DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210192

小型两栖仿龟机器人多模式运动研究

邢会明1,刘 畅1,郭书祥2,石立伟2,刘文智1,李海波1,赵 岩3

(1.哈尔滨工程大学智能科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2.北京理工大学生命学院工业和信息化部融合医工系统与健康工程重点实验室,北京 100081;
3.河北工业大学机械工程学院,天津 300401)

摘 要:针对浅滩环境和水下狭窄空间的科研考察、资源勘探等任务,提出一种"腿一多矢量喷水"复合驱动的小型两栖仿龟机器人。通过研究"腿一多矢量喷水"复合式驱动系统的运动机理,设计仿生爬行步态和旋转步态。根据"腿一多矢量喷水"复合驱动机构的变结构特性,提出"H"、"工"和"X"等多模式运动。通过机器人水中运动学建模,建立基于实时动态推力矢量分配优化机制的水中3维自主运动控制方法。最后搭建机器人原型机,陆地上的多地形运动实验验证了机器人在非结构化浅滩环境中的适应能力强,水中运动控制实验验证了两栖机器人多模式运动控制的灵活性和可行性。

关键词: 仿生机器人; 两栖机器人; 多模式运动; 步态设计 中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1002-0446(2022)-02-0212-12

Research on Multi-mode Motion of the Miniature Amphibious Turtle-inspired Robot

XING Huiming¹, LIU Chang¹, GUO Shuxiang², SHI Liwei², LIU Wenzhi¹, LI Haibo¹, ZHAO Yan³

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Convergence Medical Engineering System and Healthcare Technology,

The Ministry of Industry and Information Technology, School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: A miniature amphibious turtle-inspired robot driven by a legged, multi-vectored water-jet composite driving system is proposed for scientific investigation and resource exploration in shallow shoal environment and underwater narrow space. The movement mechanism of the proposed driving system is studied, and bionic crawling and rotation gaits are designed. According to the variable structure characteristics of the proposed driving mechanism, "H", "I" and "X" mode motion are proposed. By modeling the underwater kinematics, a three-dimensional underwater autonomous motion control method is established based on real-time dynamic thrust vector allocation and optimization mechanism. Finally, movement experiments on various terrains prove that the robot prototype has strong adaptability in unstructured shoal environment. Underwater motion control experiments verify the flexibility and feasibility of multi-mode motion.

Keywords: bio-inspired robot; amphibious robot; multi-mode motion; gait design

1 引言(Introduction)

近年来,各种自主两栖机器人得到研究人员广 泛关注。两栖机器人^[1-6]在陆地上和水下运动灵活, 被广泛应用于高风险任务,如污染检测、资源勘 探、环境监测、科研考察和人员搜救等。

两栖机器人分为仿生型和非仿生型两类,仿 生两栖机器人采用腿足式^[7-13]、游走式^[14-20]、轮桨 式^[21-24]、复合驱动式^[25-28]等推进方式。Kim 等^[8-9] 以蜥蜴为仿生原型设计了一种六足式两栖机器人, 其腿部采用连杆驱动机构,足端采用球式设计,在 陆地上和水面上的最大行走速度分别可达 0.77 m/s 和 0.48 m/s。张世武等^[11-12]用多关节变形鳍设计了 六足式两栖机器人 AmphiHex-I,在陆地上六足可 以通过变形(例如变形为驱动轮)驱动机器人行走 越障;在水中,鳍足可以通过往复摆动产生动力从 而进行划水运动。为提高机器人在陆地上和水中 的运动性能,张世武等^[13]采用新型变强度腿,在 陆地上和水中的最大运动速度分别可达 0.16 m/s 和 0.18 bl/s(body length per second,体长每秒)。腿足

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(3072021CFJ0401, 3072021CF0401);国家 863 计划(2015AA043202);国家自然科学基金 (61773064, 61503028);河北省博士后研究基金(B2020003020). 通信作者:邢会明, xinghuiming@hrbeu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2021-05-19/2021-11-05/2021-12-30

式两栖机器人具有较强的地形适应能力,但需要多 组驱动单元,每组单元需要设计较为复杂的传动机 构,增加了防水难度。为实现多组驱动单元协调运 动,需要利用复杂的中枢神经发生器进行控制。

游走式两栖机器人^[14]通过分节式机体的摆动 和短足实现两栖环境下游走。以蛇为仿生原型, Crespi等采用链式机体结构设计了两栖机器人 AmphiBot I^[15]和 AmphiBot II^[16],在陆地上爬行和水中 游动的最大速度分别可达 0.4 m/s 和 0.25 m/s。以火 蝾螈为仿生原型, Crespi等研制了两栖机器人 Salamandra Robotica I^[17]和 Salamandra Robotica II^[18], 在陆地上和水中的最大速度分别能达到 0.42 m/s 和 0.51 m/s。受火蜥蜴启发,Yin 等^[19]采用柔性关节 设计并研制了两栖机器人 Chigon,在陆地上采用 4 组机械腿爬行,机体后 3 个关节安装 3 组滚轮;在 水中,Chigon 采用蜿蜒游动方式。游走式两栖机器 人在水中运动性能较好,但是在碎石和泥地等环境 中,其蛇形的推进方式使其性能大大降低。

受陆地轮式车辆启发,研究人员将轮辐设计 成桨叶形结构,实现轮桨式驱动的两栖机器人设 计,如Whegs^[21]和SeaDog^[22]。Boxerbaum等^[21-22] 机器人以蟑螂等为仿生原型,采用多段式机体设 计,并且配有4或6组辐轮腿驱动机构,在陆地和 水底模拟蟑螂的多足运动进行爬行,具有较强的全 地形适应能力和越障能力;在水中借助辐轮的旋转 实现游动,并通过体关节的正反转动实现机器人的 上浮和下潜。轮桨式两栖机器人^[23]在陆地上具有 较强的运动能力,在水底爬行时机器人轮辐转动速 度较小,但是也会产生侧向力,易对机器人爬行方 向产生干扰。

为提高两栖机器人在不同环境的适应能力,研 究人员提出了复合驱动两栖机器人,即搭载2种 以上的驱动机构的两栖机器人。受鱼类和海豚的启 发,Ding等^[25]设计了一种轮足一鳍桨混合驱动的 多模态两栖机器人,采用多组模块化仿鱼关节和一 对胸鳍的复合驱动结构实现水下游动;在陆地上, 采用1组主动轮辐和1组被动轮实现陆面爬行。借 鉴青蛙运动机理,Yang等^[26]研发了一种两栖机器 人FroBot,在水中利用尾鳍开闭产生的前进推力进 行游动;在陆地上采用3组从动轮实现滑行,滑行 速度可达0.40 m/s。复合驱动两栖机器人配置2套 驱动机构,在一定程度上能弥补对方的不足,但是 在机械结构和控制方法上具有更高复杂度。2种驱 动机构的切换条件^[27-28]需要根据环境额外设计。

除了仿生两栖机器人,研究人员研制了非仿生

型机器人,如 LMAR^[29]和 SR^[30],大多采用履带 式驱动方式,速度达 0.5 m/s,用于两栖过渡环境水 雷探测等,对海滩环境具有良好的适应性能。但其 尺寸大、笨重,只能在较为平坦的地面运动,在有 障碍物环境和水中运动性能较差,大大限制了其应 用。

本文借鉴生物龟身体结构特点和运动方式,设 计一种具有高机动性、高隐蔽性、微型紧凑和多模 态运动等特点的仿生两栖球形机器人,如图1所 示。通过设计爬行和旋转步态,机器人在陆地上或 水底能进行步行运动;在水中,根据多矢量推进系 统特点,提出"H"、"工"和"X"型等多模式运 动。对"腿-多矢量喷水"复合驱动机构进行运动 学建模,并建立一种基于实时动态矢量分配机制的 水中3维自主运动控制方法,实现水中位置与姿态 的高精度控制。



小型两栖仿龟机器人(The miniature amphibious turtle-inspired robot)

2.1 机器人结构

受生物龟身体机构特点及运动方式启发,两栖 仿龟机器人采用紧凑式结构设计,如图2所示,球 壳采用上下舱式设计,上层为进水舱,下层为密封 舱。当机器人进入水域时,水可以从出水孔流出,有 效减小了零浮力下水中机器人的重量。双目相机和 水声通信模块位于进水舱内,通过进水舱壳与密封 舱固定。密封舱主要放置电路板和传感器等。密封 舱固定。密封舱主要放置电路板和传感器等。密封 舱下方为"腿-多矢量喷水"复合驱动机构,满足 机器人浅滩环境稳定爬行和水中高效推进的需求。 在4条机械腿中间为可拆卸式电池舱,其中1块 电池为控制部分供电,另外2块电池为动力部分供 电。

2.2 "腿一多矢量喷水"复合驱动机构

如图 3(a) 所示,"腿一多矢量喷水"复合驱动 机构^[1] 由 4 条机械腿组成,分别为左前腿(LF)、







driving mechanism 左后腿(LH)、右前腿(RF)及右后腿(RH),且 4条机械腿呈径向自由分布结构。在狭窄空间中具 有较好的原地旋转能力。如图3(b)所示,每条机械 腿由3个连杆、3个关节和1个喷水推进器组成。3 个连杆分别为"髋骨"、"股骨"和"胫骨"连杆;3 个活动关节分别为TC(thoraco-coxal)、CTr(coxatrochanteral)和FTi(femur-tibia)关节。TC关节连 接身体及髋骨,使腿可以向前或向后移动;CTr关

节连接髋骨和股骨,赋予腿升降功能; FTi 关节连

接股骨和胫骨,使胫骨伸展和弯曲。因此,每条腿 有3个自由度,分别由 TC 舵机、CTr 舵机及 FTi 舵 机驱动,喷水推进器在机械腿的末端。为减少 TC 舵机承受力,设计4段弧形辅助滑轨结构,每条滑 轨对应1条机械腿,在机械腿"髋骨"连杆上设计 2个轴承结构。TC 关节转动时带动"髋骨"连杆转 动,同时轴承在中间板和滑轨之间运动,有效避免 因机械腿过重造成的连杆变形,降低 TC 关节转动 的阻力,提高舵机使用寿命。

3 陆上运动学建模(On-land kinematic modeling)

3.1 陆上运动学建模

机器人本体坐标系如图 4(a) 所示,其原点位于 机器人本体几何中心处,与4条腿的 TC 关节在同 一平面。 $X_{\rm B}$ 、 $Y_{\rm B}$ 和 $Z_{\rm B}$ 轴分别指向向前方向、向右 方向和垂直向下方向。坐标系 { O_0^i } 为机器人腿部 基坐标系,*i*表示机械腿标号(1为LF,2为LH, 3为 RH,4为 RF)。坐标系 { O_1^i }、{ O_2^i }、{ O_3^i }和 { O_4^i }分别建立在 TC 关节、CTr 关节、FTi 关节和 足端上,如图 4(b) 所示。



Fig.4 Denavit-Hartenberg (D-H) model of the robot

215

以左前腿为例,表1列出了 D-H 模型参数。 θ_{j}^{i} 和 d_{j}^{i} 分别表示机械腿 i关节 j的角度和关节 j-1与 关节 j之间的距离; α_{j-1}^{i} 和 a_{j-1}^{i} 分别表示关节 j-1的扭转角和连杆 j-1的长度。机器人左前腿基坐 标系与足端的位姿变换矩阵表示为

$${}^{0}\boldsymbol{T}_{4}^{1} = \begin{bmatrix} c_{1}^{1}c_{23}^{1} & -c_{1}^{1}s_{23}^{1} & -s_{1}^{1} & c_{1}^{1}c_{23}^{1}a_{3} + c_{1}^{1}s_{23}^{1}d_{4} + \\ c_{1}^{1}s_{2}^{1}d_{3} + c_{1}^{1}a_{1} \\ s_{1}^{1}c_{23}^{1} & -s_{1}^{1}s_{23}^{1} & c_{1}^{1} & s_{1}^{1}c_{23}^{1}a_{3} + s_{1}^{1}s_{23}^{1}d_{4} + \\ s_{1}^{1}s_{23}^{1} & -s_{1}^{1}s_{23}^{1} & c_{1}^{1} & s_{1}^{1}s_{2}^{1}d_{3} + s_{1}^{1}a_{1} \\ -s_{23}^{1} & -c_{23}^{1} & 0 & -s_{23}^{1}a_{3} - c_{23}^{1}d_{4} + \\ c_{2}^{1}d_{3} + d_{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(1)$$

其中, $s_j^i = \sin \theta_j^i$, $c_j^i = \cos \theta_j^i$, $s_{jk}^i = \sin(\theta_j^i + \theta_k^i)$, $c_{jk}^i = \cos(\theta_j^i + \theta_k^i)$, i = 1, 2, 3, 4, j, k = 1, 2, 3, $a_1 =$ 97 cm, $a_3 = 33$ cm, $d_2 = 10$ cm, $d_3 = 60$ cm 和 $d_4 =$ 85 cm.

左前腿足端在坐标系 {O₀ⁱ} 中的位置为

$$\boldsymbol{p}^{1} = \begin{bmatrix} p_{x}^{1} \\ p_{y}^{1} \\ p_{z}^{1} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} (c_{1}^{1}c_{2}^{1}c_{3}^{1} - c_{1}^{1}s_{2}^{1}s_{3}^{1})a_{3} + (c_{1}^{1}c_{2}^{1}s_{3}^{1} + c_{1}^{1}s_{2}^{1}c_{3}^{1})d_{4} + \\ c_{1}^{1}s_{2}^{1}d_{3} + c_{1}^{1}a_{1} \\ (s_{1}^{1}c_{2}^{1}c_{3}^{1} - s_{1}^{1}s_{2}^{1}s_{3}^{1})a_{3} + (s_{1}^{1}c_{2}s_{3}^{1} + s_{1}^{1}s_{2}^{1}c_{3}^{1})d_{4} + \\ s_{1}^{1}s_{2}^{1}d_{3} + s_{1}^{1}a_{1} \\ -(s_{2}^{1}c_{3}^{1} + c_{2}^{1}s_{3}^{1})a_{3} + (c_{2}^{1}c_{3}^{1} - s_{2}^{1}s_{3}^{1})d_{4} + \\ c_{2}^{1}d_{3} + d_{2} \end{bmatrix}$$
(2)

表 1 左前腿 D-H 模型参数 Tab.1 D-H model parameters of LF

连杆 j	变量 $ heta_j^i$	$lpha_{j-1}^i$	a_{j-1}^i	d^i_j	变量范围 $ heta_j^i$
1	${oldsymbol{ heta}}_1^1(0)$	0	$a_0(0)$	d_2	$(0,\pi/2)$
2	$\theta_2^1(0)$	$-\pi/2$	a_1	0	$(-\pi/4,\pi/3)$
3	$\theta_3^1(0)$	0	$a_2(0)$	d_3	$(-\pi/6,\pi/2)$
4	0	0	a_3	d_4	0

同理,可获得另外3条机械腿的模型,正动力 学模型描述为

$${}^{\mathrm{B}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{toe}} = \mathrm{FK}(\boldsymbol{\theta}) \tag{3}$$

其中,FK 表示正动力学,为关节角度空间到笛卡 儿空间的映射。 逆运动学模型可以通过正运动学模型获得。通 过机器人足端位置计算机器人各关节角度为

$$\begin{cases} \theta_1^1 = \operatorname{atan} 2(p_y^1, p_x^1) \\ \theta_2^1 = \operatorname{atan} 2(m, n) - \operatorname{atan} 2\left(k, \pm \sqrt{m^2 + n^2 - k^2}\right) \\ \theta_3^1 = \operatorname{atan} 2(-a_3, d_4) - \operatorname{atan} 2\left(t, \pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - t^2}\right) \end{cases}$$

$$\tag{4}$$

其中, $n = p_z^1 - d_z$, $t = (m^2 + n^2 - a_3^2 - d_4^2 - d_3^2)/2d_3$, $m = c_1^1 p_x^1 + s_1^1 p_y^1 - a_1$, $k = -s_3^1 a_3 + c_3^1 d_4 + d_3$ 。

同理,可以获得 LH、RH 和 RF 机械腿的逆运 动学模型,描述为

$$\boldsymbol{\theta} = \mathrm{IK}(^{\mathrm{B}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{toe}}) \tag{5}$$

其中,IK 表示逆运动学,为笛卡儿空间到关节角度 空间的映射。

3.2 机器人步态设计

对于四足机器人,步态可以分为对称步态和 非对称步态。对称步态为二拍步态,如溜蹄步态、 对角小跑步态和疾驰步态。非对称步态为四拍步 态,如爬行步态。考虑到二拍步态的不稳定性和结 构的严重磨损,本文分析稳定的四拍步态。图 5(a) 中灰色条表示摆腿阶段,黑色条和蓝色条表示腿 处于支撑阶段,爬行步态中腿部摆动顺序依次为 "LH→LF→RH→RF"。每条腿一次完成"提-摆一落一撑"4个环节。为形象描述机器人爬行步 态,采用图 5(b)简化表示机器人在关键时刻的状 态。爬行过程中,总有3条或4条腿支撑身体。当 3条腿支撑身体时,3个落脚点构成一个钝角三角 形,机器人重心保持在三角形内,保持身体稳定。

4 水下动力学建模(Underwater dynamic modeling)

4.1 水动力学建模

如图 6 所示,大地固定坐标系 { $O_{\rm E}$ - $X_{\rm E}Y_{\rm E}Z_{\rm E}$ }为 一个标准参考坐标系,与时间、空间无关;机器人 本体坐标系 { $O_{\rm B}$ - $X_{\rm B}Y_{\rm B}Z_{\rm B}$ }是一个运动坐标系,机器 人的重心位置与本体坐标系的原点重合,机器人空 间位置和姿态角描述为 $\eta = [x,y,z,\phi,\theta,\psi]^{\rm T}$,x,y,z分别表示机器人在大地固定坐标系下的进退、横 移、升沉方向的位置; ϕ, θ, ψ 分别表示横倾角、纵 倾角和转艏角。 $v = [u,v,w,p,q,r]^{\rm T}$ 描述机器人的线 速度和角速度向量,其中u,v,w分别表示机器人进 退、横移和升沉运动的线速度,p,q,r分别表示机 器人横倾、纵倾和转艏运动的角速度。机器人位置 状态向量和速度状态向量描述为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \tag{6}$$

其中, **J** ∈ **R**^{6×6} 代表本体坐标系到大地固定坐标系的 变换矩阵。





横移

机器人结构高度对称,水下动力学模型^[6,31]为

 $\boldsymbol{M}\boldsymbol{\dot{\boldsymbol{v}}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\boldsymbol{v}})\boldsymbol{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\boldsymbol{v}})\boldsymbol{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{B}\boldsymbol{\tau}$ (7)

其中, $M \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ 代表质量惯性矩阵且满足 $M = M^{T} > 0$, $C(v) \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ 代表科里奥利力矩阵且满足 $C(v) = -C^{T}(v)$, $D(v) \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ 表示水动力阻尼矩阵, $g(\eta)$ 代表恢复力和力矩向量, $B\tau$ 为机器人驱动力 矩阵和力矩矩阵的乘积, B 代表推力分布矩阵。

4.2 推力和驱动力矩分析

如图 7(a) 所示,在水平面,每条机械腿由 TC 舵机驱动,绕 TC 关节转动。TC 关节轴与机器人几 何中心的水平距离为 *l*。为避免机器人两机械腿碰 撞,TC 关节转动约束区间为 $\theta_l \in [-\pi/4, \pi/4]$ rad。



(b) 单腿推力分析图 7 驱动系统推力分析示意图Fig.7 Diagram of driving system force analysis

机器人沿 X 轴和 Y 轴的推力分别为

$$\begin{cases} F_X = -F^1 s_1^1 c_{23}^1 + F^2 s_1^2 c_{23}^2 + F^3 s_1^3 c_{23}^3 - F^4 s_1^4 c_{23}^4 \\ F_Y = -F^1 c_1^1 c_{23}^1 + F^2 c_1^2 c_{23}^2 + F^3 c_1^3 c_{23}^3 - F^4 c_1^4 c_{23}^4 \end{cases}$$
(8)

机器人绕 Z 轴力矩为

$$T_{Z} = al[F^{1}(cs)_{1}^{1}c_{23}^{1} + F^{2}(cs)_{1}^{2}c_{23}^{2} + F^{3}(cs)_{1}^{3}c_{23}^{3} + F^{4}(cs)_{1}^{4}c_{23}^{4}]$$
(9)

其中, $(cs)_j^i = c_j^i - s_j^i$, i = 1, 2, 3, 4。

喷水推进器沿 Z 轴的推力分析如图 7(b) 所示, 机器人在 Z 轴的总推力为

$$F_Z = F^1 s_{23}^1 + F^2 s_{23}^2 + F^3 s_{23}^3 + F^4 s_{23}^4$$
(10)

机器人绕 X 轴和 Z 轴的力矩分别为

$$\begin{cases} T_X = al(-F^1 s_{23}^1 - F^2 s_{23}^2 + F^3 s_{23}^3 + F^4 s_{23}^4) \\ T_Y = al(-F^1 s_{23}^1 + F^2 s_{23}^2 + F^3 s_{23}^3 - F^4 s_{23}^4) \end{cases}$$
(11)

推力矩阵 $F_B = [F_X F_Y F_Z]^T$ 可表示为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}} = \boldsymbol{M}_{F} \boldsymbol{F}_{\mathrm{P}} \tag{12}$$

其中, $F_{P} = [F^{1} F^{2} F^{3} F^{4}]^{T}$ 为机器人推进器推力向量,且推力关系矩阵 M_{F} 为

$$\boldsymbol{M}_{\rm F} = \begin{bmatrix} -s_1^1 c_{23}^1 & s_1^2 c_{23}^2 & s_1^3 c_{23}^3 & -s_1^4 c_{23}^4 \\ c_1^1 c_{23}^1 & c_1^2 c_{23}^2 & -c_1^3 c_{23}^3 & -c_1^4 c_{23}^4 \\ s_{23}^1 & s_{23}^2 & s_{23}^3 & s_{23}^4 \end{bmatrix}$$
(13)

可得机器人驱动力矩矩阵:

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{B}} = al\boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}} \tag{14}$$

其中, $a = \sqrt{2}/2$,力矩关系矩阵 $M_{\rm T}$ 为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} -s_{23}^{1} & -s_{23}^{2} & s_{23}^{3} & s_{23}^{4} \\ -s_{23}^{1} & s_{23}^{2} & s_{23}^{3} & -s_{23}^{4} \\ (cs)_{1}^{1}c_{23}^{1} & -(cs)_{1}^{2}c_{23}^{2} & (cs)_{1}^{3}c_{23}^{3} & -(cs)_{1}^{4}c_{23}^{4} \end{bmatrix}$$
(15)

则可以得到机器人推力和力矩矩阵的积:

 $B \tau =$

$$\begin{bmatrix} s_{1}^{1}c_{23}^{1} & -s_{1}^{2}c_{23}^{2} & -s_{1}^{3}c_{23}^{3} & s_{1}^{4}c_{23}^{4} \\ -c_{1}^{1}c_{23}^{1} & -c_{1}^{2}c_{23}^{2} & c_{1}^{3}c_{23}^{3} & c_{1}^{4}c_{23}^{4} \\ s_{23}^{1} & s_{23}^{2} & s_{23}^{3} & s_{23}^{4} \\ -als_{23}^{1} & -als_{23}^{2} & als_{23}^{3} & als_{23}^{4} \\ -als_{23}^{1} & als_{23}^{2} & als_{23}^{3} & -als_{23}^{4} \\ al(cs)_{1}^{1}c_{23}^{1} & -al(cs)_{1}^{2}c_{23}^{2} & al(cs)_{1}^{3}c_{23}^{3} & -al(cs)_{1}^{4}c_{23}^{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^{1} \\ F^{2} \\ F^{3} \\ F^{4} \end{bmatrix}$$
(16)

5 水下多模式运动(Multi-mode underwater motion)

Jin 等^[32]提出了一种切换运动控制策略来实现 水下机器人TTURT 的悬停控制。TTURT 机器人有 4 个可旋转式推进器,可调节推进器方向。然而推 进器倾斜角度并没有采用连续倾斜旋转模式,而 是直接旋转 0°或者 90°,分别对应水平模式和垂直 模式。2 种模式间存在一个切换时间,易造成控制 误差。因此,本文提出一种实时动态推力矢量合成 控制策略。由于 TC 关节的实时转动,机器人稳定 性下降。本文通过将 TC 关节锁定在不同角度,提 出了"H"、"工"和"X"3种运动模式,如图8所 示。在这3种模式下,TC 关节固定,CTr和FTi关 节实时转动。"H"和"工"模式可实现两栖机器人 快速长距离运动,"X"模式可实现两栖机器人近距 离高精度位置控制。

如图 8(a)(b) 所示,将机器人周围分成 4 个区域 I、II、III 和 IV。如果航位点位于 I 和 III 区域,则 采用"H"模式;若位于 II 和 IV 区域,则"H"模 式的机器人旋转角度会超过 45°,采用"工"模式 可有效减小机器人的旋转角度。图 8(c) 为"X"运 动模式示意图,通过实时调节推力、CTr 关节和 FTi 关节角度,机器人可以实现横移、纵移、下潜、上 浮和旋转运动。依次,本文提出基于多模式运动的 水下 3 维运动控制策略。如图 9 所示,"H"模式和 "工"模式分别实现 X-Z-Yaw PID 控制和 Y-Z-Yaw PID 控制,"X"模式实现 X-Y-Z PID 控制和 Y-Z-Yaw PID 控制,"X"模式实现 X-Y-Z PID 控制。根据期 望航位点 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ 和自身位置 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 计算 机器人运动方向 $\gamma = \arctan \frac{y_w - y_r}{x_w - x_r}$,并判断航位点 落在哪个区域,据此来切换机器人的运动模式。以 机器人自身的位置和姿态角为反馈,计算误差 e =



 $[x_w - x_r \ y_w - y_r \ z_w - z_r \ 0 \ 0 \ \gamma - \psi]^T$,采用并联 PID 算法实现位置和姿态角的闭环控制。PID 控制器输 出参考力 $F_B = [F_X \ F_Y \ F_Z]^T$ 和力矩 $T_B = [T_X \ T_Y \ T_Z]^T$, 采用实时动态推力解算策略,计算关节角度 θ_j^i 和 喷水推进器推力 F^i 。







5.1 "H"型运动模式

两栖机器人控制模型为强耦合系统,"H"型控制模型可分解为水平模型和垂直模型。水平模型包括进退和航向运动模型,垂直模型包括升沉运动模型。水平模型为

$$\begin{cases} F_X^1 - F_X^2 - F_X^3 + F_X^4 = F_X \\ alF_X^1 - alF_X^2 + alF_X^3 - alF_X^4 = T_Z \end{cases}$$
(17)

假设:为了保持机器人的推力平衡,需要保证 关系 $F_x^1 - F_x^3 = F_x^4 - F_x^2$ 成立。每个推进器的推力如下:

$$\begin{cases}
F_X^1 = T_Z/(2al) + F_X^4 \\
F_X^2 = -F_X/2 + F_X^4 \\
F_X^3 = (T_Z/(al) - F_X)/2 + F_X^4 \\
F_X^4 = F_X^4
\end{cases}$$
(18)

为了最小化推进器推力,先假设推力 F_X^4 为 0,则易得推进器在 X 轴的推力特解。将最小推力定义为 $F_{\min} = \min\{F_X^i\}$,则易得 X 轴上的推进器优化推力 f_X^i :

$$f_X^i = F_X^i - \min\{F_X^i\}$$
(19)

在垂直方向上,控制模型描述为

$$\begin{cases}
F_Z^1 + F_Z^2 + F_Z^3 + F_Z^4 = F_Z \\
-alF_Z^1 + alF_Z^2 + alF_Z^3 - alF_Z^4 = T_Y \\
-alF_Z^1 - alF_Z^2 + alF_Z^3 + alF_Z^4 = T_X
\end{cases}$$
(20)

推进器在 Z 轴上的推力为

$$\begin{cases}
F_Z^1 = (alF_z - T_Y)/(2al) - F_Z^4 \\
F_Z^2 = (T_Y - T_X)/(2al) + F_Z^4 \\
F_Z^3 = (alF_Z + T_X)/(2al) - F_Z^4 \\
F_Z^4 = F_Z^4
\end{cases}$$
(21)

 $F_Z^1 和 F_Z^3 随着 F_Z^4 增大而減小, F_Z^2 和 F_Z^4 随着 F_Z^4$ $增大而增大。 令 <math>\overline{F}_Z^1 = (alF_z - T_Y)/(2al), \ \overline{F}_Z^2 = (T_Y - T_X)/(2al), \ \overline{F}_Z^3 = (alF_Z + T_X)/(2al), \ 为了最小化$ $推进器, 推力 F_Z^4 定义为$

$$F_Z^4 = (\max\{\overline{F}_Z^1, \overline{F}_Z^3\} - \max\{\overline{F}_Z^2, 0\})/2 \qquad (22)$$

于是, 推进器在 Z 轴的优化推力为

$$\begin{cases} f_Z^1 = F_Z^1 - F_Z^4 \\ f_Z^2 = F_Z^2 + F_Z^4 \\ f_Z^3 = F_Z^2 - F_Z^4 \\ f_Z^4 = F_Z^4 \end{cases}$$
(23)

通过推进器 *i* 在 *X* 轴的推力 f_X^i 和 *Z* 轴的推力 f_Z^i , 推进器 *i* 的推力 F^i 初步计算为

$$F^{i} = \sqrt{(f_{X}^{i})^{2} + (f_{Z}^{i})^{2}}$$
(24)

与 FTi 关节相比, CTr 关节转动角度小, 故设 为定值, 保持髋骨连杆水平。则 FTi 关节角度 θ; 为

$$\theta_3^i = \arctan(f_Z^i / f_X^i) \tag{25}$$

由于受推进器的推力($0 \le F^i \le 2.4$ N, $F_{max} = 2.4$ N)和 FTi 关节的转动角度($-\pi/6 \le \theta_3^i \le \pi/2$, $\theta_{3\min} = -\pi/6$)限制,机器人 FTi 关节可能无法达到式(25)计算出的角度。因此,提出喷水推进器推力和机械腿关节角度优化机制:

步骤 1: FTi 关节角度优化

如果 min{ θ_3^i } < $\theta_{3\min}$,则可获得最小角度 θ_3^i 的 机械腿标号 *i* 并令 *m* = *i*。

令
$$d = \frac{J_Z^i}{\tan \theta_{3\min}} - f_X^m$$
, 计算推力 $f_X^i = f_X^i + d$ 和
 $F^i = \sqrt{(f_X^i)^2 + (f_Z^i)^2}$ 。
计算 FTi 关节角度 $\theta_3^i = \arctan \frac{f_Z^i}{f_X^i}$ 。
步骤 2: 喷水推进器推力优化
如果 max{ F^i } > F_{\max} ,则可获得最大推力的机
械腿标号 i 并令 $n = i$ 。
令 ratio = F_{\max}/F^n ,计算每个喷水推进器推力
 $F^i = F^i \times ratio$.

5.2 "X"型运动模式

"X"型运动控制模型同样分解为水平模型和 垂直模型。水平模型包括进退和横移运动模型,垂 直模型包括升沉运动模型。

如图7所示,水平方向上易得:

$$\begin{cases} (F_{\rm H}^2 + F_{\rm H}^3) - (F_{\rm H}^1 + F_{\rm H}^4) = \sqrt{2}F_X \\ (F_{\rm H}^3 + F_{\rm H}^4) - (F_{\rm H}^1 + F_{\rm H}^2) = \sqrt{2}F_Y \end{cases}$$
(26)

根据式 (26) 易得:

$$\begin{cases} F_{\rm H}^3 = (F_X + F_Y)/\sqrt{2} + F_{\rm H}^1 \\ F_{\rm H}^2 = (F_X + F_Y)/\sqrt{2} + F_{\rm H}^4 \end{cases}$$
(27)

若 $F_X + F_Y \ge 0$, 令 $F_{\mathrm{H}}^1 = 0 \perp F_{\mathrm{H}}^4 = 0$, 则有

$$\begin{cases} F_{\rm H}^3 = (F_X + F_Y)/\sqrt{2} \\ F_{\rm H}^2 = (F_X + F_Y)/\sqrt{2} \end{cases}$$
(28)

若 $F_X + F_Y < 0$, 令 $F_H^2 = 0$ 且 $F_H^3 = 0$, 则有

$$\begin{cases} F_{\rm H}^1 = -(F_X + F_Y)/\sqrt{2} \\ F_{\rm H}^4 = -(F_X + F_Y)/\sqrt{2} \end{cases}$$
(29)

在垂直方向上,为保证机器人不发生横倾和纵 倾现象,并且简化控制模型,则有

$$\begin{cases} F_Z = F_V^1 + F_V^2 + F_V^3 + F_V^4 \\ F_V^1 = F_V^2 = F_V^3 = F_V^4 \end{cases}$$
(30)

在水下"X"运动模式中,机器人 FTi 关节转 动范围 θ_3^i 为 $[-\pi/6,\pi/6]$ 。则有

$$F_{\rm H}^i = F_{\rm V}^i / \tan \theta_3 \tag{31}$$

为了减小机器人在沿垂直方向运动的过程中 产生的水平推力,令角度 θ_{3}^{i} 取最大值或者最小值, 则推进器产生的最小推力为 $\overline{F}_{H}^{i} = \frac{F_{V}^{i}}{\tan(\pi/3)}$ 或 $\overline{F}_{H}^{i} = \frac{F_{V}^{i}}{\tan(-\pi/3)}$,推进器产生的水平推力为 $\overline{F}_{H}^{i} + F_{H}^{i}$ 。然 后,重新规划FTi关节的转动角度 $\theta_{3}^{i} = \frac{F_{V}^{i}}{\overline{F}_{H}^{i} + F_{H}^{i}}$, 需要满足的条件为 $(F_{V}^{i})^{2} + (\overline{F}_{H}^{i} + F_{H}^{i})^{2} \leq (F^{i})^{2}$ 。

6 实验与分析(Experiments and analysis)

机器人样机如图 10 所示,样机技术参数如表 2 所示,在空气中重 6.5 kgf,由 12 台舵机和 4 台喷水推进器驱动,运行时间约 2 h。



(a) 爬行步态实验
 (b) 旋转步态实验
 图 10 爬行及旋转步态实验
 Fig.10 Crawling and rotation gait experiments

表 2 机器人原理样机技术参数表

 Tab.2
 Technical specification of the robot prototype

条目	参数			
尺寸(长×宽×高)	$30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$			
重量 (空气中)	6.5 kgf			
驱动电机	12 台舵机(8.4 V, 36 kgf·cm) 4 台喷水推进器(24 V, 最大推力 2.2 N)			
通信方式	水声通信,WiFi 通信			
电池	7.4 V 锂电池, 7000 mAh			
运行时间	约 2 h			

6.1 陆上运动实验

机器人爬行实验在实验室水平地面上进行。考虑腿部结构的约束,如腿部关节摆动角度和腿部 连杆长度方面的限制,可得最大步长为12 cm。在 该步长下,机器人可以稳定爬行。如图 10(a)所示, 爬行实验在实验室光滑地板上进行。考虑到机器人 关节驱动舵机的性能,将爬行步态周期设为 2.0 s、 2.3 s、2.6 s、2.9 s、3.2 s、3.5 s、3.5 s、3.8 s、4.1 s。 在不同周期下,仿真爬行速度如图 11 黑色实线所示。每个周期下进行 5 组实验并取平均值,从而 降低误差。通过记录时间和机器人爬行距离,计 算不同爬行周期下机器人爬行速度,如图 11 红色 实线所示。实验结果表明仿真速度与实际速度高 度一致。在周期为 2 s 时,机器人爬行速度最快为 6.05 cm/s。

图 10(b) 为机器人原地左转和右转实验,实验 中采用一个标有角度刻度的圆板记录机器人的转 动角度。通过记录机器人的转动时间,计算不同周 期下的旋转速度。如图 12 所示,将步态周期分别 设为 2.0 s、2.3 s、2.6 s、2.9 s、3.2 s、3.5 s、 3.8 s、4.1 s。黑色线为机器人仿真旋转速度,蓝色 线和红色线分别为原地右转和左转速度,仿真结果 和实验结果高度一致,但仿真速度比机器人实际速 度略大,主要原因为在机器人实际控制中存在四足 同时落到的短暂时刻,导致机器人实际速度略低。 在 0.5 Hz 步态频率下,机器人左转和右转的最大 转速高达 16.3 °/s。在该频率下,机器人旋转较为 稳定。当高于该频率时,机器人出现不稳定旋转现 象。





图 13 户外不同地形爬行实验图 Fig.13 Crawling experiments in various outdoor terrains

为验证机器人在多地形下的运动性能,本文进行了大量户外浅滩环境实验。如图 13 所示,机器 人分别在鹅卵石地面、树叶覆盖地面、草地、不平 整土路地面、水池池底及浅滩等 6 种地形上进行实 验。相比于实验室内,在户外地面机器人足端与地 面具有更大摩擦力,这使得机器人具有更大速度, 最大速度达到 6.5 cm/s,旋转速度高达 16.8 °/s。此 外,在池底也进行了爬行和旋转实验,由于浮力作 用,机器人摩擦力减小,最大速度和最大旋转速度 分别降至 4.5 cm/s 和 14.5 °/s。不同地形下的爬行和 旋转测试实验验证了机器人在非结构化地形上具有 较好的爬行性能。

6.2 水下单自由度控制实验

为验证机器人在水下的单自由度运动性能,依次进行航向控制和深度控制实验,控制方法采用 PID闭环控制。实验场地选在实验室3m×2m×1m 水池内,并假设实验过程中水为静态的。

首先,进行航向控制实验。航向角由 JY901 IMU (惯性测量单元)模块获取,该模块通过扩展 卡尔曼滤波可输出稳定角度数据。如图 14 所示, 本文采用"H"运动模式,通过左右推力差分的方 法,实现机器人航向控制。图 14 展示了机器人航 向控制实验过程。机器人初始角度为 21°,目标角 度为 100°。如图 15 所示,蓝色和红色实曲线分别 为机器人仿真和实际控制结果。在实际航向控制运 动过程中,受到水流等外界因素影响,机器人达到 稳定期望角度的时间比仿真长 3 s,且超调量也要高 6.5°。机器人在 9 s 才达到稳定且平均误差为 1.7°。 相比于两栖机器人 UX-1^[33]提高 0.3°。



机器人的下潜深度通过 MEMS(微机电系统) 压力传感器(MS5803-01BA)检测,由于传感器

为线性元器件,因此压力与深度呈线性关系。机 器人通过 IIC(集成电路总线)获取压力传感器数 据,频率为 25 Hz;并将实时深度值作为深度 PID 控制的反馈数据。在本实验中,机器人采用"X" 运动模式,机器人的运动过程如图 16 所示。机器 人开始时位于水面上,深度值为0cm,目标深度为 100 cm。如图 17 所示,蓝色和红色的实曲线分别为 仿真和实际深度控制结果,黑色虚线为目标深度。 与仿真结果相比,机器人达到稳定期望深度的时间 长 3.1 s, 主要是在深度控制时, 通过 FTi 关节的转 动来改变机器人模型。在8s后,机器人达到期望 深度,平均深度误差为1.44 cm。球形机器人UX-1 的深度控制精度为 0.93 cm, 比本文的两栖机器人 低 0.51 cm, 这主要是由于两栖机器人采用"X"运 动模式,FTi关节的实时转动存在延时。TTURT 机 器人^[32]采用4个实时倾斜的推进器驱动,其深度 控制精度为9cm。与其相比,本文的两栖机器人控 制精度提高 7.56 cm。



图 16 深度控制实验 Fig.16 Depth control experiment



6.3 水下3维航位点跟踪控制实验

3D 航位点跟踪控制中采用实时的动态推力 矢量分配策略。如图 18 所示,机器人的起始点为 (140 cm, 70 cm, -7 cm),依次运动到 4 个给定的目 标点 A(100, 175, -25)、B(260, 175, -25)、C(260, 50, -25) 和 D(100, 50, -25), 用蓝色实心点表示。 机器人开始采用"工"运动模式且航向角为0°。直 到距离下一个航位点小于 20 cm, 切换到"H"运动 模式。如图 18(b) 所示,机器人到达航位点 B,在 向下一个航位点 C 运动的过程中,常规机器人需要 进行 90° 航向控制,但是本文机器人将"H"运动 模式切换到"工"运动模式,即可避免大航向角度 变化,快速跟踪航位点。"H"和"工"运动模式的 切换策略能有效减少机器人到达航位点时航向控制 的时间。图 19(a) 展示了机器人跟踪 3 维航位点的 轨迹。蓝色和红色的实心点分别为开始点和4个预 设航位点。如图 19(b) 所示, 红色实线为 X 坐标, 蓝色曲线为 Y 坐标。图 19(c) 显示了 Z 坐标的变化。 图 19(d) 显示了横倾、纵倾和转艏角度的变化,横 倾和纵倾角度变化小,最大偏移角度为5°。航向 角偏移量稍大且最大为16°,远小于不采用该切换 策略时机器人的转动角度。模式变化如图 19(e) 所 示, "0"代表"H"运动模式, "1"代表"工"运 动模式。从实验结果可知,机器人具有较好的 3D 航位点跟踪控制性能。



图 18 3D 航位点跟踪控制实验 Fig.18 3D waypoints tracking control experiment

7 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于"腿-多矢量喷水"复合 驱动机构的小型两栖仿生球形机器人,通过复合驱 动机构运动机理研究,设计仿生爬行步态和旋转步 态。机器人复合驱动机构具有变结构特点,为此本 文提出"H"、"工"和"X"等多模式运动。建立机 器人水中运动学模型,并提出一种基于实时动态矢 量分配优化机制的水中3维自主运动控制方法。对 机器人原型机进行多地形运动实验,验证了机器人 在非结构化环境中的适应能力;水中运动实验验证 两栖机器人多模式运动的灵活性和可行性。该两栖 仿龟机器人在濒海浅滩两栖环境的资源勘探、环境 侦察等方面具有广泛的应用前景。



参考文献(References)

- 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[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26: 475-487.
- [2] Hou X H, Guo S X, Shi L W, et al. Hydrodynamic analysisbased modeling and experimental verification of a new waterjet thruster for an amphibious spherical robot[J]. Sensors, 2019, 19(2). DOI: 10.3390/s19020259.
- [3] Xing H M, Guo S X, Shi L W, et al. Hybrid locomotion evaluation for a novel amphibious spherical robot[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2). DOI: 10.3390/app8020156.
- [4] Xing H M, Guo S X, Shi L W, et al. Kalman filter-based navigation system for the amphibious spherical robot[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 638-643.
- [5] 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. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2021. 102574.
- [6] Hou X H, Guo S X, Shi L W, et al. Improved model predictivebased underwater trajectory tracking control for the biomimetic spherical robot under constraints[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22). DOI: 10.3390/app10228106.
- [7] Dudek G, Giguere P, Prahacs C, et al. AQUA: An amphibious autonomous robot[J]. Computer, 2007, 40(1): 46-53.
- [8] Kim H G, Lee D G, Jeong K M, et al. Water and ground-running robotic platform by repeated motion of six spherical footpads [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(1): 175-183.
- [9] Kim H G, Lee D G, Liu Y H, et al. Hexapedal robotic platform for amphibious locomotion on ground and water surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13: 39-47.
- [10] Vogel A R, Kaipa K N, Krummel G M, et al. Design of a compliance assisted quadrupedal amphibious robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 2378-2383.
- [11] Zhang S W, Zhou Y C, Xu M, et al. AmphiHex-I: Locomotory performance in amphibious environments with specially designed transformable flipper legs[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 23(3): 1720-1731.
- [12] Zhou Y C, Zhong B, Fang T, et al. Application of bio-inspired control of AmphiHex-I in detection of Oncomelania hupensis, the amphibious snail intermediate host of Schistosoma japonicum[J]. Industrial Robot, 2017, 44(3): 242-250.
- [13] Zhong B, Zhang S W, Xu M, et al. On a CPG-based hexapod robot: AmphiHex-II with variable stiffness legs[J]. IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 542-551.
- [14] 郁树梅,王明辉,马书根,等.水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和水下步态[J].机械工程学报,2012,48(10): 18-25.

Yu S M, Wang M H, Ma S G, et al. Development of an amphibious snake-like robot and its gaits on ground and in water[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 18-25.

[15] Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. AmphiBot I: An amphibious snake-like robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 50(5): 163-175.

- [16] Crespi A, Ijspeert A J. AmphiBot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator[C]//9th International Conference on Climbing and Walking Robots. Brussels, Belgium: EPFL, 2006: 19-27.
- [17] Crespi A, Ijspeert A J. Salamandra robotica: A biologically inspired amphibious robot that swims and walks[M]//Artificial Life Models in Hardware, Berlin, Germany: Springer. 2009: 35-64.
- [18] Crespi A, Karakasiliotis K, Guignard A, et al. Salamandra robotica II: An amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 308-320.
- [19] Yin X Y, Wang C W, Xie G M. A salamander-like amphibious robot: System and control design[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 956-961.
- [20] Schreiber D A, Richter F, Bilan A, et al. ARCSnake: An archimedes' screw-propelled, reconfigurable serpentine robot for complex environments[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 7029-7034.
- [21] Boxerbaum A S. A Whegs robot featuring a passively compliant, actively controlled body joint[D]. Cleveland, USA: Case Western Reserve University, 2010.
- [22] Klein M A, Boxerbaum A S, Quinn R D, et al. SeaDog: A rugged mobile robot for surf-zone applications[C]//4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1335-1340.
- [23] Al-Kubaisi A. An experimental comparative analysis of the performance of wheels and whegs[D]. Leeds, UK: University of Leeds, 2014.
- [24] Cohen A, Zarrouk D. The AmphiSTAR high speed amphibious sprawl tuned robot: Design and experiments[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 6411-6418.
- [25] Ding R, Yu J Z, Yang Q H, et al. Dynamic modelling of a CPGcontrolled amphibious biomimetic swimming robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(4). DOI: 10.5772/56059.
- [26] Yang Y, Zhou G, Zhang J Q, et al. Design, modeling and con-

trol of a novel amphibious robot with dual-swing-legs propulsion mechanism[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 559-566.

- [27] Yu J Z, Ding R, Yang Q H, et al. On a bio-inspired amphibious robot capable of multimodal motion[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2012, 17(6): 847-856.
- [28] Yang Y, Zhang J Q, Xu H, et al. Analysis of underwater locomotion and improvement of FroBot[C]//IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 633-638.
- [29] Consi T R, Ardaugh B R, Erdmann T R, et al. An amphibious robot for surf zone science and environmental monitoring[C]// OCEANS 2009. Piscataway, USA: IEEE, 2009. DOI: 10.23919/ OCEANS.2009.5422082.
- [30] Maity A, Majumder S, Roy D N. Amphibian subterranean robot for mine exploration[C]//International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 242-246.
- [31] Fernandez R A S, Miloševi Z, Dominguez S, et al. Motion control of underwater mine explorer robot UX-1: Field trials[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99782-99803.
- [32] Jin S, Kim J, Kim J, et al. Six-degree-of-freedom hovering control of an underwater robotic platform with four tilting thrusters via selective switching control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2370-2378.
- [33] Fernandez R A S, Parra R E A, Milosevic Z, et al. Design, modeling and control of a spherical autonomous underwater vehicle for mine exploration[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 1513-1519.

作者简介:

- 邢会明(1987-),男,博士,讲师。研究领域:仿生机器 人,两栖机器人,水下多机器人集群编队控制。
- 刘 畅(2002-),男,本科生。研究领域:仿生两栖机器 人,软体机器人。
- 郭书祥(1963-),男,博士,教授。研究领域:仿生两栖 机器人,血管介入机器人,康复机器人,胶囊机 器人。