

The Aero-Aqua Ray: A Morphing Trans-medium Robot

具有可变刚度翼的水空跨介质机器人研究

黃熙鳴

北京大学工学院
hee@stu.pku.edu.cn

December 23, 2025

报告大纲

① 研究背景与动机

② 系统设计与材料

③ 建模与控制策略

④ 仿真结果分析

⑤ 结论与展望

跨介质运动的两难困境

- **环境介质差异:** 水的密度约是空气的800倍，动态粘度约为空气的55倍。
- **设计冲突:**
 - **水下环境:** 偏好中性浮力的柔性结构，通过操纵附加质量产生高效推力。
 - **空中环境:** 需要高长径比的刚性机翼，以最大化升阻比 (L/D) 并防止气动弹性颤振。
- **现有局限:** 传统硬耦合方案（如加装防水壳的无人机）在不同介质中存在严重的动力匹配失衡。

生物启发：蝠鲼与飞鱼的融合

- **蝠鲼模式(Mobuliform)**: 通过胸鳍拍打产生离散的高环量涡环，推进效率可达89%。
- **飞鱼模式(Gliding)**: 在突破水面瞬间将机翼锁定为刚性翼型，滑翔距离可超400米。
- **本研究**: 通过自适应变形弥合柔性水下运动与刚性空中滑翔之间的鸿沟。



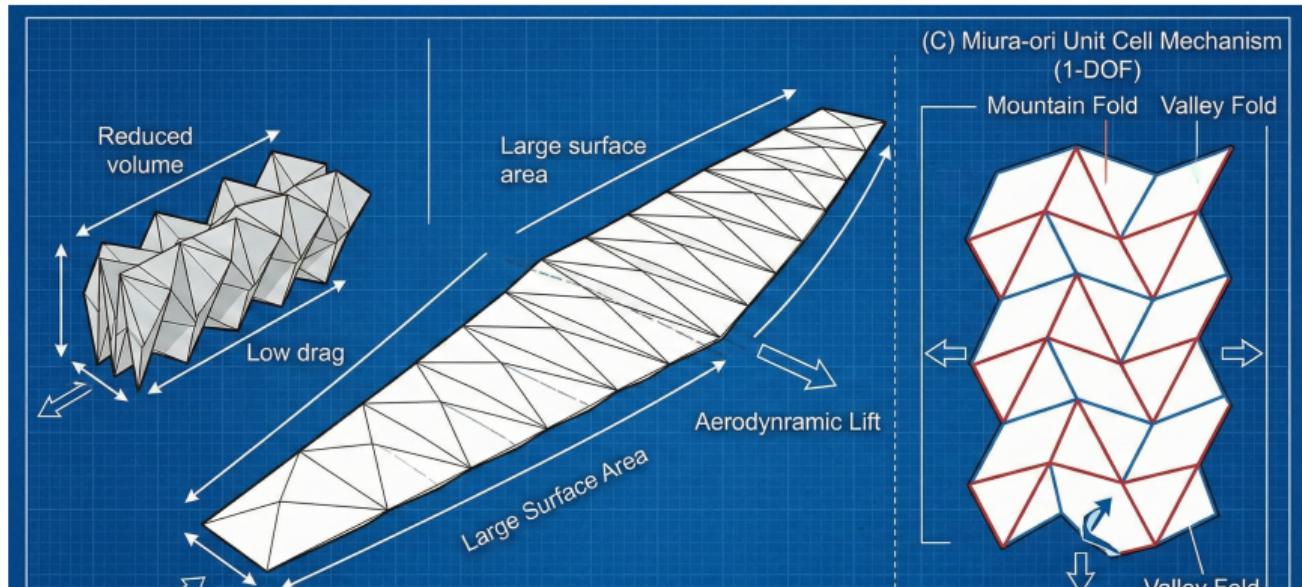
Figure: 蝙鲼



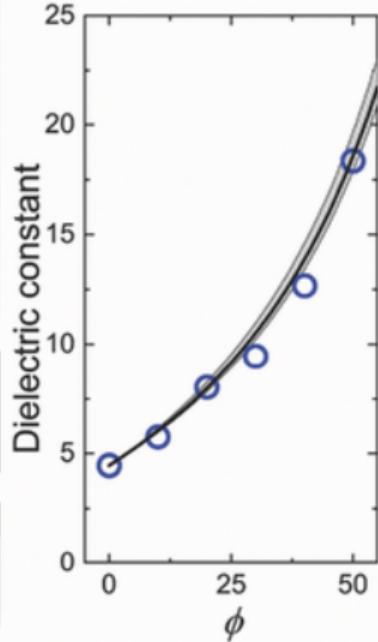
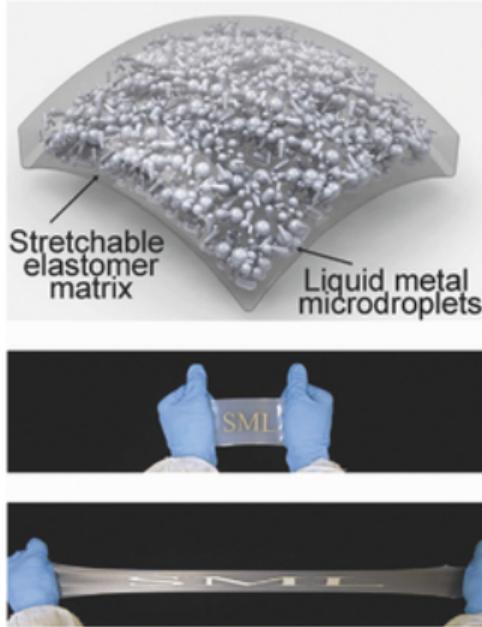
Figure: 飞鱼

形态结构：三浦折纸翼

- **运动学特性：**采用三浦折纸纹理（Miura-ori），具有单自由度（1-DOF）展收特性。
- **双态变换：**
 - **折叠态(水下)：**减小翼展和受风面积，降低转动惯量以支持高频拍动。
 - **展开态(空中)：**扩展至最大翼展，铰链锁定后充当刚性悬臂梁。
- **材料构成：**机翼骨架为激光切割的碳纤维板（CFRP），铰链处集成相变材料。



核心技术：液态金属嵌入弹性体(LMEE)



- **材料特性:** 在硅胶基底中嵌入Field's Metal 微滴（熔点 62°C ）。
- **刚度调节策略:**
 - **硬化:** 停止加热，利用水流对流冷却使液态金属固化，满足滑翔所需的结构强度。
 - **软化:** 通过焦耳加热使金属液化，机翼刚度降至硅胶量级，适应高效游泳。
- **化学锚定:** 利用硅烷偶联剂处理CFRP 表面，防止柔性铰链在高速运动中脱层。

- **水下相(LAEBT)**: 基于改进的Lighthill 长体理论。推力源于加速流体附加质量产生的反作用力 $f_{reactive}$ 。
- **空中相(UBET)**: 采用非定常叶素理论。空气附加质量可忽略，升力由环量理论主导。
- **跨介质冲击载荷**: 建立包含变量附加质量矩阵的模型，通过折叠机翼减少水面入水冲击力 F_{impact} 。

控制架构：分岔控制CPG

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \alpha(\mu - r_i^2)x_i - \omega_i y_i \\ \dot{y}_i &= \alpha(\mu - r_i^2)y_i + \omega_i x_i\end{aligned}$$

- **Hopf 振荡器网络：**采用状态方程控制执行器轨迹。
- 分岔参数 μ 的作用：
 - $\mu > 0$: 系统处于稳定极限环，驱动机翼进行节奏性游泳。
 - $\mu < 0$: 极限环消失，轨迹自然收敛至原点，机翼锁定在零偏转位置。
- **刚度反馈：**集成PD 控制器通过电流调节铰链刚度，实时应对扰动。

任务剖面与运动轨迹

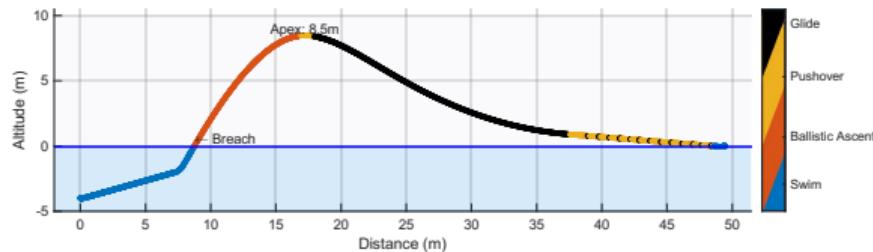
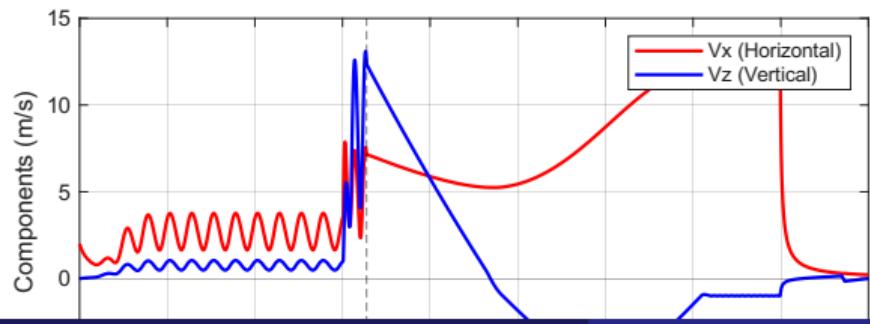
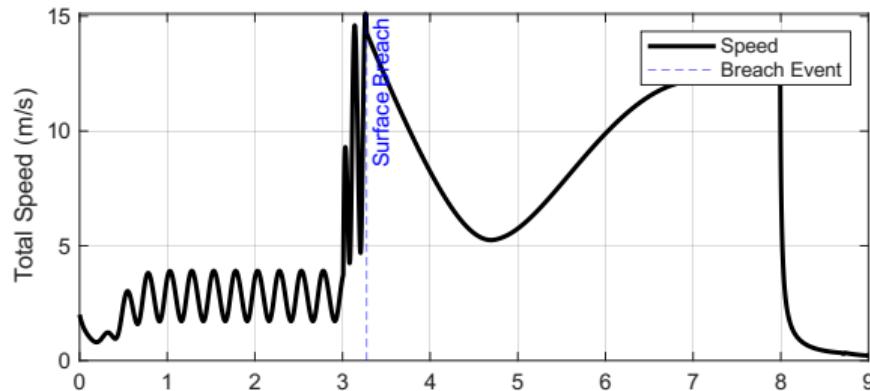


Figure: 多模式跨介质任务轨迹图

图示解析:

- 完整任务分为四个阶段：水下巡航、弹道上升、转弯平飞及刚性滑翔。
- **关键表现：**机器人实现了8.5 m 的轨迹顶点高度，为后续长距离滑翔提供了充足势能。

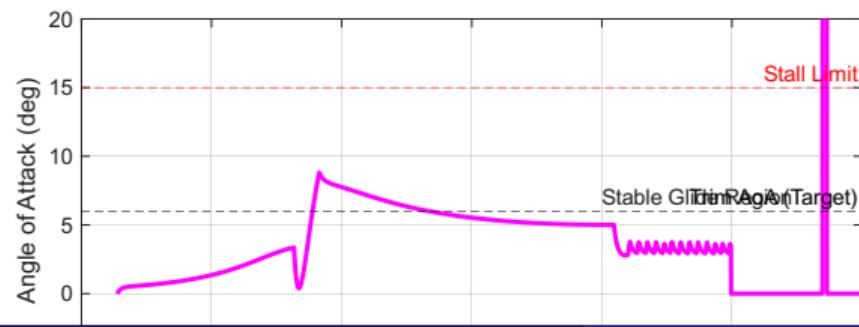
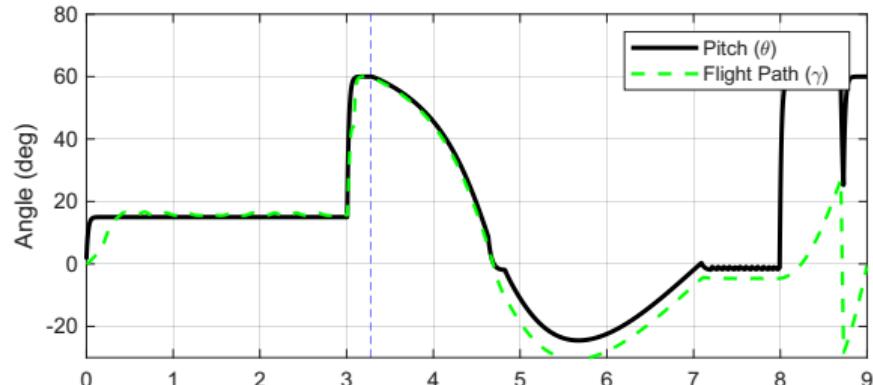
运动速度特性分析



图示解析:

- **突破瞬态:** 在跨越水面瞬间，受泵喷推力突发模式驱动，速度出现明显峰值。
- **速度演化:** 出水后总速度随重力和阻力衰减，最终稳定在平衡滑翔速度。
- **分量转换:** 在转弯平飞阶段，垂直动量被高效转化为水平巡航速度。

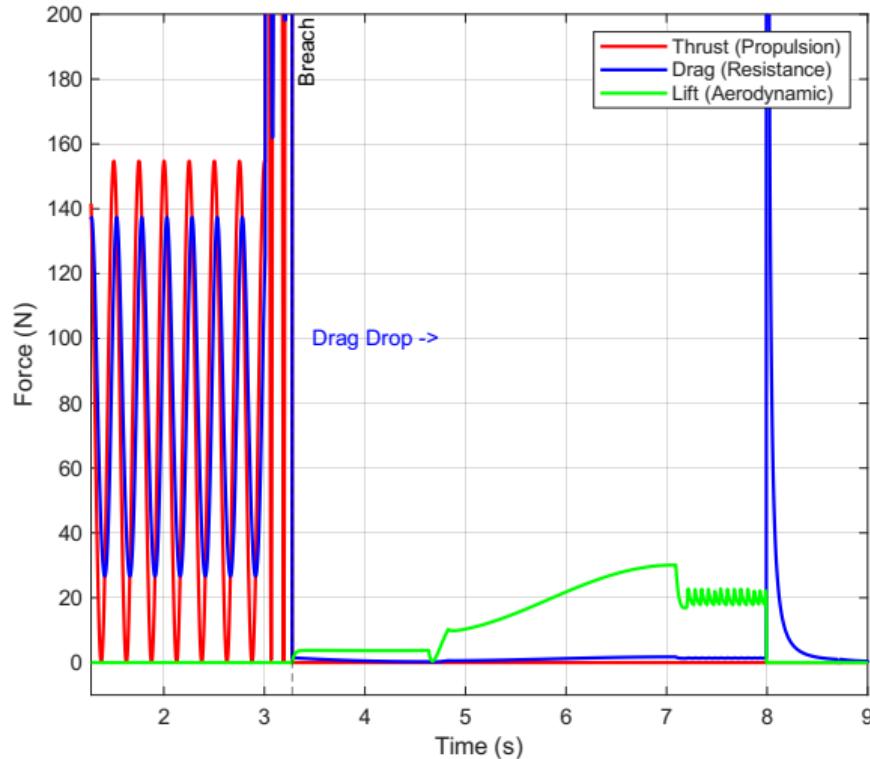
姿态稳定性验证



图示解析:

- **状态切换:** 俯仰角 (θ) 从水下振荡特征平稳过渡到空中的稳态配平条件。
- **安全保障:** 底部面板显示迎角 (AoA) 在转换后始终保持在15° 以下的稳定滑翔区，有效防止了气动失速。

力学平衡与环境切换



图示解析:

- **突破阶段:** 在 $t \approx 3.2$ s 处, 可见巨大的红色推力脉冲和相应的蓝色流体阻力峰值。
- **介质突变:** 出水瞬间, 由于流体密度骤减, 阻力 (蓝色) 急剧下降。
- **任务移交:** 空中阶段推力归零, 机器人完全依靠气动升力 (绿色) 维持飞行。

控制器有效性: CPG 相图

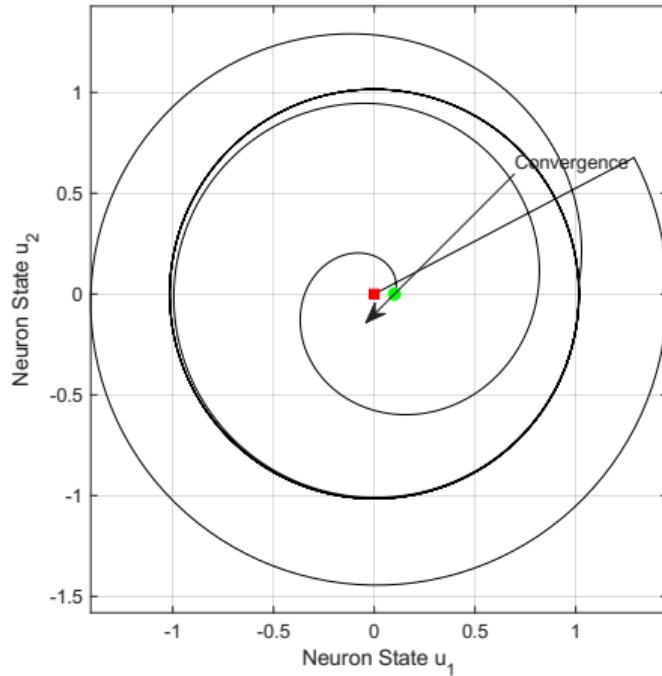


Figure: CPG 相空间轨迹

图示解析:

- **运动平滑性:** 系统从外层的大幅值稳定极限环（游泳状态）平稳收敛至原点处的固定点（滑翔状态）。
- **逻辑连续性:** 分岔控制避免了执行器指令在转换瞬间出现逻辑不连续或饱和风险，证明了控制架构的鲁棒性。

能效评估：运输代价

$$\text{COT} = \frac{E}{m \cdot d} = \frac{P}{m \cdot v}$$

- **效率优势：**得益于升力主导的滑翔模式而非强力悬停，空中COT 接近于零。
- **对比分析：**
 - 本系统仿真COT 约为 $15 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ 。
 - 传统多旋翼混合动力平台COT 常超过 $60 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ 。
- **总体收益：**尽管水下热维持会带来额外开销，但在标准探测任务中，总能耗预计比传统方案降低40%。

- **核心贡献:** 提出并通过仿真验证了一种基于可变刚度折纸翼的跨介质机器人方案。
- **主要结论:**
 - 物理属性的杂化（柔性+刚性）比单一推进系统的杂化更能有效解决阻抗匹配难题。
 - 分岔控制的CPG 能够成功管理水空界面复杂的非线性动态切换。
 - 系统在保持蝠鲼高效游泳的同时，具备了传统刚性翼的滑翔扩展能力。

- ① **一体化4D 打印:** 采用多材料4D 打印取代目前的组装工艺，消除碳纤维与铰链间的脱层隐患。
- ② **自修复柔性蒙皮:** 在硅胶基底中集成微胶囊自修复药剂，以应对复杂水域环境下的碰撞与穿刺。
- ③ **AI 驱动流场控制:** 利用深度强化学习（DRL）结合分布式应变感知，实现机翼局部刚度的实时动态调节，提升抗扰能力。

感谢各位的聆听！

Q & A