

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311246

# 基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计\*

周敬淦, 张 军, 肖 毅, 宋爱国

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘 要:** 搜救机器人是重要的探测仪器平台。针对现有搜救机器人的刚性结构环境适应性差的问题, 本文提出一种基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计方法。本文首先进行了机器人的机构设计; 其次根据螃蟹运动实验结果设计了机器人的横向运动步态, 并通过仿真验证了步态设计的可行性; 再次设计了机器人的软硬件系统; 最后对机器人在多种地形下的行走能力进行了实验测试, 并开展了暗光环境适应性、人员探测和避障能力等功能测试实验。结果表明, 该体积小巧、控制简单的机器人可以实现基本的运动功能, 横向运动中最大速度约为 3.4 cm/s, 最小功耗约为 8.6 W, 转向运动的角度范围为 $\pm 90^\circ$ 。机器人具有良好的地形和环境适应性, 并可以完成环境感知和人员探测等搜救功能。

**关键词:** 刚柔耦合; 搜救机器人; 步态设计; 运动控制

中图分类号: TH73 TP242.6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Design of a search and rescue robot with crab-inspired rigid-flexible coupling mechanisms

Zhou Jingsong, Zhang Jun, Xiao Yi, Song Aiguo

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Search and rescue robots are important detection instrument platforms. To address the poor environmental adaptability of existing rigid-structured search and rescue robots, a design method for the search and rescue robot with crab-inspired rigid-flexible coupling mechanisms is proposed in this article. Firstly, the robot mechanisms are designed. Secondly, the lateral motion gaits of the robot are designed based on crab motion experiments, and the feasibility of the gait design is verified through simulations. Thirdly, the software and hardware systems of the robot are designed. Finally, experiments are implemented on the robot's walking ability on multiple terrains. Moreover, tests of functions, including dark light environment adaptability, human detection, and obstacle avoidance capabilities, are carried out. The results show that this small-sized robot with simple control can realize basic motion functions, the maximum velocity and the minimum power consumption of the robot during the lateral motion is about 3.4 cm/s and 8.6 W, and the angle range of the turning motion is  $\pm 90^\circ$ . Furthermore, the robot adapts well to different terrains and environments and can complete search and rescue functions like environment perception and human detection.

**Keywords:** rigid-flexible coupling; search and rescue robot; gait design; motion control

## 0 引 言

搜救机器人在灾后救援等领域有着重要的应用前景, 在灾害现场部署救援机器人有助于缩短响应时间和提高救援效率, 并使救援人员远离危险<sup>[1]</sup>。搜救机器人通常负责执行密闭空间与倒塌建筑中的环境信息采集和

幸存者定位等任务<sup>[2]</sup>, 有时也可以用于幸存者救援<sup>[3]</sup>。搜救机器人的实现主要以足式机器人、轮式机器人和履带式机器人等移动机器人作为载体。与轮式和履带式机器人相比, 足式机器人由于与人类及动物相似, 更适合在不同地形表面上运动<sup>[4]</sup>, 特别是沙地和岩石等非平整地形<sup>[5]</sup>。足式机器人作为现阶段移动机器人领域的研究热点<sup>[6]</sup>, 被广泛应用于人员搜寻和救援工作中。

收稿日期: 2023-03-31 Received Date: 2023-03-31

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61873066, 62173090)项目资助

足式机器人所面临的难题之一是如何在满足小体积和高柔顺性的情况下,尽可能保证机身的坚固性和一定程度的负载能力。对于纯刚性结构的机器人而言,虽然其可以承担较大重量的负载,但机身体积往往较为庞大,大量关节驱动所产生的能耗无法忽视<sup>[7]</sup>。纯柔性结构的机器人虽然体积较小且可以通过形状的改变适应多种复杂环境<sup>[8]</sup>,但其负载能力较差。因此大量足式机器人的设计采用刚性主体与柔性关节相结合的方式<sup>[9]</sup>,使其兼具刚性与柔性结构的优点。

在自然界中,大量生物进化出了高效的腿部运动模式<sup>[10]</sup>,能够在多样化的复杂地形中高速而稳定地运动。研究者根据这些动物的运动特点设计了多种仿生足式机器人,通过仿生学的方式拓宽了机械设计的局限性<sup>[11]</sup>。与传统足式机器人相比,仿生机器人较好地模拟了生物的运动特性和自适应性,具有更高的运动效率和优秀的运动性能。

蟹类是众多仿生多足机器人的设计原型之一。螃蟹经过亿万年的进化<sup>[12]</sup>,与哺乳动物和爬行动物等生物有着不同的肢体结构<sup>[13]</sup>,能够适应陆地和水下等不同种类的环境<sup>[14]</sup>,通过其特有的横向步态在不同地形间快速行走。以蟹类的肌肉骨骼系统作为范本所设计的刚柔耦合步足具有结构柔顺和控制简单的优点<sup>[15]</sup>,可以实现基本的步行运动功能。针对机器人步足单自由度所导致的运动效率和环境适应性较弱的问题,本文提出一种基于改进机构的搜救机器人设计方法。机器人每条步足包括直线驱动器驱动的柔顺关节和舵机驱动的刚性关节两个自由度,机身底部设有转向机构,以提高机器人的运动灵活性和行走效率。基于刚柔耦合机构的机器人结构简单紧凑,具有柔顺的运动特性和简单的控制方法。

本文对搜救机器人单足及整体机构设计进行了研究,以中华绒螯蟹为仿生对象设计了机器人的运动步态并利用仿真平台完成了步态的初步验证。之后对机器人在不同地形下的多种运动能力以及机器人对各类环境的适应性和感知能力进行了实验测试。机器人在满足柔顺性和自适应性的同时,也具备多种传感器的搭载能力,能够应用于各类救援场景中。

## 1 刚柔耦合机构设计

### 1.1 单足机构设计

如图1所示,所设计的机器人单足机构包括由直线驱动器提供直线驱动的柔顺关节<sup>[16]</sup>和由数字舵机提供旋转驱动的刚性关节两个自由度。其中柔顺关节由主节块、末节块、弹簧钢片和扭转弹簧4部分组成。当直线驱动器推杆伸缩时,弹簧钢片和扭转弹簧产生的弹

性形变驱使主节块与之作协同旋转运动。刚性关节包括舵机臂和足端,当安装在末节块上的数字舵机齿轮转动时,舵机臂带动足端进行旋转运动。通过柔顺关节和刚性关节的配合,可以实现单足机构在低自由度下较大的运动范围。

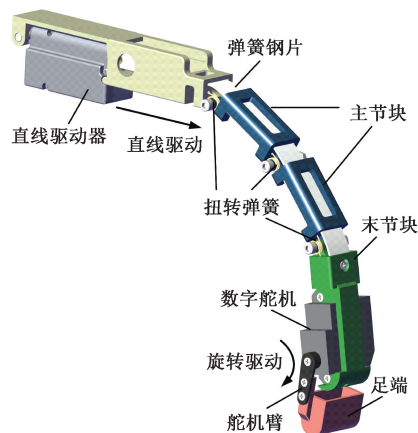


图1 机器人单足设计

Fig. 1 Robot leg design

### 1.2 机器人机构设计

如图2所示,所设计的搜救机器人由机体、八条单足和转向机构组成。机器人坐标系以机体中心为原点,采用右手坐标系,绕 $x$ 轴、 $y$ 轴及 $z$ 轴分别为横滚角 $\gamma$ 、俯仰角 $\theta$ 及航向角 $\psi$ 。机器人单足的4个关节角分别为 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 和 $\theta_4$ 。左侧四步足依次为L1、L2、L3和L4步足,其中L1和L2、L3和L4步足分别采用相同结构设计,L1和L4步足采用关于 $xoz$ 平面对称的结构设计;右侧四步足依次为R1、R2、R3和R4步足,分别采用与L1、L2、L3和L4步足关于 $yoz$ 平面对称的结构设计。转向机构安装于机体底部,包括舵机和转向盘。

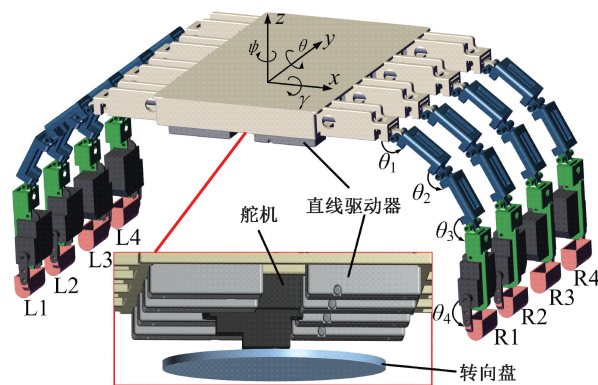


图2 机器人机构设计

Fig. 2 Robot mechanical design

## 2 运动步态设计

### 2.1 中华绒螯蟹运动实验

为了探究螃蟹的运动模式,开展了中华绒螯蟹运动实验分析。实验样本为14只大小重量相近的中华绒螯蟹,样本的最大头胸甲宽度为  $55.59 \pm 1.86$  mm,重量为  $289.42 \pm 6.01$  g。通过3台高速相机(帧率240 fps,分辨率1 920×1 080)对每只螃蟹进行5次以上完整拍摄,随后从中筛选出包含至少3个完整步态周期的40个视频段。图3所示为中华绒螯蟹一个完整步态的运动序列,朝运动方向一侧为引导侧,反方向为跟随侧,L1~L4表示引导侧的4条步足,T1~T4表示跟随侧的4条步足。

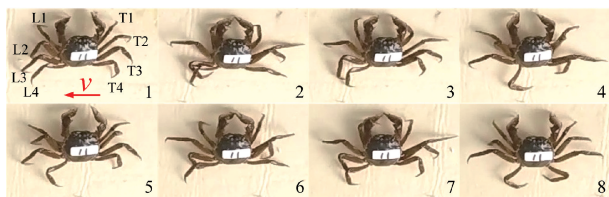


图3 中华绒螯蟹运动序列

Fig. 3 Motion sequences of the Chinese mitten crab

### 2.2 中华绒螯蟹步态分析

对实验视频进行逐帧分析,通过绘制步态相位图的方式对中华绒螯蟹的运动过程进行步态模式分析,提取运动规律<sup>[15]</sup>。步态相位图中黑色块代表支撑相,白色块代表摆动相,L1~L4分别表示引导侧四足,T1~T4分别表示跟随侧四足。根据螃蟹运动视频的统计学分析结果,并综合考虑步态与机器人机械结构的适配性,设计了T步态和Z步态两种典型步态(如图4所示)作为机器人运动的参考步态。

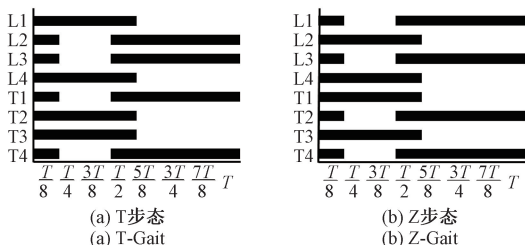


图4 典型步态相位图

Fig. 4 Phase diagrams of typical gaits

## 3 运动仿真实验

### 3.1 单足运动参数辨识

机器人单足为刚柔耦合设计,为了减小实物与仿真间的差异,通过Tracker视频分析软件对单足运动视频进

行逐帧分析并提取各关节位置,建立了直线驱动器推杆位移与关节角度间的关系函数。直线驱动器推杆的运动范围为0~20 mm,而根据单足运动的实际测试结果,推杆在4~18 mm范围内变化时即可满足单足运动范围的设计要求。设机器人单足3个关节角分别为 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 和 $\theta_3$ ,单足运动过程中各关节角度变化及其拟合曲线如图5所示。

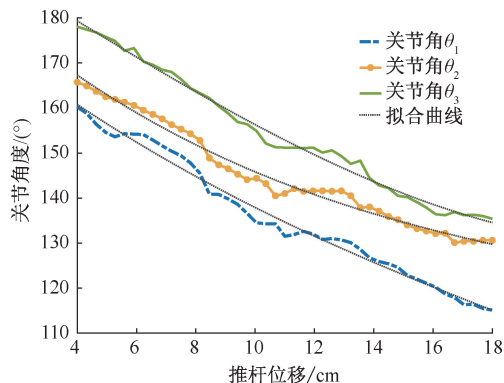


图5 机器人单足关节角度变化

Fig. 5 Joint angle changes of the robot leg

根据三次多项式函数拟合结果,关节角 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 与推杆位移 $d$ 间的关系函数如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = -0.002 \ 0d^3 + 0.134 \ 4d^2 - 5.374 \ 6d + 180.258 \ 2 \\ \theta_2 = -0.003 \ 3d^3 + 0.217 \ 0d^2 - 6.105 \ 8d + 188.458 \ 4 \\ \theta_3 = 0.003 \ 0d^3 - 0.017 \ 6d^2 - 4.064 \ 5d + 195.672 \ 5 \end{cases} \quad (1)$$

### 3.2 运动仿真实验

根据式(1)将步态周期内推杆位移变化转换为关节角度变化,由于8条步足柔顺关节的转动原理相同,因此可以将单足柔顺关节各角度函数应用于机器人各足,对于各足刚性关节角度则根据仿真结果进行调节。设步足L1、L2、R1和R2各关节角分别为 $[\alpha_{11} \ \alpha_{12} \ \alpha_{13} \ \alpha_{14}]$ 、 $[\alpha_{21} \ \alpha_{22} \ \alpha_{23} \ \alpha_{24}]$ 、 $[\beta_{11} \ \beta_{12} \ \beta_{13} \ \beta_{14}]$ 和 $[\beta_{21} \ \beta_{22} \ \beta_{23} \ \beta_{24}]$ ,L3、L4、R3和R4步足各关节角分别与L2、L1、R2和R1步足各关节角相同。单个步态周期内机器人各步足关节角仿真参数如图6所示。

将所设8个步足的关节角参数分别转换为step函数导入RecurDyn仿真软件<sup>[17]</sup>中作为机器人各关节的驱动函数,所得到的步足末端轨迹如图7所示。其中L1和L4步足、L2和L3步足、R1和R4步足及R2和R3步足的末端轨迹分别相同。由步足末端轨迹图可知,机器人运动过程中各步足均可形成闭环轨迹。

如图8所示为机器人横向运动的RecurDyn仿真实验结果。机器人沿三轴方向位移如图8(a)所示,机器人

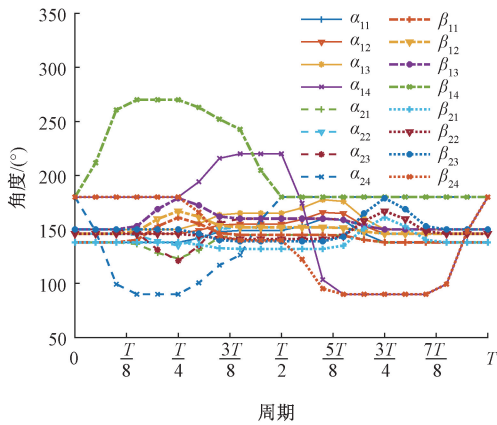


图6 各步足关节角仿真参数

Fig. 6 Simulation parameters of joint angles for robot legs

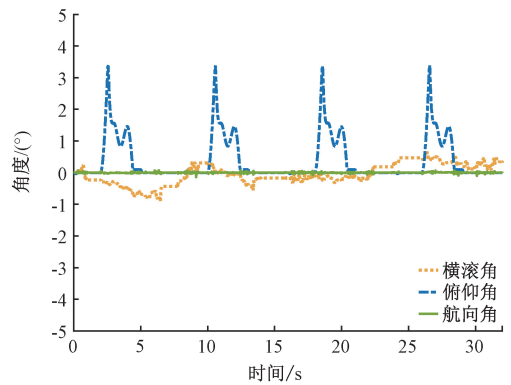
(b) 机器人姿态角  
(b) Attitude angles of the robot

图8 机器人横向运动仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the robot's lateral motion

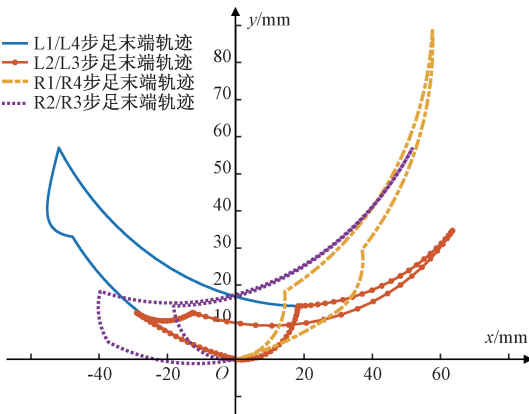
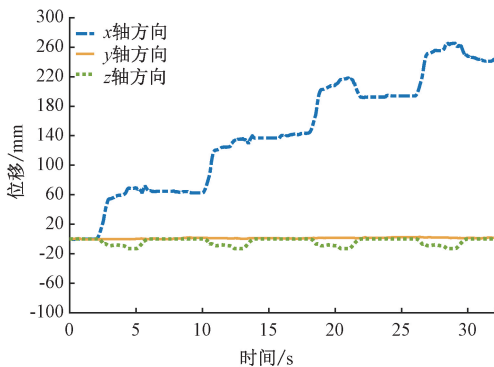


图7 机器人步足末端轨迹

Fig. 7 Robot foot-end trajectories

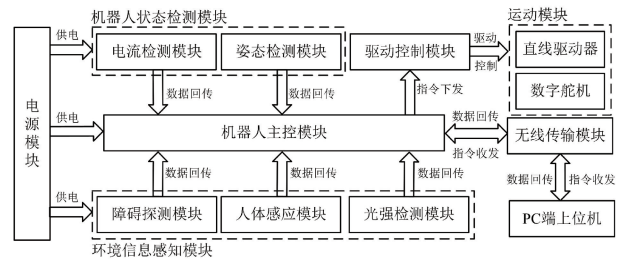
沿  $x$  和  $z$  轴方向均产生周期性位移,而沿  $y$  轴方向位移稳定在原点附近。机器人姿态角变化如图 8(b) 所示,其中俯仰角曲线的波形变化周期与机器人步态周期一致,横滚角在  $\pm 1^\circ$  范围内波动,而航向角总体变化趋于稳定。机器人运动仿真实验结果表明,机器人在所设计步态下可以实现横向运动且运动较为平稳。

(a) 机器人三轴方向位移  
(a) Three-axis displacements of the robot

## 4 机器人系统设计

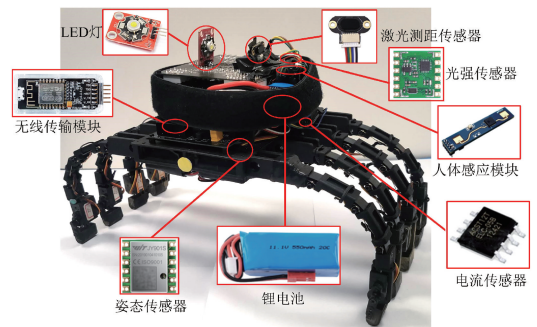
### 4.1 硬件系统设计

如图 9(a) 所示,机器人硬件系统包括电源模块、机器人主控模块、机器人状态检测模块、环境信息感知模块、运动模块、PC 端上位机驱动控制模块和无线传输模块。电源模块选用锂电池 (11.1 V, 550 mAh) 供电。机器人主控模块选用 STM32F103C8T6 作为微控制单元 (microcontroller unit, MCU), 完成步态表和控制程序的存储。驱动控制模块通过 PCA9685 芯片输出多路 PWM 波



(a) 硬件系统框图

(a) Framework of the hardware system



(b) 硬件模块安装示意图

(b) Hardware module installation

图9 机器人硬件系统设计

Fig. 9 Design of the robot hardware system

为运动模块提供驱动,并利用继电器控制电路通断。在机器人状态检测模块中,电流检测模块选用 ACS712 芯片采集电流数据,姿态检测模块选用 JY901 传感器采集三轴姿态角、加速度及角速度数据。在环境信息感知模块中,障碍探测模块选用 VL53L0 激光测距传感器,人体感应模块选用 LD2410B 毫米波雷达,光强检测模块选用 BH1750 光强传感器。无线传输模块选用 ESP32-WROOM-32 芯片与 PC 端建立 WiFi 和蓝牙双模无线通信,完成传感器数据和控制指令的传输。各硬件模块的安装如图 9(b)所示,机身平台分为两层,人体感应模块、激光测距传感器、光强传感器和 LED 灯等安装于上层,锂电池、姿态传感器、电流传感器和无线传输模块等安装于下层。

#### 4.2 控制方法设计

机器人的自由度由直线驱动器驱动的柔顺关节及数字舵机驱动的刚性关节产生,因此机器人运动控制的核心在于直线驱动器和数字舵机的控制。在 MCU 中存储有各类运动步态的步态表,根据接收到的上位机指令进行步态模式的转换。通过 MCU 控制直线驱动器的伸缩和数字舵机的旋转,改变机器人各步足的运动,从而实现机器人整体运动模式的变化。

为了增加机器人运动过程中足端与地面接触的平滑程度以提高运动的稳定性,在直线驱动器伸缩过程中采用余弦函数作为驱动函数,如图 10 所示。

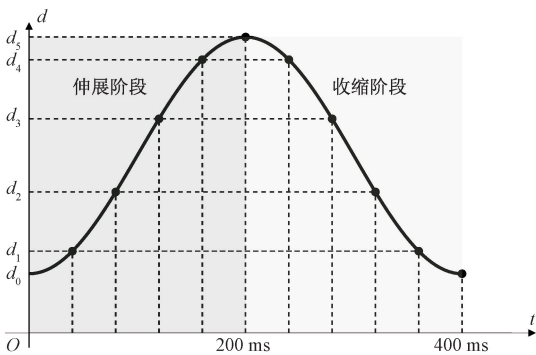


图 10 直线驱动器伸展及收缩阶段驱动函数

Fig. 10 Drive functions of linear actuator during extension and contraction phases

推杆伸展阶段及收缩阶段的总时长各为 200 ms,每个阶段各均分为 5 小段。设推杆初始位置为  $D_0$ ,结束位置为  $D_1$ ,则推杆在每小段节点处的位置  $d_i$  为:

$$d_i = D_1 - \frac{D_1 - D_0}{2} \left( \cos\left(\frac{i\pi}{5}\right) + 1 \right), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

#### 4.3 机器人交互系统设计

机器人运动过程中需要进行多种运动状态的切换并对传输数据进行实时显示和处理,机器人交互系统由 PC

端的上位机和机器人端的下位机共同组成。机器人端的下位机中存储有机器人各运动状态及步态模式的控制程序,在收到 PC 端上位机发送的状态调节和步态模式切换指令后,下位机完成对直线驱动器和舵机的控制,进而实现对机器人整体的运动控制。同时,下位机端将传感器采集的机器人状态信息及机身周围环境信息等数据实时发送至上位机,在 PC 端完成数据的动态显示、数据存储及后期处理。

如图 11 所示,机器人上位机包括串口模块、电机及舵机调节模块、运动控制模块、状态测试模块、机器人状态监测模块及环境信息检测模块。串口模块用于控制上位机与下位机间的数据收发。电机和舵机调节模块用于直线驱动器推杆长度和舵机旋转角度在限定范围内的调节。运动控制模块实现机器人运动状态及步态模式的切换。状态测试模块用于机器人横向和转向运动过程中的分步测试。机器人状态监测模块用于显示电流、三轴姿态角、加速度及角速度等数据的实时变化及数据曲线。环境信息检测模块完成障碍物信息、人员信息和光强信息等环境信息的实时显示。

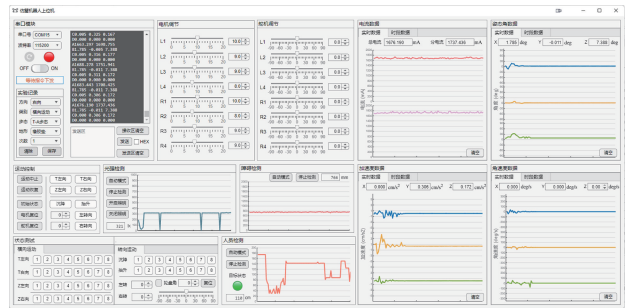


图 11 上位机控制软件界面

Fig. 11 PC control software interface

## 5 实验研究

### 5.1 横向运动实验

将机器人横向运动的单个周期分为 8 个阶段,所绘制的机器人步态设计图如图 12(a)所示。根据步态设计图在静止条件下分别调节各状态中的电机推杆长度和舵机旋转角度,使机器人步足关节调整到最优角度。之后在单地形下开展多次重复实验,对机器人的横向运动能力进行测试。选用橡胶垫作为实验场地,向机器人左侧和右侧两个方向各进行 10 次横向运动实验,每次实验均包含 4 个以上完整的步态周期。如图 12(b)所示为机器人向右进行横向运动时单周期内的运动视频序列。单周期内各状态的立体步态设计图与机身实际姿态的对比结果表明,机器人的横向运动步态较为理想,实际运动情况满足设计要求。

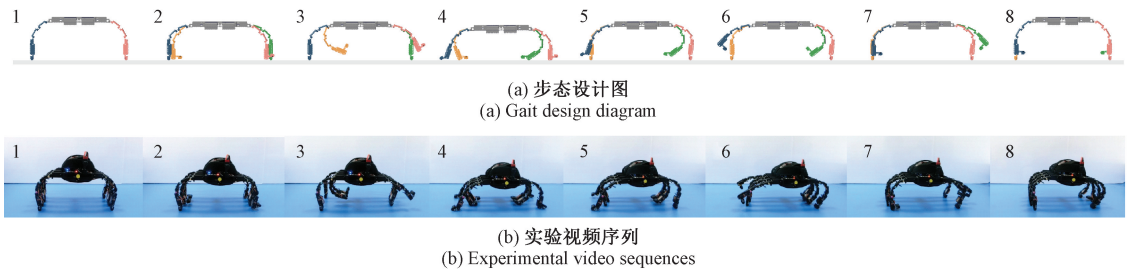


图 12 机器人横向运动步态设计图及实验视频序列  
Fig. 12 Gait design diagram and experimental video sequences of the robot's lateral motion

如图 13 所示为机器人横向运动实验结果。机器人运动过程中三轴姿态角的变化情况如图 13(a) 所示,其中横滚角有一定波动但总体趋势趋于稳定,俯仰角存在周期性变化且与机器人周期性步态设计相一致,而航向角的波动范围最小,三轴姿态角的变化规律与仿真实验

基本相同。机器人运动过程中三轴加速度的变化如图 13(b) 所示,三轴的加速度数值在一定范围内合理变化。机器人在横向运动中身体姿态及加速度的变化反映了机器人运动的稳定性,结果表明,在实际测试中机器人的横向运动较为平稳。

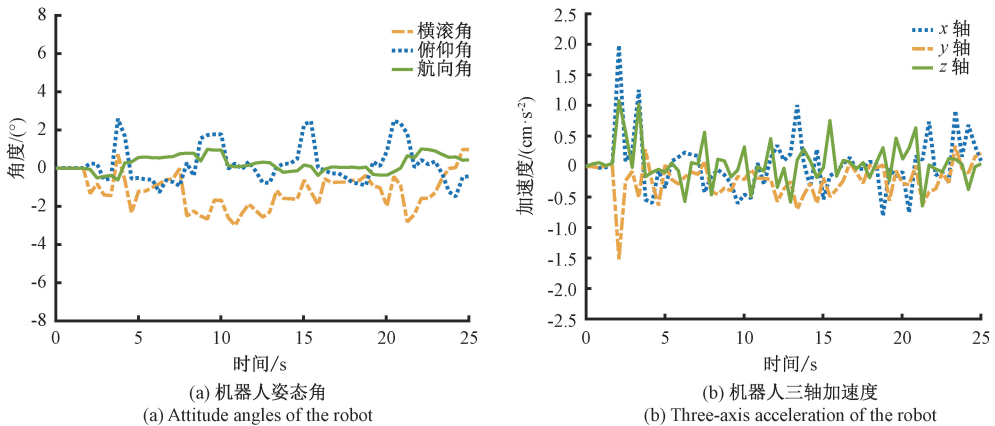


图 13 机器人横向运动实验结果  
Fig. 13 Experimental results of the robot's lateral motion

## 5.2 转向运动实验

足式机器人的转向运动多采用改变步态法,即机器人在直线步态的基础上通过改变步幅和步频等参数来实现转向<sup>[18]</sup>。机器人的转向方式又可分为原地转向和弯道转向<sup>[19-20]</sup>,前者主要应用于机器人在静止状态下或狭窄空间内的转向运动,而后者适用于机器人避障或在空旷场地的转向运动。在搜救机器人的应用场景中,运动空间通常较为狭窄且对反应时间有较高要求<sup>[21]</sup>,而原地转向能够实现更短的耗时和更好的角度控制,因此采用原地转向法实现机器人的转向运动。

如图 14 所示,机器人的转向运动分为 3 个阶段,即转向前的机身沉降阶段、机身转向阶段及转向后的机身抬升阶段。其中机身沉降和机身抬升阶段各由 8 个状态组成,通过机器人各步足的弯曲及足端与地面间的作用力实现机身高度的变化。由于机器人单足仅可实现  $yo\bar{z}$  平面内的摆动而缺少  $xoy$  平面内的自由度,机身转向阶

段主要依靠机器人底部的转向盘与地面间的摩擦力实现机器人绕  $z$  轴  $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围内的旋转。

转向实验的实验场地与横向运动相同,机身沉降阶段及抬升阶段各进行 10 次重复实验,机身转向阶段进行  $-90^{\circ} \sim 0^{\circ}$  范围内及  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围内各 10 次重复实验,每次实验中的角度增量为  $1^{\circ}$ 。结果表明,机器人通过机身状态的切换可以较好地完成转向运动。

## 5.3 平整地形运动测试实验

搜救机器人的应用环境通常较为复杂,因此需要在不同地形下测试机器人的运动能力。首先在平整地形下开展运动实验,根据橡胶垫表面粗糙程度,另外选取摩擦力数值较大的草皮纸和摩擦力较小的木地板两种材质搭建实验场地。在 3 种地形下对机器人左向和右向的横向运动各做 3 组实验,每组实验包含 3 个步态周期。如图 15 所示为机器人向右作横向运动过程中沿  $x$  轴方向的位移,机器人在 3 种地形下均可完成 3 个步态周期的

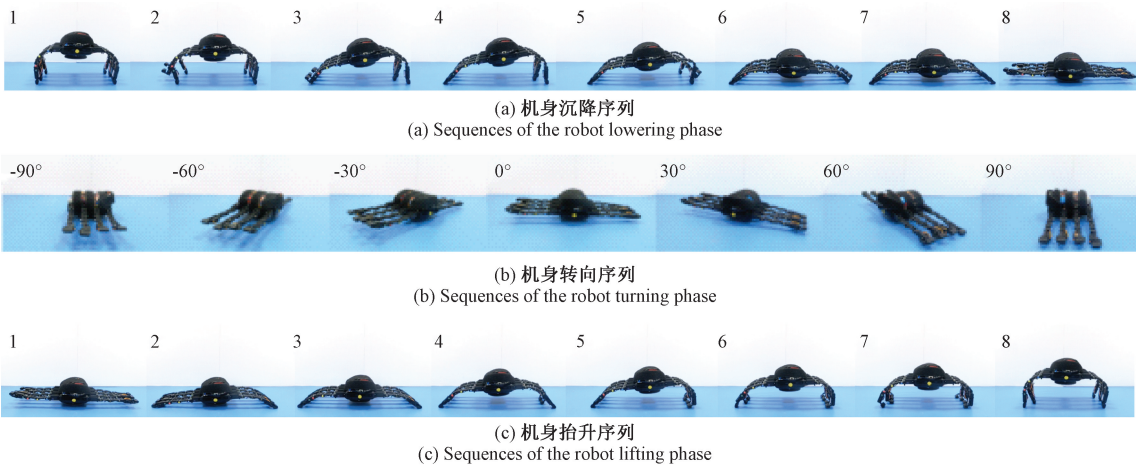


图 14 机器人转向运动实验视频序列

Fig. 14 Video sequences of the robot's turning motion experiment

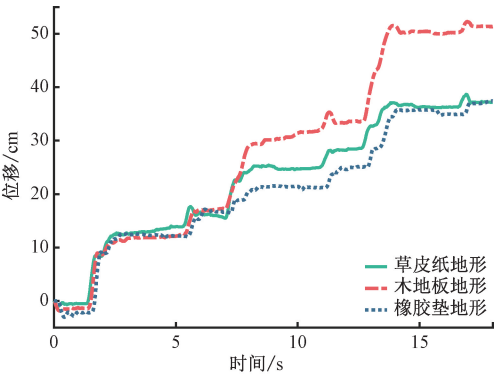


图 15 机器人各地形运动位移

Fig. 15 Displacement of the robot on various terrains

横向运动。实验过程中机器人的最大速度约为 3.4 cm/s,最小功耗约为 8.6 W。

对于搜救机器人而言,能量效率是一个较为重要的评价指标。单位距离能耗 (cost of transport, COT) 是一个无量纲指标,被广泛用于多足机器人系统能量效率的评定<sup>[22]</sup>,也称为比电阻 (specific resistance, SR)<sup>[23-24]</sup>。COT 的定义如式 (3) 所示:

$$\text{COT} = \frac{P'}{mgv'} \quad (3)$$

其中,  $P'$  表示机器人运动过程中消耗的平均功率,  $v'$  表示机器人运动过程中的平均速度,  $m$  为机器人的总质量。如表 1 所示为机器人在 3 种地形下的速度、功率及 COT 均值。实验结果表明,在运动速度方面,机器人在木地板上运动最快,在橡胶垫上运动最慢;在功率消耗方面,机器人在草皮纸上功耗最低,在橡胶垫上功耗最高;在能量效率方面,机器人在木地板上运动的能量效率最高,在橡胶垫上运动的能量效率最低。

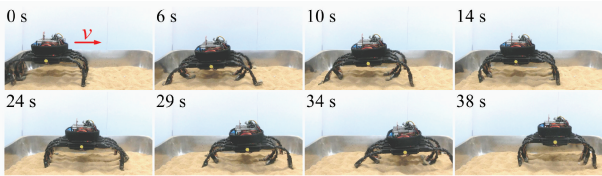
表 1 机器人各地形下速度、功率及单位距离能耗 (COT)

Table 1 Speed, power, and cost of transport (COT) of the robot on various terrains

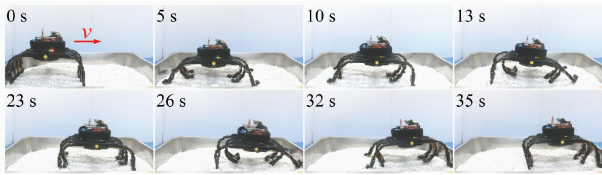
| 地形种类 | 速度均值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 功率均值/W | COT 均值 |
|------|----------------------------------------|--------|--------|
| 草皮纸  | 2.490                                  | 9.153  | 0.571  |
| 木地板  | 3.213                                  | 9.491  | 0.457  |
| 橡胶垫  | 2.093                                  | 9.777  | 0.727  |

5.4 崎岖地形运动测试实验

搜救机器人不仅需要具备在平整地形下的运动能力,还需适应多种复杂不平的地面。在实验室条件下,根据材质颗粒的大小用细沙、碎石和石块 3 种材料搭建实验地形,对机器人在崎岖地形上的运动进行测试。如图 16 所示为机器人在 3 种地形下运动的视频序列。结果表明机器人在复杂地形上仍可以完成横向行走,具有一定的环境自适应性。



(a) 细沙地形  
(a) Sand terrain



(b) 碎石地形  
(b) Gravel terrain

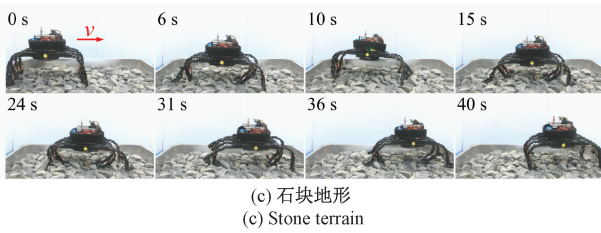
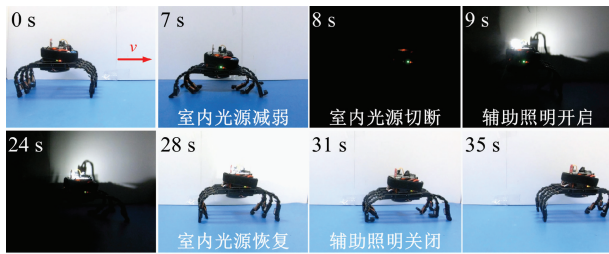


图 16 机器人崎岖地形运动视频序列

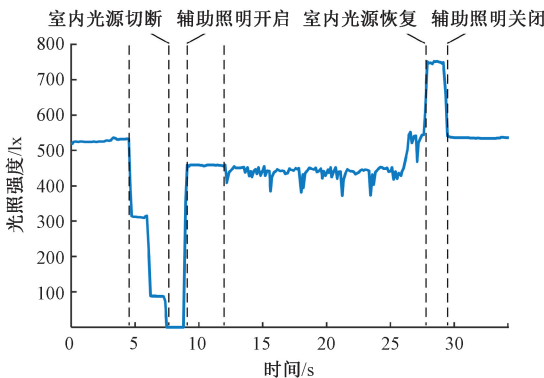
Fig. 16 Video sequences of the robot motion on rough terrains

### 5.5 暗光环境自适应性测试实验

在灾害事故发生后,由于建筑物的倒塌和损坏,现场多为较复杂的暗光环境。因此搜救机器人需要具备恶劣光照条件下的作业能力。首先使机器人在室内照明条件下运动,之后切断室内光源以测试机器人对暗光环境的自适应性,最后恢复室内光源。如图 17 所示为实验视频序列和光强传感器数据。在光强传感器检测到环境光照减弱后,机器人停止运动并自动开启机身 LED 灯作为辅助照明,之后继续在室内光源切断的暗光环境下向前运动。当室内光源恢复后,机器人的辅助照明自动关闭。实验结果表明机器人在暗光环境下仍可实现正常行走,对于废墟和隧道等恶劣光照环境具有一定的自适应性。



(a) 实验视频序列  
(a) Experimental video sequences



(b) 光照强度数据  
(b) Light intensity data

图 17 暗光环境自适应性测试实验

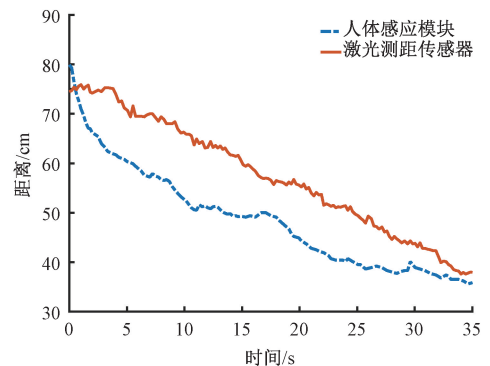
Fig. 17 Experiment of dark light environment adaptability

### 5.6 人员感知能力测试实验

人员感知能力是机器人的各项搜救功能中较为重要的一项,及时探测被困人员有助于物资投送和人员施救等后续行动。搜救机器人搭载的人体感应模块可以通过毫米波雷达识别出运动和静止状态下的人体并计算出目标的距离信息。为了进一步验证机器人的人员感知能力,实验人员固定站立于机器人右侧并使机器人朝人员方向运动,在运动过程中通过激光测距传感器和人体感应模块同时采集距离信息。如图 18(a)所示为实验视频序列,如图 18(b)所示为两种传感器采集的距离数据。通过两组数据对比可知,人体感应模块与激光测距传感器相比测距精度较差,但在机器人朝人员运动过程中可以检测到人员距离变化,搭载人体感应模块的机器人可以用于被困人员的感知。



(a) 实验视频序列  
(a) Experimental video sequences



(b) 人体感应模块及激光测距传感器数据  
(b) Data of human detection module and laser ranging sensor

图 18 人员感知能力测试实验

Fig. 18 Experiment of human detection ability test

### 5.7 避障能力测试实验

在工作场景下机器人需要快速检测障碍并完成避障运动<sup>[25]</sup>,因此需要对搜救机器人的避障能力进行实验测试。如图 19(a)所示为机器人在运动过程中检测到障碍物后进行转向避障并恢复横向运动的全部过程,如图 19(b)所示为机器人避障过程中的运动轨迹。结果表明,机器人在运动时可以探测到行进方向上的障碍物并及时完成避障。

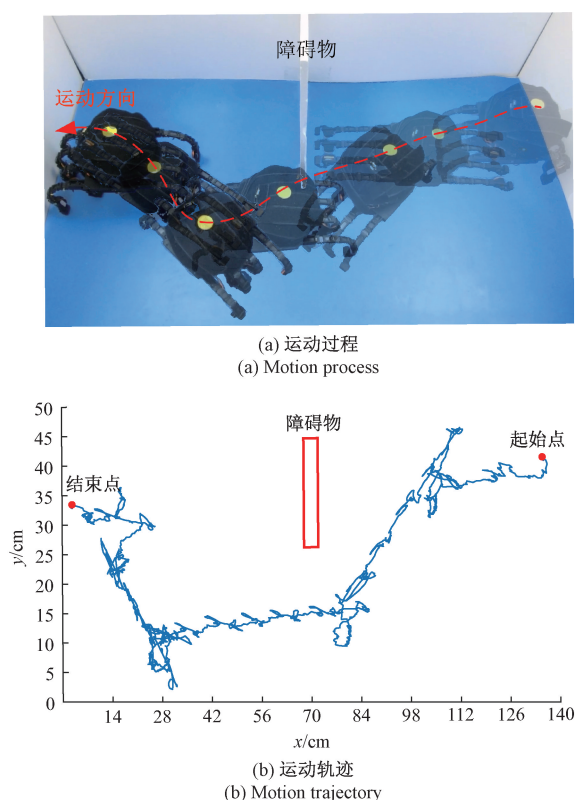


图19 机器人避障运动过程及运动轨迹

Fig. 19 Motion process and motion trajectory of robot obstacle avoidance

## 6 结 论

本文提出一种基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计方法,设计了机器人的刚柔耦合机构和仿蟹运动步态,开展了机器人运动仿真、样机系统设计和实验研究。基于 RecurDyn 软件仿真优化了机器人的步态参数,验证了其横向运动较好的稳定性。对所实现的搜救机器人样机进行了大量的实验测试,包括平整地形的横向和转向运动等基本功能测试,崎岖地面的运动适应性测试,以及暗光环境适应性、人员感知能力和避障能力测试。实验结果表明,机器人对不同地形和环境有较好的适应性,能够实现环境感知和人员探测等功能。本文所设计的搜救机器人具有体积小、结构紧凑和控制简单等优点,有望应用于复杂的灾后救援等场景。

## 参考文献

[1] PHUENGSIK R, SUTHAKORN J. A study on risk assessment for improving reliability of rescue robots[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2016: 667-672.

[2] LI F, HOU S, BU C, et al. Rescue robots for the urban earthquake environment [J]. Disaster Medicine and

Public Health Preparedness, 2023, 17: e181.

[3] PETINAUX B, MACINTYRE A G, BARBERA J A. Confined space medicine and the medical management of complex rescues: A case series [J]. Disaster Medicine and Public Health Preparedness, 2014, 8(1): 20-29.

[4] HE J, GAO F. Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 1-30.

[5] CHEN Y, CLIFTON G, GRAF N M, et al. Optimal planar leg geometry in robots and crabs for idealized rocky terrain [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2022, 17(6): 066009.

[6] 李佳钰, 黄启霖, 尤波, 等. 基于力估计与切换控制的六足机器人三边遥操作 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 253-264.

LI J Y, HUANG Q L, YOU B, et al. Trilateral teleoperation of hexapod robot based on force estimation and switching control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 253-264.

[7] ZHAI S, JIN B, CHENG Y. Mechanical design and gait optimization of hydraulic hexapod robot based on energy conservation [J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3884.

[8] AHMED F, WAQAS M, JAWED B, et al. Decade of bio-inspired soft robots: A review [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(7): 073002.

[9] KAJITA S, ESPIAU B. Legged robot [M]. Springer: Springer Handbook of Robotics, 2008: 361-389.

[10] BISWAL P, MOHANTY P K. Development of quadruped walking robots: A review [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 2017-2031.

[11] SCARFOGLIERO U, STEFANINI C, DARIO P. The use of compliant joints and elastic energy storage in bio-inspired legged robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 580-590.

[12] WATSON-ZINK V M. Making the grade: Physiological adaptations to terrestrial environments in decapod crabs [J]. Arthropod Structure & Development, 2021, 64: 101089.

[13] CHEN X, WANG L, YE X, et al. Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crablike robot [J]. Mechatronics, 2013, 23(4): 429-444.

[14] GRAF N M, GREZMAK J E, DALTORIO K A. Get a grip: Inward dactyl motions improve efficiency of sideways-walking gait for an amphibious crab-like robot [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2022, 17(6): 066008.

- [15] ZHANG J, LIU Q, ZHOU J, et al. Crab-inspired compliant leg design method for adaptive locomotion of a multi-legged robot [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022, 17(2): 025001.
- [16] LIU Q, ZHANG J, LI X, et al. A rigid and flexible structures coupled underactuated hand[C]. 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2022: 1587-1592.
- [17] 刘义,徐恺. RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.  
LIU Y, XU K. Basic application and improvement of recurdyn multi-body dynamics simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [18] HONG Z, LI B, ZHANG H, et al. A turning gait generation approach for quadruped robot based on trotting gait[C]. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016: 6068-6073.
- [19] WEI Z, SONG G, SUN H, et al. Turning strategies for the bounding quadruped robot with an active spine[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2018, DOI: 10.1108/ir-06-2018-0119.
- [20] 洪真,李彬,辛亚先,等. 三种基于对角小跑步态的四足机器人转弯运动生成方法比较[J]. 齐鲁工业大学学报, 2016, 30(5): 64-70.  
HONG ZH, LI B, XIN Y X, et al. Comparison of three kinds of turning generation methods based on diagonal trotting gait of quadruped robot [J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2016, 30(5): 64-70.
- [21] 胡胜海,赵晓丽. 搜救机器人运动机理分析与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 359-363.  
HU SH H, ZHAO X L. Movement mechanism and simulation analysis of searching and rescuing robot for earthquake[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(2): 359-363.
- [22] COLLINS S, RUINA A, TEDRAKE R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers [J]. *Science*, 2005, 307(5712): 1082-1085.
- [23] CHEN W H, LIN H S, LIN Y M, et al. TurboQuad: A novel leg-wheel transformable robot with smooth and fast behavioral transitions [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1025-1040.
- [24] YANG W S, LU W C, LIN P C. Legged robot running using a physics-data hybrid motion template [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1680-1695.
- [25] 谢赛宝,刘春阳,陈帆,等. 基于视觉的自主机器人障碍识别与路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 185-192.  
XIE S B, LIU CH Y, CHEN F, et al. Obstacle recognition and path planning method based on mobile

robot [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(12): 185-192.

## 作者简介



周敬淞, 2020 年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为仿生机器人。

E-mail: javinzhou@seu.edu.cn



**Zhou Jingsong** received his B.Sc. degree from Southeast University in 2020. He is currently a master student at Southeast University. His main research interest is bio-inspired robotics.

张军(通信作者), 2008 年于南京理工大学获得学士学位, 2013 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学副研究员, 主要研究方向为仿生机器人、康复机器人、深空探测机器人和医疗机器人等。

E-mail: j. zhang@seu.edu.cn

**Zhang Jun** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008, and received his Ph.D. degree from Southeast University in 2013. He is currently an associate professor at Southeast University. His main research interests include bio-inspired robotics, rehabilitation robotics, space robotics and medical robotics.



肖毅, 2018 年于常州工学院获得学士学位, 2021 年于陆军工程大学获得硕士学位, 现为东南大学博士研究生, 主要研究方向为仿生机器人、深空探测机器人和机器学习等。

E-mail: xiaoyi\_lgd@163.com

**Xiao Yi** received his B.Sc. degree from Changzhou Institute of Technology in 2018, and received his M.Sc. degree from Army Engineering University of PLA in 2021. He is currently pursuing his Ph.D. degree at Southeast University. His main research interests include bio-inspired robotics, space robotics and machine learning.



宋爱国, 分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、信号处理、遥操作技术等。

E-mail: a. g. song@seu.edu.cn

**Song Aiguo** received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, and received his Ph.D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Southeast University. His main research interests include robotic sensor and control, signal processing, teleoperation, etc.