

仿尺蠖蠕动模块化软体机器人的设计^①

王 绪^② 费燕琼 许红伟 朱宇航

(上海交通大学机器人所 上海 200240)

摘要 仿照尺蠖特有的 Ω 式蠕动运动方式,设计了一种能蠕动前进的模块化软体机器人。该机器人由 4 个可重组的软体球型单元模块和一对可变形软体摩擦腹足组成,通过球型模块的依次膨胀和收缩,以及软体摩擦腹足的交替吸附和脱离,实现在粗糙面上的蠕动前进。分析了该机器人的蠕动前进的运动模式,推导出了单个球型单元模块膨胀半径与压强的关系,建立了四个软体球型单元模块的膨胀、收缩和腹足交替吸附和脱离的运动模型。试验和理论验证结果表明,该机器人能实现仿尺蠖蠕动前进运动。

关键词 软体机器人, 柔性模块, 尺蠖蠕动

0 引言

软体机器人研究是仿生学研究的延续,由于软体机器人具有很强的环境适应能力,因而对软体机器人的研究已成为当前机器人研究领域的热点之一。目前国外研制出的比较有代表性的软体机器人有美国塔夫兹大学研制的仿烟草天蛾幼虫的软体机器人^[1],美国 iRobot 公司和芝加哥大学联合研制的 Blob bot 化学机器人^[2],日本早稻田大学研制的仿生尺蠖^[3],欧洲章鱼项目组研制的仿生章鱼机器人^[4],麻省理工学院研制的四足软体机器人^[5];国内研制的有上海交通大学的 3 球型软体机器人^[6,7],中国科学技术大学的仿变形虫机器人^[8]等。以上机器人的运动都具有一定的局限性,为了进一步研究适应多任务、多环境的软体机器人的运动,本研究设计了一种由多个模块单元组成的软体机器人,该机器人由 4 个可变形的球型模块单元和一对软体摩擦腹足构成,通过球型模块的依次膨胀和收缩,软体摩擦腹足的吸附和脱离,实现了机器人在粗糙环境中的蠕动前进。

1 仿尺蠖蠕动模块化软体机器人结构

经分析,仿照尺蠖蠕动模块化软体机器人的最简结构可由 4 个可重组的软体球型模块单元(模块单元 1—头部,模块单元 2—躯干,模块单元 3—躯干,模块单元 4—尾部)和前、后软体摩擦腹足组成(如图 1 所示),每个模块单元之间可以断开或粘接。模块单元 1 的底部粘接前腹足,模块单元 4 的底部粘接后腹足。

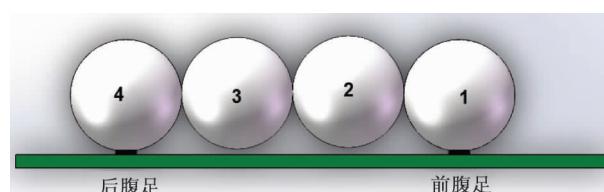


图 1 模块化软体机器人结构

2 单个球型模块单元分析

每个球型模块单元由高弹橡胶铸造而成。假设每个球型模块单元的初始半径为 r_0 , 初始壁厚为

① 国家自然科学基金(51475300)资助项目。

② 男,1988 年生,硕士;研究方向:模块化软体机器人;联系人,E-mail: wangxu428@126.com
(收稿日期:2015-04-21)

d_0 , 初始内部压强为 p_0 , 膨胀后半径为 r , 壁厚为 d , 内部压强为 p , 根据 Mooney-Rivlin 方程^[9], 可得单个球型模块单元的材料能量方程^[10]:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

其中 I_1, I_2 由主轴伸长率参数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 决定, 关系式为

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

主轴伸长率参数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 由初始半径 r_0 、初始壁厚 d_0 和膨胀后半径 r 、膨胀后壁厚 d 决定:

$$\lambda_1 = \frac{d}{d_0}, \lambda = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{r}{r_0} \quad (3)$$

内部压强 p 表示为

$$p = \frac{4d}{r\lambda} \left(1 - \frac{1}{\lambda^6}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_1}\right) \quad (4)$$

由式(1), (4) 可得

$$p = 4d_0 [C_1(r^{-1} - r_0^6 r^{-7}) + C_2(r_0^{-2} r - r_0^4 r^{-5})] \quad (5)$$

其中 C_1, C_2 为材料特有的常量, $C_2/C_1 = 0.0235^{[4]}$ 。根据式(5), 若 d_0 取 0.1mm, 初始半径 r_0 发生变化时, 膨胀半径 r 与单个球型模块单元内部压强 p 的关系如图 2 所示: 初始半径 r_0 越小, 膨胀半径 r 膨胀到最大值 r_{max} 时内部压强 p 也越大。单个球型模块的膨胀和收缩速率与球型模块初始半径 r_0 和膨胀半径 r 紧密相关。

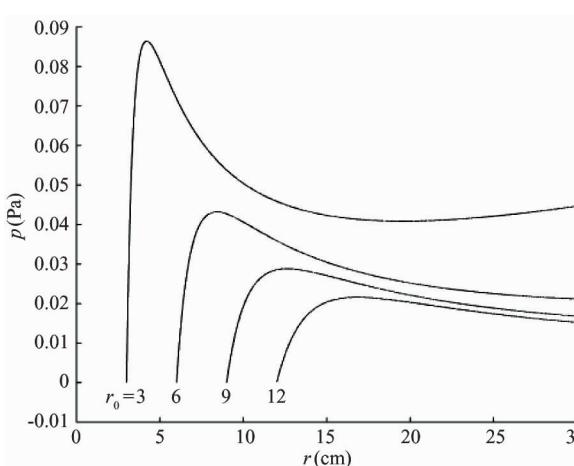


图 2 初始半径 r_0 、膨胀半径 r 、压强 p 的关系

3 仿尺蠖蠕动模块化软体机器人运动描述

通过各个球型模块的依次膨胀与收缩以及软体摩擦腹足的吸附与脱离的相互配合, 软体机器人可以实现前进运动。机器人单位时间内的移动距离和机器人的一个蠕动周期所用的时间成反比, 而机器人蠕动一个周期所需的时间与机器人的球型模块的膨胀和收缩速率成反比。在球型模块膨胀速率一定的情况下, 球型模块内部压强 p 越大, 其收缩速率也越大。通过分析图 2 可知, 在不同的初始半径 r_0 条件下, 球型模块在最大半径 r 时内部压强 p 也不一样。根据图 2 所示, 取初始半径 $r_0 = 3\text{cm}$, 最大半径 $r = 5.5\text{cm}$ 时, 随着半径的增加, 单个球型模块内部压强增加。假设摩擦腹足与地面接触时球型模块摩擦力为 1, 摩擦腹足未与地面接触时球型模块摩擦力为 0。

图 3 描述了球型模块的膨胀步骤。第 1 步骤如图 3(a) 所示。假设 4 个球型模块单元依次为 s_1, s_2, s_3, s_4 , 质量为 $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m$, 取每个模块的球心位置为其质心位置, 前摩擦腹足为 t_1 , 后摩擦腹足为 t_2 , 摩擦腹足质量为 $m_f = \frac{1}{2}m$, 以模块单元 s_4 的质心 o_i 为整个机器人系统的位置参考点, 并以模块 s_4 初始质心位置 o_1 为坐标原点位置建立二维直角坐标系。 $\Delta L_i (i = 1, 2, 3, \dots, 9)$ 表示机器人位置参考点在二维坐标系 oxy 上的位移变化值。模块 s_i 质心位置表示为 (x_i^z, y_i^z) , 其中 i 表示第 i 球, z 表示在 z 步骤。在第 1 步骤中, 机器人处于原始位置 $\Delta L_1 = 0$ 。

第 2 步骤如图 3(b) 所示。模块 s_2 的半径由 r_0 膨胀到 r , 由于 $m_3 + m_4 + m_f > m_1 + m_f, r > r_0$, 模块 s_1 和前摩擦腹足会被抬起, 摩擦力为 0, 球型模块 s_4 和后摩擦腹足接触地面, 摩擦力为 1。模块 s_1, s_2 会被向前(右)推动, 球型模块 s_4 位置不发生改变。 α 为模块 s_2, s_3, s_4 质心连线与 x 轴平行线之间的夹角, θ 为模块 s_1, s_2 质心连线与 x 轴平行线之间的夹角, 为便于分析取 $\theta = 0^\circ$ 。位置参考点的变化值为 $\Delta L_2 = 0$ 。

第3步骤如图3(c)所示。模块 s_4 半径由 r_0 膨胀到 r , 模块 s_4 和后摩擦腹足会持续接触地面, 质心位置保持不变, 前摩擦腹足和模块 s_1 持续脱离地面, 位置参考点的变化值为 $\Delta L_3 = 0$ 。

第4步骤如图3(d)所示。模块 s_3 半径由 r_0 膨胀到 r , 模块 s_4 和后摩擦腹足继续与地面吸附, 前摩

擦腹足和模块 s_1 仍与地面脱离, 位置参考点的变化值为 $\Delta L_4 = 0$ 。

第5步骤如图3(e)所示。模块 s_1 半径由 r_0 膨胀到 r , 模块 s_4 和后摩擦腹足持续接触地面, 模块 s_1 逐渐膨胀, 当膨胀半径为 $r - (r + r_0)\sin\theta$ 时, 前摩擦腹足接触地面, 位置参考点的变化值为 $\Delta L_5 = 0$ 。

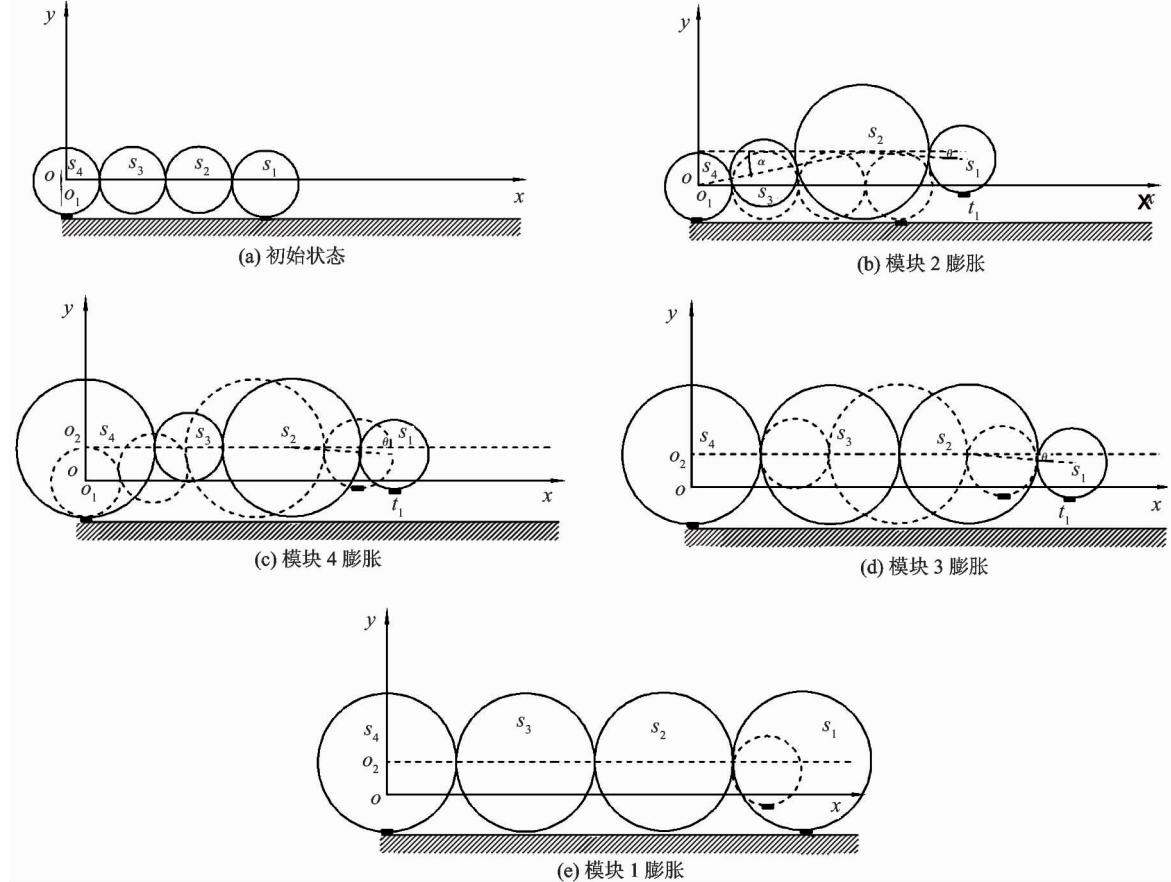


图3 球型模块膨胀过程

图4描述了球型模块的收缩步骤(步骤6~步骤9)。第6步骤如图4(a)所示。模块 s_4 半径由 r 收缩到 r_0 , 因为 $m_4 + m_f < m_2 + m_1 + m_f$, 所以模块 s_4 和后摩擦腹足脱离地面, 所受摩擦力为0; 模块 s_1 和前摩擦腹足接触地面, 所受摩擦力为1。所以模块 s_4 质心向前(右)移动。类似图3(b), 模块 s_4, s_3 的质心连线与 x 轴的平行线的夹角为 θ , 为便于分析取 $\theta = 0^\circ$ 。各球型模块质心位置和位置参考点的变化值为

$$(x_1^6 \quad x_2^6 \quad x_3^6 \quad x_4^6) = (6r \quad 6r - 2r \quad 6r - 4r \quad 6r - (4r + (r + r_0)\cos\theta))$$

$$\begin{aligned} (y_1^6 \quad y_2^6 \quad y_3^6 \quad y_4^6) &= \\ (r - r_0 \quad r - r_0 \quad r - r_0 \quad (r - r_0) - (r + r_0)\sin\theta) \\ \Delta L_6 &= 2r - (r + r_0)\cos\theta \end{aligned} \quad (6)$$

第7步骤如图4(b)所示。模块 s_2 半径由 r 收缩到 r_0 , 各球型模块质心位置和位置参考点的变化值为

$$\begin{aligned} (x_1^7 \quad x_2^7 \quad x_3^7 \quad x_4^7) &= \\ (6r \quad 6r - (r + r_0) \quad 6r - 2(r + r_0) \\ 6r - [2(r + r_0) + (r + r_0)\cos\theta]) \\ (y_1^7 \quad y_2^7 \quad y_3^7 \quad y_4^7) &= (r - r_0 \quad r - r_0 \quad r - r_0 \\ (r - r_0) - (r + r_0)\sin\theta) \end{aligned}$$

$$\Delta L_7 = 6r - [2(r + r_0) + (r + r_0)\cos\theta] - (2r - (r + r_0)\cos\theta) \quad (7)$$

第 8 步骤如图 4(c) 所示。模块 s_1 半径由 r 收缩到 r_0 , 类似类似图 3(b), 模块 s_1, s_2, s_3 质心连线与 x 轴平行线之间的夹角为 α , 各球型模块质心位置和位置参考点的变化值为:

$$(x_1^8 \quad x_2^8 \quad x_3^8 \quad x_4^8) = \\ (6r \quad 6r - 2r_0\cos\alpha \quad 6r - (r + 3r_0)\cos\alpha \\ 6r - [(r + 3r_0)\cos\alpha + (r + r_0)\cos\theta])$$

$$(y_1^8 \quad y_2^8 \quad y_3^8 \quad y_4^8) = \\ (0 \quad 2r_0\sin\alpha \quad r - r_0 \quad (r - r_0) - (r + r_0)\sin\theta)$$

$$\Delta L_8 = 6r - [(r + 3r_0)\cos\alpha + (r + r_0)\cos\theta] - [6r - [2(r + r_0) + (r + r_0)\cos\theta]] \quad (8)$$

第 9 步骤如图 4(d) 所示。模块 s_3 半径由 r 收缩到 $r_0 + (r + r_0)\sin\theta$ 的过程中, 各球型模块质心位置和位置参考点的变化值为

$$(x_1^9 \quad x_2^9 \quad x_3^9 \quad x_4^9) = \\ (6r \quad 6r - 2r_0 \quad 6r - 4r_0 \quad 6r - 6r_0)$$

$$(y_1^9 \quad y_2^9 \quad y_3^9 \quad y_4^9) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$\Delta L_9 = 6r - [(r + 3r_0)\cos\alpha + (r + r_0)\cos\theta] - [6r - 6r_0] \quad (9)$$

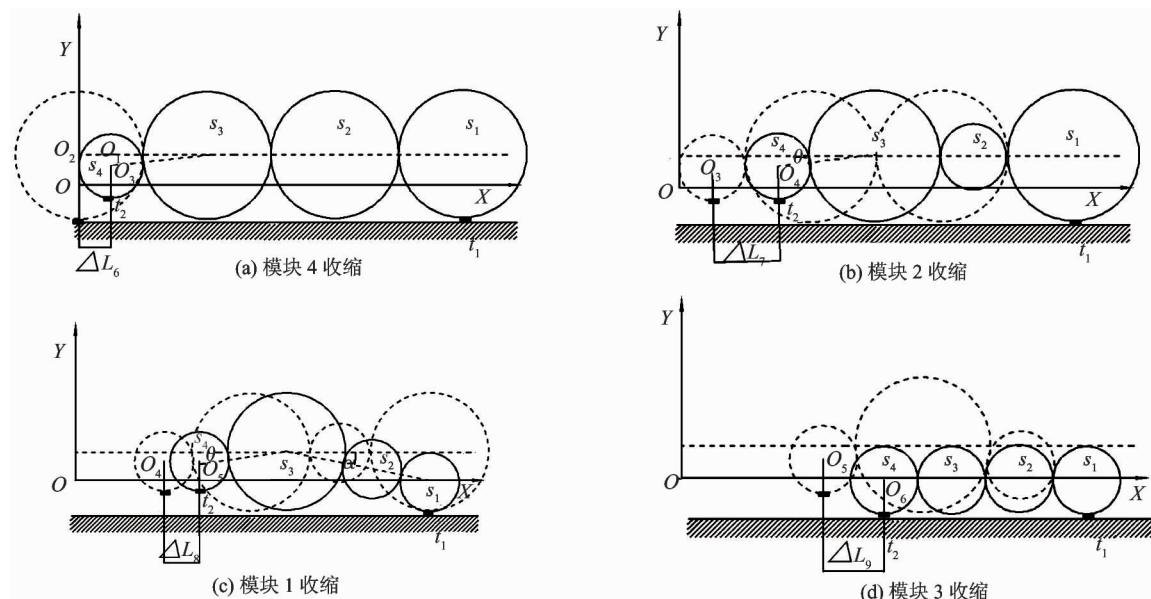


图 4 球型模块收缩过程

在一个周期中机器人的前进距离为

$$L = \Delta L_6 + \Delta L_7 + \Delta L_8 + \Delta L_9 = 6r - 6r_0 \quad (10)$$

4 试验验证

本研究设计的仿尺蠖蠕动模块化软体机器人依次通过各个球型模块单元的膨胀、收缩和前后腹足的相互配合, 使机器人取得向前的运动。图 5 中各

图对应图 3 和图 4 中相应的膨胀、收缩图, 选取球型模块初始半径 $r_0 = 3\text{cm}$, 膨胀半径 $r = 5.5\text{cm}$, 图 5 中每 1 小格为 4cm , 经过一个周期的运动, 机器人向前移动了 14cm , 式(10)中计算理论前进距离 15cm 有一定的差别。这是由于实际试验中各个球型模块和地面之间以及通气导管和地面之间存在一定的摩擦, 但是软体机器人的前进方向不会改变, 综上所述, 机器人的蠕动前进运动分析正确。

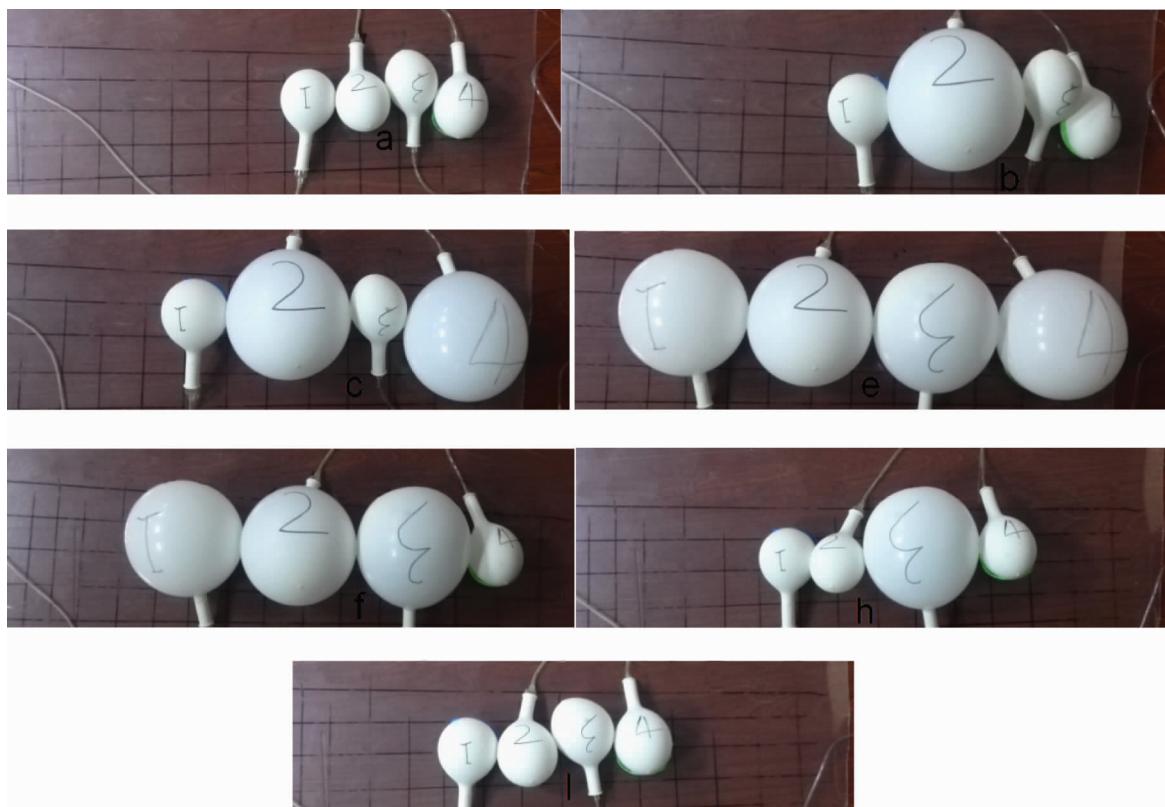


图 5 机器人前进验证实验

5 结 论

本研究基于尺蠖运动原理设计了一个多模块单元可重组的软体机器人,它由 4 个可重组的软体球型模块单元和前后两个软体摩擦腹足组成。根据每个模块单元的依次膨胀、收缩,分析了机器人的蠕动前进的运动模式,推出了机器人前进中各球型模块的质心坐标变换的表达式;得出了机器人一个蠕动周期前进距离的表达式。最后通过试验验证了该机器人能实现向前蠕动运动。

参考文献

- [1] Rieffel J, Knox D, Smith S, et al. Growing and evolving soft robots. *Artificial life*, 2014, 20(1) : 143-162
- [2] Correll N, Önal Ç D, Liang H, et al. Soft autonomous materials—using active elasticity and embedded distributed computation. In: Springer Tracts in Advanced Robotics, Experimental Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2014, 27: 227-240
- [3] Maeda S, Hara Y, Yoshida R, et al. Self-oscillating gel actuator for chemical robotics. *Advanced Robotics*, 2008, 22(12) : 1329-1342
- [4] Tramacere F, Kovalev A, Kleinteich T, et al. Structure and mechanical properties of Octopus vulgaris suckers. *Journal of The Royal Society Interface*, 2014, 11(91) : 20130816
- [5] Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(51) : 20400-20403
- [6] 费燕琼, 吕海洋, 沈星尧. 模块化软体机器人运动模式. 上海交通大学学报(自然版), 2013, 47(12) : 1870-1973
- [7] Fei Y, Shen X. Nonlinear analysis on moving process of soft robots. *Nonlinear Dynamics*, 2013, 73(1-2) : 671-677
- [8] 杜勇. 具有多运动模式的可变形软体机器人研究: [博士学位论文]. 中国科学技术大学精密仪器及机械系, 2013
- [9] Silva M P E, Jorge R N, Mascarenhas T. Using an inverse method for optimizing the material constants of the

Mooney-Rivlin constitutive model. In: Proceedings of the 2015 IEEE 4th Portuguese Meeting on Bioengineering. 2015. 1-4

[10] Destrade M, Saccomandi G. Finite amplitude inhomogeneous waves in Mooney-Rivlin viscoelastic solids. *Wave Motion*, 2013, 40(3):251-262

Design of modular soft robots imitating inchworm peristalsis

Wang Xu, Fei Yanqiong, Xu Hongwei, Zhu Yuhang

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract

In imitation of inchworms' special Ω movement, a kind of modular soft robot capable of moving like inchworm peristalsis was designed. The robot is composed of four reconfigurable and soft spherical modules, and a pair of friction gastropods, and it can peristaltically moves on a rough surface by the spherical modules' successive inflation and deflation, as well as the alternative kelleg and leave of the friction gastropods. The robot's inchworm peristalsis mode was analyzed, the relation between the expansible radius and the pressure in a single spherical module was inferred, and the dynamic moving process was modeled with the deflating and inflating modes of each module and the kelleg and leave of the friction gastropods. The modular soft robot can move forward like inchworm motion. This was verified by experiment and theoretical analysis.

Key words: soft robot, flexible modules, inchworm peristalsis