

申报级别	申报类别	项目编号
重点	科研创新项目	

荣誉攀登项目 申报表

项 目 名 称	群智模块化自重构机器人
项 目 负 责 人	杜高源
指 导 老 师	郭斌
申 报 日 期	2022 年 4 月 29 日

项目名称		群智模块化自重构机器人					
项目来源		<input type="checkbox"/> 企业联合 <input checked="" type="checkbox"/> 专题研究 <input type="checkbox"/> 军工行业 <input type="checkbox"/> 其他____					
项目实施时间		起始时间： 2022 年 5 月 完成时间： 2023 年 5 月					
申请人或申请团队		姓名	年级	学校	所在院系/专业	联系电话	E-mail
	主持人	杜高源	2020	西北工业大学	教育实验学院计算机大类	15729056096	2296704779@qq.com
	成员	徐王锦	2020	西北工业大学	教育实验学院计算机大类	13773699722	2446092971@qq.com
		赵文哲	2020	西北工业大学	教育实验学院计算机大类	15266586801	2286304176@qq.com
	主要成果	1. 成员均获得荣誉学籍 2. 第 20 届三航杯创新赛道二等奖两项 3. 国家级获奖两项，包括中国机器人及人工智能大赛、全国机器人锦标赛等竞赛 4. 舞蹈机器人基地救援组成员，负责机械臂底盘部分的软件设计与维护 5. 足球机器人基地标准平台组成员，负责实物策略设计及维护 6. 一项省级大创在研，两项校级大创在研					
指导教师	姓名	郭斌		研究方向	普适计算、群体感知		
	出生年月	1980 年 8 月		行政职务/专业技术职务	计算机学院院长助理		
	手机	18729229010		电子邮箱	guobin.keio@gmail.com		

师	主要成果	<p>本项目指导老师为西北工业大学计算机学院郭斌教授/博导，国家杰出青年科学基金获得者，军委科技委重点项目专家组专家，陕西高校青年创新团队负责人。在 IEEE/ACM 汇刊等国内外重要期刊和会议上发表论文 150 余篇，国际上率先研发了开源可定制的群智感知计算平台 CrowdOS (www.crowdos.cn/) 和人机物融合群智计算开放平台 (www.crowdhmt.com/)，且面向智慧城市、公共安全、智能制造等国家重大需求开展领域应用和技术推广。曾获得教育部自然科学一等奖、陕西省自然科学一等奖以及 IEEE UIC' 17、ISI' 19 等国际会议“最佳论文奖”6 次。担任 UbiComp, CHI, PerCom, MobiQuitous 等权威国际会议程序委员，以及 IEEE Transactions on Human-Machine Systems、IEEE Communications Magazine、ACM IMWUT 等权威国际期刊编委。IEEE 高级会员，中国计算机学会杰出会员。</p>
<p>一、研究的理论和实际应用价值，目前国内外研究的现状和趋势</p> <p>1.1 研究的理论</p> <p>形态可变机器人的概念最早是由 Toshio Fukuda 在 1985 年提出，命名为 CEBOT (“细胞机器人系统”的缩写)，后来更名为模块化机器人系统，简称模块化机器人。此项目主要研究模块化机器人包括硬件设计、算法设计(协同控制、快速重构)、远程交互技术、模拟仿真技术等方面的理论和方法。</p> <p>1.2 实际应用价值</p> <p>对于人类来说，机器人可以帮助人类更舒适地完成 4D(肮脏、危险、困难和枯燥)任务。</p> <p>传统的机器人根据目标任务设计专门的软硬件，在结构化环境中可以精确地执行特定任务，广泛的应用于制造业、医疗服务、救灾排险、资源勘探等领域；但是，传统机器人的灵活性和自适应能力不是很强，因此仅能基于它们固定的物理结构和控制器能力完成一些特定的任务。</p> <p>模块化自重构机器人系统由一系列结构简单、功能相同但相互之间完全独立的单元模块组成，每个模块都具有独立处理信息的能力。他能根据自身所处环境及任务内容的改变，通过单元模块之间连接、断开和通信等有序动作实时调整自身的构型，以适应不同的外界环境要求，最终完成任务。自重构机器人采取模块化的设计思想，摆脱了传统单体机器人构型不可变的限制，也让机器人结构设计变得简单；当构型中某些模块出现故障时，机器人仍可以完成任务，并可以通过更换新的部分模块完成修复。相对于传统的机器人，模块化自重构机器人具有更好的鲁棒性、适应性以及可靠性。现可以应用到灾后救援、军事侦察以及航天探索等领域，实用价值极高。</p> <p>1.3 国内外研究的现状和趋势</p> <p>群智模块化自重构机器人(MSRR)是近年来的研究热点。MSRR 系统由许多重复的模块组成，这些模块可以根据任务要求重新排列成不同的构型。现在已经在包括航天机械臂等领域得到了初步的应用。</p>		

模块化自重构机器人最核心的活动是改变其形状或形态。这种变化也是自重构领域研究的主题。自重构的研究最早出现在 20 世纪 90 年代中期，与模块化机器人硬件设计的发展并行。^[1]自重构是在保持模块总数的前提下，通过一组基本的、模块级的动作将模块化机器人从初始构型转化为理想构型的过程，而自重构规划则是对这些动作序列进行规划的过程，这比传统机器人规划中的类似问题更具挑战性，因为它具有大量的模块，以及模块运动和控制中普遍存在的同时性和异步性，目前还没有通用的解决方案，每种设计都有其独特的亮点与用途，但同时也存在其不足。

模块化自重构机器人的关键技术主要集中在三个方面：在自重构机器人硬件模块研究方面，根据其模块间的连接关系、模块的运动形式以及模块的拓扑结构可以将其分为晶格式、链式和混合式自重构机器人；在自重构机器人重构算法的研究方面，受到模块结构与功能的约束，主要分为基于栅格约束的重构策略和链式的重构策略；而在自重构机器人协调运动规划的研究方面，包含荷尔蒙分布式、支链协调运动等方式。^[2]

以往的 MSRR 模块难以实现自由形式的机器人系统，因为它们的物理约束依然很多，如：模块连接器是性别对立的，离散的；自组装时，模块需要规划轨迹以对准连接器；模块之间的连接耗时长，成功率低。通过对接机制，实现模块间的连接，分离和系统重构。因此，对接机构是 MSRR 系统最基本的组成部分之一，国内外，许多创新性的对接机构被设计出来。例如，由直流电机，激活的挂钩，永磁体，电磁铁，或电永磁体。对于 MSRR 系统来说，这些都不是一个有效的连接机制。由于之前的 MSRR 系统的构型受到连接器位置和性别的限制，在 MSRR 模块上构型多个连接器已经成为越来越多的共识。如果一个模块可以同时连接多个模块，**即开发一个硬件平台**，则可以丰富 MSRR 系统的构型，满足更多的功能需求。但是，多连接器模块不仅增加了机器人的重量、体积和制造成本，而且给算法层面的路径规划带来了复杂的物理约束。

自重构机器人既要实现硬件的自重构（机器人的对接、分离、操作和运动等），同时实时控制系统也必须是自重构的，这样才能适应机器人工作场景的快速变化。控制系统设计的好坏在很大程度上影响着机器人的各项性能。因此，在控制软件的设计上，应满足以下要求：

①控制软件的修改不能因工作任务的变化而变得复杂，具有应用界面友好易于操作的特点；

②软件应具有良好的安全机制和一定的容错能力，在必要时应启动保护程序，维护机器人各结构的安全；

③软件应能实现对机器人的实时控制，对各种外界情况的响应应该迅速及时；④软件应有良好的可扩展性，便于扩大机器人的适用范围。

目前，科学家已趋向使用分布式算法来实现对机器人的控制，根据这种算法编制的控制软件，不但能实现对机器人的实时控制，而且在容错能力上，也有很出色的表现。日本东北大学与名古屋大学合作研制的 Slimebot 机器人，在每一个模块上都采用一种功能性材料和一个非线性振荡器前者作为自发连接控制装置，后者作为位置控制的核心装置，通过每一模块的简单控制，来实现系统整体的自我重组，目前颇具借鉴意义。^[3]

1.4 参考文献

- [1] Liang G, Luo H, Li M, et al. Freebot: A freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point-design and implementation[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020: 6506-6513.
- [2] Ahmadzadeh H, Masehian E. Modular robotic systems: Methods and algorithms for abstraction, planning, control, and synchronization[J]. Artificial Intelligence, 2015, 223: 27-64.
- [3] 孙雪艳. 自重构机器人单元模块设计及重构策略的研究. MS thesis. 天津理工大学, 2016.

二、研究目标、研究内容、要解决的关键问题

2.1 研究目标

1. 开发可靠可扩展的模块化机器人硬件平台：我们期望在这个平台上实现自重构规划算法和具体任务，支持连接更多模块化机器人，移植其他算法进行实物验证。
2. 设计模块化机器人集群自重构算法：实现群体运动控制与协同、人机交互与合作、环境感知与自我调整等智能效果。
3. 攻克从仿真到实物的软硬件难题：将自重构算法完整移植到硬件平台上，在实物上实现仿真预期效果，完成软硬件两个层面的缝合和对接。

2.2 研究内容

1. 研究机器人硬件电控的方案和体系，通过研究对比国内外已有的相关论文，掌握其相关算法和方案框架，结合项目实际，做出一定的创新与完善。考虑到模块化机器人在不同形态的实际应用中执行各种复杂任务的具体情况，我们期望建立一个可靠的模块化机器人的硬件平台，在这个平台上实现自我重构、自我组装、运动等复杂规划算法和其他具体任务，并且保持可拓展性，可以添加更多模块化机器人、移植其他算法进行实物验证。
2. 研究自重构算法和远程交互技术，现有的自重构算法种类繁多但始终没有找到最优解，我们希望能够基于强化学习的方法，开发出性能更佳的自重构算法。同时，我们期望利用远程设备：电脑或者移动终端，给出指令，从而使得模块化机器人根据指令面对环境的变化而对自身的形态做出调整，实现自重构效果，以达到人们生产生活的需求。
3. 克服从仿真验证到实物验证的壁垒，仅仅具有良好的上层算法的良好模拟效果和远程交互的理论可行性无疑于纸上谈兵，只有将这些移植到模块化机器人的硬件上，利用仿真技术将理论演化为实践，并在实践中达到理想的预期，才能得到真正意义上性能良好的可供生产实践的模块化机器人。

2.3 要解决的关键问题

1. 模块化机器人高效自由连接硬件设计、协同运动控制算法设计
2. 模块化机器人快速重构算法设计、远程人机交互实现
3. 仿真环境算法设计到真实环境机器人部署过程中的 Sim2Real 问题

三、研究思路和研究方法、计划进度、前期研究基础

3.1 研究思路和研究方法

研究思路：查阅文献、阅读论文，了解模块化自重构机器人（MSRR）的国际前沿发展，找到突破点与创新点，立足已有知识和理论，结合项目情况和要求，进行自主创新实践。

研究方法：算法设计仿真与实物硬件调试相结合，基于国际前沿方向和技术，继续进行创新研究。广泛调研、深入探索、重复实践、达到预期。

3.2 计划进度

第一阶段，到 2022 年 8 月底，根据预期效果，完成机器人硬件方案的了解、阅读和学习，初步形成硬件电控的设计方案，同时，学习了解机器人控制理论与强化学习算法，学习了解已发表的高水平论文的实现方式和算法思路。

第二阶段，到 2022 年 12 月底，完成机器人硬件电控系统层次的设计，完成模块化机器人群体的可重构（即根据上层电脑或移动终端的指令进行姿态调整和形态变化），尝试实现机器人自重构算法的调研和创新创造，实现简单模型。

第三阶段，到 2023 年 3 月底，实现上层算法，并通过检验性的仿真性能测试，实现从仿真到实物（sim2real）——将算法移植到硬件上，调试硬件得到达到预期自重构的实践效果。

第四阶段，到 2023 年 5 月底，继续完善实物效果，思考、尝试项目的可拓展性，汇总项目学习实践成果，完成研究报告，写成两篇论文，在老师的指导下修改完善，准备结项工作。

3.3 前期研究基础

近年的综述文章总结了一些模块化自重构机器人的算法实现思路和硬件结构模式，算法实现思路有：基于搜索、基于控制、基于强化学习 agent、基于生物启发算法或者其他一些智能方法。而硬件结构主要有三种：晶格式、链式和混合式。

IROS 2020 的机器人机构设计最佳论文《FreeBOT: A Freeform Modular Self-reconfigurable Robot with Arbitrary Connection Point - Design and Implementation》中提到了一种受巴克球启发的，基于弱磁连接的模块化自重构机器人，可以在两个电机的驱动下完成多项任务，和其他模块进行一些简单配合。

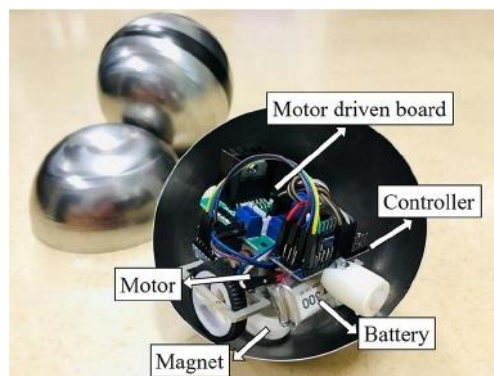


图 1 中为论文中提到的硬件结构

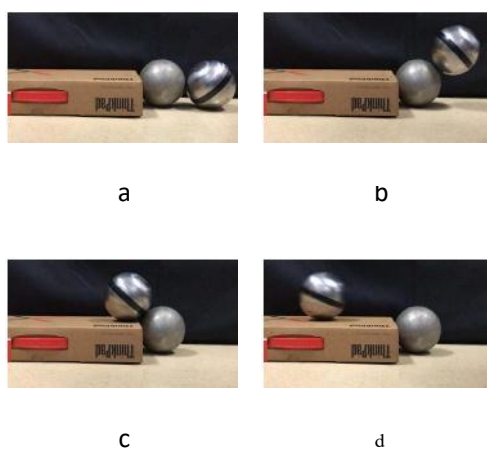


图 2 中为两个自由机器人合作爬楼梯效果图

我们目前希望能够参考相对成熟的球形机器人硬件来开发硬件平台，不排除后续不满足项目需求而自底层实现的可能。我们拟选用 **Sphero Bolt** 球形机器人作为初始的模块化单元来进行升级改造。这种机器人目前可以通过蓝牙在手机或电脑上实现 30m 范围内的操纵。

Sphero Bolt 的直径为 4.3 公分（和桌球大小接近），重量为 168g；外壳采用高透的塑料制成，内置指南针、加速器和陀螺仪；充电装置则采用了底座感应充电。其内部硬件由电池、电机、轮子、电控板、四个红外传感器、一个环境光传感器和一个矩形 LED 屏幕组成，具有一定的外部环境感知能力。



图 3 中为 Sphero Bolt 机器人实物

四、预期研究成果和特色

4.1 预期研究成果

整合攀登项目完成期间的学习收获、研究发现，汇总得到调研报告和研究报告，实现可自重构的模块化机器人实物，可以实地或以视频形式展示，如果条件允许，公开发表研究论文。

4.2 特色

现有机器人理论和强化学习方法很少实现从仿真到实物的完整过程，其中模块化机器人的自重构算法设计和实物电控实现更是一个国际前沿的热点课题。目前已发表的相关论文对于机器人自重构的实现程度均不大。此项目将着眼于攻克从仿真到实物的软硬件难题，从实现一个较为通用的模块化球形机器人平台做起，在这个机器人硬件平台上实现较高水平的自重构算法，得到较好的实物效果。

五、经费预算

开支科目	经费预算（元）	主要用途
打印复印、资料费	1000	论文、报告等打印与相关资料、书籍准备
硬件材料费	12000	机器人硬件、打印件、电控、相机、传感器

算法仿真费	8000	算法开发与仿真过程中的花费
外出调研、学术交流差旅费	1000	赴他校参观考察相关研究情况
发表学术论文版面费	8000	预计两篇论文的发表费用
总计		30000 元
<p>十一、导师推荐意见</p> <p>该研究属于国际前沿。项目成果包括实物演示和论文等。</p> <p style="text-align: right;">签名：</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p>		
<p>十二、学院意见</p> <p style="text-align: right;">院系负责人签名（盖章）：</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p>		