

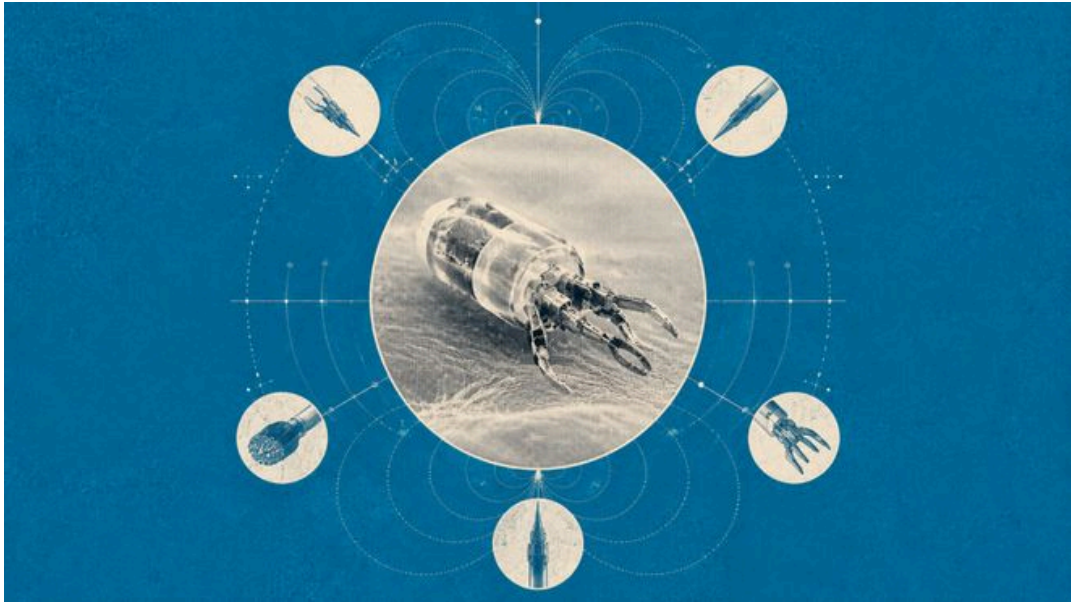
米粒大小的手术机器人问世，自带5种手术动作，1秒切换不同功能

2026-05-28 18:42:32 来源: DeepTech深科技 北京

举报

0

分享至



1966 年，美国上映了一部名为《神奇旅程》的科幻电影，影片中被缩小成微米级别的五名医生被注射到患者体内进行血管手术。时至今日，电影中的虚构桥段正在走进现实世界，只不过在体内治疗疾病的是“微型机器人”。

“微型机器人”其实是一个统称，其涵盖了尺寸从 1 微米（约为人类头发丝直径的 1/100）到数毫米的机器人，而机器人的尺寸小于 1 微米则称之为“纳米机器人”。

因体积小巧、灵活性高，微型机器人被认为是未来无创或微创手术的主要解决方案。尤其是磁控微型机器人，因为磁场可以无害地穿透人体组织，且能精准控制。

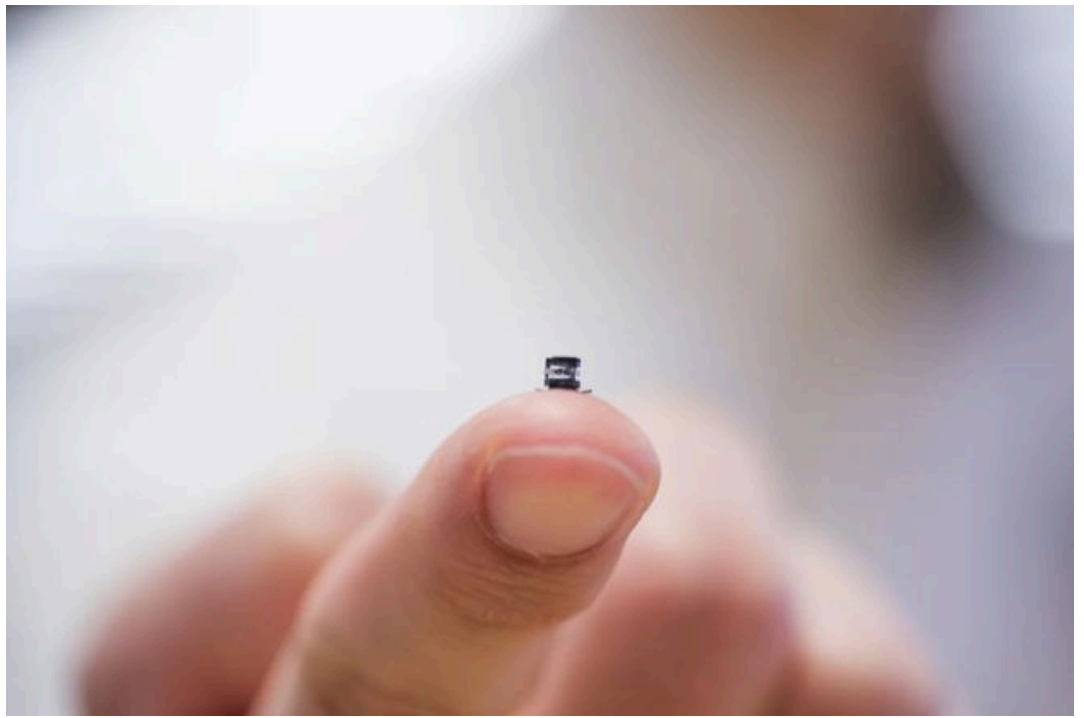
目前主要包括两类磁控微型机器人。第一类具有粘液或液体基的身体，这类机器人的身体太软，无法输出足够的力来进行切割等手术操作，且可能会在人体内留下残留物。如果想让它们变硬，通常需要极强的磁场，或者需要加热到 60°C 以上，可能导致患者体内细胞死亡。

第二类具有固体弹性体的身体，虽然不会有残留且可以远距离控制（小于30 厘米），但因为受限于单一的磁化方式，它们最多只能具备两种手术功能。此外，大多数此类机器人只能实现 5 个自由度的运动，很难在人体复杂的环境中自由穿行。

近日，新加坡南洋理工大学 (NTU) 的研究人员开发了一个 4.4mm、拥有 6 个自由度的软体微型机器人，不仅能在复杂环境中灵活移动，还能通过磁场重新编程，在体内做 5 种手术动作，包括释放药物、切割生物组织、抓取和存储生物样本以及远程加热。切换这些功能只需不到一秒的时间。相关文章发表在 Advanced Materials 期刊。

领导这项研究的是南洋理工大学机械与航空航天工程学院的副教授 Lum Guo Zhan（林国展）。过去十多年里，他一直深耕于微型机器人领域。

2021 年，他的团队在 Advanced Materials 发文，成功解决了长期困扰微型磁控软机器人的运动学瓶颈。团队通过优化机器人内部的磁化分布，首次实现了完整的 6 个自由度，这意味着该机器人能够在横滚、俯仰和偏航三个维度上自由旋转。



(来源：NTU)

为了破解现有磁控微型机器人的局限性，研究团队设计了智能磁性复合材料。也就是让机器人内部包含多种具有不同矫顽力、刚度和响应频率的磁性物质。有些部位磁性强、容易被重新磁化/退磁；有些部位磁性不会轻易被改变，比较稳定。（注：矫顽力是磁性材料的特性之一，是指在磁性材料已经磁化到磁饱和后，要使其磁化强度减到零所需要的磁场强度。）

这些物质主要包括钕铁硼（NdFeB）磁性微粒，钕铁硼被誉为“磁王”，具有极高的磁性和矫顽力（达到 93.3–614 mT）。机器人的主体执行部件、重编程模块以及用于运动的触手，都掺入了这种微粒。

二是四氧化三铁（ Fe_3O_4 ）纳米颗粒，被专门用于机器人最顶部的远程加热组件中，负责发热做热疗。

部分材料可以在 60–65 mT 的磁场作用下被可逆地磁化和消磁；而其他具有更高磁矫顽力的区域，则完全不会受到这种磁化和消磁过

程的影响。通过这种差异化的材料布局，机器人可以被随时随地且安全地重新编程，切换工作模式。

机器人的材质主要是硅胶类软材料，包括 PDMS（聚二甲基硅氧烷）与 Ecoflex 00-10（一种超软硅胶）。前者是一种刚度相对较高的医用级高分子聚合物，用它来制作机器人主体内部的磁化组件以及第六自由度增强模块。较高的刚度确保了这些执行部件在发力切割或抓取时，具有足够的支撑力和骨架强度，不会软塌塌地变形；后者是一种极其柔软且富有弹性的材料，被专门用来制作机器人负责运动的柔软触手。

在设计上，研究团队采取了对称性设计，这种设计确保了机器人在执行某一项特定功能时，只有对应的部件会被激活，而其他部件会保持不动，互不干扰。

研究人员用这种智能磁性复合材料构建的机器人主要由四个部分组成：主体、两根软触手、可重新编程模块，以及顶部的远程加热组件。由于尺寸微小，研究人员需要在显微镜下组装。

主体包含三根可变形的软梁，像小手臂，负责执行给药、切割、抓取、存储；两根软触手负责走路、爬行、翻滚；可重编程磁模块是最重要的部位，负责各功能之间的快速切换；远程加热模块具有局部热疗功能。

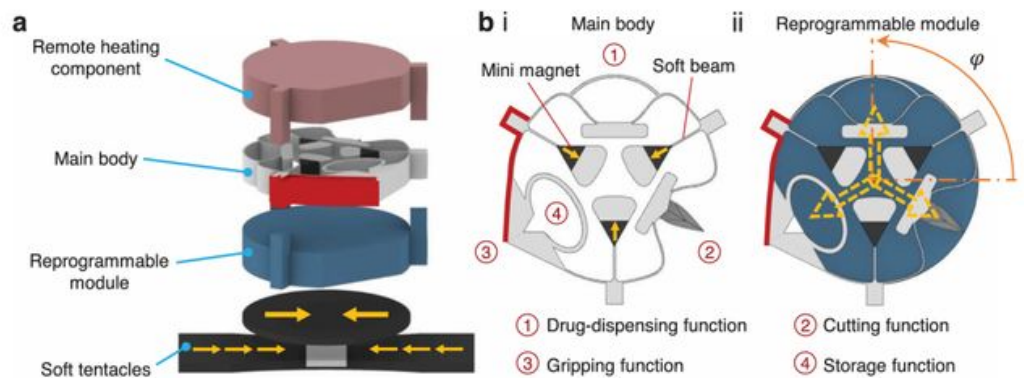


图 | 软体微型机器人 (来源: 上述论文)

当施加特定的交变磁场让“可重编程模块”完全消磁时，机器人便进入了运动模式。

在这个模式下，机器人拥有完整的 6 个自由度。不仅可以在三维空间中沿 X、Y、Z 轴平移，还能绕着三个轴自由旋转。

团队为其开发了两种主要步态：滚动，在空旷地带，它可以快速滚动，甚至可以选择横向或纵向滚动来挤过狭窄的缝隙。双锚点爬行，面对陡坡或形状复杂的障碍物，它可以像毛毛虫一样，利用触手交替作为锚点进行极其稳定的爬行越障。

一旦机器人通过运动模式到达了体内的指定病灶，通过施加一个瞬间的 60 mT 均匀磁场，就可以改变可重编程模块的磁极角度，从而切换到不同的手术功能。

当磁矩角度被设定在 90° 时，机器人进入给药模式。在特定磁场的驱动下，机器人主体内的两根软梁会发生形变，像开门一样打开内置的药物舱，释放内部装载的药物（如化疗药物胶囊），这种靶向递送比传统的血液循环给药效率高出许多倍。

当角度被设定为 330° 时，机器人进入切割模式。隐藏在机器人体内的微型刀片会被缓慢推出。研究团队在真实的鸡肝组织和生物明

胶上进行了测试。结果发现，机器人不仅能稳稳地将锋利的切刀刺入组织，还能通过旋转自身来拉伸组织并完成深度切割。极其人性化的是，这把微型手术刀平时是安全隐藏在机器人体内的，完全不必担心在移动过程中划伤健康组织。



(来源：上述论文)

将磁矩设定为 210° 方向，机器人进入抓取模式。机器人可以伸出抓手，不仅能帮助调整待切除组织的角度，还能将切下的组织（用于活检）紧紧抓起。

存储与抓取模式配合，机器人可以将抓取到的生物样本拉入自己的主体内部妥善保存。此时如果切回运动模式，抓手会锁定，确保在体内运输样本时不会掉落。

而机器人的热疗功能，可以与上述任何模式同时或独立进行。在这个功能中，当医生施加一个极高频率、中等强度的交变磁场时，由于磁场变化得实在太快，机器人的机械部件根本来不及做出任何物

理变形反应。但是，机器人顶部的四氧化三铁（ Fe_3O_4 ）颗粒却能在此高频下产生强烈的电磁感应发热。

实验表明，机器人能在 35 秒内，将其顶部温度精确升高到 40°C ，它足以对病变细胞进行热疗，同时又能保证配合使用的化疗药物不会因高温而失效。更令人惊讶的是，发热范围被极其严格地限制在机器人周围半径 5.78 毫米的极小区域内，绝不会对周围正常的生理器官造成热损伤。

为了验证该机器人走向临床的可能，团队进行了大量模拟真实人体环境的测试。



图 | Lum Guo Zhan（左）（来源：NTU）

细胞毒性实验证明，接触该机器人的匿名人类真皮成纤维细胞的存活率高达 99% 以上，与对照组几乎无异，具有极高的生物相容性。

其次，为了满足临床手术规范，机器人还在高压灭菌锅中经受了 121°C 、15 分钟的无菌处理。灭菌后，功能丝毫没有受到影响。还

能在人工合成尿液中稳定地完成爬行、滚动、切割和给药等动作。它甚至能在较强的水流和气流中紧紧抓住目标不松口。

研究人员还报告称，该机器人在经过 100 次磁化和退磁循环后，仍能保持其磁性和机械稳定性。

关于未来的发展，研究人员构想了两种极其科幻的应用场景。

第一，胃肠道治疗，可以将机器人冻在一个冰块里让患者吞下，冰块在胃里融化后，机器人在胃肠道内完成给药，完工后随消化道自然排出或从口腔回收。

第二，脑部无创手术，理论上可以将机器人进一步缩小到 2.5mm 长。届时，可以将其注射到患者的脊髓中，让它顺着脑脊液游入大脑深处执行极其复杂的脑部手术，然后再沿着脊柱原路返回并取出。

目前，研究人员正在探索如何将机器人与医学成像系统、传感器和人工器官模型集成。他们还计划与外科医生合作，了解此类系统如何融入未来的临床工作流程。

1.<https://www.ntu.edu.sg/engineering/news-and-events/news/detail/robot-surgery>

2.C. S. X.Ng, Y. X.Yeoh, N. Y. W.Foo, K.Radhakrishnan, and G. Z.Lum, "Miniature Soft Robot With Magnetically Reprogrammable Surgical Functions." *Advanced Materials* (2026): e23056. <https://doi.org/10.1002/adma.202523056>

运营/排版：何晨龙

注：封面/首图由 AI 辅助生成