

文章编号 1004-924X(2025)17-2778-14

仿生子母机器人的设计与运动控制

于 慧¹, 马宇科², 汪俊杰¹, 郑 亮^{2*}

(1. 吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022;

2. 吉林农业科技学院 电气与信息工程学院, 吉林 吉林 132101)

摘要:针对传统单体机器人在复杂两栖任务中显现出的适应性较差、功能单一等问题,提出了一种仿生两栖子母机器人系统。其中,母机器人采用可开合的龟壳形球体,集成了四条机械腿及喷水推进器;子机器人则为微型流线型舱体,配备螺旋桨推进器和水下近距离可见光通信模块。此外,还设计了齿轮啮合的挂载释放结构,用于实现子机器人的释放与回收。为了避免欧拉角奇异性,建立了基于单位四元数的六自由度全耦合动力学模型,并提出了一种UQ-PID算法,实现了母机器人的8个伺服电机和4个喷水推进器的协同控制。流体仿真表明,球形结构能够有效减少水流扰动并提高稳定性。实验表明,母机器人在陆地上能够在20 s内前进约60 cm,并且在水下能够保持较为精确的直线运动轨迹,偏差较小且推进力平稳。子机器人在水池中的轨迹误差波动为 $-0.30\sim 0.30$ m,速度峰值为32.51 cm/s。该研究为两栖子母机器人协同作业提供了可行的技术路线。

关键词:仿生两栖球形母机器人;子机器人;运动控制;流体仿真

中图分类号:TP242;X55 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253317.2778 CSTR:32169.14.OPE.20253317.2778

Bionic amphibious spherical mother robot and its sub-robot system

YU Hui¹, MA Yuke², WANG Junjie¹, ZHENG Liang^{2*}

(1. School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology,
Jilin 132022, China;

2. School of Electrical and Information Engineering,
Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengliang@jlnku.edu.cn

Abstract: To address the limited adaptability and single-functionality of traditional single-robot systems in complex amphibious tasks, a novel bionic amphibious mother-child robot system is proposed. The mother robot features a retractable, turtle-shell-shaped spherical enclosure and integrates four mechanical legs with water-jet propulsion units. The child robot comprises a microstreamlined cabin equipped with a propeller thruster and an underwater short-range visible-light communication module. A gear-meshing mount-and-release mechanism is developed to enable reliable deployment and retrieval of the child robot. To avoid Euler-angle singularities, a six-degree-of-freedom fully coupled dynamic model is formulated using unit quaternions, and a UQ-PID control algorithm is introduced to coordinate the eight servomotors and four

收稿日期:2025-04-16;修订日期:2025-05-23.

基金项目:吉林省数字农业重点学科资助项目(No. JLXK20180319)

water propulsion units of the mother robot. Fluid simulations indicate that the spherical structure effectively reduces hydrodynamic disturbance and enhances stability. Experimental results demonstrate that the mother robot achieves approximately 60 cm forward locomotion on land within 20 s and maintains a precise straight-line trajectory underwater with minimal deviation and stable thrust. The child robot exhibits a pool trajectory error within ± 0.30 m and attains a peak speed of 32.51 cm/s. The presented system and methods constitute a feasible technical approach for coordinated amphibious operation of mother-child robotic platforms.

Key words: bionic amphibious spherical mother robot; sub-robot; motion control; fluid simulation

1 引 言

受到鳐鱼^[1]、海鬣蜥^[2]、鳄鱼^[3]以及线翎电鳗^[4]等自然生物的启发,两栖机器人层出不穷。然而,这类机器人往往在结构和设计上较为复杂,这使得它们在控制和技术实现上面临较大的挑战,导致设计的复杂性增加。相比之下,球形机器人构造特殊,球形结构有很强的耐压性,对称性结构使转动半径为零,流体动力学耦合因素几乎可以忽略不计,运动非常灵活^[5],因此能够更好地应对复杂的环境和多样化的任务需求。然而,要使球形机器人兼具陆地行走与水下运行的能力,有效地整合陆地行走机构与水中推进装置是关键。为此,研究人员提出多种推进方式。冯巍等设计了一种陆地轮式驱动和水中桨式驱动相结合的两栖机器人推进机构,并通过切换机制实现了两栖运动^[6]。侯康等研究出一种球形滚动机器人,能够借助内部的螺旋推进装置实现水中运动^[7]。何彦霖等设计了一种采用复合式驱动方式(轮-腿-矢量喷水)的小型两栖球形机器人,并分析了机器人在水里不同运动模式下的驱动力变化规律^[8]。Xing等^[9]以乌龟为仿生依据设计了一种小型两栖球形机器人,水下依靠喷水展开喷水推进,陆地则借助机械腿行走,类似的驱动方式还有机器人 ASR^[10-11],该两栖机器人可以适应坑洼的地形,并且可以在狭窄的水下空间内移动。侯夕欢等针对两栖球形机器人设计了一种有螺旋桨推进器的推进系统,这种喷水推进器的螺旋桨安装在管道内,管道结构可降低周围环境对推力的影响,同时保护螺旋桨免受磨损和水草纠缠^[12]。

随着任务的逐渐复杂,子母机器人系统日益成为一种有效的解决途径。子母机器人协作系统呈现出更简单高效的特性,能规避多机器人复

杂的控制问题,降低任务的冲突状况,提升协作效率。母机器人不只是充当控制与通信中心,还可携带、释放与回收子机器人,子机器人也可独立完成一些子任务内容。这种组合式结构降低了子机器人自主导航与决策的需求,让系统控制更加简单高效。在实际应用中,郭书祥等提出了一种仿生两栖子母机器人系统,进一步拓展了多机器人协作的应用范围。两栖球形母机器人采用喷水推进器进行水下推进,并为微型子机器人提供控制信号和能源。微型子机器人由人工智能驱动器驱动。母机器人和子机器人之间通过智能软缆线连接,以实现子母机器人之间的通信及子机器人的回收^[13]。随后,他们又以樽海鞘为原型设计了一种微型子机器人,该机器人由记忆合金丝和硅胶制成的微型驱动器进行驱动,在水下运动透明度高、隐蔽性强、稳定性高^[14]。在此基础上,何彦霖提出一种多功能两栖子母机器人系统,其设计的子母机器人系统包括仿生小型两栖球形母机器人和若干微型子机器人,母机器人可以利用有线和无线的方式释放子机器人^[15]。有线方式下母机器人可以为子机器人提供电源,无线方式下子机器人可以自带电源及内部控制器^[16]。刘羽婷等设计的系统同样由两栖球形母机器人和微型子机器人组成,但微型子机器人陆地采用轮式驱动,并增加了可以实现水陆两栖运动的桨叶^[17]。综上所述,子母协作系统展现出更为强大的灵活性与可靠性,为未来多机器人系统的协作提供了更多可行的解决方案。然而,传统单体机器人在复杂水陆环境作业时,体积较大的机器人难以进入狭窄空间,而小型机器人又不具备计算的优势。为此,本文提出了子母机器人协同系统架构:子机器人充当任务执行单元,聚焦于狭窄空间的高机动性作业;母机器人充当系统的核心,可以担负起全局导航、数据处理以及子

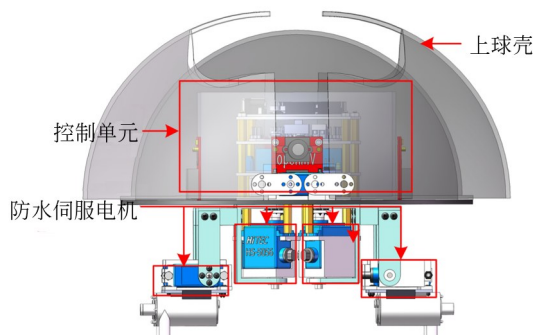
机器人释放与回收的功能。

2 原理

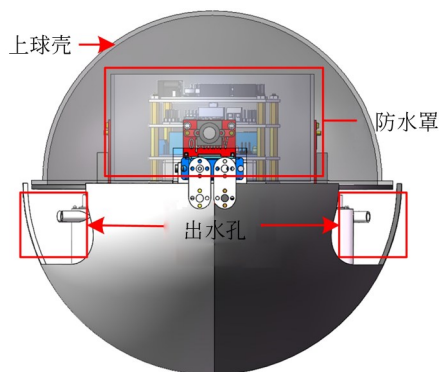
2.1 仿生两栖球形母机器人的结构

通过研究乌龟的形态结构、运动机制及其对环境的适应能力,本文设计了一种仿生两栖球形机器人,如图1所示。该机器人在外形上类似乌龟的构造,即采用半球形的“外壳”和四肢结构。图1是机器人在陆地和水下两种模式下的初始形态。在陆地模式下,仿生两栖球形机器人通过两个伺服电机控制下半球壳向上旋转,从而转换成陆地形态;在水下模式中,下半球壳闭合形成完整的球形结构,推进器则通过出水孔喷射水流推动机器人前进。仿生两栖球形母机器人主要由上球壳中的控制单元和4组机械腿两部分构成。为提高控制单元在水下运行过程中的安全性,控制系统被封装于上半球壳内部的防水罩中。

如图2所示,控制单元包括 Openmv 模块、主



(a) 陆地形态
(a) Land form



(b) 水下形态
(b) Underwater form

图1 仿生两栖机器人

Fig. 1 Bionic amphibious robot

控模块 (Arduino Mega2560)、通信模块、电源管理模块、MPU6050、24路舵机控制器以及继电器等。其中,Openmv 模块和主控模块 (Arduino Mega2560) 构成机器人数据处理与运动控制的核心单元,主要负责姿态调整和多模块数据通信;MPU6050 则与数据采集装置协同工作,以实时收集机器人的姿态信息;继电器通过开关控制推进器的工作状态,并模拟脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号实现对推进速度的精准调控;通信模块实现机器人与外部设备之间的数据稳定传输;电源模块为各子系统提供持续稳定的能量保障。图3详细展示了硬件控制系统的供电设计。控制系统采用两块 2S 聚合物锂电池作为主电源,其额定电压为 7.4 V,电池容量为 800 mAh。为了满足系统中不同模块的电压

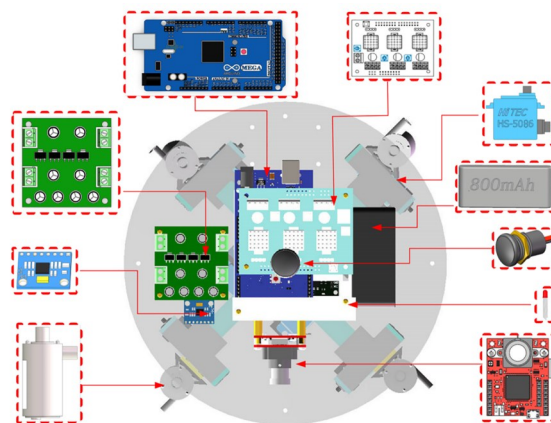


图2 控制单元构成

Fig. 2 Control unit configuration

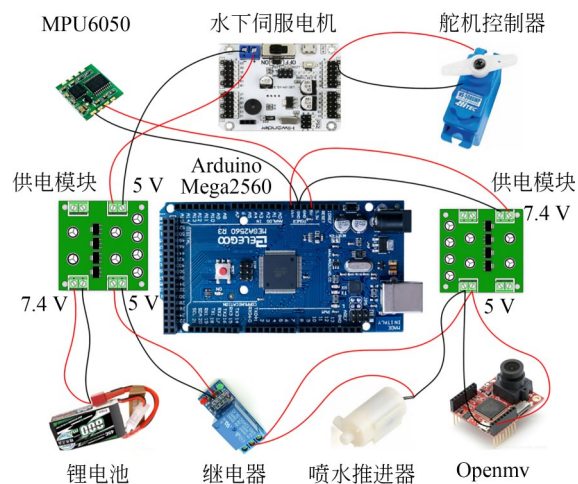


图3 硬件系统供电设计

Fig. 3 Hardware system power supply

需求,设计中使用多个供电模块,将锂电池的电压转换为 5 V 输出。每个供电模块均配备两个电源输入端和两个 5 V 输出端。伺服电机 1~12、喷水电机 1~4,24 路舵机控制器以及部分需要 5 V 供电的传感器均是由 5 V 供电模块供电,主控 Arduino Mega2560 核心板由 7.4 V 锂电池供电。驱动模块中的水下伺服电机通过 24 路舵机控制器供电。喷水电机通过继电器与 5 V 电源端相连。

仿生两栖球形机器人驱动机构仿照乌龟四肢的结构与运动样式,该机器人装配了 4 组结构一样的驱动机构,标识成左前腿(Left Front, LF)、右边前腿(Right Front, RF)、左边后腿(Left Hind, LH)跟右后腿(Right Hind, RH),如图 4 所示。

图 5 说明了仿生两栖球形机器人机械腿的运

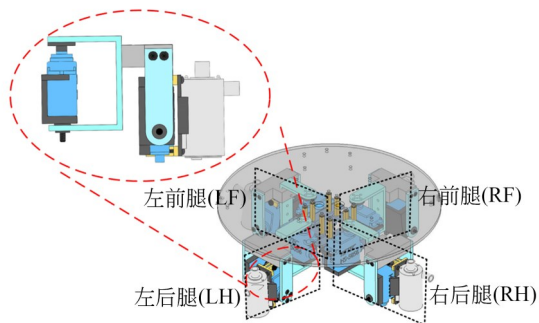


图 4 机械腿布局

Fig. 4 Mechanical leg layout

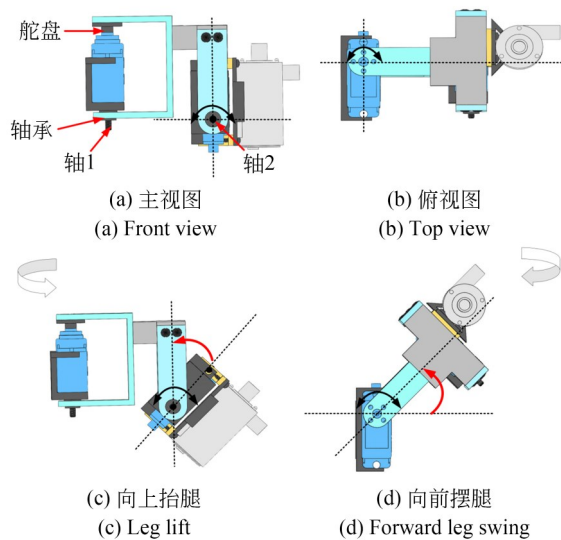


图 5 机械腿运动分析

Fig. 5 Mechanical leg motion analysis

动分解要点,详细呈现了各关键部件的运动形式及其实现办法。机器人的髋关节和腕关节皆由一个水下伺服电机、圆形舵盘、轴承与转动轴组成,可完成 0° 至 180° 的旋转动作。如图 5(a) 所示,机械腿末端的推进器绕着轴 2 发生了一定角度的转动,该动作的主要作用是调整推进器喷水的方向;机械腿整体绕轴 1 发生旋转,该旋转动作的主要作用是调节整条机械腿的运动朝向。

2.2 子机器人结构

图 6 为子机器人的结构设计,其主要组成部分包括 Openmv 模块、Arduino Nano、继电器、可见光通信模块、直流无刷电机驱动的螺旋桨推进器、电池及供电模块等。Openmv 模块作为子机器人的视觉感知系统,负责图像的采集与处理,并通过串口将处理后的数据传输至 Arduino Nano。Arduino Nano 作为子机器人的核心控制单元,接收 Openmv 模块传输的图像数据并根据分析结果执行相应的控制指令。其尺寸为 $45\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,具有低功耗特性,在轻量化设计中表现尤为突出。Arduino Nano 通过控制继电器调节螺旋桨的启停,从而精确控制子机器人的运动。继电器接收来自 Arduino Nano 的指令,并精确调节直流无刷电机驱动的螺旋桨的运行状态。子机器人与母机器人之间的通信则通过可见光通信实现。

子机器人的机械结构进行了紧凑化设计,并合理地布置了每个元器件,以尽可能地减小水的阻力和空间占用。子机器人顶端安装了防水开关,通过设计防水开关,可以有效地控制子机器人的开关机状态,能够避免多余的电能浪费。这一机制可以确保机器人在待机状态下消耗极少的电量,并在需要时迅速启动。此外,还利用穿舱螺钉固定和防水胶水进行密封。

2.3 子母机器人协作装置

以仿生两栖球形机器人为母机器人,本文设计了一种子机器人挂载和释放装置,如图 7 所示。该装置主要由两个水下伺服电机、两对夹爪和固定装置组成。在机械设计方面,夹爪的几何形状经过绘制,其内侧轮廓与子机器人外形吻合。这种仿形设计提升了子机器人挂载过程中的稳定性和可靠性。该机构采用齿轮啮合传动方式:每只夹爪的末端均带有传动齿轮,一侧通过螺钉固

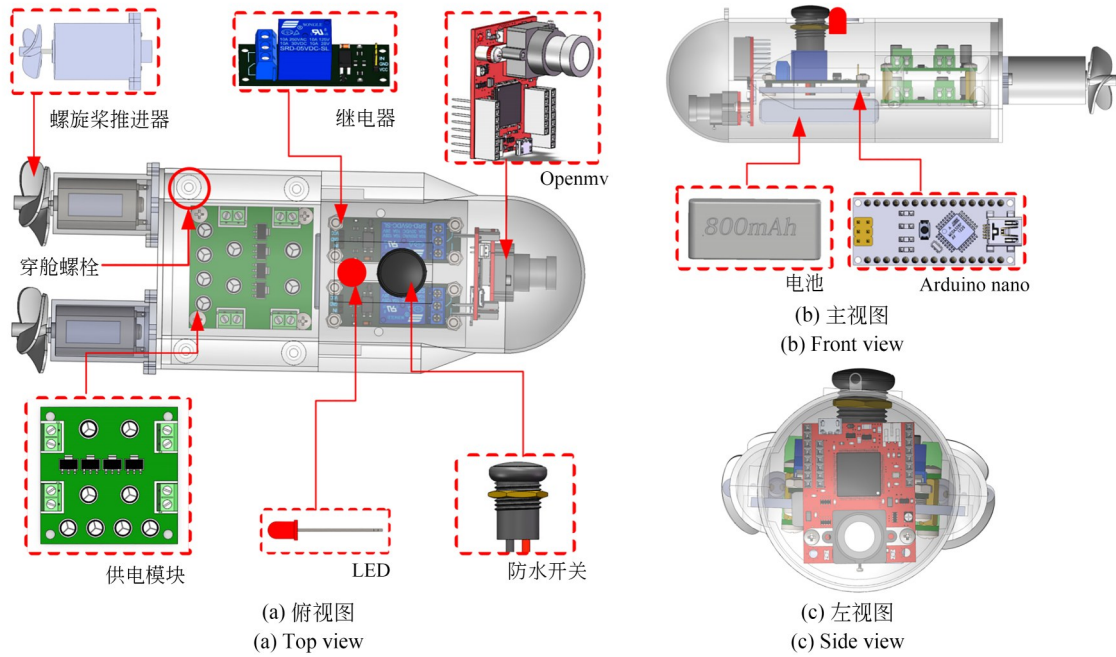


图 6 子机器人结构
Fig. 6 Sub-robot structure

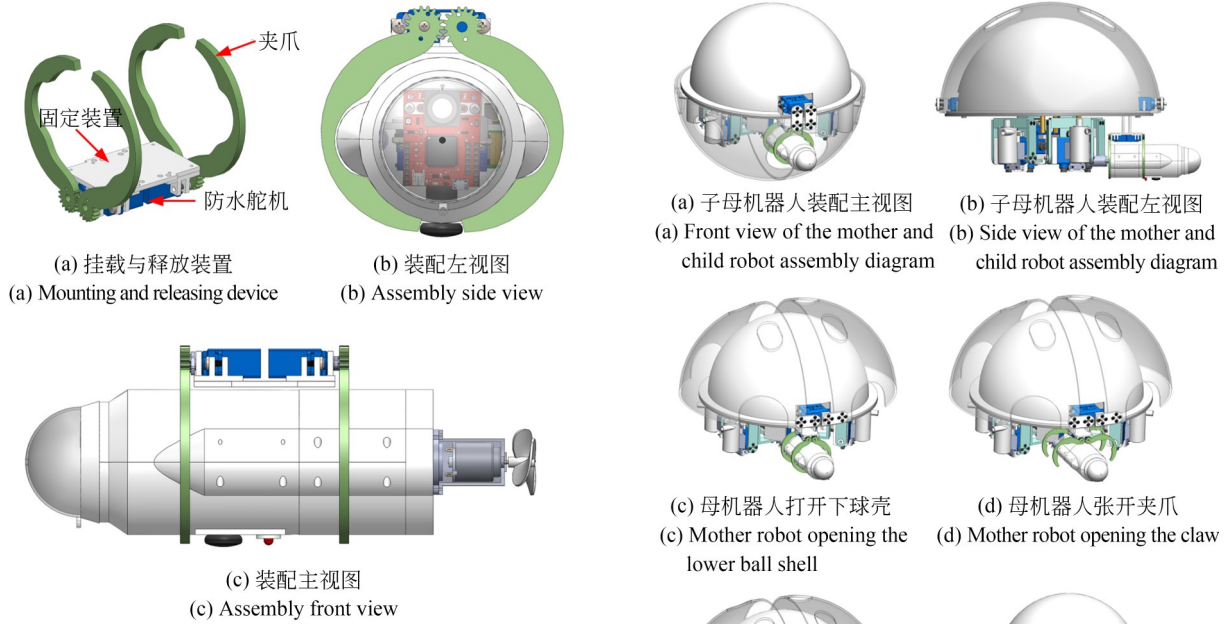


图 7 协作装置与子机器人装配示意图
Fig. 7 Collaborative devices and sub-robot assembly

定于伺服电机的舵盘;另一侧夹爪与其相啮合并通过螺钉安装在固定装置上。

图 8展示了子母机器人系统的装配结构及子机器人释放过程。如图 8(a)和 8(b)系统初始状态下母机器人通过夹爪固定子机器人,且下球壳闭合的待命状态。如图 8(c)至 8(f)所示,首先母

(e) 母机器人释放子机器人
(e) Mother robot releasing the child robot
(f) 母机器人收紧夹爪
(f) Mother robot tightening the claw

图 8 子母机器人装配结构及子机器人释放过程
Fig. 8 Mother-child robot assembly structure and sub-robot release process

机器人的下球壳向上打开,随后夹爪张开,释放子机器人,然后子机器人运行离开母机器人,最后母机器人恢复夹爪闭合、下球壳关闭的初始状态。

3 仿 真

3.1 仿生机械腿正运动学建模

机器人运动学模型是研究机器人运动规划和实现机器人运动控制的基础,主要用于描述机器人各运动构件之间的位置、速度和加速度的关系。Modified Denavit-Hartenberg(MDH)是解决机器人运动学建模问题的方法之一,它通过一组标准化的参数来描述机器人关节和连杆之间的几何关系,广泛应用于各类机械臂和机器人设计中。这里利用MDH参数法,建立了仿生两栖球形机器人的运动学模型。该球形母机器人的4条机械腿均采用相同的结构和原理设计,所以只选取其中一组机械腿作为研究对象进行正运动建模。以右前腿为例,建立机器人腿部坐标系,如图9所示,并建立右前腿DH参数表,见表1。

根据表1可知:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据齐次变换矩阵的含义,可将矩阵写成如下形式:

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

那么旋转矩阵 $R_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$,位置

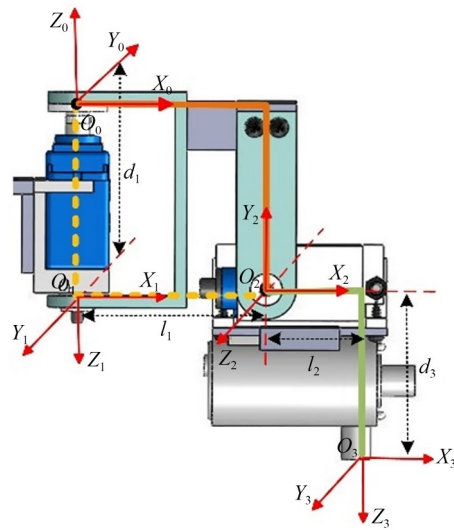


图9 机械腿DH模型

Fig. 9 Mechanical leg DH model

表1 DH参数

Tab. 1 DH parameters

连杆	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	180	0	d_1	$\theta_1(0)$
2	-90	l_1	0	$\theta_2(0)$
3	180	l_2	d_3	0

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

代入关节角初始角 $\theta_1(0)=0^{\circ}, \theta_2(0)=0^{\circ}$,机械腿基座(坐标系{0})和末端喷嘴(坐标系{3})之间的总变换为 ${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$,即:

向量 $P = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \\ 0 \\ -d_1 - d_3 \end{bmatrix}$ 。根据旋转矩阵可知;机器

人末端喷嘴的 x 轴与基座标的 x 轴对齐;机器人末端喷嘴的 y 轴与基座标的 y 轴反向;机器人末端喷嘴的 z 轴与基座标的 z 轴反向。根据位置向量可知:机器人末端喷嘴的在基座标的 x 轴的位置

置为 $l_1 + l_2$; 机器人末端喷嘴的在基座标的 y 轴的位置为 0; 机器人末端喷嘴的在基座标的 z 轴的位置为 $-d_1 - d_3$ 。以上计算结果均与图 9 中的机械腿初始姿态一致。

3.2 多机器人运动控制建模

多机器人系统的运动控制建模是研究协同作业的重要基础。对于水下机器人, 多机器人的协同运动需要精确的姿态控制, 而姿态控制的效果直接影响到多个机器人在任务执行过程中的协调性与稳定性。这里建立了一套完整的六自由度动力学模型, 并采用单位四元数来描述机器人姿态, 为多机器人协同控制提供理论基础。

由于本文中的两栖球形机器人主要在水下进行多自由度运动, 因此需要建立一个相对于参考点的运动控制方程, 以确定位置坐标。如图 10 所示, 在运动控制建模过程中建立了一个世界坐标系, 其原点坐标定义为标准正交基中的 $\{X_n, Y_n, Z_n\}$ 。该原点作为参考坐标轴。两栖球形机器人的实际位置在世界坐标系中为 $\{X_b, Y_b, Z_b\}$ 。

世界坐标系为:

$$\sum_n = \{O_n, X_n, Y_n, Z_n\}. \quad (6)$$

机体坐标系:

$$\sum_b = \{O_b, X_b, Y_b, Z_b\}. \quad (7)$$

位姿描述:

$$\eta = \begin{bmatrix} P_{bn}^n \\ \theta_{bn} \end{bmatrix} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T. \quad (8)$$

雅可比矩阵为:

$$J_\theta(\eta) = \begin{bmatrix} R_b^n(\theta_{nb}) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_\theta(\theta_{bn}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

速度映射为:

$$v = \begin{bmatrix} v_{bn}^b \\ \omega_{bn}^b \end{bmatrix} = [u, v, w, p, q, r]^T. \quad (11)$$

动力学方程为:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_b^n \\ m_b^n \end{bmatrix} = [X, Y, Z, K, M, N]^T, \quad (12)$$

其中: $\eta \in \mathbf{R}^3 \times S^3$ 表示 ASR 在世界参考坐标系中的方向和位置向量; $P_{bn}^n \in \mathbf{R}^6$ 表示机体原点 O_b 相

对于原点 O_a 的位置向量, $\theta_{bn} \in \mathbf{R}^3$ 表示描述朝向 O_b 旋转的欧拉角(滚转、俯仰和偏航), 包括滚转角、俯仰角和偏航角; $R_b^n(\theta_{nb})$ 和 $T_\theta(\theta_{bn})$ 都表示方向向量, θ 对应于绕 X 轴的旋转, b 表示机器人坐标系, p_b^n 为机体原点 O_b 在世界坐标系中的位置向量, $\theta_{bn} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 表示从 \sum_n 到 \sum_b 的欧拉角旋转(Z, Y, X 顺序), $T_\theta(\theta_{bn})$ 表示方向向量 T_θ 与速度向量 θ_{bn} 之间的映射关系。在式(9)中, $J_\theta(\eta)$ 是一个雅可比矩阵, 描述了机器人运动过程中线性速度的变化, 而 $T_\theta(\theta_{bn})$ 捕捉了角速度的变化。式(11)中, v_{bn}^b 和 ω_{bn}^b 分别表示参考坐标系中的线性速度向量和角速度向量。式(12)中, $\tau \in \mathbf{R}^6$ 表示与机器人坐标系中的力 m_b^n 和扭矩 f_b^n 相关的变换矩阵。

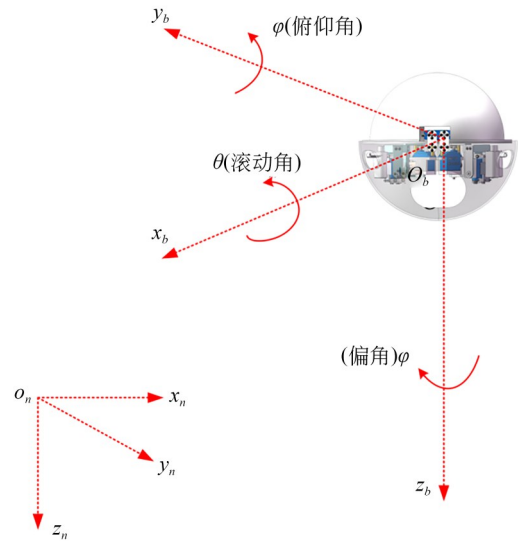


图 10 六自由度建模坐标系

Fig. 10 Six-degree-of-freedom modeling coordinate system

基于单位四元数(Unit Quaternions, UQ)建模的轨迹插值算法对于确定水下机器人的运动性能很重要, 是影响运动精度和速度的因素。特别是, 姿态插值在人工水下机器人的运动特性中起着重要作用。目前, 姿态描述主要采用欧拉方法, 但存在明显问题, 包括奇异性和角速度的耦合。UQ 建模能够更准确地描述姿态, 并有效避免欧拉角旋转时的奇异性问题, 且基于 UQ 算法的计算效率高于基于欧拉角和余弦矩阵的计算效率。通过设置 q 和 R 为非标量四元数, 第一个

方程由下式给出:

$$q = |E| \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \frac{E}{|E|} \sin \frac{\alpha}{2} \right). \quad (13)$$

该方程表明, $R' = q * R * q^{-1}$ 是一个四元数, 其范数和标量与四元数 R 相同, 其向量部分 R' 是绕 R 的欧拉轴 E 旋转的角度 α 。因此, 绕固定点向量的旋转可以通过四元数变换来表示。其中, q 是 UQ 参数, 可以表示为:

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k = \cos \frac{\alpha}{2} + \omega \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (14)$$

其中: ω 是单位向量, 四元数对坐标系进行向量旋转变换, 可以看作是对三个单位向量的旋转变换。旋转矩阵用于计算四元数, 四元数与旋转矩阵之间的关系为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_0 q_2 + q_1 q_3) \\ 2(q_0 q_3 + q_1 q_2) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

速度规划和插值算法与姿态插值和位置补偿之间的关系直接使用等距步长。将欧拉角转换为旋转矩阵, 假设输入的起点和终点对应的旋转矩阵分量分别为 R_s 和 R_e , 则两个姿态的旋转变换矩阵表示为:

$$R_e = R_s R. \quad (20)$$

对于 R 的实际计算和 R_e 的相应欧拉参数, 每个插值步骤都会生成一个旋转矩阵。姿态和位置插值都需要循环计算, 确保通过速度规划实现姿态和位置运动的同步。

4 仿真与实验

4.1 流体仿真

为准确模拟球形机器人在水下的运动, 基于 Solidworks Flow Simulation 建立了流体仿真模型。图 11 是仿生两栖球形机器人运动时的水流速度分布, 分别展示了 $t=0.2, 0.6, 1, 1.4, 1.8$ 和 2.2 s 向前运动时对周围水流的影响情况。由图 11(a) 可以看出, 机器人下球壳的 4 个出水口处速度分布较为均匀。由于机器人向前运动时(图中前进方向朝左), 仅依靠后部两个推进器喷水, 两

对应的等效轴参数有 3 种情况。 R 表示旋转矩阵。在特定的理论模型中, 为了简化表达式, 将 $\text{tr}R^{-1}$ 定义为旋转矩阵的迹。

情况 1: $(\text{tr}R^{-1})/2 = 1$ (单位矩阵), 则 $\alpha = 0$ 且参数 ω 未定义。

情况 2: $\text{tr}R^{-1} = -1$, 则 $\alpha = \pi$, 且 ω 的值为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2(1+r_{11})}} \begin{bmatrix} 1+r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

情况 3:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{1}{2}(\text{tr}R^{-1})\right) \in (0, \pi), \quad (17)$$

$$\omega = \frac{1}{2\sin\alpha} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

四元数旋转矩阵为:

侧推进器未工作, 因此在 $t=0.2$ s 时, 机器人刚启动, 整体处于静止状态, 右侧推进器出水口处的水流速度变化稍显明显, 但总体上对周围水流的影响呈现对称。从 $t=0.2$ s 到 $t=0.6$ s, 推进器速度逐渐增大, 球形机器人向前继续加速(图中为向左加速), 尾部开始形成明显的尾迹, 且右侧推进器出水口处的速度变化更加显著。从 $t=1$ s 到 $t=2.2$ s, 推进器速度逐渐趋于稳定, 球体周围的速度分布均匀, 仅在球壳边缘和推进器出水口处有局部速度变化, 其他部分未产生显著的额外阻力。随着球形机器人速度的增加, 球体后部逐渐形成湍流, 如图 12 所示。该图是机器人运行第 3 s 时周围水流的速度分布情况, 图中球体后部出现的湍流可能会扰乱机器人在流体中的运动轨迹。总体而言, 球形结构的对称性和流线型设计为水下机器人的运动控制提供了良好的稳定性。

图 12 展示了球体数据采样点的分布情况。我们在球壳边缘的前、后、左、右 4 个方向各设置了一个采样点, 并在球体正前方左右 45° 方向增设了两个采样点, 用于分析球形机器人在运动过程中周围水流的动态变化。如图 13 和图 14 所

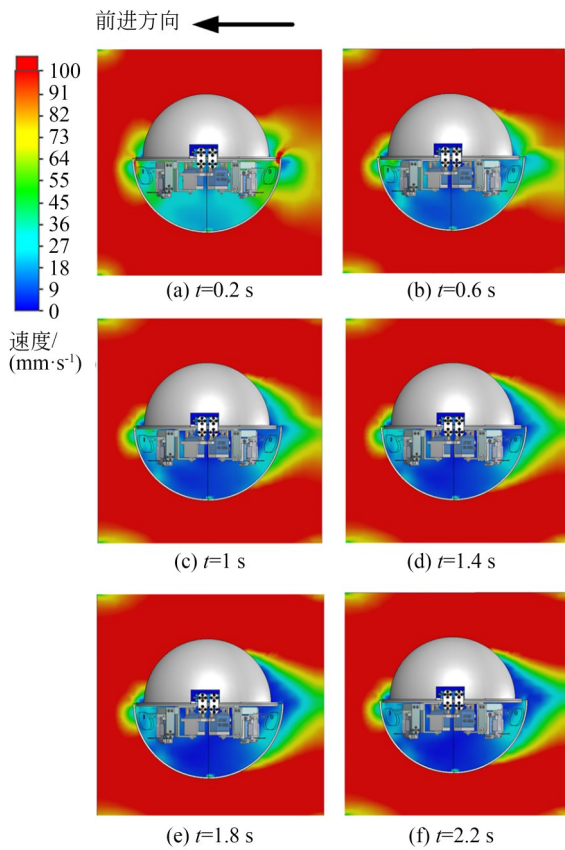


图 11 机器人向前运动的水流速度分布

Fig. 11 Flow velocity distribution of robot's forward motion

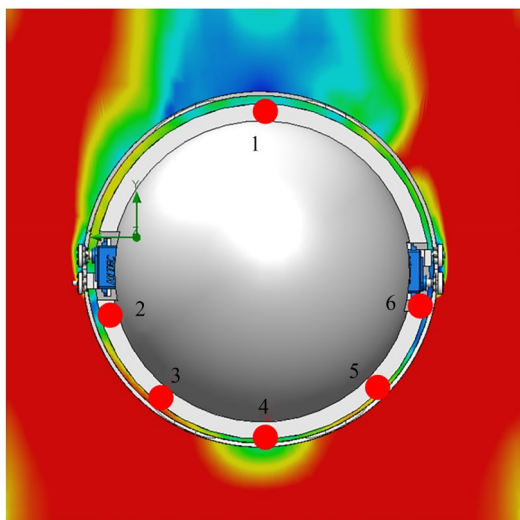


图 12 机器人运行第 3 秒时速度分布和数据采样点分布

Fig. 12 Velocity distribution and data sampling point distribution at 3rd second of robot's operation

示,6个采样点在 4 s 内的速度和压力数据图清晰地反映了水流的变化情况。从速度曲线可以看出,采样点 1 呈现出最大的弯曲弧度,表明在球形

机器人启动后,水流受到球体阻碍并绕过机器人壳体时速度显著减小,随后逐渐趋于平稳。采样点 2 和 6,在机器人平稳运行前,其速度波动幅度仅次于采样点 1。这两个采样点均位于球体壳体凸起部位,速度变化较为不稳定。采样点 3 和 5,位于球体正前方左右 45° 方向,启动时速度波动较小,且在机器人运行 1.5 s 后速度趋于稳定。采样点 4,位于球形机器人正前方,受到球形机器人的影响最小,速度最快趋于稳定状态。从图 14 中可以看出:采样点 4 在机器人加速阶段,随着球体速度的增加,压力分布呈现剧烈变化;当球体达到稳定运动状态时,压力分布逐渐趋于稳定。无论球体处于加速阶段还是稳定运动阶段,球体前方的压力始终大于后方的压力。其余采样点的压力变化趋势相似,但总体上采样点 1 所受压力最小。

通过流体分析可知:球形结构的设计在水下运动稳定性方面具有显著优势。球形机器人的对称性和流线型外形使其在水中运动时表现出

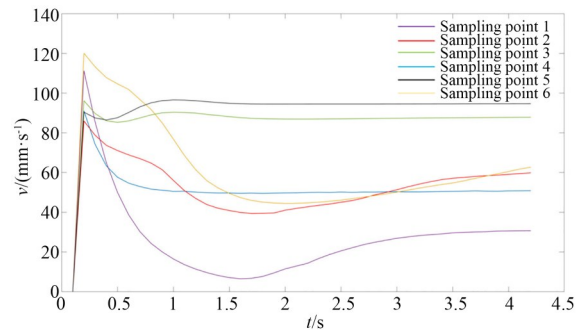


图 13 六个采样点速度与时间分布

Fig. 13 Speed and time distribution of six sampling points

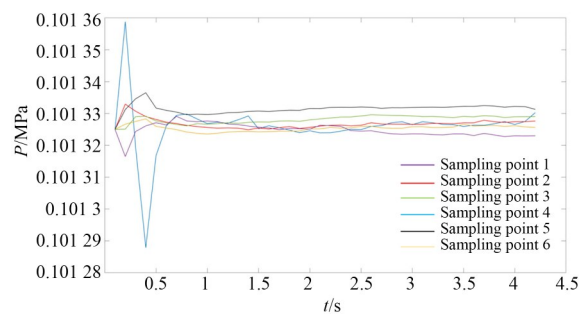


图 14 六个采样点压强与时间分布

Fig. 14 Pressure and time distribution of six sampling points

较好的稳定性和较小的水流扰动。实验结果表明,球形机器人启动时,周围水流的速度分布呈现对称性,并且随着机器人加速,水流扰动逐渐形成,但不会导致较大的轨迹偏移。在推进器的推动下,机器人后部形成的湍流尽管存在,但并没有对整体运动产生显著的阻力,这验证了球形结构在水下运动中的稳定性。此外,不同方向的采样点也显示出球形结构对于水流的影响较为均匀,表明机器人在水中运动的时候,球体外壳能在一定程度上降低机器人水中运动的阻力,进一步验证了其在水下运动中的稳定性。

4.2 陆地运动实验

本研究采用基于UQ的反馈调节算法,通过MPU6050惯性传感器实时采集姿态数据,利用UQ进行姿态解算以避免欧拉角的奇异性问题,并建立PID闭环控制系统来调节陆地上的8个舵机角度实现运动和水下4个推进器的喷水强度,使机器人能够精准跟踪期望轨迹。

为了验证仿生两栖球形机器人结构设计的合理性及其陆地运动能力,在室内环境中进行了陆地测试实验,如图15所示。陆地实验场地搭建于室内,地面铺设了两条测量钢尺,并辅助“工”字形标记,最大量程为1.5 m,为陆地步态验证实验提供了精确的测量环境。

图16是机器人二维平面的轨迹。从轴来看,

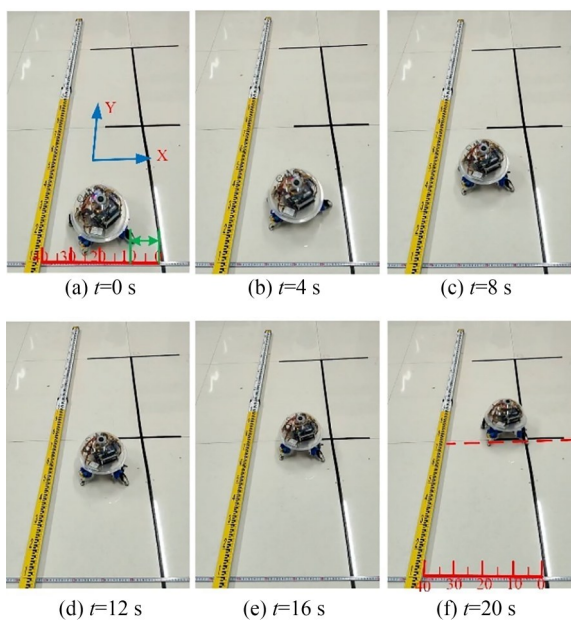


图15 陆地运动实验

Fig. 15 Land mobility experiment

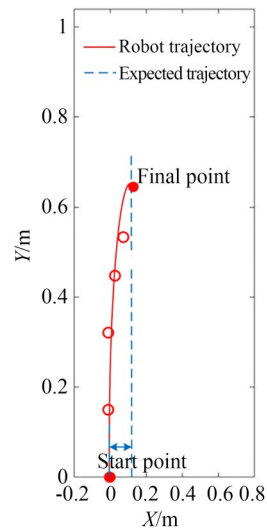


图16 XY平面陆地运动轨迹

Fig. 16 XY planar land motion trajectory

机器人从起点到终点大约偏离了10 cm,但总体轨迹平滑,表明机器人在陆地上的运动较为稳定,没有出现明显的振荡或偏移。这种运动特性可能是由于其球形结构和腿部设计所导致的,使其在运动过程中能够较好地适应地面环境,并保持一定的运动效率和稳定性。针对陆地运动出现的轨迹偏差问题,主要是由机械腿关节间隙引起的步态不对称和地面摩擦力小所致。为此提出两方面的改进方案:一是优化机械腿公差配合;二是增加机器人足端的摩擦力。

4.3 仿生两栖球形母机器人水下运动实验

水下实验场地设置于室内水池,水池长1.8 m,宽1 m,深0.45 m,利用标尺进行标记。

图17展示了机器人在水池中的直线运动过程。在第1 s,机器人位于水池前端的中央位置,

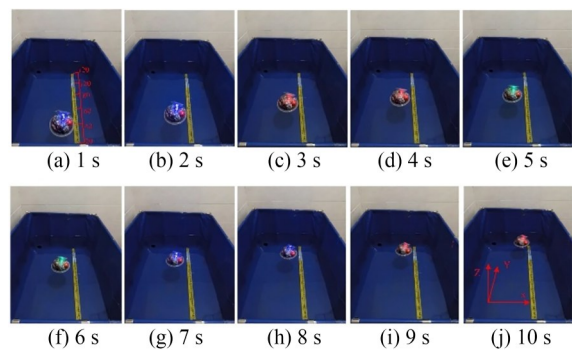


图17 水下直线运动实验

Fig. 17 Underwater straight-line motion experiment

推进器启动,喷射出的水流形成微小的射流,从而推动机器人开始运动。第 2 s,机器人已向前移动一段距离,水流开始向周围扩散,流场范围逐渐扩大。在 3~6 s 之间,机器人持续向前运动,推进速度趋于稳定,推进器周围的水流扰动较为均匀,整体仍保持一定的对称性,未观察到明显的湍流现象。第 7 s,机器人已前进较远,推进器周围水流形成了稳定的流场,推进速度稳定,推进效率较高。第 8~9 s,机器人逐渐接近水池另一端;第 10 s 推进器停止工作,水流迅速收缩,流场范围缩小,机器人运行速度逐渐降低,最终趋于静止。整个实验过程中,机器人运动轨迹基本呈直线,表明它在水下具有良好的运动稳定性和控制精度。

图 18 展示了机器人在 XY 平面内的运动轨迹。在水下运动过程中,机器人在 X 轴方向运动了 1.2 m、Y 轴方向最大偏移量 0.05 m、方向偏移 4.17%;而陆地实验中,在 X 轴方向只前进 0.6 m 就已偏离 0.1 m、方向偏移达到 16.67%,由此可知,水下运动相比陆地运动更加稳定。这样的差异是因为在水下环形外壳为球形壳体提供了均匀阻力和支撑力,地面摩擦小以及机械腿步态不一致等因素引起的误差都得到了大大减小;又由于喷水推进器所受的推力稳定且对称,在陆地运动过程,该机器人利用机械腿步态运动,会受到地面状况或者机械结构等方面的影响。这里采用基于 UQ 描述的六自由度动力学模型,可有效描述与控制其姿态及位置的变化,并且相比于欧拉角存在奇异性的问题,在一定程度上提升了机器人的水中控制精度。图 19 和图 20 分别描绘了机器人在直线运动过程中三轴速度及加速度随

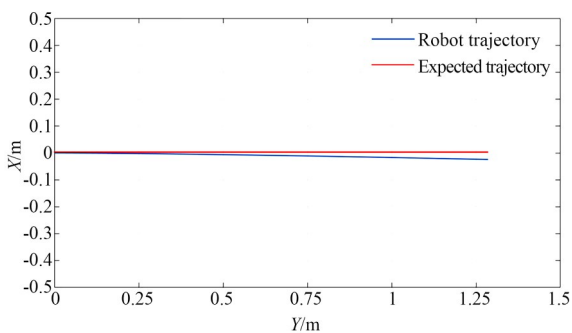


图 18 XY 平面运动轨迹

Fig. 18 XY planar motion trajectory

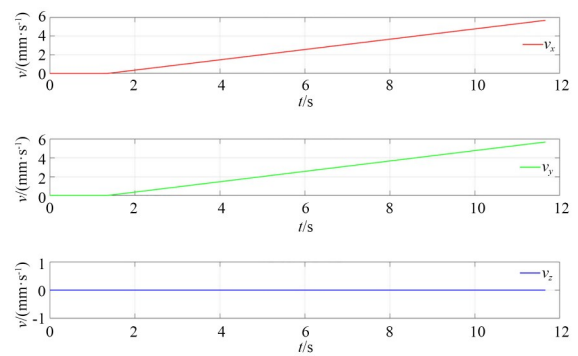


图 19 三轴速度随时间的变化

Fig. 19 Variation of three-axis velocity with time

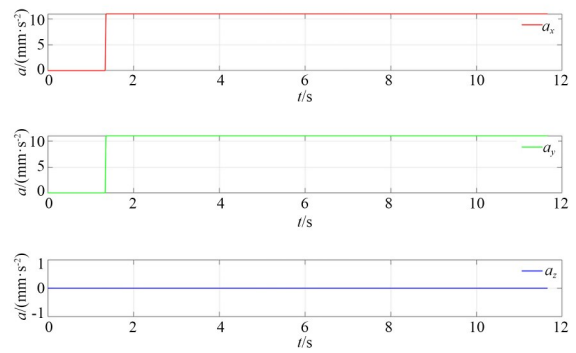


图 20 三轴加速度与时间变化

Fig. 20 Variation of three-axis acceleration with time

时间变化的情况。由图可见,机器人在静水环境下未产生垂直方向(Z轴)的运动,其Z轴速度与加速度始终保持为零。此外,X轴与Y轴的速度在推进器启动后呈匀速变化,两者合成矢量形成推力,推动机器人前进。从加速度与时间图看,X轴与Y轴的加速度仅发生了一次突变,即推进器启动时产生瞬时推力,随后推力保持稳定,表明机器人在水下的推进力较为稳定。

4.4 子机器人水下运动实验

图 21 展示了子机器人在水池中的运动过程。第 1 s,子机器人位于水池前端,稍微偏向左,推进器开始工作,可以观察到子机器人尾部喷出的水

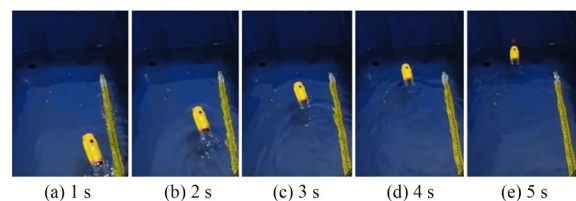


图 21 子机器人直线运动实验

Fig. 21 Sub-robot straight-line motion experiment

流。机器人开始产生向前的推力,并伴随一定的偏转角度。第 2 s,子机器人继续向前推进,明显向前移动了一段距离。尾部喷射流增强,说明推进器提供了持续推力。第 3 s,子机器人已接近水池中央,周围流场进一步扩大。第 4 s,机器人偏斜角度较小,并接近水池终点,螺旋桨停止旋转,周围水流扰动开始消散,但尾部水流扰动仍然清晰可见。第 5 s,子机器人处于静止状态。

从图 22 可以看出,机器人轨迹整体偏离目标轨迹。在 X 轴方向,机器人轨迹始终偏向 X 值较小一侧;而在 Y 轴方向上,机器人轨迹存在波动,不够平滑。从时间节点分布看,红色点之间的间距不均匀,说明机器人在不同位置的运动速度存在变化。结合误差图 23 分析,在 $Y = 1.4\text{ m}$ 至 $Y = 1.8\text{ m}$ 内,机器人轨迹出现向左弯曲,偏离目标轨迹;在接近终点时,即 Y 值接近 1.7 m 位置,机器人轨迹又向右偏离目标轨迹。误差图显示,机器人轨迹误差在 $-0.30\sim 0.30\text{ m}$ 之间波动,最大正值误差约为 0.15 m ,最大负值误差为 -0.15 m 。实验数据表明,机器人运动轨迹与目标轨迹存在一定误差,需要进一步优化控制算法以提高轨迹跟踪精度。

图 24 展示了子机器人的速度和加速度随时间的变化情况。从速度与时间变化图中可以看到,速度在第 1 s 为 26.86 cm/s ,随后在第 2 s 达

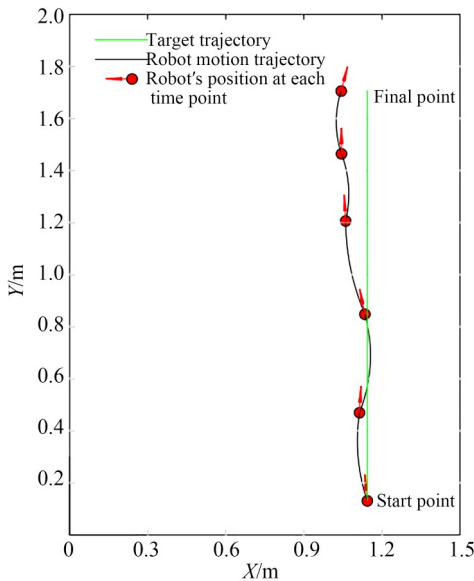


图 22 XY 平面运动轨迹

Fig. 22 XY planar motion trajectory

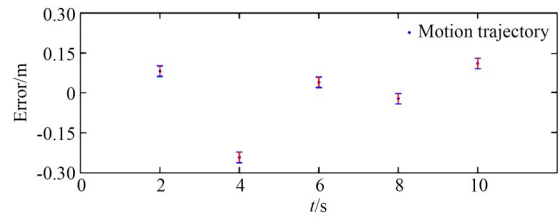


图 23 子机器人位移误差随时间的变化

Fig. 23 Variation of displacement error with time

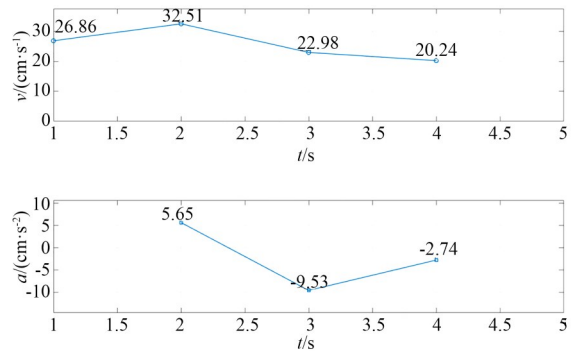


图 24 速度和加速度随时间的变化

Fig. 24 Variation of velocity and acceleration with time

到最大值 32.51 cm/s ,并在第 3 s 略有下降。第 4 s 降至 20.24 cm/s ,表明子机器人停止前进,但仍有向前运动的惯性。从加速度与时间变化图看,在第 2 s 为正值 5.65 cm/s^2 ,表示速度正在加速;到了第 3 s,加速度开始变小,表明加速的速率减缓。第 4 s,加速度值为 -9.53 cm/s^2 ,出现了负值,说明此时机器人正在减速,加速度依然是负值,机器人在缓慢减速。

相较于球形机器人,子机器人采用流线型的外壳设计,并依靠螺旋桨推进器实现运动。由于缺乏球形结构固有的流体稳定性,子机器人在水下的运动稳定性相对较低,易受到水流干扰,从而导致轨迹波动。此外,螺旋桨推进方式在产生较大推力的同时,也会引发较为剧烈的水动力扰动,尤其是在推进器尾部形成明显的湍流区域。图中清晰地显示出推进器后方的水流扩散较大,并且流场结构较为复杂,这表明该子机器人的推进效率较高,但同时伴随着较强的流体扰动效应。相较之下,球形机器人由于采用喷射式推进方式,水流扰动相对较小,流场分布更加均匀,因此在水下运动时能够保持较高的稳定性。

5 结 论

本文针对仿生两栖球形母机器人和子机器人进行结构设计,以提高传统机器人在水、陆两栖环境中的实用性和增强其完成复杂任务中的能力。首先介绍了子母机器人的组成;然后建立了仿生机械体的正运动学模型和多机器人运动控制模型;最后通过流体仿真和实验验证其设计的合理性。实验结果表明:母机器人能够按照预设的步态周期完成稳定的四足爬行运动,并在 20 s 内沿 Y 轴正方向前进约 60 cm;在水下实验中,母机器人在水池中的直线运动表现出良好的稳定性和控制精度。母机器人约在第 1.2 s 启动推进器后开始向前运动,并持续到第 9 s。在运动过程中,机器人保持接近直线轨迹,速度与加速

度变化较为平稳,X轴与Y轴的加速度约在 1.2 s 突变后趋于稳定,表明推进力稳定且没有出现明显的扰动;子机器人在水池中的轨迹存在波动,不够平滑,速度在第 2 s 达到最大值 26.86 cm/s,随后有所下降,到第 4 s 减速至 20.24 cm/s。加速度分析显示,第 2 s 加速度为 5.65 cm/s²,表明机器人加速,而在第 4 s 减速至 -9.53 cm/s²。机器人运动轨迹与目标轨迹存在一定误差,需要进一步优化控制算法以提高轨迹跟踪精度。

作者贡献声明:

于慧:机器人设计,论文构思和撰写;
马宇科:实验设计及数据整理与分析;
郑亮:论文审核与编辑;
汪俊杰:实验数据整理。

参考文献:

- [1] 王雪兵,吴庆祥,王奕轩,等. 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]. 工程科学学报, 2024, 46(9): 1594-1603.
WANG X B, WU Q X, WANG Y X, et al. Structure design, kinematic modeling, and motion planning of novel ray-inspired amphibious robots [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(9): 1594-1603. (in Chinese)
- [2] 卢明,袁玥,吴政睿,等. 仿海鬣蜥水陆两栖机器人系统设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(15): 26-34.
LU M, YUAN Y, WU ZH R, et al. System design of bionic marine iguanas amphibious robot [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(15): 26-34. (in Chinese)
- [3] 冯创新,蒋建平,白宏磊,等. 仿生鳄鱼游动推进机制动力学分析[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 63(1): 113-120.
FENG C X, JIANG J P, BAI H L, et al. Dynamical analysis of propulsive mechanism of bionic crocodile swimming in water [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2024, 63(1): 113-120. (in Chinese)
- [4] 肖杰康,黄永欣,林镇炜,等. 基于线翎电鳗运动模式的水陆两栖机器人设计[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(1): 89-92.
XIAO J K, HUANG Y X, LIN ZH W, et al. Design of amphibious robot based on the motion mode of electric eels [J]. *Mechanical Research & Application*, 2021, 34(1): 89-92. (in Chinese)
- [5] 张金鹏. 水下球形机器人BYSQ3的姿态控制和路径规划研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2018.
ZHANG J P. *Research on Attitude Control and Path Planning of the Underwater Spherical Robot BYSQ3* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [6] 冯巍,杨洋,周静. 小型两栖机器人推进机构设计与水动力学分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(11): 1325-1327, 1372.
FENG W, YANG Y, ZHOU J. Design and hydrodynamics analysis of the propulsive mechanism of a small amphibious robot [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 25(11): 1325-1327, 1372. (in Chinese)
- [7] 侯康,孙汉旭,贾庆轩. 球—轮复合可变形机器人的结构设计与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 25-31.
HOU K, SUN H X, JIA Q X. Structure design and analysis of a transformable spherical-wheel robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15): 25-31. (in Chinese)
- [8] 何彦霖,董明利,孙广开,等. 复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 219-226.
HE Y L, DONG M L, SUN G K, et al. Study on small-scaled amphibious robot with compound driv-

- ing mechanism and its underwater motion control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1): 219-226. (in Chinese)
- [9] XING H M, SHI L W, HOU X H, *et al.* Design, modeling and control of a miniature bio-inspired amphibious spherical robot [J]. *Mechatronics*, 2021, 77: 102574.
- [10] ZHENG L, GUO S X, PIAO Y, *et al.* Collaboration and task planning of turtle-inspired multiple amphibious spherical robots [J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 71.
- [11] ZHENG L, MA Y K, YU H, *et al.* Multicooperation of Turtle-inspired amphibious spherical robots [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 2932.
- [12] HOU X H, GUO S X, SHI L W, *et al.* Hydrodynamic analysis-based modeling and experimental verification of a new water-jet thruster for an amphibious spherical robot [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 259.
- [13] 郭书祥, 石立伟. 多功能两栖生物型子母机器人系统研究[J]. *科技导报*, 2015, 33(21): 64-71.
GUO SH X, SHI L W. Study on an amphibious biomimetic father-son robot system with multi-functions[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(21): 64-71. (in Chinese)
- [14] 郭书祥, 孙珊, 郭健. 新型仿生水下子母机器人系统设计[J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 1004-1010.
GUO SH X, SUN SH, GUO J. Design of a novel biomimetic underwater mother-son robot system [J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1004-1010. (in Chinese)
- [15] 何彦霖, 祝连庆, 孙广开, 等. 小型两栖球形机器人陆地运动建模及实验分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 100-108.
HE Y L, ZHU L Q, SUN G K, *et al.* Study on on-land kinematic modeling and experiment of small-scaled amphibious spherical robot [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 100-108. (in Chinese)
- [16] 何彦霖. 仿生小型两栖球形机器人结构设计及多机系统特性评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
HE Y L. *Study on Structure Design of Biomimetic Compact Amphibious Spherical Robot and Characteristics Evaluation of Multi-robot System*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 刘羽婷, 郭健, 孙珊, 等. 新型仿生球形两栖子母机器人系统设计[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(3): 582-588.
LIU Y T, GUO J, SUN SH, *et al.* Novel bionic spherical amphibious mother-son robot system design [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2019, 14(3): 582-588. (in Chinese)

作者简介:



于 慧(1999—),女,江苏连云港人,硕士研究生,2022年于重庆邮电大学获得学士学位,研究方向为两栖球形机器人与多机器人协作。E-mail: yuhuielsa@foxmail.com

通讯作者:



郑 亮(1982—),男,吉林吉林人,副教授,2006年、2010年于长春理工大学分别获得学士和硕士学位,2021年于日本高松香川大学获得博士学位,目前研究方向为两栖球形水下机器人和仿生机器人技术。E-mail: zhengliang@jlnku.edu.cn