

## 模块化可重构机器人重构方式综述

罗航, 赵思恺, 赵宁, 赵杰, 蒋再男, 朱延河\*  
(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:**随着非结构化环境作业需求的提升,固定构型机器人在环境适应性、容错性与任务复用性方面的局限性日益突出。模块化可重构机器人由标准化的同构或异构模块组成,可通过拓扑重组实现形态与功能重构。针对现有研究多按几何构型或连接拓扑分类、难以揭示不同系统重构本质差异的问题,本文从重构机理视角出发,将模块化机器人归纳为不可自重构、移动自重构、利用位姿变换(平移/旋转)自重构和利用关节运动自重构四类,系统综述了各类系统的机械实现原理、典型样机、控制特点及适用场景,并比较分析了其在结构紧凑性、运动能力、控制复杂度、能量效率和环境适应性等方面的优势与局限。本文可为模块化可重构机器人的构型设计、重构策略选择与应用优化提供参考。

**关键词:**模块化机器人;自重构;重构策略;连接机制;拓扑结构

**中图分类号:**TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2026)03-126-15

## Review of reconfiguration methods for modular self-reconfiguring robots

LUO Hang, ZHAO Sikai, ZHAO Ning, ZHAO Jie, JIANG Zainan, ZHU Yanhe\*  
(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** With the growing demand for robotic operation in unstructured environments, fixed-configuration robots are increasingly limited in adaptability, fault tolerance, and task versatility. Modular self-reconfigurable robots, composed of standardized homogeneous or heterogeneous modules, can reorganize their topology to achieve morphological and functional reconfiguration. Since existing studies are commonly classified by geometric configuration or connection topology and therefore do not fully reflect the essential differences in reconfiguration mechanisms, this paper reviewed modular robots from the perspective of reconfiguration principles. They were categorized into four groups: non-self-reconfigurable, mobile self-reconfigurable, pose-transformation-based (translation/rotation) self-reconfigurable, and joint-motion-based self-reconfigurable systems. The mechanical principles, representative prototypes, control characteristics, and application scenarios of each category were systematically summarized, and their respective advantages and limitations in compactness, mobility, control complexity, energy efficiency, and environmental adaptability were compared. This review provides a reference for configuration design, strategy selection, and application optimization of future modular self-reconfigurable robots.

**Keywords:** modular robot; self-reconfiguration; reconfiguration strategy; connection mechanism; topological structure

随着科学技术的迭代与工业自动化需求的升级,机器人技术已深入渗透至生产生活的各个领域,显著提升了社会生产力<sup>[1]</sup>。然而,传统机器人通常基于特定任务设计,其固定的机械构型限制了其在复杂多变环境中的适应能力。针对这一痛点,模块化可重构机器人(modular self-reconfiguring robot, MSRR)应运而生。该类机器

人系统由若干具备独立通信、感知、驱动及连接功能的标准化模块单元组成,通过统一的机械与电气接口互联,能够根据任务需求或环境约束自主改变自身的拓扑结构与功能形态。

相较于传统机器人,模块化机器人具有显著的优势:首先,任务适应性强,通过重构可实现“一机多用”,既能穿越狭窄缝隙,又能组装成大

收稿日期:2025-11-17

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(52025054);国家自然科学基金重点资助项目(52435001);机器人技术与系统国家重点实验室资助项目(SKLR202410B)

第一作者:罗航(2002—),男,重庆永川人,博士研究生,E-mail: 2692530664@qq.com

\*通信作者:朱延河(1975—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,博士生导师,E-mail: yhzhu@hit.edu.cn

引用格式:罗航,赵思恺,赵宁,等. 模块化可重构机器人重构方式综述[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(3): 126-140.

Citation: LUO H, ZHAO S K, ZHAO N, et al. Review of reconfiguration methods for modular self-reconfiguring robots [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(3): 126-140.

负载构型;其次,系统鲁棒性高,基于冗余自由度与分布式控制,系统在部分模块失效时可通过自修复(self-repair)维持功能<sup>[2]</sup>;最后,经济效益显著,标准化的模块设计允许批量生产,大幅降低了制造与维护成本。这些特性使得模块化机器人在深空探测、灾难救援、核设施维护等高风险、非结构化场景中展现出巨大的应用潜力。

自 1987 年 Fukuda 教授等提出首款细胞自动机机器人 CEBOT<sup>[3]</sup> 以来,模块化机器人历经近 40 年的演进,涌现出包括 PolyBot、M-TRAN、SuperBot 等经典样机。目前的分类研究多基于模块的几何外形(如立方体、球体)或连接拓扑(如链式、格点式、混合式)展开<sup>[4-5]</sup>。然而,重构方式作为实现形态变换的根本途径,直接决定了系统的运动学约束与控制复杂度。为此,本文摒弃传统的形态分类法,从“重构机理”的维度对现有的模块化机器人进行系统综述。

如图 1 所示,本文将模块化机器人的重构方式划分为四大类进行阐述:

- 1) 不可自重构(non-self-reconfigurable):需人工辅助或外部设备干预完成拆装。
- 2) 移动自重构(mobile self-reconfigurable):模块借助轮式或足式机构在平面/空间移动并对接,适用于大范围的稀疏重构。
- 3) 利用平移/旋转自重构(translation/rotation self-reconfigurable):主要见于格点式机器人,通过模块间的相对滑动或转动实现邻域位置变换。
- 4) 关节利用运动自重构(joint motion self-reconfigurable):多见于链式机器人,利用模块内部关节的弯曲或扭转,配合末端对接实现自身变形与拓扑改变。

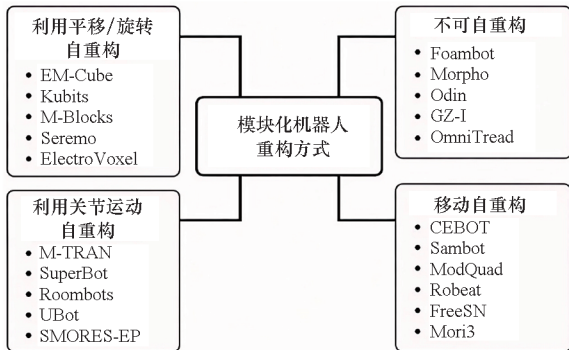


图 1 模块化机器人重构方式分类体系

Fig. 1 Taxonomy of modular robot reconfiguration methods

本文将重点分析上述四种重构方式的机械实现原理,探讨其在结构紧凑性、控制精度及能量效率等方面的优劣势,旨在明晰不同技术路线的适

用边界,为下一代高性能模块化可重构机器人的设计与优化提供理论参考与技术思路。

## 1 不可自重构的模块化机器人

不可自重构模块化机器人是指不具备自主改变拓扑结构能力,需依赖外部设备或人工辅助完成构型重组的机器人系统。尽管缺乏自主重构能力会造成在非结构化环境中的独立生存能力受限,但通过摒弃复杂的自动对接机构与高冗余驱动部件,此类机器人换取了更高的结构刚度、负载自重比及系统可靠性。本节将从典型模块构型与适用场景两个维度进行阐述。

### 1.1 模块简介

表 1 列举了若干典型的不可自重构模块化机器人的参数。此类机器人通常采用标准化的机械接口以实现模块间的快速拆装与刚性锁紧。

表 1 典型不可自重构模块化机器人的参数  
Tab. 1 Parameters of typical non-self-reconfigurable modular robots

名称	出现时间	关节副	接口数
Foambot <sup>[6-7]</sup>	2021 年	移动副	2
Morpho <sup>[8]*</sup>	2008 年	无	14,2,2,-
Odin <sup>[9-10]*</sup>	2008 年	转动、移动副	12,2
GZ-I <sup>[11]</sup>	2008 年	转动副	4
OmniTread <sup>[12]</sup>	2005 年	转动副	2

注:\* 由多个基本单元体构成,因此有多个接口数。

- 表示没有明确说明接口数。

针对特定作业需求,部分系统采用了异构或软体设计策略。例如,由康奈尔大学 Petersen 等人研发的 Foambot(如图 2 所示),引入软体机器人技术,主体由圆柱形可拉伸外膜包裹。该模块具备一个沿轴向伸缩的自由度,通过向内部泡沫结构注入流体实现体积膨胀与刚度调节。这种柔性外骨骼设计虽不具备主动对接能力,但显著增强了机器人在狭窄非结构化环境中的挤压通过性与交互安全性。

普林斯顿大学 Nagpal 团队提出的 Morpho 系统则基于生物启发式设计,采用张拉整体(tensegrity)结构理念。不同于传统的单一均质模块,Morpho 由有源连杆、无源连杆、表面膜及接口立方体(interface cube)组成一套异构组件库。通过机械连接,这些组件可构建具有柔性特质的复杂拓扑结构,如适应地形的自适应桥梁、变体积立方体及四面体金字塔等。该设计验证了模块化系

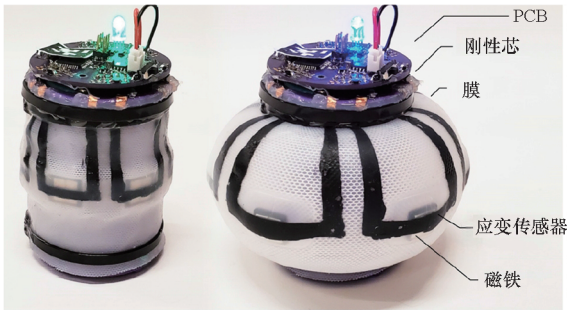


图 2 Foambot 示意图<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of Foambot<sup>[5]</sup>

统在非刚性连接下的结构演化潜力。

相比之下,大连理工大学张建伟教授团队研制的 GZ-I(如图 3 所示)则侧重于结构极简与高可靠性。该模块配置一个旋转自由度与四个标准化连接面,采用高强度的螺栓或卡扣式机械连接机制替代自动对接机构。这种设计在牺牲自主重构能力的同时,大幅降低了系统复杂度与制造成本,并显著提升了模块间的连接刚度,使其能够承受远高于同尺寸自重构机器人的外部载荷。

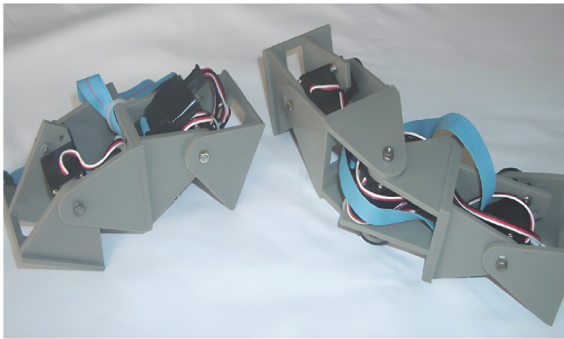


图 3 GZ-I 示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of GZ-I<sup>[11]</sup>

### 1.2 应用场景

尽管不可自重构系统需借助人机协作(human-robot collaboration)或辅助机械臂完成构型转换,限制了其在深空探测等无人值守场景的应用,但基于上述样机的分析,该类系统在以下特定工程场景中具备不可替代的优势。

1) 柔性作业与人机交互场景:对于如 Foambot 类的软体模块,其体积主要由驱动介质与柔性材料占据,难以集成复杂的刚性对接机构。采用人工辅助重构策略,可保留其本质安全特性,使其在医疗护理、易碎品搬运等接触敏感场景中表现优异。

2) 大跨度承载结构:诸如 Morpho 类的张拉整体结构,利用构件间的拉压复合受力,可在无自重构机构冗余质量的前提下,构建高强重比的桥梁

或支撑结构,适用于临时性基础设施的快速搭建。

3) 高刚度与重负载任务:采用螺栓或法兰等固定连接方式,消除了自动对接机构中常见的机械间隙(backlash)。在工业装配或重物搬运场景中,这种连接方式能提供接近整体铸造结构的刚度,有效抑制动力学振动,提升操作精度。

4) 高精度定位需求:相比于自动对接机构存在的对准误差累积,人工精密装配的模块化系统具有更高的几何精度。在长悬臂或多模块串联构型中,能有效控制末端执行器的位姿误差。

5) 极端恶劣环境:在粉尘密集、油污弥漫或水下高压环境中,精密的电子触点与自动锁紧机构极易失效。不可自重构系统采用的静态密封与固定机械连接,能够有效隔离环境干扰,保证系统在恶劣工况下的长期稳定性。

## 2 移动自重构的模块化机器人

移动自重构是指模块单元利用自身的移动能力(如轮式、足式、飞行或游动),在环境中主动改变空间位置,并通过对接机构实现物理连接,从而形成目标拓扑结构的过程。与链式或格点式重构不同,移动重构通常涉及非结构化环境中的长距离位移,其过程在功能上往往与群机器人系统的“自组装(self-assembly)”高度重合。本节将从典型样机、核心算法及应用场景三个维度进行系统阐述。

### 2.1 模块简介

表 2 列举了近年来具有代表性的移动自重构模块化机器人参数。根据作业介质的不同,此类机器人可分为地(轮/足)、空(旋翼)、海(游动)及特殊异构四类。

表 2 移动自重构的模块化机器人的机器参数

Tab. 2 Modular robotic machine parameters for mobile self-reconfiguration

名称	出现时间	移动方式	接口数量	环境介质
CEBOT <sup>[3,13-16]</sup>	1987 年	轮	2	地面
Sambot <sup>[17-20]</sup>	2011 年	轮	4	地面
ModQuad <sup>[21-23]*</sup>	2018 年	飞行	4	空中
SMORES-EP <sup>[24-27]*</sup>	2016 年	轮	4	地面
Roboat <sup>[28-29]</sup>	2019 年	推进器	6	水面
FreeSN <sup>[30-34]*</sup>	2022 年	铁磁球	无固定接口	地面
Mori3 <sup>[35-37]*</sup>	2022 年	轮	3	地面

注: \* 2023 年至今有最新的研究成果。

模块化机器人的开山之作是由福田敏男教授等于 1987 年提出的 CEBOT<sup>[3]</sup>。该系统通过简单的轮式驱动实现二维平面移动,并利用机械接口进行对接。然而,由于缺乏内部自由度且仅有两个接口,CEBOT 主要限于构建简单的链式结构,拓扑适应性较弱。随着技术演进,具备更高对称性与混合自由度的模块相继问世。北京航空航天大学魏洪兴教授团队研发的 Sambot 与宾夕法尼亚大学 Yim 团队研发的 SMORES-EP (由 SMORES<sup>[38]</sup> 进化而来) 是典型代表。二者均采用“轮式移动 + 关节运动”的复合设计,既具备移动机器人的大范围作业能力,又保留了链式机器人的关节灵活性。特别值得一提的是,SMORES-EP 引入了电永磁 (electro-permanent magnet, EPM) 连接技术,仅在充磁和退磁瞬间消耗能量,显著提升了系统的能效比与连接可靠性。

为突破地面约束,宾夕法尼亚大学 Kumar 团队开发的 ModQuad (如图 4 所示) 将四旋翼飞行器作为基本单元,通过空中对接实现三维空间结构的自组装,极大拓展了机器人的作业边界。麻省理工学院 Rus 团队研发的 Roboat 则聚焦于水面环境,通过自主导航与水下锁紧机构实现船体编队的形态重构。

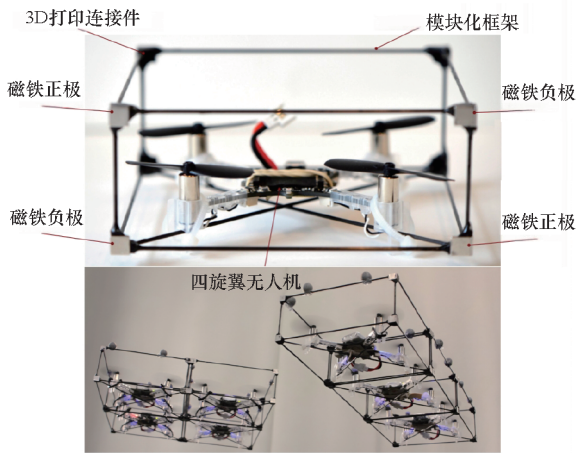


图 4 ModQuad 示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of ModQuad<sup>[21]</sup>

此外,基于特殊几何原理的新型模块也不断涌现。香港中文大学林天麟团队基于铁磁球形机器人 FreeBot<sup>[39-41]</sup> 开发了 FreeSN (如图 5 所示)。FreeSN 引入了包含自由曲面连接器的支柱模块,通过球体与支柱的磁吸配合,实现了从点接触到稳定三角结构的跨越。瑞士洛桑联邦理工学院 Paik 团队提出的 Mori3 (如图 6 所示) 由 Mori<sup>[42-44]</sup> 机器人进化而来,基于多边形网格理念,其三角形模块融合了轮式移动与折纸结构,能

够重构为准二维表面或三维封闭网格。

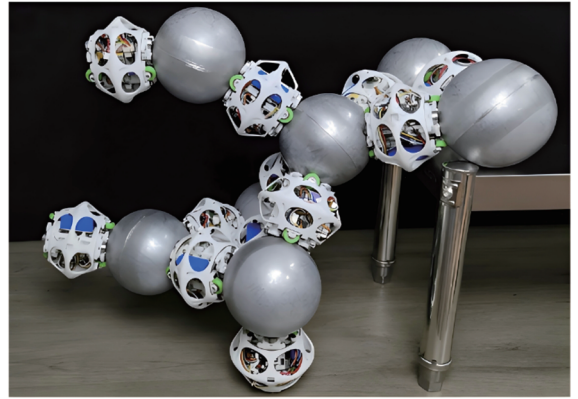


图 5 FreeSN 示意图<sup>[30]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of FreeSN<sup>[30]</sup>

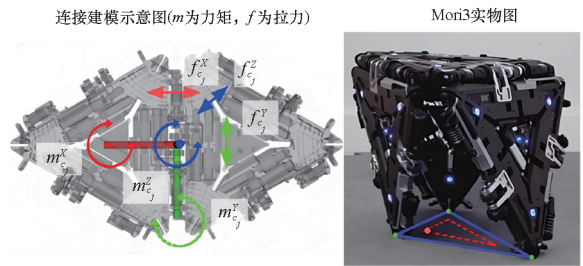


图 6 Mori3 示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of Mori3<sup>[35]</sup>

### 2.2 重构算法与控制策略

移动自重构过程本质上是一个多智能体协同控制问题,其核心流程可抽象为两个阶段:①宏观规划——确定目标构型中各模块的对位关系;②微观控制——规划无碰撞路径并执行精准对接<sup>[45]</sup>。如图 7 所示,模块需在环境约束下完成从初始离散状态到目标聚合状态的演变。

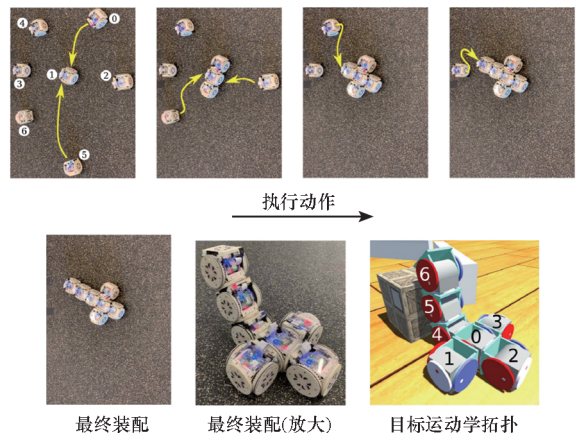


图 7 模块化机器人移动自重构与对接示意过程<sup>[24]</sup>

Fig. 7 Process of the mobile self-reconfiguration and docking of modular robots<sup>[24]</sup>

针对上述过程,现有的算法研究主要集中在

以下策略:

1) 最优规划策略。旨在最小化重构过程中的总能耗或移动距离。例如,文献[46]提出了一种针对模块分散后快速聚拢的最优重组算法。

2) 分布式招募策略。基于局部通信实现任务分配。文献[47]提出了基于广播机制(broadcasting)的招募算法,由种子模块引导空闲模块逐步填充目标位置。

3) 生物启发式策略。利用遗传算法<sup>[48]</sup>(genetic algorithms)或元胞自动机(cellular automata)规则<sup>[49]</sup>生成涌现性行为,使系统在无中心控制下实现自组织。

4) 学习型策略。结合图论与深度强化学习<sup>[50]</sup>(deep reinforcement learning),在动态未知环境中自主探索最优组装路径。

目前,移动重构算法在理论层面已日趋成熟,研究重点正从单一的路径规划向大规模集群协作、动态避障及异构系统协同方向演进。

### 2.3 优势与局限性分析

移动自重构机器人通过融合“移动”与“连接”两大特性,在特定场景下表现出显著优势,但也受限于其物理架构,存在明确的应用边界。

移动模块通常需配备专用的行走机构(如轮、桨、翼)及能源系统,这导致了以下问题:

1) 结构冗余与高成本。组装后的整体构型中,大量模块的移动部件处于闲置状态,造成了质量与体积的严重浪费,且显著提高了单模块的制造成本。

2) 系统可靠性降低。复杂的机电系统增加了故障节点,且过多的机械运动部件在长期运行中面临磨损与维护难题。

3) 微重力环境失效。在空间在轨服务等微重力环境下,依赖摩擦力的轮式驱动完全失效。虽然 ModQuad 等飞行模块提供了新思路,但传统地面移动重构策略并不适用于天基操作,且高昂的发射重量成本使得携带大量冗余移动部件显得极不经济。因此,传统轮式移动重构机器人并不适合作为空间结构在轨组装的主流方案。

尽管存在上述局限,移动自重构机器人在以下场景中具有不可替代的价值:

1) 非结构化受限空间作业。在灾后救援或地下勘探中,面对狭窄缝隙,机器人可解体为独立模块穿越障碍,并在抵达目标区域后重新组装执行任务。

2) 分布式并行任务。在军事侦察或环境监测中,模块可作为独立智能体(agent)分散执行大

范围巡检,必要时通过自重构组合成大负载平台,实现“分则能查,合则能运”的战术灵活性。

3) 群体智能算法验证。作为物理平台,验证多智能体系统的自组织、编队控制及协同决策算法,为集群机器人技术提供实物实验支撑。

### 3 利用平移/旋转自重构的模块化机器人

平移/旋转自重构通常特指格点式(lattice-type)模块化机器人采用的重构策略。与链式机器人的关节变形不同,此类机器人通常呈现正立方体或其他规则多面体构型,利用模块内部的驱动机构,依靠邻域模块或环境作为支点,在离散的网格空间内通过翻转(pivoting)或滑动(sliding)实现位置变换。由于其运动严格遵循空间棋盘规则约束<sup>[51]</sup>,此类系统往往具备极高的空间填充率与结构稳定性。本节将从典型驱动原理、重构算法及应用场景三个维度进行阐述。

#### 3.1 模块简介

表 3 列举了该类别中具有代表性的模块化机器人系统。根据驱动方式的差异,可将模块化机器人主要分为机械/惯性驱动与电磁驱动两类。

表 3 典型平移/旋转自重构模块化机器人参数  
Tab. 3 Parameters of typical translation/rotation self-reconfiguring robots

名称	出现时间	重构类型	驱动原理	接口技术
EM-Cube <sup>[52-54]</sup>	2008 年	平移	电磁驱动	电磁力
Kubits <sup>[55]</sup>	2020 年	翻转	电磁驱动	电磁力
M-Blocks <sup>[56-60]</sup>	2013 年	翻转	惯性飞轮	永磁铁
Seremo <sup>[61-63]</sup>	2016 年	翻转	轮式辅助	机械
ElectroVoxel <sup>[64-65]</sup>	2017 年	翻转	电磁驱动	电磁力

针对二维平面的重构需求,哈尔滨工业大学朱延河教授团队研发的 Seremo 采用了独特的轮式辅助策略。该模块利用内部齿轮组驱动外部销轴与卡扣,实现了沿邻接模块表面的连续翻转与平移。尽管其运动受限于二维平面,但其协同重构机制为高精度的平面图形成提供了有效方案。麻省理工学院 Rus 团队提出的 M-Blocks(如图 8 所示)则突破了传统机械传动的限制,采用惯性驱动原理。模块内部集成了高速飞轮,利用制动瞬间产生的角动量脉冲(angular momentum impulse)克服重力与磁力束缚,实现无支点的跳跃与翻转。这种设计使得 M-Blocks 成为少数能

够独立在三维空间内完成非邻域跳跃的格点式模块,极大地提升了重构的自由度。

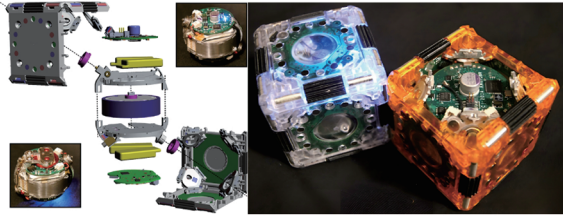


图8 M-Blocks示意图<sup>[60]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of M-Blocks<sup>[60]</sup>

为解决机械驱动结构复杂、磨损严重的问题,电磁驱动成为近年来的研究热点。瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)Ijspeert团队研发的Kubits与EM-Cube均摒弃了外部运动部件。Kubits在模块棱边嵌入电磁铁,通过动态调节磁极的引力与斥力,在邻接边形成“虚拟铰链(virtual hinge)”以实现翻转;EM-Cube则利用表面磁场阵列的顺序切换驱动模块沿表面滑动。在此基础上,麻省理工学院Mueller团队进一步优化推出了ElectroVoxel。该模块专为微重力环境设计,利用电磁力直接驱动空气轴承支撑的轻质立方体。在失重飞机(parabolic flight)实验中,ElectroVoxel验证了在无重力条件下仅消耗极低能量即可完成三维快速重构的可行性,为太空大型结构的在轨组装提供了新范式。

### 3.2 重构算法与路径规划

与具备连续运动能力的移动机器人不同,平移/旋转重构受限于离散格点运动约束(discrete lattice constraints),常被称为“棋盘规则”或“滑块谜题”问题<sup>[51]</sup>。算法需在保证整体连通性(connectivity)的前提下,规划出无碰撞的离散路径。

目前的算法研究主要分为两类:

1)集中式规划(centralized planning)。依赖全局信息构建状态空间图。经典方法包括基于图论(graph theory)的A\*搜索算法<sup>[66]</sup>及差分进化算法<sup>[67]</sup>。此类算法在静态环境中可求得最优解,但在大规模系统中面临计算复杂度呈指数级增长( $O(N^2)$ 甚至更高)的挑战。

2)分布式协同(distributed coordination)。模块仅利用局部感知与通信进行决策。典型代表包括受生物启发的“激素/费洛蒙”扩散算法(如水母泵算法<sup>[68]</sup>)、元胞自动机规则<sup>[69]</sup>、局部信息共享策略<sup>[70]</sup>等其他算法<sup>[71-78]</sup>。分布式算法虽难以保证全局最优,但具备 $O(N)$ 级别的线性扩展性,

对单点故障具有极强的鲁棒性。

### 3.3 技术特征与应用场景分析

平移/旋转自重构机器人在构型上呈现显著的二元性。

优势:①高填充率与稳定性。立方体构型可实现零间隙的致密堆叠,结构刚度极高。②运动确定性。基于格点的离散运动消除了累积误差,简化了控制模型。③微重力适应性。电磁翻转等方式在无重力环境下能耗极低,且无机机械磨损。

局限:①缺乏整体机动性。重构后的结构(如桁架、墙体)通常是静态的,缺乏类似链式机器人的关节运动能力,难以执行复杂的动态操作。②环境适应性弱。严格依赖平整的接触面或邻居模块,难以在崎岖地形工作。

基于上述特征,该类机器人的核心应用场景包括:

1)大型空间结构在轨组装与精细作业。利用微重力环境下的低功耗重构特性,该类机器人是构建大口径太空望远镜镜面阵列、超大型卫星桁架及空间站舱段的理想载体。针对国家科技重大专项中“空间飞行器在轨服务与维护”的迫切需求,该技术路线可具体深化为三方面。①多形态变拓扑作业。结合面向精细操作的灵巧作业机器人技术,利用模块的自主重构与自主变构型能力,系统可根据任务需求动态演化为宏-微串联、多分支并联或串并混联等多种拓扑形态。这种变构型能力使其能够适应光学组镜安装、天线单元组装、模块更换及燃料加注等差异化极大的精细操作任务。②高精度协同操控。通过具身感知与多分支协同控制,模块化系统可克服传统格点机器人的运动僵硬问题,实现末端优于0.5 mm的重复定位精度,在特定操作下甚至可达0.1 mm,满足精密载荷的在轨装配要求。③跨尺度宏微结合。为规避格点式机器人“低机动性”的短板,系统采用与轻量化大型机械臂协同作业的模式。利用大型机械臂25 t级的大负载能力与15 m级的大范围作业半径,完成跨尺度飞行器的辅助停泊与大部件转移,而模块化机器人则专注于末端的精细化组装。这种“大范围转移+局部精细重构”的模式,充分发挥了模块化系统“高刚度、可重构”的优势,为在轨服务与维护系统的工程实施奠定技术基础。

2)可编程物质(programmable matter)。在微观尺度下,通过海量微小模块的重构实现物体形状的实时物理渲染(physical visualization)。

3)灾后临时支撑结构。在废墟搜救中,利用

其高填充率特性,自重构为承重支柱或填充体,对不稳定建筑结构进行加固,为救援开辟通道。

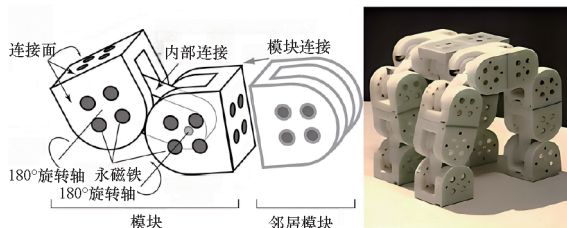
### 4 利用关节运动自重构的模块化机器人

关节运动自重构是指模块单元内部集成电机、舵机等驱动装置,具备一个或多个主动旋转/伸缩自由度(DoF),通过模块自身的形变(如折叠、弯曲、扭转)配合连接机构的吸附与释放,实现拓扑结构改变的系統。与仅依靠平移或翻转的格点式机器人不同,此类系統通常兼具链式(chain-type)与格点式(lattice-type)的特征,被称为混合式(hybrid)模块化机器人。其核心优势在于:不仅具备重构能力,且重构后的整体构型仍保留丰富的主动自由度,能够模拟蛇形、足式、轮式等多种生物或机械形态,具备极强的环境适应性与运动灵活性。

#### 4.1 模块简介

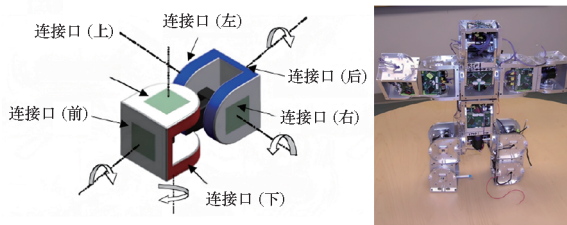
表 4 列举了该类别中具有代表性的机器人参数。此类模块通常采用“类立方体”或“两段式”结构设计,通过正交或平行的关节布置来实现复杂的空间运动。

模态运动能力,能够在该系统上验证复杂的爬行与滚动步态。然而,高自由度也带来了系統复杂度的非线性上升,对模块的能量密度与同步控制提出了严峻挑战。



(a) M-TRAN 示意图<sup>[87]</sup>

(a) Schematic diagram of M-TRAN<sup>[87]</sup>



(b) SuperBot 示意图<sup>[88]</sup>

(b) Schematic diagram of SuperBot<sup>[88]</sup>

表 4 典型关节运动自重构的模块化机器人参数

Tab. 4 Parameters of typical joint-actuated self-reconfiguring robots

名称	出现时间	关节自由度	接口数量
M-TRAN <sup>[79-87]</sup>	2002 年	2	6
SuperBot <sup>[88-91]</sup>	2006 年	3	6
Roombots <sup>[92-98]</sup>	2009 年	3	10
UBot <sup>[99-116]*</sup>	2011 年	2	4
SMORES-EP <sup>[24-27]*</sup>	2016 年	1	4

注: \* 2023 年至今有最新的研究成果。

日本产业技术综合研究所(AIST)Murata 团队研发的 M-TRAN 系列(如图 9(a)所示)是混合式架构的先驱。其模块由两个半圆柱体通过连杆连接,具备两个平行的旋转自由度,既能像链条一样柔性运动,又能像积木一样紧密堆叠,完美兼容了链式机器人的运动能力与格点机器人的重构能力。

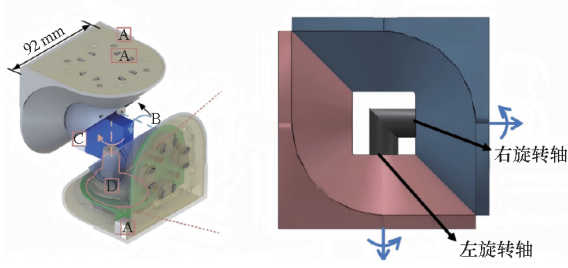
受 M-TRAN 启发,美国南加州大学沈为民教授团队推出了 SuperBot(如图 9(b)所示)。该模块在两个半球体之间引入了正交旋转关节(pitch-yaw-roll 配置),并集成了两个旋转连接面。相比 M-TRAN,SuperBot 不仅增加了自由度,还具备多

图 9 两个半圆柱体构型自重构模块  
Fig. 9 Two semi-cylinder configuration self-reconfiguration modules

瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)的 Ijspeert 团队研发的 Roombots 采用了独特的“对角线旋转”设计。其模块由两个及以上的子单元组成,关节轴线与立方体体对角线重合(45°偏置)。这种非正交设计使得 Roombots 能够通过旋转在相邻网格点之间产生复杂的各向异性位移,虽增加了运动规划的难度,但也赋予了其在自适应家具(adaptive furniture)等场景中独特的变形能力。

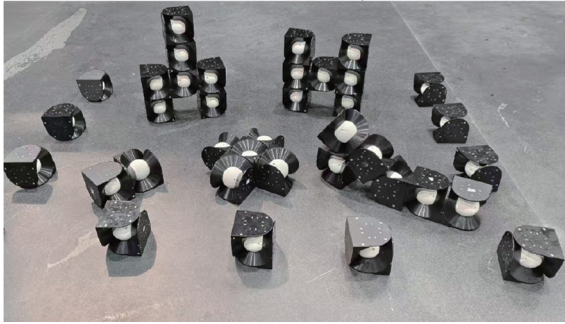
哈尔滨工业大学朱延河、赵杰教授团队研发的 UBot 系列(如图 10 所示)则采用了类立方体构型。模块内部集成了两个正交的旋转关节(pitch-pitch 或 pitch-yaw),表面分布 4 个连接接口。该设计在保持标准立方体高填充率特性的同时,极大地简化了重构所需的避碰空间,使其在狭窄环境下的变形能力优于传统长连杆模块。

此外,宾夕法尼亚大学的 SMORES-EP 虽然在前文中作为移动重构被提及,但其本质是典型的关节型机器人。其独特之处在于将轮式驱动与关节运动解耦,利用差速轮实现移动,利用全向转动关节(pan/tilt)实现变形,是“移动能力”与“关节变形能力”融合的典范。



(a) UBot 构型示意图

(a) Schematic diagram of UBot configuration



(b) UBot 不同构型实物图

(b) Picture of UBot in various configurations

图 10 UBot 示意图<sup>[110]</sup>Fig. 10 Schematic diagram of UBot<sup>[110]</sup>

## 4.2 自重构原理与算法挑战

关节型模块的重构本质上是“构型空间内的路径搜索”。其基本动作原语 (primitives) 通常包括:

1) 关节驱动。改变模块内部角度,调整末端接口的相对位姿 (pose)。

2) 邻域对接。当末端接口与目标模块对齐并满足距离约束时,激活连接机构。

3) 拓扑切换。连接成功后,断开旧的连接,完成拓扑结构的局部更新。

由于缺乏独立的移动底盘,此类模块通常需要采用“多步协同 (multi-step coordination)”策略,即利用相邻模块作为基座 (base),通过类似尺蠖蠕动或机械臂抓取的方式将游离模块传递至目标位置。

与平移/旋转型机器人较为统一的算法框架不同,关节型机器人的算法具有极高的构型依赖性 (configuration dependency)。这是因为:

1) 高维 C 空间。每个模块引入的连续旋转自由度使得系统整体的构型空间维度随模块数量呈线性增加,导致全局搜索算法 (如  $A^*$ 、RRT) 在多模块时面临维数灾难。

2) 复杂的运动学约束。不同模块的连杆长度、关节轴线方向 (正交/平行/斜向) 直接决定了

其可能的运动子空间。例如, M-TRAN 的平行关节导致其在某些方向上的运动受限 (非完整约束),而 Roombots 的斜向关节则引入了复杂的空间耦合。

因此,此类机器人通常需要针对特定构型开发专用的启发式算法 (heuristic algorithm) 或元模块 (meta-module) 策略,通用性算法的研究仍是该领域的难点。

针对高维构型空间引发的“维数灾难”瓶颈,深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 与多智能体强化学习 (multi-agent reinforcement learning, MARL) 为模块化机器人的重构规划开辟了全新的求解范式。在面对诸如 UBot 或 M-TRAN 这类动辄数十个模块、上百个自由度的高冗余系统时,传统集中式规划算法的计算复杂度往往呈指数级增长。相较之下,以多智能体近端策略优化 (multi-agent proximal policy optimisation, MAPPO) 为代表的 MARL 算法,赋予了各模块基于局部环境观测独立、实时决策关节力矩的能力,从根本上实现了去中心化的并行协同控制。进一步地,为克服大尺度重构过程中奖励信号极度稀疏的难题,研究人员引入了课程学习 (curriculum learning) 机制,引导系统按照“由简入深”的逻辑,从少数模块的基础对接稳步迁移并泛化至大规模集群的复杂拓扑演化。此类数据驱动的端到端学习框架,不仅有效规避了传统解析法中高阶非线性动力学精确建模的困难,更在应对模块突发失效与动态环境避障等强扰动工况时,展现出卓越的系统鲁棒性与自适应能力。

## 4.3 应用场景

尽管面临算法复杂、能耗较高及标准化程度低等技术瓶颈,关节运动自重构机器人凭借其无与伦比的灵活性,在以下高价值场景中展现出巨大潜力:

1) 非结构化环境救援与探测。得益于关节自由度,此类机器人可模拟蛇形穿过狭窄废墟缝隙,模拟多足昆虫攀爬瓦砾,或通过首尾连接形成环状以滚动下坡。这种多模态运动 (multi-modal locomotion) 能力使其能够进入地震救援、洞穴勘探等人类与传统轮式机器人难以抵达的区域具有独特优势。

2) 航天在轨服务与深空探测。在发射阶段,模块化机器人可折叠为高密度的长方体,最大化火箭整流罩的空间利用率 (volumetric efficiency),显著降低发射成本。入轨后,利用关节运动展开为大型桁架、机械臂或空间望远镜支撑结构,甚至

重构为行走机器人维护空间站表面。

3) 自适应服务与教育科研。以 Roombots 为代表的系统展示了“流体家具”的概念,可根据用户需求重构为桌椅、支撑架或搬运机器人。同时,由于其涵盖了机械设计、运动学建模、嵌入式控制及分布式算法等多个学科,此类机器人是高校开展机器人学交叉研究与教学的理想平台。

### 5 总结与展望

本文从重构机理的视角,系统梳理了模块化可重构机器人的四大技术流派:不可自重构、利用移动自重构、利用平移/旋转(格点式)自重构及利用关节运动(链式/混合式)自重构。不同重构方式在空间运动能力、构型变换自由度及控制复杂度等方面表现出显著的性能差异。

如表 5 所示,不同重构方式的模块化机器人在全局移动能力、局部操作变形能力及算法复杂度上呈现显著的性能互补与权衡(trade-off)特征。为验证上述定性比较的准确性,本文选取四类重构方式的经典样机,结合其核心物理参数与机理特征展开深度的定量剖析。

表 5 不同重构方式的模块化机器人性能比较

Tab. 5 Performance comparison of modular robots with different reconfiguration methods

重构方式	全局移动能力	局部操作变形能力	算法复杂度	核心优势	应用场景
不可自重构	弱	强	无	高刚度,高负载,低成本	工业精密装配,极端环境
移动自重构	极强	弱	复杂	稀疏环境跨越,并行作业	地形勘察,分布式军事侦察
利用平移/旋转自重构	强	极弱	简单	高填充率,运动确定性	大型空间结构组装,模块化卫星
利用关节运动自重构	弱	极强	极复杂	多模态变形,全地形适应	复杂灾害救援,深空探测

首先,不可自重构机器人将“算法复杂度”降至零,并实质上放弃了“全局移动能力”(仅依靠基座固定或局部的关节扭动)。产生这一物理极端现象的根本原因在于其对极致结构刚度与环境抗扰动能力的追求。以经典样机 GZ-I 为例,彻底摒弃了空间占用大且不可避免存在的机械间隙的自动对接机构,转而采用高强度螺栓与法兰等静态紧固方式,其连接强度得到了质的飞跃,实现了远超同尺寸自重构机器人的超高负载自重比。这种设计虽完全牺牲了系统的自治性,却成为工业

精密装配等苛求高刚度静态作业场景的理想技术途径。

其次,在具备自主重构能力的系统中,移动自重构与平移/旋转自重构在运动能力与控制复杂度上呈现截然不同的演化路径。移动自重构机器人(如 SMORES<sup>[38]</sup>)之所以具备极强的全局移动能力,是因为其将大量的系统功率密度倾注于专用的轮式或履带式底盘。这使其能够在广域非结构化地形中以约 0.10 m/s 的速度实现高效越障,且该指标可通过升级底层驱动电机得到直观提升。然而,这种基于连续物理空间的大规模群集运动,导致多智能体协同防碰与局部路径寻优的“算法复杂度”呈非线性激增。

相反,平移/旋转(格点式)自重构机器人(如 M-Blocks<sup>[56]</sup>、ElectroVoxel<sup>[64]</sup>)的局部变形能力“极弱”,根源在于其拓扑变换被严格约束在离散的三维网格空间内,且模块间高度依赖电磁或永磁吸附。然而,这种离散化机理带来了两大核心优势:其一,将高维连续控制问题成功降维为“简单”的离散图元搜索,大幅降低了算法复杂度;其二,重构速度极快。例如:M-Blocks 利用转速高达 6 000 r/min 至 10 000 r/min 的内部惯性飞轮,完成单次无支点跳跃仅需 0.5 ~ 1 s;ElectroVoxel 的单次翻转耗时也仅为 1.13 s。这种高频、离散的位移模式,赋予了该类系统在结构表面较强的全局移动穿梭能力。

最后,由于内嵌连续关节自由度,关节运动(链式/混合式)自重构机器人在“局部操作变形能力”上展现出“极强”的特性,能够实现极为细腻的形态微调。以 UBot<sup>[109]</sup> 为代表的系统,内部集成了多自由度的正交或全向旋转关节。为了在模拟多足、蛇形等多模态步态时有效克服多模块串联产生的重力矩,系统对单模块的功率密度与连接机构承载力提出了严苛要求。例如,UBot 的单关节输出扭矩可达 1.8 Nm,且凭借复杂的机械锁紧机构实现了高达 101 N 的接口静态连接力。然而,这种高强度的精准对接机制不可避免地牺牲了重构效率——完成一次完整的重构与恢复周期,往往需要执行至少 8 个序列的关节转动,其速度远不及格点式机器人。同时,受限于仅能依靠关节翻滚或蠕动的移动方式,其全局机动性明显弱于移动式与格点式构型。更为关键的是,连续多自由度的引入引发了严重的“维数灾难”,导致其系统运动学建模与无碰撞重构算法变得“极复杂”。

综上定量对比与机理剖析证实,重构方式的

设计与选型,本质上是系统结构刚度、运动维数及控制效率之间的多目标物理博弈。表5的性能评估体系,准确、客观地映射了这一模块化机器人领域的基础技术规律。

### 5.1 性能权衡与技术路线分析

模块化机器人的架构设计本质上是一个在结构刚度、运动自由度、系统复杂度以及能量效率等多维约束下的多目标优化问题。不同技术路线的选择,实际上是对以下几组关键矛盾的权衡与取舍。

1) 结构稳定性与运动灵活性的博弈。不可自重构系统虽然丧失了自主变形能力,但通过刚性连接消除了机械间隙(backlash),换取了工业级的定位精度与高负载能力,适用于对稳态性能要求严苛的结构化环境。反之,关节型自重构系统凭借高冗余自由度(hyper-redundancy)实现了对非结构化环境的极强适应,但代价是随着模块数量的增加,关节间隙与结构弹性形变导致的累积误差呈非线性增长,显著降低了末端执行精度与系统的整体刚度。

2) 功能冗余与系统效能的矛盾。移动自重构机器人集成了独立的行走机构(如轮、履带或旋翼),确立了其在大范围稀疏场景下的机动优势。然而,当系统重构为密集构型(如多关节机械臂或静态支撑桁架)时,这些暂时闲置的移动部件即转化为系统的“寄生质量(parasitic mass)”或死重,大幅降低了系统的有效载荷自重比(payload-to-weight ratio)与能量密度。因此,设计时需严谨评估“全模块移动”的必要性,或探索轮-关节复用等多功能一体化设计以降低死重。

3) 同质化设计的规模效应与运动能力的局限。以平移/旋转型为代表的格点式机器人,倾向于采用高度标准化的同质化单元设计。这种同质性不仅大幅降低了精密制造的边际成本与维护难度,还利于实现大规模集群的批量部署;更关键的是,它极大地简化了控制模型的维度,使大规模智能体集群的分布式自组织行为更易于收敛。然而,这种设计通常摒弃了模块内部的连续关节自由度,导致系统重构后多呈现为静态的离散网格结构(discrete lattice)。相比于关节型系统,其缺乏主动的弯曲与扭转能力,难以实现类似蛇形机器人的柔性蠕动或机械臂的灵巧操作,这在本质上限制了其在需要高动态交互与复杂运动轨迹生成任务中的应用潜力。

4) 异构化集成的任务专业化与系统复杂性。为应对深空探测、战场保障等极端复杂任务,单一

构型的通用模块往往存在“样样通、样样松”的性能瓶颈。因此,集成专用功能单元(如高能电池模块、专用末端执行器、高性能算力模块)的异构混合式(heterogeneous hybrid)设计成为提升系统综合作业效能的必然趋势。然而,异构化不可避免地引入了非结构化的连接拓扑与多物理场耦合,导致系统动力学建模与协同控制的难度剧增,同时显著提高了供应链管理成本与故障诊断的复杂性,这对建立统一的标准化接口协议提出了更严苛的要求。

### 5.2 模块化机器人硬件与算法挑战

模块化机器人技术尽管已取得长足进展,但要实现从实验室样机向工程化应用的跨越,仍面临以下核心挑战:

1) 机电系统的一体化瓶颈。现有模块在追求小型化的同时,难以兼顾高能量密度电源、大扭矩驱动器与高可靠性对接机构。特别是在微重力或高辐射等极端环境下,硬件的耐久性与连接的鲁棒性尚待验证。

2) 构型空间的“维数灾难”。对于拥有大量关节自由度的系统,其重构路径规划涉及高维非线性空间的搜索问题,传统的集中式算法在模块数量增加时计算量呈指数级爆炸,难以满足实时性要求。

3) 标准化与互操作性缺失。当前各类模块的接口协议、通信标准及尺寸规范互不兼容,导致不同科研团队研发的模块无法互联互通,严重阻碍了通用化技术生态的形成。结合国际机器人发展趋势,未来急需在以下三个维度推进模块化标准建设:①机械接口标准,推广两性同体(hermaphroditic)的无极性对接机构,消除公母头限制,提升拓扑组合的自由度;②电气共享协议,建立标准化的直流母线(DC bus)功率共享总线,允许高电量模块向低电量模块动态输能,提升集群整体续航能力;③通信底层标准,统一底层工业总线协议(如引入具有高实时性的EtherCAT或CAN FD标准),并制定面向模块化机器人的应用层报文规范,以实现异构模块(如感知模块与执行模块)的无缝热插拔与即插即用。

### 5.3 软件架构与通信算力的挑战

重构机理的物理实现不仅依赖机电硬件系统,更与底层的软件控制架构及通信拓扑存在强耦合关系。面向大规模集群的协同作业场景,各类重构方式在通信带宽分配与算力统筹方面呈现出显著的差异化特征。

1) 不可自重构系统的集中式架构。鉴于此类系统在作业周期内拓扑结构保持静态,通常采用传统的集中式架构(centralized architecture)。其通信网络(如工业以太网或硬线总线)拓扑固定,带宽需求主要受制于末端传感器的采样率与执行器的控制周期。系统算力高度集中于外部主控计算机,各模块仅充当底层执行节点,无须承担复杂的局部决策任务。该架构控制逻辑精简,但在超大规模模块接入时,极易凸显主节点的算力负载与通信带宽瓶颈。

2) 移动自重构系统的群集分布式架构。移动模块在重构前表现为离散的独立智能体,高度依赖完全分布式或群集架构(swarm/distributed architecture)。在自由机动与对接寻优阶段,模块需依托独立的端侧算力执行局部路径规划、同步定位与建图(SLAM)及动态避障。这要求各模块通过无线网络(如 Wi-Fi、UWB 或 Ad-hoc 自组网)高频进行位姿广播与状态协商。当面临大规模集群并发协同的情境时,极易引发信道拥塞与数据丢包,因此对端侧设备的边缘计算能力及去中心化算法的鲁棒性提出了严苛挑战。

3) 平移/旋转自重构的局部交互架构。格点式机器人的离散运动特性天然契合基于元胞自动机的完全分布式架构。其通信通常局限于相邻模块物理接触面的近场通信(如红外收发管或触点总线),节点间带宽需求极低,且基本摆脱了对外部无线网络的依赖。尽管单模块仅需维持简单的有限状态机(FSM)算力,但在执行超大规模(数千乃至数十万个量级)的结构组装时,如何仅依靠局部的点对点(P2P)低带宽信息传递,克服累积网络延迟并确保全局目标构型的渐近收敛,构成了该架构的核心技术壁垒。

4) 关节运动自重构的层级式架构。关节型机器人的重构涉及高维连续空间内复杂的运动学与动力学耦合,单一的分布式或集中式控制难以胜任,通常须采用层级式架构(hierarchical architecture)。在“宏观层”,系统依赖区域级或全局的集中算力节点求解无碰撞路径规划与高维逆运动学(ik);在“微观层”,则交由底层的分布式微控制器(MCU)执行高频的关节闭环伺服控制。更为严苛的是,为保证多个关节在连续变形过程中的严格时钟同步以规避结构干涉(self-collision),该系统对内部通信总线(如 CAN FD、EtherCAT 等)的硬实时性与确定性带宽提出了极高的技术要求。

## 5.4 发展趋势展望

面向未来,模块化可重构机器人的研究将呈现出多层次、系统化的演进趋势:

1) 构型设计的异构融合与软化。模块设计将突破单一刚性结构的限制,向“刚柔耦合”方向发展。引入介电弹性体等软体材料,使模块具备本质安全与形变适应能力;同时,发展涵盖感知、计算、能源及驱动的异构功能模块库,通过“乐高式”组合实现任务定制。

2) 控制架构的分布式与群体智能。为解决大规模集群控制难题,研究重点将从集中式规划转向分布式群体智能(swarm intelligence)。结合生物启发式算法(如黏菌算法、人工蜂群),使模块仅凭局部交互即可涌现出全局有序的自组织行为,大幅提升系统的鲁棒性与可扩展性。

3) 智能决策的“虚实迁移”。深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)将成为解决复杂重构决策的关键技术。通过在仿真环境中进行海量试错训练,利用 Sim-to-Real 技术将策略迁移至物理样机,使机器人能够在未知环境中自主探索最优构型与运动步态,实现真正的全自主作业。

4) 工程应用的垂直深耕。模块化机器人有望在国防与航天领域率先实现突破。特别是在空间在轨服务(on-orbit servicing)领域,利用其高压缩比发射与在轨展开能力,构建超大口徑望远镜或太空电站;在战场伴随保障中,利用其自修复能力提高装备的生存概率。

综上所述,模块化可重构机器人作为一种具备高度自适应性的变革性装备,随着材料、算法与 AI 技术的深度融合,必将在未来的智能化无人系统中占据核心地位。

## 参考文献 (References)

- [1] 田闯. 工业机器人的现状及发展趋势研究[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(20): 156-157.  
TIAN C. Research on the present situation and development trend of industrial robots [J]. China Management Informationization, 2019, 22(20): 156-157. (in Chinese)
- [2] 唐术锋. 基于万向式关节模块的自重构机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
TANG S F. Research of self-reconfigurable robot based on universal joint module [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] FUKUDA T, NAKAGAWA S. A self-reorganized robotic system with cell structure [J]. IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems, 1987, 107(11): 1019-1026.
- [4] LIANG G Q, WU D, TU Y X, et al. Decoding modular reconfigurable robots: a survey on mechanisms and

- design[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2025, 44(5): 740–767.
- [5] LIU J G, ZHANG X, HAO G B. Survey on research and development of reconfigurable modular robots[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(8): 1–21.
- [6] NILLES A, CERON S, NAPP N, et al. Strain-based consensus in soft, inflatable robots[C]//*Proceedings of IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 2022: 789–794.
- [7] CERON S, KIMMEL M A, NILLES A, et al. Soft robotic oscillators with strain-based coordination[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 7557–7563.
- [8] YU C H, HALLER K, INGBER D, et al. Morpho: a self-deformable modular robot inspired by cellular structure[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 3571–3578.
- [9] GARCIA R F M, LYDER A, CHRISTENSEN D J, et al. Reusable electronics and adaptable communication as implemented in the Odin modular robot[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009: 1152–1158.
- [10] LYDER A, GARCIA R F M, STOY K. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 883–888.
- [11] ZHANG H X, GONZALEZ-GOMEZ J, ME Z Z, et al. Development of a low-cost flexible modular robot GZ-I[C]//*Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008: 223–228.
- [12] GRANOSIK G, HANSEN M G, BORENSTEIN J. The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance[J]. *Industrial Robot*, 2005, 32(2): 139–148.
- [13] FUKUDA T, KAWAUCHI Y. Cellular robotic system (CEBOT) as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulator[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990: 662–667.
- [14] FUKUDA T, NAKAGAWA S, KAWAUCHI Y, et al. Structure decision method for self organising robots based on cell structures-CEBOT[C]//*Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 1989: 695–700.
- [15] FUKUDA T, NAKAGAWA S. Approach to the dynamically reconfigurable robotic system[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1988, 1(1): 55–72.
- [16] KAWAUCHI Y, INABA M, FUKUDA T. A principle of distributed decision making of eellular robotic system (CEBOT) [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993: 833–838.
- [17] TAN W S, WEI H X, YANG B. Sambot II: a new self-assembly modular robot platform based on Sambot [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1719.
- [18] WEI H X, CHEN Y D, TAN J D, et al. Sambot: a self-assembly modular robot system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(4): 745–757.
- [19] ZHANG Y C, WEI H X, YANG B, et al. Sambot II: a self-assembly modular swarm robot [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1955: 040156.
- [20] WEI H X, LI H Y, GUAN Y, et al. A dynamics based two-stage path model for the docking navigation of a self-assembly modular robot (Sambot) [J]. *Robotica*, 2016, 34(7): 1517–1528.
- [21] SALDAÑA D, GABRICH B, LI G R, et al. ModQuad: the flying modular structure that self-assembles in midair [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018: 691–698.
- [22] XU J W, D' ANTONIO D S, SALDAÑA D. Modular multirotors: from quadrotors to fully-actuated aerial vehicles[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 19328–19339.
- [23] GABRICH B, LI G R, YIM M. ModQuad-DoF: a novel yaw actuation for modular quadrotors [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020: 8267–8273.
- [24] LIU C, LIN Q, KIM H, et al. Parallel self-assembly with SMORES-EP, a modular robot [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020.
- [25] JING G Y, TOSUN T, YIM M, et al. An end-to-end system for accomplishing tasks with modular robots[C]//*Proceedings of Robotics: Science and Systems 2016*, 2016.
- [26] LIU C, TOSUN T, YIM M. A low-cost, highly customizable solution for position estimation in modular robots[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2021, 13(6): 061004.
- [27] LIU C, LIN Q, KIM H, et al. SMORES-EP, a modular robot with parallel self-assembly[J]. *Autonomous Robots*, 2023, 47(2): 211–228.
- [28] WANG W, GHENETI B, MATEOS L A, et al. Roboat: an autonomous surface vehicle for urban waterways [C]//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019: 6340–6347.
- [29] WANG W, SHAN T X, LEONI P, et al. Roboat II: a novel autonomous surface vessel for urban environments [C]//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020: 1740–1747.
- [30] TU Y X, LIANG G Q, WU D, et al. Locomotion and self-reconfiguration autonomy for spherical freeform modular robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2026, 45(3): 477–500.
- [31] WU D, LIANG G Q, TU Y X, et al. Linear-time quasi-static stability detection for modular self-reconfigurable robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2025, 44(6): 908–931.
- [32] TU Y X, LIANG G Q, LAM T L. FreeSN: a freeform strut-node structured modular self-reconfigurable robot-design and implementation [C]//*Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022: 4239–4245.
- [33] LI X Z, TU Y X, LIANG G Q, et al. Energy sharing mechanism for freeform robots utilizing conductive spherical sliding surfaces[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2024: 10762–10769.
- [34] TU Y X, LAM T L. Configuration identification for a freeform modular self-reconfigurable robot-FreeSN [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(6): 4636–4652.
- [35] BOLOTNIKOVA A, HOLDCROFT K, CERBONE H, et al. Optimized user-guided motion control of modular robots[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8675.

- [36] HOLDCROFT K, BOLOTNIKOVA A, BELKE C, et al. Modular robot networking: a novel schema and its performance assessment [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2022: 12698 – 12705.
- [37] HOLDCROFT K, BELKE C, SIGRIST A, et al. Hybrid wireless-local communication via information propagation for modular robotic synchronization applications [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(6): 2100226.
- [38] DAVEY J, KWOK N, YIM M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012: 4464 – 4469.
- [39] LIANG G Q, LUO H B, LI M, et al. FreeBOT: a freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point-design and implementation [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020: 6506 – 6513.
- [40] LIANG G Q, TU Y X, ZONG L J, et al. Energy sharing mechanism for a freeform robotic system-FreeBOT [C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022: 4232 – 4238.
- [41] TU Y X, LIANG G Q, LAM T L. Graph convolutional network based configuration detection for freeform modular robot using magnetic sensor array [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021: 4252 – 4258.
- [42] YAO M B, XIAO X M, BELKE C H, et al. Optimal distribution of active modules in reconfiguration planning of modular robots [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11: 011017.
- [43] BELKE C H, PAIK J. Mori: a modular origami robot [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 2153 – 2164.
- [44] YAO M B, XIAO X M, TIAN Y, et al. An actuation fault tolerance approach to reconfiguration planning of modular self-folding robots [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 8274 – 8280.
- [45] TUCCI T, PIRANDA B, BOURGEOIS J. A distributed self-assembly planning algorithm for modular robots [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, 2018: 550 – 558.
- [46] YIM M, SHIRMOHAMMADI B, SASTRA J, et al. Towards robotic self-reassembly after explosion [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 2767 – 2772.
- [47] LIU W G, WINFIELD A F T. Self-assembly in heterogeneous modular robots [C]//Proceedings of the 11th International Symposium, 2014: 219 – 232.
- [48] ALATTAS R J, PATEL S, SOBH T M. Evolutionary modular robotics: survey and analysis [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(3): 815 – 828.
- [49] STOY K. Using cellular automata and gradients to control self-reconfiguration [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(2): 135 – 141.
- [50] SONG Q L, YE D, SUN Z W, et al. Autonomous reconfiguration of homogeneous pivoting cube modular satellite by deep reinforcement learning [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235(10): 1777 – 1786.
- [51] 费燕琼, 张鑫, 夏振兴. 自重构模块化机器人的运动空间及自变形算法 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 197 – 202.
- FEI Y Q, ZHANG X, XIA Z X. Motion spaces and self-morphing algorithm of self-reconfigurable modular robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 197 – 202. (in Chinese)
- [52] TORISAKA A, HASEGAWA S, MIURA S, et al. Optimization and demonstration of 3D self-assembly system of hierarchical modular space structure using electromagnet [C]//Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.
- [53] AN B K. Em-Cube: cube-shaped, self-reconfigurable robots sliding on structure surfaces [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 3149 – 3155.
- [54] TORISAKA A, HASEGAWA S, MIURA S, et al. Electromagnet-based three-dimensional self-assembly system for hierarchical modular space structures [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2021, 58(2): 472 – 485.
- [55] HAUSER S, MUTLU M, IJSPEERT A J. Kubits: solid-state self-reconfiguration with programmable magnets [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6443 – 6450.
- [56] ROMANISHIN J W, GILPIN K, RUS D. M-Blocks: momentum-driven, magnetic modular robots [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 4288 – 4295.
- [57] GAPCHUP A, WANI A. Flying rubick's with self assembling using M-Blocks [C]//Proceedings of the International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2017: 1 – 6.
- [58] ÖZDEMİR A, ROMANISHIN J W, GROB R, et al. Decentralized gathering of stochastic, oblivious agents on a grid: a case study with 3D M-Blocks [C]//Proceedings of the International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS), 2019: 245 – 251.
- [59] ROMANISHIN J W, MAMISH J, RUS D. Decentralized control for 3D M-Blocks for path following, line formation, and light gradient aggregation [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2019: 4862 – 4868.
- [60] ROMANISHIN J W, GILPIN K, CLAICI S, et al. 3D M-Blocks: self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015: 1925 – 1932.
- [61] BIE D Y, ZHU Y H, WANG X L, et al. L-systems driven self-reconfiguration of modular robots [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(5): 1 – 12.
- [62] BIE D Y, ZHANG Y, ZHAO X G, et al. A bio-inspired self-reparation approach for lattice self-reconfigurable modular robots [C]//Intelligent Robotics and Applications, 2019: 667 – 671.
- [63] 别东洋. 模块化自重构机器人分布式变形策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- BIE D Y. Research on distributed reconfiguring strategy of modular self-reconfigurable robots [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

- [64] NISSER M, CHENG L, MAKARAM Y, et al. ElectroVoxel: electromagnetically actuated pivoting for scalable modular self-reconfigurable robots [C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022: 4254–4260.
- [65] NISSER M, IZZO D, BORGGRAEFE A. An electromagnetically actuated, self-reconfigurable space structure [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2017, 14: Pd\_1-Pd\_9.
- [66] SONG Q L, YE D, SUN Z W, et al. Motion planning techniques for self-configuration of homogeneous pivoting cube modular satellites [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 120: 107249.
- [67] ABABSA T, DJEDL N, DUTHEN Y. Genetic programming-based self-reconfiguration planning for metamorphic robot[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(4): 431–442.
- [68] DOKUYUCU H İ, GÜRSEL ÖZMEN N. Development of a new path-planning algorithm for lattice based self-reconfigurable modular robots with pivoting cube shaped modules[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2025, 188: 104955.
- [69] HURTADO F, MOLINA E, RAMASWAMI S, et al. Distributed reconfiguration of 2D lattice-based modular robotic systems[J]. Autonomous Robots, 2015, 38(4): 383–413.
- [70] MENG Y, JIN Y C. Morphogenetic self-reconfiguration of modular robots[M]//MENG Y, JIN Y C. Bio-Inspired Self-Organizing Robotic Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 143–171.
- [71] FESHBACH D, SUNG C. Reconfiguring non-convex holes in pivoting modular cube robots [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 6701–6708.
- [72] BHATTACHARJEE A, LU Y T, BECKER A T, et al. Magnetically controlled modular cubes with reconfigurable self-assembly and disassembly [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(3): 1793–1805.
- [73] KAWANO H. Linear heterogeneous reconfiguration of cubic modular robots via simultaneous tunneling and permutation[C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019: 332–338.
- [74] KAWANO H. Distributed tunneling reconfiguration of cubic modular robots without meta-module's disassembling in severe space requirement [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 124: 103369.
- [75] WU Q X, CAO G Y, FEI Y Q. Described model of a modular self-reconfigurable robot [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetic, 2005: 188–193.
- [76] KAWANO H. Complete reconfiguration algorithm for sliding cube-shaped modular robots with only sliding motion primitive[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015: 3276–3283.
- [77] LU Y T, BHATTACHARJEE A, TAYLOR C C, et al. Closed-loop control of magnetic modular cubes for 2D self-assembly[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9): 5998–6005.
- [78] VASSILVITSKII S, YIM M, SUH J. A complete, local and parallel reconfiguration algorithm for cube style modular robots[C]// Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002: 117–122.
- [79] KUOKAWA H, KAMIMURA A, YOSHIDA E, et al. Self-reconfigurable modular robot (M-TRAN) and its motion design[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002: 51–56.
- [80] KAMIMURA A, KUOKAWA H, YOSHIDA E, et al. Distributed adaptive locomotion by a modular robotic system, M-TRAN II [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2004: 2370–2377.
- [81] KUOKAWA H, TOMITA K, KAMIMURA A, et al. Distributed self-reconfiguration control of modular robot M-TRAN [C]//Proceedings of IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005: 254–259.
- [82] KUOKAWA H, TOMITA K, KAMIMURA A, et al. Distributed self-reconfiguration of M-TRAN III modular robotic system[J]. The International Journal of Robotics Research, 2008, 27(3/4): 373–386.
- [83] YOSHIDA E, MURATA S, KAMIMURA A, et al. Evolutionary motion synthesis for a modular robot using genetic algorithm[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2003, 15(2): 227–237.
- [84] YOSHIDA E, MURATA S, KAMIMURA A, et al. Evolutionary synthesis of dynamic motion and reconfiguration process for a modular robot M-TRAN [C]//Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2003: 1004–1010.
- [85] KUOKAWA H, KAMIMURA A, YOSHIDA E, et al. M-TRAN II: metamorphosis from a four-legged walker to a caterpillar[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), 2003: 2454–2459.
- [86] 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.
- [87] KUOKAWA H, YOSHIDA E, TOMITA K, et al. Self-reconfigurable M-TRAN structures and walker generation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(2): 142–149.
- [88] SALEMI B, MOLL M, SHEN W M. SUPERBOT: a deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 3636–3641.
- [89] SHEN W M, KRIVOKON M, CHIU H, et al. Multimode locomotion via SuperBot robots[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006: 2552–2557.
- [90] SHEN W M, KRIVOKON M, CHIU H, et al. Multimode locomotion via SuperBot reconfigurable robots [J]. Autonomous Robots, 2006, 20(2): 165–177.
- [91] FITCH R, MCALLISTER R. Hierarchical planning for self-reconfiguring robots using module kinematics [C]//Proceedings of the 10th International Symposium, 2013: 477–490.
- [92] NIGOLIAN V, MUTLU M, HAUSER S, et al. Self-reconfigurable modular robot interface using virtual reality: arrangement of furniture made out of Roombots modules[C]//

- Proceedings of the 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2017: 772–778.
- [93] SPROEWITZ A, LAPRADE P, BONARDI S, et al. Roombots: towards decentralized reconfiguration with self-reconfiguring modular robotic metamodules [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 1126–1132.
- [94] SPRÖWITZ A, POUYA S, BONARDI S, et al. Roombots: reconfigurable robots for adaptive furniture [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2010, 5(3): 20–32.
- [95] SPRÖWITZ A, MOECKEL R, VESPIGNANI M, et al. Roombots: a hardware perspective on 3D self-reconfiguration and locomotion with a homogeneous modular robot [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(7): 1016–1033.
- [96] SPROEWITZ A, BILLARD A, DILLENBOURG P, et al. Roombots-mechanical design of self-reconfiguring modular robots for adaptive furniture [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 4259–4264.
- [97] HAUSER S, MUTLU M, LÉZIART P A, et al. Roombots extended: challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 127: 103467.
- [98] MOECKEL R, PEROV Y N, NGUYEN A T, et al. Gait optimization for Roombots modular robots: matching simulation and reality [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 3265–3272.
- [99] QI J, LAI M Z, YANG Z Y, et al. A fault-tolerant approach for modular robots through self-reconfiguration[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 6(7): 2300774.
- [100] ZHANG C, ZHU P G, LIN Y Q, et al. Modular soft robotics: modular units, connection mechanisms, and applications [J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2(6): 1900166.
- [101] ZHAO J, CUI X D, ZHU Y H, et al. UBot: a new reconfigurable modular robotic system with multimode locomotion ability [J]. Industrial Robot, 2012, 39(2): 178–190.
- [102] ZHU Y H, JIN H Z, FAN J Z, et al. Stimulus pulse-based distributed control for the locomotion of a UBot modular robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(403): 2013.
- [103] YANG Z Y, LAI M Z, QI J, et al. Reorientation and obstacle avoidance control of free-floating modular robots using sinusoidal oscillator [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(6): 262–275.
- [104] BIE D Y, SAJID I, HAN J D, et al. Natural growth-inspired distributed self-reconfiguration of UBot robots[J]. Complexity, 2019, 2019(1): 2712015.
- [105] ZHAO N, ZHAO S K, ZHENG T J, et al. Modular snake-like robot designed for on-site reconfiguration in space exploration[J]. Biomimetics, 2025, 10(5): 293.
- [106] ZHAO N, GAO L, YANG Z Y, et al. Meta-module mutual assistance: a bioinspired design for self-assembly of modular space robot [J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(7): 2200450.
- [107] WU W, SHAO T M, CHEN G M. Influence of groove surface texture on temperature rise under dry sliding friction[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(2): 183–190.
- [108] YANG Z Y, ZHAO S K, ZHOU N L, et al. Efficient locomotion for space robots inspired by the flying snake[J]. Aerospace, 2024, 11(12): 1025.
- [109] YANG Z Y, ZHAO S K, HAN K, et al. Design of a multi-environmentally adaptable modular self-reconfigurable robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(10): 8627–8634.
- [110] ZHU Y H, ZHAO J, CUI X D, et al. Design and implementation of UBot: a modular self-reconfigurable robot[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2013: 1217–1222.
- [111] CUI X D, ZHU Y H, ZHAO J, et al. Bio-inspired locomotion control for UBot self-reconfigurable modular robot[C]//Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), 2023: 1–6.
- [112] ZHAO J, WANG X L, ZHU Y H. Automatic generating controller expressions and locomotion for UBot modular self-reconfigurable robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015: 923–928.
- [113] ZHAO J, WANG X L, JIN H Z, et al. Automatic locomotion generation for a UBot modular robot-towards both high-speed and multiple patterns[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(4): 32.
- [114] ZHAO N, GAO Y S, QI J, et al. An efficient self-reconfiguration method to deploy space modular robots[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(12): 3962–3964.
- [115] ZHAO J, CUI X D, ZHU Y H, et al. A new self-reconfigurable modular robotic system UBot: multi-mode locomotion and self-reconfiguration [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 1020–1025.
- [116] ZHU Y H, BIE D Y, IQBAL S, et al. A simplified approach to realize cellular automata for UBot modular self-reconfigurable robots[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 79(1): 37–54.