

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.005

长臂式仿生软体机器人及其主动弯曲模型^{*}

姚鹏飞¹, 高 涛², 鲍官军^{1*}, 李 昆¹, 许宗贵¹, 王志恒¹

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310014; 2. 中国联合工程公司, 浙江 杭州 310052)

摘要:针对软体机器人结构化分析困难的问题,对软体机器人气腔耦合结构、嵌入式加强材料以及充气状态下的弯曲变形等方面进行了研究,提出了一种新型的长臂式仿生软体机器人结构,该结构为多腔、多节耦合,可以实现任意方向的大范围弯曲。通过力矩平衡方程建立了长臂式仿生软体机器人的静态模型及主动弯曲数学模型,并实现了基节的各个力矩的数值化近似求解。采用上、下位机控制思想,基于ITV气压比例阀搭建了实验平台并设计、制作了软体机器人样机进行测试。研究结果表明,弯曲运动实验结果与仿真曲线基本一致,由此验证了理论模型的正确性。

关键词:长臂式仿生软体机器人;静态模型;弯曲理论

中图分类号:TH122; TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)04-0346-05

Structure & bending model of long-arm biomimetic soft robot

YAO Peng-fei¹, GAO Tao², BAO Guan-jun¹, LI Kun¹, XU Zong-gui¹, WANG Zhi-heng¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. China United Engineering Corporation, Hangzhou 310052, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of software robot structural analysis, studying on multi-cavity coupling structure of soft robot, the bending reinforcement material and bending deformation under charging state, a novel long-arm biomimetic soft robot with multi-cavity and multi-segment coupled structure was proposed. This structure could achieve large range bending in any direction. Building bending equation and static model based on moment equilibrium at the end of each segment, the approximate numerical solution was obtained for each moment of the basal and tail segment. The prototype of the long-arm biomimetic robot was designed and fabricated for experiment and the experimental platform was based on electro-pneumatic regulator. The results indicate that the established bending model according to similar data curve.

Key words: long-arm biomimetic soft robot; static model; bending theory

0 引 言

伴随着机械制造、材料研发和控制技术的高速发展以及仿生学的深入研究,软体机器人得到了越来越多的关注。相对于刚性机器人而言,软体机器人具有在非结构复杂环境中与难以用准确的数学模型加以描述的复杂多变对象进行交互作业的能力,而且这类软体机器人一般具有充分的柔顺性、适应性、超冗余或无限自由度,甚至可以任意改变自身形状和尺寸以适应

环境和目标。

Walker等人^[1]分析了章鱼腕足的解剖结构及工作原理,并应用McKibben气动肌肉驱动器设计了仿章鱼腕足的长臂式连续机器人OCTARM,研究了OCTARM的运动规划和位姿控制方法。应用类似的方法,Walker^[2]在分析象鼻解剖结构的基础上研制了象鼻机器人,采用电机-绳索机构驱动蛇形骨架实现,利用弹簧提供运动的回复力。此外,Tsukagoshi等^[3]开发了地震灾后救援的气动仿生象鼻连续体机器人ActiveHose,加拿大Kinetic Sciences公司研制了KSI仿

收稿日期:2016-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405441);浙江省自然科学基金资助项目(Q15E050025)

作者简介:姚鹏飞(1991-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事软体机器人方面的研究。E-mail:yaopengfei@zjut.edu.cn

通信联系人:鲍官军,男,副教授,硕士生导师。E-mail:gjbao@zjut.edu.cn

生触角机器人^[4-5]。上海交通大学 Tao Deng 等^[6]研制了一种模仿象鼻结构的软体机器人,采用电机-绳索驱动的盘形骨架结构,外套为硅橡胶材料,进行了初步的心脏手术模拟试验。并且,Suzumori^[7]研发了以纤维作为加强材料的多腔气动软体机器人,研究了软体机器人在高压气体作用下的弯曲模型与输出力模型的特性。

由意大利、瑞士、以色列、英国、希腊 5 个国家的 7 个研究机构共同承担的欧洲章鱼项目进行了仿生章鱼的研究^[8]。章鱼项目组试验分析了章鱼肌肉几何和生物力学特性^[9-12],提出了基于 EAP 人工肌肉的章鱼触手结构,由 4 个弧形 EAP 肌肉构成的横向肌肉组成,当施加 2 000 V 电压时,EAP 仿生章鱼触手可达到约 20% 的收缩量^[13]。后来,章鱼项目组采用 SMA 骨架、硅橡胶外套和电机绳索驱动结构研制出章鱼腕足机器人^[14-15],能够模仿章鱼腕足的运动模式和简单抓持动作。

章鱼类腕足生物的优点是具有全向弯曲的能力,快速伸缩以及大范围改变其刚度的能力。章鱼能实现这些独特功能归因于其独特的肌肉性静水骨骼结构(muscular hydrostat)。基于章鱼腕足的生物构造,本研究提出一种新型的多腔耦合气动结构—长臂式仿生软体机器人,并研究其主动弯曲模型。

1 长臂式仿生软体机器人结构

1.1 基节结构

基节解剖结构如图 1 所示。

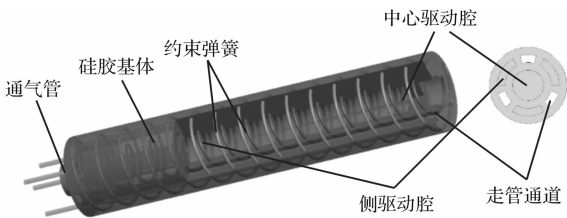


图 1 基节结构

基体由硅胶材料制成,基节包括硅胶基体、通气管、中心驱动腔和侧驱动腔,硅胶基体呈圆柱形,且硅胶基体的中部设有中心驱动腔,在中心驱动腔外的弹性基体的一圈上等圆弧间隔地设有至少 3 个驱动腔,中心驱动腔和侧驱动腔的两端均封闭,中心驱动腔和侧驱动腔均与通气管连通,由通气管输入高压气体以驱动机器人伸长或弯曲,为防止充气后发生径向大变形,本研究在各驱动腔内外壁埋置约束弹簧,同时可增大整体刚度。该结构为模块化结构,两端设置连接结构,可多节串联,各节的通气管可由走管通道统一走到基节的一端。通过控制侧驱动腔的气体压力,可以实

现基节的全向弯曲运动。

1.2 尾节结构

尾节的结构如图 2 所示。



图 2 尾节结构

其设计思想与基节一致,不同之处在于末端逐渐缩小。基节与尾节串接之后,可实现模仿章鱼腕足的伸长、弯曲、抓握等功能,同时通过调节中心驱动腔的压缩气体压力,可以实时控制机器人的本体刚度。

该基节与尾节均为模块化结构,两端设置连接结构,可多节串联,各节的通气管可由走管通道统一走到基节的一端。

2 弯曲理论分析

2.1 静态模型

软体机器人的弯曲力矩直接影响了其弯曲角度的大小,为了研究软体机器人的弯曲过程静态模型,必须对软体机器人的各驱动力的力矩进行数学建模,将机器人基节和尾节看作是一端固定、一端自由的悬臂结构,基节弯曲力矩分析如图 3 所示。

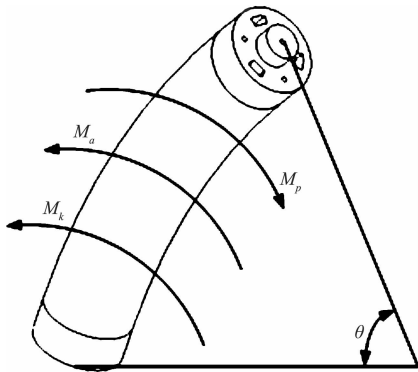


图 3 基节弯曲力矩分析

机器人在各驱动腔压力的作用下,克服弹簧的抗弯力矩和硅胶基体的弹性力矩,发生弯曲运动,根据力矩平衡得:

$$M_p - M_a - M_k - M = 0 \tag{1}$$

式中: M_p —软体机器人的侧驱动腔气体压力对其中心线产生的弯曲力矩, M_a —软体机器人硅胶基体对其中心线产生的抗弯力矩, M_k —软体机器人弹簧对其中心

线产生的弯曲力矩, M —软体机器人受到的外力矩。

2.2 气压对中心线产生的驱动力矩分析

基节侧驱动腔力矩如图 4 所示。

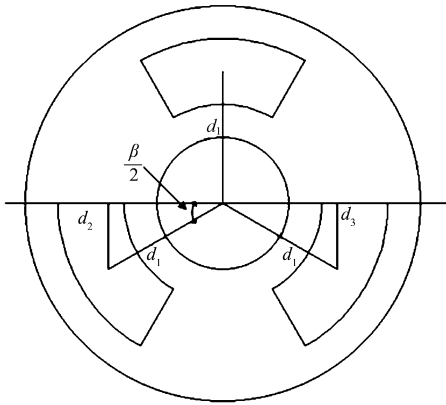


图 4 基节侧驱动腔力矩

基节截面产生的气压力矩和弹性力矩主要由侧驱动气腔及其气腔壁的硅胶基体产生,因此本研究对力矩的研究也主要围绕侧驱动气腔展开,基节的 3 个侧驱动腔内气压分别对其中心线产生的驱动力矩:

$$M_{pi} = F_p d_i \quad (2)$$

式中: d_i —基节侧驱动腔内中心至基节中心线的距离, $i = 1, 2, 3$ 。

基节截面如图 5 所示。

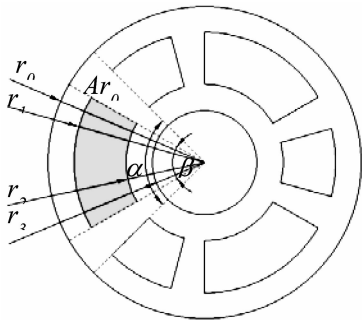


图 5 基节截面

r_0 —软体机器人基节的外径; r_1, r_2 —基节侧驱动腔的外半径和内半径; r_3 —基节中心驱动腔的外径;
 A_{r_0} —基节分离单腔基体的初始截面积

定义截面半径如图 5 所示,软体机器人的结构设计中,各个半径满足:

$$r_1 = 0.8r_0 \quad (3)$$

$$r_2 = 0.6r_0 \quad (4)$$

$$r_3 = 0.4r_0 \quad (5)$$

根据图 5 与式(2),基节驱动腔对软体机器人中心线力矩为:

$$M_{pi} = F_{pi} d_i = (P_i - P_{atm}) A_{r_0} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (6)$$

综上所述可得基节在弯曲角度为 θ 时,气压力对其中心线产生的驱动力矩为:

$$M_p = M_{p1} - M_{p2} - M_{p3} =$$

$$0.098r_0^3\beta[(P_1 - P_{atm}) - (P_2 + P_3 - 2P_{atm})\sin\frac{\beta}{2}] \quad (7)$$

2.3 硅胶基体对中心线产生的弹性力矩分析

基节在弯曲状态下,中心轴线变成了半径为 R 、中心角为 θ 的圆弧,基节在弯曲过程中的伸长量和轴向变形过程中伸长量不同,设基节在弯曲 θ 角度的时候其中心线长度为 L_θ ,则可得:

$$L_{\theta i} = R_i \theta \quad (8)$$

根据式(8),结合应力应变公式可得硅胶基体的应力为:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i = E \frac{\Delta L_i}{L_0} = E \frac{L_{\theta i} - L_0}{L_0} \quad (9)$$

基节弯曲过程中径向变形忽略不计,因此硅胶基体的壁厚发生变化,导致硅胶基体弹性力对应的截面积发生变化,所以基节分离单腔在基节弯曲 θ 角度时根据总体积不变的原则,可得它们各自的弹性力对应的截面积分别为:

$$A_i = \frac{L_0}{L_0 + \Delta L_i} A_{r_0} \quad (10)$$

依据弯曲力矩理论,可以得出:

$$M_i = \sigma_i A_i d_i \quad (11)$$

综上所述可得基节在弯曲角度为 θ 时,硅胶基体弹性力对其中心线产生的负载力矩为:

$$M_a = M_{a1} + M_{a2} + M_{a3} =$$

$$0.7(0.42\alpha - 0.14\beta)Er_0^3 \left[\frac{(R\theta + 0.7r_0\theta - L_0)}{R\theta + 0.7r_0\theta} + \frac{2(R\theta - 0.7r_0\theta\sin\frac{\beta}{2} - L_0)\sin\frac{\beta}{2}}{R\theta - 0.7r_0\theta\sin\frac{\beta}{2}} \right] \quad (12)$$

2.4 弹簧对中心线产生的弯曲力矩分析

软体机器人基节的中心驱动腔和侧驱动腔内各有一个圆柱螺旋弹簧,对中心线的弯曲力矩^[16]为:

$$M_k = \frac{E_1 d^4}{3667Dn} \theta \quad (13)$$

式中: E —弹簧的弹性模量, d —弹簧钢丝的直径, D —弹簧的中径, n —弹簧的有效圈数。

综上所述,可得基节弹簧对中心线的弯曲力矩为:

$$M_k = M_{k1} + M_{k2} = \frac{d_1^4 D_2 n_2 + d_2^4 D_1 n_1}{3667D_1 D_2 n_1 n_2} E_1 \theta \quad (14)$$

2.5 弯曲理论模型

笔者在上述内容中已经求出软体机器人基节和尾节各自受到的力矩,由图3基节的力矩平衡,把式(7,12,14)代入式(1)中,可得:

$$\theta = \frac{Ar_0^3}{C} \left[(P_1 - P_{atm}) - (P_2 + P_3 - 2P_{atm}) \sin \frac{\beta}{2} \right] - \frac{B}{C} \left[\frac{(R\theta + 0.7r_0\theta - L_0)}{R\theta + 0.7r_0\theta} + \frac{2(R\theta - 0.7r_0\theta \sin \frac{\beta}{2} - L_0) \sin \frac{\beta}{2}}{R\theta - 0.7r_0\theta \sin \frac{\beta}{2}} \right] - \frac{M}{C}$$

其中:

$$\begin{cases} A = 0.098\beta \\ B = 0.7(0.42\alpha - 0.14\beta)E \\ C = \frac{d_1^4 D_2 n_2 + d_2^4 D_1 n_1}{3 \cdot 667 D_1 D_2 n_1 n_2} E \end{cases}$$

3 实验结果与分析

长臂式仿生软体机器人运动控制实验平台基本原理如图6所示。

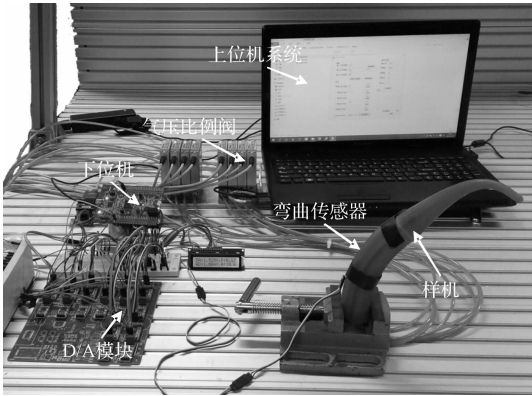


图6 实验平台

实验平台由长臂式仿生软体机器人样机、供气模块、控制模块和数据采集模块组成。供气模块采用日本SMC的电气比例阀ITV0050-3BS,可以在调压范围内连续调节出口气压;控制模块采用STM32单片机(下位机)模块并通过串口通信与PC(上位机)连接,在PC机上开发的MFC程序可以通过下位机控制输入电气比例阀的电压值,并且在下位机与电气比例阀之间安装TLC5615D/A模块和LM358放大器模块,将下位机输出的控制信号设定在电气比例阀的有效输入电压范围内。数据采集模块采用FLX-03A型接触式单向弯曲传感器和HP-20推拉力计组成,弯曲传感器固

定在软体机器人的外壁上,当软体机器人弯曲时,传感器上两端的电压值会发生线性变化。最后由STM32进行数据测量与预处理,用于弯曲角度和抓持力度测量并通过串口通信反馈至PC机。试验中的软体机器人结构参数如表1所示。

表1 软体机器人静态特性参数

参数名称	参数符号	单位	参数值
软体机器人基节初始长度	L_0	mm	110
软体机器人的弹性模量	E	MPa	2.14
软体机器人基节平均半径	r_0	mm	12
第一圆弧角	α	rad	$\pi/2$
第二圆弧角	β	rad	$\pi/3$
大气压力	P_{atm}	MPa	0.1

长臂式仿生软体机器人弯曲角度实验结果与仿真曲线如图7所示。

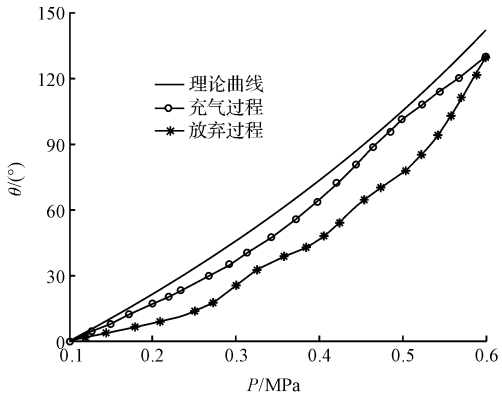


图7 软体机器人弯曲角度实验和仿真曲线

从图7中可以看出,实验结果和建立的数学模型趋势一致,建立的数学模型可以反映软体机器人弯曲角度的静态特性。

如图7所示,实验结果中充气过程和放气过程的弯曲运动曲线没有相互重合,在相等气压值的情况下,充气过程弯曲角度要普遍小于放气过程弯曲角度,但是他们的趋势是一致的。导致一定误差的原因有:

- (1)软体机器人硅胶基体具有粘滞性:充气开始阶段,由于硅胶基体的迟滞性,使得软体机器人弯曲角度很小,随着内腔压力的增大,误差会逐渐累积造成弯曲的实际角度要小于理论弯曲角度;
- (2)弹性模量的变化:软体机器人在弯曲的时候,其壁厚在每个位置是不一样的,造成其自身的弹性模量会发生变化,导致实际角度偏小;
- (3)弹簧和基体的摩擦阻力:实际实验中,软体机器人在弯曲的时候,其内腔的弹簧也发生弯曲,对软体机器人的弯曲造成一定的摩擦阻力,而理论建模时忽略了软体机器人内弹簧和硅胶基体之间的摩擦阻力;
- (4)忽略了软体机器人的径向变形:在实验过程

中,软体机器人在内腔气体压力的驱动下会发生一定程度的径向变形,而理论建模时忽略了这一点,使得测得弯曲角度略小;

(5)弯曲传感器的阻力矩:实验过程中的接触式单向弯曲传感器与软体机器外壁紧密贴合,对软体机器人弯曲造成一定的阻力矩的作用,所以实验测得弯曲角度要比理论角度偏小。

4 结束语

笔者研制了一种新型长臂式仿生软体机器人具有多腔多段耦合式结构。本研究基于软体机器人在充气状态下气压力矩、弹性力矩、外力矩以及弹簧力矩的力矩平衡原理,建立其静态模型和主动弯曲模型,并均以公式化表达。本研究以 STM32 作为下位机,PC 作为上位机并开发 MFC 程序与下位机建立通信,基于 ITV 气压比例阀搭建实验平台,制作了软体机器人样机,进行了软体机器人充放气状态下弯曲状态实验分析,并于建立的理论数学模型作比较分析。

研究表明,实验数据与仿真结果存在相同的变化趋势但无法达到曲线的重合,之后还将对不重合现象进行分析。

参考文献 (References):

- [1] JONES B A, WALKER I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots[J]. **IEEE Transactions on Robotics**,2007,22(6):1087-1099.
- [2] HANNAN M W, WALKER I D. Analysis and initial experiments for a novel elephant's trunk robot[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu: IEEE,2000.
- [3] TSUKAGOSHI H, KITAGAWA A, KOYAMA T, et al. Mobile method of active hose passing through the narrow space [C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne: IEEE,2002.
- [4] IMMEGA G, ANTONELLI K, KO J. Teleoperation of the KSI tentacle manipulator for hot cell decontamination[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Vancouver: IEEE,1995.
- [5] IMMEGA G, ANTONELLI K. The KSI tentacle manipulator

[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya: IEEE,1995.

- [6] DENG T, WANG H, CHEN W, et al. Development of a new cable-driven soft robot for cardiac ablation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenzhen: IEEE, 2013.
- [7] SUZUMORI K, IIKURA S, TANAKA H. Flexible microactuator for miniature robots[C]// IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Nara: IEEE, 1991.
- [8] OCTOPUS RESEARCH GROUP. Octopus project [EB/OL]. [2010-03-11]. <http://www.octopusproject.eu>
- [9] LASCHI C, MAZZOLAI B, MATTOLI V, et al. Design of a biomimetic robotic octopus arm[J]. **Bioinspiration & Biomimetics**,2009,4(1):1-8.
- [10] KOHEI NAKAJIMA, HELMUT HAUSER. Computing with a muscular-hydrostat system[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. karlsruhe: IEEE, 2013.
- [11] MATZNER H, GUTFREUND Y, HOCHNER B. Neuro-muscular system of the flexible arm of the octopus: physiological characterization[J]. **Journal of Neurophysiology**, 2000,83(3):1315-1328.
- [12] ROKNI D, HOCHNER B. Ionic currents underlying fast action potentials in the obliquely striated muscle cells of the octopus arm[J]. **Journal of Neurophysiology**, 2002, 88(6):3386-3397.
- [13] CIANCHETTI M, MATTOLI A, MAZZOLAI B, et al. A new design methodology of electrostrictive actuators for bio-inspired robotics[J]. **Sensors and Actuators B: Chemical**,2009,142(1):288-297.
- [14] CALISTI M, GIORELLI M, LEVY G. An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots [J]. **Bioinspiration & Biomimetics**. 2011, 6(3): 525-531.
- [15] SERCHI F G, ARIENTI A, LASCHI C. A biomimetic, swimming soft robot inspired by the octopus vulgaris[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg,2012.
- [16] 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

姚鹏飞,高 涛,鲍官军,等. 长臂式仿生软体机器人及其主动弯曲模型[J]. 机电工程,2017,34(4):346-350.

YAO Peng-fei, GAO Tao, BAO Guan-jun, et al. Structure & bending model of long-arm biomimetic soft robot[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(4):346-350.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>