



# 微纳机器人的发展综述

杨佳<sup>1,2</sup>, 张闯<sup>1,2</sup>, 王晓东<sup>1,2</sup>, 王文学<sup>1\*</sup>, 席宁<sup>3</sup>, 刘连庆<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳, 110016;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049;

3. 香港大学工业与制造系统工程系新兴技术研究所, 香港

\*E-mail: wangwenxue@sia.cn; lqliu@sia.cn

doi: 10.1360/N092018-00434

随着机器人科技的飞速发展, 机器人广泛应用于现代的生产和生活中. 机器人有多种类型, 整体尺寸从微观到宏观不等. 通常, 工业生产、服务行业和军事战争中都能看到宏观机器人的身影. 然而, 在某些特定情况, 例如体内介入诊断和治疗, 宏观机器人往往由于尺寸过大而应用受限. 因此, 微纳机器人应运而生, 该类机器人能在微纳尺度上执行任务且具有优异的灵活性、适应性, 此外, 该类机器人还能以集群的方式协同作业. 在过去的几十年, 微纳机器人俨然发展成为一个新的研究领域. 其在生物医学领域具有最广泛的应用前景, 如靶向药物传送与释放、疾病诊断与治疗等, 此外, 微纳机器人在军事方面也有着举足轻重的地位, 其在纳米加工、高端制造和环境监测之中的应用也不容小觑.

微纳机器人的发展日新月异, 其研究可以从以下几个关键组分出发.

驱动技术是微纳机器人的研究核心. 微纳机器人的驱动方法大致分为物理方法、化学方法、生物方法和混合方法. 常用的物理驱动方法是通过磁、电、光、热、声和压电等机制实现的. 其中, 磁驱动的应用最为广泛, Nelson课题组致力于磁驱动螺旋微机器人的研究, 他们使用低强度旋转磁场为机器人提供驱动, 螺旋的形状设计也有助于机器人穿过不同的材料和流体. 虽然磁驱动具有穿透力强、可远程驱动以及

无损驱动活体生物材料等优点, 但同时也需考虑高强度磁场面向生物医学应用的安全性. 电是继磁之后首选的驱动机制, 研究人员通常以电泳力和介电泳力、介电泳和微流控结合、电镊、电渗力和电润湿等方式进行驱动, 最吸引人眼球的是用电场刺激来驱动由心肌细胞或骨骼肌细胞和微纳结构结合而成的类生命机器人<sup>[1]</sup>, 然而电极的存在往往限制了电驱动在生物医学方向的应用. 除了磁和电驱动以外, 光驱动、热驱动、声驱动、压电驱动等方式均成为微纳机器人常用的驱动方式, 虽然这些驱动方式具有许多优点如光驱动具有精准的靶向性、声驱动具有较大的驱动力等; 但也存在着不足如光驱动和热驱动易对生物材料造成不可逆的损害, 压电驱动的应用易受限于机器人的尺寸等. 尽管在所有的驱动方式中物理驱动占据了较大的比重, 但化学方法的驱动也是不容忽视的. 化学驱动通常依靠化学反应产生的能量来驱动具有不同外形特征的微纳机器人, 例如纳米棒、微夹持器、火箭式管状结构、生物分子等. 纳米颗粒和纳米棒易于表面修饰, 管式机器人易产生较大的推进力, 非对称的Pt制的纳米机器人可以产生稳定的旋转运动. 化学方式下, 驱动可以从多角度进行优化, 例如探索生物兼容性更好的燃料, 测定最佳掺杂浓度, 调整操作环境的温度等. 尽管化学驱动有很多优势, 但是体内应用的高风险性、推进精准度不足、作用时间短以及缺少反馈都

英文全文见: Yang J, Zhang C, Wang X D, et al. Development of micro- and nanorobotics: A review. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 1–20, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9339-8>

是亟待解决的挑战。

大自然往往会给研究人员以最大的馈赠, 许多生物材料都已成为微纳机器人的驱动器。应用最广泛的应属带有鞭毛的细菌、藻类细胞和精子细胞。其最显著的优势是生物兼容性好, 最致命的不足是由于要维持生物分子活性而导致其应用环境十分受限。混合驱动方法是将上述的方法进行选择性地结合, 可以对多种驱动方式取长补短。例如电磁场驱动和趋药性自驱动的分时复用、以及磁驱动和压电、声、光驱动方式的结合。该方式可以提升微纳机器人的性能、增加其功能, 但同时也增加了外部条件以及控制方法的复杂度。

微纳机器人的成型均起源于最初的设计。通常, 微纳机器人的设计灵感来源于对宏观物体结构和功能的模仿、对生物的某种特性进行模仿以及类生命思想。将宏观物体的尺寸缩小至微纳尺度, 便产生了微纳尺度的具有相同形态或相应功能的机器人, 例如分子齿轮和纳米车等。研究人员仿照自驱动的细菌和细胞研制了螺旋状的微型游动机器人, 这些机器人由软体材料组成, 可实现外形的重构, 在低雷诺数的介质中表现出理想的推进性能。此外, 存在于自然界的昆虫, 如尺蠖、甲虫等, 水下的鱼类、水母等都为微纳机器人的设计提供了灵感。仿生的方式往往难以完全复现出原本生物体的结构和功能特性, 而通过将生物体功能元件和非生物元件进行结合而产生的类生命机器人<sup>[1]</sup>则很好地解决了这一问题。类生命微纳机器人通常由两部分组成: 作为驱动器的活体生物和用于支撑的支架, 其中生物组分通常包括肌肉细胞、带鞭毛的细胞或细菌和旋转蛋白。该类机器人具有高能量转换效率和本质安全等特征。

微纳机器人的制造与装配技术是该类机器人研究的重要分支, 其中主要涉及光刻技术、材料沉积技术、材料组装技术、微模塑、聚焦离子束和润湿技术等。光刻技术中除了常用的之外, 新型的微立体光刻

技术也越来越备受青睐。常用的沉积技术主要有电镀、物理气相沉积以及衍生出的掠射角沉积等。材料组装则涉及逐层静电自组装、模板辅助逐层自组装、自卷曲等。随着微纳机器人的发展, 有时则需要借助多种技术来实现复杂结构的加工装配。

微纳机器人发展成熟化的标志之一就是实现运动控制, 即实时监控微纳机器人的运动位置和速度、保持运动参数在设定范围。常见的运动控制方法有磁控、化学反应控制和超声控制等。例如超声驱动的纳米线和化学驱动的微球均可以通过磁场实现转向控制; Pt-Au纳米棒可以受染料浓度梯度的引导; Au-Ru微米棒可通过超声场实现运动方向的反转。此外, 微纳机器人的反馈控制也是研究热点, 现有的反馈方法有视觉反馈和力反馈。Li等人<sup>[2]</sup>为微型载具设计了基于视觉反馈的闭环控制系统, 还通过引入人工智能令微型机器人更加智能化。

实际需求的随着不断增长, 微纳机器人面临着诸多挑战。首先是多功能化的挑战, 理想的微纳机器人应该集感知、驱动和智能于一体, 并配以良好的反馈机制; 其次, 微纳机器人需要跨过科学研究和临床应用之间的鸿沟, 更加面向市场化; 第三, 微纳机器人需要全新的能量转换机制, 更加鲁棒的无线驱动和控制方法以及更合理的装配技术; 第四, 微纳机器人需要环境适应性更好的创新型材料; 最后, 微纳机器人还需要精准的集群控制。

微纳机器人是机器人研究领域的重要分支, 同时带动了多学科共同发展。其具有体积小, 推重比大等优点, 可以在复杂环境中执行任务, 被广泛应用于疾病诊断与治疗等领域。英文全文从驱动、设计、制造和控制等方面对该类机器人进行了综述, 提出了该类机器人在未来发展中可能遇到的挑战。我们设想未来的微纳机器人将会由智能材料组成, 同时兼具反馈控制和智能控制, 集多种功能于一体, 且类生命微纳机器人将成为该类机器人的主要发展方向。

## 参考文献

- 1 Zhang C, Wang W, Xi N, et al. Development and future challenges of bio-syncretic robots. *Engineering*, 2018, 4: 452-463
- 2 Li T, Chang X, Wu Z, et al. Autonomous collision-free navigation of microvehicles in complex and dynamically changing environments. *ACS Nano*, 2017, 11: 9268-9275