



昆虫机器混合系统: 从自由状态控制到自主智能调控

马倩^{1,2,3}, 王泓宇^{1,2,3}, 洪慧⁴, 潘纲^{2,3}, 郑能干^{1,2,3,5*}

1. 浙江大学求是高等研究院, 杭州 310027;

2. 浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027;

3. 脑机智能全国重点实验室, 杭州 310058;

4. 杭州电子科技大学射频电路与系统教育部重点实验室, 杭州 310018;

5. 人工智能省部共建协同创新中心(浙江大学), 杭州 310027

* 联系人, E-mail: zng@cs.zju.edu.cn

2023-02-27 收稿, 2023-07-14 修回, 2023-07-18 接受, 2023-07-28 网络版发表

国家重点研发计划(2020YFB1313501)、国家自然科学基金(T2293723, 61972347)、浙江省自然科学基金(LR19F020005)、浙江省重点研发计划(2022C01022, 2022C01119, 2021C03003)和中央高校基本业务费专项资金(226-2022-00051)资助

摘要 以昆虫作为载体, 采用光/电等外部调控手段对其运动行为进行干预或控制, 实现可静态预设或动态控制的昆虫机器混合系统, 也被称作昆虫机器人。这类微型动物机器人在运动稳定性、环境适应性、隐蔽性等方面拥有天然的优势, 在搜救侦查、科学研究等众多领域具有重要的应用价值。随着神经科学、微机电系统、人工智能等研究领域的快速发展, 昆虫机器混合系统研究正从自由状态控制发展至自主智能调控阶段。本文回顾了昆虫机器人在受控运动模式、可控动作类型、达成控制任务等方面的研究现状, 总结了昆虫机器混合系统研究框架, 评述了基于不同调控原理实现的典型昆虫机器混合系统研究进展。在此基础上, 分析了昆虫机器混合系统在神经调控机制、微型控制系统、刺激技术及方法、智能控制系统等研究中面临的困难、存在的问题, 预测了未来的发展趋势。

关键词 昆虫机器人, 昆虫机器混合系统, 神经调控原理, 刺激系统, 控制策略

昆虫机器混合系统是一类以昆虫作为生物载体, 通过轻量级昆虫机器接口(insect-machine interface, IMI)评估载体当前运动状态, 采用光、电、机械等外部调控技术控制其运动行为, 实现生物智能和机器智能融合的新型昆虫机器人^[1,2](图1(a))。相比于仅模仿昆虫外形及运动方式的微型机器人或仿生机器人^[3], 昆虫机器人具有以下5个方面的显著优势: (1) 系统结构相对简单。研制过程中仅需实现昆虫机器接口, 无须考虑机械结构、驱动及控制等系统的高难度设计问题。(2) 感知运动能力优越。得益于在漫长进化过程中形成的敏锐环境感知能力和模式可自然切换的运动性能,

昆虫机器人更易适应于复杂的外界环境。(3) 系统能耗优化。昆虫机器人避免了驱动能耗难题, 节省的能量能更好用于传感、通信、运动调控等任务。(4) 隐蔽性能优良。昆虫在自然界中种类繁多、数量庞大, 昆虫机器人的小巧体型和天然外形更具伪装优势, 任务执行过程中不易引起人类及其他动物的关注。(5) 研发成本降低。成熟的繁育技术降低了昆虫载体的成本, 可控的研发费用能增加研制阶段的测试次数, 提高昆虫机器人控制性能。昆虫机器人具备了生物载体的感知、运动能力, 以及微机电系统高精度性、可控性等特点, 能弥补微型机器人在运动速度、运动距离及有效载荷等

引用格式: 马倩, 王泓宇, 洪慧, 等. 昆虫机器混合系统: 从自由状态控制到自主智能调控. 科学通报, 2023, 68: 3077–3094

Ma Q, Wang H Y, Hong H, et al. Cyborg insects: From free-state control to autonomous intelligent regulation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 3077–3094, doi: [10.1360/TB-2023-0186](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0186)

方面的不足^[4,5],在工程应用和科学研究领域拥有重要的研究价值和意义.独特的飞行机制^[6]和爬行姿态使昆虫机器人在不同运动模式中表现出出色的稳定性,更易抵达大鼠^[7~10]、鸽子^[11~13]、家兔^[14]、鱼^[15~17]、壁虎^[18]等一般动物机器人无法覆盖的极端场景,适用于缝隙等微环境中的搜救、勘测任务.此外,作为基础研究的工具平台,基于昆虫机器接口所建立的脑与机器之间的信息传递和控制环路,可以方便地观测到个体行为和社会群体数据,为解决神经科学、昆虫学及仿生学等领域的重要科学问题提供新的研究思路与探索方法,比如揭示昆虫通讯、择偶等行为的神经机制.

昆虫拥有爬行、跳跃、飞行等多种运动模式,其感觉运动神经系统的组成及组织结构却相对简单,便于进行运动行为调控的刺激位点选择.电极植入术后恢复时间较短,可将实验准备周期缩短至1天以内.同时,昆虫的生活史短,饲养及取材过程相对容易,能为研究提供大量的样本个体.上述优点使得具有神经科学、机械工程、计算机科学等不同专业背景的科研人员能跨越学科限制,快速掌握昆虫运动行为调控的相关技术和方法,推动昆虫机器人研究的迅速发展.

自由状态昆虫机器人的运动行为控制,需要解决或克服如下研究问题和技术障碍:理解昆虫运动调控的神经原理,选择合适的刺激位点以及刺激方式,开发满足昆虫负载、体型需求的微型无线控制系统,实现自由状态下昆虫机器人在不同运动场景的运动行为控制.当前昆虫机器人研究正处于从人工手动控制过渡至自主智能调控的关键阶段:通过分析方向、加速度等外部运动状态和运动意图,解码感知-运动神经回路的内部动力学过程,生成控制指令,实现对昆虫机器人的自动控制.围绕昆虫机器混合系统研究现状,结合作者团队在蜜蜂/熊蜂机器人的研究经验,本文综述昆虫机器混合系统的研究现状,提出昆虫机器混合系统研究框架,总结昆虫机器人调控方法,分析当前研究面临的挑战以及未来的发展趋势.

1 昆虫机器混合系统研究现状

基于躲避机制,Shimoyama等人^[19]通过电刺激触角实现蟑螂机器人的爬行转向控制,探索刺激脉宽、脉冲个数与爬行距离、转向率间的定量关系.这一开创性工作为昆虫机器人研究提供了昆虫载体选取、刺激位点确定及刺激方式选用等方面的借鉴思路.随后,康奈尔大学、麻省理工学院、南洋理工大学、浙江大

学、北京理工大学等科研团队相继展开研究,以蟑螂(*Periplaneta americana*、*Madagascar hissing cockroach*、*Blaberus discoidalis*)、甲虫(*Cotinix texana*、*Mecynorrhina torquata*)、烟草天蛾(*Manduca sexta*)及蜜蜂(*Apis mellifera*、*Bombus terrestris*)等作为生物载体的昆虫机器人相继研制成功.

不同纲目的昆虫载体存在形态结构、运动模式等方面的明显差异,对昆虫机器人运动行为控制研究具有重要影响.作为最早被投入使用的昆虫,蟑螂体型相对较大,生命力顽强,负载能力优越.这些生理优势使得蟑螂机器人的电刺激耐受性好,行为控制稳定性高,实现了在自由状态下的转向^[20]及分级调控^[21],陆续完成了预设轨迹行走^[22,23]、声音定位^[24]、未知环境全局探索^[25]及目的地导航^[26]等任务测试,有望率先应用于真实环境的实际任务.烟草天蛾翅展可达10 cm,负载重量约1 g,拥有强健肌肉,飞行能力优越,是最早完成自由状态下飞行转向控制的昆虫载体^[27].甲虫具有出众的负载能力和运动性能,目前已实现甲虫机器人固定模式飞行启动^[28~31]、爬行模式^[32~35]、飞行模式转向^[36~39]等多种动作的控制.蜜蜂作为新兴模式生物,有着丰富的社会行为、优越的飞行能力等优点,已被广泛用于神经科学和行为学^[40,41]等研究.它的体型小巧,体重仅为甲虫的1/30,基于精细手术操作和电极植入技术,蜜蜂机器人同样已实现固定状态的飞行启停^[42,43]以及自由状态下的转向控制.除上述昆虫外,拥有绝佳弹跳力的蝗虫也在近年被用于研制跳跃昆虫机器人^[44],蜻蜓^[45]则有望凭借其出色的航行能力成为飞行昆虫机器人的新载体.

经过近20年的发展和积累(图1(b)),研制成功一系列典型的昆虫机器混合智能系统,取得了以下三个方面的突破性成果:(1)受控运动模式约束减少,形式多样.得益于刺激系统在轻量化、微型化、无线化等方面的突破,昆虫机器人的运动模式方可从固定状态转至自由状态,覆盖地面、空中等运动场景.(2)可控动作类型不断增多,日渐丰富.随着对昆虫神经系统的深入理解,可选用的昆虫载体类型逐渐丰富,运动行为的调控位点包含外周神经系统的传感器、肌肉以及中枢神经系统的脑、腹神经索,昆虫机器人的可控动作也从飞行启停、转向增加至加速、跳跃等.(3)控制任务难度逐步提升,自主智能.随着人工智能算法的应用深入,对于昆虫运动的行为分析和智能控制能力增强,可完成的控制任务难度从最初单一动作的手动控制、行为

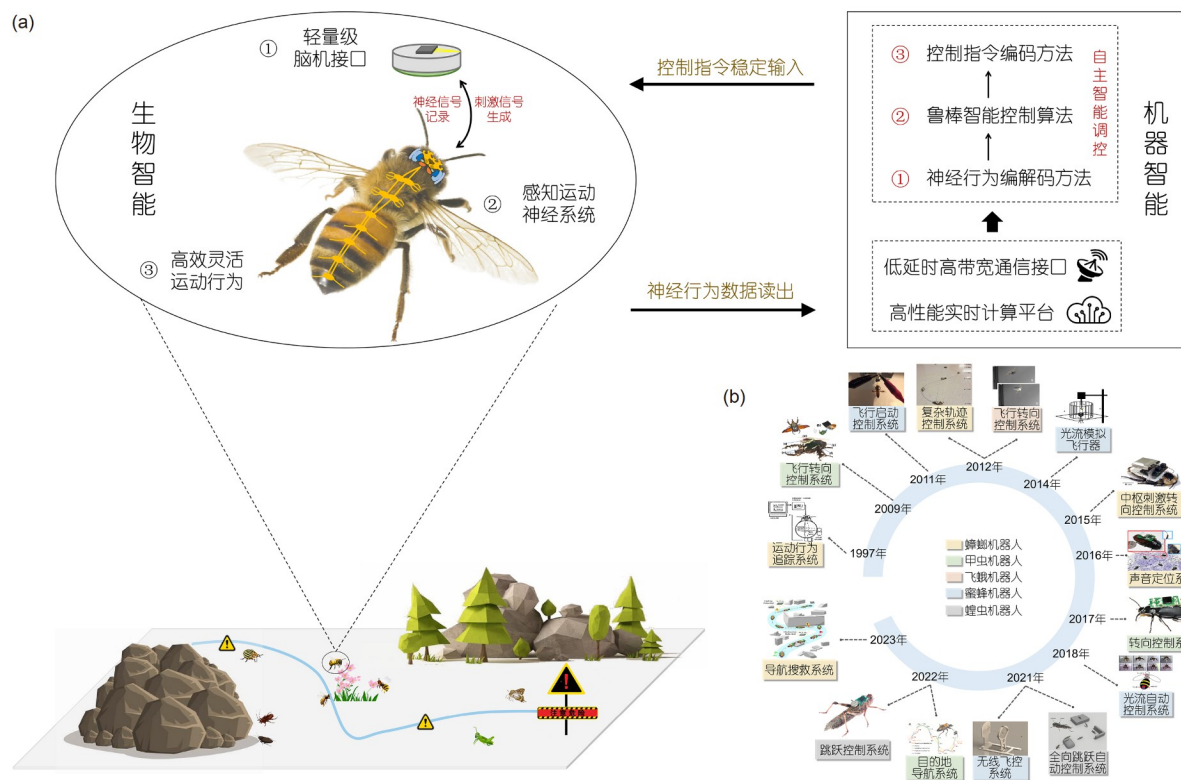


图 1 (网络版彩色)昆虫机器混合系统概念及其研究进展。(a) 昆虫机器混合系统概念; (b) 代表性研究工作进展

Figure 1 (Color online) Concept and research progress of the insect-machine hybrid system. (a) The concept of the insect-machine hybrid system; (b) the progress of representative research work

序列的自动控制逐步发展为自主智能控制。

昆虫机器人研究进展是多学科技术快速发展, 共同推动实现的结果。脑科学、昆虫学等基础学科领域的进展, 揭示了昆虫神经系统的结构和功能, 为刺激位点选择提供了充分的理论依据。微电子技术及微机电控制系统等工程研究的进步, 则为运动模式、行为类型的多样化以及远程无线控制提供了技术支持。与此同时, 在混合智能系统上的不断创新, 使得对昆虫机器人的精细行为分析以及自主智能调控成为可能。

2 昆虫机器混合系统研究框架

昆虫机器混合系统研究框架主要由调控原理、刺激方式、刺激系统以及控制策略4个部分构成(图2)。智能控制策略通过环境和个体感知获取环境状态及昆虫个体的运动状态信息, 采用控制算法对昆虫当前状态和目标任务进行评估, 自动生成并触发控制指令, 由微型刺激系统将接收到的控制指令编码生成特定形式的刺激信号, 刺激调控运动行为的对应身体位点, 实现对昆虫机器人的智能控制。

2.1 运动调控的神经原理

实现昆虫机器混合系统的运动行为调控需理解昆虫感知觉运动产生的神经原理。昆虫感知觉运动回路由接收转化外部信息的感觉器、整合信息做出决策的脑和腹神经索、产生行为的效应器等三个主要部分组成。依据运动行为调控的神经原理选择合适的刺激位点, 可为实现昆虫机器人稳定、可靠的行为控制提供强有力的理论基础。

采用神经解剖学、组织学及神经元示踪标记等技术和方法, 可重建昆虫全脑信息^[46], 用于呈现昆虫感知觉回路的组成结构(图3)。昆虫的神经系统分为中枢神经系统和外周神经系统。外周神经系统主要由感觉神经元、运动神经元以及与之连接的感觉器和效应器组成, 中枢神经系统则由脑、腹神经索以及传递神经冲动的联系神经元组成。分布于昆虫周身的不同感器率先感知外部环境变化, 并根据刺激信息类型、表征差异分别进行接收。如复眼、单眼等视觉感器接收来自不同方向、波长的光信息^[47~49], 位于触角的毛形感

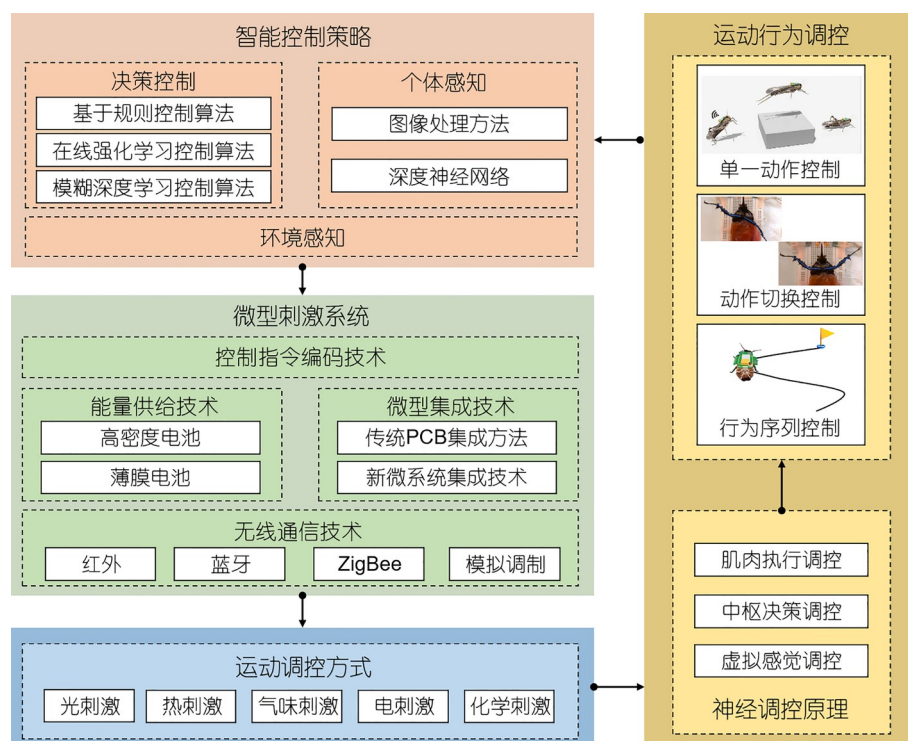


图2 (网络版彩色)昆虫机器混合系统研究框架

Figure 2 (Color online) Research framework for the insect-machine hybrid system

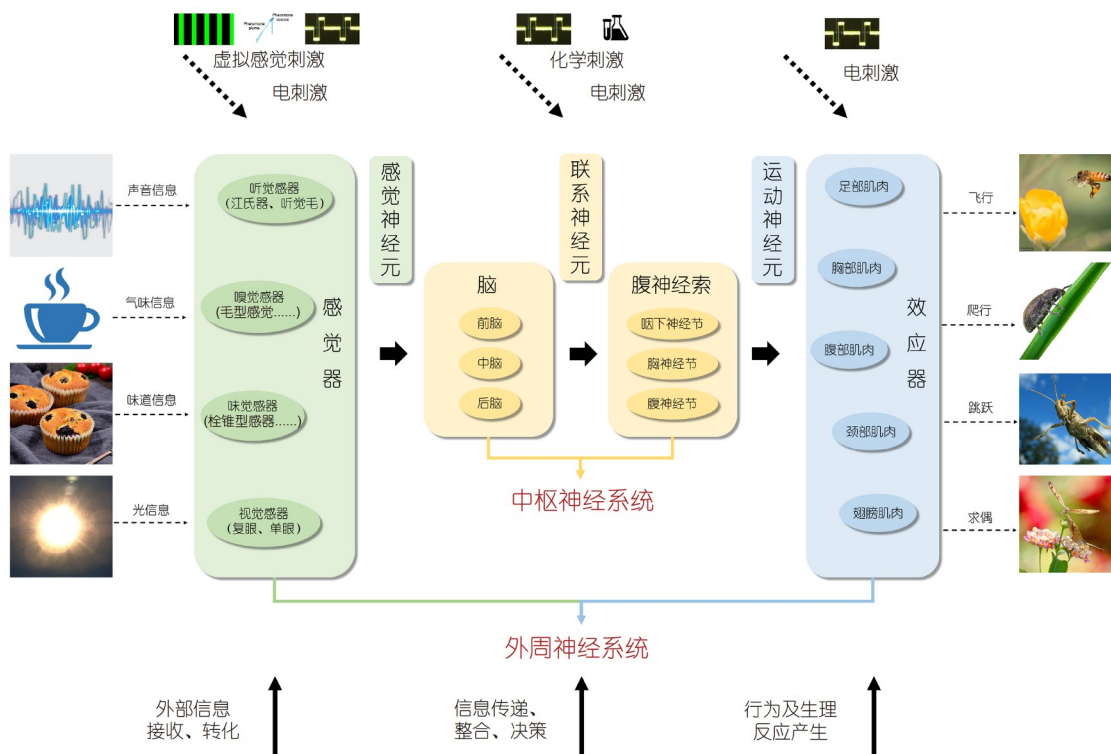


图3 (网络版彩色)昆虫感知运动回路的组成结构

Figure 3 (Color online) The compositional structure of the sensorimotor circuits in insects

器、锥形感器等嗅觉感器则负责气味分子^[50]。感器中的感觉神经元将外界信息转化为能在神经系统传导的神经电信号,将其投射至中枢神经系统。神经信号随之进入专属的感觉通路,在初级中枢处经预加工处理,减弱或剔除不必要信息,放大特定的有效信号^[51]。处理后的神经信号继续在不同脑区间层层传递、处理,遵循信息特征差异(如光的波长、方向)进入不同的并行通路,在高级感觉中枢整合,由运动行为决策中枢做出最终指令。决策指令通过联系神经元进一步输出至腹神经索,此处神经节分别控制昆虫身体不同部位的运动,由运动神经元将指令传递至效应器(肌肉),最终引起翅膀、足等的运动或其他生理反应。

昆虫机器人研究前期的运动行为调控主要基于对外周神经系统功能的了解,以感器和肌肉调控为主。随着信息在中枢神经系统传递过程的清晰化,以中枢神经系统调控的昆虫机器混合系统得以实现。鉴于生理结构(前脑)优势,昆虫嗅觉、视觉系统的研究更为成熟完整,相关脑区常被选作刺激位点,用于昆虫机器人行为调控。昆虫嗅觉认知通过触角感器、触角叶(antennal lobes, ALs)、蘑菇体(mushroom body, MB)等脑内多层信号处理结构实现^[52,53]。实验结果证明,电刺激触角可实现对蟑螂^[54]、甲虫^[55]和蜜蜂^[56]的转向控制以及对天蛾的飞行俯仰角度调控^[27]。触角感器感知到外界环境中的气味分子后,通过嗅觉感受神经元将其以动作电位的形式传至嗅觉初级中枢——触角叶,完成嗅觉信息的初步分类^[57]。研究表明,该位点可用于调控天蛾的飞行启动和停止^[58-60]。初步处理后的气味信息经投射神经元(projection neurons, PNs)形成两条并行的嗅觉通路^[61-65]:一条由触角叶背侧PNs形成的外侧触角叶束(lateral antennal lobe tracts, l-ALTs)先投射至外侧角(lateral horn, LH)再到达蘑菇体;另一条则由腹侧PNs的内侧触角叶束(medial antennal lobe tracts, m-ALTs)先传递至蘑菇体再到外侧角。两条嗅觉通路有着独立的投射路径,因外侧角和蘑菇体间的信息交互存在密切联系,它们根据气味特性分别参与、承担嗅觉信息处理的不同任务。蘑菇体作为高级感觉中枢和行为决定中枢,处理、整合来自周身感器接收的复杂信息,其功能还与嗅觉、视觉关联性学习与记忆等高级行为密切相关^[66,67]。目前尚未报道通过嗅觉中、高级中枢调控实现的昆虫机器人。

相比于嗅觉系统,视觉系统结构更为复杂,参与脑区更多,包括复眼(compound eyes)、视叶(optic lobe)、

侧前脑(lateral protocerebrum)、蘑菇体和中心复合体(central complex)等^[68]。视觉通路从复眼视网膜(retina)开始,在此将来自外界的视觉信息转换成电生理信号,常被作为非侵入式光刺激行为调控的刺激位点。视觉信息随后被传递至视叶。视叶作为传递和处理视觉信息的关键脑区,组织面积较大容易辨认,由薄层(lamina)、视髓质(medulla)和视小叶(lobula)组成。实验证实,刺激视叶可诱导甲虫^[29,30]和蜜蜂^[42]振翅行为的启动与停止。经视觉初级中枢处理后的信息除沿着脑区组成结构传递至侧前脑的主要通路外,小部分神经信号被直接投射至高级中枢。侧前脑作为多种感觉通向高级中枢的“中转站”,能根据视觉信息的颜色、方向等特点对其进行分类处理^[69,70]。通过腹侧结节间束(vetral inter-tubercle tract, vITT)和内侧结节间束(medial inter-tubercle tract, mITT)实现左右半球的信息互通,或经结节腹侧束(tubercle-accessory tract, TALT)传至同侧中心复合体,完成最终的整合、决策。侧前脑前视结节脑区经实验证明同样能调控熊蜂振翅行为启动及停止^[71]。中心复合体与蘑菇体间存在视觉信息的交互,整合后将决策传输至腹神经索。电刺激蘑菇体能以高成功率诱导蜜蜂产生振翅行为^[43]。

尽管以腹神经索的胸、腹神经节作为刺激位点的运动行为控制在蟑螂^[20]、天蛾^[72]研究中得到了成功验证,但运动决策如何从高级中枢(脑)传递至腹神经索形成特定生理和行为反应的过程仍不明确。肌肉作为运动的执行功能单元,刺激肌肉可以产生稳定性较高的运动行为,多用于甲虫机器人研究。神经元体积小,紧密排列,难以分离,神经组织刺激对开脑手术、电极植入等操作的精度要求较高,难以避免电极侵入、移位等带来的损伤。因此,目前昆虫机器人运动行为调控多依赖于刺激感器和肌肉实现,还鲜有以高级中枢为位点的运动行为调控研究。

2.2 运动调控的刺激方式

调控昆虫机器混合系统的运动行为可采用不同的刺激技术。根据神经调控原理的刺激位点在结构位置和功能作用等方面的差异,目前已建立包括光、电、化学在内的多种刺激方式,在特异性、安全性、可操作性等方面各有优越性和局限性。

以刺激实施的具体部位作为分类依据,可将刺激方式分为非侵入式和侵入式两大类(表1)。非侵入式刺激方式无须对昆虫进行复杂的手术操作,实施方便,损

表1 昆虫运动行为调控的刺激方式比较

Table 1 Comparison of stimulation methods for animal motor behavior regulation

刺激方式	组成方式	植入方式	特异性	特点
光刺激	光流信号	非侵入式	中	无损伤、抗干扰能力差
热刺激	温度	非侵入式	低	不可逆损伤
气味刺激	化学激素	非侵入式	中	无损伤、抗干扰能力差
电刺激	电信号	侵入式	低	可行性程度高、抗干扰能力强
化学刺激	化学激素	侵入式	中	低损伤

伤程度相对较低,但对复杂或高度不确定的环境因素敏感,需人工排除实验干扰.刺激信号需与受刺激传感器的功能相匹配,可分为光刺激^[73]、热刺激^[74]、气味刺激^[75]等.基于昆虫视觉系统的结构和特性,光刺激配置运动方向、波长、速度、形状可变的光流作为刺激信号,刺激复眼或单眼,能诱导昆虫产生头部或腹部的转向行为^[76,77].该刺激方式易受环境光源所干扰,存在降低昆虫对刺激光的敏感度、延长行为产生的响应时间等情况,适用于特定平台场景,难以直接迁移至未知开放环境.热刺激直接采用加热装置刺激昆虫传感器,诱导其产生行为反应,这种通过快速加热的刺激方式可能会对传感器造成不可逆损伤,需要进一步优化刺激参数.气味刺激受启发于蛾类敏锐的嗅觉能力,通过模拟雌性的信息素诱导雄性蛾类,控制其产生追踪行为^[78,79].

侵入式刺激方式通常需对昆虫脑、肌肉、腹部等进行手术,将外部介质引入昆虫体内进行相应的刺激,主要包括化学刺激^[80]、电刺激^[19].化学刺激通过向昆虫体内注射生物胺,利用生物胺作为神经递质参与运动行为调节的原理^[81],以兴奋或抑制运动行为进行调控.电刺激技术具有高操作可行性和强抗干扰能力,适用于实践应用,目前已作为相对成熟的调控技术被广泛用于昆虫机器人研究.为降低昆虫对刺激电极介入的排异,令昆虫机器人具备良好的运动性能和生存寿命,结合昆虫生长发育周期^[82]提出的变态发育蛹期植入技术^[83,84]能提高组织和电极间的生物融合程度,引入高生物兼容性的柔性电极^[85-87]能减少电极移位.虽然采用脑区定位技术^[43]能进一步缓解电极植入位点的偏离问题,电刺激方式面临电极周围神经元无差别激活的缺陷,导致行为反应一致性较低.光遗传技术特异性强,时空分辨率高,配置特定波长和强度的光可激活特定类型神经元,有助于提高行为反应的一致性和稳定性.目前这种刺激技术多见于啮齿类、灵长类等模式动物^[88,89]的运动行为控制研究,受限于光纤和转化

病毒与载体的匹配问题,还未在昆虫机器人上得到应用.

2.3 运动调控的刺激系统

研制自由状态运动行为可控的昆虫机器混合系统,需要开发刺激参数可配置的控制系统(刺激背包).轻量化、小尺寸、低功耗是设计昆虫机器人刺激背包的重要约束.轻量化、小尺寸用于适配昆虫载体的负载能力和体型,避免影响正常的运动行为.优化刺激系统功耗,有助于进一步降低系统重量,延长系统工作时间.此外,这类刺激系统一般具备无线通信能力,用于自由状态下昆虫机器人的运动行为调控.

昆虫刺激系统主要由控制芯片、能量供给模块、无线通信模块、刺激输出模块及其他分立元件组成.目前已开发的无线刺激背包总结为表2,适配不同昆虫载体和控制任务.在轻量化设计策略方面,通常从优化系统各组件的总量入手,当前最重要的考虑是降低能量供给模块的重量.现有刺激背包电源多采用可重复充电的高密度电池,优点在于行为调控实验可以不受应用场景空间大小、昆虫具体位置和周围环境干扰等限制,但容易导致背包的整体重量偏大.以爬行方式运动调控为主的蟑螂为例,个体较大,体宽体长分别约为2和6 cm,体重约为6 g,能承受的重量远超多数昆虫,采用电池(120 mAh)重量2.5 g^[26].为满足飞行类昆虫的低负载需求,甲虫刺激背包通过更换小容量电池(8.5~10 mAh),将背包整体重量减轻至1.5~2 g,蜜蜂刺激背包则采用新型柔性印刷纸电池^[90]将供电模块重量进一步约束至50 mg以下.

在小尺寸设计策略方面,考虑到传统印刷电路板(printed circuit board, PCB)集成制造方法无法有效缩小背包体积,微型电子元件及微系统集成技术(例如PCB集成天线和微组装)已被应用于刺激背包系统的开发^[93].不同于额外集成传感器用于位置数据获取的蟑

表 2 昆虫机器人的无线刺激背包^{a)}

Table 2 Wireless stimulation system for the cyborg insects

昆虫类型	重量(mg)	功耗(mW)	尺寸(mm)	无线通信方式	文献
蜜蜂	190/100	—	5.6×4.6×0.15	红外通信	[90]
甲虫	1331	~77	16×13	射频接收机	[36]
	1250	0.2	16×16	射频接收机	[91]
	450	3	16×6	红外通信	[55]
	700	—	18×15	ZigBee	[92]
蟑螂	3000	—	16.5	ZigBee	[20]
	5500	11.55	40×15	蓝牙	[26]
天蛾	650	0.75	6.8×10.2	模拟调制	[58]
蝗虫	950	7.7	12×7×5	蓝牙	[44]

a) “—”表示无相关数据

螂及甲虫刺激背包, 其他昆虫的背包采用减少元器件数量的方式缩小整体尺寸, 基本仅具有刺激功能。如蝗虫^[44]刺激背包直接采用集成蓝牙通信功能的小巧尺寸(4 mm×4 mm)控制芯片, 以缩小背包规格。

在低功耗设计策略方面, 主要通过选用功耗优化的器件、设置系统工作模式等方法实现。首先, 使用功耗在mW级别的传感器、红外摄像头等感知器件。其次, 无线通信技术从最早的模拟调制(analog modulation, AM)方式(第一代飞蛾无线刺激器)^[58]发展到现在的蓝牙、ZigBee(紫蜂)等技术, 已在有效地提高通信质量和系统抗干扰能力的同时, 降低数据传输功耗。早期的射频通信^[36]以点对点的形式进行信号传输, 通信距离长, 但在功耗和集成度方面存在不足; 蓝牙通信模块集成度高、功耗较低及通信速率快, 但在通信范围上难以满足长远距离的研究需求; ZigBee技术^[20]优势体现在功耗低、网络容量大、安全性能高等方面, 可通过组网技术实现群组调控, 但目前模块集成度仍偏低, 容易造成系统重量偏高。红外光通信技术抗干扰能力强, 功耗低, 须以点对点形式定向传输信号, 传输距离短, 穿透性较弱, 需搭建特定实验场景, 适用于大麦虫^[55]和蜜蜂等小体型昆虫。此外, 需在系统层面整体优化背包功耗, 设定低功耗工作模式。大麦虫刺激背包通过设置激活(3 mW)和睡眠(0.6 μ W)的循环模式以减少背包在休眠时期的额外功耗, 甲虫背包则配置不同刺激输出用于神经组织(~500 μ W)、肌肉(~20 μ W)等刺激位点以节约功耗。

受到功耗、通信距离和系统重量等限制, 当前昆虫无线刺激系统多适用于实验室条件研究, 还未能实现户外场景应用。

2.4 运动调控的控制策略

构建运动行为稳定可控的昆虫机器混合系统, 需要研究鲁棒的自主控制策略。尽管通过人工手动方式已能实现较为稳定的控制效果, 但该方式对操作人员的实验经验和注意力有较高的要求, 难以满足难度和复杂程度增加的实际控制任务, 将智能控制算法应用于昆虫机器混合系统实现自主智能控制是当前研究的热点。

昆虫运动行为的自主智能控制策略, 首先解决环境及个体状态的实时感知问题, 随后评估当前状态和规划控制任务, 最终自动生成最优控制指令。通常, 采用各种传感器进行环境与个体感知数据的获取, 并获得环境障碍、路径信息及昆虫运动状态等实时信息。常规由摄像头获取的运动行为数据, 需经过处理分析后才能获得昆虫的实时运动状态。传统图像处理方法通过昆虫的颜色、纹理等特征来识别其当前行为, 如粒子滤波算法已被用于熊蜂腹部偏转角度的检测^[94], 但该方法易受场景光照、角度等因素变化带来的干扰, 导致计算误差较大。商用Vicon动作捕捉系统^[32]可通过识别昆虫体节上的反光标记点直接得到关键点3D坐标位置, 但标记点掉落易造成数据缺失, 系统成本也相对较高。为了获得更为准确的运动状态信息, 避免繁琐的前期准备工作(人工排除干扰、贴标记点等), 深度神经网络被用于昆虫姿态点估计, 相较于传统图像处理方法在精度和速度性能上有较大的提升, 能方便地迁移至不同实验场景。基于堆叠沙漏网络和特征金字塔网络的熊蜂机器人关键点检测方法, 能在不同实验场景下获得较好的关键点检测效果^[95]。梯形网络^[96]可进一

步提升检测精度和计算速度,较好地完成熊蜂关键点计算任务.除图像传感器外,集成于微型刺激系统上的惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)可直接获得昆虫三轴姿态角度和加速度等运动状态数据^[97],但传感器重量为刺激系统研制带来额外开销,多用于蟑螂等大负载昆虫.

现阶段昆虫机器人自动控制研究中,控制任务通常在实验前预先设定和规划.若能采用智能控制算法,根据当前环境、个体感知做出较为优化的控制决策,便可实现对昆虫机器人运动行为的自主智能调控.当前使用的控制算法包括基于规则的控制算法、在线强化学习控制算法以及模糊深度学习控制算法.基于规则控制算法^[98]在甲虫、蟑螂机器人中得到广泛应用,需根据人工经验来设定特定规则,遵循不同实验场景的规则生成相应的控制指令,控制精度有待进一步改进.机器学习控制算法通常需要大量实验数据训练模型,在一些难以设置规则的复杂场景中更具优势,能够提升控制效果.在线强化学习控制算法无须对环境进行建模,通过与环境的不断交互可以学习最优控制策略,算法性能已在光流熊蜂机器人行为控制研究中得到验证,能在短时间内实现对熊蜂腹部偏转控制^[99].模糊深度学习控制算法最近才被用于昆虫机器人研究,在飞蛾飞行控制参数优化方面取得了较好性能^[100].

昆虫个体差异、行为反应不确定等特性,使得昆虫机器人的自主智能控制问题值得深入研究,存在较大的探索空间.在实验室环境中自动控制昆虫机器人完成简单的任务已取得较好的结果,当前难点主要是精确的行为分析方法和鲁棒的控制算法,但距离实际应用还有较长的距离,有待进一步研究.

3 典型昆虫机器混合系统

各学科领域技术的快速发展以及交叉融合,推动昆虫机器混合系统研究取得了突破性进展,在蟑螂、甲虫、飞蛾、蜜蜂等载体上实现了多种受控模式下的动作行为调控(表3).本节基于感觉运动控制回路的调控原理,对若干个典型昆虫机器人研究成果进行分类评述.

3.1 基于虚拟感觉刺激的运动调控

通过刺激昆虫感觉系统的感知器官以模拟不同感觉信息输入,实现基于虚拟感觉刺激的运动调控.根据感觉类型主要分为虚拟视觉、虚拟嗅觉以及虚拟触觉

3类,可采用光刺激、气味刺激、电刺激等多种调控方式,具有高稳定性、强可靠性等特点,已被用于熊蜂、蟑螂等昆虫机器人自主智能控制系统构建.蟑螂、蝗虫等爬行类昆虫拥有灵巧的运动结构和优越的运动能力,研制的昆虫机器混合系统在狭小空间搜索、危险地形幸存者搜救等方面有着潜在的应用价值.

虚拟视觉运动调控通过配置昆虫视觉系统敏感的光信号刺激复眼实现,在熊蜂和飞蛾机器人研究中取得了进展.基于熊蜂的复眼结构和光敏感度特性,浙江大学巩凡^[108]搭建了最大刷新频率5.7 kHz,光条运动速度为4.8 m/s的熊蜂模拟飞行器,采用旋转的单一黄绿色亮条纹作为光刺激,成功诱导固定状态熊蜂产生与光流运动方向相同的腹部转向,为构建熊蜂机器人飞行控制系统提供了安全稳定的行为刺激诱导范式.针对该实验范式,Zheng等人^[105,106]提出的基于转换回报函数的Sarsa控制算法,具有精度高、收敛快的优点,能对目标任务进行最优参数自动选择,控制熊蜂摆腹在最多8步内趋于目标模式并保持稳定.齐炎等人^[99]在自由度更强的扭矩仪平台上开发了虚拟环境熊蜂偏航避障演示系统,实验证明了强化学习算法对光流诱导偏航控制的优越性,为研制光流熊蜂机器人智能控制系统提供了必要的实验平台和偏航行为控制技术.Yang等人^[100]采用紫外线调控飞蛾行为,提出了基于模糊深度学习的控制方法,将飞蛾机器人飞行控制的成功率提升至83%.

虚拟嗅觉运动调控主要通过气味刺激昆虫嗅觉系统触角实现.东京大学Kanzaki等人^[78,79]利用雄性蛾类对同类雌性信息素的特殊追踪能力(zig zagging pattern),提出了一种全新的虚拟嗅觉调控方法,通过模拟信息素诱导天蛾机器混合系统产生相应的转向,准确、灵活地完成气味源定位任务.

虚拟触觉运动调控通常以电刺激昆虫触角或尾须实现,目前在蟑螂、蝗虫和甲虫机器人中取得了稳定的控制效果.蟑螂主要通过触角和尾须精确感知外界各种波动,触角细毛可以感知如空气的振动和扰动,温度、湿度的瞬间波动等极微弱的信号,可用于短程探测,而尾须则用于远程探测.Latif和Bozkurt^[22]在蟑螂背部负载重约4 g的微型无线刺激系统,通过电刺激触角控制蟑螂机器人完成S形路线的行走任务,证明昆虫机器人具备完成具体控制任务的能力.针对危险搜索、幸存者救援等实际应用任务,Latif等人^[24]研制了一款昆虫机器接口系统.该系统具备ZigBee通信能力,

表 3 不同种类昆虫机器人研究方法与行为调控

Table 3 Control methods and behavior regulation of different cyborg insects

昆虫载体	刺激方式	刺激位点	刺激参数	调控行为	文献
甲虫(<i>Cotinis texana</i> 、 <i>Mecynorhina torquata</i> 、 <i>Zophobas morio</i>)	电	视叶	1.6 V, 40~100 Hz	振翅启动、停止/转向	[29]
	电	前上侧片肌肉	2 V, 100 Hz	飞行对侧转向	[36]
	电	前背板/基节/腿节肌肉	1.5 V, 100 Hz, 1 ms	前足伸缩、升降、伸曲	[32]
	电	翅下肌	3 V, 50 Hz, 3 ms	飞行速度调整(减速)	[91,101]
	电	第三腋生肌	3.5 V, 3 ms	飞行同侧转向	[38]
	电	背纵肌/背腹肌	3 V, 100 Hz, 10%, 1 s	飞行振翅启动	[31]
	电	前背板/基节肌肉	1.5 V, 1 ms	步伐频率、行走速度调控	[35]
	电	触角肌肉	2 V, 50 Hz, 2 ms, 2 s	爬行转向、倒退、停止	[55]
	电	前上侧片/第三腋生肌	1.6 V, 90 Hz, 20%, 1 s	飞行高度、速度调控	[102]
	电	前足/中足/后足肌肉	3 V, 100 Hz, 50%, 0.5 s	飞行振翅调控	[103]
	电	触角/翅基	2.5 V, 2 ms, 400 ms 2.5 V, 20 Hz, 200 ms, 50%	爬行转向、加速	[98]
蟑螂(<i>Periplaneta americana</i> 、 <i>Gromphadorhina portentosa</i> 、 <i>Blaberus discoidalis</i> 、 <i>Madagascar hissing cockroach</i>)	电	触角	100 μ A, 50%, 100, 100 ms	爬行对侧转向	[19]
	电	触角/尾须基部	54~170 μ A, 40~105 Hz, 20%	爬行对侧转向/速度调控	[54]
	电	触角鞭节/尾须	2 V, 50 Hz, 50%, 1.5 s 150 μ A, 50 Hz, 50%, 1.5 s	爬行对侧转向	[21]
	电	前胸神经节	2.5 V, 20 Hz	爬行对侧转向	[20]
	电	尾须	6~8 V, 40 Hz, 50%	爬行对侧转向	[26]
	电	触角鞭节	3 V DC	爬行对侧转向	[22]
蝗虫(<i>Locusta migratoria</i> 、 <i>Schistocerca americana</i> 、 <i>Locusta migratoria manilensis</i>)	电	后足肌肉	2 V, 80/100 Hz, 2 ms	跳跃控制	[44]
	光	单眼	无相关数据	头部运动	[73,74]
	电	触角/尾须	3.2 V, 60 Hz, 2 ms, 1 s 400 ms	转向、跳跃控制	[104]
飞蛾(<i>Manduca sexta</i>)	电	腹神经节	2.5 V, 200 Hz, 100, 1 s	飞行同侧转向	[72]
	电	触角肌肉	3 V, 250 Hz, 50%, 200 ms	飞行俯仰角调控	[27]
	电	触角叶/颈部肌肉	3.5 V, 20/50 Hz, 50% 3.5 V, 20 Hz, 50%	飞行启动、停止/同侧转向	[58~60]
蜜蜂(<i>Apis mellifera</i> 、 <i>Bombus terrestris</i>)	光	复眼	2.05~4. 88 rad/s	腹部同侧转向	[105,106]
	电	视叶	4 V, 40 Hz, 40%, 30 N/>6 V	飞行振翅启动、停止	[42]
	电	蘑菇体	30 μ A, 200 Hz, 40%, 0.3 s	振翅启动	[43]
	电	前视结节	1~5 V, 100 Hz, 40%, 1 s/>6 V	飞行振翅启动、停止	[71]
	电	触角	500/1000 mV, 100 Hz	转向控制	[56]
	电	视叶	3 V, 100 Hz, 40%, 1 s	转向控制	[107]

集成低功率麦克风阵列,对声源进行定位,并向触角导入电刺激控制指令实现自主导航,诱导蟑螂机器人到达声源终点。Li等人^[109]开发了一个全链无线脑对脑系统(brain-to-brain system, BTBS),采用基于稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)的脑机接口识别人类运动意图,通过蓝牙传输至背载微型刺激器的蟑螂机器人,向其触角触发特定电脉冲序

列,实现蟑螂机器人沿S形轨道爬行的自动控制,验证了虚拟触觉调控的稳定性,为自动驾驶提供了新思路。Tran-Ngoc等人^[26]开发了一款集成微电刺激、定位导航、红外拍摄等功能的微型控制系统,提出了一种利用IMU的启发式导航算法,构建了基于尾须调控的蟑螂机器人混合系统,在灾难模拟环境中成功控制蟑螂机器人完成目的地自动驾驶、未知障碍地形幸存者探测

等测试任务,推动昆虫机器人向实际应用迈出了关键的一步。

Liu等人^[104]在蝗虫触角和尾须同时植入刺激电极,负载无线微型昆虫机器接口,构建了总重约为2.7 g的蝗虫机器人。该机器人能实现转向、跳跃、协同定向跳跃等运动行为的控制,完成高度达162 mm的全向跳跃自动调控,适用于不平坦地形的环境监测、搜救任务。Vo-Doan等人^[55]开发了一款低功耗微型红外无线刺激背包,构建了成本较低、结构简单的新型甲虫机器人,向触角触发不同形式的电刺激,可实现对其转向、后退及停止行为的控制。通过配置刺激频率等参数,可精细调控甲虫机器人的转向角度和后退速度。基于这一研究工作,Nguyen等人^[98]采用翅基和触角电刺激实现加速和转向行为的控制策略,提出了结合推力控制器和比例控制器的反馈控制系统,可提高甲虫机器人路径追踪自动导航的准确性和可靠性。

3.2 基于肌肉刺激的运动调控

通过电刺激昆虫各部分肌肉群实现运动调控,具有较高的控制稳定性,多被用于甲虫、蝗虫等肌肉发达的昆虫载体。目前已成功研制爬行、飞行可控的甲虫机器人和跳跃可控的蝗虫机器人。除地面应用外,凭借机动性高、活动范围广、隐蔽性好等明显优势,甲虫机器人可应用于高空侦察、监测等,并可通过行为调控结果验证肌肉功能作用,推动昆虫学研究。

鉴于独特的异步肌结构,微弱的低频刺激信号即可诱导甲虫产生或中止相应的运动行为。Sato^[30]开发了总重仅为1.3 g的轻量级刺激背包,采用射频无线技术,构建了首款甲虫机器人飞行系统,通过电刺激前上侧片肌肉实现了飞行转向行为的远程控制,有望将昆虫作为新型飞行器的载体。Sato等人^[38]以巨型花金甲的第三腋生肌作为调控位点,结合总重为1.2 g的射频无线刺激背包,研制了甲虫机器人系统,通过分级调控实验,验证了第三腋生肌在同侧转向行为中的关键作用,证实了昆虫机器人在基础学科领域的重要研究价值。该团队^[101,110]还通过实验发现,不对称电刺激翅下肌可引起甲虫机器人对侧约20°的偏航行为,对称电刺激则可加大俯仰角度,从而降低飞行速度,产生类似制动的运动控制效果。Choo等人^[31]提出了一种基于背纵肌刺激的飞行振翅调控策略。该策略具有低损伤、高可靠的优点,能诱导甲虫机器人产生启动时间<1 s、成功率超过90%的飞行行为,且飞行能力不受影响。为

解决甲虫机器人飞行的水平调控问题,Li等人^[111]以第三腋生肌和前上侧片肌肉作为电极植入位点,结合微型无线刺激背包,研制了转向可控的甲虫机器人飞行系统,提出比例导数反馈控制器,实现甲虫机器人飞行轨迹的自动导航,通过优化刺激时长和间隔,进一步提升了方向控制性能。在此基础上,Li等人^[102]和Vo-Doan等人^[112]通过实验证明,比例导数反馈控制器可同样用于甲虫机器人飞行高度的自动控制,根据当前飞行高度与预设值高度的偏差自动生成控制指令,电刺激双侧前上侧片或第三腋生肌以实现甲虫机器人上升、下降行为的诱导控制。

甲虫的前背板Protraction、Retraction肌肉群,足部基节Levation、Depression肌肉群,腿节Extension、Flexion肌肉群,分别控制基节的前伸和缩回、腿节的抬起和放下及胫节的伸展和弯曲。基于这一肌肉调控原理,甲虫机器人的爬行运动控制取得了诸多亮点成果。根据足的角位移与电刺激频率间成比例、非线性、时变的对应关系,Cao等人^[32,34]提出了一种可调参数比例控制器的多隶属度模糊控制系统,成功控制固定状态甲虫机器人的前足沿着预设路径运动。针对甲虫自由行走时的足部运动序列,团队提出了肌肉群协同电刺激调控方法,控制甲虫机器人完成Tripod和Galloping两种步态的行走;通过调控刺激序列的持续时间,构建了行走速度可控的甲虫机器人^[35,103]。这些与足部运动控制相关的发现和演示为未来开发高可靠、低功耗的昆虫机器混合足式机器人提供了希望^[113,114]。

Ma等人^[44]将刺激电极分别植入蝗虫后足的伸肌和屈肌,结合重量为0.95 g、尺寸为12×7×5 mm³的微型无线刺激背包,构建了跳跃式蝗虫机器人。通过无线控制可完成高度和距离分别为10.4和42.6 cm的跳跃,依托载体内部的身体扶正机制,能快速恢复并进行连续的跳跃动作。研究结果还表明,电刺激蝗虫后足可将转向及跳跃动作压缩在短时间内完成,从而实现蝗虫机器人的转向跳跃控制^[115]。

3.3 基于感觉中枢区域刺激的运动调控

通过电刺激昆虫感觉中枢,诱导产生运动行为,实现基于感觉中枢决策区域刺激的运动调控,此类方法对脑区定位和手术操作技术要求较高。目前对蜜蜂的视觉系统工作机制已有一定的研究积累,采用基于视觉中枢区域刺激的调控策略,可以较好地诱导调控蜜蜂的运动行为。蜜蜂作为社会性昆虫,拥有独特的群体

智能、优越的飞行与导航能力, 这些优势使得蜜蜂机器人研究不仅具有昆虫机器人共有的科研意义与应用前景, 还能推动社会行为机制、记忆等昆虫生物学热点科学问题的研究。

浙江大学鲍莉^[116]搭建了精度为10 μm 的三维推进脑立体定位平台, 完成了对刺激位点的精确度量, 通过电刺激视叶实现了对固定状态蜜蜂振翅行为的启动与停止控制, 分析了刺激参数与振翅时间之间的映射关系, 确定了行为调控的最佳参数值, 为研制蜜蜂机器人控制系统提供了新的行为诱导范式。赵慧霞等人^[117]搭建了一套可用于蜜蜂固定、电极植入和电刺激导入的实验系统, 结合脑部表面标志物, 建立了多脑区定位技术, 确定了蘑菇体、视叶等7个脑区的坐标数据, 用于蜜蜂脑部开窗后精确快速定位。通过电刺激蘑菇体, 实现了振翅启动成功率达100%的控制效果。在研究基础上, 薛磊等人^[71]选用负载能力更强、更耐低温的熊蜂作为生物载体, 以前视结节作为调控位点, 控制固定状态熊蜂的振翅启停和腹部转向。为了提高行为控制效果的稳定性, 降低重复的参数测试次数和电刺激损伤, 进一步深入探索不同刺激参数对熊蜂振翅行为的调控效果, 应用非参数估计建立刺激输入-振翅行为间的定量关系模型, 对行为调控的刺激参数范围进行优化。此外, 他们提出了高精度(10 μm)、低损伤的非开窗电极植入技术, 结合轻量级、小尺寸、低功耗的红外无线刺激背包(重量约为130 mg, 体积为 $12 \times 5.4 \times 1.76 \text{ mm}^3$, 功耗为15~30 μW), 构建了运动活性、生命活性良好的熊蜂机器人样机, 实现了在自由状态下爬行、飞行运动的转向控制。在此基础上, 他们提出结合专家先验知识的离线强化学习控制算法, 能自适应不同熊蜂样本, 完成熊蜂机器人在树杈迷宫内的自动导航, 为未来实现实用化的熊蜂机器人打下了基础。

基于视叶刺激的调控原理, 北京理工大学赵杰亮等人^[118]开发了一款体积为 $5.6 \times 4.6 \times 0.15 \text{ mm}^3$ 、总重为190 mg的蜜蜂刺激背包, 采用红外无线通信, 在自主设计的飞控平台上, 实现了对固定状态蜜蜂机器人的飞行启动及转向控制。他们同时设计、搭建了磁悬浮电刺激实验平台, 开展了半自由状态蜜蜂机器人的飞行和转向行为控制的研究工作^[107,119]。

4 未来发展趋势及挑战

昆虫机器混合系统研究已取得许多引人注目的进展, 尤其是蟑螂机器人有接近实用的研究成果。这表明

当前研究正处于从实验室探索朝实际应用领域推进的阶段, 但在运动行为的神经调控机制、刺激技术与方法、微型刺激系统以及智能控制系统等方面, 仍存在较多的理论空白和技术障碍, 距离真正的落地应用还有一定的距离, 存在诸多难题有待进一步解决。本节以当前昆虫机器混合系统研究过程中的技术瓶颈为基础, 结合相关领域的新技术, 总结四个方面的研究内容, 讨论昆虫机器人的未来发展趋势。

4.1 运动行为的神经调控机制研究

昆虫运动行为控制主要通过刺激神经或肌肉组织, 触发神经冲动的产生和传递来实现。由于感知运动神经回路涉及脑区较多、信息整合过程复杂, 仅依赖对组织结构及功能的了解, 难以确定最佳刺激位点, 导致现有昆虫机器人控制普遍存在行为相对粗略、动作不够流畅、稳定性和可靠性欠佳等现象。

为提高昆虫机器人运动行为的控制精度, 可从感知觉运动回路的两个方面考虑: (1) 深入理解感知觉运动回路的神经原理。探索与运动行为相关的神经信号传导通路和神经环路结构, 基于新型高密度人工智能计算平台, 如华为昇腾^[120]、Google Colaboratory、亚马逊云(Amazon Web Services, AWS)等, 建立仿生计算模型^[121]模拟昆虫感知觉运动控制过程, 结合行为实验, 进一步明确感知觉运动通路的工作机制, 确定运动行为调控的神经刺激位点, 从根本上提高行为调控的可靠性和准确性。(2) 探索神经信号编解码规律。当前实验所采用单向或双向波形的电脉冲序列, 或根据电生理信号进行部分参数的计算模拟, 与神经元间传递的生物电信号和信息加工过程存在一定的差异, 因此应进一步研究神经元活动的发放规律, 分析运动控制相关指令的特征与时空特性, 理解感知-运动控制的神经机制, 提高行为调控的性能。

4.2 运动行为的刺激技术及方法研究

电刺激技术凭着可行性程度高、抗干扰能力强、损伤程度低等显著特点, 作为主要刺激方式应用于昆虫机器混合系统。目前昆虫脑部植入使用的刺激电极通常为单根金属丝, 材料以镍铬合金、钨、铜等为主, 结构设计相对简单。受制作工艺影响, 刺激电极多只能植入一个位点, 单次刺激实现一种动作的控制, 且难以避免植入式金属电极对组织的潜在损伤。针对现有刺激电极电学性能和力学性能上的缺陷, 可从电极的结

构设计和材料选取两方面入手: (1) 研制多位点柔性刺激微电极. 借鉴用于神经信号记录的犹他阵列和密歇根式探针设计思路, 采用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)封装技术, 研制刺激位点可调节的柔性微针, 突破单根微丝电极在刺激位点数量和区域范围等方面的限制, 实现器件对昆虫脑部/身体组织的多位点刺激, 推动昆虫机器人的多动作控制研究. (2) 选用高生物相容性且电学性能良好的柔性电极材料. 合理设计电极各层薄膜材料构成, 提高刺激电极的生物相容性, 减少电荷聚集导致的神经细胞坏死, 降低昆虫载体免疫反应导致的炎症反应, 从而进一步提高电刺激的精准性.

此外, 针对电刺激导致电极尖端周围神经元群被无差别激活的问题, 研究新型调控技术. 光遗传技术^[122]特异性强、时空分辨率高, 能针对特定类型神经细胞进行特异性调控, 有可能实现运动行为的精准控制. 随着昆虫基因组测序的研究进展, 有望研制匹配昆虫的病毒载体试剂和微型光纤, 推进基于光遗传技术的昆虫机器人研究.

4.3 运动行为的微型控制系统开发

受昆虫体型和负载限制, 现有微型刺激系统在供电形式、通信距离等设计方面存在较大的约束和挑战, 仅能满足昆虫机器混合系统在实验室环境的使用需求. 针对长时间、远距离、多任务的实际应用, 需从能量供给系统、通信导航技术、多功能器件集成等方面展开深入研究. 主要包括: (1) 设计充电形式便利、具备长时间供电能力的能量供给系统. 无线能量传输技术^[123]能以非接触形式、在特定场景对控制系统充电, 可避免传统充电方式导致控制系统脱落等情况发生. 生物燃料电池能利用生物体内的酶或微生物组织作为催化剂, 将化学能不断转化成电能, 为控制系统提供可持续的能量供应^[124], 延长昆虫机器人的有效工作时间. (2) 应用满足长距离的通信导航技术. 谐波雷达技术已被应用于昆虫采集、导航行为研究^[125,126], 能在半径800 m范围内通过相位比较获取目标物方位信息, 可用于解决长距离范围的昆虫机器人定位问题. 将传感、计算及通信功能系统负载至活体昆虫上, 通过昆虫的自由运动构建移动的物联网平台^[127], 这种低功耗组网技术以自然界常见生物作为载体, 具备天然的隐蔽性, 不会令昆虫机器人产生强烈的排斥行为, 同样可用于解决通信距离短的难题. (3) 集成多模式信息获取的功

能器件. 当前昆虫机器接口通常为单向模式, 难以同时实现电刺激或神经信号记录功能. 研制集成刺激-记录双向交互模式的微型系统, 通过神经元发放情况预判昆虫机器人的主动运动意愿, 减少外部的控制干预次数, 降低对昆虫的电刺激损伤, 延长昆虫机器人的工作寿命. 同时, 可考虑将微型低功耗麦克风、无线视觉系统^[128]等功能器件集成于控制系统, 满足在搜救、侦查等实际任务中对多模式信息(如位置、自身状态与外界环境状况等)的获取需求.

4.4 运动行为的智能控制系统构建

昆虫机器混合系统正处于自主智能控制研究阶段, 基于传统控制算法或人工智能算法, 构建智能控制框架, 已实现多种昆虫机器人在不同任务中的自动控制. 由于昆虫行为响应存在个体差异和实验环境等因素导致的随机性, 仅评估昆虫单点轨迹、3D朝向等粗略运动状态, 或采用基于常规数据驱动方法训练的控制算法, 难以实现高精度地导航昆虫机器人完成实际应用任务. 需深入研究运动行为分析和控制算法, 提出昆虫身体关键点回归算法, 获取昆虫机器人实时运动过程中的3D精细姿态表征, 建立刺激参数与行为响应间的精准定量关系模型, 为提升控制精度提供关键技术基础. 针对基于模型的强化学习方法存在训练成本高、风险大的问题, 研究昆虫机器人仿真模型, 有效利用昆虫自身特性模拟真实昆虫机器人与环境交互的行为反应, 可为控制算法提供充分、接近真实的训练数据^[129], 提升算法在真实实验场景中的鲁棒性和稳定性.

另外, 现有智能控制主要以昆虫机器人个体为主, 大大制约了实际应用的执行能力. 为扩展应用场景, 提高系统的整体性能^[130,131], 最大化利用昆虫的生物智能优势, 应构建昆虫机器人集群系统. 该集群系统可直接采用具有群居社会性特点的昆虫(蜜蜂、蟑螂等)作为载体, 运用昆虫的群体智能, 通过个体间自然、独有的通讯形式以提升协作和交互效率, 避免复杂的群体避障行为建模, 在环境监测、灾难救援等领域发挥更为重要的作用.

5 总结

昆虫机器混合系统的研究涉及神经科学、微电子系统、计算机等多个学科, 是典型的交叉研究方向, 有望带来基础科学和工程应用等多方面的创新研究成果.

本文梳理了近年来昆虫机器混合系统的研究进展,总结了在受控运动模式、可控动作类型、达成控制任务三个方面的研究成果,回顾了昆虫机器混合系统研究框架,将目前典型昆虫机器混合系统研究工作根据神经调控原理进行分类评述,总结归纳了昆虫机器人在运动行为的神经调控机制、刺激技术方法、微型刺激系统以及智能控制系统等方面的未来发展方向及研究挑战。

昆虫机器混合系统作为微型动物机器人,直接选用昆虫作为载体平台,解决了能源供给和样机稳定性等关键技术难题,大大降低了系统成本。同时,昆虫机器混合系统得以保留昆虫自身优越的感觉和运动性能,

在环境适应性、隐蔽性、机动性等方面表现出巨大优势。受电极植入精度、控制系统功能等限制,当前昆虫机器人在控制性能、控制范围等方面仍有较大提升空间。随着对昆虫感知觉回路、控制系统及控制算法等理论和技术的不断突破,有望构建真正兼具生物智能与机器智能的昆虫机器混合系统。

另外,以社会性昆虫作为载体的昆虫机器人还可用于探索昆虫间信息交互原理。社会性昆虫具有复杂的社会性结构,以种群方式繁衍,群内分工明确,若能揭示它们之间信息文化传播过程的工作机制,理解它们的群体智能行为,可为其他社会性生物甚至人类社会的研究提供宝贵的借鉴。

参考文献

- Zheng N G, Chen W D, Hu F L, et al. Research progress and challenges in cyborg insects (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]
- Ando N, Kanzaki R. Insect-machine hybrid robot. *Curr Opin Insect Sci*, 2020, 42: 61–69
- Manoonpong P, Patané L, Xiong X, et al. Insect-inspired robots: Bridging biological and artificial systems. *Sensors*, 2021, 21: 7609
- Wang H, Huai R T, Yang J Q, et al. Review of research progress in biorobot. In: Jiang Z Y, Liu X H, Jiao S H, et al., eds. 3rd International Conference on Advances in Materials Manufacturing. Advanced Materials Research, 2013, 655–657: 1061–1065
- 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
- Srinivasan M V. Visual control of navigation in insects and its relevance for robotics. *Curr Opin Neurobiol*, 2011, 21: 535–543
- Wu Z, Zheng N, Zhang S, et al. Maze learning by a hybrid brain-computer system. *Sci Rep*, 2016, 6: 31746
- Su L, Zhang N, Yao M, et al. A computational model of the hybrid bio-machine MPMS for ratbots navigation. *IEEE Intell Syst*, 2014, 29: 5–13
- Sun C. Hybrid intelligence and automatic navigation of rat-robots (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 [孙超. 大鼠机器人的智能融合及导航控制研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2013]
- 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
- 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
- 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(S1): 357–363
- 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]
- Liu Y J. Study on the control technique of biological behavior for rabbit-robots (in Chinese). Master Dissertation. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013 [刘颖杰. 家兔动物机器人行为控制技术的研究. 硕士学位论文. 秦皇岛: 燕山大学, 2013]
- 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
- Peng Y, Wu Y H, Yang Y L, et al. Study on the control of biological behavior on carp induced by electrophysiological stimulation in the corpus cerebelli. In: International Conference on Electronic & Mechanical Engineering & Information Technology. Harbin: IEEE, 2011. 502–506
- Peng Y, Wang T T, Yan Y H, et al. Design and application of the wireless remote control system of carp robots (in Chinese). *Chin J Biomed Eng*, 2019, 38: 431–437 [彭勇, 王婷婷, 闫艳红, 等. 鲤鱼机器人无线遥控系统设计与应用. 中国生物医学工程学报, 2019, 38: 431–437]
- 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]
- 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

- 20 Sanchez C J, Chiu C W, Zhou Y, et al. Locomotion control of hybrid cockroach robots. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 20141363
- 21 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
- 22 Latif T, Bozkurt A. Line following terrestrial insect biobots. In: International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, San Diego, 2012. 972–975
- 23 Whitmire E, Latif T, Bozkurt A. Kinect-based system for automated control of terrestrial insect biobots. In: 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka: IEEE, 2013. 1470–1473
- 24 Latif T, Whitmire E, Novak T, et al. Sound localization sensors for search and rescue biobots. *IEEE Sens J*, 2016, 16: 3444–3453
- 25 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
- 26 Tran-Ngoc P T, Le D L, Chong B S, et al. Intelligent insect–computer hybrid robot: Installing innate obstacle negotiation and onboard human detection onto cyborg insect. *Adv Intelligent Syst*, 2023, 5: 2200319
- 27 Hinterwirth A J, Billie M, Jacob L, et al. Wireless stimulation of antennal muscles in freely flying hawkmoths leads to flight path changes. *PLoS One*, 2012, 7: e52725
- 28 Sato H, Berry C W, Casey B E, et al. A cyborg beetle: Insect flight control through an implantable, tetherless microsystem. In: 21th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Tucson: IEEE, 2008. 164–167
- 29 Sato H, Berry C W, Maharbiz M M. Flight control of 10 gram insects by implanted neural stimulators. In: Solid-State, Actuators, and Microsystems Workshop. Hilton Head Island: IEEE, 2008. 90–91
- 30 Sato H. Remote radio control of insect flight. *Front Integr Neurosci*, 2009, 3: 24
- 31 Choo H Y, Yao L, Cao F, et al. Electrical stimulation of coleopteran muscle for initiating flight. *PLoS One*, 2016, 11: e0151808
- 32 Cao F, Zhang C, Doan T T V, et al. A biological micro actuator: Graded and closed-loop control of insect leg motion by electrical stimulation of muscles. *PLoS One*, 2014, 9: e105389
- 33 Cao F, Zhang C, Hao Y C, et al. Insect-machine hybrid robot: Insect walking control by sequential electrical stimulation of leg muscles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seattle: IEEE, 2015. 4576–4582
- 34 Zhang C, Cao F, Li Y, et al. Fuzzy-controlled living insect legged actuator. *Sens Actuat A-Phys*, 2016, 242: 182–194
- 35 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
- 36 Sato H, Peeri Y, Baghoomian E, et al. Radio-controlled cyborg beetles: A radio-frequency system for insect neural flight control. In: IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Sorrento: IEEE, 2009. 216–219
- 37 Doan T V, Svetoslav K, Huynh N A, et al. Insect-machine hybrid system. In: 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Osaka: IEEE, 2013. 2816–2819
- 38 Sato H, Vo Doan T T, Kolev S, et al. Deciphering the role of a coleopteran steering muscle via free flight stimulation. *Curr Biol*, 2015, 25: 798–803
- 39 Vo Doan T T, Sato H. Insect-machine hybrid system: Remote radio control of a freely flying beetle (*Mercynorrhina torquata*). *JoVE*, 2016, doi: 10.3791/54260
- 40 Alem S, Perry C J, Zhu X, et al. Associative mechanisms allow for social learning and cultural transmission of string pulling in an insect. *PLoS Biol*, 2016, 14: e1002564
- 41 Romero-González J E, Solvi C, Chittka L. Honey bees adjust colour preferences in response to concurrent social information from conspecifics and heterospecifics. *Anim Behav*, 2020, 170: 219–228
- 42 Bao L, Zheng N G, Zhao H X, et al. Flight control of tethered honeybees using neural electrical stimulation. In: Proceedings of the 5th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering. Cancun: IEEE, 2011. 558–561
- 43 Zhao H X, Zheng N G, Ribi W A, et al. Neuromechanism study of insect–machine interface: Flight control by neural electrical stimulation. *PLoS One*, 2014, 9: e113012
- 44 Ma S, Liu P, Liu S, et al. Launching of a cyborg locust via co-contraction control of hindleg muscles. *IEEE Trans Robot*, 2022, 38: 2208–2219
- 45 Thomas S J, Harrison R R, Leonardo A, et al. A battery-free multichannel digital neural/EMG telemetry system for flying insects. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2012, 6: 424–436
- 46 Rybak J. The digital bee brain: Integrating and managing neurons in a common 3D reference system. *Front Syst Neurosci*, 2010, doi: 10.3389/fnsys.2010.00030
- 47 Zhao H X, Zheng H Q, Hu F L. Progress in visual processing pathways in compound eyes of bees (in Chinese). *Acta Entomol Sin*, 2012, 55: 749–757 [赵慧霞, 郑火青, 胡福良. 蜜蜂复眼的视觉通路研究进展. *昆虫学报*, 2012, 55: 749–757]
- 48 Paulk A C, Gronenberg W. Higher order visual input to the mushroom bodies in the bee, *Bombus impatiens*. *Arthropod Structure Dev*, 2008, 37:

443–458

- 49 Paulk A C, Dacks A M, Phillips-Portillo J, et al. Visual processing in the central bee brain. *J Neurosci*, 2009, 29: 9987–9999
- 50 Keil T A, Steinbrecht R A. Diffusion barriers in silkworm sensory epithelia: Application of lanthanum tracer to olfactory sensilla of *Antheraea polyphemus* and *Bombyx mori*. *Tissue Cell*, 1987, 19: 119–134
- 51 Parnas M, Lin A C, Huetteroth W, et al. Odor discrimination in drosophila: From neural population codes to behavior. *Neuron*, 2013, 79: 932–944
- 52 Galizia C G, Szyszka P. Olfactory coding in the insect brain: Molecular receptive ranges, spatial and temporal coding. *Entomol Exp Appl*, 2008, 128: 81–92
- 53 Na J, Bai X, Guo R, et al. Olfactory neural structure and molecular mechanism of odor perception in insect (in Chinese). *Prog Mod Biomed*, 2015, 15: 749–755 [那杰, 白旭, 郭瑞, 等. 昆虫气味认知的嗅觉神经结构及分子机制. *现代生物医学进展*, 2015, 15: 749–755]
- 54 Moore T E, Crary S B, Koditschek D E, et al. Directed locomotion cockroaches: “Bibots”. *Acta Entomolog Sloven*, 1998, 6: 71–78
- 55 Vo-Doan T T, Tan M Y W, Bui X H, et al. An ultralightweight and living legged robot. *Soft Robotics*, 2017, 5: 17–23
- 56 Li Z Q. Research on motion control of bees based on electrophysiological response mechanism of antennae (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2019 [李志强. 基于触角电生理响应机制的蜜蜂运动控制研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2019]
- 57 Knaden M, Strutz A, Ahsan J, et al. Spatial representation of odorant valence in an insect brain. *Cell Rep*, 2012, 1: 392–399
- 58 Bozkurt A, Lal A, Gilmour R. Aerial and terrestrial locomotion control of lift assisted insect biobots. In: *Proceedings of the 31st International Conference of the IEEE EMBS*. Minneapolis: IEEE, 2009. 2058–2061
- 59 Bozkurt A, Gilmour R F, Lal A. Balloon-assisted flight of radio-controlled insect biobots. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 2304–2307
- 60 Bozkurt A, Lal A, Gilmour R. Radio control of insects for biobotic domestication. In: *Proceedings of the 4th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*. Antalya: IEEE, 2009. 215–218
- 61 Brill M F, Rosenbaum T, Reus I, et al. Parallel processing via a dual olfactory pathway in the honeybee. *J Neurosci*, 2013, 33: 2443–2456
- 62 Brill M F, Meyer A, Rössler W. It takes two—Coincidence coding within the dual olfactory pathway of the honeybee. *Front Physiol*, 2015, 6: 1–4
- 63 Roussel E, Carcaud J, Combe M, et al. Olfactory coding in the honeybee lateral horn. *Curr Biol*, 2014, 24: 561–567
- 64 Gupta N, Stopfer M. Functional analysis of a higher olfactory center, the lateral horn. *J Neurosci*, 2012, 32: 8138–8148
- 65 Rössler W, Brill M F. Parallel processing in the honeybee olfactory pathway: Structure, function, and evolution. *J Comp Physiol A*, 2013, 199: 981–996
- 66 Durst C, Eichmüller S, Menzel R. Development and experience lead to increased volume of subcompartments of the honeybee mushroom body. *Behav Neural Biol*, 1994, 62: 259–263
- 67 MaBouDi H, Shimazaki H, Giurfa M, et al. Olfactory learning without the mushroom bodies: Spiking neural network models of the honeybee lateral antennal lobe tract reveal its capacities in odour memory tasks of varied complexities. *PLoS Comput Biol*, 2017, 13: e1005551
- 68 Pfeiffer K, Kinoshita M. Segregation of visual inputs from different regions of the compound eye in two parallel pathways through the anterior optic tubercle of the bumblebee (*Bombus ignitus*). *J Comp Neurol*, 2012, 520: 212–229
- 69 Mota T, Yamagata N, Giurfa M, et al. Neural organization and visual processing in the anterior optic tubercle of the honeybee Brain. *J Neurosci*, 2011, 31: 11443–11456
- 70 Mota T, Gronenberg W, Giurfa M, et al. Chromatic processing in the anterior optic tubercle of the honey bee brain. *J Neurosci*, 2013, 33: 4–16
- 71 Xue L. The research of bumblebee flight control by anterior optic tubercle electrical stimulation (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 [薛磊. 前视结节电刺激对熊蜂飞行控制的研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2015]
- 72 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
- 73 Mann K, Massey T L, Guha S, et al. A wearable wireless platform for visually stimulating small flying insects. In: *Proceedings of 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, 2014. 1654–1657
- 74 Visvanathan K, Gupta N K, Maharbiz M M, et al. Flight initiation and directional control of beetles by microthermal stimulation. In: *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop*, 2014. 126–129
- 75 Kuwana Y, Shimoyama I, Miura H. Steering control of a mobile robot using Insect antennae. In: *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. Pittsburgh: IEEE, 1995. 530–535
- 76 van Kleef J P, Massey T, Maharbiz M. An ocellar-based flight control system for flying insects. *IEEE EMBC*, 2013, 51: M-167
- 77 Gong F, Zheng N G, Xue L, et al. RICA: A reliable and image configurable arena for cyborg bumblebee based on CAN bus. *Engineering in Medicine & Biology Society. IEEE*, 2014. 860–863
- 78 Kanzaki R, Minegishi R, Namiki S, et al. Insect-machine hybrid system for understanding and evaluating sensory-motor control by sex pheromone in *Bombyx mori*. *J Comp Physiol A*, 2013, 199: 1037–1052
- 79 Ando N, Kanzaki R. A simple behaviour provides accuracy and flexibility in odour plume tracking—The robotic control of sensory-motor

- coupling in silkmoths. *J Exp Biol*, 2015, doi: 10.1242/jeb.124834
- 80 Weisel-Eichler A, Libersat F. Neuromodulation of flight initiation by octopamine in the cockroach *Periplaneta americana*. *J Comp Physiol A*, 1996, 179: 103–112
 - 81 Brembs B, Christiansen F, Pflüger H J, et al. Flight initiation and maintenance deficits in flies with genetically altered biogenic amine levels. *J Neurosci*, 2007, 27: 11122–11131
 - 82 Hong F, Song H, An C J. Introduction to insect metamorphosis (in Chinese). *Chin J Appl Entom*, 2016, 53: 1–8 [洪芳, 宋赫, 安春菊. 昆虫变态发育类型与调控机制. *应用昆虫学报*, 2016, 53: 1–8]
 - 83 Bozkurt A, Paul A, Pulla S, et al. Microprobe microsystem platform inserted during early metamorphosis to actuate insect flight muscle. In: 20th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Kobe: IEEE, 2007. 405–408
 - 84 Bozkurt A, Gilmour R F, Sinha A, et al. Insect-machine interface based neurocybernetics. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 1727–1733
 - 85 Tsang W M, 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: IEEE, 2008. 1922–1924
 - 86 Tsang W M, Stone A L, Aldworth Z N, et al. Flexible split-ring electrode for insect flight biasing using multisite neural stimulation. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2010, 57: 1757–1764
 - 87 Bozkurt A, Lal A. Low-cost flexible printed circuit technology based microelectrode array for extracellular stimulation of the invertebrate locomotory system. *Sens Actuat A-Phys*, 2011, 169: 89–97
 - 88 Josset N, Roussel M, Lemieux M, et al. Distinct contributions of mesencephalic locomotor region nuclei to locomotor control in the freely behaving mouse. *Curr Biol*, 2018, 28: 884–901.e3
 - 89 Caggiano V, Leiras R, Gohi-Erro H, et al. Midbrain circuits that set locomotor speed and gait selection. *Nature*, 2018, 553: 455–460
 - 90 Zhao Z. Research on honeybee cyborg based on embedded optic lobe control (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2020 [赵真. 蜜蜂脑视叶调控机理及其昆虫飞控系统研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2020]
 - 91 Doan T V, Li Y, Cao F, et al. Cyborg beetle: thrust control of free flying beetle via a miniature wireless neuromuscular stimulator. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Coimbatore: IEEE, 2015. 1048–1050
 - 92 Cao F, Sato H. Insect-computer hybrid robot achieves a walking gait rarely seen in nature by replacing the anisotropic natural leg spines with isotropic artificial leg spines. *IEEE Trans Robot*, 2019, 35: 1034–1038
 - 93 Wang H, Ma Q, Chen K, et al. An ultra-low-noise, low power and miniaturized dual-channel wireless neural recording microsystem. *Biosensors*, 2022, 12: 613
 - 94 Jin M J. Abdominal waving control of tethered bumblebees based on Sarsa (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 [金梦洁. 固定状态下基于Sarsa的光流诱导熊蜂运动行为控制. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2017]
 - 95 Chen Z. Pose estimation methods for bumblebee based on cascaded pose regression and deep domain adaptation (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 [陈钊. 基于级联姿态回归和领域自适应深度学习的熊蜂姿态估计方法. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2019]
 - 96 Zhao L, Wen J, Wang P, et al. Context-guided adaptive network for efficient human pose estimation. *AAAI*, 2021, 35: 3492–3499
 - 97 Cole J, Mohammadzadeh F, Bollinger C, et al. A study on motion mode identification for cyborg roaches. In: IEEE International Conference on Acoustics. New Orleans: IEEE, 2017. 2652–2656
 - 98 Nguyen H D, Dung V T, Sato H, et al. Efficient autonomous navigation for terrestrial insect-machine hybrid systems. *Sens Actuat B-Chem*, 2023, 376: 132988
 - 99 Qi Y. Turning control of insect robot via light-induced method (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 [齐炎. 基于光流刺激诱导的昆虫机器人偏转控制算法研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2019]
 - 100 Yang X, Jiang X L, Su Z L, et al. Cyborg moth flight control based on fuzzy deep learning. *Micromachines*, 2022, 13: 611
 - 101 Doan T V, Dung V T, Sato H. Braking and body angles control of an insect-computer hybrid robot by electrical stimulation of beetle flight muscle in free flight. 2021, arXiv: 2111.14314
 - 102 Li Y, Sato H, Li B. Feedback altitude control of a flying insect-computer hybrid robot. *IEEE Trans Robot*, 2021, 37: 2041–2051
 - 103 Cao F, Sato H. Remote radio controlled insect-computer hybrid legged robot. In: Proceedings of 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Kaohsiung: IEEE, 2017. 59–62
 - 104 Liu P, Ma S, Liu S, et al. Omnidirectional jump control of a locust-computer hybrid robot. *Soft Robotics*, 2023, 10: 40–51
 - 105 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
 - 106 Zheng N, Ma Q, Jin M, et al. Abdominal-waving control of tethered bumblebees based on Sarsa with transformed reward. *IEEE Trans Cybern*, 2019, 49: 3064–3073
 - 107 Yu L, Zhao J, Ma Z, et al. Experimental verification on steering flight of honeybee by electrical stimulation. *Cyborg Bionic Syst*, 2022, 2022: 9895837

- 108 Gong F. Flight arena design and its application in yaw behavior research of bumblebee (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 [巩凡. 模拟飞行器设计及其在熊蜂偏航行为研究中的应用. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2015]
- 109 Li G Y, Zhang D G. Brain-computer interface controlled cyborg: Establishing a functional information transfer pathway from human brain to cockroach brain. *PLoS One*, 2016, 11: e0150667
- 110 Fu F, Li Y, Wang H, et al. The function of pitching in beetle's flight revealed by insect-wearable backpack. *Biosens Bioelectron*, 2022, 198: 113818
- 111 Li Y, Wu J, Sato H. Feedback control-based navigation of a flying insect-machine hybrid robot. *Soft Robotics*, 2018, 5: 365–374
- 112 Vo-Doan T T, Dung V T, Sato H. A cyborg insect reveals a function of a muscle in free flight. *Cyborg Bionic Syst*, 2022, 2022: 9780504
- 113 Kosaka T, Gan J H, Long L D, et al. Remote radio control of insect flight reveals why beetles lift their legs in flight while other insects tightly fold. *Bioinspir Biomim*, 2021, 16: 036001
- 114 Li Y, Cao F, Doan T V, et al. Role of outstretched forelegs of flying beetles revealed and demonstrated by remote leg stimulation in free flight. *J Exp Biol*, 2017, 220: 3499–3507
- 115 Ma S, Li B, Li Y. The steering jump control of a locust bio-robot via asynchronous hindleg kickings. *Adv Intelligent Syst*, 2022, 4: 2200082
- 116 Bao L. The induction of honeybee simple flight behavior and optic flow stimulus-spike potentials relationships (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 [鲍莉. 蜜蜂简单行为诱导及光流刺激下锋电位发放的研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2012]
- 117 Zhao H X. Neuromechanism study of flight control in brain-machine interface of honey bee (*Apis mellifera* L.) (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 [赵慧霞. 蜜蜂(*Apis mellifera* L.)脑机接口的飞行控制神经机理研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2014]
- 118 Zhao J L, Zhao Z, Yu L, et al. Design of flight control system for honeybee based on EEG stimulation (in Chinese). *J Mech Eng*, 2021, 57: 45–52 [赵杰亮, 赵真, 余丽, 等. 基于脑电刺激的蜜蜂飞行控制系统设计. 机械工程学报, 2021, 57: 45–52]
- 119 Ding H, Zhao J, Yan S. Behavioral control and changes in brain activity of honeybee during flapping. *Brain Behav*, 2021, 11, doi: 10.1002/brb3.2426
- 120 Su Y, Zhou J, Ying J, et al. Computing infrastructure construction and optimization for high-performance computing and artificial intelligence. *CCF Trans HPC*, 2021, 3: 331–343
- 121 Lobato-Rios V, Ramalingasetty S T, Özdil P G, et al. Neuromechfly, a neuromechanical model of adult drosophila melanogaster. *Nat Methods*, 2022, 19: 620–627
- 122 Dong X, Kheiri S, Lu Y, et al. Toward a living soft microrobot through optogenetic locomotion control of *Caenorhabditis elegans*. *Sci Robot*, 2021, 6: eabe3950
- 123 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
- 124 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
- 125 Woodgate J L, Makinson J C, Rossi N, et al. Harmonic radar tracking reveals that honeybee drones navigate between multiple aerial leks. *iScience*, 2021, 24: 102499
- 126 Brebner J S, Makinson J C, Bates O K, et al. Bumble bees strategically use ground level linear features in navigation. *Anim Behav*, 2021, 179: 147–160
- 127 Iyer V, Nandakumar R, Wang A, et al. Living iot: A flying wireless platform on live insects. In: ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2019
- 128 Iyer V, Najafi A, James J, et al. Wireless steerable vision for live insects and insect-scale robots. *Sci Robot*, 2020, 5: eabb0839
- 129 Peng B X, Andrychowicz M, et al. Sim-to-real transfer of robotic control with dynamics randomization. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane, IEEE, 2018. 3803–3810
- 130 Wu W L, Zhou X S, Shen B, et al. A review of swarm robotic systems property evaluation research (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2022, 48: 1153–1172 [武文亮, 周兴社, 沈博, 等. 集群机器人系统特性评价研究综述. 自动化学报, 2022, 48: 1153–1172]
- 131 Zhou X, Wen X, Wang Z, et al. Swarm of micro flying robots in the wild. *Sci Robot*, 2022, 7: eabm5954

Summary for “昆虫机器混合系统: 从自由状态控制到自主智能调控”

Cyborg insects: From free-state control to autonomous intelligent regulation

Qian Ma^{1,2,3}, Hongyu Wang^{1,2,3}, Hui Hong⁴, Gang Pan^{2,3} & Nenggan Zheng^{1,2,3,5*}

¹ Qiushi Academy for Advanced Studies, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

² College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

³ State Key Lab of Brain-Machine Intelligence, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

⁴ Key Laboratory of Radio Frequency Circuit and System, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

⁵ CCAI by MOE and Zhejiang Provincial Government (ZJU), Hangzhou 310027, China

* Corresponding author, E-mail: zng@cs.zju.edu.cn

Cyborg insects are a convergence of biological organisms and artificial machinery, which is often referred to as insect-machine hybrid systems. These systems utilize an insect-machine interface (IMI) to gain control of the locomotion of insects and to facilitate the manipulation of their natural movement patterns. This control is achieved through external stimulus of the insect's peripheral or central nervous system and muscle fibers. Cyborg insects offer notable advantages over their counterparts—micro or bionic mobile robots—that merely mimic the physical attributes and movement patterns of insects. These benefits encompass: (1) The elimination of the need for complex designs associated with mechanical structure, drive, and control systems. This simplifies the developmental process substantially. (2) The integration of the superior sensorimotor performance of insects, which have been honed and refined through millions of years of evolution, providing them with an inherent, natural advantage. (3) The unique design where system power is supplied exclusively to control and communication modules, facilitating efficient command issuance and data transmission. (4) A compact size and natural insect-like appearance, making them virtually undetectable to both humans and other animals, thus offering exceptional stealth capabilities. (5) The mature feeding technology reduces the cost of insect culture, and makes the development cost of insect machine mixing system into controllable. Cyborg insects amalgamate the sensory cognition and movement capabilities inherent to insects with the high precision and controllability characteristic of micro-electro-mechanical systems (MEMS). This unique combination addresses and compensates for the limitations of micro robots, particularly concerning motion speed, distance, and payload. The attributes of straightforward system structure, exceptional motion perception, low energy consumption, and superior stealth make cyborg insects extremely valuable in both scientific research and practical engineering applications. Their stability across diverse motion modes makes them particularly suitable for complex real-world scenarios. For instance, they can be employed in search, rescue, and reconnaissance operations in disaster environments, especially those characterized by narrow, intricate terrains. Moreover, insect-machine hybrid systems offer a unique, versatile research platform with easily adjustable variables, providing promising opportunities for in-depth studies in neuroscience, entomology, and bionics.

In this review, we first provide a comprehensive summary of the insect-machine hybrid system architecture, followed by a critical review of the significant strides made in the development of typical insect-machine hybrid systems based on different control principled. We aim to encapsulate the critical components that influence the locomotion control of these hybrid systems, including the characteristics of neuromechanism, neuromodulation methods, microstimulation systems, and control strategies. We also explore the significant research findings concerning several typical cyborg insects in detail. These findings are categorized based on virtual sensation, muscle execution, and central decision-making, all of which are grounded in the context of the neuromechanism. Additionally, to exploit cyborg insects effectively for practical applications, we delineate a research framework that addresses future cyborg insects, considering the current technical bottlenecks. We further discuss the technical challenges associated with cyborg insects, focusing on the sensorimotor neural mechanism of insects, neuromodulation methods, microcontrol systems and intelligent control strategies.

In conclusion, we present an insightful forecast into the future research directions that hold promise in overcoming these challenges and unleashing the full potential of insect-machine hybrid systems. The journey towards these exciting prospects may prove transformative in our understanding of biology, technology, and the inspiring interface where they converge.

cyborg insects, insect-machine hybrid systems, neuromodulation mechanism, stimulation system, control strategy

doi: [10.1360/TB-2023-0186](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0186)