arXiv:2304.04299v1 [cs.RO] 9 Apr 2023

鞭毛刚度对低雷诺数环境下多鞭毛机器人运动的影响

恩南迪·奇克雷、亚丝敏·厄兹坎-艾登，*IEEE*会员

摘要—**藻类和细菌等微生物在雷诺数（Re）极低的黏性环境中运动，此时黏性阻力占主导地位，超过惯性力。它们通过进化出特殊结构来适应这种环境，例如整体身体变形，以及在运动过程中打破对称性的柔性结构，如鞭毛（具有各种形状、尺寸和数量）。在本研究中，我们提出假设：鞭毛在一个运动周期中的柔性变化会影响鞭毛运动的运动动力学。为验证这一假设，我们开发了一种自主式自推进机器人，该机器人配备四根柔性、多分段鞭毛，并由单个直流电机协同驱动。运动过程中鞭毛的刚度通过连接在机器人中心的缆索驱动机构进行控制。对机器人游泳性能的实验评估表明，在恢复行程期间增加鞭毛的柔性，并在动力行程期间降低其柔性，可以提升机器人的游泳性能。我们的研究结果揭示了这些微生物如何操控其生物特征以在低黏性介质中推动自身运动，并对生物医学和科研应用具有重要意义。**

I. 引言

了解微生物如何在黏性环境中运动一直备受研究人员关注，因为这对于解决微型机器人运动挑战以及设计更优的机器人游动体具有潜在应用价值。微型机器人在各个领域都展现出巨大的应用潜力，包括用于精准且微创手术和治疗的生物医学应用 [1], [2], [3], [4], [5],遥测和传感 [6], [7], 靶向药物递送 [8], [9], [10]–[11], 以及活检[12]。此外，这些微尺度机器人还适用于环境探索与监测[13], [14], [15]以及其他水下探索应用[16]。尽管这些机器人具有广阔的应用前景，但其发展仍受到若干挑战的限制 [17], [2]–[18], 例如缺乏高效的制造方法 [19],在小尺寸下进行能量生成与存储的能力 [20], , 以及适应不断变化的物理环境的能力 [21]。寻找有效的运动策略对于微型游动体同样至关重要，科学家们已从微生物中汲取灵感，用于构建机器人游动体 [22], [23], [21]–[24], [25], [**?**]。

细胞生物（如细菌、藻类和精子细胞）在低雷诺数环境中蓬勃生长——在这种环境下，黏性阻尼和流体摩擦力占主导地位，而惯性作用相对较弱 [26]–[27]。为了实现在此类环境中的运动，我们考虑“扇贝定理”，该定理指出，在低雷诺数

本研究未获得任何机构的资助。所有作者均供职于美国印第安纳州圣母大学电气工程系，邮编 46556nchikere,yozkanay@nd.edu

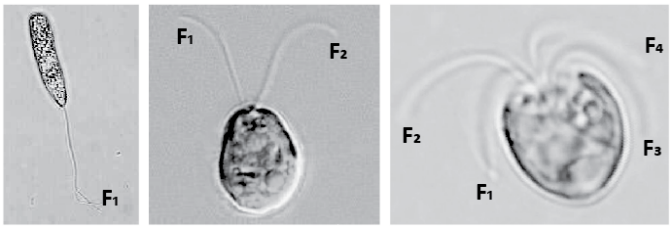


图 1. **生物鞭毛系统**。 具有不同数量鞭毛的鞭毛藻类：（左）单根鞭毛，（中）两根鞭毛，（右）四根鞭毛。 F_i 显示第 i^{th} 根鞭毛。

数流体中，如果运动模式在正向和反向上相同（往复运动），游动体无法实现净位移 [26]。因此，正如普塞尔 [26],所指出的，要实现净位移，微型游动体需要改变身体（或附肢）形状的几何序列并打破对称性。

微生物利用鞭毛或纤毛等生理适应结构，在高黏度栖息环境中生存繁衍 [28]。鞭毛或纤毛可以按照特定模式排列在微生物身体上，使其能够朝特定方向移动并打破对称性；这是在此类环境中游动的必要条件 [29]。例如，大肠杆菌等细菌会通过旋转螺旋形鞭毛移动，而粘质沙雷氏菌 [30]也采用这种方式；精子细胞 [31] 和藻类等真核游动生物则依靠鞭状鞭毛结构推进 [32]。研究人员希望了解微生物如何利用这些生理适应结构在其栖息环境中生存繁衍，因为这有助于深入认识如何开发效率最高的机器人游动体，尤其是微型机器人，使其能够在血液或体液等低雷诺数环境中运行 [33], [34]。

若干先前研究 [35], [36], [37], [38], [39], [40]已强调了最高效的机器人游动体应具备的理想特征，包括重量轻、体型小，能够在特定环境中有效移动和导航，能够承受恶劣环境或物理应力，能够受到控制，并配备相关工具以收集有关其环境的信息以及与其他设备进行通信。

值得注意的是，人工微结构若要在受控条件下移动或游动，必须满足两个要求 [27]–[26]。首先，装置必须能够通过注入和传递能量而发生机械形变（柔性）；其次，这些形变的顺序必须是周期性的，且不可逆转。鞭毛的数量和游动步态是值得关注的特征，已发现它们会影响游泳性能 [41], [40]。

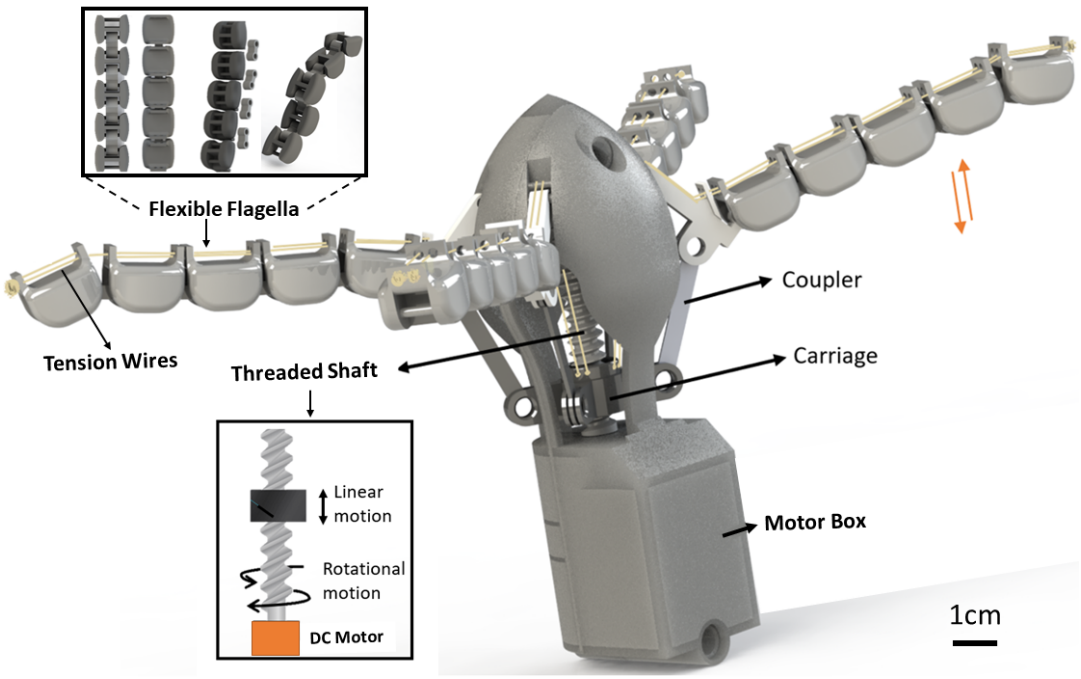


图2。**鞭毛机器人部件**。一幅计算机辅助设计图，展示了四足机器人的所有主要组件。柔性鞭毛子图显示其由通过连杆连接的短小3D打印块组成。螺纹轴子图显示了驱动过程中运动类型的变化。

本研究介绍了一种自主推进机器人，它配有四根多节鞭毛，并由单个直流电机共同驱动。我们特别关注划水行程中鞭毛柔性的变化如何促进低雷诺数下的运动。此前已有关于机器人游动体柔性的实验研究，研究人员考察了具有完全柔性鞭毛、被动柔性鞭毛[40]，和完全刚性鞭毛[39]，[40]的机器人的运动。本研究展示了一种新方法，其灵感来自微生物鞭毛的波浪式摆动模式：我们控制鞭毛在每个运动周期中的柔性，并比较其对机器人游泳性能的影响，以及与完全柔性鞭毛构型所达到的性能。

II. 材料与方法

A. 生物学启发

图1（右）所示的四鞭毛藻为该机器人的生物学灵感来源。该生物有四根从其细胞体一端伸出的鞭毛，并排列成两组反平行对 [29]。藻类通过鞭状推进进行动力划水行程和恢复行程，并呈现出多种步态模式，例如跳跃步态、疾驰步态和特朗克步态[29]。它可以在运动划水行程中改变鞭毛的形状，从而生成复杂的游泳模式，并适应不同的环境条件。

我们仿照四鞭毛藻的跳跃步态游泳行为，设计并制造了一种中尺度、欠驱动、低成本的 3D 打印机器人，能够在高黏度流体中利用其鞭毛的可控柔性穿行。

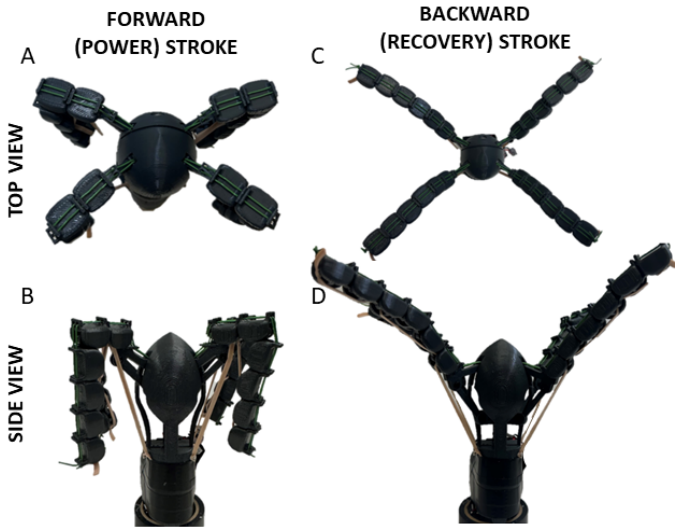


图 3. **可控柔性鞭毛的状态**。完全柔性状态 A（俯视图）和 B（侧视图）。滑架向上移动，使钢丝在鞭毛连杆周围松弛。B. 完全伸展刚性状态 C（俯视图）和 D（侧视图）。滑架向下移动，将钢丝拉紧，使鞭毛伸展并变得刚硬。

B. 机械设计与制造

机器人由一个身体（长度为 = 12.6cm，重量为 =125g）构成，其中设有一个舱室，内置直流电机、滑架和螺纹，以及鞭毛（图 2）。该机器人使用 Solidworks 软件设计，并采用 Stratasys F170打印机以丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（ABS）进行 3D 打印。

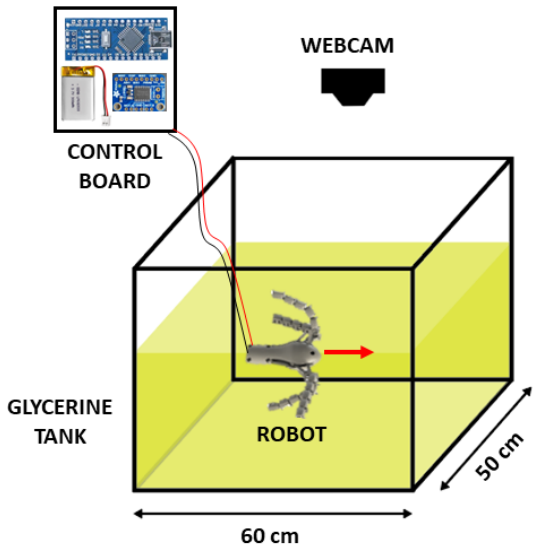


图 4. **实验装置** 该装置由一个透明的方形水箱组成，箱内装有高黏度甘油，用以模拟藻类所处的低雷诺数流体环境。水箱上方安装了一台数码相机，用于记录机器人的运动状态。机器人通过定制的控制板进行控制，控制板包括 Arduino Nano 和电机驱动器。

机器人的设计经过优化，通过采用尖锐的尖端和流线型身体（图 2），尽可能减小流体动力阻力的影响。此外，我们沿机器人框架安装了泡沫塑料条，以增强其浮力（图 5）。为了通过单个电机统一控制鞭毛，我们设计了一种简单的机构，将电机的旋转运动转化为滑架的直线运动。该机构如图 2 插图所示，采用了一个 3D 打印的螺栓状滑架和一根螺纹轴（公制板牙 M25 X 2.5，直径 = 8mm，长度 = 53mm，角度 = 0°），并与直流电机相连（6 伏、100 RPM、70 mA 的 Polulu 高扭矩直流齿轮电机）。选择这款电机，是因为它既能为驱动轴和缆线提供足够的扭矩，又能使机器人在甘油中保持足够的推进速度。

鞭毛由六个通过短连杆连接在铰链关节中的3D打印部件组成。在鞭毛的六个3D打印部件之间加入铰链式关节部件和短连杆会形成小间隙，从而产生被动柔性。然而，当滑架将钢丝向下拉动时（图2），关节部件之间的间隙闭合，使鞭毛变得刚性。这一机制使机器人能够在运动周期中改变其鞭毛的形状和柔性。该机制的示意图如图3所示。在图3A-B中，鞭毛完全柔性；滑架已被驱动至螺纹轴的上方位置，因此更多钢丝被释放到关节部件中，使其具有柔性。在图3C-D中，滑架被驱动向下移动，使钢丝被拉紧，鞭毛变得刚性。鞭毛刚度的这些重复变化通过打破对称性，改变鞭毛与其环境相互作用的方式，使其能够产生推动系统向前运动的净推进力。

为了增强动力行程期间的对称性破缺机制（图2），我们使用低刚度橡皮筋（Office Depot®品牌橡皮筋，'#33'）将电机盒的四个顶部边缘连接到位于鞭毛中部的连接杆。在刚性的恢复行程期间，橡皮筋被拉伸；而在动力行程期间，它们收缩回原来的形状，形成一种柔性但弯曲的形态，从而产生所需的对称性破缺效果。

C. 电子设备

四根鞭毛由一台直流齿轮电机（Polulu，6 伏，100 RPM，70 mA）驱动，该电机与一根螺纹杆相连，杆上装有一个滑架。该机构可将电机的旋转运动转换为滑架的直线运动。滑架上连接着 28 AWG 绝缘铜线，铜线从机器人身体内的滑架连接至鞭毛。直流电机由 Adafruit TB6612 1.2A 直流/步进电机驱动器驱动，该驱动器再连接至 Arduino Pro Mini 控制器。直流电机以 100 RPM 运转；为了使电机轴按所需方向顺时针和逆时针旋转，Arduino 被编程为每五秒改变一次机器人的运动方向。在实验过程中，Arduino 控制器由 5V USB 电源供电，而直流电机由 6V 直流电源供电。电机正转和反转使滑架向上和向下运动，导致连接在鞭毛上的钢丝在滑架向下运动（恢复行程）时绷紧，使鞭毛保持刚性；在滑架向上运动（动力行程）时，鞭毛变得柔软，钢丝则松弛。

D. 实验装置

为确保与在微尺度下运动的生物具有动力学相似性，我们使用了植物甘油（Bulk Apothecary©），其黏度为 1.49 $Pa.s$，相当于水的黏度的 1500 倍，且在 20°C 时密度为 1000 kg/m_3。如图 4 所示，一个透明水箱（60x50x45 cm^3, CLEAR 2420，Waterbox Aquariums©）中注入了植物甘油，液面达到水箱容积的三分之二。为监测机器人的动力学特性，我们将一台俯视摄像机（Logitech C920x HD Pro）安装在水箱顶部的框架上。进行实验时，机器人通电后被放置在水箱的一端附近。随后启动摄像机，以 30 fps 拍摄机器人在流体中运动的视频。

III. 结果

在实验中，我们测试了两种不同类型的机器人鞭毛：完全柔性鞭毛和可控柔性鞭毛。完全柔性鞭毛的构型与图 2 所示的可控柔性鞭毛相同（由 3D 打印的连杆制成），但各部件并未用张力钢丝连接，因此其柔性无法控制。我们开展了实验，将不同鞭毛构型的性能作为每周期位移的函数进行比较。

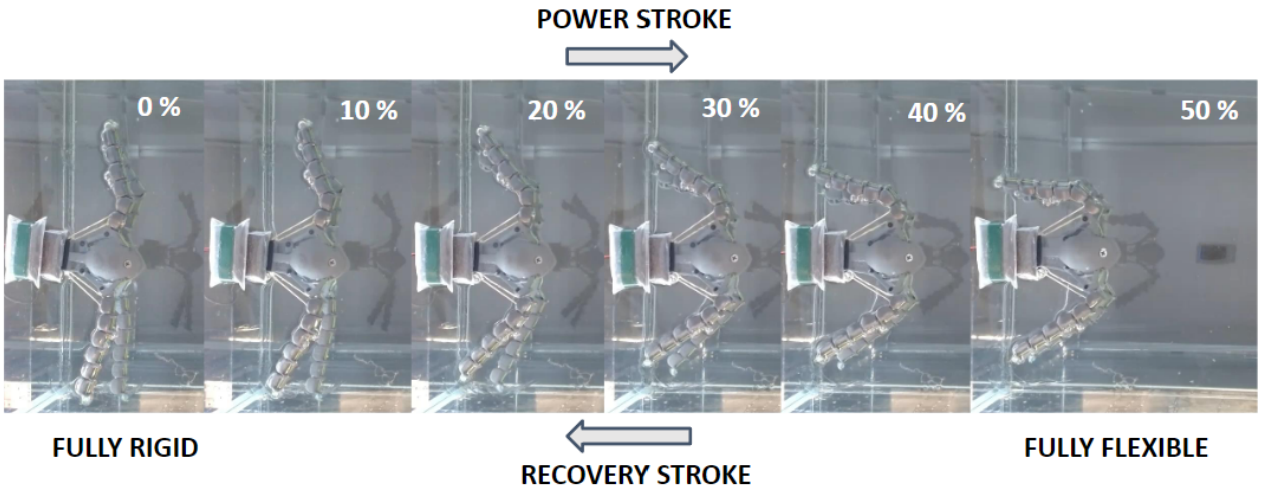


图5.**鞭毛状态**。甘油中受控鞭毛在运动周期（动力行程和恢复行程）期间的变形；在动力行程结束时（周期的 50%），鞭毛完全柔性，而在恢复行程结束时（周期的0%或100%），鞭毛完全刚性。在机器人的底部部分附加了一小块聚苯乙烯泡沫板（6cm × 4cm），以改善其浮力。

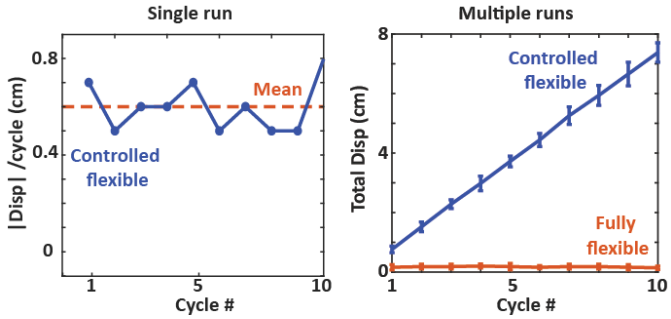


图 6. **机器人的步态运动学与性能**。机器人在 10 个周期内每个运动周期中的位移（左）。左图显示了一个周期内发生的平均位移。记录了10个运动周期的数据。实验运行 5 次、持续10个周期的总位移（右）。该图显示了机器人在 10 个周期内的总位移。记录了 5 次实验运行的数据

每种构型的实验均进行了五次，每次运行 10 个周期，共计 50 个周期。这样做是为了确保结果的可重复性，并使用网络摄像头记录了每次运行。

对完全柔性鞭毛进行了多次实验测试，结果表明，由于鞭毛无法产生足够的推力来抵消阻力并推动机器人前进，因此净位移可以忽略不计（补充视频）。完全柔性构型表现出与完全刚性、无铰链鞭毛构型相似的结果，在 [40], 中，机器人能够产生足够的推力来抵消阻力，并在半个周期内实现向前推进，但在周期结束时又回到初始位置。这是由于其在两个方向上的运动模式相似，未能打破时间对称性，导致经过若干周期后没有净位移。

受控柔性构型在动力行程和恢复行程期间有效地产生了足够的推力，减小阻力，使机器人能够在黏性流体中前进（补充视频）。此外，两个划水行程期间的不对称形状变化打破了运动的时间对称性，从而使机器人产生净位移。在图 6 中，我们绘制了每个周期的位移。

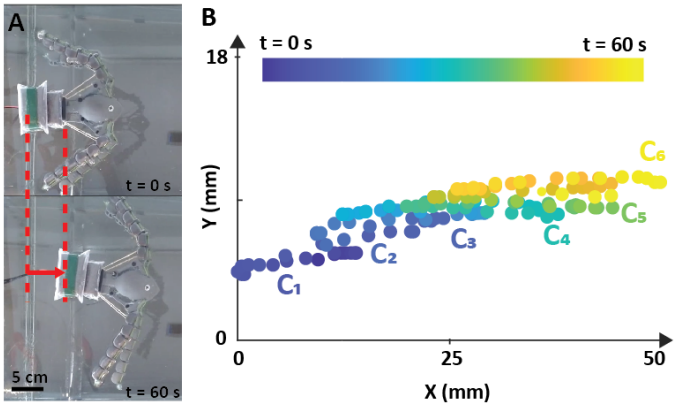


图7。**六个周期内的尖端轨迹**。该图显示了机器人尖端沿红色箭头方向在六个运动周期中的位移。机器人在六个周期（$C_{1:6}$）内移动了5cm，耗时共计60秒（颜色条表示时间）。

以及机器人安装受控柔性鞭毛和完全柔性鞭毛时实验得到的总位移。图 6A 中的每周期位移曲线展示了机器人处于受控柔性构型时，在一次运行中 10 个周期内的位移。我们观察到，每个运动周期的平均位移速率为 0.7 ±0.11 cm/周期。这意味着，在一个完整的运动周期中，机器人在流体中的位移约为 0.7 cm。图 6B 展示了五次不同运行中，机器人使用受控柔性鞭毛和完全柔性鞭毛时 10 个周期内的总位移。图中显示，

在受控柔性构型下，机器人经过 10 个完整周期的位移为 7±0.74cm。而在完全柔性构型下，位移可以忽略不计。

在图7中，我们可以观察到机器人尖端在六个周期内的轨迹；机器人在60秒内移动了约5厘米。对受控柔性构型进行五次实验所得的每周期位移图显示，周期数与位移之间呈线性关系。这表明我们的机器人满足了在低雷诺数流体中运动的要求：它通过形状变化打破时间对称性，并产生足够的推力推动自身在流体中前进。

IV. 结论

本文提出了一种通过刚度控制改善低雷诺数人工游动体运动动力学的新方法。我们介绍了一种受藻类启发的四鞭毛机器人，它在每个运动周期中改变鞭毛的刚度，以打破时间对称性并产生非互易运动，这是在低雷诺数流体中运动的必要条件。为控制鞭毛的刚度，我们采用了由直流电机驱动的缆索驱动机构，在每个运动周期中改变多节段鞭毛的柔性。实验表明，柔性的变化使机器人能够实现更高效的游泳性能，并以每周期0.7±0.11厘米的速度在黏性流体中推进自身；相比之下，我们的完全柔性鞭毛机器人构型则表现较差。

这项研究揭示了微生物运动的复杂机制，尤其是在高黏度流体中的运动机制，并为深入了解鞭毛刚度在优化游泳性能方面所发挥的作用提供了宝贵见解。通过模仿微生物的游泳行为，我们可以开发能够自主穿行于复- 杂环境、执行特定任务，并有望协助生物医学研究应用和环境探索的机器人。对微生物运动的研究是生物学中的一个关键研究领域，而我们的发现对于理解和推进该领域具有广泛意义。机器人技术和仿生设计在解决现实世界挑战方面具有巨大潜力，而这项研究是实现这一潜力的重要一步。未来，我们计划为机器人的鞭毛刚度实现更加全面的控制系统，使用不同的执行器来实验微生物的其他步态模式。通过独立改变每根鞭毛的刚度，我们可以研究不同鞭毛运动组合如何影响机器人的整体游泳行为。此外，通过探索新的步态模式，我们或许能够发现微生物在复杂流体环境中导航的新方式，从而进一步深入了解生物运动的机制。最终，这项研究将有助于开- 发更先进、更高效的游泳机器人，并拓展其广泛的潜在应用。

V. 致谢

我们感谢圣母大学 MiNiRo-Lab 的成员们所给予的帮助、支持和建议。

参考文献

[1] F. Ullrich, C. Bergeles, J. Pokki, O. Ergeneman, S. Erni, G. Chatzipir- piridis, S. Pan˜A©n, C. Framme, and B. J. Nelson,《用于微创眼内手术的微型机器人运动实验》，*Investigative Ophthalmology & Visual Science*，第54卷，2853–2863页，2013年4月。[2] E. Diller and M. Sitti，《微尺度移动机器人学》，机器人学基础与趋势ˆA®，第2卷，143–259页，2013年9月。出版商：Now Publishers, Inc.[3] M. Sitti, H. Ceylan, W. Hu, J. Giltinan, M. Turan, S. Yim, and E. Diller，《无系留移动毫米/微型机器人的生物医学应用》，*Proceedings of the IEEE*，第103卷，205–224页，2015年2月。会议名称：Proceedings of the IEEE。[4] K. L. Kozielski, A. Jahanshahi, H. B. Gilbert, Y. Yu, ˜A. Erin, D. Francisco, F. Alosaimi, Y. Temel, and M. Sitti，《非共振供电注射式纳米电极，实现自由活动小鼠的无线深部脑刺激》，*Science Advances*，第7卷，文章编号eabc4189，2021年1月。出版商：美国科学促进会。[5] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott，《用于微创医学的微型机器人》，生物医学工程年度评论，第12卷，第1期，55–85页，2010年。电子版：https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-010510-103409。[6] O.¯ Ergeneman, G. Dogangil, M. P. Kummer, J. J. Abbott, M. K. Nazeeruddin, and B. J. Nelson，《用于眼内测量的磁控无线光学氧传感器》，*IEEE Sensors Journal*，第8卷，29–37页，2008年1月。会议名称：IEEE Sensors Journal。[7] A. Aziz, S. Pane, V. Iacovacci, N. Koukourakis, J. Czarske, A. Men- ciassi, M. Medina-S˜A¡nchez, and O. G. Schmidt，《微型机器人的医学成像：迈向体内应用》，*ACS Nano*，第14卷，10865–10893页，2020年9月。出版商：美国化学会。[8] Y. Wang, J. Shen, S. Handschuh-Wang, M. Qiu, S. Du, and B. Wang,《用于消化系统靶向递送和治疗的微型机器人》，*ACS Nano*，第17卷，27–50页，2023年1月。出版商：美国化学会。[9] W. Gao and J. Wang,《药物递送中的合成微/纳米马达》，*Nanoscale*，第6卷，10486–10494页，2014年8月。出版商：英国皇家化学学会。[10] G. Dogangil, O. Ergeneman, J. J. Abbott, S. Pane, H. Hall, S. Muntwyler, and B. J. Nelson，《利用搭载、释放和回收无系留微型夹持器的磁控胶囊内窥镜进行活检》，载于*2008 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，1921–1926页，2008年9月。ISSN：2153-0866。[11] Y.-W. Lee, J.-K. Kim, U. Bozuyuk, N. O. Dogan, M. T. A. Khan, A. Shiva, A.-M. Wild, and M. Sitti，《用于按需锚定和货物递送的多功能3D打印花粉粒仿生水凝胶微型机器人》，*Advanced Materials*，卷号不适用，期号不适用，文章编号2209812。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.202209812。[12] S. Yim, E. Gultepe, D. H. Gracias, and M. Sitti，《利用搭载、释放和回收无系留微型夹持器的磁控胶囊内窥镜进行活检》，*IEEE*生物医学工程汇刊，第61卷，513–521页，2014年2月。[13] S. Dubowsky, K. Iagnemma, S. Liberatore, D. M. Lambeth, J. S. Plante, and P. J. Boston，《概念任务：用于大规模行星表面及地下探测的微型机器人》，*AIP*会议论文集，第746卷，1449–1458页，2005年2月。出版商：美国物理联合会。[14] T. Yoshimitsu, T. Kubota, I. Nakatani, T. Adachi, and H. Saito，《用于小行星探测的微型跳跃机器人》，*Acta Astronautica*，第52卷，441–446页，2003年1月。[15] Y. Chen, H. Wang, E. F. Helbling, N. T. Jafferis, R. Zufferey, A. Ong, K. Ma, N. Gravish, P. Chirarattananon, M. Kovac, and R. J. Wood，《一种受生物启发的扑翼式空水两栖微型机器人》，*Science Robotics*，第2卷，文章编号eaao5619，2017年10月。出版商：美国科学促进会。

[16]K. Yoshida and H. Onoe，《集成无线光子胶体晶体水凝胶传感器的马兰戈尼推进微型机器人：用于探索水生环境》，Advanced Intelligent Systems，第4卷，第5期，文章编号2100248，2022年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aisy.202100248。[17] M. Sitti，《微尺度与纳米尺度机器人系统：[机器人学的重大挑战]》，IEEE Robotics & Automation Magazine，第14卷，53–60页，2007年3月。会议名称：IEEE Robotics & Automation Magazine。[18] F. Dragomir and O. E. Dragomir，《微型机器人学：现状、挑战与展望》，载于2014年IEEE机器人与仿生学国际会议（ROBIO 2014），1904–1909页，2014年12月。[19] Y. Qin，《微成形与微型制造系统——发展需求与展望》，Journal of Materials Processing Technology，第177卷，8–18页，2006年7月。[20] Y. Wang, M. Dai, H. Wu, L. Xu, T. Zhang, W. Chen, Z. L. Wang, and Y. Yang，《湿气诱导发电的自供能微型机器人》，Nano Energy，第90卷，文章编号106499，2021年12月。[21] H.-W. Huang, F. E. Uslu, P. Katsamba, E. Lauga, M. S. Sakar, and B. J. Nelson，《人工微观游泳器的自适应运动》，Science Advances，第5卷，文章编号eaau1532，2019年1月。出版商：美国科学促进会。[22]E. M. Purcell，《旋转鞭毛推进的效率》，Proceedings of the National Academy of Sciences，第94卷，11307–11311页，1997年10月。出版商：Proceedings of the National Academy of Sciences。[23] L. Zhang, K. E. ˆA Peyer, and B. J. ˆA Nelson，《用于微操控的人工细菌鞭毛》，Lab on a Chip，第10卷，第17期，2203–2215页，2010年。出版商：英国皇家化学学会。[24] J. Begey, M. Eti ˜A©vant, J. E. Quispe, A. Bolopion, M. Vedrines, J. Abadie, S. R ˜A©gnier, N. Andreff, and P. Renaud，《柔性鞭毛微型游泳器磁驱动的可操控性判据》，IEEE Robotics and Automation Letters，第5卷，4891–4898页，2020年7月。会议名称：IEEE Robotics and Automation Letters。[25] I. S. M. Khalil, A. F. Tabak, M. A. Seif, A. Klingner, and M. Sitti，《软体机器人精子的平面与螺旋鞭毛游动模式可控切换》，PLOS ONE，第13卷，文章编号e0206456，2018年11月。出版商：公共科学图书馆。[26] E. M. Purcell，《低雷诺数下的生命》，American Journal of Physics，第45卷，3–11页，1977年1月。出版商：美国物理教师协会。[27] N. Cohen and J. H. Boyle，《低雷诺数下的游泳：波动运动初学者指南》，Contemporary Physics，第51卷，103–123页，2010年3月。出版商：Taylor & Francis；电子版：https://doi.org/10.1080/00107510903268381。[28] A. Ghanbari，《用于微纳机器人控制的仿生重定向策略》，Journal of Micro-Bio Robotics，第16卷，173–197页，2020年12月。[29] K. Y. Wan，《主动鞭毛协调中的同步性与对称性破缺》，Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences，第375卷，文章编号20190393，2020年2月。出版商：英国皇家学会。[30] S. Nakamura and T. Minamino，《细菌的鞭毛驱动运动》，Biomolecules，第9卷，文章编号279，2019年7月。[31] Z. Wang, A. Klingner, V. Magdanz, M. W. Hoppenreijs, S. Misra, and I. S. M. Khalil，《精子细胞在时间周期性相互作用力作用下的鞭毛推进》，Advanced Biology，卷号不适用，期号不适用，文章编号2200210。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adbi.202200210。[32] J. Elgeti, R. G. Winkler, and G. Gompper，《微型游动体物理学——单粒子运动与集体行为：综述》，Reports on Progress in Physics，第78卷，文章编号056601，2015年4月。出版商：IOP Publishing。[33] L. W. Rogowski, M. Oxner, J. Tang, and M. J. Kim，《黏性流体中异质鞭毛微型游泳器的行为》，Biomicrofluidics，第14卷，文章编号024112，2020年3月。出版商：美国物理联合会。[34] Y. Alapan, U. Bozuyuk, P. Erkoc, A. C. Karacakol, and M. Sitti，《生理性血流中用于靶向货物递送的多功能表面微滚轮》，Science Robotics，第5卷，文章编号eaba5726，2020年5月。出版商：美国科学促进会。[35] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, H. A. Stone, and J. Bibette，《微观人工游泳器》，Nature，第437卷，第862–865页，2005年10月。编号：7060。出版商：自然出版集团。[36] J. Singleton、E. Diller、T. Andersen、S. Regnier 和 M. Sitti，“使用多根柔性人造鞭毛实现微尺度推进”，载于*2011*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第1687–1692页，2011年9月。ISSN：2153-0866。[37] Y. Du、J. Lam、K. Sachanandani 和 M. K. Jawed，“颗粒介质中关节式软体机器人的运动建模”，*IEEE Robotics and Automation Letters*，第7卷，第6495–6502页，2022年7月。会议名称：IEEE Robotics and Automation Letters。[38] Z. Ye、S. R ˜A©gnier 和 M. Sitti，“具有多根柔性鞭毛的旋转磁性微型游泳机器人”，*IEEE*机器人学汇刊，第30卷，第3–13页，2014年2月。会议名称：IEEE Transactions on Robotics。[39] Y. Du、A. Miller 和 M. K. Jawed，“用于气液界面附近运动的简易鞭毛软体机器人”，3月

2021 2103 05712 。

[ ]

arXiv：。cs。[40] K. Diaz、T. L. Robinson、Y. O. Aydin、E. Aydin、D. I. Goldman 和 K. Y. Wan，“四鞭毛自主推进的极简机器人物理模型”，仿生启发与仿生学，第16卷，第066001页，2021年9月。出版商：IOP Publishing。[41] L. Hof，“多根鞭毛游动软体微型机器人的磁驱动”，