

分类号: \_\_\_\_\_

单位代码: 10335

密 级: 无

学 号: 11824008

# 浙江大学

## 博士学位论文



中文论文题目: 微型机器人及其组装系统的  
结构设计与仿生控制研究

英文论文题目: Structure design and bionic control of  
microrobots and assembly system

申请人姓名: 刘一得

指导教师: 曲绍兴 教授

合作导师: 周昊飞 长聘副教授

学科(专业): 固体力学

研究方向: 微型机器人

所在学院: 航空航天学院

论文递交日期 二〇二三年四月



# 微型机器人及其组装系统的

## 结构设计与仿生控制研究



论文作者签名: \_\_\_\_\_

指导教师签名: \_\_\_\_\_

论文评阅人 1: \_\_\_\_\_ (隐名评阅)

评阅人 2: \_\_\_\_\_ (隐名评阅)

评阅人 3: \_\_\_\_\_ (隐名评阅)

评阅人 4: \_\_\_\_\_ (隐名评阅)

评阅人 5: \_\_\_\_\_ (隐名评阅)

答辩委员会主席: 杨卫 院士, 浙江大学

委员 1: 熊蓉 教授, 浙江大学

委员 2: 李秦川 教授, 浙江理工大学

委员 3: 姜汉卿 教授, 西湖大学

委员 4: 赵慧婵 副教授, 清华大学

答辩日期 2023 年 5 月 18 日



**Structure design and bionic control of  
microrobots and assembly system**



**Author's signature:** \_\_\_\_\_

**Supervisor's signature:** \_\_\_\_\_

External reviewers: \_\_\_\_\_ (anonymous review)  
\_\_\_\_\_ (anonymous review)  
\_\_\_\_\_ (anonymous review)  
\_\_\_\_\_ (anonymous review)  
\_\_\_\_\_ (anonymous review)

Examining Committee Chairperson:

Prof. Wei Yang, Zhejiang University

Examining Committee Members:

Prof. Rong Xiong, Zhejiang University

Prof. Qinchuan Li, Zhejiang Sci-Tech University

Prof. Hanqing Jiang, Westlake University

Prof. Huichan Zhao, Tsinghua University

Date of oral defence: May 18, 2023



# 浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 导师签名：  
签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日



## 致谢

2018 年至 2023 年，这五年就像一场没做完的梦，梦里我一直在飞。有梦想的人就像不谙世事的飞鸟，会碰壁，会撞在摩天大楼透明的玻璃上。旁人会嘲笑他们，说他们不懂得退让，但这并不是飞鸟的错，因为他们的眼里没有透明的玻璃，他们觉得向前飞本该如此。

我们的研究起步于一种幻想式的技术假设，一种受到最多嘲笑的幻梦，我本该最先摔在地上。但我的导师曲绍兴老师从来没有否定我们的想法，他一直鼓励我们往高处飞，往远处飞。飞行是克服引力的过程，现实的引力是很沉重的，感谢我的导师帮我摆脱了现实沉重的引力，让我可以毫无顾忌的横冲直撞。这一路上我见过很多退却的人，很多失去激情、心生倦意的人。越往高处飞空气越稀薄，稀薄的空气会让你难以呼吸，所以当你感到喘不过气时，说明你已经飞得很高了。

五年的研究中，我经历了许多次跌倒又爬起，每当我精疲力竭时，我都会幻想着我们的微型机器人在宇宙中的某颗星球上踱步的画面。我记得那些在归程的车上的讨论与总结，无数次失败换来一些现在看来显而易见甚至微不足道的经验。在一次从下沙返程的途中，我已经忘记那是第几次实验失败，车上的气氛很沉闷。车开到万塘路的时候，我想打破这种沉闷，我转过头对彦泓说，我昨晚做了一个梦，梦到我的右手食指可以发射皮秒激光了。我们俩都哈哈大笑，他说这是他今年听到过最好笑的笑话（当天是 12 月 31 日），我说我不是想讲笑话，我真的做了一个这样的梦。我们俩笑着笑着就哭了，我想这是我第一次为科研流泪。

在老师的 support 下，我们这个小方向成立了小组。开始建立资料库，有了新鲜血液的加入，开启了新的项目。曲老师为我们批准了一间实验室，购买了我们做梦都希望拥有的实验设备。当那台激光器从 127 房间的后门抬进来，被叉车放在实验室的地面上的瞬间，我突然有种感觉，一切都要改变了。

如今是我博士的第五年，我们拥有了最好的设备，我们也探索出了可能是最先进的实验技术，如果说最初的梦想是一张拼图，那我们已经做好了将这张图拼完的准备。

感谢我的导师曲绍兴老师在科研和生活中对我的指导、支持和鼓励。感谢杨卫院士对我研究的关注、指导和支持。感谢周昊飞老师、李华老师以及所有给予我指导和帮助

的老师。

感谢 Qu\_Group 的所有成员，感谢大家友善的帮助和无私的讨论。感谢刘彬鸿博士和赵东昊博士，感谢你们给予我的鼓励和支持。感谢 Qu\_Group 微型机器人小组所有的师弟师妹，我祝愿你们都能成为我们领域的飞鸟。感谢从最开始就和我一起做微型机器人梦的师弟陈彦泓，没有你就没有我们今天的研究基础。

感谢上海交通大学张卫平教授和王晨阳博士在我们研究过程中的分享、讨论和鼓励。

感谢我的父母，你们就是我的翅膀。

## 摘要

微型机器人的研究涉及从细胞尺度（纳米-微米）至昆虫尺度（毫米-厘米）。细胞尺度的微型机器人一般作为医疗器械用于人体内部，昆虫尺度的微型机器人适用于灾后救援、洞穴勘探等极端场景。相比于传统机器人，昆虫尺度微型机器人具有体积小、质量轻、机动性高的优势。大量机器人可以构成多机器人系统或机器人群，这种系统可以表现出复杂的集群行为，并通过自身的组装和重构功能处理不同任务，具有这类功能的机器人群也被称为模块化可重构机器人系统。本文研究对象为昆虫尺度微型机器人及其组装系统，研究目标为发展高性能微型机器人设计理论和制造技术，并构筑一种基于微型机器人的组装机器人系统。传动机构对微型机器人的性能起重要作用，目前缺少适用于微型机器人的传动机构构型，且缺少指导设计微型机器人高性能传动机构的理论，已发表的微型机器人样机和同尺度的昆虫在运动能力上仍有较大差距。微型机器人和多机器人系统的运动控制同样存在挑战，设计这类系统的高机动性运动控制架构缺少理论指导。本文基于旋量代数、格拉斯曼-凯莱代数（Grassmann-Cayley Algebra）和非线性动力系统网络对称性理论，开展了微型机器人传动机构设计理论研究和微型多机器人运动控制架构研究，发展了高性能微型机器人传动机构设计方法与微型组装机器人系统仿生运动控制架构，突破了微型机器人速度瓶颈，解决了微型四足机器人多关节分布式控制问题。主要工作包括：

(1) 基于旋量代数和构型综合方法，设计了适用于微型机器人的三支链二自由度传动机构构型。针对微型机器人传动机构构型少的问题，从设计传动耦合效应和被动约束支链的角度出发，设计了一种新型二自由度并联机构构型，验证了该新构型的自由度并建立了逆运动学模型。基于旋量理论选取合适的支链运动旋量系，优化了智能复合微结构制造技术（Smart Composite Microstructure Method, SCM）制造流程。基于 SCM 技术，发展了所设计的传动机构的制造和装配流程。制造了搭载该传动机构的无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm，该爬行机器人样机采用类似尺蠖的运动方式，具有机载的电源和控制器，长度 4.2 cm、质量 4.34 g、速度 27.4 cm/s，是目前领域内性能最好的微型机器人样机之一。

(2) 基于 Grassmann-Cayley Algebra 对传动机构的奇异性分析，发展了高性能微

**型机器人设计方法。**基于所提出的第一代微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm 的测试试验，发现了微型机器人折纸传动机构中普遍存在的奇异性问题，通过实验证明了奇异性是限制微型机器人运动能力的重要因素之一。提出使用 Grassmann-Cayley Algebra 作为对折纸传动机构进行奇异性分析的方法，论证了该方法的合理性和优越性。以所设计的折纸传动机构为对象，发展了将射影空间代数描述和仿射空间几何关系相联系的折纸传动机构奇异性分析和 SCM 制造优化方法。制造了搭载新传动机构的新一代无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G，机器人长度 4.0 cm、质量 4.71 g、速度 75.0 cm/s、相对速度 18.8 倍体长每秒。通过解决传动机构的奇异性问题，将新一代微型爬行机器人样机的速度提升到上一代的 2.7 倍，和同尺度速度最快的昆虫相当，突破了微型机器人速度瓶颈。

(3) **基于所提出的高性能微型爬行机器人，提出以爬行机器人为组成单元的仿生组装机器人系统架构。**提出 BioARS (Bionic Assembly Robotic System) 仿生组装机器人系统概念，该系统属于一种模块化和可重构机器人系统，我们使用 3D 打印的机器人样机，对系统架构和系统的重要功能进行了验证。总结了系统在组装、站立和运动控制实验中的硬件设计和控制架构设计问题，提出了将该系统进行微型化的三个重要研究内容：1. 微型爬行机器人单元的形态和运动能力，2. 组装后四足形态的运动控制，3. 基于集群行为的系统自动化。

(4) **为了解决微型组装四足机器人的膝-髋关节分布式控制问题，基于非线性动力系统网络对称性理论，提出一种新型八元网络中枢模式发生器。**基于非线性动力学网络对称性原理，通过设计网络对称性的方式提出一种八元网络中枢模式发生器，实现了对四足机器人八个关节的分布式控制。基于  $H/K$  商群定理，通过计算网络的对称群，验证了网络支持的五种步态。基于 Stein 神经元模型，构造了网络的常微分方程形式，并设计了基于该八元网络的三层仿生运动控制架构。通过数值仿真，实现了该中枢模式发生器的五种步态和二十种步态切换，给出三种步态切换策略。讨论了网络中对称性和仿生设计原则，为设计适应性回路提供指导。

本文的研究对设计高性能微型机器人、设计微型机器人运动控制架构、构造微型多机器人系统等提供了理论和技术支撑。

**关键词：**微型机器人，昆虫尺度机器人，模块化可重构机器人系统，中枢模式发生器

## Abstract

Research on microrobots involves scales ranging from cellular (nanometers to micrometers) to insect-scale (millimeters to centimeters). Microrobots at the cellular scale are generally used as medical instruments inside the human body, while those at the insect-scale are suitable for extreme scenarios such as earthquake rescue and cave exploration. Compared to conventional robots, microrobots at the insect-scale have advantages such as small size, light weight, and high mobility. A large number of microrobots can be used to form a multi-robot system or swarm, which can exhibit complex collective behavior and solves different tasks through the assembly and reconfigurable abilities. This thesis focuses on insect-scale robots and their assembly systems, with the target of constructing an assembly robotic system based on insect-scale robots. The main research areas include high-performance microrobot design theory, manufacturing technology, and bionic control based on micro assembly systems. Under the guidance of screw algebra, Grassmann-Cayley Algebra, and the nonlinear dynamics of the networks, this thesis has carried out theoretical research on the design of microrobot transmission mechanisms and research on the architecture of micro multi-robot system motion control, and developed high-performance microrobot transmission mechanism design methodologies and bionic motion control architecture for micro assembly robot systems.

Firstly, this thesis proposes a novel transmission mechanism for microrobots. Improving the mobility of microrobots is one of the most important research topic in this field. In response to this issue, we propose a 2-DoF origami transmission mechanism based on screw theory and type synthesis method. We also propose a microrobot prototype, S<sup>2</sup>worm, equipped with this transmission mechanism. The proposed transmission mechanism imitates the exoskeleton limb of insect exoskeletons to achieve 2-DoF motion. The screw theory is introduced for the first time to guide the designing and manufacturing process of the insect-scale robot. S<sup>2</sup>worm has onboard power and control systems, which enables it to achieve untethered locomotion. The robot is 4.2 cm in length, weighs 4.34 g, and has a top speed of 27.4 cm/s, making it one of the best prototypes in this field.

Based on the performance testing of our first-generation microrobot prototype, S<sup>2</sup>worm, we discovered the singularity problem in the origami transmission mechanism, and demonstrated that singularity is one of the important factors that limit the mobility of microrobots. Based on this finding, we propose a new design strategy for microrobots by using Grassmann-Cayley algebra to analyze the singularity of the transmission mechanisms and guide the geometric configuration and manufacturing process. Smart composite microstructure method is widely used in the manufacturing of microrobot transmission mechanisms, and our proposed design strategy can be well integrated with this method and applied to various microrobot designs. Based on this new design strategy, we propose the second-generation microrobot prototype, S<sup>2</sup>worm-G, which is 4.0 cm in length, weighs 4.71 g, and has a speed of 75.0 cm/s, which is 2.7 times faster than the first-generation robot due to the resolution of the singularity in the transmission mechanism.

Based on our high-performance microrobots, we propose a bionic assembly robotic system architecture composed of inchworm robots as units. This system is composed of a group of inchworm robots that can be assembled into a quadruped configuration. We used 3D-printed crawling robots to verify the system concept and functions of the system, and proposed three research targets for miniaturizing the system: 1. the shape and mobility of micro inchworm robot units; 2. the motion control of the quadruped configuration after assembly; 3. system automation based on collective behavior.

To achieve the motion control of a quadrupedal assembly robot system and realize high adaptability control of the robot in the case of limited hardware computing power, we propose an eight-cell central pattern generator based on the principle of nonlinear dynamic network symmetry. This network has two layers of neurons, which are used to generate control signals for the hip and knee joints. The network supports five gaits, and we use the  $H/K$  quotient group theorem to prove that the spatiotemporal symmetry of these gaits is supported by the network symmetry. We use the Stein neuronal model in the network to construct the network's ordinary differential equations and simulate the five gaits and twenty types of gait transitions. Based on this central pattern generator, we propose a three-layer bionic motion control architecture for distributed control of the gait of the assembled quadruped robot.

The research in this paper provides theoretical and technical support for designing high-performance microrobots, designing motion control architectures for microrobots, and constructing micro-multi-robot systems.

**Keywords:** Microrobots, Insect-scale Robots, Modular Reconfigurable Robotic System, Central Pattern Generator(CPG)



## 缩略词表

英文缩写	英文全称	中文全称
BioARS	Bionic Assembly Robotics System	仿生组装机器人系统
$n$ BL/s	$n$ Body Lengths Per Second	$n$ 倍体长每秒
CPG	Central Pattern Generator	中枢模式发生器
DoF	Degrees of Freedom	自由度
GCA	Grassmann-Cayley Algebra	格拉斯曼-凯莱代数
MLR	Mesencephalic Locomotor Region	中脑运动区
MRR	Modular Reconfigurable Robotic System	模块化可重构机器人系统
ODE	Ordinary Differential Equation	常微分方程
SCM	Smart Composite Microstructure Method	智能复合微结构制造技术
SFB	Spherical Five-bar	球型五杆机构



# 目次

致谢 .....	I
摘要 .....	III
Abstract .....	V
缩略词表 .....	IX
目次 .....	XI
1 引言 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 微型机器人 .....	2
1.2.1 微型机器人的研究现状 .....	2
1.2.2 微型机器人的制造技术 .....	6
1.2.3 微型机器人的驱动技术 .....	11
1.2.4 微型机器人的性能评价指标 .....	18
1.2.5 小结 .....	19
1.3 模块化和可重构机器人系统 .....	20
1.3.1 模块化和可重构机器人系统的研究现状 .....	20
1.3.2 模块化和可重构机器人系统的技术难点 .....	23
1.3.3 小结 .....	24
1.4 仿生运动控制 .....	25
1.4.1 仿生运动控制的模型研究 .....	26
1.4.2 仿生运动控制的应用研究 .....	28
1.4.3 仿生运动控制的理论基础 .....	30
1.4.4 小结 .....	32
1.5 本文主要研究内容 .....	33
2 传动机构运动学设计与微型爬行机器人 S <sup>2</sup> worm .....	35
2.1 引言 .....	35
2.2 折纸传动机构设计 .....	37
2.2.1 设计目标 .....	37

2.2.2 设计过程 .....	38
2.2.3 结果验证 .....	39
2.2.4 运动学模型 .....	42
2.3 样机制造 .....	44
2.3.1 传动机构与驱动器 .....	44
2.3.2 机载电子系统 .....	46
2.3.3 双堆叠压电陶瓷驱动器驱动原理 .....	48
2.3.4 样机质量分布 .....	49
2.4 测试与表征 .....	49
2.4.1 压电陶瓷驱动器性能测试 .....	49
2.4.2 S <sup>2</sup> worm 运动能力测试 .....	50
2.4.3 S <sup>2</sup> worm 能耗测试 .....	52
2.4.4 测试结果讨论 .....	52
2.5 本章小结 .....	53
3 传动机构奇异性分析与高速微型爬行机器人 S <sup>2</sup> worm-G .....	55
3.1 引言 .....	55
3.2 系统概述 .....	57
3.2.1 系统介绍 .....	57
3.2.2 传动机构的运动学设计 .....	59
3.2.3 抬升运动和扭转运动的原理 .....	60
3.2.4 推进原理 .....	61
3.3 奇异性现象 .....	63
3.3.1 抬升运动的奇异性 .....	63
3.3.2 扭转运动的奇异性 .....	64
3.4 奇异性分析 .....	66
3.4.1 约束旋量系分析 .....	67
3.4.2 驱动旋量系分析 .....	68
3.4.3 整体力旋量系 .....	68
3.4.4 构造 superbracket .....	69

3.4.5 Superbracket 计算与分解 .....	70
3.4.6 奇异性分析的方法论证 .....	73
3.5 样机制造 .....	74
3.5.1 传动机构的优化设计 .....	74
3.5.2 传动机构与驱动器 .....	76
3.5.3 机载电子系统 .....	79
3.5.4 样机质量分布 .....	80
3.6 测试与表征 .....	81
3.6.1 传动机构奇异性测试 .....	81
3.6.2 压电陶瓷驱动器性能测试 .....	81
3.6.3 S <sup>2</sup> worm-G 前进能力测试 .....	83
3.6.4 S <sup>2</sup> worm-G 转弯能力测试 .....	84
3.6.5 S <sup>2</sup> worm-G 地形适应性测试 .....	85
3.6.6 S <sup>2</sup> worm-G 能耗测试 .....	86
3.6.7 测试结果讨论 .....	87
3.7 本章小结 .....	89
4 微型仿生组装机器人系统及其仿生控制架构 .....	91
4.1 仿生组装机器人系统 BioARS .....	91
4.1.1 前言 .....	91
4.1.2 系统架构 .....	93
4.1.3 系统表征测试 .....	96
4.1.4 小结 .....	101
4.2 运动控制：八元网络 .....	103
4.2.1 前言 .....	103
4.2.2 全局对称性 .....	105
4.2.3 局部对称性与网络架构 .....	107
4.2.4 BioARS-II 系统及其仿生运动控制架构 .....	110
4.2.5 数值仿真 .....	113
4.2.6 结果讨论 .....	115

4.2.7 小结 .....	118
4.3 本章小结 .....	119
5 总结与展望 .....	121
5.1 研究总结 .....	121
5.2 研究展望 .....	122
参考文献 .....	125
附录一 .....	139
A superbracket 展开公式 .....	139
B Mathematica 代码 .....	139
作者简历 .....	143
攻读博士期间主要研究成果 .....	145

# 1 引言

## 1.1 研究背景及意义

微型机器人（Microrobots）与模块化可重构机器人（Modular and Reconfigurable Robot, MRR）系统是近年来机器人领域两个重要的研究方向。微型机器人是一类尺寸极小，集成度极高的微机电系统，这类机器人具有质量轻、机动性高、制造成本低的优势，适用于灾后救援、洞穴勘探等极端场景。模块化可重构机器人系统是一类由很多重复单元组成的机器人系统，这些单元可以通过排列和连接使得整个系统呈现出不同的形态以完成复杂任务。将微型机器人和模块化机器人系统的两方面优势相结合，可以构造一种兼具高机动性和高适应性的机器人系统。这种系统可以利用微型机器人小巧、成本低的优势实现大批量的制造和运输，在执行任务时多个机器人可以通过组装和重构以获得更强大的功能和环境适应性。这种系统有望应用于航空航天，地外勘探、军事侦察等重要领域。

运动能力是微型机器人最重要的性能指标之一，如速度和转弯半径等。微型机器人中的传动机构将驱动器输出的运动转换成机器人整体的运动和位移，因此传动机构对机器人的运动能力有重要影响。目前关于微型机器人的传动机构研究仍处于探索阶段，不仅缺少高性能传动机构构型，而且缺少指导机器人传动机构设计和运动能力提升的理论，导致大多数微型机器人难以达到同尺度昆虫的运动能力。另一方面，关于模块化机器人系统研究同样存在技术瓶颈，现有的大多数设计难以兼顾模块运动能力和系统功能性，导致系统实用性不足，并且由于缺少适用于组装后系统的运动控制架构，导致系统的机动性不足。最后，对于一种由微型机器人组成的模块化机器人系统，其计算能力受限于单个微型机器人的机载处理器，目前缺少适用于这一类系统的低算力高性能运动控制架构。

本文的目标是搭建一种微型爬行机器人及其模块化机器人系统。为了解决上述问题，实现所设计系统的高机动性和高适应性，本文针对微型机器人传动机构、组装机器人系统设计和微型组装机器人系统控制架构三个问题开展研究。这些研究可以为发展微型机器人与模块化可重构机器人系统设计和控制理论，构造新型高性能机器人系统提供

理论指导和推动作用。

本章主要介绍本文的研究背景，包含四部分内容：

第1.2节：微型机器人的研究现状和主要技术。

第1.3节：模块化可重构机器人的研究现状和重要问题。

第1.4节：仿生运动控制架构的研究现状和理论基础。

第1.5节：本文的主要研究内容。

## 1.2 微型机器人

Richard Feynman 于 1959 年在加州理工学院发表了一场名为 “There's plenty of room at the bottom: an invitation to enter a new field of physics”<sup>[1]</sup> 的演讲。在这场演讲中，Feynman 提出了发展微型化技术、制造微型系统的理念，并且描述了微型化技术发展将遇到的系统复杂性问题和可能出现的功能性微型系统，这些理念启发了微型机器人的研究。微型机器人涵盖的尺度很广，从小到可以注射进入人体的 Nanorobot<sup>[2]</sup>，到和昆虫类似的毫米-厘米尺度机器人<sup>[3]</sup>，这些都属于微型机器人的研究范围。本文研究的对象为昆虫尺度机器人（Insect-scale Robot），本节将介绍昆虫尺度微型机器人的研究现状，包括该领域的知名研究、所涉及的制造技术、驱动技术，以及该领域的性能评价指标。

### 1.2.1 微型机器人的研究现状

微型机器人依照其运动方式，主要分类有：腿足式和爬行式机器人的地面微型机器人（Terrestrial Microrobots），空中运动的扑翼机器人<sup>[4][5][6]</sup>，水面运动仿水黾机器人<sup>[7][8][9]</sup> 和水中游动的微型机器人<sup>[10][11][12][13]</sup> 等等。本文主要研究内容为微型爬行机器人，因此本小节主要介绍地面微型机器人的研究现状，主要内容为地面微型机器人领域最著名的两个研究：1.HAMR 系列机器人；2.RoACH 系列机器人。

HAMR（全称为 Harvard Ambulatory MicroRobot）是地面微型机器人领域最著名的研究之一。该研究由哈佛大学的 Robert J. Wood 教授所领导的哈佛大学微型机器人实验室（Harvard Microrobotics Lab）开展，提出了日后微型机器人最经典的系统方案之一，即由压电陶瓷变形产生驱动效应，由智能复合微结构技术（Smart Composite Microstructure

Method, SCM, 具体在第1.2.2节介绍) 所制造的碳纤维折纸结构作为传动机构将陶瓷变形放大。研究团队于 2008 年推出第一款由形状记忆合金驱动的可行走的微型机器人样机 HAMR1<sup>[14]</sup>, 前四代 HAMR (HAMR1<sup>[14]</sup>, HAMR2<sup>[15]</sup>, HAMR3<sup>[16]</sup>, HAMR4<sup>[14]</sup>) 均采用六足运动方案和 tripod 步态。HAMR2 及之后的版本均采用压电陶瓷驱动器。从 HAMR-V<sup>[17]</sup>, HAMR-VP<sup>[18]</sup>和 HAMR-VI<sup>[19]</sup>开始, 样机的运动方案由六足转变为四足, 且该方案在后来的研究中一直延用 (图1.1)。

HAMR-VP<sup>[18]</sup>作为 HAMR-V 通过弹出组装技术 (Pop-up Assembly)<sup>[20]</sup>制造的版本, 是 HAMR 系列研究的第一个里程碑式成果 (图1.1(g)), 提出了一套成熟的微型机器人设计、制造、控制方法。HAMR-VP 的质量为 1.27 g, 最高速度可以达到 0.44 m/s, 相对速度达到 10.1 BL/s (Body Lengths Per Second, 倍体长每秒), 是当时最快的微型机器人样机之一。

HAMR-F<sup>[21]</sup> (图1.1(h)) 具有无线通信功能, 是 HAMR 系列研究中自动化程度最高的一代样机。这款 HAMR 是无系留的 (Untethered, 具体概念在第1.2.4节介绍), 具有机载的电池和控制器, 并且其机载的控制器上具有一个微型惯性测量单元。因此, HAMR-F 可以通过机载控制器实现反馈控制, 在高速运动的同时可以校准自己的运动轨迹和前进方向。

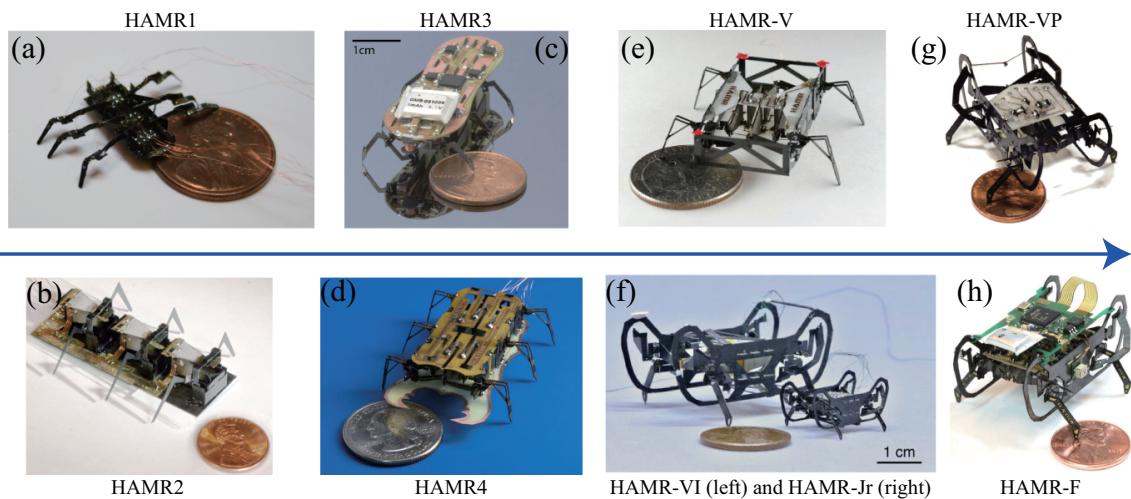


图 1.1 HAMR 的发展历程 (按论文发表时间排序)。(a)HAMR1<sup>[14]</sup>: 由形状记忆合金驱动的六足机器人。(b)HAMR2<sup>[15]</sup>: 压电陶瓷驱动的六足机器人。(c)HAMR3<sup>[16]</sup>: 可以无系留运动的六足机器人。(d)HAMR4<sup>[14]</sup>: 使用 PC-MEMS 技术制造的六足机器人。(e)HAMR-V<sup>[17]</sup>: 使用智能复合微结构制造技术制造的四足机器人。(f)HAMR-VP<sup>[18]</sup>: HAMR-V 通过弹出组装技术所制造的版本。(g)HAMR-VI<sup>[19]</sup>: HAMR-V 基于传动链动力学模型的优化版本。(h)HAMR-F<sup>[21]</sup>: 具有射频通信功能的无系留微型四足机器人。

在以上 HAMR 研究的基础上，该团队又陆续发表了基于 HAMR 的功能化和微型化研究成果，例如：可以在水面上行走的 HAMR<sup>[22]</sup>，可以在倾斜表面上攀爬的 HAMR-E<sup>[23]</sup>以及由 HAMR-VI 微型化后的 HAMR-Jr<sup>[24]</sup>。

Chen 等人通过为 HAMR 加装电湿润足（Electrowetting Pad, EWP）（图1.2(a)），实现了机器人在陆地上行走，在水面上行走以及沉入水中行走等功能。当机器人在水面上运动时，机器人利用 EWP 的表面张力，为机身提供浮力。当需要潜入水中时，通过给 EWP 通电可以破坏由表面张力维持的水面，这时 EWP 不能为机器人提供浮力，机器人由于密度大于水则没入水中。这项研究证明了微型机器人可以通过利用其较小的身体尺寸、中等尺度制造方法和表面效应来实现这类机器人特有的运动能力。

HAMR-E 是针对 HAMR 攀爬能力的一项研究，研究者们为 HAMR 安装电吸附足（Electroadhesion Pad）以实现机器人在倾斜的表面行走（图1.2(c))）。这项研究通过为 HAMR-VI 加装折纸被动踝关节和静电吸附盘，使得机器人可以通过静电力吸附在环境表面，从而在墙壁上和天花板上行走。该研究还提出了一种利用静电吸附力行走的步态，以保证机器人在行走时有足够的脚和环境表面吸附以保证机器人不会掉落。这项研究证明了微型机器人有望通过类似的技术实现在复杂的三维表面攀爬，这种攀爬机器人有望应用于昂贵设备内部检测等特殊任务。

HAMR-Jr 是针对 HAMR 样机微型化技术的一项研究，其微型化对象为 HAMR-VP (图1.1(f) 和图1.2(c))。样机的长度为 22.5 mm，质量为 320 mg。伴随着体积的缩小，HAMR-Jr 的负载能力获得了巨大的提升，可承载负荷达到 3.5 g。HAMR 团队的下一步研究将利用提高的负载能力，为 HAMR-Jr 赋予更多功能。这项工作也证明了 HAMR 系列加工技术在制造微型机构上的巨大潜力。

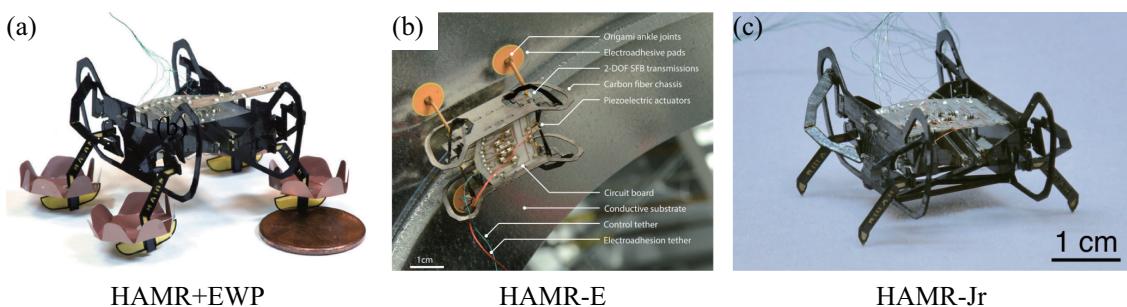


图 1.2 HAMR 的功能化和微型化研究（按论文发表时间排序）。(a)HAMR+EWP<sup>[22]</sup>: 搭载电湿润足（Electrowetting Pad, EWP），可以在地面和水面上行走，也可以利用电湿润原理打破水面的表面张力潜入水中。(b)HAMR-E<sup>[23]</sup>: 搭载电吸附足（Electro Adhesion Pad），可以通过电吸附足行走在导电的倾斜表面。(c)HAMR-Jr<sup>[24]</sup>: HAMR-VI 的缩小版本。

另一个地面微型机器人的著名研究是由 UC Berkeley 的 Ronald S. Fearing 教授团队开展的 RoACH 研究（图 1.3）。第一代 RoACH<sup>[25]</sup>是一个由形状记忆合金驱动的无系留微型六足机器人，其结构由 SCM 技术加工，重量为 2.4 g，具有机载的电源和控制器，是当时最小最轻的腿足式机器人之一。RoACH 的后续工作如 DASH<sup>[26]</sup>，DynaRoACH<sup>[27]</sup>，OctoRoACH<sup>[28]</sup>以及 VelociRoACH<sup>[29]</sup>等，这些系统虽然保留了第一代 RoACH 的传动机构和 tripod 运动步态，但是其驱动方式都改为电机驱动，后续系统的尺寸也因此增加到 10 cm，质量也更重。一个例外是 MEDIC<sup>[30]</sup>，这是一款厘米尺度的四足机器人，其制造驱动方式延续了第一代 RoACH<sup>[25]</sup>。MEDIC 的特点是其身体始终与地面保持接触，该样机可以实现前进、转弯、翻越障碍和逆行。

SailRoACH 和 VelociRoACH 基于 OctoRoACH 平台研究了机器人高速运动下的空气动力学效应，由于机器人的运动速度极高，这些研究中通过增加帆和翼的方式来研究高速移动机器人的方向稳定性和运动过程稳定性控制。SailRoACH 使用一个舵机来遥控机器人背上的翼面帆，使机器人能够以 1.6 m/s 的速度在 1.2 m 半径下稳定转弯。VelociRoACH 通过给机器人加装侧翼作为空气动力学旋转阻尼器，进一步提高机器人对扰动的稳定性，同时也不会降低机器人的前进速度，该样机最高速度可以到达 2.7 m/s。

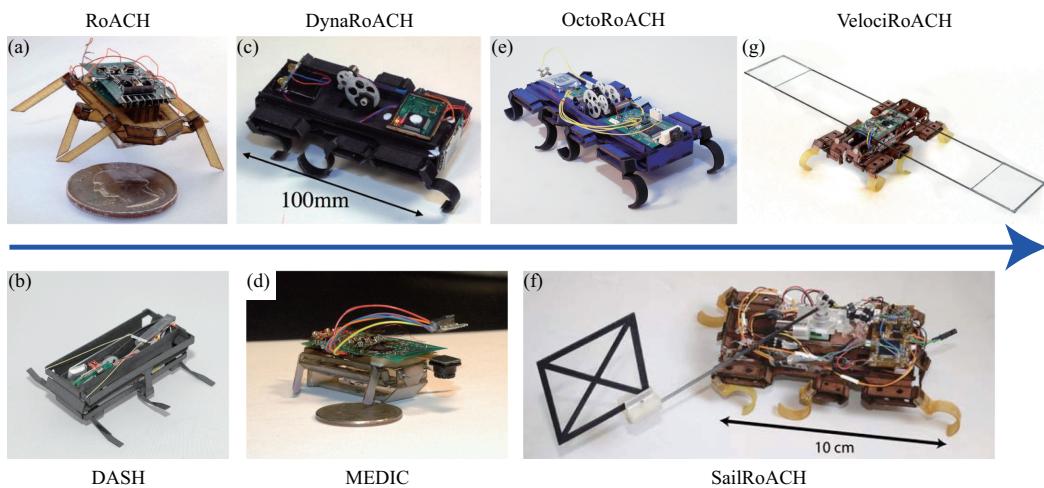


图 1.3 RoACH 的发展历程（按论文发表时间排序）。(a)RoACH<sup>[25]</sup>: 由形状记忆合金驱动的 2.4 g 六足机器人。(b)DASH<sup>[26]</sup>: 由电机驱动的 16 g 六足机器人。(c)DynaRoACH<sup>[27]</sup>: 10 cm, 24 g 的六足机器人，验证了对侧向腿弹簧运动模型。(d)MEDIC<sup>[30]</sup>: 由 SCM 技术制造，形状记忆合金驱动的毫米尺度四足机器人。(e)OctoRoACH<sup>[28]</sup>: 利用腿的差速进行转向，可以实现极小的转弯半径（最小 2.7 cm）和极高的转弯角速度（最高 400°/s）。(f)SailRoACH<sup>[31]</sup>: 利用帆进行导向的高速六足机器人，长度为 10 cm，最高速度可以达到 22 倍体长每秒。(g)VelociRoACH<sup>[29]</sup>: 利用侧翼的空气动力学效应进行稳定的高速六足机器人，长度为 10 cm，最高速度可以达到 27 倍体长每秒。

在 VelociRoACH 的基础上，研究人员对 RoACH 的功能性开展了进一步研究（图 1.4）。

Rose 等人<sup>[32]</sup>在机器人的背部安装了一个支架以携带一台名为 H<sup>2</sup>Bird<sup>[33]</sup>的微型扑翼机器人。该研究利用 VelociRoACH 作为一台腿足式机器人的地形适应性和高速优势，让 VelociRoACH 通过前进运动使得 H<sup>2</sup>Bird 达到足够的速度（1.2 m/s）以实现起飞。并且在 VelociRoACH 前进过程中，H<sup>2</sup>Bird 的翼可以提高整个系统前进运动的稳定性。

Casarez 等人<sup>[34]</sup>研究了两只 VelociRoACH 协作攀爬障碍物的问题。该研究通过在两只 VelociRoACH 上安装可断开的连接关节，实现了两台机器人攀爬上单个机器人不能越过的障碍。具体方式为两台机器人一前一后的走到障碍前，后面的机器人利用连接关节和前面的机器人连接，并将前面的机器人推上障碍物。接着两台机器人将连接关节断开，但仍通过缆线连接，已经爬上障碍的机器人用缆线将后面那台机器人拉上障碍。

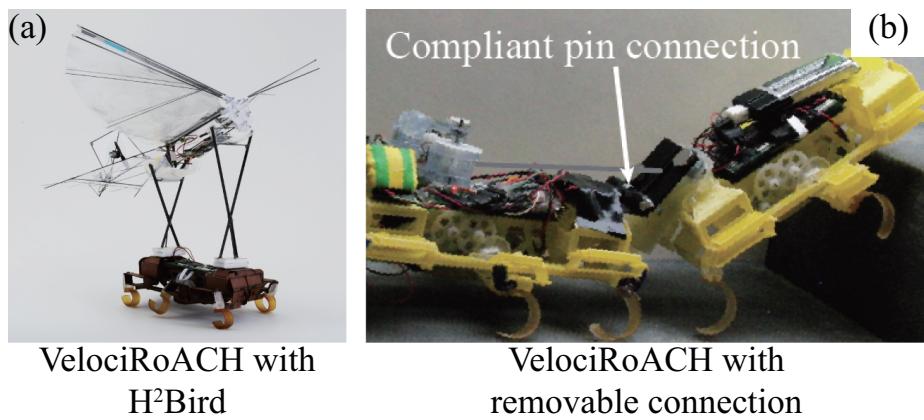


图 1.4 RoACH 的功能化研究（按论文发表时间排序）。(a)VelociRoACH with H<sup>2</sup>Bird<sup>[32]</sup>: 携带扑翼机器人 H<sup>2</sup>Bird 的 VelociRoACH，利用 VelociRoACH 的高速运动给扑翼机器人一个初速度帮助其起飞。(b)VelociRoACH with a removable connection<sup>[34]</sup>: 安装连接关节的 VelociRoACH，两个 VelociRoACH 可以协作攀爬更陡峭的障碍。

## 1.2.2 微型机器人的制造技术

微型机器人的结构具有体积小、质量轻、灵活度高、功能复杂的特点。由于微型机器人的驱动器多为智能材料驱动器，因此这一类微型机器人的结构除了支撑机器人身体，承载各种器件，还需要作为传动机构，将智能材料驱动器的微小变形转变为机器人的运动。目前微型机器人的制造技术主要可分为三类：1. 智能复合微结构制造技术（Smart Composite Microstructure Method, SCM）；2. 3D 打印技术；3. 硅刻蚀和 SOI（Silicon On Insulator）技术。

SCM 技术是微型机器人领域最重要的制造技术之一，该技术的核心是利用柔性薄膜材料作为转轴，利用硬质层状材料作为杆件<sup>[35][36]</sup>。该技术使用硬质层状材料夹住柔

性薄膜材料，通过在硬质层状材料上刻出槽口的方式构造复杂的微型结构（图 1.5(a)）。硬质层状材料通常为碳纤维板材，柔性薄膜材料通常使用聚酰亚胺薄膜。由于这两种材料都不具备粘接性能，需要额外的胶膜将这两种材料粘接，例如热固化胶膜，因此一个由 SCM 制造的结构通常包含至少一个五层结构：碳纤维-胶膜-聚酰亚胺薄膜-胶膜-碳纤维。加工一个五层结构 SCM 的工艺流程主要由激光加工和热压组成，首先将上述所有材料先使用激光加工出对应的图案，再将所有材料组成一个堆叠进行加热固化，最终再使用激光将所需要的结构从框架中切割释放出来（图 1.5(b)）。PC-MEMS<sup>[37]</sup>技术是一种在 SCM 技术基础上演变出的加工技术（图 1.5(c)），该技术和 SCM 技术不同之处在于所加工的结构在从框架上释放的过程中需要经过两次激光切割，在两次激光切割之间，结构会经过一次弹出折叠组装，用于组装而非传动的柔性关节在这一过程中会被固定。

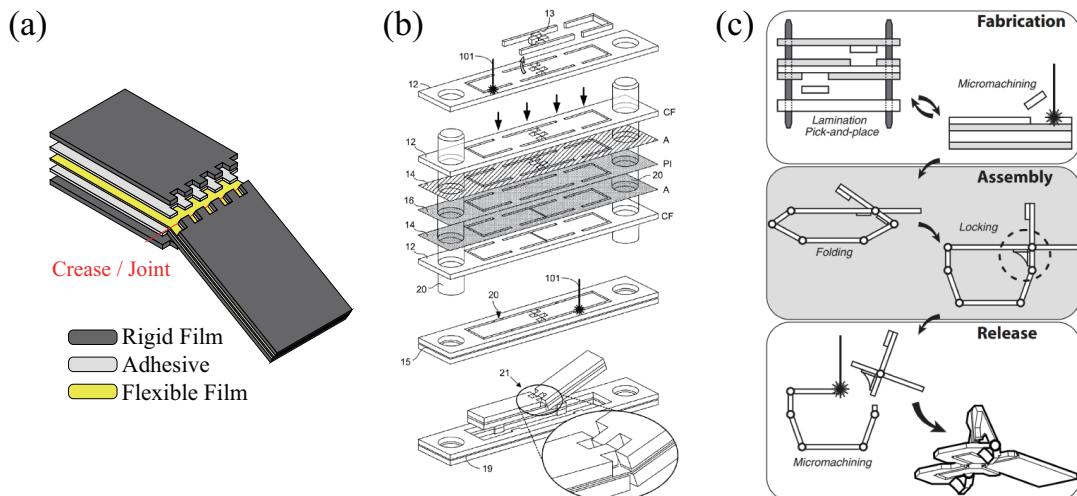


图 1.5 (a)SCM 技术加工的一个五层铰链结构。(b)SCM 技术的工艺流程<sup>[37]</sup>。(c)PC-MEMS 技术的工艺流程<sup>[38]</sup>。

SCM 技术被广泛应用于加工微型机器人结构，尤其是微型机器人的传动机构。微型扑翼机器人 Robobee 以及上一节提到的 HAMR 和 RoACH 都是基于 SCM 技术完成的机器人结构制造。除了这些研究外，SCM 技术还被广泛用于加工各种微型机械结构和机器人（图 1.6）。我们在这里介绍一些具有代表性的工作，以说明 SCM 技术在微型机构上极高的适用性。

微型机械臂 milliDelta 是由 McClintock 等人<sup>[39]</sup>提出的一个毫米-厘米尺度微型并联机械臂（图 1.6(a)）。该研究将并联机器人 Delta 构型<sup>[40][41]</sup>进行微型化，利用 SCM 技术制造了样机的传动机构，包含三组 SCM 五层结构，其中两组五层结构组形成了样

机的闭链传动机构，另一组五层结构为三个曲柄滑块结构，实现了驱动的输入和转化。milliDelta 样机由三个压电陶瓷驱动器驱动，三个驱动器的末端分别连接在三个曲柄滑块结构的输入杆上，该样机可以实现三自由度平动。

Suzuki 和 Wood<sup>[42]</sup>提出的微型眼手术机器人 mini-RCM（图 1.6(b)）。该机器人的传动机构由 SCM 技术制造，可以实现围绕结构外一个远端固定点的二自由度转动。这个远端的固定点是传动机构的两个旋转自由度对应的转轴的交点，该样机中的闭链传动机构较为复杂，如果直接加工需要很多组五层结构，因此该传动机构的制造方式是先将机构中的某些杆件打断以便于进行平面化设计，在装配过程中再将先前打断的杆件重新拼接。

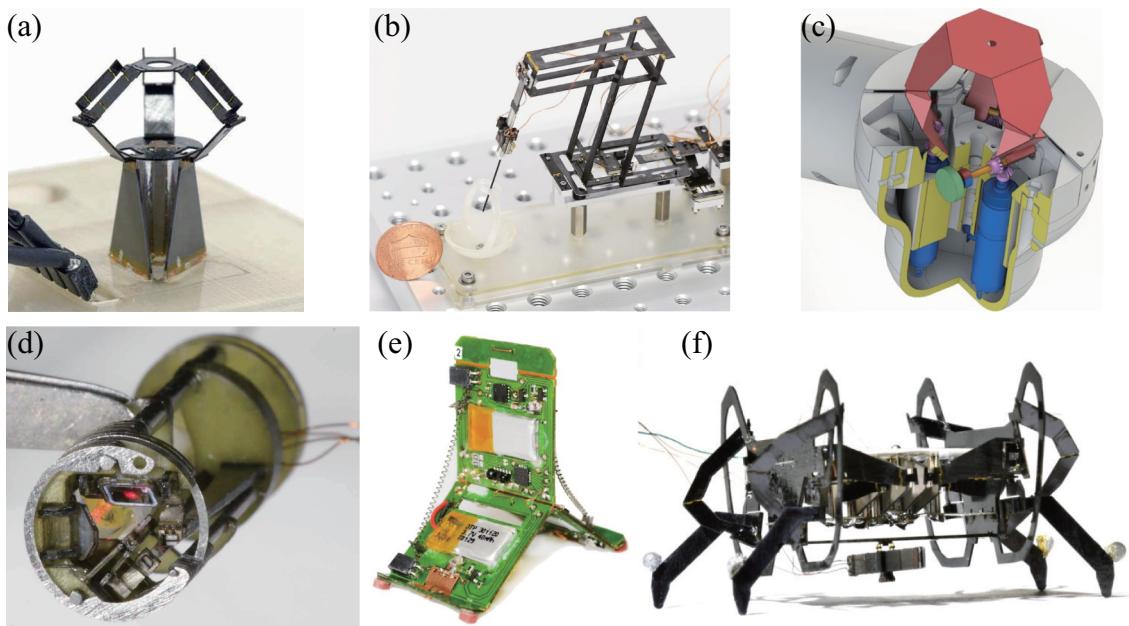


图 1.6 SCM 技术的加工案例。(a)milliDelta<sup>[39]</sup>。(b)mini-RCM<sup>[42]</sup>。(c)3-DoF origami robot<sup>[43]</sup>。(d)microrobotic laser steering system<sup>[44]</sup>。(e)Tribot<sup>[45]</sup>。(f)腹部安装压电抓手的 HAMR<sup>[46]</sup>。

Mintchev 等人<sup>[43]</sup>使用 SCM 技术制造了一个微型化的三自由度并联机构（图 1.6(c)），该研究是对 Saleron 等人<sup>[47]</sup>提出构型的微型化。该三自由度并联机构由 SCM 技术制造，每个支链的末端均安装有直流电机和霍尔效应传感器。该机构可以承受 2 N 的力，具有极高的刚度（1.2 N/mm），可以安装在操作手柄上作为人机交互按钮。

York 等人<sup>[44]</sup>提出的微型激光导向装置（图 1.6(d)），可以高速高精度操纵光纤激光束。该装置半径 6 mm，长度 16 mm，外形尺寸极小，可以集成在手术内窥镜的末端。该装置内部具有 2 至 3 个振镜组，每片振镜均安装在一个由 SCM 技术加工的连杆机构末端，由一个压电陶瓷驱动器驱动。该装置在 SCM 技术的基础上还引入了溅射沉积、金

刚石研磨等多种精密加工技术，实现了极高的集成度。

Tribot 是由 Zhakypov 等人<sup>[48][49][50][45]</sup>提出的一个微型仿生机器人研究（图 1.6(e)）。Tribot 的身体是一个 120° 对称结构，具有三个足，每两个足之间安装有一个形状记忆合金弹簧，每个足的末端还安装有一个形状记忆合金扭簧。Tribot 机器人使用 SCM 技术制造出平面化结构并通过折叠组装。Tribot 样机的硬质连杆使用 PCB 版而非碳纤维，因此该研究在 SCM 技术中集成了 PCB 电路和电子元器件，电子元器件均嵌入在机构的杆件内，因而具有极高的集成度。

Abondance 等人<sup>[46]</sup>利用 SCM 技术制造了一个压电陶瓷驱动的微型抓手并安装在 HAMR 腹部（图 1.6(f)）。该微型抓手所使用的 SCM 结构内部整合了压电陶瓷片，因此不需要额外的传动机构和安装过程。所制造的微型抓手质量极小（100 mg），通过和 HAMR 样机相互配合，最高可以提起 2.8 g 的负载。

这些研究证明了 SCM 技术的诸多优点：

- 可以加工复杂结构，如并联机构或其他闭链传动机构（milliDelta, mini-RCM）。
- 可以根据需求，制造具有良好的力学性能的微型结构（Mintchev et al.）。
- 容易拓展和整合其他加工技术、零件和材料（York et al., Tribot, Abondance et al.）。

3D 打印技术是一种增材制造技术，其可加工的结构范围包含从微纳米尺度到宏观尺度。用于加工微型结构和微型机器人的 3D 打印技术一般使用光固化方式<sup>[51][52][53]</sup>，通过光照固化聚合物，结构的三维外形通过调整光照图案进行控制。

Zeng 等人<sup>[54]</sup>提出了一种受光照驱动，以液晶弹性体（Liquid Crystalline Elastomer, LCE）作为驱动器的微型机器人图 1.7(a))。该机器人的三维结构通过激光直写技术（Direct Laser Writing, DLW）制造，足端的特征尺寸为 500 nm。

St. Pierre 等人提出了两款 3D 打印的四足微型机器人<sup>[55][56]</sup>。第一款样机<sup>[55]</sup>使用 3D 打印技术制造，所使用的设备为商业 3D 打印机 Objet 30 Pro，使用的材料为刚性不透明光聚合物 VeroBlue RGD840。该机器人长度为 2 cm，质量为 1.6 g，机器人的腿可以相对于身体旋转，并在转轴处固定有一块磁铁。该机器人可以在外加磁场的驱动下行走。该研究通过在机器人四条腿上嵌入不同方向的磁铁，实现了机器人的多种运动步态。该研究以微型 3D 打印四足机器人为平台，研究了微型机器人和昆虫不同步态对地形的适应性。

该研究的另一款样机<sup>[56]</sup>使用激光直写技术制造，腿部的四块磁铁通过手动安装，整体设计和上一代相比基本保持不变。但是该样机长度为 2.5 mm，质量为 1 mg，体积和质量只有原先的千分之一，是当时世界上最小的腿足式机器人之一。该样机在外加磁场的作用下，最高速度可以达到 37.3 mm/s，可以用于研究毫米尺度腿足式机器人的运动机制。

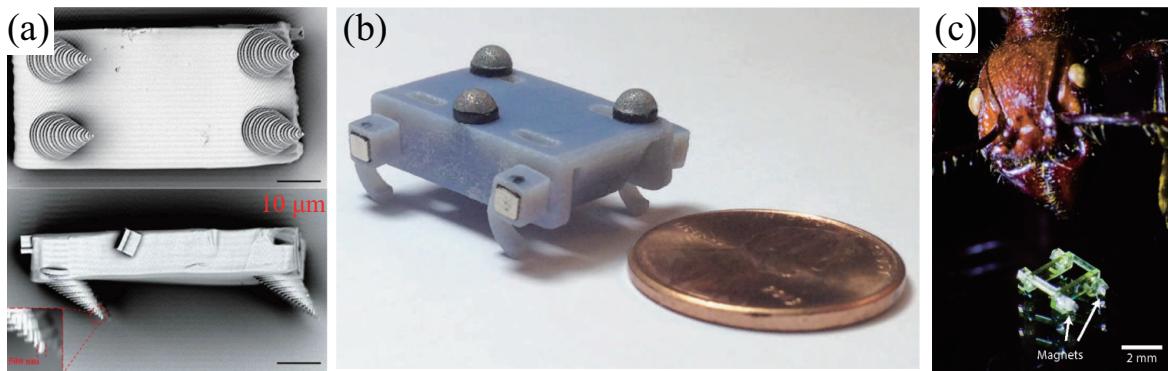


图 1.7 3D 打印技术的加工案例。(a)Microscopic walker<sup>[54]</sup>。(b)St. Pierre 等人提出的第一代 3D 打印四足微型机器人<sup>[55]</sup>。(c)St. Pierre 等人提出的第二代 3D 打印四足微型机器人<sup>[56]</sup>。

硅刻蚀和 SOI 技术是一类基于硅材料的二维加工技术，通过在硅片上刻蚀微型结构制造微型机器人，并衍生出硅材料芯片和微结构的三维组装技术<sup>[57]</sup>。在 2003 年，Hollar 等人<sup>[58]</sup>就使用 SOI 技术制造出一款一自由度的微型机器人，该机器人包含三块子芯片：第一块包含机器人的驱动器和腿，第二块包含太阳能电池和高压放大器，第三块包含用于机器人腿运动控制的 CMOS 电路。该机器人展现出 SOI 技术极高的加工精度和系统集成性。SOI 技术加工平面化转轴<sup>[59][60]</sup>的原理如图 1.8(a) 所示，连杆之间通过一个圆柱头卡在圆柱槽中实现转动，两个连杆之间通过一段较长的蛇形弹簧保持不分离。

Contreras 等人<sup>[61]</sup>于 2017 年提出了一款基于 SOI 工艺的毫米尺度的微型行走机器人（图 1.8(b)），该机器人尺寸为 5 mm × 6 mm × 0.5 mm，质量为 18 mg。基于静电尺蠖电机（Electrostatic Inchworm Motor）驱动一个二自由度平面连杆作为机器人的腿。在垂直方向上，这个机器人可以产生 1.5 倍于其自重的力，足以支撑其实现行走运动。随后 Contreras 和 Yang 等人<sup>[61][62]</sup>又提出了一款六足行走机器人（图 1.8(d)），并基于该六足机器人开展了数据驱动的步态优化研究。

除了行走机器人外，硅刻蚀和 SOI 技术还被用于加工微型飞行机器人和微型跳跃机器人。Drew 等人<sup>[63]</sup>使用硅刻蚀技术制造一款通过电动力产生推进的离子飞行器（Ionocraft）（图 1.8(c)）。该飞行器尺寸为 1.8 cm × 1.8 cm，质量为 13.6 mg，可以负载

40 mg 包含 IMU 的柔性 PCB 器件实现起飞功能。Greenspun 等人<sup>[64]</sup>提出了一款微型跳跃机器人（图 1.8(e)），该机器人质量为 43 mg，由静电尺蠖电机驱动，最高可以跳起 6.5 mm。

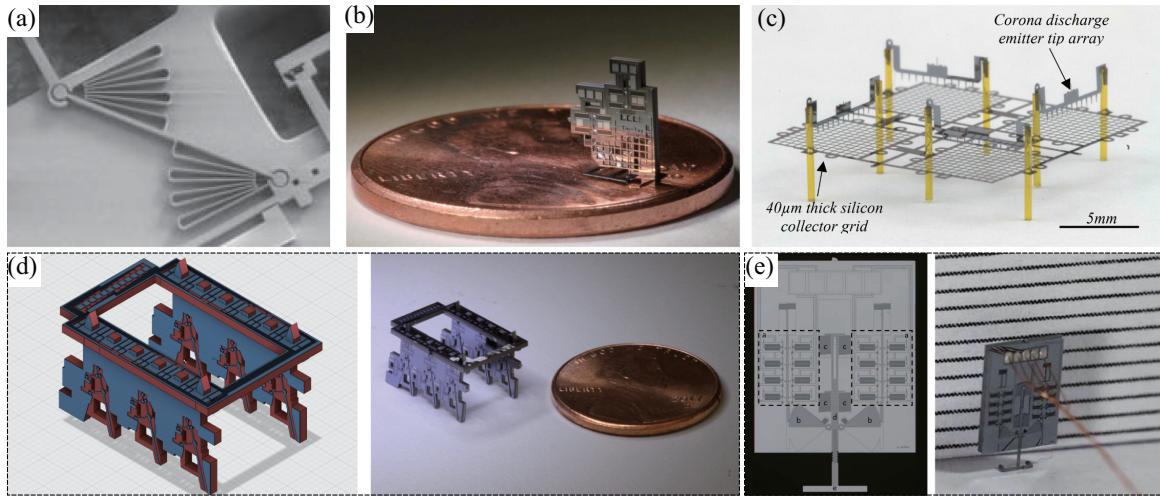


图 1.8 硅刻蚀和 SOI 技术的加工案例。(a)SOI 技术中平面转轴的原理<sup>[59]</sup>。(b) 微型行走机器人<sup>[61]</sup>。(c) 离子飞行器 (ionocraft)<sup>[63]</sup> (d) 微型六足机器人<sup>[62]</sup> (e) 微型跳跃机器人<sup>[64]</sup>

### 1.2.3 微型机器人的驱动技术

微型机器人由于尺寸很小，难以使用大型机器人的驱动方案。微型机器人广泛采用智能材料驱动器以及一些特殊的驱动结构<sup>[65][66]</sup>，例如：压电陶瓷和压电聚合物、形状记忆合金和形状记忆聚合物、电磁舵机、静电薄膜电机等，这些智能材料与结构往往具有更小的体积和更高的能量利用效率。本小节将介绍微型机器人领域主要的驱动技术和应用案例，具体包括以下八种：1. 压电陶瓷材料；2. 形状记忆材料；3. 电磁舵机；4. 压电薄膜材料；5. 介电弹性体；6. 静电驱动悬臂梁；7. 软体电磁驱动器；8. 静电薄膜电机。

压电陶瓷材料具有响应频率高，能量密度高的优点<sup>[67]</sup>。但是由于其变形极小，因此其作为驱动器时一般采用压电多层梁<sup>[68]</sup>的形式（图 1.9(a)）。该方案具体为一个三层结构，其主要部分为两片压电陶瓷夹持一层碳纤维，两片压电陶瓷的非对称变形会造成梁末端的振动。一般在梁的末端还会有一个延长杆结构，用于将陶瓷产生的振动放大到百微米-毫米尺度以产生显著的驱动效应。与该结构相对应的电源驱动方案有四种（图 1.9(b)），分别为串联（Series）构型，并联（Parallel）构型，交替（Alternating）构型和同步（Simultaneous）构型。其中，同步构型最适用于多个压电梁的独立控制。

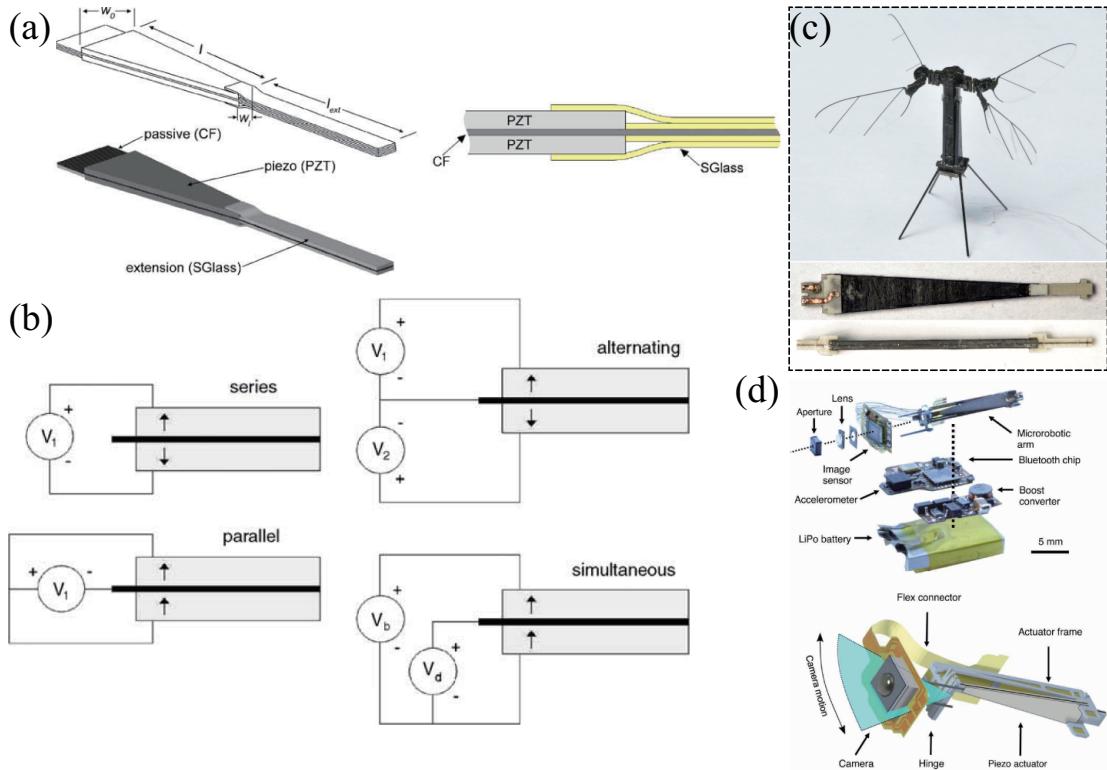


图 1.9 微型机器人中的压电驱动技术：压电多层梁驱动器。(a) 压电多层梁驱动器型<sup>[68]</sup>。(b) 压电多层梁驱动器的四种电源驱动构型：串联（series）构型，并联（parallel）构型，交替（alternating）构型和同步（simultaneous）构型<sup>[68]</sup>。(c)Robobee 中的压电多层梁驱动器<sup>[3]</sup>。(d) 微型导向机构中的压电多层梁驱动器<sup>[69]</sup>。

压电多层梁驱动器在微型机器人领域应用最为广泛，例如我们在第1.2.1节提到的HAMR研究几乎全部使用压电多层梁驱动器和同步构型。除了该研究外，使用这套驱动方案的微型机器人研究还有微型扑翼机器人 Robobee<sup>[3]</sup>（图 1.9(c)），微型并联机器人 milliDelta<sup>[39]</sup>，微型手术机器人 mini-RCM<sup>[42]</sup>以及用于调整微型相机姿态的微型导向机构<sup>[69]</sup>（图 1.9(d)）等等。

除了使用多层梁构型，压电陶瓷也可以直接作为微型机器人的腿足<sup>[70]</sup>（图 1.10(a)）。Liu 等人<sup>[71]</sup>提出了一种基于压电陶瓷驱动器的六足爬行机器人（图 1.10(b)），该机器人尺寸为  $58 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ，质量  $42.55 \text{ g}$ ，模仿节肢动物的运动方式，其速度范围为  $0.26 \text{ mm/s}$  至  $516.3 \text{ mm/s}$ 。由于其使用压电陶瓷直接作为腿足，该机器人的负载能力极强，最高可以携带  $200 \text{ g}$  的载荷。

形状记忆材料利用形状记忆效应产生驱动，具体可以分为形状记忆合金（Shape Memory Alloy, SMA）和形状记忆聚合物（Shape Memory Polymer, SMP）。SMA 主要成分为镍钛合金，该材料的相转变温度可以通过材料的合金成分配比调节。我们在

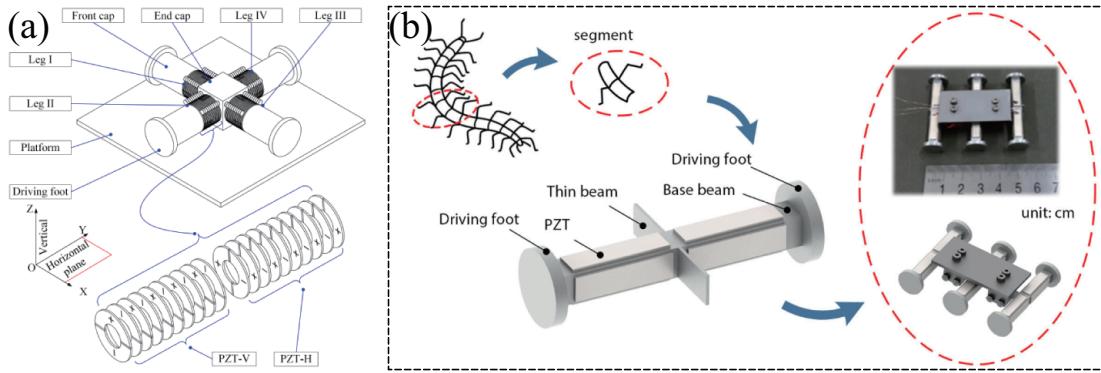


图 1.10 微型机器人中的压电驱动技术: 压电陶瓷直接驱动。(a) 压电陶瓷直接驱动的腿足式机器人<sup>[70]</sup>。(b) 六足仿节肢动物机器人<sup>[71]</sup>。

第 1.2.2 节介绍的 RoACH<sup>[25]</sup>和 Tribot<sup>[45]</sup>研究分别使用 SMA 丝和弹簧进行驱动。

Nguyen 等人<sup>[72]</sup>在 SMALLBug 中使用了 SMA 弯曲驱动器(图 1.11(a))。该驱动器使用 SMA 丝和碳纤维片复合, 使用 PWM 波和脉宽调制的方式加热 SMA, 该驱动器驱动频率最高达到 20 Hz, 作为 SMA 驱动器达到了非常高的频率。搭载该驱动器的 SMALLBug 微型机器人样机长度为 13 mm, 质量 30 mg, 在 20 Hz 的驱动频率下达到其最高速度 17 mm/s。

Yang 等人<sup>[73]</sup>提出的 RoBeetle 使用 SMA 丝驱动, 该研究的技术突破在于使用可控镍钛铂基催化甲醇释放热量驱动 SMA 丝, 并提出了一套机械控制机构, 让 SMA 丝在驱动的同时控制甲醇释放的热量, 使得 SMA 丝反复循环“加热-冷却”过程(图 1.11(b))。该机器人样机质量 88 mg, 爬行过程完全由机械结构控制, 不需要使用任何电子元器件, 可以实现 0.76 mm/s 的无系留爬行运动。

SMP 在微型机器人中被广泛用于驱动机器人的结构变形, 这一过程和 origami 技术相结合, 可以实现微型机器人的结构自组装功能。Felton 等人<sup>[74]</sup>将电子元器件预先安装在平面化的折纸结构上, 并通过驱动 SMP 铰链折叠, 实现了具有自组装功能四足爬行机器人(图 1.11(c))。这项技术可用于快速制造机器人原型机, 制造太空中的自组装卫星, 以及制造厘米级机器人。同样是将 SMP 和 origami 技术相结合, Miyashita 等人<sup>[75]</sup>提出了一种微型机器人自组装外骨骼(图 1.11(d))。该研究利用 SMP 驱动折纸结构, 制造了多种功能性的微型机器人外骨骼, 并且通过使用可降解聚合物, 使得这种自组装外骨骼具有降解功能。Firouzeh 等人<sup>[76]</sup>基于 SMP 和 SCM 技术, 提出了一种欠驱动微型机械手(图 1.11(e))。该机械手的结构刚度可以通过选择性的驱动关节上的 SMP 来调控, 从而实现不同的抓持模式和抓持效果。

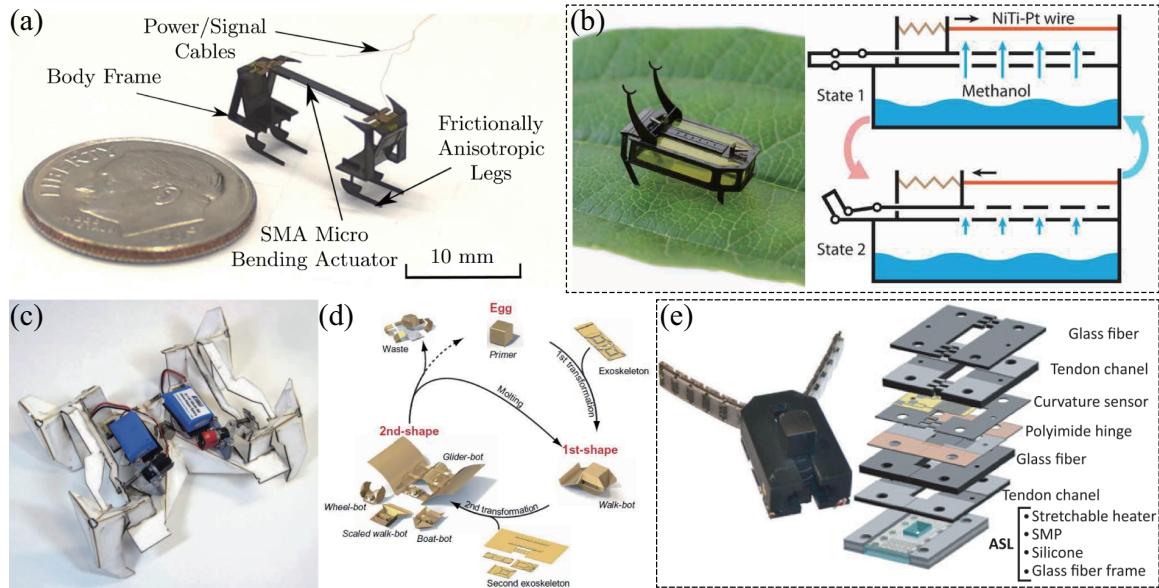


图 1.11 微型机器人中的形状记忆材料驱动技术。(a) 搭载形状记忆合金弯曲驱动器的 SMALLBug<sup>[72]</sup>。(b) 搭载形状记忆合金丝的 RoBeetle<sup>[73]</sup>。(c) 基于形状记忆聚合物的折纸自组装机器人<sup>[74]</sup>。(d) 基于形状记忆聚合物的微型机器人折纸外骨骼<sup>[75]</sup>。(e) 基于形状记忆聚合物的欠驱动微型抓手<sup>[76]</sup>。

电磁舵机和传统无刷电机、空心杯电机相比，体积更小、质量更轻，更适合作为微型机器人驱动器。电磁舵机主要分为直线式和摆动式。直线电磁舵机的驱动原理是改变定子线圈内的磁场，使得转子磁铁在线圈内部沿线圈轴向往复运动。和摆动式电磁舵机相比，直线式电磁舵机产生的驱动为直线运动，因此需要传动机构将其运动进行转化。上海交通大学的 Zhang 等人提出了一系列直线式电磁舵机和 SCM 传动机构相结合的微型扑翼机器人项目<sup>[77][78][79]</sup>。2016 年，Zou 等人提出了第一款电磁舵机驱动微型扑翼机器人（图 1.12(a))。该样机翼展为 3.5 cm，质量 80 mg，由一个直线电磁舵机驱动两个对称的 SCM 四连杆机构，可以实现起飞功能。2020 年，Wang 等人又提出两款基于直线电磁舵机的微型扑翼机器人<sup>[78][79]</sup>。第一款微型扑翼机器人的结构和 Zou 等人工作相似，依然使用单个直线电磁舵机驱动一对翼（图 1.12(b))。该样机作为实验平台，用以验证一种改进的准稳态气动模型。第二款微型扑翼机器人采用两个电磁舵机分别驱动两片翼，从而实现了一对翼的独立驱动（图 1.12(c))。该样机翼展为 3.5 cm，质量 96 mg，可以产生让自身转向的俯仰、侧倾和偏航三种扭矩。

摆动电磁舵机产生的运动和翅膀拍动的轨迹相似，因此可以直接将翼面安装在舵机上而不需要额外的驱动结构<sup>[81][82]</sup>。Roll<sup>[80]</sup>等人提出一种重 2.6 g 的摆动电磁舵机，磁铁作为动子固定在定子线圈内部的一根轴上并绕之转动，固定轴的方向和定子线圈的直径方向。在线圈的外壁上还安装有两个永磁铁以产生虚拟弹簧效应，可以为动子提供恢复

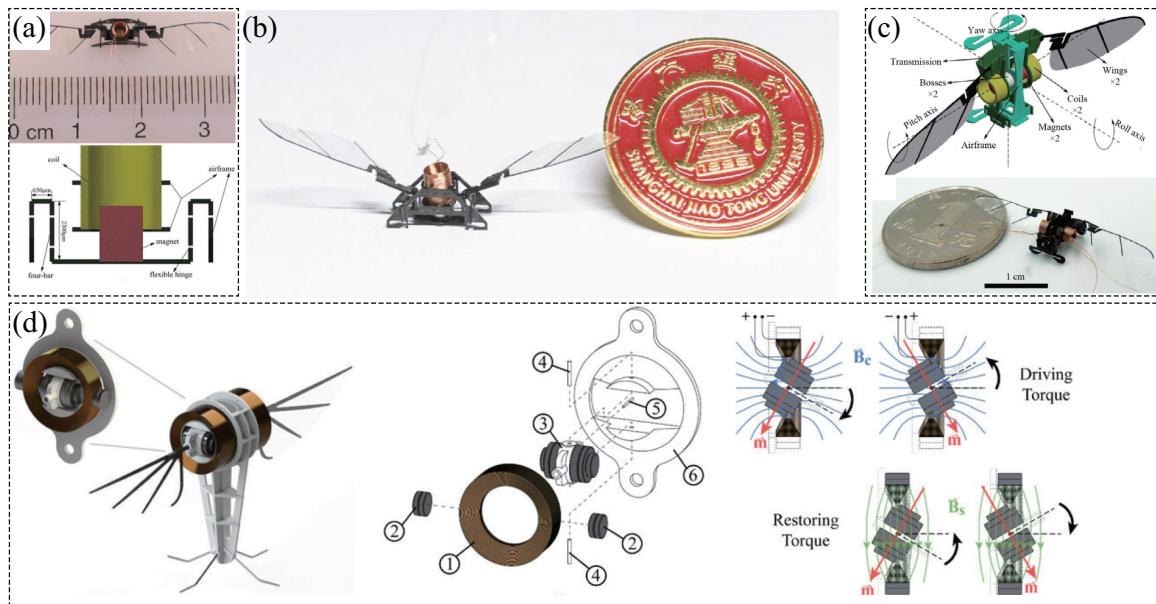


图 1.12 微型机器人中的电磁舵机驱动技术。(a) 直线电磁舵机结构及微型扑翼机器人<sup>[77]</sup>。(b) 改进后的直线电磁舵机驱动微型扑翼机器人<sup>[78]</sup>。(c) 一对翼由双直线电磁舵机独立驱动的微型扑翼机器人<sup>[79]</sup>。(d) 摆动电磁舵机的结构及永磁铁的虚拟弹簧效应<sup>[80]</sup>。

到原位的力矩。

压电聚合物的主要成分为聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene Difluoride, PVDF)，是一种具有压电效应的聚合物薄膜材料，这种材料具有轻量化和柔软的特点。Wu 和 Liang 等人<sup>[83][84]</sup>提出了两种基于 PVDF 的微型机器人样机。第一代样机由一个 PVDF 薄膜和 PET 薄膜组成的并联结构驱动，PVDF 的上下表面均有 Pd/Au 电极层，另有一条 PET (Polyethylene Terephthalate) 胶带粘贴在机器人的底部作为前腿 (图 1.13(a))。该机器人的尺寸为  $3 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ，质量为 64 mg，由于所使用的均为柔性材料，该机器人可以在承受一个成年人的踩踏后继续运行。第二代样机在第一款样机的基础上，将机器人的前腿替换为两个电吸附足 (图 1.13(b))。由于具有电吸附足，这代样机可以实现极快的转弯过程，最高转弯加速度可以达到  $28 \text{ BL/s}^2$ 。

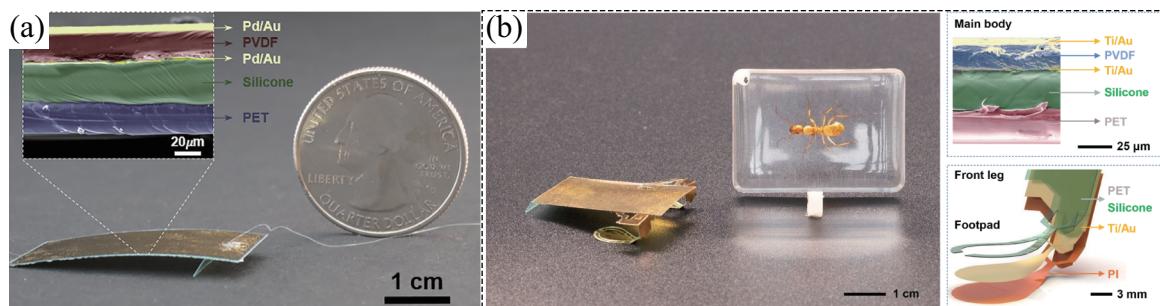


图 1.13 基于压电聚合物驱动的微型爬行机器人。(a) 使用 PET 作为前腿<sup>[83]</sup>。(b) 使用电吸附足<sup>[84]</sup>。

介电弹性体材料是一种应用广泛的电驱动智能材料<sup>[85]</sup>，这种薄膜材料在电场作用下会产生 Maxwell 应力，从而导致材料的变形和驱动效应。介电弹性体驱动器的构型很多，例如：单向约束构型；双向约束构型；卷曲构型；最小能量构型等等。Duduta 等人<sup>[86]</sup>提出两款基于单向约束构型的微型机器人（图 1.14(a)）。这些微型机器人的介电弹性体驱动器中的刚性碳纤维约束着驱动器的变形方向，这种驱动器不需要预拉伸即可产生可观的驱动效应。

Chen 等人<sup>[6]</sup>基于卷曲介电弹性体驱动器提出了一系列微型扑翼机器人（图 1.14(b))。这种驱动器具有极轻的质量（100 mg），极高的工作频率（500 Hz）和极大的功率密度（600 W/kg）。由于介电弹性体材料柔软的特点，搭载这种软驱动器的微型扑翼机器人在飞行过程中即便发生碰撞，也不会因为驱动器的断裂而失效（如果使用压电陶瓷驱动器，机器人发生碰撞时驱动器会断裂）。

Tang 等人<sup>[87]</sup>基于卷曲介电弹性体驱动器提出了一系列管道机器人（图 1.14(c))。这类机器人中包含两种介电卷曲驱动器模块：较短的锚定模块，用于将机器人的一端固定在管道内壁；较长的伸长模块，用于产生沿管道内的前进运动。由于主体部分由介电弹性体驱动器组成，该机器人具有很高的柔顺性，可以适应管道内部弯曲的结构。

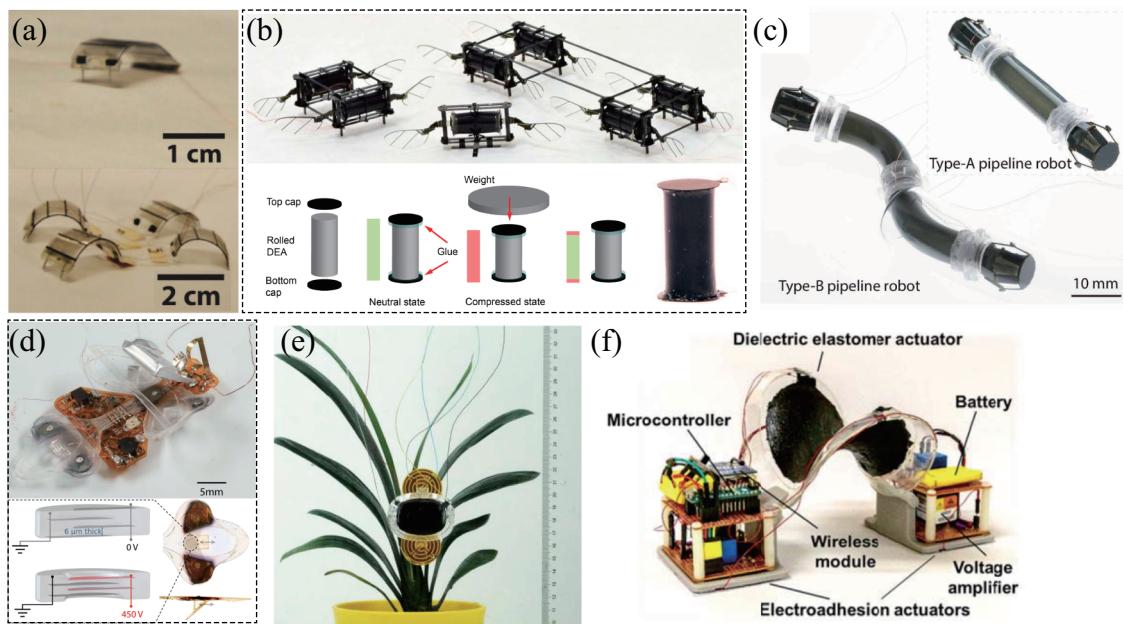


图 1.14 (a) 基于单向约束构型介电弹性体驱动器的微型爬行机器人<sup>[86]</sup>。(b) 基于卷曲节点弹性体驱动器的微型扑翼机器人<sup>[6]</sup>。(c) 基于卷曲节点弹性体驱动器的管道机器人<sup>[87]</sup>。(d)DEAnsect<sup>[88]</sup>。(e) 基于介电弹性体最小能量结构的攀爬机器人<sup>[89]</sup>。(f) 基于介电弹性体最小能量结构的无系留攀爬机器人<sup>[90]</sup>。

Ji 等人<sup>[88]</sup>提出的 DEAnsect 是一种基于双向约束介电弹性体驱动器的爬行机器人

(图 1.14(d))。在这项工作中他们提出一种低压介电弹性体驱动器堆叠 (Low Voltage Stacked DEAs, LVSDEAs)，这项技术可以将介电弹性体驱动器的电压降低到五百伏以下，极大地降低了介电弹性体的驱动条件。该机器人样机质量为 970 mg，最高速度可以达到 30 mm/s。

Gu 等人<sup>[89]</sup>和 Cao 等人<sup>[90]</sup>分别提出了基于 DEMES 结构的两款攀爬机器人(图 1.14(e) 和 (f))。这两款机器人都使用和 HAMR-E 类似的电吸附足，其电吸附足的电驱动黏附过程和 DEMES 的电驱动变形过程相配合实现机器人攀爬。

以上是一些应用较为广泛的微型机器人驱动技术，除了这些研究外，还有一些更加新颖，尚未被广泛采用的微型机器人驱动技术。

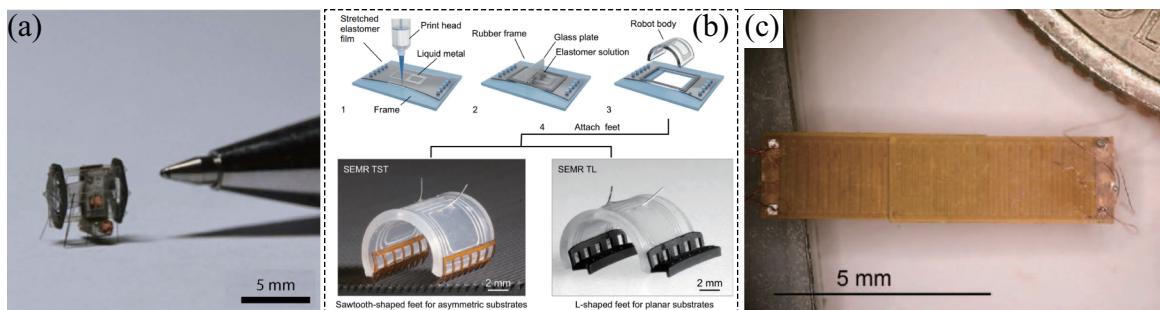


图 1.15 (a) 基于静电驱动悬臂梁的无系留微型机器人<sup>[91]</sup>。(b) 基于软体电磁驱动器的微型机器人 SEMRs<sup>[92]</sup>。(c) 基于静电薄膜电机的微型机器人<sup>[93]</sup>。

Qi 等人开展了关于静电驱动悬臂梁的微型机器人驱动技术研究<sup>[94][95][91]</sup>。这种驱动技术所使用的结构为一个悬臂梁安装在平行板电容器中，悬臂梁和平行板电容器的某一个电极接触后由于带上了相同的电荷，会因为电荷斥力向着另一极，如此往复摆动产生持续的振动驱动。2022 年，Zhu 和 Qi 等人<sup>[91]</sup>基于静电驱动悬臂梁制造了一个无系留的微型移动机器人 (图 1.15(a))，该机器人长度 5 mm，重量 9.4 mg，携带有 37 mg 的陶瓷电容由于供电，移动速度为 5.9 mm/s，运行时间为 1.68 s。

软体电磁驱动器通过用注入弹性体外壳中的液态金属代替传统电机中的固态金属线圈，因此可以制造出体积小、质量轻的全软体电磁驱动器<sup>[96]</sup>。2022 年，Mao 等人<sup>[92]</sup>提出一系列基于软体电磁驱动器的微型机器人 SEMRs (图 1.15(b))。该系列机器人由软体电磁驱动器线圈和一对摩擦脚组成，对于不同的基底摩擦脚可以采取不同的设计。其中的系留版本最高相对速度可以达到 70 BL/s，是目前相对速度最高的微型机器人之一。

静电薄膜电机是一种利用静电力产生驱动效应的平面化驱动器<sup>[97]</sup>，Wang 等人<sup>[93]</sup>提出了一种模仿骨骼肌多级驱动结构的微型静电薄膜电机及微型机器人 (图 1.15(c))。该

微型静电薄膜电机尺寸为  $28\text{ mm} \times 5.7\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ , 质量为  $92\text{ mg}$ , 可以在  $15\text{ mm}$  的行程中输出  $85\text{ mN}$  的力。这种微型电机驱动的机器人具有极高的柔顺性, 可以承受一个成年人的踩踏。

#### 1.2.4 微型机器人的性能评价指标

评价微型机器人的性能可以测量机器人样机的质量、尺寸、运动速度、相对移动速度、续航时间、制造成本等指标, 这些指标的共同点是容易量化。对于两种质量相近、尺寸相似的微型机器人样机, 他们的整体性能可以通过其他可量化指标进行比较。

除了以上这些客观的指标外, 还有一类指标用于衡量微型机器人的应用能力, 我们这里介绍两种: 一是系留 (Tethered) 与无系留 (Untethered); 二是自动化得分 (Autonomy Score)。

微型机器人主要应用于一些传统机器人不能执行的任务, 例如洞穴勘探和太空探测。对于这一类任务, 微型机器人样机是否能够无系留 (Untethered) 的执行功能是评判微型机器人样机水平的重要依据。系留样机需要缆线连接以实现供电和控制等功能。系留样机由于受到缆线的拖拽, 在运动过程中会受到缆线的干扰, 并且运动范围也会受到限制。为了实现无系留的微型机器人, 目前主要有两种技术方案: 一种是使用外加场对机器人进行场驱动 (Field-driven); 另一种是将机器人驱动所需的电池、控制器等元器件集成在机器人上。

常见的场驱动方式如磁场<sup>[98][99][92]</sup>, 光场<sup>[100][101][3]</sup>, 湿度场<sup>[102]</sup>等, 这种驱动方式虽然可以让微型机器人在运动过程中摆脱缆线的干扰, 但是机器人的运动空间依然受到限制, 机器人只能在产生驱动场装置能覆盖到的范围内工作。对于某些由磁场驱动, 目标环境是人体内的微型机器人, 场驱动可以满足这类机器人的工作需求。但是对于大部分微型机器人而言, 仍需要发展电池和控制器的集成技术。

微型机器人通过集成电子元器件的方式实现无系留需要付出极高的代价, 这一过程中降低最多的性能就是运动速度。很多微型机器人研究的系留版本可以实现极高的运动速度, 但是其无系留版本会降速很多, 例如: HAMR-VP<sup>[18]</sup>的最高速度达到  $0.44\text{ m/s}$ , 但是其无系留版本 HAMR-F<sup>[21]</sup>速度下降到  $0.17\text{ m/s}$ ; Mao 等人<sup>[92]</sup>提出的 SEMRs 系列微型机器人的系留版本速度极高, 相对速度高达  $70\text{ BL/s}$ , 但是其系留版本速度下降到  $2.1\text{ BL/s}$ 。

造成无系留样机相对于其系留版本速度下降的主要原因是需要集成电池和驱动组件，这些驱动组件中最有代表性的就是升压装置。由于技术限制，目前绝大多数无系留微型机器人都采用商业化的小型锂电池，这种电池虽然很轻，但是其输出标准电压基本为 3.7 V。在第 1.2.3 节中我们介绍的绝大多数微型机器人驱动技术均需要极高的驱动电压：压电陶瓷材料的驱动场强一般为  $1.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ ，对于  $127 \mu\text{m}$  厚的商业化的压电陶瓷产品，其驱动电压需要 200 V 左右；介电弹性体材料的驱动场强更高，Ji 等人<sup>[88]</sup>的 DEAnsect 使用的  $6 \mu\text{m}$  厚的介电弹性体薄膜需要 450 V 的驱动电压。将商业化锂电池的电压提高到上百伏需要使用复杂的升压装置，因此所集成电池和驱动组件往往比机器人本身要重得多。

评价微型机器人性能的另一个指标是自动化得分，这一概念由 Ryan St. Pierre 和 Sarah Bergbreiter 提出<sup>[103]</sup>，用于衡量微型机器人的自动化水平。自动化具体分为三项：能源自动化，控制自动化，感知自动化。每有其中一项便得一分，三项全部拥有为三分，得到三分的系统的系统也称为全自动化系统。

微型机器人和昆虫的尺度相似，因此评价微型机器人的性能时，经常将昆虫和微型机器人进行对比。从自动化得分的角度进行评价，昆虫均为全自动化系统。昆虫利用糖或者脂肪储存能源，因而具有能源自动化；昆虫具有脑和神经进行运动控制，因而实现了控制自动化；昆虫利用眼、皮肤、触角等进行环境感知，因而实现了感知自动化。

目前大多数无系留微型机器人的自动化得分一般为两分，即实现了能源和控制的自动化。从应用的角度来说，只要实现了能源和控制自动化，该样机即可被遥控执行任务。少数微型机器人通过集成传感器如地面颜色传感器<sup>[88]</sup>、气体传感器<sup>[84]</sup>或光传感器<sup>[104][105]</sup>实现感知功能，但是和昆虫的自动化水平与智能化程度相比仍然有较大差距。

## 1.2.5 小结

在本节中，我们综述了微型机器人领域的研究现状。介绍了昆虫尺度微型机器人领域的两个代表性研究 HAMR 和 RoACH，归纳了三种制造技术和八种驱动技术，并描述了两种微型机器人的性能评价指标。可以发现，实现无系留的全自动化微型机器人逐渐成为领域内的研究目标，越来越多的研究人员希望通过技术进度使得微型机器人达到甚至超越昆虫的运动能力和智能水平。无系留的全自动化微型机器人可以应用于灾后救援、洞穴探测、地外勘探、管道探测和精密仪器检测等众多领域，这些应用场景对微型

机器人的性能提出了更高的要求，实现上述任务需要发展新的设计理论和制造技术。

当前微型机器人研究的主要瓶颈在于缺少提升机器人运动能力的理论指导，尤其是缺少传动机构设计理论。微型机器人中的传动机构将驱动器输出的运动转换成机器人整体的运动和位移，因此传动机构对机器人的运动能力有重要影响。以 HAMR 为例，虽然其对球形五杆（Spherical Five-bar, SFB）构型传动机构的制造过程和动力学模型开展了深入研究，然而并未发展设计新型传动机构构型的相关理论或方法。目前关于微型机器人的传动机构研究仍处于探索阶段，不仅缺少高性能传动机构构型，而且缺少指导机器人传动机构设计和运动能力提升的理论，导致大多数微型机器人难以达到同尺度昆虫的运动能力。因此，本文开展了微型机器人传动机构设计理论和制造方法研究。

本文关于微型机器人的研究目标是设计一种高机动性无系留微型爬行机器人，为了实现这个目标，我们提出了一种新型二自由度折纸传动机构和一种考虑传动机构奇异性 的微型机器人新型设计方法。为了验证我们提出的机构和方法，我们基于 SCM 技术和压电多层梁驱动器，制造了名为 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 两款微型爬行机器人样机。

### 1.3 模块化和可重构机器人系统

模块化和可重构机器人（Modular and Reconfigurable Robot, MRR）系统是一类由很多重复单元组成的机器人系统，这些单元可以通过排列和连接使得整个系统呈现出不同的形态，这个过程称之为组装和重构。设计 MRR 系统的目标是利用组装和重构的特性，使 MRR 系统可以根据环境和任务需求变换自身形态，从而让系统具有更好的环境适应性，以及通过重构解决复杂任务的能力。

#### 1.3.1 模块化和可重构机器人系统的研究现状

MRR 根据其结构可以分为三类<sup>[106]</sup>：

1. 晶格结构（Lattice architectures）：系统单元为类似立方体的三维结构，系统可以重构不同的形状和图案。晶格结构系统通过这种设计方式来简化重构的技术难度，但是系统的功能性较弱。代表性的工作有：Molecule<sup>[107]</sup>, Miche<sup>[108]</sup>（图 1.16(a)）和 M-Blocks<sup>[109]</sup>等。
2. 链结构（Chain architectures）：系统单元可以组成串联的链，这些链可以是树状结

构或闭合的环。这类系统可以通过增加单元扩大系统规模和功能，但是随着单元数量增多，整个系统的运动控制也会变得更为困难。代表性的工作有：PolyBot<sup>[110]</sup>（图 1.16(b)），YaMoR<sup>[111]</sup>和 Molecule<sup>[112][113]</sup>等。

3. 移动结构（Mobile architectures）：系统单元具有移动能力，可以通过组装和重构构成复杂结构，一群单元也可以作为一个机器人集群（Swarm）表现出某些集群行为。代表性的工作有：CEBOT<sup>[114]</sup>，Swarm-bot<sup>[115]</sup>和 ModQuad<sup>[116]</sup>（图 1.16(c)）等。

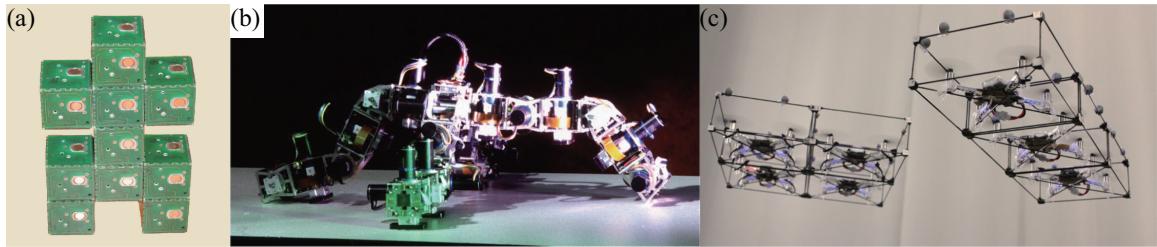


图 1.16 三类 MRR 系统结构及代表性工作。(a) 晶格结构的 Miche<sup>[108]</sup>，系统单元是立方体。(b) 链结构的 PolyBot<sup>[110]</sup>，二十四个单元组成一个四足构型。(c) 移动结构的 ModQuad<sup>[116]</sup>，系统单元是无人机，可以移动到指定位置完成组装。

除了这三类结构之外，还有一类混合结构（Hybrid architectures），具有上述三类结构的特点中多个种类的特点，因此难以被归类为某一种结构。混合结构的代表性工作有：SuperBot<sup>[117]</sup>，SMORES<sup>[118]</sup>和 M-TRAN 等<sup>[119]</sup>。本节中我们重点介绍两个研究，分别是：M-Blocks 和 M-TRAN。

Romanishin 等人<sup>[109]</sup>从 2013 年开展了名为 M-Blocks 的模块化机器人研究。该系统的单元是一种边长 50 mm 的机器人方块，通过方块边缘的圆柱型磁铁连接（图 1.17(a) 和 (b)）。机器人的内部有一个通过无刷直流电机转动的飞轮，飞轮的外围有一条可以被舵机驱动收紧的皮带（图 1.17(c)）。机器人驱动时，首先由电机带动飞轮转动，接着由舵机收紧皮带减速飞轮，这个过程中飞轮转动产生的惯量作用在整个机器人上，可以驱动机器人平面运动、腾空旋转以及断开磁连接。多个 M-Blocks 单元可以像砖块一样搭建结构，其中的单元可以通过磁连接在其他单元上运动，从而实现系统的变构过程。

在第一代 M-Blocks 中，无刷直流电机和机器人框架是相对固定的，因此机器人单元只能执行二维运动。为了解决这个问题，第二代 M-blocks<sup>[120]</sup>在无刷直流电机与机器人的外部框架之间安装了一个旋转电机，使得电机可以在机器人的方块框架内部围绕着方块的一条对角线旋转，从而让飞轮可以产生相对与机器人框架三个正交方向的旋转惯

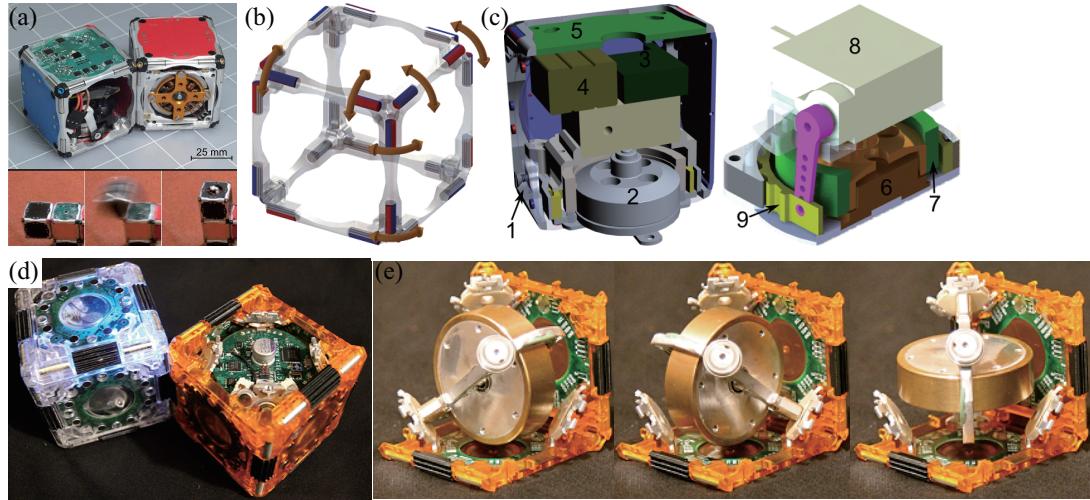


图 1.17 M-blocks<sup>[109]</sup>的外型和运动过程 (a), 磁连接 (b) 以及飞轮驱动系统 (c)。3D M-blocks<sup>[120]</sup>的外形 (d) 以及可旋转的飞轮驱动系统 (e)。

量, 因此第二代样机命名为 3D M-Blocks (图 1.17(d) 和 (e))。3D M-Blocks 单元组成的组装系统可以重构为各种三维结构, 打破了上一代 M-Blocks 只能执行二维运动的限制。

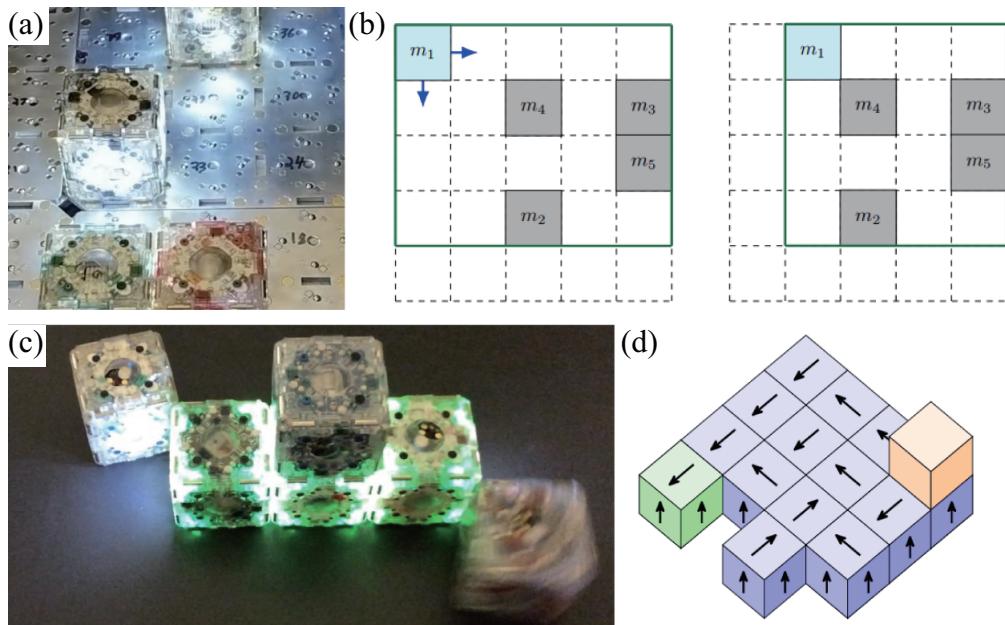


图 1.18 3D M-Blocks 的去中心化控制研究。3D M-Blocks<sup>[121]</sup>的随机聚集过程 (a) 和算法演示 (b)。3D M-Blocks<sup>[121]</sup>排成一条直线 (c) 以及一个单元在一群单元上按设定轨迹行走 (d)。

在 3D M-Blocks 的基础上, Romanishin 等人又开展了一系列基于该系统的去中心化 (Decentralized) 组装和控制功能研究。Ozdemir 等人<sup>[121]</sup>基于随机运动控制算法实现了一群 3D M-Blocks 在二维平面上的聚集和连接 (图 1.18(a) 和 (b))。Romanishin 等人<sup>[122]</sup>利用磁识别标 (Magnetic Fiducial Tag) 实现系统的轨迹追踪、排成直线和光梯度聚集等功

能（图 1.18(c) 和 (d)）。可以发现，从 M-Blocks 到 3D M-Blocks 的运动能力提升，极大的拓展了该系统的研究空间，为这类晶格结构 MRR 系统的去中心化控制和三维运动控制提供了高性能的平台。

M-TRAN 的全称是 **modular transformer**，该系统的模块是两个相连的立方体，这些立方体可以通过末端的磁连接关节形成链状结构以执行操作或运动等任务（图 1.19(a))。第一代 M-TRAN 系统<sup>[119]</sup>确定了单元硬件方案，如：机载处理器、驱动器、通信和电力传输以及磁连接方案。第一代 M-TRAN 可以实现重构和行走等功能，但是这一代系统是通过主机控制而非分布式控制，因此系统只能执行主机中预先编程的功能。

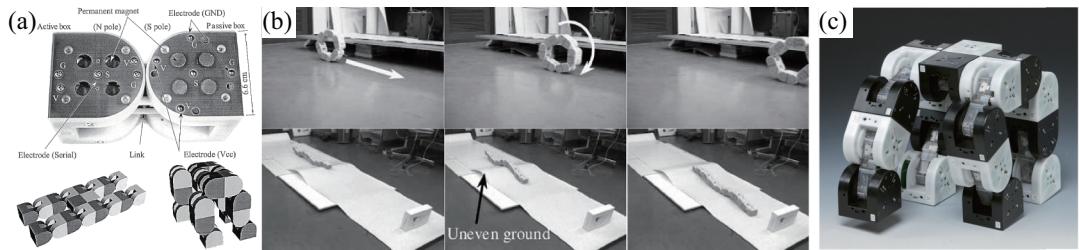


图 1.19 M-TRAN 系列研究。(a) 第一代 M-TRAN<sup>[119]</sup>，单元为两个相连的立方体。(b) 第二代 M-TRAN II<sup>[123][124]</sup>，采用 CPG 实现了多种形态的运动控制：(上：环形态滚动；下：链形态爬行)。(c) 第三代 M-TRAN III<sup>[125]</sup>，采用分布式控制架构，图中为其四足形态。

第二代 M-TRAN II<sup>[123][124]</sup>的研究主要关注系统的自动化运动控制，通过应用 CPG 产生的节律性信号控制组装系统的运动过程。为了提高系统运动过程的适应性，团队将 CPG 和遗传算法相结合，以仿真环境中的运动效果为目标利用遗传算法优化 CPG 的控制参数。利用 CPG 控制，M-TRAN II 实现了如滚动、爬行、步行等多种运动模式（图 1.19(b)）。

第三代 M-TRAN III<sup>[125]</sup>（图 1.19(c)）采用分布式控制器，实现了三种控制模式：1. 虚拟主机控制；2. 全局同步控制；3. 并行异步控制。M-TRAN III 展示了分布式控制架构的稳定性和系统均匀性，并验证了分布式控制可以在主机控制网络不稳定的情况下依然保持各单元之间的协作。

### 1.3.2 模块化和可重构机器人系统的技术难点

设计 MRR 系统，是基于这种多机器人系统具有如下优点<sup>[126]</sup>：

1. 灵活性：系统具有大量冗余自由度，可以针对很多任务生成对应的构型。

2. 鲁棒性：系统的冗余性和自适应性带来的自修复性，增加了系统的鲁棒性。

3. 低成本：单元具有重复性，批量制造可以降低成本。

但是因为实现鲁棒性所需要的自修复功能具有极高的控制难度。实现低成本需要极大的系统规模，而目前的 MRR 系统规模受限于连接强度，最多只能实现几十个单元的相互连接。所以现有的 MRR 系统只能实现灵活性的优点。

实现 MRR 系统理论上的全部优点，需要解决硬件和软件两个层面的技术难点。MRR 系统硬件层面上的技术难点主要有三点：1. 高性能驱动技术-提高系统单元的运动性能；2. 高集成度传感技术-提高系统单元的智能化水平；3. 高强度连接技术-扩大系统组装规模。MRR 系统软件层面的技术难点主要包括两方面：一是针对将要解决的任务类型，系统完成自身形状的匹配；二是系统重构过程的运动规划和控制。现有的 MRR 研究大多基于各自系统硬件，对这两个问题提出了一些解决方案。对于这两个问题目前尚未有通用的解决方法。

本文研究的内容涉及微型的 MRR 系统，因此我们需要考虑微型机器人技术和 MRR 技术结合后的技术难点。可以发现，MRR 系统硬件层面的技术难点的前两点和我们在上一节中介绍的微型机器人技术发展目标是相似的，都是为了提高系统的运动性能和功能集成度。而对于微型机器人来说，由于系统的质量更轻，如果想实现微型机器人的组装功能，所需要的连接关节可以更轻，系统的规模也更容易扩大。因此在硬件层面上，基于微型机器人技术发展微型的 MRR 系统具有一定的优势。在软件层面上，如果想要实现微型的 MRR 系统，由于微型机器人的机载算力是有限的，设计控制算法时还需要考虑算法对硬件算力的需求。因此在软件层面上，设计微型的 MRR 系统除了需要解决 MRR 系统本身的控制问题，还需要考虑微型机器人低算力的特点对这些算法进行改进或提出针对微型 MRR 系统的算法。

### 1.3.3 小结

在本节中，我们回顾了 MRR 的研究现状，介绍了该领域对机器人系统的分类，并介绍了两个具有代表性的研究 M-Blocks 和 M-TRAN，最后我们结合 MRR 领域的发展历程，归纳了 MRR 研究所面临的技术难点。可以发现，MRR 的研究目标往往是相似的，都是实现个体的智能化和系统的自动化，研究进程可以归纳为三个阶段：

- 阶段一：单元硬件设计。根据系统结构（晶格结构、链结构、移动结构、混合结构）设计单元硬件，具体包括系统的驱动方式和连接方式。
- 阶段二：系统运动控制。在硬件设计的基础上，开展对单元及组装系统的运动控制研究，提高系统的运动性能和工作表现。
- 阶段三：系统自动化。在运动控制的技术上，开展对系统的自动化和智能化研究，例如：组装过程去中心化和自动化、面对需求自动重构等等。

本文关于 MRR 的研究目标是设计一种昆虫尺度的混合组装机器人系统。我们提出仿生组装机器人系统 BioARS 概念，该系统由一群爬行机器人作为组装单元，爬行机器人通过磁连接成为一个四足机器人形态以获得更好的环境适应性。我们的研究也分为三个阶段：阶段一-设计微型爬行机器人；阶段二-实现爬行机器人和组装后四组机器人的运动控制；阶段三-实现整个系统的自动化组装，行走等功能。目前，我们已经完成阶段一（本文第二章、第三章）和阶段二（本文第四章），我们设计了高机动微型爬行机器人，并设计了一种可以控制由八个爬行机器人所组成的四足机器人的仿生运动控制架构。

## 1.4 仿生运动控制

上一节中我们介绍了 MRR 系统的研究进程，其中阶段二为系统的运动控制。机器人系统的运动控制策略很多，例如：基于模型的控制方法<sup>[127][128][129]</sup>（Model-based Approach），基于行为的控制方法<sup>[130][131]</sup>（Behavior-base Approach）以及仿生运动控制方法<sup>[132]</sup>（Biocybernetics Approach）等等，其中仿生运动控制相对于前两种控制策略，具有算力需求低，适应性高等优点。因为本文的研究目标是构造一种微型 MRR 系统，需要考虑到微型化带来的算力限制，所以我们采用仿生运动控制作为组装机器人系统的控制策略。

仿生运动控制主要模仿生物的节律性运动控制结构。生物的节律性运动<sup>[133]</sup>包括行走、咀嚼、呼吸和消化等等，神经生物学研究表明，这些节律性运动并不受到大脑的直接控制，其控制信号来自于中枢模式发生器（Central Pattern Generator, CPG）。CPG 在生物中广泛存在，位于脊椎动物的脊髓或者是无脊椎动物的胸腹神经节中<sup>[134][135]</sup>。生物中的 CPG 是由一组中间神经元构成的局部振荡网络，通过神经元间的相互抑制产生自

激振荡，产生具有稳定相互锁关系的多路或单路周期信号。从工程角度看，CPG 可以被看作一组相互耦合的非线性振荡器组成的非线性动力学网络<sup>[132]</sup>，因此 CPG 可以作为机器人的运动控制器。本节主要介绍 CPG 控制器模型研究，CPG 在机器人控制中的应用研究，以及从非线性动力学网络角度研究 CPG 的理论基础。

### 1.4.1 仿生运动控制的模型研究

CPG 是由一组神经元组成，神经元之间相互连接形成网络，本节主要介绍 CPG 中常用的神经元模型和网络结构。

CPG 的神经元模型可以分为两类，一类是具有生物学基础的模型，例如：Fitzhugh-Nagumo model<sup>[136][137]</sup>，Stein Neuronal model<sup>[138][139]</sup>，Matsuoka model<sup>[140][141]</sup>等等。另一类是人为设计的具有极限环的动力学方程，这种模型一般称为振荡器（Oscillator），例如：Van der Pol oscillator<sup>[142][143]</sup>，Phase oscillator<sup>[144]</sup>，Hopf oscillator 等等。本小节中我们介绍其中两个具有代表性的模型：FitzHugh-Nagumo model 和 Van der Pol oscillator。

FitzHugh-Nagumo model 是从 Hodgkin-Huxley model<sup>[145][146]</sup>推导简化得出的，在 CPG 中较为常用的方程形式是<sup>[136][137]</sup>：

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= c \cdot (y_i + x_i + \frac{x_i^3}{3} + f_{ci}) \\ \dot{y}_i &= -\frac{x_i - a + b \cdot y_i}{c}\end{aligned}\tag{1-1}$$

其中， $i$  表示神经元的序号， $x_i$  是神经元的膜电势， $f_{ci}$  是第  $i$  个神经元受到的驱动信号， $a$ 、 $b$ 、 $c$  是没有生理意义的常数。

神经元受到的调控信号以及神经元间的相互抑制作用可以通过公式1-1中的  $f_{ci}$  项引入， $f_{ci}$  的具体形式为：

$$f_{ci} = f_a + f_b \cdot [k_1 \sin(k_2 t)) + \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} \cdot x_j]\tag{1-2}$$

其中， $f_a$  是驱动信号的稳态项， $f_b$  是影响神经元受到的激励的振幅参数， $k_1 \sin(k_2 t)$  是神经元受到的调控信号，对网络中的所有神经元作用都相同， $k_1$  和  $k_2$  表示调控信号的振幅和频率， $\sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} \cdot x_j$  是神经元间的相互作用项， $\lambda_{ji}$  表示第  $j$  个神经元对第  $i$  个神经元的耦合作用的强度。

Van der pol oscillator 在 CPG 中常见的方程形式为<sup>[143]</sup>:

$$\ddot{x}_i + \mu \cdot (x_{ai}^2 - p^2) \cdot \dot{x}_i^2 + g^2 \cdot x_{ai} = q \cdot [1 + k_1 \sin(k_2 t)] \quad (1-3)$$

其中,  $i$  表示神经元的序号,  $x_i$  是振荡器的输出信号,  $\mu$  决定了振荡器的非线性程度,  $x_{ai}$  是振荡器受到的耦合作用, 具体形式在公式 1-4,  $p$  和  $g$  分别控制振荡器输出信号的幅值和频率,  $q \cdot [1 + k_1 \sin(k_2 t)]$  项表示振荡器所受到调控信号,  $q$  是一个幅值常数,  $k_1$  和  $k_2$  表示调控信号的振幅和频率。

Van der Pol oscillator 的相互作用项的形式为<sup>[143]</sup>:

$$x_{ai} = x_i + \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} \cdot x_j \quad (1-4)$$

其中  $\lambda_{ji}$  表示第  $j$  个神经元对第  $i$  个神经元的耦合作用强度。

比较这个两个模型可以发现, 其方程中表示神经元所受到的调控信号和神经元间相互作用这两项的形式具有相似性, 例如神经元所受到的调控信号均表示为正弦信号  $k_1 \sin(k_2 t)$ , 神经元间相互作用均表示为其他神经元的膜电势对于某一神经元的线性作用  $\sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} \cdot x_j$ 。这种简化形式具有通用性, 可以让神经元模型变得更为简洁。

CPG 的网络结构和控制的机器人的运动形式相关, CPG 所包含的神经元数量往往和机器人中需要控制的关节数量或肢体数量相当<sup>[147][148]</sup>。链式网络常见于蛇形机器人<sup>[149][150][151]</sup>, 四元网络常见于四足机器人<sup>[152][153][154]</sup>, 六元网络常见于六足机器人<sup>[155][156][157]</sup>。这里我们以四足机器人的四元网络 CPG 为例, 介绍几种常见的四元网络结构, 分别是: 单向环, 双向环, 以及全连接(图 1.20)。

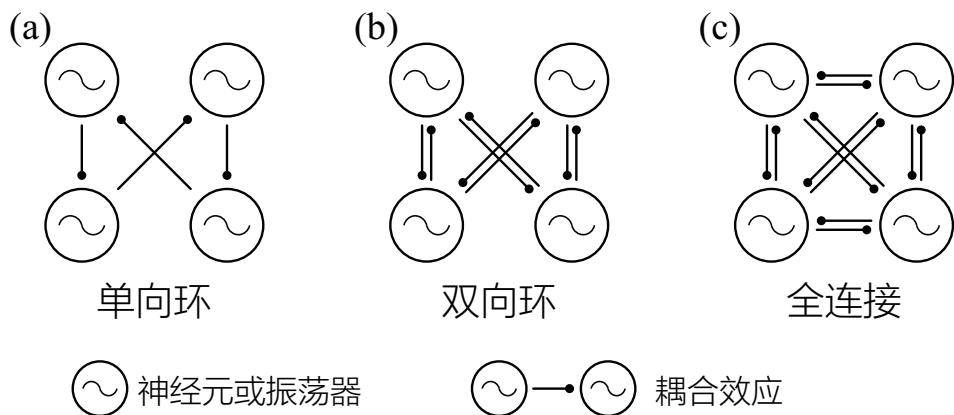


图 1.20 四元网络 CPG 常见的网络结构。(a) 单向环结构。(b) 双向环结构。(c) 全连接结构。

单向环结构是最简单的四元 CPG 网络结构, 网络内有四条耦合效应, 呈现出一个

单向连接的四元环，网络结构的对称性为  $Z_4$ 。Collins 等人<sup>[158]</sup>对这种网络结构进行了详细的研究，基于 Stein neuronal model, Van der Pol oscillator 和 FitzHugh-Nagumo model 这三种神经元模型分别实现了 CPG 的网络结构设计和步态控制。该研究基于数值仿真，实现了单向四元环网络基于以上神经元模型的 walk、trot 和 bound 三种步态，并提出了三种步态间的切换策略。

双向环四元网络内部的八条耦合效应呈现出一个双向连接的四元环，网络机构的对称性为  $D_4$ 。和单向环结构相比，双向环的对称群包含的群生成元更多，因此其支持的步态也更为复杂（具体分析见第1.4.3小节）。Kimura 等人基于<sup>[152]</sup> Matsuoka model 的四元双向环 CPG 实现了四足机器人的 trot 步态的运动控制。该 CPG 集合了生物的多种发射行为，例如拉伸发射、前庭脊髓发射和伸肌-屈肌反射，具体方式为机器人传感器收到的信号以抑制耦合或激励耦合的方式接入到 CPG。

全连接网络中，任意两个神经元之间均存在等效的双向连接，这种网络结构的对称性为  $S_4$ 。Liu 等人<sup>[159]</sup>基于 Matsuoka model 的全连接网络 CPG，提出了一种三维空间运动适应性轨迹生成器，搭载该生成器的平台可以在复杂的地面上行走。该 CPG 中四个神经元产生的四路信号被映射函数（Mapping Function）映射成一个三维周期性轨迹，这也是四元网络控制四足机器人多关节的常见方式，腿之间节律性由 CPG 输出信号的节律性保证，而每条腿中关节的控制信号由映射函数生成。

### 1.4.2 仿生运动控制的应用研究

上一小节中我们介绍了 CPG 中常用的神经元模型和网络结构，本小节中我们将介绍 CPG 作为仿生运动控制器的优点和代表性工作。

CPG 作为仿生运动控制器具有如下优点<sup>[132][160]</sup>：

1. 稳定性 (Stability): CPG 作为非线性动力系统，稳定性来自于系统具有的极限环 (Limit Cycle)，因此系统可以抵抗小的扰动。
2. 节律性 (Rhythmicity): CPG 产生的信号具有周期性，不同神经元之间的信号具有稳定的相位关系。
3. 多样性 (Variety): 单个 CPG 控制可以产生多种行为或步态，并且系统在行为（或步态）间切换仅需要进行简单的参数调整。

4. 适应性 (Adaptability): CPG 可以和集成反馈回路, 神经元和系统的状态可以通过反馈信号调节。

作为一种运动控制器, 稳定性和节律性的特点让 CPG 适用于周期性的运动控制, 例如机器人的行走和游动等动作, 因此十分适合作为仿生机器人的运动控制器。CPG 的多样性让一种 CPG 控制器通过简单的参数调整, 即可产生多种不同的节律性, 这一点尤其适合控制仿生机器人的多种运动模式, 例如足式机器人的步态切换。适应性特点意味着 CPG 可以很容易地集成传感反馈模块, 适合机器人的自动化控制。因此 CPG 十分适合机器人的周期性运动的自动化控制。本节中我们将介绍 CPG 在仿生机器人, 微型机器人和软体机器人中的代表性应用以证明其优点。

Manoonpong 等人<sup>[161][162][163][164][165]</sup>开展了一系列使用集成传感的 CPG 进行多关节腿足式机器人运动控制的研究 (图 1.21)。该研究所使用的网络架构分为四层, 其 CPG 使用两个神经元相互抑制自激励二元网络生成运动信号, 该二元网络受到神经信号的调控, 传感器的输入信号通过神经元相互作用的方式引入这两个神经元。为了控制机器人的多个关节, CPG 生成两路控制信号会再次输入速度整定网络 (Velocity Regulating Network, VRN) 和相位选择网络 (Phase Switching Network, PSN), 经过这两个网络处理的关节信号将用于机器人的关节电机控制。

Ijspeert 等人<sup>[149][166][151][167]</sup>提出了一种通过链状网络 CPG 进行运动控制蝶螈机器人 (图 1.22)。其中一项重要成果是在控制机器人游泳运动的链状网络上增加额外的神经元实现了足式运动控制<sup>[166]</sup>, 复现了蝶螈从水生运动演化运动到陆生运动的进化过程。这项研究不仅为机器人通过仿生运动控制架构设计提供新的思路, 同时也证明了机器人可以作为研究神经生物学和进化生物学的重要手段。该研究后续<sup>[168]</sup>还通过在链状网络的基础上设计集成了多种传感器, 实现了机器人对环境的自动化监控。Manoonpong 和 Ijspeert 的研究均为使用 CPG 进行仿生机器人运动控制。两项研究都在 CPG 实现机器人运动控制的基础上, 集成了传感器实现了机器人运动的自动化, 证明了 CPG 作为运动控制器的适应性优点。

Saito 等人<sup>[169]</sup>提出了搭载纯硬件 CPG 控制器微型机器人 (图 1.23(a))。该研究使用一个四元全连接网络结构 CPG 控制一个 2.7mm 长的微型足式机器人, 所使用的 CPG 是通过集成电路技术制造 (图 1.23(b) 和 (c)), 通过硬件电路实现。这项研究证明了 CPG 可以通过体积极小的硬件实现, 不需要过高算力的硬件。

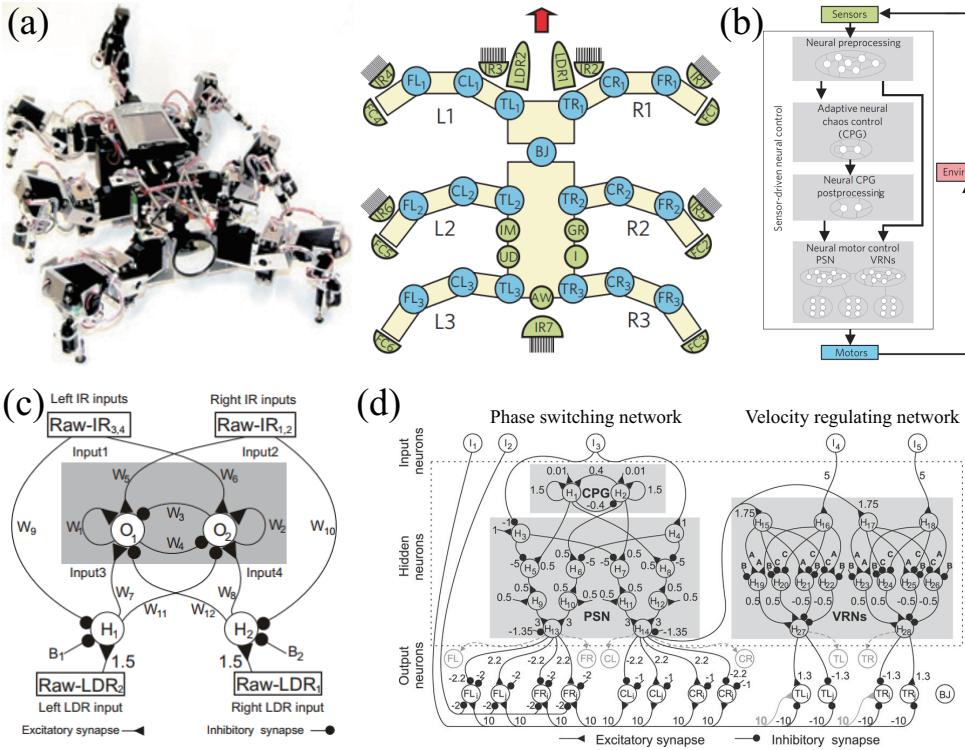


图 1.21 六足机器人的样机 (a) 和控制架构 (b)。(c) 生成运动信号的二元网络<sup>[162]</sup>。(d) 运动控制架构的两个后处理网络<sup>[163]</sup>: 速度整定网络和相位选择网络。

Drotman 等人<sup>[170]</sup>基于一种双稳态气阀<sup>[171]</sup> (图 1.23(e)), 构造了一种气动的三元抑制回路, 实现了一个不包含任何电子元器件的纯气动振荡器。并通过该振荡器驱动三腔软体机械臂, 实现了一个软体机器人的行走运动控制 (图 1.23(d) 和 (f))。

Saito 和 Drotman 的研究分别从微型机器人和软体机器人的角度证明了 CPG 的优点, 这两项研究不仅证明了 CPG 具有极高的稳定性和节律性。还从制造 CPG 硬件的角度说明 CPG 具有极强的集成性, 可以通过集成电路的方式制造, 达到极小的体积和功耗, 或者用气动回路的方式制造, 甚至不需要任何电子元器件。

### 1.4.3 仿生运动控制的理论基础

CPG 作为仿生运动控制器有诸多优点, 也已经应用在很多机器人平台上, 但是关于如何设计 CPG 尚未有一套公认的方法。本文的研究目标是实现一种基于微型机器人的 MRR 系统, 我们希望实现该系统组装成四足机器人形态的运动控制。由于一个四足机器人将由八个爬行机器人模块组成, 因此我们需要一个分布式的八元网络控制器作为 CPG 而不是四元网络。并且我们希望实现组装四足机器人的多种运动步态, 所以需要从 CPG 实现步态控制的原理出发设计一种新型八元 CPG。本小节将介绍 CPG 作为一种多

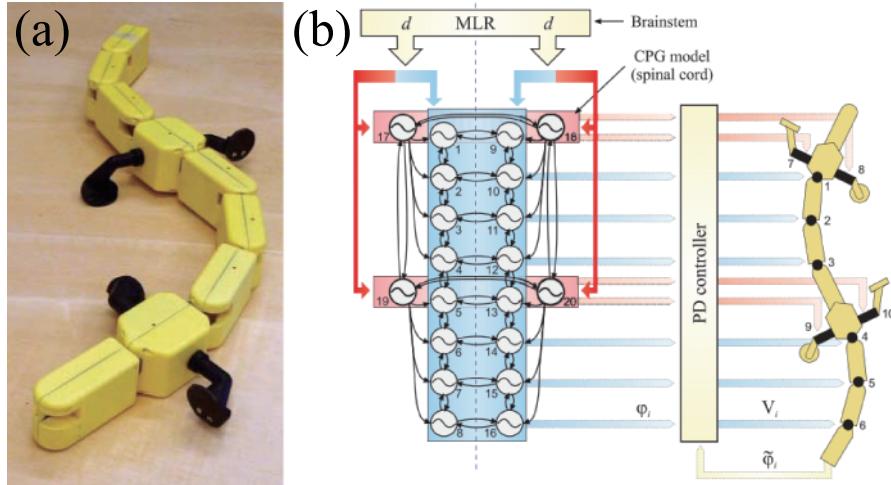


图 1.22 水路两栖仿蝾螈机器人<sup>[166]</sup>的样机 (a) 和 CPG 控制架构 (b)。

元非线性动力学网络产生节律性信号的理论基础，具体包括：网络的对称性、步态的节律性以及步态节律性与网络对称性之间的关系。

在第1.4.1小节中我们介绍过，CPG 是由一组神经元方程相互耦合组成的神经网络。CPG 实质上是多个动力学方程（神经元）相互耦合（神经突触）构成的一个具有对称性的动力学网络。该网络的对称性可以用图论同态群（Graph-theoretic Automorphism Group）来描述，即网络的拓扑结构所具有的对称性构成的群。从动力学网络的角度来看，CPG 的优点如稳定性和节律性实质上动力学系统的特性。CPG 网络的多样性特点，即可以产生多种步态，实质上该动力学系统具有多个周期性吸引子（Attractor）。而步态切换意味着系统周期性吸引子的改变，或者说通过调控系统的参数导致了系统的分岔（Bifurcation）。

步态（Gait）有很多种，四足动物常见的步态<sup>[172]</sup>包括：walk、trot、gallop 等等。步态的特点是关节之间具有稳定的相位关系，以 walk 步态为例，四条腿的髋关节之间存在稳定的  $\frac{1}{4}$  相位差，而一条腿内部的膝关节和髋关节之间又存在一个特定的相位差。因此，步态的节律性本质是一种关节之间时域信号的时空对称性（Spatiotemporal Symmetry）。

一个 CPG 网络支持的步态种类，本质上是一个多元动力学网络所具有的周期性吸引子的种类。CPG 的网络所支持的每一种步态所对应的周期性吸引子都对应着一个时空对成群（Spatiotemporal Symmetry Group），该时空对成群和网络的图论自同态群的关系由  $H/K$  商群理论定义，该理论描述为：

( $H/K$  Theorem<sup>[173][174]</sup>) Let  $\Gamma$  be the symmetry group of a coupled cell network in which

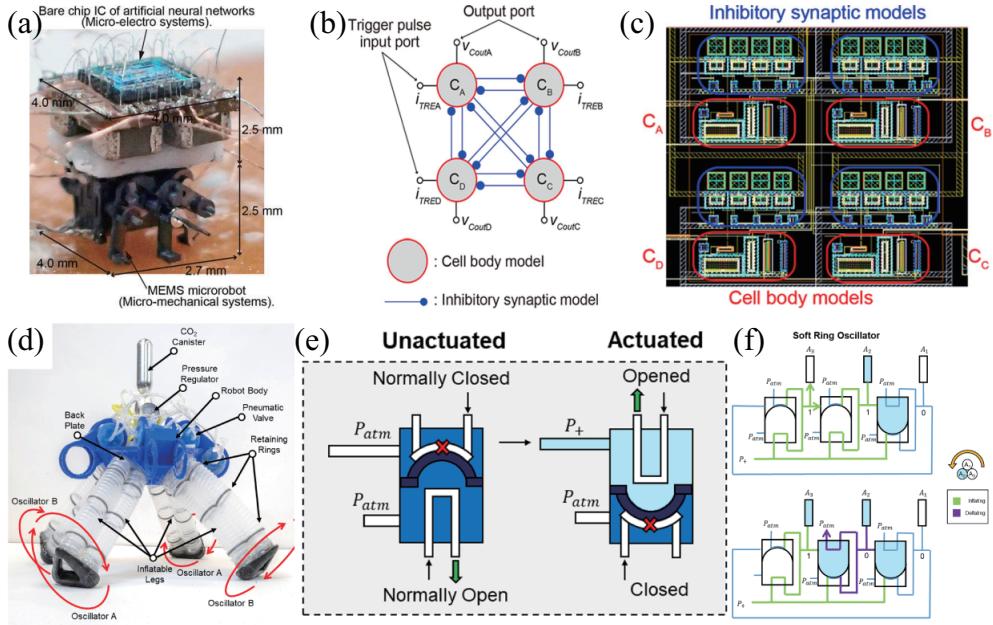


图 1.23 使用集成电路 CPG 的微型足式机器人<sup>[169]</sup>的样机 (a)、网络结构 (b) 和机载芯片 (c)。使用无电子气动振荡器的软体足式机器人<sup>[170]</sup>的样机 (d) 和双稳态气动阀 (e) 和振荡器气动回路 (f)。

all cells are coupled and the internal dynamics of each cell is at least two-dimensional. Let  $K \subset H \subset \Gamma$  be a pair of subgroups. Then there exist periodic solutions to some coupled cell systems with spatiotemporal symmetries  $H$  and spatial symmetries  $K$  if and only if  $H/K$  is cyclic and  $K$  is an isotropy subgroup. Moreover, the system can be chosen so that the periodic solution is asymptotically stable.

简而言之，CPG 网络的图论自同态群为  $\Gamma$ ，网络中的每种步态都对应着一个  $H$  和  $K$  的组合。 $H$  是步态的时空对称群， $K$  是对应于步态的空间对称性的各向同性子群 (Isotropy Subgroup)。商群  $H/K$  是对应于步态周期性的循环子群 (Cyclic Subgroup)，该商群描述了步态的时间对称性。

从动力学的角度分析，网络对称性决定了 CPG 支持的步态，所以设计网络结构的对称性是设计 CPG 最重要的环节。然而，随着网络单元数量的增多和网络规模的扩大，设计和分析网络对称性变得更加困难。

#### 1.4.4 小结

在本节中，我们回顾了 CPG 的研究现状，介绍了 CPG 在机器人运动控制中常用的神经元模型、网络架构和代表性的工作。从动力学的角度来看，CPG 是一种具有拓扑对称性的多元非线性动力学网络。我们从动力学网络的角度概述了通过网络对称性设计

CPG 的理论基础。

关于 CPG 的应用型研究很多，但是现有的四足机器人 CPG 架构多数包含四个神经元，仅能用于控制髋关节之间的相位差，而其膝关节的信号常使用髋关节信号的映射，因此不能实现对四足机器人八个关节的分布式控制。本文的研究目标是构造一种微型的多机器人系统 BioARS，该系统的组成单元为微型爬行机器人，八只爬行机器人可以组装为一个八关节四足机器人。我们想利用 CPG 算力要求低、具有自适应性、容易融合传感器信息等优势，实现组装后四足机器人的仿生运动控制。为了实现对该机器人八个关节的分布式控制，需要一种新型八元网络架构。

因此，本研究基于动力学网络的对称性原理，设计了一种新型八元网络 CPG，并基于该八元网络提出一种三级仿生运动控制架构用于 BioARS 四足形态的运动控制。

## 1.5 本文主要研究内容

为了解决微型机器人传动机构设计问题、模块化和可重构机器人系统运动控制架构设计问题，搭建一种高机动性、高适应性微型爬行机器人及其组装机器人系统，本文在旋量代数、格拉斯曼-凯莱代数 (Grassmann-Cayley Algebra)、非线性动力系统网络对称性理论的指导下，开展了微型机器人传动机构设计理论研究和微型多机器人运动控制架构研究，发展了高性能微型机器人传动机构设计方法与微型组装机器人系统仿生运动控制架构。具体研究内容如下：

(1) **基于旋量代数和构型综合方法，设计一种适用于微型机器人的三支链二自由度传动机构构型。**从微型机器人运动对自由度的需求出发，基于旋量理论和构型综合方法，结合微型机器人传动机构制造工艺，设计了一种二自由度折纸传动机构并设计了其平面化制造工艺。提出了搭载该传动机构的第一代微型爬行机器人 S<sup>2</sup>worm。

(2) **基于 Grassmann-Cayley Algebra 对传动机构的奇异性分析，发展一种高性能微型机器人设计方法。**从实验发现的二自由度折纸传动机构的奇异性问题出发，论证了使用 Grassmann-Cayley Algebra 对折纸传动机构进行奇异性分析的合理性和优势，提出一种考虑奇异性的微型机器人传动机构设计方法。对提出的二自由度折纸传动机构进行了奇异性分析，推导出机构所有的奇异构型。并根据奇异性分析结果，优化了折纸传动机构设计。提出了搭载该传动机构的第二代微型爬行机器人 S<sup>2</sup>worm-G。

(3) 基于所提出的高性能微型爬行机器人，提出一种以爬行机器人为组成单元的仿生组装机器人系统架构。提出仿生组装机器人系统（Bionic Assembly Robotic System, BioARS）概念，即一种由八只或更多爬虫机器人作为模块的多机器人系统，爬虫机器人可以组装为一个四足机器人，因而该系统具有爬虫和四足动物两种运动形态及其对应的环境适应性。基于样机系统组装、站立和运动控制实验中的硬件设计和控制架构设计问题，总结了将该系统进行微型化的三个重要研究问题。

(4) 为了解决微型组装四足机器人的膝-髋关节分布式控制问题，基于非线性动力系统网络对称性理论，提出一种新型八元网络中枢模式发生器。在 BioARS 系统的基础上，提出第二代微型仿生组装机器人系统 BioARS-II，其爬虫机器人模块为八只 S<sup>2</sup>worm-G。为了满足该系统低算力、高灵活性的四足运动控制需求，提出了一种基于对称性网络的中枢模式发生器作为 BioARS-II 的仿生运动控制架构。基于多元动力系统的网络拓扑对称性和系统状态时空对称性之间的关联，通过构造网络的全局对称性和局部对称性，设计出一个具有八神经元，双层网络结构的中枢模式发生器。针对 BioARS-II 系统架构，提出了以上述中枢模式发生器为核心的 BioARS-II 系统三层仿生运动控制架构。

## 2 传动机构运动学设计与微型爬行机器人 S<sup>2</sup>worm

本章的研究目标是提高微型机器人的运动能力，为此我们开展了微型机器人高性能传动机构研究。基于旋量理论和构型综合方法，开展微型机器人传动机构运动学设计研究，提出了一种新型三支链二自由度并联机构构型，结合智能复合微结构制造技术，制造了一种二自由度折纸传动机构，并制造了搭载该传动机构的高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm。

### 2.1 引言

微型机器人的设计通常参考昆虫，如尺蠖<sup>[175]</sup>、蜜蜂<sup>[4]</sup>和蟑螂<sup>[18,25-26]</sup>。其中，地面运动的昆虫机器人具有高机动性和更强的地形适应性等优势<sup>[103]</sup>，成为该领域主要研究方向之一。

大多数地面昆虫机器人是人造的机械系统，如果类比成生物，其骨骼和肌肉是机器人的驱动传动机构，其大脑是机器人的控制系统。与大型机器人相比，昆虫机器人的设计和制造过程很少采用机械加工方法和商业化的零件。例如，在大型机器人中常用的驱动器如电动机、气动驱动器和液压驱动器，而在昆虫机器人中，最常见的驱动器是微型马达<sup>[79,176-177]</sup>以及像压电陶瓷<sup>[4,21]</sup>、介电弹性体<sup>[88,178]</sup>和形状记忆合金<sup>[25,73]</sup>等智能材料。

传动机构设计是微型机器人设计中最为困难的环节之一。由于智能材料驱动器的响应通常是材料变形而不是类似电机的旋转运动，因此需要传动机构将驱动器的变形转化为机器人的运动<sup>[21,25,61]</sup>。为了模仿昆虫运动效果，这类传动机构通常需要具有超过一个自动度（Degree of freedom, DoF）。球形五杆机构（Spherical Five-bar, SFB）在微型机器人中的应用非常成功。这是一个著名的二自由度传动机构，最早应用于 HAMR 系列仿蟑螂机器人作为驱动腿足的髋关节<sup>[16]</sup>，使得 HAMR 系列机器人可以快速前进和转弯。对于另外一类仿尺蠖机器人，由于缺少适用于这一类运动模式的传动机构，刚性结构的仿尺蠖机器人样机很难实现转弯功能，而软体仿尺蠖机器人样机可以通过非对称地激活肌肉来实现转弯功能<sup>[88][178]</sup>，因此有必要为仿尺蠖昆虫机器人设计一种二自由度传动机构。在为小尺寸机器人设计传动机构时候，并联构型相比于串联构型，具有更小的体积

和更高的刚度。这是由于并联机构和动平台和定平台之间连接有两个或多个串联运动支链。当对动平台施加载荷时，多个支链会对动平台产生支撑力，因而使得整个结构具有更高的刚度。这对传动机构的设计也提出了极高的要求，目前除了 SFB 之外尚未有合适的二自由度传动机构作为参考。

目前，常用的几种适用于微型机器人传动机构的制造方法有智能复合微结构制造技术（Smart Composite Microstructure Method, SCM）<sup>[26][21][20][24]</sup>、Silicon on Insulator（SOI）工艺<sup>[59][60][61][64]</sup>、3D 打印<sup>[56]</sup>等。另一方面，昆虫机器人的自动化在其自主执行任务过程中起重要作用。但是将机器人的控制系统集成到机载器件中十分困难，因为实现机器人自动控制所需的电子元器件甚至机器人结构质量更大<sup>[103]</sup>。

我们计划制造一个高机动性无系留昆虫尺度的爬行机器人样机，其具有二自由度传动机构和机载的电源与控制系统，可以执行前进和转弯的动作从而实现全向运动。我们选择爬行作为机器人推进方式的原因是：

1. 爬行只需要两个自由度即可实现全向运动。从传动机构设计的角度考虑，机器人所需要的自由度越少，传动机构就越简单，结构制造和运动控制过程就越方便。使用爬行作为推进方案可以最大化地压缩机器人的尺寸并简化制造难度和控制方案。
2. 我们的目标是构建由八个类似爬虫的机器人组装而成的四足机器人系统，即 BioARS 系统。因此我们更倾向于设计具有全向运动能力的微型爬行机器人，让它们充当组装后四足机器人的关节。

在本章中，我们基于旋量理论（Screw theory）和构型综合方法（Type synthesis method），设计了一种名为 S<sup>2</sup>worm 的爬行机器人样机（图2.1）。我们使用旋量理论设计了一种新型的二自由度传动机构，并讨论了在微型机器人传动机构设计中如何应用旋量理论简化后续 SCM 制造过程。机器人采用双堆叠压电陶瓷驱动器，机器人的机载电子元器件提供能源，产生用以驱动压电陶瓷驱动器的高压信号从而实现运动控制。机器人可以通过集成的 WiFi 模块和主机通信以实现远程控制。

## 2.2 折纸传动机构设计

### 2.2.1 设计目标

我们想设计一个二自由度的传动机构以实现爬行机器人的全向运动。考虑到机器人的体积很小，我们希望其具有尽可能高的刚度，因此该机器人的传动机构最好是一个并联机构。根据文献调研<sup>[179]</sup>，二自由度的并联机构构型非常稀少，其中球型五杆机构（Spherical Five-bar, SFB）最为大家熟知，被广泛应用于 HAMR 系列微型机器人中作为腿传动机构。在这项工作，我们之所以不使用球型五杆机构，而要设计一种新型传动机构构型，主要考虑到下列因素：

1. 耦合效应：球型五杆机构更适用于微型机器人的腿足控制，该机构的两个自由度是解耦的，适合规划微型机器人的足端轨迹。对于爬行机器人，我们更希望该传动机构在驱动机器人前进时具有耦合效应，因此我们设计的二自由度折纸传动机构具有两个相同的输入支链，在机器人前进时均提供推进力。
2. 刚性：我们希望传动机构有一个额外的被动支链，可以提供更多的约束力以提高传动机构的刚度。很多昆虫进化出外骨骼，支撑身体结构的同时可以为运动提供约束。我们设计的二自由度传动机构具有一个被动支链，来模仿外骨骼所具有的功能。

因此，我们的目标是设计一个具有三支链的二自由度传动机构。其中一个被动的支链称为外骨骼支链（Exoskeleton Limb），另两个相同且包含输入转轴的支链称为肌肉支

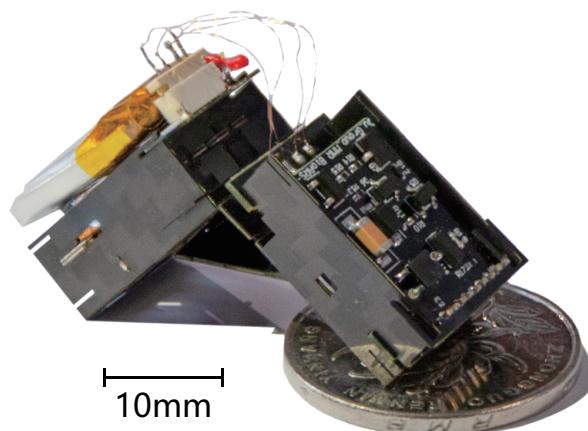


图 2.1 S<sup>2</sup>worm 微型爬行机器人样机照片。机器人的左侧为后部，右侧为前部。机器人前部下方有一枚硬币作为尺寸参考。

链 (Muscle Limb)。设计一个具有  $n$  个自由度,  $n + 1$  个支链的并联机构有一种通用的方法<sup>[180]</sup>, 即用  $n$  个六自由度支链作为驱动支链, 再额外增加一个  $n$  自由度支链作为约束支链。这个设计看似满足我们的要求, 但实则存在一个严重的问题。六自由度的支链不能为动平台提供约束力, 在这种构型中仅有一条  $n$  自由度支链为动平台提供约束力, 因而用这种方法设计出的机构刚度较差。

## 2.2.2 设计过程

为了设计一种新型的适用于微型爬行机器人的二自由度三支链传动机构, 本文采用了基于旋量理论<sup>[181][182]</sup>的构型综合法<sup>[183]</sup>。设计目标是一个二自由度的并联机构, 具有三个支链, 其中两个相同的肌肉支链产生驱动力, 剩下的一个被动支链作为外骨骼支链为机构提供约束。

首先我们考虑二自由度传动机构的运动旋量系的一组标准基<sup>[184]</sup>:

$$\begin{aligned} S_1 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ S_2 &= (0, c\theta, s\theta; 0, 0, 0) \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中,  $c$  和  $s$  分别代表  $\sin$  和  $\cos$ ,  $\theta$  是围绕  $S_1$  旋转的角度。

在上述机构的运动旋量系中,  $S_1$  和  $S_2$  可以构造为一个万向节 (universal joint)。外骨骼支链作为一个被动支链, 对结构施加约束, 因此外骨骼支链的旋量系可以等于机构的运动旋量系。在构造肌肉支链运动旋量系的过程中, 我们为肌肉支链运动旋量系在机构运动旋量系的基础上增加三个额外的旋量, 分别为:

$$\begin{aligned} S_3 &= (0, 0, 0; 1, 0, 0) \\ S_4 &= (0, 0, 0; 0, 1, 0) \\ S_5 &= (0, 0, 0; 0, 0, 1) \end{aligned} \quad (2-2)$$

所增加的三个旋量均表示平动副, 但考虑到传动机构将采用平面化的制造技术, 在结构中更适合构造旋转副, 因此我们考虑公式2-1和2-2中五个运动旋量所构成的另一种

线性组合：

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\
 S_2 &= (1, 0, 0; 0, b_2, c_2) \\
 S_3 &= (1, 0, 0; 0, b_3, c_3) \\
 S_4 &= (0, c\theta, s\theta; a_4, b_4, c_4) \\
 S_5 &= (0, c\theta, s\theta; a_5, b_5, c_5)
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

其中， $b_2, c_2, a_4, b_4, c_4, a_5, b_5, c_5$  均表示任意实数。肌肉支链的运动链可以依据公式2-3构造。前三个旋量  $S_1, S_2, S_3$  对应三个相互平行的旋转副，后两个旋量  $S_4, S_5$  对应着两个相互平行的旋转副，考虑到制造过程的简便性，可以令第三个旋转副和第四个旋转副相交以构成一个万向节。此运动链对应的传动机构模型如图2.2(a) 所示。

公式2-3中，关于支链运动旋量系的线性组合选取并不是任意的，而应当考虑最终对应的支链实际构型。为了简化制造过程，支链的选取应当尽可能地确保均为旋转副，这里给出一个反例。公式2-1和2-2的另一种可能的线性组合可以表示为：

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\
 S_2 &= (0, 0, 0; 0, c\alpha, s\alpha) \\
 S_3 &= (1, 0, 0; 0, b_3, c_3) \\
 S_4 &= (0, c\theta, s\theta; a_4, b_4, c_4) \\
 S_5 &= (0, c\theta, s\theta; a_5, b_5, c_5)
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

上述运动旋量系对应着一种具有平动关节的肌肉支链构型，如图 2.2(b) 所示。和图 2.2(a) 中的仅由旋转副构成的肌肉支链相比，这两种支链构型所实现的运动空间相同，然而图 2.2(b) 中的支链的制造过程更加困难。因为在所使用的 SCM 制造工艺中，平动关节需要由 Sarrus 机构代替<sup>[20]</sup>，这将导致更复杂的制造过程。上述论证表明，在为微型机器人设计传动机构的过程中，旋量理论不仅为构型综合法提供了基础，也可以用于挑选合适运动旋量系组合以设计便于加工的支链构型。设计出仅包含旋转关节的支链构型将极大地简化后续 SCM 加工过程。

### 2.2.3 结果验证

基于上一节的设计，外骨骼支链  $l_1$  的运动旋量系  $\mathbb{S}_{l_1}$  可以表示为：

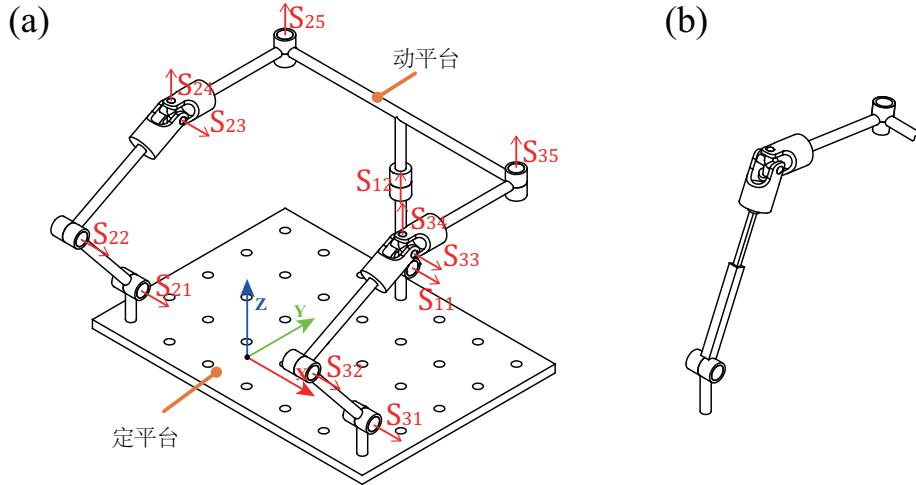


图 2.2 (a) 三支链二自由度传动机构模型。(b) 另一种可能的肌肉支链运动链模型, 对应的运动旋量系为公式2-4。

$$\mathbb{S}_{l_1} = \begin{cases} S_{11} = (1, 0, 0; 0, 0, -L_{11}) \\ S_{12} = (0, c\theta, s\theta; L_{11}s\theta, 0, 0) \end{cases}. \quad (2-5)$$

其中  $L_{11}$  是坐标系原点到  $S_{11}$  和  $S_{12}$  的交点的距离。 $S_{21}$  和  $S_{31}$  也同样经过原点。

根据并联机构的旋量理论, 支链的约束旋量系包含的约束力旋量和支链的运动旋量系中的所有运动旋量均互易 (reciprocal)。因此外骨骼支链的约束旋量系  $\mathbb{S}_{l_1}^r$  经过计算可以表示为:

$$\mathbb{S}_{l_1}^r = \begin{cases} S_{11}^r = (0, 0, 1; L_{11}, 0, 0) \\ S_{12}^r = (1, 0, 0; 0, 0, -L_{11}) \\ S_{13}^r = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ S_{14}^r = (0, 0, 0; 0, -s\theta, c\theta) \end{cases}. \quad (2-6)$$

另外两个肌肉支链  $l_2$  和  $l_3$  的运动旋量系  $\mathbb{S}_{l_2}$  和  $\mathbb{S}_{l_3}$  可以表示为:

$$\mathbb{S}_{l_i} = \begin{cases} S_{i1} = (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ S_{i2} = (1, 0, 0; 0, q_2, r_2) \\ S_{i3} = (1, 0, 0; 0, q_3, r_3) \\ S_{i4} = (0, c\theta, s\theta; p_4, q_4, r_4) \\ S_{i5} = (0, c\theta, s\theta; p_5, q_5, r_5) \end{cases} (i = 2, 3) \quad (2-7)$$

其中  $q_2, r_2, q_3, r_3, p_4, q_4, r_4, p_5, q_5, r_5$  均表示任意实数。

肌肉支链  $l_2$  和  $l_3$  的约束旋量系可以表示为：

$$\mathbb{S}_{l_i}^r = S_{i1}^r = (0, 0, 0; 0, -s\theta, c\theta) \quad (i = 2, 3) \quad (2-8)$$

由公式2-6和2-8可以看出， $\mathbb{S}_{l_2}^r$  和  $\mathbb{S}_{l_3}^r$  均为  $\mathbb{S}_{l_1}^r$  的子集。根据并联机构旋量理论，机构的约束旋量系是所有支链旋量系的并集，所设计的并联机构的约束旋量系  $\mathbb{S}^r$  可以表示为：

$$\mathbb{S}^r = \mathbb{S}_{l_1}^r \cup \mathbb{S}_{l_2}^r \cup \mathbb{S}_{l_3}^r = \mathbb{S}_{l_1}^r. \quad (2-9)$$

又因为并联机构的机构运动旋量系  $\mathbb{S}^f$  是所有支链运动旋量系的交集，计算过程可以表示为：

$$\mathbb{S}^f = \mathbb{S}_{l_1} \cap \mathbb{S}_{l_2} \cap \mathbb{S}_{l_3} = \mathbb{S}_{l_1}. \quad (2-10)$$

公式2-10进一步验证机构仅具有两个自由度，这两个自由度为外骨骼支链  $l_1$  所容许的两个自由度。

除了使用并联机构旋量理论对所设计的机构进行自由度验证，还可以通过 Grübler-Kutzbach 公式进行验证。这里我们使用改良后的版本，公式包含了过约束效应，具体分为公约束和虚约束，公式可以表示为：

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v \quad (2-11)$$

其中  $M$  表示机构的自由度， $d$  表示机构的阶数， $d = 6 - \lambda$ ， $\lambda$  表示公约束的数量， $n$  是杆件的数量， $g$  是运动副的数量， $f_i$  是第  $i$  个运动副的自由度， $v$  是被动约束的数量。

基于公式2-6和2-8，可以发现机构中存在一个公约束，对应的旋量为：

$$(0, 0, 0; 0, -s\theta, c\theta) \quad (2-12)$$

这是一个纯力偶，和机构中所有的运动副对应的运动旋量均互易。因此公式2-11中  $\lambda = 1$ ， $d = 6 - 1 = 5$ 。机构的自由度计算过程为： $M = 5(11 - 12 - 1) + 12 + 0 = 2$ 。再一次证明了机构的自由度是符合设计的。

图2.3(a) 是所设计的传动机构经过 SCM 方法加工出样品的 CAD 模型。由于 SCM 方法加工出的机构利用材料的弯曲形成转轴，和折纸的方式类似，因此该传动机构被我们称为折纸传动机构。图2.3(b) 为机器人样机整体结构的 CAD 模型，该模型在折纸传

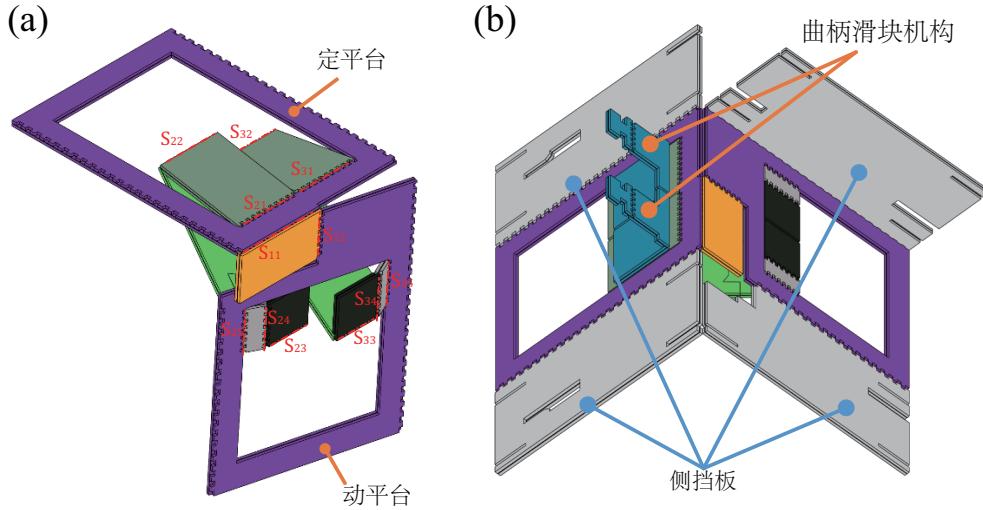


图 2.3 (a)S<sup>2</sup>worm 中二自由度折纸传动机构的 CAD 模型。(b)S<sup>2</sup>worm 的整体结构的 CAD 模型。在传动机构的基础上还包含两个曲柄滑块机构和四个侧挡板。

动机构的基础上增加了一些零部件。两个曲柄滑块结构被固定在深绿色的连杆上，用于传导压电陶瓷驱动器产生的变形到转轴  $S_{21}$  和  $S_{31}$  上。四片侧挡板分别安装在动平台和定平台两侧，用于固定驱动器和电子元器件。

#### 2.2.4 运动学模型

在第2.2.3小节，我们完成了所设计的传动机构构型的自由度验证，本节中我们将推导该传动机构的逆运动学模型。该模型有助于指导三支链二自由度传动机构的轨迹规划。

本小节模型推导中所使用的符号如图 2.4所示。我们建立两个用于分析的坐标系，分别是基于定平台的坐标系  $O_{ib}j_bk_b$  和基于动平台的坐标系  $Pijk$ ，其中坐标系  $Pijk$  的 Z 轴和  $O_{ib}j_bk_b$  的 Z 轴保持平行，Y 轴和连杆  $A_1P$  保持平行。接着我们建立两类参考平面，分别是描述动平台的平面  $\pi_p$  和描述支链的平面  $\pi_c^i(i = 2, 3)$ 。平面  $\pi_p$  包含点  $C_2, D_2, P, C_3, D_3$ ，平面  $\pi_c^2$  包含点  $A_2, B_2, C_2$ 。

接着我们定义描述机构构型的几个关键几何参数。机构动平台的姿态可以用两个角度  $\alpha$  (图 2.4(c)) 和  $\beta$  (图 2.4(b)) 来描述，分别对应机构的抬升运动和扭转运动的角度。机构的输入角度定义为  $\theta_2$  和  $\theta_3$ ，分别为两个肌肉支链的输入角度。逆运动学模型的目标是通过给定的  $\alpha, \beta$ ，结合机构的几何参数，求解  $\theta_2$  和  $\theta_3$ ，这里我们建立逆运动学模型以  $\theta_2$  为例，求解  $\theta_2$  关于  $\alpha, \beta$  的函数。机构中所有连杆的几何长度表示为

$\{l_1 = A_iB_i, l_2 = B_iC_i, l_3 = C_iD_i, l_4 = D_iP\}$ ( $i = 2, 3$ )。点 P 到  $\pi_c^i$ ( $i = 2, 3$ ) 之间的距离为  $d_0$ , 点  $A_1$  到 O 之间的距离为  $l_0$ 。逆运动学模型建立过程如下:

(1) 平面  $\pi_p$ : 在  $\beta$  已知的前提下, 推导距离  $d_i$ ( $i = 2, 3$ ) 和  $\beta$  之间的关系(图 2.4(b))。假设连杆  $C_2D_2$  和坐标系  $Pijk$  中的 X 轴的夹角为  $\gamma$ , 根据对称性,  $C_3D_3$  和 X 轴的夹角也为  $\gamma$ 。所以,  $d_0$  可以表示为:

$$d_0 = l_4 \cos \beta + l_3 \sin \gamma \quad (2-13)$$

因此  $\sin \gamma$  可以表示为:

$$\sin \gamma = \frac{d_0 - l_4 \cos \beta}{l_3} \quad (2-14)$$

$d_i$ ( $i = 2, 3$ ) 可以写为:

$$d_i = l_3 \cos \gamma + \delta_i l_4 \sin \beta \quad \delta_i = \pm 1 \quad (2-15)$$

其中  $\delta_i$  取决于点  $D_i$  在  $Pijk$  的 X 正半轴或负半轴, 正半轴  $\delta_i = -1$ 。

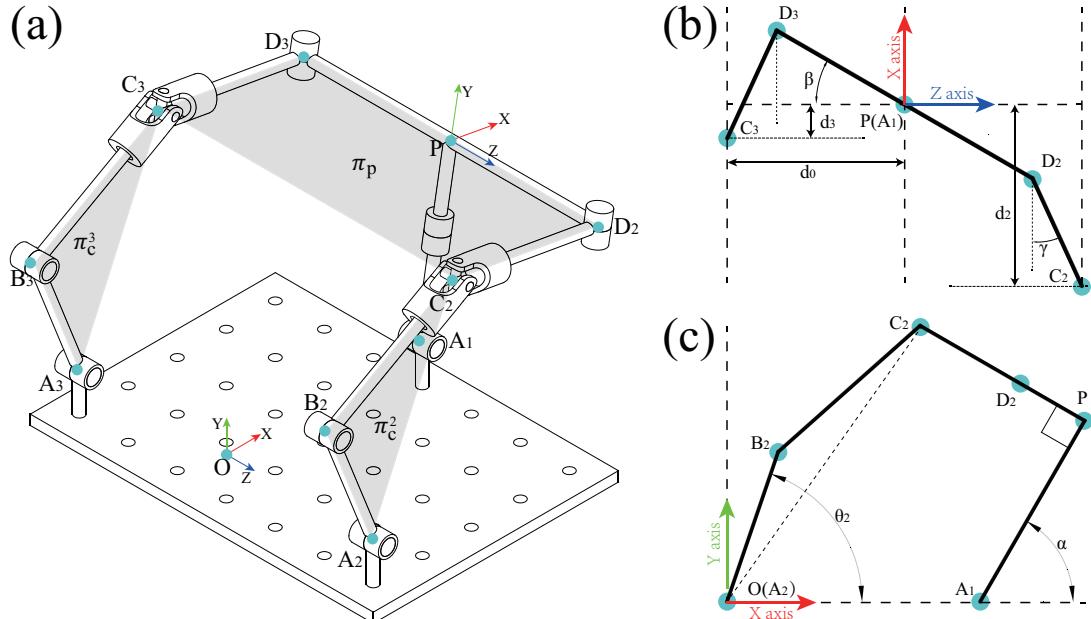


图 2.4 (a) 三支链二自由度传动机构模型, 定平台坐标系为  $O_{ib}j_{ib}k_{ib}$ , 动平台坐标系为  $Pijk$ 。(b) 平面  $\pi_p$  上的投影。(c) 平面  $\pi_c^2$  上的投影。

(2) 平面  $\pi_c^2$ : 由公式 2-15 知, 图 2.4(c) 中  $C_2P$  的距离为  $d_2$ , 可以表示为一个仅关于  $\beta$  角度和机构几何参数的函数, 在此前提下推导  $\theta_2$  关于  $d_2$  和角度  $\alpha$  之间的关系。点  $C_2$

在局部二维坐标系  $O\mathbf{i}_b\mathbf{j}_b$  中的位置向量可以表示为：

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OC_2} &= \overrightarrow{OA_1} + \overrightarrow{A_1C_2} \\ &= \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_s \\ d_2 \end{bmatrix} \\ &= (l_0 + \cos \alpha l_s - \sin \alpha d_2) \mathbf{i}_b + (\sin \alpha l_s + \cos \alpha d_2) \mathbf{j}_b\end{aligned}\quad (2-16)$$

$\theta_2$  对应的夹角  $\angle B_2OA_1$  可以表示为：

$$\theta_2 = \angle B_2OA_1 = \angle B_2OC_2 + \angle C_2OA_1 \quad (2-17)$$

根据方程2-16,  $\angle B_2OC_2$  和  $\angle C_2OA_1$  可以表示为：

$$\begin{aligned}\angle B_2OC_2 &= \arccos \frac{l_1^2 + |\overrightarrow{OC_2}|^2 - l_2^2}{2l_1|\overrightarrow{OC_2}|} \\ \angle C_2OA_1 &= \arctan \frac{\sin \alpha l_2 + \cos \alpha d_2}{l_0 + \cos \alpha l_s - \sin \alpha d_2}\end{aligned}\quad (2-18)$$

结合方程2-17和方程2-18, 可以得到三支链二自由度传动机构的逆运动学解, 即角度  $\theta_2$  可以表示为：

$$\theta_2 = \arccos \frac{l_1^2 + |\overrightarrow{OC_2}|^2 - l_2^2}{2l_1|\overrightarrow{OC_2}|} + \arctan \frac{\sin \alpha l_2 + \cos \alpha d_2}{l_0 + \cos \alpha l_s - \sin \alpha d_2} \quad (2-19)$$

## 2.3 样机制造

### 2.3.1 传动机构与驱动器

过去的二十年中, SCM 技术被广泛应用于微型机器人领域。本文中, 我们使用 SCM 技术制造了机器人的机身 (包含传动机构和侧挡板) 和驱动器 (图2.5(a) 和 (b))。制造过程所涉及到的所有材料均在表2.1中列出。

首先是制造 S<sup>2</sup>worm 的整体碳纤维结构, 将各层材料通过激光加工出图案, 然后在热压力下固化以进行粘接。S<sup>2</sup>worm 的结构包含一个二自由度折纸传动机构, 以及两个曲柄滑块机构。我们分别制造这两层堆叠 (图2.5(a) 步骤 1 至 4), 然后在这两层堆叠之间引入一块新的粘接层以进行粘合。然后, 将上述多层结构热压固化并从框架中切出, 即得到 S<sup>2</sup>worm 整体结构 (图2.5(a) 步骤 5 至 6)。

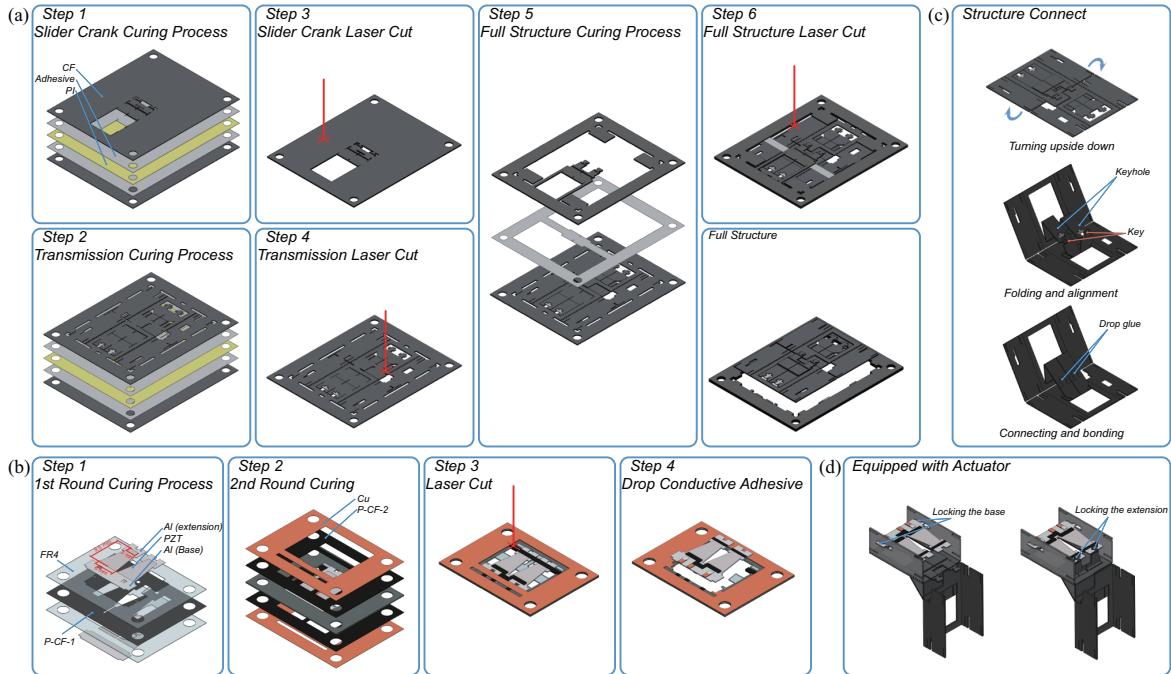


图 2.5 S<sup>2</sup>worm 的制造过程和装配过程。(a)S<sup>2</sup>worm 整体结构的制造过程。(b) 双堆叠压电陶瓷驱动器的制造过程。(c)S<sup>2</sup>worm 整体结构的装配。为了通过 SCM 方法制造折纸转动机构, 需要将结构平面化, 因此有些需要首先被打断。为了重新连接这些连杆, 我们设计了用于对齐的定位图案并用胶水粘合。(d)S<sup>2</sup>worm 样机的装配过程。驱动器与侧板锁定, 延伸部份与滑动曲柄机构锁定。

表 2.1 制造 S<sup>2</sup>worm 所使用的材料

材料名称	英文名称	图 2.5 中符号缩写	厚度 (mm)
碳纤维	Carbon Fiber	CF	200
杜邦 FR 胶膜	Dupont FR 1500 Sheet Adhesive	Adhesive	200
聚酰亚胺	Polymide Filme	PI	7.5
玻璃纤维	Epoxy Glass Cloth	Fr4	127
压电陶瓷	Piezoelectric Ceramic	PZT	127
氧化铝陶瓷	Alumina Ceramic	Al	127
碳纤维预浸料	Carbon Fiber Prepreg 1	P-CF-1	50
碳纤维预浸料	Carbon Fiber Prepreg 2	P-CF-2	200
铜箔	Copper Foil	Cu	13

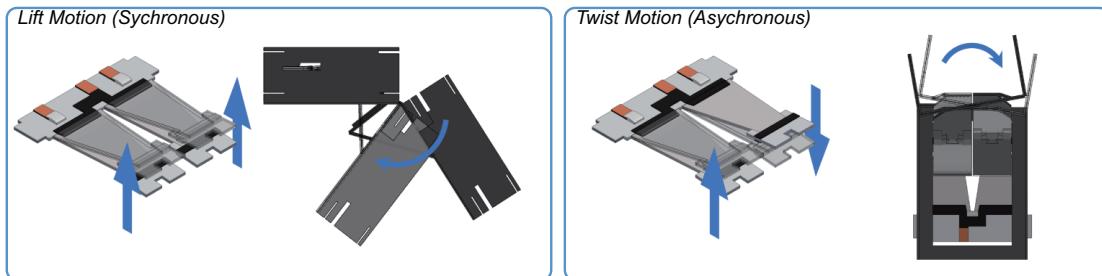


图 2.6 S<sup>2</sup>worm 的驱动原理。两个压电陶瓷堆叠通过同步驱动产生抬升运动, 异步驱动产生扭转动作。

双堆叠压电陶瓷驱动器包含的材料有压电陶瓷(PZT, 牌号 PZT-5H, 购买自 Piezo.com), 氧化铝陶瓷(Al), 两种不同厚度的纤维预浸料(P-CF-1 和 P-CF-2) 和铜箔(Cu)。在制造过程中, 玻璃纤维(FR4)被激光切成框架以放置和固定陶瓷。驱动器的堆叠放置如图2.5(b)步骤1所示, 压电陶瓷被放置于氧化铝陶瓷之间, 压电陶瓷两侧镀有5 μm的银作为导体, 氧化铝陶瓷被切割成底座和延展件。一片50 μm的单向碳纤维预浸料被激光切割后作为中间层, 在热压过程中放置在陶瓷层中间。固化后整个堆叠的上下表面再分别放置两片200 μm厚的碳纤维预浸料, 最后在最外侧再放置两片铜箔。再次固化这个新的堆叠, 并用激光将驱动器从框架中切割取出(图2.5(b)步骤2至3)。为了连接中间层50 μm碳纤维预浸料和顶层铜电极, 需要使用导电粘合剂填充氧化铝陶瓷基底上的孔, (图2.5(b)步骤4)。最终, 压电陶瓷驱动器的底座固定在机器人的侧板上, 驱动器的延伸件连接在曲柄滑块机构上(图2.5(c)和(d)), 所有的连接点都用胶水固定。

压电陶瓷驱动器有两个陶瓷堆叠, 来驱动两个曲柄滑块机构以及所连接的传动机构的肌肉支链。S<sup>2</sup>worm可以执行两种动作, 抬升运动和扭转运动。抬升运动由两个压电陶瓷堆叠同步驱动, 扭转运动由两个压电陶瓷堆叠异步驱动(图2.6)。

### 2.3.2 机载电子系统

设计S<sup>2</sup>worm的能源和控制系统时, 需要考虑系统的小体积和高电压特性, 所设计的电路要能提供驱动压电陶瓷的电压。机器人的电源选用的是一块3.7伏35毫安时的可充电锂电池。机载电路包括控制电路和高压转换电路, 如图2.7所示, 所涉及的元器件均在表2.2中列出。控制电路可以接受来自上位机的控制指令, 并通过三路PWM信号控制高压转换电路产生驱动电压。高压转换电路包含一个Flyback转换(Flyback Converter)电路以产生母线高压, 以及两个产生驱动电压的推挽互补电路(Complementary Push-pull Circuit)。

双堆叠压电陶瓷驱动器的双路控制是通过同步构型(Simultaneous Configuration)实现的<sup>[68]</sup>。在驱动器中, 中间层的单向碳纤维不仅储存弹性能, 同时也在电路上联通了上下两片PZT陶瓷。可以将每片压电陶瓷视作一个电容, 则双堆叠压电陶瓷驱动器的电路原理如图2.8所示。电路中有四路信号, 高压总线 $V_{bias}$ 输入一个恒定的高压信号, 地线 $V_{GND}$ 以及两路信号线 $V_{left}$ 和 $V_{right}$ 输入两路高压方波信号以产生驱动效应。

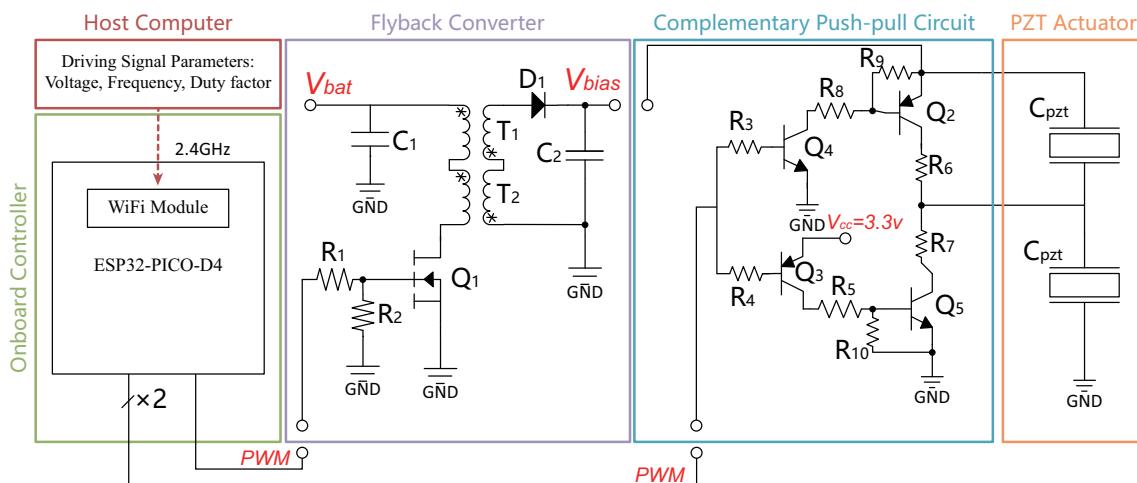
图 2.7 S<sup>2</sup>worm 机载电路原理图。

表 2.2 图2.7中电路的元器件列表

器件名称	符号	参数型号
电容	$C_1, C_2$	$1\mu F(0402), 1\mu F(2200)$
电阻	$R_1, R_2, R_3 - R_7, R_8, R_9, R_{10}$	$200\Omega, 20k\Omega, 10k\Omega, 15M\Omega, 499k\Omega, 100k\Omega$ (均为 0402)
二极管	$D_1$	US1NWF-7
变压器	$T_1, T_2$	ATB322515-0110-T000
MOSFET	$Q_1$	ST12324DS-T1-GE3
PNP	$Q_2, Q_3$	STR2550
NPN	$Q_4, Q_5$	STR1550

### 2.3.3 双堆叠压电陶瓷驱动器驱动原理

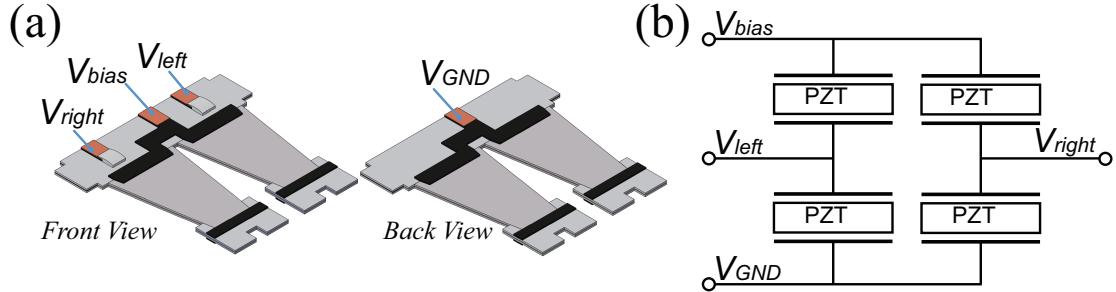


图 2.8 (a) 双堆叠压电陶瓷驱动器模型图。 (b) 双堆叠压电陶瓷驱动器电路原理图。

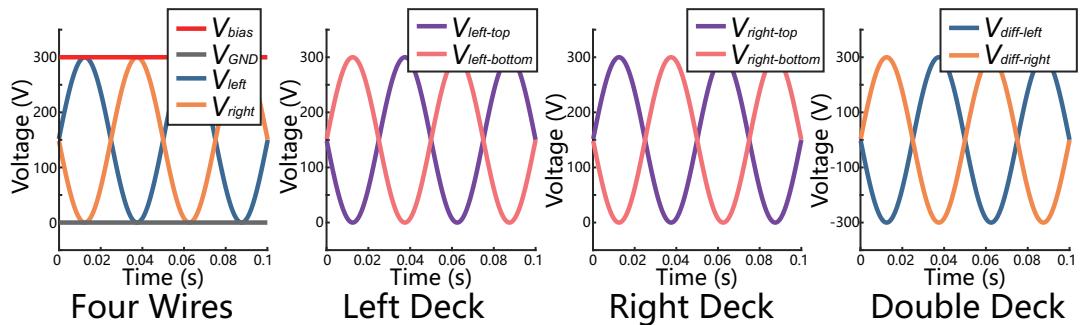


图 2.9 双堆叠压电陶瓷驱动器的四路信号。这里用两个完美的正弦波作为左路和右路的堆叠驱动型号示意驱动器的异步运动的控制方式。

我们使用两个完美的 20Hz 正弦信号来演示双堆叠驱动器的驱动原理。这里两个正弦信号相差半个周期，实现异步驱动。如图2.8所示，双堆叠驱动器的一个堆叠包含两片 PZT 陶瓷。上面一片 PZT 陶瓷施加的电压是总线电压和输入电压的差值，下面一片 PZT 陶瓷施加的电压是输入电压和地线的差值。因此，两个堆叠的共四片 PZT 陶瓷的电压（左上  $V_{left-top}$ ，左下  $V_{left-bottom}$ ，右上  $V_{right-top}$ ，右下  $V_{right-bottom}$ ）可以表示为：

$$\begin{aligned} V_{left-top} &= V_{bias} - V_{left} \\ V_{left-bottom} &= V_{left} - V_{GND} \\ V_{right-top} &= V_{bias} - V_{right} \\ V_{right-bottom} &= V_{right} - V_{GND} \end{aligned} \tag{2-20}$$

我们使用电压差  $V_{diff}$  来描述一个堆叠中上下两片 PZT 陶瓷的驱动电压差值。对左右两个堆叠来说，电压差可以表示为：

$$\begin{aligned} V_{diff-left} &= V_{left-top} - V_{left-bottom} = V_{bias} - 2V_{left} \\ V_{diff-right} &= V_{right-top} - V_{right-bottom} = V_{bias} - 2V_{right} \end{aligned} \tag{2-21}$$

上述信号如图2.9所示。可以看出  $V_{diff-left}$  和  $V_{diff-right}$  之间的相位关系与  $V_{left}$  与  $V_{right}$  之间的相位关系是一致的，说明驱动器左右堆叠之间的相位关系可以通过驱动信号的相位关系调节。

### 2.3.4 样机质量分布

S<sup>2</sup>worm 的四个主要组成部分已经介绍完毕，分别是：SCM 结构、双堆叠压电陶瓷驱动器、电池和控制电路。除了这些质量较大的部件外，机器人还包含一些焊接材料和电线。S<sup>2</sup>worm 样机整体质量为 4.34 克，表2.3列出了样机的质量分布。

表 2.3 S<sup>2</sup>worm 样机质量分布

部件名称	质量 (克)
整体结构 (传动机构)	0.80
双堆叠压电陶瓷驱动器	0.28
电池	1.48
控制电路	1.51
导线, 焊锡和胶水	0.27
总计	4.34

## 2.4 测试与表征

### 2.4.1 压电陶瓷驱动器性能测试

本节首先表征的是双堆叠压电陶瓷驱动器的最大末端变形。测试过程中所使用的驱动信号来自我们自制的高压放大电路，测试波形近似方波，测试电压设定为 150V, 200V 和 250V，测试频率为 10Hz 至 100Hz。驱动器的末端变形通过激光位移传感器捕捉，测试设备型号为 KEYENCE LK-G10。测试结果如图2.10所示。

在末端测试过程中，我们观察到驱动器位移的时域曲线会随着加载电压的频率改变而改变（图2.10(b) 和 (c)）。我们定义末端变形的峰值为一个变形周期内最高点和最低点之间的差值。在驱动信号为 250V 10Hz 时，最大末端变形约为 640 μm。在整个测试过程中，驱动器的末端变形随着驱动信号的频率增大而不断下降。

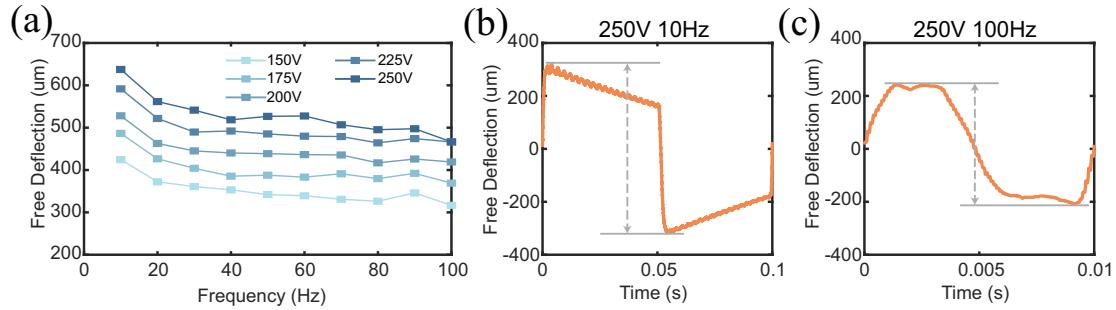


图 2.10 (a) 双堆叠压电陶瓷驱动器在不同电压下的末端自由挠度。(b) 驱动信号为 250 V 10 Hz 时，一个周期内驱动器的挠度与时间的关系。最大值挠度出现在半周期开始时，并随时间减小。(c) 驱动信号为 250 V 100 Hz 时，一个周期内驱动器的挠度与时间的关系。最大值挠度出现在半周期开始的中间段。

#### 2.4.2 S<sup>2</sup>worm 运动能力测试

S<sup>2</sup>worm 运动能力测试主要关注的指标为机器人的前进速度和转弯半径。对于地面机器人来说，前进速度是衡量机器人运动能力最重要的指标。S<sup>2</sup>worm 的前进速度为机器人机载电源驱动下的速度，测试电压为 200V, 225V 和 250V，测试结果如图2.11所示。测试表面是一块静摩擦系数为 0.4 的铝合金金属板。我们报道的平均速度是多个测试结果的平均值，每个测试结果均为机器人在一次测试中稳定前进 10 cm 的过程中的平均速度。速度测试中，最高平均速度为 27.4 cm/s，测试电压参数为 250V 60Hz。这对无系留的昆虫尺度机器人来说是一个很高的速度。在速度测试中，测试频率为 50Hz 和 60Hz 时的速度要高于其他的测试频率。

转弯能力是衡量地面昆虫机器人运动能力的另一项重要指标。昆虫可以在狭小的空间中改变方向，因而具有更高的机动性和环境适应性，设计的昆虫机器人也应该具有类似的性能。

本文中，我们通过给双堆叠压电陶瓷驱动器的两个堆叠施加不同频率的驱动电压来实现 S<sup>2</sup>worm 的转向。在第2.3.3节中，我们解释了压电陶瓷驱动器同步构型的驱动原理，在转弯测试中，我们设定左路堆叠的驱动信号为 200V 50Hz，右路为 200V 25Hz。由于左右堆叠的驱动频率不同，S<sup>2</sup>worm 会稳定的向右转向。

我们测试了数组机器人在左路 50Hz-右路 25Hz 和左路 60Hz-右路 30Hz 下的转弯半径（图2.12(a)）。所有的测试参数组合都可以使机器人产生稳定的向右转动。最小平均转弯半径发生在 225V 左路 60Hz-右路 30Hz，此时的转弯半径为 1.7cm。最高平均速度和最小转弯半径对应的测试信号如图2.12(c) 所示。

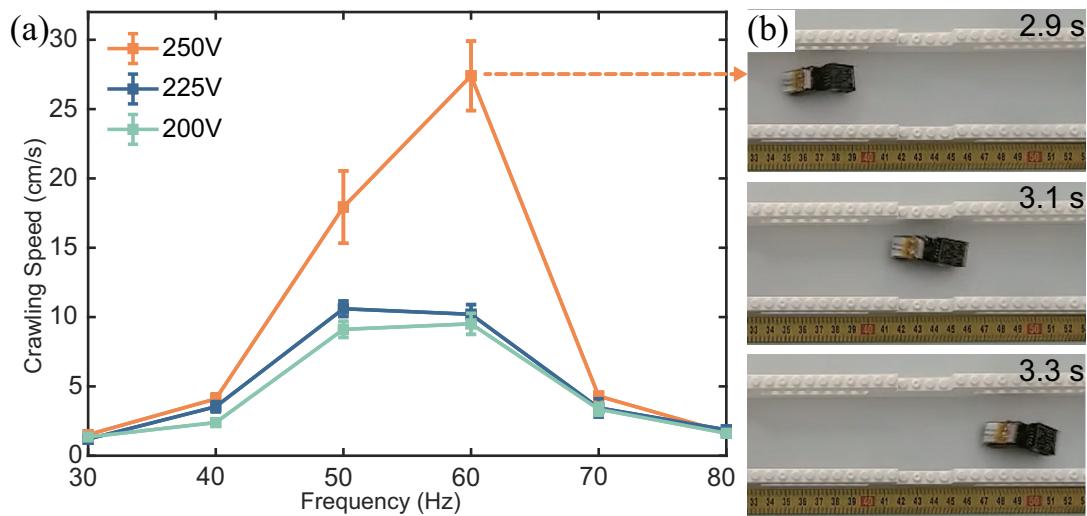


图 2.11 (a)S<sup>2</sup>worm 的平均速度和驱动频率之间的关系。(b)S<sup>2</sup>worm 在 0.4 秒内通过 12 cm。

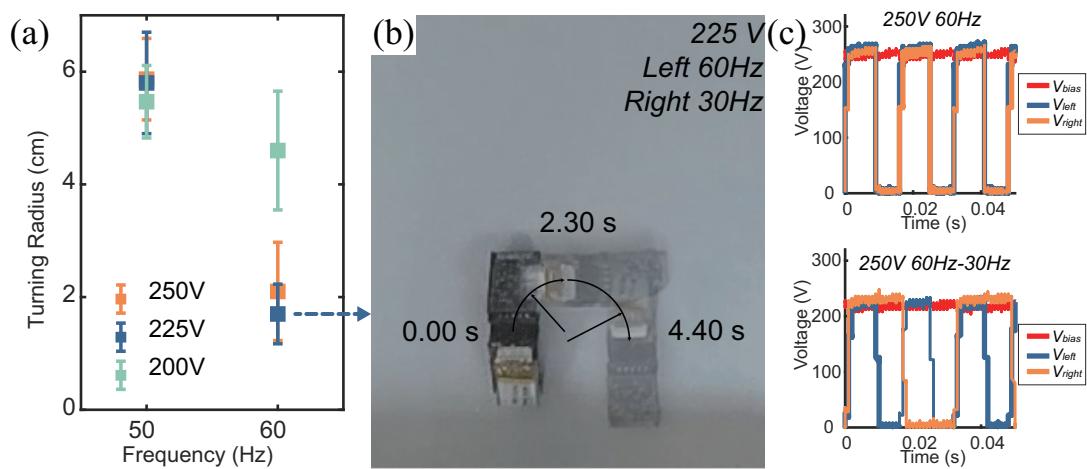


图 2.12 (a)S<sup>2</sup>worm 的转弯半径和驱动频率之间的关系。(b)S<sup>2</sup>worm 在 4.4 秒内通过 180°。(c)S<sup>2</sup>worm 在最高速度 (上图: 220V 60Hz) 和最小转弯半径 (下图: 220V 60Hz-30Hz) 下的驱动信号。

### 2.4.3 S<sup>2</sup>worm 能耗测试

能量消耗是衡量微型机器人性能的另一个重要指标。本文中我们使用两个指标来衡量 S<sup>2</sup>worm 的能量消耗，分别是：Energy to move 1m 和 Cost of transport (CoT)。Energy to move 1m 的定义为机器人运动 1m 的距离所消耗的能量。CoT 的定义为  $CoT = \frac{Power}{Speed \times Mass \times g}$ ，其中  $g = 9.8 m/s^2$  代表重力加速度。

我们选择平均速度为 10.6cm/s, 17.9cm/s 和 27.4cm/s 时的能耗参数来计算机器人的能量消耗。我们记录了在这些速度下机器人电源的供电电流（电压均为 3.7 V），所有的测试参数和能耗指标都在表2.4中列出。S<sup>2</sup>worm 的最高功率发生在机器人速度最快时，功率为 610.5mW，此时的 Energy to move 1m 和 CoT 分别为 2.23J 和 52.4。

S<sup>2</sup>worm 的续航能力可以用电池容量和能耗指标来评估，电池电压为 3.7V，容量为 35mAh，可以储存的能量 466.2J。基于机器人速度为 27.4cm/s 时 Energy to move 1m 为 2.23J，S<sup>2</sup>worm 预计最远可以运动 208m。

表 2.4 S<sup>2</sup>worm 的能耗指标

速度 (cm/s)	频率 (Hz)	电流 (mA)	功率 (mW)	Energy to move 1m (J)	Cost of transport
10.6	50	115	425.5	4.01	94.4
17.9	50	156	540.2	3.00	70.5
27.4	60	165	640.5	2.23	52.4

### 2.4.4 测试结果讨论

在速度测试过程中，测试材料的表面粗糙度会影响机器人的速度。这是因为 S<sup>2</sup>worm 的运动原理为双锚爬行模型 (Two-anchor crawling)，具体的讨论在第3.2.4节。在每一个运动循环期间，非对称的静摩擦产生推进力，因此机器人在相对粗糙的地面上移动得更快，但过高的表面粗糙度也会阻碍前进运动。另一方面，机器人的前进运动是通过双堆叠压电陶瓷驱动器的两个堆叠的同步运动实现的，而过高的频率和传动机构制造过程中的瑕疵（如奇异性问题），会导致机器人在前进的过程中由于驱动力的非对称而产生左右的摆动。

表2.5比较了 S<sup>2</sup>worm 和几个尺度类似的机器人的运动能力和能耗，结果表明 S<sup>2</sup>worm 的性能在该领域内处于较为领先地位。

表 2.5 S<sup>2</sup>worm 的性能比较

项目名称	尺寸 (cm)	质量 (g)	速度 (cm/s)	相对速度	Cost of transport
DASH <sup>[26]</sup>	10	16.2	150	15	14.7
HAMR-F <sup>[21]</sup>	4.5	2.8	17.2	3.8	83.9
DEAnsect <sup>[88]</sup>	4	0.97	1.2	0.3	1670
Liang et al. <sup>[84]</sup>	2.4	1.9	2.88	1.2	887
S <sup>2</sup> worm	4.1	4.34	27.4	6.7	52.4

## 2.5 本章小结

在本章中，我们提出了一种二自由度折纸传动机构以及搭载这款传动机构的无系留高速微型爬行机器人样机 S<sup>2</sup>worm。该二自由度折纸传动机构基于旋量理论和构型综合法设计，并通过智能复合微结构技术制造。S<sup>2</sup>worm 样机搭载的二自由度折纸传动机构，由一个双堆叠压电陶瓷驱动器驱动，可以实现高速前进和灵敏的转弯。样机具有机载电源和控制器，以及一个高压放大器，可以产生两路独立的高压信号以驱动压电陶瓷驱动器的两个堆叠。S<sup>2</sup>worm 样机重 4.34 g，长 4.1 cm。样机的最高平均速度高达 27.4 cm/s，相当于 6.7 倍体长每秒。在转弯试验中，S<sup>2</sup>worm 的最小转弯半径达到 1.7 cm，相当于 0.4 倍体长。实验结果表明 S<sup>2</sup>worm 具有高度自动化程度、高机动性和低能耗的优点。

在微型机器人领域，这是第一次使用旋量理论设计传动机构。我们利用构型综合方法设计了一款三支链二自由度的新型并联机构构型。该机构从模仿昆虫结构、提高驱动效率的角度出发，利用两个肌肉支链的同步驱动使得机器人前进，利用一个二自由度外骨骼支链提供运动约束从而提高结构刚度。在设计过程中，我们论证了通过使用旋量理论推导合适的支链运动旋量系列，可以有效地简化 SCM 工艺流程。下一章中，我们进一步研究本章提出的二自由度折纸传动机构，并提出一种基于奇异性分析的高性能微型机器人传动机构设计方法。



### 3 传动机构奇异性分析与高速微型爬行机器人 S<sup>2</sup>worm-G

在上一章中，我们开展了微型机器人传动机构的运动学设计研究，基于旋量理论和构型综合方法，提出了一种新型三支链二自由度并联机构构型，并使用智能复合微结构制造技术制造了一种二自由度折纸传动机构以及搭载该传动机构的高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm。

本章的研究目标依然是提高微型机器人的运动能力，在上一章研究的基础上，我们发现了微型机器人折纸传动机构中的奇异性问题，并证明了奇异性问题是限制微型机器人运动能力的重要因素之一。基于这个发现，开展了微型微型机器人传动机构的奇异性分析研究，提出了一种微型机器人高性能传动机构设计方法，即基于 Grassmann-Cayley Algebra 对传动机构的奇异性分析结果，对传动机构的智能复合微结构制造过程进行指导，并制造了搭载新一代传动机构的高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G。

#### 3.1 引言

昆虫尺度微型机器人具有体积小、重量轻、机动性强等优点。这类机器人有望应用于受限空间探测、地震灾后搜索和行星探测等极端环境。这些潜在的应用场景要求机器人具有极高的运动能力和自动化程度。为了实现这些设计目标，在过去的二十年里，许多研究人员对昆虫尺度微型机器人的设计原理和制造方法进行了大量研究。

昆虫尺度微型机器人的驱动传动系统组成和传统机器人不同，传统机器人的驱动传动系统通常由电机、连杆、齿轮和轴承等零部件组成。昆虫尺度微型机器人的驱动基础和传动系统制造技术我们在第1.2节有详细的介绍，其传动机构为毫米-厘米级别，主要使用智能材料驱动器，例如：电活性材料如压电陶瓷<sup>[4][21]</sup>和介电弹性体<sup>[6][87]</sup>，以及热活性材料，如形状记忆合金<sup>[25][50][45][72]</sup>和聚合物<sup>[76]</sup>。

尽管智能材料驱动器具有体积小、重量轻、集成度高等优点，但这类驱动器输出力和位移相对较小，并且智能材料驱动器的驱动方式大多为材料变形，而不是像电机那样进行输出旋转或平移运动。因此，微型机器人的机器人结构不仅要作为底盘起到支撑机器人部件的作用，还要作为传动机构，转换智能材料驱动器的输出<sup>[103][185]</sup>。这需要机器

人结构不仅设计得小巧紧凑，而且还要具有复杂的传动功能。

我们在第1.2.2小节中介绍了很多制造微型机器人结构的技术，如 SCM 技术<sup>[20][38]</sup>、硅刻蚀和 SOI 技术<sup>[186]</sup>、3D 打印技术等<sup>[56]</sup>。SCM 技术通过在 Dash<sup>[26]</sup>、HAMR 系列<sup>[18][21]</sup>微型机器人项目中的成功应用而引起了广泛的关注。该技术被广泛应用于制造微型机器人，例如：地面机器人<sup>[72][73][187]</sup>，微型扑翼机器人<sup>[3][4][188][189]</sup>，微型并联机器人<sup>[39][42][43][190]</sup>等。SCM 技术可以与折纸技术和弹出装配技术相结合，制造出轻量化且具有复杂功能的柔性传动机构<sup>[74]</sup>。这类柔性传动机构的只需要通过简单的折叠即可完成装配过程，和传统机器人相比，避免了冗余的制造和装配工艺。

然而，这类折叠过程往往会导致机器人传动机构的奇异性。因为 SCM 由柔性铰链相连接，加工完成的 SCM 机构在经历折叠与装配过程前是一个铺平的二维结构，大多数铰链的初始角度为零度，这可能会使机器人的局部在装配完成后的状态就具有奇异性。奇异性问题是并联机构学中的重要研究问题<sup>[191][192]</sup>，并联机构发生奇异时，机构在某些方向不具有刚度，并且会产生一些设计之外的自由度（DoF）。解决这类问题需要对机构进行奇异性分析，这是并联机器人领域的经典问题。研究者提出了许多策略来解决并联机构的奇异性问题，Gosselin 和 Angeles<sup>[193]</sup>通过考虑定义输入和输出速度之间关系的两个雅可比矩阵对闭环机构的奇异性进行了分类，Merlet<sup>[194]</sup>通过 Grassmann 几何（Grassmann Geometry, GG）分析了 6-DoF Gough Stewart 平台的奇异性，Ben Horin 和 Shoham<sup>[195]</sup>将 Grassmann-Cayley 代数（Grassmann-Cayley ALgebra, GCA）应用于一种六自由度并联机器人奇异构型分析。

虽然大量工作证明了奇异性分析对并联机构性能提升的重要性，并且 SCM 技术所制造的折纸传动机构的奇异性问题会限制机器人的性能，但是这类机构的奇异性没有得到足够的重视。这可能因为昆虫尺度微型机器人是一个相对较新颖的课题，目前很少有专门为这类机器人设计的并联传动机构。

为了填补这一空白，我们在上一章中通过旋量理论和构型综合方法，为微型机器人提出了一种新型二自由度折纸传动机构，以实现机器人的全向运动，并制造了名为 S<sup>2</sup>worm 的微型机器人样机。尽管机器人具有相对较高的运动能力，如 27.4 cm/s 的最高速度和 1.7 cm 的转弯半径，但实验仍然揭示了一些问题。例如，机器人的速度仍然低于预期，并且机器人的转弯速度远低于前进的速度。我们将这些缺陷归因于我们设计的二自由度折纸传动机构的奇异性问题。

本章中我们提出一种设计高性能微型机器人的新策略，即应用 GCA 来避免传动机构的奇异性。在本章中，我们基于这套方法优化了通过 SCM 方法制造的二自由度折纸传动机构。我们通过 GCA 对二自由度折纸传动机构进行了奇异性分析，GCA 计算得出的奇异构型与机构的几何形态有关。机器人的 SCM 结构在 GCA 计算结果的基础上进行了改进，因此新的机器人样机被称为 S<sup>2</sup>worm-G。

实验结果表明，与以前的设计相比，新设计解决了奇异性问题，极大提高了 S<sup>2</sup>worm-G 的移动性能。机器人的最高前进速度从 27.4 cm/s 提高到 75.0 cm/s。转弯速度从 ~1.2 cm/s 提高到 9.3 cm/s。S<sup>2</sup>worm-G 运动性能的提高证明了可以通过奇异性分析来指导 SCM 制造结构的设计并优化传动机构。所提出的二自由度折纸传动机构可以推广到其他微型机器人中作为高性能传动机构。这项工作也证明了构型综合过程和 GCA 计算优化流程是昆虫尺度微型机器人一条可行的设计路线。

## 3.2 系统概述

### 3.2.1 系统介绍

S<sup>2</sup>worm 是一个通过 SCM 方法制造的搭载二自由度折纸传动机构的昆虫尺度微型机器人项目。S<sup>2</sup>worm 可以分为几个子系统：驱动系统、能源系统和控制系统。驱动系统包括双堆叠压电陶瓷驱动器、SCM 技术制造的曲柄滑块机构和二自由度折纸传动机构。能源系统包括电池和升压电路。控制系统是一个装有微处理器的控制板。所有这些子系统都集成在一起，使机器人实现了能源和控制自动化，从而实现了无系留运动。为了平衡机器人的质量分布，控制装置和升压电路安装在机器人的头部，电池和驱动器安装在机器人尾部（图 3.1(a)）。

该机器人由双堆叠压电陶瓷驱动器驱动。驱动器的变形通过压电陶瓷（PZT）的逆压电效应产生，在 PZT 的表面上施加电压，压电驱动器的末端会产生偏移。在压电陶瓷驱动器的末端和二自由度折纸传动机构的输入杆之间引入曲柄滑块机构，可以将驱动器的偏移转化为传动机构驱动关节的旋转。S<sup>2</sup>worm 可以以 27.4 cm/s 的最高平均速度进行无系留运动。高速和无系留的特点使 S<sup>2</sup>worm 成为性能最强的昆虫尺度微型机器人之一。我们通过旋量理论和构型综合法所设计的新型折纸传动机构作为一种微型机器人的传动机构展示出了巨大的潜力。

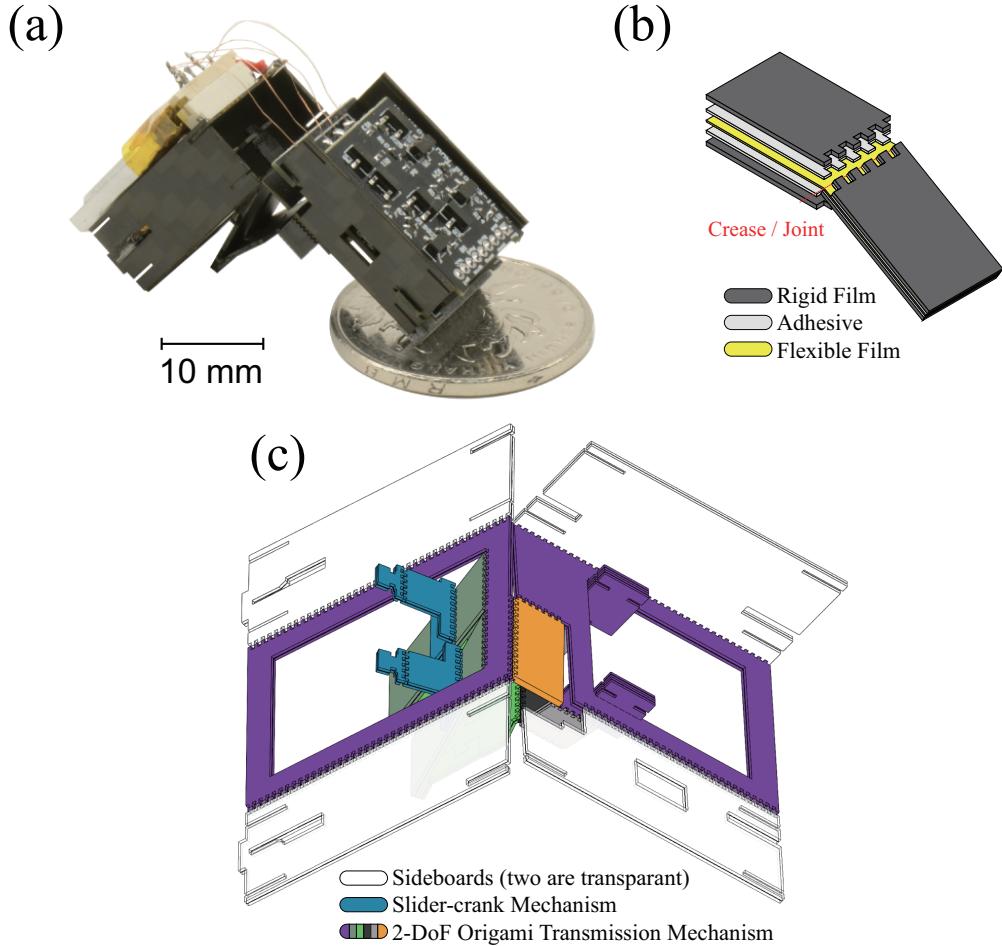


图 3.1 (a) S<sup>2</sup>worm-G 的照片。和一个硬币进行比较。(b) SCM 结构的组成原理。结构中包含一个柔性薄膜用于形成铰链，两片刚性薄片用于形成杆件，两片粘接薄膜用于粘接刚性薄片和柔性薄膜。刚性薄片在铰链处有“castle”的折痕，用于实现铰链旋转，SCM 结构中旋转的旋转范围一般为  $-90^\circ$  至  $+90^\circ$ 。(c) S<sup>2</sup>worm-G 折纸传动机构的 SCM 结构模型。SCM 结构包括二自由度折纸传动机构、两个曲柄滑块结构和四个侧板。

在本章中，我们介绍了基于 S<sup>2</sup>worm 的第二代微型爬行机器人研究成果，该样机名为 S<sup>2</sup>worm-G。与之前的工作相比，机器人的外观和重量几乎没有变化 (S<sup>2</sup>worm: 长度 4.1 cm, 质量 4.34 g; S<sup>2</sup>worm: 长度 4.0 cm, 质量 4.71 g)。新样机以 GCA 奇异性分析的结果作为指导，对折纸传动机构进行了改进，极大地提高了机器人的运动能力。基于奇异性分析结果，新的 SCM 结构设计避免了奇异构型。S<sup>2</sup>worm-G 的最高速度达到 75.0 cm/s，转弯速度达到 9.3 cm/s。

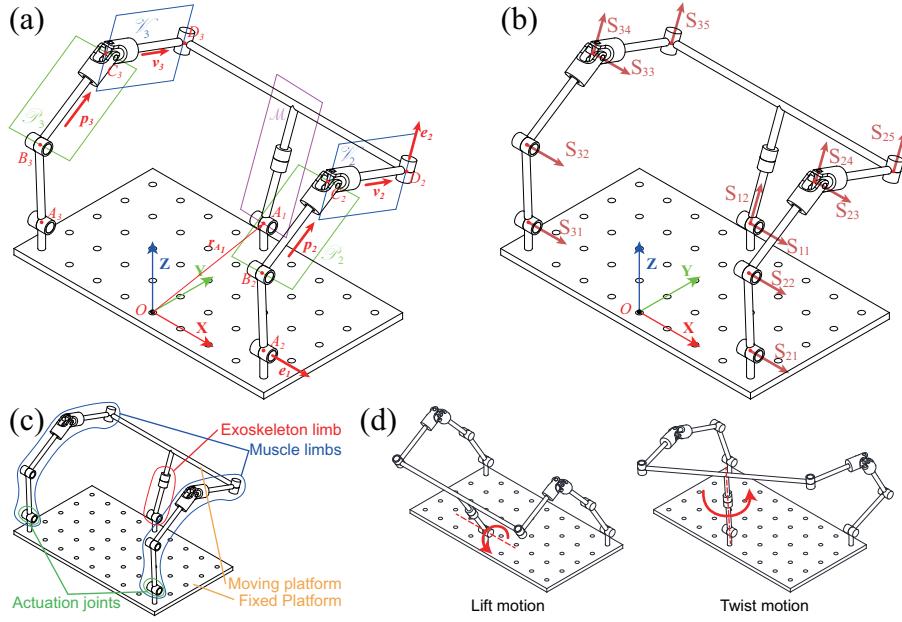


图 3.2 二自由度折纸传动机构模型。(a) 几何记号。(b) 旋量记号。(c) 支链记号。(d) 抬升运动和扭转运动示意图。

表 3.1 本章中使用的符号

类型	符号
仿射空间	点 $O, A_1, A_2, A_3, B_2, B_3, C_2, C_3, D_2, D_3$
	向量 $e_1, e_2, e_3, p_2, v_2, p_3, v_3, s_2, s_3, r_{A_1} - r_{D_3}$
	平面 $P_2, P_3, V_2, V_3, \mathcal{M}$
旋量	旋量系 $\mathbb{S}_1, \mathbb{S}_2, \mathbb{S}_3, \mathbb{S}_c, \mathbb{S}_a$
	运动旋量 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{25}, S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}, S_{35}$
	力旋量 $S_{11}^r, S_{12}^r, S_{13}^r, S_{14}^r, S_{21}^r, S_{31}^r, S_{c1}, S_{c2}, S_{c3}, S_{c4}, S_{a1}, S_{a2}$
射影空间	有限点 $A_1, C_2, C_3$
	无限点 $e_1, e_2, e_3, p_2, p_3, v_2, v_3, s_2, s_3$
	线 $S_{c1}, S_{c2}, S_{c3}, S_{c4}, S_{a1}, S_{a2}$ (和力旋量符号相同)

### 3.2.2 传动机构的运动学设计

上一章中我们介绍了折纸传动机构的构型综合过程，本章中我们主要关注的是二自由度折纸传动机构的奇异性问题（图 3.1(a))。

图 3.2 是二自由度折纸传动机构的等效简化模型，图中标记了本章传动机构分析所使用的符号，所有符号的含义均在表 3.1 中给出。二自由度折纸传动机构是一个三支链并联机构，具有一个外骨骼支链（Exoskeleton Limb）和两个肌肉支链（Muscle Limb）。其中，外骨骼支链包含  $S_{11}$  和  $S_{12}$ ，肌肉支链分别包含  $S_{21}$  到  $S_{25}$  以及  $S_{31}$  至  $S_{35}$ （图 3.2(c))。

外骨骼支链包含两个正交的旋转关节，这两个关节可以被简化为一个万向节（Uni-

versal Joint)。肌肉支链包含五个旋转关节，前三个旋转关节彼此平行，后两个旋转关节分别彼此平行，因此该支链可以用 RRRRR 表示。两个驱动关节分别是两个肌肉支链的第一个关节  $S_{21}$  和  $S_{31}$  (图 3.2(c))。

传动机构的几何记号定义在仿射空间 (Affine Space)， $A_1$  至  $D_3$  用于描述支链的关节点， $O$  是传动机构的坐标系原点。外骨骼支链的第一个和第二个关节的方向向量被定义为  $e_1$  和  $e_2$ 。方向向量  $e_3$  的定义是  $e_3 = e_1 \times e_2$ 。方向向量  $p_2$ ,  $v_2$ ,  $p_3$  和  $v_3$  分别定义为沿着  $B_2C_2$ ,  $C_2D_2$ ,  $B_3C_3$  和  $C_3D_3$  方向的向量。

基于支链的几何构型又定义了五个几何平面： $\mathcal{P}_2$ ,  $\mathcal{V}_2$ ,  $\mathcal{P}_3$ ,  $\mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$ 。 $\mathcal{P}_i(i=2,3)$  描述的平面经过点  $C_i(i=2,3)$ ，平面的法向量为  $p_i \times e_1(i=2,3)$ 。 $\mathcal{V}_i(i=2,3)$  描述的平面经过点  $C_i(i=2,3)$ ，平面的法向量为  $v_i \times e_2(i=2,3)$ 。 $\mathcal{M}$  描述的平面经过点  $A_1$ ，平面的法向量为  $e_3$

外骨骼支链的运动旋量系是：

$$\mathbb{S}_1 = \left\{ \begin{array}{l} S_{11} = (e_1; r_{A_1} \times e_1) \\ S_{12} = (e_2; r_{A_1} \times e_2) \end{array} \right\}. \quad (3-1)$$

其中， $r_{A_1}$  是  $A_1$  点的位置向量。

肌肉支链的运动旋量系是：

$$\mathbb{S}_i = \left\{ \begin{array}{l} S_{i1} = (e_1; r_{A_i} \times e_1) \\ S_{i2} = (e_1; r_{B_i} \times e_1) \\ S_{i3} = (e_1; r_{C_i} \times e_1) \\ S_{i4} = (e_2; r_{C_i} \times e_2) \\ S_{i5} = (e_2; r_{D_i} \times e_2) \end{array} \right\} (i=2,3). \quad (3-2)$$

基于上一章的工作，双堆叠压电陶瓷驱动器的输入通过曲柄滑块机构施加在运动旋量  $S_{21}$  和  $S_{31}$  上。传动机构的抬升运动和扭转运动分别对应于动平台关于运动旋量  $S_{11}$  和  $S_{12}$  的运动 (图 3.2(d))。这两种运动分别产生了机器人前进和扭转的推进力。

### 3.2.3 抬升运动和扭转运动的原理

为阐明抬升运动和扭转运动的原理，我们将机器人简化为通过万向节连接的两个方盒 (图 3.3)。这两个方盒分别代表机器人的前部和后部，机器人前部相对于后部可以通

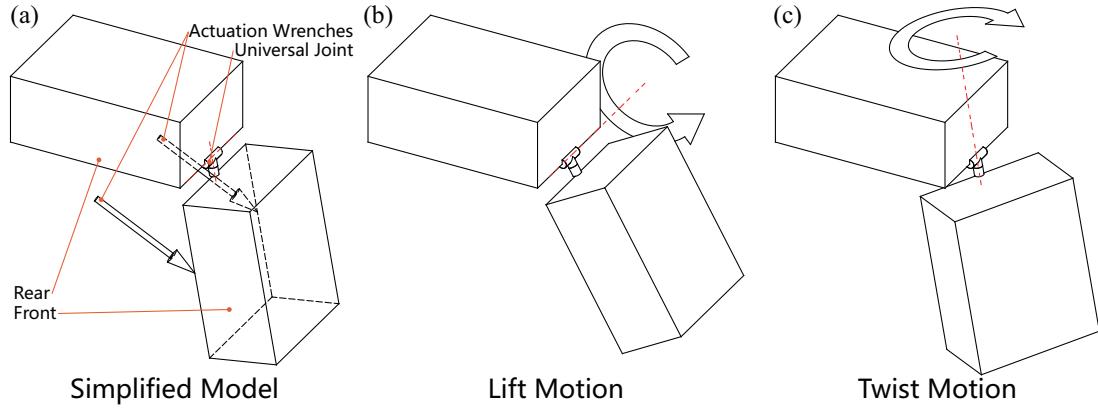


图 3.3 S<sup>2</sup>worm 驱动原理图。(a) S<sup>2</sup>worm 机器人的简化模型。(b) 抬升运动的原理。肌肉支链同步驱动，产生的驱动力的合力作用在万向节的水平转轴上使得机器人的动平台抬升。(c) 扭转运动的原理。肌肉支链异步驱动，产生的驱动力的合力作用在万向节的竖直转轴上使得机器人的动平台扭转。

过万向节进行二自由度旋转。

肌肉支链产生的驱动力简化后用两个箭头表示，这种简化方式可以通过后续推导中肌肉支链施加在机构动平台上的驱动力旋量的形式证明（方程 3-9），肌肉支链产生的驱动器旋量是两个纯力（不包含扭矩）。

抬升运动是由两个肌肉支链同步作用驱动的。此时两个驱动力关于机器人的对称面镜像对称，两个驱动力的合力产生了一个围绕万向节水平转轴的力矩，使得机器人的前部抬升。

扭转运动是由两个肌肉支链异步作用驱动的。此时两个驱动力的合力除了产生抬升的力矩，还会产生一个围绕着万向节垂直轴的力矩，使得机器人的前部发生扭转。这里需要说明的是，即使机器人的两个肌肉支链完全异步驱动，两个驱动力的合力在抬升运动上也很难相互抵消，因此机器人的前部总是会发生轻微的抬升运动。

### 3.2.4 推进原理

昆虫尺度微型机器人的前进运动可以通过步态或单向摩擦力来推进。爬行机器人通常使用特殊的脚部结构来产生单向摩擦力<sup>[72][178]</sup>。

S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 没有装备任何单向摩擦结构，机器人的前进运动通过传动机构抬升运动进行驱动，在每个抬升运动周期中，机器人的前部和后部通过和地面接触产生的正应力不同从而产生非对称摩擦力，最终转变成机器人前进运动的推进力。这种现象类似于 two-anchor crawling motion<sup>[172]</sup>，我们将一个前进运动周期分成两个部分进行分

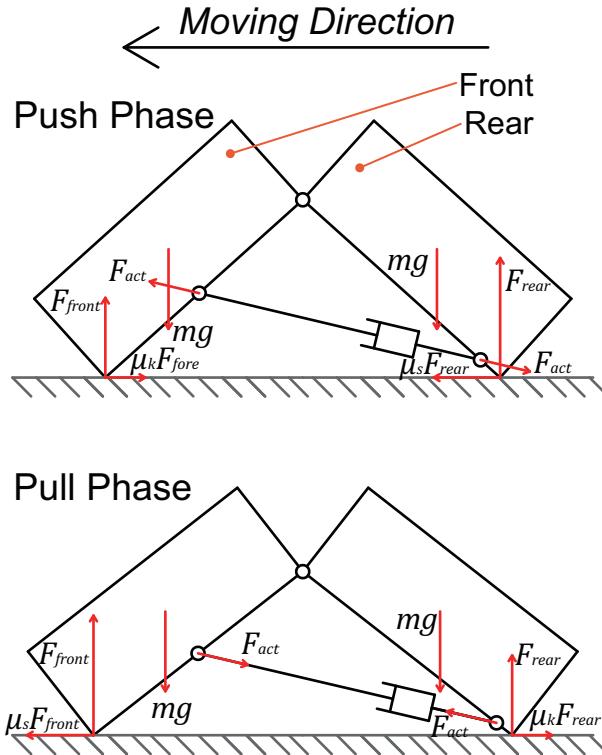


图 3.4 前进运动的原理。机器人的前部和后部质量相等，驱动力可以简化成一个虚拟线性弹簧连接在前部和后部上。

析，分别是 push phase 和 pull phase（图 3.4）。

在前进运动过程中，由于两个肌肉支链产生的驱动力是左右对称的，因此我们将驱动力的合力简化为一个虚拟的线性弹簧，弹簧两端分别连接在机器人的前部和后部。根据机器人的质量分布情况，模型中前部和后部的质量可以认为是相等的，虚拟弹簧的质量可以忽略。

在 push phase 中，虚拟线性弹簧产生推力，推力的垂直分量会在提升机器人前部同时下压机器人的后部。因此 push phase 机器人和地面的受力分析可以写为：

$$\begin{aligned} F_{front} &= mg - F_{act}^v \\ F_{rear} &= mg + F_{act}^v \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中  $F_{front}$  和  $F_{rear}$  分别是机器人前部和后部与地面的支持力， $m$  是机器人前部和后部的质量， $g$  是重力加速度， $F_{act}^v$  是虚拟线性弹簧推进力的垂直分量。

机器人此时和地面的摩擦力状态是：

$$\begin{aligned}\mu_s F_{front} &< \mu_s F_{rear} \\ \mu_k F_{front} &< F_{act}^H < \mu_s F_{rear}\end{aligned}\quad (3-4)$$

其中  $\mu_s$  和  $\mu_k$  分别是静摩擦和动摩擦因数， $F_{act}^H$  是虚拟线性弹簧推进力的水平分量。

在 pull phase 中，虚拟线性弹簧产生拉力，拉力的垂直分量会在向下拉机器人前部同时提升机器人的后部。因此 pull phase 机器人和地面的受力分析可以写为：

$$\begin{aligned}F_{front} &= mg + F_{act}^v \\ F_{rear} &= mg - F_{act}^v \\ \mu_s F_{rear} &< \mu_s F_{front} \\ \mu_k F_{rear} &< F_{act}^H < \mu_s F_{front}.\end{aligned}\quad (3-5)$$

根据方程 (3-4) and (3-5)，在 push phase 中，机器人的后部接触地面作为支撑点，前部向前滑动。在 pull phase 中，机器人的前部接触地面作为支撑点，后部向前滑动。因此在一个运动周期的两部分机器人都产生前进运动。

在实验中我们观察，机器人的前部在 push phase 会被抬起脱离地面（图 3.5），在方程 3-3 中，如果出现  $mg \leq F_{act}^v$  则会导致前部被完全抬起离开地面，这种情况在 S<sup>2</sup>worm-G 中更加常见，这是由于经过优化的驱动传动系统的动力更强，可以产生更大的推进力。由于前部抬升离开了地面，因此 S<sup>2</sup>worm-G 运动过程中的 push phase 主要用于机器人腾空并将重心向前移动，pull phase 中，机器人会完全腾空并在空中收起移动后部，所以 S<sup>2</sup>worm-G 和地面的相对位移主要由 pull phase 产生。

机器人的转弯是通过机构的扭转运动来实现的。由于机器人身体的扭曲，机器人产生的推进力的方向与机器人的前进方向不一致，这导致机器人转弯。实验中转弯是通过给双堆叠压电陶瓷驱动器的两个堆叠施加不同频率的驱动信号实现的。

### 3.3 奇异性现象

#### 3.3.1 抬升运动的奇异性

- 现象描述：**观察到在高频驱动下，对于 S<sup>2</sup>worm 的传动机构，肌肉支链在驱动器的带动下会发生振动，但机构的动平台并不会抬升。这意味着肌肉支链无法将驱动

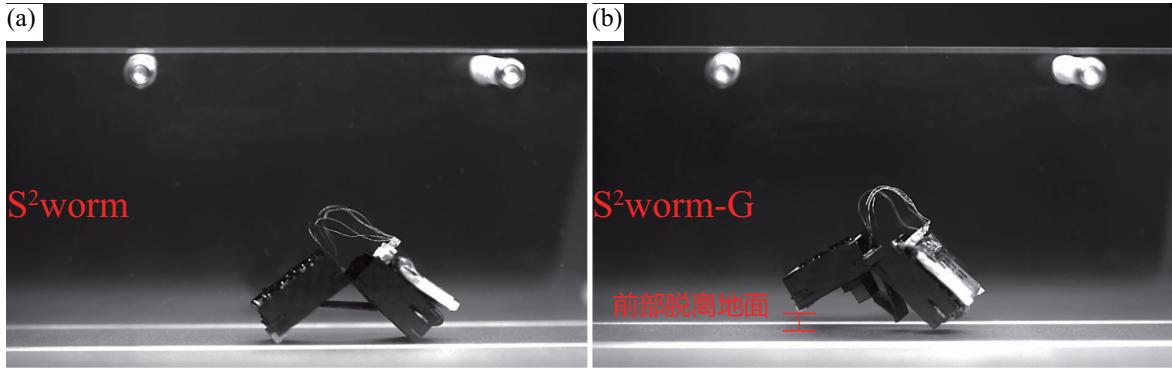


图 3.5 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 的前进运动机制。驱动信号均为 220V-90Hz，机器人均向左前进。(a) S<sup>2</sup>worm 运动时，前部和后部均和地面接触产生推进力。(b) S<sup>2</sup>worm-G 运动时，push phase 会出现机器人前部脱离地面的现象。

作用传递到动平台。为了进一步验证奇异性，我们测试了机构的刚度（图3.12(a))。在加载开始时，曲线的斜率很低，此时对应的理论刚度为零。随着结构逐渐远离奇异构型，曲线的斜率逐渐增加，直到等于没有奇异性的传动机构的曲线斜率。

抬升运动奇异性的局部现象如图3.6 (a) 和 (b) 所示。我们锁定输入转轴 S<sub>21</sub> 和 S<sub>31</sub>，然后手动绕转轴 S<sub>11</sub> 分别施加顺时针和逆时针扭矩以旋转移动平台，传动机构仍然可以发生轻微的抬升运动。转轴 S<sub>24</sub>、S<sub>25</sub> 和 S<sub>34</sub>、S<sub>35</sub> 之间的连杆分别在施加扭矩的方向上发生内翻或外翻状态，动平台的抬升运动范围为 126° 到 132°。这表明传动机构在抬升运动中存在缺陷。即使锁定了输入转轴，传动机构仍允许动平台执行小角度的抬升。

- 负面影响：**传动机构的奇异性将限制机器人的工作频率，因为传动机构在高频运动时会吸收驱动器的输入。由于机器人前进运动的推进力来自于每个周期产生的抬升运动引起的不对称摩擦力，抬升运动奇异性将限制机器人的速度。

### 3.3.2 扭转运动的奇异性

- 现象描述：**在我们之前的工作中，通过异步驱动双堆叠压电陶瓷驱动器来实现扭转运动。高速相机拍摄的视频和刚度测试也显示了扭转运动的奇异性，类似于抬升运动中观察到的结果，旧的传动机构在高频驱动下不会执行扭转运动，机构关于扭转运动的刚度也非常低。

图 3.6(c) 和 (d) 展示了扭转运动奇异性的机构局部现象。我们锁定转轴 S<sub>21</sub> 和 S<sub>31</sub>，

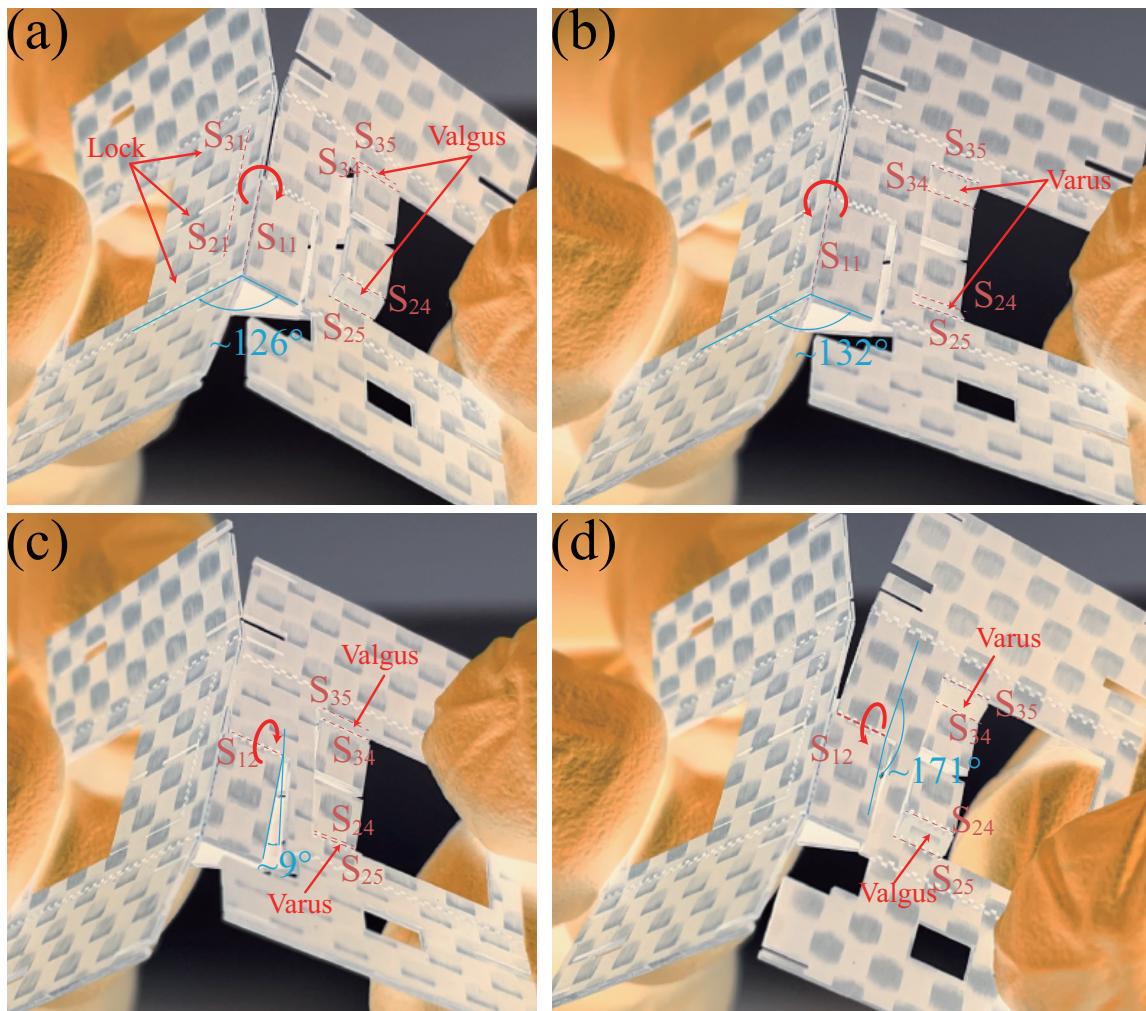


图 3.6 S<sup>2</sup>worm 的二自由度折纸传动机构的奇异性演示。两个输入转轴 S<sub>21</sub> 和 S<sub>31</sub> 被锁定在定平台上。  
 (a) 顺时针力矩作用下抬升运动的奇异性。(b) 逆时针力矩作用下抬升运动的奇异性。(c) 顺时针力矩作用下扭转运动的奇异性。(d) 逆时针力矩作用下扭转运动的奇异性。

并绕转轴 S<sub>12</sub> 旋转移动平台。类似于抬升运动的奇异性现象，即使锁定了输入转轴，机构的动平台可以轻微扭转。在顺时针扭矩作用下，动平台围绕转轴 S<sub>11</sub> 旋转约 9°。转轴 S<sub>24</sub>, S<sub>25</sub> 和 S<sub>34</sub>, S<sub>35</sub> 之间的连杆分别表现为外展和内收状态。在逆时针扭矩作用下，动平台围绕转轴 S<sub>11</sub> 逆时针旋转约 9°。转轴 S<sub>24</sub>, S<sub>25</sub> 和 S<sub>34</sub>, S<sub>35</sub> 之间的连杆分别表现为内收和外展状态。

- 负面影响：**机构扭转运动的薄弱刚度会影响机构一个重要的运动性能指标：转向速度。即使 S<sup>2</sup>worm 可以以 27.4 cm/s 的速度前进，其转向速度只有约 1.2 cm/s。

### 3.4 奇异性分析

在第 3.3 节中，我们分析了二自由度折纸传动机构奇异性现象和负面影响。在本节中，我们将通过 GCA 分析解决机构的奇异性。进行奇异性分析的方法有很多，例如：

1. 计算雅可比矩阵的行列式；2. Grassmann Geometry (GG)；3. Grassmann-Cayley Algebra (GCA)。相比与前两种方法，我们更倾向于使用 GCA 是因为以下几点理由：

1. SCM 方法很少用于构建具有六个自由度的并联机构。大多数 SCM 结构，包括我们在本文中研究的二自由度折纸传动机构，都属于少自由度的并联机构（自由度小于六）。对于这种类型的机构，雅可比矩阵的推导过程相对比较困难。
2. SCM 是一种基于柔性机构 (Compliant Mechanism) 的制造方法。大多数由 SCM 制造的并联机构仅包含旋转副（除了可以作为移动副的 Sarrus 机构），SCM 结构的驱动副也很少使用移动副。通常情况下，GG 更适合处理移动副作为驱动的并联机构，以便更容易地识别驱动力旋量。在 SCM 结构中，大量的旋转副推导驱动力旋量变得困难，因此对于这类机构不适合使用 GG。
3. 我们可以通过传动机构在仿射空间中的构型和射影空间中的 GCA 分析结果来找到所有可能的奇异构型。GCA 的结果可以指导我们评判一个构型是否是奇异的。这对于 SCM 设计过程很有帮助。

GCA 方法可以追溯到 Herman Grassmann 在 1844 年创造的外代数 (Exterior Algebra)。White<sup>[196]</sup>首次在机器人领域引入 GCA 方法。GCA 被应用于对线丛 (Linear Variety) 进行符号化运算。并联机构雅可比矩阵的行可以表示为六个旋量，对应于六条投影线在 Plücker 坐标系下的向量形式。雅可比矩阵的奇异构型对应着这六条线发生了线性相关的情形。由于这六个旋量构成了并联机构的整体力旋量系，所以 GCA 的计算就是为了判断机构整体力旋量系是否发生了降秩。

GCA 中定义了并 (Join) 符号“ $\vee$ ”和交 (Meet) 符号“ $\wedge$ ”，分别对应于向量空间的张 (Span) 和交 (Intersection)。对一个并联机构整体力旋量系的六维线丛进行 superbracket 计算即是计算其对应雅可比矩阵的行列式。当整体力旋量系的 superbracket 计算结果为零时，并联机构处于奇异构型。superbracket 的计算方法是从六条线上各选择两个点，共选择 12 个点，并计算这十二个点展开后的代数表达式。Ben-Horin<sup>[195]</sup>和 Amine<sup>[197]</sup>的研究

究给出了详细的计算和简化过程。通过 GCA，我们可以获得描述并联机构奇异构型的符号表达式。更多的计算细节可以参考 White<sup>[196]</sup>的计算讲义。

本节利用 GCA 对折纸传动机构奇异性分析的步骤为：

1. 计算二自由度折纸传动机构的整体力旋量系的符号表达式。
2. 计算整体力旋量系中六个力旋量的 superbracket 结果并简化。
3. 分解 superbracket 计算结果，找到使得结果为零的几何条件。这一步尤为重要，我们将 GCA 结果与线丛的几何意义相结合，分析出奇异性发生时传动机构的构型。

### 3.4.1 约束旋量系分析

首先是计算二自由度折纸传动机构的整体力旋量系，机构的整体力旋量系是机构约束旋量系和驱动旋量系的并集。我们从约束旋量系开始计算，二自由度折纸传动机构有三条支链，一条外骨骼支链和两条肌肉支链。外骨骼支链施加了四个约束旋量，它们是相对于外骨骼支链运动旋量系互易（Reciprocal）的四个力旋量。它们可以写成：

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{11}^r &= (\mathbf{e}_1; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_1) \\ \mathbf{S}_{12}^r &= (\mathbf{e}_2; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_2) \\ \mathbf{S}_{13}^r &= (\mathbf{e}_3; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_3) \\ \mathbf{S}_{14}^r &= (0; \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2). \end{aligned} \tag{3-6}$$

两条肌肉支链的约束力旋量计算遵循相同的过程计算，每个肌肉支链的约束旋量系仅包含一个纯扭矩：

$$\mathbf{S}_{21}^r = \mathbf{S}_{31}^r = (0; \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2). \tag{3-7}$$

机构动平台的约束旋量系  $\mathbb{S}_c$  是来自支链施加的所有约束力旋量的并集。由于  $\mathbf{S}_{21}^r =$

$S_{31}^r = S_{14}^r$ ,  $\mathbb{S}_c$  可以表示为:

$$\mathbb{S}_c = \left\{ \begin{array}{l} S_{c1} = (\mathbf{e}_1; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_1) \\ S_{c2} = (\mathbf{e}_2; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_2) \\ S_{c3} = (\mathbf{e}_3; \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{e}_3) \\ S_{c4} = (0; \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2) \end{array} \right\}. \quad (3-8)$$

以上是机构的约束旋量系。

### 3.4.2 驱动旋量系分析

机构的驱动旋量系包含机构所有支链施加在动平台上的驱动力旋量。支链中驱动力旋量的计算过程是首先将施加驱动力的运动旋量排除，和其余所有运动旋量以及约束力旋量互易的旋量即为该支链的驱动力旋量。肌肉支链中，施加驱动力的运动旋量为支链的第一个运动旋量。因此两条肌肉支链的驱动力旋量的计算结果为：

$$\begin{aligned} S_{a1} &= (\mathbf{s}_2; \mathbf{r}_{C_2} \times \mathbf{s}_2) \\ S_{a2} &= (\mathbf{s}_3; \mathbf{r}_{C_3} \times \mathbf{s}_3) \end{aligned} \quad (3-9)$$

其中  $\mathbf{s}_2$  和  $\mathbf{s}_3$  分别代表方向向量，具体定义为：

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_2 &= (\mathbf{e}_1 \times (\mathbf{s}_3 - \mathbf{r}_{B_2})) \times (\mathbf{e}_2 \times (\mathbf{r}_{D_2} - \mathbf{r}_{C_2})) \\ &= (\mathbf{e}_1 \times \mathbf{p}_2) \times (\mathbf{e}_2 \times \mathbf{v}_2) \\ \mathbf{s}_3 &= (\mathbf{e}_1 \times (\mathbf{r}_{C_3} - \mathbf{r}_{B_3})) \times (\mathbf{e}_2 \times (\mathbf{r}_{D_3} - \mathbf{r}_{C_3})) \\ &= (\mathbf{e}_1 \times \mathbf{p}_3) \times (\mathbf{e}_2 \times \mathbf{v}_3) \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中方向向量  $\mathbf{p}_2$ ,  $\mathbf{v}_2$ ,  $\mathbf{p}_3$ ,  $\mathbf{v}_3$  均在图 3.2 中给出。向量  $\mathbf{s}_2$  和  $\mathbf{s}_3$  分别是平面  $\mathcal{P}_2$ 、 $\mathcal{V}_2$  和平面  $\mathcal{P}_3$ 、 $\mathcal{V}_3$  的交线的方向向量。由于驱动力旋量经过点  $C_2$  和  $C_3$ ，因此这两个驱动力旋量对应的几何体分别是平面  $\mathcal{P}_i$  和  $\mathcal{V}_i$  ( $i = 2, 3$ ) 的交线。

### 3.4.3 整体力旋量系

整体力旋量系是约束旋量系  $\mathbb{S}_c$  和运动旋量  $\mathbb{S}_a$  的并集，因此二自由度折纸传动机构的整体力旋量系可以表示为：

$$W = \text{span}(S_{c1}, S_{c2}, S_{c3}, S_{c4}, S_{a1}, S_{a2}). \quad (3-11)$$

机构的雅可比矩阵的行可以表示为上述整体力旋量系中每个力旋量的 Plücker 坐标的形势。雅可比矩阵的行列式结果为零时，机构出现奇异性，此时旋量对应的六条射线线性相关，整体力旋量系的秩小于 6。

### 3.4.4 构造 superbracket

二自由度折纸传动机构的整体力旋量系由公式 3-11 给出。为了求解机构的奇异性，我们需要根据公式 3-11 构造出 superbracket，因此要在每个力旋量中选择两个点。

旋量是射影空间中的线，因此可以被分类为有限线 (Finite line) 和无限线 (Infinite line)。每条线上均可以取出两个点，无限线仅包含处于无穷远处的点，也叫无限点。有限线至少包含一个有限处的点，另一个点既可以是有限点也可以是无限点。在旋量的表示形式中，方向向量均对应着一个无限点。

在接下来的分析中，为了区分有限点和无限点，表示无限点的符号均带有下划线。 $S_{c1}$ ,  $S_{c2}$ ,  $S_{c3}$  均为有限线，因为这三点线都经过  $A_1$  点。他们的第二个点均选为其方向向量对应的无限点，分别是  $e_1$ ,  $e_2$  和  $e_3$ 。 $S_{c4}$  是一条无限线，其上的两个点分别是  $\underline{e}_1$  和  $\underline{e}_2$ 。

驱动力旋量  $S_{a1}$  上的两个点分别选为  $\underline{s}_2$  和  $C_2$ 。在射影空间中，点  $\underline{s}_2$  是两条射影线  $\underline{e}_1\underline{p}_2$  和  $\underline{e}_2\underline{v}_2$  的交点。由于方向向量  $p_3$  和向量  $e_1$  正交，因此射影空间中的点  $\underline{p}_2$  属于射影空间中的线  $\underline{e}_2\underline{e}_3$ 。由于方向向量  $v_3$  和向量  $e_2$  正交，因此射影空间中的点  $\underline{v}_2$  属于射影空间中的线  $\underline{e}_1\underline{e}_3$ 。

基于同样的分析过程，射影点  $\underline{s}_3$  是两条射影线  $\underline{e}_1\underline{p}_3$  和  $\underline{e}_2\underline{v}_3$  的交点。点  $\underline{p}_3$  属于射影空间中的线  $\underline{e}_2\underline{e}_3$ 。点  $\underline{v}_3$  属于射影空间中的线  $\underline{e}_1\underline{e}_3$ 。

基于上述分析过程，我们可以画出射影空间中的六个力旋量（图 3.7），每个力旋量和其对应的两个点均列在表 3.2 中。从整体力旋量中取出的十二个点分别是： $S_{c1} = A_1e_1$ ,  $S_{c2} = A_1\underline{e}_2$ ,  $S_{c3} = A_1\underline{e}_3$ ,  $S_{c4} = \underline{e}_1\underline{e}_2$ ,  $S_{a1} = C_2\underline{s}_2$ ,  $S_{a2} = C_3\underline{s}_3$ 。因此二自由度折纸传动机构的 superbracket 可以表示为：

$$\text{Superbracket} = [A_1e_1, A_1\underline{e}_2, A_1\underline{e}_3, C_2\underline{s}_2, \underline{e}_1\underline{e}_2, C_3\underline{s}_3]. \quad (3-12)$$

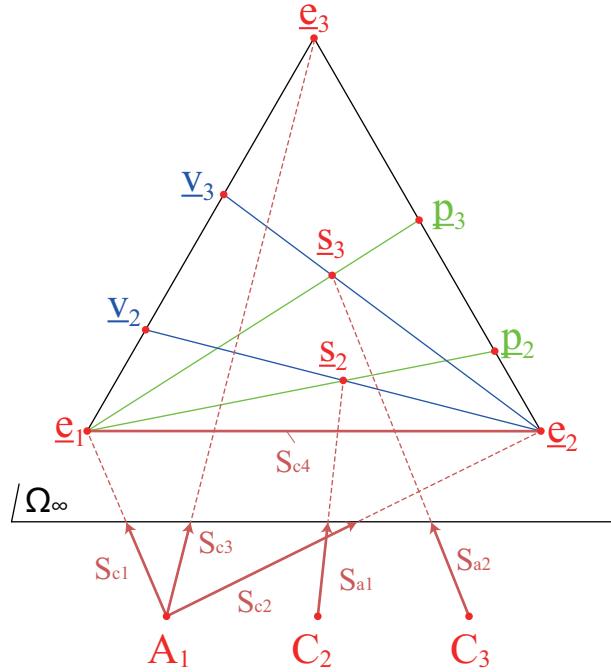


图 3.7 传动机构整体力旋量系的射影图。

表 3.2 旋量的类型和射影点。

旋量	线类型	第一个 射影点	第二个 射影点
$S_{c1}$	Finite	$A_1$	$e_1$
$S_{c2}$	Finite	$A_1$	$e_2$
$S_{c3}$	Finite	$A_1$	$e_3$
$S_{c4}$	Infinite	$e_1$	$e_2$
$S_{a1}$	Finite	$C_2$	$s_2$
$S_{a2}$	Finite	$C_3$	$s_3$

### 3.4.5 Superbracket 计算与分解

基于 superbracket 计算和简化过程<sup>[195][197]</sup>, 方程 (3-12) 可以被扩展和简化为 (计算使用的计算机程序在附录一):

Superbracket

$$\begin{aligned}
 &= [A_1 e_1 e_2 e_3] [A_1 C_2 s_2 e_2] [A_1 e_1 C_3 s_3] \\
 &\quad - [A_1 e_1 e_2 e_3] [A_1 C_2 s_2 e_1] [A_1 e_2 C_3 s_3] \\
 &= [A_1 e_1 e_2 e_3] [A_1 C_2 s_2 e_2] [A_1 e_1 C_3 s_3]
 \end{aligned} \tag{3-13}$$

其中射影点的上标记号  $\dot{\square}$  表示交换子，该符号的具体解释在 Ben-Horin 的工作<sup>[195]</sup>中给出。奇异构型对应于方程 3-13 为零的情况。关于 superbracket 计算结果的分解和讨论如下。

- (a) 方程中的第一项  $[A_1 \underline{e}_1 \underline{e}_2 \underline{e}_3]$  为零。此时对应的几何情况为四个点  $A_1, \underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3$  共平面。这种情况是不可能发生的，因为  $A_1$  是一个有限点，而  $\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3$  是三个无限点，分别对应三个正交的方向向量。
- (b) 方程中的第二项  $[A_1 C_2 \underline{s}_2 \dot{\underline{e}}_2][A_1 \dot{\underline{e}}_1 C_3 \underline{s}_3]$  为零。这种情况下计算结果对应的 GCA 表示形式为：

$$(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (A_1 C_3 \underline{s}_3) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0 \quad (3-14)$$

关于方程 3-14 如何成立需要讨论以下几种具体情况：

- (b.1)  $(\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0 \Rightarrow$  线  $(\underline{e}_1 \underline{e}_2)$  发生了降级，对应的几何情况为点  $\underline{e}_1$  和  $\underline{e}_2$  重合，这种情况不会发生。
- (b.2)  $(A_1 C_2 \underline{s}_2) = 0 \Rightarrow$  平面  $(A_1 C_2 \underline{s}_2)$  降级，射影点  $A_1, C_2, \underline{s}_2$  共线。此时驱动力旋量  $S_{a1}$  经过点  $A_1$ 。此时机构的几何构型是平面  $\mathcal{P}_2$  和  $\mathcal{V}_2$  经过点  $A_1$ 。
- (b.3)  $(A_1 C_3 \underline{s}_3) = 0 \Rightarrow$  平面  $(A_1 C_3 \underline{s}_3)$  降级，射影点  $A_1, C_3, \underline{s}_3$  共线。此时驱动力旋量  $S_{a2}$  经过点  $A_1$ 。此时机构的几何构型是平面  $\mathcal{P}_3$  and  $\mathcal{V}_3$  经过点  $A_1$ 。
- (b.4)  $(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0 \Rightarrow$  点  $A_1, C_2, \underline{s}_2, \underline{e}_1, \underline{e}_2$  共面，驱动力旋量  $S_{a1}$  处于平面  $(A_1 \underline{e}_1 \underline{e}_2)$  内，此时对应的几何构型是平面  $\mathcal{V}_2$  和  $\mathcal{M}$  重合。
- (b.5)  $(A_1 C_3 \underline{s}_3) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0 \Rightarrow$  点  $A_1, C_3, \underline{s}_3, \underline{e}_1, \underline{e}_2$  共面，驱动力旋量  $S_{a2}$  处于平面  $(A_1 \underline{e}_1 \underline{e}_2)$  内，此时对应的几何构型是平面  $\mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$  重合。
- (b.6)  $(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (A_1 C_3 \underline{s}_3) = 0 \Rightarrow$  点  $A_1, C_2, \underline{s}_2, C_3, \underline{s}_3$  共平面，驱动力旋量  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  张成的平面经过点  $A_1$ 。当平面  $\mathcal{P}_2$  和  $\mathcal{P}_3$  重合且经过  $A_1$  时，可以达到这种几何条件。
- (b.7)  $(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (A_1 C_3 \underline{s}_3) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0 \Rightarrow$  平面  $(A_1 C_2 \underline{s}_2)$  和  $(A_1 C_3 \underline{s}_3)$  交线和直线  $(\underline{e}_1 \underline{e}_2)$  共平面。当三个平面  $\mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$  具有公共交线时可以达到这种几何条件。

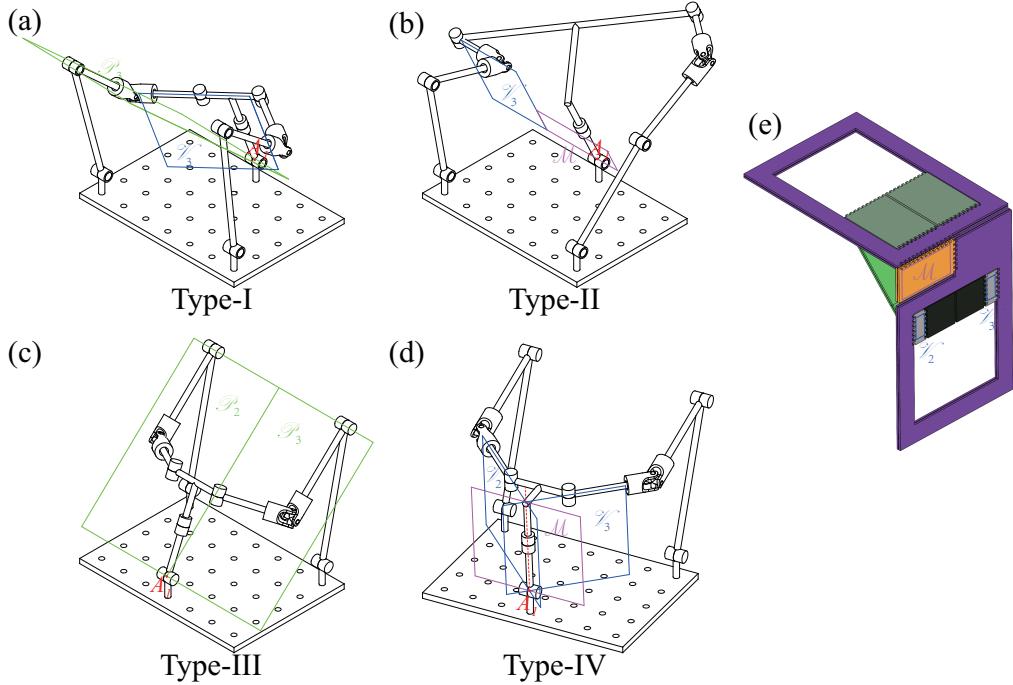


图 3.8 (a)-(d) 四种奇异构型。(a) Type-I, 平面  $\mathcal{P}_3$  和  $\mathcal{V}_3$  都经过点  $A_1$ 。(b) Type-II, 平面  $\mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$  共面。(c) Type-III, 平面  $\mathcal{P}_2$  和  $\mathcal{P}_3$  共面且都经过点  $A_1$ 。(d) Type-IV, 平面  $\mathcal{V}_2$   $\mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$  具有一条公共交线且经过点  $A_1$ 。(e) S<sup>2</sup>wormSCM 结构的初始构型。平面  $\mathcal{V}_2$ ,  $\mathcal{V}_3$  和  $\mathcal{M}$  共面。这种几何形态对应于 Type-II 和 Type-IV。

表 3.3 二自由度折纸传动机构奇异构型的 GCA 表达式和对应的 GG 线从类型

奇异类型	GCA 表达式	几何结构
Type-I	$(A_1 C_2 \underline{s}_2) = 0$ or $(A_1 C_3 \underline{s}_3) = 0$	Plane $\mathcal{P}_2$ and $\mathcal{V}_2$ (or $\mathcal{P}_3$ and $\mathcal{V}_3$ ) both pass the point $A_1$ .
Type-II	$(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0$ or $(A_1 C_3 \underline{s}_3) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0$	Plane $\mathcal{V}_2$ (or $\mathcal{V}_3$ ) and $\mathcal{M}$ are coplanar.
Type-III	$(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (A_1 C_3 \underline{s}_3) = 0$	Plane $\mathcal{P}_2$ and $\mathcal{P}_3$ are coplanar and both pass the point $A_1$ .
Type-IV	$(A_1 C_2 \underline{s}_2) \wedge (A_1 C_3 \underline{s}_3) \wedge (\underline{e}_1 \underline{e}_2) = 0$	Plane $\mathcal{V}_2$ $\mathcal{V}_3$ and $\mathcal{M}$ have a common intersection line which pass the point $A_1$ .

奇异类型	线从几何类型	GG 分类 <sup>[194]</sup>
Type-I	$S_{a1}$ (or $S_{a2}$ ) $S_{c1} S_{c2} S_{c3}$ concur	3c. All lines through a point
Type-II	$S_{a1}$ (or $S_{a2}$ ) $S_{c1} S_{c2} S_{c4}$ are coplanar	3d. All lines in plane
Type-III	$S_{a1} S_{a2}$ span a plane passes the point $A_1$ , $S_{c1} S_{c2} S_{c3}$ pass the point $A_1$	4d. Degenerate congruence. All the lines in plane or pass the point in that plane
Type-IV	The planes which contain $S_{a1} S_{a2}$ $S_{c1} S_{c2} S_{c3}$ intersect at a common line	4c. Parabolic congruence. A one parameter family of flat pencils, having one line in common and forming a variety.

我们找到了二自由度折纸传动机构的所有奇异构型。将上述分析结果归类为四种奇异性类型，具体如下列出：

- **Type-I: (b.2)** 和 **(b.3)**, 一个驱动力旋量经过点  $A_1$ 。
- **Type-II: (b.4)** 和 **(b.5)**, 一个驱动力旋量和平面  $(A_1e_1e_2)$  重合。
- **Type-III: (b.6)**, 两个驱动力旋量张成的平面经过点  $A_1$ 。
- **Type-IV: (b.7)**, 平面  $(A_1C_2S_2)$  和  $(A_1C_3S_3)$  的交线属于平面  $(A_1e_1e_2)$ 。

我们通过 GCA 分析获得了二自由度折纸传动机构所有可能的奇异性类型，并将结果展示在图 3.8 中。如前所述，GG 和 GCA 两种方法在几何和代数方面可以互相解释和补充。我们在表 3.3 中列出了四种奇异性类型和 GG 线丛类型分类之间的对应关系。

基于上述分析，我们研究了 S<sup>2</sup>worm 折纸传动机构的设计。在传动机构初始状态中（图 3.8(e)），两个驱动力旋量处于平面  $(A_1e_1e_2)$  中。此种几何构型对应于 **Type-II**、**Type-III** 和 **Type-IV** 三类奇异性，这导致了传动系统在初始构型和随后的传动过程中的低效。解决方法是尽可能使驱动力旋量垂直于平面  $(A_1e_1e_2)$ ，具体的实现方法将在第 3.5.1 节中的 SCM 设计中进一步解释。

通过应用 GCA，我们可以计算 SCM 结构的所有可能的奇异性。不仅可以解释之前设计中的奇异性问题，还可以指导优化 SCM 结构以避免奇异性。

### 3.4.6 奇异性分析的方法论证

到目前为止，本小节所有的奇异性分析都是基于假设传动机构是一个刚体系统。而实际上 SCM 结构是由柔性聚酰亚胺薄膜作为柔性转轴连接在一起的。因此我们需要论证对这样一个柔性机构使用基于刚体的奇异性分析方法的合理性，关键在于证明柔性铰链并不会影响奇异性分析结果，以下是论证过程：

在柔性机构<sup>[198]</sup>中，活性铰链（living hinge）的定义是极短极薄的柔性铰链。在 SCM 结构中，由聚酰亚胺薄膜实现的柔性铰链满足这个定义，因为 SCM 结构中的聚酰亚胺薄膜很薄 ( $12.5\mu m$ )，铰链的缝隙很窄 ( $\sim 25\mu m$ )。基于活性铰链定义，这些柔性铰链可以被视作是一个刚度极低的扭簧，在结构运动的过程中，这些扭簧会在机构的关节处施加一些小的扭矩。

由于这些扭矩的方向都平行于铰链对应的转轴轴线，因此这些扭矩作用在支链的运动旋量系子空间上。这个子空间和支链的约束旋量系互易，因此作用在这个子空间上的力矩不会影响支链的约束旋量系。有一个特殊情况需要考虑，即输入铰链作为扭簧施加的力矩会和输入力矩叠加，这将改变支链的驱动力旋量的大小，但并不会改变其方向。因此支链的驱动旋量系的形式也不会发生改变。

基于上述分析，不论是否考虑铰链的扭簧刚度，传动机构的整体力旋量系的形式都将保持不变，因此其 GCA 奇异性分析的过程和结果均不受影响。所以在对 SCM 机构进行奇异性分析的时候，可以将机构假设为一个刚体系统而不用考虑其铰链柔性，进行这种假设的前提是机构的柔性铰链满足活性铰链的定义。

## 3.5 样机制造

### 3.5.1 传动机构的优化设计

这一小节中，我们将以 GCA 计算和分析得到的奇异性结果作为指导，优化二自由度折纸传动机构的 SCM 设计以优化驱动传动效果。基于对传动机构的几何定义，我们可以将奇异性分析中所有的几何平面对应到折纸传动机构中具体的连杆。

图 3.9 比较 了旧的 S<sup>2</sup>worm 和当前的 S<sup>2</sup>worm-G 中的 SCM 结构之间的差别。两代版本之间的相同功能的连杆都使用了相同的颜色。为了简化描述过程，接下来的分析中描述连杆均使用其颜色代指，连杆的颜色和在传动机构中对应位置等几何信息在表 3.4 中给出。

平面  $\mathcal{P}_i(i = 2, 3)$  (图 3.2) 对应的是位于转轴  $S_{i2}$  和  $S_{i3}(i = 2, 3)$  之间的 Light Green 连杆。平面  $\mathcal{V}_i(i = 2, 3)$  对应的是位于转轴  $S_{i4}$  和  $S_{i5}(i = 2, 3)$  之间的 Gray 连杆。平面  $\mathcal{M}$  对应的是位于转轴  $S_{11}$  和  $S_{12}$  之间的 Orange 连杆。

在 SCM 结构中，最常见的可能导致奇异性的情况是多个连杆共面。因为 SCM 是刚制造完成时是一个包含铰链的二维结构，结构从二维到三维的组装过程是通过折叠铰链完成的。在二自由度折纸传动机构中，**Type-I** 奇异条件很少发生，因为同时满足平面  $\mathcal{P}_i$  和  $\mathcal{V}_i$  通过点  $A_1$  的要求很难，而这种几何构型要求 Light Green 杆和 Gray 连杆都通过点  $A_1$ 。这种几何条件在二自由度折纸传动机构的 SCM 设计中很难满足，因为实现机构的支链闭合会将 Light Green 色连杆折叠。

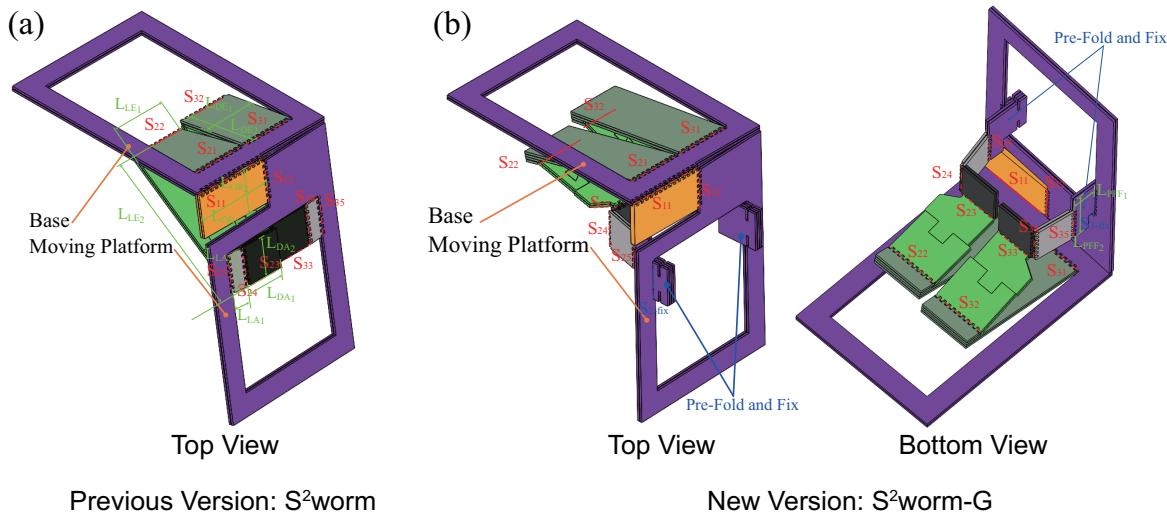


图 3.9 二自由度折纸传动机构的 SCM 结构（模型中的侧板和曲柄滑块结构被隐藏）。(a)  $S^2$ worm。(b)  $S^2$ worm-G。

表 3.4 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 中 SCM 结构的几何参数比较。

连杆	对应的运动旋量	图 3.9 中的记号	$S^2$ worm (mm)	$S^2$ worm-G (mm)
Dark Green	$S_{i1}$ and $S_{i2}$ $i = 2, 3$	$L_{DE_1}$ $L_{DE_2}$	5 7	4.8 10.8
Light Green	$S_{i2}$ and $S_{i3}$ $i = 2, 3$	$L_{LE_1}$ $L_{LE_2}$	5 13	4.8 7
Dark Gray	$S_{i3}$ and $S_{i4}$ $i = 2, 3$	$L_{DA_1}$ $L_{DA_2}$	3.6 3.4	3.6 3.4
Light Gray	$S_{i4}$ and $S_{i5}$ $i = 2, 3$	$L_{LA_1}$ $L_{LA_2}$	1.5 3.4	3.5 3.4
Orange	$S_{i4}$ and $S_{i5}$ $i = 2, 3$	$L_{Or_1}$ $L_{Or_2}$	7 3.75	7 3.75
Pre-Fold and Fix	$S_{i5}$ and $S_{i-fix}$ $i = 2, 3$	$L_{PFF_1}$ $L_{PFF_2}$	— —	2.1 4.9

在 S<sup>2</sup>worm 的初始构型（图 3.8）中，Gray 连杆和 Orange 连杆共面。两个驱动力旋量  $S_{a1}$  和  $S_{a2}$  都位于平面 ( $A_1e_1e_2$ ) 中，这种几何关系导致了奇异条件 **Type-II**, **Type-III** 和 **Type-IV** 的出现。为了避免机器人的奇异性，改进方法是避免 gray 杆和 orange 杆共面。此外，为了最大化作用效果，我们倾向于使作用驱动力旋量尽可能垂直于平面 ( $A_1e_1e_2$ )。由于作用力矩  $Sa1$  和  $Sa2$  是 Light Green 连杆和 Gray 连杆的交线，并且平面 ( $A_1e_1e_2$ ) 对应 Orange 连杆。为了改善 SCM 结构，最简单修正方法是在机构的初始构型中使 Gray 连杆尽可能垂直于 Orange 连杆。

在新版本的 SCM 结构中，我们应用了一种名为“Pre-Fold and Fix”的方法来使 Gray 连杆与 Orange 连杆垂直。具体方法是在 Gray 连杆和机构动平台之间添加两个额外的连杆用于折叠和固定。“Pre-Fold and Fix”连杆和移动平台通过关节  $S_{2-fix}$  和  $S_{3-fix}$  相连接，先将这两个连杆折叠到和动平台相垂直，再将之固定。

考虑到 SCM 方法的结构限制，一个关节几乎无法旋转超过 90°，因此在 S<sup>2</sup>worm-G 中添加“Pre-Fold and Fix”连杆，使得转轴  $S_{i5}(i=2,3)$  对应的 Gray 连杆能够自由旋转。如果不增加“Pre-Fold and Fix”连杆进行过渡，而将 Gray 连杆直接连接到动平台，这将导致转轴  $S_{i5}(i=2,3)$  几乎接近 90°。为了适应这个改动，SCM 结构的其他连杆长度都需要做出轻微调整。所有设计参数均罗列在表 3.4 中。

### 3.5.2 传动机构与驱动器

关于 S<sup>2</sup>worm 结构的 SCM 制造过程我们在第 2.3.1 小节中已经进行了详细的解释，这一小节我们将重点介绍 S<sup>2</sup>worm-G 基于 S<sup>2</sup>worm 的改进以及新的驱动器强化工艺。

首先我们介绍 SCM 的结构组成原理。根据 SCM 制造原理，柔性铰链和连杆是通过两个刚性薄片夹住一块柔性薄膜实现的。通常还会引入额外的粘合薄片将前述材料粘合在一起。本文中我们选择的柔性薄膜、刚性薄片和粘合薄片分别为聚酰亚胺薄膜（PI）、碳纤维（CF）和杜邦 FR1500 粘合薄膜（Dupont FR1500 Sheet Adhesive），这些材料的详细信息列在表 3.5 中列出。形成的柔性连杆五层堆叠结构是 CF-adhesion-PI-adhesion-CF。

S<sup>2</sup>worm-G 的 SCM 结构可以分为两个滑块曲柄机构和一个二自由度折纸传动机构。与第一代 S<sup>2</sup>worm 相比，这一代 SCM 结构的制造和组装过程更加复杂。由于我们通过增加 Gray 连杆（图 3.9）的长度来解决二自由度折纸传动机构的奇异性问题，因此两个 Gray 连杆、两个 Black 连杆和一个 Purple 连杆不再能够像 S<sup>2</sup>worm 中一样在单个五层堆叠中平铺。

为解决这个问题，我们引入了一个额外的五层堆叠结构，因此 S<sup>2</sup>worm-G 的 SCM 结构包含三个五层堆叠结构（图 3.10(a)）。其中顶部堆叠结构用于构建滑块曲柄机构。中间和底部的堆叠结构共同用于构建二自由度折纸传动机构。

这三个堆叠结构首先经过热压，成为三个固化片，然后分别被激光切割出对应的图案。每两个固化片之间引入一张粘合膜进行粘合。然后将上述结构再次固化并从框架中切割出来以进行折叠和装配。Light Green 连杆在折叠后通过接头图案重新连接以构

建闭环结构<sup>[42][187]</sup>。Gray 连杆经过“Pre-Fold and Fix”连杆折叠保持和动平台相互垂直，两片 200 $\mu\text{m}$  的氧化铝陶瓷栓用于插入和固定“Pre-Fold and Fix”连杆。如上一节所分析，这可以使 Gray 连杆在传动机构的初始构型下垂直于 Orange 连杆，从而使二自由度折纸传动机构避免奇异性并提高传动效果。上述折叠装配过程如图 3.10(b) 所示。此时的 SCM 结构已准备好安装压电陶瓷驱动器。

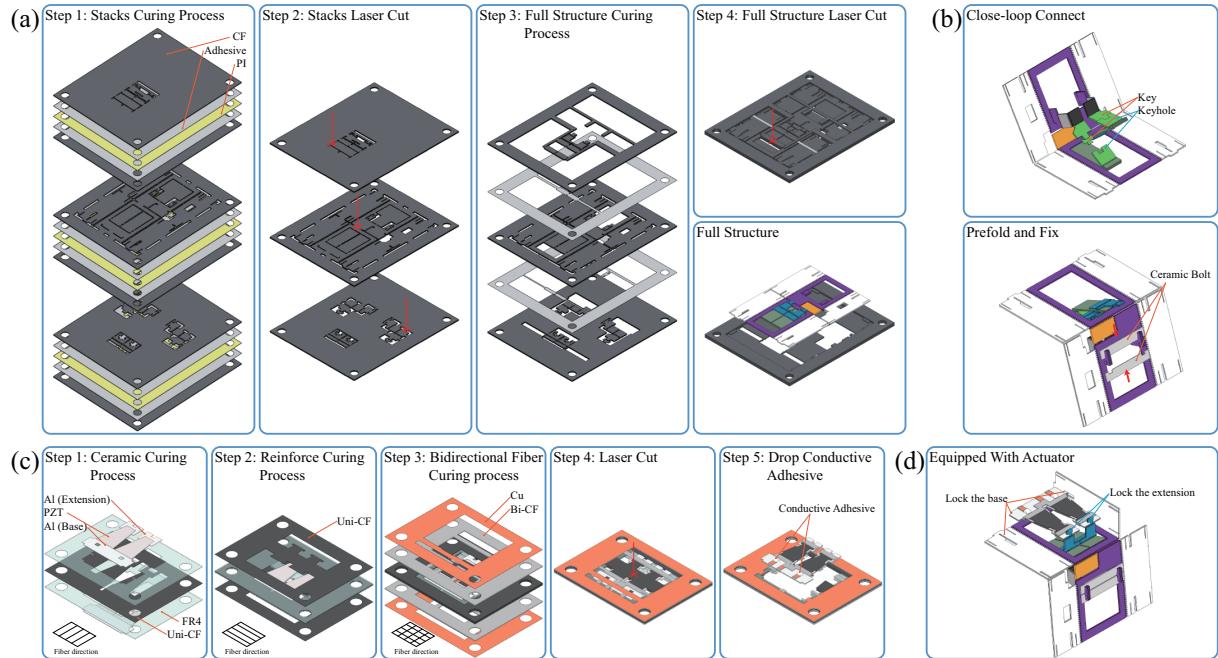


图 3.10 (a) 传动机构制造流程。(b) 传动机构的连接和固定。(c) 双堆叠压电陶瓷驱动器制造流程。(d) 驱动器装配过程。

表 3.5 制造 S<sup>2</sup>worm-G 所使用的材料

部件	材料	图 3.10 中缩写	厚度 ( $\mu\text{m}$ )
传动机构	Carbon Fiber	CF	200
	Dupont FR1500 Sheet Adhesive	Adhesive	12.5
	Polyimide Film	PI	12.5
驱动器	Epoxy Glass Cloth	FR4	127
	Piezoelectric Ceramic	PZT	127
	Alumina Ceramic	AI	127
	Unidirectional Carbon Fiber Prepreg	Uni-CF	50
	Bidirectional Carbon Fiber Prepreg	Bi-CF	200
	Copper Foil	Cu	13

压电陶瓷驱动的制造过程可以分为五步（图 3.10(c)），所使用的材料特性都罗列在表 3.5。第一步，使用 FR4 框架摆放和对准所有的陶瓷材料（压电陶瓷，氧化铝陶瓷），单向碳纤维预浸料夹在两片 FR4 框架中间，形成一个三层结构。这一步中，每个 FR4 框架内都有五片陶瓷，分别是两片梯形的压电陶瓷，三片氧化铝陶瓷中两片较小的称为 extension，另一片较大的称为 base。单向碳纤维预浸料的纤维排列方向和梯形压电陶瓷的高度方向平行。第二步中，将第一步固化后的固化片正反两面再贴上新的单向碳纤维预浸料并进行固化，这一步中单向碳纤维预浸料的纤维方向和梯形压电陶瓷的底边方向平行。这种平行放置的单向碳纤维预浸料可以对压电陶瓷片进行强化。第三步中，将第二步固化后的五层固化片的正反两面再贴上新的双向碳纤维预浸料和两张铜箔。双向碳纤维预浸料和第二步中的单向碳纤维预浸料的图案互补，双向碳纤维预浸料可以桥接压电陶瓷和氧化铝陶瓷之间的缝隙，并且连接压电陶瓷表面的金属镀层从而联通电路。第四步中，将第三步固化后的七层固化片从 FR 框架中切出。第五步，给切出的驱动器涂上环氧导电胶从而联通电路，至此就完成了双堆叠压电陶瓷驱动器的全部制作过程。给 SCM 结构装配压电陶瓷驱动器的过程如图 3.10(d) 所示。首先将驱动器的 base 嵌入 SCM 结构侧板的安装孔中，再将两个曲柄滑块结构的安装头分别嵌入驱动器两个陶瓷堆叠的 extension 中。以上是 S<sup>2</sup>worm-G 传动机构与驱动器的全部制造和装配过程。

### 3.5.3 机载电子系统

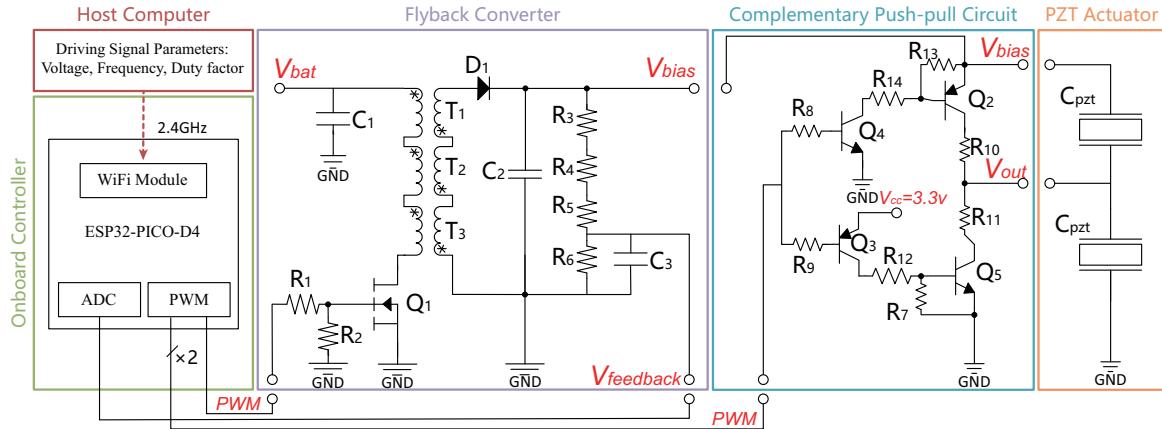


图 3.11 机载电子元器件的电路原理图。高压转换电路包含一个 **flyback converter circuit** 用于产生高电平  $V_{bias}$  以及两个 **complementary push-pull circuit** 用于产生驱动信号  $V_{out}$ 。

表 3.6 图 3.11 中所使用的电子元器件。

器件	图 3.11 中符号	参数和型号
Capacitor	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub>	1μF(0402), 1μF(2220), 1nF(0402)
Resistor	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub> -R <sub>5</sub> , R <sub>6</sub> -R <sub>7</sub> , R <sub>8</sub> -R <sub>12</sub> , R <sub>13</sub> , R <sub>14</sub>	200Ω(0603), 20kΩ(0603), 3.3MΩ(0402), 100kΩ(0402), 10kΩ(0402), 499kΩ(0402), 2MΩ(0402)
Diode	D <sub>1</sub>	US1NWF-7
Transformer	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub>	ATB322515-0110-T000
MOSFET	Q <sub>1</sub>	SI2324DS-T1-GE3
PNP	Q <sub>2</sub> , Q <sub>3</sub>	STR2550
NPN	Q <sub>4</sub> , Q <sub>5</sub>	STR1550

为了实现昆虫尺度微型机器人的无系留运动，我们给 S<sup>2</sup>worm-G 装配了机载电子元器件，包含电池和控制系统。S<sup>2</sup>worm-G 使用和 S<sup>2</sup>worm 同型号的 3.7 V 35 mAh 可充电锂电池，机载电子元器件具体包含一个自制的高压放大器用于驱动压电陶瓷，以及一个机载控制器用于接收控制指令（图 3.11）。所使用的电子元器件型号均在表 3.6 中列出。

S<sup>2</sup>worm-G 机载电子元器件所使用的设计方案和 S<sup>2</sup>worm 类似，机载控制器基本沿用上一代方案，WiFi 模块用于和上位机实现通信，高压放大器包含一个 flyback converter 用于电压放大产生高压信号  $V_{bias}$ ，以及两路 complementary push-pull circuit 用于生成驱

动用的方波信号  $V_{out}$ 。

驱动双堆叠压电陶瓷驱动器的电路依然使用 simultaneous configuration<sup>[68]</sup>, 第2.3.3小节介绍了这种驱动方式的具体原理。一个驱动器陶瓷堆叠可以被看作是两个串联的电容，在顶部电容上施加的电压为  $V_{top} = V_{bias} - V_{out}$ ，在底部电容施加的电压为  $V_{bottom} = V_{out} - V_{GND} = V_{out}$ 。因此一个驱动器陶瓷堆叠受到的等效驱动信号可以表示为：

$$V_{drive} = V_{top} - V_{bottom} = V_{bias} - 2V_{out} \quad (3-15)$$

在第3.6.2，我们再次使用这个结论进行驱动器位移和信号之间的相位差分析。

和 S<sup>2</sup>worm 所使用的机载电路相比，S<sup>2</sup>worm-G 的电路进行了三点改进：

1. 增加了一个串联的变压器 ( $T_3$ )，以提高 flyback converter 的负载能力同时降低电路发热量。
2. 在 flyback converter 中增加了一个反馈回路 ( $R_3, R_4, R_5, R_6, C_3$ )，以实现高压信号  $V_{bias}$  的闭环控制。这一路反馈采样信号通过 ADC 模组输入到机载控制器中。
3. complementary push-pull circuit 中的电阻  $R_{14}$  阻值由  $15M\Omega$  减小到  $2M\Omega$ 。这个调整可以让等效驱动信号  $V_{drive}$  的上升沿更加尖锐。

### 3.5.4 样机质量分布

至此，S<sup>2</sup>worm-G 的主要组成部分已经介绍完毕，具体包括：SCM 结构、双堆叠压电陶瓷驱动器，电池和机载电子元器件。这些组成部分的质量分布都在表 3.7 中给出。和 S<sup>2</sup>worm 相比，新传动机构的质量仅增加了 0.1 g，和样机整体质量相比几乎可以忽略。

表 3.7 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 的质量分布。

部件名称	S <sup>2</sup> worm (g)	S <sup>2</sup> worm-G (g)
传动机构	0.80	0.81
驱动器	0.28	0.39
电池	1.48	1.52
控制电路	1.51	1.80
导线、焊锡和胶水	0.27	0.19
合计	4.34	4.71

## 3.6 测试与表征

在这一部分，我们主要关注 S<sup>2</sup>worm-G 的 SCM 结构和运动性能测试。对于优化后的 SCM 结构，我们比较了之前版本和当前版本的刚度，以证明 SCM 结构在抬升运动和扭转运动期间的奇异性已经被解决。对于 S<sup>2</sup>worm-G 机器人，我们测量了前进和转向运动期间的速度，并测试了几种不同的基底上机器人的运动速度以证明机器人的表面适应性。我们还测量和计算了机器人的能耗指标。最后我们采用 St. Pierre 和 Bergbreiter<sup>[103]</sup>提出的性能指标和自动化得分，比较 S<sup>2</sup>worm-G 和其他相近尺度的机器人样机和昆虫的运动能力和自动化性能。

### 3.6.1 传动机构奇异性测试

为比较新旧版本传动机构之间的结构刚度，我们对传动机构的抬升和扭转运动的结构刚度进行了测试。在测试过程中，传动机构通过夹具进行固定，传动机构的输入连杆也被固定在定平台上。载荷通过一根针施加在动平台上，整个测试装置被固定在万能力学测试系统（INSTRON 5944）上进行测试。测试过程中，载荷施加针的位移数据和力数据都被测试系统记录。为便于比较新旧传动机构的结构刚度，载荷施加针的位移和力都通过力臂换算成了相应的角度和扭矩。（图 3.12）。

二自由度折纸传动机构的刚度通过  $K = \frac{\text{Torque}}{\text{Angle}}$  进行计算。本节中，我们使用的刚度为割线刚度，具体定义为  $K = \frac{\text{Torque}@1^\circ}{1^\circ}$ 。对于 S<sup>2</sup>worm 中的传动机构，抬升运动和扭转运动的刚度计算结果分别为  $K_{Lift}^{S^2 worm} = 0.31 N \cdot mm/^\circ$ ,  $K_{Twist}^{S^2 worm} = 0.05 N \cdot mm/^\circ$ 。对于 S<sup>2</sup>worm-G 中的传动机构抬升运动和扭转运动的刚度计算结果分别为  $K_{Lift}^{S^2 worm-G} = 2.14 N \cdot mm/^\circ$ ,  $K_{Twist}^{S^2 worm-G} = 0.53 N \cdot mm/^\circ$ 。比较计算结果可以发现，当前版本的抬升运动刚度是之前的七倍，扭转运动的刚度是之前的十倍。这说明了新的传动机构具有更高的刚度，二自由度折纸传动机构的奇异性可以通过 GCA 分析指导 SCM 设计的方法被有效的解决。

### 3.6.2 压电陶瓷驱动器性能测试

双堆叠压电陶瓷驱动器产生的变形通过陶瓷堆叠尖端输出到传动机构。氧化铝陶瓷 extension 连接到 SCM 结构的曲柄滑块机构上带动输入连杆的摆动。我们通过自制的

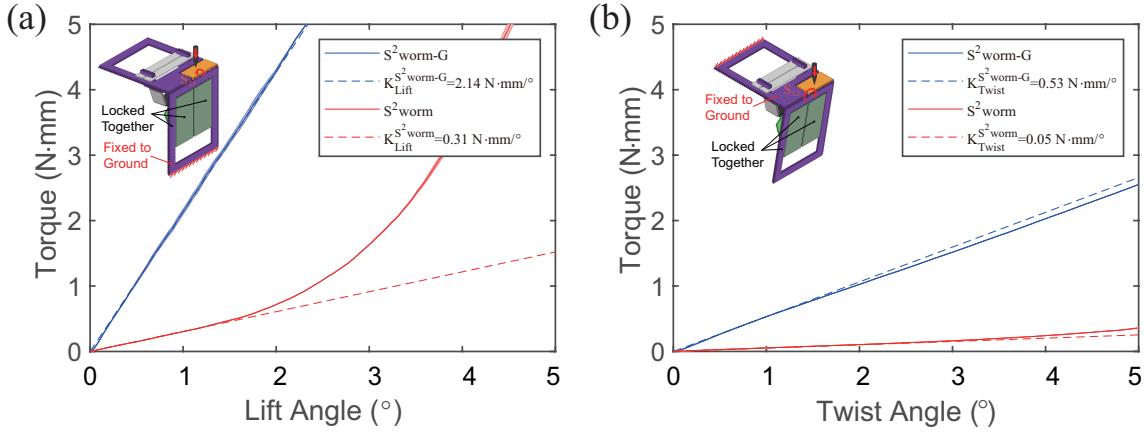


图 3.12 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 的结构刚度测试。 (a) 抬升运动。 (b) 扭转运动

高压放大器将锂电池的 3.7V 电压抬升到 200V 左右以驱动压电陶瓷。驱动器的末端变形通过激光传感器 (KEYENCE, LK-G10) 进行测量，驱动器受到的电压信号由示波器 (Tektronix, MDO 34) 进行记录。

驱动器末端变形和驱动信号的关系如图 3.13 所示。这里的驱动信号定义来自方程 (3-15):  $V_{drive} = V_{bias} - 2V_{out}$ 。测试电压 (实际上是高压放大器的 flyback converters 输出的电压  $V_{bias}$ ) 设置为 160 V、180 V、200 V 和 220 V, 频率测试范围从 10 Hz 到 150 Hz。图 3.13(a) 中记录了驱动器的末端变形。

由于改进后的高压放大器具有反馈功能，即便在较高的频率下方波波形也可以保持相对较为完整，驱动器的末端变形量也没有较为明显下降。在 S<sup>2</sup>worm 中，受限于高压放大器的负载能力，高频高压驱动时方波的波形会失真。在 S<sup>2</sup>worm-G 中，虽然输出信号的电压没有明显下降，但是高频高压下自制电子元器件的功率限制依然存在，图 3.13 (b) 展示了驱动信号在 140 Hz 和 150 Hz, 200 V 和 220 V 时的纹波现象，由于此时高压放大器的负载很高，高输出的高电平信号并不稳定。

驱动器加载电压和驱动器末端变形之间的相位差会随着驱动频率的变化而改变。在频率相对较低时 (图 3.13 (c)), 驱动器末端变形的上升沿和驱动信号的上升沿几乎是同步的。但是随着驱动频率的增加，在 200V-100Hz 时 (图 3.13 (d)), 驱动器末端变形的上升沿相对于驱动信号的上升沿会产生一个大约 1.6 ms 的迟滞，这个时间占到一个驱动信号方波周期的 16%。

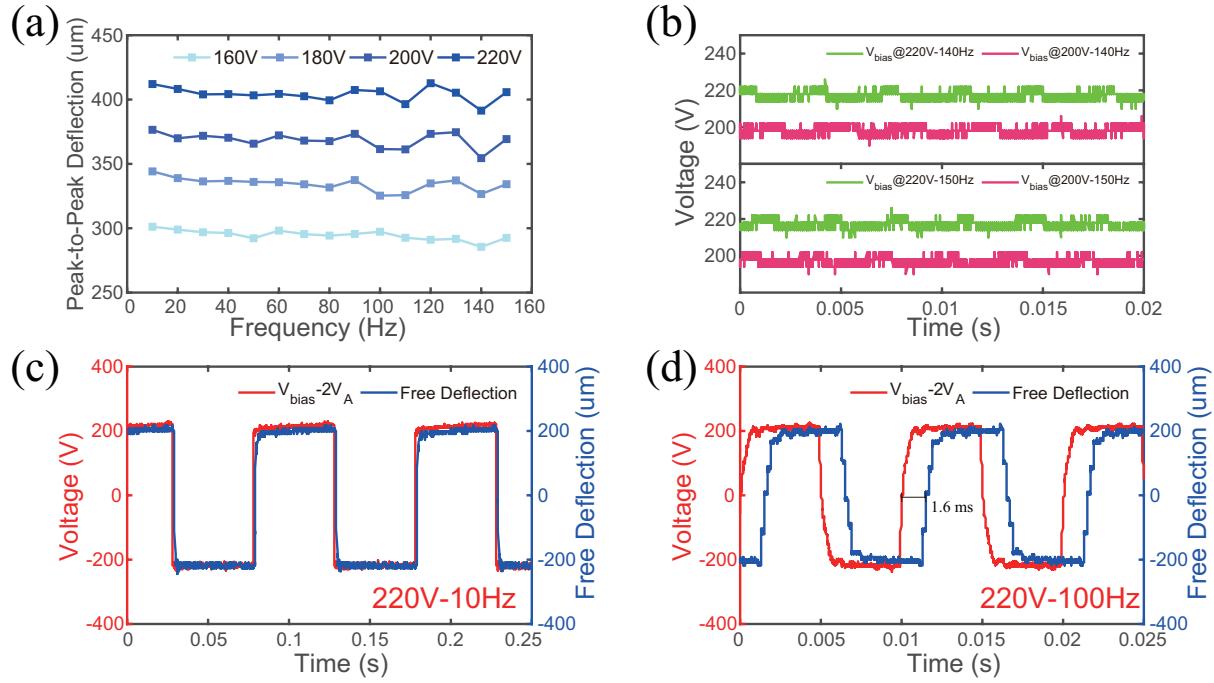


图 3.13 (a) 压电陶瓷驱动器末端变形量与驱动信号的电压和频率之间的关系。(b) 当电压值设定为 200V 和 220V, 频率设定为 140Hz 和 150Hz 时候, 高压信号的纹波现象。此时自制高压放大器的负载过高, 所产生的方波信号的低频时相比波形会发生变形。(c) 200 V-10 Hz 时候驱动信号的波形和驱动器末端变形。此时驱动信号和驱动器变形的上升沿几乎是同步的。(d) 200 V-100 Hz 时候驱动信号的波形和驱动器末端变形。此时驱动器变形的上升沿比驱动信号的上升沿要慢 1.6 ms。

### 3.6.3 S<sup>2</sup>worm-G 前进能力测试

我们测量了 S<sup>2</sup>worm-G 机器人的速度。测试表面为氧化铝板, 机器人与表面之间的动摩擦系数为 0.4。测试使用的驱动信号的电压范围为 160 V 至 220 V, 频率范围为 80 Hz 至 120 Hz, 在这个测试信号范围之外机器人无法进行稳定的前进运动。每个测试驱动信号下机器人的最高速度结果均在图 3.14(a) 中给出。所有速度数据均是通过选取机器人速度稳定后 (没有明显加速过程) 一段 10 cm 的路程进行计算得出结果。

当驱动信号低于 200V 时, 机器人的最高速度出现在 100Hz, 在 200V-100Hz 时候机器人的最高速度达到 55.6 cm/s (13.9 BL/s)。当驱动信号高于 200V 时, 机器人的最高速度出现在 90Hz, 在 220V-90Hz 时候机器人的最高速度达到 75.0 cm/s (18.8 BL/s)。和 S<sup>2</sup>worm 相比, S<sup>2</sup>worm-G 的最高速度达到了之前的 2.7 倍, 可以证明解决了抬升运动的奇异性极大地提高了机器人的运动能力。

上述速度测试中, 为了保证机器人的前进运动方向, 我们使用积木搭建了一个较窄的轨道。在没有轨道约束的情况下, 机器人会由于机械制造和驱动中轻微的不对称而导

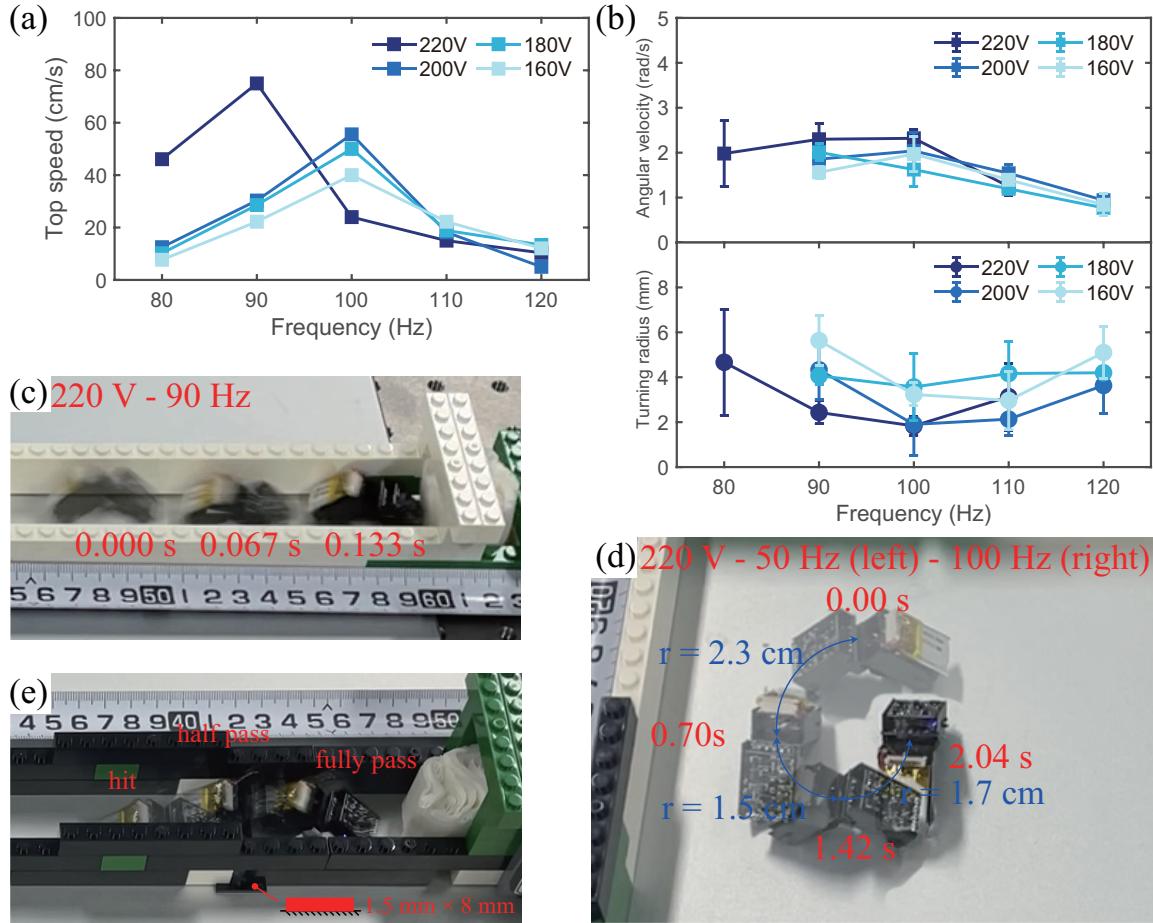


图 3.14 (a) S<sup>2</sup>worm-G 的速度测试结果。最高速度为 75 cm/s，驱动信号参数为 220V-90Hz。(b) S<sup>2</sup>worm-G 的转弯测试结果。最高转弯角速度和最小转弯半径均发生在 220 V-50 Hz-100 Hz。X 轴表示双堆叠压电陶瓷驱动器右侧堆叠的驱动频率，左侧堆叠的驱动频率始终保持为右侧堆叠频率的一半。(c) S<sup>2</sup>worm-G 以 75.0 cm/s 前进的视频照片。(d) S<sup>2</sup>worm-G 以 2.32 rad/s 转弯的视频照片。(e) S<sup>2</sup>worm-G 攀爬 1.5 mm × 8 mm 障碍物的快照。

致向一个固定的方向偏移。为了在没有轨道约束的情况下保持机器人的方向，可以通过调节双堆叠压电陶瓷驱动器左右路的信号来进行调整。我们通过改变两路驱动信号的占空比（220V-90Hz，占空比：左 50%，右 43%），实现了机器人相对笔直的运动轨迹，但是机器人的速度会下降。

### 3.6.4 S<sup>2</sup>worm-G 转弯能力测试

昆虫尺度机器人在执行巡航和探索任务时需要具有良好的转弯能力。二自由度折纸传动机构可以通过异步驱动两个肌肉支链来实现转弯。S<sup>2</sup>worm-G 的转弯功能依然是通过给双堆叠压电陶瓷驱动器的两个陶瓷堆叠施加电压相同但频率不同的驱动信号实现的。具体来说，如果我们想让机器人向左转，假设右侧堆叠的驱动频率为  $f_0$ ，则左

侧堆叠的频率为  $\frac{f_0}{2}$ 。本节中，我们采用了这种方法实现转弯并记录了转弯半径和所需时间，以计算机器人转弯的角速度和转弯速度。驱动器右侧堆叠的频率范围从 80 Hz 到 120 Hz。左侧堆叠的驱动频率设置为右侧的一半，即从 40 Hz 到 60 Hz。驱动电压范围设置为 160 V 到 220 V。角速度和转弯半径记录在图 3.14(b) 中，图中的 X 轴的频率对应右侧堆叠的驱动频率。

结果表明，对于 200 V 以下的所有驱动电压，机器人几乎无法在 40 Hz 到 80 Hz 的频率范围内执行转弯动作。但是在更高的驱动频率组合下，机器人可以顺利地进行转弯，唯一一组不能实现转弯的信号组合是 220 V-60 Hz-120 Hz。实验结果表明，机器人的最高角速度为 2.32 rad/s 和最小转弯半径 1.8 cm 均对应着驱动信号 220 V-50 Hz-100 Hz (图 3.14(d))。

转弯速度定义为：角速度  $\times$  转向半径。最高的转弯速度为  $1.98 \text{ rad/s} \times 4.7 \text{ cm} = 9.3 \text{ cm/s}$ ，对应的驱动信号为 220 V-40 Hz-80 Hz。与 S<sup>2</sup>worm 相比 ( $\sim 1.2 \text{ cm/s}$ )，S<sup>2</sup>worm-G 的转弯速度提高了 7.7 倍，可以证明解决了扭转运动的奇异性极大地提高了机器人的转弯运动能力。

### 3.6.5 S<sup>2</sup>worm-G 地形适应性测试

良好的适应性允许微型机器人在不同环境和地形下工作。本小节中我们通过两个测试来衡量 S<sup>2</sup>worm-G 的适应性：1. 不同基底上的速度测试；2. 障碍攀爬测试。

**表 3.8 S<sup>2</sup>worm-G 在不同基底上的适应性测试。**

基底	电压 (V)	频率 (Hz)	速度 (cm/s)	相对速度 (bl/s)
纸张	220	80	54.6	13.7
	220	90	42.9	10.7
皮革	200	80	59.8	15.0
	220	80	33.3	8.3
橡胶	200	80	50.0	12.5
	220	80	41.2	10.3

测试所选择的基底为纸张、皮革和橡胶。S<sup>2</sup>worm-G 可以在这些基底执行前进运动。最大速度及其对应的测试参数列在表 3.8 中。这项测试结果证明 S<sup>2</sup>worm-G 可以在多种基底上进行高速 ( $\geq 50 \text{ cm/s}$ ,  $12.5 \text{ bl/s}$ ) 前进运动。但是与铝板相比，这些基底上机器

人可操作频率范围较小。例如，机器人在所有基底的速度在超过 100 Hz 后都急剧下降。我们认为这是由于基底相对柔软，机器人更容易附着在这些基底上。另一个可能的原因是柔软的基底会降低机器人在前进过程中的推进力。

在障碍攀爬测试中，所使用的障碍物为宽度相同（8 mm）但高度不同的碳纤维板。驱动信号设置为 220 V-90 Hz。当障碍物高度低于 0.2 mm 时，机器人会跳过障碍物而不发生碰撞。当障碍物高于 0.2 mm 时，机器人开始和障碍物发生碰撞，机器人在经过几个周期碰撞后会爬上并越过障碍物。攀爬障碍物的过程分为三步：首先，机器人的前部撞上障碍物；在多次撞击后，机器人的前部攀上障碍物；最后机器人的后部也越过障碍物。实验结果表明机器人可以攀爬的障碍物高度最高为 1.5 mm，相当于机器人自身高度的 7.6%。障碍攀爬测试的过程如图 3.14(e) 所示。

### 3.6.6 S<sup>2</sup>worm-G 能耗测试

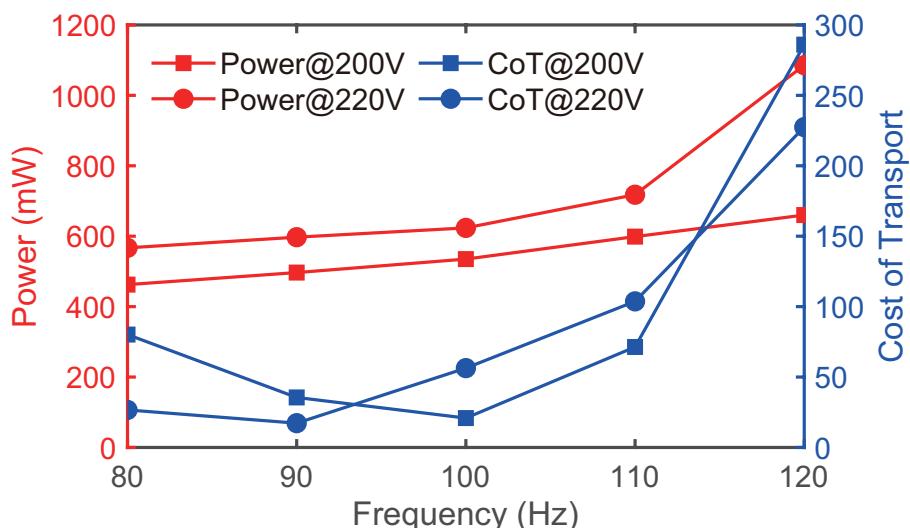


图 3.15 S<sup>2</sup>worm-G 的能耗表征。红色线：消耗功率与驱动频率之间的关系。蓝色线：CoT 与频率之间的关系。

表 3.9 S<sup>2</sup>worm-G 的能耗和 CoT。

电压 (V)	频率 (Hz)	速度 (cm/s)	功率 (mW)	Cost of Transport
220	90	75.0	597.2	17.3 (lowest)
200	100	55.6	535.0	20.9
220	80	46.1	566.9	26.7

微型机器人的能耗指标可以通过 Cost of transport (CoT) 来衡量。该指标的定义为

$\text{CoT} = \frac{\text{Power}}{\text{Speed} \times \text{Mass} \times g}$ , 其中  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  代表重力加速度。该定义考虑了机器人的质量, 是一个无量纲指标。CoT 越低表示机器人的相对能耗越低。我们测量了 S<sup>2</sup>worm-G 样机在驱动电压为 200V 至 220V, 驱动频率在 80Hz 至 120Hz 范围内的消耗功率, 基于消耗功率计算的 CoT 结果绘制在图 3.15。图中的曲线说明机器人的 CoT 和样机的运动速度相关性高于和消耗功率的相关性。随着驱动频率的增加, 虽然功率逐渐增加, 但是由于机器人的速度增加的更多, CoT 的计算结果反而逐渐降低。最低的 CoT 对应于机器人速度的最大值, 此时的驱动信号分别是 200 V 100 Hz 和 220 V 90 Hz。我们选择了一些相对较低的 CoT 结果罗列在表 3.9 中。

### 3.6.7 测试结果讨论

图 3.16 比较了 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 与一些相近尺度的机器人和昆虫的性能。我们使用 St.Pierre<sup>[103]</sup>提出的指标衡量了这些昆虫和机器人的设计水平和运动能力, 分别是: 自动化得分、绝对速度、相对速度和 CoT。自动化得分最高为三分, 具有机载电源、控制器、传感器中的任意一项为一分, 三项均具有为三分。所有昆虫的自动化得分都是 3。用于进行比较的昆虫数据来自 Jensen<sup>[199]</sup>、Lighton<sup>[200]</sup>、Full<sup>[201]</sup>、Fewell<sup>[202]</sup>、Lipp<sup>[203]</sup>、Reinhardt<sup>[204]</sup>等人的研究。

表 3.10 包含了同尺度机器人的性能数据。可以发现, 从速度指标和相对速度指标上看, S<sup>2</sup>worm-G 是最快的昆虫尺度微型机器人之一。在目前所有已发表的无系留昆虫尺度微型机器人中, S<sup>2</sup>worm-G 具有最高的相对速度。其能耗指标 CoT 也处于和昆虫相当的级别。

HAMR 系列机器人一直被认为是昆虫尺度微型机器人最优秀的研究项目, 其历代样机设计展现出来极高的运动能力<sup>[18]</sup>和自动化水平<sup>[21]</sup>。HAMR 系列拓展了 SCM 技术和一系列微型机器人设计制造技术, 大量微型机器人项目都受到了 HAMR 项目的启发。本章中提出的 S<sup>2</sup>worm-G 作为 S<sup>2</sup>worm 项目的第二代研究成果, 通过 GCA 分析优化了传动机构, 极大地提升了机器人的运动能力。通过提出的新型微型机器人设计方法, 即基于 GCA 分析指导设计的 SCM 结构, S<sup>2</sup>worm-G 具有极高的运动速度 (75 cm/s, 18.8 BL/s)、完善的自动化设计 (无系留, 机载的电池和控制器) 和极低的能量消耗 ( $\text{CoT} = 17.3$ ), 可以认为 S<sup>2</sup>worm-G 是昆虫尺度微型机器人领域性能最强的样机之一。

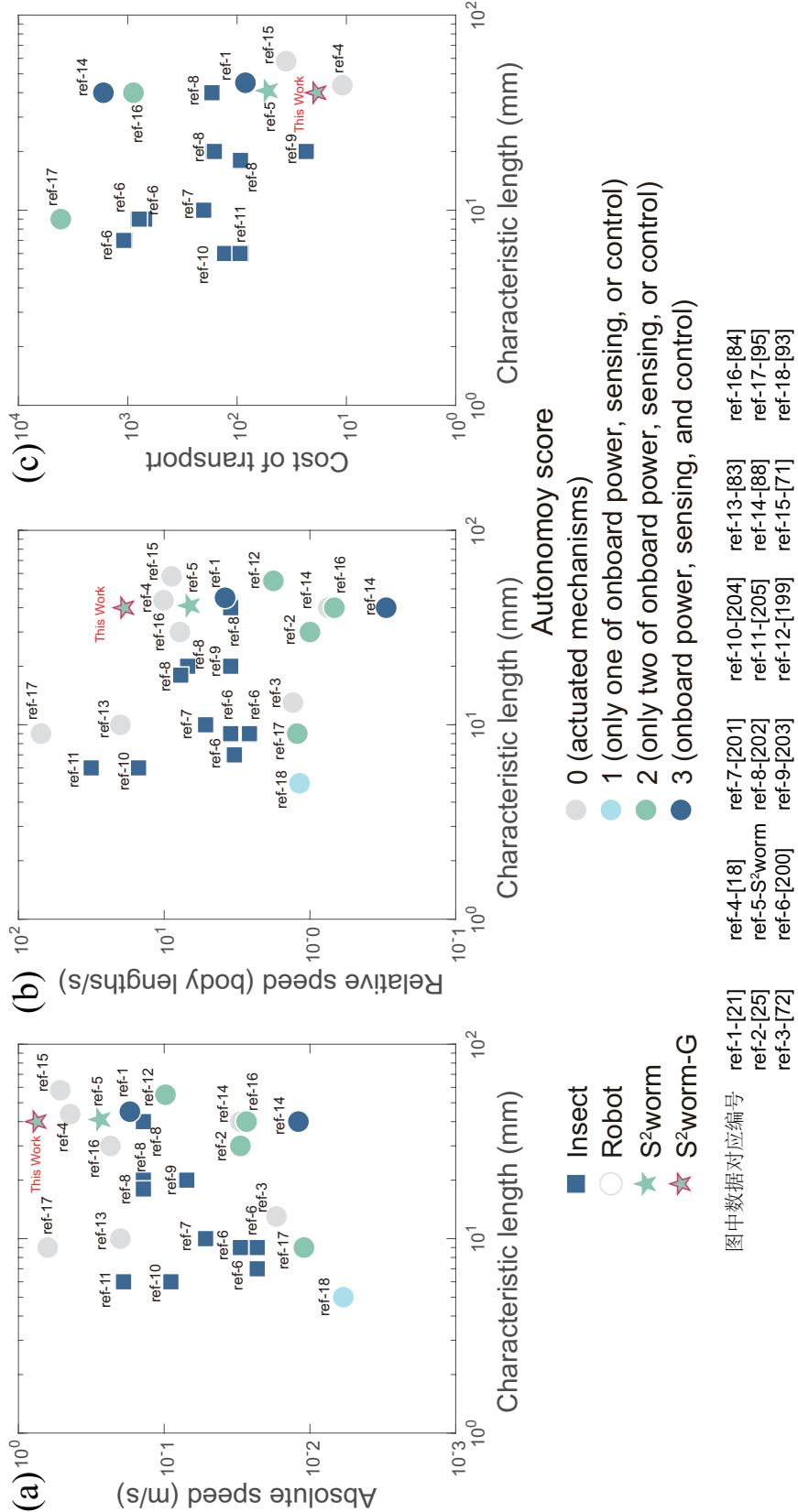


图 3.16 S<sup>2</sup>worm-G 和一些微型机器人及昆虫的性能比较。(a) 绝对速度。(b) 相对速度。(c) 能量消耗 CoT。

表 3.10 S<sup>2</sup>worm、S<sup>2</sup>worm-G 以及一些已发表的微型机器人的性能参数。

	名称	尺寸 (cm)	质量 (g)	速度 (cm/s)	相对速度 (bl/s)	Cost of Transport
系留	SMALLBug <sup>[72]</sup>	1.3	0.03	1.7	1.3	None
	HAMR-VP <sup>[18]</sup>	4.37	1.27	44.2	10.1	11.1
	Wu et al <sup>[83]</sup>	1	0.024	20	20	None
	DEAnsect <sup>[88]</sup>	4	0.19	3	0.75	None
	Liu et al <sup>[71]</sup>	5.8	42.55	51.6	8.9	35.6
	Liang et al <sup>[84]</sup>	3	0.065	23.43	7.81	None
	SEMR TST <sup>[92]</sup>	0.9	0.17	63	70	None
无系留	HAMR-F <sup>[21]</sup>	4.5	2.8	17.2	3.8	83.9
	RoACH <sup>[25]</sup>	3	2.4	3	1	None
	MinRAR V2 <sup>[205]</sup>	5.5	28	9.8	1.8	None
	DEAnsect <sup>[88]</sup>	4	0.97	1.2	0.3	1670
	Liang et al <sup>[84]</sup>	2.4	1.68	2.88	1.2	887
	Zhu et al <sup>[91]</sup>	0.5	0.0464	0.59	1.18	221.9
	SEMR UL <sup>[92]</sup>	0.9	0.71	1.1	1.2	4100
	S <sup>2</sup> worm	4.1	4.34	27.4	6.7	52.4
	S <sup>2</sup> worm-G	4.0	4.71	75.0	18.8	17.3

### 3.7 本章小结

本章中，我们提出一种新型微型机器人设计方法，即使用 Grassmann-Cayley Algebra 分析传动机构奇异性并指导 SCM 结构的制造。本章对微型机器人研究的贡献有：

- 首次报道微型机器人折纸传动机构的奇异性问题，并证明传动机构奇异性是限制微型机器人运动能力的重要因素之一。
- 论证将 SCM 结构视作刚体系统进行奇异性分析的合理性。
- 提出一套完整的奇异性分析并指导 SCM 结构的设计过程。
- 一款高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G。

所提出的无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G 长度 4.0 cm，质量 4.71 g。由于搭载了优化的二自由度传动机构，机器人的最高速度可以达到 75.0 cm/s（相对速度 18.8 BL/s）。机器人的转弯角速度最高可达 2.32 rad/s，最小转弯半径为 1.8 cm，最高转弯速度 9.3 cm/s。实验结果证明了 S<sup>2</sup>worm-G 具有极高的运动能力、自动化水平和能耗效率。在无系留微型机器人领域，S<sup>2</sup>worm-G 具有最高的绝对速度和相对速度，并且还表现出良好的地形适应性和越障能力。

据我们所知，我们首次报道了昆虫尺度微型机器人的传动机构的奇异性问题，首次使用 GCA 对昆虫尺度微型机器人的折纸传动机构进行分析并解决了奇异性问题。我们证明了 GCA 可以用于分析和指导微型机器人折纸传动机构的设计过程。上一章中我们使用旋量理论和构型综合方法设计了一种新型的微型机器人传动机构，这一章中我们提出一种新的基于 GCA 的传动机构设计优化方法。我们证明了所提出的这套设计流程可以很好的指导 SCM 结构的设计和制造过程。

本文的研究目标是构造一个由微型机器人组成的仿生组装机器人系统，本章提出的 S<sup>2</sup>worm-G 可以作为该系统的组成单元。关于仿生组装机器人系统的具体概念和相关研究将在下一章中详细介绍。

## 4 微型仿生组装机器人系统及其仿生控制架构

本章的研究目标是构建一个由爬行机器人作为模块的可组装多机器人系统，该系统可以由虫群的形态组装成四足机器人形态，我们将其命名为仿生组装机器人系统，也叫 BioARS。本章第一节介绍了 BioARS 概念，用一些 3D 打印的机器人验证系统的可行性，并提出了构建系统需要解决的几个主要问题。第二节中，提出一个适用于 BioARS 四足形态运动控制的仿生运动控制架构，该控制架构的核心是一个基于计算神经学和对称性动力系统的八元神经网络。在第二节最后，介绍了 S<sup>2</sup>worm 组成的 BioARS-II 系统及其仿生运动控制架构。

### 4.1 仿生组装机器人系统 BioARS

#### 4.1.1 前言

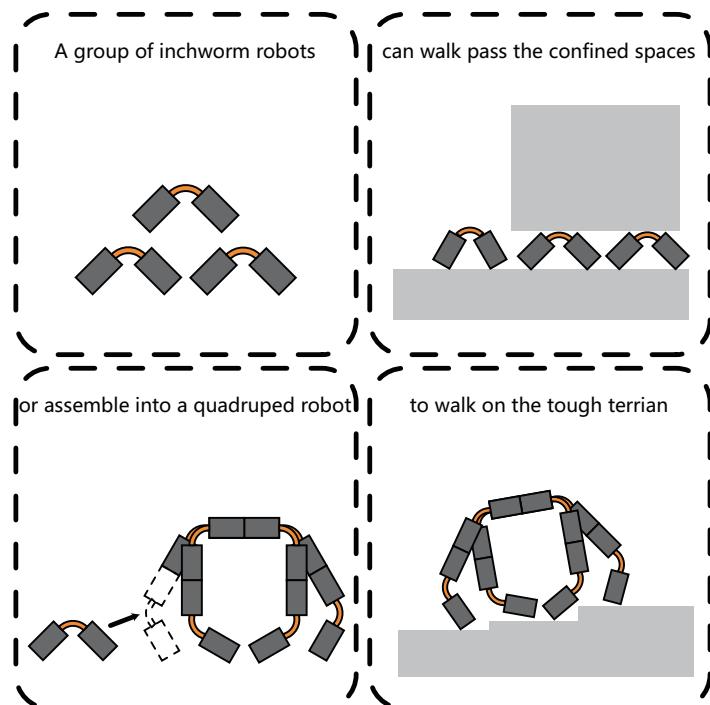


图 4.1 仿生组装机器人系统 (Bionic Assembly Robotic System, BioARS) 的设计理念。这个该系统是一群灵活的小型爬行机器人，能够以虫群的形态穿越狭小的空间。在崎岖的地形下，该系统可以组装成四足机器人，每个爬行机器人都形成四足机器人某个关节。由于系统兼具虫群和四足形态，因而具有更好的地形适应性。

仿生机器人的模仿对象涵盖小尺度的昆虫（如尺蠖<sup>[175]</sup>、蜜蜂<sup>[4]</sup>和蟑螂<sup>[18][206]</sup>）到大型哺乳动物（如狗<sup>[207]</sup>和人<sup>[208]</sup>）。其中，模仿尺蠖等爬行昆虫的机器人具有体积小、运动敏捷等特点<sup>[175][209][210]</sup>。尺蠖的爬行运动是通过弯曲折叠身体，利用身体的前后两段和地面产生的对称的静摩擦力来产生推进，这种驱动方式十分简单，但也导致了尺蠖的攀爬能力不足，地形适应能力较弱。陆生脊椎动物等四足动物是陆地上最具地形适应性的动物。四足机器人具有很高的适应性，可以在不同地形上移动<sup>[153][154][207]</sup>。然而，现有的仿生机器人系统大多仍不具有适应多种环境的能力。例如，昆虫机器人可以通过狭窄的空间而不能在崎岖的地面上行走，四足机器人反之。

模块化和可重构机器人系统是机器人领域的又一重要研究内容，刚性机器人和柔性机器人领域都有相关研究，且研究对象的尺度范围较广。这类系统都在模块化机器人系统或机器人集群的基础上，为系统赋予更多功能<sup>[211][212][213]</sup>。这类机器人系统通常由大量相同的机器人模块组成，类似于组成晶体的原子。这些系统中的模块可以自主移动以改变系统的形态，在面对不同任务时系统可以组装和重构<sup>[109][117][119][212]</sup>。软体可组装机器人系统的组装模块主要由软材料构成<sup>[213]</sup>。与刚性可组装机器人系统模块不同，它们通常由统一的泵驱动，模块的组装过程需要手动连接。还有一类模仿生物组织的多机器人系统，这些模块通过弱耦合，模仿生物组织的迁移行为<sup>[214][215]</sup>。可组装和可重构机器人使得系统具有更好的解决复杂任务的能力，但是由于其模块需要满足组装、连接、通讯传感等功能，体积难以压缩，单个模块的运动能力较弱。

我们的目标是建立一个具有自组装能力的模块化仿生机器人系统。系统由类似尺蠖的爬行形机器人作为模块，可以组装成一个四足机器人。我们将该系统称为仿生组装机器人系统（**Bionic Assembly Robotic System**, BioARS）（如图4.1所示）。BioARS 系统结合了爬行机器人群和四足机器人的环境适应性特点。在组装状态下，能够以虫群的形态穿越狭小的空间。在崎岖的地形下，该系统可以组装成四足机器人以实现行走和攀爬功能。由于系统兼具虫群和四足形态，因而具有更好的地形适应性。这对于完成复杂任务（如行星探测）是有益的。例如，可以将一群爬行机器人播撒在星球表面先探索相对平坦的区域，然后，多个爬行机器人组装成四足机器人，以搜索崎岖的区域或搬运较重的土壤样本。

在我们的设计中，组装后的四足机器人包含八只爬行机器人作为膝关节和髋关节。我们之所以选择爬行机器人作为组装机器人系统的模块是因为：

1. 结构简单，设计制造过程简便；
2. 爬行机器人体积小，灵活性高；
3. 爬行机器人的弯曲运动和腿足式机器人的关节弯曲运动类似。

与 Sambot<sup>[211]</sup>和 Fable<sup>[212]</sup>等同样可以组装成四足形态的多机器人系统相比，BioARS 的模块更简单，其设计和运动模式更像接近尺蠖而不是块体或棒体。由于模块质量轻，BioARS 的形态可以在每条腿中包含比 Sambot 和 Fable 更多的模块（Sambot 和 Fable: 1, BioARS: 2），因此具有更大的机动性。BioARS 爬行机器人模块的头部、尾部和侧翼均嵌入了 NdFeB（钕铁硼）磁铁作为磁连接关节。在 BioARS 的四足机器人形态中，两个爬行机器人连接成一条腿，连接到一个十字形的机器人躯干上。

不同的物种具有不同的环境适应能力。在自然界中，一个物种进化到另一个物种需要数万年。然而在 BioARS 系统中，爬行机器人模块在几秒内就可以组装成四足机器人。该系统集成了爬行机器人的虫群形态和组装后的四足形态，系统的体积大小，质量轻重可以随着系统的组装和解体不断切换。由于 BioARS 系统兼具狭小空间和崎岖地面等多种地形适应性，这种系统在地外勘探和地震搜救等场景具有较大的应用潜力。

本文的目标是提出一种昆虫尺度的 BioARS 系统，以前两章提出的昆虫尺度高速爬行机器人 S<sup>2</sup>worm 作为模块。由于以昆虫尺度机器人作为研究平台有一定难度，因此本节首先提出一个基于 3D 打印的 BioARS 系统以演示和验证系统的设计概念。

#### 4.1.2 系统架构

BioARS 系统中的组成模块是爬行机器人。该模块具有机载的电源和控制器，可以无系留运动。在磁连接方案中，我们使用“shoulder-to-shoulder”的连接方式来提高磁连接关节的强度。组装后的形态是四足机器人，由八只爬行机器人模块和一个嵌入磁铁的 3D 打印躯干组成。我们提出了一个多级控制架构以实现组装四足机器人的步态控制。

图片 4.2(a) 和 (b) 分别是爬行机器人的样机照片和 CAD 模型。爬行机器人的机身为两个 3D 打印的脚，通过一个弹簧片连接。所使用的 3D 打印材料为树脂，打印设备为 Object 260 Connex 3 (Stratasys 公司)。弹簧片所使用的材料为高弹性锰钢片。每个脚都安装有一个舵机，舵机的舵臂和另一只脚之间用缆线连接。舵机的驱动信号来自爬行机器人的机载控制器，能源来自机载的一颗 3.7 V 锂电池。

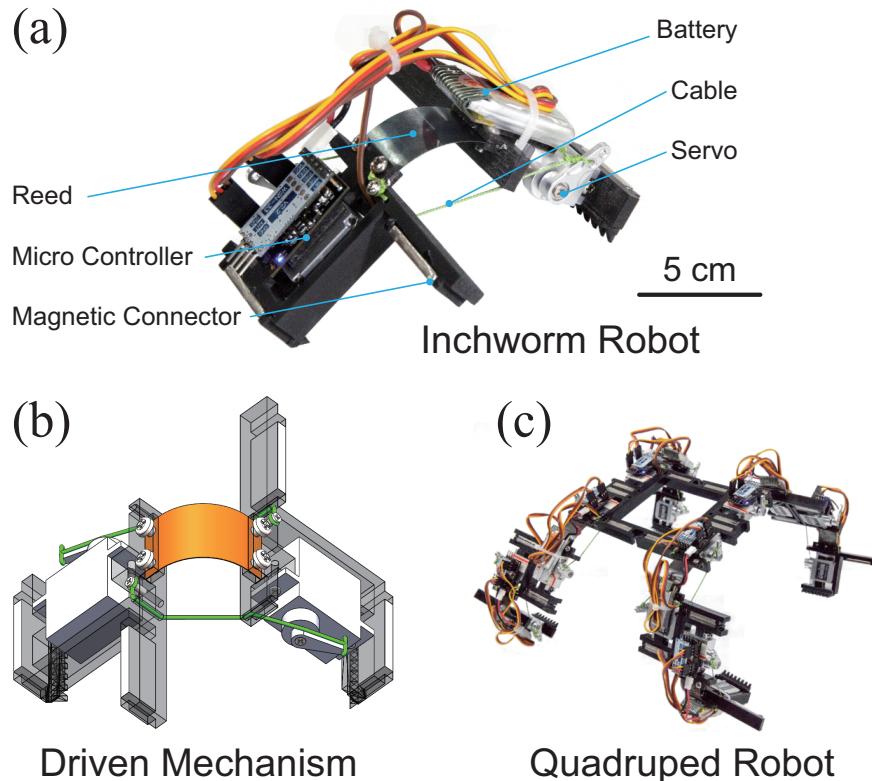


图 4.2 (a) 爬行机器人样机。(b) 爬行机器人的 CAD 模型，机器人由两个舵机驱动两根缆线实现机器人的前进和转弯。(c) 组装后四足机器人样机。

爬行机器人的驱动系统由上述的两个舵机、缆线和簧片组成。当两个舵机同时旋转，拉动缆线会导致弹簧片弯曲，使得机器人发生弯曲的动作，弹簧片会储存弹性能量。当两个舵机恢复到原来的位置时，会释放缆线，同时弹簧片释放弹性能量，使得机器人觉得弯曲动作恢复，如此往复。3D 打印脚上的倒勾结构可以产生非对称摩擦力，将机器人的弯曲动作转化为前进动作。当两个舵机均往复旋转时，机器人向前运动，当只有两个舵机非对称的往复旋转时，机器人发生转弯运动。

为组装机器人系统设计连接关节时，需要考虑几何尺寸、重量、连接力、易用性和其他因素。商用钕铁硼磁具有重量轻、体积小、磁力强的优点，是最常用的磁连接材料。并且，磁连接关节在足够接近时候，可以相互吸引自动定对准吸附在一起，不需要手动组装或辅助定向，这可以为组装过程带来便利。在本章的 BioARS 系统的爬行机器人模块中使用的磁铁的重量约为 5.6g，几何尺寸为 25mm×10mm×3mm。一个爬行机器人安装有四个磁铁，两个在脚的末端，两个在侧翼。

这里要特别描述在 BioARS 中应用的连接方案，我们称之为“shoulder-to-shoulder”(图4.3)。与我们称之为“head-to-head”的传统磁连接方式相比，“shoulder-to-shoulder”可以显著

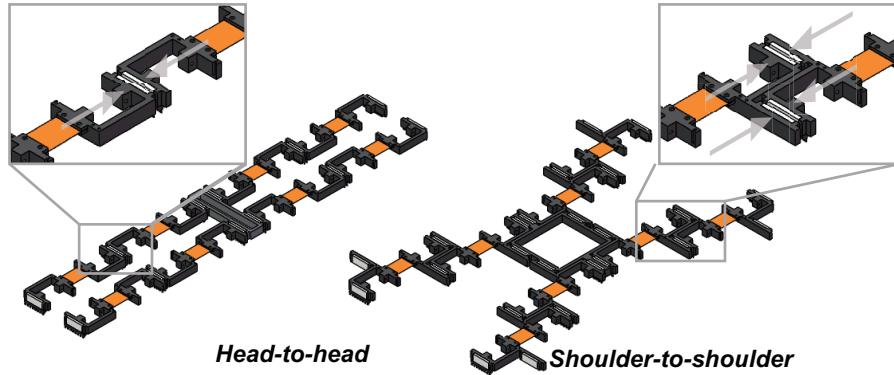


图 4.3 两种磁连接方式“head-to-head”与“shoulder-to-shoulder”的示意图。

提高连接力矩。此外，它可以缩短四足机器人站立时的阻力使四足机器人的结构更紧凑。在第4.1.3节，我们提供了两种连接方案的实验对比。

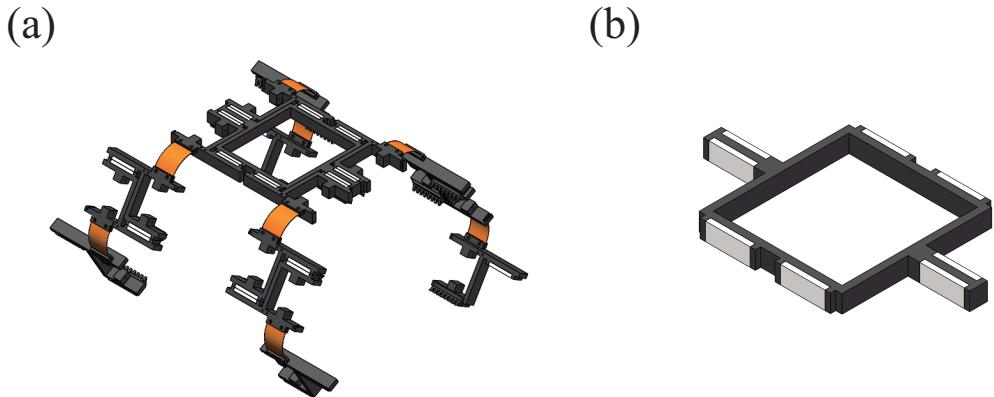


图 4.4 (a) 组装后四足机器人站立形态示意图。(b) 用于组装的躯体模块模型。

图4.3显示了以“shoulder-to-shoulder”完成组装的四足机器人未站立时趴在地上姿態。图4.2(c)和图4.4(a)是四足机器人站立的姿態。站立的四足机器人呈现“X”形宽 0.308 米，长 0.230 米，高 0.156 米，躯干为十字形刚性 3D 打印零件。躯干上嵌入由八个 NdFeB 磁铁作为磁连接关节（图4.4(b)）。四足机器人总重量为 0.8 千克。

组装和站立过程的各个阶段如图 4.5 所示。首先，八个爬行机器依次连接到躯体上（在实验中，所有爬行机器人的连接过程都受到遥控）。完成连接后，由上位机给所有爬行机器人的机载控制器发送待机命令，所有爬行机器人都停止运动。作为小腿（膝关节）的四个爬行机器人先弯曲以缩短站立过程中的阻力臂，此时四足机器人的姿態称为预站立（pre-standing）。最后，四个作为大腿（髋关节）的爬行机器人开始弯曲，使得四足机器人完全站起来。

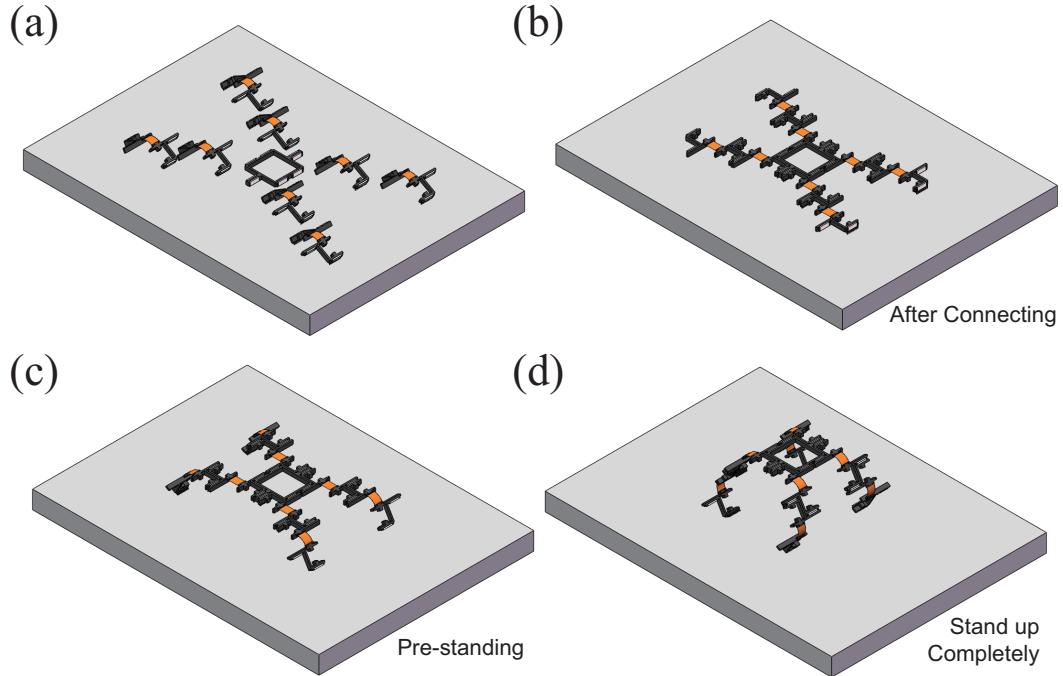


图 4.5 组装成四足形态的过程分解，首先所有爬行机器人模块聚集到驱动模块周围并相互连接 (a)-(b)。四个作为小腿（膝关节）的模块首先弯曲，四足机器人进入预站立状态 (c)，接着四个作为大腿（髋关节）的模块弯曲，四足机器人完全站起来 (d)。

由于四足机器人是由八个爬行机器人组装而成，爬行机器人各自有独立的控制器。因此对于四足动物机器人控制必须基于对爬行机器人的运动控制。这里我们用了一个上位机与八个爬行机器人的机载控制器通信以控制四足机器人的步态。

BioARS 的步态控制架构包括四个层级（图4.6）。第一层级是四足机器人的步态选择。在本节中，我们以 trot 步态为例。基于选定的步态，第二层级产生四足机器人每个关节的运动轨迹。对于 trot 步态，每个关节的运动轨迹如图4.7(c) 所示。然后上位机依据每个爬行机器人对应的关节将信号发送到爬行机器人的机载控制器（图4.7(b)）。第三层级为爬行机器人的机载控制器，在接受到关节运动信号后，爬行机器人的机载控制器根据关节旋转信号，产生驱动舵机的 PWM 信号，以确保整个四足机器人执行周期性 trot 步态。第四层级为机器人的舵机执行层。

### 4.1.3 系统表征测试

在这一小节，我们首先测量了爬行机器人模块的运动能力，包括机器人的速度和转弯半径。用照片的形式演示了 BioARS 的组装、站立和行走过程，并比较了系统两种形态的地形适应性。最后测量了磁连接关节的连接力，证明了“shoulder-to-shoulder”策略

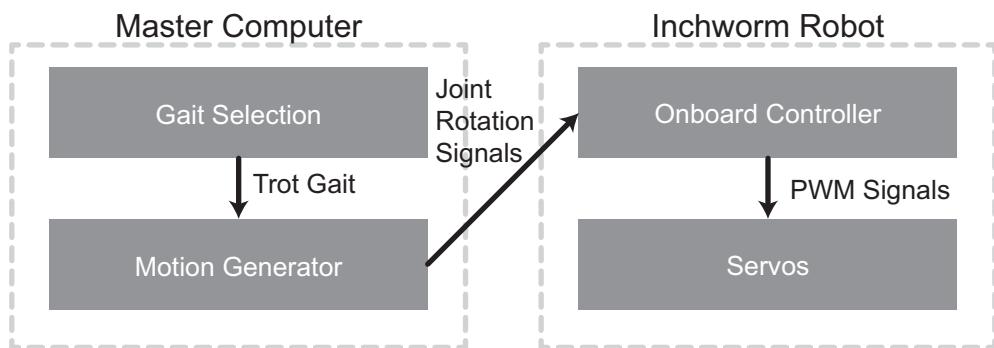


图 4.6 四足机器人的四级步态控制架构。第一级选择四足机器人的步态。第二级基于所选择的步态生成每个关节的旋转周期并将控制信号分别发送给对应的爬行机器人模块。第三级基于关节旋转信号生成驱动电机的 PWM 信号。最后一级是爬行机器人模块的舵机，执行收到的 PWM 信号。

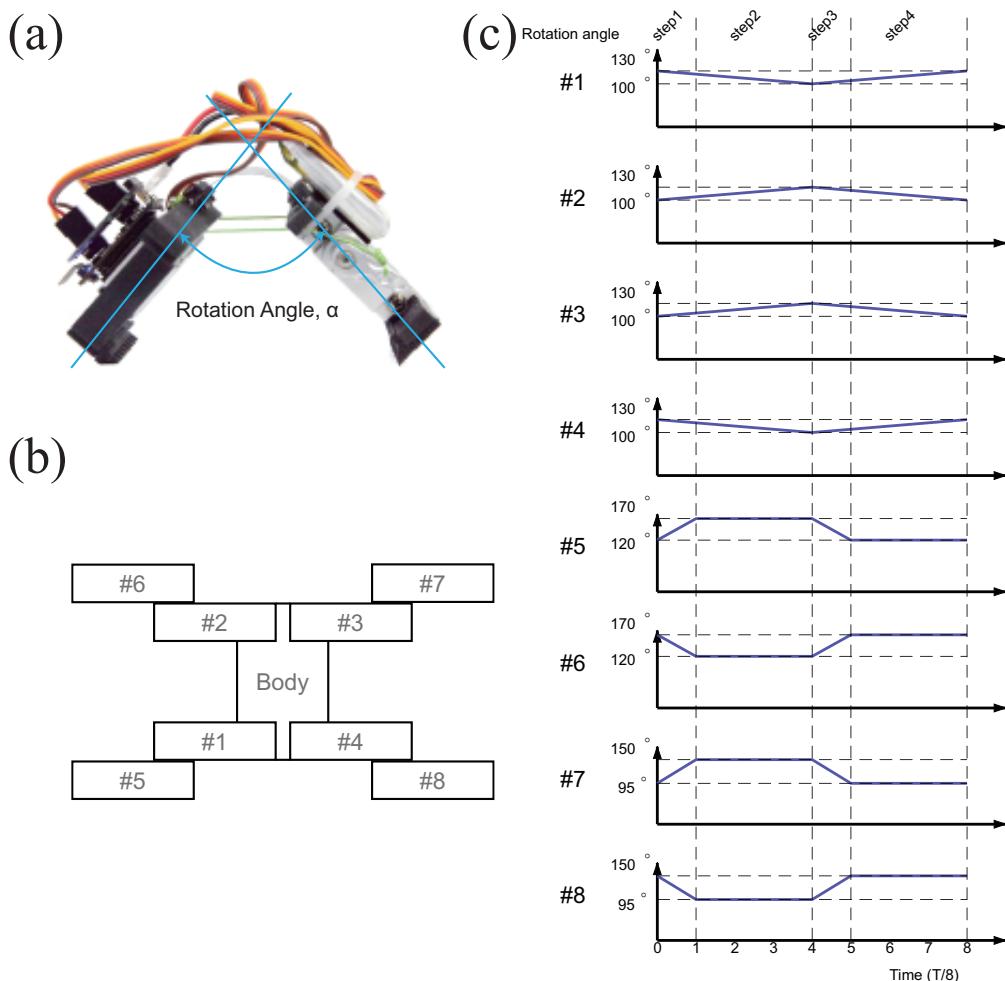


图 4.7 (a) 爬行机器人模块弯曲角度示意图。(b) 四足机器人中爬行机器人模块编号规则。(c) 执行 trot 步态时，八个爬行机器人模块弯曲角度时域图。

的优势。

在 BioARS 中，聚集和组装过程所需要的时间取决于模块的移动能力。测量爬行机器人运动能力时，为了尽可能的放大 3D 打印脚上的倒勾与地面间的摩擦力，我们使用一个尼龙布覆盖的平板作为测试平台。定义爬行机器人的弯曲动作范围在最小旋转角度  $\alpha_1$  和最大旋转角  $\alpha_2$  之间（图4.8(a)）。我们测试了几组参数，最大旋转角度  $\alpha_2$  设置为  $120^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $180^\circ$ 。运动频率  $f$  选择  $1\text{Hz}$  和  $2\text{Hz}$ 。最小旋转角度  $\alpha_1$  取值为  $90^\circ$ 。不同测试参数下，爬行机器人的速度记录在图4.8(b) 中。

我们接着测量了爬行机器人的转弯半径（图4.8(c)）。爬行机器人的直行是通过同时驱动两个舵机实现，在转向测试中，我们只驱动其中一个舵机来拉动缆线，因此机器人的弹簧片将不对称弯曲，使得机器人发生转向（图4.8(d)）。实验结果表明，爬行机器人的最小转弯半径为约  $80\text{cm}$ 。

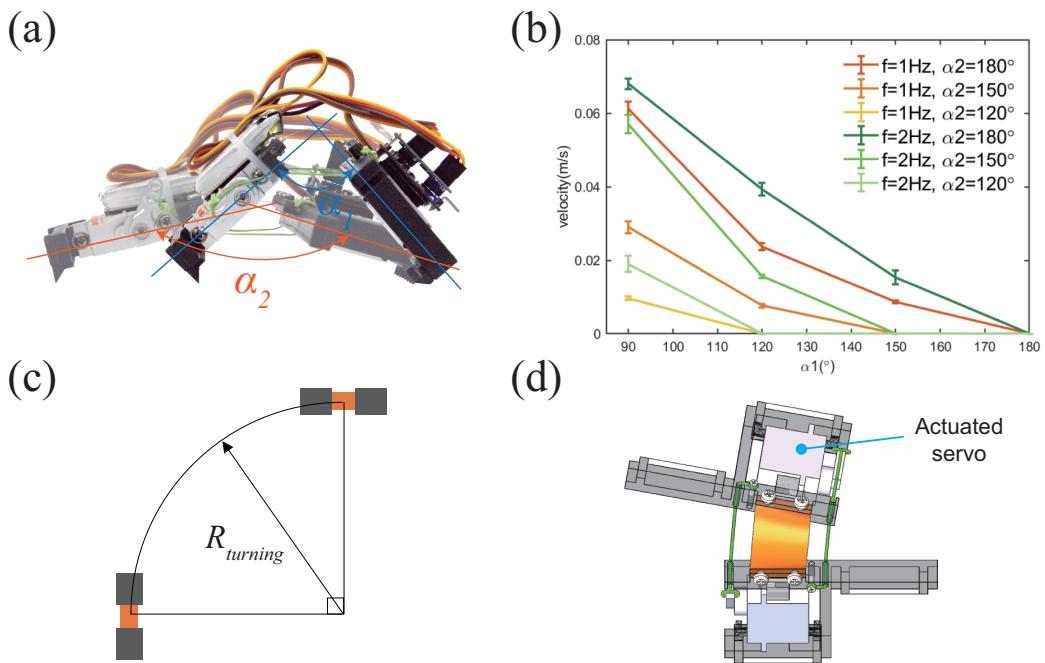


图 4.8 (a) 爬行机器人模块最小旋转角度  $\alpha_1$  和最大旋转角  $\alpha_2$ 。(b) 不同  $\alpha_1, \alpha_2$  和频率  $f$  下爬行机器人的速度。(c) 爬行机器人转弯半径示意图。(d) 爬行机器人转弯原理图。

我们用实验的视频截图来解释 BioARS 的工作过程（图4.9）。这个实验包括三个阶段：组装（手动放置和远程控制）、站立和行走。第一阶段中，八个爬行机器人聚集在躯干周围并按顺序连接。当磁连接关节足够靠近时（本实验中约为  $4\text{cm}$ ，和爬行机器人与地面的摩擦力相关），磁力会使得一对磁连接关节自动吸合在一起。由于这个连接过程具有自导向（Self-oriented）的特性，因此我们不需要很精确的遥控爬行机器人。

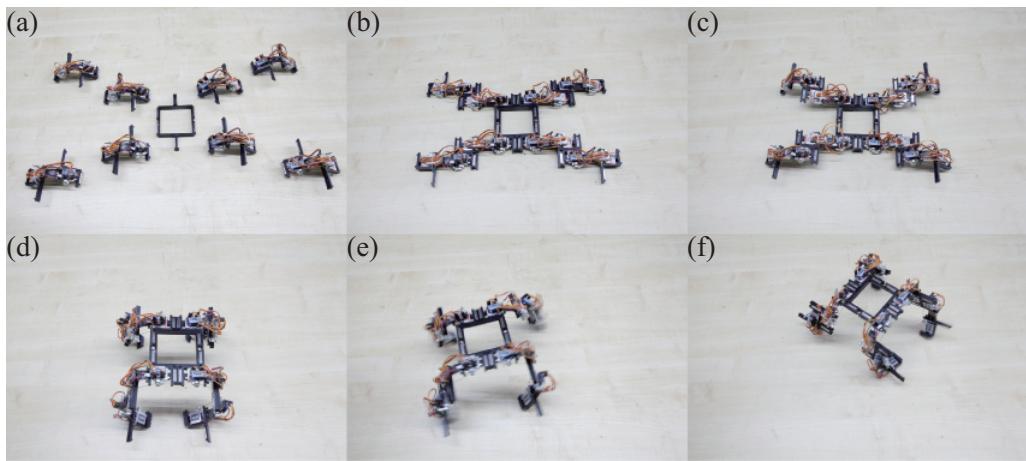


图 4.9 (a)-(b) 组装过程：八个爬行机器人组装成一个四足机器人（八个爬行机器人都受到远程遥控）。(c)-(d) 站立过程：四足机器人站起来有两个步骤：1. 四个充当小腿（膝关节）的爬行机器人首先弯曲，四足机器人进入预站立状态；2. 四个充当大腿（髋关节）的爬行机器人弯曲，四足机器人完全站立。(e)-(f) 行走过程：四足机器人以 trot 步态向右行走。

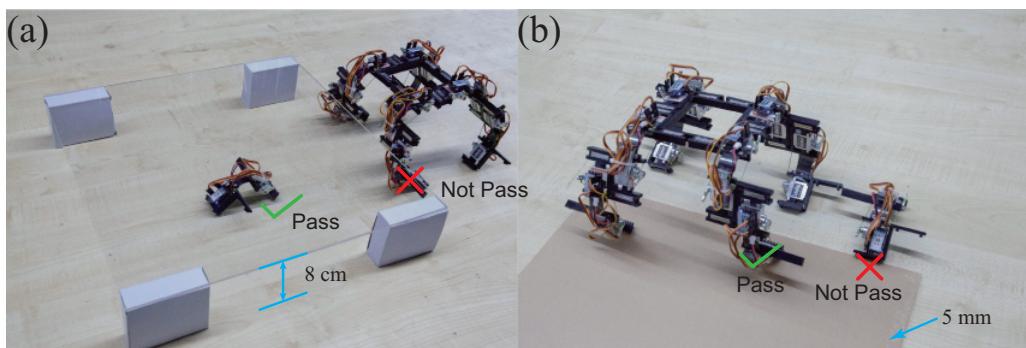


图 4.10 (a) 穿越狭窄空间：面对一个狭窄的通道（8 cm），爬行机器人可以钻过去，而四足机器人由于体积过大不能穿越。(b) 攀爬障碍物：四足机器人可以攀爬 5 mm 高的障碍物，而爬行机器人无法攀爬。

在所有爬行机器人都完成磁连接之后，我们在上位机停止所有爬行机器人的运动。这时四足机器人就像是静止地趴在地上。在行走的命令下达后，四足机器人通过“预站立-站立”的方式完全站起来，机器人的重量由爬行机器人构成的四条腿支撑。然后按照我们设计的步态控制策略，由上位机发送步态控制信号，四足机器人的爬虫下位机接收到控制信号开始行走。

我们在尼龙布包裹的硬亚克力板和未包裹尼龙布的木地板上分别测试了四足机器人的速度。在 Trot 步态，频率为 2 Hz 时候，四足机器人在两种地面上的平均速度分别为 0.12m/s 和 0.1m/s。和爬行机器人相比，四足机器人的最大速度提高了 70%。在爬行机器人和四足机器人的环境适应性测试中（4.10），爬行机器人可以钻过 8cm 高的狭窄通道，而四足机器人无法通过。四足机器可攀爬 5 毫米高的台阶，而爬行机器人无法做到。这证明了系统的两种形态具有不同的适应性，系统可以通过组装-解体的方式，兼具钻过狭窄通道和攀爬行走的能力。

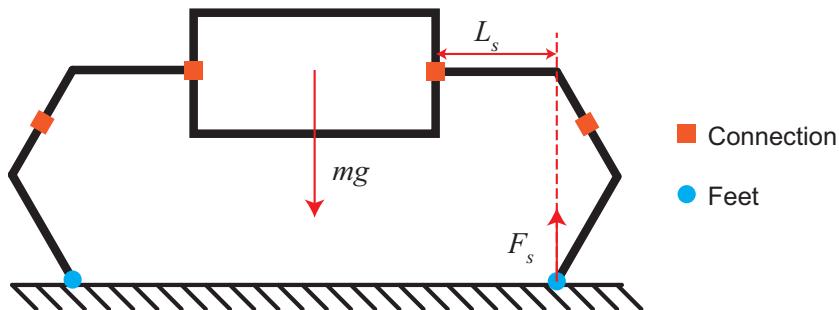


图 4.11 计算磁连接失效弯矩的准静态模型。最大失效弯矩发生在四足机器人躯体和大腿（髋关节）之间的磁连接处。

以往的工作已经证明，“head-to-head”型磁连接关节能够抵抗拉伸载荷和剪切载荷<sup>[119][213]</sup>。但是这种连接方法不能克服 BioARS 中四足机器人站立和行走时，机器人关节处受到的较大的破坏磁连接的力矩。

我们建立了一个准静态模型来分析磁连接关节的破坏力矩（图4.11）。在四足机器人站立过程中，我们假设重力均匀分布在四只脚上，每只脚的支撑力  $F_s$  是：

$$F_s = \frac{mg}{4} \quad (4-1)$$

其中  $m$  是四足机器人的质量， $g = 9.8m/s^2$  为重力加速度。最大破坏弯矩发生在机器人大腿与身体的连接处。这个失效弯矩全部来自支撑力  $F_s$ ，力臂是关节到足端的水

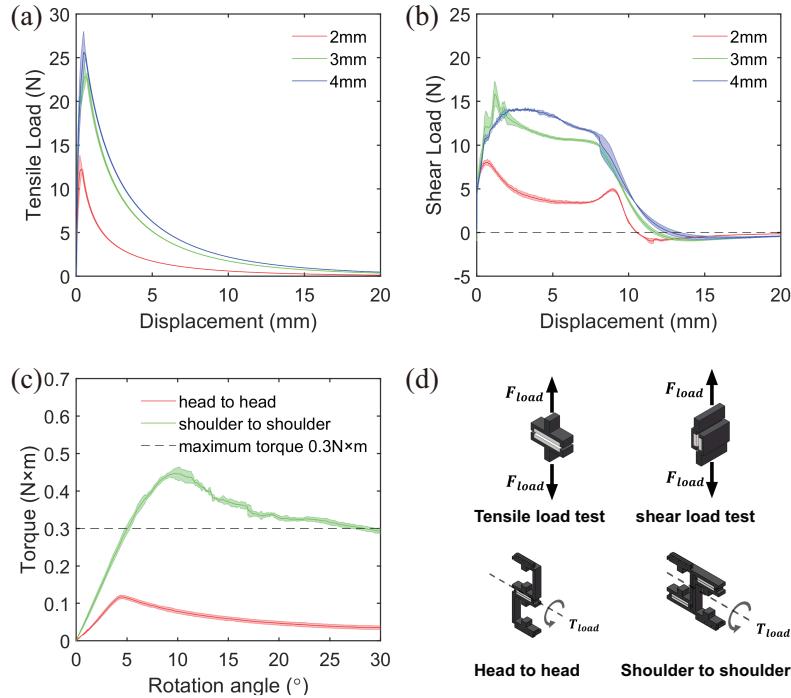


图 4.12 磁连接关节表征。(a) 拉伸载荷测试：三种不同厚度磁铁承受拉伸破坏的能力（使用的磁铁尺寸，长度：25mm，宽度：10mm，厚度：2mm/3mm/4mm）。(b) 剪切载荷试验：三种不同厚度磁铁承受剪切破坏的能力。(c)head-to-head 型和 shoulder-to-shoulder 型两种不同磁连接关节弯曲破坏测试，(使用的磁铁尺寸，长度：25mm，宽度：10mm，厚度：3mm)。(d) 上述测试加载方式示意图。

平距离  $L_s$ 。因此，磁连接关节受到的最大弯矩  $M_{bending}$  可以表示为：

$$M_{bending} = F_s \times L_s = \frac{mgL_s}{4} \quad (4-2)$$

四足机器人的总质量  $m = 0.8 \text{ kg}$ ，力臂  $L_s$  的范围为 0.08 m 至 0.15 m。因此，最大破坏弯曲力矩  $M_{bending}$  大约为 0.3Nm。在选择磁连接关节的磁铁尺寸时，我们进行了不同厚度磁铁对拉力测试和剪切测试的实验（图4.12(a) 和 (b)），基于实验结果我们选择  $25\text{mm} \times 10\text{mm} \times 3\text{mm}$  的磁铁制作磁连接模块。我们对“head-to-head”和“shoulder-to-shoulder”两种类型的磁连接关节进行了弯矩破坏测试（图4.12(c)）。比较这两种连接类型的测试结果可以发现，后者的破坏弯矩比前者高得多。这证明了“shoulder-to-shoulder”类型的连接可以有效提高磁连接关节的承载能力，并且可以满足 BioARS 站立和行走过程中的连接强度要求。

#### 4.1.4 小结

我们提出仿生组装机器人系统（BioARS）概念，该系统由一群爬行机器人组成，八只爬行机器人可以组装为四足机器人形态。本章基于 3D 打印的爬行机器人，对系统的

组装，站立，行走等过程进行了原理验证。在四足机器人的步态控制中，我们在上位机生成了步态控制信号并发送到爬行机器人模块的机载控制器中。对该系统的实验结果证明了我们对 BioARS 系统的技术假设，即该系统结合了虫群和四足动物的优点，既可以作为爬行机器人群群经过狭窄的空间，也可以组装成四足机器人爬过障碍。

在提出了 BioARS 系统的基本概念后，我们针对该系统的下一阶段工作将围绕以下几个问题展开：

- **问题一：**爬行机器人模块的形态和运动能力。本章中所使用的爬行机器人模块由 3D 打印零件和舵机组成，尺寸和质量都超出昆虫尺度，且运动能力不足。我们希望该系统的爬行机器人是昆虫尺度，尺寸应在毫米到厘米级别，质量在几克左右，且具有高速灵活的运动能力。
- **问题二：**组装后四足形态的运动控制。基于爬行机器人组装成四足机器人的技术假设，四足机器人的运动控制应当由爬行机器人的机载控制器实现。因此我们必须采用低算力要求的运动控制架构。
- **问题三：**基于集群行为的系统自动化。本章中，从爬行机器人到四足机器人的组装程具体为：聚集-对准-连接-站立。为了实现系统的自动化，这些行为必须有爬行机器人群决策并完成。这些行为都具有固定的模式和规律，类似于自然界虫群的集群行为。因此为了实现最终系统的自动化，可以将组装过程设计为系统的集群行为。

其中，问题一我们已经解决。在本论文第二章和第三章中，我们介绍了 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 两款高速无系留的昆虫尺度爬行机器人样机。我们计划搭建的第二代 BioARS-II 系统，即由 S<sup>2</sup>worm-G 组成的昆虫尺度的仿生组装机器人系统。本章的第二节主要关注问题二，我们提出了一种基于计算神经学和多元动力系统的仿生控制架构，并介绍了 BioARS-II 系统和基于仿生控制架构的组装形态运动控制。

## 4.2 运动控制：八元网络

上一节中，我们介绍了 BioARS 概念，用一些 3D 打印的爬行机器人验证了系统的可行性，并提出了将系统微型化需要解决的几个主要问题：爬行机器人模块的形态和运动能力；组装后四足形态的运动控制；基于集群行为的系统自动化。

为了解决问题一，本文在第二章和第三章中提出 S<sup>2</sup>worm-G 高机动微型爬行机器人作为组成 BioARS 系统的爬行机器人单元。本节主要研究问题二，即如何基于 S<sup>2</sup>worm-G 这一微型机器人的机载控制器设计一种可以实现组装后四足机器人运动控制的控制架构。第一节中我们提出一种分级控制架构，以生物的控制架构为原型，用下丘脑中的中脑运动区（Mesencephalic Locomotor Region, MLR）生成步态指令信号，由中枢模式发生器（Central Pattern Generator, CPG）在 MLR 信号的调控下产生控制关节的信号。

本节中我们基于计算神经学和对称性动力系统提出了一种八元神经网络 CPG 模型。本节主要介绍该八元网络模型的架构，实现步态的原理，步态控制效果和步态切换策略。

### 4.2.1 前言

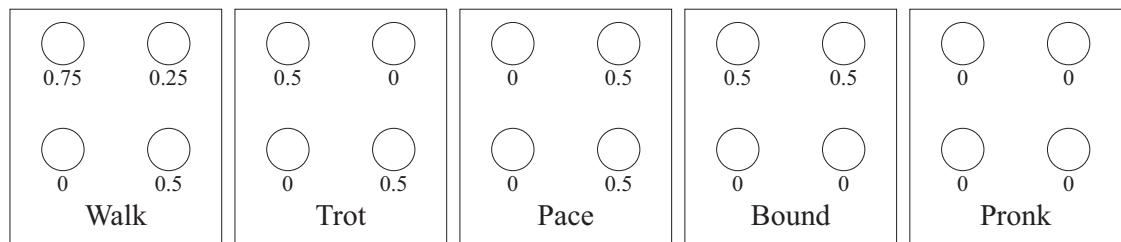


图 4.13 四足运动五种步态 walk, trot, pace, bound 和 pronk 对应的相位关系。

中枢模式发生器（Central Pattern Generator, CPG）是一类神经元的网络，有证据表明，这个存在于脊柱中的神经元网络是生物节律性运动控制信号的来源<sup>[216-217]</sup>。该网络可以在仅接收简单的输入信号的情况下，产生协调的输出信号。很多研究都采用人工 CPG 网络作为机器人的运动控制器<sup>[132,161,166,170,218]</sup>。

在一个包含  $n$  条腿的机器人中，每条腿包含膝和髋两个关节。因此，需要实现一个  $n$  条腿机器人的完全控制至少需要控制  $2n$  个自由度。然而，大多数腿式机器人的 CPG 仅包含  $n$  个神经元，每个神经元控制一条腿的，具体用于控制机器人所有的髋关节的节

律性<sup>[219-221]</sup>。腿足中的膝关节的控制信号，一般由该条腿中的髋关节的控制信号映射产生，膝关节和髋关节之间的信号相位关系由映射函数调控。这种策略在工程上具有便利性，但从生物学角度来看，在四足动物运动中，应该不会存在这样一种映射函数，而是所有的膝关节和髋关节（或操控关节运动的肌肉）均受到神经元的信号调控。因此，一个四足机器人的 CPG 应当包含至少八个神经元。对于 BioARS 系统来说，四足机器人由八个完全相同的爬行机器人构成，爬行机器人的机载控制器中包含一个神经元。在组装成四足机器人后，所有爬行机器人的机载控制器通过无线通信的方式彼此连接，称为四足机器人的运动控制器。所以每个爬行机器人机载控制器内置的用于四足运动控制的算法应该是相同的，即作为膝关节或髋关节的爬虫机器人应该使用的是同一个运动控制算法，所以在为 BioARS 系统设计 CPG 时，我们更希望使用一个八元网络。

有一些已经发表的用于四足机器人运动控制的八元网络 CPG，但他们都不能满足 BioARS 系统的要求。Collins 等人<sup>[222]</sup>提出一个可以实现多种步态的八元网络。但是该网络需要一个外部选择器，以决定某种步态控制信号被发送到哪条腿。并且它无法实现膝髋关节分布式控制，因为只有四个控制信号是有效的。Ijspeert 等人<sup>[223]</sup>提出了一种具有膝髋关节耦合的八元网络。该网络的八个神经元可以同时控制四条腿的膝髋关节，但是该网络具有  $Z_4$  对称性，可以实现的步态有限，仅能实现 walk, trot 和 gallop。Golubitsky 等人<sup>[173]</sup>提出了  $Z_4 \times Z_2$  八元网络可以执行六个步态。但是在该网络中仅有四个神经元的信号可以用于步态控制，其他四个神经元的作用为传递网络内信号并保持网络对称性。因此它不能为膝髋关节控制提供八个信号。

设计八元网络 CPG 最困难的问题之一就是设计网络的对称性<sup>[132,148]</sup>。四足运动的步态信号是一种具有时空周期性对称性的周期性信号。网络的对称性是可以保留网络架构的变换，这些变换构成一个图论自同构群（graph-theoretic automorphism group）。在一个动力学网络中，单元之间的同步（synchrony）和锁相（phase-locking）现象都是网络的对称性导致的。为四足动物构建八元网络 CPG 时候，应考虑两种隐含的对称性，四条腿之间的相位关系对应的全局对称性，以及一条腿内部膝关节和髋关节之间的相位差对应的局部对称性。全局对称性决定四条腿之间的步态，局部对称性决定膝髋关节之间的相位锁定。

本节中我们提出了一种新型八元网络 CPG 模型，用于四足机器人运动控制。该八元网络有两层神经元，分别用于产生髋关节和膝关节的控制信号。该网络支持五种步态

(walk, trot, pace, bound 和 pronk) (图4.13)。我们应用  $H/K$  商群定理 ( $H/K$  quotient theory) 证明网络对称性支持这些步态的时空对称性，并使用 Stein 模型作为网络中的神经元模型以构造网络的常微分方程 (Ordinary Differential Equation, ODE)。基于生物学假设，我们设计了网络中神经元之间的耦合效应。这个八元网络 CPG 在四足机器人运动控制中具有以下优势：

1. 多种步态：walk, trot, pace, bound 和 pronk;
2. 控制参数简单，步态切换灵活；
3. 具有稳定和自适应性的膝髋关节锁相。

#### 4.2.2 全局对称性

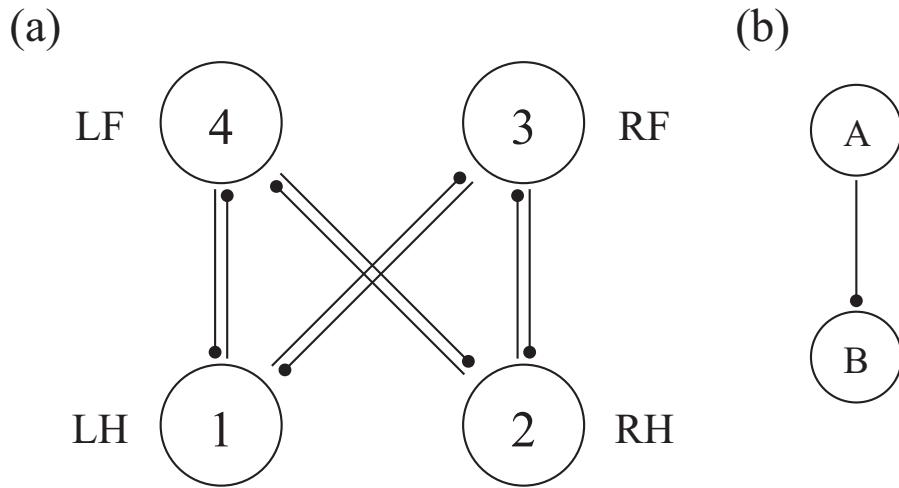


图 4.14 (a) 具有双向耦合的四元网络，这个网络的对称群为  $D_4$ 。神经元 1, 2, 3 和 4 分别对应着四足运动控制中的左后腿 (Left Hind, LH)，右后腿 (Right Hind, RH)，右前腿 (Right Front, RF) 和左前腿 (Left Front, LF)。(b) 箭头表示神经元 A 对神经元 B 的耦合效应。

网络可以表示为一张包含节点和节点之间连接的图。节点表示一组状态变量，连接表示这些节点之间状态变量的相互作用。CPG 是一种由动力学方程构成的网络，节点表示特定 ODE 函数神经元和连接表示神经元之间的相互作用。在计算机程序中，CPG 看作一个 ODE 方程组，由 Runge-Kutta 计算方法或其他算法进行数值计算。但在网络设计时，不能仅仅将 CPG 看作一个高维的动态系统，而应当考虑网络的对称性以及所导致的神经元之间的相位关系。四足机器人的步态节律可以使用时空对称性描述，这是一种与神经元模型无关的现象<sup>[158]</sup>。两个 CPG 如果网络对称性相同但所使用的神经元模型不

同，其产生的信号也具有相同时空对称性。因此，我们应首先构建网络结构，再选择神经元模型。

我们要建立一个用于四足运动控制的 CPG，可以实现多种步态：walk, trot, pace, bound 和 pronk。以往的工作已经证明，在具有  $Z_4$  对称性的网络中，trot 和 pace 步态的时空对称性总是共轭的<sup>[174]</sup>。因此我们将网络的全局对称性设计为  $D_4$ ，这是一个具有双向耦合的四元网络（图4.14）。神经元 1、2、3 和 4 分别用于控制四足机器人的左后腿（LH），右后腿（RH）、右前腿（RF）和左前腿（LF）。 $D_4$  群的生成元（Generator）是  $\omega = (1324)$  和  $k = (13)(24)$ 。 $D_4$  的群元素可以表示为：

$$D_4 = \{1, \omega, \omega^2, \omega^3, k, k\omega, k\omega^2, k\omega^3\}. \quad (4-3)$$

这里我们使用  $H/K$  商群理论来证明具有  $D_4$  对称性的双向耦合四元网络支持我们期望的五种步态。该理论表述为：

( $H/K$  Theorem<sup>[173][174]</sup>) Let  $\Gamma$  be the symmetry group of a coupled cell network in which all cells are coupled and the internal dynamics of each cell is at least two-dimensional. Let  $K \subset H \subset \Gamma$  be a pair of subgroups. Then there exist periodic solutions to some coupled cell systems with spatiotemporal symmetries  $H$  and spatial symmetries  $K$  if and only if  $H/K$  is cyclic and  $K$  is an isotropy subgroup. Moreover, the system can be chosen so that the periodic solution is asymptotically stable.

简而言之，CPG 网络的每种步态都对应着一个  $H$  和  $K$  的组合。 $H$  是步态的时空对称群（spatiotemporal symmetry group）。 $K$  是对应于步态的空间对称性的各向同性子群（isotropy subgroup）。商群  $H/K$  是对应于步态周期性的循环子群（cyclic subgroup）。根据  $H/K$  定理，我们需要在双向耦合四元网络的对称群  $D_4$  中找到符合我们需要的步态的循环商子群和各向同性子群。

- **Walk:**  $H/K$  循环商子群可以从四条腿的周期关系中观察到，表示为  $Z_4(\omega(\frac{1}{4}))$ 。
- **Trot:** 各向同性子群  $K$  保证了对角神经元的等效，即  $Z_2(k)$ 。单侧腿之间的相差为  $\frac{1}{2}$ ，因此  $H/K$  循环商子群可以取  $Z_2(\omega^2(\frac{1}{2}))$ 。
- **Pace:** 各向同性子群保证了 1、4 神经元同步 2、3 神经元同步， $K = Z_2(k\omega^2)$ 。对角神经元的相差是  $\frac{1}{2}$ ， $H/K = Z_2(k)$ 。

表 4.1 五种步态的时空对称群  $H$ , 各项同性子群  $K$  和循环商子群  $H/K$ 

步态	$H$	$K$	$H/K$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$x_4(t)$
Walk	$\mathbf{Z}_4(\omega)$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{Z}_4(\omega)$	$x_1(t + \frac{1}{2})$	$x_1(t + \frac{1}{4})$	$x_1(t + \frac{3}{4})$
Trot	$\mathbf{D}_2(k, \omega^2)$	$\mathbf{Z}_2(k)$	$\mathbf{Z}_2(\omega^2)$	$x_1(t + \frac{1}{2})$	$x_1(t)$	$x_1(t + \frac{1}{2})$
Pace	$\mathbf{D}_2(k, \omega^2)$	$\mathbf{Z}_2(k\omega^2)$	$\mathbf{Z}_2(k)$	$x_1(t + \frac{1}{2})$	$x_1(t + \frac{1}{2})$	$x_1(t)$
Bound	$\mathbf{D}_2(k, \omega^2)$	$\mathbf{Z}_2(\omega^2)$	$\mathbf{Z}_2(k)$	$x_1(t)$	$x_1(t + \frac{1}{2})$	$x_1(t + \frac{1}{2})$
Pronk	$\mathbf{D}_4(k, \omega)$	$\mathbf{D}_4(k, \omega)$	$\mathbf{1}$	$x_1(t)$	$x_1(t)$	$x_1(t)$

- **Bound:** 各向同性子群保证了 1、2 神经元同步 3、4 神经元同步,  $K = \mathbf{Z}_2(\omega^2)$ 。对角神经元的相差是  $\frac{1}{2}$ ,  $H/K = \mathbf{Z}_2(k)$ 。
- **Pronk:** 所有神经元都同步, 各向同性子群  $K = \mathbf{D}_4(k, \omega)$ .

表4.1总结了所有步态的子群选择, 还列出在不同步态下其他神经元相对于 1 号神经元的相位关系, 其中  $x_i$  表示神经元的状态。到此我们证明了双向耦合四元网络满足所有步态的时空对称性要求。因此八元网络的全局对称性可以设置为  $\mathbf{D}_4$ 。

### 4.2.3 局部对称性与网络架构

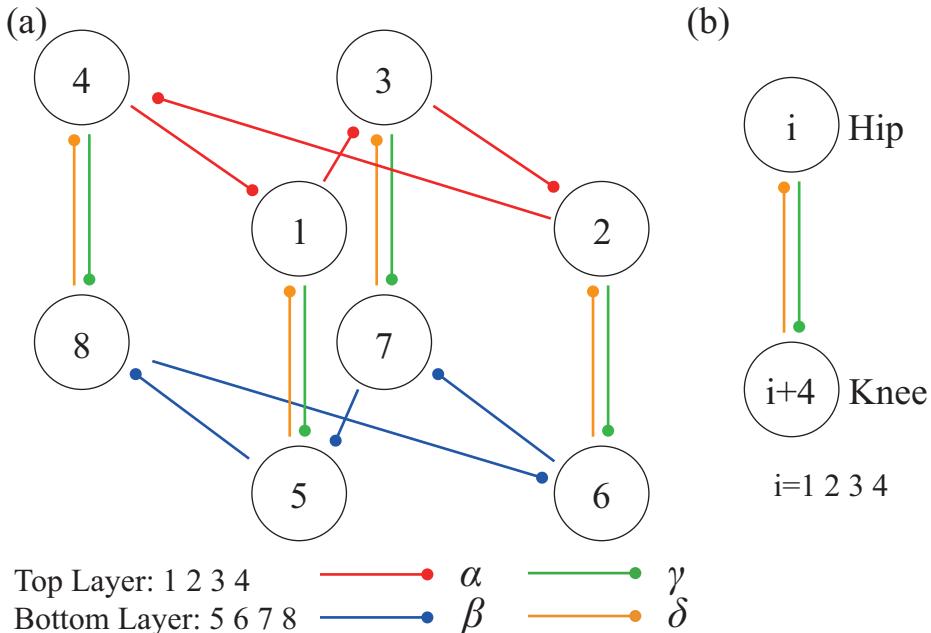


图 4.15 (a) 八元网络架构。网络分为上下两层, 上层包含神经元 1, 2, 3, 4, 用于髋关节控制, 下层包含神经元 5, 6, 7, 8, 用于膝关节控制。网络中具有四种耦合:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 。(b) 八元网络中用于控制一条腿的一对神经元。

设计全局对称性以支持多种步态是设计八元网络的第一步。在上一小节中，具有  $D_4$  对称性双向耦合的四元网络已被证明可以支持我们想要的步态，本小节将重点关注 CPG 的局部对称性设计和网络架构。

对于四足运动来说，最好的网络架构是八个神经元分别控制八个膝髋关节，然而大多数 CPG 无法满足这一需求。大多数四足运动控制 CPG 采用四元网络，只能控制腿和腿之间的相位关系，膝关节的控制信号往往是通过对髋关节的控制信号映射生成。

本节中，我们的目标是设计一个八元网络，每个关节都受到一个神经元的控制，因此我们需要将上一小节中提出的双向耦合四元网络拓展到八元网络，这里存在两个困难：

1. 需要为网络增加神经元，但同时需要保持网络的  $D_4$  对称性。
2. 需要设计膝髋关节神经元的局部对称性，来控制膝髋关节间稳定的相位关系。

图 4.15 展示了扩展后的八元网络。原四元网络中的一个单元被分成具有双向耦合的上下两个单元，分别对应着髋关节和膝关节。单元 1 和 5 被分配控制四足动物左后腿的髋和膝，单元 2,6 控制右后腿的髋和膝，3,7 控制右前腿的髋和膝，4,8 控制左前腿髋和膝。

原四元网络中的双向耦合也被分为两层，八元网络顶层和底层都各包含一个单向耦合环，但方向相反。在一对单元之间还增加了一对双向耦合以保持髋单元和膝单元的等价性。这对膝髋单元之间双向耦合可以从四元网络中为每个单元添加自耦合得到，整个网络仍然保持着  $D_4$  对称性<sup>[224]</sup>。

在八元网络中，共有四种类型的耦合：

- $\alpha$ : 顶层髋关节神经元中的耦合
- $\beta$ : 底层膝关节神经元中的耦合
- $\gamma$ : 从顶层到底层的耦合
- $\delta$ : 从底层到顶层的耦合

为了维持  $D_4$  全局对称性， $\alpha$  和  $\beta$  应该相等，从而使得同一层内的单元等价。 $\gamma$  和  $\delta$  也应该相等，以保持一对膝髋单元等价。因此，网络的全局对称性由  $\alpha$  和  $\beta$  形成，局部对称性由  $\gamma$  和  $\delta$  形成。

在这个网络中，单元的 ODE 方程采用了 Stein 神经元模型<sup>[138-139]</sup>。该模型可以表示为：

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= a[-x_i + \frac{1}{1 + \exp(-f_{ci} - by_i + bz_i)}] \\ \dot{y}_i &= x_i - py_i \\ \dot{z}_i &= x_i - qz_i\end{aligned}\tag{4-4}$$

其中， $x_i$  表示第  $i$  个神经元的膜电位， $a$  是影响神经元频率的速率常数，在八个单元的两层网络中，有  $a^h$  和  $a^k$  两个参数，分别对应髋关节（hip）和膝关节（knee）。 $f_{ci}$  是神经元的驱动信号。 $b$  是自适应常数，决定神经元的自适应程度。 $p$  和  $q$  是钠离子累积转换的速率常数<sup>[225]</sup>。在本节中，这些常数取值为  $b = -2000, p = 10, q = 30$ 。

该八元网络中，对某个神经元来说，来自其他神经元的耦合效应包含在其方程的驱动信号  $f_{ci}$  中。因此， $f_{ci}$  有三个组成部分：来自中脑运动区（MLR）的控制信号，来自同一层中的神经元的耦合效应，以及来自其他层中的神经元的耦合效应。因此  $f_{ci}$  可以表示为：

$$\begin{aligned}f_{ci}^h &= f^h[1 + k_1^h \sin(k_2^h t) + \alpha \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} x_j + \delta \sum_{j=5}^8 \lambda_{ji} x_j] \quad \text{上层: } i = 1, 2, 3, 4 \\ f_{ci}^k &= f^k[1 + k_1^k \sin(k_2^k t) + \beta \sum_{j=5}^8 \lambda_{ji} x_j + \gamma \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} x_j] \quad \text{下层: } i = 5, 6, 7, 8\end{aligned}\tag{4-5}$$

其中  $f(f^h, f^k)$  是振幅参数， $k_1(k_1^h, k_1^k)$  和  $k_2(k_2^h, k_2^k)$  决定了来自 MLR 的驱动信号的振幅和频率。求和项  $\alpha \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} x_j$  和  $\beta \sum_{j=5}^8 \lambda_{ji} x_j$  是来自同一层中的神经元的耦合效应， $\delta \sum_{j=5}^8 \lambda_{ji} x_j$  和  $\gamma \sum_{j=1}^4 \lambda_{ji} x_j$  指的是来自其他层中的神经元的耦合效应。参数  $a, f, k_1$  和  $k_2$  调节八元网络的步态。

神经元之间的耦合效应是根据网络架构和神经元模型设定的。耦合矩阵  $\lambda_{ij}$  可以根据网络架构（图 4.15）推导出，表 4.2 中列出了八元网络的耦合矩阵。

根据全局对称性，耦合参数  $\alpha$  和  $\beta$  均设置为  $-0.15$ ，表示神经元间的抑制性耦合。对于局部对称性，如果  $\gamma = \delta$ ，则会导致一对膝髋神经元产生  $Z_2$  对称性。即使这对神经元的其他控制参数不严格相等，因为它们位于具有相反耦合环的不同层中，但它仍然带来了近似  $\frac{1}{2}$  周期的锁相。因此，在本节的八元网络中， $\gamma$  和  $\delta$  分别设置为  $-0.6$  和  $-0.1$ 。这里的生物学假设是，上层网络控制着整个八元网络的步态，下层网络跟随上层网络生成的信号。设置  $\gamma \neq \delta$  可能会打破全局  $D_4$  对称性，因为它导致一对膝髋神经元并不是

神经元	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	1	0	1	0	0
3	0	1	0	0	0	0	1	0
4	1	0	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0	1	0
7	0	0	1	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	1	0	0

表 4.3 八元网络的参数类别

	类别	参数	数值或功能
神经元	变量	$a(a^h, a^k)$	
		$f(f^h, f^k)$	
		$k_1(k_1^h, k_1^k)$	步态控制
		$k_2(k_2^h, k_2^k)$	
常数	常数	$b$	-2000
		$p$	10
		$q$	30
网络	常数	$\alpha$	-0.15
		$\beta$	-0.15
		$\gamma$	-0.6
		$\delta$	-0.1

完全等效，但下一小节中的数值仿真结果证明这种不对称性不会影响步态控制。

到此我们已经完成了网络架构设计，表 4.3列出了八元网络的参数类别和对应功能。

#### 4.2.4 BioARS-II 系统及其仿生运动控制架构

基于上一小节所设计的八元网络架构包含的用于生成信号的神经元网络和用于调控信号的 MLR，我们提出 BioARS-II 系统三层仿生运动控制架构。首先我们介绍 BioARS-II 系统的概念，BioARS-II 系统是基于 S<sup>2</sup>worm-G 的第二代 BioARS 系统，该系统的具体组成如图 4.16所示。BioARS-II 系统由 S<sup>2</sup>worm-G 作为组装模块，每只 S<sup>2</sup>worm-G 的侧向均安装磁连接关节，S<sup>2</sup>worm-G 之间通过磁连接关节实现连接，八只 S<sup>2</sup>worm-G 可以组装为一个微型四足机器人，组装后的四足机器人每条腿包含两只 S<sup>2</sup>worm-G，分别作为膝关节和髋关节，BioARS-II 系统的基本概念和 BioARS（图 4.1）保持一致。

由于 BioARS-II 系统的组成部件为 S<sup>2</sup>worm-G，因此该系统的运动控制也应当基于 S<sup>2</sup>worm-G 机载硬件的计算能力。为了实现 BioARS-II 中四足机器人步态控制，我们基

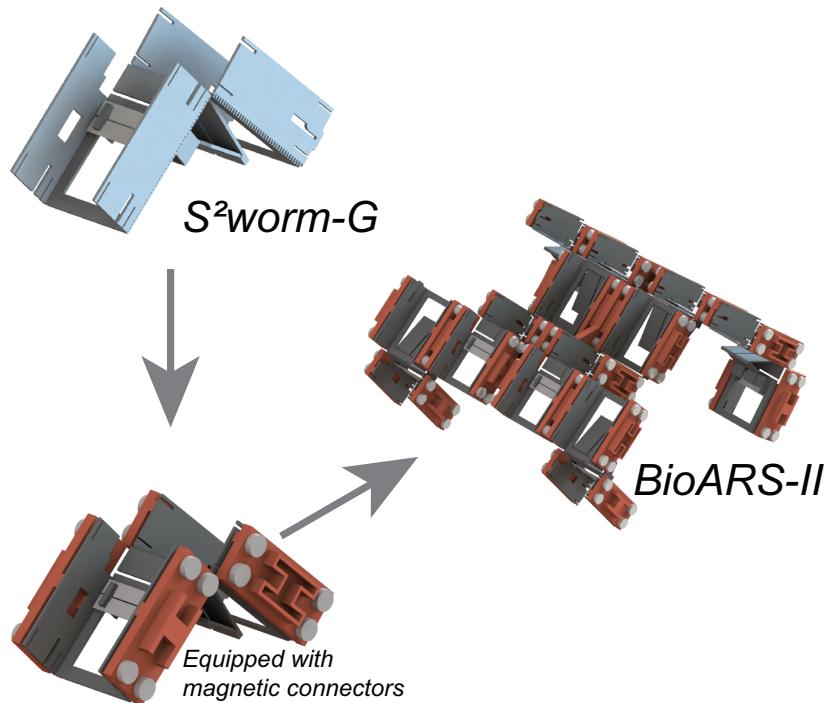


图 4.16 BioaRS-II 系统。该系统由八只 *S<sup>2</sup>worm-G* 作为组成模块，每只 *S<sup>2</sup>worm-G* 的侧翼都安装了磁连接关节，八只 *S<sup>2</sup>worm-G* 连接组成为一个四足机器人。

于所提出的八元网络的网络架构，设计了一种三层仿生运动控制架构（图 4.17）。控制架构的第一层为信号调控层 MLR，其功能相当于生物中的中脑运动控制区，通过改变 CPG 中的控制参数（表 4.3）和调控信号（公式 4-5）来改变 CPG 层产生的信号。控制架构的第二层为信号生成层 CPG，这里我们使用本节所设计的的八元网络作为 CPG，神经元模型依然选择 Stein 模型。这一层的功能相当于生物中的神经环路，受到 MLR 的调控从而生成节律性的信号。控制架构的第三层为信号后处理层 Post Processing，这一层的功能是处理由 CPG 层生成的信号并发送到 BioARS-II 四足机器人中对应的 *S<sup>2</sup>worm-G* 单元。由于 CPG 生成的信号一般为一个数值范围在 0 至 1 之间的信号（图 4.18），而实际的控制信号可以是关节角度信号或者电压信号，因此需要信号处理层对 CPG 生成的信号进行转换和发送。

到此我们完成了 BioARS-II 系统的仿生运动控制架构设计，该控制器所产生的步态受到 MLR 的调控，控制信号由 CPG 生成，经过信号后处理层发送到机器人对应的关节。

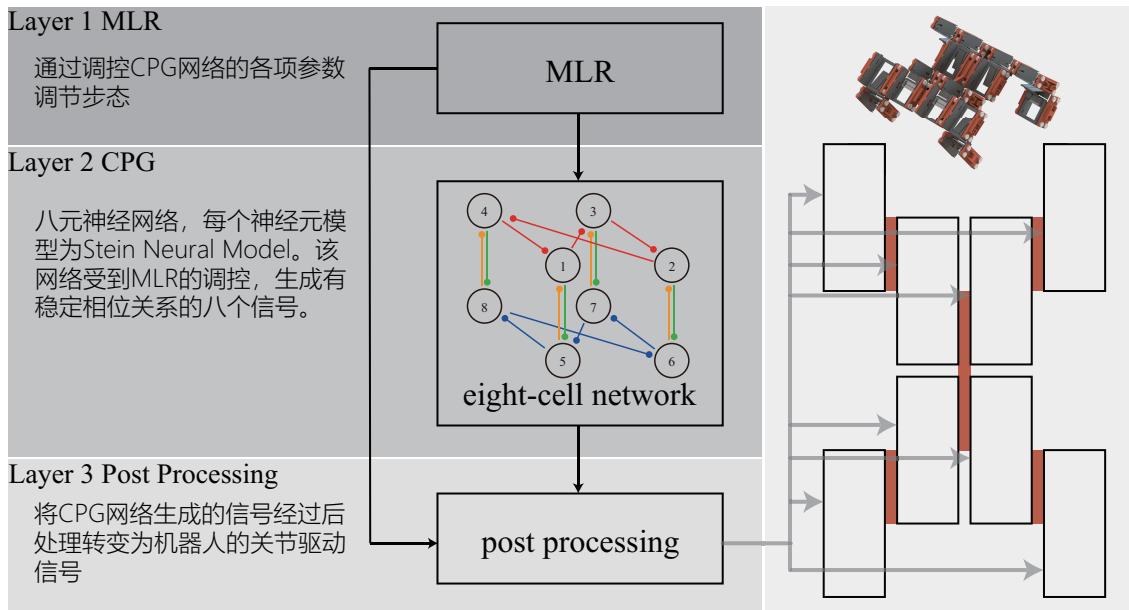


图 4.17 BioaRS-II 系统的三层仿生运动控制架构。

表 4.4 八元网络的初始状态

神经元	神经元的状态量 $(x_i, y_i, z_i)$	
1 和 5	$(1, 0.04, 0.016)$	$(1, 0.045, 0.018)$
2 和 6	$(1, 0.045, 0.018)$	$(0.8, 0.05, 0.02)$
3 和 7	$(0.8, 0.05, 0.02)$	$(1, 0.025, 0.014)$
4 和 8	$(1, 0.025, 0.014)$	$(1, 0.04, 0.016)$

表 4.5 八元网络执行五种步态的控制参数。

层级	变量名	步态				
		Walk	Trot	Pace	Bound	Pronk
顶层-髋关节	$a^h$	10	11	11	16	30
	$f^h$	40	41	41	50	70
	$k_1^h$	0	0.085	0.04	0.1	0.8
	$k_2^h$	0	56	54	59	60
底层-膝关节	$a^k$	10	11	11	14	30
	$f^k$	40	41	41	45	70
	$k_1^k$	0	0	0.01	0	0.2
	$k_2^k$	0	0	54	0	60

#### 4.2.5 数值仿真

我们通过在 MLR 中调整参数设定，让八元网络 CPG 产生对应的步态信号以及执行步态。在生成步态和步态切换的仿真中，由于不涉及具体的机器人模型和几何参数，所以我们仅展示八元网络 CPG 输出的原始信号，这些神经元的信号未经过后处理。关于八元网络的数值模拟全部在 Python 3.8 环境中编写，网络的 ODE 方程组通过四阶 Runge-Kutta 方法计算。八元网络的初始状态如表 4.4 所示。

八元网络能够生成至少五种步态：walk, trot, pace, bound 和 pronk。表 4.5 列出了不同步态对应的参数组合。这些步态的数值仿真结果如图 4.18 所示。我们画出了膝髓神经元之间的相位图，以证明八元网络能够产生稳定膝髓神经元锁相。这种锁相特征对实现四足机器人八个关节的运动控制有帮助，因为它可以取代映射函数。

在 Collins<sup>[158]</sup>提出的由 Stein 模型构成的四元网络中，同样发现了从 walk 到 trot 到 bound 的步态， $a$  的取值是不断增加的。然而，该网络中无法实现 pace 步态。在八元网络中，我们发现 pace 的参数  $a$  和  $f$  与 trot 相同，但  $k_1$  为 trot 步态的一半。这里的生物学假设是 MLR 向 CPG 施加相对与 trot 来说更弱的驱动信号，生成 pace 步态，

动物通过步态转换能够调整速度、地形适应性和能量消耗。从动力学的角度来看，CPG 的步态转换对应于系统的分岔现象<sup>[174]</sup>。ODE 控制参数（在八元网络中，控制参数是  $a, f, k_1$  和  $k_2$ ）的变化导致系统从一个吸引子转移到另一个吸引子。在八元网络中，我们发现五种步态，因此共有二十种步态切换过程。

在对步态切换进行数值仿真的过程，我们观察到了若干现象，这些现象导致了步态切换并不总是成功的。为了保证步态切换的成功，我们采用了三种切换策略，并且可以根据所采用的切换策略对步态切换进行分类。三种策略如下：

**S.1 “Switch”:** 直接将控制参数 ( $a, f, k_1$  和  $k_2$ ) 由当前步态更改为目标步态。这是最简单的策略，适用的步态切换有：walk-to-bound, walk-to-pronk, trot-to-walk, trot-to-bound, trot-to-pronk, pace-to-walk, pace-to-bound, pace-to-pronk and bound-to-pronk。

**S.2 “Power pair”:** 除了更改控制参数外，还将神经元 1 和 3 的驱动信号的幅度参数增加至少 100% 并维持一段时间（本节中维持的时间为 0.2 秒），然后返回其原始值。

这个策略最早由 Collins 在 stein 四元网络中提出<sup>[158]</sup>。在 Collins 的数值仿真中

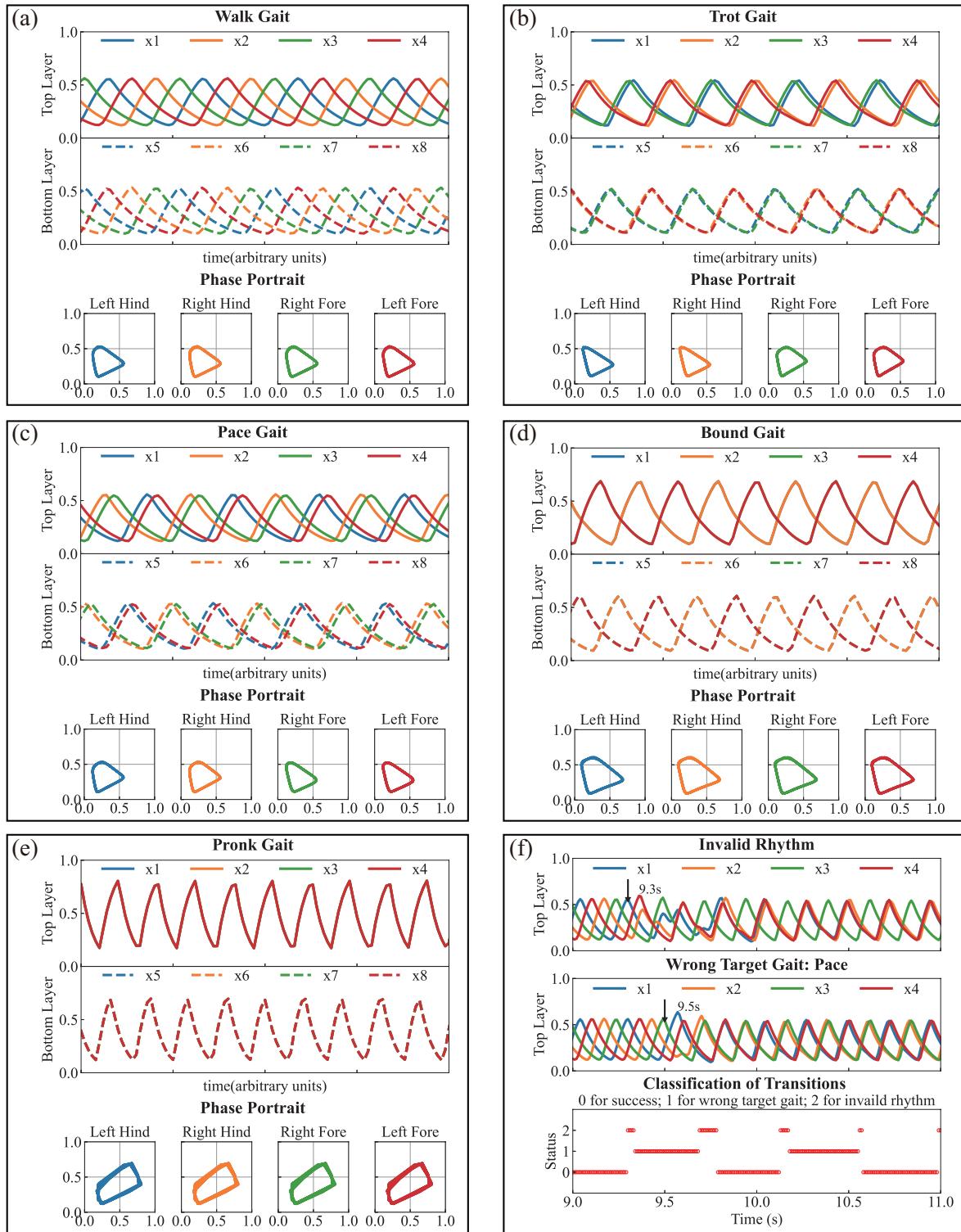


图 4.18 (a)-(e) 八元网络五种步态的数值仿真结果，网络中上下两层输出状态量和膝髋关节神经元的相图。(f) 使用“switch”策略实行 walk-to-trot 步态切换时，切换成功与否以及切换后的网络状态和施加策略的时间有关。上：在第 9.3 秒实施步态切换，切换后系统进入混乱，1, 2, 4 神经元同步，3 神经元和其他神经元差  $\frac{1}{2}$  周期。中：在第 9.5 秒实施步态切换，切换后八元网络输出的 pace 而不是 trot 步态。下：切换后网络的状态和施加切换策略的时间的关系。

“Power pair”适用的步态切换有：bound-to-walk 和 bound-to-trot。这个策略在八元网络中仅仅适用于 bound-to-walk。

**S.3 “Reset”：**对于其他的步态切换，“Switch”和“Power pair”策略在一些仿真中会导致失败。我们发现切换后成功与否与施加切换策略的时间有关。如图 4.18(f) 所示，在使用“Switch”策略的进行 walk-to-trot 切换时，有时会观察到错误的节律（在 10.2 秒应用“Switch”策略，神经元 1 2 和 4 同步位，神经元 3 和其他神经元差  $\frac{1}{2}$  周期）和错误的目标步态（在 10.6 秒应用“Switch”策略，但切换成了 pace 步态）。

为确保步态过渡的成功，我们提出了“Reset”策略。具体方法为：除了更改步态控制参数之外，用适当的状态量组合替换当前的系统状态量 ( $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  和  $t$ )，以生成正确的目标步态。

严格来说，“Reset”策略并不是引发八元网络的分岔，而是让整个系统重置。这个重置过程使系统在施加“Reset”策略的那一刻在时间上并不连续。图 4.19 中展示二十个步态切换的数值仿真结果。我们提出的三种策略可以实现所有步态成功切换，但是“Reset”会导致系统的不连续，之后的研究会寻找更好的替代“Reset”的策略。

#### 4.2.6 结果讨论

在第 4.2.3 节，我们提出了膝关节神经元跟随髋关节神经元的假设。从神经元模型的角度来看，髋关节网神经元的步态控制参数  $a$ ,  $f$ ,  $k_1$  和  $k_2$  的值通常比底层大（表 4.5）。 $a^k \geq a^h$  表示髋关节神经元比膝关节神经元更活跃。 $f^h \geq f^k$ ,  $k_1^h \geq k_1^k$ ,  $k_2^h \geq k_2^k$  表示神经元从 MLR 接收的驱动信号不同，其中膝关节神经元接收到的信号更强。从网络架构的角度，这个假设导致了  $\gamma \neq \delta$ 。 $\gamma = -0.6$ ,  $\delta = -0.1$  对应于上层神经元对下层神经元施加了一个强抑制，下层神经元对上层神经元施加了一个弱抑制。

另一种遵循这个假设的网络设计方式则更加激进，需要调整  $\alpha$  和  $\beta$  的值。例如， $\alpha = -0.15$ ,  $\beta = -0.1$  表示上层髋关节是一个强耦合网络，底层膝关节是一个弱耦合网络。这样的修改方式会为整个八元网络的全局对称性引入缺陷，但是该网络的数值模拟也可以成功地实现五种步态和所有步态转换，只是和我们在上一节中进行仿真的网络的控制参数不同。

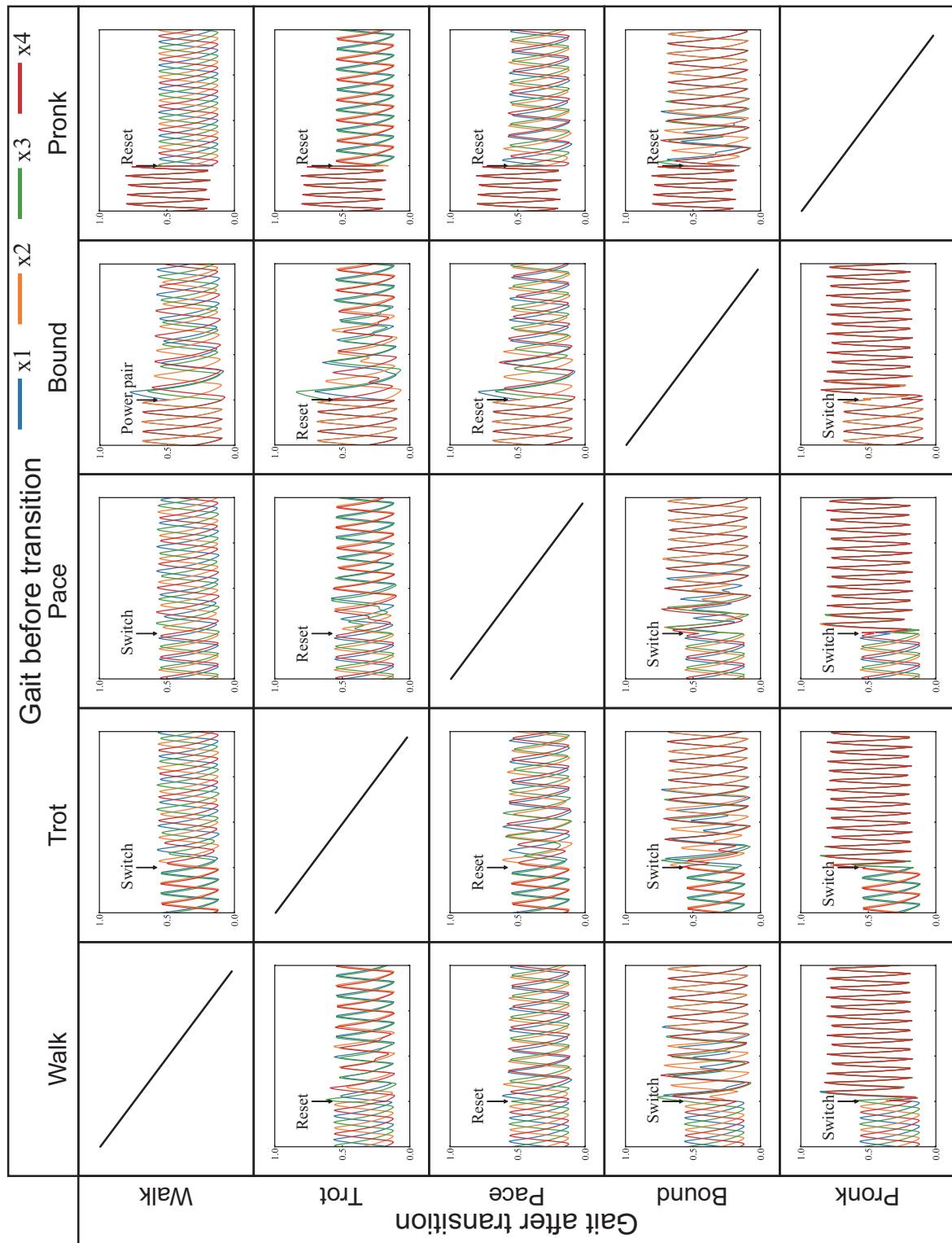


图 4.19 二十种步态切换和对应的切换策略。每个切换都展示了系统 2 s 内上层网络的时域状态。箭头表示施加切换策略的时间。

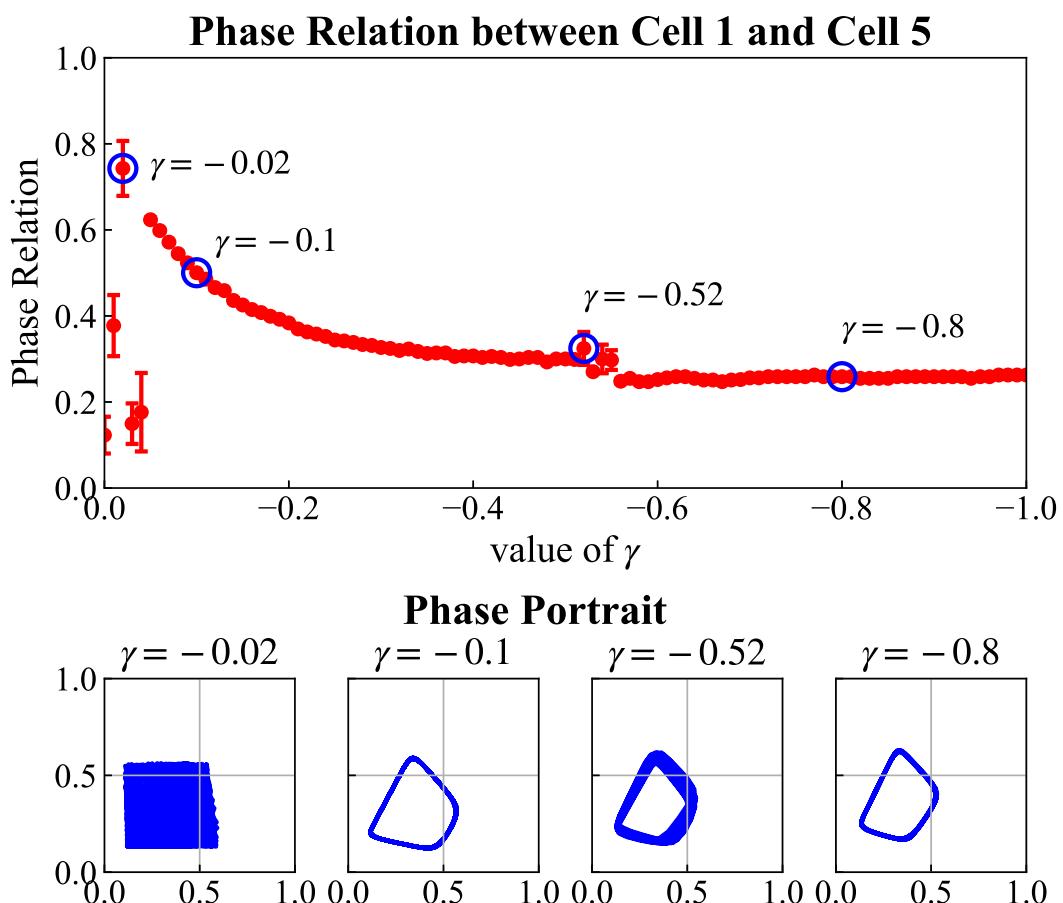


图 4.20 上：神经元 1 和 5 之间的相位差和  $\gamma$  之间的关系。下： $\gamma$  取值为  $-0.02, -0.1, -0.52, -0.8$  时对应的相图。

有一个例外是  $\beta = 0$ , 这意味着膝关节的网络是没有耦合效应, 这样的网络结构与 Billard 等人<sup>[223]</sup>提出的网络类似。即使该网络仍有八个神经元, 网络的对称性由  $D_4$  降至  $Z_4$ 。我们无法在这个网络中找到 pace 步态。这表明膝关节网络并不仅是跟随髋关节网络, 还影响整个网络的对称性和网络步态的时空对称性。

我们提出的八元网络的一个重要优势是它具有膝关节和髋关节之间稳定的相位锁定。由于非等效的相互抑制  $\gamma \neq \delta$ , 膝关节和髋关节信号之间的相位关系可以通过更改  $\gamma$  和  $\delta$  的值来调整。这里我们给一个简单的例子。测试所使用的网络结构与图4.13中的网络相同, 我们仅更改参数  $\gamma$  以演示如何调节膝关节和髋关节之间的相位关系。以 walk 步态为例, 图 4.20 显示神经元 1 和 5 之间的相位关系随着  $\gamma$  值从 0 到 1 的变化而变化。大部分  $\gamma$  取值可以生成稳定的极限环, 此时神经元 1 和 5 之间的相位关系相对稳定。有些  $\gamma$  值 (例如 0.02 和 0.52) 无法生成稳定的极限环, 特别是  $\gamma = 0.02$ , 设计网络的过程中应该避免使用这样的参数。数值仿真结果表明, 膝髋关节神经元之间的相位关系的调整范围为 0.25 – 0.62, 并具有稳定的极限环。以后的研究可以通过调整网络的膝髋神经元之间的相位关系来提高四足机器人运动的速度和能量效率。

#### 4.2.7 小结

我们提出了一种用于四足机器人运动控制的八元网络 CPG 模型。该网络的八个神经元分为顶层和底层, 分别生成四个膝关节和髋关节的控制信号。我们使用 Stein 神经元模型作为网络中神经元的控制方程, Stein 神经元模型为网络提供了提供简单的步态控制参数。该模型可以执行五种步态和二十种步态转换。在网络设计过程中, 我们从对称性的角度出发, 利用全局对称性实现四条腿之间的步态相位关系, 利用局部对称性构造膝关节和髋关节之间的相位关系。我们应用  $H/K$  商群定理证明网络的对称性支持所设计的步态对称性, 我们应用非对称的相互抑制实现了膝关节和髋关节神经元之间的相位锁定。我们介绍了基于 S<sup>2</sup>worm-G 的第二代 BioARS 系统, 以及该系统的运动控制架构, 该控制架构由三部分组成, 模仿生物中中脑运动区对神经环路的调控, 以所提出的八元网络 CPG 模型为核心, 对 BioARS-II 的四足机器人进行步态控制。我们演示五种步态和二十个步态切换的数值仿真结果, 并演示了通过调节局部网络参数改变膝关节和髋关节之间的相位差。这一节中我们介绍的八元网络 CPG, 解决了第4.1.4节中的问题二, 可以作为 BioARS 四足机器人的运动控制方案。

### 4.3 本章小结

在本章中，我们的研究目标是构造一种微型组装机器人系统。我们提出了仿生组装机器人系统 BioARS 的概念和系统结构，该系统由爬虫机器人作为组装单元，系统中的八只爬虫机器人可以组装为一个四足机器人，因而该系统兼具爬虫和四足生物两种动物的优势。我们首先使用 3D 打印的方式，制造了一些爬虫机器人样机对系统概念进行验证，包括爬虫机器人的组装、站立和行走过程，并在验证实验中发现了将该系统微型化需要解决的三个重要研究问题：

- **问题一：**爬行机器人模块的形态和运动能力。
- **问题二：**组装后四足形态的运动控制。
- **问题三：**基于集群行为的系统自动化。

本论文第二章和第三章主要关注高机动微型爬行机器人设计。在这两章的研究中，我们提出的高机动微型爬行机器人 S<sup>2</sup>worm-G 可以作为 BioARS 系统微型化的组装模块，解决了上述问题一。

本章的第二节基于动力系统网络的对称性原理，通过构造全局对称性和局部对称性的方式，提出了一种用于四足机器人运动控制的八元网络 CPG 模型。该模型具有结构简单，算力需求低，可以实现多种步态和步态切换的优点。我们基于该 CPG 模型，提出了一种面向微型化的 BioARS-II 系统四足机器人的仿生运动控制架构，解决了上述问题二。



## 5 总结与展望

### 5.1 研究总结

本文的研究目标是设计一种高性能微型爬行机器人及其组装多机器人系统。针对这一目标，本文基于旋量代数，格拉斯曼-凯莱代数（Grassmann-Cayley Algebra）和非线性动力学网络对称性理论，开展了微型机器人传动机构运动学研究、折纸传动机构设计理论研究和微型多机器人系统仿生控制架构动力学研究。本文的工作对高性能微型机器人设计、微型组装机器人系统设计、微型多机器人系统控制以及推广基于折纸技术的微型机构制造技术有着重要的支撑作用。本文的主要研究成果可以总结如下：

(1) **发展了一种微型机器人传动机构设计方法，提出了一种适用于微型机器人的新型传动机构构型。**针对微型机器人传动机构构型设计难题，从模仿昆虫外骨骼结构的角度出发，基于旋量理论和构型综合方法，提出了一种新型三支链二自由度并联机构构型。基于所提出的并联构型制造了一种二自由度折纸传动机构，基于智能复合微结构制造技术和折叠组装技术，提出了制造该传动机构完整的工艺流程。制造了搭载该传动机构的高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm，并对样机的运动性能表征。所制造的机器人样机 S<sup>2</sup>worm 长 4.2 cm，质量 4.37 g，最高速度 27.4 cm/s，相对速度 6.7 倍体长每秒，具有机载的电源和控制器，是速度最快的无系留微型机器人之一。

(2) **发现并解决了微型机器人传动机构中的奇异性问题，提出了一种高性能微型机器人设计方法。**从提出的二自由度折纸传动机构入手，分析了传动机构奇异性对微型机器人运动能力的影响，采用 Grassmann-Cayley Algebra 分析了传动机构的奇异性，并结合机构的几何模型指导传动机构的设计制造过程。通过对传动机构进行刚度测试，验证了机构的奇异性问题已经得到解决。制造了搭载该传动机构的第二代高速无系留微型机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G 验证了传动机构奇异性对微型机器人运动能力的影响。所制造的机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G 长 4.0 cm，质量 4.71 g，最高速度 75 cm/s，相对速度 18.8 倍体长每秒，通过解决传动机构奇异性，S<sup>2</sup>worm-G 的速度提高到 S<sup>2</sup>worm 的 2.7 倍。

(3) **提出了一种仿生组装机器人系统架构，验证了该系统并提出了将该系统微型化的重要研究问题。**提出了 BioARS 仿生组装机器人系统架构，该系统以爬行机器人作为

组成单元，可以组装成四足机器人构型因而具有多种生物的环境适应性。通过搭建原理样机，对系统的组装、站立、行走等功能进行了初步验证，在验证过程中总结了将 BioARS 系统微型化需要突破的三个问题：1. 爬行机器人模块的形态和运动能力；2. 组装后四足形态的运动控制；3. 基于集群行为的系统自动化。

(4) 设计了一种八元网络模型用于四足机器人步态控制，给出该模型的使用方法并讨论了模型的调控策略。基于非线性动力学网络对称性理论，通过设计全局对称性和局部对称性构造了一种具有  $D_4$  对称性的八元网络。基于  $H/K$  理论验证了该网络所支持的步态种类，并基于 Stein 神经元模型构造了该网络的常微分方程。找出了模型的所有步态控制参数，并给出所有步态切换的策略。基于该八元网络模型提出了微型化的仿生组装机器人系统的仿生运动控制架构。

## 5.2 研究展望

对于微型机器人，本文从设计理论、制造工艺和控制方法等角度开展了系统的研究。对于微型组装机器人系统，本文从原理验证，仿生控制架构等角度开展了初步研究。基于本文的研究基础，后续研究内容可以从以下几个方面开展：

(1) **微型机器人的运动能力极限探究。**微型机器人运动能力主要取决于驱动器和传动系统。本文归纳了微型机器人的主要驱动技术和传动机构制造技术，发现并证明了传动机构的奇异性是限制微型机器人速度的重要因素之一。后续研究可以从驱动技术和传动技术的角度出发，进一步提高微型机器人的速度和运动能力。也可以从理论的角度出发，研究微型机器人的速度上限在哪里，以及哪些因素是限制微型机器人运动能力的主要因素。

(2) **推广所提出的传动机构和设计方法到其他微型机器人。**基于智能复合微结构制造技术的折纸传动机构在微型机器人中具有广泛的应用，本文所提出的二自由度折纸传动机构和基于奇异性分析的传动机构设计方法，可以推广和应用在其他微型机器人项目中，以提高机器人的运动能力。

(3) **实现 S<sup>2</sup>worm 的全自动化。**所提出的 S<sup>2</sup>worm 和 S<sup>2</sup>worm-G 样机虽然实现了无系留（机载的电源和控制器）和极高的速度，但是和自然界的昆虫相比，由于缺少了感知功能，其执行任务需要人为的操控。下一步工作可以通过为机器人装备机载的传感

器，实现机器人的全自动化。

(4) **构建 S<sup>2</sup>worm 集群。**在实现 S<sup>2</sup>worm 全自动化的基础 上，进一步搭建由 S<sup>2</sup>worm 所组成的微型机器人集群。将 S<sup>2</sup>worm 作为平台研究集群行为，或者为 S<sup>2</sup>worm 集群设计人造的集群行为。

(5) **搭建 BioARS-II 系统。**本文验证了 BioARS 系统的可行性，提出了高性能微型爬行机器人样机 S<sup>2</sup>worm-G 作为系统的组成单元，并设计了一种八元网络 CPG 作为 BioARS-II 的仿生运动控制架构核心。下一步研究将关注搭建 BioARS-II 的系统样机，并将八元网络及分布式控制架构部署到 S<sup>2</sup>worm-G 的机载控制器上，实现 BioARS-II 系统的各项功能以及系统的全自动化。



## 参考文献

- [1] Feynman R. There's Plenty of Room at the Bottom[G]//Feynman And Computation. 2002.
- [2] Sitti M. Voyage of the Microrobots[J]. Nature, 2009, 458(7242): 1121-1122.
- [3] Jafferis N T, Helbling E F, Karpelson M, et al. Untethered Flight of an Insect-Sized Flapping-Wing Microscale Aerial Vehicle[J]. Nature, 2019, 570(7762): 491-495.
- [4] Wood R J. The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 341-347.
- [5] Ma K Y, Chirarattananon P, Fuller S B, et al. Controlled Flight of a Biologically Inspired Insect-Scale Robot[J]. Science, 2013, 340(6132): 603-607.
- [6] Chen Y, Zhao H, Mao J, et al. Controlled Flight of a Microrobot Powered by Soft Artificial Muscles[J]. Nature, 2019, 575(7782): 324-329.
- [7] Song Y S, Sitti M. STRIDE: A Highly Maneuverable and Non-Tethered Water Strider Robot[C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007: 980-984.
- [8] Song Y S, Sitti M. Surface-Tension-Driven Biologically Inspired Water Strider Robots: Theory and Experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 578-589.
- [9] Koh J S, Yang E, Jung G P, et al. Jumping on Water: Surface Tension-Dominated Jumping of Water Striders and Robotic Insects[J]. Science, 2015, 349(6247): 517-521.
- [10] Deng X, Avadhanula S. Biomimetic Micro Underwater Vehicle with Oscillating Fin Propulsion: System Design and Force Measurement[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005: 3312-3317.
- [11] Abbott J J, Peyer K E, Lagomarsino M C, et al. How Should Microrobots Swim?[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(11-12): 1434-1447.
- [12] Tottori S, Zhang L, Qiu F, et al. Magnetic Helical Micromachines: Fabrication, Controlled Swimming, and Cargo Transport[J]. Advanced Materials, 2012, 24(6): 811-816.
- [13] Qiu T, Lee T C, Mark A G, et al. Swimming by Reciprocal Motion at Low Reynolds Number[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 5119.
- [14] Baisch A T. Design, Manufacturing, and Locomotion Studies of Ambulatory Micro-Robots[J],.
- [15] Baisch A T, Sreetharan P S, Wood R J. Biologically-Inspired Locomotion of a 2g Hexapod Robot[C] //2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010: 5360-5365.
- [16] Baisch A T, Heimlich C, Karpelson M, et al. HAMR3: An Autonomous 1.7g Ambulatory Robot[C] //2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011: 5073-5079.
- [17] Ozcan O, Baisch A T, Ithier D, et al. Powertrain Selection for a Biologically-Inspired Miniature Quadruped Robot[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014: 2398-2405.
- [18] 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.
- [19] Doshi N, Goldberg B, Sahai R, et al. Model Driven Design for Flexure-Based Microrobots[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015: 4119-4126.

- [20] 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.
- [21] Goldberg B, Zufferey R, Doshi N, et al. Power and Control Autonomy for High-Speed Locomotion With an Insect-Scale Legged Robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(2): 987-993.
- [22] Chen Y, Doshi N, Goldberg B, et al. Controllable Water Surface to Underwater Transition through Electrowetting in a Hybrid Terrestrial-Aquatic Microrobot[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2495.
- [23] de Rivaz S D, Goldberg B, Doshi N, et al. Inverted and Vertical Climbing of a Quadrupedal Micro-robot Using Electroadhesion[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaau3038.
- [24] Jayaram K, Shum J, Castellanos S, et al. Scaling down an Insect-Size Microrobot, HAMR-VI into HAMR-Jr[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2020: 10305-10311.
- [25] Hoover A M, Steltz E, Fearing R S. RoACH: An Autonomous 2.4g Crawling Hexapod Robot[C]// 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008: 26-33.
- [26] Birkmeyer P, Peterson K, Fearing R S. DASH: A Dynamic 16g Hexapedal Robot[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2009: 2683-2689.
- [27] Hoover A M, Burden S, Fu X Y, et al. Bio-Inspired Design and Dynamic Maneuverability of a Minimally Actuated Six-Legged Robot[C]//2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. 2010: 869-876.
- [28] Pullin A, Kohut N, Zarrouk D, et al. Dynamic Turning of 13 Cm Robot Comparing Tail and Differential Drive[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2012: 5086-5093.
- [29] Haldane D W, Peterson K C, Garcia Bermudez F L, et al. Animal-Inspired Design and Aerodynamic Stabilization of a Hexapedal Millirobot[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 3279-3286.
- [30] Kohut N J, Hoover A M, Ma K Y, et al. MEDIC: A Legged Millirobot Utilizing Novel Obstacle Traversal[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011: 802-808.
- [31] Kohut N J, Zarrouk D, Peterson K C, et al. Aerodynamic Steering of a 10 Cm High-Speed Running Robot[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013: 5593-5599.
- [32] Rose C J, Mahmoudieh P, Fearing R S. Coordinated Launching of an Ornithopter with a Hexapedal Robot[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015: 4029-4035.
- [33] Julian R C, Rose C J, Hu H, et al. Cooperative Control and Modeling for Narrow Passage Traversal with an Ornithopter MAV and Lightweight Ground Station[C]//AAMAS '13: Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2013: 103-110.
- [34] Casarez C S, Fearing R S. Step Climbing Cooperation Primitives for Legged Robots with a Reversible Connection[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016: 3791-3798.
- [35] Wood R J, Avadhanula S, Sahai R, et al. Microrobot Design Using Fiber Reinforced Composites[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(5).
- [36] Aukes D M, Wood R J. Algorithms for Rapid Development of Inherently-Manufacturable Laminate Devices[C]//ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. 2014.

- [37] Sreetharan P S, Whitney J P, Wood R J. Monolithic Fabrication of Three-Dimensional Structures: US8834666B2[P]. 2014.
- [38] Sreetharan P S, Whitney J P, Strauss M D, et al. Monolithic Fabrication of Millimeter-Scale Machines[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(5): 055027.
- [39] McClintock H, Temel F Z, Doshi N, et al. The milliDelta: A High-Bandwidth, High-Precision, Millimeter-Scale Delta Robot[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14).
- [40] Clavel R. Device for the Movement and Positioning of an Element in Space: US4976582A[P]. 1990.
- [41] Pierrot F, Reynaud C, Fournier A. DELTA: A Simple and Efficient Parallel Robot[J]. *Robotica*, 1990, 8(2): 105-109.
- [42] Suzuki H, Wood R J. Origami-Inspired Miniature Manipulator for Teleoperated Microsurgery[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2(8): 437-446.
- [43] Mintchev S, Salerno M, Cherpillod A, et al. A Portable Three-Degrees-of-Freedom Force Feedback Origami Robot for Human – Robot Interactions[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2019, 1(12): 584-593.
- [44] York P A, Peña R, Kent D, et al. Microrobotic Laser Steering for Minimally Invasive Surgery[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(50).
- [45] Zhakypov Z, Mori K, Hosoda K, et al. Designing Minimal and Scalable Insect-Inspired Multi-Locomotion Millirobots[J]. *Nature*, 2019, 571(7765): 381-386.
- [46] Abondance T, Jayaram K, Jafferis N T, et al. Piezoelectric Grippers for Mobile Micromanipulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4407-4414.
- [47] Salerno M, Zhang K, Menciassi A, et al. A Novel 4-DOF Origami Grasper With an SMA-Actuation System for Minimally Invasive Surgery[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(3): 484-498.
- [48] Zhakypov Z, Falahi M, Shah M, et al. The Design and Control of the Multi-Modal Locomotion Origami Robot, Tribot[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015: 4349-4355.
- [49] Zhakypov Z, Belke C H, Paik J. Tribot: A Deployable, Self-Righting and Multi-Locomotive Origami Robot[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017: 5580-5586.
- [50] Zhakypov Z, Paik J. Design Methodology for Constructing Multimaterial Origami Robots and Machines[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(1): 151-165.
- [51] Kowsari K, Akbari S, Wang D, et al. High-Efficiency High-Resolution Multimaterial Fabrication for Digital Light Processing-Based Three-Dimensional Printing[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2018, 5(3): 185-193.
- [52] Ge Q, Chen Z, Cheng J, et al. 3D Printing of Highly Stretchable Hydrogel with Diverse UV Curable Polymers[J]. *Science Advances*, 2021, 7(2): eaba4261.
- [53] Wang D, Wang J, Shen Z, et al. Soft Actuators and Robots Enabled by Additive Manufacturing[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2023, 6(1): null.
- [54] Zeng H, Wasylczyk P, Parmeggiani C, et al. Light-Fueled Microscopic Walkers[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(26): 3883-3887.
- [55] Pierre R S, Bergbreiter S. Gait Exploration of Sub-2 g Robots Using Magnetic Actuation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(1): 34-40.

- [56] St. Pierre R, Gosrich W, Bergbreiter S. A 3D-printed 1 Mg Microrobot Running at 15 Body Lengths per Second[C]//2018 Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop Technical Digest. 2018: 59-62.
- [57] Gomez H C, Schindler C B, Clark H L, et al. Zero Insertion Force MEMS Socket: 3d Multi-Chip Assembly for Microrobotics[C]//2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXXIII). 2019: 1732-1735.
- [58] Hollar S, Flynn A, Bellew C, et al. Solar Powered 10 Mg Silicon Robot[C]//IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto. 2003: 706-711.
- [59] Mehta A M, Pister K S J. Flexure-Based Two Degree-of-Freedom Legs for Walking Microrobots[C] //ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2007: 441-450.
- [60] Contreras D S, Pister K S J. Durability of Silicon Pin-Joints for Microrobotics[C]//2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS). 2016: 1-6.
- [61] Contreras D S, Pister K S J. Dynamics of Electrostatic Inchworm Motors for Silicon Microrobots[C] //2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS). 2017: 1-6.
- [62] Yang B, Wang G, Calandra R, et al. Learning Flexible and Reusable Locomotion Primitives for a Microrobot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1904-1911.
- [63] Drew D, Pister K. TAKEOFF OF A FLYING MICROROBOT WITH COTS SENSOR PAYLOAD USING ELECTROHYDRODYNAMIC THRUST PRODUCED BY SUB-MILLIMETER CORONA DISCHARGE[C]//2018 Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop Technical Digest. 2018: 67-70.
- [64] Greenspun J, Pister K. FIRST LEAPS OF AN ELECTROSTATIC INCHWORM MOTOR-DRIVEN JUMPING MICROROBOT[C]//2018 Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop Technical Digest. 2018: 159-162.
- [65] Karpelson M, Wei G Y, Wood R J. A Review of Actuation and Power Electronics Options for Flapping-Wing Robotic Insects[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008: 779-786.
- [66] Zhang J, Sheng J, O'Neill C T, et al. Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019, 35(3): 761-781.
- [67] Peng J, Chen X. A Survey of Modeling and Control of Piezoelectric Actuators[J]., 2013, 2013.
- [68] Wood R J, Steltz E, Fearing R S. Optimal Energy Density Piezoelectric Bending Actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 119(2): 476-488.
- [69] Iyer V, Najafi A, James J, et al. Wireless Steerable Vision for Live Insects and Insect-Scale Robots[J]. Science Robotics, 2020, 5(44): eabb0839.
- [70] Deng J, Liu Y, Chen W, et al. A XY Transporting and Nanopositioning Piezoelectric Robot Operated by Leg Rowing Mechanism[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(1): 207-217.
- [71] Liu Y, Li J, Deng J, et al. Arthropod-Metamerism-Inspired Resonant Piezoelectric Millirobot[J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 3(8): 2100015.
- [72] Nguyen X T, Calderón A A, Rigo A, et al. SMALLBug: A 30-Mg Crawling Robot Driven by a High-Frequency Flexible SMA Microactuator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6796-6803.

- [73] Yang X, Chang L, Pérez-Arcibia N O. An 88-Milligram Insect-Scale Autonomous Crawling Robot Driven by a Catalytic Artificial Muscle[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45).
- [74] Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A Method for Building Self-Folding Machines[J]. *Science*, 2014, 345(6197): 644-646.
- [75] Miyashita S, Guitron S, Li S, et al. Robotic Metamorphosis by Origami Exoskeletons[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(10): eaao4369.
- [76] Firouzeh A, Salerno M, Paik J. Stiffness Control With Shape Memory Polymer in Underactuated Robotic Origamis[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(4): 765-777.
- [77] Zou Y, Zhang W, Zhang Z. Liftoff of an Electromagnetically Driven Insect-Inspired Flapping-Wing Robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(5): 1285-1289.
- [78] Wang C, Zhang W, Hu J, et al. A Modified Quasisteady Aerodynamic Model for a Sub-100 Mg Insect-Inspired Flapping-Wing Robot[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2020, 2020: 1-12.
- [79] Wang C, Zhang W, Zou Y, et al. A Sub-100 Mg Electromagnetically Driven Insect-inspired Flapping-wing Micro Robot Capable of Liftoff and Control Torques Modulation[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(6): 1085-1095.
- [80] Roll J A, Cheng B, Deng X. An Electromagnetic Actuator for High-Frequency Flapping-Wing Microair Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(2): 400-414.
- [81] Roll J A, Cheng B, Deng X. Design, Fabrication, and Experiments of an Electromagnetic Actuator for Flapping Wing Micro Air Vehicles[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 809-815.
- [82] Cheng B, Roll J A, Deng X. Modeling and Optimization of an Electromagnetic Actuator for Flapping Wing Micro Air Vehicle[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 4035-4041.
- [83] Wu Y, Yim J K, Liang J, et al. Insect-Scale Fast Moving and Ultrarobust Soft Robot[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(32): eaax1594.
- [84] Liang J, Wu Y, Yim J K, et al. Electrostatic Footpads Enable Agile Insect-Scale Soft Robots with Trajectory Control[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(55).
- [85] Suo Z. Theory of Dielectric Elastomers[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 549-578.
- [86] Duduta M, Clarke D R, Wood R J. A High Speed Soft Robot Based on Dielectric Elastomer Actuators[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017: 4346-4351.
- [87] Tang C, Du B, Jiang S, et al. A Pipeline Inspection Robot for Navigating Tubular Environments in the Sub-Centimeter Scale[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): eabm8597.
- [88] Ji X, Liu X, Cacucciolo V, et al. An Autonomous Untethered Fast Soft Robotic Insect Driven by Low-Voltage Dielectric Elastomer Actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37).
- [89] Gu G, Zou J, Zhao R, et al. Soft Wall-Climbing Robots[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaat2874.
- [90] Cao J, Qin L, Liu J, et al. Untethered Soft Robot Capable of Stable Locomotion Using Soft Electrostatic Actuators[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 21: 9-16.
- [91] Zhu Y, Qi M, Liu Z, et al. A 5-Mm Untethered Crawling Robot via Self-Excited Electrostatic Vibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(2): 719-730.

- [92] Mao G, Schiller D, Danner D, et al. Ultrafast Small-Scale Soft Electromagnetic Robots[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4456.
- [93] Wang H, York P, Chen Y, et al. Biologically Inspired Electrostatic Artificial Muscles for Insect-Sized Robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2021, 40(6-7): 895-922.
- [94] Qi M, Zhu Y, Liu Z, et al. A Fast-Moving Electrostatic Crawling Insect[C]//2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2017: 761-764.
- [95] Zhu Y, Liu Z, Qi M, et al. Modeling and Approximate Analytical Solution of Nonlinear Behaviors for a Self-Excited Electrostatic Actuator[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103(1): 279-292.
- [96] Mao G, Drack M, Karami-Mosammam M, et al. Soft Electromagnetic Actuators[J]. *Science Advances*, 2020, 6(26): eabc0251.
- [97] Wang H, Yamamoto A. Analyses and Solutions for the Buckling of Thin and Flexible Electrostatic Inchworm Climbing Robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(4): 889-900.
- [98] Hu W, Lum G Z, Mastrangeli M, et al. Small-Scale Soft-Bodied Robot with Multimodal Locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81-85.
- [99] Kim Y, Yuk H, Zhao R, et al. Printing Ferromagnetic Domains for Untethered Fast-Transforming Soft Materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [100] James J, Iyer V, Chukewad Y, et al. Liftoff of a 190 Mg Laser-Powered Aerial Vehicle: The Lightest Wireless Robot to Fly[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2018: 3587-3594.
- [101] Bhushan P, Tomlin C J. Design of the First Sub-Milligram Flapping Wing Aerial Vehicle[C]//2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2019: 2-5.
- [102] Shin B, Ha J, Lee M, et al. Hygrobot: A Self-Locomotive Ratcheted Actuator Powered by Environmental Humidity[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14): eaar2629.
- [103] St. Pierre R, Bergbreiter S. Toward Autonomy in Sub-Gram Terrestrial Robots[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2019, 2(1): 231-252.
- [104] Rubenstein M, Ahler C, Nagpal R. Kilobot: A Low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviors[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2012: 3293-3298.
- [105] Rubenstein M, Ahler C, Hoff N, et al. Kilobot: A Low Cost Robot with Scalable Operations Designed for Collective Behaviors[J]. *Robotics and Autonomous Systems. Reconfigurable Modular Robotics* 2014, 62(7): 966-975.
- [106] Yim M, Shen W m, Salemi B, et al. Modular Self-Reconfigurable Robot Systems [Grand Challenges of Robotics][J]. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2007, 14(1): 43-52.
- [107] Kotay K, Rus D, Vona M, et al. The Self-Reconfiguring Robotic Molecule[C]//Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146): vol. 1. 1998: 424-431 vol.1.
- [108] Gilpin K, Kotay K, Rus D, et al. Miche: Modular Shape Formation by Self-Disassembly[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(3-4): 345-372.
- [109] Romanishin J W, Gilpin K, Rus D. M-Blocks: Momentum-driven, Magnetic Modular Robots[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013: 4288-4295.
- [110] Yim M, Duff D, Roufas K. PolyBot: A Modular Reconfigurable Robot[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065): vol. 1. 2000: 514-520 vol.1.

- [111] Moeckel R, Jaquier C, Drapet K, et al. Exploring Adaptive Locomotion with YaMoR, a Novel Autonomous Modular Robot with Bluetooth Interface[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2006, 33(4): 285-290.
- [112] Zykov V, Mytilinaios E, Desnoyer M, et al. Evolved and Designed Self-Reproducing Modular Robotics[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(2): 308-319.
- [113] Zykov V, Chan A, Lipson H. Molecubes: An Open-Source Modular Robotics Kit[J].
- [114] Fukuda T, Nakagawa S, Kawauchi Y, et al. Structure Decision Method for Self Organising Robots Based on Cell Structures-CEBOT[C]//1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1989: 695, 696, 697, 698, 699, 700-695, 696, 697, 698, 699, 700.
- [115] Mondada F, Guignard A, Bonani M, et al. SWARM-BOT: From Concept to Implementation[C] //Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453): vol. 2. 2003: 1626-1631 vol.2.
- [116] Saldaña D, Gabrich B, Li G, et al. ModQuad: The Flying Modular Structure That Self-Assembles in Midair[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2018: 691-698.
- [117] Salemi B, Moll M, Shen W m. SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006: 3636-3641.
- [118] Davey J, Kwok N, Yim M. Emulating Self-Reconfigurable Robots - Design of the SMORES System[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012: 4464-4469.
- [119] Murata S, Yoshida E, Kamimura A, et al. M-TRAN: Self-Reconfigurable Modular Robotic System[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7(4): 431-441.
- [120] Romanishin J W, Gilpin K, Claici S, et al. 3D M-Blocks: Self-reconfiguring Robots Capable of Locomotion via Pivoting in Three Dimensions[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015: 1925-1932.
- [121] Özdemir A, Romanishin J W, Groß R, et al. Decentralized Gathering of Stochastic, Oblivious Agents on a Grid: A Case Study with 3D M-Blocks[C]//2019 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS). 2019: 245-251.
- [122] Romanishin J W, Mamish J, Rus D. Decentralized Control for 3D M-Blocks for Path Following, Line Formation, and Light Gradient Aggregation[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019: 4862-4868.
- [123] Kurokawa H, Kamimura A, Yoshida E, et al. M-TRAN II: Metamorphosis from a Four-Legged Walker to a Caterpillar[C]//Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453): vol. 3. 2003: 2454-2459 vol.3.
- [124] Kamimura A, Kurokawa H, Yoshida E, et al. Automatic Locomotion Design and Experiments for a Modular Robotic System[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(3): 314-325.
- [125] Kurokawa H, Haruhisa Kurokawa, Tomita K, et al. Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(3): 373-386.
- [126] Seo J, Paik J, Yim M. Modular Reconfigurable Robotics[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2019, 2(1): 63-88.
- [127] Tahirovic A, Magnani G. General Framework for Mobile Robot Navigation Using Passivity-Based MPC[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(1): 184-190.

- [128] Incremona G P, Ferrara A, Magni L. MPC for Robot Manipulators With Integral Sliding Modes Generation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(3): 1299-1307.
- [129] Bjelonic M, Grandia R, Geilinger M, et al. Offline Motion Libraries and Online MPC for Advanced Mobility Skills[J]. The International Journal of Robotics Research, 2022, 41(9-10): 903-924.
- [130] Balch T, Arkin R. Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [131] Arkin R C. Behavior-Based Robotics[M]. 1999.
- [132] Ijspeert A J. Central Pattern Generators for Locomotion Control in Animals and Robots: A Review[J]. Neural Networks. Robotics and Neuroscience 2008, 21(4): 642-653.
- [133] Delcomyn F. Neural Basis of Rhythmic Behavior in Animals[J]. Science, 1980, 210(4469): 492-498.
- [134] Cohen A H, Wallén P. The Neuronal Correlate of Locomotion in Fish[J]. Experimental Brain Research, 1980, 41(1): 11-18.
- [135] Soffe S R, Roberts A. Tonic and Phasic Synaptic Input to Spinal Cord Motoneurons during Fictive Locomotion in Frog Embryos[J]. Journal of Neurophysiology, 1982, 48(6): 1279-1288.
- [136] FitzHugh R. Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane[J]. Biophysical Journal, 1961, 1(6): 445-466.
- [137] Nagumo J, Arimoto S, Yoshizawa S. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon[J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(10): 2061-2070.
- [138] Stein R B, Leung K V, Mangeron D, et al. Improved Neuronal Models for Studying Neural Networks[J]. Kybernetik, 1974, 15(1): 1-9.
- [139] Stein R B, Leung K V, Ouzt M N. Properties of Small Neural Networks[J]. Kybernetik, 1974: 8.
- [140] Matsuoka K. Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation[J]. Biological Cybernetics, 1985, 52(6): 367-376.
- [141] Matsuoka K. Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators[J]. Biological Cybernetics, 1987, 56(5): 345-353.
- [142] van der Pol B. LXXXVIII On Relaxation-Oscillations[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1926, 2(11): 978-992.
- [143] Bay J S, Hemami H. Modeling of a Neural Pattern Generator with Coupled Nonlinear Oscillators[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1987, BME-34(4): 297-306.
- [144] Buchli J, Ijspeert A J. Distributed Central Pattern Generator Model for Robotics Application Based on Phase Sensitivity Analysis[C]//Ijspeert A J, Murata M, Wakamiya N. Lecture Notes in Computer Science: Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology. 2004: 333-349.
- [145] Hodgkin A L, Huxley A F. A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve[J]. The Journal of Physiology, 1952, 117(4): 500-544.
- [146] FITZHUGH R. Thresholds and Plateaus in the Hodgkin-Huxley Nerve Equations[J]. The Journal of general physiology, 1960, 43: 867-896.
- [147] Taga G. A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion[J]. Biological Cybernetics, 1995, 73(2): 97-111.
- [148] Golubitsky M, Stewart I, Buono P L, et al. Symmetry in Locomotor Central Pattern Generators and Animal Gaits[J]. Nature, 1999, 401(6754): 693-695.

- [149] Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. AmphiBot I: An Amphibious Snake-like Robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems. Biomimetic Robotics* 2005, 50(4): 163-175.
- [150] Stefanini C, Orlandi G, Menciassi A, et al. A Mechanism for Biomimetic Actuation in Lamprey-like Robots[C]//The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. 2006: 579-584.
- [151] Crespi A, Ijspeert A J. Online Optimization of Swimming and Crawling in an Amphibious Snake Robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(1): 75-87.
- [152] Kimura H, Fukuoka Y, Konaga K. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot Using a Neural System Model[J]. *Advanced Robotics*, 2001, 15(8): 859-878.
- [153] Fukuoka Y, Kimura H, Cohen A H. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(3-4): 187-202.
- [154] Kimura H, Fukuoka Y, Cohen A H. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(5): 475-490.
- [155] Chiel H, Beer R, Quinn R, et al. Robustness of a Distributed Neural Network Controller for Locomotion in a Hexapod Robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(3): 293-303.
- [156] Cruse H, Kindermann T, Schumm M, et al. Walknet—a Biologically Inspired Network to Control Six-Legged Walking[J]. *Neural Networks*, 1998, 11(7): 1435-1447.
- [157] Zhong B, Zhang S, Xu M, et al. On a CPG-Based Hexapod Robot: AmphiHex-II With Variable Stiffness Legs[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 542-551.
- [158] Collins J J, Richmond S A. Hard-Wired Central Pattern Generators for Quadrupedal Locomotion[J]. *Biological Cybernetics*, 1994, 71(5): 375-385.
- [159] Liu C, Chen Q, Wang D. CPG-Inspired Workspace Trajectory Generation and Adaptive Locomotion Control for Quadruped Robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2011, 41(3): 867-880.
- [160] Yu J, Tan M, Chen J, et al. A Survey on CPG-Inspired Control Models and System Implementation[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25(3): 441-456.
- [161] Manoonpong P, Pasemann F, Roth H. Modular Reactive Neurocontrol for Biologically Inspired Walking Machines[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(3): 301-331.
- [162] Manoonpong P, Pasemann F, Wörgötter F. Reactive Neural Control for Phototaxis and Obstacle Avoidance Behavior of Walking Machines[J]. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2007, 1(11): 6.
- [163] Manoonpong P, Pasemann F, Worgötter F. Sensor-Driven Neural Control for Omnidirectional Locomotion and Versatile Reactive Behaviors of Walking Machines[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008: 24.
- [164] Steingrube S, Timme M, Wörgötter F, et al. Self-Organized Adaptation of a Simple Neural Circuit Enables Complex Robot Behaviour[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(3): 224-230.
- [165] Manoonpong P, Parlitz U, Wörgötter F. Neural Control and Adaptive Neural Forward Models for Insect-like, Energy-Efficient, and Adaptable Locomotion of Walking Machines[J]. *Frontiers in Neural Circuits*, 2013, 7.
- [166] Ijspeert A J, Crespi A, Ryczko D, et al. From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model[J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1416-1420.

- [167] Crespi A, Karakasiliotis K, Guignard A, et al. Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(2): 308-320.
- [168] Bayat B, Crespi A, Ijspeert A. Envirobot: A Bio-Inspired Environmental Monitoring Platform[C]// 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). 2016: 381-386.
- [169] Saito K, Sugita K, Ishihara Y, et al. Insect-Type MEMS Microrobot with Mountable Bare Chip IC of Artificial Neural Networks[J]. Artificial Life and Robotics, 2017, 22(1): 118-124.
- [170] Drotman D, Jadhav S, Sharp D, et al. Electronics-Free Pneumatic Circuits for Controlling Soft-Legged Robots[J]. Science Robotics, 2021, 6(51).
- [171] Rothemund P, Ainla A, Belding L, et al. A Soft, Bistable Valve for Autonomous Control of Soft Actuators[J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar7986.
- [172] Alexander R M. Principles of Animal Locomotion[M]. 2006.
- [173] Buono P L, Golubitsky M. Models of Central Pattern Generators for Quadruped Locomotion I. Primary Gaits[J]. Journal of Mathematical Biology, 2001, 42(4): 291-326.
- [174] Golubitsky M, Stewart I. Nonlinear Dynamics of Networks: The Groupoid Formalism[J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 2006, 43(3): 305-364.
- [175] Koh J S, Cho K J. Omegabot : Biomimetic Inchworm Robot Using SMA Coil Actuator and Smart Composite Microstructures (SCM)[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2009: 1154-1159.
- [176] Bhushan P, Tomlin C. Design of an Electromagnetic Actuator for an Insect-Scale Spinning-Wing Robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4188-4193.
- [177] Bhushan P, Tomlin C. An Insect-Scale Self-Sufficient Rolling Microrobot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(1): 167-172.
- [178] Li T, Zou Z, Mao G, et al. Agile and Resilient Insect-Scale Robot[J]. Soft Robotics, 2018, 6(1): 133-141.
- [179] Merlet J P. Parallel Robots: Open Problems[C]//Hollerbach J M, Koditschek D E. Robotics Research. 2000: 27-32.
- [180] Zlatanov D. A Family of New Parallel Architectures with Four Degrees of Freedom[J]. Electronic Journal of Computational Kinematics, 2001, 1: 1-10.
- [181] Ball R S. A Treatise on the Theory of Screws[M]. 1998.
- [182] Hunt K H, Hunt K H, Hunt K H. Kinematic Geometry of Mechanisms[M]. 1978.
- [183] Huang Z, Li Q. General Methodology for Type Synthesis of Symmetrical Lower-Mobility Parallel Manipulators and Several Novel Manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-145.
- [184] Huang Z, Li Q C. Type Synthesis of Symmetrical Lower-Mobility Parallel Mechanisms Using the Constraint-Synthesis Method[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 59-79.
- [185] Wood R J, Finio B, Karpelson M, et al. Progress on Pico Air Vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(11): 1292-1302.
- [186] Contreras D S, Drew D S, Pister K S J. First Steps of a Millimeter-Scale Walking Silicon Robot[C]// 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2017: 910-913.

- [187] Liu Y, Chen Y, Feng B, et al. S2worm: A Fast-Moving Untethered Insect-Scale Robot With 2-DoF Transmission Mechanism[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 6758-6765.
- [188] Arabagi V, Hines L, Sitti M. Design and Manufacturing of a Controllable Miniature Flapping Wing Robotic Platform[J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(6): 785-800.
- [189] Chen Y, Liu Y, Liu T, et al. Design and Analysis of an Untethered Micro Flapping Robot Which Can Glide on the Water[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(8): 1749-1759.
- [190] Salerno M, Paik J, Mintchev S. Ori-Pixel, a Multi-DoFs Origami Pixel for Modular Reconfigurable Surfaces[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6988-6995.
- [191] Liu G, Lou Y, Li Z. Singularities of Parallel Manipulators: A Geometric Treatment[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 579-594.
- [192] Merlet J P. Parallel Robots[M]. 2006.
- [193] Gosselin C, Angeles J. Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
- [194] Merlet J P. Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry[J]. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(5): 45-56.
- [195] Ben-Horin P, Shoham M. Application of Grassmann—Cayley Algebra to Geometrical Interpretation of Parallel Robot Singularities[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(1): 127-141.
- [196] White N L. Grassmann—Cayley Algebra and Robotics[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1994, 11(1): 91-107.
- [197] Amine S, Tale Masouleh M, Caro S, et al. Singularity Analysis of 3T2R Parallel Mechanisms Using Grassmann—Cayley Algebra and Grassmann Geometry[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 52: 326-340.
- [198] Howell L L. Compliant Mechanisms[M]. 2001.
- [199] Jensen T F, Holm-Jensen I. Energetic Cost of Running in Workers of Three Ant Species, *Formica Fusca* L., *Formica Rufa* L., and *Camponotus Herculeanus* L. (Hymenoptera, Formicidae)[J]. Journal of comparative physiology, 1980, 137(2): 151-156.
- [200] Lighton J R B, Bartholomew G A, Feener D H. Energetics of Locomotion and Load Carriage and a Model of the Energy Cost of Foraging in the Leaf-Cutting Ant *Atta Colombica* Guer[J]. Physiological Zoology, 1987, 60(5): 524-537.
- [201] Full R, Zuccarello D, Tullis A. Effect of Variation in Form on the Cost of Terrestrial Locomotion[J]. The Journal of experimental biology, 1990, 150: 233-46.
- [202] Fewell J H, Harrison J F, Lighton J R B, et al. Foraging Energetics of the Ant, *Paraponera Clavata*[J]. Oecologia, 1996, 105(4): 419-427.
- [203] Lipp A, Wolf H, Lehmann F O. Walking on Inclines: Energetics of Locomotion in the Ant *Camponotus*[J]. The Journal of experimental biology, 2005, 208: 707-19.
- [204] Reinhardt L, Blickhan R. Level Locomotion in Wood Ants: Evidence for Grounded Running[J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(13): 2358-2370.
- [205] Rios S A, Fleming A J, Yong Y K. Monolithic Piezoelectric Insect With Resonance Walking[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2): 524-530.

- [206] Morrey J, Lambrecht B, Horchler A, et al. Highly Mobile and Robust Small Quadruped Robots[C] //Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453): vol. 1. 2003: 82-87 vol.1.
- [207] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot[J]. IFAC Proceedings Volumes. 17th IFAC World Congress 2008, 41(2): 10822-10825.
- [208] Kaneko K, Harada K, Kanehiro F, et al. Humanoid Robot HRP-3[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008: 2471-2478.
- [209] Felton S M, Tolley M T, Onal C D, et al. Robot Self-Assembly by Folding: A Printed Inchworm Robot[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 277-282.
- [210] Wang W, Lee J Y, Rodrigue H, et al. Locomotion of Inchworm-Inspired Robot Made of Smart Soft Composite (SSC)[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(4): 046006.
- [211] Wei H, Cai Y, Li H, et al. Sambot: A Self-Assembly Modular Robot for Swarm Robot[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2010: 66-71.
- [212] Pacheco M, Moghadam M, Magnússon A, et al. Fable: Design of a Modular Robotic Playware Platform[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 544-550.
- [213] Kwok S W, Morin S A, Mosadegh B, et al. Magnetic Assembly of Soft Robots with Hard Components[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2180-2187.
- [214] Li S, Batra R, Brown D, et al. Particle Robotics Based on Statistical Mechanics of Loosely Coupled Components[J]. Nature, 2019, 567(7748): 361-365.
- [215] Xie H, Sun M, Fan X, et al. Reconfigurable Magnetic Microrobot Swarm: Multimode Transformation, Locomotion, and Manipulation[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): eaav8006.
- [216] Grillner S, Wallén P. Central Pattern Generators for Locomotion, with Special Reference to Vertebrates[J]. Annual Review of Neuroscience, 1985, 8(1): 233-261.
- [217] Grillner S, Parker D, El Manira A. Vertebrate Locomotion-A Lamprey Perspective[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1998, 860(1): 1-18.
- [218] Thandiackal R, Melo K, Paez L, et al. Emergence of Robust Self-Organized Undulatory Swimming Based on Local Hydrodynamic Force Sensing[J]. Science Robotics, 2021, 6(57): eabf6354.
- [219] Chen W, Ren G, Zhang J, et al. Smooth Transition between Different Gaits of a Hexapod Robot via a Central Pattern Generators Algorithm[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 67(3): 255-270.
- [220] Yu H, Gao H, Ding L, et al. Gait Generation With Smooth Transition Using CPG-Based Locomotion Control for Hexapod Walking Robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5488-5500.
- [221] Bellegarda G, Ijspeert A. CPG-RL: Learning Central Pattern Generators for Quadruped Locomotion[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 12547-12554.
- [222] Collins J J, Stewart I N. Coupled Nonlinear Oscillators and the Symmetries of Animal Gaits[J]. Journal of Nonlinear Science, 1993, 3(1): 349-392.
- [223] Billard A, Ijspeert A. Biologically Inspired Neural Controllers for Motor Control in a Quadruped Robot[C]//Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium: vol. 6. 2000: 637-641 vol.6.

- [224] Golubitsky M, Stewart I, Török A. Patterns of Synchrony in Coupled Cell Networks with Multiple Arrows[J]. *Siam Journal on Applied Dynamical Systems*, 2005, 4(1): 78-100.
- [225] Hodgkin A L, Horowicz P. Potassium Contractures in Single Muscle Fibres[J]. *The Journal of Physiology*, 1960, 153(2): 386-403.



## 附录一

### A superbracket 展开公式

参考 Ben-Horin<sup>[195]</sup>的工作，六条射影线中每条取出两个射影点，共十二个点。这十二个射影点的 superbracket 的展开式共计 24 个多项式，其通用形式为：

$$\begin{aligned}
 & [[ab, cd, ef, gh, ij, kl]] \\
 &= - \sum_{1,2} \text{sign}(1, 2) [abcd] [ef^{12}g^{12}i][hjkl] \\
 &\quad + \sum_{3,4} \text{sign}(3, 4) [abce] [df^{34}gh]^{34}[ijkl] \\
 &\quad - \sum_{5,6,7} \text{sign}(5, 6, 7) [abce]^{56} [dghi]^{57} [fjkl]^{67} \\
 &\quad + \sum_{8,9,10} \text{sign}(8, 9, 10) [abcg]^{89} [defi]^{810} [hjkl]^{910}
 \end{aligned} \tag{A-1}$$

### B Mathematica 代码

我们将上述公式 A-1 编写成 Mathematica 代码（软件版本为 11.3），以计算我们提出的二自由度折纸传动机构的 superbracket。我们提出的 superbracket 形式为（公式 3-12）：

$$\text{Superbracket} = [[A_1e_1, A_1e_2, A_1e_3, C_2s_2, e_1e_2, C_3s_3]]. \tag{B-1}$$

所编制的代码如下：

```





```

**SB06** =  $-\{\{a, b, d, e\}, \{c, f, g, h\}, \{i, j, k, l\}\};$

**SB07** =  $-\{\{a, b, c, f\}, \{d, e, g, h\}, \{i, j, k, l\}\};$

**SB08** =  $+\{\{a, b, d, f\}, \{c, e, g, h\}, \{i, j, k, l\}\};$

**SB09** =  $-\{\{a, b, c, e\}, \{d, g, h, i\}, \{f, j, k, l\}\};$

**SB10** =  $+\{\{a, b, d, e\}, \{c, g, h, i\}, \{f, j, k, l\}\};$

**SB11** =  $+\{\{a, b, c, f\}, \{d, g, h, i\}, \{e, j, k, l\}\};$

**SB12** =  $+\{\{a, b, c, e\}, \{d, g, h, j\}, \{f, i, k, l\}\};$

**SB13** =  $-\{\{a, b, d, f\}, \{c, g, h, i\}, \{e, j, k, l\}\};$

**SB14** =  $-\{\{a, b, d, e\}, \{c, g, h, j\}, \{f, i, k, l\}\};$

**SB15** =  $-\{\{a, b, c, f\}, \{d, g, h, j\}, \{e, i, k, l\}\};$

**SB16** =  $+\{\{a, b, d, f\}, \{c, g, h, j\}, \{e, i, k, l\}\};$

**SB17** =  $+\{\{a, b, c, g\}, \{d, e, f, i\}, \{h, j, k, l\}\};$

**SB18** =  $-\{\{a, b, d, g\}, \{c, e, f, i\}, \{h, j, k, l\}\};$

**SB19** =  $-\{\{a, b, c, h\}, \{d, e, f, i\}, \{g, j, k, l\}\};$

**SB20** =  $-\{\{a, b, c, g\}, \{d, e, f, j\}, \{h, i, k, l\}\};$

**SB21** =  $+\{\{a, b, d, h\}, \{c, e, f, i\}, \{g, j, k, l\}\};$

**SB22** =  $+\{\{a, b, d, g\}, \{c, e, f, j\}, \{h, i, k, l\}\};$

**SB23** =  $+\{\{a, b, c, h\}, \{d, e, f, j\}, \{g, i, k, l\}\};$

**SB24** =  $-\{\{a, b, d, h\}, \{c, e, f, j\}, \{g, i, k, l\}\};$

(\*以上为superbracket通用展开式中的 24 个多项式\*)

(\*代入二自由度传动机构中六个力旋量的射影线表示形式\*)

**Sc1** = {A1, e1}; **Sc2** = {A1, e2}; **Sc3** = {A1, e3}; **Sc4** = {C2, s2}; **Sa1** = {e1, e2}; **Sa2** = {C3, s3};

(\*代入六个力旋量的射影线中的十二个点\*)

$\{a, b\} = \text{Sc1}; \{c, d\} = \text{Sc2}; \{e, f\} = \text{Sc3}; \{g, h\} = \text{Sc4}; \{i, j\} = \text{Sa1}; \{k, l\} = \text{Sa2};$

(\*生成 superbracket 表示形式\*)

**SuperBracket** = {SB01, SB02, SB03, SB04,

SB05, SB06, SB07, SB08,

SB09, SB10, SB11, SB12,

SB13, SB14, SB15, SB16,

SB17, SB18, SB19, SB20,

SB21, SB22, SB23, SB24};

**SBOP** = Array[sbop, 24];

(\*判断 superbracket 中是否有重复单元，筛选出没有重复的组合\*)

For[ii = 0, ii ≤ 23, ii++;

tet1 = SuperBracket[[ii, 1]];

tet2 = SuperBracket[[ii, 2]];

tet3 = SuperBracket[[ii, 3]];

tag1 = DuplicateFreeQ[tet1];

tag2 = DuplicateFreeQ[tet2];

tag3 = DuplicateFreeQ[tet3];

tag = tag1&&tag2&&tag3;

If[tag, sbop[ii] = SuperBracket[[ii]], sbop[ii] = 0]

];

(\*打印判断结果\*)

For[ii = 0, ii ≤ 23, ii++;

Print[sbop[ii]];

]

(\*二自由度折纸传动机构 superbracket 的计算结果如下\*)

{ {-A1, -e1, -e2, -e3}, {-A1, -C2, -s2, -e1}, {-A1, -e2, -C3, -s3} }

{ {A1, e1, e2, e3}, {A1, C2, s2, e2}, {A1, e1, C3, s3} }



## 作者简历

作者于 2014 年考入哈尔滨工业大学机械设计制造及其自动化专业（英才学院），后转入机械电子工程专业，于 2018 年 6 月获得工学学士学位，毕业论文获得 2018 年哈尔滨工业大学百优本科毕业设计（论文）奖。同年 9 月保送至浙江大学航空航天学院应用力学研究所，师从曲绍兴教授，攻读力学博士学位。主要研究方向为微型机器人及多机器人系统的设计与控制理论。



## 攻读博士期间主要研究成果

(# 表示共同一作)

已发表论文：

- [1] **Liu, Y.** ; Chen, Y.; Feng, B.; Wang, D.; Liu, T.; Zhou, H.; Li, H.; Qu, S.; Yang, W. S<sup>2</sup>worm: A Fast-Moving Untethered Insect-Scale Robot With 2-DoF Transmission Mechanism. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2022, 7 (3), 6758–6765.
- [2] **Liu, Y.** ; Zhao, D.; Chen, Y.; Wang, D.; Wen, Z.; Ye, Z.; Guo, J.; Zhou, H.; Qu, S.; Yang, W. BioARS: Designing Adaptive and Reconfigurable Bionic Assembly Robotic System with Inchworm Modules. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* 2020, pp 11681–11687.
- [3] **Liu, Y.** ; Liu, B.; Yin, T.; Xiang, Y.; Zhou, H.; Qu, S. Bistable Rotating Mechanism Based on Dielectric Elastomer Actuator. *Smart Mater. Struct.* 2019, 29 (1), 015008.
- [4] Chen, Y.#; **Liu, Y.** #; Liu, T.; Li, H.; Qu, S.; Yang, W. Design and Analysis of an Untethered Micro Flapping Robot Which Can Glide on the Water. *Sci. China Technol. Sci.* 2022, 65 (8), 1749–1759.
- [5] Fu, Y.; Hu, X.; **Liu, Y.** ; Wang, P.; Chen, S.; Zhou, H.; Yu, H.; Qu, S.; Yang, W. Impact-Induced Bubble Interactions and Coalescence in Soft Materials. *International Journal of Solids and Structures* 2022, 238, 111387.
- [6] Hu, X.; Fu, Y.; **Liu, Y.** ; Liu, B.; Qu, S. Acarid Suction Cup-Inspired Rapid and Tunable Magnetic Adhesion. *Advanced Materials Technologies* 2021, 6 (8), 2100004.
- [7] Zhao, D.; **Liu, Y.** ; Liu, B.; Chen, Z.; Nian, G.; Qu, S.; Yang, W. 3D Printing Method for Tough Multifunctional Particle-Based Double-Network Hydrogels. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13 (11), 13714–13723.

待发表论文：

- [1] **Liu, Y.** ; Feng, B.; Cheng, T.; Chen, Y.; Liu, X.; Zhang, J.; Qu, S.; Yang, W. Singularity Analysis and Solutions for the Origami Transmission Mechanism of Fast-Moving Untethered Insect-scale Robot. (已回复 *IEEE Transactions on Robotics* 审稿意见)

[2] Liu, Y. #; Liu, X.#; Qu, S.; Yang, W. A novel eight-cell network for quadruped locomotion control. (准备中)

**发明专利:**

[1] 刘一得, 曲绍兴, 陈彦泓, 王东奇. 微型爬行机器人的传动机构及微型爬行机器人: 中国, 2022 1 0513896.8[P]. 2022-8-30.

[2] 刘一得, 冯博, 曲绍兴. 微型并联机器人及平面化设计制造方法: 中国, 2022 1 1568273.7[P]. 2023-3-10.

[3] 刘一得, 冯博, 曲绍兴. 四自由度微型并联机器人及其制造和控制方法. 已受理.

**荣誉与奖励:**

[1] 2023 RSS Pioneers Robotics: Science and systems. Insect-scale Robot and Assembly Robotic System. (a member of the 30-strong cohort, 22% acceptance rate)

[2] 2021 陆增祺优秀博士生奖 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室