



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Micro and Nano Manipulation and Characterization—Review

磁控微型机器人的选择性与独立控制——综述

王敏^a, 吴天一^a, 刘锐^a, 张焯然^{b,*}, 刘军^{a,c,*}

^a Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

^b School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518057, China

^c Shenzhen Research Institutes of City University of Hong Kong, Shenzhen 518057, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 August 2021

Revised 18 September 2022

Accepted 9 February 2023

Available online 14 April 2023

关键词

微型机器人

磁性机器人

独立控制

选择性控制

机器人微操作

摘要

磁驱动方法具有无线连接和高安全性的特点,是一种常见的微型机器人驱动技术,适用于微流体操作以及医疗微型机器人导航等应用。然而,由于微型机器人或被驱动的目标暴露在同一片磁场环境中,使得选择性地控制单个机器人或多个目标中的某一部分变得具有挑战性。本文回顾了磁场驱动的多微型机器人或多关节微型机器人系统的选择性和独立控制方法的最新进展。这些选择性和独立的控制方法将全局磁场解码为特定配置,用于多个微型机器人的独立驱动。这些方法包括将机器人设计成具有与众不同的物理属性或者在工作空间中的不同位置产生性质各异的磁场。对选定目标的独立控制使多个微型机器人能够有效协作以完成更复杂的操作。本文从一个独特的视角来解释如何在磁场中操纵单个微型机器人以在小尺度机器人中实现高水平的群体智能,这有助于加速微型机器人技术在现实生活中应用的转化和发展。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

利用磁场对微型机器人进行操作在过去几十年中取得了重大进展,并在各种应用中产生了深远的影响,如微型机器人活检[1]、药物输送[2]、细胞操作[3]和微装配[4]。在磁性操作中,机器人一般由永磁体或铁磁材料设计而成,并通过外部磁场进行无线驱动。与声学[5]、光学[6]、热学[7]和压电[8]方法等其他操纵策略相比,磁驱动在其无缆连接、输出力大和高安全性方面具有独特的优势。

在通常的磁控微型机器人系统中,由铁磁材料制成的单个或多个机器人[9–11]在工作空间内,被外部可编程的

磁场控制和驱动。外部磁场一般由电流可控的电磁线圈或位置可调的永磁体产生[12–13]。微型机器人在梯度磁场中受磁力拖动或者在旋转的匀强磁场中受扭矩而转动。虽然已经有研究实现了对群体微型机器人的协同控制以完成复杂的显微操作任务[14–15]。然而,由于磁场存在于整个工作空间中,故该驱动方法在控制多个微型机器人时灵活性较低,因为所选定的机器人或个体在移动时不可避免地会影响工作空间中的其他对象。除了群体操作之外,对组内单个个体的选择性和独立控制是一种极具挑战性但非常实用的方法。特别是在微型机器人协同控制难以实现复杂群体任务的情况下,磁控独立和选择性控制是非常有意

* Corresponding authors.

E-mail addresses: zhangzhuoran@cuhk.edu.cn (Z. Zhang), Jun.Liu@cityu.edu.hk (J. Liu).

2095-8099/© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 24(5): 21–38

引用本文: Min Wang, Tianyi Wu, Rui Liu, Zhuoran Zhang, Jun Liu. Selective and Independent Control of Microrobots in a Magnetic Field: A Review. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.02.011>

义的一种方法。

本文首先将介绍磁性操作的基本原理，回顾了现有的多微型机器人系统中的选择性和独立控制方法，并讨论了潜在的应用和未来可能的研究方向。不同于该领域的其他综述主题，如磁控机器人的运动原理和控制方法[16-17]、磁控机器人的先进应用[18-19]以及磁、生物能混合驱动方法[20]，本文侧重于关注在多机器人系统中的磁控机器人个体的选择性控制方法。磁控微型机器人的选择性控制对于提高微型机器人的运行速度、提升微型机器人的负载能力、提高协同操纵的灵活性具有重要意义。随着这些方法的提出与应用，磁控微型机器人将能够以更高的智能化水平得到更广泛的应用。

本文介绍了磁驱动方法的基本原理，并总结了磁驱动方法中的选择性操作的控制策略。其中主要的控制策略可以分为五类，如图1所示：①全局均匀磁场策略，依赖于个体在全局旋转均匀磁场中的不同转矩响应；②全局梯度磁场策略，由非均匀梯度磁场引起个体受磁力不同；③局部可移动永磁体策略，其中可移动磁体产生增强的局部磁场；④局部电磁线圈策略，通过可寻址平面磁线圈对机器人实现选择性激活；⑤依赖于个体微型机器人不同的共振频率响应策略。这些方法不都是独立使用的，文献中也报道了利用多种策略组合的控制方法。

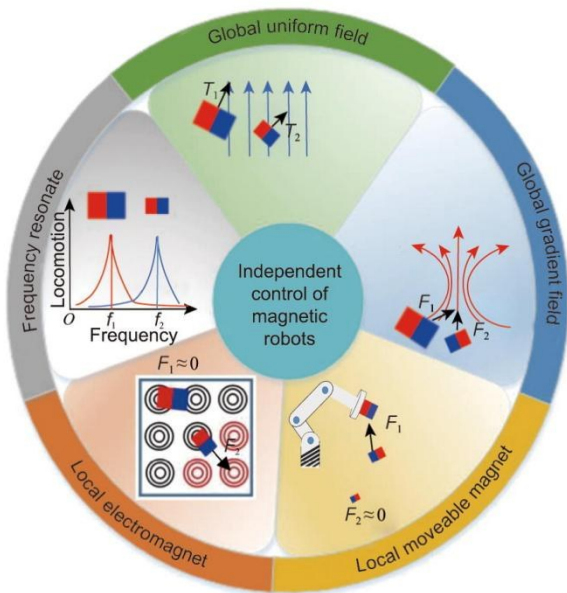


图1. 磁驱动多机器人系统的独立控制策略可分为5类，从上开始顺时针依次为：全局均匀磁场策略（磁性机器人设计有不同的磁矩特性或结构，并由均匀磁场驱动）；全局梯度磁场策略（应用全局梯度磁场在不同位置产生不同的力来独立控制）；可移动永磁体驱动策略（采用外置永磁体，增强局部磁场密度）；局部电磁线圈驱动策略（通过平面线圈阵列执行选择性驱动）；共振频率策略（磁性机器人设计有独特的共振频率，并由外部变频磁场驱动）。 F_1 、 F_2 ：对不同机器人的磁力； f_1 、 f_2 ：施加磁场的驱动频率； T_1 、 T_2 ：对不同机器人的磁力矩。

本文的组织结构如下：第二节介绍了磁驱动机制，包括磁场中的磁力、转矩的作用以及被控微型机器人之间的耦合作用。第三节总结了五类独立控制机器人的策略方法。之后，在第四节中介绍了使用可以独立控制的多机器人系统的应用。第五节讨论了多机器人系统中独立控制方法的潜力和未来前景，随后是第六节的结论部分。

2. 磁性操作基本原理

磁驱动依赖于外部施加的磁场和磁性个体的相互耦合作用。为了更好地理解磁驱动的基本机制，本节将介绍如何从两个典型的磁源（永磁体和电磁体）产生外部磁场。还详细研究了为什么可以通过改变外部场来操纵微观个体。总的来说，磁性机器人的运动受外部磁场的磁扭矩、力的作用和磁性机器人之间相互作用的影响。

2.1. 磁场的产生

与通电线圈产生的磁场相比，永磁体是一种节能高效的磁场源，可用于操纵小机器人。此外，一般来说当产生相同大小的磁场时，永磁体比电磁线圈占用更少的空间。基于永磁体的方法的主要局限性在于操作后无法随时关闭磁场。施加在受控个体上的磁场强度取决于磁场源的磁矩 \mathbf{M} 、体积 V 和磁场源到受控机器人个体的向量 \mathbf{r} 。当磁场源与受控个体之间的距离远大于磁场源尺寸时，可以用偶极子模型来表示磁源磁场的分布。

$$\mathbf{B}\{\mathbf{M}, V, \mathbf{r}\} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi r^5} (3\mathbf{r}\mathbf{r}^T - r^2 \mathbf{I}) \right) V \mathbf{M} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{B}\{\mathbf{M}, V, \mathbf{r}\}$ 是永磁体产生的磁场； μ_0 是真空磁导率； \mathbf{I} 表示单位矩阵。

根据式(1)可知，磁场源在目标位置产生的磁场强度随距离呈立方衰减，与磁场源的体积和磁矩成正比。选择固定的永磁体作为磁场源后，可以调整源磁铁的方向和位置，从而在受控微型机器人的位置产生所需的磁通量密度。

电磁线圈是产生可控磁场的另一种方式。与永磁体不同，电磁线圈可以在不移动磁场源的情况下改变场强，为磁驱动提供更可控的解决方案。作为磁场源，与永磁体相比，电磁线圈的磁力和转矩相对较低。增加力和扭矩输出的可能解决方案包括使用大电流或增加线圈数量。然而，这些解决方案会导致线圈的发热以及能耗成本增加。电磁系统的两种典型设置是亥姆霍兹线圈和麦克斯韦线圈，它们可以分别提供均匀磁场和梯度磁场。在不失一般性的情况下，以圆柱形线圈为例，其磁场可以使用毕奥-萨伐尔

定律 (Biot-Savart Law) 确定, 如下所示:

$$\mathbf{B}\{i, h, r, l, N\} = \frac{N\mu_0 i}{4\pi} \int_h \int_l \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} dh \quad (2)$$

式中, N 是线圈的匝数; i 是电流密度; l 是圆形线圈的单位矢量; h 是线圈的高度。

在电磁系统的尺寸、线圈匝数确定后, 给定点 (即受控机器人个体所在位置) 的磁场强度取决于该电磁系统的通电电流和圆柱体的方向。为了增加电磁系统的灵活性, 研究人员设计了可移动线圈来执行更复杂的任务, 并可以最大程度地减少能耗[21-22]。

2.2. 磁控微型机器人的驱动机制

在磁操纵系统中, 微型机器人是使用可以被外部磁感应的磁性材料制造的。根据矫顽力和磁阻, 磁性材料可被分为软磁材料和硬磁材料。软磁体具有相对较低的磁化强度 (即矫顽力低于 $1000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$), 而硬磁材料具有较高的磁场强度, 通常认为在外部驱动磁场下是恒定的。为简单起见, 接下来将使用恒定磁矩 \mathbf{M} 分析磁化材料的驱动机制。文献[16,18]中提供了有关磁化过程的更详细的信息。

2.2.1. 磁转矩

当磁偶极子产生驱动磁场 \mathbf{B} 时, 受控机器人个体趋向于随外磁场对齐并旋转。由于磁转矩的变化, 旋转磁场时受控个体跟随旋转。受控磁性个体上磁力矩的一般形式可表示为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{B} \times \mathbf{M} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{M} = [M_x, M_y, M_z]^T$ 、 $\mathbf{B} = [B_x, B_y, B_z]^T$ 分别是受控机器人的磁矩外磁场在机器人位置处产生的磁场强度及在每个轴上的分量。根据式 (3), 受控设备或机器人在变化的外磁场 \mathbf{B} 的扭矩作用下发生旋转。在微型机器人的应用中, 广泛采用螺旋状结构设计机器人, 该结构能将旋转运动转换为线性运动, 以便在工作空间中移动受控个体。

2.2.2. 磁力

磁性机器人所受的磁场拖拽力是由磁场梯度产生的。在磁场梯度为 $\nabla \mathbf{B}$ 的位置, 磁矩为 \mathbf{M} 的受控设备所受磁力的一般形式可表示为:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} + M_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{B} \quad (4)$$

从这个等式可以看出, 机器人所受的磁力与磁矩成正比, 与物体尺寸和磁化强度有关。当施加均匀磁场 (即 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} = 0$) 时, 受控机器人不会受到磁力的作用。

2.2.3. 磁控机器人之间的相互作用

当工作空间中存在多个微型机器人并且彼此靠近时, 它们之间的相互作用会显著影响它们的运动行为。一般来说外部磁场的强度远高于受控微型机器人产生的局部磁场的强度, 因此受控设备更有可能与外部磁场对齐。然而, 由于两个相邻微型机器人之间的距离较短, 局部相互作用力不可忽略[18,23]。

不失一般性, 以下以两个受控设备 (R_1 和 R_2) 之间的相互作用进行讨论。如图2所示, 可以通过改变外部磁场的方向控制机器人之间排斥和吸引作用的转换。在机器人磁矩 (\mathbf{M}_1 和 \mathbf{M}_2) 确定的情况下, 由磁源 R_2 产生的作用在 R_1 上的力可以通过将式 (1) 代入式 (4) 来表示。本文将具有磁矩 \mathbf{M}_1 的 R_1 视为磁场产生单元, 将具有磁矩 \mathbf{M}_2 的 R_2 视为受力单元。通过将位置 R_2 处的磁场 (由 R_1 产生) 代入式 (4), 则对应的磁相互作用力为:

$$\mathbf{F} = -\nabla \left(\frac{\mu_0}{4\pi \|r\|^3} \left(\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 - 3 \frac{(\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{r})}{\|r\|^2} \right) \right) \quad (5)$$

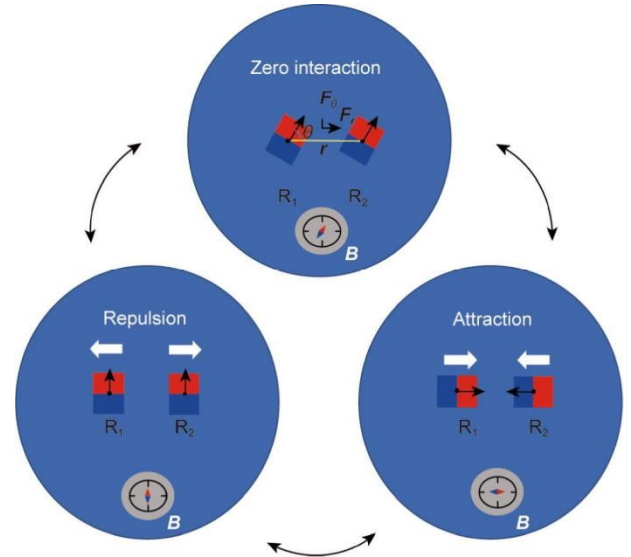


图2. 两个磁性机器人之间的相互作用。通过调整外部磁场的方向, 可以使两个磁性机器人的相互作用力由排斥力转变为吸引力。 θ : 外部磁场方向与两个受控机器人连线 (R_1-R_2) 之间的夹角; F_r 、 F_θ : 分别为沿连线的力和垂直于连接线的力。

假定 θ 为外部磁场方向与两个受控机器人连线 (R_1-R_2) 的夹角 (图2), 则两个机器人间的相互作用力 [式 (5)] 可以表示为:

$$\mathbf{F} = -\frac{\mu_0 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2}{4\pi} \nabla \left(\frac{1 - 3\cos^2\theta}{\|r\|^3} \right) \quad (6)$$

使用圆柱坐标系, 相互作用力 \mathbf{F} 可以解耦为两个分量 F_r 和 F_θ , 分别表示沿两个机器人连线和垂直于两个机器

人连线的力。

$$\mathbf{F}_r = \frac{3\mu_0 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 (1 - 3\cos^2\theta)}{4\pi \|\mathbf{r}\|^4} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_\theta = \frac{3\mu_0 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 (2\cos\theta \sin\theta)}{4\pi \|\mathbf{r}\|^4} \quad (8)$$

当 $\mathbf{F}_r = 0$ 时, 可得临界角 $\theta = 54.73^\circ$ 。当 θ 小于临界角时, 两个微型机器人相互吸引。当 θ 大于临界值时, 微型机器人相互排斥。 \mathbf{F}_θ 则表示顺时针或逆时针的旋转趋势, 在群体控制期间利用 \mathbf{F}_θ 来产生旋涡或图案以排列磁性粒子[24–25]。其他研究人员也使用相互作用力来控制用于时序任务中设备之间的距离[26–27]。

3. 先进的独立控制策略

与单机器人系统或者群体机器人系统相比, 可独立控制的多机器人系统可以以更高的效率完成复杂的协作任务。随着微/纳米制造技术的发展和控制策略的发展, 多种不同的策略已经被用于对磁场环境中的多机器人系统进行独立控制。如前所述, 这些策略大致可以分为5类。本文回顾了这5种方法, 并在本节总结了它们的优点和局限性。

3.1. 全局的均匀磁场策略

在多微型机器人磁控系统中独立控制每个微型机器人是具有挑战性的, 因为所有微型机器人都会从外部磁场接收磁场驱动信号。要实现对不同个体的选择性控制, 一个解决方案是打破单个磁性机器人之间的同质性。本节回顾了在全局均匀磁场中的三种独立控制方法: ①设计具有不同几何形状或不同磁矩的个性化定制机器人; ②通过磁滞特性激活或锁定个体; ③应用辅助的机械结构来限制不必要的自由度。

亥姆霍兹线圈可以产生全局的均匀磁场, 这是输出均匀磁场的常用方法。然而, 制造具有不同物理属性的微型机器人仍然十分具有挑战, 并且在小尺度下设计新颖的机械结构以限制不必要的自由度也是一项挑战。

3.1.1. 机器人独特的磁场性能

通过定制每个机器人的设计, 可以实现对均匀场中多个微型机器人的选择性控制。这可以通过改变机器人的设计材料和几何形状来实现, 因为不同的材料对相同磁场会有不同的反应; 此外, 机器人的几何差异会导致其运动所需要的驱动磁场的大小不同。

图3(a)[28–30]列举了通过设计具有不同内部物理

特性的机器人个体来实现独立控制的方法。利用外部磁场 \mathbf{B} 来驱动地面上独特的磁性目标旋转时, 目标的磁化强度应超过阈值 \mathbf{M}_{\min} 以克服目标的重力扭矩 T_g 。Floyd等[28]利用 \mathbf{M}_{\min} 作为阈值来选择性地驱动由软磁材料和硬磁材料制成的微型机器人。当施加的磁场强度不足以使软磁材料磁化达到阈值时, 仅硬磁微型机器人被选择进行运动。相反, 如果施加的磁场高于 \mathbf{M}_{\min} , 则软磁体和硬磁体可以同时启动。这样, 软硬材料都可以被磁化[图3(a)中的(i)] [28]。文献还报道了具有相同形状但不同磁化方向的多微型机器人系统的解耦机制。在这个系统中, 具有独特本体方向的微型机器人可以与均匀场对齐。通过振荡均匀场, 可以使不同的微型机器人以不同的轴摇摆并移动到不同的目的地。因此, 通过对恒定磁场和振荡磁场进行编程控制, 可以实现独立的运动方向和位置控制[图3(a)中的(ii)] [29]。

此外, 相同材料制作而成但具有不同纵横比外形的微型机器人也被用于独立控制系统中[31]。具有高纵横比的机器人在由振荡磁场驱动时具有大的转动惯量和低的角加速度。例如, 如果角速度较低, 微型机器人可以围绕接触点旋转。相反, 如果角速度太快, 微型机器人无法跟上, 接触点可能会在表面滑动。在随后的研究中, 研究人员通过使用不同的控制信号来改变每个微型机器人的速度响应, 并将一维的平行运动扩展到二维(2D)独立控制[32]。相似的, Tottori等[30]通过改变螺旋结构的长度实现了对三个磁性微型机器人的选择性控制。该方法被用于重新排列微型机器人以进行组装过程[图3(a)中的(iii)]。

3.1.2. 机器人的磁滞特性

磁滞曲线揭示了磁性材料在磁化或退磁过程中的剩磁水平。不同材料制备的机器人具有不同的磁滞, 可以通过不同剩磁来进行选择性控制。对于由相同材料制成的微型机器人, 磁滞特性是相同的。然而, 不同方向的磁化效应对具有不对称几何形状的微型机器人的贡献不同。例如, 椭圆形个体的长轴比短轴更容易被磁化, 因此, 可以利用微型机器人之间的方向差异进行选择驱动。Diller等[33]通过选择性磁化和退磁对由相同和不同材料制成的微型机器人进行了独立控制[图3(b)中的(i)]。实验结果表明, 多机器人系统中的一组微型机器人可以独立移动。这种方法能对不同尺寸的微型机器人进行有效的独立控制, 只要它们具有不同的磁滞特性。类似的方法也被应用在微流体系统中[图3(b)中的(ii)] [34]。在这个系统中, 当泵的方向被调整到不同的姿态时, 几个由软铁硼和铁氧体颗粒制成的流体泵可以被强外部脉冲磁场有选

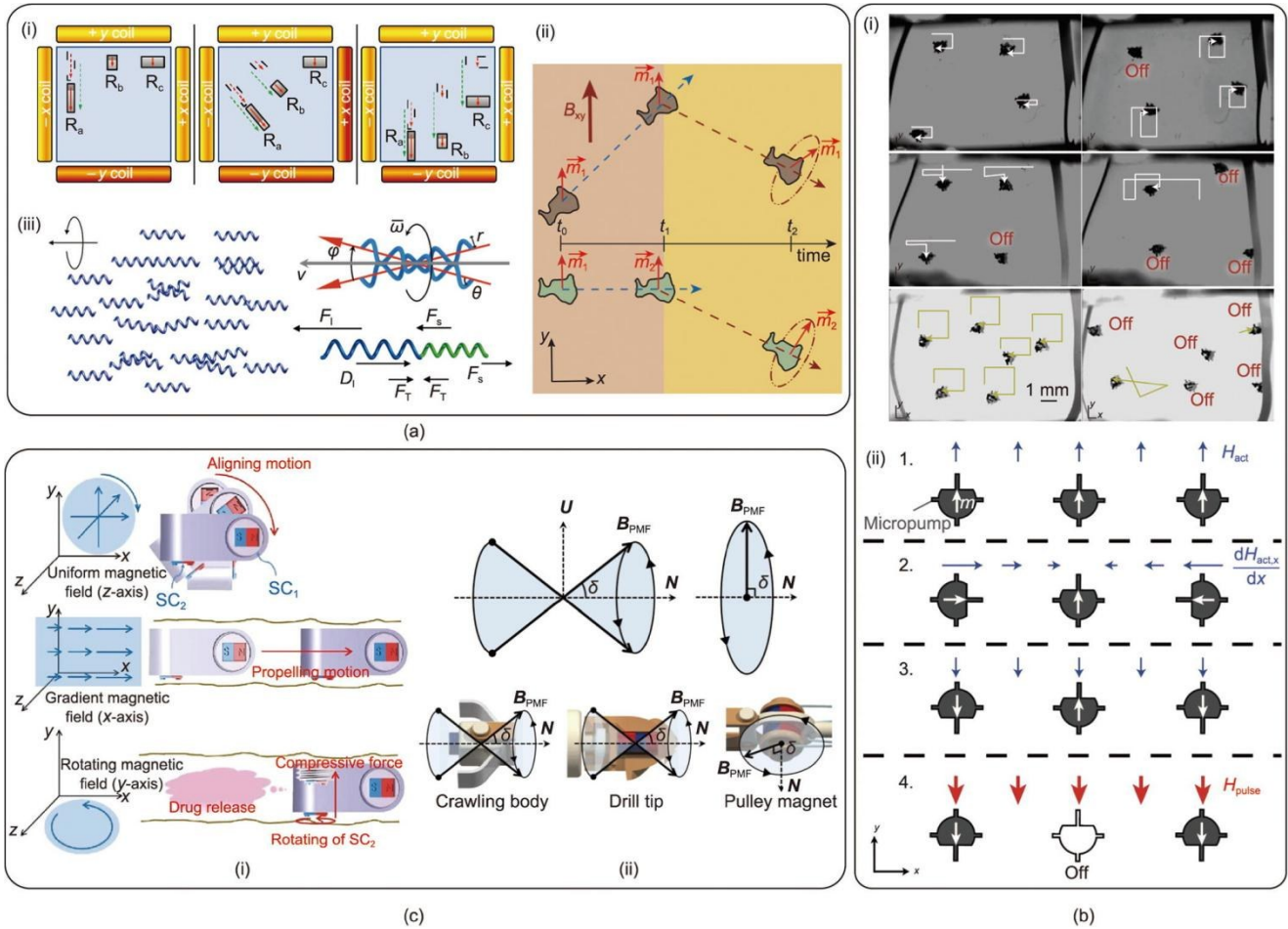


图3. 均匀磁场下的独立运动。(a) 依赖于机器人不同物理特性的选择性控制方法：(i) 不同的制造材料和尺寸；(ii) 利用均匀磁场改变机器人的姿态，并利用梯度磁场来驱动机器人；(iii) 具有不同直径和长度的螺旋机器人。(b) 利用机器人的磁滞特性进行选择控制：(i) 受控机器具有不同矫顽力；(ii) 材料相同但磁化方向不同的受控机器人。(c) 设计特殊结构以限制不必要的自由度：(i) 具有两个正交腔室的胶囊内窥镜；(ii) 具有多个能被独立控制关节的爬行机器人。 R_a 、 R_b 、 R_c ：机器人； \vec{m}_1 、 \vec{m}_2 ：机器人磁矩； t_0 、 t_1 、 t_2 ：时间； B_{xy} ：外加磁场； ω ：角速度； r ：半径； ϕ ：装配角； θ ：螺旋角； v ：游动速度； F_1 、 F_s ：游动机器人1和s的推进力； F_T ：牵引力； D_1 、 D_2 ：游动机器人1和s的拖拽力； m ：磁矩； H_{act} ：磁驱动场； H_{pulse} ：磁化切换场脉冲； SC_1 、 SC_2 ：磁性螺帽； δ ：进动角； B_{PMF} ：推进磁场 ($0 < \delta < 90^\circ$)； B_{RME} ：旋转磁场 ($\delta = 90^\circ$)； N ：旋转轴的单位矢量； U ：垂直于 N 的单位向量。(a) 经许可转载自参考文献[28–30]；(b) 经许可转载自参考文献[33–34]；(c) 经许可转载自参考文献[35–36]。

择地打开或关闭。

3.1.3. 机器人新颖的结构设计

一般来说，具有相同结构的磁性微型机器人在工作空间中均匀磁场刺激下具有相同的响应。为了在每个关节中实现不同的运动和不同的功能，一种解决方案是设计新颖的机械结构来限制部分自由度从而允许个性化的独立驱动。Choi等[35]提出了一种代表性设计用于药物输送的胶囊微型机器人[图3(c)中的(i)]。该微型机器人包含两个正交的圆柱形腔室，可以通过旋转不同的磁性螺帽来选择性地启动它们。胶囊微型机器人在梯度磁场作用下移动到病灶处后，通过具有不同旋转轴的均匀旋转磁场可以选择性地释放两个腔室。在另一项研究中，Lee等[36]提出了一种在管状环境中工作的磁控机器人。该机器人能够在狭窄的管状环境中爬行，并且可以钻孔或展开以疏通阻塞

区域[图3(c)中的(ii)]。这种独立的关节控制是通过正交放置的磁性单元来实现的，从而完成爬行或者钻孔等不同的功能。

3.2. 全局的梯度磁场策略

如第3.1节所述，基于扭矩差异的驱动方法依赖复杂的制造过程来定制不同的机器人个体或使用额外结构来限制个体间耦合自由度。这些方法仍存在一定局限性，如时间成本高、能源浪费和增大了机器人的额外体积。基于此，一些研究人员提出了使用梯度磁场进行驱动的解决方案，这可以简化具有相同物理特性的微型机器人的制造过程。本节总结了采用梯度磁场产生的不同磁力进行选择控制的进展。在非均匀磁场中，可以通过控制磁场梯度来实现机器人在多个位置受到不同磁力的作用。因此，这种方法需要对每个微型机器人进行实时位置反馈和运动学建

模。基于控制输入的线圈数量是否超过所需控制运动的自由度，全局梯度磁场控制系统分为完全驱动和欠驱动系统[37]。例如，当存在多个受控对象时，所使用的系统只有一个控制输入（如永磁体或线圈），并且需要控制多个自由度时，该系统可被定义为欠驱动。图4 [21,37-44]分别显示了完全驱动和欠驱动系统独立控制个体的一些代表性研究。

3.2.1. 全驱动系统

当磁场源的数量等于或大于可控机器人与其可操作自由度的乘积时，磁驱动系统被定义为全驱动系统。在这种情况下，运动学和控制矩阵相对容易建模，因为方程中不需要引入其他额外的控制力。然而，所需的磁场源的数量会随着可控目标数量的增加而增加，因此由于空间有限，

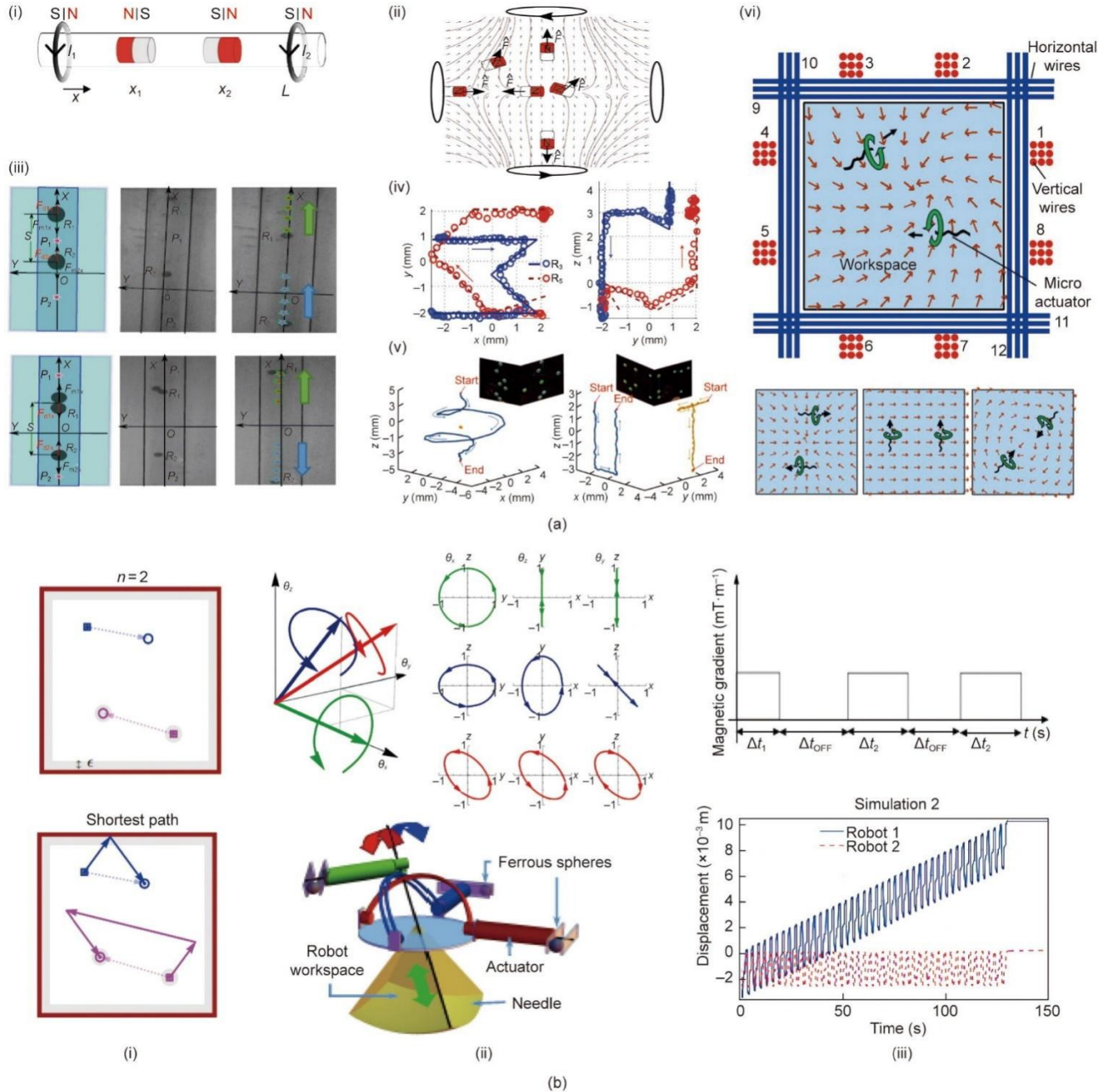


图4. 基于梯度磁场的机器人选择性控制系统。(a) 全驱动系统：(i) 一维管道中两个磁性机器人的选择性控制；(ii) 两个磁性微型机器人在2D平面中的可控运动；(iii) 两个微型机器人在相同和相反方向上的可控运动；(iv) 两个受控机器人在3D空间中以独立的轨迹移动；(v) 两个磁珠可以被独立控制，也可以同时沿不同轨迹运动；(vi) 定制多组线圈用于两个目标的独立驱动，其中8组线圈垂直排列，4组线圈平面排列。(b) 欠驱动系统：(i) 结合侧壁效应实现微型机器人的独立位置控制；(ii) 通过控制驱动磁场的施加时间和间隔顺序实现对机器人的独立位置控制；(iii) 自定义结构以限制不必要方向的自由度。 I_1 、 I_2 ：通过线圈的电流； x_1 、 x_2 ：位置； L ：线圈间距； \hat{F} ：方向和力矢量； R_1 、 R_2 ：磁性微珠半径； P_1 、 P_2 ：最终位置； F_{d1x} 、 F_{d2x} ：拖拽力； F_{m1x} 、 F_{m2x} ：磁力； S ：分离微珠的初始距离； R_3 、 R_5 ：不同形状的微型机器人； n ：自由度数量； ϵ ：两个机器人之间的最小间距以及与边界的最小间距； θ_x 、 θ_y 、 θ_z ：不同轴的旋转角度； Δt_1 、 Δt_2 ：脉冲序列的宽度； Δt_{OFF} ：持续的零输入时间。(a) 经许可转载自参考文献[21, 38-42]；(b) 经许可转载自参考文献[37,43-44]。

该方法只能控制少量磁性目标。

使用梯度磁场独立控制两个磁性目标首先在单自由度场景中得到验证[图4(a)中的(i)] [38]。在这项工作中,两个线圈分别安装在亚克力管的两侧,两个磁性微型机器人被放置在管道中。其中一个机器人所受的力是外部磁力和两个微型机器人之间相互作用力的叠加。因此,控制其中一个机器人所受合力为零时可以有选择地启动另一个微型机器人。通过实时反馈的位置,可以通过开环或闭环方式实现对两个磁性机器人进行选择控制。为了将工作空间扩展到2D平面,Wong等[39]设计了一个带有4个固定线圈的磁控系统来选择性地移动两个相同的机器人。首先,他们根据数值模拟和分析研究绘制了力-位置关系图。然后,研究人员为每个微型机器人创建了具有预设的速度和加速度的路点轨迹[图4(a)中的(ii)] [39]。实时视觉反馈被上传到比例-积分-微分(PID)控制器,用于轨迹跟踪和闭环控制。实验结果表明,两个磁性机器人在直径为85 mm的工作空间中受控制跟随其预定轨迹,结果显示其跟踪误差小于1.5 mm。

Denasi和Misra [45]提出了一种用于控制两个磁性微型机器人的引领者-跟随者控制方案。研究人员通过引入磁力、流体拖曳力、浮力和重力来提高动态建模精度。借助准确的动力学模型,两个微型机器人被独立驱动以跟随预设轨迹,其跟随平均误差约为10 mm。Mellal等[40]通过采用线性二次控制器在相同或相反的方向上以不同的速度移动多个磁性微珠来提高系统的准确性[图4(a)中的(iii)]。在一些临床应用中,微型机器人在三维(3D)空间中移动是很有必要的。Diller等[41]实现了3D空间中多个磁性微型机器人的独立驱动[图4(a)中的(iv)]。Ongaro等[21]通过集成多个可移动电磁线圈开发了更灵巧的驱动系统以在流体环境中悬浮和移动多个微型机器人[图4(a)中的(v)]。该系统旨在产生高磁梯度场并实时保持重力和磁力之间的平衡。使用类似的策略,研究人员开发了一种新的电磁系统,通过集成8个垂直线圈在X和Y方向产生可调谐磁场以及4个水平线圈来控制Z方向的磁场强度,实现独立地控制空间中的多个机器人[图4(a)中的(vi)] [42]。

3.2.2. 欠驱动系统

由于工作空间有限,在大多数应用场景中都没有足够的磁场源来选择性地驱动多个机器人。例如,临床应用总是需要多个机器人进行协作任务,而手术室中通常只有一个磁源[如磁共振成像(MRI)]。因此,要实现多个机器人的选择性驱动,除了磁力之外的其他力也应该参与驱

动。近年来也有一些解决方案被提出,例如,将磁力与侧壁产生的黏附力相结合,采用个体之间的相互作用力,通过机械结构辅助来增加摩擦力等。2017年,Shahrokhi等[43]利用磁力和侧壁摩擦实现了两个均匀粒子的独立位置控制[图4(b)中的(i)]。在黏附力的作用下,靠近侧壁的粒子被锁定,而另一个粒子则可以在磁场作用下自由移动。在侧壁相互作用的帮助下,两个粒子可以分别移动到选定的不同终点位置。对贴壁粒子使用最短路算法,而自由移动的粒子被设置为补偿运动,研究人员实现了对两个粒子同时到达目标位置的驱动[图4(b)中的(i)] [43]。两年后,研究人员将工作空间从正方形空间扩展到任意多边形区域,通过将重力引入动力学模型,将系统升级为3D独立目标位置控制系统[46]。

通过独特的机械结构设计,也可以在欠驱动系统中实现独立控制。文献[44]设计了一种新颖的机器人结构,该系统包含三个正交枢轴,并且在枢轴末端安装了一个铁球体。任意给定点的磁场都可以解耦为三个方向[图4(b)中的(ii)] [44]。如果施加的力与枢轴平行,则不会产生扭矩,则对应枢轴将保持固定而不会发生任何旋转。采用这种机制,研究人员通过商业MRI展示了磁性装置的独立关节控制并用于靶向递送和活检。

在没有外界环境的外力辅助下,在欠驱动磁控制系统中实现多个微型机器人的独立控制非常具有挑战性,因为多个微型机器人的运动在梯度场中是非线性的。研究人员也试图从控制策略的角度来解决这一局限性。例如,Vartholomeos等[37]使用具有可编程脉冲宽度的梯度磁场实现了两个毫米级磁性机器人的独立位置控制。如图4(b)中(iii) [37]所示,在一个控制循环周期中,可以控制其中一个机器人处于动态平衡状态,即其净位移为零。另一个机器人可以被驱动到目的地。在随后的一项研究中,同一小组引入了一种更为鲁棒的控制器,可在驱动和跟踪之间进行最佳切换,以实现两个磁性机器人的独立闭环控制[47]。

3.2.3. 均匀磁场和梯度磁场共同驱动

旋转均匀磁场和梯度磁场分别用于通过磁扭矩和拖拽力驱动磁性微型机器人。因此,旋转均匀磁场可以驱动微型机器人进行旋转运动,而梯度磁场则驱动微型机器人进行平移运动。本节将总结采用均匀磁场和梯度磁场组合的选择性控制方法。在此驱动框架中,其中一种驱动模式(扭矩或力)用于锁定不移动的目标,而另一种驱动模式负责操作其他目标。这种选择性控制框架与磁驱细菌的运动方式类似,磁驱细菌的运动方向由磁场控制,而细菌的

动能负责作为动力源向前移动细菌[48]。两个独立驱动的磁性粒子被证明可以使用组合的旋转磁场和梯度磁场顺序

或以平行方式移动。顺序运动控制时[图5(a)][49]，未被选择的微型机器人通过旋转推进力和阻力之间的动态平

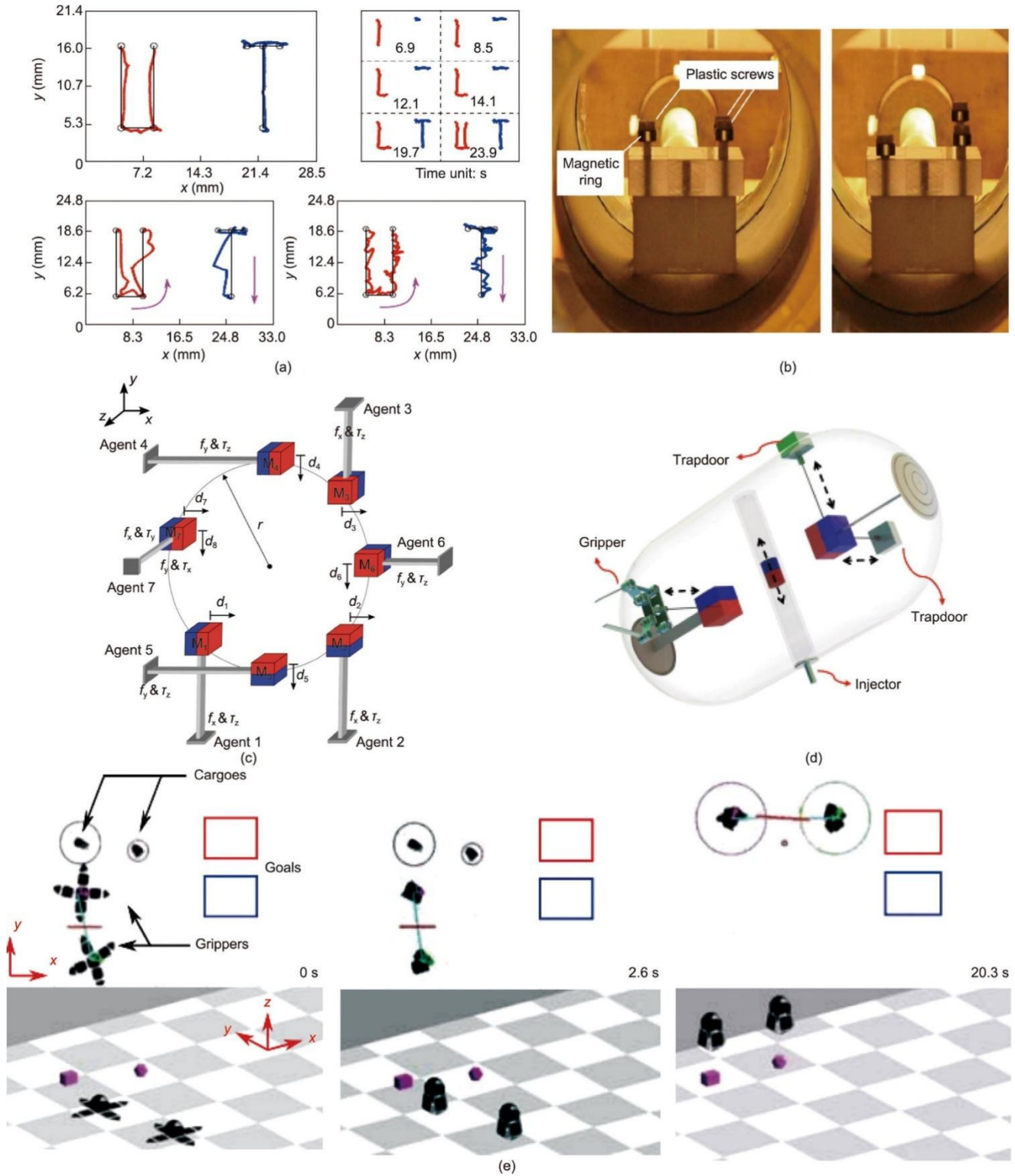


图5. 将均匀旋转磁场和梯度磁场结合进行机器人选择性控制。(a) 均匀磁场用于机器人激活，梯度磁场用于拖拽机器人。(b) 梯度磁场和均匀强磁场结合在空间中产生零场点；零场点机器人被旋转均匀场驱动上下移动，其他位置机器人则被锁定。(c) 使用梯度和均匀磁场实现8个自由度的独立控制。(d) 具有独立控制药物输送和活检功能的胶囊机器人。(e) 旋转均匀磁场用于改变机器人的姿态，从而调整它们的相互作用，实现独立的位置控制：梯度磁场用于远距离移动机器人。 d_1-d_6 ：移动方向； f_x, f_y ：驱动力； τ_x, τ_y, τ_z ：驱动力矩； M_1-M_7 ：机器人个体。(a) 经许可转载自参考文献[49]；(b) 经许可转载自参考文献[50]；(c) 经许可转载自参考文献[52]；(d) 经许可转载自参考文献[53]；(e) 经许可转载自参考文献[27]。

衡被锁定在原始位置附近。由于均匀场的旋转轴垂直于梯度方向，因此沿旋转轴的运动受到限制。对于同步运动控制，使用梯度磁场驱动两个个体向所需方向运动是一项挑战。研究人员提出了一种分步方法来同时驱动两个机器人。为了提高控制精度，一旦微型机器人与其所设定轨迹之间的距离大于阈值时，就会调整梯度磁场以实现两个机器人不同运动轨迹的控制。

Rahmer等[50]报道了一种空间选择性驱动螺旋微型机器人的方法。在这项研究中，研究人员在工作空间中的三个不同位置的螺钉上分别安装一个磁环。施加的磁场由静态梯度磁场 H_s 、用于净零场选择的旋转磁场 H_{offs} 和用于驱动均匀旋转磁场 H_{rot} 组成，总驱动磁场可以表示为： $H = H_s + H_{\text{offs}} + H_{\text{rot}}$ 。通过叠加静态梯度磁场 H_s 和旋转磁场 H_{offs} 可以在空间中创建净零场点。之后再施加旋转均匀磁场 H_{rot} 用于驱动磁性目标旋转。相比之下，由于在其他非净零磁场点，磁环和螺钉之间在磁力挤压的作用下存在较大的摩擦，则磁环在旋转均匀磁场 H_{rot} 作用下也不能旋转，可以被认为是锁定状态[图5(b)] [50]。

2015年，Petruska和Nelson等[51]证明，磁场及其梯度在工作空间中任意一点都可以被分解为8个独立分量。三年后，Salmanipour和Diller[52]展示了最多8个自由度的独立控制，其最大运动耦合度为8.6%。如图5(c)[52]所示，该八自由度磁系统中包含7个可被独立控制的立方体磁体，这些磁体在物理上受限于沿一个或两个轴发生的偏转。外部磁场及其梯度可以在每个机器人上产生力和扭矩的各种组合以进行独立控制。相似的，其他研究人员开发了一种多功能胶囊机器人，它具有7个可以独立驱动的自由度，如图5(d)所示[53]。其中三个自由度用于控制喷药室，其他自由度用于运动和活检。实验结果表明，自由度之间的平均串扰误差为7.0%，最高误差为18.3%。最近还有学者提出了两个可独立控制的微型磁性夹具用于拾取和转运货物系统，该系统能够通过路径规划算法独立拾取货物并将货物运送到两个不同的目的地。其中外部梯度磁场被用来调整两个夹具的大体位置。当夹具靠近物体时，精确位置是通过两磁性夹具之间的相互作用力进行调整的[图5(e)] [27]。

3.3. 局部电磁铁驱动策略

前面几部分讨论的独立控制方法都是基于全局磁场的输入进行的。系统中每个磁性线圈的输入电流都经过精确控制，使选定的磁性微型机器人能够依照想要的方式进行移动，同时最大程度地减少与其他微型机器人的耦合。这些方法依赖的控制算法涉及具有高阶控制矩阵的复杂建

模。如果不提供反馈，轨迹误差很容易累积，因此很难消除对未选定目标的驱动影响。为了简化控制过程，研究人员开发了专门的基板，可以产生用于驱动的局部磁场。这种系统的操作机制通常使用嵌入式的微型螺线管或静电底座来推动或锚定选定的微型机器人。图6[4,54-65]总结了近年来使用局部磁场进行机器人独立驱动的不同策略。这种方法论的局限性在于它依赖于高精度的制造基板，并且不能将操作空间扩展到3D空间。虽然这种方法解决了误差累积问题，但由于相邻驱动单元之间磁场的快速变化，很难在两个本地单元之间准确移动目标。

早在1995年，研究人员就开始通过设计微电磁铁阵列系统来操作多个永磁体目标[图6(a)] [54]。随后，Lee等[55]在2001年设计了两种类型的微电磁铁阵列（环形和矩阵陷阱）来产生高磁密度（约0.1 T）和磁场梯度（约 $10^4 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ ）以吸引和捕获磁性粒子[图6(b)]。随着集成电路技术的发展，Peltine等[56]将微线圈制造到印刷电路板（PCB）中以产生局部磁场，以便操纵多个同质的毫米级机器人[图6(c)]。同样，Cappelleri等[57]通过采用微机电系统（MEMS）制造的微线圈阵列来操纵磁性机器人[图6(f)]，并且在仿真和开环实验中成功证明了平面工作空间中多个机器人的独立控制。

为了减少累计误差，Chowdhury等[58,66]利用CCD相机获得的视觉位置反馈开发了闭环控制系统[图6(g)]。在他们的工作中，基于D* lite的路径规划器用于路径点的确定，并应用线性规划优化算法根据所需的驱动力确定每个驱动单元的电流。为了克服两个螺线管之间低磁通区域的弱驱动力不足以驱动机器人的缺陷，研究人员提出了一种改进的双层正交布局的微线圈系统，这种双层配置被证明可以用来执行微装配任务[图6(h)] [59,67]。Steager等[60]通过全局磁场和局部磁场的叠加，提出了一种具有微米级精度的精细操作策略[图6(i)]。其中远距离的移动由全局磁场完成，而基板阵列的局部微线圈用于产生局部磁力以捕获选定的粒子。文献[4]首次报道了使用局部电磁阵列来完成时序任务[图6(j)]。之后，在2019年，Chakravarthula等[61]设计了两个接头有卡扣的协作机器人来转移货物[图6(k)]；这些机器人可以被独立控制打开和关闭，并且能够协同工作。最近，研究人员还演示了使用数字磁性基板来组装电子材料[68]。

多个磁性机器人的控制操作会引入一个新的问题，即机器人个体之间的相互耦合。Johnson等[69]讨论了微型机器人之间的相互作用，并给出建议的最小距离以确保机器人间的吸引力小于静摩擦力。文献[62]提出了一种具有导航功能底板的液滴选择性操纵系统。该研究的灵感来自

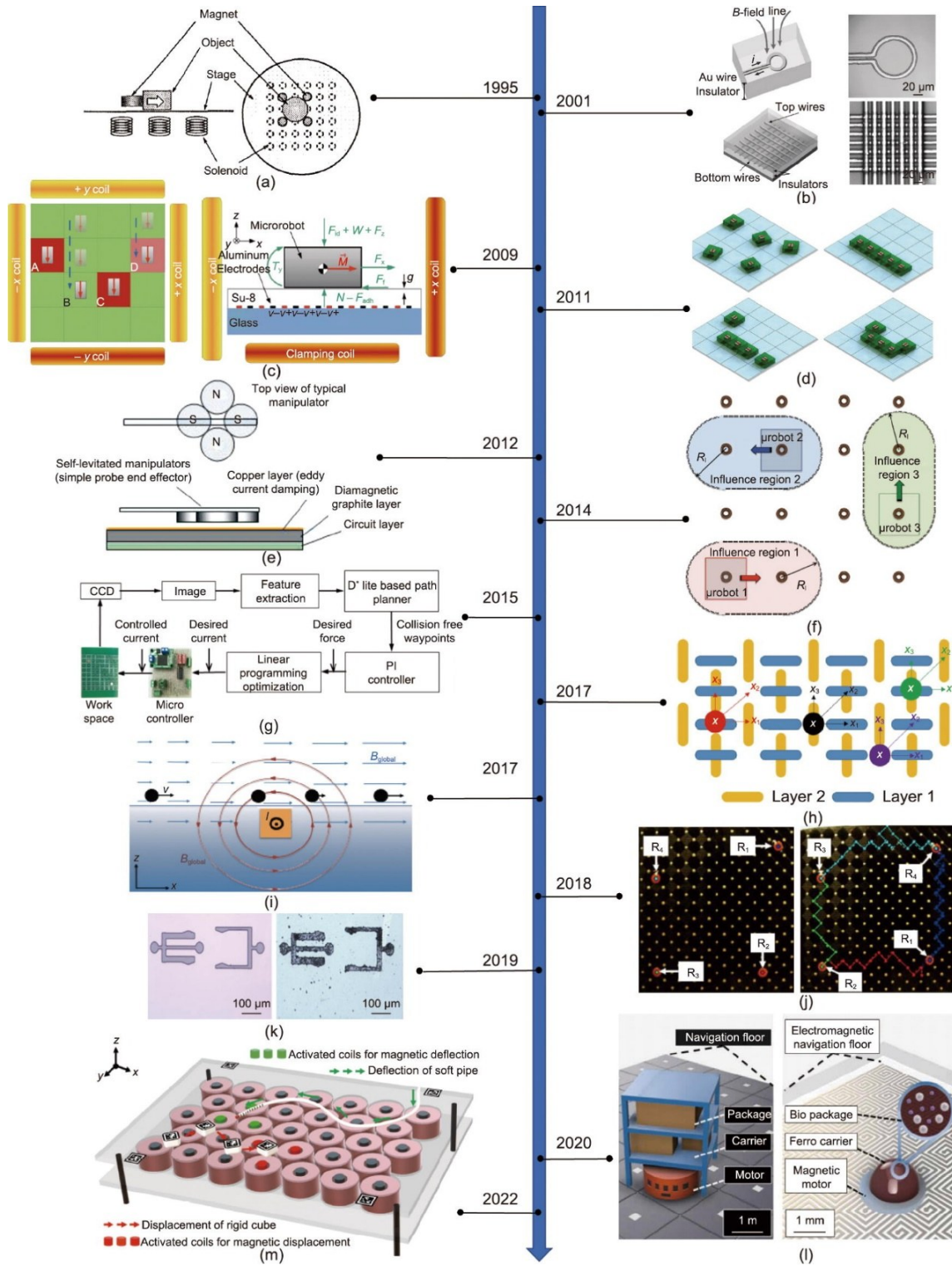


图6. 利用局部电磁场的多机器人系统选择性控制策略。(a) 使用局部螺线管阵列进行独立控制的首次演示实验；(b) 用于粒子捕获和驱动的改进螺线管结构；(c) 施加静电力锚定被选择目标；(d) 使用局部锚定进行机器人图案化编程操作；(e) 使用印刷电路板 (PCB) 集成的线圈提供局部磁场；(f) 以开环方式独立控制机器人个体；(g) 具有实时位置反馈的闭环控制单个机器人目标；(h) 使用正交的双层微线圈以增强局部磁场；(i) 全局和局部磁场组合以对机器人个体进行选择操作；(j) 使用独立控制来完成时序任务；(k) 两个磁性个体合作完成运输任务；(l) 用于液滴操纵的智能微存储系统；(m) 使用平面线圈阵列独立控制柔性性和刚性机器人。*i*: 电流；A、B、C、D: 4个微型机器人； F_{ad} : 静电力锚定力； W : 重量； F_x 、 F_y 、 F_z : 磁力； F_{fr} : 静摩擦力； N : 反作用力； T : 磁扭矩； F_{adh} : 吸附力； \vec{M} : 微型机器人的磁矩； V^- 、 V^+ : 电极间的相对电压； R_1 : 作用半径；CCD: 电荷耦合器件；PI: 比例-积分； x : 当前状态； $x_1 \sim x_3$: 过渡状态； I : 电流； B_{global} : 全局磁场； B_{local} : 局部磁场； v : 速度； $R_1 \sim R_4$: 4个机器人。(a) 经许可转载自参考文献[54]；(b) 经许可转载自参考文献[55]；(c) 经许可转载自参考文献[63]；(d) 经许可转载自参考文献[64]；(e) 经许可转载自参考文献[56]；(f) 经许可转载自参考文献[57]；(g) 经许可转载自参考文献[58]；(h) 经许可转载自参考文献[59]；(i) 经许可转载自参考文献[60]；(j) 经许可转载自参考文献[4]；(k) 经许可转载自参考文献[61]；(l) 经许可转载自参考文献[62]；(m) 经许可转载自参考文献[65]。

智能仓库中的自动导引车系统。如图6 (1) [62]所示, 导航底板嵌入了一组电磁线圈阵列装置用于驱动永磁体。与生物试剂混合的铁磁液滴可以在电磁基板上移动以进行试剂运输。文献[70–71]也采用类似的方法来重新配置铁磁流体液滴机器人。除了微电磁阵列, 另一种独立控制技术是基于静电锚定。使用这种方法, Pawashe等[63]开发了一种选择性控制策略, 使用4个外部电磁线圈进行驱动, 并在基板下方使用额外的叉指电极选择性地微型机器人制动到所需位置[图6 (c)]。在另一个类似的系统中, 导航表面被分成一个由电极制成的单元格, 以使用静电力捕获磁性微型机器人。由于该方法的便捷性和可靠性, 在局部基板上对微型机器人的选择性控制策略也用于组装和拆卸任务[64]。最近, Li等[65]还开发了一种用于操纵柔性 and 刚性机器人的电磁阵列系统[图6 (m)]。该系统展示了控制多个刚性机器人或协同导航多个柔性机器人的潜力。

3.4. 局部可移动的永磁体策略

磁偶极子模型表明, 永磁体可以在其周围产生梯度磁场。该局部磁场可以通过重新放置磁场源来调整, 并可用于独立控制微型机器人。与局部基板上的驱动不同, 基于永磁体运动的方法可用于在3D空间中操纵物体, 如在工作空间中提升和悬浮目标。然而, 基于永磁体的方法在操作多个对象时存在高耦合效应。此外, 由于磁场无法关闭, 这可能会对工作空间内其他铁磁物体产生电磁力而引入其他问题。

Torres等[72–73]在机器人机械手上安装了一个圆锥形永磁体作为末端执行器。锥形尖端周围的聚焦磁场可用于以更高的精度操纵目标[图7 (a)] [72]。2015年, Nelson和Abbott [74]展示了通过单个旋转偶极子同时控制两个磁性螺钉的相向运动或同向运动[74]。如图7 (b)所示, 旋转磁铁可以在不同区域产生方向各异的旋转磁场。例如, 对于区域A, 旋转轴向右; 对于区域B, 旋转轴向左。因此, 旋转的永磁体可用于同时将多个物体操纵到不同的目的地。随后, 该研究小组还进一步开发了具有位置反馈的闭环控制模型, 实现了低于0.2%的稳态误差和低于1.0%的角速度波动[75]。基于局部磁场驱动的方法被用于腹腔镜工具的倾斜角度调整[76]。之后, 研究人员使用外部可移动磁铁来完成多臂协作任务[图7 (c)] [77]。然而, 对磁梯度建模是比较困难的, 尤其是当磁场源的材料和形态不均匀时。研究者在神经网络的帮助下对磁通量密度进行了建模, 从而实现了两个相同粒子的同时和独立的显微操作[78]。除固体材料外, 铁磁流体学也被用于构

建多关节机器人[79]。当将外部磁铁放置在某些关节上时, 由于铁磁流体的积累, 局部压力增加并使关节弯曲[图7 (d)] [79]。因此, 通过独立驱动多个关节形成不同的运动模式。类似的机制已被用作磁流变阀, 用于软机器人的分布式控制[80]。

3.5. 共振频率策略

另一种典型的在多机器人系统中的选择性控制方法是利用机器人间的频率响应不同来实现单个机器人的操作。在这种方法中, 微型机器人或个体被设计为具有不同的共振频率。基于频率的方法可以大致分为三类: ①用不同的材料或成分分别制造单个微型机器人; ②设计具有特殊结构或尺寸的微型机器人; ③机器人携带具有不同频率特征的定制电子电路。

利用阈值频率是多个机器人选择性控制的最广泛使用的方法之一[81]。阈值频率是指与外部驱动磁场相对应的最大同步频率, 即当施加频率大于阈值频率时, 机器人将不能随着驱动磁场的变化而同步运动。当外部频率低于所有机器人个体的阈值频率时, 多个机器人可以同时被驱动。相反, 如果外部频率超出了特定微型机器人的阈值频率时, 则该微型机器人将减速或保持静止, 因为此时驱动的磁性扭矩小于微型机器人的负载扭矩。

2002年, Ishiyama等[82]通过将永磁螺帽连接到螺丝尖端, 设计了两个微型机器。这两个微型机器设计有不同的长度(6 mm和9 mm)。实验表明, 两台机器都对1 Hz的磁场表现出同步响应。然而当频率增加到80 Hz时, 长度较长的微型机器人仍然可以被驱动, 但较短的机器人变得静止[图8 (a)中的(i)] [82]。在随后的研究中, 该研究小组进一步研究了两个微机械的独立定向控制[83]。Vach等[84]开发了5种具有不同频率速度特性的磁性微型螺旋桨, 并实现了独立转向的选择性控制[图8 (a)中的(ii)]。使用类似的驱动策略, Mahoney等[85]分析了软铁磁体和永磁体的不同频率响应。当施加的频率高于两个小型设备的阈值频率时, 研究人员实现了两个个体的差速控制[图8 (a)中的(iii)] [85]。不同的频率响应也被用于磁性微机器的分类[86]。由于摩擦力的差异, 机器人表面改性也可以改变其频率响应。例如, Cheang等[87]应用化学方法将三个磁性颗粒组合成弯曲结构[图8 (a)中的(iv)]。尽管所有机器人个体都具有相同的几何形状和磁性, 但表面亲水性或疏水性涂层材料的存在导致了其运动时的不同摩擦力, 从而影响个体在水中的游动行为。实验结果表明, 具有疏水表面的微型游泳器比亲水表面的微型游泳器具有更高的阈值频率特性。

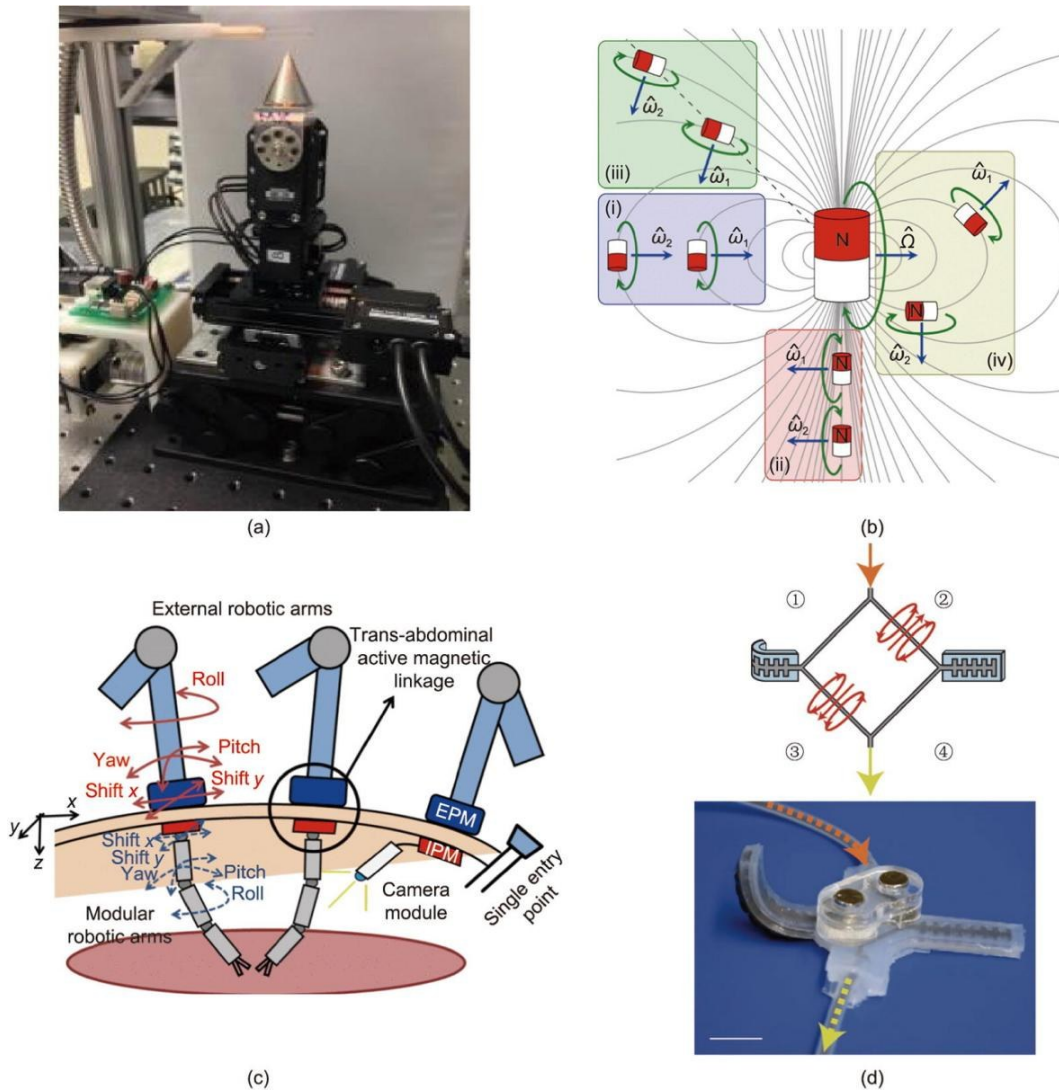


图7. 由可移动永磁体独立控制机器人运动。(a) 安装圆锥形永磁体作为机器人机械手的末端执行器, 用于产生局部磁场来操纵机器人; (b) 永磁体可以在两个不同位置以相同频率产生不同方向的扭矩; (c) 由局部永磁体驱动多臂机器人的独立和协作操作; (d) 局部永磁体使磁流体聚集和阻塞, 从而独立控制机器人关节。 $\hat{\Omega}$ 、 $\hat{\omega}_1$ 、 $\hat{\omega}_2$: 旋转轴; EPM: 外部永磁体; IPM: 内部永磁体。(a) 经许可转载自参考文献[72]; (b) 经许可转载自参考文献[74]; (c) 经许可转载自参考文献[77]; (d) 经许可转载自参考文献[79]。

个性化的结构设计是另一种调整阈值频率的策略。代表性设计如图8 (b) 中的 (i) [88]所示。在本文中, 微型机器人由两个安装在基板上的镍单元组成, 它们之间有一个微小的间隙。通过改变外部磁场的方向, 可以使两个镍单元收缩或拉伸。机器人身体底部设计的斜向脚与地面产生的各向异性摩擦使得机器人在周期性震荡磁场驱动下实现净运动。两个镍单元之间的间隙和装配方向的变化赋予它们不同的频率响应。应用这些先进的设计策略, 研究人员实现了对一组微型机器人的选择性控制。这种独特的设计和控制框架使该团队赢得了2007年和2009年的RoboCup比赛[88–89]。

受人类精子游动形态的启发, Khalil等[90]设计了一个微型机器人, 其两条尾巴安装在相反方向[图8 (b) 中

的 (ii)]。研究人员发现, 通过控制施加磁场的频率可以选择性地操纵具有不同长度尾巴的微型机器人。当两条尾巴产生的推进力大小相等但方向相反时, 存在临界反转频率以停止所选机器人的运动。研究人员证明, 临界频率取决于两条尾巴的长度比。因此, 微型机器人被制造成具有不同的尾长比, 并通过改变输入频率进行选择控制。在另一项研究中, 微型螺旋机器人采用了不同的磁头结构 [I 型: 条形; II 型: 十字形; 图8 (b) 中的 (iii)] [91]。在施加的旋转磁场发生 90° 突然变化的情况下, I型机器人可以跟随施加磁场旋转, 而II型机器人保持静止。因此, 该施加频率也能对机器人进行选择性的操作。

对于中尺度机器人, 电磁线圈可以通过定制电阻-电感-电容 (RLC) 电路的不同谐振频率而被选择性地触发。

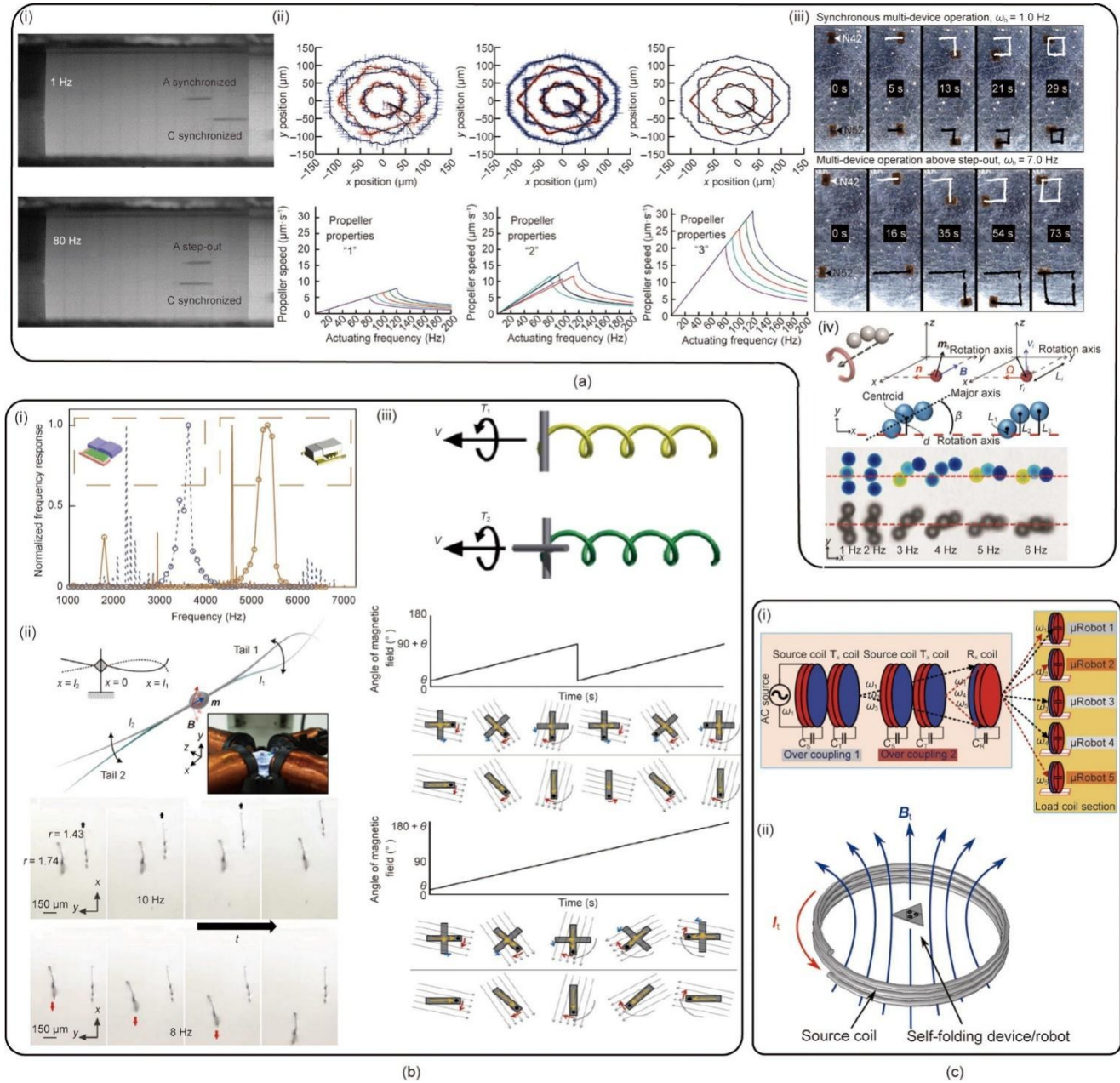


图 8. 通过频率谐振进行机器人选择性控制。(a) 机器人内在物理特性导致不同的共振频率：(i) 用于选择性控制的不同直径和长度的机器人；(ii) 可以控制具有不同材料的个体的独立轨迹；(iii) 不同的阈值频率调节受控微型机器人的速度；(iv) 表面材料具有不同的亲水性，导致不同的共振频率。(b) 特殊的结构导致不同的共振频率：(i) 不同的安装方式导致不同的外部磁场作用力（每个机器人都嵌入了两个小磁铁，一个平行于机器人主体安装，另一个垂直于机器人主体安装）。通过调整外部磁场的方向，可以使两个嵌入的磁铁相互吸引或排斥，从而驱动机器人。(ii) 双尾精子机器人，两条尾巴的不同长度比会导致不同的阈值频率；(iii) 不同的头部结构（条形头部与十字形头部）在外部磁场的驱动下会产生不同的延伸力和共振频率。(c) 电阻-电容 (RC) 电路引起不同的谐振频率：(i) RC 电路通过频率解耦来单独控制不同的小型机器人；(ii) 通过控制外部磁场的频率来控制多臂折纸机器人的不同关节，其中每只手臂都安装了具有不同频率响应和形状记忆合金的电阻-电感-电容 (RLC) 电路。A、C：两个磁性机器人个体； ω_s ：应用频率；N42、N52：两种磁性材料； m_s ：磁矩； B ：磁场； n ：垂直于 m_s 和 B 的单位向量； Ω ：移动方向； d ：机器人到旋转轴的距离； β ：旋转轴与运动方向的夹角； $L_1 \sim L_3$ ：磁珠中心到旋转轴的距离； L_r ：机器人中心到旋转轴的距离； r_i ：第 i 个磁珠的矢量位置； v_i ：第 i 个磁珠的切向速度； l_1, l_2 ：两条尾巴的长度； r ：两条尾巴的长度比； v ：速度； T_1, T_2 ：两个机器人的磁力矩； θ ：对称轴与外磁的夹角；Tx：发射器；Rx：接收器； C_s, C_T, C_R ：源线圈、发射线圈和接收线圈的电容； $\omega_1 \sim \omega_5$ ：5 个个体的共振频率；AC：交流电； I_s ：外部线圈输入电流； B_s ：自折叠设备上的磁场。(a) 经许可转载自参考文献[82,84–85,87]；(b) 经许可转自参考文献[88,90–91]；(c) 经许可转载自参考文献[92–93]。

如图 8 (c) [92–93]所示，该技术已用于多个磁性微型机器人的选择性控制。例如，2018 年展示了同步无线电力传输和驱动系统[92]。在这个系统中，来自源线圈的能量被选择性地传输到具有特定频率的接收线圈。具有不同谐

振频率的负载线圈安装在微型机器人内[图 8 (c) 中的 (i)] [92]。相似的，研究人员还开发了具有可寻址控制能力的多关节折纸微型机器人[93]。在这项工作中，外部源线圈通过改变电流频率和幅度来提供随时间变化的磁场。

每个关节都由一个形状记忆阵列和一个具有独特共振频率的RLC共振器构建而成。当外场的频率与所选RLC电路的谐振频率相匹配时,相应的关节就会被激活。通过在各频率之间快速切换或将所有频率信号叠加在一起,也可以实现多个关节的同时折叠[图8(c)中的(ii)] [93]。

4. 应用

4.1. 仿生应用

灵巧的机器人操作一般需要多个关节或多个机器人的配合。因此,应用多臂机器人对于完成具有多个自由度的任务至关重要。传统的多关节机器人由于需要大量装配部件,如重型电机和齿轮等,将导致这类机器人的体积庞大,不适合小规模应用。磁性微型机器人解决了这一限制,因为它们可以被远程控制并且需要很小的空间。图9(a) [79,93–95]显示了一些通过选择性激活机器人关节的仿生应用。例如,Boyvat等[93]设计了一个多关节机械臂,其中每个关节都由形状记忆合金和单独的接收线圈组成。通过改变外部磁源的驱动频率[图9(a)中的(i)],可以选择驱动单个关节或同时驱动多个关节[93]。另一项研究报道了一个多层折纸机器人[94]。每层模块由覆盖有永磁体的折纸结构组成。堆叠结构使得机器人从顶层到底层所需的旋转力矩逐渐增加。结果,每一层都能够独立地展开和收缩以响应外部磁场产生的特定范围的磁场强度。该原型被证明可以通过使用施加的磁场作为输入并将相应的机械响应数字化为数字输出来构建施密特触发器(Schmitt trigger) [图9(a)中的(ii)] [94]。受到盛开的鲜花启发,Mao等[95]通过在花瓣中集成电磁线圈设计了一种花卉机器人。“花瓣”可以通过控制馈电电流[图9(a)中的(iii)]被选择性或同时激活[95]。研究人员还开发了一种多足爬行机器人[79]。如图9(a)中(iv)所示,该机器人由铁磁流体施加的压力来驱动。为了进行选择性控制,可以将永磁体放置在选定通道上方以使得流体聚集,从而阻塞通道。结果表明,多足爬行机器人的选择性和协调控制使机器人能够朝着目的地移动。

4.2. 装配和物料运输

尽管很多研究已经对单个或群体微型机器人进行了深入研究并证明了它们的货物运送能力,但涉及多个微型机器人的物流任务仍然具有挑战性。通过选择性和协作控制解决这个问题为未来的应用带来了巨大的好处,因为多个微型机器人可以为机器人系统提供更高的负载能力和更精细化操作的能力。微装配是一个具有代表性的应用领域,

可以对微装配任务采用协同操作,如图9(b)中(i)所示[4]。全局磁场和局部磁场被同时用于将多个目标组装成不同的模式[4,30]。另一项组装任务是在局部磁场的帮助下完成的[61]。在这项工作中,两个磁性夹具被设计为具有用于传输包裹货物功能的卡扣结构[图9(b)中的(ii)] [61]。局部磁场驱动技术也被用于操纵多个液滴(如分配、输送和传感) [图9(b)中的(iii)] [62]。局部静电锚定也被用于在全局磁场中捕获选定的目标,从而通过启动和锚定选定的目标来完成组装任务。大多数具有独立控制策略的装配应用都强烈依赖于2D和专用基板上的局部磁场操作。未来的研究有望通过控制全局磁场从2D操作扩展到3D操作。

4.3. 医疗应用

近年来,许多机器人和传感系统已经展示了它们在医疗应用中的潜力[96–97]。其中,磁性微型机器人因其多重优势在生物医学应用中展现出突出的潜力,这些优势包括:①生物组织对磁场几乎透明;②磁场不依赖开放的视觉空间,可在深层组织中远程操作微型机器人;③磁性操作不需要物理连接或额外的机载电池和机载电路空间。由于磁性微型机器人体积小,它们可以通过胃肠道、支气管和血管等狭窄腔室。图9(c) [35–36,53,77]显示了使用选择性控制策略的多个磁性接头或微型机器人的生物医学潜力。

2012年,Natali等[77]展示了用于外科手术的多臂磁控机器人导管的协同控制[图9(c)中的(i)]。手术器械中的磁铁由位于腹部组织上方的永磁铁控制。内部接头保持一定的距离以避免磁铁的耦合效应。为了使用在血管中移动的机器人为中风患者清除血块, Lee等[36]开发了一种多功能磁性机器人,其中每个功能都可以被有选择性地激活[图9(c)中的(iii)]。该系统通过解耦两个正交磁铁的运动来实现磁性微型机器人的选择性驱动。

胶囊微型机器人也被研究用于诊断和治疗胃肠道疾病[98]。文献[35]设计了一个带有两个正交腔室的胶囊机器人来容纳不同的药物[图9(c)中的(iii)]。在这两个腔室中嵌入磁铁,可以独立地控制将不同的药物输送到不同的位置。另一种胶囊机器人是通过集成三自由度药物释放机构和四自由度运动机构开发的[图9(c)中的(ii)] [53]。Shahrokhi等[46]使用商业MRI来驱动磁性微型机器人,以独立控制机器人的运动导航和活检功能。这个机器人由两个铁球组成,位于平面上的球体旋转以进行位置控制,而另一个铁质球体用于触发活检功能。

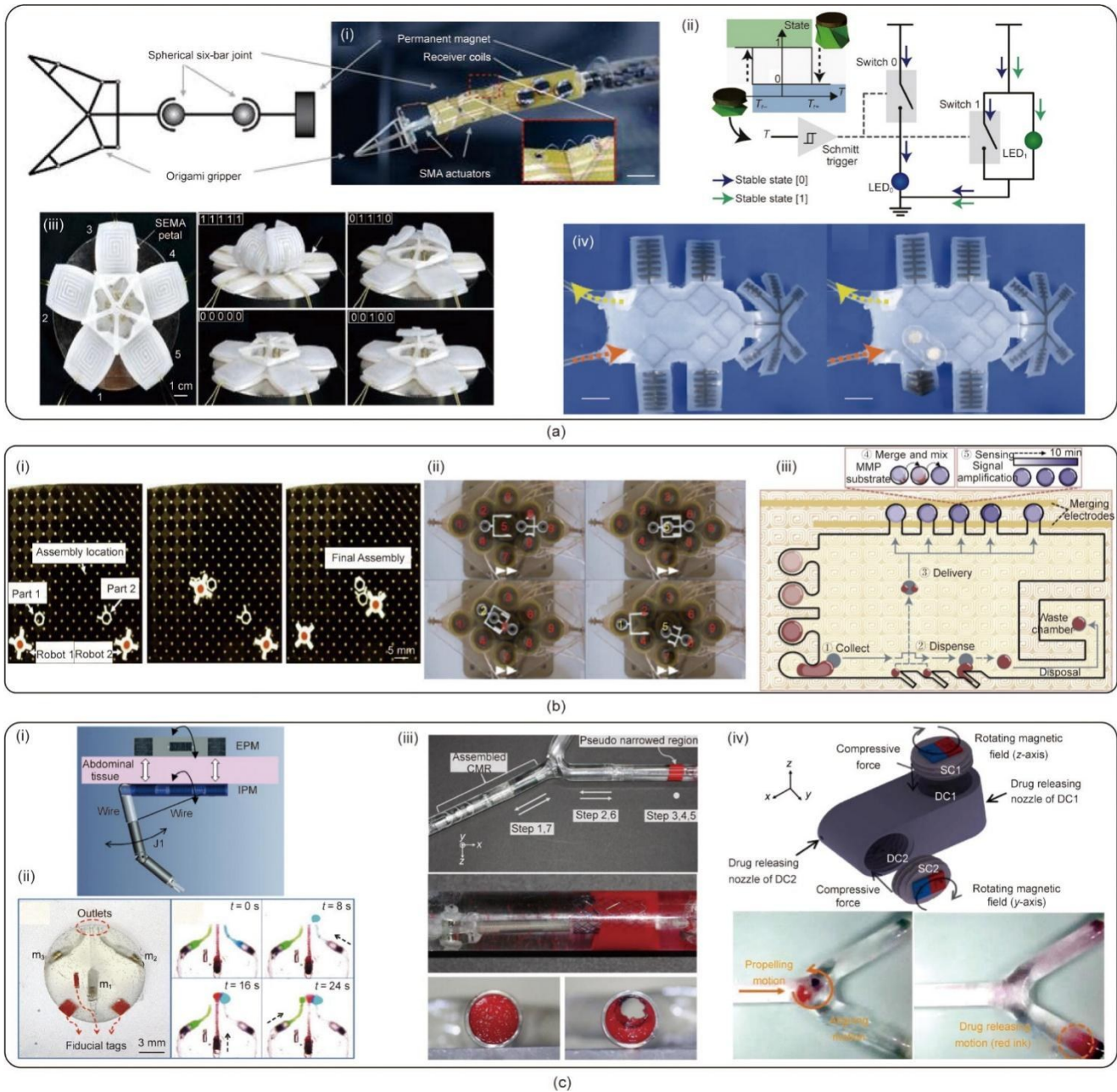


图9. 使用可独立控制的多机器人磁驱动系统的最新应用。(a) 多关节机器人: (i) 多关节机械臂; (ii) 折纸开关触发结构; (iii) 可单独控制折展的花瓣机器人; (iv) 多足爬行机器人。(b) 货物转运和机器人组装: (i) 独立的货物运输和组装; (ii) 两机器人协作完成货物运输; (iii) 液滴运输和操作。(c) 医疗场景中的应用: (i) 手术机械臂; (ii) 多功能(样品抓取和药物输送)胶囊机器人; (iii) 清除血块的爬行机器人; (iv) 具有两个腔室的胶囊机器人, 用于顺序给药。 T_c 、 T_e : 折叠和展开单元所需的力矩; T : 磁扭矩; LED: 发光二极管; SEMA: 软电磁执行器; SMA: 形状记忆合金; J1: 关节1; $m_1 \sim m_3$: 三个磁性机器人; t : 时间; CMR: 胶囊磁性机器人; SC1、SC2: 磁性螺帽1和磁性螺帽2; DC1、DC2: 药物腔室1和药物腔室2。(a) 经许可转载自参考文献[79,93-95]; (b) 经许可转载自参考文献[4,61-62]; (c) 经许可转载自参考文献[35-36,53,77]。

5. 讨论与未来展望

根据被控机器人的数量, 磁性机器人系统可分为三类: 个体系统、多机器人系统和群体系统。多机器人系统的独立控制是提高负载能力和多功能性的有效策略。本文总结了通过磁场独立控制多个微型机器人的最新进展。表1 [4,21,28-29,35-38,42,44,54,62,64,74,77,79,83,86,89-92,

96,99]总结了代表性控制策略及其特征。

在前面提到的5种独立控制策略中, 均匀磁场下基于扭矩的驱动方法依赖于具有不同物理特性(如材料、几何形状或尺寸的变化)的微型机器人。梯度磁场驱动时, 产生的推进力需要通过运动学模型进行分析, 而且一般需要引入反馈机制, 因为当梯度在不同位置发生变化时, 非线性建模的误差会迅速累积。专用基板上的局部螺线管驱动

方式通常用于简化控制问题并独立控制大量微型机器人。然而，这种策略涉及复杂的制造过程，并且仅限于2D平面工作空间。相比之下，基于永磁体的微型机器人易于制造且消耗的能量最少。然而，由于磁场无法关闭，磁场源的意外移动可能会导致碰撞或严重的吸引力问题。频率共振驱动是一种被大量采用的独立控制驱动方法。这种方法依赖于各个微型机器人的不同制造方式，从而为它们提供不同频率响应。具有有源线圈的多设备系统增加了控制灵活性，因为机器人的每个自由度都可以被轻松启动，而不是被外部磁场被动控制。然而，由于制造上的限制，这类磁性系统通常都非常笨重，使其在体内的应用受到限制。5种主流策略有时会结合起来以获得更好的驱动性能。例

如，Khalesi等[100]利用 $2N$ 个永磁体和一对亥姆霍兹线圈实现对 N 个磁性机器人的同时独立控制。

尽管在所综述的文献中已经大量展示了用于选择性和独立控制多个磁性微型机器人的各种技术，但提高驱动精度和可控机器人的数量仍然具有挑战性和实际价值。下面建议的几个关键解决方案有望进一步实现更高水平的灵巧性来实现对多个微型机器人的控制：

- 通过引入电磁力、重力、黏附力、摩擦力和流体力，为磁场中的多个受控微型机器人建立精细的运动学方程。参考文献[101–102]中介绍了这些力的建模过程。

- 设计灵巧的磁驱动系统在该类系统中，可以在选定区域加强磁场强度，以实现区域内目标的单独控制。参

表1 Comparison of representative control strategies for independent magnetic microrobot control

Control strategies	Sub-strategies	Magnetic source	Pros and cons	Application (representative)	Refs.
Uniform rotational field	Individuals have distinct magnetic properties	Helmholtz coil/permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Easy actuation • Difficult to fabricate individuals in various magnetic composites 	Drug delivery, swarm collaboration	[28–29]
	Individuals have novel physical design	Helmholtz coil/permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Easy actuation • Difficult to design novel structures on a small scale 	Biopsy and spray, medical examination	[35–36]
Global gradient field	Fully actuated system	Maxwell coil/commercial MRI/permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Individuals can have the same properties • Specific kinematic model • Precise position feedback is necessary 	Biopsy and spray, trajectory following, medical examination	[21,37–38]
	Underactuated system	Maxwell coil/commercial MRI/permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Individuals can have the same properties • Less magnetic source required • Precise position feedback is necessary • Require other external force to control 	Biopsy and spray, trajectory following	[42,44]
Local magnetic field	Moveable permanent magnet	Permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • Individuals can be of the same properties • Precise position control • Simple control system • Difficult to control multiple objects simultaneously 	Crawling robot, surgical robot	[74,77,79]
	Specialized substrate with micro solenoid array	Customized micro solenoid	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-object simultaneous actuation • Actuation errors will not exceed the distance between cells • Limited in 2D space 	Patterns programming, assembly and transfer, droplet manipulation	[4,54,62,64]
Frequency response	Individuals with different materials	Helmholtz coil/customized coil array	<ul style="list-style-type: none"> • Easy actuation • Require knowing the resonance frequency in advance • Difficult to fabricate individuals with distinct properties 	Drug delivery, swarm collaboration	[83,86]
	Individuals have a special designed structure or size	Helmholtz coil/customized coil array	<ul style="list-style-type: none"> • Easy actuation • Difficult to fabricate novel structures in the small structure 	Swarm collaboration, medical examination	[90–92]
	Customized circuit with different frequency responses	Customized planar coil	<ul style="list-style-type: none"> • Easy fabrication • Require electricity or thermal transfer • Individuals are relatively bulky 	Multi-joint robot, crawling robot, surgical robot	[89]
Active actuation	Individuals determine their own movement rather than being controlled by an external field	Permanent magnet	<ul style="list-style-type: none"> • More individuals can be actuated simultaneously • Individuals are bulky 	Multi-joint robot, crawling robot	[96,99]

考文献[22,103]中提出了具有可调电磁源位置和方向的示例系统。

- 构建具有主动控制功能的驱动系统，从而具有多个独立控制的设备。例如，微型柔性定制电磁线圈的集成将使高自由度系统的独立控制成为可能。

- 将磁系统与其他场驱动技术（如声学、光和静电）相结合。本文中提到了使用静电力来选择性地锁定磁性微型机器人的方法。未来的研究可以通过将磁场与光波或声波相结合，以在3D空间中进行显微操作来开发更可靠的方法。文献[104–105]提供了多场联合控制技术的几个例子。

群体控制在医疗应用中具有重要意义，因为微型机器人的尺寸限制了其药物输送有效载荷。此外，多个机器人的独立控制对于完成时序任务是必要的，例如，在持续时间内将药物输送到多个位置。大多数可独立控制的机器人的尺度都在微米到毫米范围内。对于这些纳米机器人，群体控制策略可能更适合增加有效载荷能力，但实现独立控制仍具有难度。此外，由于工作空间有限，很难在医疗应用中采用更大规模的机器人。先前的研究已经成功地展示了选择性和独立控制多关节磁系统在外科手术、自组装和药物输送中的应用。对于临床问题的转化，需要通过进行更多的动物和物理实验来确保高安全性和可靠性。

6. 总结

本文回顾了磁性多机器人系统的发展，这些系统可以被独立控制，也可以通过协同控制以进行复杂的操作。首先介绍了一般的磁耦合机制，并分5类解释了最先进的控制策略。回顾了每个类别中方法的优点和局限性。本文分三类对可独立控制的多机器人系统的应用进行了讨论：多关节手术机器人操作、货物运输和生物医学治疗。本文提供了包括代表性研究的汇总表，并讨论了未来研究的关键挑战和方向。尽管对多个磁性微型机器人的选择性和独立控制的研究仍然存在许多挑战并且处于起步阶段，但该策略具有将机器人显微操作转化为具有更高灵活性和更高效载荷输出水平的巨大潜力。控制每个微型机器人执行专门任务的能力将把微型机器人系统提升到更高的智能化水平。

致谢

本研究得到了香港研究资助局(RGC)(11212321、

11217922和ECS-21212720)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515110175)和深圳市科学技术创新委员会(SGD20210823104001011)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Min Wang, Tianyi Wu, Rui Liu, Zhuoran Zhang, and Jun Liu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Son D, Gilbert H, Sitti M. Magnetically actuated soft capsule endoscope for fine-needle biopsy. *Soft Robot* 2020;7(1):10–21.
- [2] Polyak B, Friedman G. Magnetic targeting for site-specific drug delivery: applications and clinical potential. *Expert Opin Drug Deliv* 2009;6(1):53–70.
- [3] Wang X, Ho C, Tsatskis Y, Law J, Zhang Z, Zhu M, et al. Intracellular manipulation and measurement with multipole magnetic tweezers. *Sci Robot* 2019;4(28):eaav6180.
- [4] Kantaros Y, Johnson BV, Chowdhury S, Cappelleri DJ, Zavanos MM. Control of magnetic microrobot teams for temporal micromanipulation tasks. *IEEE Trans Robot* 2018;34(6):1472–89.
- [5] Rao KJ, Li F, Meng L, Zheng H, Cai F, Wang W. A force to be reckoned with: a review of synthetic microswimmers powered by ultrasound. *Small* 2015;11(24):2836–46.
- [6] Palima D, Glückstad J. Gearing up for optical microrobotics: micromanipulation and actuation of synthetic microstructures by optical forces. *Laser Photonics Rev* 2013;7(4):478–94.
- [7] Erdem EY, Chen YM, Mohebbi M, Suh JW, Kovacs GTA, Darling RB, et al. Thermally actuated omnidirectional walking microrobot. *J Microelectromech Syst* 2010;19(3):433–42.
- [8] Karpelson M, Wei GY, Wood RJ. Driving high voltage piezoelectric actuators in microrobotic applications. *Sens Actuators A Phys* 2012;176:78–89.
- [9] Kim Y, Parada GA, Liu S, Zhao X. Ferromagnetic soft continuum robots. *Sci Robot* 2019;4(33):eaax7329.
- [10] Cui J, Huang TY, Luo Z, Testa P, Gu H, Chen XZ, et al. Nanomagnetic encoding of shape-morphing micromachines. *Nature* 2019;575(7781):164–8.
- [11] Xie H, Sun M, Fan X, Lin Z, Chen W, Wang L, et al. Reconfigurable magnetic microrobot swarm: multimode transformation, locomotion, and manipulation. *Sci Robot* 2019;4(28):eaav8006.
- [12] Mahoney AW, Abbott JJ. Five-degree-of-freedom manipulation of an untethered magnetic device in fluid using a single permanent magnet with application in stomach capsule endoscopy. *Int J Robot Res* 2015;35(1–3):129–47.
- [13] Kummer MP, Abbott JJ, Kratochvil BE, Borer R, Sengul A, Nelson BJ. OctoMag: an electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. *IEEE Trans Robot* 2010;26(6):1006–17.
- [14] Yu J, Wang B, Du X, Wang Q, Zhang L. Ultra-extensible ribbon-like magnetic microswarm. *Nat Commun* 2018;9(1):3260.
- [15] Yu J, Jin D, Chan KF, Wang Q, Yuan K, Zhang L. Active generation and magnetic actuation of microrobotic swarms in bio-fluids. *Nat Commun* 2019;10(1):5631.
- [16] Abbott JJ, Diller E, Petruska AJ. Magnetic methods in robotics. *Annu Rev Control Robot Auton Syst* 2020;3(1):57–90.
- [17] Yang L, Zhang L. Motion control in magnetic microrobotics: from individual and multiple robots to swarms. *Annu Rev Control Robot Auton Syst* 2020;4(1):509–34.
- [18] Cao Q, Han X, Li L. Configurations and control of magnetic fields for manipulating magnetic particles in microfluidic applications: magnet systems and manipulation mechanisms. *Lab Chip* 2014;14(15):2762–77.
- [19] Hwang J, Kim J, Choi H. A review of magnetic actuation systems and magnetically actuated guidewire- and catheter-based microrobots for vascular interventions. *Intell Serv Robot* 2020;13(1):1–14.
- [20] Alapan Y, Yasa O, Yigit B, Yasa IC, Erkok P, Sitti M. Microrobotics and

- microorganisms: biohybrid autonomous cellular robots. *Annu Rev Control Robot Auton Syst* 2019;2(1):205–30.
- [21] Ongaro F, Pane S, Scheggi S, Misra S. Design of an electromagnetic setup for independent three-dimensional control of pairs of identical and nonidentical microrobots. *IEEE Trans Robot* 2019;35(1):174–83.
- [22] Du X, Zhang M, Yu J, Yang L, Chiu WYP, Zhang L. Design and real-time optimization for a magnetic actuation system with enhanced flexibility. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 2020;26(3):1524–35.
- [23] Cao Q, Fan Q, Chen Q, Liu C, Han X, Li L. Recent advances in manipulation of micro- and nano-objects with magnetic fields at small scales. *Mater Horiz* 2020;7(3):638–66.
- [24] Xie H, Sun M, Fan X, Lin Z, Chen W, Wang L, et al. Reconfigurable magnetic microrobot swarm Multimode transformation, locomotion, and manipulation. *Sci Robot* 2019;4(28):eaav8006.
- [25] Yu J, Yang L, Zhang L. Pattern generation and motion control of a vortex-like paramagnetic nanoparticle swarm. *Int J Robot Res* 2018;37(8):912–30.
- [26] Salehizadeh M, Diller E. Three-dimensional independent control of multiple magnetic microrobots via inter-agent forces. *Int J Robot Res* 2020;39(12):1377–96.
- [27] Zhang J, Salehizadeh M, Diller E. Parallel pick and place using two independent untethered mobile magnetic microgrippers. In: *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2018 May 21–25; Brisbane, QLD, Australia*. IEEE; 2019. p. 123–8.
- [28] Floyd S, Diller E, Pawashe C, Sitti M. Control methodologies for a heterogeneous group of untethered magnetic micro-robots. *Int J Robot Res* 2011;30(13):1553–65.
- [29] Mandal P, Chopra V, Ghosh A. Independent positioning of magnetic nanomotors. *ACS Nano* 2015;9(5):4717–25.
- [30] Tottori S, Zhang L, Peyer KE, Nelson BJ. Assembly, disassembly, and anomalous propulsion of microscopic helices. *Nano Lett* 2013;13(9):4263–8.
- [31] Diller E, Floyd S, Pawashe C, Sitti M. Control of multiple heterogeneous magnetic micro-robots on non-specialized surfaces. In: *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2011 May 9–13; Shanghai, China*. IEEE; 2011. p. 115–20.
- [32] Diller E, Floyd S, Pawashe C, Sitti M. Control of multiple heterogeneous magnetic microrobots in two dimensions on nonspecialized surfaces. *IEEE Trans Robot* 2012;28(1):172–82.
- [33] Diller E, Miyashita S, Sitti M. Magnetic hysteresis for multi-state addressable magnetic microrobotic control. In: *Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2012 Oct 7–12; Vilamoura-Algarve, Portugal*. IEEE. 2012. p. 2325–31.
- [34] Diller E, Miyashita S, Sitti M. Remotely addressable magnetic composite micropumps. *RSC Advances* 2012;2(9):3850–6.
- [35] Choi K, Jang G, Jeon S, Nam J. Capsule-type magnetic microrobot actuated by an external magnetic field for selective drug delivery in human blood vessels. *IEEE Trans Magn* 2014;50(11):1–4.
- [36] Lee W, Nam J, Jang B, Jang G. Selective motion control of a crawling magnetic robot system for wireless self-expandable stent delivery in narrowed tubular environments. *IEEE Trans Ind Electron* 2017;64(2):1636–44.
- [37] Vartholomeos P, Akhavan-Sharif MR, Dupont PE. Motion planning for multiple millimeter-scale magnetic capsules in a fluid environment. In: *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2012 May 14–18; Saint Paul, MN, USA*. IEEE; 2012. p. 1927–32.
- [38] Denise W, Wang J, Edward S, Vijay K. Control of multiple magnetic micro robots. In: *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; 2015 Aug 2–5; Boston, Massachusetts, USA*. ASME; 2015 p. V004T09A041.
- [39] Wong D, Steager EB, Kumar V. Independent control of identical magnetic robots in a plane. *IEEE Robot Autom Lett* 2016;1(1):554–61.
- [40] Mellal L, Folio D, Belharet K, Ferreira A. Optimal control of multiple magnetic microbeads navigating in microfluidic channels. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2016 May 16–21; Stockholm, Sweden*. IEEE; 2016. p. 1921–6.
- [41] Diller E, Giltinan J, Sitti M. Independent control of multiple magnetic microrobots in three dimensions. *Int J Robot Res* 2013;32(5):614–31.
- [42] Kawaguchi T, Inoue Y, Ikeuchi M, Ikuta K. Independent actuation and master-slave control of multiple micro magnetic actuators. In: *Proceedings of 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS); 2018 Jan 21–25; Belfast, UK*. IEEE; 2018. p. 190–3.
- [43] Shahrokhi S, Mahadev A, Becker AT. Algorithms for shaping a particle swarm with a shared input by exploiting non-slip wall contacts. In: *Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); 2017 Sep 24–28; Vancouver, BC, Canada*. IEEE; 2017. p. 4304–11.
- [44] Becker A, Felfoul O, Dupont PE. Simultaneously powering and controlling many actuators with a clinical MRI scanner. In: *Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2014 Sep 14–18; Chicago, IL, USA*. IEEE; 2014. p. 2017–23.
- [45] Denasi A, Misra S. Independent and leader–follower control for two magnetic micro-agents. *IEEE Robot Autom Lett* 2017;3(1):218–25.
- [46] Shahrokhi S, Shi J, Isichei B, Becker AT. Exploiting nonslip wall contacts to position two particles using the same control input. *IEEE Trans Robot* 2019;35(3):577–88.
- [47] EqtamiA, FelfoulO, DupontPE. MRI-powered closed-loop control for multiple magnetic capsules. In: *Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2014 Sep 14–18; Chicago, IL, USA*. IEEE; 2014. p. 3536–42.
- [48] Becker A, Ou Y, Kim P, Kim MJ, Julius A. Feedback control of many magnetized: tetrahymena pyriformis cells by exploiting phase inhomogeneity. In: *Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2013 Nov 3–7; Tokyo, Japan*. IEEE; 2013. p. 3317–23.
- [49] Zhang J, Jain P, Diller E. Independent control of two millimeter-scale soft-bodied magnetic robotic swimmers. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2016 May 16 – 21; Stockholm, Sweden*. IEEE; 2016. p. 1933–8.
- [50] Rahmer J, Stehning C, Gleich B. Spatially selective remote magnetic actuation of identical helical micromachines. *Sci Robot* 2017;2(3):eaal2845.
- [51] Petruska AJ, Nelson BJ. Minimum bounds on the number of electromagnets required for remote magnetic manipulation. *IEEE Trans Robot* 2015;31(3):714–22.
- [52] Salmanipour S, Diller E. Eight-degrees-of-freedom remote actuation of small magnetic mechanisms. In: *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2018 May 21 – 25; Brisbane, QLD, Australia*. IEEE; 2018. p. 3608–13.
- [53] Salmanipour S, Youssefi O, Diller ED. Design of multi-degrees-of-freedom microrobots driven by homogeneous quasi-static magnetic fields. *IEEE Trans Robot* 2020;37(1):246–56.
- [54] Inoue T, Iwatani K, Shimoyama I, Miura H. Micromanipulation using magnetic field. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 1995 May 21–27; Nagoya, Japan*. IEEE; 1995. p. 679–84.
- [55] Lee CS, Lee H, Westervelt RM. Microelectromagnets for the control of magnetic nanoparticles. *Appl Phys Lett* 2001;79(20):3308–10.
- [56] Pelrine R, Wong-Foy A, McCoy B, Holesman D, Mahoney R, Myers G, et al. Diamagnetically levitated robots; an approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties. In: *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2012 May 14–18; Saint Paul, MN, USA*. IEEE; 2012. p. 739–44.
- [57] Cappelleri D, Efthymiou D, Goswami A, Vitoroulis N, Zavlanos M. Towards mobile microrobot swarms for additive micromanufacturing. *Int J Adv Robot Syst* 2014;11(9).
- [58] Chowdhury S, Jing W, Cappelleri DJ. Towards independent control of multiple magnetic mobile microrobots. *Micromachines* 2015;7(1):3.
- [59] Chowdhury S, Jing W, Cappelleri DJ. Designing local magnetic fields and path planning for independent actuation of multiple mobile microrobots. *J Microbiol Robot* 2017;12(1–4):21–31.
- [60] Steager E, Wong D, Wang J, Arora S, Kumar V. Control of multiple microrobots with multiscale magnetic field superposition. In: *Proceedings of 2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS); 2017 Jul 17–21; Montreal, QC, Canada*. IEEE; 2017. p. 1–6.
- [61] Chakravarthula PN, Shekhar S, Ananthasuresh GK. Attachment, detachment, and navigation of small robots using local magnetic fields. In: *Proceedings of 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS); 2019 Jul 1–5; Helsinki, Finland*. IEEE; 2019. p. 1–6.
- [62] Yu W, Lin H, Wang Y, He X, Chen N, Sun K, et al. A ferrobatic system for automated microfluidic logistics. *Sci Robot* 2020;5(39):eaba4411.
- [63] Pawashe C, Floyd S, Sitti M. Multiple magnetic microrobot control using electrostatic anchoring. *Appl Phys Lett* 2009;94(16):164108.
- [64] Diller E, Pawashe C, Floyd S, Sitti M. Assembly and disassembly of magnetic mobile micro-robots towards deterministic 2D reconfigurable micro-systems. *Int J Robot Res* 2011;30(14):1667–80.
- [65] Li X, Lu C, Song Z, Ding W, Zhang XP. Planar magnetic actuation for soft and rigid robots using a scalable electromagnet array. *IEEE Robot Autom Lett* 2022;7(4):9264–70.
- [66] Chowdhury S, Jing WM, Jaron P, Cappelleri DJ. Path planning and control for

- autonomous navigation of single and multiple magnetic mobile microrobots. In: Proceedings of ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; 2015 Aug 2–5; Boston, Massachusetts, USA. ASME; 2015 p. V004T09A040.
- [67] Sagar Chowdhury WJ, Cappelleri David J.. Independent actuation of multiple microrobots using localized magnetic fields. In: Proceedings of 2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS); 2016 Jul 18–22; Paris, France. IEEE; 2016. p. 1–6.
- [68] Lapunik V, Jufik M, Vitek M, Kuthan J, Mach F. Magnetically assembled electronic digital materials. In: Proceedings of 2022 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS); 2022 Jul 25–29; Toronto, ON, Canada. IEEE; 2022. p. 1–6.
- [69] Johnson BV, Chowdhury S, Cappelleri DJ. Local magnetic field design and characterization for independent closed-loop control of multiple mobile microrobots. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 2020;25(2):526–34.
- [70] Fan X, Dong X, Karacakol AC, Xie H, Sitti M. Reconfigurable multifunctional ferrofluid droplet robots. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(45):27916–26.
- [71] Zhang J, Wang X, Wang Z, Pan S, Yi B, Ai L, et al. Wetting ridge assisted programmed magnetic actuation of droplets on ferrofluid-infused surface. *Nat Commun* 2021;12(1):7136.
- [72] Torres NA, Popa DO. Cooperative control of multiple untethered magnetic microrobots using a single magnetic field source. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE); 2015 Aug 24–28; Gothenburg, Sweden. IEEE; 2015. p. 1608–13.
- [73] Torres NA, Ruggeri S, Popa DO. Untethered microrobots actuated with focused permanent magnet field. In: Proceedings of ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; 2014 Aug 17–20; Buffalo, New York, USA. ASME; 2014. p. V004T09A024.
- [74] Nelson ND, Abbott JJ. Generating two independent rotating magnetic fields with a single magnetic dipole for the propulsion of untethered magnetic devices. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2015 May 26–30; Seattle, WA, USA. IEEE; 2015. p. 4056–61.
- [75] Di Natali C, Buzzi J, Garbin N, Beccani M, Valdastrì P. Closed-loop control of local magnetic actuation for robotic surgical instruments. *IEEE Trans Robot* 2015;31(1):143–56.
- [76] Simi M, Pickens R, Menciassi A, Herrell SD, Valdastrì P. Fine tilt tuning of a laparoscopic camera by local magnetic actuation: two-port nephrectomy experience on human cadavers. *Surg Innov* 2013;20(4):385–94d.
- [77] Natali CD, Ranzani T, Simi M, Menciassi A, Valdastrì P. Trans-abdominal active magnetic linkage for robotic surgery: concept definition and model assessment. In: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2012 May 14–18; Saint Paul, MN, USA. IEEE; 2012. p. 695–700.
- [78] Isitman O, Kandemir H, Alcan G, Cenev Z, Zhou Q. Simultaneous and independent micromanipulation of two identical particles with robotic electromagnetic needles. In: Proceedings of International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS); 2022 Jul 25–29; Toronto, ON, Canada. IEEE; 2022. p. 1–6.
- [79] McDonald K, Rendos A, Woodman S, Brown KA, Ranzani T. Magnetorheological fluid-based flow control for soft robots. *Adv Intell Syst* 2020;2(11):2000139.
- [80] Leps T, Glick PE, Ruffatto Iii D, Parness A, Tolley MT, Hartzell C. A low-power, jamming, magnetorheological valve using electropermanent magnets suitable for distributed control in soft robots. *Smart Mater Struct* 2020;29(10):105025.
- [81] Amoudruz L, Koumoutsakos P. Independent control and path planning of microswimmers with a uniform magnetic field. *Adv Intell Syst* 2021;4(3):2100183.
- [82] Ishiyama K, Sendoh M, Arai KI. Magnetic micromachines for medical applications. *J Magn Magn Mater* 2002;242:41–6.
- [83] Sendoh M, Ishiyama K, Arai KI. Direction and individual control of magnetic micromachine. *IEEE Trans Magn* 2002;38(5):3356–8.
- [84] Vach PJ, Klumpp S, Faivre D. Steering magnetic micropropellers along independent trajectories. *J Phys D Appl Phys* 2016;49(6):065003.
- [85] Mahoney AW, Nelson ND, Peyer KE, Nelson BJ, Abbott JJ. Behavior of rotating magnetic microrobots above the step-out frequency with application to control of multi-microrobot systems. *Appl Phys Lett* 2014;104(14):144101.
- [86] Howell TA, Osting B, Abbott JJ. Sorting rotating micromachines by variations in their magnetic properties. *Phys Rev Appl* 2018;9(5):054021.
- [87] Cheang UK, Lee K, Julius AA, Kim MJ. Multiple-robot drug delivery strategy through coordinated teams of microswimmers. *Appl Phys Lett* 2014;105(8):083705.
- [88] Frutiger DR, Vollmers K, Kratochvil BE, Nelson BJ. Small, fast, and under control: wireless resonant magnetic micro-agents. *Int J Robot Res* 2009;29(5):613–36.
- [89] Kratochvil BE, Frutiger D, Vollmers K, Nelson BJ. Visual servoing and characterization of resonant magnetic actuators for decoupled locomotion of multiple untethered mobile microrobots. In: Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2009 May 12–17; Kobe, Japan. IEEE; 2009. p. 2859–64.
- [90] Khalil ISM, Tabak AF, Hamed Y, Tawakol M, Klingner A, Gohary NE, et al. Independent actuation of two-tailed microrobots. *IEEE Robot Autom Lett* 2018;3(3):1703–10.
- [91] Tottori S, Sugita N, Kometani R, Ishihara S, Mitsuishi M. Selective control method for multiple magnetic helical microrobots. *J Micro Nano Mech* 2011;6(3–4):89–95.
- [92] Narayanamoorthi R, Juliet AV, Chokkalingam B. Frequency splitting-based wireless power transfer and simultaneous propulsion generation to multiple micro-robots. *IEEE Sens J* 2018;18(13):5566–75.
- [93] Boyvat M, Koh JS, Wood RJ. Addressable wireless actuation for multijoint folding robots and devices. *Sci Robot* 2017;2(8):eaan1544.
- [94] Novelino LS, Ze Q, Wu S, Paulino GH, Zhao R. Untethered control of functional origami microrobots with distributed actuation. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117(39):24096–101.
- [95] Mao G, Drack M, Karami-Mosammam M, Wirthl D, Stockinger T, Schwödiauer R, et al. Soft electromagnetic actuators. *Sci Adv* 2020;6(26):eabc0251.
- [96] Libanori A, Chen G, Zhao X, Zhou Y, Chen J. Smart textiles for personalized healthcare. *Nat Electron* 2022;5(3):142–56.
- [97] Chen G, Xiao X, Zhao X, Tat T, Bick M, Chen J. Electronic textiles for wearable point-of-care systems. *Chem Rev* 2022;122(3):3259–91.
- [98] Wang M, Song S, Liu J, Meng MQH. Multipoint simultaneous tracking of wireless capsule endoscope using magnetic sensor array. *IEEE Trans Instrum Meas* 2021;70:1–10.
- [99] Khalesi R, Yousefi M, Nejat Pishkenari H, Vossoughi G. Robust independent and simultaneous position control of multiple magnetic microrobots by sliding mode controller. *Mechatronics* 2022;84:102776.
- [100] Pawashe C, Floyd S, Sitti M. Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot. *Int J Robot Res* 2009;28(8):1077–94.
- [101] Floyd S, Pawashe C, Sitti M. Two-dimensional contact and noncontact micromanipulation in liquid using an untethered mobile magnetic microrobot. *IEEE Trans Robot* 2009;25(6):1332–42.
- [102] Yang LD, Du XZ, Yu E, Jin DD, Zhang L. DeltaMag: an electromagnetic manipulation system with parallel mobile coils. In: Proceedings of 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2019 May 20–24; Montreal, QC, Canada. IEEE; 2019. p. 9814–20.
- [103] Li C, Lau GC, Yuan H, Aggarwal A, Dominguez VL, Liu S, et al. Fast and programmable locomotion of hydrogel-metal hybrids under light and magnetic fields. *Sci Robot* 2020;5(49):eabb9822.
- [104] Xu L, Gong D, Chen K, Cai J, Zhang W. Acoustic levitation applied for reducing undesired lateral drift of magnetic helical microrobots. *J Appl Phys* 2020;128(18):184703.
- [105] Wang H, Rubenstein M. Autonomous mobile robot with independent control and externally driven actuation. In: Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); 2016 Oct 9–14; Daejeon, Republic of Korea. IEEE; 2016. p. 3647–52.