



# 动物机器人: 研究基础、关键技术及发展预测

方轲, 梅皓, 宋逸, 王周义, 戴振东\*

南京航空航天大学机电学院仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016

\* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2021-12-17 收稿, 2022-03-24 修回, 2022-03-25 接受, 2022-03-25 网络版发表

国家重点研发计划(2020YFB1313504)资助

**摘要** 动物机器人利用动物固有的感知、运动、能量供应和神经系统, 通过神经信息干预, 实现对生物运动行为的控制. 这类特殊的机器人在运动稳定性、灵活性、环境适应性和自身运动能量供应等方面保持了天然的优势, 具有重要的应用价值; 同时, 该研究涉及动物运动神经网络及外部调控信息与固有运动神经信息的交互作用机制等重大理论问题, 是神经科学和机器人交互领域的重要研究方向. 该研究高度融合了动物智能和机器智能, 涉及动物行为学、神经科学、微机电技术、力学和通信技术等, 是多学科交叉融合的前沿领域. 本文回顾动物运动神经系统与运动行为调控之间的关系, 系统梳理不同动物机器人的运动调控方法及系统构成, 总结活动在水、陆、空不同空间中典型动物运动行为调控的研究进展, 归纳分析动物机器人研究在运动调控方法、微电极植入、微刺激系统、通信导航和能量供应等研究中面临的关键问题, 并预测未来的发展趋势.

**关键词** 动物运动调控, 动物机器人, 微刺激系统, 运动神经调控系统

在数十亿年的生存竞争中, 动物进化出精巧的运动机构/结构、高效的能量运用方式和敏捷的运动能力. 这些经过大自然亿万年选择而得以保留的生存技能, 是仿生机器人研究的灵感源泉<sup>[1-4]</sup>. 研制具有动物一样超级运动能力的机器人是仿生机器人研究的重要目标. 近年来, 随着灾难搜救、隐蔽侦察、狭小空间巡检等任务需求的增多, 人们对仿生机器人提出了更加迫切的需求; 而现有仿生机器人在能量供应、运动稳定性、机敏性和环境适应性等方面远不及对应的动物, 尚不能全面满足工程应用的需求. 为此, 需要更加深入借鉴动物感知、决策、避障和运动控制等方面的机制和能力<sup>[5,6]</sup>. 同时, 上述差异促使生物学家和机器人专家思考能否直接利用动物固有的运动机构与能量供应, 通过调控动物的神经信息系统达到机器人学(Robotics)的目标, 即动物运动调控<sup>[7-9]</sup>.

早期的动物行为调控以奖惩训练为基础, 基于条件反射实现行为调控. 该方法成功用于马、犬、信鸽等动物并取得了巨大成就, 且一直沿用到现在, 例如导盲犬、警犬等. 但此方法训练周期长, 严重依赖动物和训导员间形成的密切关系, 制约了其推广应用. 近年来, 随着脑科学、信息科学、微电子技术及微机电控制系统等基础科学与工程领域研究的发展, 人们对动物神经系统的结构和功能有了新的认识, 对模拟神经信号和远程调控提供了技术支持. 这些发展为从脑功能的时-空间编码和神经信息干预的角度调控动物运动行为提供了可能, 即将动物固有的运动结构/机构与运动神经信息调控技术相结合, 用脑机接口方法(brain computer interface, BCI), 以模拟神经信号直接作用于动物载体特定的脑区(核团)或神经系统, 诱发相关功能脑区的神经元活动, 实现动物运动行为的控制<sup>[10]</sup>. 这种利用

引用格式: 方轲, 梅皓, 宋逸, 等. 动物机器人: 研究基础、关键技术及发展预测. 科学通报, 2022, 67: 2535-2552

Fang K, Mei H, Song Y, et al. Animal robots: Research foundation, key technologies and development forecasts (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2535-2552, doi: 10.1360/TB-2021-1314

动物神经信息调控方法研制的动物-机器混合系统即为动物机器人<sup>[11]</sup>。

动物机器人是一类特殊的类生命机器人,是将生命体与传统的机电系统进行深度有机融合,形成的一种新类型机器人系统<sup>[12]</sup>。其具备生命体与传统机电系统的各自优点,集成了动物载体的感知、驱动和自主智能等能力,以及机电系统的高精准性、可重复性和可控性等特点,使动物机器人在运动稳定性、灵活性、环境适应性以及自身运动能量供应等多个方面有着天然显著的优势,克服了传统仿生机器人在分布驱动、环境感知及能量供应等方面的困难<sup>[13]</sup>,拥有前瞻科学价值和广泛应用前景,有望完成人类或传统仿生机器人所不能完成的任务<sup>[14]</sup>。此类机器人在公共安全领域可执行反恐、搜救、时态感知等任务<sup>[15,16]</sup>;在民用领域可以广泛地应用于环境勘测、狭小空间检测等领域<sup>[17-20]</sup>;在科学研究领域可作为研究工具,探索运动神经网络的结构及神经信息交互作用规律、神经可塑性及功能修复等未知领域<sup>[13]</sup>。

鉴于动物机器人研究涉及学科多、应用领域广,本文从动物运动调控的神经基础和系统构成,水、陆、空环境下的动物运动调控研究进展,及动物运动调控的瓶颈与未来发展趋势3个方面分别论述。

## 1 动物运动调控的神经基础和系统构成

### 1.1 文献调研及分析

动物运动调控是一个多学科交叉的研究领域。进入21世纪以来,随着脑科学成为科学研究的前沿,动物机器人研究在科学推动的需求牵引下得到快速发展。美国、俄罗斯、韩国和日本等国持续投入大量资金,研究用动物神经调控技术实现动物机器人的目标,已取得许多引人注目的进展<sup>[21]</sup>。通过对Google Scholar、Web of Science、Library of Congress和中国知网等文献数据库进行搜索(截至2021年10月)及二次人工校对,以“insect robot”、“rat robot”、“pigeon robot”、“animal-robot”和“animal cyborg”等为关键词,得到动物运动调控研究的论文发表现状和所研究的动物情况(图1(a))。论文总数尚不多,但论文数量呈现显著的逐年增长。特别是2013年后,随着各国脑科学计划的陆续启动,动物运动调控技术有了迅猛发展。从2015年起,相关研究论文数大幅度增长。美国的研究机构开展了多种动物的行为调控,其中美国国防高级研究局(Defense Ad-

vanced Research Projects Agency, DARPA)资助了多项旨在把动物改造成终极特工的机器生命计划(Project Robo-life)、昆虫-微机电系统整合计划(the Hybrid Insect Micro-electro-mechanical Systems (HI-MEMS) Program)等。

Holzer和Shimoyama<sup>[8]</sup>于1997年率先用电刺激蟑螂的触觉感受区,实现人工控制蟑螂沿直线前进。2002年,Talwar等人<sup>[22]</sup>用同样方法刺激大鼠脑胡须触觉感受区,实现了对大鼠的运动调控,研制出机器大鼠(Robo-rat)。随后,各国学者分别以蟑螂<sup>[8,23,24]</sup>、甲虫<sup>[25-28]</sup>、鲨鱼<sup>[29,30]</sup>、壁虎<sup>[31]</sup>、鸽子<sup>[32,33]</sup>、大鼠<sup>[34-37]</sup>等动物为载体,实现了多种动物机器人的控制验证和初步行为调控。我国动物运动调控研究起步稍晚。2005年,苏学成等人<sup>[38]</sup>用无线指令完成了大鼠机器人左右转向、前进等运动的调控,并于2007年展示了对鸽子起飞和转向的调控。2008年,戴振东团队<sup>[31]</sup>率先研究了大壁虎的运动调控。随后,浙江大学、郑州大学、中国科学院自动化研究所等多个团队分别开展相关研究,并取得了令人瞩目的成绩<sup>[36,39-42]</sup>。

随着对脑科学的深入研究,动物运动调控的方法在刺激位点、刺激方法、刺激模式等方面更加多样,促进了运动行为调控的精细化。另一方面,随着动物机器人实用化研究的不断发展,在动物机器人的微控制系统、通信导航系统和可持续性能量供应微系统等方面的研究有了一些突破(图1(b)),为未来的动物运动调控研究奠定了基础。

### 1.2 动物运动的神经调控基础

运动是动物赖以生存、繁衍和发展的最基本功能之一,是神经系统活动中最常见的外在表现形式,运动的神经调控机制已成为神经科学研究的重点内容之一。随着脑科学研究及相关技术的发展,动物运动的神经调控研究也已覆盖了无脊椎动物(各种昆虫)和脊椎动物(鲨鱼、大壁虎、鸽子、大鼠等)。人们对各类动物的脑内运动神经系统结构及功能有了新的认识,进一步确立了不同动物运动神经系统的调控方法。

#### 1.2.1 无脊椎动物

各种昆虫的神经肌肉系统组成相对简单,主要由脑、胸神经节、腹神经节及运动神经元等组成。其头部有着各种感觉器官,有着发达的信息感受能力。在运动过程中,昆虫的感觉器官接收外界刺激后,通过感觉神经元传递到大脑或胸神经节,由运动中枢整合产生

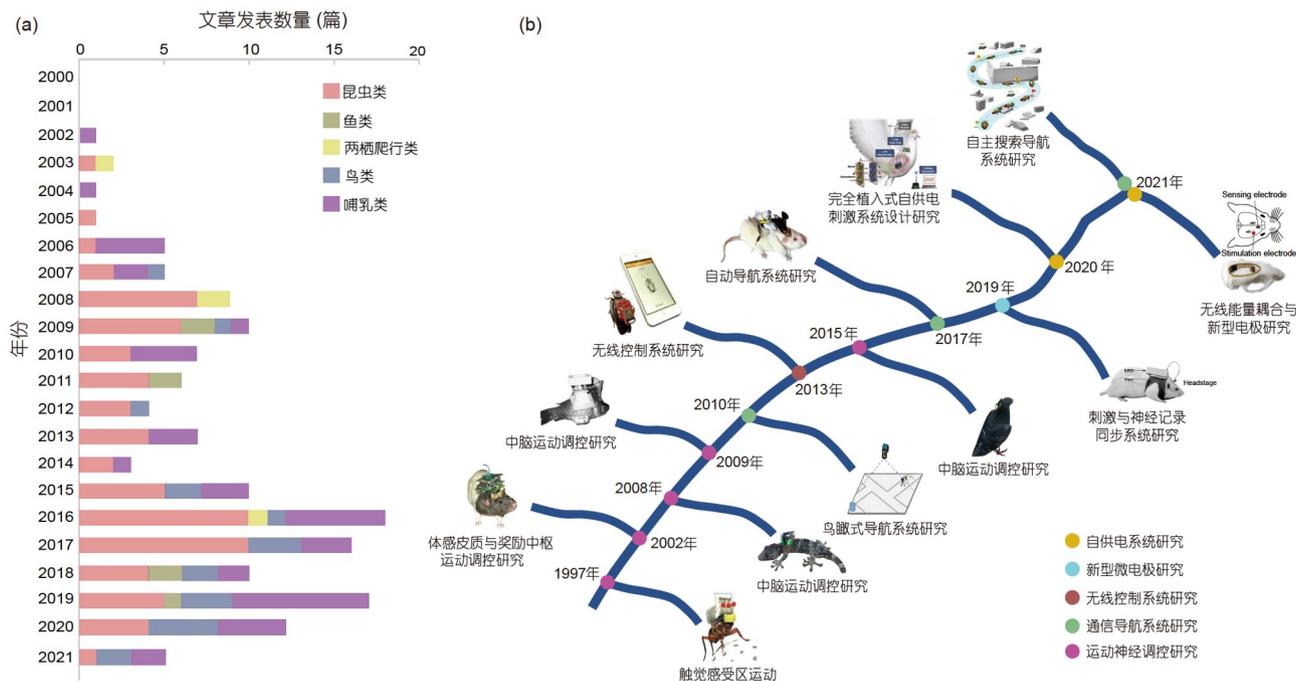


图1 过去20年动物机器人的研究进展。(a) 研究论文的数量及种属分布; (b) 代表性研究工作进展

Figure 1 Research advances of animal robots in the past 20 years. (a) Number and species distribution of published research articles; (b) the progress of representative research work

控制指令, 再从胸神经节/腹神经节传导至运动神经元控制肌群产生相应的运动行为<sup>[43]</sup>。

在昆虫的运动调控研究中, 主要是通过刺激感觉系统和运动相关肌肉系统以实现其运动行为调控, 如蟑螂、甲虫、烟草飞蛾等。

### 1.2.2 脊椎动物

脊椎动物的运动相关神经系统是一个分层、多级的控制系统, 从高级到低级分别由皮层、基底神经节、中脑运动区、脊髓运动神经环路和骨骼肌肉系统共同组成<sup>[44]</sup>(图2)。在运动过程中, 各系统对运动的调控作用有顺序关系、反馈关系和复杂网络联系, 彼此分工协作<sup>[45,46]</sup>。大脑皮层、丘脑和中脑(变温动物)是感觉信息的汇聚和整合中心(图2, a区), 接收和整合外部感觉信息(视觉、听觉及嗅觉等)与内部感觉信息(肌肉张力、关节位置及身体的空间位置信息等)。在发起运动前形成相应的运动意向, 编码运动目标的空间位置、运动目标与自身位置的空间关系, 将相关信息传输至基底神经节完成运动程序(motor program)信息的融合, 并在运动行为执行中不断地根据感知反馈调节和修正运动指令<sup>[47]</sup>。

基底神经节(图2, b区)是大脑皮层下一组进化保守的前脑核团区, 它由纹状体、苍白球、丘脑下核和黑

质网状部组成, 是动物运动行为的选择决策中心, 在运动调控中起着关键作用<sup>[48]</sup>。它整合来自皮层、丘脑和杏仁核(多巴胺系统)的信息输入, 做出适当的运动行为决策, 并通过苍白球间质和黑质网状部等核团的中间神经元抑制性控制中脑运动区的活动<sup>[4,45]</sup>。

中脑运动区是动物运动指令形成与发送区, 负责运动指令的协调和组织, 并进行上行和下行投射, 将运动信息传递给各个脑区, 在运动过程中发挥着独特(集中调度)的作用<sup>[49]</sup>(图2, c区)。它接受来自高级中枢系统的不同调控指令并进一步编码, 整合成为更细致的运动行为调控指令, 并分别投射到中脑运动相关的功能核团, 调控运动启动、运动停止和运动驱动维持等行为。同时, 通过脑干网状脊髓系统向脊髓中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)提供谷氨酸能的兴奋性刺激, 激活脊髓网络的活动<sup>[45,50]</sup>。

网状脊髓、CPG、运动神经元和肌肉-骨骼系统共同构成运动的协调与执行环路(图2, d区)。网状脊髓系统是身体方向和姿势控制的整合处理中心, 会调节脊髓CPG激活特定的运动神经元, 并传递到下行骨骼-肌肉系统完成运动行为<sup>[45]</sup>。同时, CPG接受与运动相关感觉反馈的调控, 以适应外界干扰。完整的动物运动神经调控系统是一个模块化反馈控制系统, 小脑作为一个

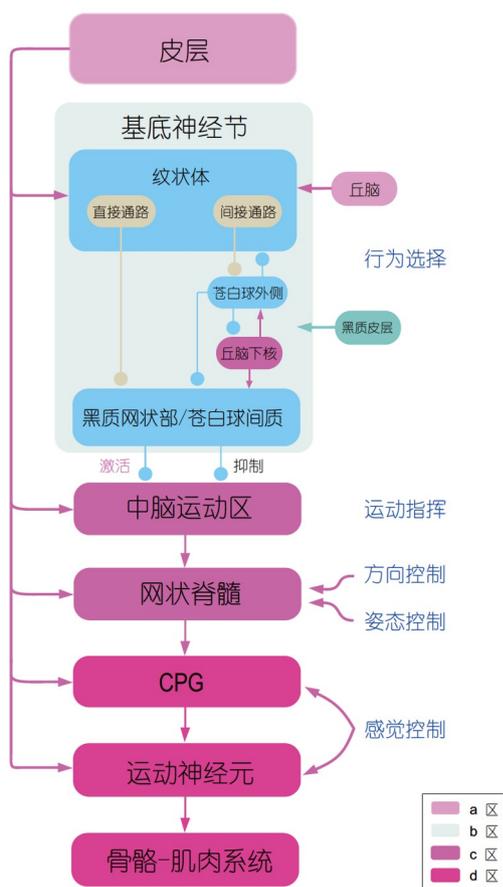


图2 脊椎动物的运动神经调控系统<sup>[45]</sup>。a, b, c, d分别代表脊椎动物运动神经调控系统的不同功能区；抑制结构用蓝色表示，兴奋用红色表示，多巴胺用绿色表示

Figure 2 The neuromodulation system of vertebrate animal locomotion<sup>[45]</sup>. a, b, c and d respectively represent different functional areas of the motor neuromodulation system in vertebrate animals; inhibitory structures are depicted in blue, excitatory in red, and dopamine in green

与脑干相关的结构，在实际运动过程中，通过运动反馈信息来提高运动的精细程度。

脊椎动物的运动调控策略主要有三类：(1) 刺激感觉输入的神经通路或脑区，结合特定行为训练形成条件反射，完成运动行为调控。如电刺激大鼠的体感皮质区(primary somatosensory cortex, SI)、躯体感觉皮层的桶状区(barrel field cortex, BF)、内侧前脑束(medial forebrain bundle, MFB)，可以调控大鼠前进、左右转向等运动行为<sup>[22]</sup>。(2) 刺激与决策相关的中间神经元(大脑或神经节)，产生虚拟的痛觉和恐惧，实现运动行为调控。如电刺激大鼠的丘脑腹侧后外侧核(ventral posterolateral thalamic nucleus, VPL)、丘脑腹后内侧核(ventral posteromedial thalamic nucleus, VPM)、杏仁核(amygdala nucleus, AMY)或黑质纹状体通路(nigrostri-

tal pathway, NSP)，可以调控大鼠的左右转向行为<sup>[51,52]</sup>。(3) 刺激与运动传出相关的中脑运动相关脑区，直接调控动物的运动行为。如光刺激大鼠的中脑运动区的楔形核(cuneiform nucleus, CnF)和脚桥核(pedunculopontine nucleus, PPN)可以调控大鼠的运动速度，调节和维持大鼠的高速运动<sup>[53]</sup>；电刺激大鼠的中脑背侧导水管周围灰质(dorsal periaqueductal gray nucleus, dIPAG)可以调控大鼠停止的运动<sup>[36]</sup>。

现有动物运动调控多采用单一位点调控，尚存在一定缺陷。刺激皮层的感觉代表区或感觉系统时，由于各种感官输入信号在大脑(神经节)的整合，会干扰或降低刺激效果，降低调控可靠性，甚至使运动控制失效，很难实现精细运动的调控<sup>[54]</sup>。刺激基底神经节的行为选择决策区域时，由于包含的神经核团多、神经环路复杂，在频繁的刺激过程中抑制性神经元的过度兴奋有时会导致神经递质平衡紊乱，使得运动调控的稳定性和可靠性欠佳。刺激中脑运动相关脑区时，其优点是不会干扰大脑对信息进行整合与判断的复杂过程，但存在核团空间位置紧密且刺激频率带宽各异等问题，需要更复杂的电刺激模式才能达到有效刺激<sup>[53]</sup>。刺激肌肉系统时，获得的刺激反应确定性较高，但该方法只适用于对昆虫的初级运动进行调控。对于高等脊椎动物而言，由于运动过程的复杂性以及涉及的肌肉数量众多，这种调控方式低效且实施困难。

### 1.3 动物运动行为调控系统的组成

从工程应用角度看，构建动物机器人的运动调控系统需要包含动物机器人的运动行为发起、运动调控信号产生及远程控制、运动行为的调控方式和微电极制作与植入4个主要子系统。其中运动行为发起需要根据运动神经信息的产生、整合与传输规律，结合不同动物的特点，选取合适脑/神经/肌肉作用点，作为运动行为调控的位点基础。

#### 1.3.1 动物运动调控信号的产生与传输

为实现运动行为调控的协调性与精细化，需设计符合动物神经元信号发放规律和时空特性的刺激信号，同时考虑到模拟神经信号发生器的重量和通信方式对动物运动行为的影响，必须研制微型化、无线且传输距离较远的刺激器<sup>[55]</sup>。目前动物机器人遥控刺激系统由本地控制端(便携式笔记本或手机、微控制器和无线传输模块)和在体微刺激器(微型刺激信号器和无线传输模块)共同组成<sup>[56]</sup>。本地控制端用于设定并发送控

制指令,在体微刺激器用于接收指令并根据接收到的指令产生模拟动物运动神经信息的刺激信号<sup>[42]</sup>,最终由刺激电极输出刺激信号到动物的相应刺激位点,实现动物运动行为调控<sup>[57,58]</sup>。

已研制的遥控刺激系统分别基于红外技术(infrared data association, IrDA)、射频收发芯片、蓝牙、Zigbee星形网络通信、3G网络等无线通信,实现刺激信号的接收与传输(表1)。红外技术<sup>[8]</sup>抗干扰能力强,但须点对点定向传输,无法组网,传输距离短,目前已很少使用。射频通信<sup>[59]</sup>的遥控范围小于500 m,且通信效果易受障碍物影响、抗干扰性能差、易丢失指令,可靠性不够。蓝牙通信<sup>[60]</sup>速率较快、延迟小,但通信距离和组网能力有限,限制了其在动物行为调控研究中的应用。Zigbee星形网络<sup>[61]</sup>的通信速率较低,但网络容量大、工作频段灵活,其特有的无线组网通讯技术可以实现多个动物机器人的协同调控,是目前小尺度环境下动物行为调控研究中使用最广泛的无线通信方式。对于户外大尺度环境空间,动物机器人的运动调控研究可借助民用通信网络<sup>[62]</sup>,通过基站传输数据,通信距离可达几千米以外,数据的安全性较高,但功耗大,数据传输存在一定延迟,在未来仍需要开展研究和研制。

当前,动物机器人的遥控刺激系统功能主要集中在神经调控和生理电记录等方面,多用于科学研究,尚不具有户外实用价值。

### 1.3.2 调控动物运动行为的信号及特点

成功的动物运动行为调控涉及3个关键因素:脑内刺激位点、刺激信号的种类与刺激信号的参数及施加模式。脑内刺激位点与动物运动相关神经核团的分布及功能相关,按脑科学空间编码假说,刺激脑内不同核团,会产生不同的行为反应。刺激位点的精确定位需要结合脑功能图谱和电极植入实验反复测试后确定合适位置。

刺激信号的种类主要有化学激素<sup>[63]</sup>、超声信号<sup>[64]</sup>、光信号<sup>[65]</sup>与电信号<sup>[52]</sup>等(表2)。其中化学刺激的实时性差,难于工程应用,仅用于科学研究。超声刺激是一种非侵入式的刺激方法,受限于超声设备微型化困难,空间精度较低,仅限于实验室内载体固定状态下的运动行为调控。光信号刺激主要分为光流刺激和光遗传刺激。光流刺激是在动物载体视觉感知范围内,采用方向可变的光进行刺激,以诱导动物飞行方向偏转<sup>[66]</sup>,目前多用于科学研究;光遗传刺激是将光学和遗传学技术相结合,利用病毒载体在脑组织中合成光敏

感蛋白,采用不同波长和频率的光刺激光敏感蛋白开启或关闭特定细胞类群或特定神经元的活动,进而调控动物运动行为<sup>[67]</sup>。光遗传技术具有目的性强、低损伤性、高时空分辨率和遗传特异性等特点,在控制精度和刺激方向的选择性等方面都具有显著优势,是动物机器人研究的新热点<sup>[68]</sup>。虽然光遗传技术已在大鼠机器人的运动调控研究中取得进展<sup>[65,69]</sup>,但因病毒载体适配性问题,尚未广泛用于其他动物,是目前研究的一个瓶颈。

电信号刺激目前仍是各类动物机器人最为广泛的运动调控方法,基于电刺激方法的动物机器人控制平台比较成熟、简单易用,针对需要的运动行为只需要确定相关脑区的坐标位置,准确植入电极和连接电刺激信号发射装置即可。电信号本身与生物体自身的神经活动相类似,以电刺激信号直接作用于动物的特定脑区,诱导调控其相应的运动行为具有重复性高、反应灵敏等特点。但电刺激诱导调控动物机器人在实际应用中也存在一定的不确定性和局限性<sup>[65]</sup>。电刺激所发出的微刺激信号在动物的脑组织中易扩散,且信号传递方向具有不确定性;其次,电刺激信号预先设定仿动作电位单元信号不具有刺激特异性,会激活目标脑区所有类型的神经元,导致诱导行为的复杂化。

在刺激模式方面,不同的动物载体和脑区具有不同的神经元刺激阈值,单一位点的刺激模式难于实现动物运动行为的精准调控。而且在动物实际的运动行为中,诱发运动行为的电刺激很难保持与固有神经信息的电流特性相一致,即便是相同的动作行为,其神经元电信号也并非同时激活,也不以单一的频率、脉宽进行激发。设定不同的刺激参数模式,进行适时、有序的多模式组合,对应特定的动物载体建立刺激模式输入与行为响应输出的量化模型,是动物机器人运动调控精细化的必要手段。

### 1.3.3 微电极制作及植入技术

研究具有良好生物相容性的新型微电极和可靠的植入技术是动物机器人研究的重点之一。植入动物脑组织中的微电极需要具备长期有效性、稳定性以及可靠性3个关键因素。在微电极设计和制作过程中,需要综合不同动物的脑组织空间结构与脑内组织液环境,确定制作微电极的材料、结构和加工处理工艺;综合不同动物的神经元电学特性与颅骨表面特征,确定微电极的阻抗参数、脑区定位标准、植入规范和固定方法。在微电极的力学性能和电化学性能方面,需要电极

表1 动物机器人遥控刺激系统的无线通信方式

Table 1 Wireless communication methods of the animal robot remote control stimulation system

无线通信方式	通信距离(m)	通信速率(kb/s)	通信质量	功耗	数据传输方式	硬件成本	文献
红外技术(IrDA)	0~2	0~16000	高	低	点对点	低	[8]
射频收发芯片	<500	0.3~50	有限	低	点对点	低	[56,59]
蓝牙(bluetooth)	8~30	1000	高	低	星形	中等	[34,60]
Zigbee星形网络	200~300	10~250	高	低	星形	低	[19,61]
3G网络通信	>5000	160~250	中	高	星形	高	[62]

表2 动物运动行为调控的刺激方式比较<sup>a)</sup>

Table 2 Comparison of stimulation methods for animal motor behavior regulations

刺激方式	组成方式	植入方式	空间精度	特异性	瞬时精度
化学刺激	化学激素	侵入式	中(mm)	中	低(s)
电刺激	电信号	侵入式	中(mm)	低	高(ms)
超声刺激	超声信号	非侵入式	低(cm)	低	高(ms)
光刺激	光信号和基因	侵入式	高(单细胞)	高	高(ms)
	光流信号	非侵入式	NA	NA	低(s)

a) NA表示参数不详

尖端直径尽量细,同时要具有一定机械强度和弹性,确保植入的微电极不会发生弯折;选择具有良好的生物相容性材料,对微电极进行电镀、绝缘、封装以降低阻抗,减少植入式微电极的生物毒性和对细胞的损伤,确保长期植入后不会引起组织炎症反应。

目前,根据动物调控的刺激方法以及微电极加工工艺和材料,可分为玻璃微电极<sup>[63,70]</sup>、金属微丝微电极<sup>[71,72]</sup>、微加工MEMS电极<sup>[73]</sup>、碳纳米管柔性探针电极(microfabricated flexible neural probes, FNPs)<sup>[74,75]</sup>和光纤微丝电极<sup>[76]</sup>。玻璃微电极一般多用于动物机器人的急性短期实验研究中。金属微电极由于其电阻较低且刚性较好,是动物行为调控研究中广泛使用的刺激电极。现有的金属微电极主要采用镍铬合金、铂铱合金、银、钨、不锈钢和碳纤维等材料。微电极尖端的直径尺寸一般需要根据动物载体的目标脑区(核团)大小选择,电极尖端与脑区(核团)的直径比应约小于1/5,确保在较低的刺激强度下能激活阈值高的神经元,使被刺激的核团不会受到功能性损伤。

## 2 水、陆、空环境下的动物运动调控

得益于各国脑/神经研究项目支持和已经取得的重要进展,过去几年生物机器人研究取得了长足的发展。其研究对象覆盖了水、陆、空全空域,涉及的动物包

括昆虫、鱼类、两栖爬行类、鸟类、哺乳类等。本节根据不同动物机器人的运动场景,简要总结了各类动物机器人的运动调控方法、被刺激的脑区(核团)以及相对应的运动调控行为(表3),并对若干个典型动物机器人(蟑螂机器人、大鼠机器人、甲虫机器人、鸽子机器人)的重要研究成果进行分类评述。

### 2.1 水中动物的运动调控

水生动物机器人在海洋、湖泊等水下区域的资源探索、水上搜救、水坝质量勘察、海洋环境监测、海啸预警、深海侦察追踪、海洋/湖泊生态系统研究等领域中有着极为重要的应用前景。已有的水生动物机器人研究充分利用不同动物载体自身的生物学优势,采用植入式微系统刺激感觉代表区、中脑运动区以及小脑区域,以实现水生动物机器人左右转向、前进、后退等运动行为调控(表3)。

### 2.2 陆上动物的运动调控

陆上运动的动物机器人种类繁多、功能各异,拥有灵巧的运动结构和超凡的运动能力,在完成侦察、搜救和狭小空间探索等方面有着明显优势。相关研究主要采用植入式微电刺激或光遗传技术刺激动物的感觉代表区、中脑运动相关脑区(核团)和肌肉系统等,以

表 3 不同种类的动物机器人研究方法与行为调控

Table 3 Research methods and behaviour modulation of different species of animal robots

场景	调控动物	刺激方法	刺激位点	调控行为	文献
水中	白斑角鲨 ( <i>Squalus acanthias</i> )	电刺激	嗅觉中枢	左/右转向	[30]
	金鱼 ( <i>Carassius auratus</i> )	电刺激	中脑内侧纵束核	前进、左右转向	[77]
	鲤鱼 ( <i>Cyprinus carpio</i> )	电刺激 光刺激	小脑中线	左/右转向、前进、后退	[78] [69]
陆地	甲虫 ( <i>Allomyrina dithotomus</i> ) ( <i>Zophobas morio</i> )	电刺激	背纵肌 触觉感受器	左/右转向 侧向行走	[79] [80]
	蟑螂 ( <i>Periplaneta Americana</i> ) ( <i>Gromphadorhina portentosa</i> ) ( <i>Blaberus discoidalis</i> )	电刺激	触角和尾须 前胸神经节	前行 后退 左/右转向	[23] [81] [24] [82] [8]
	美国蚱蜢 ( <i>Schistocerca Americana</i> )	电刺激	胸椎T3神经节	跳跃	[83]
	高脚蜘蛛 ( <i>Heteropoda venatoria</i> )	电刺激	腿部神经节	前进、后退	[84]
	大壁虎 ( <i>Gekko gekko</i> )	电刺激	中脑运动区	前进、左/右转向	[31]
	海龟 ( <i>Trachemys scripta elegans</i> )	电刺激	视觉中枢	左右/转向、前进、停止	[85]
	大鼠 ( <i>Rattus norvegicus</i> )	电刺激 光刺激	内侧前脑束 体感运动皮层 丘脑腹后外侧核 丘脑腹后内侧核 杏仁核 中脑背侧导水管周围灰质 脑干尾侧细胞外侧核 腹侧导水管区周围灰质 楔形核 脚桥核 黑质纹状体通路	前进 攀爬 跳跃 左/右转向 高速运动 停止	[22] [76] [35] [86] [87] [52] [88] [68] [14]
	烟草飞蛾 ( <i>Manduca sexta</i> )	电刺激	触角叶 背纵/腹肌 颈部肌肉	左/右转向 停止 飞行触发	[25] [73] [89]
	甲虫 ( <i>Cotinis texana</i> ) ( <i>Mecynorhina torquata</i> )	电刺激 光刺激	大脑头尾中线 左右/腹眼内侧视叶 左/右基底飞行肌 左/右视叶中间的脑部 左/右前上侧肌 第三块腋窝肌肉 背纵肌	飞行触发 飞行终止 抬头/俯冲 左/右转向	[59] [27] [27] [90] [91]
	意大利蜜蜂 ( <i>Apis mellifera ligustica</i> )	光刺激 电刺激	触角基部 左/右视叶 背纵/腹肌	振翅触发 振翅终止	[66] [92]
鸽子 ( <i>Columba livia</i> )	电刺激	古纹状体后部 丘脑的腹前背中核 中脑内侧网状结构 蓝斑核 中脑丘间核 丘脑背外后核团	起飞 左/右转向 前进	[71] [32] [39] [93] [94] [95]	

实现各类动物机器人的左右转向、前进、加速等运动行为调控(表3)。此外,智能化、微型化的自动化导航装备已有研究,支持实现动物机器人的“脑机融合”,建立更加精确可靠的运动调控系统。

### 2.2.1 爬行昆虫机器人: 蟑螂机器人

爬行昆虫的负重能力强,运动敏捷,以爬行昆虫为载体的昆虫机器人在狭窄空间和危险环境探索等方面有着独特优势。特别是体型娇小、运动速度快的蟑螂,能够敏捷地避开障碍物,被誉为“天才逃生专家”,是搜救型动物机器人的理想载体。1997年, Holzer和Shimoyama<sup>[8]</sup>首次在美国大蠓触角感受区植入微电极,利用轨迹球与计算机结合的刺激-行为分析系统,建立了载体运动行为与刺激参数之间的定量关系。通过遥控刺激器与光学传感器的反馈,基本实现了短距离的直线运动行为调控,极大地启发了昆虫机器人的研究。2012年, Latif和Bozkurt<sup>[28]</sup>采用相同原理在蟑螂的触角和尾部植入刺激电极,在背部搭载一个基于Zigbee星形网络的无线刺激背包系统,利用微型控制器发送电刺激信号,成功控制其沿着规定的路线运动,并进一步提高了蟑螂机器人的运动调控精度。随着神经科学和电子信息科学技术的不断发展融合,在此前蟑螂运动调控研究的基础上,2013年美国Backyard Brians公司研制出了全球首款商用电子蟑螂机器人(Cyborg-Roboroch)<sup>[96]</sup>。在IOS和Android系统,通过智能手机的蓝牙系统,将电刺激信号发送到安装在蟑螂背部的微型控制系统,以调控蟑螂机器人的运动行为。这些都标志着蟑螂机器人已有了较为全面的运动行为调控技术和稳定的无线控制系统,已突破了部分实验室研究阶段,正式进入实际应用领域研究。

针对蟑螂机器人在城市搜索和救援等实际应用领域,需要解决其在非结构化的复杂环境中自主导航、人类存在检测以及自身运动状态检测等方面问题。2015年, Latif等人<sup>[19]</sup>使用安装在人工昆虫身上的低功率麦克风阵列作为定位声源,引导蟑螂机器人自主导航到达声源目标。2016年, Li和Zhang<sup>[24]</sup>开发了一个全链无线脑对脑系统(brain-to-brain system, BTBS)。该系统使用基于稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)的脑机接口(BCI)来识别人类的运动意图,通过人脑实现对蟑螂机器人的运动调控。利用蓝牙通信,由BCI发送运动调控指令至蟑螂机器人背部的微型刺激器以触发特定的电脉冲序列刺激蟑螂大脑,进而控制蟑螂机器人完成沿S形轨道的运动。

2017年, Cole等人<sup>[81]</sup>研究设计了一个基于Zigbee星形无线网络、两轴陀螺仪、三轴加速度计和低功耗系统芯片的微型刺激器系统。研究者通过捕获蟑螂机器人的运动行为数据,结合已有的蟑螂行为模型和标准的步态分析技术,构建了一个新的分类模型,可以准确检测蟑螂的步态或运动状态。同年, Dirafzoon等人<sup>[97]</sup>根据上述研究提出了一种使用蟑螂机器人对未知环境进行全局探索和测绘的方法,用于在最小感知和定位约束下的应急场景。利用自然随机运动模型和蟑螂机器人的可调控运动,结合空中导航引导蟑螂机器人探索未知环境,构建局部地图。使用拓扑数据分析工具,从这些局部地图环境中提取稳健的拓扑信息和近似几何信息,然后进行合并完成完整的可视化全局地图。

2021年, Tran-Ngoc等人<sup>[20]</sup>研究设计了一个全新的微型刺激器系统,集成了昆虫运动控制系统、定位导航系统、微型红外摄像机和无线通信模块。在一个模拟的灾难场景测试中,初步实现了控制蟑螂机器人导航到预定目的地,自主穿越未知的障碍地形探测幸存者,并以无线方式传输给本地控制台。

### 2.2.2 大鼠机器人

大鼠因具有发达的运动和感知能力、易于实验室繁殖、脑结构和功能认识较完整等特点,被选为动物机器人的重要模式动物。早期大鼠机器人运动调控通常基于感觉代表区的虚拟奖励或虚拟惩罚原理,由电刺激产生虚拟的线索提示、奖励或惩罚,以完成大鼠的运动调控。2002年, Talwar等人<sup>[22]</sup>基于虚拟奖励原理,结合人工行为强化训练建立行为和电刺激之间的联系,研制了第一款大鼠机器人,初步实现了对大鼠的前进、左右转向等运动行为的调控。同时,为减少刺激电缆对动物自由活动的限制,他们研发了第一代大鼠机器人无线控制系统。该无线控制系统使实验者能够远程(约500 m)发送电刺激脉冲序列,以精确调控大鼠机器人在各种地形中导航。国内关于大鼠机器人的研究始于2005年。苏学成团队<sup>[38]</sup>采用类似的原理,首次通过发射无线信号指令完成了大鼠机器人的左右转向、前进和原地转圈等运动行为调控。2009年,苏学成团队<sup>[35]</sup>利用虚拟惩罚原理,电刺激大鼠丘脑腹侧后外侧核(VPL)和杏仁核(AMY)以调控其左右转向行为。与虚拟奖励的方法相比,这种方法缩短了调控大鼠机器人的训练时间,并且在较低刺激强度下即可完成一系列的动作调控。为了提高大鼠机器人左右转向运动调控的精度,2016年,郑筱祥团队<sup>[51]</sup>采用电刺激大鼠的丘脑腹

后内侧核(VPM)诱导大鼠机器人的左右转向运动,证明了以电刺激VPM可更好地控制大鼠的运动行为。

随着光遗传技术的发展以及鼠脑科学研究的深入,大鼠机器人的运动行为调控在刺激脑区、刺激方法、可调控行为的多样化等方面有了突破性进展。2010及2013年,郑筱祥团队<sup>[36,76]</sup>通过电刺激和光遗传技术分别刺激大鼠的dIPAG核团,成功实现了大鼠机器人防御停止行为的调控。2017年, Capelli等人<sup>[68]</sup>利用光遗传技术发现小鼠的脑干尾侧细胞外侧核(lateral paragi-gantocellular nucleus, LPGi)的谷氨酸能神经元可调节小鼠的运动速度。2018年, Caggiano等人<sup>[53]</sup>利用光遗传技术研究发现,中脑运动区的楔形核(CnF)和脚桥核(PPN)以互补的方式编码小鼠的运动速度,可达到较慢速度的维持与调节,而当仅光刺激楔形核时,可调控小鼠进行高速、同步的运动行为。2018年, Park等人<sup>[88]</sup>利用小鼠天生的狩猎和探索习性,在小鼠头顶的视野前方安装目标小球,通过视频记录分析头部和物体位置的方向信息,采用光遗传技术刺激小鼠内侧视前区-腹侧导水管区周围灰质(MPA-vPAG)的神经元环路,成功地诱导调控小鼠按照指定的路线进行运动。

为了减少大鼠机器人在运动调控中的人工训练时间,使其更好地快速投入使用,2007年,吴朝晖团队<sup>[34]</sup>进一步开发了基于视觉的自动训练系统,以取代耗时的手动训练过程。通过摄像机对大鼠机器人的行为状态进行视觉感知,利用目标检测算法对大鼠机器人的运动状态进行参数化建模,进而采用自适应调整策略施加合适的刺激强度,解决了大鼠机器人的自动训练问题。2014年,吴朝晖团队<sup>[98]</sup>首次报道了人与大鼠机器人的语音交互系统,该系统融合了脑机接口和自动语音识别技术,将人类的语音指令转换为适当的脑电刺激,以调控大鼠机器人的运动行为,大大缩短了大鼠机器人的训练时间。2019年, Kong等人<sup>[99]</sup>通过优化大鼠内侧前脑束(MFB)的电刺激参数,减少了大鼠机器人运动控制所需的训练时间。

为摆脱大鼠机器人运动调控需在可视范围内进行的限制,实现大鼠机器人在未知环境中的自主导航,2007年,郑筱祥团队<sup>[34]</sup>开发了一种远程控制系统,通过无线微刺激器向大鼠脑内发送电刺激信号,完成了大鼠机器人在复杂环境中导航。2010年,陈卫东团队<sup>[37]</sup>提出了一种新型的大鼠机器人自动导航系统。该系统利用鸟瞰摄像机视频跟踪大鼠机器人的运动状态,自动生成导航刺激命令,使大鼠机器人按照预先设定的路

线完成自动导航任务。但是该系统受限于鸟瞰摄像机所能获取的运动范围,无法让大鼠机器人在更开阔的环境中进行自主导航。针对这一问题,2015年,吴朝晖团队<sup>[100]</sup>利用动物机器人的生物特性继续开发了一个基于机器视觉引导的大鼠机器人闭环刺激模型,通过在大鼠机器人的头顶部装载微型摄像设备,将目标检测算法整合到大鼠机器人运动调控系统中,使其可以根据面前的物体状态自动发出刺激序列,自动做出特定的运动行为调控完成人类指定的导航任务。

为更高效发挥动物机器人的作用,需要首先解决大鼠机器人控制系统的微型化与能量供应问题。2019年, Yun等人<sup>[101]</sup>首创了一个体积小、功耗低、可完全植入动物体内、具有无线控制能力的皮下植入式刺激器,并成功调控大鼠机器人在自由空间内左右转向等运动行为。该刺激器的所有组件都是使用定制的柔性扁平电缆,并使用液晶聚合物封装,以避免植入后发生免疫排斥反应。尽管这一植入式微型刺激系统极大地提高了大鼠机器人的隐蔽性,但也面临着电能耗尽电源仍需要更换的窘境。2021年, Burton等人<sup>[75]</sup>在大鼠帕金森疾病模型的研究中,设计了一个完全可植入、无线、无电池的植入式深部脑刺激(deep brain stimulation, DBS)微系统。该系统由一个3 W射频功率的双环天线供电,可实时地对大鼠的内侧前脑束(MFB)进行慢性电刺激,以诱导大鼠的头部运动,且可稳定运行36 d。这一开创性研究为未来动物机器人自供电系统的研究提供了新研究范式。

### 2.3 空中飞行动物的运动调控

飞行动物具有活动范围广、能量消耗小、隐蔽性能好等天然优势,基于飞行动物的生物机器人是近年来动物微型飞行器研究的热门课题。在飞行的昆虫动物机器人中,广泛采用电刺激昆虫特定感觉、神经或肌肉器官来实现其飞行行为调控;在鸽子机器人中,主要采用虚拟惩罚原理与中脑运动区调控原理,以实现对其运动调控。

#### 2.3.1 飞行昆虫机器人:飞行甲虫机器人

昆虫有着优越的飞行能力和高机动性,以昆虫为载体的昆虫机器人可以监测人类无法到达、狭窄和危险的环境。飞行甲虫机器人一般选择个体较大、具有较强负重能力的甲虫,如绿金龟(*C. texana*)、日本独角仙(*M. torquata*)等。对于这类个体较大的甲虫,负重一般可达自重的20%~30%,在背载微刺激设备后仍能完

成自由飞行<sup>[102]</sup>。此外,甲虫的神经系统相对简单,神经元信号输出是单一化的,控制飞行肌肉振翅频率的运动神经信号阈值很低。因此,仅需要微弱的低频刺激信号即可调控甲虫的飞行行为。

2009年,Sato团队<sup>[59]</sup>在绿金龟和日本独角仙等飞行甲虫机器人的研究中,设计了一个射频通信的甲虫无线控制系统。通过电刺激甲虫的左右视叶、左右侧基底肌等位点,成功实现了甲虫起飞、停止、左右转向等运动行为调控。他们阐明了甲虫依赖非同步肌控制振翅原理,实现了以低频刺激信号调控甲虫的飞行行为。同时,为了降低甲虫机器人的飞行功耗,增加其飞行调控的可靠性与精确性,Sato团队<sup>[91]</sup>采用与早期变态植入技术(early metamorphosis insertion technology, EMIT)类似的电极植入技术,将电极、硅芯片等植入甲虫蛹体内,成功保证了甲虫机器人的存活率和微刺激系统的稳定性。此外,为获得甲虫机器人更为精细化的运动行为调控,2015年,Sato团队<sup>[103]</sup>以*M. torquata*为载体,对参与自由飞行的不同肌肉进行了更细致的研究,证明了第3块腋窝肌肉在甲虫的转向调节中起着关键作用。2016年,Sato团队<sup>[104,105]</sup>在甲虫的左右视叶、左右背纵肌等位点植入电极,通过电刺激成功调控其飞行启动、左右转向等行为,并在同一位点用单一直流脉冲成功诱导其飞行停止行为。2019年,Sato团队<sup>[106]</sup>首次切除甲虫的翼膜并以人工翼膜(对二甲苯薄膜)代替了天然的翅膀膜,对甲虫的飞行参数推力、升力、加速度和减速度进行测量分析,研究了昆虫翼结构对其飞行性能的影响。结果表明,在加入人工膜代替切除的翅膀后可以使甲虫成功地飞行,该研究为提高飞行昆虫机器人的飞行性能提供了新方法。

### 2.3.2 鸽子机器人

鸽子有超强的负重能力与持续飞行能力,具有良好的归巢习性和集群行为,以鸽子为载体的动物机器人在远距离飞行与动物机器人集群飞行调控等方面有着巨大的应用前景。2006年,苏学成团队<sup>[57]</sup>采用虚拟惩罚的调控原理,成功研制出世界上首例“机器人鸟”。通过电刺激鸽脑内的恐惧感受区古纹状体后部(posterior amygdala, PoA)和躯体痛觉感受区丘脑腹前背中核(dorsalis intermedialis ventralis anterior, DIVA),成功诱导鸽子起飞、左右转向等运动行为。这一方法从原理上实现了鸽子机器人简单的运动调控,但长期的负面刺激让鸽子在被刺激后表现出非适应的生理反应,且刺激参数会因个体差异变化较大。这些都使得长期有

效、精确地调控鸽子机器人仍然面临诸多问题。

为解决鸽子机器人在投入工作前的训练问题,2015年,戴振东团队<sup>[32]</sup>结合鸟类的脑功能图谱,选择避开动物大脑对信息进行整合与判断的多级调控环节,直接电刺激中脑运动区以调控其运动行为。研究表明,电刺激鸽子中脑的内侧网状结构(formatio reticularis medialis mesencephali, FRM)和蓝斑核(locus ceruleus, LoC)等多个特定核团,可以直接地调控鸽子机器人完成左右转弯、前进、起飞等运动行为,省去了人工训练阶段。2018年,苏学成团队<sup>[95]</sup>通过电刺激的方法,成功确定了鸽子的中脑丘间核(nucleus intercollicularis, ICo)是调控鸽子机器人前进的中脑运动核团。2021年,Jang等人<sup>[94]</sup>为了研究鸽子中脑运动区与其飞行调控行为的联系,利用电刺激中脑的圆形核(nucleus rotundus, RT)、枕中脑束(tractus occipito-mesencephalicus, OM)、带状核(nucleus taeniae, TN)等核团,可直接调控鸽子机器人的左右转向行为;电刺激中脑的中脑束(tractus septo-mesencephalicus, TSM)、原纹状体腹侧部(archistriatum ventral, AV)等核团,可成功调控鸽子机器人的起飞行为。

在鸽子机器人精准调控研究方面,2015年,苏学成团队<sup>[33]</sup>开发了一个基于多模式电刺激系统的遥控导航设备。该刺激系统可以发射多模式、非稳态的TTL双相脉冲来刺激鸽子的躯体痛觉感受区DIVA,以调控鸽子机器人前进、左右转向等运动行为。研究表明,基于多模式的刺激系统比单模式的刺激系统有着更好的神经元适应性,可以提高鸽子机器人运动调控的可靠性。2016年,苏学成团队<sup>[71]</sup>继续提出了一种多脑区微电极同步植入的方法,通过计算各个脑区之间的距离与深度差,将微电极同时植入多个脑区中,成功缩短了手术过程以及减少单根电极植入所引起的误差。2019年,万红团队<sup>[39]</sup>将电极植入鸽子中脑内侧网状结构(FRM),通过定量分析电刺激参数发现,刺激参数(振幅、频率与占空比)大小与鸽子飞行轨迹的调节作用呈显著的非线性相关。

为实现鸽子机器人户外远距离的飞行调控,2018年,戴振东团队<sup>[107]</sup>为鸽子机器人设计了一款可背载的微型无线导航刺激器,并提出了预编程分层刺激算法,以确保鸽子机器人远距离飞行调控的安全性。该刺激器系统主要由微型北斗全球定位系统、微控制器、微刺激器和数据存储卡组成。其主要特点是通过预编程算法,实现特定的时间和地点对鸽子机器人进行微电

刺激以调控其飞行转向行为,并将飞行数据储存在外置的内存卡中,无需无线传输数据。在此研究基础上,2020年,戴振东团队<sup>[108]</sup>首次将鸽子机器人用于鸽群的集群行为研究中,并利用上述研究的预编程分层刺激算法对鸽群所属层级关系最高的领导鸽施加人工调控,粗略地实现了对整个鸽群的飞行状态调控。这是第一个实现远距离调控鸽子机器人户外飞行研究,是动物机器人走出实验室研究面向实际应用的有益尝试。

为提高鸽子机器人的隐蔽性,解决能量供应问题,2019年, Kim团队<sup>[93]</sup>设计了一种完全可植入的神经刺激系统并用于鸽子机器人。该刺激系统主要由一个手持式的刺激控制器和一个完全植入式的微刺激器组成,集成了刺激器、无线通讯及电池充电等功能。通过电刺激可成功调控鸽子机器人的运动行为,但由于电池需要充电等问题,该系统无法持续工作。针对这一局限性,2021年, Kim团队<sup>[109]</sup>在上述研究的基础上,首次将生物燃料电池(biofuel cell, BFC)和动物大脑刺激器(animal brain stimulator, ABS)相结合,分别封装在生物相容性高的纤维素透析膜中再完全植入到鸽子体内。通过生物体内酶促反应将生物燃料电池中的葡萄糖氧化还原,从而产生持续的电能为动物大脑刺激器供电,确保了鸽子机器人微控制系统的可持续性、稳定性和隐蔽性。

### 3 动物行为调控研究的发展趋势

综上所述,动物运动行为调控研究仍处于实验室探索阶段,目前虽已有蟑螂机器人、大鼠机器人和鸽子机器人等接近实用的研究成果,但后续面向应用的研究尚需一定研究周期。在动物运动的神经调控机制与调控方法上仍有不少科学问题尚待探索,在通信、导航、刺激器、能量供应及关键器件微型化等方面仍需要大量投入和研制。

为高效发挥动物机器人的作用,以满足实际应用的需要,本文以动物行为调控技术的研究瓶颈为基础,结合动物机器人研究框架的4个方面内容(图3),对面向动物机器人的未来发展趋势进行讨论。

#### 3.1 运动行为的神经调控机制与方法研究

当前用于动物运动行为调控的主要方法是通过电刺激其神经系统或肌肉,触发神经冲动形成适当的运动反应。刺激神经系统的方法主要有3种:(1)传入(感觉)神经的刺激;(2)传出(运动)神经的刺激;(3)与决策相关的中间神经元(脑或神经节)的刺激。此3种调控方

法均存在感知-决策-运动神经回路涉及核团较多、信息整合过程复杂等问题,导致动物机器人的运动行为调控普遍存在运动行为不够精确、动作不够流畅、稳定性和可靠性欠佳等。此外,由于对动物运动神经系统的认识不足,可实现调控的动物机器人行为动作较少。

为探索动物机器人更多可控的运动行为反应,实现更加精细化的控制,未来需要进一步研究不同动物的脑功能图谱及运动行为调控的神经机制。(1)结合不同的动物载体,探明与运动相关的神经信号传导通路和神经环路结构(图3),在更为清晰的运动神经通路上选择特定核团或环路进行刺激,以增加动物机器人运动调控的可靠性与可控行为多样化。(2)进一步考虑个体差异、生理状态及外部环境变化等因素对行为调控的影响。深入研究大脑对外部刺激的整合机制,以消除各种因素对神经活动的干扰,将动物自身的运动意愿融合到控制策略中,增加对动物本身智能的理解与利用。(3)根据丘脑运动意愿与中脑运动模式相结合的神经调控机制,建立多脑区(核团)协同刺激模式,深度解析神经电信号的编码规律,设置合理的刺激参数并进行特异性强的精细刺激。建立精确的刺激输入与运动响应间的定量映射关系模型,提高运动行为调控的鲁棒性与流畅性,实现动物机器人运动行为调控的精细化与稳定性。(4)在现有的工作基础上,结合最新的光遗传技术,开发基于精细的光遗传与微电刺激方法相结合的神经调控技术。结合光/电刺激技术的优势,实现有选择性地对目标核团特定的神经元细胞群激活或抑制,并根据不同类型神经元动作电位阈值和细胞膜电生理属性的差异,配置特定的电刺激参数,以建立特异性的参数化调控指令。同时分级强化光/电刺激与行为响应之间的关联,优化调控效果,调控动物机器人精准地完成特定的运动行为。

#### 3.2 刺激调控微系统设计

动物机器人必须配备机载设备才具备实用价值。目前,动物机器人由于受到动物载体个体大小和负重能力的限制,动物背载的微型刺激调控系统设计方面存在较大的约束和挑战。在面向实际应用领域,动物机器人的控制系统微型化和高度集成化将是必然的发展趋势,即要求在有限空间内实现整体系统的轻量化、节能化和微型化。设计集成刺激发生、信息反馈、电源供电等功能于一体的在体刺激调控系统,以减少动物体的消耗,防止负载过重而影响对其的有效控制。同



图3 (网络版彩色)动物机器人的研究框架  
Figure 3 (Color online) Research framework for animal robots

时, 需要结合不同动物机器人的运动场景, 深入研究微电极的制备与植入技术, 确保刺激调控微系统具有长期有效性和稳定性, 延长动物机器人的使用寿命. 特别是在水下环境中, 需要研制新型的微电极材料和防水密封方法, 以保证整个系统不会受水的侵入而发生短路和元器件腐蚀, 并适应水温、水压、水流等周围环境的变化.

针对这些研制需求, 需要深入研究柔性MEMS技术, 设计低功耗、高可靠的集成刺激电路, 实现多路、可调节的刺激信号产生, 生成多样化的运动调控指令. 配合上述光/电刺激神经调控技术, 构建多模态闭环神经调控微系统, 以实现刺激调控微系统的功能集成化(图3). 采用基于SOC/SIP的微系统集成技术, 使用基板堆叠微系统、全晶圆封装微系统和晶圆级混合封装微系统等3D叠装高密度互联技术, 将电路模块与控制系统模块集成, 以实现刺激调控微系统硬件的微型化. 采用高生物相容性和高可靠性系统封装技术, 将微型控制装置植入动物载体体内, 提高刺激调控系统的隐蔽性.

针对植入脑内的部件需要结合神经工程领域的最新技术, 突破电极位点的数量限制以及提高电极刺激的安全性. 研究稳定性好、灵敏度高、长期有效、生物相容性好的高性能神经微电极, 减少降低动物载体的损伤和免疫反应. 此外, 脑区微电极直径小, 长径比大, 植入过程中受到压力可能发生屈曲. 若屈曲发生在

植入之初(即电极尖端刚刚接触脑区组织时), 轻则导致电极弯曲无法插入, 重则导致电极断裂; 若屈曲发生在植入过程中(即电极尖端已经刺入脑区), 轻则改变电极方向、降低植入精度, 重则导致脑区损伤. 电极的屈曲行为不仅与电极本身的力学特性相关, 还与脑组织的机械力学特性相关. 目前国内外尚未有关于脑区电极屈曲行为的研究, 因此未来必须结合实际情况研究电极的屈曲行为, 探索可靠的微电极植入技术, 保障植入精度. 未来一个重要的发展方向是设计基于构建力-位-视觉多信息融合的手术机器人, 实现高精度的微电极植入和器件埋植, 缩短动物机器人的研制周期.

### 3.3 通信导航技术的应用与开发

无线控制技术在动物机器人领域运用已有几十年的历史了. 早期开发的遥控刺激系统, 由于通信距离有限、带宽过窄和数据传输延迟等问题, 动物机器人的运动调控和自主导航的范围有限, 无法离开人类视野实现真正意义上的远距离自主导航控制. 对于面向实际应用的动物机器人, 需要突破在通信距离、通信速率以及数据实时交互等方面的关键技术壁垒, 实现场景信息与控制指令信号的交互传输. 需要在控制系统的微型化、集成化基础上, 开发集成具有定位精度高、控制指令丰富、通信距离远、数据安全性高和数据可实时传输等功能的通信导航系统(图3). 通过精确的定位功能和远距离无线通信的方式, 实现动物机器

人远距离实时调控, 扩大其运动调控范围. 同时, 需要结合遥控与遥测等相关技术, 实时检测动物的生理活动状态以及环境特征, 通过动物机器人装载的传感设备回传各类图像信息和感官信息, 建立多模态的闭环实时反馈调控系统, 实现动物机器人的远距离自动导航调控. 此外, 需要基于动物机器人的通信导航系统, 研究低功耗的无线组网技术, 实现动物机器人的群组调控, 建立跨物种协作框架.

### 3.4 自供电系统设计策略

动物机器人的控制系统通常用电池供电, 电池大会增加动物负荷, 电池小会导致设备的工作时间受限. 现有研究多采用锂电池, 尽管锂电池容量不断提高, 但仍无法满足延长动物机器人工作时间的要求.

为最大限度地发挥动物机器人的运动能力, 开发具有持续供电能力的微型能量供应系统, 是保证动物机器人长时间工作的必要措施(图3). 综合当前的研究基础和应用技术, 研究无线能量耦合、生物燃料电池和摩擦纳米发电机等关键技术, 在未来动物机器人能量供应系统的研究领域拥有巨大潜在的应用前景. 动物机器人的无线能量耦合研究是通过非接触式充电系统, 让动物机器人在特定的场景内完成无线充电. 生物燃料电池研究是利用生物体内的酶促反应将生物化学能转化为电能, 以满足可持续性供电的实际需求. 目前, 动物机器人的研究(大鼠<sup>[75]</sup>、鸽子<sup>[109]</sup>)已在无线能量耦合应用和生物燃料电池开发等方面有了部分实用

性结果验证, 但还都处在实验室阶段, 仅能实现生物机器人的基本控制, 其稳定性、能量供应效率等方面还有待进一步深入研究, 以满足动物机器人背载设备的供电需求.

摩擦纳米发电技术是一项革新的技术<sup>[110]</sup>, 它能够巧妙地将两种物体间摩擦形成的电荷转化为有用的电能. 在未来动物机器人能量供应研究中, 有望通过这项创新技术将动物运动过程中的摩擦机械能转化为有效的电能并进行储存, 以满足动物机器人的运动调控和机载设备的供电需求.

## 4 总结

动物行为调控技术是一门高度融合了电子信息技术、人工智能技术和神经科学技术的交叉学科, 是类生命机器人发展的新趋势. 本文从动物运动的神经调控原理出发, 系统地梳理了不同动物机器人的运动调控方法及系统构成, 简要总结了近年来有关动物行为调控技术的发展. 根据不同动物机器人的运动场景(水、陆、空), 对若干个典型动物机器人的运动行为调控方法、遥控刺激系统优化以及自动导航系统研究等方面的重要研究成果进行分类评述, 并对未来动物机器人需要突破的研究问题和面临的关键技术挑战进行了总结与讨论. 在此基础上, 概括了动物机器人的研究框架, 从运动神经调控原理、刺激系统微型化、通信导航、自供电系统设计4个方面归纳分析并预测动物机器人的未来发展.

## 参考文献

- 1 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. *Science*, 2000, 288: 100–106
- 2 Catavittello G, Ivanenko Y, Lacquaniti F. A kinematic synergy for terrestrial locomotion shared by mammals and birds. *eLife*, 2018, 7: e38190
- 3 Lu Y X. Scientific significance and frontiers of bionics: The significance and development of bionics (in Chinese). *Sci Chin*, 2004, 4: 22–24 [路雨祥. 仿生学的意义与发展. *科学中国人*, 2004, 4: 22–24]
- 4 Arber S, Costa R M. Connecting neuronal circuits for movement. *Science*, 2018, 360: 1403–1404
- 5 Ji A H, Dai Z D, Zhou L S. Research progress of bionic robot (in Chinese). *Robot*, 2005, 27: 284–288 [吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展. *机器人*, 2005, 27: 284–288]
- 6 Zhang X L, Zheng H J. A review of robot bionics (in Chinese). *Robot*, 2002, 24: 188–192 [张秀丽, 郑浩峻. 机器人仿生学研究综述. *机器人*, 2002, 24: 188–192]
- 7 Zhao C, Ju Y F, Liu Y Z. Review of robotic bio-control technology (in Chinese). *J Data Acquisit Process*, 2010, (S1): 191–195 [赵琛, 巨永锋, 刘阳子. 机器人生物控制技术综述. *数据采集与处理*, 2010, (S1): 191–195]
- 8 Holzer R, Shimoyama I. Locomotion control of a bio-robotic system via electric stimulation. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Grenoble: IEEE, 1997. 1514–1519
- 9 Light R U, Chaffee E L. Electrical excitation of the nervous system—Introducing a new principle: Remote control. Preliminary report. *Science*, 1934, 79: 299–300
- 10 Birbaumer N. Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. *Psychophysiology*, 2006, 43: 517–532

- 11 Bozkurt A, Gilmour R F, Sinha A, et al. Insect-machine interface based neurocybernetics. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 1727–1733
- 12 Zhang C, Wang W, Xi N, et al. Development and future challenges of bio-syncretic robots. *Engineering*, 2018, 4: 452–463
- 13 Wang H, Huai R T, Yang J Q, et al. Review of research progress in biorobot. *Adv Mat Res*, 2013, 655: 1061–1065
- 14 Ahmadi A, Behroozi M, Shalchyan V, et al. Rat navigation by stimulating somatosensory cortex. *J Bionic Eng*, 2019, 16: 931–942
- 15 Guo C, Dai Z D, Sun J R. Research status and future development of biorobots (in Chinese). *Robot*, 2005, 2: 187–192 [郭策, 戴振东, 孙久荣. 生物机器人的研究现状及其未来发展. *机器人*, 2005, 2: 187–192]
- 16 Bozkurt A, Lobaton E, Sichiitiu M. A biobotic distributed sensor network for under-rubble search and rescue. *Comp*, 2016, 49: 38–46
- 17 Whitmire E, Latif T, Bozkurt A. Acoustic sensors for biobotic search and rescue. In: 13th IEEE Sensors Conference. Valencia: IEEE, 2014. 2195–2198
- 18 Zheng N G, Chen W D, Hu F L, et al. Research progress and challenges on cyborg insect (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2011, 41: 259–272 [郑能干, 陈卫东, 胡福良, 等. 昆虫机器混合系统研究进展. *中国科学: 生命科学*, 2011, 41: 259–272]
- 19 Latif T, Whitmire E, Novak T, et al. Sound localization sensors for search and rescue biobots. *IEEE Sens J*, 2015, 16: 3444–3453
- 20 Tran-Ngoc P T, Long L D, Chong B S, et al. Insect-computer hybrid system for autonomous search and rescue mission. *Res Square*, 2021, 2015: 10869
- 21 Romano D, Donati E, Benelli G, et al. A review on animal-robot interaction: From bio-hybrid organisms to mixed societies. *Biol Cybern*, 2019, 113: 201–225
- 22 Talwar S K, Xu S, Hawley E S, et al. Rat navigation guided by remote control. *Nature*, 2002, 417: 37–38
- 23 Erickson J C, Herrera M, Bustamante M, et al. Effective stimulus parameters for directed locomotion in madagascar hissing cockroach biobot. *PLoS One*, 2015, 10: e0134348
- 24 Li G, Zhang D. Brain-computer interface controlled cyborg: Establishing a functional Information transfer pathway from human brain to cockroach brain. *PLoS One*, 2016, 11: e0150667
- 25 Bozkurt A, Gilmour R, Stern D, et al. MEMS based bioelectronic neuromuscular interfaces for insect cyborg flight control. In: 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2008). Tucson: IEEE, 2008. 160–163
- 26 Bozkurt A, Lal A, Gilmour R. Electrical endogenous heating of insect muscles for flight control. In: International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vancouver: IEEE, 2008. 5786–5789
- 27 Sato H, Berry C W, Casey B E, et al. A cyborg beetle: Insect flight control through an implantable, tetherless microsystem. In: 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Tucson: IEEE, 2008. 164–167
- 28 Latif T, Bozkurt A. Line following terrestrial insect biobots. In: International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. San Diego: IEEE, 2012. 972–975
- 29 Brown S. Stealth sharks to patrol the high seas. *New Sci*, 2006, 189: 30–31
- 30 Kajiura S M, Fitzgerald T P. Response of juvenile scalloped hammerhead sharks to electric stimuli. *Zoology*, 2009, 112: 241–250
- 31 Wang W B, Dai Z D, Guo C, et al. A study on steering movement induced by electrical stimulation in the midbrain of the great Gecko (*Gekko gecko*) (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2008, 9: 979–986 [王文波, 戴振东, 郭策, 等. 电刺激大壁虎(*Gekko gecko*)中脑诱导转向运动的研究. *自然科学进展*, 2008, 9: 979–986]
- 32 Cai L, Dai Z, Wang W, et al. Modulating motor behaviors by electrical stimulation of specific nuclei in pigeons. *J Bionic Eng*, 2015, 12: 555–564
- 33 Yang J, Huai R, Wang H, et al. A robo-pigeon based on an innovative multi-mode telestimulation system. *Bio-Med Mater Eng*, 2015, 26: 357–363
- 34 Feng Z, Chen W, Ye X, et al. A remote control training system for rat navigation in complicated environment. *J Zhejiang Univ-Sci A*, 2007, 8: 323–330
- 35 Huai R, Yang J, Hui W, et al. A new robo-animals navigation method guided by the remote control. In: 2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. Tianjin: IEEE, 2009. 1–4
- 36 Lin J Y, Yu C N, Jia J, et al. Using dIPAG-evoked immobile behavior in animal-robotics navigation. In: International Conference on Computer Science and Education. Hefei: IEEE, 2010. 1295–1298
- 37 Zhang Y, Sun C, Zheng N, et al. An automatic control system for ratbot navigation. In: 2010 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications & International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Hangzhou: IEEE, 2010. 895–900
- 38 Su X C, Huai R T, Yang J Q, et al. Brain mechanisms and control methods for motor behavior of animal robots (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2012, 42: 1130–1146 [苏学成, 槐瑞托, 杨俊卿, 等. 控制动物机器人运动行为的脑机制和控制方法. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42: 1130–1146]
- 39 Zhao K, Wan H, Shang Z, et al. Intracortical microstimulation parameters modulate flight behavior in pigeon. *J Integr Neurosci*, 2019, 18: 23–32
- 40 Zhou Z, Liu D, Sun H, et al. Pigeon robot for navigation guided by remote control: System construction and functional verification. *J Bionic Eng*, 2021, 18: 184–196
- 41 Wang S, Shen L, Liu X, et al. A wearable backpack chip for honeybee biorobot. In: 2016 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). Shanghai: IEEE, 2016. 1–3

- 42 Song W G, Chai J, Han T Z, et al. A miniature multi-mode remote control stimulator for free-moving animals (in Chinese). *Acta Physiol Sin*, 2006, 58: 183–188 [宋卫国, 柴洁, 韩太真, 等. 一种用于自由活动动物的微型多模式遥控刺激器. *生理学报*, 2006, 58: 183–188]
- 43 Klowden M J. *Physiological Systems in Insects*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2013
- 44 Stelmach G E, Diggles V A. Control theories in motor behavior. *Acta Psychol*, 1982, 50: 83–105
- 45 Grillner S, Manira A E. Current principles of motor control, with special reference to vertebrate locomotion. *Physiol Rev*, 2020, 100: 271–320
- 46 Yeom H G, Kim J S, Chung C K. Brain mechanisms in motor control during reaching movements: Transition of functional connectivity according to movement states. *Sci Rep*, 2020, 10: 567–578
- 47 Tang X W. *Introduction to Brain Science* (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006 [唐孝威. *脑科学导论*. 杭州: 浙江大学出版社, 2006]
- 48 Roseberry T K, Lee A M, Lalive A L, et al. Cell-type-specific control of brainstem locomotor circuits by basal ganglia. *Cell*, 2016, 164: 526–537
- 49 Ryczko D, Dubuc R. The multifunctional mesencephalic locomotor region. *Curr Pharm Des*, 2013, 19: 4448–4470
- 50 Dubuc R. Locomotor regions in the midbrain (MLR) and diencephalon (DLR). In: Binder M D, Hirokawa N, Windhorst U, eds. *The Encyclopedia of Neuroscience*. New York: Springer, 2009. 2168–2171
- 51 Xu K, Zhang J, Zhou H, et al. A novel turning behavior control method for rat-robot through the stimulation of ventral posteromedial thalamic nucleus. *Behav Brain Res*, 2016, 298: 150–157
- 52 Koh C S, Park H Y, Shin J, et al. A novel rat robot controlled by electrical stimulation of the nigrostriatal pathway. *Neurosurg Focus*, 2020, 49: E11
- 53 Caggiano V, Leiras R, Goñi-Erro H, et al. Midbrain circuits that set locomotor speed and gait selection. *Nature*, 2018, 553: 455–460
- 54 Jamali M, Jamali Y, Golshani M. Theory of cyborg: A new approach to fish locomotion control. *BioRxiv*, 2019, 6: 47–69
- 55 Lemmerhirt D F, Staudacher E M, Wise K D. A multitransducer microsystem for insect monitoring and control. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2006, 53: 2084–2091
- 56 Xu S, Talwar S K, Hawley E S, et al. A multi-channel telemetry system for brain microstimulation in freely roaming animals. *J Neurosci Methods*, 2004, 133: 57–63
- 57 Wang Y, Su X C, Huai R T, et al. A telemetry navigation system for animal-robots (in Chinese). *Robot*, 2006, 28: 183–186 [王勇, 苏学成, 槐瑞托, 等. 动物机器人遥控导航系统. *机器人*, 2006, 28: 183–186]
- 58 Zhang S M, Wang P, Jiang J, et al. Study on remote navigation and behavior training system in rats (in Chinese). *Chin J Biom Eng*, 2007, 26: 830–836 [张韶岷, 王鹏, 江君, 等. 大鼠遥控导航及其行为训练系统的研究. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26: 830–836]
- 59 Sato H, Berry C W, Peeri Y, et al. Remote radio control of insect flight. *Front Integr Neurosci*, 2009, 3: 24–35
- 60 Ye X, Wang P, Liu J, et al. A portable telemetry system for brain stimulation and neuronal activity recording in freely behaving small animals. *J Neurosci Methods*, 2008, 174: 186–193
- 61 Yan X, Ni H S, Huang X. Application of ZigBee star network in animal robot (in Chinese). *Electron Technol*, 2010, 8: 14–15 [严霞, 倪化生, 黄炫. ZigBee星形网络在动物机器人中的应用. *电子技术*, 2010, 8: 14–15]
- 62 Zhu Z J, Wang H, Han J H. Development of remote control stimulation system for animal robot based on 3G network communication (in Chinese). *Auto Instrum*, 2017, 10: 71–74 [朱志坚, 王浩, 韩济华. 基于3G网络通信的动物机器人遥控刺激系统的研制. *自动化与仪器仪表*, 2017, 10: 71–74]
- 63 Sholomenko G N, Funk G D, Steeves J D. Avian locomotion activated by brainstem infusion of neurotransmitter agonists and antagonists. *Exp Brain Res*, 1991, 85: 659–673
- 64 Kubanek J, Brown J, Ye P, et al. Remote, brain region-specific control of choice behavior with ultrasonic waves. *Sci Adv*, 2020, 6: eaaz4193
- 65 Chen S C, Zhou H, Guo S C, et al. Optogenetics based rat-robot control: Optical stimulation encodes “stop” and “escape” commands. *Ann Biomed Eng*, 2015, 43: 1851–1864
- 66 Zheng N, Jin M, Hong H, et al. Real-time and precise insect flight control system based on virtual reality. *Electron Lett*, 2017, 53: 387–389
- 67 Boyden E S, Zhang F, Bamberg E, et al. Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1263–1268
- 68 Capelli P, Pivetta C, Esposito M S, et al. Locomotor speed control circuits in the caudal brainstem. *Nature*, 2017, 551: 373–377
- 69 Peng Y, Han X X, Wang T T, et al. The invention discloses a light stimulation device and a light control experimental method for a carp robot (in Chinese). *J Biom Eng*, 2018, 35: 720–726 [彭勇, 韩晓晓, 王婷婷, 等. 一种用于鲤鱼机器人的光刺激装置及光控实验方法. *生物医学工程学报*, 2018, 35: 720–726]
- 70 Lafferty J M, Farrell J J. A technique for chronic remote nerve stimulation. *Science*, 1949, 110: 140–141
- 71 Huai R T, Yang J Q, Wang H. The robo-pigeon based on the multiple brain regions synchronization implanted microelectrodes. *Bioeng Bugs*, 2016, 7: 213–218
- 72 Delius J D. Some techniques for the electrical brain stimulation of small unrestrained animals. *Med Biol Eng*, 1966, 4: 393–397

- 73 Tsang W, Aldworth Z, Stone A, et al. Insect flight control by neural stimulation of pupae-implanted flexible multisite electrodes. In: 12th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences. San Diego: MicroTAS, 2008. 1922–1924
- 74 Tsang W M, Stone A L, Otten D, et al. Insect-machine interface: A carbon nanotube-enhanced flexible neural probe. *J Neurosci Methods*, 2012, 204: 355–365
- 75 Burton A, Won S M, Sohrabi A K, et al. Wireless, battery-free, and fully implantable electrical neurostimulation in freely moving rodents. *Microsyst Nanoeng*, 2021, 7: 62–74
- 76 Chen S, Qu Y, Guo S, et al. Encode the “STOP” command by photo-stimulation for precise control of rat-robot. In: 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka: IEEE, 2013. 2172–2175
- 77 Kobayashi N, Yoshida M, Matsumoto N, et al. Artificial control of swimming in goldfish by brain stimulation: Confirmation of the midbrain nuclei as the swimming center. *Neurosci Lett*, 2009, 452: 42–46
- 78 Peng Y, Wu Y, Yang Y, et al. Study on the control of biological behavior on carp induced by electrophysiological stimulation in the corpus cerebelli. In: Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin: IEEE, 2011. 502–505
- 79 Feng Y, Yang B, Jiang Y, et al. Research on key techniques of insect flapping onset control based on electrical stimulation. *Sensors*, 2020, 20: 239–254
- 80 Nguyen H D, Tan P Z, Sato H, et al. Sideways walking control of a cyborg beetle. *IEEE Trans Med Robot Bion*, 2020, 2: 331–337
- 81 Cole J, Mohammadzadeh F, Bollinger C, et al. A study on motion mode identification for cyborg roaches. In: 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans: IEEE, 2017. 2652–2656
- 82 Sanchez C J, Chiu C W, Zhou Y, et al. Locomotion control of hybrid cockroach robots. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 20141363
- 83 Giampalmo S L, Absher B F, Bourne W T, et al. Generation of complex motor patterns in American grasshopper via current-controlled thoracic electrical interfacing. In: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Boston: IEEE, 2011. 1275–1278
- 84 Yang Z, Chun K Y, Xu J, et al. A preliminary study of motion control patterns for biorobotic spiders. In: 11th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). Taichung: IEEE, 2014. 128–132
- 85 Kim C H, Choi B, Kim D G, et al. Remote navigation of turtle by controlling instinct behavior via human brain-computer interface. *J Bionic Eng*, 2016, 13: 491–503
- 86 Ramshur J T, Morshed B I, de Jongh Curry A L, et al. Telemetry-controlled simultaneous stimulation-and-recording device (SRD) to study interhemispheric cortical circuits in rat primary somatosensory (SI) cortex. *BMC Biomed Eng*, 2019, 1: 19
- 87 Aravanis A M, Wang L P, Zhang F, et al. An optical neural interface: *In vivo* control of rodent motor cortex with integrated fiberoptic and optogenetic technology. *J Neural Eng*, 2007, 4: S143–S156
- 88 Park S G, Jeong Y C, Kim D G, et al. Medial preoptic circuit induces hunting-like actions to target objects and prey. *Nat Neurosci*, 2018, 21: 364–372
- 89 Bozkurt A, Paul A, Pulla S, et al. Microprobe microsystem platform inserted during early metamorphosis to actuate insect flight muscle. In: 2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Hyogo: IEEE, 2007. 405–408
- 90 Zhang C, Cao F, Li Y, et al. Fuzzy-controlled living insect legged actuator. *Sens Actuat A-Phys*, 2016, 242: 182–194
- 91 Sato H, Berry C W, Casey B E, et al. A cyborg beetle: Insect flight control through an implantable, tetherless microsystem. In: 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Tucson: IEEE, 2008. 164–167
- 92 Dyhr J P, Higgins C M. The spatial frequency tuning of optic-flow-dependent behaviors in the bumblebee *Bombus impatiens*. *J Exp Biol*, 2010, 213: 1643–1650
- 93 Shim S, Yun S, Kim S, et al. A handheld neural stimulation controller for avian navigation guided by remote control. *BME*, 2019, 30: 497–507
- 94 Jang J, Baek C, Kim S, et al. Current stimulation of the midbrain nucleus in pigeons for avian flight control. *Micromachines*, 2021, 12: 788–801
- 95 Wang H, Yang J, Lü C, et al. Intercollicular nucleus electric stimulation encoded “walk forward” commands in pigeons. *Anim Biol*, 2018, 68: 213–225
- 96 Whitmire E, Latif T, Bozkurt A. Kinect-based system for automated control of terrestrial insect biobots. In: 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka: IEEE, 2013. 1470–1473
- 97 Dirafzoon A, Bozkurt A, Lobaton E. A framework for mapping with biobotic insect networks: From local to global maps. *Robot Auton Syst*, 2017, 88: 79–96
- 98 Wu Z, Yang Y, Xia B, et al. Speech interaction with a rat. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3579–3584
- 99 Kong C, Shin J, Koh C S, et al. Optimization of medial forebrain bundle stimulation parameters for operant conditioning of rats. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2019, 97: 1–9
- 100 Wang Y, Lu M, Wu Z, et al. Visual cue-guided rat cyborg for automatic navigation. *IEEE Comput Intell Mag*, 2015, 10: 42–52

- 101 Yun S, Koh C S, Jeong J, et al. Remote-controlled fully implantable neural stimulator for freely moving small animal. [Electronics](#), 2019, 8: 706–722
- 102 Bozkurt A, Gilmour R F, Lal A. Balloon-assisted flight of radio-controlled insect biobots. [IEEE Trans Biomed Eng](#), 2009, 56: 2304–2307
- 103 Cao F, Zhang C, Choo H Y, et al. Insect-machine hybrid robot: Insect walking control by sequential electrical stimulation of leg muscles. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle: IEEE, 2015. 4576–4582
- 104 Doan T T V, Sato H. Insect-machine hybrid system: Remote radio control of a freely flying beetle (*Mercynorrhina torquata*). [J Vis Exp](#), 2016, 115: e54260
- 105 Cao F, Zhang C, Choo H Y, et al. Insect-computer hybrid legged robot with user-adjustable speed, step length and walking gait. [J R Soc Interface](#), 2016, 13: 20160060
- 106 Kosaka T, Shimizu T, Sato H, et al. Development of insect cyborgs with artificial wings. In: 2019 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS). Munich: IEEE, 2019. 216–221
- 107 Wang H, Li J, Cai L, et al. Flight control of robo-pigeon using a neural stimulation algorithm. [J Integr Neurosci](#), 2018, 17: 337–342
- 108 Wang H, Wu J, Fang K, et al. Application of robo-pigeon in ethological studies of bird flocks. [J Integr Neurosci](#), 2020, 19: 443–448
- 109 Lee D, Jeong S H, Yun S, et al. Totally implantable enzymatic biofuel cell and brain stimulator operating in bird through wireless communication. [Biosens Bioelectron](#), 2021, 171: 112746–112754
- 110 Wang Z L, Wang A C. On the origin of contact-electrification. [Mater Today](#), 2019, 30: 34–51

Summary for “动物机器人：研究基础、关键技术及发展预测”

## Animal robots: Research foundation, key technologies and development forecasts

Ke Fang, Hao Mei, Yi Song, Zhouyi Wang & Zhendong Dai\*

*Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

\* Corresponding author, E-mail: [zddai@nuaa.edu.cn](mailto:zddai@nuaa.edu.cn)

Animal robots are a class of bio-syncretic robots with the visual, auditory and tactile perception capabilities of animals. They make use of the animal's inherent motor system and act directly on specific brain regions (nucleus) or nervous systems of animal carriers through simulated neural signals to induce neuronal activity in the relevant functional brain regions in order to achieve motor behavior control of the carriers. This type of special robots has natural and significant advantages in many aspects such as locomotor stability, flexibility, environmental adaptability and energy supply for its locomotion, overcoming the difficulties of traditional bionic robots in terms of distribution drive, environmental perception and energy supply. It has significant theoretical and application values and is one of the important research directions in the development of robotics. The research was highly integrated with animal intelligence and machine intelligence, involving animal behavior, neuroscience, microelectromechanical technology, mechanics and communication technology, and is a frontier area of multidisciplinary integration. These robots are expected to perform tasks that are not possible for humans or traditional bionic robots. It can be used in the field of public security to perform tasks such as counter-terrorism, search and rescue, and temporal awareness. In the civilian field, it can be widely used in environmental surveys and detection of confined spaces. In scientific research, it can be used as a research tool to explore the structure of motor neural networks and unknown areas such as neural information interaction patterns, neuroplasticity and functional repair.

In this paper, we review the development of animal locomotor behavior regulation in the past 20 years, systematically sort out the relationship between the animal locomotor nervous system and the locomotor behavior regulation, and briefly summarize the neural mechanisms of animal locomotor regulation, the generation and transmission of animal locomotor regulation signals, the composition and characteristics of signals regulating animal locomotor behaviors, and microelectrode fabrication and implantation techniques. According to the motion scenarios of different animal robots (in water, on land and in the air), the stimulation modulation methods, the brain areas (nucleus) that are stimulated and the corresponding movement modulation behaviors of the animal robots studied are summarized. The important research results of several typical animal robots are categorized and reviewed in terms of methods for locomotor modulation behaviors, optimization of remote control stimulation systems, and research on automatic navigation systems, and the research problems and key technical challenges that need to be broken through for future animal robots are summarized and discussed. Based on this, to effectively play the role of animal robots and meet the needs of practical applications, the paper outlines a framework for future research on animal robots based on the bottlenecks in animal behavioral control technology and summarizes and analyzes four aspects of animal robots, including research on motor neural control mechanisms, miniaturization of stimulation and control systems, application of communication and navigation technologies, and design strategies for self-powered systems. The future development trends and application prospects of animal robots are predicted.

**animal locomotor modulation, animal robots, microstimulation systems, motor neuromodulation system**

doi: [10.1360/TB-2021-1314](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1314)