

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.10.010

# 面向海滩环境监测的绳驱柔性骨骼仿生蟹机器人

陈晓明<sup>1,2</sup>, 陈大川<sup>1</sup>, 赵玉倩<sup>1</sup>, 李程<sup>3</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学秦皇岛分校 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; 3. 国网甘肃省电力公司天水供电公司, 甘肃 天水 741000)

**摘要:** 环境的污染给海洋生态带来的巨大变化会对人类的生活造成严重的影响, 研究仿生机器人实时监测海滩环境能够有效解决该问题. 因此, 提出了一种绳索驱动柔性骨骼仿生蟹机器人. 首先, 建立刚柔耦合模型研究柔性足端的运动规律. 其次, 研究基于手机应用程序(application, APP)的仿生蟹控制方法, 并实验研究仿生蟹机器人的响应特性和运动特性. 然后, 测试仿生蟹在多种沙滩上的越障能力, 并同时控制多只仿生蟹以测试手机APP的集群控制性能. 最后, 利用该机器人实现渤海湾6个海滩环境的监测, 并捕捉海滩环境图像和参数. 该仿生蟹机器人的研究为海滩环境监测提供了一种有效的方法.

**关键词:** 柔性骨骼; 绳索驱动; 仿生蟹机器人; 手机应用程序控制; 海滩环境监测

中图分类号: TP 242 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1443-09

## Cable-Driven Flexoskeleton Bionic Crab Robots for Beach Environmental Monitoring

CHEN Xiao-ming<sup>1,2</sup>, CHEN Da-chuan<sup>1</sup>, ZHAO Yu-qian<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>3</sup>

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. Tianshui Power Supply Company State Grid Gansu Electric Power Company, Tianshui 741000, China. Corresponding author: CHEN Xiao-ming, E-mail: chenxiaoming@neuq.edu.cn)

**Abstract:** Environmental pollution has brought great changes to the marine ecology and will have a serious impact on human life. Investigation of bionic robots to monitor the beach environment in real time can effectively solve this problem. Therefore, a cable-driven flexoskeleton bionic crab robot is proposed. Firstly, a rigid-flexible coupling model is established to study the motion law of the flexible foot end. Secondly, control method of the bionic crab based on a mobile phone application (APP) is studied, and the response characteristics and motion characteristics of the bionic crab robot are experimentally studied. Then, the obstacle-crossing ability of the bionic crab on various beaches is tested, and multiple bionic crabs are controlled simultaneously to test the cluster control performance of the mobile phone APP. Finally, the robot is used to monitor six beaches in Bohai Bay and capture beach environment images and parameters. The research on the bionic crab robot provides an effective method for beach monitoring.

**Key words:** flexoskeleton; cable-driven; bionic crab robot; mobile phone APP control; beach monitoring

海洋在人类的生活中发挥着重要作用, 如全球气候的调节、食物和氧气的供给<sup>[1-3]</sup>. 随着人类活动范围的不断扩大和工业的迅速发展, 环境的污染和气候的变化对海洋生态系统产生了较大

的负面影响<sup>[2-4]</sup>. 海滩监测仿生机器人能够完成地形图绘制、垃圾收集、环境监测等任务<sup>[5-8]</sup>. 研究海滩环境监测仿生机器人是解决上述问题的有效手段. 到目前为止, 多种用于海滩环境监测的机

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(A2022501004, F2020501040); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2223013).

作者简介: 陈晓明(1990-), 男, 河南郑州人, 东北大学秦皇岛分校讲师, 博士.

机器人相继被开发出来,具体包括腿式机器人<sup>[9]</sup>、轮腿混合机器人<sup>[10]</sup>、Atlas 机器人<sup>[11]</sup>、仿生蛇机器人<sup>[12]</sup>和仿生蟹机器人<sup>[13-14]</sup>等.在各种仿生机器人中,仿生蟹机器人因其强大的地形适应能力和越障能力在海滩环境监测方面具有较大的潜力<sup>[13]</sup>.传统的仿生蟹机器人通常涉及复杂笨重的机械系统<sup>[13]</sup>和繁重的组装工作<sup>[15]</sup>.例如,两栖仿生蟹机器人由固定框架电机、姿态调节电机、圆柱齿轮等部分组成<sup>[13]</sup>;六足机器人的每条腿有4个部分,3个近端部分由舵机驱动,远端部分由柔性末端执行器驱动<sup>[16]</sup>.这类仿生蟹机器人不仅涉及多电机的驱动和复杂系统的控制,而且其关节处部件组装和动力传输会产生棘手的维修困难<sup>[17]</sup>.金属仿生蟹机器人通常具有较大的惯性,且在调整其运动时需要耗费较大的能量和较长的时间<sup>[13,16,18]</sup>.此外,该类仿生蟹机器人不仅会造成大量的能量消耗,还会在海滩上留下明显的痕迹甚至沉入海滩中<sup>[13,18]</sup>.因此,非常有必要研究用于海滩监测的简单轻便仿生蟹机器人.

柔性骨骼是利用柔性材料构建动物关节并模拟动物运动的新兴技术,具有结构简单、控制简单等优点.柔性骨骼在开发海滩环境监测机器人方面具有较大潜力<sup>[19-21]</sup>.到目前为止,多种功能性材料被用来制作柔性骨架,如硅胶<sup>[22]</sup>、形状记忆合金<sup>[23]</sup>、电活性聚合物<sup>[24]</sup>等.与此同时,多种驱动方法被用于柔性骨骼的驱动,具体包括电缆<sup>[25]</sup>、气动<sup>[26]</sup>和化学反应<sup>[27]</sup>.柔性骨骼重量轻、惯性低、能量消耗低等优点使该技术能够克服传统仿生蟹机器人的局限性<sup>[19,21]</sup>.例如,Jin 等<sup>[25]</sup>研究了一种软滚动机器人,并通过电压调制记忆合金的方式实现该机器人的驱动,并完成爬行、滚动等动作.值得注意的是,Jiang 等<sup>[19,21]</sup>和 Ren 等<sup>[28]</sup>受到螳螂关节的启发,设计制作了一种柔性关节,并通过控制关节硬度实现其轨迹调节,为研究新型的仿生蟹机器人提供了思路.

绳索驱动是一种简单实用的柔性关节驱动方法,能够实现单向力传递<sup>[25,29-30]</sup>.目前,绳索驱动方法已成功应用于柔性骨架控制.例如,Gueners 等<sup>[29]</sup>研究了一种中等尺寸电缆驱动并联机器人,该机器人具有6个自由度,由8个绳索完全约束,其零部件可由3D打印获得. Jin 等<sup>[30]</sup>开发了一种腿外骨骼绳索驱动方法.该方法具有结构简单、惯性小等优点,并被成功应用于病人步态的训练.因此,绳索驱动方法可用于柔性骨骼驱动,有望实现新型仿生蟹机器人的研发.

本文结合柔性骨骼和绳索驱动方法提出了一种用于海滩监测的经济简单轻便仿生蟹机器人.首先通过刚柔耦合模型研究了仿生蟹机器人的运动规律.其次,设计仿生蟹机器人的机械结构,并开发了手机应用控制方法.然后,通过实验验证手机应用控制方法的可行性,并研究该机器人在海滩上的运动规律和集群控制特点.最后,利用该仿生蟹机器人进行不同海滩环境的监测并采集环境照片和参数.

## 1 仿生蟹机器人足端运动原理

为了研究仿生蟹机器人柔性足端的运动规律,将该足端变形位置视为柔性梁,并采用平面梁单元进行离散.将柔性足端非变形位置视为刚体,建立刚柔耦合模型研究仿生蟹机器人足端运动行为.

平面梁单元如图1所示,每个单元有节点1和节点2两个节点,每个节点选择 $X, Y$ 方向移动和转角作为广义坐标.则每个单元广义坐标 $\boldsymbol{u}$ 为

$$\boldsymbol{u}=[x_1, y_1, \theta_1, x_2, y_2, \theta_2]. \quad (1)$$

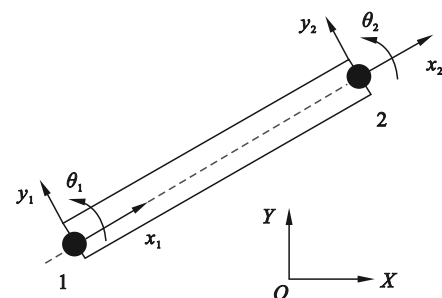


图1 平面梁单元模型

Fig. 1 Plane beam element model

采用坐标变换矩阵 $\boldsymbol{A}$ ,可以将局部坐标系变换到全局坐标系,即

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{u}. \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{q}$ 为全局广义坐标向量.

根据虚位移原理,可以得到平面梁单元的动力学方程为

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{q}'' + \boldsymbol{K}\boldsymbol{q} - \boldsymbol{Q} = 0. \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 为平面梁单元的质量矩阵; $\boldsymbol{q}''$ 为全局广义坐标向量的加速度; $\boldsymbol{K}$ 为平面梁单元的刚度矩阵; $\boldsymbol{Q}$ 为平面梁单元的外力向量.平面梁单元的质量矩阵表达式为

$$\boldsymbol{M} = \int_V \rho \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{N} dV. \quad (4)$$

式中: $V$ 是单元的域; $\rho$ 为质量密度; $\boldsymbol{N}$ 为形状函

数.刚度矩阵表达式为

$$K = \int_V B^T D B dV, \quad (5)$$

$$B = \frac{\partial N}{\partial u}. \quad (6)$$

式中: $B$ 为应变梯度矩阵; $D$ 为弹性矩阵.

外力向量表达式为

$$F = \int_V N^T f dV. \quad (7)$$

式中, $f$ 为节点力.

基于上述理论推导,在 Adams 软件中进行建模仿真,研究仿生蟹机器人足端的运动行为.仿生蟹机器人足端变形仿真模型如图 2 所示,将仿生蟹机器人足端位置 1 和 3 视为刚体,将变形位置视为柔性体并离散为 8 个单元.在足端施加牵引力研究足端的形变特点,牵引力的指向与绳索牵拉方向一致.



图 2 仿生蟹机器人足端变形仿真模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the bionic crab robot foot end transformation simulation model

仿生蟹机器人足端的变形量和弯曲角度随着时间的变化规律如图 3 所示.在拉力的作用下,足端的变形随时间发生周期性变化.因此,开发仿生蟹机器人时,通过绳索驱动的方法对仿生蟹机器人足端施加拉力以实现仿生蟹机器人运动驱动和控制.

## 2 仿生蟹机器人设计

### 2.1 仿生蟹机器人控制系统

本节建立了仿生蟹机器人的控制系统如图 4 所示,包括 ESP32-Cam 摄像头模组,Arduino Nano 开发板,手机和 4 个舵机.此外,本文开发了手机应用,通过消息队列遥测传输协议(message queuing telemetry transport, MQTT)与 ESP32-Cam 通信.当 Arduino Nano 开发板接收到来自 ESP32-Cam 摄像头模组的信号时,利用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号切换舵机工作方式以实现仿生蟹机器人运动状态的切换,从而操控仿生蟹机器人完成各种沙滩环境的监测.

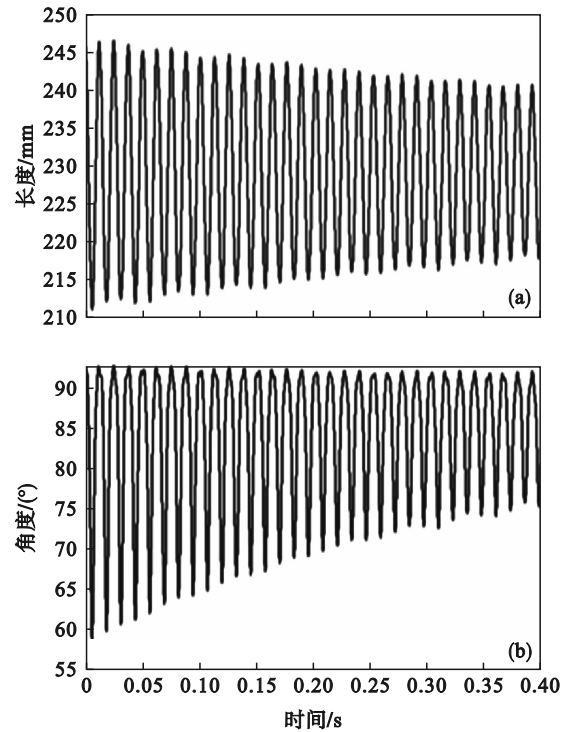


图 3 仿生蟹机器人足端变形数值仿真结果

Fig. 3 Numerical simulation results of the bionic crab robot foot end transformation

- (a)一足端变形量随时间的变化规律;
- (b)一足端弯曲角度随时间的变化规律.

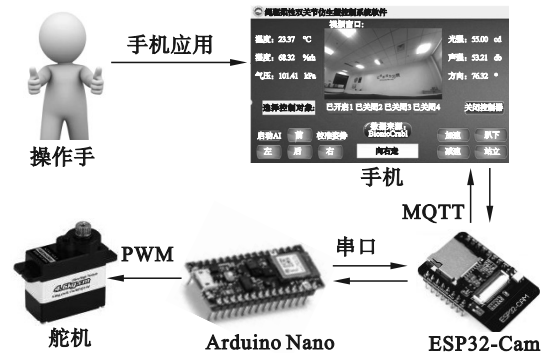


图 4 仿生蟹机器人控制系统

Fig. 4 Control system of the bionic crab robot

### 2.2 仿生蟹机器人的结构设计

首先设计了仿生蟹机器人的组件,包括电池、传感器、单片机、躯干、摄像头、外壳、4 个舵机、4 个舵机臂和 4 条双关节足端(图 5a).绳索连接双关节足端并由舵机驱动以实现仿生蟹机器人的驱动和控制.摄像头安装于仿生蟹机器人外壳顶部用于实时捕捉海滩环境图像.除此之外,仿生蟹机器人配备有控制器和电源.当仿生蟹机器人处于站立状态时,其长度为 200 mm,宽度为 80 mm,高度为 60 mm.仿生蟹机器人的装配图如图 5b 所示.

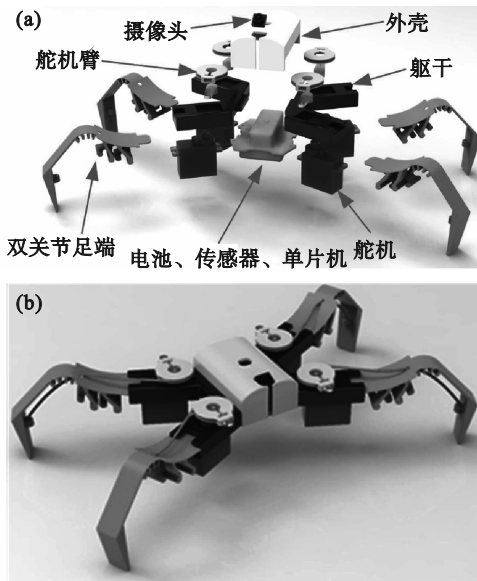


图5 仿生蟹机器人设计实物图

Fig. 5 Rear object image of the designed bionic crab robot

(a)—仿生蟹机器人零件图; (b)—仿生蟹机器人装配图.

仿生蟹机器人的躯干结构由尼龙 12CF 通过 3D 打印技术制作而成. 在双关节足端的长度为 35 mm, 宽度为 10 mm 的情况下, 利用如图 6a 所示的测试装置进行测试, 得到载荷为 50 g 时双关节足端厚度  $t$  与弯曲角度  $\gamma$  之间的关系, 结果如图 6b 所示. 随着厚度  $t$  的增加, 弯曲角度  $\gamma$  从  $55^\circ$  逐步下降到  $7^\circ$ . 然后, 开展绳索拉伸实验. 将绳索一端固定, 另一端悬挂质量为 1 kg 重物以测量绳索长度随时间的变化规律, 如图 6c 所示.

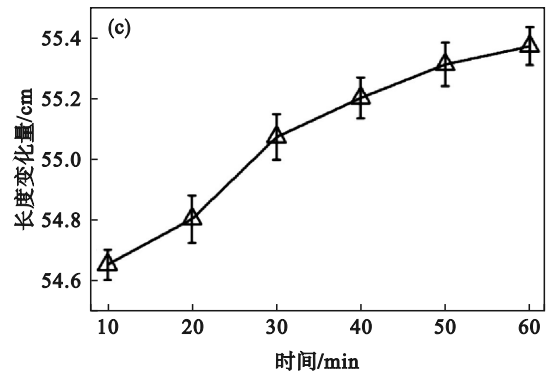
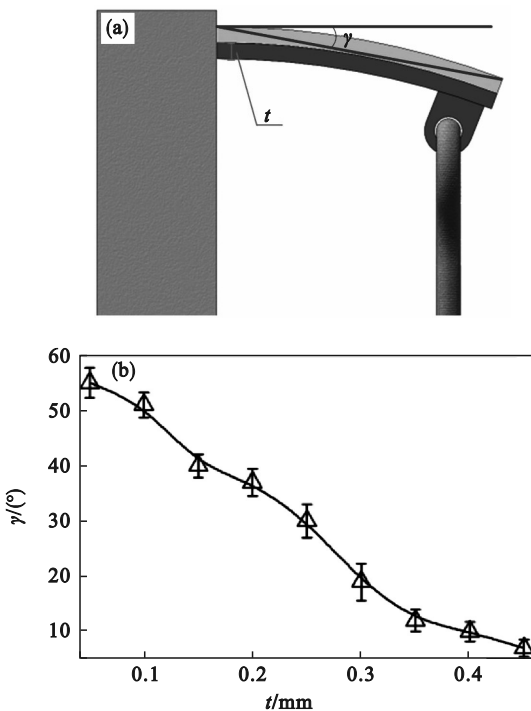


图6 仿生蟹机器人的测试

Fig. 6 Testing of the bionic crab robot

(a) —测试装置; (b) —足端厚度与弯曲角度的关系; (c) —绳索长度随时间的变化规律.

双关节足端、外壳和舵机臂由聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 通过 3D 打印技术加工制成. 将打印的组件与摄像头、舵机、传感器等组件进行组装, 得到仿生蟹机器人样机, 如图 7 所示.

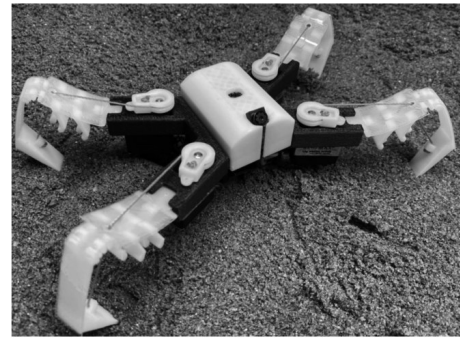


图7 仿生蟹机器人的组装

Fig. 7 Assembly of the bionic crab robot

### 3 仿生蟹机器人的控制原理

基于 MQTT 协议, 仿生蟹机器人通过物联网与手机进行通信. 手机可以向仿生蟹机器人发送需求, 并通过物联网将仿生蟹机器人收集的环境参数传输到手机, 包括温度、湿度、气压、声音强度和磁场方向. 通过局域网将捕获的图像传输到手机. 为了实现集群控制, 建立了一个集群通信系统用于同时控制多个仿生蟹机器人以收集环境数据, 如图 8 所示. 以发布主题的方式在云服务器发送消息, 仿生蟹机器人通过订阅主题接收该消息, 以实现对多个仿生蟹机器人的控制. 此外, 手机可以订阅仿生蟹机器人发布的主题, 实时获得海滩环境数据.

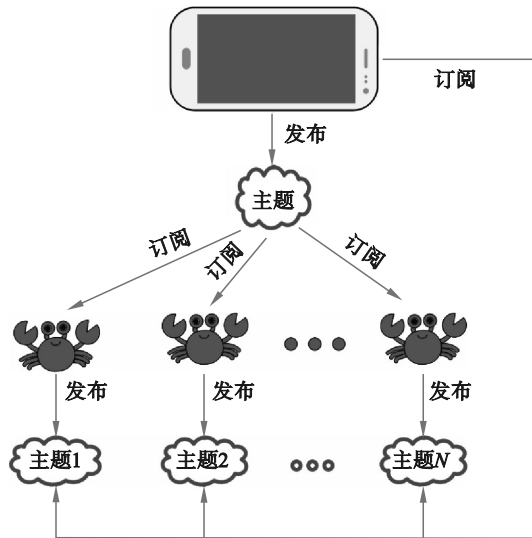


图8 手机APP的控制原理

Fig. 8 Control principle of the mobile phone APP

利用E4A(基于谷歌 Simple 语言的编程工具)开发了一个手机APP.该手机APP通过MQTT协议实现ESP32-Cam和手机间的通信.在手机和互联网连接后,可以通过手机应用读取仿生蟹机器人上安装的传感器和相机收集的信息.用户可以切换“停止”和“启动”按钮,以使所需的仿生蟹机器人处于可控制状态.此外,通过按下方向开关、速度调制和仿生蟹机器人姿态的命令按钮,可以调整仿生蟹机器人运动状态.同时,利用手机APP来操作仿生蟹机器人收集环境参数,如温度、湿度、气压、声音等参数.此外,该仿生蟹机器人外壳顶部安装的摄像头可以实时捕捉周围海滩环境.海滩环境照片和参数可以通过局域网发送到手机.利用仿生蟹机器人通过上述方式实现对海滩环境的监测.

### 4 仿生蟹机器人性能测试

#### 4.1 仿生蟹机器人运动测试

该部分研究了在手机APP控制下,仿生蟹机器人在冲浪区地形上的运动性能.首先,使用视频记录了短距离控制下仿生蟹机器人的运动过程,并研究了对不同指令的响应特性.从视频中提取的图像显示机器人的移动过程,如图9所示.仿生蟹机器人对“前”“后”“左”“右”和“站立”指令的响应时间如图10所示.在接收到手机APP的命令后,仿生蟹机器人可以快速向前移动,响应时间约为0.353 s,完成站立、向后、向左和向右移动需要更长的时间,约为0.415 s,0.400 s,0.388 s

和0.400 s.

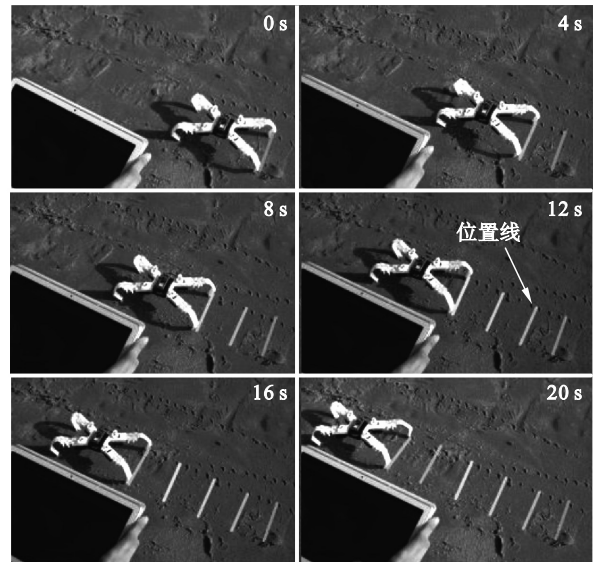


图9 短距离控制时仿生蟹机器人的运动

Fig. 9 Motion of the bionic crab robot in the case of short range control

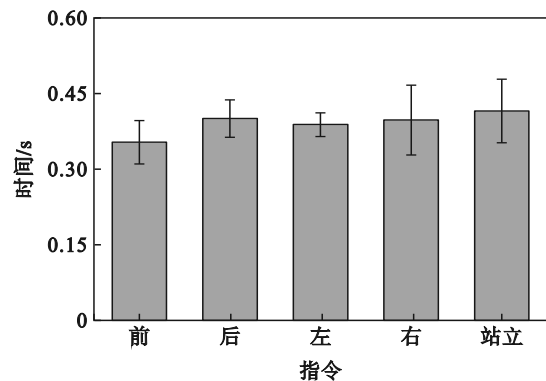


图10 仿生蟹机器人的响应时间

Fig. 10 Response time of the bionic crab robot

该部分还研究了远距离手机APP控制下仿生蟹机器人的运动过程,如图11所示.使用视频记录机器人的移动过程,并计算其运动速度,如图12所示.由图12可知,在冲浪区地形上机器人的速度为8.60~11.49 mm/s.

#### 4.2 仿生蟹机器人越障能力测试

对仿生蟹机器人在崎岖海滩上的移动性能进行研究,并测试其攀爬障碍能力.当遇到低障碍时,仿生蟹机器人可以直接越过障碍物.当遇到高障碍时,操作者可以通过手机APP控制仿生蟹机器人绕过障碍物.首先在如图13所示的松软且崎岖的海滩上研究仿生蟹机器人的运动过程.仿生蟹机器人的速度随时间变化如图14所示,仿生蟹机器人的速度为16.15~18.78 mm/s.

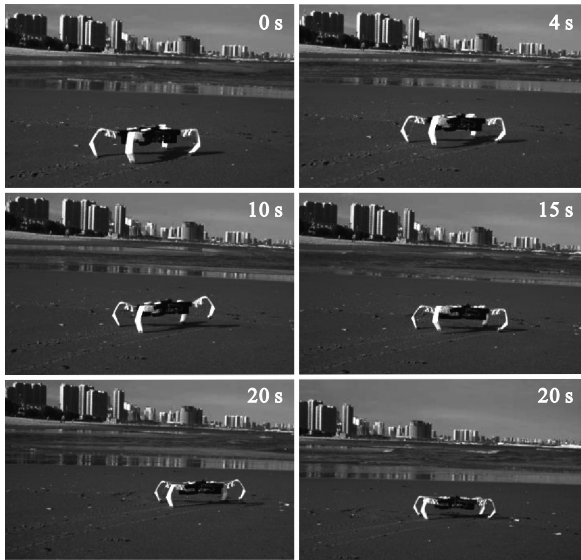


图 11 远距离控制下仿生蟹机器人的运动  
Fig. 11 Motion of the bioniiic crab in the case of long range control

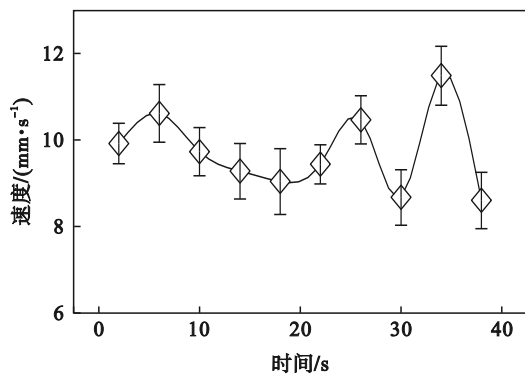


图 12 仿生蟹机器人运动速度随着时间的变化  
Fig. 12 Change in speed of the bioniiic crab robot over time

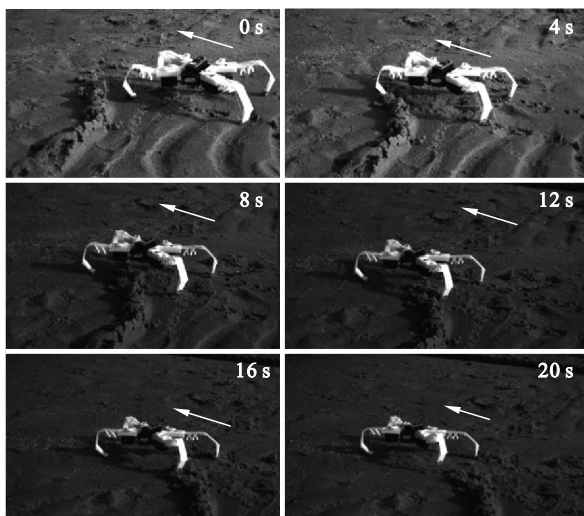


图 13 仿生蟹机器人在松软崎岖海滩上的运动  
Fig. 13 Motion of the bioniiic crab robot on soft and rugged beach

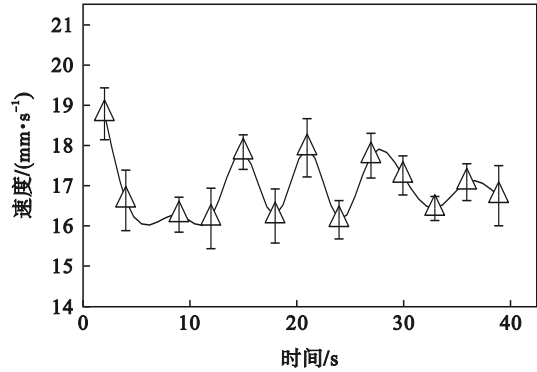


图 14 仿生蟹机器人在松软崎岖海滩上的运动速度与时间的关系  
Fig. 14 Relationship between the speed and time of the bioniiic crab robot on soft and rugged beach

对仿生蟹机器人在板结且崎岖海滩上的运动规律进行研究. 仿生蟹机器人的移动过程如图 15 所示, 速度变化如图 16 所示. 根据图 16, 由于海滩的板结和崎岖不平, 仿生蟹机器人的速度为 12.42~16.60 mm/s, 随时间呈现出明显的波动. 可见, 该仿生蟹机器人具有良好的越障能力.

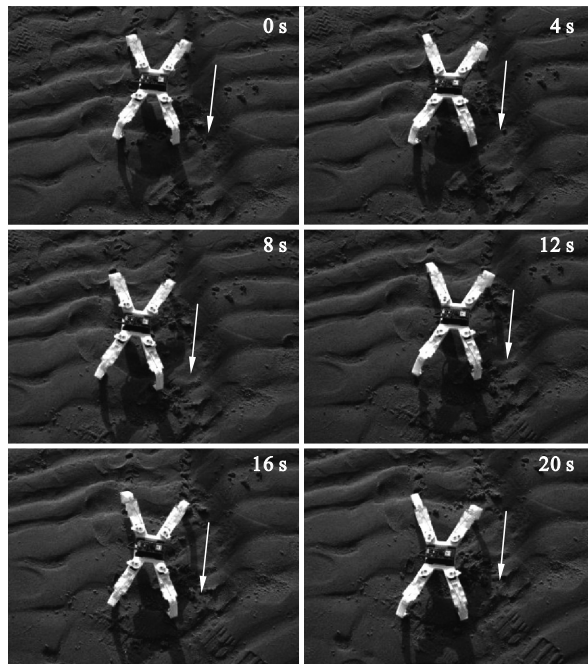


图 15 仿生蟹机器人在板硬崎岖海滩上的运动  
Fig. 15 Motion of the bioniiic crab robot on harden and rugged beach

### 4.3 仿生蟹机器人集群控制

本节研究了手机 APP 对多只仿生蟹机器人的操控性能. 首先, 控制两个仿生蟹沿着预设的路径移动. 两个仿生蟹机器人在板硬海滩上的移动过程和速度如图 17 所示. 当遇到障碍时, 仿生

蟹机器人可以轻松地克服. 仿生蟹机器人的运动过程如图 17a~图 17c 所示. 在手机 APP 的控制下, 仿生蟹机器人 1 和仿生蟹机器人 2 在海滩上留下了几乎相同的轨迹. 其速度都表现出明显的波动: 仿生蟹机器人 1 的速度从 8.31 mm/s 增加到 10.86 mm/s; 仿生蟹机器人 2 的速度从 11.23 mm/s 增加到 13.82 mm/s. 在 0~32 s 内, 越过障碍物. 在运动到平稳的海滩后, 其速度逐渐变得接近于稳定, 如图 17d 所示.

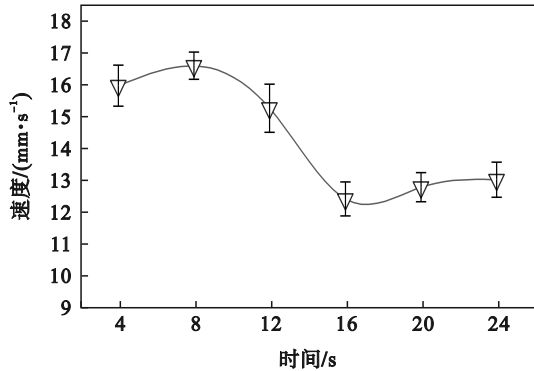


图 16 仿生蟹机器人在板硬崎岖海滩上的运动速度与时间的关系

Fig. 16 Relationship between the speed and time of the bionic crab robot on harden and rugged beach

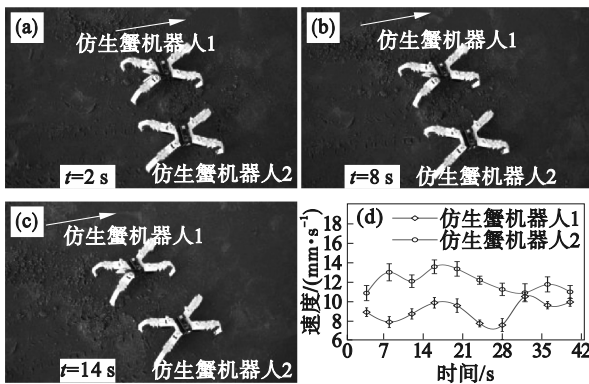


图 17 两只仿生蟹机器人的控制

Fig. 17 Control of two bionic crab robots  
(a)~(c)—两只仿生蟹机器人运动;  
(d)—运动速度随时间变化.

利用手机 APP 控制 3 个机器人在松软海滩上移动. 3 只仿生蟹机器人在松软海滩上的移动过程如图 18a~图 18c 所示. 3 只仿生蟹机器人在海滩上留下了相似的轨迹. 图 18d 显示了 3 只仿生蟹机器人的速度呈现出几乎相同的波动幅度. 由图 17d 和图 18d 可知, 松软海滩的缓冲效应会减小仿生蟹机器人的速度波动.

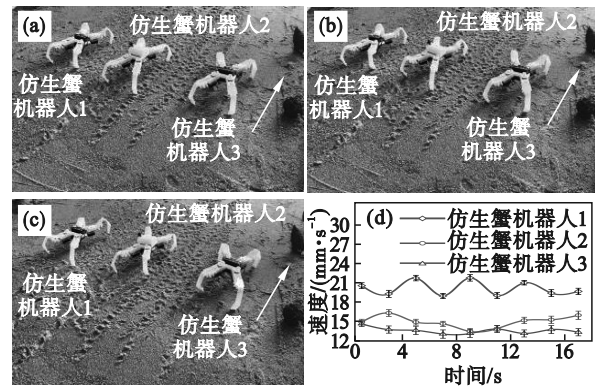


图 18 3 只仿生蟹机器人的控制

Fig. 18 Control of three bionic crab robots  
(a)~(c)—3 只仿生蟹机器人运动;  
(d)—运动速度随时间变化.

### 5 海滩环境的监测

利用手机 APP 控制仿生蟹机器人对渤海湾海滩环境进行监测. 使用摄像头捕捉海滩环境图像, 并将其发送回手机, 如图 19 所示. 海滩 1 和海滩 2 上的仿生蟹机器人监测一些垃圾, 如塑料袋和香烟头等. 在海滩 3、海滩 4 和海滩 5 上的仿生蟹机器人监测到了各种海洋植物和贝壳. 此外, 海滩 6 上的仿生蟹机器人还捕捉到海鸥的活动.

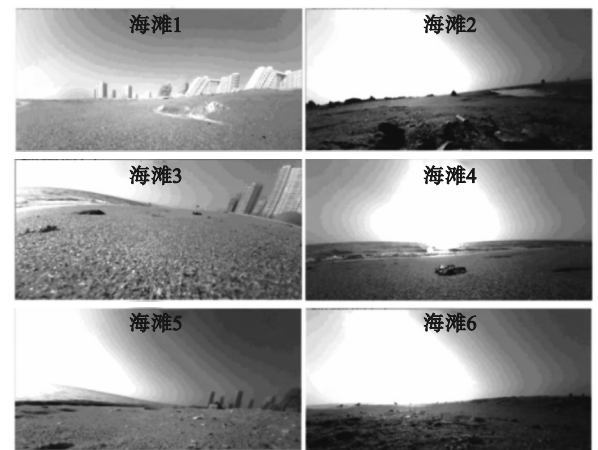


图 19 海滩环境图片的实时采集

Fig. 19 Real time collection of beach environment images

仿生蟹机器人配备的传感器可以采集多种环境参数, 如温度、湿度、声音强度、大气压强和地磁场方向等, 并将其传送至手机. 仿生蟹机器人在上述 6 个渤海湾海滩收集的环境参数总结如图 20 所示. 海滩 1~6 的温度、湿度和声音强度呈现出明显的差异 (图 20a~图 20c), 而大气压强和地磁场方向仅存在一些十分细微的差异 (图 20d~

图 20e)。因此,该仿生蟹机器人能够以简单、经济、实用的方式实现海滩环境的监测。

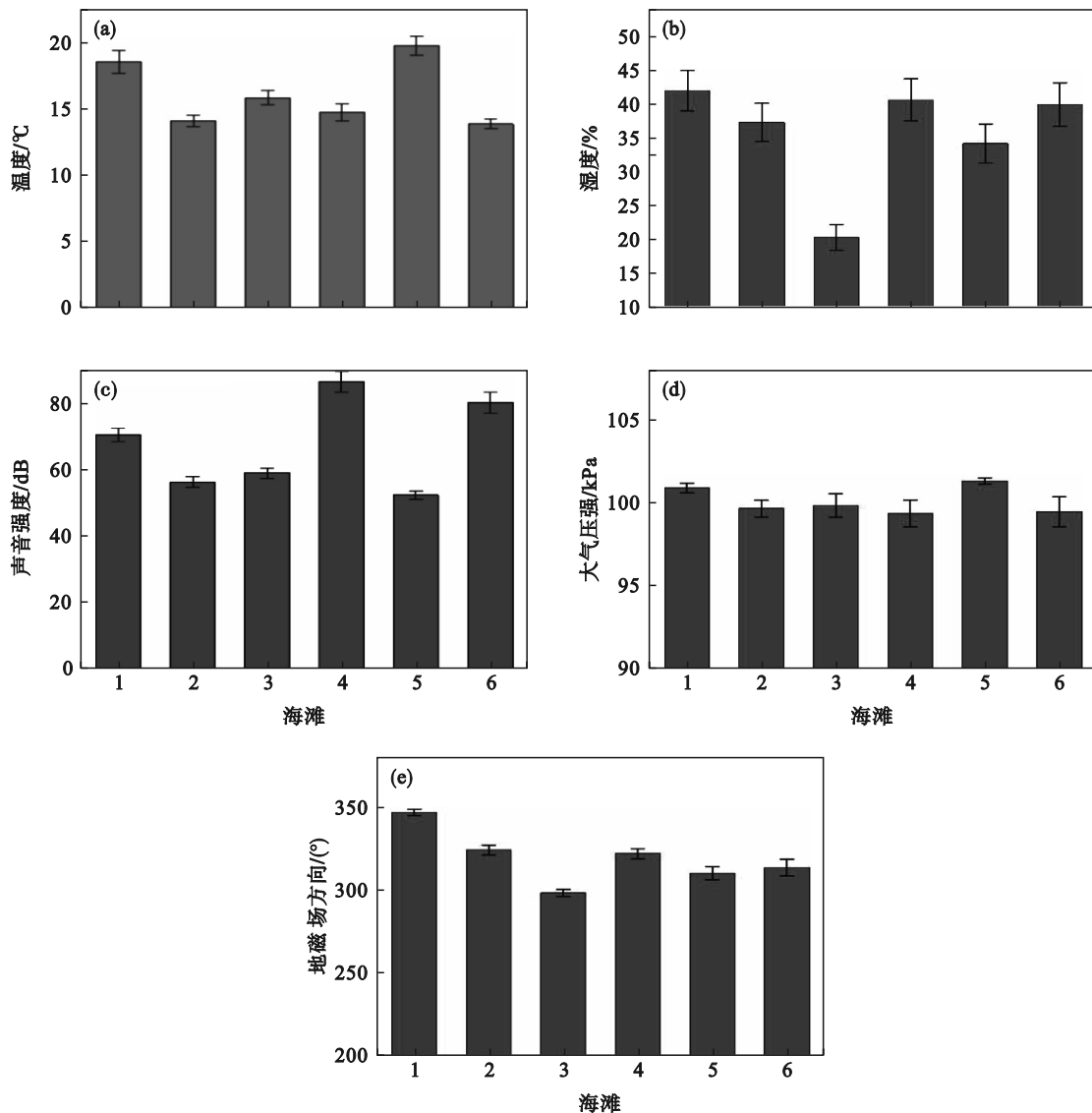


图 20 海滩多种环境参数的采集

Fig. 20 Collection of various environmental parameters in beaches

(a)—温度; (b)—湿度; (c)—声音强度; (d)—压强; (e)—地磁场方向。

## 6 结 语

本文结合柔性骨骼和绳索驱动提出了一种面向海滩环境监测的仿生蟹机器人。首先,基于刚柔耦合模型研究了仿生蟹机器人足端的运动规律,并开发了手机 APP 以实现仿生蟹机器人与手机之间的通信。在此基础上,通过手机 APP 控制仿生蟹机器人运动,研究了其在松软海滩环境和板硬海滩环境中速度随时间的变化规律。此外,本文还利用手机 APP 同时操控 2 个和 3 个仿生蟹机器人在不同海滩上的运动,并分析了每个仿生蟹机器人速度波动。最后,本文将该仿生蟹

机器人应用于渤海湾的 6 个不同海滩的监测,并成功地采集了周围环境的图像和参数。本文提出的仿生蟹机器人具有良好的地形适应性、简单的结构和经济的加工方法等优点,有望成为海滩环境监测的有效工具。

### 参考文献:

- [1] Chen X M, Ren Y K, Jiang T Y, et al. Characterization of particle movement and high-resolution separation of microalgal cells via induced-charge electroosmotic advective spiral flow[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(3): 1667-1676.
- [2] Danovaro R, Fanelli E, Aguzzi J, et al. Ecological variables for developing a global deep-ocean monitoring and conservation strategy [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(2): 181-192.

- [3] Chen X M, Shen M, Liu S, et al. Microfluidic impedance cytometry with flat-end cylindrical electrodes for accurate and fast analysis of marine microalgae[J]. *Lab on a Chip*, 2024, 24(7): 2058–2068.
- [4] Galland G, Harroul-Kolieb E, Herr D. The ocean and climate change policy[J]. *Climate Policy*, 2012, 12(6): 764–771.
- [5] Rajasekaran L, Santhanam S M. Optimum frequency selection for localization of underwater AUV using dynamic positioning parameters[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(12): 4291–4303.
- [6] He Y L, Zhu L Q, Sun G K, et al. Underwater motion characteristics evaluation of multi amphibious spherical robots[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(2): 499–508.
- [7] Nguyen D N, Ho N L, Dao T P, et al. Multi-objective optimization design for a sand crab-inspired compliant microgripper[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(10): 3991–4009.
- [8] Zheng L, Piao Y, Ma Y K, et al. Development and control of articulated amphibious spherical robot [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(5): 1553–1561.
- [9] Chang H, Chang J, Clifton G, et al. Anisotropic compliance of robot legs improves recovery from swing-phase collisions [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(5): 056001.
- [10] Boxerbaum A S, Bachmann R J, Quinn R D, et al. Design and testing of a highly mobile insect-inspired autonomous robot in a beach environment [J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2010, 4(4): 319–336.
- [11] De Waard M, Inja M, Visser A. Analysis of flat terrain for the atlas robot [C]//2013 3rd Joint Conference of AI & Robotics and 5th RoboCup Iran Open International Symposium. Tehran, 2013: 1–6.
- [12] Branyan C, Hatton R L, Mengüç Y. Snake-inspired kirigami skin for lateral undulation of a soft snake robot [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1728–1733.
- [13] Estremera J, Cobano J A, Gonzalez de Santos P. Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: an application to humanitarian demining [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5): 700–711.
- [14] Graf N M, 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] Wang L Q, Liu D F, Chen D L, et al. The virtual prototype design and simulation of amphibious bio-crab robot with variable posture [C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Guilin, 2009: 2140–2145.
- [16] Grezmak J, Graf N, Behr A, et al. Terrain classification based on sensed leg compliance for amphibious crab robot [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 23308–23316.
- [17] Billah M M, Ahmed M, Farhana S. Walking hexapod robot in disaster recovery: developing algorithm for terrain negotiation and navigation [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2008, 2(6): 795–800.
- [18] Greiner H, Shectman A, Won C, et al. Autonomous legged underwater vehicles for near land warfare [C]//Proceedings of Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Monterey: IEEE, 1996: 41–48.
- [19] Jiang M S, Song R, Gravish N. Knuckles that buckle: compliant underactuated limbs with joint hysteresis enable minimalist terrestrial robots [C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, 2020: 3732–3738.
- [20] Chen X M, Liu S, Shen M, et al. Dielectrophoretic characterization and selection of non-spherical flagellate algae in parallel channels with right-angle bipolar electrodes [J]. *Lab on a Chip*, 2024, 24(9): 2506–2517.
- [21] Jiang M S, Zhou Z Y, Gravish N. Flexoskeleton printing enables versatile fabrication of hybrid soft and rigid robots [J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(6): 770–778.
- [22] Xu M, Wang G, Rong C. Fiber-reinforced flexible joint actuator for soft arthropod robots [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 340: 113522.
- [23] Kim B, Lee M G, Lee Y P, et al. An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 125(2): 429–437.
- [24] Chang L F, Liu Y F, Yang Q, et al. Ionic electroactive polymers used in bionic robots: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(5): 765–782.
- [25] Jin X, Cui X, Agrawal S K. Design of a cable-driven active leg exoskeleton (C-ALEX) and gait training experiments with human subjects [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, 2015: 5578–5583.
- [26] Wehner M, Quinlivan B, Aubin P M, et al. A lightweight soft exosuit for gait assistance [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, 2013: 3362–3369.
- [27] Lv P F, Yang X, Bisoyi H K, et al. Stimulus-driven liquid metal and liquid crystal network actuators for programmable soft robotics [J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(9): 2475–2484.
- [28] Ren J, Wu F, Shang E W, et al. 3D printed smart elastomeric foam with force sensing and its integration with robotic gripper [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 349: 113998.
- [29] Gueners D, Chanal H, Bouzgarrou B C. Design and implementation of a cable-driven parallel robot for additive manufacturing applications [J]. *Mechatronics*, 2022, 86: 102874.
- [30] Jin X, Prado A, Agrawal S K. Retraining of human gait—are lightweight cable-driven leg exoskeleton designs effective? [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, 26(4): 847–855.