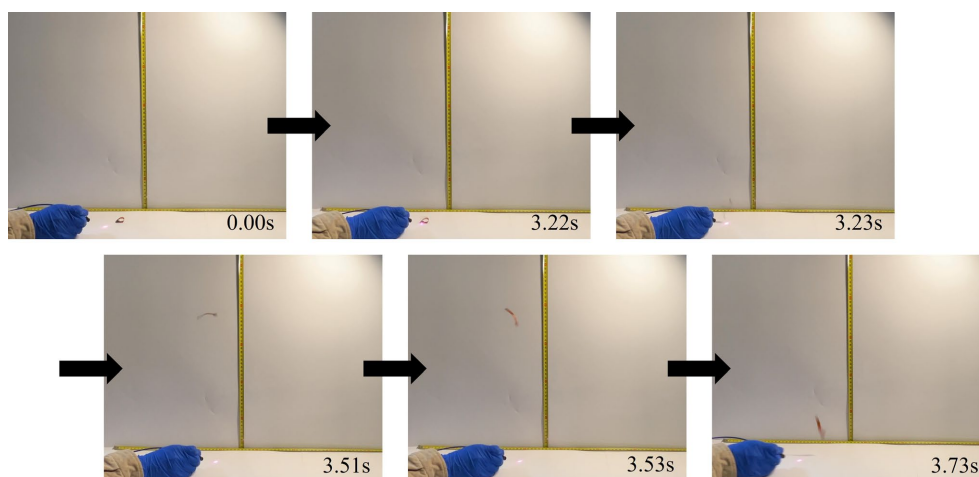


Figure 8. Photos of time-varying jumping behavior of soft robot

图 8. 软体机器人跳跃行为随时间变化的照片

如图 9，对软体机器人的跳跃高度与跳跃时间进行测量并记录，跳跃高度为每个时间点的软体机器人主体所在位置最低点的高度，使用公式：

$$v = \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)},$$

其中， h_1 为前一个时间点软体机器人所在最低点的高度， h_2 为当前时间点软体机器人所在最低点的高度， t_1 为运动到前一个时间点所需的时间， t_2 为运动到当前时间点所需的时间。可以计算出每个时间点，软体跳跃机器人的运动速度，由于软体机器人在空中进行 360 度翻转运动，整体跳跃高度会呈现稳定上升趋势，但是跳跃速度会随着软体机器人的实际运动状态而改变，受空气阻力及软机器人最低点的跳跃高度共同影响。

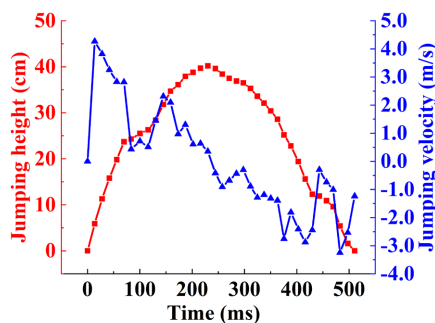


Figure 9. Jumping height and velocity of the soft robot

图 9. 软体机器人的跳跃高度与速度分析

3.4. 原理及重复性分析

灵感来源于果蝇幼虫的跳跃运动，该光控软体跳跃机器人主要是使用光控气动腔室进行驱动，当将软体跳跃机器人两边手动吸附在一起时，软体机器人人体内存在弯曲应力 $F_{\text{应}}$ ，磁铁间存在吸引力 $F_{\text{吸}}$ ，腔室膨胀力 $F_{\text{向上}}$ 。对软体机器人进行力学分析，当 $F_{\text{应}} + F_{\text{向上}}$ 小于等于 $F_{\text{吸}}$ 时，软体机器人保持稳定弯曲状态，不会自动打开进行跳跃。当 $F_{\text{应}} + F_{\text{向上}}$ 大于 $F_{\text{吸}}$ 时，软体机器人两侧的磁铁无法吸引在一起，导致软体机器人两侧打开，尾部拍打地面，器件开始跳跃。而一旦开始跳跃时，由于磁铁间的距离过大， $F_{\text{吸}}$ 会在非常短的时间内减小为 0，尾部向基底拍打的力 $F_{\text{拍}}$ 用于软体机器人的跳跃运动。同时，该运动还需要克服软体机器人自身的重量，整体才能进行向上运动做功，软体机器人的运动速度与跳跃高度直接由 $F_{\text{拍}}$ 与重力的差值决定。当软体机器人的重量越小时，软体机器人的跳跃高度会越高。

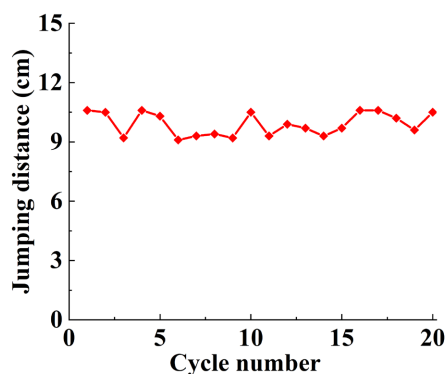


Figure 10. Repeatability analysis of jumping distance for soft robots

图 10. 软体机器人的跳跃距离可重复性分析

为了验证软体机器人的跳跃可重复性，将制作的软体机器人使用 1 W 的红外激光照射，每次照射 3.5 秒，然后冷却 10 分钟，手动弯曲后继续重复照射再冷却，如图 10，实验测试了 20 次循环下，软体机器人相对于初始起跳位置的水平跳跃距离的变化，实际测量了软体机器人落地后在基底上最后停留位置与初始位置之间的距离。如图 11，对 20 次循环下，软体机器人的跳跃高度稳定性进行了分析。实验结果验证了软体跳跃机器人拥有较长的使用寿命，且跳跃距离与跳跃高度保持相对稳定，进一步说明该研究中使用的软气动腔室能够广泛应用在需要频繁使用的软体机器人场景中。

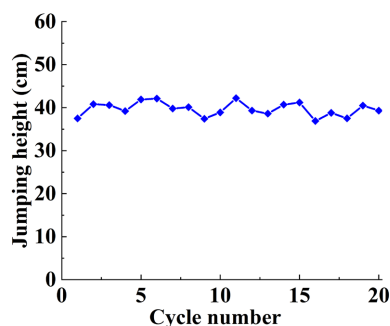


Figure 11. Repeatability analysis of jumping height for soft robots

图 11. 软体机器人的跳跃高度可重复性分析

与其他光控软体机器人进行对比，该光控软体机器人可以进行厘米级高度的跳跃，跨越更高的障碍

物, 且使用寿命相比于大多光控软体机器人来说已经进行了大幅延长。常见的光控软体机器人由于是使用热膨胀系数不同的薄膜组合制备而成, 薄膜表面非常容易在移动器件, 频繁使用过程中受到损失, 进而增加多次使用的成本, 该光控软体机器人由于身体为刚性较高的薄膜与气动腔室组合制作, 既具备了气动软体机器人的强环境适应性, 又能够在短时间内通过远程光进行驱动, 且制备方式较简便, 成本低。

4. 结论

本文创新性地开发了一种新型光控软体跳跃机器人器件, 采用电子氟化液作为驱动介质, 避免了传统制备过程中复杂的溶液制备。通过将弹性较好的硅橡胶腔室、性能优异的聚酰亚胺薄膜以及小磁铁等关键组件集成在一起, 制备方法比较便捷。除此之外, 通过在结构精细设计的气体驱动腔室内注入掺杂黑色碳黑粉末的电子氟化液溶液, 并通过红外激光的远程精确操控, 该器件展现出卓越的动态响应特性, 能够在短短 4 秒内完成从静止状态到约 40 厘米高度的快速跳跃运动。

在结构设计方面, 本研究突破了传统气动软体机器人必须依赖外部软管连接的限制, 通过对内部气动腔室的三维构型进行拓扑优化, 成功实现了整体厚度小于 3 毫米的气动腔室结构。这种紧凑型设计使得软体机器人能够在传统气动软体机器人难以移动的狭窄空间内灵活移动。该光控软体跳跃机器人器件在以下两个方面展现出显著优势: 首先, 在小型化方面, 通过创新的结构设计和材料选择, 实现了器件尺寸的显著减小; 其次, 在运动能力方面, 基于气动腔室与磁铁相互配合的独特驱动机制, 为制备质量较轻、运动速度迅速的软体机器人提供了新的方向。该器件在环境监测与勘探、多模态运动融合等前沿应用领域具有重要的潜在价值和发展前景, 可以与其他爬行、滚动器件进行选择组合, 增加整体器件的运动模态。

参考文献

- [1] Li, Q. and Jiao, Y. (2022) Ultrafast Photothermal Actuators with a Large Helical Curvature Based on Ultrathin GO and Biaxially Oriented PE Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 55828-55838. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c18478>
- [2] Wang, R., Han, L., Wu, C., Dong, Y. and Zhao, X. (2022) Localizable, Identifiable, and Perceptive Untethered Light-Driven Soft Crawling Robot. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 6138-6147. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c20539>
- [3] Luo, X., Li, L., Zhang, H., Zhao, S., Zhang, Y., Chen, W., *et al.* (2021) Multifunctional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/Low-Density Polyethylene Soft Robots with Programmable Configuration for Amphibious Motions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 45833-45842. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c11056>
- [4] Hu, J., Nie, Z., Wang, M., Liu, Z., Huang, S. and Yang, H. (2023) Springtail-Inspired Light-Driven Soft Jumping Robots Based on Liquid Crystal Elastomers with Monolithic Three-Leaf Panel Fold Structure. *Angewandte Chemie International Edition*, **62**, e202218227. <https://doi.org/10.1002/anie.202218227>
- [5] Li, J., Wang, M., Cui, Z., Liu, S., Feng, D., Mei, G., *et al.* (2022) Dual-Responsive Jumping Actuators by Light and Humidity. *Journal of Materials Chemistry A*, **10**, 25337-25346. <https://doi.org/10.1039/d2ta07339k>
- [6] Song, X., Qiu, X., Huang, X., Xu, M. and Zhang, L. (2022) Light-Driven Awn-Footed Soft Robots. *Macromolecular Materials and Engineering*, **307**, Article ID: 2101003. <https://doi.org/10.1002/mame.202101003>
- [7] Guo, H., Priimagi, A. and Zeng, H. (2021) Optically Controlled Latching and Launching in Soft Actuators. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2108919. <https://doi.org/10.1002/adfm.202108919>
- [8] Han, L., Si, J., Zhu, B., Wang, R., Wu, C. and Guo, M. (2023) A Multidirectional Locomotion Light-Driven Soft Crawling Robot. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2305046. <https://doi.org/10.1002/adfm.202305046>
- [9] Pilz da Cunha, M., Debije, M.G. and Schenning, A.P.H.J. (2020) Bioinspired Light-Driven Soft Robots Based on Liquid Crystal Polymers. *Chemical Society Reviews*, **49**, 6568-6578. <https://doi.org/10.1039/d0cs00363h>
- [10] Ahn, C., Liang, X. and Cai, S. (2019) Bioinspired Design of Light-Powered Crawling, Squeezing, and Jumping Untethered Soft Robot. *Advanced Materials Technologies*, **4**, Article ID: 1900185. <https://doi.org/10.1002/admt.201900185>
- [11] Jeon, G. and Park, Y. (2021) Soft Jumping Robot Using Soft Morphing and the Yield Point of Magnetic Force. *Applied*

-
- Sciences*, **11**, Article No. 5891. <https://doi.org/10.3390/app11135891>
- [12] He, W., Li, J., Yan, Z. and Chen, F. (2022) Bidirectional Human-Robot Bimanual Handover of Big Planar Object with Vertical Posture. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **19**, 1180-1191. <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3043480>
- [13] He, Q. and Cai, S. (2021) Soft Pumps for Soft Robots. *Science Robotics*, **6**, eabg6640. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg6640>
- [14] Fan, J.Z., *et al.* (2020) Biologically Inspired Swimming Robotic Frog Based on Pneumatic Soft Actuators. *Bioinspiration & Biomimetics*, **15**, Article ID: 046006.
- [15] Fang, X., Wei, K. and Yang, R. (2024) Untethered Soft Pneumatic Actuators with Embedded Multiple Sensing Capabilities. *Soft Robotics*, **11**, 382-391. <https://doi.org/10.1089/soro.2023.0048>