

文章编号: 1008-1542(2022)06-0602-11

模块化自重构机器人关键技术综述及研究展望

张 岩, 王 晴, 康永霖, 豆小超, 丁宇鹏, 王亚彬

(河北科技大学电气工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:近年来,模块化自重构机器人因其构型复杂多样、运动模式丰富多变、目标构型可重构等特性而备受关注。通过对模块化自重构机器人关键技术的文献进行归纳,对现有的模块化自重构机器人关键技术进行了全面总结。首先,介绍了模块化自重构机器人的结构特点以及拓扑结构,重点分析了 3 种拓扑结构的优缺点以及发展趋势;其次,对自重构机器人现有的关键技术进行了综述,重点关注了模块化自重构机器人 3 种不同连接结构的物理原理和基本结构、机器人模块的重构算法以及重构过程的快速性 3 方面技术,分析总结了其优缺点以及发展现状;最后,针对自重构机器人空间在轨、抢险救灾两项任务的发展前景进行了展望,并提出未来的研究重点:1)探索连结结构的强刚度和轻质量的兼具方法,高效快速完成机器人重构过程;2)作业过程中,重构算法的高容错性和低耗能发展;3)将实时数据与所建立的动力学模型进行有机结合,对机器人进行人工调整,提高机器人的作业效率。

关键词:工业机器人技术;自重构;模块化;连结结构;重构算法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

DOI: 10.7535/hbkd.2022yx06005

Review on key technologies of modular self-reconfigurable robots

ZHANG Yan, WANG Qing, KANG Yonglin, DOU Xiaochao, DING Yupeng, WANG Yabin

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In recent years, modular self-reconfigurable robots have attracted much attention due to their complex and diverse configurations, varied motion modes and reconfigurable target configurations. By summarizing the literature on the key technologies of modular self-reconfigurable robots, the existing key technologies of modular self-reconfigurable robots were summarized comprehensively. Firstly, the structural characteristics and topological structure of the modular self-reconfigurable robot were introduced, and the advantages and disadvantages of the three topological structures as well as the development trend were analyzed. Secondly, the existing key technologies of self-reconfigurable robots were summarized, focusing on the physical principles and basic structures of three different connection structures of modular self-reconfigurable

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-09-10; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 河北省自然科学基金(E2019208443); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021202); 教育部产学研合作协同育人项目(202002303007); 河北科技大学大学生创新创业训练计划项目(2021047Z)

第一作者简介: 张 岩(1983—), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要从事机器人与机器学习、静电理论与电磁环境效应方面的研究。

E-mail: yanyanfly163@163.com

张岩, 王晴, 康永霖, 等. 模块化自重构机器人关键技术综述及研究展望[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43(6): 602-612.

ZHANG Yan, WANG Qing, KANG Yonglin, et al. Review on key technologies of modular self-reconfigurable robots[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(6): 602-612.

robots, the reconstruction algorithm of robot modules and the rapidity of the reconstruction process. The advantages and disadvantages as well as the development status of these technologies were analyzed and summarized. Finally, the development prospects of the space in-orbit and rescue and disaster relief tasks of the self-reconfiguration robot were prospected, and the future research priorities were proposed as follows: 1) To explore the method of both strong stiffness and light weight of the connected structure to efficiently and quickly complete the robot reconfiguration process; 2) To develop high fault tolerance and low energy consumption of reconstruction algorithm during operation; 3) To combine the real-time data with the established dynamic model organically to manually adjust the robot and improve the operating efficiency of the robot.

Keywords: industrial robot technology; self-reconfigurable; modularization; connected structure; reconstruction algorithm

21 世纪以来,机器人技术在军事侦察、勘探勘测、医疗服务、工业生产等领域得到了广泛应用,对于国家经济建设和国防科技进步具有重要意义。传统机器人由于特定的结构、功能和运动形式,可以实现高速、精确、可重复位置等任务^[1]。但是,这些机器人环境适应能力低、自行复原能力较弱而且并不具有自我变形的能力,因此只能在结构化环境下工作。上述缺陷也影响着传统机器人在动态、未知、非结构化的复杂环境领域中的使用,如军事侦查、灾害救助和科学监测等^[2]。

在自重构机器人长时间重复使用中,往往出现模块连接不牢固、发热等问题,限制了机器人的作业环境,严重影响了其在抢险救灾等狭小、不确定环境中的应用^[3]。近年来,自重构机器人以其工作中的稳定高效运行为目标,对部分关键技术提出了进一步要求,人们的研究方向从整体向细节转变。本文对当前自重构机器人所取得的主要研究成果进行综述,归纳总结自重构机器人连接结构的优缺点、重构算法的高效性与重构过程的快速性 3 项关键技术,讨论自重构机器人的应用发展趋势,并对其未来发展进行展望。

1 模块化自重构机器人简介

模块化的可重构机器人系统是由至少若干只具备 1 个简单运算功能单元的机器人标准模块组成起来的,其中每一标准模块都是指一种高度自治化的机械电子单元系统^[4],如图 1 所示,它必须具备机器人独立的自主运动、计算能力和计算机通信能力。大量的功能结构相同、具有满足一定人类认知学习能力要求的智能模块之间通过一种自重构算法进行连接和组合,构成一个自重构模块智能机器人。目前最具优势的特点之一是它能够实现在几乎没有任何外界条件干涉的条件下,利用智能模块系统之间的相互主动连接和分离,自动地调整其系统的拓扑结构,以应对复杂环境,完成任务^[5]。

按照模块间连接的拓扑构造,可以把模块化自重构机械人分成串联式、阵列式、混合式^[6] 3 种结构,如图 2 所示。在串联式、阵列式和混合式 3 种结构中,由于串联式构造较简单,因此机器人的基本结构和运动控制也就相对地很简便且稳定性也较高,只是在复杂的环境作业中常发生故障;阵列式的结构机器人构型在运动控制方面较为繁琐,在运动路线规划方面也加大了难度。根据上述 2 种机器人的优点,研究人员设计出了混合式自重构机器人,其特点是结构简单且适应工作环境能力较强,在自重构机器人近几年乃至将来的发展过程中,越来越受到人们的青睐,并在灾难救援、空间探测、管道检测等领域中发挥重要作用。

表 1 从机器人拓扑结构、单/多方位系统、同/异构、连结结构等方面总结了近年来国内外关于自重构机器人结构上的研究成果。国内外自重构机器人发展迅速,拓扑结构方面自重构机器人由最初的串联式、阵列式逐渐趋向于混合式;模块的连接方位逐渐趋向于有多个连接面的多方位系统,结构功能上也趋向模块结构功能相同的同构机器人。

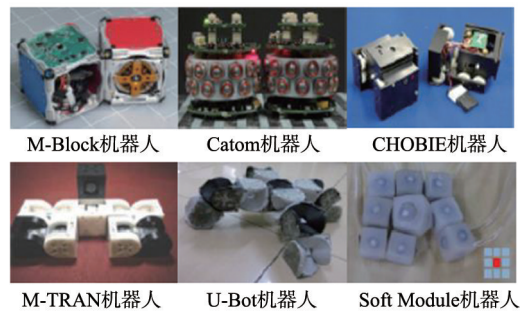


图 1 自重构机器人
Fig.1 Self-reconfigurable robot

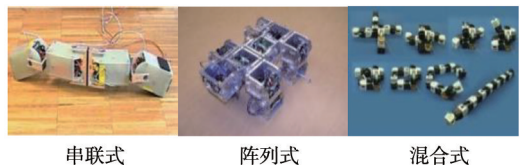


图 2 拓扑结构
Fig.2 Topology

表1 国内外关于自重构机器人关键技术方面的研究成果

Tab.1 Domestic and foreign research results on key technologies of self-reconfigurable robots

研究机构	年份	机器人	拓扑结构	单/多方位系统	同/异构机器人	连接结构	文献编号
日本名古屋大学	1988	CEBOT	串联式	单	异构	机械式	[7]
美国施乐帕克研究中心	1994	Polybot	串联式	多	异构	机械式	[8—16]
美国 Dartmouth 学院	1998	Molecube	阵列式	多	异构	机械式	[17—20]
南加利福尼亚大学	2000	CONRO	串联式	多	同构	机械式	[21—23]
日本产业技术总合研究所	2000	M-TRAN	混合式	多	同构	机械式	[24—27]
上海交通大学	2004	USS	串联式	单	异构	机械-电磁式	[28]
上海交通大学	2005	M-Cube	阵列式	多	同构	机械式	[29—31]
哈尔滨工业大学	2009	HITMSR II	混合式	多	同构	机械-电磁式	[32]和[33]
天津理工大学	2014	M ² SBot	混合式	多	同构	机械-电磁式	[34]
麻省理工学院	2015	3D M-Blocks	混合式	多	同构	机械-电磁式	[35]和[36]
哈尔滨工业大学	2016	Seremo	混合式	多	同构	机械-电磁式	[37]
英国谢菲尔德大学	2018	HyMod	混合式	多	同构	机械-电磁式	[38]
瑞士洛桑联邦理工学院	2020	Kubits	混合式	多	同构	机械-电磁式	[39]

2 模块化自重构机器人关键技术综述

2.1 自重构机器人连接结构研究

连接结构是自重构机器人的关键组成之一,机器人模块在重构过程中相互的连接和可控分离,以及机器人在运动过程中相邻模块的稳固连接、自重构功能,都与模块间连接结构的设计紧密相关。但因为各个模块化机器人研究的侧重点和要求不同,其连接结构的装置设计形式便具有了多样性,如机械式、电磁式、机械-电磁式等连接结构^[40]。

2.1.1 机械式连接结构

机械式连接结构在工作过程中,往往具有受环境影响小、耗能较低、连接稳定牢固等特点,其主要包含钩爪式、销孔式等多种具体的连接结构^[41]。由于机械式的连接结构连接较稳定,连接结构在重构过程中不易分离,所以在连接/分离过程中需要较大的空间^[42],更适用于较空旷的工作环境中,典型的连接/分离原理如图3所示。

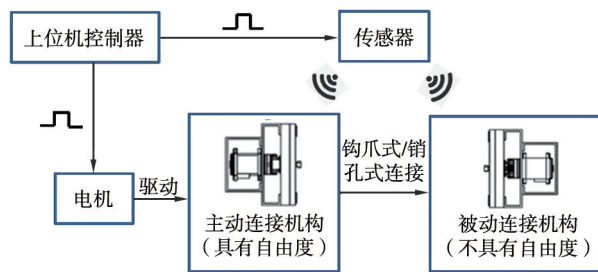


图3 机械式连接/分离

Fig.3 Mechanical connection/separation

2.1.2 电磁式连接结构

最初的磁力模块连接结构是由2个磁极相反永磁体所组成^[43],这个连接方法虽然操作起来简便、可行性强,但它必须用大于它原来磁力的外力将磁力模块分开。后来出现的模块化的机器人系统设计中往往会使用电磁体,磁力的方向和大小受电流改变的影响^[44],进而使模块之间实现有效连接与分离。因为磁力大小是和连接模块间距成反比^[45],对一般机械的连接模块结构形式来说,只依靠磁力的机械连接模块结构形式连接强度相对较弱,易受到环境中磁力的影响,且因为需要一直供电导致耗能较多^[41],但磁性连接结构连接/分离过程中需要空间比较小,典型的连接/分离原理如图4所示。

2.1.3 机械-电磁式连接结构

研究人员结合2种连接结构的优点,设计了一种机械-电磁式的连接结构^[40],以此应对机械式与电磁式2种自重构连接结构在作业中遇到的困难。机械-电磁式的连接结构不仅具有电磁式连接可靠、易于分离的

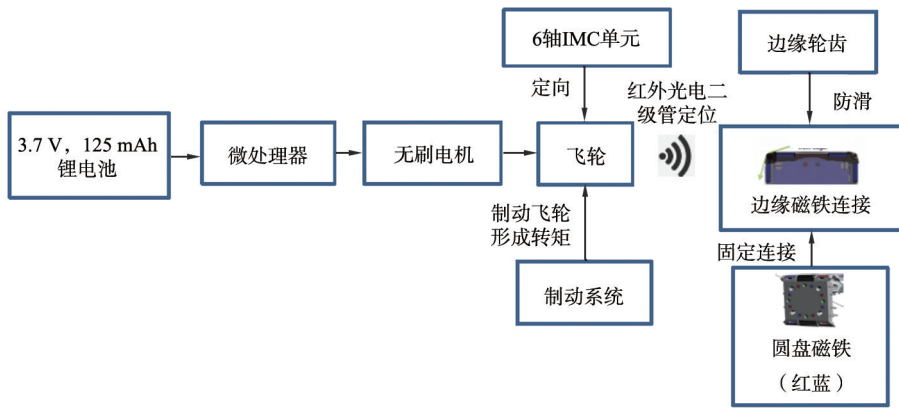


图 4 电磁式连接/分离

Fig.4 Electromagnetic connection/separation

优点,还具备机械式连接结构模块体积较小、结构简单、耗能小等优点^[46],更适合作业于未知、复杂的环境,其连接/分离原理如图 5 所示。

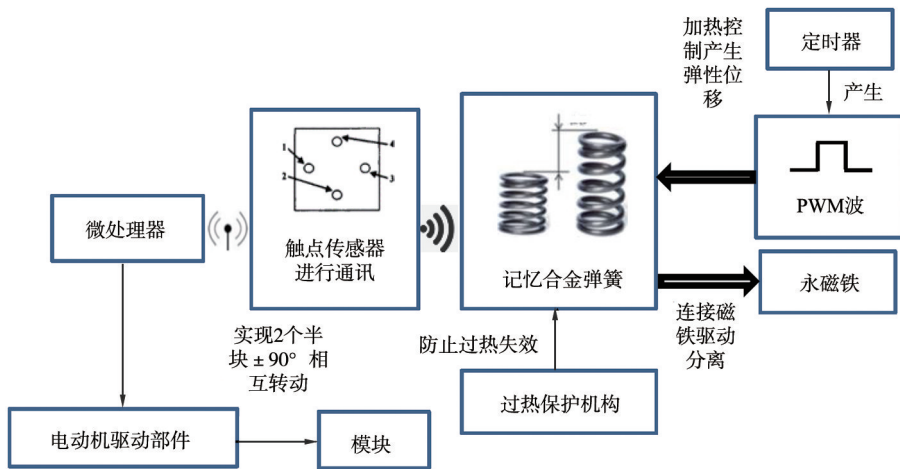


图 5 机械-电磁式连接/分离

Fig.5 Mechanical-electromagnetic connection/separation

图 6 总结了自重构机器人 3 种连结结构各自的优缺点:机械式连接结构虽然耗能低、连接牢固、可靠性高,但分离较困难,需要较大的空间完成重构;电磁式连接机构研发简单、迅速,重构需要空间较小,且连接和断开较容易,但其往往能耗较高,且会出现发热等现象;机械-电磁式兼具机械式和电磁式 2 种连接结构模块体积小、结构简单、连接稳固,重构过程耗能小、容易分离等优点。目前,机械-电磁相结合的新型连接结构越来越多地得到研究人员的使用^[46],人们对已有的连接结构不断进行创新、改造,解决出现的问题,但仍然出现了机器人模块连接稳定性与机器人重构高效性 2 种性能不共存、工作过程连接机构发热等问题^[47]。可见,相关关键技术的研究依旧是十分必要的。

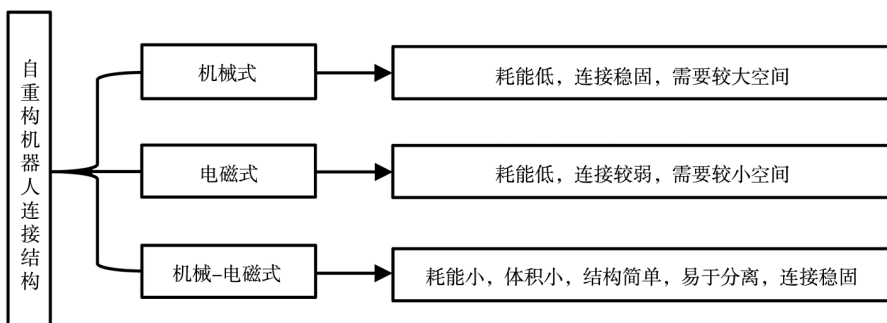


图 6 自重构机器人连接结构的特点

Fig.6 Characteristics of self-reconfigurable robot connection structure

2.2 自重构机器人重构算法研究

在模块化自重构机器人重构过程中,模块间的连接与分离离不开准确高效的重组算法,拥有一套合适的运动自重构规划算法对于自重构机器人来说意义重大。进入 21 世纪以来,自重构机器人发展更加迅速,各国科学家致力于构建更加适用于机器人的重组算法,力求新的突破,在提高模块空间规划效率的同时,又能提高其运动能力,减少不必要的能量损耗。

英国赫瑞瓦特大学 LARKWORTHY 等^[48]提出了一种六边形变胞自重构系统的高效规划算法,如图 7 所示。其中,移动的痕迹以灰色显示,蓝色代表机器人模块,白色代表空白空间,轨迹是单个机器人单元可以自由移动的地方(如箭头所示)。该算法在随机问题实例上实现了 $O(n)$ 平均的时间复杂度,其能够在包含少于 20 000 个单元的配置的一般状态空间中解决大约 97% 的规划,状态空间根据规划效率分为 2 类。第 1 类配置允许欧拉之旅(Euler tour)缠绕在机器人集合体上,欧拉之旅的存在意味着模块可以在安全气囊的周边自由移动,此类配置之间的规划可以使用专门的规划算法在 $O(n)$ 中执行;第 2 种专门的规划算法从一般配置规划到附近的欧拉巡回配置,使规划的距离很短。通过 2 种算法的共同使用,更快速准确地为六边形变形机器人规划可执行的任务配置。

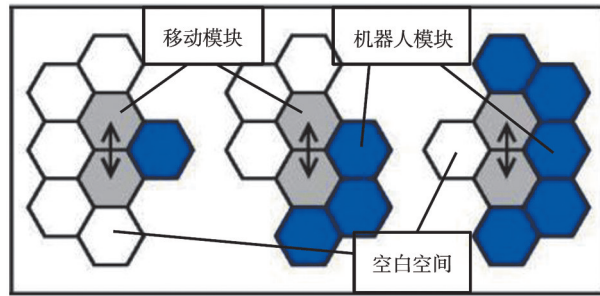


图 7 六边形机器人重构配置

Fig.7 Hexagon robot reconfiguration

德国 LUTZ 等^[49]提出了一种解决移动模块化机器人自重构问题的方法,如图 8 所示。在该方法中,机器人在最终配置中所处的位置由运行时的群体机制决定,其采用多个重构复杂度各异的自重构机器人进行仿真规划和自重构执行实验,最终证明该方法可行,且相较于以往所提出的自重构方法具有明显的优越性。

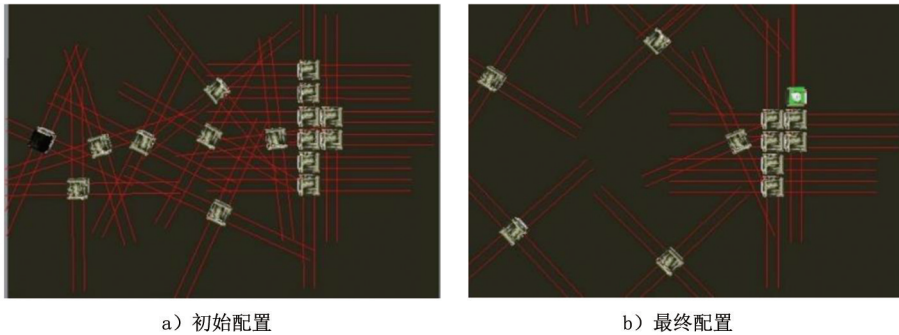


图 8 模块化机器人重构配置

Fig.8 Modular robot reconfiguration

NAZ 等^[50]研制了一种基于柱形 L 格的模块化机器人分布式自重构算法,用于探索使用实时观测量子遗传算法(QGAs)来进化神经控制器,如图 9 所示。该控制器能够在自适应移动任务中控制自重构模块化机器人。近年来,量子启发的遗传算法在许多具有挑战性的应用中显示出了优于传统遗传算法的优势。NAZ 等^[50]用几种量子气体变量进行实验,实际观测的 QGA 在解决数值优化问题上取得了很好的结果。此研究使用了有 2 个自由度和 4 个连接面的模块化自重构机器人,并设置了不同的机器人配置进行了几项实验,从测试移动特性的单个模块配置到检查自重构新配置的几个断开的模块配置,以及蛇形、四足和滚动轨道配置。结果表明,该机器人能够满足全部测试场景的工作需求,自重构过程中可以产生稳定的步态,即使用真实观测 QGA 进化的人工神经控制器能够有效控制自重构模块化机器人执行自适应运动任务。

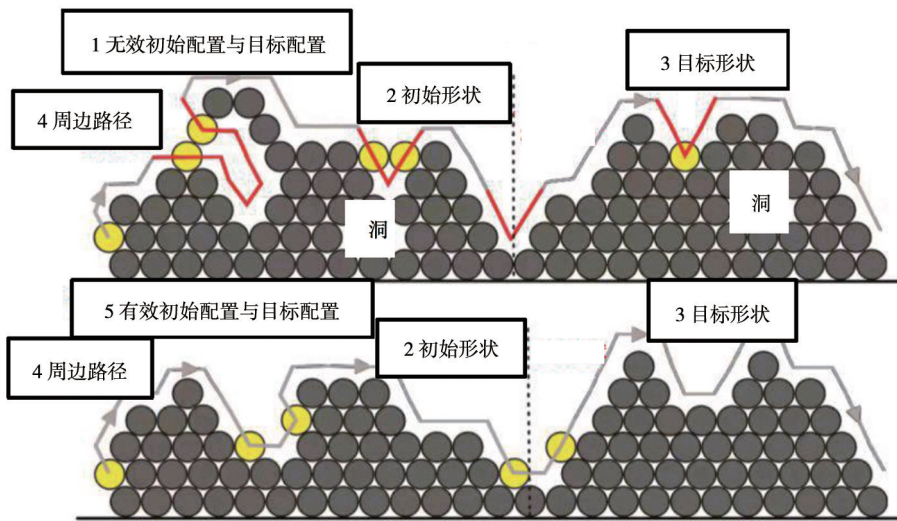


图 9 分布式自重构算法

Fig.9 Distributed self-reconfigurable algorithm

表 2 列举了国内部分研究机构提出的典型重构算法。

表 2 国内部分典型重构算法

Tab.2 Typical domestic reconstruction algorithms

研究机构	研究人员	算 法	参考文献编号
哈尔滨工业大学	赵杰	基于动态子单元的集中式分层规划方法和面对拓扑构型改变与基于动态子单元的 3 层规划策略	[32—33]
天津理工大学	杨洪光	一种对自重构机器人的构型变换的规划算法	[51]
杭州电子科技大学	刘碧川	一种分布式并行自重构算法	[52]
上海交通大学	苏士程	一种基于标记点的自变形算法	[55]
哈尔滨工业大学	王博	一种基于深度 Q 学习方法的分布式自变构规划方法	[53]
长春工业大学	安天娇	一种基于积分滑膜的可重构机器人最优控制算法	[54]

2.3 自重构机器人快速性研究

理想情况下,自重构机器人重构的快速性往往取决于机器人模块分离、连接快速性,随着机器人模块数量的增加,重构的快速性成为模块化自重构机器人技术研究的难点。

目前多个研究机构已经提出了多种优化方法来加速转换以及设计形状本身的技术。例如 VASSIL-VITSKII 等^[55]提出精确的模块几何形状,其可以在线性时间内实现多形态自主性、跳跃性的自重构,使机器人从模块的平圆盘形态自重构成另一种形态,这种方法为自重构模块化机器人系统的可扩展性开辟了新途径。

文献[49]提出了一种将自动规划作为移动模块化机器人自重构的方法。在作业中,机器人依据当前模块的结构形态计算各种重构方法所需的时间,并在其中找到最佳的重构方法进行自动重构。同时,机器人计算的重构时间也会提供给操作者,操作者可以控制机器人暂停目前的重构方法,并根据工作需要自行更换重构方法。未来的模块化机器人发展,在理论上会愈来愈广泛,在该方法中,根据重构对时间长短的需求,机器人会自动找到最佳方法并进行重构,模块化自重构机器人的重构快速性研究可以以此为新的研究思路 and 理论依据。

另外,文献[56]提出了一种具有确定性的新型分布式方法,使大规模自重构可以在合理的时间内完成。其设计了一种放置在重构场景下能够快速构建结构的支架,如图 10 所示,这种支架是可参数化的,并且具有立方晶格结构。此外,其还提出了 2 点优化,一是在模块内部留下内部孔,用来促进运动;二是使支架被模块覆盖,在促进运动的同时保持支架的外观。由此产生的物体将包含比其他情况下更少的模块,并且这些模块将能够在物体内部移动,这 2 个优化有助于减少自重构时间。

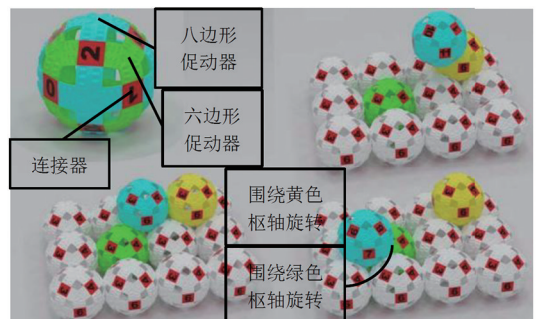


图 10 确定性支架组装

Fig.10 Deterministic bracket assembly

机器人重构的快速性利于机器人更好地适应不确定的工

作环境,其在自重构机器人的研究领域展现出广阔的发展前景。重构快速性的提升重点在于模块几何形状的设计、机器人重构结构形态的规划等多个方面,但当前国内外相关方面的研究还较为薄弱,有必要对其开展更进一步的研究。

3 模块化自重构机器人热点应用领域

3.1 基于空间在轨任务的自重构机器人应用

空间在轨任务包含空间站建造与运营工作、空间实验的开展、航天器维护等任务,如图 11 所示。为适应不同的空间在轨任务,自重构机器人自动迅速地改变自身结构,组成各种复杂构型的机器人,来减少受空间复杂、日常任务繁重等问题的影响。在空间在轨任务中,自重构机器人用于一些航天员难以到达的狭小空间里,感应、收集、处理并传送信息,或用于对航天设备进行检查、探测、表面清洁、修复损坏等,或用于对需要的设备、材料等进行搬运、装配操作等工作中^[57]。

但在空间站作业中,能源的补给往往不能及时提供,机器人控制系统还要具备相对较高程度的容错性与安全性,来提高机器人自修复功能,进而减少能量的消耗。为满足空间站的环境要求,应使用混合型自重构机器人进行作业,当某个模块发生故障时,模块之间相互运动、聚集到一起,利用自重构算法,迅速找出系统自修复运动中的最短路径,控制空闲的同类型正常功能模块与损坏失效的模块按照规划路径互换位置,快速、低耗能完成自重构机器人自修复功能,保证机器人结构和功能的完整性,提高航空运行中大量精细化任务的工作效率,这对降低航天员的工作量、提升空间在轨工作质量具有重要意义^[58]。

3.2 基于抢险救灾任务的自重构机器人应用

通过自然界长期的物种选择,各种生物在运动控制、身体构造等方面已经产生了极强的适应性。为了适应自重构机器人在抢险救灾未知、恶劣的环境中作业,需要选择更适应环境的仿生机器人为研究对象^[59],如图 12 所示,比如模仿蛇类动物爬行方式的蛇形机器人、模仿猎豹跳跃的四足机器人、具有一定柔顺性的机械臂等。与普通模块化自重构机器人相比,仿生机器人在复杂地形上具有更好的通过性和稳定性,在抢险救灾中的侦察、检测、排除危险、输送物资等领域具有显著的优势和广阔的应用前景^[60-61]。

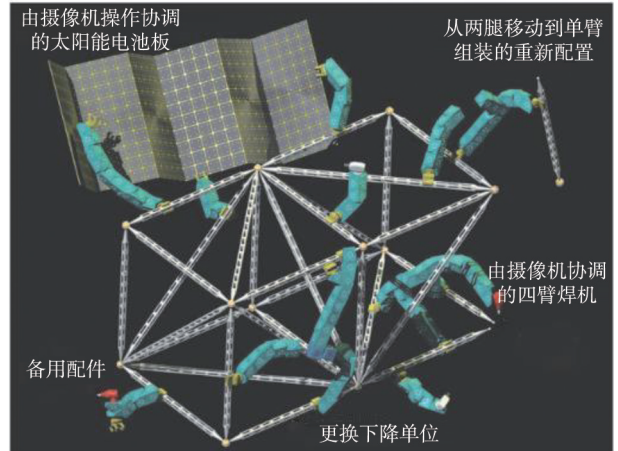
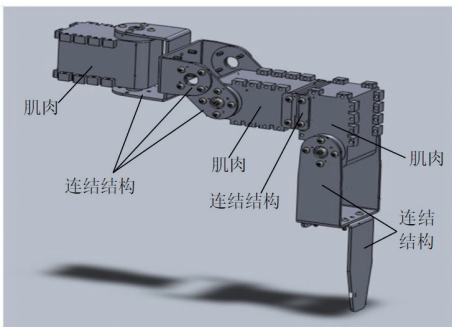
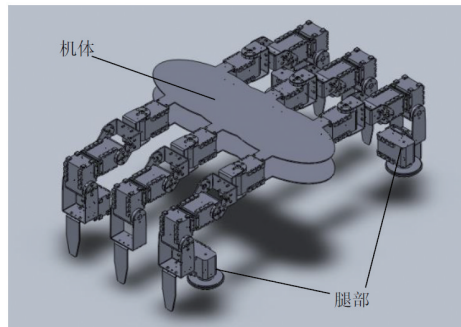


图 11 机器人空间在轨任务

Fig.11 Robotic space missions in orbit



a) 仿生自重构机器人腿部模型



b) 仿生自重构机器人六足机构模型

图 12 仿生自重构机器人

Fig.12 Bionic self-reconfigurable robot

4 存在的问题及研究展望

4.1 存在的问题及不足

随着机器人技术的蓬勃发展,模块化自重构机器人在抢险救灾、空间检测等复杂环境中凸显出重要的应

用价值,已经吸引了世界各研究机构的注意,但目前自重构机器人还存在不足,具体如下。

1)机器人模块往往使用3D打印技术,实现了模型高精度、高效率、低成本、低重量、多规格制作,保证了机器人作业过程中模块的灵巧性,但3D打印的材料刚度不够高,受模块连接/分离过程中碰撞易发生变形,降低了任务的完成质量。

2)动物的关节运动是通过肌肉收缩实现的,但机器人往往依靠电机驱动,仿生机器人的灵活性和协调性远不如真正的生物,如何使关节运动与控制系统完美配合,使机器人对灾区地形、环境的适应能力更强,可应用的场合更多,是仿生自重构机器人亟需解决的难题。

3)因模块外部模型磨损、内部结构精度不足、外界环境存在复杂多变的未知情况等,模块化自重构机器人重构过程可能在机器人运动过程中产生较大误差,导致模块连接结构的结合快速性与准确性不能得到保证,进而影响任务的正常进行。另外,具有相同模块的同构模块化自重构机器人,不同位置的各模块动作所需要的驱动力可能是不同的,在作业中往往造成部分模块驱动能力的浪费。

4)模块化自重构机器人往往代替人类工作于环境恶劣、空间狭小等人类难以到达或者不利于人类工作的环境中,例如抢险救灾、军事侦察、航空航天等。而在未知多变的环境中,机器人损坏的概率也相对较高,且机器人回收、检查等工作也不易进行,增加了机器人改进升级工作的难度。

4.2 研究展望

受工作环境的影响,模块化自重构机器人工作效率的提高成为研究者关注的主要问题,分层、分布式等多种高效规划算法的提出,配合机器人模块快速移动、重构结构的创新,推动自重构机器人工作效率迅速提升。但也仍面临着一些挑战,如机器人连结结构、重构算法、工作数据利用等方面的问题,均成为未来模块化自重构机器人的研究方向,具体如下。

1)连结结构强刚度研究。连结结构是模块化自重构机器人重构的关键之一,对实现自重构机器人重构的高效快速是必不可少的,然而在实际作业中,往往要求连结结构兼具强刚度和轻重量2个充满矛盾性的综合性能,这对目前国内外各个研究机构仍是技术难点。

2)仿生机器人灵活性研究。实际环境中,生物体的适应能力远远优于仿生机器人,为了使关节结构与控制系统完美配合,更好地适应作业环境,需要提高机器人控制系统的性能以及机器人智能水平,提高机器人运动的灵活性和协调性。

3)重构算法低耗能研究。模块化自重构机器人的优势在于其灵活多变的构型,以及对复杂环境的适应能力,其重构路径和规划问题在作业中发挥着重要的作用。在复杂恶劣的作业环境中,机器人易受环境影响产生误差,造成能量的过度消耗,消耗的能量不能及时补充,且需要反馈系统进行自修复,这种情况下,研究能够同时满足机器人重构的高容错性且低耗能的算法是十分必要的。

4)应用数据有效利用研究。自重构模块机器人在应用过程中都会产生大量的实际数据,在模块上装备视频拍摄传输设备及传感器设备,实时监测机器人作业环境和重构过程,将数据与所建立的动力学模型相结合,检测算法运行的合理性,必要时可对机器人进行人工调整,以提高机器人的作业效率,并对机器人工作及损坏数据进行分析,针对出现的不足做出改进,不断提升机器人工作性能。

模块化自重构机器人依靠自身灵活多变的特点,将更广泛地用于传统工业、日常生活、空间在轨、抢险救灾等任务中。因此,模块化自重构机器人的研究工作具有巨大的发展空间和现实意义。

参考文献/References:

- [1] 徐磊.模块化个人机器人结构设计及运动规划的研究[D].上海:上海交通大学,2009.
XU Lei.Research on Structure Design and Motion Planning of the Modular Personal Robot[D].Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [2] 林杨乔.流体驱动的模块化软体机器人的关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2019.
LIN Yangqiao.Research on Key Technologies of Fluid Driven Modular Soft Robot[D].Hangzhou:Zhejiang University,2019.
- [3] 刘策越.面向快速测试进化形态的模块化机器人研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
LIU Ceyue.Research on Modular Robot for Quick Testing of Evolved Robot Morphologies[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2018.
- [4] 刘开元,陈萌,费燕琼.串联型模块化机器人重构策略[J].高技术通讯,2019,29(10):995-1002.

- LIU Kaiyuan, CHEN Meng, FEI Yanqiong. Reconfiguration strategy of series modular robot[J]. Chinese High Technology Letters, 2019, 29(10): 995-1002.
- [5] 苏士程. 混合型自重构模块化机器人的设计及自变形方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
SU Shicheng. Research on the Structure and Self-morphing Method of the Hybrid Self-reconfigurable Modular Robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [6] YIM M, SHEN W M, SALEMI B, et al. Modular self-reconfigurable robot systems-challenges and opportunities for the future[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine: A Publication of the IEEE Robotics and Automation Society, 2007, 14(1): 43-52.
- [7] FOLLADOR M, CIANCHETTI M, LASCHI C. Development of the functional unit of a completely soft octopus-like robotic arm[C]// 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). Rome: IEEE, 2012: 640-645.
- [8] YIM M, HOMANS S, ROUFAS K. Climbing with snake-like robots[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2001, 34(4): 7-12.
- [9] YIM M, DUFF D, ZHANG Y. Closed-chain motion with large mechanical advantage[C]// Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems-Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). Maui: IEEE, 2001: 318-323.
- [10] DUFF D G, YIM M, ROUFAS K. Evolution of polybot: A modular reconfigurable robot[C]// Proc of the Harmonic Drive Intl Symposium. Nagano: [s.n.], 2001: 1-7.
- [11] YIM M, DUFF D G, ROUFAS K D. Walk on the wild side: Designers of the polybot robot system solve the challenges of locomotion by mimicking locomotion in the animal world[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2002, 9(4): 49-53.
- [12] YIM M, ROUFAS K, DUFF D, et al. Modular reconfigurable robots in space applications[J]. Autonomous Robots, 2003, 14(2): 225-237.
- [13] YIM M, DUFF D G, ROUFAS K. Modular reconfiguration robots, an approach to urban search and rescue[C]// Proc of 1st International Workshop on Human-friendly Welfare Robot Systems. [S.l.]: [s.n.], 2000: 69-76.
- [14] YIM M, DUFF D G, ROUFAS K D. PolyBot: A modular reconfigurable robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000: 514-520.
- [15] YIM M, ZHANG Y, ROUFAS K, et al. Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with PolyBot[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 442-451.
- [16] ROUFAS K, ZHANG Y, DUFF D, et al. Six degree of freedom sensing for docking using IR LED emitters and receivers[C]// Experimental Robotics VII. Berlin: Springer, 2001: 91-100.
- [17] KOTAY K, RUS D, VONA M, et al. The self-reconfiguring robotic molecule[C]// 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE, 1998: 424-431.
- [18] KOTAY K D. Scalable parallel algorithm for configuration planning for self-reconfiguring robots[J]. Proceedings of SPIE, 2000(1): 377-387.
- [19] KOTAY K, RUS D. Locomotion versatility through self-reconfiguration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 26(2/3): 217-232.
- [20] KOTAY K, RUS D. Efficient locomotion for a self-reconfiguring robot[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2005: 2963-2969.
- [21] CASTANO A, BEHAR A, WILL P M. The conro modules for reconfigurable robots[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 403-409.
- [22] CASTANO A, WILL P. Mechanical design of a module for reconfigurable robots[C]// Proceedings 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Takamatsu: IEEE, 2000: 2203-2209.
- [23] KHOSHNEVIS B, KOVAC R, SHEN W M, et al. Reconnectable joints for self-reconfigurable robots[C]// Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems-Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium. Maui: IEEE, 2001: 584-589.
- [24] KUROKAWA H, TOMITA K, YOSHIDA E, et al. Motion simulation of a modular robotic system[C]// 2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society-IECON 2000. Nagoya: IEEE, 2000: 2473-2478.
- [25] 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.
- [26] 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). Las Vegas: IEEE, 2003: 2454-2459.
- [27] KUROKAWA 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.
- [28] 苏一华, 葛彤, 连琰. 水下分散自重构模块的硬件设计[J]. 航海工程, 2005(3): 49-52.
SU Yihua, GE Tong, LIAN Lian. Hardware design of the underwater self-reconfigurable modules[J]. Ship & Ocean Engineering, 2005(3): 49-52.
- [29] 夏平, 朱新坚, 费燕琼. 一种新型自重构模块机器人的机构设计[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(6): 40-42.

- XIA Ping,ZHU Xinjian,FEI Yanqiong.Mechanical design of a novel modular self-reconfigurable robot[J].Machine Design and Research, 2005,21(6):40-42.
- [30] 夏平,朱新坚,费燕琼.一种新型的自重构模块机器人[J].上海交通大学学报,2006,40(3):431-434.
XIA Ping,ZHU Xinjian,FEI Yanqiong.A novel self-reconfigurable modular robot[J].Journal of Shanghai Jiao Tong University,2006,40(3):431-434.
- [31] 费燕琼,夏振兴,夏平.自重构机器人的基本模块结构设计与分析[J].中国机械工程,2007,18(9):1085-1088.
FEI Yanqiong,XIA Zhenxing,XIA Ping.Structural design and analysis of a module in self-reconfigurable robots[J].China Mechanical Engineering,2007,18(9):1085-1088.
- [32] 赵杰,张亮,蔡鹤皋.一种均一阵列式模块化自重构机器人的机构设计研究[J].机械与电子,2003(4):56-59.
ZHAO Jie,ZHANG Liang,CAI Hegao.Research on mechanism design of a homogenous lattice modular Self-Reconfigurable robot[J].Machinery & Electronics,2003(4):56-59.
- [33] 张玉华,赵杰,张亮,等.新型模块化可重构机器人系统[J].机械工程学报,2006(sup1):175-178.
ZHANG Yuhua,ZHAO Jie,ZHANG Liang,et al.Novel modular self-reconfigurable robot system[J].Journal of Mechanical Engineering, 2006(sup1):175-178.
- [34] 雷营林.自重构模块化机器人:M2SBot 结构设计与研究[D].天津:天津理工大学,2014.
LEI Yinglin.Self-Reconfigurable Modular Robots:Structure Design and Study of M2SBot[D].Tianjin:Tianjin University of Technology, 2014.
- [35] 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.Tokyo:IEEE,2013:4288-4295.
- [36] 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).Seattle:IEEE,2015:1925-1932.
- [37] BIE Dongyang,ZHU Yanhe,WANG Xiaolu,et al.L-systems driven self-reconfiguration of modular robots[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2016,13(5).DOI:10.1177/1729881416669349.
- [38] PARROTT C,DODD T J,GROB R.HyMod:A 3-DOF hybrid Mobile and Self-Reconfigurable modular robot and its extensions[C]//Distributed Autonomous Robotic Systems:13th International Symposium.London:Springer,2018:401-414.
- [39] 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.
- [40] 李明哲.基于球形单元模块自重构机器人自重构策略的研究[D].北京:北京邮电大学,2021.
LI Mingzhe.Research on Self-Reconfiguration Strategy of Self-Reconfigurable Robot Based on Spherical Unit Module[D].Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications,2021.
- [41] 刘俊凯.弹性机器人原型设计及其自主对接技术研究[D].上海:华东理工大学,2019.
LIU Junkai.Research on Prototype Design and Autonomous Docking Technology of Resilient Robot[D].Shanghai:East China University of Science and Technology,2019.
- [42] 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 Dongyang.Research on Distributed Reconfiguring Strategy of modular Self-Reconfigurable robots[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.
- [43] 杨帆.基于被动关节的多模块移动微机器人设计与运动控制研究[D].上海:上海交通大学,2011.
YANG Fan.Design and Research on Modular Mobile Microrobots Based on Passive Joints[D].Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [44] 张红升.电控永磁压边方法关键技术及拉深工艺研究[D].秦皇岛:燕山大学,2021.
ZHANG Hongsheng.Research on the Key Technology of Electro-Permanent Magnet Blank Holder and Deep Drawing Process[D].Qinhuangdao:Yanshan University,2021.
- [45] 李瑞华.双转子平动式啮合电机设计与特性分析[D].北京:北京邮电大学,2010.
LI Ruihua.Design and Studies on Novel Double Rotors Translational Meshing Motor[D].Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications,2010.
- [46] 孙雪艳.自重构机器人单元模块设计及重构策略的研究[D].天津:天津理工大学,2016.
SUN Xueyan.The Unit Module Design and Research of Reconfigurable Strategy for Self-Reconfigurable Robot[D].Tianjin:Tianjin University of Technology,2016.
- [47] 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 Shufeng.Research of Self-Reconfigurable Robot Based on Universal Joint Module[D].Harbin:Harbin Institute of Technology, 2010.
- [48] LARKWORTHY T,RAMAMOORTHY S.An efficient algorithm for self-reconfiguration planning in a modular robot[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation.Anchorage:IEEE,2010:5139-5146.

- [49] BIHLMAIER A, WINKLER L, WÖRN H. Automated planning as a new approach for the self-reconfiguration of Mobile modular robots [C]//9th International Workshop on Robot Motion and Control. Kuslin; IEEE, 2013; 60-65.
- [50] NAZ A, PIRANDA B, BOURGEOIS J, et al. A distributed self-reconfiguration algorithm for cylindrical lattice-based modular robots [C]//2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA). Cambridge; IEEE, 2016; 254-263.
- [51] 杨洪光. 自重构机器人重构规划算法的研究及动力学分析 [D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
YANG Hongguang. The Study of Self-Reconfiguration Robots' Reconfiguration Planning and Dynamics Analysis [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.
- [52] 刘碧川. 模块化自重构机器人可控性及运动规划研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
LIU Bichuan. Research on Controllability and Motion Planning of Modular Self-Reconfigurable Robots [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.
- [53] 王博. 可变构卫星在轨自变构规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
WANG Bo. Study on In-orbit Reconfiguration Planning Method for Self-Reconfigurable Satellites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [54] 安天娇. 基于自适应动态规划的可重构机器人系统分散积分滑模最优控制研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
AN Tianjiao. Research on Decentralized Integral Sliding Mode Optimal Control for Reconfigurable Robot Systems Based on Adaptive Dynamic Programming [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.
- [55] VASSILVITSKII S, YIM M, SUH J. A complete, local and parallel reconfiguration algorithm for cube style modular robots [C]//Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington: IEEE, 2002; 117-122.
- [56] THALAMY P, PIRANDA B, LASSABE F, et al. Deterministic scaffold assembly by self-reconfiguring micro-robotic swarms [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 58. DOI: 10.1016/j.swevo.2020.100722.
- [57] 夏颖. 空间在轨可重构机器人运动控制技术的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
XIA Ying. Research on Motion Control Technology for Space on-Orbit Reconfigurable Robot [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [58] 刘朝旭. 空间在轨桁架细胞机器人衍生构型分析及路径规划 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
LIU Chaoxu. Derivatization Configuration Analysis and Path Planning of Space in Orbit Truss Cellular Robot [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [59] 韩亮亮, 陈萌, 张崇峰, 等. 月面服务机器人研究进展及发展设想 [J]. 载人航天, 2018, 24(3): 313-320.
HAN Liangliang, CHEN Meng, ZHANG Chongfeng, et al. Research progress and development conception of lunar service robot [J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(3): 313-320.
- [60] 杨柯. 水下自重构机器人游走仿生混合运动研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
YANG Ke. Study on Swimming-Walking Bionic Mixed Motion of Underwater Self-Reconfigurable Robot [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [61] 陈致远, 涂群章, 张详坡, 等. 足式爬行机器人研究进展与发展趋势 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 1-12.
CHEN Zhiyuan, TU Qunzhang, ZHANG Xiangpo, et al. Review of multi-legged crawling robot [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(9): 1-12.