arXiv:2303.00805v1 [physics.flu-dyn] 1 Mar 2023

Pleobot：用于后生游动的模块化机器人解决方案

Sara Oliveira Santos[1], Nils Tack[1], Yunxing Su[1], Francisco Cuenca-Jim´enez[2], Oscar Morales-Lopez[2], P. Antonio Gomez-Valdez[2],和 Monica M. Wilhelmus[1,*]

[1]布朗大学，流体力学中心，工程学院，普罗维登斯，02912，美国[2]墨西哥国立自治大学，Circuito Interior s/n，工程，Coyoac´án，04510，墨西哥[*]mmwilhelmus@brown.edu

摘要

后生波运动是水生群居生物广泛采用的一种游泳方式，使其能够在中等雷诺数区间实现出色的运动表现和机动性。由于研究活体生物面临诸多挑战，我们对驱动这些能力的机制了解有限。受自然启发的设计为开发小型、机动灵活的水下自推进机器人提供了一种途径。本文介绍 Pleobot 的设计、制造与验证——这是一种独特的仿磷虾机器人游泳附肢，也是首个用于全面研究后生推进的平台。我们的方法将多连杆三维打印机构与关节的主动与被动驱动相结合，以生成自然运动学。通过同步测量力和流体流动，并结合生物学数据，我们展示了附肢产生的流动与推力之间的联系。此外，我们首次阐述了在动力冲程中有助于产生升力的前缘吸力效应。Pleobot 的可重复性和模块化使研究人员能够独立操控特定运动和特征，从而检验关于形态与功能关系的核心假设。最后，我们概述了 Pleobot 的未来发展方向，包括对形态特征进行调整。我们预计，该平台将吸引生态学、生物学和工程学等基础研究领域，以及开发用于研究太阳系各处海洋的新平台等广泛科学领域的关注。

引言

仿生机器人学已成为生物学和生态学中的重要工具，因为与传统的生物个体研究方法相比，它能够开展控制更严格的比较研究[1]。对特定性状或感兴趣行为进行独立操作，可检验探索机动性和性能背后驱动机制的核心假设。虽然若干测试平台已揭示生物水下推进的重要方面[2–5]，但它们也为无人水下航行器（UUV）提供了实用的工程解决方案。针对工程问题的既有机器人解决方案，包括金枪鱼[6], 扇贝[7], 和海豚[8]，展现出更高的推进效率，并能在多种环境中实现最佳运行。然而，由于实验或技术方面的挑战，大多数进展都集中在相对较高的雷诺数（Re）范围。因此，尽管生活在中等流态范围内的物种极其多样，我们仍需全面了解低至中等 Re 范围内的水生推进及其衍生的工程应用。

后生游动是生活在过渡流态（Re $<$ 1000）中的许多数量最丰富的无脊椎动物物种普遍采用的游泳方式，例如桡足类和磷虾。这种推进步态的特点是多个间隔紧密的游泳附肢依次划动，彼此之间存在相位差，形成尾至头行波[9]。后生运动使磷虾能够展现大尺度行为，尤其是能够进行昼夜垂直迁移（DVM），从海面迁至深达 1 km 的最低含氧区[10,11]。通过在动力冲程和恢复冲程中恰当调节阻力，可实现高效游动[9,12]。动力冲程期间，游泳附肢（腹肢）朝着与游动方向相反的方向运动，同时尽可能增大表面积。每个腹肢都会因此产生阻力，形成推动生物体前进的推力。相反，在恢复冲程期间，腹肢的轮廓面积减小，从而降低附肢所受阻力，并产生足以克服身体所受阻力的净推力。先前研究表明，在中等 Re 范围内，与基于升力的推进相比，基于阻力的后生波游泳在加速、制动和转向方面更为有效，因为它能在短时间内产生显著推力[9,13–15]。

对活磷虾开展的流体流动实验奠定了我们理解流固相互作用对远场流动影响的基础[16,17]。Murphy等人对活磷虾的游泳运动学进行了表征，并将推进系统的成功归因于附肢形态、划动运动学以及由此产生的流体动力学效应[16]。研究表明，在磷虾[17] 和螳螂虾[18] 腹肢上形成的尖端涡对于推力产生[19,20]至关重要。Kim和Gharib使用具有简化运动学的理想化腹肢形状扩展了这些研究结果。他们证明，尖端涡所包围的附肢表面积

具体而言，会调节推力产生[19]。然而，在表征近场流动以及测量游泳过程中产生的力方面所面临的挑战，阻碍了建立流体动力学与力分布（即推力和升力）之间关系的努力，这些关系涉及处于中等Re数范围内的后生波游动者。

简化的机器人模型和数值模拟补充了这些研究工作，揭示了不同 Re、相位差和附肢间距对流体动力学的影响[18,21–25]。例如，Ford 等人发现，在低 Re 下，相邻腹肢产生的射流彼此不会相互作用，这是由于黏性耗散所致；但当 Re 约为 800 时，这些射流会形成近稳态射流 [22]。这一差异使垂直和水平动量增加，从而使磷虾能够产生运动和悬停所需的推力与升力。相位差也被证明是影响后生游动效率的重要因素：它能带来接近最大的效率和推力，与同步运动相比，还能实现更高的平均身体速度[21,22,24,26]。同样，附肢间距也是与划动运动学相关的关键形态因素。先前研究表明，当附肢间距与附肢长度之比小于 1 时，游泳性能更佳[27]。据推测，这直接源于腹肢间流体相互作用增强了动力冲程期间的涡强度和环量[18]。

尽管通过简化系统获得的见解极具价值，我们仍需要一种关于基于阻力的后生波游泳的统一理论，以解释附肢运动学、流场与力的产生之间的关系。例如，悬停所需升力的产生机制仍有待探索。为更好地匹配自然界中的生物学和流体动力学现象，有必要增加系统复杂度，从而阐明形态和运动学特征对近场与远场流动的影响。随后，我们应采用综合框架，全面研究运动运动学、形态与功能之间的联系。

受机器人学启发的生物学研究方法促使我们着手解决这一问题。我们展示了首个完全关节化、多连杆的后生波机器人附肢，它能够复现磷虾的游泳运动学。我们设计的新型装置能够主动控制近端和远端附肢，并通过腹肢与周围流体的相互作用，实现远端附肢两个分枝的被动平面外驱动。此外，我们通过组装3D打印模块，实现了磷虾腹肢的主要形态特征。借助力和流体流动测量，我们量化了特定流动特征对推力和升力产生的影响，并厘清它们在一个冲程的动力冲程和恢复阶段中所发挥的作用。我们利用生物学数据验证了该模型作为合适测试平台的可行性。在本研究中，我们首次利用*Pleobot* 研究后生波腹肢的近场流动，并提供证据表明，此前未曾报道的前缘吸力效应有助于动力冲程期间产生升力。*Pleobot* 的可重复性和模块化使其能够采用多种配置和运动程序，以研究不同雷诺数、分类群和形态属性下的后生运动。因此，我们预计*Pleobot* 将吸引生态学、生物学和工程学等众多科学领域的广泛关注。

结果

Pleobot 运动学

Pleobot 的游泳运动学 由三个主要角度表征：1） α，身体轴与原肢节之间的角度；2） β，原肢节与双枝远端附肢（包括内肢和外肢）之间的角度；以及 3） γ，内肢与外肢之间的角度（图 1A-D）。杯状角 ζ 也在 *Pleobot* 中实现，如南极磷虾 所示（图 1E、F）。所得仿磷虾模型（图 1G）使用齿轮组驱动 α 和 β 运动学（图 1B）。 γ在动力冲程和恢复冲程期间，由于流体动力而被动驱动（图 1D），并且 ζ 外肢的角度是固定的（图 1F）。

Pleobot 的运动学通过追踪机器人系统连续数个周期（n = 5）的运动，并与生物体数据[16] 进行比较而得到验证。周期平均的 α 角和 β 角随时间的变化符合 E. superba 的运动学数据（图 2A、B）[16]。 β 角与磷虾数据之间的轻微偏差，与齿轮间的间隙有关，而间隙大小与齿轮组中的单元数量成正比。被动驱动的外肢运动范围为14° 至 95°；外展发生在回程冲程结束时，内收则与恢复冲程开始时相吻合（图 1）。目前尚无 E. superba 完整划水周期的对比数值报道，但 Murphy 及其合作者[16] 描述了 γ 在 0° 和 77°之间振荡。Pleobot 的运动学分析表明，它能够以极小误差执行预设的运动程序，其运动也与已报道的活磷虾数值一致。因此，Pleobot 是一种精准且高度可重复的活体后生波生物游泳附肢机器人仿体[16]。

流场可视化

我们在四个不同平面上进行了粒子图像测速测量，以评估流场（图 3A）。动力冲程开始时（t/T 为无量纲冲程时间，此时为 0），内肢末端形成一个涡旋，同时沿该肢段的大部分长度均匀分布着一个附着涡（图 3E）。这一模式与使用活体幽灵虾获取的生物学数据一致（图 3F）。与此同时，随着 α 增加， β 减小，外肢向外展（图 2）。在动力冲程的前半段（t/T 达到 = 0.25 之前），外肢保持较小的攻角（AoA，相对于

水平的身体轴，沿顺时针方向测量），从而促进沿外肢前侧面（朝向游动方向）形成附着的前缘涡（LEV）（图3B）。前缘涡保持附着，直至外肢达到攻角 $=73^{o}\pm1^{o}$ 在 t/T $=0.3$ 时。随着 α 角度增加，外肢的攻角也随之增大，在动力冲程后半段变为相对于游动方向垂直（攻角 $=90^{o}$）（图 4I）。由于腹肢在此阶段减速，前缘涡从外肢脱落（图 3C、4I），内肢的附着涡则在末端脱落（图 3E、F、4E）。两个反向旋转涡卷吸的流体共同作用，形成一股朝向后方的大型向下射流。

开始恢复冲程时，外肢内收并与内肢重叠，从而有效减小腹肢暴露于流体中的总体轮廓面积（图2C、E、3D、4C）。与动力冲程相反，这种构型会产生一对反向旋转的侧缘涡，在游动方向上诱导展向流（图3D、4F、G）。

流体动力

通过力测量评估稳定向前游动过程中升力和推力的贡献（图4）。针对按20倍放大的内肢和外肢模型，计算了升力（C_L）和推力（C_T）系数。在动力冲程开始时（t/T $=0$），推力较大，这可能是由于在前一个划水周期结束时，腹肢后方产生了来流展向流（图4G）。在动力冲程期间，推力和升力与外肢的外展高度相关。内肢上的力可分解为推力和升力方向的分量，而沿外肢形成的前缘涡促成了这种关联。在动力冲程的前三分之一阶段（t/T ~0.16），随着外肢进行外展并产生附着的前缘涡，升力系数急剧增加，达到其全局最大值（$C_L=0.44$）（图4B、C、H）。相比之下，在产生推力的同时，推力在此阶段基本保持不变，直到升力达到峰值并开始下降后才显著增加（图4A）。这种反向关系与外肢攻角转变为更垂直的方向相吻合，从而导致前缘涡脱落。由于整个腹肢总体呈垂直方向，这也源于内肢对推力贡献的增加（见图4A、B）。在动力冲程的后半段，随着内肢的附着涡向尖端移动并形成停止涡，推力急剧下降（图4E）。由于腹肢相对于流体的有效角度增加（角度 Ψ，即身体轴与内肢前侧面之间的总体角度；见图4），内肢和外肢产生向下的力，使升力降至最低。随后升力增加，可能是由于停止涡裹挟的展向流作用于减速中的内肢和外肢前侧面（图4E）。

在恢复冲程的前 2/3 阶段，推力为负值，这表明划水周期的这一阶段主要受阻力支配。推力系数在恢复冲程中段附近达到最低点（图 4A），此时腹肢正在加速。推力逐渐增大并转为正值，这表明即使在恢复冲程期间也会产生一定推力。恢复冲程开始后，随着角度减小，升力急剧下降至另一个最低点（图 4B）。恢复冲程结束时，附肢减速，升力再次上升。推力和升力的增加，与重叠的内肢和外肢后方出现展向流同时发生（图 4G）。

讨论

近年来，水下探索对机动性强的自主水下航行器的需求日益增长，推动了受自然启发的各种方法[28–32]。尤其是地外海洋的发现，促使人们开发新型机器人平台，而这些平台很可能需要后生游动具备高效率、多功能性和机动性。因此，*Pleobot* 为后续研究后生游动奠定了基础，以指导水下探测器的设计。

Pleobot 是首个用于研究后生游动的全关节式机器人。该设计构成了一个模块化的3D打印平台，融入了磷虾的运动学和形态特征。磷虾是一种海洋生物，已观察到会形成大型聚集群，并向海洋深处迁徙数百米。尽管磷虾的运动学已得到非常详尽的研究，但仍需定量分析单个附肢附近的流体流动，以将运动学与流体动力学联系起来，并理解力的产生。*Pleobot* 是首个能够在单个附肢尺度上，厘清运动学参数、形态学和近场流体动力学对推力与升力产生各自作用的系统。

我们的独特研究表明，*Pleobot* 可作为一个模拟系统，用于研究共同影响后生推进效率和流动特征的广泛参数和特性。尽管磷虾已被用作生物学、计算和机器人研究中的模式生物，但研究重点大多放在多个附肢的流场上，而非推力和升力产生的单一机制。因此，只有通过测量近场流动，并在模型中引入复杂因素，从而能够独立检验与自然系统生态学和行为（即机动性、迁徙和快速游动）相关的假设，才能得出有关流固相互作用的结论。

在本研究中，对力和粒子图像测速数据的分析使我们能够评估特定流动特征对*Pleobot*升力和推力产生的贡献。在动力冲程开始时，内肢有助于产生推力和升力

，其方式是形成尖端涡和附着涡。同样，外肢也有助于产生这两种力。磷虾在稳定向前游动时必须产生升力，因为它们具有负浮力，必须产生升力才能维持在水柱中的位置[17]。随着划水过程的推进，外肢的朝向变得更加垂直，其对升力的贡献随之减小，而对推力的贡献则增加（图 4A、B）。这体现了升力产生与推力产生之间的权衡。在稳定游动时，推力的主要作用是推动生物体向前，而升力则用于确保其在水柱中的垂直位置。我们的数据表明，推力和升力的产生并非由行为过程决定，而是受限于相对狭窄的运动学和形态学标准范围。步态和拍动频率的行为变化总会调节这些力。然而，对外肢被动外展角度及其在流动中的朝向的依赖性表明，在后生推进中，只有有限的一组系统要求对推力和升力的产生至关重要。

值得注意的是，我们揭示了在动力冲程期间沿外肢存在前缘涡。力测量表明，在动力冲程期间，外肢上形成的这一附着前缘涡增强了升力。此外，这一涡旋略微延缓了升力的损失，使升力在动力冲程的部分阶段始终保持为正。这种基于升力的机制可能补充了腹肢推动水体所产生的基于阻力的机制的作用。这些近场结果说明了*Pleobot*的重要性：它不仅是一个在中等雷诺数区间内为海洋探索设计解决方案的平台，也是一个理解自然的框架。对仿生附肢进行的力测量凸显了理解腹肢周围涡动力学的重要性，并揭示了升力和推力是同时产生的。

将自然运动学和形态特征融入*Pleobot* 能够带来令人鼓舞的结果，并为提高机器人模型的复杂性、阐明有助于磷虾及其他后生波游动者提高效率的更多机制提供了动力。特别是，内肢和外肢周围存在毛发状刚毛，以及推进器的柔性，最有可能改变腹肢周围的流场。刚毛是低至中等雷诺数范围内后生波生物的定义性特征，可增加与水接触的表面积，从而增强推力[9,33,34]。研究表明，柔性是推进器的一项重要特征，它能够平滑推力峰值，使推进器在动力冲程期间产生近乎恒定的推力[19]。*Pleobot* 提供了一个评估这些额外形态特征重要性的平台。此外，其模块化设计易于复制，并可组合成多个单元，以研究腹肢协同相互作用等机制（图5）。例如，多个附肢以相位差进行划水会促进流体流动相互作用，而这种相互作用可能有助于增强推力[18,35]。*Pleobot* 由此成为量化这些影响的理想平台。

最后，尽管生物体研究构成了我们对后生游动认识的核心[13,16–18]，但对活体动物进行研究，只能让我们部分了解产生高效运动和良好性能的生物力学与流体动力学机制。近期的机械学与机器人学方法能够实现可重复测量，凸显了低成本、可控测试平台对生物学研究的重要贡献[22,27,35]。这种比较方法对于建立后生游动的统一理论至关重要。*Pleobot* 的制造对希望开展实验的机构和个人都触手可及（参见 oliveira:zenodo:2022））。其模块化设计可快速制作不同形状和尺寸的附肢原型。此外，对其近端和远端节段的控制，有助于研究多种系统，从小型桡足类、磷虾，到螳螂虾和龙虾等较大型物种。因此，*Pleobot* 可用于全面表征后生游动这种基于阻力的推进方式，并帮助建立这一运动机制的统一理论。

方法

磷虾附肢运动学建模

为重现 南极磷虾的运动学（如 Murphy 等人所报告）[16]，，我们使用 α 和 β 的数值来确定 *Pleobot*的运动学关系。*Pleobot* 根据雷诺数进行动态缩放。该无量纲参数使用附肢的速度和长度尺度定义，对于活磷虾约为 600：

$$Re = \frac{U_{tip} * L}{\nu} = \frac{2\theta n L^2}{\nu} \tag{1}$$

其中，L 是腹肢的长度，U_{tip} 是其末端的平均速度，而 ν 是流体的运动黏度。U_{tip} 使用划幅 θ、频率 n和长度 L计算，即为 $2\theta nL$。

该运动系统采用多连杆机构实现，通过传动齿轮箱驱动近端节段和远端节段（分别对应 α 和 β），并配备独立控制的伺服电机。角度 γ表示面外运动，这给主动驱动带来了挑战，因此通过结构（腹肢）与流体之间的流体动力学相互作用实现被动驱动。

决定齿轮位置的运动学关系为[36,37]:

$$\frac{\Delta\phi_{k+1}-\Delta\phi_k}{\Delta\phi_{k-1}-\Delta\phi_k}=-\frac{N_{k-1}}{N_{k+1}}=-\frac{r_{k-1}}{r_{k+1}} \tag{2}$$

该方程给出了主动齿轮和从动齿轮（分别为 $\Delta\phi_{k+1}$ 和 $\Delta\phi_{k-1}$）与连接两者的连杆 $\Delta\phi_k$ 之间的关系（补充图1），其中 N 和 r 分别表示相应齿轮的齿数和半径。对于给定的附肢i，腹肢的位置 $\mathbf{R}_{pi}$由下式决定（补充图2，B）：

$$\mathbf{R}_{pi}=\mathbf{R}_{1i}+\mathbf{R}_{2i} \tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned}&\mathbf{R}_{1i}=\mathbf{R}\left(\theta_{1i}\right)\mathbf{r}_{1i}\,; \quad \mathbf{R}_{2i}=\mathbf{R}\left(\theta_{2i}\right)\mathbf{r}_{2i}\\ &\mathbf{r}_{1i}=[x_{1i},0]^T\,; \quad \mathbf{r}_{2i}=[x_{2i},0]^T\end{aligned} \tag{4}$$

原肢节和外肢的局部参考系向量分别为 $\mathbf{r}_{1i}$ 和 $\mathbf{r}_{2i}$。同样，$\mathbf{R}(\theta_{1i})$ 和 $\mathbf{R}(\theta_{2i})$ 表示全局旋转矩阵，而x_{1i} 和 x_{2i} 表示长度（补充图2，A）。

最后，齿轮的角位移通过式（2）所述的关系求得：

$$\frac{\Delta\psi_{2i}-\Delta\theta_{1i}}{\Delta\psi_{1i}-\Delta\theta_{1i}}=-r_{e1}, \qquad \frac{\Delta\psi_{3i}-\Delta\theta_{1i}}{\Delta\psi_{2i}-\Delta\theta_{1i}}=-r_{e2}, \qquad \frac{\Delta\psi_{4i}-\Delta\theta_{1i}}{\Delta\psi_{3i}-\Delta\theta_{1i}}=-r_{e3} \tag{5}$$

其中，ψ 是齿轮沿连杆1（内肢）的转动角，θ 是从全局参考系测量的第一根连杆的角度（补充图2，A），r_e 是齿轮传动比。利用 α_i 和 β_i，可通过方程（3）和（5）求解该机构的正运动学，从而计算出 ψ_{1i}，使第二根杆（内肢）运动（补充图2，C）。第一根杆（原肢节）以角度 α_{1i}运动（补充图2，A）。腹肢1末端的后生波轨迹由 $\mathbf{R}_{p1}=[x_{p1},y_{p1}]^T$给出。

制造通过3D打印完成，并采用较小的公差，以减少振动和齿轮系的运动损失。支撑结构容纳伺服电机和齿轮，并被设计为水面以上的结构。轴承用于减少齿轮与轴之间的摩擦。传动装置的放大倍数为2.5，以实现连杆所需的角速度。

外肢和内肢

当*E. superba* 向前推进时，内肢和外肢进行外展和内收，从而有效改变附肢的轮廓面积，以产生推力并减少阻力。这一运动由 γ表征，即外肢与内肢之间的夹角。在*Pleobot*中，该过程在水平面上、原肢节的外侧进行驱动。

向前游动的磷虾在动力冲程开始时发生外肢外展，其最大幅度达到 77 °[16]。这一运动会使附肢产生杯状变形，形成一种V形结构[17],，让人联想到游动鱼类所具有的类似结构；研究表明，与平直鳍相比，这种结构能够产生更大的推力（例如，参见[2]）。在恢复冲程期间，外肢和内肢进行内收。

附肢的杯状变形形成的角度 ζ位于内肢和外肢之间。通过测量内肢和外肢中平面之间的角度（图 1E），利用摄影证据对其进行量化。 *Pleobot* 被设置为与量化得到的平均值 37°相匹配。

机器人设计

模块化 CAD 设计采用聚乳酸（PLA）打印，使用 Prusa i3MKS3+ 3D 打印机（Prusa Research，布拉格，捷克共和国）进行快速原型制作。每对附肢由两个伺服电机（HS-5087MH，Hitec RCD，美国加利福尼亚州圣迭戈）驱动，并由微控制器（ELEGOO Mega 2560，Elegoo Industries，中国深圳）控制。该微控制器通过两个重复序列插值模块使用 Simulink（MathWorks，美国马萨诸塞州纳蒂克）进行编程，其中一个用于 α，另一个用于 β，规定的角度改编自[16]。完整的 CAD 库和装配文件，以及已购组件清单，均可在 Oliveira Santos 等人提供的开放获取存储库中获取（参见 oliveira:zenodo:2022）。

对*Pleobot* 的游泳运动学进行了分析，并与活磷虾所报道的运动学进行了比较[16]。将一个机器人附肢系 tether 在横梁上，并浸没于室温下的甘油-水混合物中（60%甘油和40%水）。使用科学相机（FASTCAM MINI WX，Photron，2048像素 x 2048像素）以125帧/秒的速度记录附肢运动。通过使用MATLAB的DLTdv8并借助自动点跟踪对视频记录进行数字化，跟踪机器人游泳足表面的黑色标记点，包括原肢节和外肢上的标记点[38]。

流场测量

使用二维粒子图像测速测量摆动附肢周围的流场。实验在边长为30 cm的立方水槽中进行，使用高速摄像机（FASTCAM MINI WX，Photron，2048像素 x 2048像素）以125帧/秒的速度进行拍摄，配合尼康镜头（Nikon AF-S VR Micro-NIKKOR 50 mm）和连续激光器（Laserglow，532 nm下功率为1 W），并使用柱面透镜生成激光片。向流体中加入了 10 μm颗粒进行示踪（Dantec Dynamics，丹麦斯科夫伦讷）（补充图3）。视场为174 mm x 174 mm，所得空间分辨率为每像素0.085 mm。使用DaVis 10（LaVision）计算速度场，采用逐渐减小的询问窗口尺寸（初始为48像素 x 48像素，重叠率50%，1次遍历；最终为32像素 x 32像素，重叠率50%，3次遍历）。采用标准矢量后处理去除流场中的离群值。根据速度场计算涡量场。

力测量

使用安装在边长为30 cm的立方水槽中的六轴力传感器（Nano 17 F/T 力传感器，ATI），对放大（20倍）的远端附肢模型进行力测量（补充图4）。实验匹配了雷诺数，以确保实现动力学相似。为此，对基准条件下的拍动频率和流体黏度进行了调整。实验使用动力黏度为9 cSt的甘油-水混合物（60%甘油、40%水），其黏度由标准流变仪（Ares-G2，TA Instruments）测得。附肢经过设计，可在甘油-水混合物中实现中性浮力。

力传感器安装在双枝桨足的旋转轴上，使x轴与桨足对齐，y轴与其垂直。测得的平行于（$F_{\parallel}$）和垂直于（$F_{\perp}$）桨足的力，结合该截面相对于身体的方向（由角度 Ψ表示），可分解为升力和推力；身体轴与内肢之间的总夹角定义为 $\alpha + 180^{o} - \beta$。升力和推力系数（分别为C_L和C_T）根据分解后测得的升力和推力计算（公式6）。利用一个周期内的瞬时力，并对五个周期取平均，计算升力和推力如下：

$$\begin{aligned} Lift &= F_{\parallel}\ sin\ \psi - F_{\perp}\ cos\ \psi \\ Thrust &= F_{\parallel}\ cos\ \psi + F_{\perp}\ sin\ \psi \end{aligned} \tag{6}$$

并C_L并C_T作为

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad ; C_T = \frac{Thrust}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{7}$$

其中， ρ 为甘油-水混合物的密度，U 为附肢尖端速度，A 为外展附肢的面积。

生物体实验

使用活体幽灵虾沼泽幽灵虾 验证 Pleobot*Pleobot*的流体动力学和 γ角度运动学。幽灵虾不像磷虾那样是专性游泳动物，但由于以下几个原因，它们是合适的类比对象。首先，它们普遍依赖后生游动。其次，它们具有与磷虾相近的形态学和游泳运动学（即与其外肢、内肢和刚毛相关的参数）。最后，它们在体型和解剖结构方面也相似。

标本（n = 4）使用氰基丙烯酸酯将其系留于垂直金属丝上，氰基丙烯酸酯涂敷于其甲壳背侧表面，然后悬挂在成像容器中（15 × 10 × 5 cm^3），并将水中氧饱和度调至 100%。我们通过向水中播撒 10 μm 粒子（Dantec Dynamics，丹麦斯科夫伦德）并使用光纤照明器（Fiber-Lite MI-152，Dolan-Jenner Industries，美国马萨诸塞州博克斯伯勒）配合准直透镜（N-BK7平凸透镜，Thorlabs，美国新泽西州牛顿）进行明场粒子图像测速[39]。我们使用高速数字摄像机（Fastcam Nova R2，Photron，日本东京）以 2000 fps 的帧率和 2048 × 1472平方像素的分辨率记录侧视图和后视图。

使用 DaVis 10 软件包（LaVision，德国哥廷根）计算速度矢量。图像对经过三轮重叠询问窗（75%）分析，询问窗尺寸逐步减小（从 96 × 96 到 64 × 64 平方像素）。所有帧均用于分析，帧间时间间隔为 0.5 ms。在进行图像询问前，对身体和腹肢进行遮罩处理，确认粒子图像测速测量中不存在表面伪影。

参考文献

1. G. V. Lauder. 将机器人学作为生态学和进化生物学中的一种比较方法。《综合与比较生物学》 **62**,721–734(2022).**2.** C. J. Esposito、J. L. Tangorra、B. E. Flammang 和 G. V. Lauder。一种机器鱼尾鳍：刚度和运动程序对运动表现的影响。《实验生物学杂志》 **215**, 56–67(2012).

3. Tytell E, L. J. 仿生机器人学见解：波动游泳的神经机械协调。《科学·机器人学》2, eabk0620 (2021)。 4. Howe、Bryant、Duff 和 Astley。通过机器人物理模型检验体深对鱼类机动性的影响。《生物启发与仿生学》17, 016002 (2021)。 5. G. V. Lauder 和 J. L. Tangorra。鱼类运动：躯干与鳍驱动运动的生物学与机器人学。《机器鱼：仿生鱼形水下机器人》25–49 (2015)。 6. Zhu 等。金枪鱼机器人：探索游泳鱼类性能空间的高频实验平台。《科学·机器人学》4, eaax4615 (2019)。 7. Robertson、Efremov 和 Paik。Roboscallop：一种双壳类启发的游泳机器人。IEEE《机器人与自动化快报》4, 2078–2085 (2019)。 8. Wu、Yu、Yuan 和 Tan。迈向滑翔式机器海豚：设计、建模与实验。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》24, 260–270 (2019)。 9. Vogel。流动流体中的生命：流动的物理生物学（修订扩充第二版）。普林斯顿大学出版社。(2020)。 10. Bianchi、Stock、Galbraith 和 Sarmiento。昼夜垂直迁移：一维海洋模型中的生态调控因素及其对生物泵的影响。《全球生物地球化学循环》27, 478–491 (2013)。 11. Bianchi 和 Mislan。基于声学数据的昼夜垂直迁移时间和速度的全球模式。《湖沼学与海洋学》61, 353–364 (2016)。 12. Kils。南极磷虾（南极磷虾）的游泳行为、游泳性能和能量平衡。BIOMASS 科学丛书第3号 (1981)。 13. Byron 等。跨尺度的后生运动：当前挑战与未来方向。《综合与比较生物学》61, 1674–1688 (2021)。 14. Vogel。比较生物力学：生命的物理世界。普林斯顿大学出版社。美国新泽西州普林斯顿 (2003)。 15. Walker 和 Westneat。水生划桨运动与飞行的机械性能。《伦敦皇家学会会刊 B辑：生物科学》267, 1875–1881 (2000)。 16. Murphy、Webster、Kawaguchi、King 和 Yen。南极磷虾的后生游动：步态运动学与系统设计。《海洋生物学》158, 2541–2554 (2011)。 17. Murphy、Webster 和 Yen。南极磷虾悬停的流体动力学。《湖沼学与海洋学：流体与环境》3, 240–255 (2013)。 18. Garayev 和 Murphy。螳螂虾的后生游动：运动学与腹肢间涡相互作用。《综合与比较生物学》61, 1631–1643 (2021)。 19. Kim 和 Gharib。基于阻力的划桨推进中的涡形成特征与推力性能。《实验生物学杂志》214, 2283–2291 (2011)。 20. DeVoria 和 Ringuette。低展弦比旋转平板鳍的涡形成与饱和。《实验流体》52, 441–462 (2012)。 21. Alben、Spears、Garth、Murphy 和 Yen。基于阻力的游泳中多个附肢的协调。《皇家学会界面杂志》7, 1545–1557 (2010)。 22. Ford、Lai、Samaee 和 Santhanakrishnan。后生划桨的流体动力学：雷诺数和相位差变化的影响。《皇家学会开放科学》6, 191387 (2019)。 23. Granzier-Nakajima、Guy 和 Zhang-Molina。低至中等雷诺数下后生推进的数值研究。《流体》5, 86 (2020)。 24. Hayashi 和 Takagi。边界附近刚性肢臂的后生游动。《流体》5, 24 (2020)。 25. Lim 和 DeMont。腹肢的运动学、流体动力学和力的产生表明，美洲螯龙虾（美洲螯龙虾）采用喷射辅助行走。《实验生物学杂志》212, 2731–2745 (2009)。 26. Zhang、Guy、Mulloney、Zhang 和 Lewis。甲壳动物游泳中肢体最佳协调的神经机制。《美国国家科学院院刊》111, 13840–13845 (2014)。 27. Ford 和 Santhanakrishnan。相位差在磷虾类多附肢后生游泳中的作用。《生物启发与仿生学》16, 066007 (2021)。

28. Aubin, C. 等. 面向高能量密度机器人的电解质血管系统。《自然》571, 51–57 (2019). 29. Katzschmann, R., DelPreto, J., MacCurdy, R. 和 Rus, D. 利用声学控制的软体机器鱼探索水下生物。《科学·机器人学》3, eaar3449 (2018). 30. Neveln, I. 等. 电鱼研究中的仿生与生物启发机器人学。《实验生物学杂志》216, 2501–2514 (2013). 31. Wang, Y., Wang, R., Wang, S., Tan, M. 和 Yu, J. 水下仿生推进：从检测到操作。《IEEE工业电子学报》67, 7629–7638 (2019). 32. White, C., Lauder, G. 和 Bart-Smith, H. Tunabot flex：一种金枪鱼仿生机器人，身体柔性有助于提升高性能游泳能力。《生物启发与仿生学》16, 026019 (2021). 33. Koehl, M. 微观附肢的生物力学：速度变化引起的功能转变。《生物力学杂志》37, 789–795 (2004). 34. Cheer, A. 和 Koehl, M. 桨状附肢与耙状附肢：流体流经小型生物刚毛附肢的过程。《理论生物学杂志》129, 17–39 (1987). 35. Ford, M. P. 和 Santhanakrishnan, A. 缩小附肢间距可通过促进尖端涡相互作用提高后生游动速度。《综合与比较生物学》61, 1608–1618 (2021). 36. Erdman, A. G. 和 Sandor, G. N. 机构设计分析与综合（第1卷）。Prentice-Hall (1997). 37. Sandor, G. N. 和 Erdman, A. G. 高级机构设计，第2卷：分析与综合。Prentice-Hall (1984). 38. Hedrick, T. L. 生物和仿生系统二维及三维运动学测量的软件技术。《生物启发与仿生学》3, 034001 (2008). 39. Gemmell, B. J., Jiang, H. 和 Buskey, E. J. 一种新的微尺度粒子图像测速方法（μPIV），用于量化自由游动浮游动物周围的流场。《浮游生物研究杂志》36, 1396–1401 (2014).

致谢

我们衷心感谢 Valentina Di Santo 提供富有见地的讨论，为本研究奠定了更坚实的基础。我们也感谢 Yair Sanchez Juarez 和 Pedro Enrique Ávila Hernández 为*Pleobot*早期版本所做的工作。本研究经费由加利福尼亚大学墨西哥与美国研究所（UC MEXUS）、国家科学技术委员会（CONACYT）通过 UC MEXUS-CONACYT 合作资助项目（UCMEXUS CN-18-138）提供，此外还包括布朗大学研究副校长办公室研究种子基金以及美国国家航空航天局罗得岛州 EPSCoR 种子基金（80NSSC22M0040）。

作者贡献声明

M.M.W.、S.O.S、F.C.J、P.A.J.V. 和 O.M.L. 提出了研究构想并设计了实验；S.O.S.、N.T、Y.S. 开展实验并分析数据；M.M.W.、S.O.S、F.C.J、P.A.J.V.、O.M.L.、N.T 和 Y.S. 撰写了手稿；M.M.W. 负责监督项目。M.M.W. 负责管理项目。所有作者均审阅了手稿。

补充信息

竞争利益作者声明不存在竞争利益。**数据可用性声明**如通过电子邮件向通讯作者提出合理请求，将提供数据。

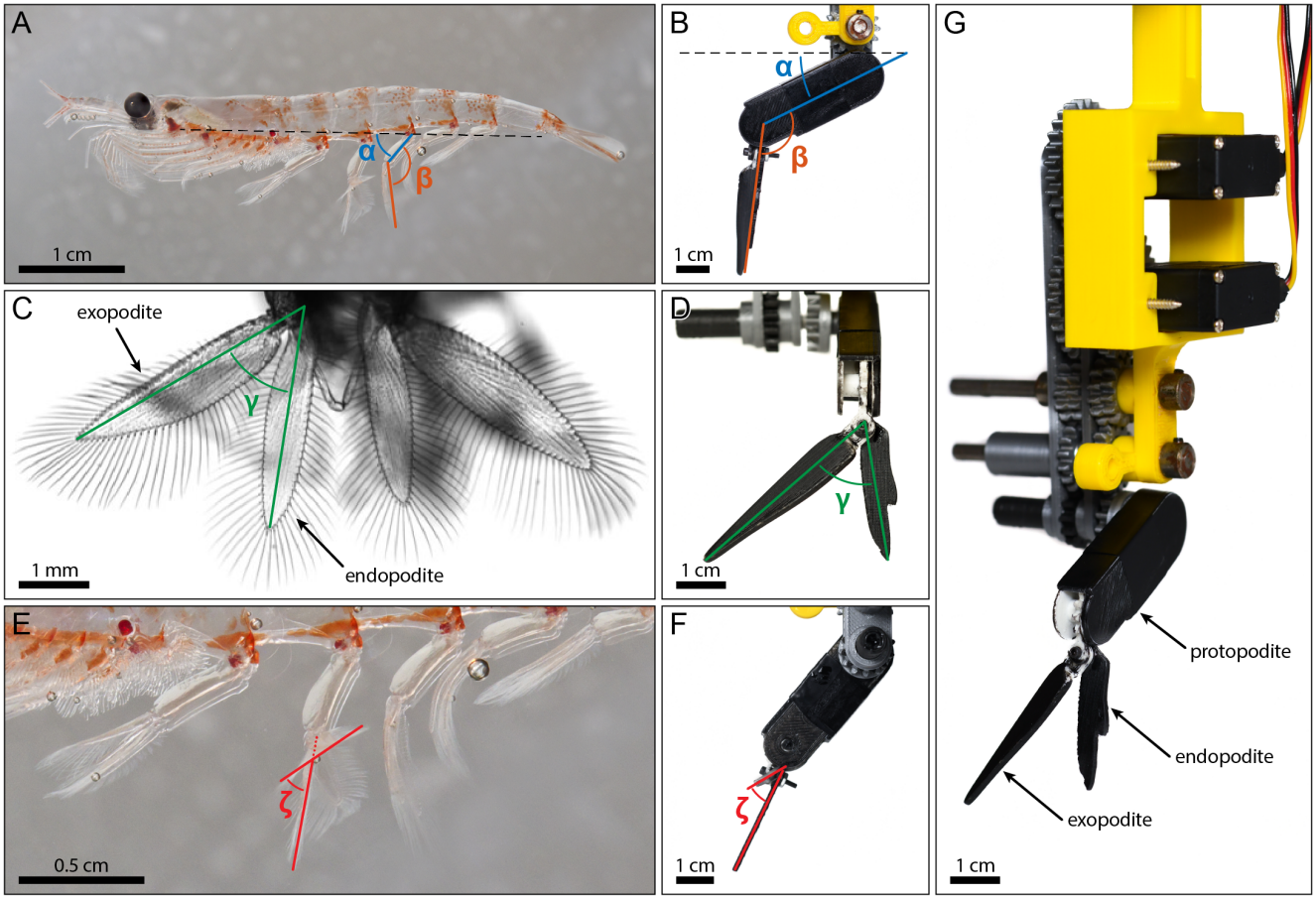


图1. 腹肢的形态学和运动学参数。A 面板（南极磷虾）、C 面板（沼泽幽灵虾）和 E 面板展示了自由游泳虾的运动学参数，这些参数已应用于 B、D 和 F 面板所示的*Pleobot* 中： α 定义为身体轴线与近端节段（原肢节）之间的夹角， β 为原肢节与远端双枝节段（由内肢和外肢构成）之间的夹角， γ 在动力冲程期间外肢与内肢分离时出现，而 ζ 描述外肢与内肢之间形成的杯状变形。*Pleobot* （G 面板）采用机械齿轮组设计，可主动控制 α 和 β，同时被动整合 γ。请注意，C 面板拍摄于生物体背面，而 E 面板则从侧面近距离展示腹肢（与 A 面板视角相同）。

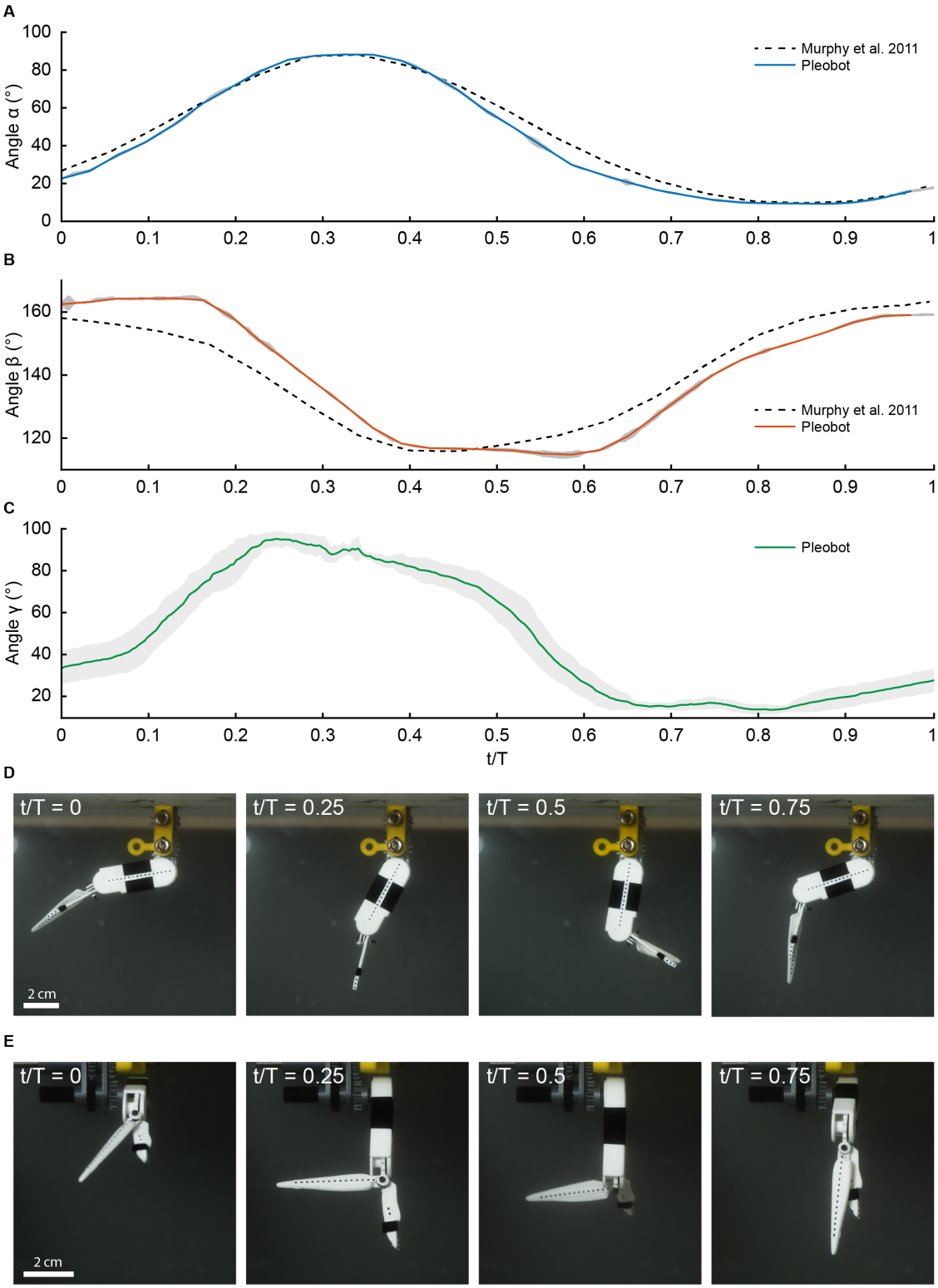


图 2. 运动学测量。通过追踪*Pleobot* 的运动，并将每个运动学参数与生物学数据绘制在一起，对其进行了验证[16]。A–C 面板展示了运动学角度的变化 α， β，以及 γ。请注意，5 个周期的标准差以阴影区域表示。D 和 E 面板分别展示了从侧视图（D 面板）和正视图（E 面板）观察到的这些角度的变化。

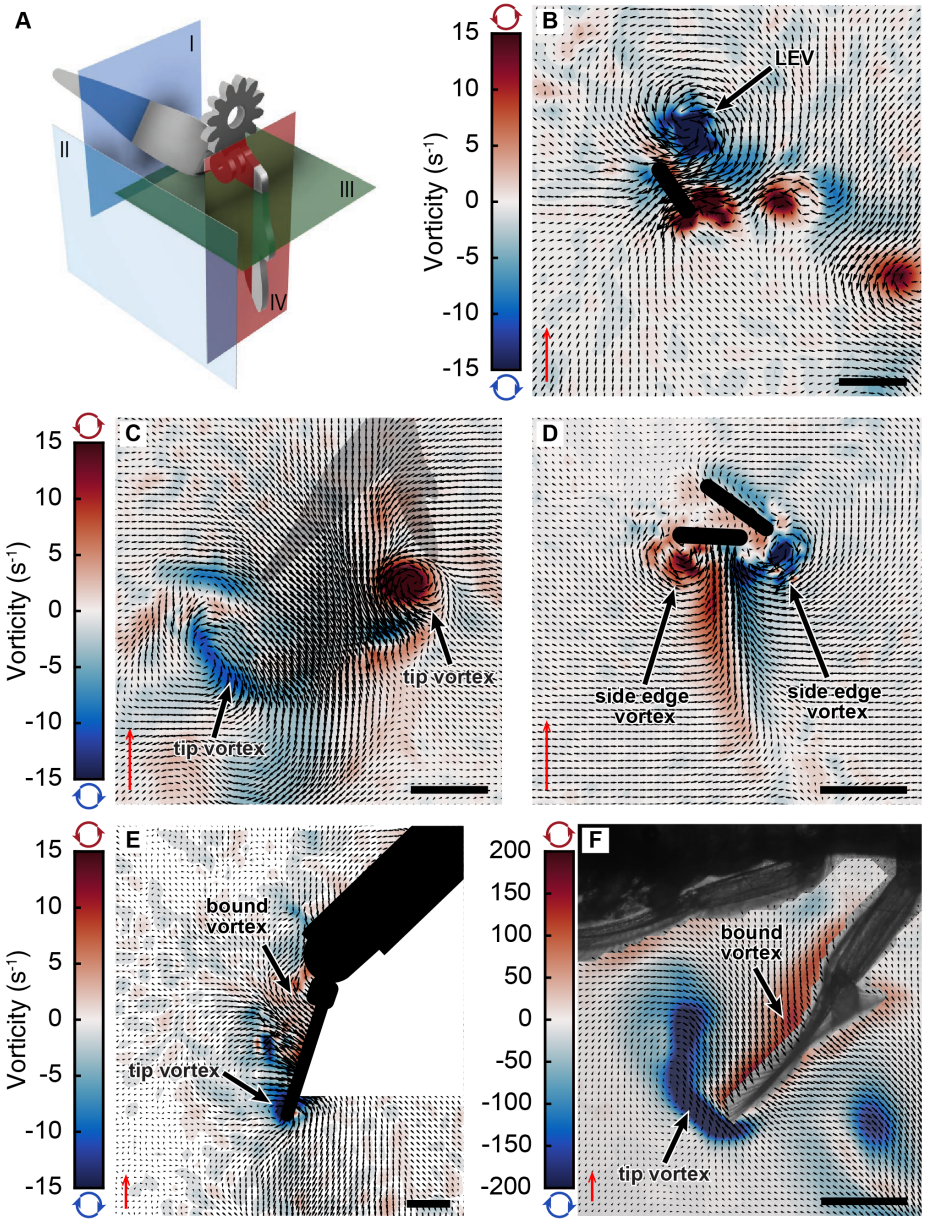


图 3. 流场测量。面板 A 展示了采集粒子图像测速数据的平面。面板 B–E 展示了具有代表性的瞬时速度场和涡量场：B 为垂直平面 I，C 为正面平面 II，D 为水平面 III，E 为垂直平面 IV。面板 F 展示了从系留活虾采集的流场测量结果，以供参考。面板 B 和 D–E 中的黑色区域是*Pleobot* 在 A 中各平面上的对应截面轮廓；E 中的白色区域表示激光形成的阴影区域。在 C 中，*Pleobot* 位于平面之外，为清晰起见叠加显示了其位置。请注意，箭头的大小和方向随给定网格点处的速度值变化，而颜色则根据色图随涡量值变化。红色比例箭头表示 20 cm s^{-1}。比例尺在 (B–E) 中表示 1 cm，在 (F) 中表示 1 mm。

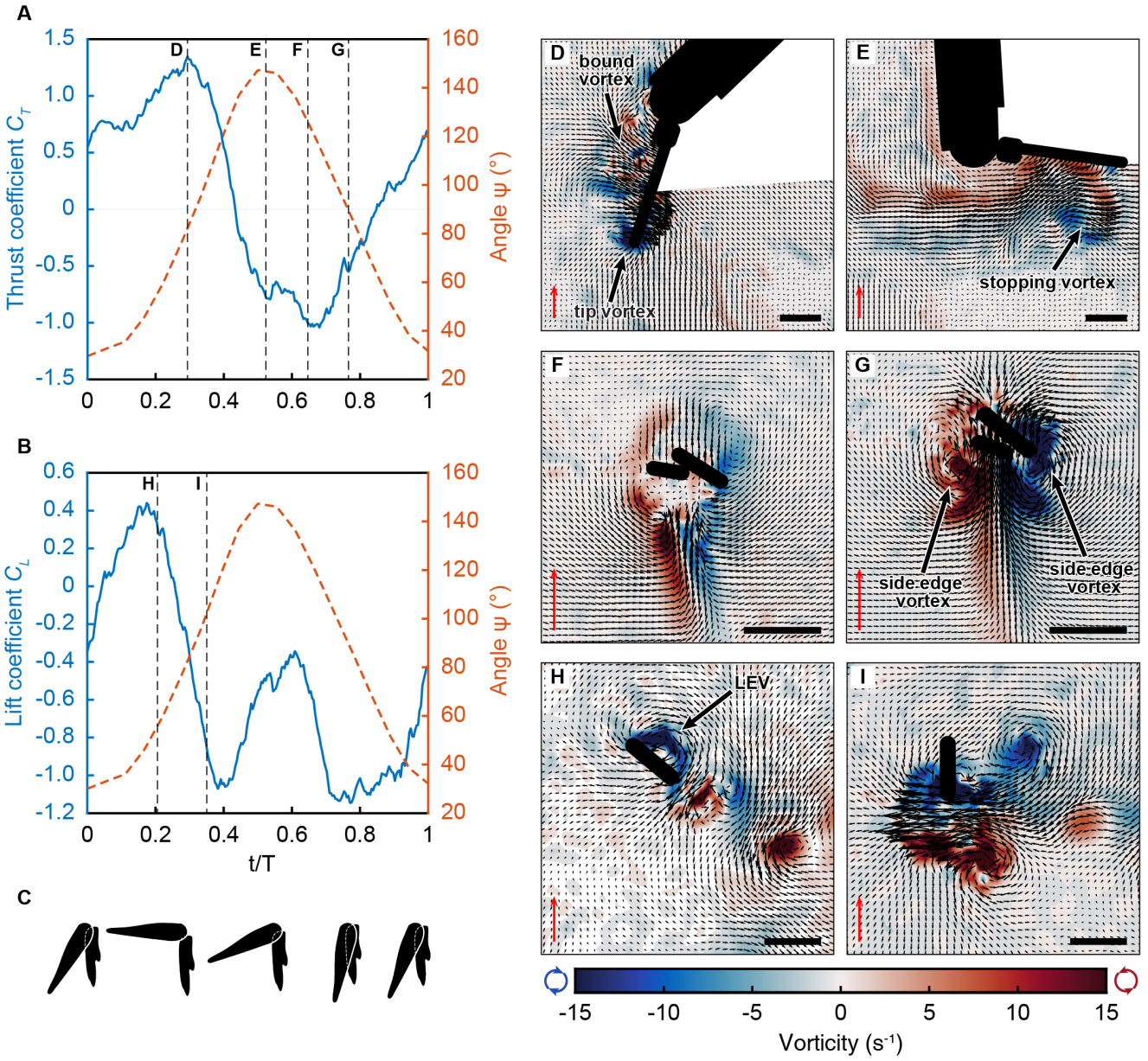


图4。 力测量。推力（A）和升力（B）系数取连续五个周期的平均值。橙色虚线表示附肢的运动学特征，以角度 Ψ 表征。C面板中与 γ 角度前视图对应的游泳足轮廓，突显了一个划水周期内游泳足表面积的变化。D–I面板展示了周期不同时间点的粒子图像测速测量结果，对应A和B面板中的黑色虚线。D和E面板对应动力冲程期间沿内肢的侧视图，显示尖端涡和附着涡（D），它们在动力冲程结束时脱落（E）。F和G面板展示恢复冲程期间外肢和内肢的仰视图，可见附肢后方、两个侧缘涡旋之间不断增强的展向流。H和I面板对应动力冲程期间沿外肢中平面的侧视图，其中可辨认出一个前缘涡（LEV）；随着攻角变化，该涡最初主要产生升力，随后转而产生推力。所有画面中的比例尺和红色比例箭头分别代表1厘米和20厘米 s^{-1}。

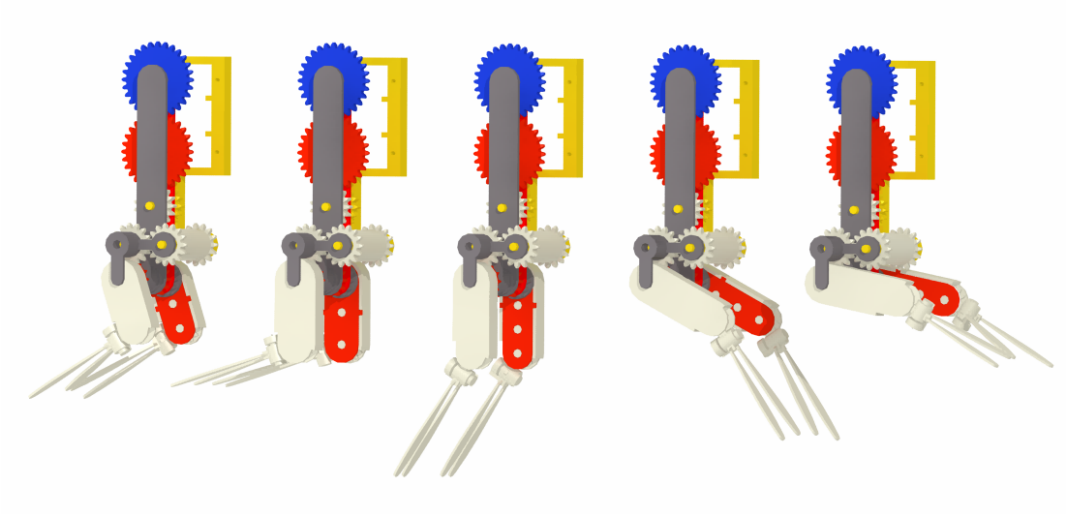
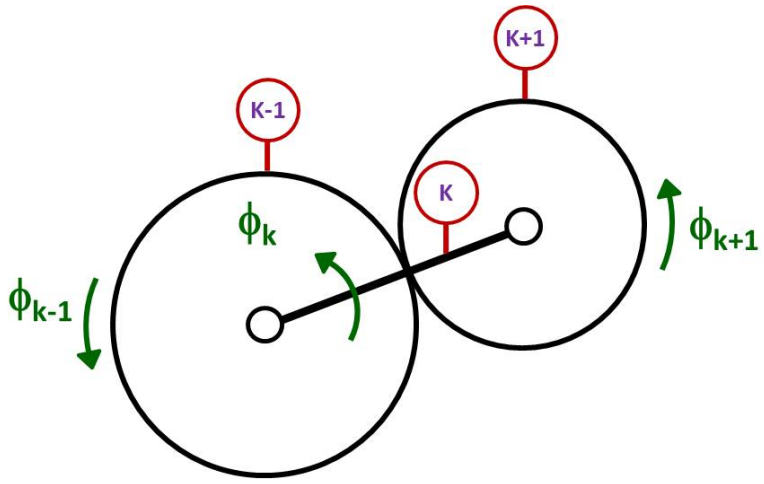
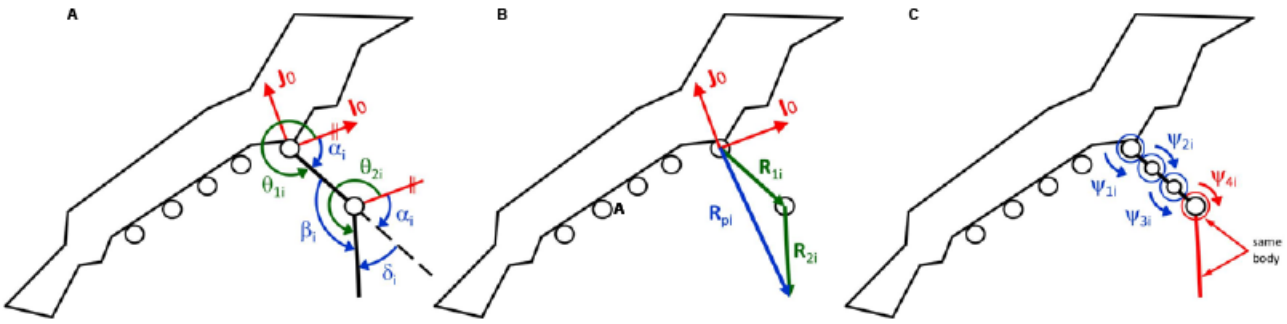


图 5. 仿磷虾模块化机器人（SKRIMP）。该示意图展示了 *Pleobot* 的模块化设计和快速原型制作如何通过采用多个单元，支持对后生游动的研究。这包括研究多个分类群、体型结构和附肢构型中的流体流动与力。*SKRIMP*为新一代自主水下航行器的开发奠定了基础，使其能够利用后生波游动者的游泳特征，在复杂的海洋环境中运行。

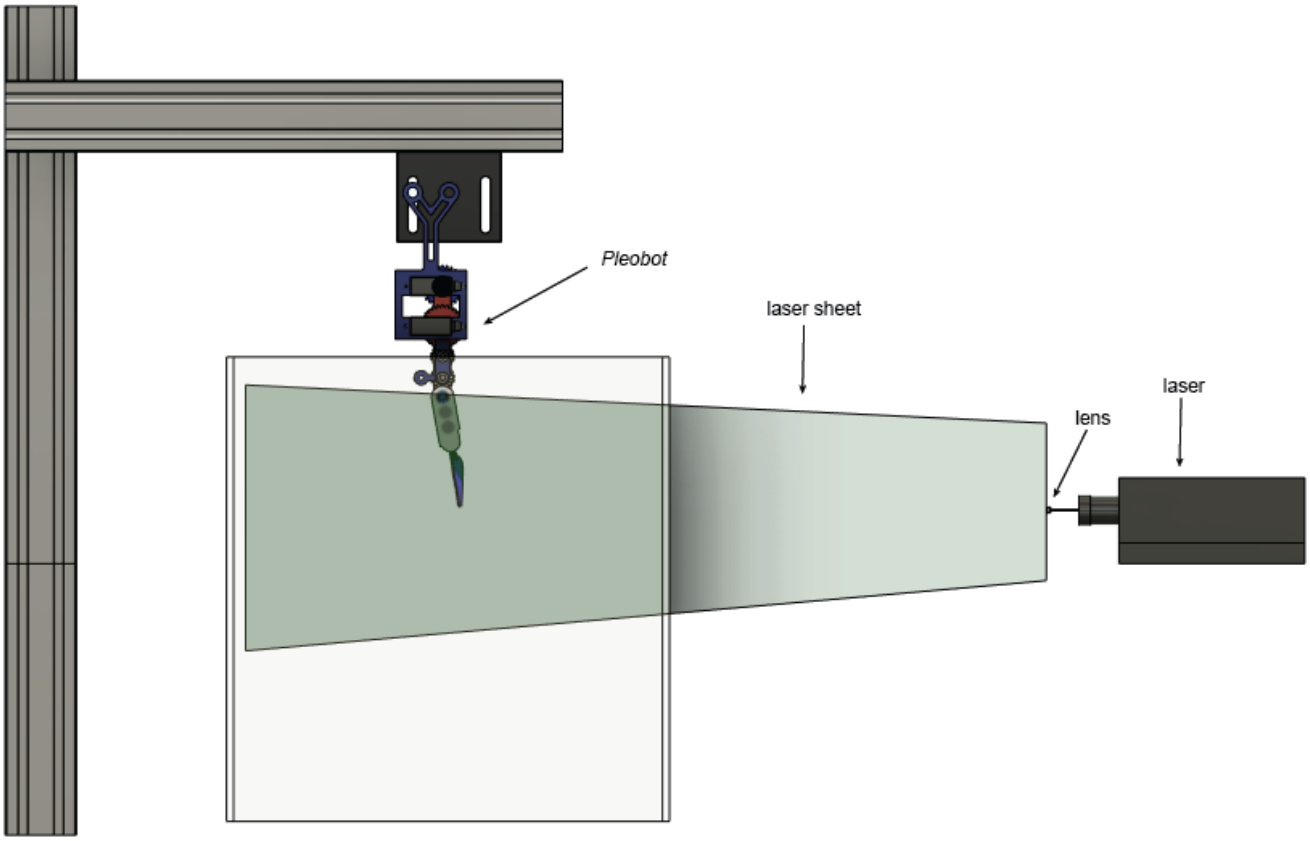
arXiv:2303.00805v1 [physics.flu-dyn] 1 Mar 2023



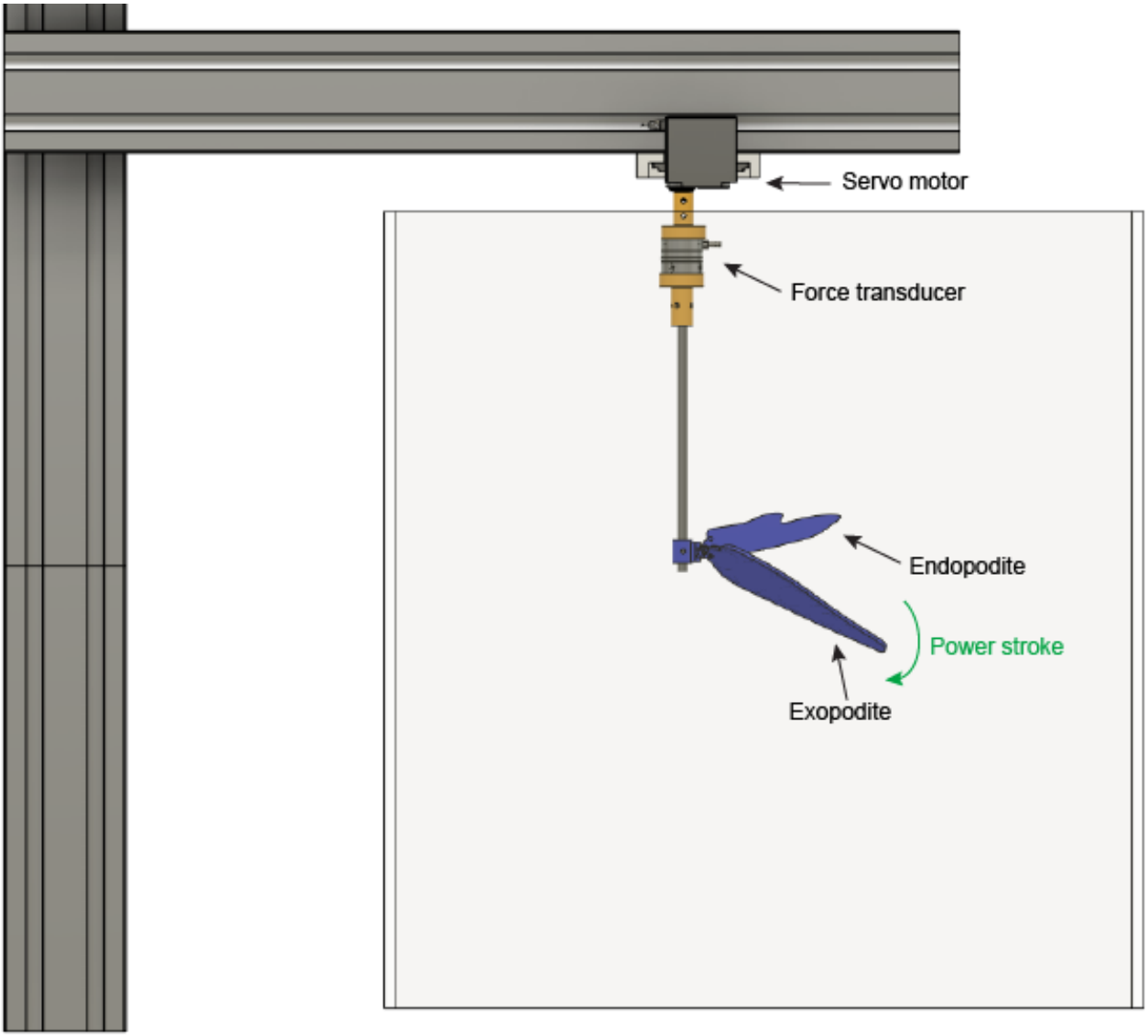
补充图1。行星齿轮副。输入转角为 ϕ 、连杆编号为k的齿轮副。我们得到主动齿轮和从动齿轮（分别为 $\Delta\phi_{k+1}$ 和 $\Delta\phi_{k-1}$）与连接二者的连杆 $\Delta\phi_k$之间的关系。图片改编自[7]



补充图2。Pleobot的运动系统。面板A展示了一个腹肢的全局参考系示意图，包含J_o 和I_o，以及角度 α_i（磷虾身体轴与近端附肢之间的夹角）、 β_i（磷虾近端节段与远端节段之间的夹角）、 $\theta_{1i} = 2\pi - \alpha_i$、$\theta_{2i} = \theta_{1i} - \delta_i = \pi + \beta_i - \alpha_i$和 $\delta_i = \pi - \beta_i$。面板B展示了腹肢的位置R^{pi}，其表示为$R^{pi} = R_{1i} + R_{2i}$，其中$R_{1i} = R(\theta_{1i})\, r_{1i}$，且$R_{2i} = R(\theta_{2i})\, r_{2i}$。这里，$r_{1i}$和$r_{2i}$表示局部参考系向量，$R(\theta_{1i})$和$R(\theta_{2i})$分别为原肢节和内肢的全局旋转矩阵。面板C展示了角度 Ψ，即齿轮沿连杆1（内肢）的转角，其中$\Delta\theta_{1i} = \theta_{1i} - \theta_{1i}$、0、 $\Delta\psi_{1i} = \psi_{1i} - \psi_{1i}$、0、$\Delta\psi_{2i} = \psi_{2i} - \psi_{2i}$、0、 $\Delta\psi_{3i} = \psi_{3i} - \psi_{3i}$、0、 $\Delta\psi_{4i} = \Delta\theta_{2i}$和$\Delta\theta_{2i} = \theta_{2i} - \theta_{2i}$、0。



补充图3. 使用二维粒子图像测速测量摆动附肢周围的流场。实验在边长为30厘米的立方水槽中进行，使用高速摄像机（FASTCAM MINI WX，Photron，2048像素 x 2048像素），拍摄速度为每秒125帧；同时使用尼康镜头（Nikon AF-S VR Micro-NIKKOR 50mm）和连续激光（Laserglow，532纳米时功率为1瓦），并通过柱面透镜形成激光片。流场中播撒了 10 μ米粒子（Dantec Dynamics，丹麦斯科夫伦讷）。



补充图4。用于力测量的实验装置。力测量采用远端附肢（内肢和外肢）的放大（20 倍）模型进行。该模型安装在一个六轴力传感器（Nano 17 F/T 力传感器，ATI）上，传感器设置于边长为 30 cm 的立方水槽中。运动学由角度 Ψ规定，其计算方式为 $\alpha + 180^{o} - \beta$。通过降低拍动频率并提高流体黏度，利用 Re（1500）对实验进行动态缩放。使用了甘油-水混合物（60% 甘油和 40% 水），其动力黏度为 9 cSt，采用标准流变仪（Ares-G2，TA Instruments）测得。该附肢被设计为在水-甘油混合物中呈中性浮力。