

【院士专栏：国防装备设计与制造】

基于设计形态学的军事仿生机器人研究现状与进展

马进^{1a}, 胡洁^{1b}, 朱国牛², 戚进^{1b}

(1. a.上海交通大学 感知科学与工程学院 b.上海交通大学 设计学院, 上海 200240;

2.新加坡南洋理工大学 机械与宇航工程学院, 新加坡 639798)

摘要: **目的** 对设计形态学在军事仿生机器人设计领域的研究现状进行梳理、归纳和分析, 为设计服务于国防建设和军事装备提供思路和参考。**方法** 首先从设计形态学的内涵出发, 结合仿生设计理论, 详细解读设计形态学, 如何能够通过融合多学科知识, 来辅助新型军事仿生机器人研制; 其次, 根据军事仿生机器人作战域的不同, 从陆地、水下和空中(间)军事仿生机器人3个方面展开, 论述了国内外设计形态学助力军事仿生机器人发展的现状, 归纳并阐述了不同类型军事仿生机器人设计的特点; 最后, 总结并分析了设计形态学在军事仿生机器人设计领域进行应用的发展趋势, 对设计形态学助力军事装备的研究方法及研究重点进行了展望。**结论** 设计形态学是一种强调系统的理论体系, 是融合仿生学方法的生物激励模式下的设计形态创新, 能够有效地支持军事仿生机器人领域的融合创新。随着人工智能技术的不断发展, 设计形态学在军事仿生机器人领域的应用将逐步向人机共融智能设计方向演化。

关键词: 设计形态学; 仿生设计; 军事机器人; 创新

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)04-0001-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.04.001

Research Status and Progress of Military Bionic Robot Based on Design Morphology

MA Jin^{1a}, HU Jie^{1b}, ZHU Guo-niu², QI jin^{1b}

(1.a.School of Perceptual Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University b.School of Design, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2.School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

ABSTRACT: This paper is to systematically sort out, summarize and analyze the research status of design morphology in the field of military bionic robot design, so as to provide ideas and references for the design of national defense construction and military equipment. Firstly, starting from the connotation of design morphology and combined with bionic design theory, this paper explains in detail how design morphology can assist the development of new military bionic robot by integrating multidisciplinary knowledge; secondly, according to the different combat domains of military bionic robots, this paper summarizes the current situation of design morphology helping the development of military bionic robots at home and abroad, and summarizes the characteristics of the design of different types of military bionic robots from the three aspects of land, underwater and air (inter) military bionic robots; finally, this paper summarizes and analyzes the development trend of the application of design morphology in the field of military bionic robot design, and prospects the future research methods and research priorities of design morphology helping military equipment. Design morphology is a theoretical system that emphasizes system. It is an innovation of design morphology under the biological incentive mode integrating bionic methods. It can effectively support the fusion innovation in the field of military bionic robots. With the continuous development of artificial intelligence technology, the application of design morphology in the field of military bionic robot will gradually evolve to the direction of man-machine integrated intelligent design.

KEY WORDS: design morphology; bionic design; military robots; innovation

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 马进(1986—), 男, 博士, 助理教授, 主要研究方向为仿生设计、创新设计。

随着国际安全形势的不断演进,新技术革命涌入战争领域和现代战争需求的不断增多,军用机器人越来越多地被用于执行反恐、作战、保障和侦察等各种任务。而天气、地形和态势等复杂的战场环境给军事机器人执行作战任务带来了极大的困难,对军事机器人环境适应力提出了更高的要求。而自然界中的生物经过亿万年演化和自然选择,进化出了神奇的特性或功能,能够很好地适应复杂多变的环境且具有高可靠性,这为军事机器人的研制提供了宝贵的设计激励源。通过生物激励模式下的设计形态学,融合多学科知识来学习、模拟和复制生物体的功能、行为或结构,进一步开展仿生学研究,从而开发军事仿生机器人成为当前机器人研究领域的热点。军事仿生机器人具有良好的环境适应能力,将能够在未来复杂的战场环境下,提供更为有效的战场支持^[1],极大地促进对未来作战态势的控制,甚至将带来海陆空作战部队立体编成乃至作战战略的深刻变革。对现有的基于设计形态学的军事仿生机器人研究现状进行系统分析和总结,可以了解相关领域的研究热点,探索研究前沿和研究方向,为后续设计服务于国家战略需求提供有效参考。

1 相关概念及理论

仿生机器人作为机器人领域新兴的研究方向,已成为当前国内外研究的热点^[2]。随着仿生技术的不断发展,仿生机器人已广泛应用于军事、航空航天和抢险救灾等领域。相比其他领域的应用,军事仿生机器人的工作环境更为复杂、恶劣,因此对其本体结构和运动控制等提出了更加严苛的要求,其研发过程是一项相当复杂的系统工程。军事仿生机器人研发过程实质上是仿生学、心理学、信息科学等多学科的交叉融合。上世纪末美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)与国防部等军事机构率先开展了相关领域的研究,制定了一系列的开发计划,如联合机器人计划(Joint Robotics Program, JRP)^[3]、标准化机器人系统(Standardized Robotics Systems, SRS)^[4]、未来作战系统(Future Combat System, FCS)等^[5]。融合仿生学方法的生物激励模式下的设计形态学则为军事仿生机器人研发提供了有效的技术手段。以下对设计形态学和军事仿生机器人相关概念和理论进行介绍和解读。

1.1 设计形态学

1.1.1 设计形态学内涵

设计的本质是多学科融合创新的过程。设计作为一门科学其目的在于通过设计实现产品,并开发与此相对应的知识和应用,以达到预期的设计成果^[6]。而形态学是探寻生物体形态产生、发展及相关机理的学问。设计形态学作为设计领域“形态学”研究的学科,

本质是对设计领域进行架构性分析,以及对典型对象各组成部分、要素、整体形态进行探究和分析,以启迪创新的科学。从历史的维度看,设计形态学的演进过程,从最早的艺术形态学,到从生物学、艺术学和工学等单一角度来研究的设计形态学,进而到仿生学、信息科学和心理学等多学科交叉融合的广义设计形态学,是一个不断创新的过程。传统的设计形态学研究,侧重于产品、建筑、平面和艺术品等造型设计与美学关系的研究,强调形与态在哲学上的统一,突出设计美学思想。而现代产品形态设计过程主要侧重于功能、结构、行为、原理和艺术等的相互交融,与仿生学、信息学、工学和心理学等学科紧密关联^[7]。

生物在自然界亿万年进化和选择中,演化出了极其精确和完善的机制以适应内外界的环境变化。研究自然界生物的优异能力及其机理,并将其应用到新技术装备设计和制造中被称为仿生。很多对人类社会产生巨大推动力的发明都源自仿生,例如模仿风滚草制造的车轮,模仿游鱼发明的船橹等。虽然仿生活动已开展了近 500 万年,但仿生学(Bionics)作为一门系统的科学,直到 1960 年 9 月才在俄亥俄州召开的第一次仿生学会议上被提出^[8-9]。仿生学通过研究生物体功能、行为和结构原理,对其进行模仿并应用于工程领域^[10]。

融合仿生学方法生物激励模式下的设计形态学作为设计形态学的重要分支,在模仿自然界中生物激励源的同时,全面考虑了生物体形态、动作结构、运动策略和信息感知等因素,融合了多学科知识以实现对工程领域产品设计的系统支持,两者的有机结合促进了工程领域创新设计活动的开展。融合仿生学方法及生物激励模式下的设计形态学,在设计过程中首先获取自然界生物领域激励源,再通过抽取其中蕴涵的模式来获取“形(结构等外在形状)”和“态(功能和行为等蕴含的内在状态)”,并经多学科融合来构建数学模型和技术模型,并将其从生物领域类推到工程领域,最后通过美学设计、工程领域结构或材料等来实现系统装置,完成系统的创新过程。融合仿生学方法生物激励模式下的设计形态学过程模型见图 1。

1.1.2 设计形态学要素

设计形态学的 2 个组成元素是设计范畴下的“形”和“态”。设计形态学中的“形”是指包括组成部分、几何尺寸、材料和色彩等结构化的外在形状。设计产品为实现特定状态,需要具有一定的强度、刚度。设计形态学中的“态”则是功能、原理、行为、美学特征和价值等的内在状态。产品设计的目的即利用特定形状来表达产品不同的功能特征或价值取向等。在设计形态学中,“形”是设计的物质载体,“态”是设计的意识传达,二者互为依存,“形”必传达一定的“态”,“态”则反过来决定了“形”的式样。

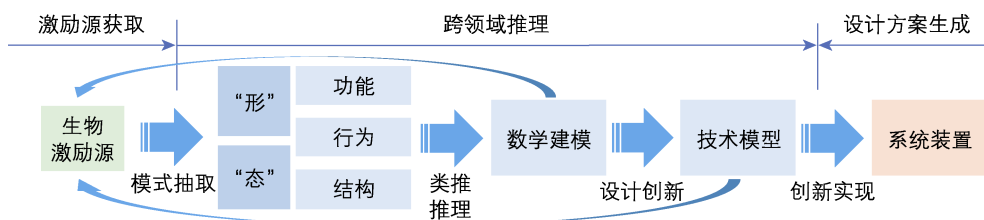


图 1 融合仿生学方法生物激励模式下的设计形态学过程模型

Fig.1 Design morphology process model in bio-inspired mode incorporating bionics method

融合仿生学方法生物激励模式下的设计形态学，通过抽取生物领域激励源中的行为、功能和原理等“态”元素，利用数学建模等方法，来分析并挖掘其中蕴含的动作或运动机理等，采用机构、材料和色彩等“形”元素对其在工程领域进行重新表达，以实现产品的创新。设计形态学中的“形”和“态”涉及多学科交叉融合，通过多学科交叉融合能够分析和理解事物外形表象下蕴含的“态”，并通过多学科交叉融合将其运用到新产品设计的表达中。

1.2 军事仿生机器人

1.2.1 军事仿生机器人内涵

军事仿生机器人是设计形态学和军事机器人需求的高度融合，研发人员从自然界各种生物中获得灵感，创造出众多能够执行作战和战略任务的高性能仿生机器人，极大地促进了军事装备的发展。

军事仿生机器人继承了军事机器人的特点，同时又具有仿生系统的特点，其具有以下战场优势：较高的运动灵活性和智能化程度；较强的环境适应性和战场生存能力；绝对服从军事指挥和命令；全天候、全方位的战场作战能力；较低的作战费用等。

自 20 世纪 60 年代以来，国内外军事仿生机器人的发展大致经历了 3 个主要阶段：固定或可编程遥控指挥阶段、具有感知功能的半自助作战阶段及具有智

能决策能力的自主无人作战阶段^[1]。固定或可编程遥控指挥军事仿生机器人即按照作战需求将描述特定功能的代码存储到军事机器人内部，通过专业人员遥控指挥完成远距离作战任务，但该类机器人缺乏必要的反馈环节。具有感知功能的半自助军事仿生机器人能够通过视觉、触觉等多种传感器感知战场环境并反馈到作战指挥端。该类机器人具有感知功能和一定的决策能力，能够处理简单的任务，但当遇到复杂军事任务时仍然需要人员干预。具有智能决策能力的自主无人军事仿生机器人具有较高的智能化程度，能够通过自主学习和推理动态来适应复杂的战场环境，自主完成感知—决策—执行过程，成功避开障碍、智能识别目标，并主动执行搜索、救援、侦察等多种任务，无需人员操控。

1.2.2 军事仿生机器人分类

军事仿生机器人作为军事机器人的重要分支，其分类较为复杂。例如，按照其运动方式的不同，可以分为跳跃军事仿生机器人、轮式军事仿生机器人、足式军事仿生机器人及爬行军事仿生机器人等^[2]。按照机器人军事功能进行分类，可分为作战与攻击、侦察与探险、排雷与排爆、防御与保安、后勤与维修、防化与防辐射等^[12]。按照其作战域的不同，可以划分为陆地军事仿生机器人、水下军事仿生机器人和空中（间）军事仿生机器人^[2]，见图 2。

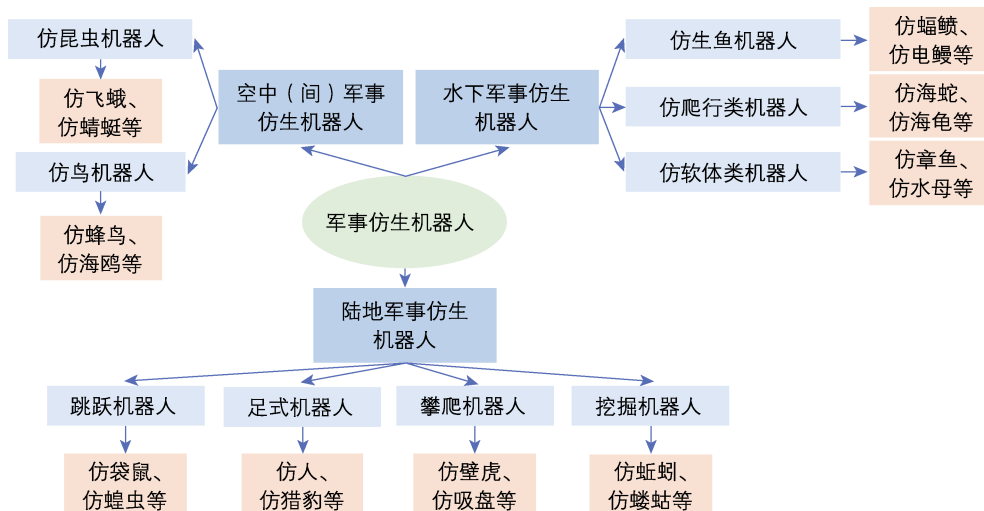


图 2 军事仿生机器人分类

Fig.2 Categories of military bionics robotics

1.3 基于设计形态学的军事仿生机器人设计

分析和研究自然形态和人为形态的原理是构成设计形态学的基础^[13]。仿生设计方法作为设计形态学理论体系的重要组成部分,其通过设计仿生将繁复的感性模仿和瞬间思维上升到统一的理性思维,从而完成系统的设计仿生活活动,这为军事仿生机器人研发过程中从众多构思中凝练出最准确的设计概念提供了有力的方法。基于设计形态学的军事仿生机器人设计表现为一种由粗到精、由抽象到具体、由模糊到清晰不断演化的过程。融合仿生学方法生物激励模式下的设计形态学能够利用生物学、工学、信息科学和艺术学等多各学科系统地获取生物领域激励源,分析、抽取并构建模型,实现从生物领域到工程领域的跨领域类推,在工程领域模拟实现自然界生物优异的运动等特性,完成新型军事仿生机器人设计。设计形态学强调系统的理论体系、强调多学科交叉、强调融合创新,这与军事仿生机器人设计需求不谋而合。

2 军事仿生机器人研究现状

随着作战任务和军事需求的不断增多,军事仿生机器人呈现出种类繁多、形态各异、功能多样等特点。以下从设计形态学角度出发,从陆地军事仿生机器人、水下军事仿生机器人和空中(间)军事仿生机器人3个方面对当前军事机器人仿生结构、运动机理和行为方式研究现状和趋势进行总结分析。

2.1 陆地军事仿生机器人

自然界中存在着众多的陆生生物,为了适应不同

的环境进化出了独特的生理结构、运动机理和行为方式。从设计形态学角度出发,结合军事功能,国内外研发人员开发了一系列陆地军事仿生机器人,以用于执行后勤保障、侦察排险和防化防辐射等危险任务。根据任务场景和运动机理的不同,陆地军事仿生机器人可以划分为跳跃机器人、足式机器人、攀爬机器人和挖掘机器人等。

2.1.1 跳跃机器人

跳跃机器人研究最早起源于1969年美国国家航天局阿波罗登月计划^[14]。随后各国科研机构广泛开展了跳跃机器人研究。跳跃机器人见图3。如图3a,东京大学NIYYAMAR等^[15]对自然界中众多生物跳跃形态进行了深入、细致的分析,探寻了其中蕴涵的形态特征和规律,设计了一种气动双足跳跃机器人Mowgli,其跳跃高度能达到自身体长的1.5倍,同时实现了对跳跃和着陆运动的灵巧控制。Mowgli每条腿由3个带有McKibben气动系统的肌肉执行器和被动弹簧组成的全驱动关节(即髋关节、膝关节和踝关节),以及一个欠驱动关节组成。如图3b,德国费斯托(FESTO)公司^[16]模仿袋鼠运动机理开发了由髋关节、尾部和腿部驱动构成的双足跳跃机器人Bionic-Kangaroo,其运动过程分为起跳、腾空和着陆3个阶段,并通过各关节的配合来实现跳跃和稳定着陆。如图3c,ZAITSEV V等^[17]受沙漠蝗虫形态启发研制了双足跳跃TAUB机器人,其跳跃机构由模仿沙漠蝗虫股骨和胫骨结构比例构成的双腿组成,股骨和胫骨之间采用扭力弹簧连接以模仿蝗虫腿的储能和跳跃功能。TAUB腿部开口角度最大可达150°,能够在自重

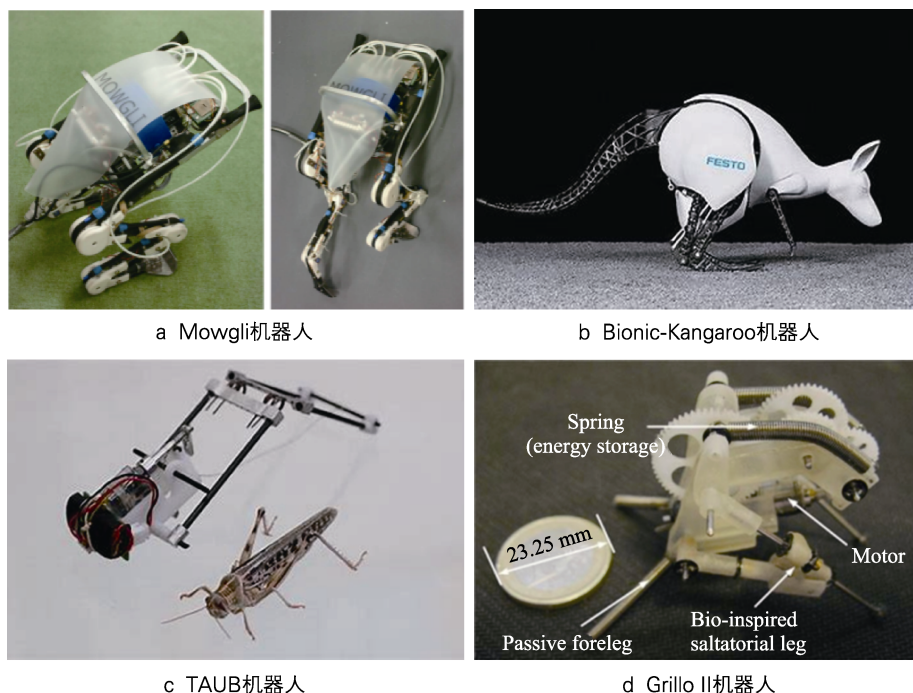


图3 跳跃机器人
Fig.3 Jumping robots

22.6 g 的前提下完成 3 m 的跳跃高度或距离。如图 3d, SCARFOGLIERO U 等^[18]对自然界中蟋蟀的腿部形态特征、结构和弹跳机理进行剖析,搭建了一款重量 15 g、长度 50 mm 的四足跳跃微型机器人 Grillo, 其能够克服障碍物并在非结构化环境中移动,可在弹跳瞬间获得约 1.5 m/s 的初速度。

国内在跳跃机器人领域的研究也较多。南京航空航天大学^[19]提取了蝗虫蹬腿跳跃运动行为等形态特征,构建了相应的力学建模,设计了适应多种表面的连续跳跃弹跳机器人。此外,东北大学、哈尔滨工业大学也开展了跳跃机器人的探索研究。

2.1.2 足式机器人

足式机器人见图 4。在四足军事仿生机器人研制上,1969 年为了解决崎岖地形下单兵装备携带问题,美国军队委托 GE 开发设计了较早的军事仿生四足步行机器人 Walking Truck, 见图 4a^[20]。美国波士顿动力公司在美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 的支持下模仿四足哺乳动物外形和运动形态成功研制了 Big-Dog 机器人,见图 4b^[21],该机器人具有很强的复杂地形适应能力,从 Big-Dog 机器人开始波士顿动力公司先后研发了 Cheetah, 见图 4c、Little-Dog 和 Spot-mini 四足步行机器人,其中 Little-Dog 机器人能

够实现对复杂地形的感知和动态规划^[22]。国内北方车辆研究所也开发了四足机器人,其能够负载 50 kg,克服 30°斜坡,以完成军事任务。

在双足军事仿生机器人研制上,如图 4d,美国波士顿动力公司为美军研制了迄今为止世界上最先进的仿人机器人 Atlas,其通过安装于头部的 MultiSense SLB 感知多模态信息,能够承载外力冲击,根据工作环境进行动态适应性调整来完成一系列复杂动作^[21]。国内北京航空航天大学开发了“汇童”BHR 类人机器人,如图 4e,能够模仿人运动姿态,实现人机交互^[23]。

此外,模拟蟑螂、蜘蛛和蚂蚁等昆虫,以及蛇等爬行类动物的外形、结构和运动形态进行仿生机器人设计并应用军事领域,也取得了丰硕的成果。德国费斯托 (FESTO) 等公司先后完成了 RoACH (如图 4f)^[24]、Bionic-Spider (如图 4g)、GreaseFire (如图 4h)^[25]和 Bionic-Ant (如图 4i) 等仿生机器人研制,这些成果可应用于军事或救灾等领域。

2.1.3 攀爬机器人

攀爬机器人见图 5。攀爬机器人可以实现对目标军事监视和追踪功能,在军事领域已开展了广泛研究。如图 5a,斯坦福大学 JIANG H 等^[26]模仿壁虎靠脚掌刚毛与接触物体表面间范德华力牢牢吸附于物体

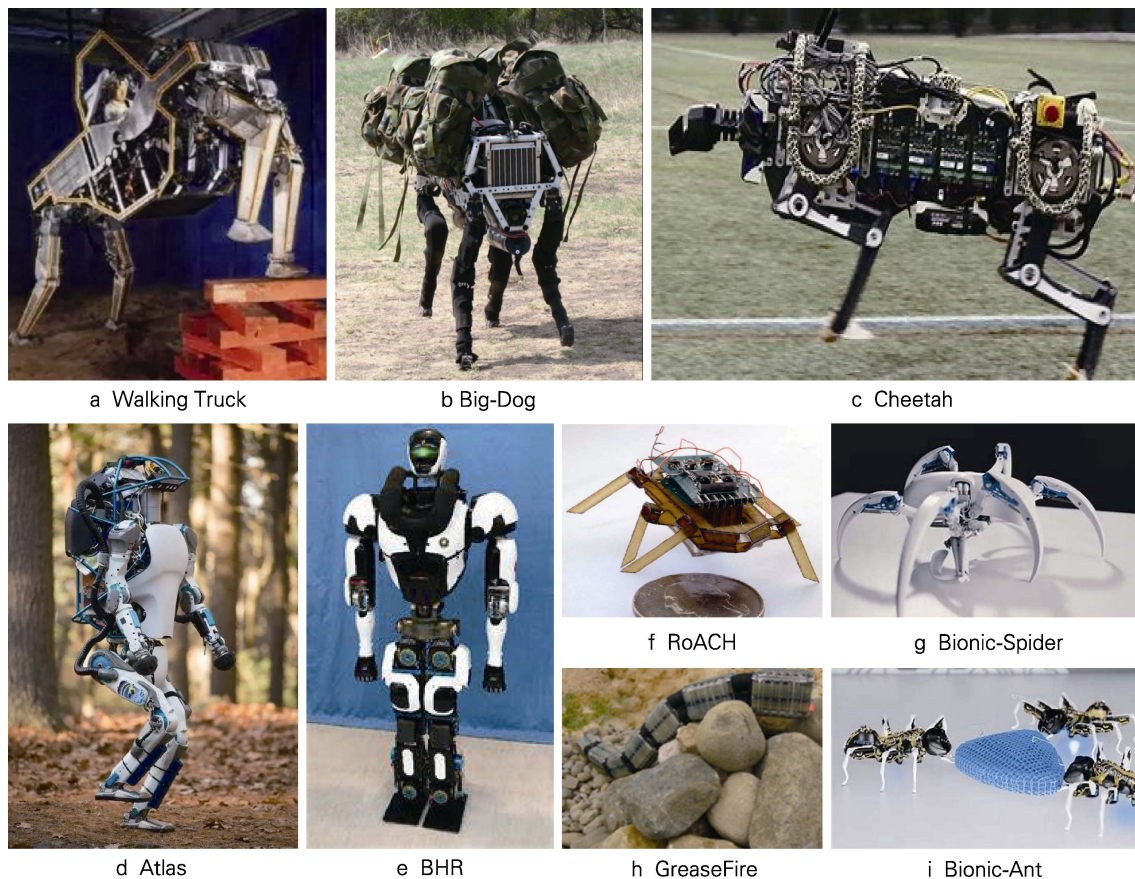


图 4 足式机器人
Fig.4 Walking robots

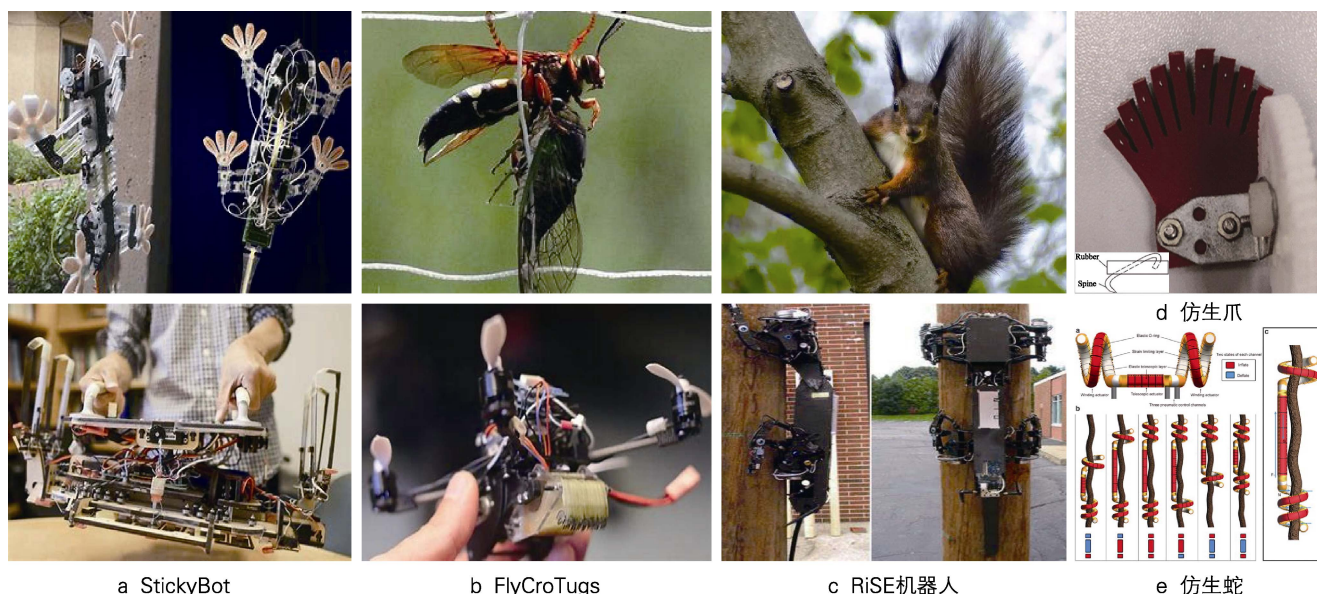


图 5 攀爬机器人
Fig.5 Climbing robots

表面的机理,设计了一种具有方向粘附力的材料,并将其应用于太空环境下的物体抓取。如图 5b, ESTRADA M A 等^[27]分析了黄蜂能够利用腹足爪钩牢牢抓住物体表面拖动比身体大数倍猎物的机理,开发了能够拖动自身体重 40 倍物体的 FlyCroTugs,且可通过相互协作完成军事侦察任务。如图 5c, HAYNES G C 等^[28]通过模仿松鼠灵巧攀爬的形态机理,开发了能够动态、高速爬杆的仿生机器人 RiSE,其攀爬速度可达 28 cm/s,能够到达指定位置驻停以保持低功耗,以完成军事搜索和侦察任务。如图 5d, JI A 等^[29]模仿自然界中松鼠等能够实现攀爬功能生物的爪子形态和结构,采用弹性橡胶体和棘针相结合的方式开发了仿生爪装置,能够被动适应不同表面攀爬作业。如图 5e, LIAO B 等^[30]受树栖蛇缠绕爬升运动的启发,开发了分别由一个缠绕执行器和一个伸缩执行器组成的气动驱动缠绕式软体爬杆机器人,它可以最大实现 30.85 mm/s 的攀爬速度,最大承载载荷可达自身体重 25 倍,可应用于防化防辐射等特殊环境下。

其他的陆地军事仿生机器人,例如对蚯蚓^[31]、鼯鼠^[32]和穿山甲^[33]等的结构形态和机理进行深入研究,而开发完成的挖掘机器人也取得了很好的效果,在功能上已能够执行扫雷、排爆、侦察等军事作业。

2.2 水下军事仿生机器人

水下军事机器人是人类利用河湖和海洋从事军事活动不可或缺的工具。由于水下环境复杂多变,常规螺旋桨和叶轮等作为推进机构的水下军事机器人存在适应性差、运行噪声大等缺点,极大地限制了其应用。因此,研发结构简单、具有高超的水中运动能力的水下军事仿生机器人成为当前研究的重点。为此,研究人员从设计形态学角度出发,结合仿生学和

机器人学,通过模仿具有高超的水中运动能力的鱼类、爬行类和软体类等水生生物体的外形结构和推进机理来进行水下军事机器人的研制,并取得了一系列的研究成果。

2.2.1 仿生鱼机器人

弗吉尼亚大学工程学院与哈佛大学研究人员^[34]在美国海军研究办公室的支持下,从形态适应性角度,提取了黄鳍金枪鱼快速游动机理,成功研制了能模仿黄鳍金枪鱼水下高机动性的机器鱼 TunaBot (图 6a),为仿生鱼的下一步研究指明了方向。蝠鲼依靠扇动两侧胸鳍进行扑翼式游动,能够极大地减少游动产生的湍流,新加坡国立大学研究人员^[35]分析了其结构等形态特征与环境适应性需求之间的关系,构建了数学和力学建模,开展了详细的设计和优化研究,研制了具有较好灵活性和机动性的仿生蝠鲼机器人 MantaDroid (图 6b),续航时间高达 10 h,适用于海洋勘探等多种任务。浙江大学 WANG K 等^[36]受深海狮子鱼的启发,融合仿生学、材料科学等多学科知识,研制了能够适应深海低温、高压等极端环境的仿生狮子鱼 (图 6c)。它由软体人工肌肉驱动一对翅膀状的柔性胸鳍并通过节律性地扑翅来实现游动,为深海军事活动提供了潜在的解决方案。

2.2.2 仿爬行类机器人

仿爬行类机器人见图 7。KIM H J 等^[37]从设计形态学角度出发,分析并提取了海龟鳍肢结构形态特征和动作机理,建立了相应的运动学模型,分析了其具有良好灵活性和机动性的生物机制,并最终确定了相应的模型物理和运动参数开发了仿海龟机器人。瑞士洛桑联邦理工学院 KARAKASILLOTIS K 等^[38]提炼了蝶螈运动形态和动作规律,搭建了一款由四个驱动器

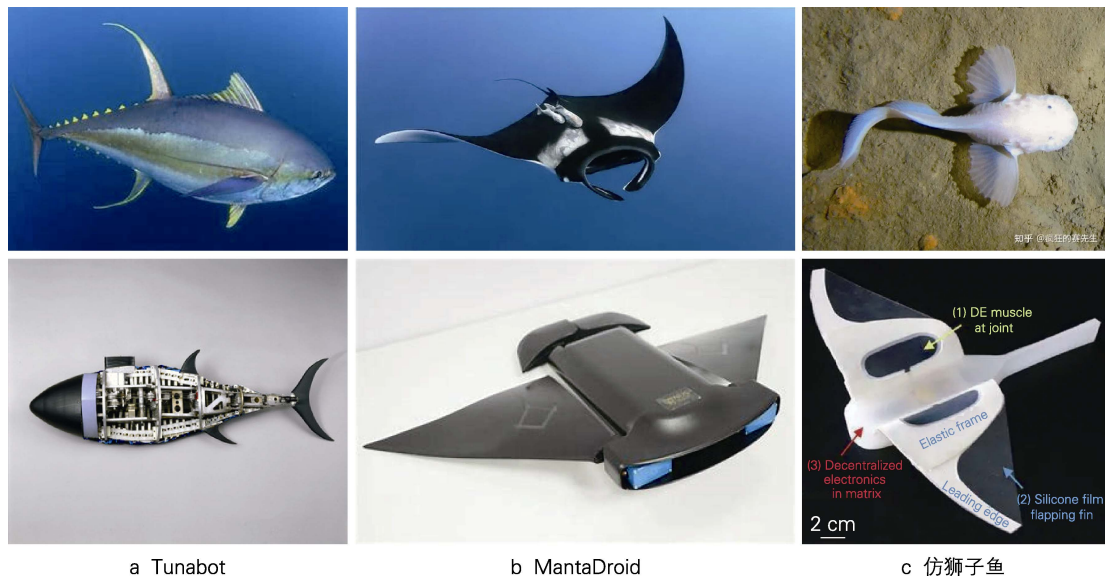


图 6 仿生鱼机器人
Fig.6 Fish-like robots

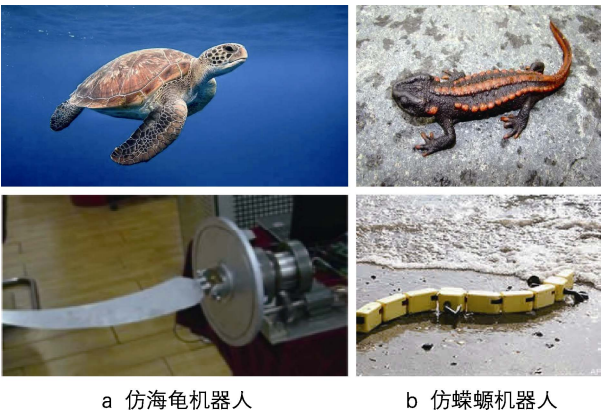


图 7 仿爬行类机器人
Fig.7 Reptile-like robots

驱动的仿生机器人系统，能够实现爬行和游动模态的任意变换，能够满足适多栖环境作业要求。

2.2.3 仿软体类机器人

仿软体类机器人见图 8。如图 8a，法国贝尔实验室研究者^[39]受僧帽水母运动形态启发，开发了一种可成群部署的自供电新型海水监测机器人 JellyBots，用于监测水面等水文参数。美国加州大学圣地亚哥分校 CHRISTIANSON C 等^[40]模仿章鱼结构形态和水下吸收水并在后方喷出以实现前进运动的行为，研制了一款可以通过改变形状来实现循环喷水推进的仿生章鱼机器人（图 8b），其水中运动速度可达 18~32 cm/s。



图 8 仿软体类机器人
Fig.8 Mollusk-like robots

2.3 空中（间）军事仿生机器人

亿万年的生物进化和自然选择为有翼昆虫、飞鸟等动物赋予了非凡的空中飞行能力，使其在生物形态、飞行方式和能量利用效率等方面达到了近乎完美的程度，这为开展基于设计形态学的空中（间）军事仿生机器人设计提供了很好的借鉴。与陆地和水下军事仿生机器人相比，空中（间）军事仿生机器人具有体积小、运动灵活且不受活动空间和地形限制等特点，越来越受到世界军事大国的重视。

2.3.1 仿昆虫机器人

仿昆虫机器人见图 9。美国加州大学伯克利分校 CHUKWADYIM 等^[41]模仿苍蝇出色的飞行性能，研制了具有 4 个翅膀的 RoboFly 微型机器人（如图 9a），其体重仅 300 mg，翼展只有 3 cm，通过拍打翅膀产生的高达 150 Hz 的高频振动可以使机器人保持空中飞行，进而开展军事侦察活动。为了模仿蜻蜓高超的

飞行技能，克服旋翼飞机难以在湍流环境下稳定飞行的问题，英国防务科学与技术研究所^[42]和荷兰代夫特大学^[43]通过对蜻蜓形态结构和飞行机理的长期观察和研究，先后开发出了 Skeeter（如图 9b）和 DelFly Nimble 机器人（如图 9c），其中 Skeeter 机器人重量不足 20 g，却可以乘风飞到 1 000 m 的高空执行监视任务，而 DelFly Nimble 机器人可以在充满电的情况下实现 1 000 m 以上的长距离飞行，并能够在空中完成 360° 翻转动作。受蜜蜂肢体和飞行形态的启发，MA KY 等^[44]在美国 DARPA 资助下开展了仿生形态学研究，开发了当时世界上最小的仿昆虫机器人 RoboBee（图 9d），重量仅为 0.1 g，可以实现垂直起飞、悬停和转向等操作，取得了令人难以置信的技术突破。

2.3.2 仿鸟机器人

仿鸟机器人见图 10。如图 10a，受海鸥和鲱鱼鸥

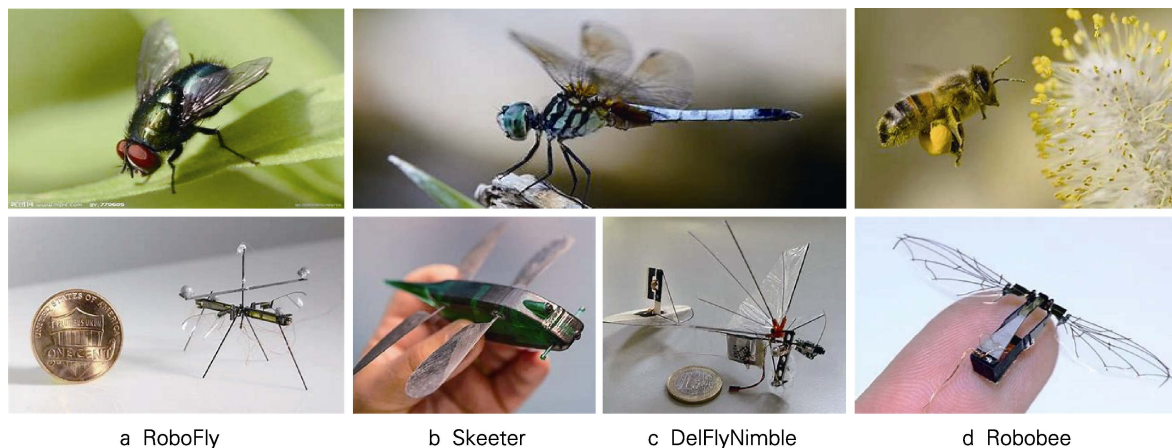


图 9 仿昆虫机器人
Fig.9 Insect-like robots



图 10 仿鸟机器人
Fig.10 Bird-like robots

翼展形态和扑翼动作机理的启发,德国费斯托(FESTO)公司开发了一款能够在空中飞行、滑翔和翱翔的扑翼飞行器 SmartBird^[45],其具有出色的空气动力学性能和高效的能量利用效率,空气动力学效率可达 80%,驱动电机效率约 45%。在自然界中蜂鸟既能够像鸟类一样主动控制翅膀形变以实现瞬时飞行,又能够像昆虫一样在空中悬停,为了探究这一原理并应用于军事领域,美国 AeroVironment 公司受美国 DARPA 资助,对蜂鸟飞行姿态和飞行机理进行了总结和分析,并耗时 5 年设计了一款翼展 16 cm,自身重量 10 g 的 HummingBird 机器人(图 10b)^[46],它能够完成悬停、翻筋斗等困难动作并可以执行小范围的空中侦察任务。斯坦福大学 CHANG E 等^[47]观察到鸟类在飞行过程中可以不断主动调节羽毛姿态以适应不同飞行姿态,基于该运动形态设计了由 4 个驱动器控制 40 根相互弹性连接的羽毛组成欠驱动变形翼,并搭建成 PigeonBot 机器人(图 10c),飞行试验表明,其具有较高的空气动力学性能和稳健性。

3 存在的问题和未来的趋势

目前,设计形态学在军事仿生机器人设计方面已取得了不错的成果,但是在融合多学科知识实现跨领域创新设计等方面,仍然存在亟待解决的问题,例如,如何利用互联网积累大量的生物实例以支持军事仿生机器人设计,如何实现彻底的军事机器人仿生设计,如何支持军事仿生机器人向多栖、集群机器人发展等。

3.1 生物激励源获取的问题

军事仿生机器人设计的起点是获取具有启发性的生物领域案例作为激励源,激励源的质量直接决定了设计方案的可行性和有效性。现有的生物激励源获取通常通过查找领域出版物、咨询生物专家或利用搜索引擎进行关键词检索,这使设计过程容易产生“知识鸿沟”,获得的生物知识容易缺乏全面性,军事仿生机器人设计活动具有偶然性和盲目性,难以获得行之有效的设计方案。与此同时,互联网则积累了大量的生物案例和知识,缺乏有效手段对其进行合理的挖掘和应用。

为此,结合生物领域知识表示特点,从设计形态学融合多学科的角度出发,研究对应的自然语言处理方法,来对互联网广泛存在的结构化/非结构化生物实例进行检索和挖掘,获取有效实例作为激励源推送给军事仿生机器人研发人员,作为设计参考成为未来的研究重点。

3.2 跨领域仿生推理及方案实现的问题

自然界中生物能够动态适应变化的复杂自然环境,军事仿生机器人系统是通过模仿自然生物结构、

行为或运动规律等形态进行构建的,但当前机器人机构设计和运动控制模型搭建等方面仍与自然界生物存在较大的差距,其中跨领域类推环节成为军事仿生机器人达到更加逼真的仿生性能的桎梏之一。究其原因,一方面科学家对生物体结构及机理的认知和研究不足,另一方面军事仿生机器人设计推理过程非常依赖设计人员或团队的既往经验,缺乏行之有效的计算机辅助下的跨领域设计推理手段,设计过程缺乏全面性。

当前深度学习理论在跨领域类推和推理方面已取得了一定的突破,为实现跨领域智能推理以生成新型设计方案提供了一种潜在的研究路径。因此,研究从生物领域激励源映射产生工程领域创新设计方案的跨领域智能推理算法,对促进军事机器人的研发具有重要的现实意义。

3.3 多行为模态融合的问题

现代战争逐渐向全方位、立体化、多层次、大纵深和诸兵种联合作战方式演化。战场局势日趋复杂、瞬息变化,对军事仿生机器人机动性、环境自适应能力和集群协作能力等提出了更为严苛的要求。目前军事仿生机器人大多只适用于陆地、空中/间或水下单一环境,对具有更高机动性,可以根据工作环境自适应改变外形结构和适应多栖环境,以及具有更高智能的协作行为的研究十分有限。

自然界中的生物可以根据环境动态改变自己的外形、行为以适应多栖环境,例如,弹涂鱼在水下可以像鱼一样游泳,在沙滩上会利用其坚韧的胸鳍来生存,有时甚至会爬到树根上。自然界中生物也可以通过集群协作行为完成超出单个个体智能程度的任务,例如蜂群、鱼群、蚁群等。军事仿生机器人应用场景具有复杂性,多行为模态融合以实现高机动性、多栖和集群协作是仿生机器人研究领域的重要课题。

4 结语

军事仿生机器人是一种以完成复杂或危险条件下预设战术或战略任务为目标,以智能化技术为核心的具有环境适应能力的仿生智能化装备。军事仿生机器人不仅能够满足未来的作战需求,更是为抢夺第 4 次工业革命战略制高点奠定了基础,已成为世界各国竞相发展的重点。当前对军事仿生机器人的研究,根据任务的不同主要侧重于对自然界中生物形态、动作结构、运动策略和信息感知等方面的模仿,研发过程通常从自然界已知激励源出发来研究如何将其映射到工程领域,并最终形成机器人设计方案,导致军事机器人研制存在一定的盲目性和不确定性,而随着计算机和人工智能技术的不断发展,互联网积累了大量的生物实例,能够为新型军事机器人研制提供更为全面的信息,如何融合多学科技术充分挖掘其中蕴涵的

设计形态知识,以更好地服务于新型军事机器人研制成为设计形态学亟须研究的重点。研究表明,设计形态学方法将成为军事仿生机器人创新设计的有力支撑,能够显著缩短军事机器人系统的研制时间,增强军事机器人系统的可靠性和稳健性,提高军事机器人系统适应动态复杂环境和执行复杂军事任务的能力。

参考文献:

- [1] 朱强,周良生. 军用仿生足式机器人的发展现状[J]. 山东工业技术, 2018(1): 184.
ZHU Qiang, ZHOU Liang-sheng. Status of Bionic Military Legged Robot[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(1): 184.
- [2] 门宝,范雪坤,陈永新. 仿生机器人的发展现状及趋势研究[J]. 机器人技术与应用, 2019, 5(5):15-19.
MEN Bao, FAN Xue-kun, CHEN Yong-xin. Status and Trends of Bionic Robots[J]. Robot Technique and Application, 2019, 5(5): 15-19.
- [3] NGUYEN H, EVERETT H R. Joint Robotics Program (JRP)-Supported Efforts at the Space and Naval Warfare Systems Center[C]. San Diego: Proceeding of the SPIE, Unmanned Systems Technology VIII. 2006.
- [4] THIBADOUX S A. Robotic Acquisition Programs: Technical and Performance Challenges[C]. Orlando: Proceeding of the SPIE, Unmanned Ground Vehicle Technology IV. 2002.
- [5] DIETTERLE R. The Future Combat Systems (FCS) Overview[C]. New Jersus: Military Communications 2005.
- [6] 席涛,周芷薇,余非石. 设计科学研究方法探讨[J]. 包装工程, 2021, 42(8): 63-78.
XI Tao, ZHOU Zhi-wei, YU Fei-shi. Design Science Research Methods[J]. Packaging Engineering, 42(8): 63-78.
- [7] 胡洁. 人工智能驱动的创新设计是未来的趋势——胡洁谈设计与科技[J]. 设计, 2020, 33(8): 5.
HU Jie. Design and Technology: AI Shines into Future Design Innovation[J]. Design, 2020, 33(8): 5.
- [8] KIM J, PARK K. The Design Characteristics of Nature-inspired Buildings[J]. Civil Engineering and Architecture. 2018(6): 88-107.
- [9] ANJALI P K, SEEMA S M, VIKRAMSINH S T. Biomimicry-Nature Inspired Building Structures[J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2017, 10(1): 162-166.
- [10] 胡洁,马进,戚进,等. 生物激励的知识建模与创新类推方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 21-31.
HU Jie, MA Jin, QI Jin, et al. Knowledge Modelling and Innovative Analogy Methodology of Biologically Inspired Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 21-31.
- [11] 黄远灿. 国内外军用机器人产业发展现状[J]. 机器人技术与应用, 2009(2): 28-34.
HUANG Yuan-can. Status of military robot industry[J]. Robotic Technique and Application, 2009(2): 28-34.
- [12] 李穗平. 军用机器人的发展及其应用[J]. 信息化研究, 2007, 33(5): 64-66.
LI Sui-ping. Development and Application of Military Robots[J]. Information Research, 2007, 33(5): 64-66.
- [13] 吴翔. 设计形态学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
WU Xiang. Design Morphology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [14] ZHANG C, ZOU W, Ma L, et al. Biologically Inspired Jumping Robots: A Comprehensive Review[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 124: 1-19.
- [15] NIYYAMA R, NAGAKUBO A, KUNIYOSHI Y. Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System[C]. Roma, Italy: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). 2007: 2546-2551.
- [16] EVAN A. Festo's Newest Robot Is a Hopping Bionic Kangaroo-The German Robotics Company Unveils its Most Ambitious Bioinspired Robot Yet[EB/OL]. (2014-04-02)[2022-01-20]. <https://spectrum.ieee.org/festo-newest-robot-is-a-hopping-bionic-kangaroo>.
- [17] ZAITSEV V, GVIRSMAN O, HANAN U B, et al. A Locust Inspired Miniature Jumping Robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(6): 66.
- [18] SCARFOGLIERO U, STEFANINI C, DARIO P. A Bio-inspired Concept for High Efficiency Locomotion in Micro Robots: The Jumping Robot GRILLO[C]. Orlando: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). 2006.
- [19] 王寰. 蝗虫起跳的运动力学及仿生跳跃机器人[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
WANG Huan. Locomotion Mechanics of a Locust's Take Off and the Bionic Jumping Robot[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [20] SINGLA A, BHATTACHARYA S, DHOLAKIYA D, et al. Realizing Learned Quadruped Locomotion Behaviors through Kinematic Motion Primitives[C]. Montreal: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019.
- [21] TRIPATHY S, GAUR S. Rough Terrain Quadruped Robot-BigDog[J]. Materials Today: Proceedings, 2021: 1-4.
- [22] YANG G Z, FULL R J, JACOBSTEIN N, et al. Ten Robotics Technologies of the Year[J]. Science Robotics, 2019, 4(26): 1826.
- [23] GAO Z, CHEN X, YU Z, et al. Autonomous Navigation with Human Observation for a Biped Robot[C]. 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2021: 780-785.
- [24] HOOVER A M, STELTZ E, FEARING R S. RoACH: An Autonomous 2.4 g Crawling Hexapod Robot[C].

- Nice, France: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2008: 26-33.
- [25] TESCH M, LIPKIN K, BROWN I, et al. Parameterized and Scripted Gaits for Modular Snake Robots[J]. *Advanced Robotics*, 2009, 23(9): 1131-1158.
- [26] JIANG H, HAWKES E W, FULLER C, et al. A Robotic Device Using Gecko-inspired Adhesives Can Grasp and Manipulate Large Objects in Microgravity[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(7): 4545.
- [27] ESTRADA M A, MINTCHEV S, CHRISTENSEN D L, et al. Forceful manipulation with Micro Air Vehicles[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(23): 6903.
- [28] HAYNES G C, KHRIPIN A, LYNCH G, et al. Rapid Pole Climbing with a Quadrupedal Robot[C]. Kobe: Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009.
- [29] JI A, ZHAO Z, MANOONPONG P, et al. A Bio-inspired Climbing Robot with Flexible Pads and Claws[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(2): 368-378.
- [30] LIAO B, ZANG H, CHEN M, et al. Soft Rod-climbing Robot Inspired by Winding Locomotion of Snake[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(4): 500-511.
- [31] JOEY Z G, CALDERON A A, CHANG L, et al. An Earthworm-inspired Friction-controlled Soft Robot Capable of Bidirectional Locomotion[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(3): 36.
- [32] 代陈超, 侯宇, 尹志朋, 等. 仿生挖掘机器人结构设计与运动特性分析[J]. *机械设计与制造*, 2017(5): 106-108.
- DAI Chen-chao, HOU Yu, YIN Zhi-peng, et al. The Structure Design and Motion Characteristics Analysis of the Bionic Digging Robot[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2017(5): 106-108.
- [33] VARGHESE S K, JOSEPH T, VARUGHESE S A, et al. "Pangolin"-Animatronic Based Robotic Hand System for Human Rescue in Deep Mine Hole and Bore Well Accidents[C]. Bangalore: 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC), 2020.
- [34] ZHU J, WHITE C, WAINWRIGHT D K, et al. Tuna Robotics: A High-frequency Experimental Platform Exploring the Performance Space of Swimming Fishes[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(34): 4615.
- [35] ZHONG Y, ZHANG D B, ZHOU C L, et al. Better Endurance and Load Capacity: An Underwater Vehicle Inspired by Mantaray[C]. Shanghai: The 4th International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC2009), 2009.
- [36] WANG K, SHEN Y, YANG Y, et al. Morphology and Genome of a Snailfish from the Mariana Trench Provide Insights into Deep-sea Adaptation[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019: 823-833.
- [37] KIM H J, SONG S H, AHN S H. A Turtle-like Swimming Robot Using a Smart Soft Composite (SSC) structure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 22(1): 14.
- [38] KARAKASILLOTIS K, IJSPEERT A J. Analysis of the Terrestrial Locomotion of a Salamander Robot[C]. St. Louis: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [39] FORNAI F, FERRI G, MAZZOLAI B, et al. Design of a Small Sized Self-powered Robot for Monitoring the Ocean Water Column[C]. Bergen, Norway: 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen, 2013: 1-6.
- [40] CHRISTIANSON C, CUI Y, ISHIDA M, et al. Cephalopod-inspired Robot Capable of Cyclic Jet Propulsion through Shape Change[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 16(1): 16.
- [41] CHUKEWAD Y M, JAMES J, SINGH A, et al. Robo-Fly: An Insect-sized Robot with Simplified Fabrication that is Capable of Flight, Ground, and Water Surface Locomotion[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 2025-2040.
- [42] NGUYEN Q V, CHAN W L. Development and Flight Performance of a Biological-inspired Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle with Wing Stroke Plane Modulation[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 14(1): 16.
- [43] KARASEK M, MUIJRES F T, DE WAGTER C, et al. A Tailless Aerial Robotic Flapper Reveals that Flies use Torque Coupling in Rapid Banked Turns[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1089-1094.
- [44] 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.
- [45] ACKERMAN E. Festo Launches SmartBird Robotic Seagull [EB/OL]. (2011-03-24)[2022-01-20]. <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/festo-launches-incredibly-lifelike-smartbird>.
- [46] HYLTON T, MARTIN C, TUN R, et al. The Darpa Nano Air Vehicle Program[C]. Nashville: Proceeding of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012.
- [47] CHANG E, MATLOFF L Y, STOWERS A K, et al. Soft Biohybrid Morphing Wings with Feathers Underactuated by Wrist and Finger Motion[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(38): 1246.