



新型仿鳐鱼水陆两栖机器人的结构设计、运动学建模与运动规划

王雪兵 吴庆祥 王奕轩 邬雅轩 孙宁

Structure design, kinematic modeling, and motion planning of novel ray-inspired amphibious robots

WANG Xuebing, WU Qingxiang, WANG Yixuan, WU Yaxuan, SUN Ning

引用本文:

王雪兵, 吴庆祥, 王奕轩, 邬雅轩, 孙宁. 新型仿鳐鱼水陆两栖机器人的结构设计、运动学建模与运动规划[J]. *北科大: 工程科学学报*, 2024, 46(9): 1594–1603. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.08.31.006

WANG Xuebing, WU Qingxiang, WANG Yixuan, WU Yaxuan, SUN Ning. Structure design, kinematic modeling, and motion planning of novel ray-inspired amphibious robots[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(9): 1594–1603. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.08.31.006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.08.31.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[刚柔耦合水下蛇形机器人的建模与控制仿真](#)

Modeling and control simulation of a bio-inspired underwater snake robot with a novel rigidsoft coupling structure
工程科学学报. 2023, 45(12): 2095 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.05.001>

[矿区废弃地移动机器人全覆盖路径规划](#)

Complete coverage path planning of mobile robot on abandoned mine land
工程科学学报. 2020, 42(9): 1220 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.09.004>

[具有状态约束与输入饱和的全向移动机器人自适应跟踪控制](#)

Adaptive tracking control for omnidirectional mobile robots with full-state constraints and input saturation
工程科学学报. 2019, 41(9): 1176 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.009>

[基于速度调节与路径跟踪的差动机器人运动控制](#)

Motion control of differential robot based on speed adjusting and path tracking
工程科学学报. 2023, 45(9): 1550 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.08.14.003>

[面向六关节机器人的位置域控制](#)

Position domain control technology for six-joint robots
工程科学学报. 2022, 44(2): 244 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.08.07.002>

[协作机器人智能控制与人机交互研究综述](#)

Review: Intelligent control and human-robot interaction for collaborative robots
工程科学学报. 2022, 44(4): 780 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.08.31.001>

新型仿鳐鱼水陆两栖机器人的结构设计、运动学建模与运动规划

王雪兵^{1,2)}, 吴庆祥^{1,2)}✉, 王奕轩^{1,2)}, 邬雅轩^{1,2)}, 孙 宁^{1,2)}

1) 南开大学人工智能学院机器人与自动信息系统研究所, 天津 300350 2) 南开大学深圳研究院智能技术与机器人系统研究院, 深圳 518083

✉通信作者, E-mail: wuqx@nankai.edu.cn

摘 要 跨介质作业机器人在灾害救援、环境探测、军事侦查等方面具有显著优势,但现有水陆两栖机器人依赖于两套或多套驱动系统,结构复杂、维护成本高,且额外的驱动系统切换将增加控制难度与作业时间.为此,本文设计了一种新型的行波驱动仿鳐鱼水陆两栖机器人(Wave-inspired actuated ray-inspired amphibious robot, WARAR).首先,设计了一种具有高越障能力的行波驱动机构.基于此,设计了一种仿鳐鱼柔性鳍,将行波机构驱动力转换为水中游动的推进力,从而实现单一驱动系统同时满足陆地和水中运动的双重目标.随后,建立了 WARAR 的运动学模型,并提出了一种跨水陆介质轨迹规划方法.最后,自主搭建了 WARAR 的实验平台,并对所设计机器人的移动、爬坡、转向、游动等性能进行了充分测试.此外,验证了所设计跨水陆介质作业轨迹规划方法的有效性.

关键词 仿鳐鱼机器人;水陆两栖机器人;行波驱动机构;仿鳐鱼柔性鳍;轨迹规划

分类号 TG142.71

Structure design, kinematic modeling, and motion planning of novel ray-inspired amphibious robots

WANG Xuebing^{1,2)}, WU Qingxiang^{1,2)}✉, WANG Yixuan^{1,2)}, WU Yaxuan^{1,2)}, SUN Ning^{1,2)}

1) Institute of Robotics and Automatic Information Systems (IRAIS), College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China

2) Institute of Intelligence Technology and Robotic Systems, Shenzhen Research Institute, Nankai University, Shenzhen 518083, China

✉Corresponding author, E-mail: wuqx@nankai.edu.cn

ABSTRACT Cross-media operating robots are versatile machines that can move and perform tasks in various environments such as air, water, and land. These robots are highly adaptable and flexible, making them useful in a wide range of applications, including exploration, marine research, environmental monitoring, military reconnaissance, industrial and infrastructure maintenance, and emergency response. Cross-media operating robots need to switch corresponding movement modes in different environments, such as using buoys or propellers in water and wheels or legs on land. However, existing amphibious robots often have complex structures and high maintenance costs because they rely on multiple sets of actuated systems, which leads to increased difficulty in control and longer operating times. To address these challenges, this study presents a novel wave-inspired actuated ray-inspired amphibious robot (WARAR). The WARAR design includes a wave-inspired actuated mechanism that transforms motor rotation into sinusoidal waves by passing a spiral rod through movable hinges arranged side by side, resulting in better mobility and obstacle-crossing capability. Two of these mechanisms are arranged side by side, enabling WARARs to adopt the differential principle for steering control. Based on this

收稿日期: 2023–08–31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52205019, 62373198);天津市杰出青年科学基金资助项目(22JCJQC00140);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515012669);中国博士后科学基金面上资助项目(2021M701779)

principle, a flexible ray-inspired fin is designed to transform the actuated force of the wave-inspired mechanisms into a propulsion force for swimming in the water by connecting the supporting bone to one end of the movable hinge and covering it with flexible silicone rubber. Moreover, by utilizing the two structures, a new type of WARAR that only requires control of the wave-inspired mechanism for operation on land, in water, and during transitions between the two is designed. Furthermore, a suitable electronic control room is designed to make the electronic control system of WARAR waterproof that can also be sealed to provide buoyancy. Specifically, WARARs are mainly fabricated through three-dimensional printing, which effectively reduces weight. The simple actuated system structure and lightweight overall machine are the keys to the high flexibility of WARARs. Moreover, the kinematic models of WARARs are established, and the swimming mode hydrodynamic characteristics of WARARs are analyzed using simulation methods. Given the complex operating environments of water and land media, a trajectory planning method is proposed using the A* planning method that considers safe areas. Finally, an experimental platform is constructed with land and water environments to test the performance of WARARs during moving, climbing, turning, and swimming. The effectiveness of the proposed trajectory planning methods for crossing water and land media is verified. Overall, the development of WARARs provides a more efficient and cost-effective solution for cross-media operating robots with applications in various fields.

KEY WORDS ray-inspired robots; amphibious robots; wave-inspired actuated mechanisms; ray-inspired flexible fins; trajectory planning

近年来,水陆两栖机器人展现出巨大的应用前景^[1-2],不仅广泛应用于海洋生态监测、水下考古勘探等领域,还在自然灾害救援、海岸巡查等任务中发挥着重要作用^[3]。然而,现有水陆两栖机器人多依赖两套或多套驱动系统来实现跨介质作业,在结构与控制方面面临诸多挑战^[4]。因此,针对水陆两栖作业需求,开展水陆两栖机器人的结构设计、运动学建模与路径规划等问题的研究具有重要的实际意义^[5-6]。

水陆两栖机器人的发展离不开陆地和水域作业机器人技术的进步。针对陆地和水域作业机器人,国内外学者开展了一些创新性的工作。具体来说,陆地移动机器人根据移动方式的不同可以分为足式、轮式、履带和复合式等^[7-10]。在足式水陆两栖机器人的结构设计中,爪和腿作为机器人与环境交互的重要部分,其研究备受关注^[11]。例如,在水下环境中,机器人的爪部设计需要考虑水动力学性能,以确保机器人能够在水中稳定移动和抓握物体。同时,在陆地环境中,腿部的设计则需要具备足够的灵活性和稳定性,以适应不同地形的变化,实现高效的步态运动^[12-13]。因此,针对爪和腿的形式设计,需要综合考虑机械结构、材料特性以及运动控制策略,从而使水陆两栖机器人能够在不同工作模式下均能表现出良好的性能^[14-15]。

除了基于爪和腿机器人,还有一类轮式两栖机器人,可以在特定场景下展现出独特的优势^[16]。轮式两栖机器人通过结合轮子和浮力装置,实现在水陆两种介质中的平稳移动。在水中,轮子可以作为推进器,提供必要的推进力,而在陆地上,轮

子则能够使机器人迅速穿越复杂地形。此类结构设计简单且易于控制,适用于一些需要快速切换水陆环境的应用场景,如紧急救援和海岸巡查。同样地,轮式两栖机器人的运动学建模和路径规划仍需深入研究,以确保其在水陆转换过程中的稳定性和精准性^[17]。

此外,近年来,部分学者开展了关于行波驱动机器人的研究^[18]。例如,通过增加串联关节驱动机构,实现了一定角度的转向和攀爬^[19];通过增加滚轮运动机构和浮力装置,实现了转向和水陆两栖运动^[20-21]。

根据上述描述可知,现有水陆两栖机器人多采用切换结构的方式来实现跨介质作业,但是这种方式结构复杂,在防水以及结构维护方面仍然存在诸多挑战。此外,额外的运动结构切换将增加额外的控制结构,使得其控制研究愈加困难。针对上述问题,本文提出了一种基于行波驱动机构的仿鳐鱼水陆两栖机器人(Wave-inspired actuated ray-inspired amphibious robot,简称 WARAR),采用行波机构一侧固定仿生鳍的方式,基于单驱动机构实现跨介质运行。在此基础上,利用数值仿真,分析了 WARARs 在水中的运动性能。随后,基于 A* 算法,提出考虑安全区域的路径规划算法,实现复杂障碍物水陆环境下的自主规划,并利用 minimum snap 方法设计了平滑的运动轨迹。

本文具体贡献概述如下:

1) 设计了一种行波驱动机构,通过螺旋杆穿过并排布置活动铰链的方式将电机转动转换为正弦波动,在保障移动能力的同时,实现越障能力的

提升; 基于此, 设计了一种柔性仿鳐鱼鳍结构, 通过将支撑骨与活动铰链的一端连接并覆盖柔性硅橡胶的方式, 将行波驱动力转换为水中的推进力。

2) 基于上述结构, 设计了一种新型的 WARARs, 实现无需驱动系统切换的跨水陆介质作业, 结构简单、易于控制、作业效率高。同时, 建立了 WARARs 的运动学模型, 并提出了一种跨介质作业轨迹规划方法。

3) 自主搭建 WARARs 实验样机, 验证了其移动、转向、爬坡和游动等运动性能, 并对所提轨迹规划方法在陆地和水域环境中的有效性进行了验证。

1 结构设计与运动学建模

1.1 结构设计

根据空间几何原理可知, 刚性驱动杆的一端连接柔性绳并进行驱动, 柔性绳将在离心力的作用下做螺旋运动, 如图 1(a) 所示。此外, 由坦克链条(活动铰链)驱动原理可知, 多个刚性杆并联连接可以在保持轴向刚性的同时, 在纵向具有一定的柔性, 如图 1(b) 所示。基于上述分析, 将两条活动铰链并联, 利用螺旋杆穿过两条活动铰链连接间隙, 可得如图 1(c) 所示行波驱动机构, 其中, L 表示螺旋杆波长, A 表示螺旋线幅值, $2r$ 表示关节扣高度。具体来说, 如图 1(c) 所示, 设计螺旋轴头部与电机轴/无电机空轴通过一个万向节(主动/被动轴头)使之能平行排列, 电机带动螺旋轴水平旋转, 螺旋杆的一端通过主动轴头与驱动电机连接, 另一端通过被动轴头与外部壳体连接。在运动过程中, 电机驱动螺旋杆转动, 通过活动铰链(图 1(d)) 将螺旋运动转换为上下的波动, 从而驱动 WARARs

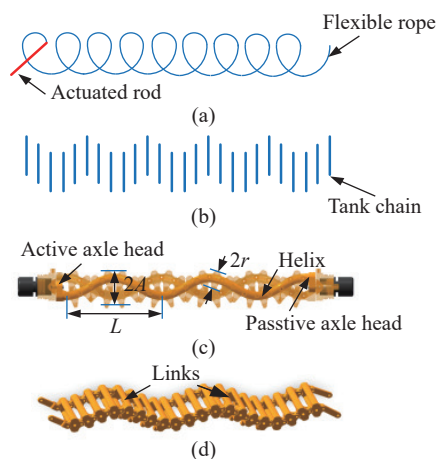


图 1 行波机构驱动原理与结构

Fig.1 Actuated principle and structure of the wave-like mechanisms

前进或者后退。

进一步, 为实现机器人在水中的运动, 基于仿鳐鱼的驱动原理, 设计了一种新型的仿鳐鱼柔性鳍。具体来说, 如图 2 所示, 在活动铰链的一端安装多根支撑骨, 并在支撑骨的两侧粘附柔性硅橡胶。当螺旋杆驱动活动铰链运动时, 支撑骨与活动铰链同步运动, 从而带动柔性仿生鳍产生波动。当 WARARs 前进或后退时, 仿生鳍与水流相互作用, 产生所需的推动力。这种驱动系统无需复杂的切换/变形机构, 可以实现 WARARs 在水陆两种介质中的作业, 控制难度低, 并且可以避免由于体积和结构冗余等原因导致推进速度和效率不理想的问题。此外, 根据差速原理, 通过两行波机构关联布置方式可以实现 WARARs 的转向控制。

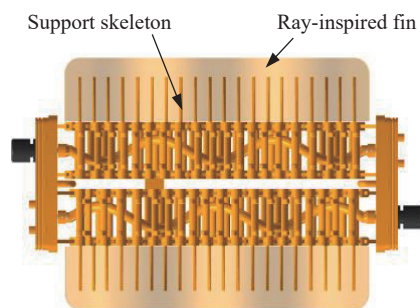


图 2 仿生鳍水域驱动机构

Fig.2 Actuated mechanism of the bionic fin in the water area

根据上述描述, 新型 WARARs 的整体结构如图 3 所示, 包括螺旋杆、活动铰链、仿生鳍、电机室、支撑板、电控室等部分组成。具体来说, 两根螺旋杆并排布置, 并将两端固定在电机室内, 每个电机室中安装有一台电机, 用于驱动螺旋杆运动。每根螺旋杆上配置有一条活动铰链, 其中一侧的活动铰链固定有支撑骨用于布置仿生鳍。此外, 通过支撑板将两电机室连接在一起, 电控室固定在支撑板上, 用于安装控制、通信和驱动等电控模块。

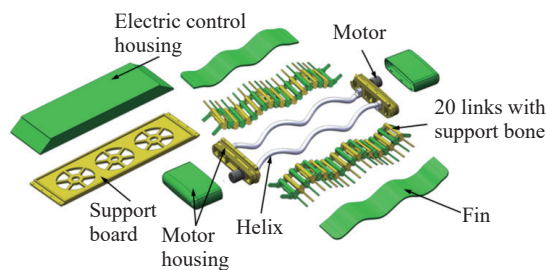


图 3 WARARs 整体结构图

Fig.3 Overall structure of WARARs

根据上述设计结构, 搭建 WARARs 实验平台, 如图 4 所示。其中, 实验平台空载总质量约为 350 g,

长宽分别为 302.5 mm 和 151.0 mm. 此外, 仿生鳍的长宽分别为 195.5 mm 和 38.0 mm. 在结构件加工过程中, 螺旋杆使用密度较小、硬度较高的铝合金制作, 为机器人提供强扭矩输出. 仿生鳍采用柔软、有弹性的硅橡胶制作, 在随支撑骨波动的同时, 具有一定的柔顺性, 模拟鳐鱼鳍与水流作用机理, 为机器人提供游动推力; 其他结构件采用 3D 打印的方式制作, 材料选用密度为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$ 的高性能树脂, 兼具高硬度和良好的防水性能.

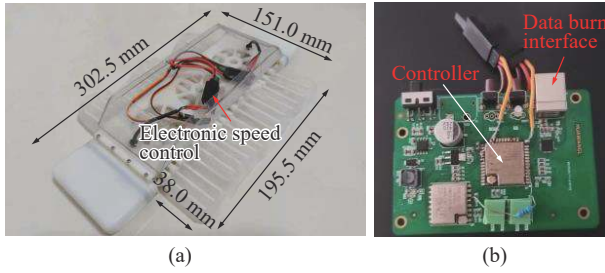


图 4 自建 WARARs 实验平台

Fig.4 Self-established experimental platform for WARARs

此外, WARARs 电控系统, 如图 4(b) 所示, 包括控制器、驱动电机、供电电源等, 其中, 驱动电机采用无刷直流电机, 减速比为 1:63, 空载最大转速为 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 供电电压为 7.4 V. 控制器采用 ESP32 模块, 程序烧录后安装于电控室内. 同时, 为实现 WARARs 的漂浮控制, 所需的浮力计算公式如下:

$$F_{\text{浮}} = mg = G_{\text{排}} = \rho_{\text{液}} V_{\text{排}} g \quad (1)$$

式中, $F_{\text{浮}}$ 表示 WARAR 在水中的浮力, m 为 WARAR 质量, g 为重力加速度, $G_{\text{排}}$ 为 WARAR 排水重力, $\rho_{\text{液}}$ 为水的密度, $V_{\text{排}}$ 为 WARAR 排水体积.

基于式 (1), 考虑 WARARs 整体质量为 388 g, 可得电控制容积为 390 cm^3 .

1.2 运动学建模

针对单行波驱动机构, 建立活动关节扣接触点处线速度 v_{link} 关于电机驱动频率 f 求解方程为^[18]

$$v_{\text{link}} = (2\pi)^2 \frac{Arf}{L} \quad (2)$$

进一步, 如图 5 所示, 定义 WARARs 所处环境为大地坐标系, v_R, v_L 分别为右侧和左侧行波驱动机构的线速度, v 是 WARARs 质心的线速度, R 为旋转半径, α 是旋转角度, s 表示 WARARs 左、右两行波驱动机构线速度中心的垂直距离. 根据几何位置关系, 由线速度与运动时间 t 相乘得到对应旋转路径, 再由旋转路径与旋转半径可得旋转角度为

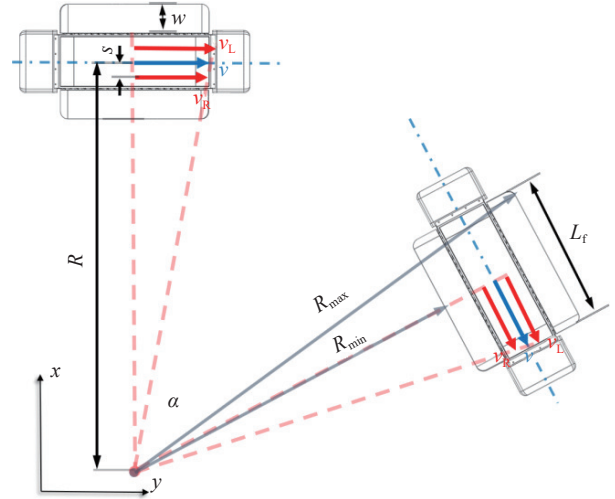


图 5 WARARs 运动学模型

Fig.5 Kinematic model of WARARs

$$\alpha = \frac{v_R t}{R-s} = \frac{v_L t}{R+s} = \frac{v t}{R} \quad (3)$$

随后, 对 α 求导, 可得其角速度 ω 为

$$\omega = \dot{\alpha} = \frac{v_R}{R-s} = \frac{v_L}{R+s} = \frac{v}{R} \quad (4)$$

进一步, 根据式 (4) 可得

$$\omega = \frac{v_L - v_R}{2s} \quad (5)$$

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} \quad (6)$$

进而, WARARs 的状态方程 $\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\alpha}]^T$ 可以表示为^[22]

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 1/s \\ \cos \alpha & \sin \alpha & -1/s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (7)$$

此外, 如图 5 所示, w 为仿生鳍宽度, L_f 为仿生鳍长度. 根据鳐鱼水陆两栖机器人的结构特点和运动学约束可知, 鳐鱼水陆两栖机器人运动边缘最大外径为 R_{max} , 最小内径为 R_{min} , 可得特定局限场景下的约束方程为

$$R_{\text{min}} = R - 2s - w \quad (8)$$

$$R_{\text{max}} = \sqrt{(R + 2s + w)^2 + \left(\frac{L_f}{2}\right)^2} \quad (9)$$

2 WARARs 游动模态分析

WARARs 利用仿生鳍与水之间的相互作用力为其提供动力. 考虑到实验环境难以直接分析 WARARs 实验平台的水动力学特性, 本小节将使用 SolidWorks 软件通过流体瞬态仿真模拟实际的水流环境, 以分析 WARARs 的游动模态水动力学特性^[23].

根据实际应用环境的情况可知, WARARs 的水动力学特性主要与仿生鳍的水上高度和水下深度有关. 因此, 在仿真环境中, 首先建立模拟真实环境的基本仿真计算域, 如图 6 所示. 其中, 流体环境深度为 60 cm, 仿生鳍最高点距离水面为 2 mm. 假设水流速度为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 并给定鳐鱼水陆两栖机器人相反的速度以保持其悬停在原地, 即水流速度和机器人速度相对为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. 根据雷诺公式 $Re = \rho v d / \mu$ 和 $F = \rho_{\text{液}} \theta^2 A C / 2$, 选择 WARARs 向前游动的阻力作为全局目标, 可得到阻力系数 C . 其中, Re 为雷诺数, 选择 2903, $\rho_{\text{液}}$ 、 θ 、 μ 分别表示水的密度、速度、黏性系数, d 表示仿生鳍的特征长度, F 为所受阻力, A 为垂直方向截面面积, C 为阻力系数.

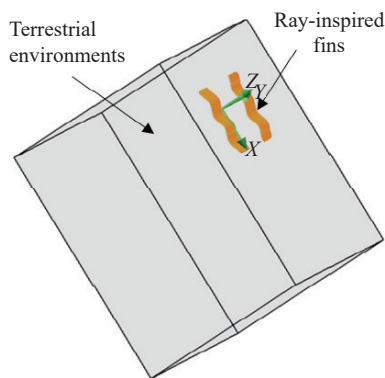


图 6 WARARs 计算域仿真环境

Fig.6 Simulation environment of the computing domain for WARARs

图 7 展示了仿真 60 s 时的 WARARs 流速的不同俯视图切面. 其中, 经过 WARARs 波动中心线处

的横切面高度被定义为初始位置. 向上为正高度, 向下为负高度, 即上方切面分别为 7.5、5.0 和 2.5 mm, 下方切面分别选择为 -2.5、-5.0 和 -7.5 mm. 由图 7 分析可知, 仿生鳍上方和下方的水流相对速度较大. 当离中心横切面较近时, 仿生鳍上下表面的水流相对速度明显降低, 两侧的相对流速最快.

进一步, 图 8 展示了仿真 60 s 时 WARARs 流速的侧视图切面, 包括前端低、后端高和前端高、后端低两种状态. 由图 8 分析可知, 仿生鳍中心处的流速最低, 由中心向上和向下时的相对流速逐渐递增. 进一步分析可知, WARARs 的整体流速呈流线型, 相对均匀, 这将有利于机器人在水域环境中的稳定控制.

此外, 图 9 展示了仿生鳍两种状态下的纵向切面动压和相对压力分布图. 在仿生鳍相对于流体运动时, 表面流体完全受阻, 动能转化为压力能, 即当仿生鳍以 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度在静止的水域中游动时, 由于谐波运动, 仿生鳍产生的动能由中心向外减小的过程呈规律性变化, 证明机器人在水中的运动是较为平稳而非混乱的. 根据沿 x 轴方向仿生鳍表面的仿真结果分析可知, 仿生鳍在水中波动时将产生驱动 WARARs 的作用力.

图 10(a) 显示了阻力随时间变化的仿真结果, 图 10(b) 显示了阻力系数随时间变化的仿真结果. 由图 10 所示仿真结果分析可知, WARARs 在 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速中保证悬停时, 在初始阶段所受阻力较大, 短暂超调后, 阻力明显降低, 并逐渐稳定在 $2.013 \times 10^{-4} \text{ N}$, 对应的相应阻力系数为 174.27.

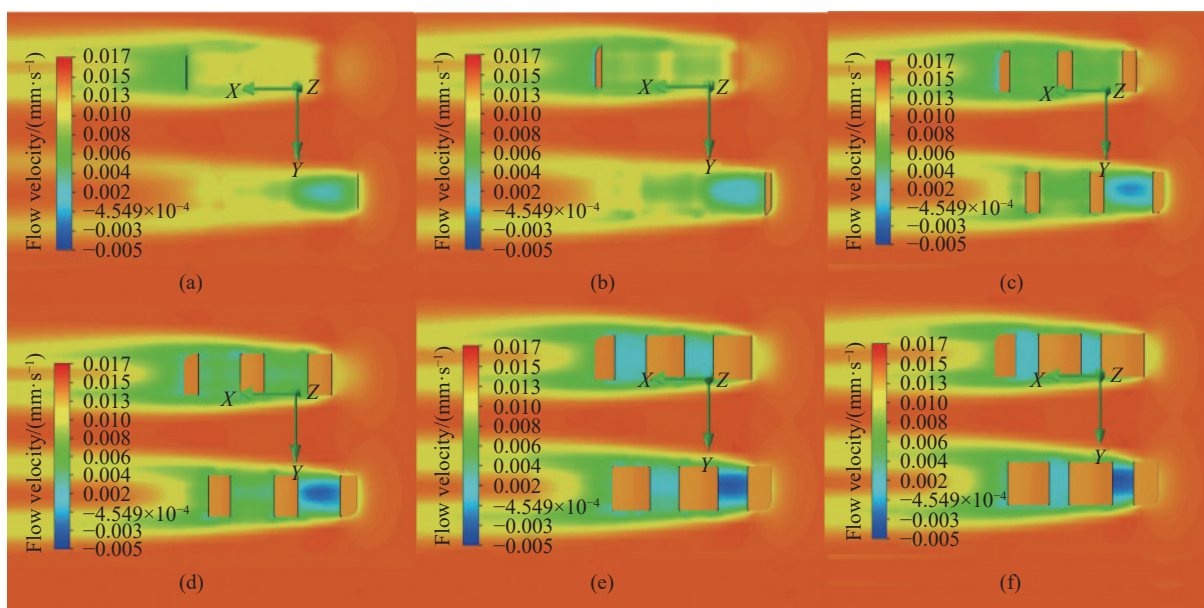


图 7 不同俯视图切面高度湍流动能分布. (a) 7.5 mm; (b) 5 mm; (c) 2.5 mm; (d) 2.5 mm; (e) -5 mm; (f) -7.5 mm

Fig.7 Turbulent kinetic energy distribution in different top view sections: (a) 7.5 mm; (b) 5 mm; (c) 2.5 mm; (d) -2.5 mm; (e) -5 mm; (f) -7.5 mm

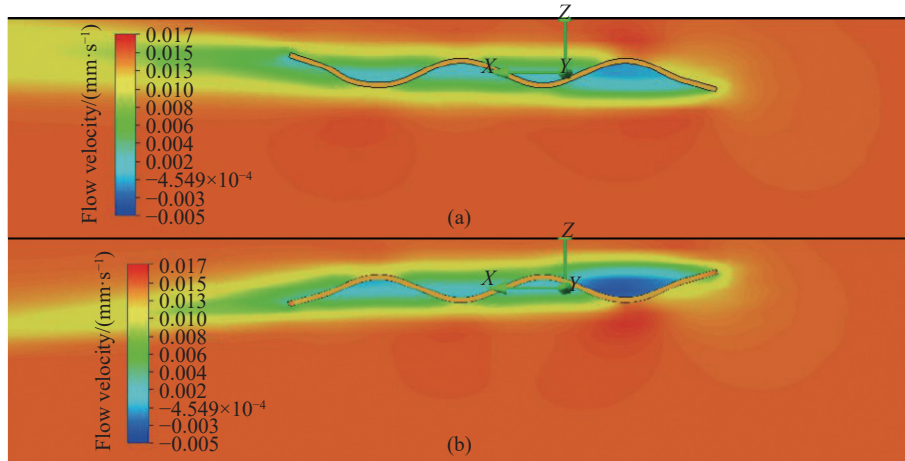


图8 湍流动能分布的纵切面。(a) 仿生鳍前端低后端高; (b) 仿生鳍前端高后端低

Fig.8 Longitudinal section of turbulent kinetic energy distribution: (a) bionic fins with a low front end and a high rear end; (b) bionic fins with a high front end and a low rear end

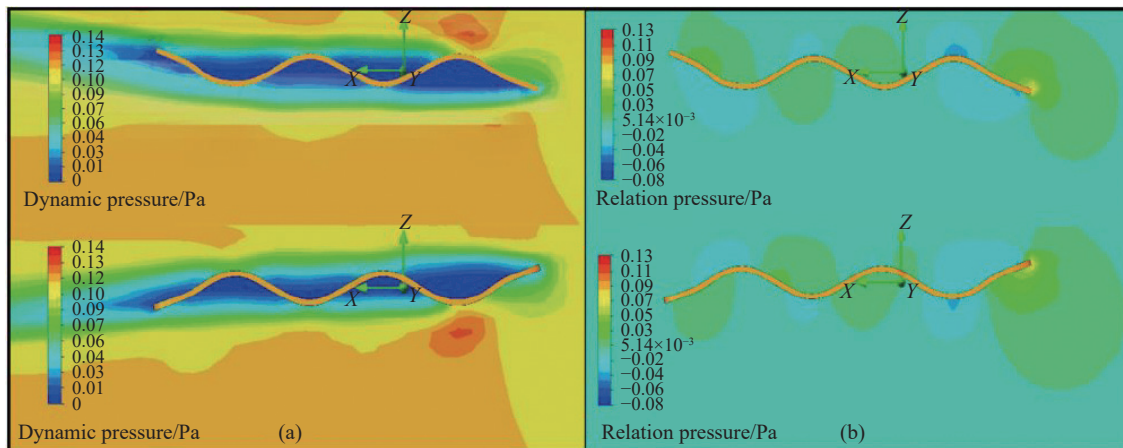


图9 仿生鳍前端低、后端高和前端高、后端低时的压力分布纵切面。(a) 动压分布图; (b) 相对压力分布图

Fig.9 Longitudinal section of pressure distribution when the bionic fin is at the low front end and high rear end and high front end and low rear end: (a) dynamic pressure distribution; (b) relative pressure distribution

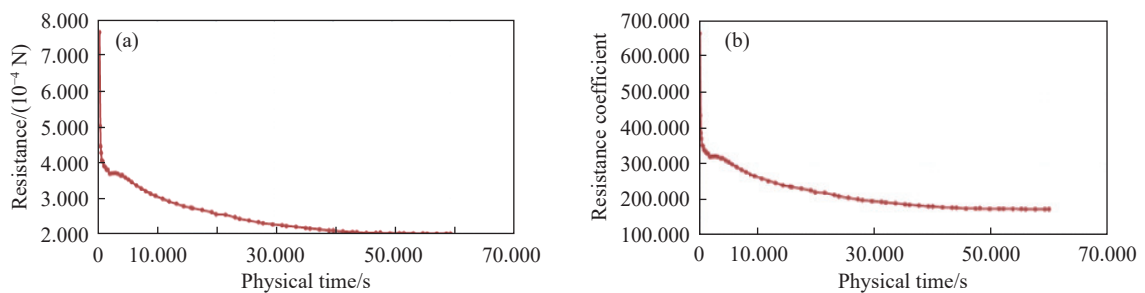


图10 仿真结果。(a) 阻力; (b) 阻力系数

Fig.10 Simulation results: (a) resistance; (b) resistance coefficient

值得一提的是,分析瞬态仿真过程是理想状态下的仿真. 仿生鳍状态取瞬间状态采样, 与水流相对差速为 $15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 然而在实际的静止水域环境中, 机器人仿生鳍连续呈周期性正弦波动时, 机器人与周围液体相互作用引起的水动力就会对机器人本身的运动产生影响, 同时也对水下理想环境造成影响. 但由于新型 WARARs 的体积小巧、

结构均匀且对称, 仿生鳍呈规律谐波运动, 因此运动规律能够保持基本稳定性.

3 WARARs 运动规划

3.1 考虑安全区域的 A* 路径规划

本小节将提出一种考虑 WARARs 安全区域的 A* 路径规划方法. 首先, 构建改进的栅格化全局

地图模型, 如图 11 所示. 其中, 白色方格表示起始点或目标点, 蓝色方格表示水域环境, 绿色方格表示陆地环境, 黑色方格表示障碍物.

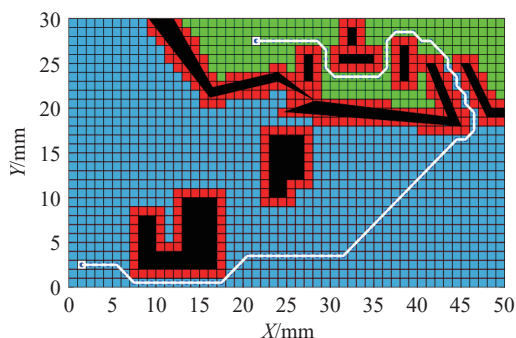


图 11 考虑安全区域的 A*规划路径

Fig.11 Path of A* planning considering safe areas

每个方格中心都是“节点”, 在整个搜索过程中, 以启发式路径最短为目标, 设计代价函数, 约束搜索范围, 得到最优解, 并依次将节点分别放入“开放列表”或者“封闭列表”. 不断从出发节点(父节点)向上下左右以及斜线方向的节点(子节点)扩展, 并将相邻方格节点放入作为优先级队列的开放列表中进行等待. 考虑父节点的距离作为移动代价 $g(n)$, 目标节点搜索估算的距离作为成本代价 $h(n)$, 可得传统 A*算法^[24]的代价函数 $f(n)$ 为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (10)$$

随后, 不考虑障碍物所在方格节点的代价函数, 将最优节点作为路径点放入封闭列表, 并继续以此节点作为父节点进行搜索. 通过反复迭代, 可得最小距离路径. 但由于实际障碍物具有不规则的棱角, 而机器人作为质点往往会忽略体积和运动的抖振及偏离误差, 进而引起碰撞. 为此, 本小节为障碍物添加了安全区域, 如图 11 中红色区域所示, 其中红色区域为相邻黑色方格节点距离覆盖区域. 根据图 11 所示结果可知, 在水域障碍物较少的情况下, 增加的红色区域未对 WARARs 路径产生影响; 在陆地障碍物较多的情况下, 可有效保证机器人的安全和路线控制精度.

3.2 基于 minimum snap 的轨迹规划

由 A*搜索得出的最短路径满足了距离约束, 但仅仅是一条规划出的折线段路线, 并不能直接用于机器人的追踪控制. 为此, 本小节提出基于 minimum snap^[25]的轨迹规划方法, 在约束速度和加速度的同时, 实现机器人的平滑移动. 具体介绍如下.

对于 A*算法求取的路径点 n 个, 共 $n-1$ 条折

线路段, 每条路段基于时间节点 T 按照匀速或者梯形方法分配好的时间 t 表示为包含参数 $p_{n-1,i}$ 的如下多项式:

$$f_{n-1}(t) = p_{n-1,1}t^1 + p_{n-1,2}t^2 + p_{n-1,3}t^3 + p_{n-1,4}t^4 + p_{n-1,5}t^5 + p_{n-1,6}t^6 + p_{n-1,7}t^7, T_{n-2} < t < T_{n-1} \quad (11)$$

求第 $n-1$, ($n \geq 2$) 段最优 $\text{snap}_{n-1}(t)$ 可以表示为

$$\text{snap}_{n-1}(t) = f_{n-1}^{(4)}(t) = 24p_{n-1,4} + 120p_{n-1,5}t^2 + 360p_{n-1,6}t^3 + 840p_{n-1,7}t^4, T_{n-2} < t < T_{n-1} \quad (12)$$

为使得 $\text{snap}_{n-1}(t)$ 的 2-范数最小, 定义目标函数如下:

$$J_{n-1}(t) = \int_{T-2}^{T-1} (f_{n-1}^{(4)}(t))^2 dt \quad (13)$$

随后, 为使得每段轨迹的连续点处位置、速度、加速度、加加速度相等, 设计约束条件如下:

$$f_{n-1}^{(k)}(t) = f_{n-2}^{(k)}(t), n \geq 2, k = 1, 2, 3, 4. \quad (14)$$

将 A*算法求得的最短路径点使用 minimum snap 算法进行优化, 得如图 12(a) 所示平滑连续的优化轨迹图. 结合电机性能指标以及机器人在水中或陆地最大直行速度, 设定仿真路线总长度为 11.04 m, 运行时间为 30 s. 由图 12(b) 所示可知, 速度和加速度平滑连续, 且皆在合理范围内.

4 实验验证与分析

首先, 我们对所提设计机器人的运动性能进行了验证, 主要包括:

- 以不同速度移动相同距离;
- 单侧行波驱动机构速度的改变;
- 不同爬坡高度的测试;
- 以不同速度在水面上移动.

图 13(a) 展示了相同移动距离为 80 cm 时不同运动速度情况下的 WARARs 的运动轨迹, 定义 Y 轴范围 0.4 m, 方便分析机器人直行偏移情况. 其中, 蓝线、绿线和红线分别表示 WARARs 运动时间分别为 $t_3=16$ s、 $t_2=11$ s 和 $t_1=9$ s 情况下的运动轨迹. 具体来说, 当运动时间为 16 s 时, WARARs 的侧向移动偏差约为 4 cm. 随着运动时间的减少, 11 s 时偏差为 -2 cm 到 8 cm, 9 s 时偏差为 6 cm. 由于机器人整体宽度约 15 cm, 行进路程 80 cm, 定义误差率等于侧向偏移距离除以整体宽度, 再除以行进路程, 可知 15 s 时误差率为 0.33%, 11 s 时误差率为 0.67%, 9 s 时误差率为 0.50%. 图 13(b) 展示了一侧行波机构(右)速率固定, 另一侧行波机构(左)的速率按照 lv_1 、 lv_2 、 lv_3 不断加速的变化时 WARARs

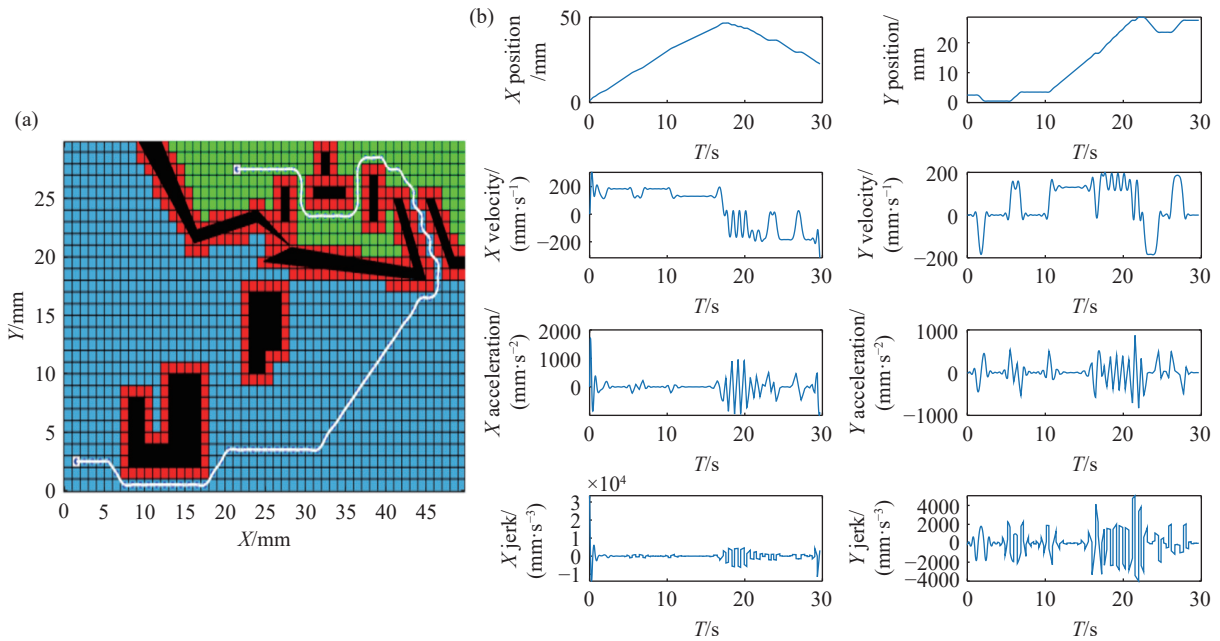


图 12 WARARs minimum snap 优化轨迹。(a) 平滑路径; (b) 位置、速度、加速度和加加速度

Fig.12 Optimal trajectories of minimum snap for WARARs: (a) smooth path; (b) position, velocity, acceleration, and jerk

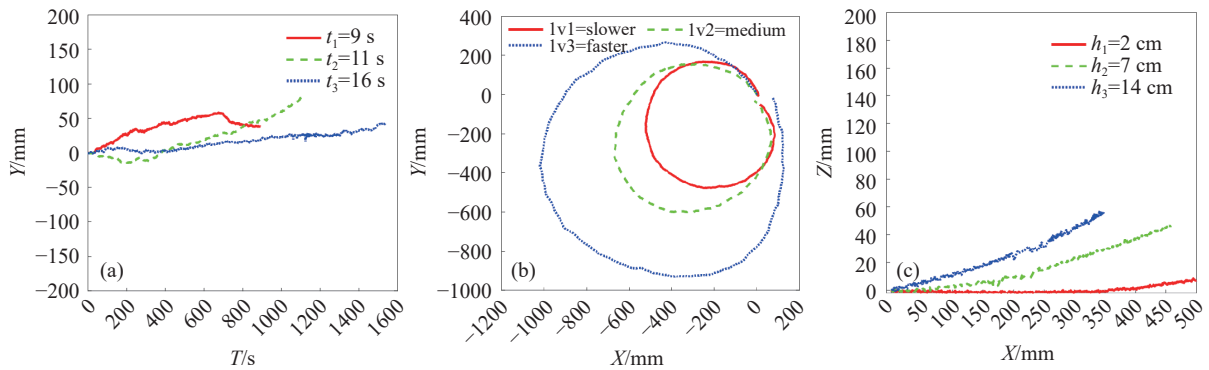


图 13 WARARs 实验结果。(a) 不同速度移动相同距离; (b) 单侧行波驱动机构速度改变; (c) 不同爬坡高度

Fig.13 WARAR experimental results: (a) movement of the same displacement at different velocities; (b) velocity variation of unilateral wave-inspired actuated mechanism; (c) different climbing heights

的三组实验运动轨迹。在此情况下, 基于差速原理, WARARs 的运动轨迹为圆形。根据图 13(b) 实验结果可知, 随着两行波机构转速差减小, WARARs 转弯半径不断增大, 且圆周运动中心处于相对的第三象限, 原因可能是机器人启动时所受摩擦力影响过大, 从而导致机器人在开始时角度发生偏转。因此, 解决机器人启动时角度方位的矫正非常重要。此外, 随着半径的增大, WARARs 移动轨迹与理想圆形轨迹的误差不断增大。综上所述, WARARs 在运动估计方面存在一定误差, 这主要是因为 WARARs 负载的不平衡、电机的转速误差、地面摩擦或平整度不均匀等因素导致。图 13(c) 展示了光滑纸板一端从不断被抬高 $h_1=2\text{ cm}$ 、 $h_2=7\text{ cm}$ 、 $h_3=14\text{ cm}$ 时 WARARs 的三组实验运动轨

迹, 定义 Z 轴范围为 0.2 m, 方便分析机器人运动效果。具体来说, 当高度为 2 cm 时, WARARs 可快速且平稳进行爬坡; 当高度为 7 cm 时, WARARs 可以攀爬至顶端, 但速度明显降低; 当纸板高度调至 14 cm 时, WARARs 运行轨迹存在转折点, 爬行速度显著变慢, 且出现打滑现象。

此外, 在水域环境, 同样对所设计机器人的运动性能进行了实验, 如图 14 所示, 定义 Y 轴范围 0.4 m, 方便分析水域直行游动的偏移误差情况。具体来说, 控制 WARARs 以相同速度分别运行 40、40 和 35 cm 的三组重复实验 w_{s1} 、 w_{s2} 、 w_{s3} , 以保证实验结果的有效性。根据图 14 所示实验结果可知, WARARs 最大跑偏距离为 5 cm。进一步分析 WARARs 的直行误差率可得其分别为 1.50%、0.95%

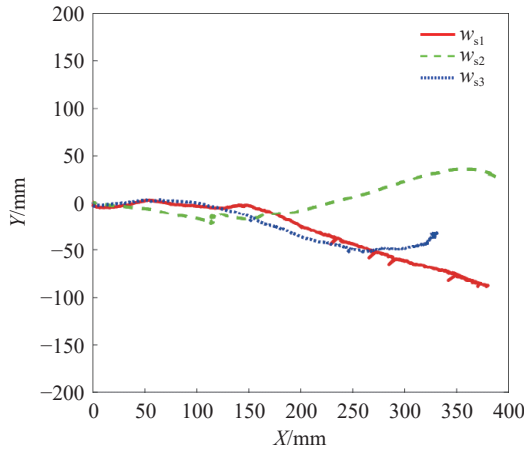


图 14 WARARs 水面移动实验结果

Fig.14 WARARs experimental results of water surface movement at different velocities

和 0.48%. WARARs 的水中运动误差主要由于波浪扰动.

为实现所提方法的验证, 分别进行了陆地和水域运动的可行性测试, 即 90°/45°的转向和直

行移动实验. 实验中采用运动捕捉系统(Qualisys 的 Arqus A12-8)实时测量 WARARs 的轨迹信息. 图 15 展示了 WARARs 在陆地上的移动轨迹. 首先, WARARs 直行, 然后右转 90°, 再直行, 然后左转 45°, 再直行, 然后左转 45°, 再直行, 最后左转 90°. 蓝色实线和红色虚线分别表示 WARARs 两次实际移动轨迹. 根据图 15 实验结果分析可知, WARARs 能够实现目标轨迹的控制. 然而与红色曲线相比, 蓝色实线的直线度更好, 这主要是由于电机运行过程中存在误差, 以及机器人移动过程中出现抖动等问题, 这些问题极易导致轨迹的跟踪误差.

图 16 展示了 WARARs 在水域环境通过狭窄通道的实验结果. 由图 16 实验结果分析可知, WARARs 在水域环境中能够快速移动. 进一步, 对比两次测量的轨迹结果可知, 相对于陆地环境, 水域环境中 WARARs 的运动方向更容易产生抖动, 这可能是因为当机器人方向变化时, 水的阻力对两个行波驱动仿生鳍产生的阻力不同.

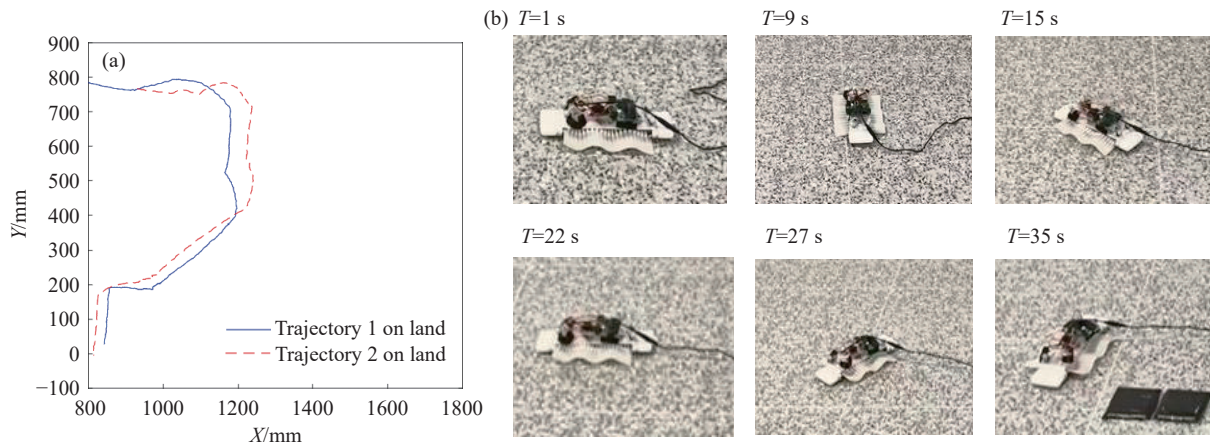


图 15 WARARs 陆地移动实验结果. (a) 路径轨迹; (b) 移动快照

Fig.15 WARAR experimental results in terrestrial environments: (a) movement trajectories; (b) snapshots

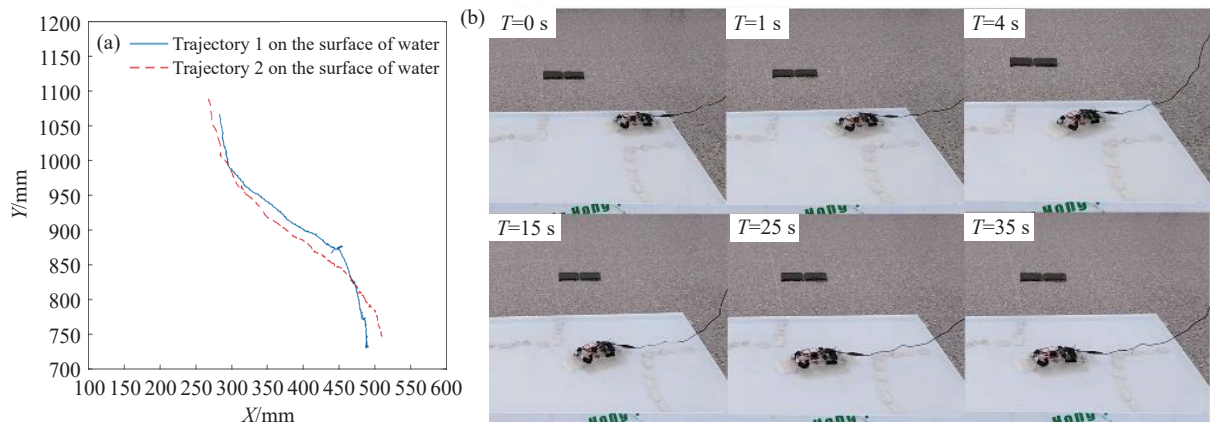


图 16 WARARs 水面游动实验结果. (a) 路径轨迹; (b) 游动快照

Fig.16 WARAR experimental results in aquatic environments: (a) movement trajectories; (b) snapshots

在陆地和水面上的轨迹运动中, 不难发现由于机器人本身的结构特点、控制电机的误差以及地面摩擦/水波震荡等原因, 机器人在规定路线上会稍微偏离, 但基本上能够完成必要的转向和直行运动。

5 结论

本文设计了一种新型的 WARARs, 其基于行波驱动机构和柔性仿生鳍, 实现了在陆地、水域以及跨介质的作业, 同时避免了在跨水陆介质运行时需进行复杂结构切换的问题。在此基础上, 建立了 WARARs 的运动学模型, 并利用数值仿真分析了其水动力特性。随后, 提出了一种考虑安全区域的 A* 路径规划方法, 并利用 minimum snap 设计了平滑的运行轨迹。最后, 自主搭建了 WARARs 实验平台, 并在陆地和水域环境中进行了实验验证, 验证了所设计 WARARs 的出色运动性能。

参 考 文 献

- [1] Wang R, Wang S, Wang Y, et al. Development and motion control of biomimetic underwater robots: A survey. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2022, 52(2): 833
- [2] Bai X J, Shang J Z, Luo Z R, et al. Development of amphibious biomimetic robots. *J Zhejiang Univ SCIENCE A*, 2022, 23(3): 157
- [3] Tzafestas S G. Mobile robot control and navigation: A global overview. *J Intell Rob Syst*, 2018, 91(1): 35
- [4] Zhang J, Zhou J J, Yuan S H, et al. Review of configuration, motion mechanism, modeling and control of amphibious bionic robots. *Robot*, 2023, 45(3): 367
(张建, 周俊杰, 苑士华, 等. 水陆两栖仿生机器人构形、运动机理及建模控制综述. *机器人*, 2023, 45(3): 367)
- [5] Ren K, Yu J C. Research status of bionic amphibious robots: A review. *Ocean Eng*, 2021, 227: 108862
- [6] Ma X M, Wang G, Liu K X. Design and optimization of a multimode amphibious robot with propeller-leg. *IEEE Trans Robot*, 2022, 38(6): 3807
- [7] Liu C, Tan X C, Yao Y A, et al. Design and analysis of a novel deformable wheel-legged robot. *J Mech Eng*, 2022, 58(3): 65
(刘超, 谭稀岑, 姚燕安, 等. 一种新型可变形轮腿式机器人的设计与分析. *机械工程学报*, 2022, 58(3): 65)
- [8] Zhao J W, Han T, Wang S Z, et al. Design and research of all-terrain wheel-legged robot. *Sensors*, 2021, 21(16): 5367
- [9] Huang H, Wang H L, Wang Q F, et al. Design and study on a wall-climbing robot based on planetary gear track obstacle-surmounting and hybrid double adsorption compensation. *Robot*, 2022, 44(4): 471
(黄华, 王虎林, 王庆粉, 等. 一种基于行星履带轮越障与混合双吸附补偿的爬壁机器人的设计与研究. *机器人*, 2022, 44(4): 471)
- [10] Khan R, Malik F M, Raza A, et al. Comprehensive study of skid-steer wheeled mobile robots: Development and challenges. *Ind Robot Int J Robot Res Appl*, 2021, 48(1): 142
- [11] Wang Y, Cai M X, Wang S, et al. Development and control of an underwater vehicle-manipulator system propelled by flexible flippers for grasping marine organisms. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, 69(4): 3898
- [12] Ye Z L, Zhang L A, Sun S, et al. Design and analysis of bionic double-claw pipe climbing robot. *Mech Sci Technol*, <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20220300>
(叶增林, 张良安, 孙洒, 等. 仿生双爪式管道攀爬机器人设计与分析. *机械科学与技术*, <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20220300>)
- [13] Xing H M, Guo S X, Shi L W, et al. Design, modeling and experimental evaluation of a legged, multi-vectored water-jet composite driving mechanism for an amphibious spherical robot. *Microsyst Technol*, 2020, 26(2): 475
- [14] Cocuzza S, Doria A, Reis M. Vibration-based locomotion of an amphibious robot. *Appl Sci*, 2021, 11(5): 2212
- [15] Guo J, Li C Y, Guo S X. Study on the autonomous multirobot collaborative control system based on spherical amphibious robots. *IEEE Syst J*, 2020, 15(4): 4950
- [16] Kim C, Lee K, Ryu S, et al. Amphibious robot with self-rotating paddle-wheel mechanism. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2023, 28(4): 1836
- [17] Baines R, Fish F, Kramer-Bottiglio R. Amphibious robotic propulsive mechanisms: Current technologies and open challenges. *Bioinspired Sensing, Actuation, and Control in Underwater Soft Robotic Systems*, 2021: 41
- [18] Zarrouk D, Mann M, Degani N, et al. Single actuator wave-like robot (SAW): Design, modeling, and experiments. *Bioinspir Biomim*, 2016, 11(4): 046004
- [19] Shachaf D, Inbar O, Zarrouk D. RSAW, A highly reconfigurable wave robot: Analysis, design, and experiments. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4(4): 4475
- [20] Guetta O, Shachaf D, Katz R, et al. A novel wave-like crawling robot has excellent swimming capabilities. *Bioinspir Biomim*, 2023, 18(2): 026006
- [21] Yang W L, Wu P, Zhou X Q, et al. Improved artificial potential field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning. *Appl Sci*, 2021, 11(5): 2114
- [22] Sun H S, Wu Q X, Wang X B, et al. A new self-reconfiguration wave-like crawling robot: Design, analysis, and experiments. *Machines*, 2023, 11(3): 398
- [23] Huang H C, Sheng C W, Wu J N, et al. Hydrodynamic analysis and motion simulation of fin and propeller driven manta ray robot. *Appl Ocean Res*, 2021, 108: 102528
- [24] Bagheri S M, Taghaddos H, Mousaei A, et al. An A-Star algorithm for semi-optimization of crane location and configuration in modular construction. *Autom Constr*, 2021, 121: 103447
- [25] Han L, He L, Sun X, et al. An enhanced adaptive 3D path planning algorithm for mobile robots with obstacle buffering and improved Theta* using minimum snap trajectory smoothing. *J King Saud Univ Comput Inf Sci*, 2023, 35(10): 101844