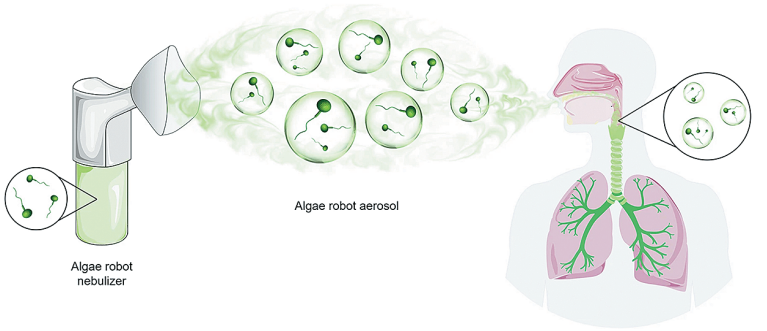
话题主持:本报记者 马亚宁

生物混合机器人,听上去很酷!不过,它并非科幻作品中的虚构的概念,而是已在现实中迈出坚实步伐的前沿科研成果。从美国国防高级研究计划局(DARPA)早期布局的可控半机械昆虫,到如今美国康奈尔大学开发出的由真菌和计算机组成的新型生物混合机器人,再到中国科学家受鸟类启发研制的带有生物混合感知系统的扑翼机器人,等等。越来越多的生物混合机器人,不断试探着碳基生命与硅基生命融合的边界,展现出不容忽视的巨大潜力和未来前景。



■ 雾化器将绿藻机器人雾化为气溶胶液滴,吸入后实现肺部分布

生物混合机器人

未来医疗的活体革命

碳基与硅基破界融合

华东师范大学生命科学学院医学合成生物学课题组 教授 叶海峰 副教授 管宁子

当机器人扭起秧歌,当智能驾驶重塑出行,我们正迎来一个“拟人之形,仿人之智”的机器人时代。然而,在这片由钢铁与代码构筑的疆域之外,另一种新型智能体正在悄然兴起——生物混合机器人。它们打破碳基生命与硅基生命的古老界限,开启一个有机与无机、生命与机器深度融合的新纪元。

什么是生物混合机器人

想象一下,如果机器人能像生物一样自我修复,像细胞一样感知环境,同时又能像计算机一样精准执行任务——这就是生物混合机器人的魅力所在。科学家们将活体生物组件(如细胞、组织、微生物等)与人工非生物组件(如电子芯片、纳米材料、机械结构等)巧妙结合,创造出一种融合自然与人工优势的新型智能系统。

这种融合绝非简单的拼凑。生物部分赋予了机器人独特的“生命力”:敏锐的感知、高效的能量转换(如光合作用)、卓越的自我修复机制、精密的生化功能(如药物合成和免疫调节)等自然进化赋予的神奇能力;而机器部分则提供了精准控制、程序化执行、高度标准化与可编程特性、对极端环境耐受、强大信息处理和外部响应等传统优势。两者的结合产生了1+1>2的效果,其终极目标是实现超越传统机器人或纯生物系统性能极限的新一代智能体,代表着未来智能技术发展的重要方向。

为何要发展生物混合机器人

在人工智能大模型迅猛发展、具身智能方兴未艾的当下,为何还要探索生物混合机器人的新路径?答案就藏在大自然40亿年进化的智慧中。

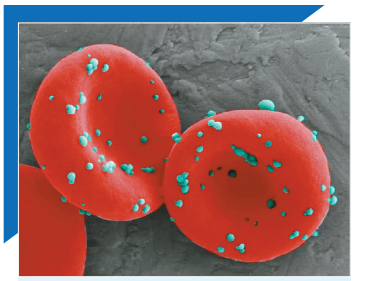
再精密的机械臂也无法像人类手臂那样自我修复伤口,再先进的传感器也难以媲美细胞对生化信号的敏锐感知。这些“生命特质”正是传统机器人难以逾越的生理瓶颈。与此同时,纯生物系统也具有局限性。免疫细胞虽然能精准识别病原体,却无法像机器那样被精确控制;微生物虽然能适应复杂环境,却难以在极端复杂环境中稳定工作。而生物混合机器人将生命的神奇能力与机器的精准控制完美结合——生物组件赋予机器“生命力”,而人工系统则为生物功能装上“方向盘”和“加速器”。

生物混合机器人代表的不只是一项新技术,更是一种全新的思维方式——它模糊了生命与非生命的界限,正在开启一个“半机械生命”的新纪元。在这个纪元里,治疗疾病可能就像指挥一支体内微型医疗队,环保清洁或许只需投放一群智能微生物。这种“生命+机器”的跨界组合,正在创造传统技术无法实现的奇迹。

展望未来:机遇与挑战并存

生物混合机器人与传统仿生机器人存在本质区别:后者更像博物馆里的精致蜡像,仅模仿生物外形,而前者真正融合了生命系统与精密人工元件的核心特征。这种突破性的“半机械生命体”兼具机械的精确可控性和生物体的环境适应性及自我修复能力,开创了智能系统的新范式。

生物混合机器人的发展仍面临不少挑战,构成了该技术从实验室走向实际应用必须跨越的技术鸿沟。当前绝大多数生物混合机器人严重依赖外部指令控制,自主决策能力不足。以医疗应用场景为例,“细胞医生机器人”常在复杂人体环境中“迷路”,需外部磁场或光信号指引,且缺乏机体的自主判断和应急机制。生物组织与电子元件之间的接口问题使系统集成面临严峻挑战,犹如两个语言不通的人密切协作,难以实现无障碍“对话”。此外,生物混合机器人在复杂生理环境中的持久可靠性有待提升。要实现从“遥控玩具”到“智能生命体”的飞跃,必须在新型生物电子接口材料、仿生决策算法、动态环境适应机制等关键技术上取得突破。



■ 治疗性纳米颗粒锚定在红细胞表面

在伦理规范层面,这种介于生命与非生命之间的存在也引发了深刻思考。全球科学家与政策制定者积极构建监管框架,在推动科技进步的同时确保安全可控。我国《生物技术研究开发安全管理条例》要求活体机器人研究备案以防滥用。条例特别规定,具有自主移动能力的生物混合机器人必须植入不可逆的失效机制。全球科研国家也达成共识,禁止开发可自我复制的生物混合系统。这种“促进突破性研究的同时,确保技术发展符合人类根本利益”的平衡发展理念,正在指导各国建立更完善的生物混合技术治理体系。

展望未来,生物混合机器人技术的发展前景令人充满期待。随着合成生物学、纳米技术和人工智能的深度交叉融合,我们或将在不久的将来见证新一代智能生物混合机器人的诞生。可以预见,未来医生开处方或许不再是药丸,而是“释放一群机器人”;癌症治疗不再依赖毒副作用巨大的化疗,而是让特制细菌“定点爆破”;糖尿病患者不必频繁注射胰岛素,只需佩戴红光手环,光一照胰岛素便自动生成。我们正站在医疗技术的新门槛,而生物混合机器人,极有可能成为开启未来健康新时代的关键钥匙。

精彩案例

科学家已开发出多种类型的生物混合机器人,利用不同的“生物动力”或“控制方式”实现多样化功能。

■ 会游泳的“药物快递员”

加州大学圣地亚哥分校的研究团队开发了一种以天然游动单细胞绿藻为动力源的微型机器人。这些直径仅10微米的“游泳健将”自带螺旋桨般的鞭毛,能够在液体环境中自主游动。研究人员在其表面装载了纳米级的抗生素药物,通过喷雾送入肺炎小鼠的肺部。这些微藻机器人能够精准抵达感染区域,局部杀菌,治疗效果显著优于传统药物。更重要的是,它们不会引发强烈的免疫排斥,能在体内长期驻留。这项技术即将进入临床试验,未来有望用于治疗肺炎、哮喘乃至肺癌等呼吸系统疾病。

■ 红细胞“特洛伊木马”

来自哈佛大学的研究团队研发出一种巧妙的伪装术:将装载治疗药物的纳米颗粒“藏”在人体自身的红细胞表面,借助血液循环在体内悄然运输,精准抵达肺部肿瘤区域。由于红细胞是“自己人”,这一过程几乎不会引起免疫系统的警觉,从而实现高度隐蔽的药物投递。当红细胞穿过肺部狭窄微血管时,药物颗粒会因受压而自动释放,唤醒免疫系统,迅速对抗癌细胞。这犹如在体内部署了一支“隐形部队”,不干扰正常组织、不误伤健康细胞,专注锁定目标,按需精确出击,有望提升肿瘤控制效果并降低复发风险,特别适用于肺部转移性肿瘤的免疫治疗。

■ 可吞服生物传感器:胃肠出血的智能侦察兵

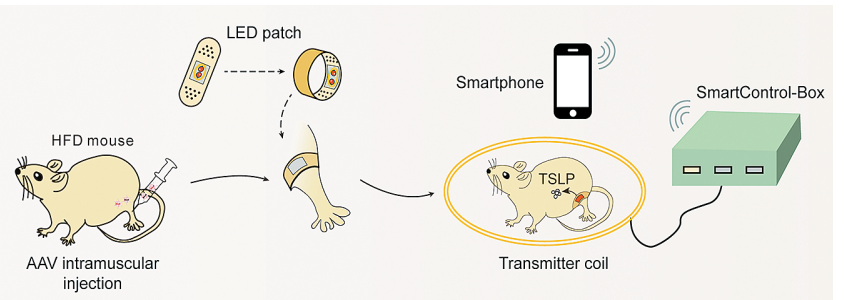
胃肠道出血监测领域迎来了一项突破性技术——麻省理工学院研发的“可吞服生物电子胶囊”。这种仅硬币大小的智能设备,结合了合成生物学与柔性电子学的前沿成果,构建了一个具备“感知—处理—传输”功能一体化的生物混合监测系统。胶囊内置了经过基因编程的工程细菌、低功耗微电子传感器和无线通信模块。当胶囊在消化道内运行时,工程细菌会持续监测周围环境,一旦监测到血液特有的分子特征血红蛋白,便会触发发光反应。这种生物发光信号被高灵敏度传感器捕获后,经芯片处理转化为数字信号,最终通过蓝牙传输至外部接收设备。整个检测过程完全自动化,就像在消化道内安置了一位永不疲倦的“智能侦察兵”,为长期服用抗凝药物或消化道溃疡高风险患者提供了无创的居家监护方案。

■ 光控“溶瘤细菌战士”

在攻克癌症的持久战中,来自华东师范大学的科学家们正在开发一种新型活体武器——溶瘤细菌。经过基因改造的溶瘤细菌会像特警部队一样,利用肿瘤组织特有的低氧环境作为导航信号,自动聚集在癌变区域周围。这些细菌体内装备了先进的“光控武器系统”,即红外光响应的基因回路。当医生对肿瘤部位照射近红外光(波长710nm,具有良好组织穿透性)时,光照触发细菌内部的光敏开关,大量生产抗癌蛋白和免疫调节因子。不同于传统化疗,这种“溶瘤细菌战士”无需频繁注射,随时响应医生的指令,实现三个维度的精准打击:空间上局限在光照区域,时间上由照射时长决定,剂量上通过光强调节。这标志着肿瘤治疗正在迈向“精准打击”的生物智能时代。

■ 手机遥控的“减肥开关”

华东师范大学科研人员利用光遗传学技术,实现了用普通智能手机远程控制基因表达的全新治疗模式。研究人员将一种红光/远红光可切换的基因表达调控系统注射到肥胖小鼠体内,并在体表贴上微型LED贴片,通过手机App远程控制LED发出特定波长的红光,就能激活抗肥胖蛋白的表达,使小鼠逐渐减重。这就像给细胞安装了一个光控开关,手机App就是遥控器,何时治疗、治疗多久,完全由患者自主决定。该系统代表了一种“无形态”的生物混合机器人:不依赖机械结构,而是将细胞的生物反应能力与外部电子设备连接,标志着精准医疗进入“光控时代”——治疗不再依赖反复用药,而像操作家电一样便捷。



■ 通过无线红光激活基因表达来调控肥胖小鼠体重(示意图)