

形状记忆合金驱动连续跳跃柔性机器人*

毛 婷, 彭瀚旻, 查泽琳, 赵燊佳

(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 针对在复杂、狭窄的非结构化地形下跳跃机器人存在的着陆稳定性和运动连续性的问题,提出了一种形状记忆合金(shape memory alloy,简称 SMA)智能材料驱动的柔性跳跃机器人,它具有轻质小型、结构简单及连续运动的优点。利用对称的折纸柔性身体减少着陆振动,保证着陆稳定;利用对称的双 SMA 弹簧拮抗系统实现弹性元件交替变形和储能释能的功能;建立了柔性机器人跳跃运动的理论模型,研究了关键结构尺寸对能量储存和跳跃性能的影响机制,并研制了一款尺寸为 $6\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 、质量为 3.8 g 的原理样机。实验结果表明:柔性机器人依靠 SMA 驱动能够实现跳跃触发和形态恢复,最大跳跃高度和远度分别为 8.67 cm 和 18 cm ,并且可以适应不同工作面。该机器人跳跃性能优越,控制顺序简单,可为非结构化地形下完成侦察探测工作奠定基础。

关键词 形状记忆合金;微型机器人;跳跃运动;柔性
中图分类号 TP242; TH113.1

引 言

针对在非结构化地形下的侦察、探测等任务,跳跃机器人^[1]凭借良好的运动、越障和环境适应能力而具有广泛的应用前景。传统的跳跃机器人采用基于电机驱动的弹射机构,利用机械传动元件实现能量的储存和释放。文献[2-3]提出的昆虫仿生式跳跃机器人,将电机旋转的机械能通过凸轮、齿轮等机械元件传动,储存在弹簧内,释放能量的同时打开跳跃腿,能跳跃几倍于身体尺寸的高度和远度。但是,上述机器人零件复杂,制造困难,抗撞击性差,可控性差,未考虑机器人的着陆稳定性。文献[4-5]采用笼形保护外壳或对称结构设计实现机器人的连续运动。

随着智能材料和柔性机器人^[6]的发展,跳跃机器人利用化学能驱动^[7-8]、气动驱动^[9]以及智能材料驱动器^[10-11]等来简化结构,其中 SMA 驱动器^[12]兼具传动和驱动功能,用作弹射机构,具有尺寸小、质量轻、结构简单及跳跃性能优越等优点。文献[13-14]提出的跳蚤式、蛙式的 SMA 单腿跳跃机器人,采用多根 SMA 弹簧进行跳跃姿态的触发和恢复,但存在无翻转的平稳着陆、跳跃后的状态恢复及连续运动方面的问题。文献[15]的四足机器人控制 5 根 SMA 丝的激活顺序实现 1.2 倍身体高度的跳跃,但多 SMA 驱动器加热相变的协调控制较困难。文

献[16]设计了保护笼来解决着陆问题。笔者设计的 SMA 跳跃机器人兼顾跳跃能力和连续运动,降低控制难度,缩减体积质量,满足狭窄、复杂空间的探索需要。为此,提出了一种 SMA 柔性跳跃机器人。

1 结构设计

1.1 整体结构设计

SMA 驱动连续跳跃柔性机器人是由“8”字形基体、加强肋、侧边保护带、弹性带和形状记忆合金弹簧等组成,如图 1 所示。其中,“8”字形基体由图案化的平面聚氯乙烯(polyvinyl chloride,简称 PVC)薄膜(厚度为 0.5 mm)折叠形成,分为头部、尾部和可绕折叠关节自由旋转的腹部。轻质、弹性的身体提高了机器人的抗撞击能力,并设置 4 根加强肋固定头尾部的形状。基体的头尾部两侧设置 4 个由平直状弯成半圆弧状的保护带(厚度为 0.25 mm),防止机器人跳跃后侧翻而失去运动能力。2 个由平直状弯成弧状的弹性带(厚度为 0.5 mm)两端固定在头部和尾部端面,穿过基体腹部的非对称开口,卡在边沿处,作为储能和释能的部件。2 根形状记忆合金弹簧安置在腹部的中央开口处,作为储能和释能的触发部件。

* 国家自然科学基金资助项目(51875280);江苏省优秀青年基金资助项目(BK20180067);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX18_0253);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)
收稿日期:2019-04-13;修回日期:2019-11-11

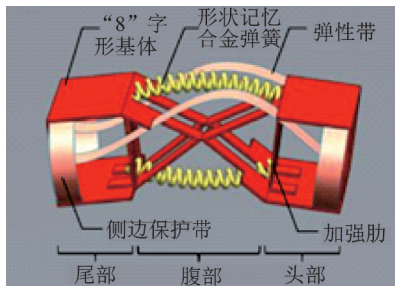
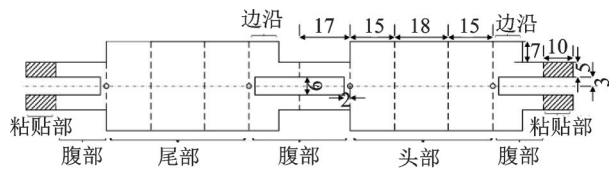


图1 机器人结构

Fig.1 Structure of robot

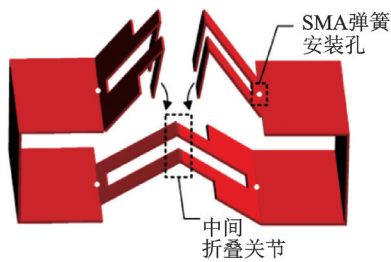
1.2 折纸结构设计

“8”字形基体的平面图案设计如图2(a)所示,实线是剪切线,虚线是折叠线。2D平面按照图案进行剪裁和折叠后,将两端预留的粘贴部分粘贴到中间折叠关节处,可形成交叉状的自由旋转的“8”字形基体的腹部。腹部的上下边沿关于折叠关节反对称的设置是为了形成弹性带的不对称变形,实现机器人的斜向跳跃。腹部中央的开口和头尾部的圆孔是为了安装2根SMA弹簧。



(a) “8”字形基体平面设计图(单位:mm)

(a) Planar design of body shaped like “8” (unit:mm)



(b) 折叠形状

(b) Shape after folding

图2 “8”字形基体平面设计图案和折叠方式

Fig.2 Planar design and folding method of body shaped like “8”

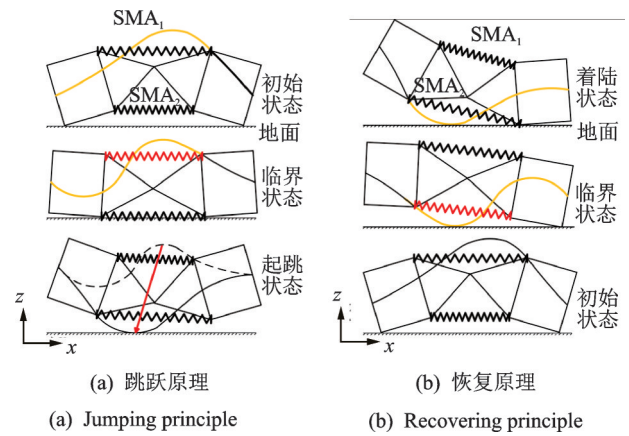
2 理论分析

2.1 机器人跳跃和恢复原理

机器人的跳跃原理如图3(a)所示,在初始状态时加热SMA₁,SMA₁收缩,“8”字形基体绕腹部折叠关节旋转而导致上端相互靠近,通过矩形开口对弹性带施加压力,弹性带黄色部分在边沿处产生滑移,

这一过程中弹性带发生弯曲变形并储存能量。在到达弯曲极限临界状态时,即由弧状变为类余弦状,弹性带发生反转,撞击地面而释放能量,即由上凸状变为下凹状的起跳状态,机器人向斜上方跳跃。

机器人在跳跃后的着陆状态,头部与弹性带触地。它的恢复原理如图3(b)所示,加热SMA₂,SMA₂收缩,“8”字形基体绕腹部折叠关节旋转而导致下端相互靠近,弹性带到达弯曲极限临界状态时发生反转,机器人恢复到初始状态,可以进行二次跳跃运动。



(a) 跳跃原理

(a) Jumping principle

(b) 恢复原理

(b) Recovering principle

图3 机器人的运动原理

Fig.3 Working principle of robot

2.2 弹性带和边沿长度设计

弹性带和边沿的长度共同决定了弹性带的变形程度和储存的总能量,先给定“8”字形基体的结构尺寸,见图2(a),弹性带反转前状态以实线表示,反转后状态以虚线表示。根据机器人的跳跃原理进行弹性带的临界弯曲状态分析,如图4(a)所示,将弹性带分解成3个部分

$$\overline{ABCE} = \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CE} \quad (1)$$

最佳的临界弯曲状态时候, \overline{ABC} 形成类余弦形状,且与边沿卡槽B点弹性带截面相切,易于滑移和变形,根据几何关系分析 \overline{ABCE} 的长度

$$\begin{cases} l_{AB} = \sqrt{l_{AD}^2 + l_{BD}^2} = \sqrt{(x\sin\theta + 15)^2 + (9 - x\cos\theta)^2} \\ \alpha = 2\beta = 2\left(\theta - \arctan \frac{l_{AD}}{l_{BD}}\right) \\ l_{ABCE} = 2l_{AB} + l_{CE} = 2 \frac{\alpha\pi}{180} \frac{l_{AB}}{2\sin(\alpha/2)} + \sqrt{l_{AH}^2 + l_{HF}^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中: θ 为 $\angle BFG$ 的角度; x 为边沿的长度; β 为 \overline{AB} 的转角; α 为 \overline{AB} 对应的圆心角。

边沿长度 x 的大小需要保证弹性带在腹部能上下反转,即预留2倍弧高的间距;同时,初始状态下

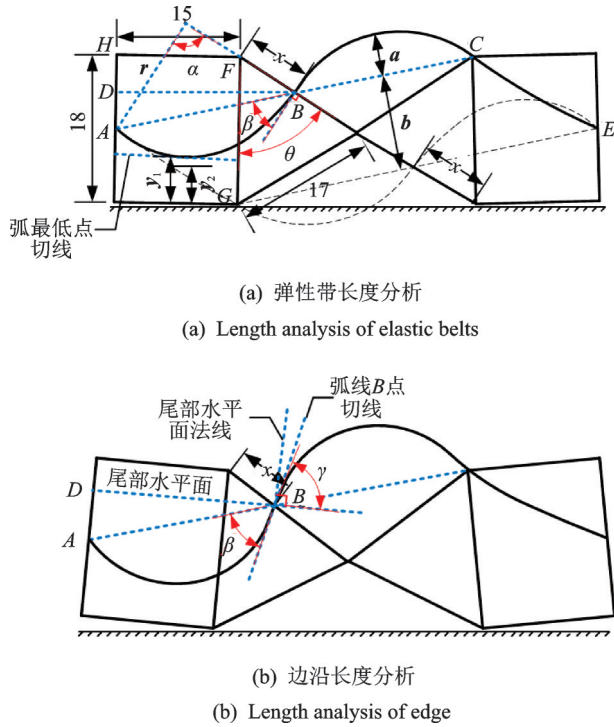


图 4 基于能量储存的结构尺寸分析(单位:mm)

Fig.4 Structure size analysis based on energy storage (unit:mm)

弹性带 \widehat{AB} 最低点与尾部底面的距离要足够弹性带反转。满足条件

$$\begin{cases} y_1 > y_2 \\ b \geq 2a \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的未知量的表达式为

$$\begin{cases} y_1 = r(1 - \cos(\alpha - \theta)) \\ y_2 = 9\left(1 - \frac{r \sin(\alpha - \theta)}{15}\right) \\ a = r(1 - \cos\alpha/2) \\ b = (18 - x \cos\theta - x \sin\theta \tan\angle DBA) \cos\angle DBA \\ r = \frac{l_{AB}/2}{\sin(\beta/2)} \end{cases} \quad (4)$$

其中: y_1 为 \widehat{AB} 最低点切线与身体底面的空隙距离; y_2 为 \widehat{AB} 最低点处弹性带反转后与身体底面的空隙距离; b 为弹性带的反转空间距离; a 为 \widehat{AB} 的弧高; r 为 \widehat{AB} 的半径。

结合式(2)和式(4),计算得出不同 x 取值下,上述各个参数的结果,如表1所示。

因此,边沿长度 x 需要设定在10 mm以内。根据式(2),带入参数 $\theta = 58^\circ, x = 10 \text{ mm}, l_{AH} = 9 \text{ mm}, l_{HF} = 15 \text{ mm}$,则 $l_{ABCE} = 71.37 \text{ mm}$ 。

考虑 \widehat{CE} 部分不是平直的(计算总长时为简化

表 1 边沿长度对尺寸参数的影响

Tab.1 Influence of edge length on dimension parameters mm

x	a	b	y_1	y_2
7	4.34	12.40	6.96	4.38
8	4.70	12.00	6.43	3.85
9	5.05	11.60	5.88	3.38
10	5.42	11.22	5.32	2.93
11	5.80	10.87	4.70	2.48
12	6.17	10.51	4.10	2.07

按照平直计算),设置 l_{ABCE} 的长度为72 mm。

根据跳跃原理,临界状态时,弹性带的储能部分集中在 \widehat{ABC} ,由于反转过程 \widehat{AB} 的左半部分和 \widehat{BC} 的右半部分是撞击在基体尾部和头部的中空结构底面,因此计算总能量时,每根弹性带仅考虑一个弧的应变能,即机器人总弹性能简化成 \widehat{ABC} 储存的总能量。由于弹性带在线弹性范围内工作,弯曲变形可恢复, \widehat{AB} 可视为简支梁,利用梁的弯曲应变能计算

$$\begin{cases} A = \alpha \frac{\pi}{180} = \frac{M_e l_{AB}}{EI} \\ V_\epsilon = W = 2 \frac{M_e^2 l_{AB}}{2EI} \\ I = bh^3/12 \end{cases} \quad (5)$$

其中: M_e 为使弹性带 \widehat{AB} 产生变形需要的外力偶; E 为PVC材料的弹性模量; I 为转动惯量; W 为弹性带变形外力做的功; V_ϵ 为弯曲应变能; b 和 h 分别为弹性带界面的宽和高; A 为 \widehat{AB} 中心角对应的弧度。

$$\text{得} \quad V_\epsilon = A^2 E b h^3 / 12 l_{AB} \quad (6)$$

结合式(2)和式(6), l_{AB} 恒定的情况下, x 减小, l_{AB} 减小, A 增大, V_ϵ 增大。边沿长度减小的影响有:①虽然弹性带不处于最易滑移状态,导致响应时间的增长,但临界状态时弹性带增大的变形程度会提高储能量以及跳跃能力;②过短的边沿会导致弹性带反转困难。分析图4(b), γ 为弹性带在边沿卡槽处的切线与尾部水平面的夹角,若 γ 角度接近于 90° ,那么弹性带很难通过微小滑移、弯曲变形而反转,而是被头尾部分挤压至出现折叠、失效。根据几何关系计算 γ

$$\begin{cases} l_{AB} = \sqrt{l_{AD}^2 + l_{BD}^2} = \sqrt{(x \sin\theta + 15)^2 + (9 - x \cos\theta)^2} \\ \gamma = \beta + \angle DBA = \frac{1}{2} \alpha + \arctan \frac{l_{AD}}{l_{DB}} \\ l_{AB} = \frac{\alpha \pi}{180} \frac{l_{AB}}{2 \sin(\alpha/2)} \end{cases} \quad (7)$$

带入参数 $l_{AB} = 27 \text{ mm}$, $l_{ABCE} = 72 \text{ mm}$, 得到 x 与 γ 的关系

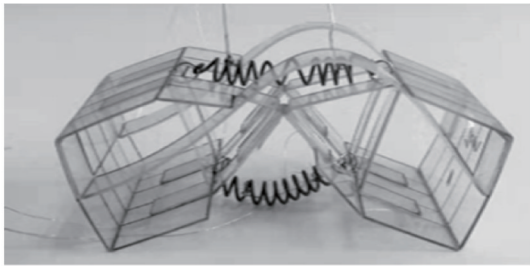
$$\begin{cases} \frac{\alpha}{\sin(\alpha/2)} = \frac{3094}{\sqrt{(x\sin\theta + 15)^2 + (9 - x\cos\theta)^2}} \\ \gamma = \frac{1}{2}\alpha + \arctan \frac{x\sin\theta + 15}{9 - x\cos\theta} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), γ 随着 x 的减小而增大。当边沿长度为 6 mm 时, $\gamma = 85^\circ$, 接近直角状态, 因此边沿长度选择在 7 ~ 10 mm 之间。

弹性带储存的能量 V_e 转化成动能, 继而影响机器人的跳跃能力。

3 实验

根据上述设计理论, 研制了如图 5(a) 所示的机器人样机, 其外形尺寸为 $6 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$, 质量为 3.8g。机器人采用的是具有单向形状记忆效应的 $\text{Ti}_{49.2}\text{Ni}_{50.8}$ SMA 弹簧, 该弹簧外径为 4.16 mm, 丝径为 0.55 mm, 原长为 8 mm, 经过拉伸后安装在机器人的“8”字形基体上。机器人身体选择的是弹性模量为 2.4 GPa 的 0.5 mm 厚的 PVC 塑料薄膜。为了测试机器人的跳跃性能, 利用固纬 GPS-3303C 直流电源给 SMA 弹簧提供电流。



(a) 机器人样机

(a) Photo of prototype soft robot



(b) 样机实验装置

(b) Experimental setup of prototype

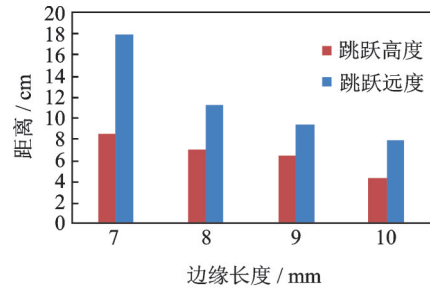
图5 机器人测试系统

Fig.5 Testing system of prototype

3.1 边沿长度与运动性能的关系

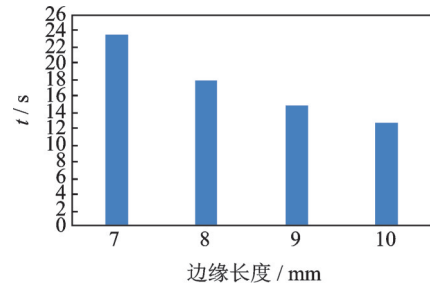
理论分析表明, 边沿长度的减小会导致储存能

量的增大, 继而提高机器人的跳跃能力, 通过实验结果对此进行验证。图 6(a) 和 (b) 显示了在 1A 的加热电流下, 边沿长度 (见图 2) 对机器人跳跃高度、远度以及响应时间的影响。边沿越短, 跳跃性能越好; 但是较短的边沿会增大弹性带临界弯曲的变形程度, 导致响应时间增大。这与理论分析的结果一致。边沿为 7 mm 条件下, 机器人跳 8.67 cm 高、18 cm



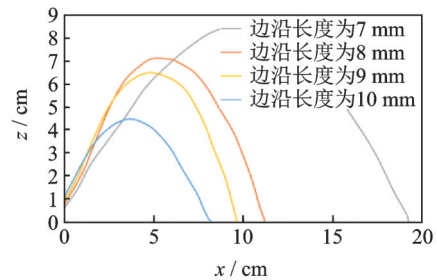
(a) 不同边沿长度下的跳跃性能

(a) Jumping performance under different edge lengths



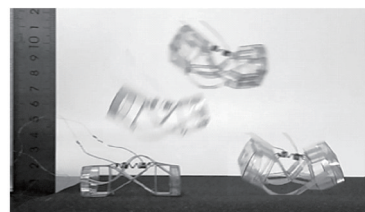
(b) 不同边沿长度下的响应时间

(b) Response time under different edge lengths



(c) 不同边沿长度下的跳跃轨迹

(c) Jumping trajectory under different edge lengths



(d) 边沿为 8mm 时的跳跃过程

(d) Jumping process at 8 mm edge

图6 不同边沿长度下机器人的运动性能

Fig.6 Motion performance under different edge lengths

远,响应时间为23.6 s。选择机器人弹性带的中点为测量点,绘制机器人的跳跃轨迹,如图6(c)所示。弹性带朝着 $-x$ 和 $-y$ 的方向弹开,运动过程平稳,轨迹接近抛物线,边沿为7mm时的跳跃性能尤为显著。因此,可以通过改变边沿长度来适应实际应用的需求。考虑到使用材料的特性,避免SMA弹簧的过度加热以及PVC弹性带的过度变形,设定边沿长度为8 mm。

3.2 驱动电流与运动性能的关系

机器人结构尺寸确定后,即在边沿长度为8 mm、弹性带长度为72 mm的条件下,需要测试机器人合适的驱动条件以及跳跃-恢复过程。不同电流下机器人的响应时间如图7所示。由于SMA热相变的特性,电流越大,SMA升温越快,收缩回原长的响应时间越短。机器人的跳跃能量来源于弹性带的弯曲变形,与电流无关,电流会影响弹性带反转释放能量的速度,导致能量的利用率有所差别。由于该机器人尺寸小、质量轻,使因电流而产生的性能差别可忽略不计,即机器人的跳跃性能取决于结构本身,一旦尺寸参数确定,跳跃性能基本不变。此外,机器人的恢复过程如图8所示。图7显示恢复时间相较于响应时间要长,这是因为需要克服SMA残余的热应力。过小的电流无法提供足够的回复力使弹性带变形;过大的电流会产生可能使PVC基体受损的过量热量。因此,选择0.6~1.4 A的电流范围。在电流1.4 A的情况下,机器人的响应时间为6 s,恢复时间为9.5 s。

实验表明:双SMA弹簧工作和控制独立,相互配合实现弹性带的交替反转变形,完成机器人的跳跃和恢复功能,满足机器人的连续运动要求;利用对称结构的设计减少了驱动器的数量和结构复杂度,跳跃高度和远度达到了身体尺寸的3倍,具备较好的实际应用性,协调了运动稳定和跳跃能力之间的矛盾。

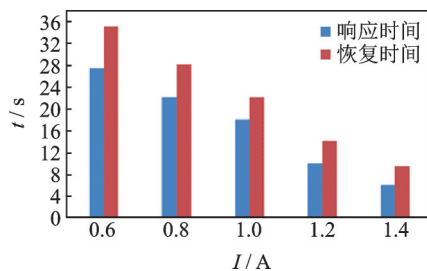


图7 不同驱动电流下机器人的响应和恢复时间
Fig.7 Response recovering time under different driving currents

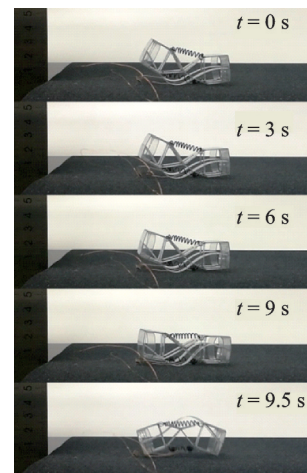
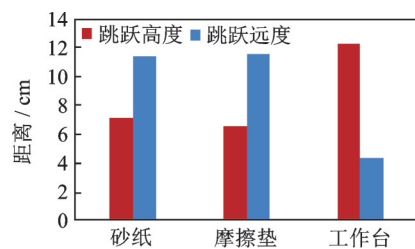


图8 机器人在1.4 A下的恢复过程

Fig.8 Recovery process of robot under 1.4 A

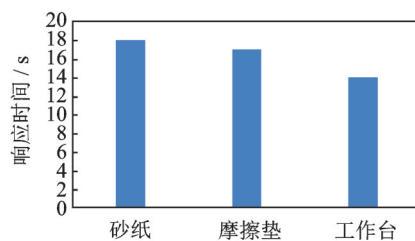
3.3 工作面与运动性能的关系

本研究的跳跃机器人的设计目标是能够在非结构化的粗糙工作面上实现行走和探索任务,因而上述实验中,机器人的工作平面采用的是砂纸,不同的工作面上机器人的跳跃性能如图9(a)所示。机器人在工作台上的跳跃高度远高于砂纸,跳跃远度大大减少。因为在较光滑的平面上,弹性带斜向翻转,撞击地面时产生打滑现象,弹性带的斜向跳跃的效果大大减弱,导致机器人跳跃后发生空中翻转。为了使机器人能够适应不同的工作表面,采用在机器人弹性带上适当部位粘贴摩擦纸的方式,增加弹性带与地面相互作用时的抓地力,机器人在同样的工作台上的跳跃性能相较于未加摩擦垫得到了提高。由此得出,可以通过粘贴摩擦片的方式使机器人能够适应不同粗糙程



(a) 不同工作面上的跳跃性能

(a) Jumping performance on different working surfaces



(b) 不同工作面上的响应时间

(b) Response time on different working surfaces

图9 不同工作面上机器人的运动性能

Fig.9 Motion performance on different working surfaces

度的工作面,并具有良好的跳跃性能。粗糙的表面会阻碍弹性带变形过程中“8”字形基体的滑移,因而光滑工作台表面的响应时间较短。机器人在不同工作面上良好的适应性有利于扩大其运动范围。

4 结束语

针对狭窄、复杂的非结构化地形下的探索任务,提出了一种SMA智能材料驱动连续跳跃的柔性机器人。为了实现机器人结构的轻量化及制造过程的简化,采取图案平面化设计和整体式基体构造。基于跳跃过程的原理分析和理论计算,对与机器人储能相关的关键尺寸参数进行优化设计,并制造了机器人的样机,测试验证了理论分析的正确性。实验结果表明:在边沿长度为7 mm时,机器人最大的跳跃高度和速度分别为8.5 cm和18 cm;驱动电流越大,响应时间和恢复时间越短,在1.4 A的加热电流下,机器人的响应时间为6 s,恢复时间为9.5 s;采用在弹性带上贴附摩擦片的方法,机器人可以适应不同粗糙程度的工作面,而保持良好的跳跃能力;通过控制SMA₁和SMA₂的驱动时序,机器人可以完成跳跃、状态恢复、再次跳跃的连续过程。机器人具有尺寸小、质量轻、结构简单、制造容易、着陆稳定及可连续运动的特点,能够适应狭窄复杂环境下的探索任务。

参 考 文 献

- [1] 魏敦文,葛文杰. 跳跃机器人研究现状和趋势[J]. 机器人, 2014, 36(4): 503-512.
WEI Dunwen, GE Wenjie. Research status and development trend of hopping robots[J]. Robot, 2014, 36(4): 503-512. (in Chinese)
- [2] KOVAČ M, FUCHS M, GUIGNARD A, et al. A miniature 7g jumping robot [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA: IEEE, 2008: 373-378.
- [3] SARFOGLIERO 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.
- [4] LI S G, KATZSCHMANN R, RUS D. A soft cube capable of controllable continuous jumping [C] // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 1712-1717.
- [5] MINTCHEV S, ZAPPETTI D, WILLEMIN J, et al. A soft robot for random exploration of terrestrial environments [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, Australia: IEEE, 2018: 7492-7497.
- [6] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and

control of soft robots [J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.

- [7] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J B, et al. Soft robotics: a 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion [J]. Science, 2015, 349(6244): 161-165.
- [8] LOEPFE M, SCHUMACHER C M, LUSTENBERGER U B, et al. An untethered, jumping roly-poly soft robot driven by combustion [J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 33-41.
- [9] BIRCH M C, QUINN R D, HAHM G, et al. Design of a cricket microrobot [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA: IEEE, 2014: 1109-1114.
- [10] DUBOWSKY S, KESNER S, PLANTE J S, et al. Hopping mobility concept for search and rescue robots [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2008, 35(3): 238-245.
- [11] NISHIKAWA S, ARAI Y, NIYAMA R, et al. Coordinated use of structure-integrated bistable actuation modules for agile locomotion [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 1018-1024.
- [12] RODRIGUE H, WANG W, HAN M W, et al. An overview of shape memory alloy-coupled actuators and robots [J]. Soft Robotics, 2017, 4(1): 3-15.
- [13] NOH M, KIM S W, AN S, et al. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5): 1007-1018.
- [14] REN Z J, WANG H S, CHEN W D. Frog-inspired hind limb for jumping robots [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macau, China: IEEE, 2017: 605-610.
- [15] HO T, LEE S. Design of an shape memory alloy-actuated biomimetic mobile robot with the jumping gait [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2013, 11(5): 991-1000.
- [16] HO T, LEE S. Analysis and simulation of a jumping robot actuated by shape memory alloy [J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016(302): 1315-1326.



第一作者简介:毛婷,女,1995年10月生,硕士。主要研究方向为压电作动器和柔性机器人的设计与应用。曾发表《A small locust inspired actuator driven by shape memory alloys and piezoelectric strip》(《Smart Materials and Structures》2019, Vol.28, No.10)等论文。
E-mail: maoting@nuaa.edu.cn

通信作者简介:彭瀚旻,男,1984年4月生,博士,副教授。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