



评述

昆虫机器混合系统研究进展

郑能干^①, 陈卫东^{①②}, 胡福良^③, 鲍莉^{①④}, 赵慧霞^③, 王坤^{①④}, 郑筱祥^{①④⑤*}, 吴朝晖^②

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 浙江大学动物科学学院, 杭州 310027;

④ 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027;

⑤ 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 教育部生物医学工程重点实验室, 杭州 310027

* 联系人, E-mail: qaas@zju.edu.cn

收稿日期: 2010-11-29; 接受日期: 2011-03-05

国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61003150)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 61031002)、中国博士后科学基金(批准号: 20090461369, 201003725)资助项目

doi: 10.1360/052010-717

摘要 昆虫机器混合系统是以昆虫为载体, 运动性能优异的新型昆虫机器人. 本文首先提出昆虫机器混合系统的定义, 分析其主要特点; 进而结合蜜蜂机器人的研制, 评述该领域的主要研究成果. 在此基础上, 概括了昆虫机器混合系统的研究框架, 从神经生理机制、行为刺激方法、电极组织接口、刺激控制微系统和无线数据传输等几个方面归纳其主要研究挑战, 分析其发展趋势, 并展望了实现生物智能和机器智能融合的昆虫机器混合系统.

关键词昆虫机器混合系统
微型飞行器
昆虫机器接口
微刺激系统
变态早期植入

昆虫是自然界中最早获得飞行能力的物种, 其运动机理和飞行动力学原理一直是生命科学与工程技术研究人员关注的热点课题^[1~3]. 近年来, 通过借鉴昆虫的生理结构和运动行为, 人们试图通过仿生手段实现具备优异性能的微型飞行器, 特别是重量为 10~100 g、翼长 1~15 cm、有效负荷为 56 mg 左右的微型飞行系统(micro air vehicle, MAV)^[2,4~7]是研究的重点. 模仿昆虫的扑翼飞行方式因其机动性和灵活性方面的优势, 正成为 MAV 的主流解决方案, 相关研究成果层出不穷, 如加州大学伯克利分校 MFI^[8]、多伦多大学 Mentor、乔治亚理工大学 Entomopter^[9]、加州理工学院的机器飞行昆虫^[10]、范德比大学 CIM 实验室的扑翼微飞行器^[11]、荷兰代尔夫特理工大学的 Delfly 系列^[12]、西北工业大学扑翼微型飞行器^[13]、上

海交通大学扑翼 MAV^[14,15]和南京航空航天大学多自由度仿生扑翼机模型^[16,17]等. 虽然, 在微机电系统、能量获取、飞行电控等方面取得了较大突破, 但现有扑翼微型飞行器仍存在运动模式、扑翼结构、飞行稳定性、动力及能源供给、有效负载和导航等方面的技术瓶颈. 因受到低雷诺数空气动力学、智能材料、自主飞行控制及微系统加工等领域发展水平的限制, 扑翼微型飞行器仅能在一定程度上模仿昆虫的简单功能; 而在感知能力、飞行距离、速度、有效载荷、机动性以及复杂环境适应性等方面, 还远未能与昆虫相媲美^[18~21].

随着神经生物学、信息科学及微机电系统等领域科学与工程研究的飞速发展和交叉汇聚, 以昆虫为载体, 采用电刺激^[22~33]、动量重定向^[34]、代谢调

控^[35]等技术控制或扰动载体行为, 实现了可静态预设或动态控制的昆虫-机器混合系统. 这类特殊机器人继承了载体优越的爬行、跳跃或迁飞能力, 使用人工控制模块(即昆虫机器接口^[22], insect-machine interface)精确诱导载体运动行为, 是一种全新的微型机器人.

昆虫机器混合系统的控制模块主要是基于硅芯片的电刺激以及采用微机电系统技术构建的化学刺激系统; 通过刺激载体大脑、神经节以及肌肉等组织, 诱导或控制昆虫产生预期的飞行或爬行动作. 在实际应用中, 可根据具体需求将昆虫机器混合系统扩展为动物传感器及群组, 记录载体运动生理数据, 监测极端环境事件, 并回传至后端计算系统.

昆虫机器混合系统不用考虑如何构建复杂的气动布局、机械结构和推进动力模块, 仅需解决微型控制器与昆虫载体的耦合接口^[22], 具有如下优点: ① 系统结构简单: 与仿生飞行机器人相比, 省略了机身、机翼、人造肌肉、飞行传感及控制模块, 仅需实现昆虫-机器接口, 系统结构和动力源大为简化; ② 运动能力优越: 昆虫机器混合系统继承了载体的优越运动性能. 昆虫在长达几亿年的进化过程中, 演化并具备了独特的运动能力, 如蜜蜂复杂完美的飞行行为或蝗虫长距离的迁飞/跳跃能力; ③ 系统能耗较小: 此类昆虫机器人仅有刺激/记录模块和通信接口需要消耗电能, 用于完成简单指令及数据压缩传输. 与人造仿昆微型机器人相比, 节省了推进控制模块所需的能量, 因此系统能耗大为减少; ④ 隐蔽性能优良: 人类或动物对自然界及生活环境中出现的昆虫已习以为常. 正因如此, 仿昆虫机器人的研究不仅借鉴昆虫气动结构及运动机理, 还考虑实现逼真的昆虫“封装”. 而昆虫机器混合系统具有天然的外部造型, 更能满足国防、安保等特殊应用的需求.

与其他基于神经接口的动物机器人^[36-38]相比, 昆虫机器混合系统具有活动范围广、能量消耗小、隐蔽性好、执行效率高等优势. 得益于载体超强的运动能力和小巧体积, 昆虫机器混合系统能抵达一般动物机器人无法覆盖的极端环境. 利用昆虫载体自身的社会行为特性, 形成群体智能系统, 高效地完成更为困难的军事和民用任务. 然而, 在载体行为诱导和微型控制系统等方面, 昆虫机器混合系统面临更为困难的研究与技术挑战.

研究昆虫机器混合系统的神经生理基础、构建方法及设计工具, 实现融合生物智能和机器智能的特殊昆虫机器人, 将在科学研究、国防安保、危险环境搜救、气象观测、工业生产、娱乐媒体等领域拥有广阔的应用前景. 此外, 这种新的研究思路和方法对神经生物学和昆虫学等领域的探索也有特殊意义. 借助昆虫行为控制技术, 可进一步拓展昆虫通讯、择偶、飞行能量学及昆虫天敌行为预测等众多问题的研究. 特别地, 针对某些特定的昆虫物种(如果蝇(*Drosophila*)、东亚飞蝗(*Locusta migratoria manilensis*)、烟草飞蛾(*Manduca sexta*)、蜜蜂(*Apis mellifera ligustica*)等), 借助神经电刺激和信号处理等工程方法, 深入研究昆虫某些特定运动行为的神经与肌肉信号, 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了新的研究思路与探索方法.

鉴于昆虫机器混合系统具有重要的研究价值和广阔的应用前景, 各国政府和研究机构投入了大量资金和力量进行探索. 1995年, 日本政府投入500万美元资助东京大学 Shimoyama 教授研究蟑螂机器人^[39]. 美国国防部高级研究计划局重点资助了密歇根大学、麻省理工大学、加州大学伯克利分校和康奈尔大学的研究小组以甲虫^[29-32]和烟草飞蛾^[22-27]等昆虫为载体, 使用神经电刺激、化学诱导、光刺激等手段构建行为可控的昆虫机器混合系统. 霍华德休斯医学中心则以果蝇为研究对象, 发展成像与记录新技术, 分析昆虫神经元发放电与载体运动行为间的映射关系^[40].

中国针对昆虫机器混合系统的研究未见报道. 但在动物机器人领域, 已有较多研究成果, 主要有: 山东科技大学利用惩罚机制控制鸽子起飞和运动, 构建了基于鸟的生物机器人^[36,41]; 南京航空航天大学深入研究了脑干刺激对壁虎转向运动的控制规律, 实现了爬行可控的壁虎机器人^[37,42-45]; 中国科学院自动化研究所和西安交通大学合作开发的多模式遥控刺激器, 成功应用于自由大鼠的运动行为控制^[38]; 浙江大学求是高等研究院以大鼠为载体, 开发了遥控大鼠机器人^[46,47], 并实现了大鼠机器人的自动导航^[48].

本文以昆虫机器混合系统为研究对象, 结合本实验室在蜜蜂机器人的研究经验, 综述这个新兴交叉研究领域的最新进展、研究挑战和发展趋势.

1 昆虫机器混合系统研究进展

昆虫机器混合系统的研究始于 20 世纪 90 年代, 美日等国的科研人员以蟑螂、甲虫及烟草飞蛾为载体搭建原型, 提出了昆虫行为控制技术及昆虫-机器接口的初步方案. 本节首先以运动方式为分类标准, 把现有研究工作分为爬行昆虫机器混合系统和飞行昆虫机器混合系统两类进行评述. 随后, 介绍作者所在研究小组蜜蜂机器人的研究进展.

1.1 爬行昆虫机器混合系统: 蟑螂机器人

基于“触角神经电刺激可致美洲蟑螂(*Periplaneta Americana*)产生对侧偏向的逃避行为”的原理, 东京大学 Isao Shimoyama 教授研制成功了爬行昆虫机器混合系统, 实现了短距离的可控直线行走^[39]. 刺激电极为直径 100 μm 的不锈钢丝; 由 8 位微控制器、光

电传感器和 3 V 电池组成的微型刺激背包重 1.9 g, 相当于 2 倍载体自重. 刺激位点为触角输入神经, 刺激电流为 10~100 mA, 方波脉冲个数为 1~100 个, 持续时间为 100~200 ms. 背包上的光电传感器检测载体偏离预设黑色直线的方向, 采用对侧电刺激确保载体沿直线行进.

该研究小组搭建了蟑螂机器人刺激-行为分析系统, 以获取载体行为与刺激参数之间的定量关系. 系统由轻质聚苯乙烯小球、光学编码器、微处理器和计算机 4 部分组成(图 2). 背负刺激背包的载体放置在小球顶部, 其运动轨迹分解为球体滚动的前向和偏向位移. 光学编码器分别记录球体的两个位移分量, 经微处理器采样后输入计算机; 计算机生成刺激脉冲个数和刺激时间等参数, 配置刺激背包. Shimoyama 等人使用该系统测量了刺激脉冲个数与爬行距离、刺激时长与爬行距离、刺激脉冲个数与

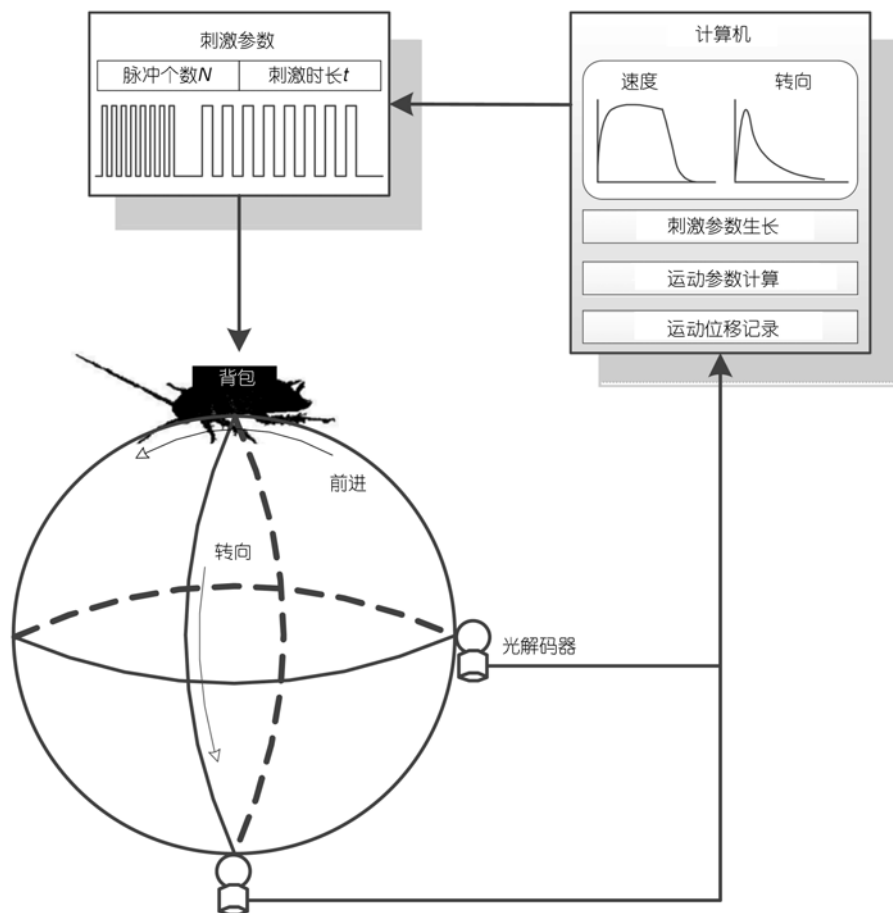


图 1 蟑螂机器人刺激-行为分析实验装置(改自文献[39])

运动偏角等数据, 分析了刺激-行为之间存在的函数关系。

作为文献报道的第一例昆虫机器混合系统, 蟑螂机器人展示了如何使用电刺激诱导昆虫载体完成预期运动行为的科学创意。然而, 由于电刺激产生“逃避”行为的神经生理学机理仍有待进一步研究, 尚缺乏载体“刺激-行为-时间”关系的定量分析模型。在工程应用中, 随着个体以及刺激时间等参数的改变, 相同诱导条件产生的载体运动行为存在较大的统计方差, 其直接表现于蟑螂机器人系统仅能完成短距离的直线行走, 还未能实现长时间的精确控制。

1.2 飞行昆虫机器混合系统

当前文献报道的飞行昆虫机器混合系统主要以烟草飞蛾(*Manduca sexta*)^[23,24]和甲虫^[31,49]为载体, 采用植入式微系统刺激神经与肌肉组织, 以实现起飞、停止、左右偏转等行为控制。此外, 另有研究使用动量重定向技术, 扰动烟草飞蛾的运动行为, 实现了长距离、低能耗的可控飞行。

(1) 飞蛾机器人。烟草飞蛾的发育期一般约为 49 天、翼展 10 cm、负载能力约 2 g, 是比较理想的昆虫载体。该载体的飞行控制系统由感受器、大脑及神经中枢系统组成。其感受器包括触角、眼睛、毛发

细胞、钟形感受器等, 用于感受外界的视觉、机械与化学刺激; 刺激引发感觉神经元冲动信号, 传递至大脑及神经中枢, 经处理后控制运动肌肉群收缩或舒张产生飞行活动。研究表明, 烟草飞蛾颈部肌肉直接参与飞行过程中的转向动作, 其头部朝向目标后翅膀肌肉才开始相应地收缩^[50-52]。

利用上述研究结果, 康奈尔大学 SonicMEMS 实验室将微电极植入飞蛾的触角叶、颈部肌肉、背纵肌和背腹肌等位点^[24,27], 使用方波信号刺激载体产生了起飞、停止和左右转向等行为(表 1)。刺激背包由电极、微处理器、无线接收器和电池模块组成, 使用 3 通道 72 MHz 调幅操作杆无线发送刺激脉冲指令。系统使用氦气球提供浮力, 以抵消刺激背包的重量 (650 mg)。

为了减少电极植入对载体的损伤并提高系统可靠性, 该研究小组提出了变态早期植入技术(early metamorphosis insertion technology, EMIT)^[22]。在飞蛾生命周期的第 17~19 天, 将蛾蛹麻醉植入刺激电极, 固定 36 h 后自然愈合, 存活率达到 95%。实验表明, 电极与组织结合紧密, 实现了低损伤、高可靠的昆虫-机器接口。在手术过程中, Bozkurt 等人^[25]使用热阻电极刺激载体肌肉, 使得胸部飞行肌从室温到 39℃(起飞温度)的时间缩短了 10 倍, 大大减少了

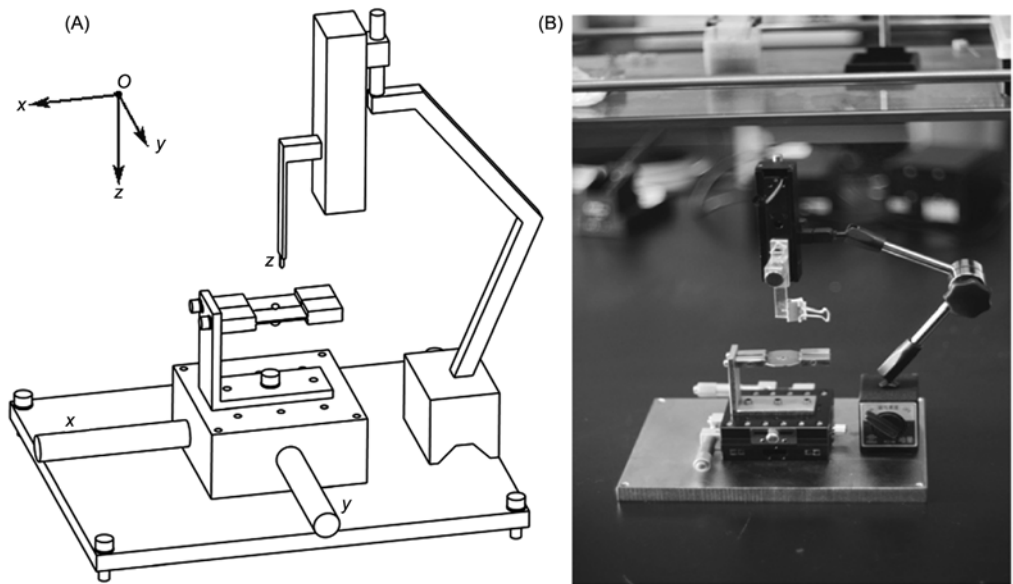


图 2 昆虫精细立体定位仪
(A) 设计概要图; (B) 实际装置

表 1 基于电刺激的昆虫机器人: 刺激位点、参数与诱导行为^{a)}

研究团队	载体	刺激位点	刺激参数 ¹	脉冲类型	诱导行为
康奈尔大学	烟草飞蛾 (<i>Manduca sexta</i>)	触角叶	3.5Vpp-20Hz-50%	正负交替	飞行触发
		背纵肌、背腹肌	3.5Vpp-50Hz-50%	正负交替	对侧转弯
		触角叶	3.5Vpp-50Hz-50%	正负交替	飞行终止
加州大学伯克利分校、密歇根大学和亚利桑那大学	甲虫 (<i>Cotinis texana</i>)	大脑头尾中线	3.2V-100Hz-20%	正负交替	飞行触发
		大脑头尾中线	3.2V-100Hz-20%	正负交替	飞行终止
		大脑头尾中线	3V-10Hz-20% ²	正负交替	抬头/俯冲 ³
		左前上侧肌	2V-100Hz-N/A	正向脉冲	右侧偏转
		右前上侧肌	2V-100Hz-N/A	正向脉冲	左侧偏转
	甲虫 (<i>Mecynorhina torquata</i>)	视叶(复眼内侧沿)	4V-100Hz-20%	正负交替	飞行触发
		左右视叶	6V, 单个脉冲	正向脉冲	飞行终止
		左前上侧肌	1.3V-100Hz-10%	正向脉冲	右侧偏转
		右前上侧肌	1.3V-100Hz-10%	正向脉冲	左侧偏转
		大脑头尾中线	2V-100Hz-20% ²	正负交替	抬头/俯冲 ³
东京大学	美洲蟑螂 (<i>Periplaneta Americana</i>)	触角基部	3V-500Hz-50%	方波	正向爬行
		左触角基部	3V-500Hz-50%	方波	右侧偏转
		右触角基部	3V-500Hz-50%	方波	左侧偏转
浙江大学	意大利蜜蜂(<i>Apis mellifera ligustica</i>)	视叶	4Vpp-40Hz-40%	正负交替	振翅触发
		触角基部	5V-100Hz-50%	正向脉冲	振翅中止

a) 1: 刺激参数格式为“脉冲电压幅值(V)/峰峰值(Vpp)-频率-占空比”, N/A 表示参数不详; 2: 每 3 s 刺激插入 3.3 s 间歇; 3: 刺激持续期间抬头上飞, 刺激间歇期俯冲

起飞预热时间; 该技术有助于节约载体能量, 提高昆虫机器混合系统的飞行距离和运载能力. 此外, SonicMEMS 实验室的研究人员采用 MAV 研究中较为成熟的动量重定向技术, 在载体尾部安装微型电动悬翼和微位移方向舵^[34], 实现了长距离、低能耗的飞行控制.

与 EMIT 类似, 康奈尔大学另一个研究小组则提出了将微流系统(micro fluidics)植入蛾蛹, 借助神经递质调控载体行为^[35]. 在飞蛾变态发育完成后, 采用电化学溶解和电活性注射技术将 L-谷氨酸、gaba-氨基丁酸等注入载体各位点, 以调控背纵肌及附近神经组织的代谢过程. 该方法通过对飞行肌肉代谢的可逆调控, 成功实现了振翅抑制、停止和恢复等运动行为. 该方法的主要缺陷在于, 系统最小响应时间以分钟为单位, 尚不能在实际系统中单独使用, 但可作为电刺激的有效补充. 进一步的研究工作包括设计更为精细的微流系统, 支持多种神经递质同时调控

肌肉代谢, 以缩短行为控制的响应时间.

综上所述, 对飞蛾机器人的研究较为系统完善. 选择实验室培养简便、生理研究成果较多的烟草飞蛾作为昆虫载体, 从神经电生理、飞行动力及肌肉代谢等多种角度开展了富有成果的探索. 系统能耗微小且远程活动能力优越的飞蛾机器人是研究的目标, 需要突破的问题包括两个方面: 其一, 如何实现多自由度的精确行为控制. 采用针对神经肌肉组织的电、光或者化学刺激, 以及机械扰动等手段精确控制载体的飞行行为, 以满足实际应用的需要, 这是下一阶段研究的难点; 其二, 如何减轻刺激系统重量、降低系统能耗是构建飞蛾机器人的必要前提, 有利于延长飞蛾机器人的活动距离, 扩大飞行覆盖范围. 现阶段多数刺激系统超过载体的实际负荷, 使用气球悬吊等方式, 势必降低飞蛾机器人的实用性.

(2) 甲虫机器人. 加州大学伯克利分校、密歇根大学和亚利桑那大学的联合研究小组以甲虫(*Cotinis*

texana, *Mecynorhina torquata*)为载体, 使用神经和肌肉电刺激实现了起飞、停止、左右转向、振翅频率调节等飞行行为的准确控制^[31,49]. 选择甲虫作为载体平台有 3 个方面的原因: 其一, 甲虫个体较大, 一般负重能力为自重的 20%~30%, 如 *C. texana* 和 *M. torquata* 分别背负 0.3 和 4.0 g 左右的刺激系统后, 仍可完成自由飞行; 其二, 甲虫依赖非同步肌控制振翅, 即神经元输出的电信号仅用于触发调节肌肉的飞行行为, 如启动、中止或者强度改变等, 运动神经信号的频率远低于振翅频率. 因此诱发甲虫产生复杂的飞行行为只需较低频刺激信号, 有利于降低系统能耗、提高可靠性; 其三, 甲虫实验室饲养条件较为成熟, 成本低廉.

实验过程中, 使用后前胸背板植入的电极作为参考地, 分别于脑部、视叶、前上侧肌植入刺激电极^[31]. 采用低能耗微处理器和微型电池搭建具备神经/肌肉刺激和无线通信功能的控制系统. 分别在自由飞行、木棒固定、电极固定、细线固定和平衡架 5 种束缚状态下进行了广泛的实验, 探索刺激模式与飞行行为之间的关系^[29]. 在两侧视叶或脑部, 以负向或正负切换的方波刺激可触发载体产生飞行动作, 而正向单个脉冲则中止其飞行行为. 进一步地, 使用 0.1~10 Hz 范围内的电刺激可用于调节 *C. texana* 的振翅频率, 产生类似于汽车油门的调节功能; 而对于 *M. torquata*, 则可观察到使用 100 Hz 的电刺激导致飞行高度变化. 另一方面, 通过前上侧肌肉的电刺激, 可使 75% 的载体触发对侧的偏转(均值为左转 20°, 右转 32.4°).

为了提高昆虫-刺激系统的可靠性, 该研究小组测试了类似于飞蛾机器人的蛹期电极植入术^[29,30], 尝试将电极、硅芯片、微导管插入蛹期甲虫(*Zophobas morio* beetles)的脑、胸、背部肌肉, 载体存活率分别高于 80%, 20%和 79%. 结果证明, 该技术可实现比成虫植入更为可靠的控制接口与刺激系统.

甲虫机器人是当前控制功能最为齐全、最接近实用的昆虫机器混合系统. 然而, 由于载体运动神经系统的刺激信号传递通路还没有明确研究成果, 如何实现更为精确的行为控制仍有待于进一步探索, 包括神经冲动的电刺激诱发机制、神经电传导通路以及飞行肌肉收缩与振翅行为的对应关系等科学问题. 另外, 植入方式和刺激系统的设计需以降低载体刺激损害、提高刺激精度为研究目标, 从植入操作、器

件设计以及刺激方法等多个方面进行突破.

(3) 蜜蜂机器人. 蜜蜂是生物学研究常用的模式昆虫, 其具有优越的飞行与导航能力, 饲养条件简单且来源充足, 是昆虫机器混合系统的理想载体. 研究蜜蜂机器人, 除了昆虫飞行机器人共有的科研意义与应用前景外, 还具有独特的方法学价值. 行为精确可控的蜜蜂机器人可用于确认脑区特定神经元、记录神经元状态以及分析神经回路与行为状态间的相关性. 此外, 还可用于研究导航、记忆、授粉和酿蜜等昆虫生物学的热点问题.

与甲虫和烟草飞蛾相比, 蜜蜂个体较小, 其脑区宽度约为 5 mm, 电极固定和植入操作更为困难. 使用直角坐标进行位点的精确度量, 采用螺旋测微推进器耦合的机械滑台, 实现 X 轴和 Y 轴坐标值的精确定位, 最小刻度达 10 μm ; Z 轴使用步进电机耦合的推进器实现电极精细埋植, 最小推进精度为 10 μm . 该昆虫立体定位装置分辨率为 10 μm ×10 μm ×10 μm , 高于采用核磁共振成像系统重建的蜜蜂脑图谱基准分辨率(15.6 μm ×15.6 μm ×30 μm)^[53], 能准确定位视叶、蘑菇体、触角叶等核团和胸腹部肌肉组织. 装置高度为 14.5 mm, 可在体视显微镜下完成蜜蜂固定及电极植入等一些系列实验操作^[54]. 图 2 所示为昆虫立体定位仪.

以意大利蜜蜂(*Apis mellifera ligustica*)为载体, 首先实现了固定状态下的蜜蜂飞行行为诱导与控制. 在大脑视觉中枢(图 3)植入直径 65 μm 微丝电极后, 导入 40 Hz 的 4 V 方波脉冲. 在长度为 750 ms 的正反电压刺激下, 载体在均值为 1.2 s 的刺激后启动振翅, 平均持续时间为 9.35 s. 当刺激电压超过 6 V 时, 振翅立即终止^[55]. 根据刺激-行为实验数据, 课题组建立了刺激脉冲与翅膀振动之间的定量相关模型, 以分析两者的映射关系.

蜜蜂最大负载与自重相当, 约为 1 g. 基于无线能量耦合方法的控制芯片, 其原理如图 4 所示. 无线传输的控制命令解调后由控制器生成刺激指令串, 接收到的能量经过整流和稳压后输出到微丝电极. 整个系统重 0.2 g, 体积为 0.2 mm×1 mm×1 mm. 采用柱状螺旋天线, 线径 0.1 mm, 直径 4 mm. 该系统输出 4.5 V 刺激电压, 用于测试蜜蜂机器人自由飞行状态下的行为控制指令, 为实现实用化的蜜蜂机器人奠定了关键技术基础.

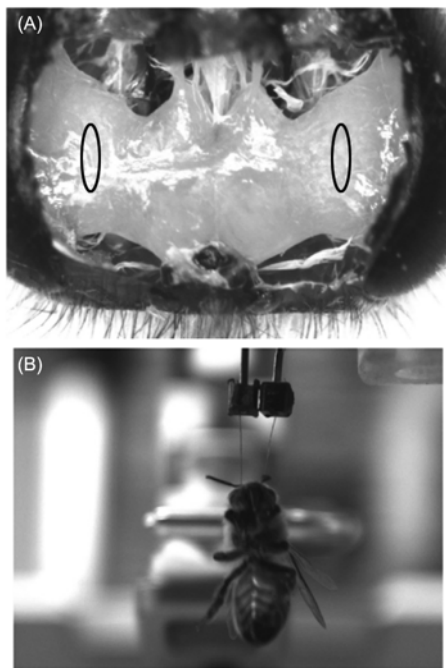


图 3 蜜蜂机器人(固定状态)
(A) 微电极植入位点(圆圈内); (B) 刺激实验

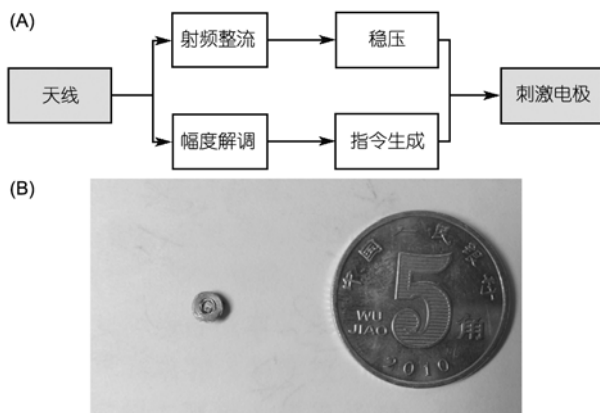


图 4 无线能量耦合的神经刺激芯片
(A) 原理图; (B) 芯片体积

受到个体大小的限制, 蜜蜂机器人在系统设计方面存在较大的约束和挑战. 除刺激位点选择定位和刺激参数设定等问题外, 还需考虑如何利用微机电加工技术制作载体负载范围内的刺激记录与通信系统, 以实现蜜蜂自由飞行行为的精确可控与神经元发放电的无线记录. 此外, 因最大负载重量仅为 1 g, 蜜蜂机器人无法采用常规电池供电方案, 需

要研究能量获取及无线耦合方法, 优化刺激通信系统能耗.

2 研究框架与挑战

总体而言, 昆虫机器混合系统的研究仍处于起步阶段. 虽有蟑螂、飞蛾及甲虫机器人等接近实用的研究成果, 但在昆虫运动相关的神经生理机制、行为刺激方法、电极组织接口、刺激控制微系统以及无线数据传输等方面存在着大量的研究课题. 本节将以“构建精确可控的昆虫机器混合系统及其群组”为研究目标, 分析该领域的研究框架(图 5), 逐项讨论需要突破的科学和工程问题.

2.1 昆虫外部刺激及运动行为相关的神经机理

昆虫大脑与神经节对外部刺激的整合投射, 以及运动行为控制相关的神经生理机制是构建精确、可控的昆虫机器混合系统的理论基础和技术前提. 昆虫视觉传感器、化学传感器、机械传感器和磁传感器等感受外部刺激, 经感觉神经元传入脑或胸神经节, 经运动中枢整合产生控制指令, 再由胸神经节传导至运动神经元, 控制肌肉群产生相应的运动行为^[56]. 一般认为, 昆虫神经系统比较简单, 其大脑神经节所含神经元数目大大少于其他较为高等的动物大脑, 却仍能敏锐感知微弱的外部刺激, 精巧控制身体的运动行为. 有关昆虫大脑对外部刺激的整合机制、刺激与所诱导的运动行为间的相互关系等神经机制研究还比较有限, 当前仅对少数昆虫(如飞蝗、蜜蜂等)有一些定性及定量的研究成果^[1].

针对昆虫机器混合系统的研制需求, 有待深入分析外界刺激诱导昆虫产生逃避、趋向等运动行为的神经机理、探明运动相关的神经信号传导通路并摸索神经电信号的编解码规律. 主要包括: ① 外界刺激诱导机制: 针对特定的输入刺激, 采用合适的研究方法, 采集昆虫脑部特定中枢、体神经索等相关区域的“刺激-区域-信号”三元数据组, 探明外部刺激传入、中枢处理及运动信号传出等神经控制信号传导通路; ② 神经通路研究方法: 分析昆虫载体特性, 结合成像和电生理等实验手段, 发展记录神经元活动和载体行为数据的新方法与新手段, 以获取新型实验数据, 用于机制分析与模型计算; ③ 电信号编解码规律: 基于载体神经元电信号、肌电信号和外

部行为数据, 研究刺激诱导的神经元信号发放规律, 分析运动控制相关指令的特征及时空特性, 为昆虫机器混合系统精确控制指令的设定提供依据。

2.2 昆虫行为控制与刺激方法

用于载体行为诱导与控制的刺激方法主要有电刺激、光诱导和代谢调控等 3 种。第一种情况, 在触角或视叶等位点施加适当的电刺激, 使载体产生逃避反应从而实现运动触发; 或采用单个正向脉冲, 迫使载体停止运动行为; 或在前上侧肌施加电刺激, 扰动肌肉收缩节律, 实现朝向对侧的运动偏转; 第二种情况则利用昆虫的趋光性, 在载体视觉感知范围内, 采用方向可变的光刺激, 诱导载体飞行偏转; 第三种情况, 使用神经递质调控载体飞行肌的新陈代谢, 实现振翅抑制、停止和恢复。

就昆虫行为控制与刺激方法而言, 需要考虑刺激位点、刺激方式以及刺激模式等 3 个问题: ① 刺激位点: 根据外部刺激诱导载体产生的行为反应规

律, 选择人工刺激的输入位点, 即一定体积的特定神经或肌肉组织。刺激位点的定位与选择是决定昆虫机器混合系统研制成功与否的关键问题, 需要结合神经生理机制和载体植入实验反复测试后确定; ② 刺激方式: 针对预设的控制行为和刺激位点, 选择响应灵敏、疲劳度小、重复性高的刺激方式。当前较为通用的神经/肌肉电刺激导致载体行为反应的机理尚不明确, 并存在刺激范围过大、易于导致载体疲劳等缺陷。因此, 发展具备高时空分辨特性的新型刺激方式, 如光感基因调控技术^[57-60]等, 将会成为突破这些瓶颈的解决方案; ③ 刺激模式: 针对给定的刺激位点与刺激方式, 亟需建立对应特定载体行为的刺激输入特征模型和刺激-响应量化模型, 以实现载体行为的精确控制。

2.3 电极-组织接口技术

当前昆虫机器混合系统主要使用铂和钨等材料制成的微丝电极, 仅用于将电信号传导到刺激位点,

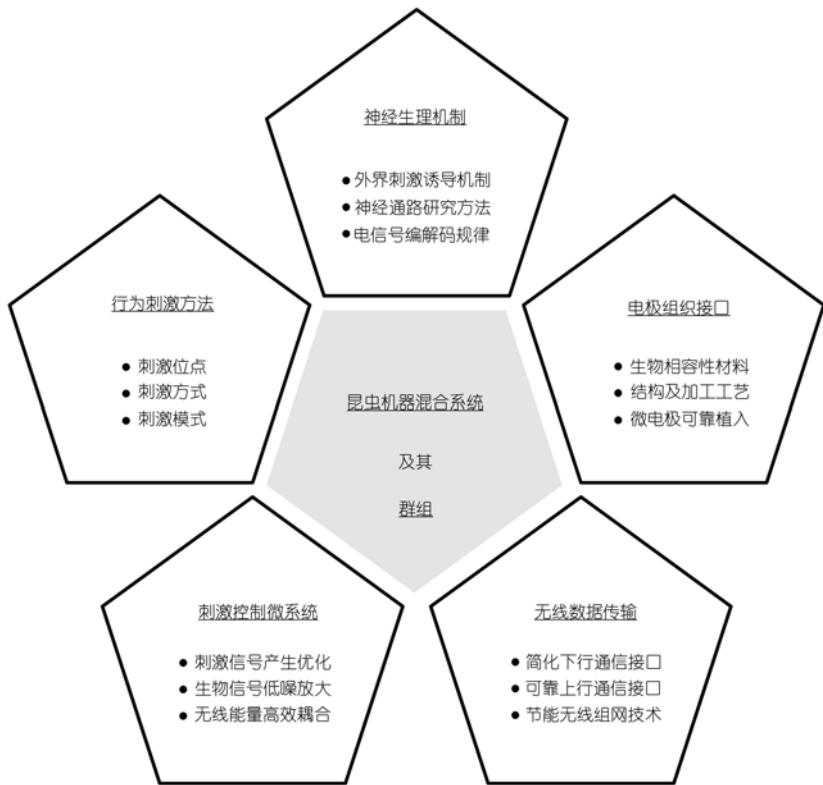


图 5 昆虫机器混合系统及其群组研究框架

可基本满足实验需求. 电极植入操作则有成虫期植入与变态早期植入两种. 前者操作略为简单, 但植入手术对载体损伤较大; 此外, 由于植入电极与体表外骨骼使用蜂蜡等黏合剂固定, 易于松动, 因而可靠性较低. 变态早期植入是为了克服上述缺陷而发展出来的新型电极植入技术. 在载体变态发育过程中, 电极与组织逐渐结合, 手术创口愈合良好, 生理排斥作用轻微, 电极可承受较大的外力牵拉.

电极-组织接口是昆虫机器混合系统的核心组成部分. 因此, 研究新型微电极和可靠植入技术, 构建稳定、可靠、长效的电极-组织接口是昆虫机器混合系统研究的重要问题. 电极材料及制作工艺是影响电极-组织接口稳定性与可靠性的关键因素. 植入昆虫体内的电极需耐受材料-组织界面发生的电化学反应. 更重要的是, 需要具有较好的生物相容性, 才能长期记录神经电信号、输入稳定的刺激电流, 并且降低因体内免疫反应所导致的载体损伤.

因此, 在现有工作基础上, 应进一步研究长效、稳定、灵敏度高、载体损伤轻微的新型微电极, 发展操作简单、重复性好的电极植入技术. 需要突破: ① 生物相容性电极材料: 关注电极尖端及支架的各层材料构成, 包括如何利用纳米技术等制备新型涂层材料, 避免胶质细胞增生及电荷聚集导致的神经细胞坏死, 提高生物相容性, 降低载体免疫反应导致的包裹与炎性反应, 增强电极耐受腐蚀和分解的能力, 以保证微电极长效稳定工作; ② 电极结构及加工工艺: 采用或研究纳米机电系统(nano-electro-mechanical system, NEMS)和微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)加工工艺, 设计不同尺度的微电极及电极阵列, 制备精细牢固的电极前端、衬底及支架结构, 以支持可动态配置的刺激与记录; ③ 微电极可靠植入技术: 根据昆虫载体繁育过程中各阶段的生理特点, 选择合适的植入时间, 制定完备的操作流程, 建立电极植入操作对神经及组织损伤的定量评价模型, 以实现耐受拉扯的紧密电极-组织接口并获得输入阻抗等系统参数的准确计算方法, 也是构建电极-组织接口需要重点突破的技术难题.

2.4 刺激控制微系统

刺激与控制微型模块是昆虫机器混合系统的核心组件, 主要用于接收上位机命令、记录传感输入、产生刺激脉冲以及发送载体状态至上位机等. 该模块属

于资源极端受限的嵌入式计算系统, 采用微型纽扣电池供电, 重量为几百微克到几十克之间, 以便于载体自由运动. 当前昆虫机器混合系统原型的刺激控制系统具备两个特点: 其一, 通常只具有单向功能, 即无线接收配置命令, 产生刺激脉冲; 其二, 需要借助气球等外力减轻载体负重. 此外, 大量昆虫载体, 如烟草飞蛾, 自重仅为 1~10 g, 无法支撑刺激系统负载而自由飞行.

研究精确可控的昆虫机器混合系统, 其刺激控制微系统应具备能耗低、重量轻、输出精确度可调、双向通信等特性, 需要解决节能刺激信号产生、低噪信号放大及无线能量耦合等 3 个问题: ① 刺激信号产生: 研究低能耗和精确度可配置的刺激信号产生器, 刺激信号产生器采用基于电容并联网络的 CMOS 模数转换器, 可大幅降低模块功耗; 在此基础上, 根据昆虫载体的刺激需求进行相关的优化设计将是刺激信号产生器设计的努力方向; ② 神经/肌肉信号放大: 设计低噪声的神经/肌肉信号放大器, 用于采集和记录神经/肌肉细胞的动作电位, 研究昆虫神经信号 CMOS 放大器的热噪声与闪烁噪声抑制方法, 并考虑如何消除组织-电极界面溶液反应产生的偏置电势; ③ 无线能量耦合: 基于线圈电磁耦合技术, 研究充分利用射频能量的高效能量耦合方法, 实现发射频率较低、能量损耗优化和天线结构简单的无线能量传输接口, 以替代电池供电, 达到降低系统负载重量和优化系统能耗的设计目的.

2.5 无线数据传输

当前原型系统中, 无线通信接口基于 ZigBee 等成熟技术, 存在通信距离有限、接口模块过重、带宽过窄等缺陷. 仅通过上位机向昆虫机器混合系统无线配置刺激指令的单向交互模式, 无法记录载体的神经肌肉信号; 视野范围内的载体运动状态, 则主要依靠摄像机跟踪监测. 显然, 此交互模式无法构成闭环控制回路, 实现载体行为的精确控制. 建立昆虫机器混合系统与上位机的有效反馈, 需要可靠节能的无线通信协议提供技术支持.

考虑到昆虫机器混合系统的负载能力与计算资源有限等特点, 低复杂度、高可靠、低能耗的无线组网技术成为昆虫机器混合系统走向实用的关键技术基础. 有必要研究昆虫机器混合系统及上位机的特殊无线互联网络, 实现刺激控制参数配置、神经肌肉

数据记录以及昆虫机器混合系统间通信等重要系统功能,以构建自由运动状态下的昆虫机器混合系统及其群组。

(1) 低复杂度下行通信接口。基于电磁耦合技术,研究能量耦合、数据传输和时钟同步一体的下行通信方法;以简单谐振回路为基本模块,设计耐受生物体及环境干扰的调制解调电路,实现低复杂度的下行通信接口,用于接收外部数据传入昆虫机器混合系统。

(2) 高可靠上行通信接口。研究神经刺激信号与载体运动状态的映射关系,进而定义载体控制状态并获取记录数据传输负载,以选择载波频率,确定调制方式;研究提高上行通信接口谐振回路品质因数的优化方法以及变化频率补偿策略,提高接口可靠性。

(3) 低能耗无线组网技术。研究面向昆虫机器混合系统群组的无线组网技术,在上下行数据通信接口调度、媒体访问控制、数据路由等协议各层优化传输能耗和传输可靠性等系统参数。特别地,针对该无线数据传输接口的跨层低能耗设计策略是极为重要的研究问题,有助于降低散热,并提高系统可靠性。

如何缩小传输天线的体积、提高动力源的能量重量比、消除系统噪音是群组系统实现需要克服的重要问题。研制触角封装的天线、高能量比的动力源和低能耗的数据处理方法将成为解决以上问题的方法。进一步地,若要关注特殊领域的重要应用,还应考虑数据传输实时性与安全性等更为严格的设计约束,才能有效满足关键领域的重要需求。

3 总结

昆虫机器混合系统属于较为典型的多学科交叉、问题驱动的研究领域,涉及生物、信息、材料、机械、控制等多个学科,需要不同领域的研究人员协作攻关。本文定义了昆虫机器混合系统的概念,分析了昆虫机器混合系统的主要特点,并按运动方式分类评述了现有研究进展,进而提出了该领域的研究框架,从神经生理机制、行为刺激方法、电极组织接口、刺激控制微系统及无线数据传输等五个方面讨论了构建实用昆虫机器混合系统及其群组需要突破的研究

问题和研究挑战,展现了该领域的研究空间。

通过植入电极与刺激控制模块,有效利用载体平台天然的运动能力,构建性能卓越、控制精确的昆虫机器系统,是近年来出现的全新研究领域,具有重要的科学意义和应用前景。在构建这种“半人工”系统的过程中,将深化人们对昆虫神经生理和运动系统等基础问题的研究。此外,这类系统还能探索这些科学问题提供前所未有的有力工具,有助于揭开它们的神秘面纱,或将让研究人员触摸到生命科学及仿生工程难题的本质。

与人工仿生机器人相比,研究昆虫机器混合系统为实现远距离、低能耗的微型飞行器提供了更为有效的实现途径。昆虫载体在自然进化过程中演化而来的运动和感知能力是现有仿生微型机器人无法突破的技术瓶颈,基于神经刺激方法构建精确可控的昆虫机器混合系统将为特种经济昆虫利用、国防安保等领域提供高性能的实用平台。

值得一提的是,昆虫机器人包含了昆虫机器混合系统与仿昆虫机器系统两大差异巨大的组成部分。当前仿昆虫机器人采用人造微型器件实现,仅能模仿昆虫感知与运动等简单功能。与昆虫机器混合系统相比,存在显著差距。然而,随着智能材料、神经科学、力学、组织工程、控制科学以及人工智能等理论与技术的发展,两者的区别势必日渐缩小,不断融合。人们正把昆虫传感器、神经系统、运动系统和人造微型器件集成为精确可控、运动性能优异且兼具生物智能与机器智能的昆虫机器人系统。

另外,昆虫群体所体现的智能行为与更为高级的脊椎动物的行为高度相似,这些群体行为是更为复杂的科学问题。蜜蜂和蚂蚁等具有社会特性的昆虫,其个体之间如何通讯(如蜜蜂的舞蹈语言),其群体如何实现完整的控制与反馈,最终形成自然的群体智能的组织,也是研究昆虫机器混合系统的初始动力之一。本文主要关注如何诱导和控制单个昆虫的行为,研发执行人工指令的昆虫机器混合系统个体。在此基础上,通过通信技术组合形成群组。如何利用昆虫的群体智能行为,实现混合机器智能、生物个体智能以及群体智能的群组系统,也是非常有价值的课题。

参考文献

- 1 Burrows M. The Neurobiology of an Insect Brain. New York: Oxford University Press, 1996
- 2 Sane S P. The aerodynamics of insect flight. *J Exp Biol*, 2003, 206: 4191–4208
- 3 Sane S P, Dieudonné A, Willis M A, et al. Antennal mechanosensors mediate flight control in moths. *Science*, 2007, 315: 863–866
- 4 Hewish M. A bird in the hand: minnature and micro air vehicles challenge conventional thinking. *Jane's International Defense Review*, 1999, 32: 22–28
- 5 Pines D J, Bohorquez F. Challenges facing future micro-air-vehicle development. *J Aircraft*, 2006, 43: 290–305
- 6 Tanaka H, Shimoyama I. Forward flight of swallowtail butterfly with simple flapping motion. *Bioinspir Biomim*, 2010, 5: 026003
- 7 Birch J M, Dickinson M H. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, 2001, 412: 729–733
- 8 Steltz E, Avadhanula S, Fearing R S. High lift force with 275 Hz wing beat in MFI. In: Saxena A, Oritiz A, Ma S G, eds. *IEEE Intelligent Robots and Systems*. San Diego, 2007. Portland: IEEE, 2007. 3987–3992
- 9 Entomopter Project, <http://angel-strike.com/entomopter/EntomopterProject.html>
- 10 Sirirak T N P, Tai Y C, Ho C M, et al. A palm-sized electrically powered ornithopter. In: Howard A M, Sejnowski T J, eds. *NASA/JPL workshop on biomorphic robotics*. Pasadena, California, 2000. Cambridge: MIT press, 2007. 14–27
- 11 Cox A G, Monopoli D M, Goldfarb M, et al. The development of elastodynamic components for piezoelectrically actuated flapping Micro-Air Vehicles. *J Intell Mater Syst Struct*, 2002, 13: 611–615
- 12 Croon G C H E, Clerq K M E, Ruijsink R, et al. Design, aerodynamics, and vision-based control of the DelFly. *Int J Micro Air Vehicles*, 2009, 1: 71–97
- 13 侯宇, 方宗德, 孔建益, 等. 扑翼节律运动的产生与控制. *中国机械工程*, 2006, 17: 2411–2414
- 14 Decan Z, Whenyuan C, Songlin P, et al. Modeling and simulation study of insect-like flapping-wing MAV. *Adv Rob*, 2006, 20: 807–824
- 15 左德参, 陈文元, 彭松林, 等. 基于 MEMS 技术的扑翼式微飞行器的研究. *系统仿真学报*, 2005, 17: 1505–1508
- 16 郑祥明, 昂海松. 基于多传感器技术的微型飞行器智能组合导航技术研究. *宇航学报*, 2007, 28: 1185–1189
- 17 曾锐, 昂海松, 梅源, 等. 扑翼柔性及其对气动特性的影响. *计算力学学报*, 2005, 22: 750–754
- 18 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
- 19 Breugel F V, Regan W, Lipson H. From insects to machines. *IEEE Rob Autom*, 2008, 15: 68–74
- 20 Bermudez F G, Fearing R. Optical flow on a flapping wing robot. In: Tan J D, Walker I, Otte M W, eds. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, 2009. Portland: IEEE, 2009. 5027–5032
- 21 Whitney J P, Wood R J. Aeromechanics of passive rotation in flapping flight. *J Fluid Mech*, 2010, 660: 197–220
- 22 Bozkurt A, Gilmour J R F, Sinha A, et al. Insect-machine interface based neurocybernetics. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 1727–1733
- 23 Bozkurt A, Gilmour R, Stern D, et al. MEMS based bioelectronic neuromuscular interfaces for insect cyborg flight control. In: Chandralalim H, Bhav S A, eds. *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Tucson, USA, 2008. Portland: IEEE, 2008. 160–163
- 24 Bozkurt A, Gilmour R F, Lal A. Balloon-assisted flight of radio-controlled insect biobots. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56: 2304–2307
- 25 Bozkurt A, Lal A, Gilmour R. Electrical endogenous heating of insect muscles for flight control. In: Akay M, Babilioni F, Carmena J, eds. *Annual International IEEE/EMBS Conference*. Vancouver, BC, Canada, 2008. Portland: IEEE, 2008. 5786–5789
- 26 Bozkurt A, Lal A, Gilmour R. Radio control of insects for biobotic domestication. In: He B, Kim Y M, Pan X C, eds. *Annual International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*. Antalya, 2009. Portland: IEEE, 2009. 215–218
- 27 Bozkurt A, Paul A, Pulla S, et al. Microprobe microsystem platform inserted during early metamorphosis to actuate insect flight muscle. In: Suzuki Y, Burdett J S, eds. *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Hyogo, 2007. Portland: IEEE, 2007. 405–408
- 28 Mavoori J, Millard B, Longnion J, et al. A miniature implantable computer for functional electrical stimulation and recording of neuromuscular activity. In: Lian Y, Bhattacharwa S, eds. *IEEE International Workshop on Biomedical Circuits and Systems*. Singapore,

2004. Portland: IEEE, 2004. S1/7/INV-S1/13-16
- 29 Sato H, Berry C W, Casey B E, et al. A cyberorg beetle: insect flight control through an implantable tetherless microsystem. In: Chandralalim H, Bhav S A, eds. IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Tucson, Arizona, USA, 2008. Portland: IEEE, 2008. 164–167
- 30 Sato H, Berry C W, Maharbiz M M. Flight control of 10 gram insects by implanted neural stimulators. In: Spangler L C, Turner K L, Sulouff B, eds. Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. Hilton Head Island, South Carolina, 2008. Portland: IEEE, 2008. 90–91
- 31 Sato H, Berry C W, Peeri Y, et al. Remote radio control of insect flight. *Front Integrative Neurosci*, 2009, 3: 1–11
- 32 Sato H, Peeri Y, Baghoomian E, et al. Radio-controlled cyborg beetles: a radio-frequency system for insect neural flight control. In: Hierold C, Sarro L M, eds. IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Sorrento, Italy, 2009. Portland: IEEE, 2009. 216–219
- 33 Tsang W M, Aldworth Z, Stone A, et al. Insect flight control by neural stimulation of pupae-implanted flexible multisite electrodes. In: Locascio L, ed. International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences. San Diego, California, USA, 2008. Portland: IEEE, 2008. 1922–1924
- 34 Pulla S, Lal A. Insect powered micro air vehicles. In: Ikeuchi K, Lynch K, Chatila R, eds. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan. 2009. Portland: IEEE, 2009. 3657–3662
- 35 Chung A J, Erickson D. Engineering insect flight metabolics using miniature stage implanted microfluidics. *Lab on a Chip*, 2008, 9: 669–676
- 36 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
- 37 张昊, 成佳伟, 肖世旭, 等. 大壁虎运动体态及其与步态相关性的实验研究. *自然科学进展*, 2009, 19: 1365–1371
- 38 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
- 39 Holzer R, Shimoyama I. Locomotion control of a bio-robotic system via electric stimulation. In: Giralt G, Fukuda T, Hebert M, eds. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, Grenoble, France, 1997. Paris: IEEE, 1997, 1514–1519
- 40 Seeling J D, Chiappe M E, Lott G K, et al. Two-photon calcium imaging from head-fixed *Drosophila* during optomotor walking behavior. *Nature Methods*, 2010, 7: 535–544
- 41 槐瑞托, 苏学成, 杨俊卿, 等. 动物机器人遥控操作导航控制方法. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18: 352–359
- 42 王文波, 戴振东. 动物机器人的研究现状与发展. *机械制造与自动化*, 2010, 39: 1–7
- 43 谢合瑞, 郭策, 戴振东. 恒流多通道动物机器人遥控刺激系统的研制. *现代电子技术*, 2009, 32: 68–71
- 44 郭策, 蔡雷, 谢合瑞, 等. 大壁虎脚趾运动和感觉的分区分级调控. *科学通报*, 2009, 54: 959–965
- 45 李海鹏, 戴振东, 谭华, 等. 壁虎动物机器人遥控系统. *计算机技术与发展*, 2008, 18: 16–19
- 46 Feng Z, Chen W, Ye X, et al. A remote control training system for rat navigation in complicated environment. *J Zhejiang University Science A*, 2007, 8: 323–330
- 47 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: 830–835
- 48 Zhang Y, Sun C, Zheng N, et al. An automatic control system for ratbot navigation. In: Feng W, Hariri S, Zhang H, eds. IEEE/ACM International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Hangzhou, China, 2010. Portland: IEEE, 2010
- 49 Maharbiz M M, Sato H. Cyborg beetles: merging of machine and insect to create flying robots. *Sci Am*, 2010, 303: 94–99
- 50 Kloppenburg P, Camazine S M, Sun X J, et al. Organization of the antennal motor system in the sphinx moth *Manduca sexta*. *Cell Tissue Res*, 1997, 287: 425–433
- 51 Willis M A, Arbas E A. Odor-modulated upwind flight of the sphinx moth, *Manduca sexta* L. *J Comp Physiol A*, 1991, 169: 427–440
- 52 Midle J, Gronenberg W, Strausfield N. The head-neck system of the blowfly calliphora: functional organization and comparisons with the sphinx moth *Manduca sexta*. *The Head-Neck Sensory-Motor System*, A. Berthoz. New York: Oxford University Press, 1992. 64–70
- 53 Haddad D, Schaupp F, Brandtm R, et al. NMR imaging of the honeybee brain. *J Insect Sci*, 2004, 4: 7
- 54 Wang S, Zheng N, Zhao H, et al. A stereotaxic instrument for precise localization of honeybee brain. 33rd Annual International Conference

- of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, submitted
- 55 Bao L, Zheng N, Zhao H, et al. Flight control of tethered honeybees using neural electrical stimulation. Accept, to appear in the Proc the IEEE EMBS Conference on Neural Engineering. Cancun, Mexico, 2011
- 56 Klowden M J. Physiological Systems in Insects. 2nd ed. Beijing: Academic Press & Science Press, 2007
- 57 Aravanis A M, Wang L, 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: 143–156
- 58 Zhang F, Wang L, Brauner M, et al. Multimodal fast optical interrogation of neural circuitry. Nature, 2007, 446: 633–641
- 59 Gunaydin L A, Yizhar O, Berndt A, et al. Ultrafast optogenetic control. Nature Neurosci, 2010, 13: 387–392
- 60 Henderson J M, Federici T, Boulis N. Optogenetic neuromodulation. Neurosurgery, 2009, 64: 796–804

Research Progress and Challenges in Cyborg Insects

ZHENG NengGan¹, CHEN WeiDong^{1,2}, HU FuLiang³, BAO Li^{1,4}, ZHAO HuiXia³,
WANG Shen^{1,4}, ZHENG XiaoXiang^{1,4,5} & WU ZhaoHui²

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

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

3 College of Animal Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4 College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

5 Key Laboratory of Biomedical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

As novel insect-machine systems, cyborg insects are constructed of control modules and insects. Inheriting excellent kinetic performance from the insect platforms, these new robots are characterized by simplicity, invisibility and low power. This paper proposes the definition of cyborg insects and discusses their main features firstly. With the help of our research experience concerning cyborg honeybees, we review the main results and discuss the research challenges in a research framework including neural mechanisms, stimulus methods, electrode-tissue interface, micro stimulus systems and wireless data transmission with limited resources. In addition, we discuss the research trends and potential applications and envision the novel cyborg systems combining the biological intelligence and artificial intelligence in the forthcoming future.

insect cyborgs, micro air vehicle, insect machine interface, micro stimulus system, early metamorphosis insertion technology

doi: 10.1360/052011-717