

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2014.0000

## 一种气动静压软体机器人的驱动力产生机理及控制策略

郑俊君<sup>1,2</sup>, 宋小波<sup>2,3</sup>, 姜祖辉<sup>1,2</sup>, 谭治英<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031; 2. 常州先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 213016)

**摘要:** 基于复杂刚性结构的传统机器人在狭小多变的空间中活动时, 易对机器人本体产生较大磨损与消耗. 针对此类问题, 本文提出一种新型气动静压软体机器人, 降低了机器人通过狭小空间时的阻力, 减少运动损耗. 在研究海参静水骨骼结构基础上, 设计了软体机器人气囊相变结构, 分析了气囊充放气的流体静压力学特性, 建立驱动力产生的数学模型, 从而设计出单单元与双单元控制策略, 并利用时间戳 BP (反向传播) 神经网络对系统的延时时间进行预测, 增强内模反馈系统的稳定性. 在越障实验与稳定性分析中, 加入延时预测后, 机器人能在单单元与双单元控制模式下稳定行进, 并顺利越过小沟壑, 顺利完成六单元翻转的概率从 89% 提高到 96%.

**关键词:** 软体机器人; 流体静压特性; 控制策略; 延时预测

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2014)-04-0000-06

## The Driving Force Mechanism and Control Strategy of a Pneumatic Hydrostatic Soft Robot

ZHENG Junjun<sup>1,2</sup>, SONG Xiaobo<sup>2,3</sup>, JIANG Zuhui<sup>1,2</sup>, TAN Zhiying<sup>2,3</sup>

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;

2. Changzhou Institute of Advanced Manufacturing Technology, Changzhou 213164, China;

3. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Traditional robots with complicated rigid structure will be worn and teared when running in a cramped and diverse space. For this problem, a new model of pneumatic hydrostatic force soft robot is presented, and the resistance and motion loss are reduced while robots pass the cramped space. Based on sea cucumbers' hydrostatic bone structure, a soft robot with airbag phase transition structure is designed, the hydrostatic mechanical property of the airbag's charging and discharging process is analyzed, and a mathematical model of driving force is set up. Thus, single-unit and double-unit control policies are designed, meanwhile, a time-stamped BP (backpropagation) neural network is used to predict delay time for increasing the stability of internal model feedback control. According to obstacle surmounting tests and stability analysis tests, the robot with delay prediction can move stably and cross small gaps smoothly by single-unit and double-unit control strategy, and the probability of turning over six units increases from 89% to 96%.

**Keywords:** soft robot; hydrostatic characteristics; control strategy; delay prediction

### 1 引言 (Introduction)

传统的轮式、腿式、履带式等移动机器人<sup>[1-3]</sup>存在大范围的刚性结构, 在崎岖的路面或者狭小的空间中不容易保持平衡, 易被卡在小沟壑中, 而且机器人克服较大的环境阻力也增加了能耗. 为此, 研究人员设计与研发了基于仿生的软体机器人, 到目前为止, 取得了一定进展. 例如, Rahn 等人使用气动人工肌肉 (pneumatic artificial muscle) 作为驱动器, 研制了一种仿章鱼的操纵臂<sup>[4-5]</sup>, 如图 1(a) 所示. Hirai 等人使用形状记忆合金 (shape memory alloy) 作为驱动器, 如图 1(b) 所示, 研制了一种可

变形可跳跃机器人<sup>[6]</sup>. Hara 等人使用聚合物凝胶 (polymer gel) 作为驱动器, 研制了一种仿尺蠖机器人<sup>[7-9]</sup>, 如图 1(c) 所示, 在特定环境下可通过凝胶自激振荡原理来实现自主行走. Otake 等人采用电场聚合物 (electroactive polymer) 研制了一种仿海星软体机器人<sup>[10-11]</sup>, 如图 1(d) 所示, 这种机器人在空间不同电场条件下能改变形状并进行移动. 已有的软体机器人, 因为采用电致流变体、电致伸缩材料及功能凝胶等作为驱动器, 不可避免地存在驱动效率较低、调控能力较弱、电源电压或者磁场强度要求过高等情况.

本文提出气动静压软体机器人, 相较于传统的

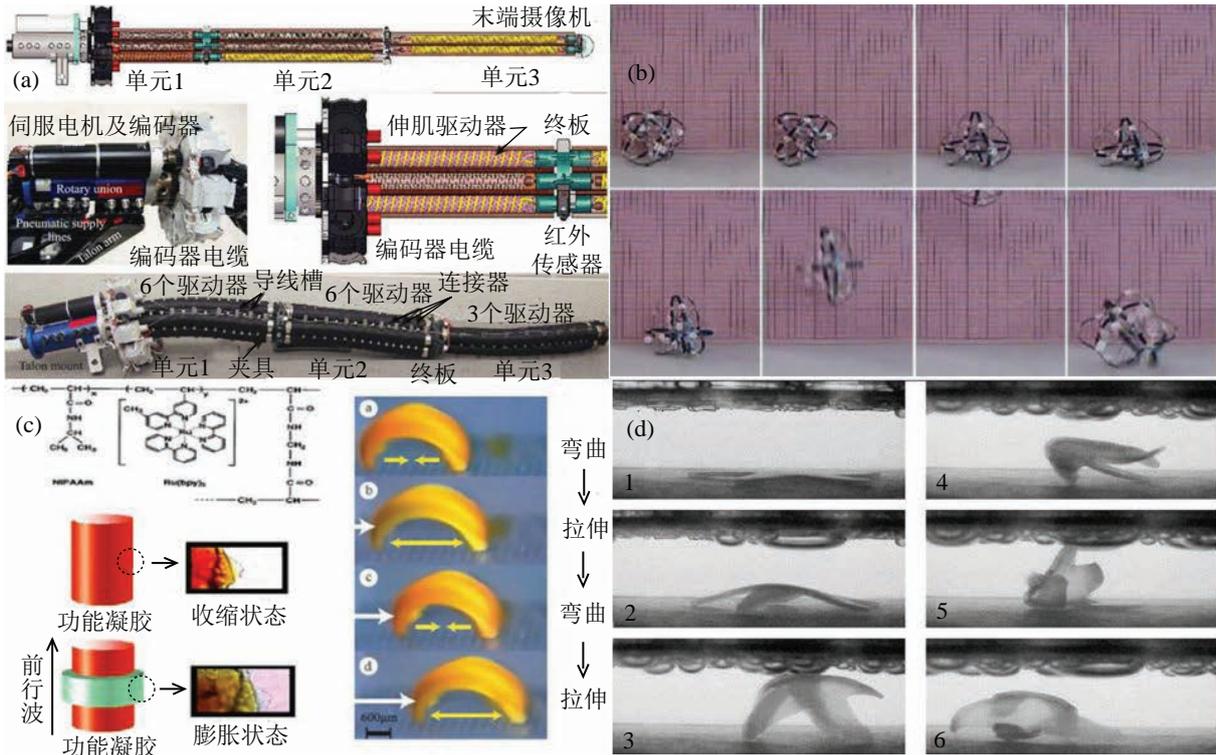


图1 仿生软体机器人; (a) 仿章鱼操作臂; (b) 跳跃机器人; (c) 仿尺蠖机器人; (d) 仿海星软体机器人

Fig.1 Bionic soft robot; (a) biomimetic robotic octopus arm; (b) jumping robot; (c) self-walking gel; (d) starfish-shaped gel robot

轮式等刚性机器人，特有的气囊结构克服了崎岖环境带来的大阻力，能够越过小沟壑、狭小空间等复杂环境。相对于其它的新型软体机器人，该机器人采用气动方式，驱动方式简单，驱动效率高，不需要过高的电压，有较强的抗压能力。文中分析了软体机器人结构相变机理，研究气囊的充气过程的力学特性，建立流体静压数学模型。在结构模型的基础上，设计了单单元和双单元控制模式实现机器人多单元控制。通过建立内模反馈系统，加入神经网络延时预测进而增强机器人的稳定性。

## 2 气动静压软体机器人设计 (Design of the pneumatic hydrostatic soft robot)

本文提出的气动静压软体机器人是由多单元组成的机器人，其机体概念模型如图2所示，机体由6个外部保护气囊、6个驱动气囊以及外围的传感器系统组成。其中外围的保护气囊起到保护机器人内部控制主板、减压抗震、减少摩擦等作用，内部的驱动气囊为机器人提供了驱动力，使机器人能够进行运动，而外围传感器系统起到定位以及采集环境信息反馈的作用。

机器人的总体设计如图3所示，包括机体部分、气泵、真空发生器、继电器模块、控制中心、无线模块等。上位机发送控制信息，机器人通过无

线模块对控制信息进行分析并解码后，由控制中心产生PWM（脉冲宽度调制）控制信号，对继电器

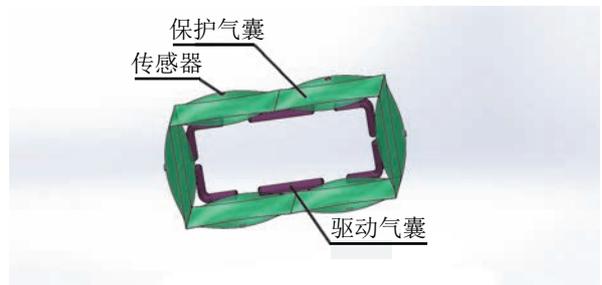


图2 概念模型

Fig.2 Conceptual model

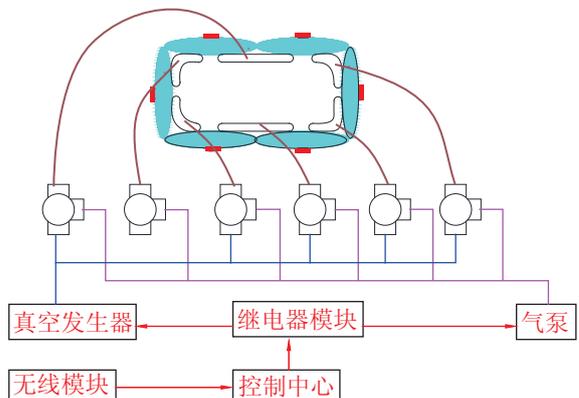


图3 机器人总体架构

Fig.3 Overall architecture of the robot

模块开合进行控制. 继电器模块的开合实现对气囊以及真空发生器的控制, 从而实现机器人多单元控制, 使得机器人产生驱动力进行运动. 另外, 控制中心通过读取传感器的反馈信息, 对环境变量进行采集, 从而依据不同的情况采用不同的控制策略.

### 2.1 驱动力产生机理

当驱动气囊进行充气时, 驱动气囊膨胀过程中其外壁对保护气囊进行挤压产生驱动力, 使得机器人向前运动. 气体的单单元运动步态如图 4 所示, 右下角的气囊膨胀平展产生对外围保护气囊的驱动力, 促使外围保护气囊翻转, 实现机器人行进.

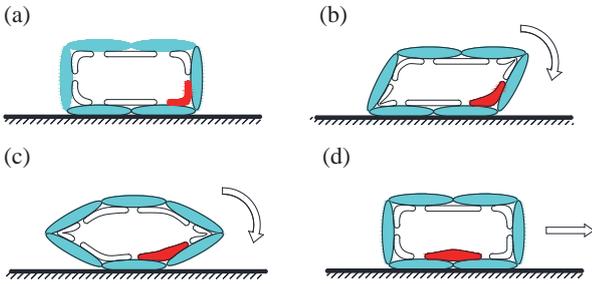


图 4 单单元控制运动步态

Fig.4 Locomotion of the single-unit control strategy

以单个驱动气囊为例进行分析, 气囊的充气过程如图 5 所示. 图中气囊的中间部位固定在外两个保护气囊之间,  $F$  为气囊膨胀过程中气囊外壁对保护气囊的作用力,  $\theta$  为气囊相对于竖直方向的偏转角,  $l$  为驱动气囊的总长度.

利用拉格朗日欧拉方法 (arbitrary Lagrangian Eulerian method) 对气囊的充气过程进行无穷小流体元分析得到其力学特性, 并建立流体结构耦合模型<sup>[12]</sup>. 模型的质量方程、动量方程以及能量方程分别为式 (1) ~ 式 (3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_j - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  表示流体元的密度;  $v_i$  表示气体的流速;  $x_i$  表示欧拉坐标;  $w_i$  表示相对速度,  $w_i = v_i - u_i$ ,  $u_i$  表示网格的速度;  $\sigma_{ij}$  为应力张量,  $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i})$ ;  $b_i$  为单位体积力;  $\delta_{ij}$  表示 Kronecker  $\delta$  函数;

流体网格的控制方程为

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial(x_i, t)}{\partial t} + \omega_i \frac{\partial(x_i, t)}{\partial t} \quad (4)$$

式中:  $X_i$  表示拉格朗日坐标,  $x_i$  表示欧拉坐标.

另外, 机体的材料动力学特性决定了模型的动理学特性, 气动力学方程为

$$M\ddot{w} + R\dot{w} + Kw = F \quad (5)$$

$M$  表示气体单元的质量,  $R$  表示着气囊的阻尼模量,  $K$  表示气囊的弹性模量, 而  $F$  表示气囊单元所受合力的大小, 即机器人的运动驱动力.

机器人前进过程中, 驱动气囊对保护气囊做功, 做功过程如图 4 所示, 每一时刻的做功量可以写成式 (6):

$$dW = Fdx = Td\theta \quad (6)$$

其中  $dx$  为运动的距离,  $T$  为力矩,  $d\theta$  为角度的变化量,  $T = F \cdot \frac{l}{4}$ ,  $l$  为气囊的长度.

机体做一次翻转, 如图 5 所示, 左半部分气囊对地做功, 只有右半部分气囊膨胀对机器人做功, 其中心点  $m$  的运动距离为  $1/4$  圆弧, 旋转角度为  $90^\circ$ , 可以计算得到一个单元气体膨胀过程气体对机器人所做的功为

$$W = \int_0^{\frac{\pi}{8}} Fdx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} Td\theta = F \frac{\pi l}{8} \quad (7)$$

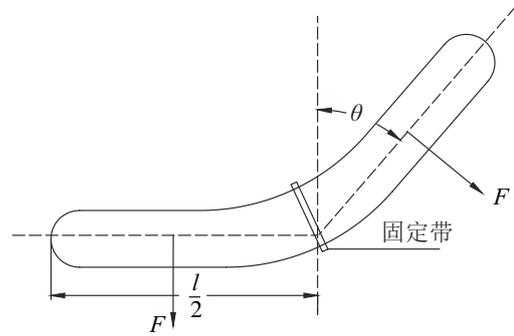


图 5 驱动气囊膨胀过程

Fig.5 The expansion process of driving airbag

### 2.2 控制策略

为了更好地实现机器人的控制, 本文针对不同的控制环境采用不同的控制方式以增加机器人运动的平稳性. 另外, 由于系统中存在着无线传输延时、继电器启动延时、电磁阀启动延时以及传感器采集延时等情况, 所以对控制系统加入延时预测, 以增加系统的稳定性.

#### 2.2.1 控制方式

根据不同的环境, 对机器人的控制方式采用单单元控制或者双单元控制.

##### (1) 单单元控制模式

在相对崎岖但阻力较小的路面, 可以采用单单元控制模式, 使得机器人能相对平稳地进行运动.

图4所示为单单元控制的运动步态，通过对单个气囊进行充放气从而产生驱动力  $F$  驱动软体机器人进行运动，使得机器人能够平稳前进，力  $F$  的大小为式(5)所示，其时序控制如图7所示，通过循环控制各个单元的独立充放气使得机器人保持稳定的步态。

(2) 双单元控制模式

在相对平坦或者阻力较大的环境可采用双单元控制方式以增加机器人速度或者增大驱动力从而克服周围环境带来的大阻力，图6所示为双单元控制的运动步态，图8为其时序控制图。在图6(c)中，假设忽略  $F_2$  和  $F_4$  对外围保护气囊产生的形变量，双单元控制每一个运动步态对机器人所做的功为  $w'$ ，依据式(7)可知

$$w' = 2W = F \frac{\pi l}{4} \quad (8)$$

为单单元控制系统的2倍，从而能够更好地克服周围环境带来的阻力，使得机器人能够更好地应对复杂的环境，越过一些小沟壑或者小凸起。

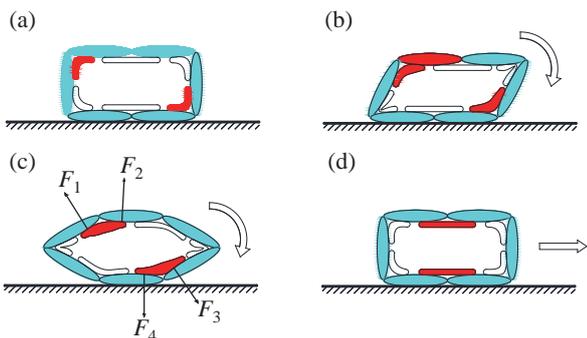


图6 双单元控制运动步态

Fig.6 Locomotion of the double-unit control strategy

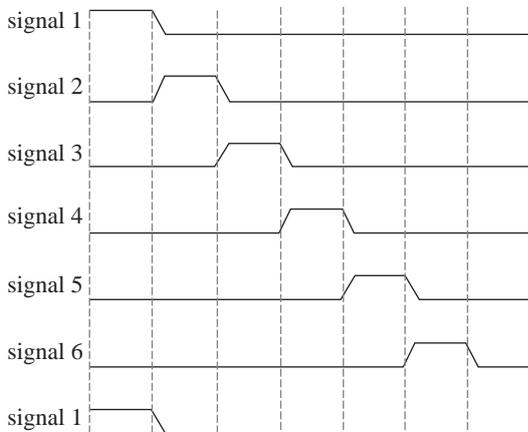


图7 单单元控制时序图

Fig.7 Timing diagram of the single-unit control strategy

在整体控制软件中，还要实现对传感器的采集、无线信号的编解码、继电器模块的控制以及控

制模式的选择等。图9为单单元控制模式下的程序流程图。

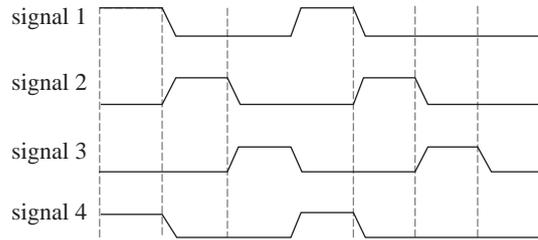


图8 双单元控制时序图

Fig.8 Timing diagram of the double-unit control strategy

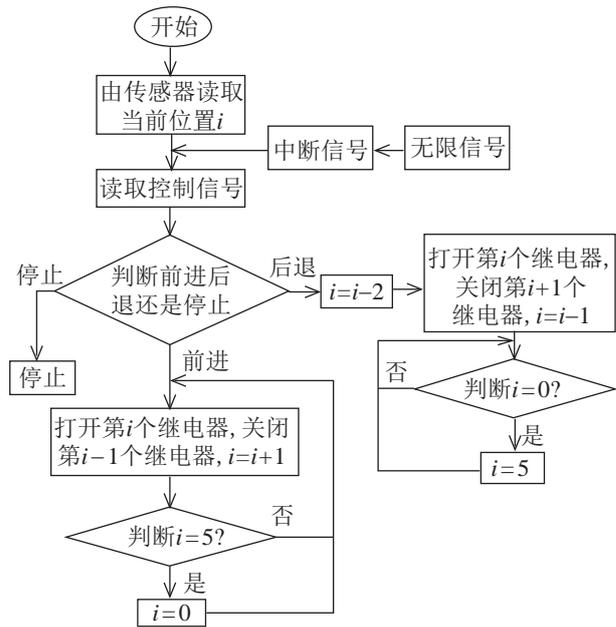


图9 单单元控制程序流程图

Fig.9 Flow chart of the single-unit control program

2.2.2 系统的延时预测

由于系统运作时存在着通信延时、启动延时等延时，这些随机的延时会对系统的性能产生影响，也可能导致系统不稳定。因此，在系统中加入延时预测，从而增强系统的稳定性。由于延迟具有非线性特性，而神经网络具有非线性逼近的特性，因此本文利用时间戳BP神经网络(TSBPNN)<sup>[13]</sup>进行在线延时预测。

系统中的控制对象可以看成是一个1阶系统，如式(9)所示， $G_c(s)$ 为控制对象：

$$G_c(s) = \frac{C}{As+B} \quad (9)$$

整个系统的结构如图10所示。

为了简化系统的模型使得系统更便于进行分析，合并系统的传感器与控制器，控制器与控制器之间的延时记为  $e^{-\tau s}$ ，则整个闭环系统的传递函数

为

$$G(s) = \frac{Ce^{-\tau s}}{As + B + Ce^{-\tau s}} \quad (10)$$

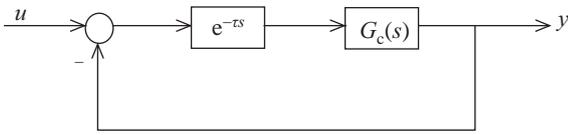


图 10 控制系统结构图

Fig.10 Structure of the control system

为实现对延时的预测, 引入内模系统结构<sup>[13]</sup>, 则系统的结构图变化如图 11 所示, 其中  $G'_c(s)$  为内模模型, 则系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{Ce^{-\tau s}}{As + B + C(e^{-\tau s} - e^{-\tau' s})} \quad (11)$$

其中的  $e^{-\tau' s}$  为通过时间戳 BP 神经网络进行实时预测的延时时间。

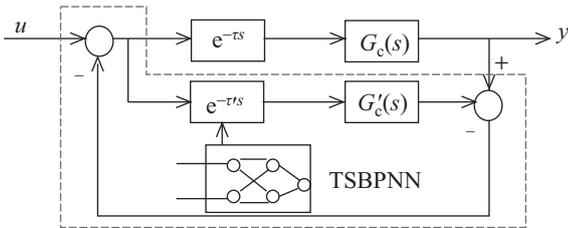


图 11 加入延时预测的内模结构系统

Fig.11 Internal model structure with delay prediction

当实时预测的延时时间  $\tau' \approx \tau$  时, 系统的闭环传递函数近似为

$$G(s) \approx \frac{Ce^{-\tau s}}{As + B} \quad (12)$$

此时的系统只需经过  $\tau$  时间的微小延时就能产生输出, 系统的特性与系数 A 有关, 而与系统过程之中产生的延时没有关系。

### 3 实验验证 (Experimental verification)

实验过程中, 编写了单单元控制及双单元控制程序, 验证了机器人的运动机理以及数学模型的合理性, 实现了机器人的前进、后退等功能. 进行了越障实验, 证明了机器人能够在崎岖的环境中进行运动. 进行了稳定性能分析, 结果表明延时预测增强了系统的稳定性能。

实验中用气压调节阀将气压控制在  $0.25 \text{ MPa} \pm 0.02 \text{ MPa}$ , 通过控制中心发出的 PWM 信号控制继电器的导通时间继而控制电磁阀的导通时间实现气袋的平缓充气以及快速抽气, 同时实现弱电对强电的控制. 实验中使用的器材型号如表 1 所示。

表 1 实验器材

Tab.1 Experimental apparatus

器材	型号	耐压范围 /MPa	厂家
控制芯片	STM32F103VE		ST
电磁阀	TG22-08	0 ~ 0.8	STNC
气压调节阀	GFR200-08	0.15 ~ 0.9	AirTAc
真空发生器	CV-10HS	0.2 ~ 0.8	CNKAIY
PU 气管	4/6/8mm		
转接头	4-6/6-8mm		

实验过程中为了方便观察, 对机器人做黄色的标识, 图 12 显示机器人的前进过程, 可以在图中发现黄色标识位置的变化. 通过对电磁阀的 PWM 调制, 机器人能够很好地进行前进后退。



图 12 软体机器人行进过程

Fig.12 Advancing of the soft robot

对于单单元及双单元控制方式, 保证相同的运动环境, 实验环境如图 12 所示, 且保证两者的充气气压相同, 为  $0.25 \text{ MPa}$ , 实验过程两种控制方式的运动速度如表 2 所示, 双单元的运动速度约为单单元控制的 2 倍。

表 2 运动速度

Tab.2 Kinematic velocity

控制模式	运动速度 / (m/s)
单单元控制方式	1.75
双单元控制方式	3.46

实验中验证了机器人能够在较为复杂的路面上进行运动, 图 13 所示为机器人行走在较为不平整的路面上及越过小沟壑的过程。

为了验证加入延时预测的效果, 判断系统的稳定性是否提高. 分别对加入了延时预测和没有加入延时预测的系统进行 100 次试验, 以是否能顺利完成 6 个单元的顺序翻转为一次试验. 实验结果如图 14 所示, 加了延时预测的系统能够完成 6 个单元翻转的概率为 96%, 没有加延时预测的系统能顺利完

成6个单元翻转的概率为89%，由此可见增加延时预测增强了系统的稳定性。



图13 机器人在复杂环境运动过程

Fig.13 The soft robot advancing in a complicated space

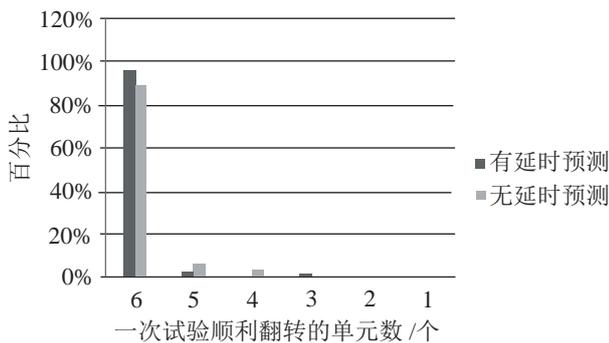


图14 系统稳定性分析

Fig.14 Analysis on the system stability

## 4 总结与展望 (Conclusion and future work)

本文通过研究海参的“固-液”相变形态，利用充气气囊设计了气动静压软体机器人。通过对气囊充放气过程的气体流体特征分析，建立了充放气过程的数学模型，并利用流体力学的无穷小流体力元分析，实现了对驱动力产生机理的研究。在产生驱动力的基础上，提出了单元与双单元的控制模式，以实现机器人在平坦、大阻力或者凹凸不平等环境下的最优控制。为避免机器人中的电磁阀、继电器等元件启动延时及传感器、无线模块等通信模块引起的随机延时导致系统不稳定，利用时间戳BP神经网络算法对延时进行实时预测，并在实验中验证了加入延时预测的系统的稳定性得到提高。另外，在驱动方式及越障实验中验证了机器人能稳定地在平坦与崎岖的路面上运动。

在研究驱动力的产生机理，建立流体静压模型，设计多单元控制方式的基础上，下一步研究重点集中在两个方面：一方面实现机器人的无缆设计，另一方面增加机器人的驱动面（预计设计为20面球体）实现多向运动，从而增强机器人的灵活

性。

## 参考文献 (References)

- [1] Shim H S, Kim J H, Koh K. Variable structure control of non-holonomic wheeled mobile robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 1995: 1694-1699.
- [2] Gregorio P, Ahmadi M, Buehler M. Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1997, 27(4): 626-634.
- [3] Zhu J, Sun D, Tso S K. Development of a tracked climbing robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35(4): 427-444.
- [4] Trivedi D, Lotfi A, Rahn C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(4): 773-780.
- [5] Laschi C, Mazzolai B, Mattoli V, et al. Design of a biomimetic robotic octopus arm[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2009, 4(1): No.015006.
- [6] Matsuyama Y, Hirai S. Analysis of circular robot jumping by body deformation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1968-1973.
- [7] Hara Y, Maeda S, Yoshida R, et al. Development of novel self-oscillating molecular robot fueled by organic acid[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 2223-2227.
- [8] Maeda S, Hara Y, Sakai T, et al. Self-walking gel[J]. Advanced Materials, 2007, 19(21): 3480-3484.
- [9] Maeda S, Hara Y, Yoshida R, et al. Peristaltic motion of polymer gels[J]. Angewandte Chemie, 2008, 47(35): 6690-6693.
- [10] Otake M, Kagami Y, Inaba M, et al. Motion design of a starfish-shaped gel robot made of electro-active polymer gel[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(2/3): 185-191.
- [11] Otake M, Nakamura Y, Inoue H. Pattern formation theory for electroactive polymer gel robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 2782-2787.
- [12] Zhang S, Cheng H, Liu X. Study on flow field characteristics of airbag deploying process[C]//System Simulation Technology & Application. 2011: 116-120.
- [13] Wang Z F, Li L C, Huang H M. Internal model control with delay prediction for networked control systems[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(11): 1885-1888.

## 作者简介:

- 郑俊君 (1990-), 男, 硕士. 研究领域: 仿生机器人, 机器视觉.
- 宋小波 (1981-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器视觉, 仿生机器人.
- 姜祖辉 (1987-), 男, 硕士. 研究领域: 机械设计及其自动化.