

振动直驱式小型爬行机器人设计与性能研究*

陈望益, 彭瀚旻, 杨 涛

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对狭小空间探索机器人结构复杂或需绳驱动的问题,设计一种无传动系统的三足小型爬行机器人。首先,利用振动电机旋转时离心力的周期性变化,驱动机器人产生前向或者旋转运动;其次,建立小型爬行机器人运动理论模型,通过数值计算绘制其运动轨迹;然后,研制出尺寸为38 mm×36 mm×33 mm、质量为17.70 g的原理样机;最后,研发机器人的电路驱动控制系统,实现内置电源和独立控制。结果表明:通过调节电压占空比,小型爬行机器人在橡胶和聚乙烯表面可实现对直线速度、转向半径、速度以及负载的控制;在驱动电压为3.3 V时,小型爬行机器人在橡胶表面可达到81 mm/s的最大直线速度和35.00 g的最大负载。该机器人具有轻质小型、结构简单、运动可控以及自带电源的优点。

关键词 振动驱动;小型机器人;内置电源;爬行

中图分类号 TP242; TH113.1

引 言

与传统机器人相比,小型机器人具有质量轻、体积小和机动性高等优势^[1-4],广泛应用于工程检测、灾害救援等领域。根据驱动原理的不同,小型机器人主要分为压电驱动、电磁驱动以及气动驱动等类型^[5-8]。

基于压电驱动的方式,Rios等^[9]提出了一种微型压电机器人,质量仅为16 g,最高速度可达520 mm/s。该机器人驱动足由2个压电双晶片组成,通过改变驱动电压幅值和相位差实现转向和直线运动。压电驱动机器人具有响应迅速、运动速度快以及结构简单的特点,但存在驱动电压高和负载能力弱的问题。

基于电磁场驱动的方式, Lee等^[10]提出了一种由电磁场驱动的爪形微型尺蠖机器人,通过线圈产生的交变磁场驱动足部运动。该机器人尺寸为12.2 mm×11.0 mm×9.0 mm,最大速度为36 mm/s。电磁场驱动的机器人具有结构简单、成本低的优点,但该类型机器人一般只有1个运动自由度,且线圈排列较为复杂。此外,对于多自由度运动的机器人而言,一般存在线圈产生的磁场之间相互干扰的问题。

基于气动驱动的方式,Lim等^[11]研制了一种微

型气动虫状机器人,通过排气和充气的连续交替实现运动。该机器人尺寸为70 mm×9 mm×9 mm,最高速度为50 mm/s。压电机器人具备响应迅速和速度快等优点,但其所需驱动电压较高,负载能力较差,一般需要借助导线连接外部设备来提供驱动能源^[12]。气动机器人需要通过导管连接气泵来提供动力,导致其行动范围受到限制,基于电磁电机控制的机器人则可以避免上述问题^[13]。

基于电磁电机驱动的机器人可以细分为有传动系统和无传动系统^[14-15]。Zarrouk等^[16]提出的由单个电机驱动的微型机器人,最大速度达到350 mm/s。该机器人具有速度快、仅用1个电机即可实现两自由度运动的特点。然而,由于传动系统的存在,该机器人结构较为复杂。与基于传动系统的微型机器人不同,Su等^[17]提出了一种无传动系统的四足爬行机器人,该机器人由4个偏心电机驱动,尺寸为72 mm×76 mm×35 mm,通过特殊的柔性放大结构,其最大速度可达206 mm/s。不足之处在于该机器人总体尺寸较大,柔性结构较为复杂。

为此,笔者设计一种基于振动电机驱动的小型爬行机器人。该机器人结构简单、质量轻、体积小并带有机载电源,具备良好的运动性能和负载能力,可以满足在狭小空间内探索的需求。

* 国家自然科学基金资助项目(51875280, U2037603); 机械结构力学及控制国家重点实验室自主研究课题资助项目(MCMS-I-0322K01); 江苏高校优势学科资助项目

收稿日期:2022-09-03; 修回日期:2022-11-10

1 结构设计

图1为机器人结构及控制策略。图1(a)展示了小型爬行机器人结构和主要组成部分。该作动器由外壳、3个驱动足、2个偏心扁平振动电机、充电锂电池和电路控制板组成,总体外形尺寸为38 mm×36 mm×33 mm。外壳通过3D打印加工,材料为光敏树脂。外壳内部的2个半圆形凹槽用于放置振动电机,圆柱形孔槽便于固定外壳。

图1(b)为电路控制系统,由主控芯片、驱动模块和充电模块组成。电机和芯片的驱动电压均为3.3 V,而锂电池满电量时输出电压为4.1 V,锂电池在放电过程中电压会持续下降到3.4 V,因此可通过低压差线性稳压器将线路电压稳定在3.3 V。充电模块可为锂电池提供续航能力,振动电机的驱动模块使用双H桥电路控制其转速和转向,驱动足的材料为磷铜,头部为直径0.9 mm的圆锥。机器人运动过程中足与地面存在碰撞,三足设计可保证所有足与地面充分接触,提高机器人的运动稳定性。

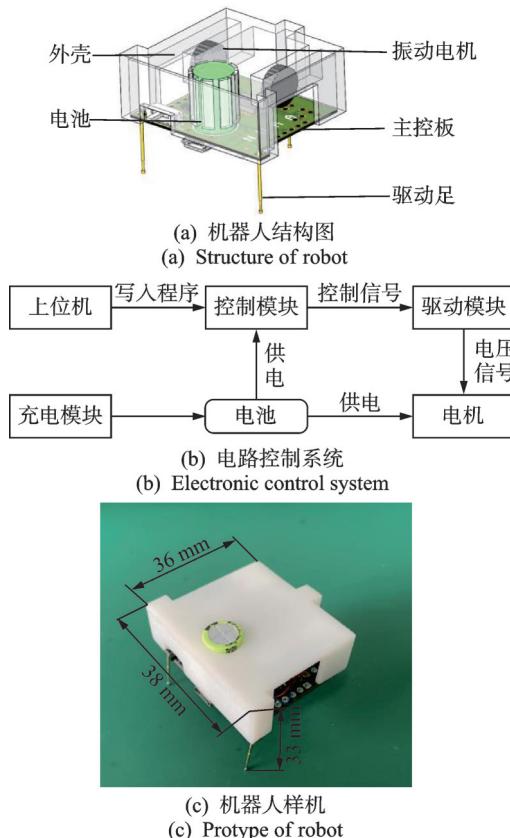


Fig.1 Structure and control strategy of robot

机器人样机见图1(c),整机质量为17.70 g。电路板是机器人控制的核心,综合考虑微控制器所占面积和外设接口数量,选用意法半导体公司的

STM32F103C8T6型电路板。驱动模块采用东芝公司的TB6612FNG型模块,该芯片可同时驱动2个电机,且可调整电压信号的占空比和电流方向,便于实现机器人的多种运动模式。可充电锂电池容量为70 mAh,采用电容封装直接焊接于电路板,避免部件之间柔性连接影响机器人整体的运动。

2 理论分析

2.1 理论模型

图2为机器人理论模型,展示了爬行机器人结构与其受力分析的简化模型。

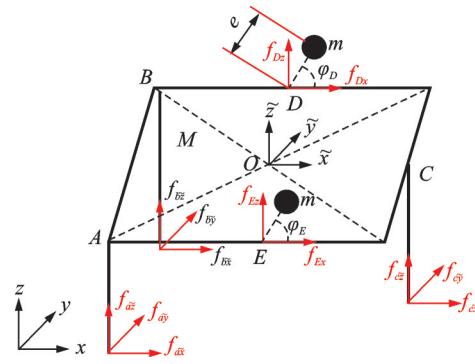


图2 机器人理论模型

Fig.2 Theoretical model of robot

建立绝对坐标系(x, y, z)与机器人固连的惯性坐标系($\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$),初始时刻两坐标系重合。简化模型由1块质心位于形心的刚性正方形平板与3个刚性足A、B、C组成,平板质量为 M ,长度为 L 。刚性足与平板为刚性连接,足的质量忽略不计。振动电机D、E对称放置于平板两侧中点,偏心距为 e ,偏心质量为 m , φ_D 与 φ_E 为偏心块的初相位。 f_{pi} 、 f_{qi} ($i=a, b, c$)分别为足所受的法向力与切向力大小。法向力在 $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ 上的分量为 $f_{i\tilde{x}}, f_{i\tilde{y}}, f_{i\tilde{z}}$ 。偏心振动电机产生的力矩忽略不计,其离心力为

$$\begin{cases} f_{E\tilde{x}} = me^2\omega_j \sin(\omega_j t + \varphi_j) \\ f_{E\tilde{z}} = me^2\omega_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \end{cases} \quad (j=D, E) \quad (1)$$

不考虑机器人足与地面的碰撞,则约束其法向位移与绕 x, y 轴的旋转运动,在 t 时刻这3个自由度的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_z = 0 \\ f_{pa} + f_{pb} + f_{pc} - f_{D\tilde{z}} - f_{E\tilde{z}} - (M + 2m)g = 0 \\ \sum M_x = 0 \\ f_{pa} - f_{pb} - f_{D\tilde{z}} + f_{E\tilde{z}} = 0 \\ \sum M_y = 0 \\ f_{pa} + f_{pb} - f_{pc} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

联立求解式(2),可得到3个足上的法向力 f_{pi} 。根据库伦干摩擦模型,在滑动情况下,作用在足接触位置的切向力与法向力的大小关系为

$$f_{qi} = -\operatorname{sgn}(v)\mu f_{pi} \quad (i=a, b, c) \quad (3)$$

其中: μ 为动摩擦因数; v 为接触位置的相对切向速度。

$\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,定义为

$$\operatorname{sgn}(v) = \begin{cases} 1 & (v > 0) \\ 0 & (v = 0) \\ -1 & (v < 0) \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可得三足接触点的切向力大小,其方向与速度矢量方向相反,接触点的速度矢量为

$$v_i = v_o + v_{ir} \quad (i=a, b, c) \quad (5)$$

其中: v_i 为地面接触点足上的速度矢量; v_o 为机器人质心的速度矢量; v_{ir} 为接触点相对质心的速度矢量。

$$\left\{ \begin{array}{l} v_o = \dot{x}(t)\mathbf{n}_x + \dot{y}(t)\mathbf{n}_y \\ v_{ar} = \frac{\sqrt{2}}{2} L\dot{\theta}(t) \sin(\theta + \theta_a) \mathbf{n}_x + \\ \quad \frac{\sqrt{2}}{2} L\dot{\theta}(t) \cos(\theta + \theta_a) \mathbf{n}_y \\ v_{br} = \frac{\sqrt{2}}{2} L\dot{\theta}(t) \sin(\theta + \theta_b) \mathbf{n}_x + \\ \quad \frac{\sqrt{2}}{2} L\dot{\theta}(t) \cos(\theta + \theta_b) \mathbf{n}_y \\ v_{cr} = \frac{1}{2} L\dot{\theta}(t) \sin(\theta + \theta_c) \mathbf{n}_x + \\ \quad \frac{1}{2} L\dot{\theta}(t) \cos(\theta + \theta_c) \mathbf{n}_y \end{array} \right. \quad (6)$$

其中: θ 与 $\dot{\theta}$ 分别为机器人的转角与角速度的数值; \mathbf{n}_x 与 \mathbf{n}_y 分别为 x 、 y 方向上的单位矢量; θ_i 为足的初始相位角, $\theta_a = \frac{\pi}{4}$, $\theta_b = -\frac{\pi}{4}$, $\theta_c = -\pi$ 。

因此,机器人的动力学方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} (M+2m)\ddot{x}(t) = -\sum_i \operatorname{sgn}(v_{ix})\mu \left| \frac{v_{ix}}{v_i} \right| f_{pi} + \\ \quad \sum_j f_{jx} \cos \theta \quad (i=a, b, c; j=D, E) \\ (M+2m)\ddot{y}(t) = -\sum_i \operatorname{sgn}(v_{iy})\mu \left| \frac{v_{iy}}{v_i} \right| f_{pi} + \\ \quad \sum_j f_{iy} \sin \theta \quad (i=a, b, c; j=D, E) \\ J\ddot{\theta}(t) = \sum_i (f_{qi} \times \mathbf{r}_i) + \frac{L}{2} (f_{Ex} - f_{Dx}) \quad (i=a, b, c) \end{array} \right. \quad (7)$$

其中: J 为机器人在质心处的 z 轴转动惯量; $\ddot{\theta}$ 为机器人的角加速度矢量; \mathbf{r}_i 为质心到足的位矢; f_{qi} 为驱动足所受切向力矢量; f_{Ex} 、 f_{Dx} 分别为振动电机 E 、 D 在 x 方向的分力矢量。

2.2 数值计算结果

按照式(1)~(7)的平衡方程与运动学关系,可得在 t 时刻每个驱动足上的摩擦力大小。根据宏观运动的连续性,摩擦力方向由 $t-dt$ 时刻的速度方向决定。由此,给定机器人运动的初始条件参数见表1,可通过数值计算绘制其轨迹。

表1 初始条件参数

Tab.1 Initial condition parameters

模型材料参数	数值
本体质量 M/g	17.70
偏心块质量 m/g	0.25
偏心距 e/mm	2.5
电机转速 $n/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	160
动摩擦因数 μ	0.4
作动器边长 L/mm	35

图3为运动示意图及数值计算结果。其中,图3(a)、(b)和(c)分别为左、右侧电机单独运行时和两侧同时运行时的数值计算结果。当只有一侧电机运行时,机器人向一侧运动;当两侧电机同时运行,机器人做直线运动,轨迹计算结果符合预期设计。假设电机偏心质量块的初始相位为 -90° ,图3(d)为机器人其中一个驱动足周期运动的过程:

1) 偏心块逆时针旋转到 -90° 和 -180° 过程中,驱动足与地面接触,偏心力在竖直方向上的分力变小,水平分力变大;

2) 偏心块继续旋转,驱动足开始离开地面,摩擦力逐渐减小,驱动机器人在摩擦力完全消失之前保持前进;

3) 驱动足悬空,在离心力水平分力的作用下继续驱动机器人前进;

4) 偏心块回到初始位置,驱动足与地面重新接触,机器人在 x 方向前进一段距离。

由于机器人实际运动中的情况更加复杂,存在驱动足与运动表面发生碰撞的情况,该问题计算非常复杂。因此,模型中未考虑碰撞,仿真得到的速度值与实验结果存在差异。

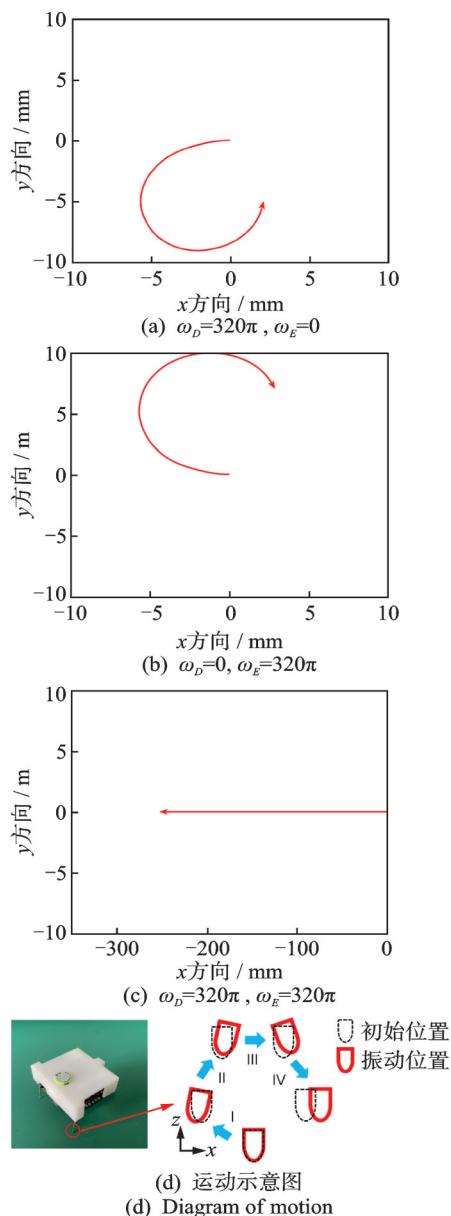


图3 运动示意图及数值计算结果

Fig.3 Diagram of motion and numerical calculation results

3 实验研究

3.1 测试方法

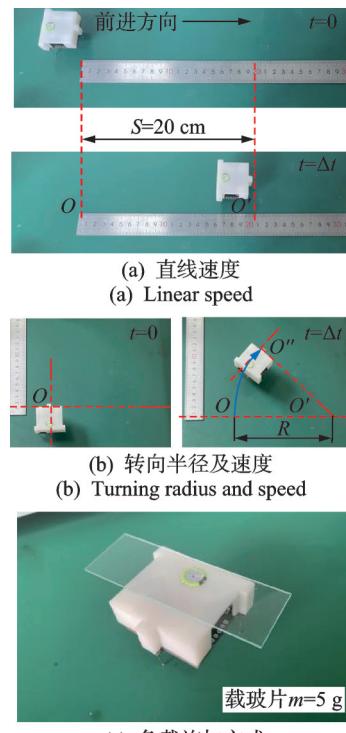
为测试在不同驱动电压占空比下,机器人的直线速度、转向速度和半径、负载极限,以及在不同工作表面上机器人的运动差异,笔者设计了以下实验。

实验在绝缘橡胶和聚乙烯(polyvinyl chloride,简称PVC)薄板上进行,表面粗糙度分别为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 。测试时选择2个转速大致相近的电机,使左、右两侧振动频率差异尽可能小。同时,通过调节驱动电压的占空比,使两电机振动频率一致。经过调试,当左、右电机电压分别为 3.23 V 、 3.10 V 时,可实现直线运动。此电压值用标准电压描述,占空

比是基于标准电压的百分比。

图4为实验测试方法,所有实验过程均用相机录制数据。机器人的直线速度测试方法如图4(a)所示,通过一定的时间 Δt 内的运动距离 S 计算出机器人运动的平均速度。为测得单侧电机在不同电压下驱动机器人的转向半径和速度,设计了如图4(b)的测试方法。以机器人前足的位置为初始点 O ,运动一段时间 Δt 后,前足的位置到达 O'' ,利用中垂线的几何关系找到转向的圆心 O' ,用刻度尺测得 OO' 间的距离 R ,即为该电压占空比下的转向半径和转角。根据弧长公式计算机器人走过的路程,得出机器人的平均转向速度。

在此基础上,测试增加负载时机器人的速度变化曲线。实验时将载玻片作为负载放置于机器人顶部,两者重心保持在同一垂直方向上,每次增加1块载玻片(质量为 5 g),直至机器人无法运动,质量负载施加方式如图4(c)所示。



(c) 负载施加方式

(c) Mode of added load mass

图4 实验测试方法

Fig.4 Experimental testing methods

3.2 实验结果

通过上述实验方法测得各占空比下机器人的直线速度、转向半径和速度以及在满占空比下的负载能力。

3.2.1 直线速度

不同占空比下机器人在2种表面上的速度如图5所示。在2种粗糙度的表面上,机器人速度随着占空比增大呈现增大的趋势。当占空比为100%时,机器人在橡胶上的最大速度达到81 mm/s,在PVC薄板表面的最大速度为71 mm/s。当占空比低于20%时,由于驱动力不足以克服摩擦阻力,此时机器人保持静止,说明机器人在大粗糙度表面上的移动速度较快。该机器人移动的驱动力来自于驱动足与运动表面接触产生的摩擦力,但摩擦力太大会阻碍前进,摩擦力过小则会发生滑移。

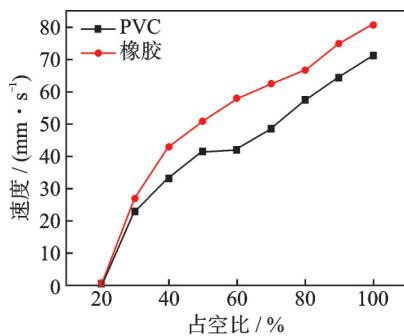


图5 不同占空比下机器人在2种表面上的速度

Fig.5 Velocities of robot on 2 contacting surfaces with different duty cycles

3.2.2 负载

机器人在2种材质表面上的负载能力实验均在标准电压下进行。不同负载下机器人在两种表面上的速度如图6所示。随着负载的增加,机器人在2种表面上的速度均呈减小趋势,当负载达到40 g时,机器人在2种材质的表面均无法运动。当负载为25 g时,2种材质上机器人的直线速度仅差1 mm/s。继续增加负载,机器人在PVC薄板上的速度比在橡胶上的更快。这是因为PVC薄板摩擦因数比橡胶更小,相同的负载下,摩擦阻力更小,因此在PVC薄板上机器人的移动速度下降更慢。与自身的重量相比,笔者设计的机器人表现出优异的负载能力,在探索时可以携带更多的传感器和更大容量的电池。

3.2.3 转向速度与半径

图7为不同占空比下机器人在2种表面上的转向半径和速度。由图7(a)可知,电压占空比和转向速度呈正相关。由于动摩擦因数小,PVC薄板上的转向速度小于橡胶。图7(b)中,在占空比为50%时,机器人在2种表面上的转向半径均达到最大值。随着电机振动频率的增加,半径变化趋势呈现类似正弦变化,推测与机器人的固有频率有关。

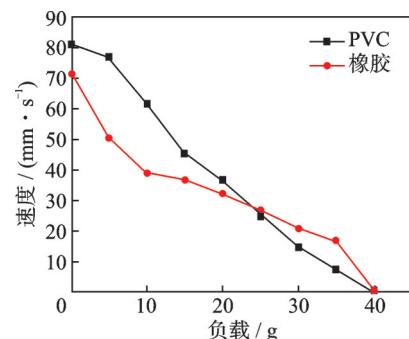


图6 不同负载下机器人在2种表面上的速度

Fig.6 Velocities of robot on 2 contacting surfaces under different loads

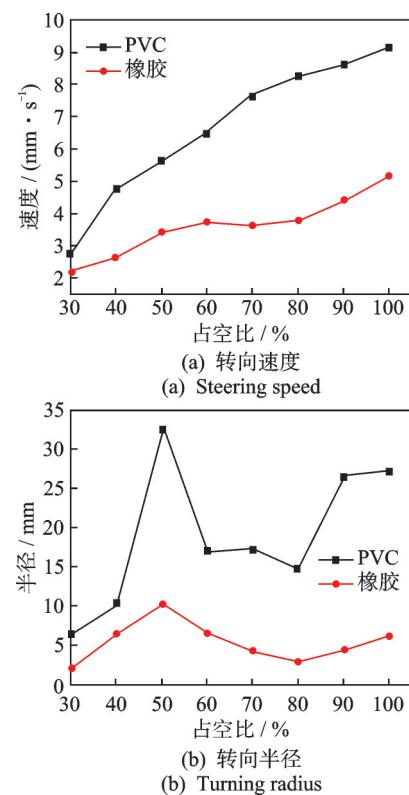


图7 不同占空比下机器人在2种表面上的转向半径和速度

Fig.7 Turning radius and velocities of robot on 2 contacting surfaces with different duty cycles

通过上述实验可知,机器人的驱动足与运动表面间的摩擦大小对运动性能有重要影响。因此,可通过改变驱动足顶端的形状来适应不同粗糙度的运动表面。

4 结论

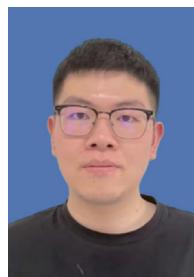
1) 针对狭小空间的探索问题,笔者设计了一种基于振动电机驱动的小型爬行机器人。采用振动驱动,无需传动系统,即可实现机器人结构的小型化和轻量化。为实现机器人脱离导线的限制,设计了

电路控制系统。制造了质量为 17.70 g、尺寸为 38 mm×36 mm×33 mm 的机器人样机,并在 PVC 薄板和橡胶上测试了机器人的运动性能。

2) 机器人在橡胶表面的最大速度为 81 mm/s,在 PVC 表面的最大速度为 71 mm/s;当向机器人逐级施加负载时,在 PVC 薄板上的运动速度下降更慢,最大承受负载为 35.00 g;机器人转向速度与占空比呈正相关,转向半径在占空比为 50% 时达到最大值。笔者设计的机器人尺寸小、质量轻、结构简单,具有较好的运动性能和负载能力,可以适应狭小空间的探索任务。

参 考 文 献

- [1] LI C, ZHANG T, GOLDMAN D I. A terradynamics of legged locomotion on granular media[J]. *Science*, 2013, 339(6126): 1408-1412.
- [2] WATANABE K, KANNO T, ITO K, et al. Single-master dual-slave surgical robot with automated relay of suture needle[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6343-6351.
- [3] SEO T W, SITTI M. Tank-like module-based climbing robot using passive compliant joints[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 397-408.
- [4] YE Z, RÉGNIER S, SITTI M. Rotating magnetic miniature swimming robots with multiple flexible flagella [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1): 3-13.
- [5] DOLGHI O, STRABALA K W, WORTMAN T D, et al. Miniature in vivo robot for laparoendoscopic single-site surgery[J]. *Surgical Endoscopy*, 2011, 25(10): 3453-3458.
- [6] SHENG W H, CHEN H J, XI N. Navigating a miniature crawler robot for engineered structure inspection[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(2): 368-373.
- [7] AHN C, LIANG X D, CAI S Q. Bioinspired design of light-powered crawling, squeezing, and jumping untethered soft robot[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900185.
- [8] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaag2048.
- [9] RIOS S A, FLEMING A J, YONG Y K. Miniature resonant ambulatory robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(1): 337-343.
- [10] LEE K M, KIM Y, PAIK J K, et al. Clawed miniature inchworm robot driven by electromagnetic oscillatory actuator[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12(4): 519-526.
- [11] LIM J, PARK H, AN J, et al. One pneumatic line based inchworm-like micro robot for half-inch pipe inspection[J]. *Mechatronics*, 2008, 18(7): 315-322.
- [12] ZHU P, PENG H, LU X, et al. A steerable miniature legged robot based on piezoelectric bending actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(4): 45009.
- [13] VARTHOLOMEOS P, PAPADOPOULOS E. Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Orlando, FL, USA: IEEE, 2006: 549-654.
- [14] KARYDIS K, POULAKAKIS I, TANNER H G. A navigation and control strategy for miniature legged robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(1): 214-219.
- [15] KOVÁČ M, SCHLEGEL M, ZUFFEREY J C, et al. Steerable miniature jumping robot[J]. *Autonomous Robots*, 2010, 28(3): 295-306.
- [16] ZARROUK D, FEARING R S. Controlled in-plane locomotion of a hexapod using a single actuator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(1): 157-167.
- [17] SU Q, ZHANG S, LIU Y, et al. A quadruped crawling robot operated by elliptical vibrations of cantilever legs [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(2): 1466-1474.



第一作者简介:陈望益,男,1997年6月生,硕士生。主要研究方向为作动器设计与控制。

E-mail:chenwangyi@nuaa.edu.cn

通信作者简介:彭瀚旻,男,1984年4月生,博士、教授。主要研究方向为压电换能器理论分析、设计及应用。

E-mail:penghm@nuaa.edu.cn