

DOI: 10.7652/xjtuxb202003016

模块化软体机器人多模式运动分析

闵剑, 刘朝雨, 王江北, 费燕琼
(上海交通大学机器人研究所, 200240, 上海)

摘要: 为了探讨模块化软体机器人驱动模式多样性对实现有效运动的影响,设计了一个6模块软体爬行机器人,并进行了多模式运动分析。使用差动运动模块设计了一个通过前进波在机体上的传递实现运动的机器人;分析了爬行过程中充放气模块的受力状态和充放气模块位置间隔之间的关系,得出了满足充气时模块获取的运动量、放气时模块向前传递运动量这一单向运动必要条件的的位置间隔关系式,依据该模型得到了6模块机器人的10种可行运动模式;采用集中质量法对机器人建立拉格朗日动力学模型,通过ADAMS仿真验证了不同驱动模式的可行性;通过实验验证了机器人的可行运动模式并得出了不同模式下的运动速度。研究表明:使用充放气模块位置间隔关系公式来分析模块化爬行机器人运动模式可行且准确;多模块软体机器人具有丰富的运动模式,依据驱动模式的不同即可实现运动速度的变化;通过选用高效的运动模式A1D2,多模块机器人可实现最大运动速度13.2 mm/s。

关键词: 模块化软体机器人;位置间隔关系;多模式运动

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0126-08

Multi-Mode Motion Analysis of Modular Soft Robot

MIN Jian, LIU Zhaoyu, WANG Jiangbei, FEI Yanqiong
(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To investigate the influence of driving pattern of the modular soft robot on the oneway advancement, a six-module soft crawling robot is designed and the multi-mode motions are discussed. The six-module soft crawling robot is designed by connecting differential drive modules in serial which can move forward by transmitting traveling waves on the body. Analyzing the relationship between the force state of inflating or deflating modules and their position interval during crawling process, the position interval model is obtained, which meets the necessary condition of one-way advancement, where the module gains advancement as inflating and the movement is transmitted forward as deflating. And 10 feasible motion modes are elicited by consulting the model. The Lagrangian dynamics model is established by taking advantage of lumped mass method, and the feasibility of the motion modes is verified by simulation in ADAMS. The feasible motion modes of the robot are verified by experiments and the crawling speeds in different modes are obtained. This approach shows that it is feasible and accurate to analyze the motion mode of modular crawling robot by using the position interval relationship formula of the inflating and deflating modules. The multi-module soft robot has rich motion

modes, and the movement speed can be changed by adjusting driving modes. The mode A1D2 enables the robots to achieve a maximum speed of 13.2 mm/s.

Keywords: modular soft robot; position interval relationship; multi-mode motion

软体机器人使用柔性材料如硅橡胶^[1]、纤维^[2]、形状记忆合金(SMA)^[3]以及电活性聚合物^[4]制造而成,可以通过柔性变形改变自身的结构和尺寸。相比于传统的刚性机器人,软体机器人更易和复杂的环境相容以及实现安全的人机交互^[5],在探测^[6]、救援^[7]、医疗^[8]以及柔性抓取^[9]等领域都有广阔的应用前景。

在软体爬行机器人领域,国内外学者研制出了具有代表性的爬行机器人:Ge 等仿照蚯蚓运动设计了具有双向运动模式的软体爬行机器人^[10];Bran-yan 等研制了可像蛇一样蜿蜒蠕动的模块化双连杆蛇形软体机器人^[11];Qin 等使用弹簧和制动器开发了具有快速转向能力的软体爬行机器人^[12],该机器人可以实现主动避障;杜勇使用 SMA 开发了可实现蠕动和滚动运动的多模块机器人^[13];刘亭羽开发了具有单驱动和双驱动两种运动模式的串联型模块化爬行机器人^[14];浙江大学的 Zou 等研制了具有全向运动模式的多模块仿毛虫运动机器人^[15],该机器人可以实现缓慢的全向运动;上海交通大学的王江北等研制了可实现大步幅爬行的多气囊柔性机器人^[16];上海交通大学的王绪等研制了可实现蠕动爬行的球形模块化机器人^[17]。

模块化结构机器人具有单体机器人不具有的优势^[18],可以具有不同的运动速度和多种运动模式。随着模块的增多,多模块软体机器人的运动序列将变得多样化^[19]。本文使用差动运动软体模块设计了一种 6 模块软体爬行机器人,模块的周期性充放气可以改变软体机器人和地面的摩擦力,促使机器人运动。本文还探求了软体机器人单向前进运动的必要条件,研究了其爬行的可行驱动序列,分析获得了 10 种运动模式。

1 模块化软体机器人

1.1 结构设计

差动运动软体模块^[20]如图 1 所示,可以看出:差动运动软体模块由多气囊结构^[1]和底板组成;两个对称布置的气囊结构使得机器人可以进行差速运动;底板由上下两层硅胶以及中间的不可拉伸层组成,不可拉伸层限制底板变形,使其只能发生弯曲;单个差动运动软体模块的尺寸为 $W=82\text{ mm}$, $L=$

110 mm。

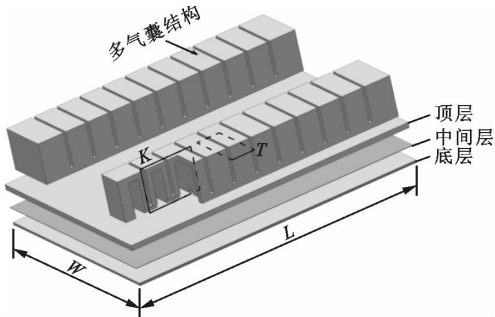


图 1 差动运动软体模块^[20]

气囊驱动器的截面如图 2 所示,其中 $S_a=13\text{ mm}$, $S_b=2.5\text{ mm}$, $S_c=1\text{ mm}$, $S_i=14\text{ mm}$, S_d 、 S_e 、 S_f 、 S_g 、 S_h 均为 3 mm。在 3D 打印驱动器模具之后,使用硅胶浇铸成型,获得驱动器。使用硅胶和硫化胶将驱动器和底板拼接成单模块,模块之间使用硅胶进行连接。

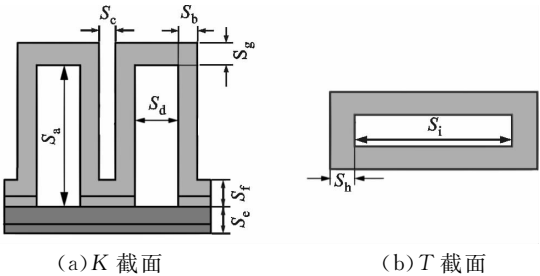


图 2 驱动器气囊截面

在仿尺蠖爬行运动的基础上,设计了一款由 6 个差动运动模块组成的模块化软体机器人,如图 3 所示。可以看出,机器人由 6 个相同的模块相连组成,每个模块的两个多气囊结构独立供气,该机器人具有 12 个主动件,驱动序列的选择比较多样化,因此具有丰富的运动模式。

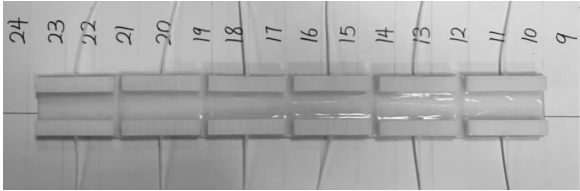


图 3 6 模块软体机器人

1.2 前进波传递过程

图 4 为软体机器人前进波传递示意图,a 为原始状态,b 为尾部模块 1 充气收缩,c 为前进波在模

块2和3上的传递,d为前进波传递到头部模块6,e为机器人完成1个周期运动的位置,f为机器人完成4个周期运动时的位置,可以看出,机器人在4个周期内一共前进了 $\Delta X = 11.6 \text{ cm}$ 。

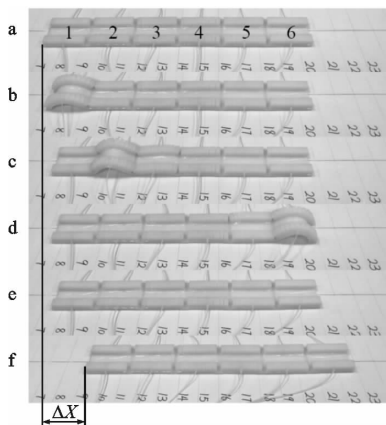


图4 软体机器人前进波传递过程示意

2 多模式运动分析

多模块软体机器人采用前进波传递运动,由于其具有多个驱动器,多模块软体机器人可以根据6个模块的驱动顺序不同实现多模式运动。本节将分析多模块软体机器人可实现运动的驱动序列,机器人实验平台为硬PVC板。

2.1 机器人单向前进运动的必要条件

机器人要实现单向前进,前进波传递过程中必须满足:①模块充气时可以获得后侧传来的运动量;②模块放气时可以将自身的变形量向前传递。

在多模块软体机器人的前进波传递过程中,模块间隔如图5所示,可以看出,待充气模块位于待放气模块前方(右侧)。

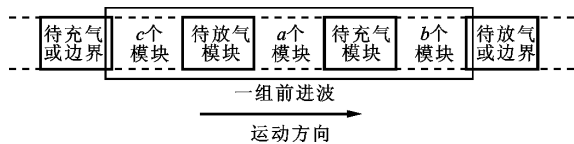


图5 模块间隔示意

2.1.1 充放气模块运动传递 图6是待充气和待放气模块受力示意图,单个模块质量为 m ,地面与模块之间的静摩擦因数为 μ ,模块膨起时弯曲角度为 θ ,模块压力分布在前后两端,充气模块左右侧所能提供的最大静摩擦力分别为 $f_{ar} = \mu(1/2 + a)mg$, $f_{bl} = \mu(1/2 + b)mg$ 。实验表明,前后两端水平方向的拉力 F 与气压 $p(t)$ 和自身变形量 Δl 相关,记为 $F(p(t), \Delta l)$,其中气压 $p(t)$ 是充气时间的非线性函数,变形量为 $\Delta l = L(1 - (2/\theta)/\sin(\theta/2))$ 。若充气

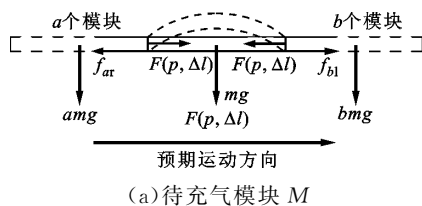
完成后的变形量为 ΔL ,如何变形取决于模块 M 前后的摩擦力, $a < b$,则 $f_{ar} < f_{bl}$,模块后端先达到最大静摩擦力,模块后端前移 ΔL ,模块 M 上的中心位移 ΔX 为 $\Delta L/2$ 。由此可得, ΔX 和 a 、 b 的关系为

$$\Delta X_M = \begin{cases} \Delta L/2, & a < b \\ 0, & a = b \\ \Delta L/2, & a > b \end{cases} \quad (1)$$

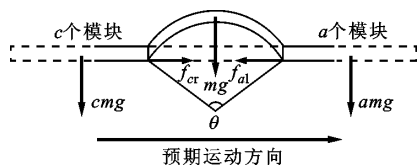
同理,待放气模块 N 的中心位移为

$$\Delta X_N = \begin{cases} \Delta L/2, & a < c \\ 0, & a = c \\ \Delta L/2, & a > c \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)(2)可以看出:当 $a < b$ 或 $a < c$ 时,模块可以向前运动;当 $a = b$ 或 $a = c$ 时,充气或放气后模块 M 和 N 将自身的前进波传递到前方模块,但模块 M 和 N 的位置没有发生变化。



(a) 待充气模块M



(b) 待放气模块N

图6 待充气和待放气模块受力示意

2.1.2 $a = b$ 或 $a = c$ 时的运动传递 图7为 $a = b$ 或 $a = c$ 时,一组连续前进波的传递情况。若此时 $a = c$ 且 $a < b$,则有 $f_{ar} < f_{bl}$,模块 M 左侧先到达最大静摩擦力。

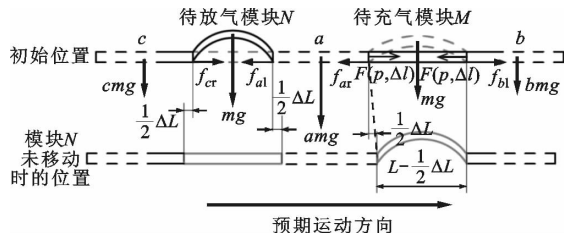


图7 $a = b$ 或 $a = c$ 时的前进波传递情况

假设运动完成后模块 N 的中点没有移动,那么模块 M 的右侧不会发生滑动,模块 M 的最终变形量为 $\Delta L/2$ 。该条件下,模块 M 的最终拉力为

$$F_M(p, \Delta L/2) = \mu(1/2 + a)mg \quad (3)$$

模块 N 充气完成后的最终拉力为

$$F_N(p, \Delta L) = \mu(1/2 + c)mg = \mu(1/2 + a)mg \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得

$$F_M(p, \Delta L/2) = F_N(p, \Delta L) \quad (5)$$

但是,模块最终的驱动力与充气气压 p 和变形量有关,而 M 和 N 的变形量并不相同,所以式(5)不成立,之前的假设也不成立,即模块 N 的中点会右移。所以,在 $a=c$ 、 $a < b$ 的序列下可以实现运动量传递。同理可知,当 $a=b$ 、 $a < c$ 时,运动量也会随着前进波向前传递。通过上述分析可知,当 $a < b$ 或 $a < c$ 时,机器人可以实现单向前进运动。

2.1.3 $a=b=c$ 时的运动传递 图8为 $a=b=c$ 时,一组连续前进波的传递情况,图中虚线为模块 M 充气模块 N 放气之后没有产生运动量时的情形。假设该序列结束后,模块 N 的摩擦力 f_{cr} 的方向由向右变成了向左,且 f_{cr} 方向转变时向右作用的距离为 $\Delta L/2 - \Delta z$ (在图8中, $0 \leq \Delta z \leq \Delta L/2$), 转变方向后向左作用距离为 $\Delta x - \Delta z$ 。通过实验观测可知,模块的放气时间小于模块的充气时间,模块 N 放气完成后会在模块 M 作用下继续移动,即有 $\Delta x - \Delta z > 0$ 。

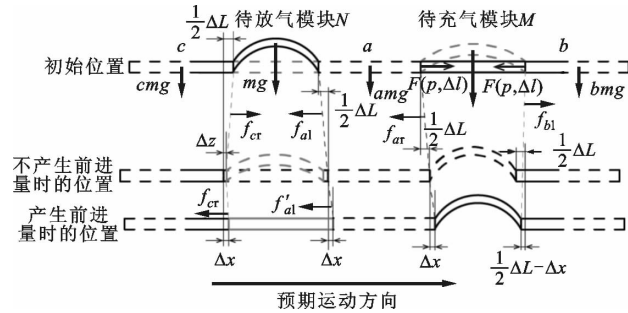


图8 $a=b=c$ 时的前进波传递情况

充放气过程中能量守恒,定义模块 M 和 N 充气完成后所具有的势能(包括重力势能和弹性势能)分别为 $E_M(P, \Delta L_M)$ 和 $E_N(P, \Delta L_N)$ 。充气时气体对模块 M 做功。在前进波从模块 N 传递到模块 M 的过程中,模块 N 的势能和气体对模块 M 做的功转化为克服摩擦力做的功和模块 M 的势能 E_M , 即

$$E_N(P, \Delta L_N) + \int_0^t \int_0^{\Delta L} F_M(p(t), \Delta l) dt d\Delta l = W_{f_{cr}} + W_{f'_{cr}} + W_{f_{al}} + W_{f_{bl}} + E_M(P, \Delta L_M) \quad (6)$$

待放气模块 N 充气时的能量变化方程为

$$\int_0^t \int_0^{\Delta L_N} F(p(t), \Delta l) dt d\Delta l = E_N(P, \Delta L_N) + \mu(1/2 + c)mg \Delta L_N \quad (7)$$

待放气模块 N 放气时的能量变化方程为

$$E_N(P, \Delta L_N) = \mu(1/2 + c)mg(1/2)\Delta L_N + \mu(1/2 + a)mg(1/2)\Delta L_N \quad (8)$$

模块气压随时间的变化量 $p(t)$ 仅与模块自身结构和充气压力 P 有关。当 M 充气时,外部摩擦力为 $f_{ar} = \mu(1/2 + a)mg$; 当 N 充气时,外部摩擦力为 $f_{cr} = \mu(1/2 + c)mg$ 。又由 $a=c$ 可知,充气结束后 $\Delta L_M = \Delta L_N$ 。综上可得

$$\int_0^t \int_0^{\Delta L_N} F_N(p(t), \Delta l) dt d\Delta l = \int_0^t \int_0^{\Delta L_M} F_M(p(t), \Delta l) dt d\Delta l \quad (9)$$

$$E_N(P, \Delta L_N) = E_M(P, \Delta L_M) \quad (10)$$

由式(6)~(10)可以得到

$$\mu mg \frac{1}{2} \Delta l = \mu \left(\frac{1}{2} + a \right) mg (\Delta x - 2\Delta z) + \mu \frac{1}{2} mg \Delta x \quad (11)$$

当 $a=0$ 时,计算可得 $\Delta x = \Delta z$, 与实验结果 $\Delta x > \Delta z$ 矛盾,此时只有有前进波的传递过程而不会产生新的前进量。

当 $a=1$ 时,计算可得 $\Delta x = 3\Delta z/4 + \Delta L/4$ 。由 $0 \leq \Delta z \leq \Delta L/2$ 可得 $\Delta L/4 \leq \Delta x \leq 5\Delta L/8$, 因此 M 和 N 的中心位移为 $\Delta L/8 \leq \Delta X \leq 5\Delta L/16$ 。

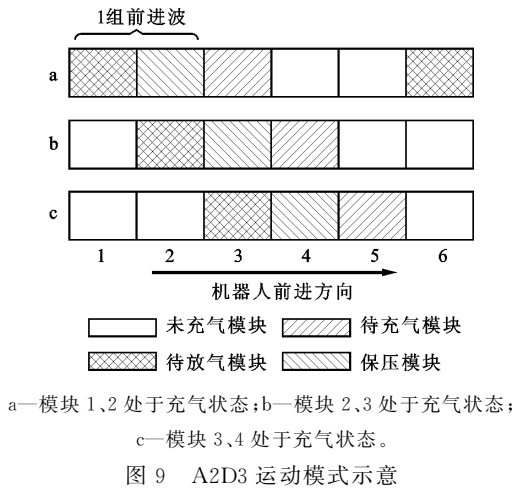
综合本小节分析可知,机器人实现单向前进的必要条件为:机器人驱动序列的待充气和待放气模块之间的间隔满足

$$a \leq b \text{ 或 } a \leq c \quad (12)$$

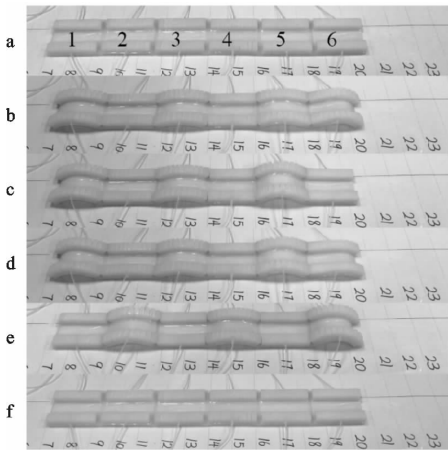
2.2 机器人驱动序列分析

若用 A 表示模块充气状态, D 表示模块未充气状态, i 和 j 分别表示连续的充气模块和未充气模块数量,则不同的运动模式可记为 $A_i D_j$ 。 i 个充气模块构成一组前进波, i 个充气模块加上 j 个未充气模块构成一组驱动序列。图9是 $A2D3$ 运动模式示意,图中 a 包含两组驱动序列,此时模块1和2处于充气状态,记为 $A2$, 模块3、4、5处于未充气状态记为 $D3$, 模块6则是另一组驱动序列的前进波。

待充气模块为一组前进波的前一个模块(图9中 a 的模块3), 待放气模块为连续前进波的尾部模块(图9中 a 的模块1)。一般有 $a=i-1$ 、 $b=c=j-1$, 当充放气模块与边界相邻时,有 $b \leq j-1$ 或 $c \leq j-1$ 。根据式(12)可知, $i \leq j$ 时机器人可以单向前进。当 $i=j$ 时,会有 $a=b=c$ 。 $A1D1$ 模式下, $a=i-1=0$, 根据式(11)可知,该模式下机器人不能前进。图10是 $A1D1$ 模式下的实验效果,软体机器人在完成一个周期的运动后,整体位置未发生明显变



化。A2D2 模式下, $a = i - 1 = 1$, 根据式 (11) 可知, 机器人可以实现单向运动。对于 A3D3 模式, 6 模块机器人不会出现 $a = b = c = 2$, 分析可知机器人运动过程中会出现 $a = 2, b = c = 1$ 的状态, 不满足必要条件公式 (式 (12)), 因此 A3D3 模式下, 机器人不能实现单向运动。



a—初始状态；b—前进波向 1、3、5 模块传递；c—前进波传递到 1、3、5 模块；d—前进波向 2、4、6 模块传递；e—前进波传递到 2、4、6 模块；f—20 s 时模块的最终状态。

图 10 机器人在 A1D1 模式下的运动过程

综上所述, 机器人在 A1D2、A1D3、A1D4、A1D5、A2D2、A2D3、A2D4 模式下可以实现单向前进运动。机器人在运动时可以在一组前进波传递完成后开始下一个周期, 在满足 $i \leq j$ 的条件下, A1D6、A2D5、A2D6 运动模式可以使机器人实现单向前进。

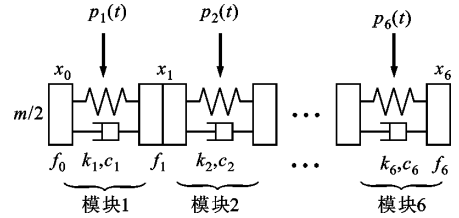
3 动力学建模与仿真

3.1 拉格朗日动力学建模

第 2 节分析了机器人多模式运动的可行性, 本

小节将建立软体机器人动力学模型, 以验证不同模式下的机器人可驱动性。

软体驱动器由于其易变形的特点导致了具有无限多自由度。为简化模型, 采用集中质量法将单个模块的质量分布到模块的前后端。由于模块变形将产生弹力和能量耗散, 因此采用弹簧阻尼系统对模块进行等效代换, 从而得到等效的集中参数模型, 如图 11 所示。



f_i —摩擦力; k_i —弹性系数; c_i —能量耗散系数;
 $p_i(t)$ —外部激励; x_i —广义坐标。

图 11 简化后的动力学系统模型

在图 11 中, 广义力为

$$Q_i = |f_i| \operatorname{sgn} x_i \quad i = 0, 1, \dots, 6 \quad (13)$$

系统动能为

$$\bar{T} = \frac{1}{4} m (\dot{x}_0^2 + \dot{x}_1^2) + \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^5 \dot{x}_i^2 \quad (14)$$

根据模块具体变形, 可以得出膨胀弯曲 θ 后, 重力势能为

$$V_G = V(x_0, x_1, x_2, \dots, x_6) = \sum_{i=1}^6 \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_i}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\theta_i}{2}} \frac{mLg}{\theta_i^2} \left(\sin \alpha_i - \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_i}{2} \right) \right) d\alpha_i \quad (15)$$

式中参数满足关系 $\frac{L}{\theta_i} \sin \frac{\theta_i}{2} = x_i - x_{i-1}$ 。模块充气变形后的弹性势能为

$$V_E = V(x_0, x_1, \dots, x_6, p_1^{(t)}, p_2^{(t)}, \dots, p_6^{(t)}) \quad (16)$$

在 50 kPa 气压作用下, 测量单模块的拉伸力-轴向变形量特性曲线, 结果如图 12 所示, 分析可知 $V_E = \sum_{i=1}^6 \int_0^{\Delta l} F(p_i^{(t)}, \Delta l_i) d\Delta x$, 其中 $\Delta l_i = L - (x_i - x_{i-1})$ 。

由本节分析可知: 系统总势能为 $\bar{V} = V_G + V_E$;

系统耗散能为 $\bar{D} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 c_i \dot{x}_i^2$; 机器人动力学拉格朗日函数为 $\bar{L}(\dot{x}, x, t) = \bar{T}(\dot{x}, x, t) - \bar{V}(\dot{x}, x, t)$; 系统的拉格朗日方程为 $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{L}}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial \bar{L}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial \dot{x}_i} = Q_i, i = 0, 1, \dots, 6$ 。

3.2 仿真分析

在机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 中

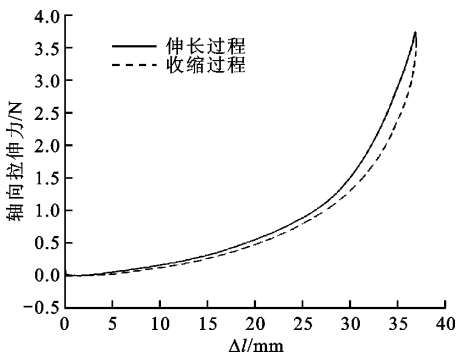


图 12 50 kPa 时单模块轴向拉伸特性

建立系统的动力学模型,根据第 2 节分析所得的不同运动模式,设计对应的驱动序列。图 13 是不同运动模式下软体机器人前端的位移。从图 13a 中可以看出,当 $i=1$ 时, j 越大,则下一组前进波到达的时间间隔越长,机器人运动速度变慢。对比图 13a 和 13b 中的 A1D6 和 A2D5 模式可知,两种模式下一组驱动序列作用的模块数量相同,但是 A2D5 模式中一组驱动序列有两个前进波,传递的运动量更多,运动速度更快。仿真结果表明,第 2 节分析所得到的驱动序列均可以使机器人向前运动。

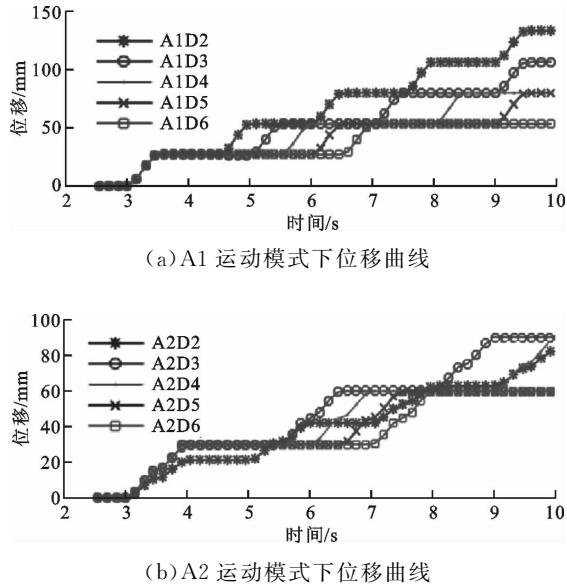


图 13 不同运动模式下 ADAMS 仿真结果

4 实 验

采用第 2 节所述的 10 种可行运动模式对 6 模块软体机器人进行单向运动实验。驱动器充气压力为 50 kPa,充放气时间均为 0.5 s,充放气交错进行,得到软体机器人在 A1 和 A2 模式下的速度曲线,如图 14 和图 15 所示。

分析图 14 和图 15 可知:机器人在 A1 模式下

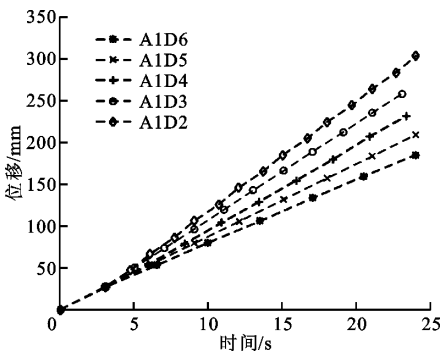


图 14 软体机器人在 A1 模式下的位移曲线

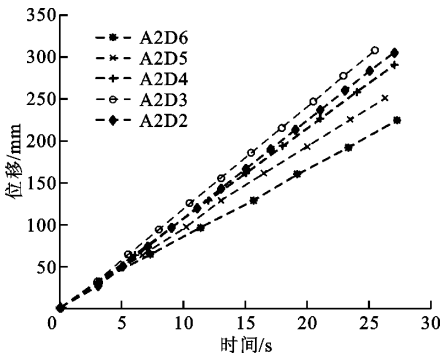


图 15 软体机器人在 A2 模式下的位移曲线

传递一个前进波获得的位移均值为 27.2 mm,在 A2 模式下的位移均值为 31.4 mm。随着间隔 j 的减小,前进波传递的数量增多,机器人的运动速度加快。反常的情况是图 15 中 A2D2 模式的运动速度小于 A2D3 模式下的运动速度。根据式(11)可知, A2D2 模式有 $a=b=c=1$,此时一个前进波传递的运动量为 $\Delta L/8 \leq \Delta X \leq 5\Delta L/16$ 。A2D2 模式下,一个前进波传递的运动量小于 $\Delta L/2$,导致了前进波之间的间隔虽然减小,运动速度却没有增加的现象,这在图 13 的动力学仿真中也有所体现。根据图 14 和图 15 数据,计算出不同模式下软体机器人运动的平均速度,结果如表 1 所示。

表 1 机器人在不同运动模式下的平均速度

i	平均速度/(mm · s ⁻¹)				
	$j=6$	$j=5$	$j=4$	$j=3$	$j=2$
1	7.3	8.7	10.2	11.6	13.2
2	8.0	9.5	10.8	12.4	11.6

在不同的运动模式下,软体机器人可实现不同的运动速度,且在 A1D2 模式下具有最大的运动速度 13.2 mm/s。为检测本文差动 6 模块机器人的效果,对比了与本文相似的软体机器人的运动模式和最大速度,结果如表 2 所示。可以看出:在蠕动机器人中,本文机器人在运动速度上具有明显优势;参与

对比的其他机器人运动模式均较为单一,本文机器人可以实现 10 种运动模式,只改变驱动序列即可以实现运动速度从 7.3 mm/s 到 13.2 mm/s 的变化,应用前景更加广阔。

表 2 不同软体机器人的运动模式和最大速度

机器人类型	运动模式	最大速度/(mm · s ⁻¹)
蚯蚓式 ^[10]	蠕动	4.2
双连杆式 ^[11]	蠕动	2.6
串联 5 模块 ^[14]	双驱动	3.3
SMA 模块化 ^[13]	滚动	26.7
差动 6 模块	多模式	13.2

5 结 论

模块化机器人由于驱动器较多,所以可选择的驱动序列也较多,但只有某些驱动序列可使机器人实现有效运动,目前的研究没有充分体现出模块化机器人运动的多样性。本文通过分析充放气模块的受力状态,得出了可使机器人进行有效运动的充放气模块位置间隔关系,从而分析得出了可使机器人进行有效运动的驱动序列。对机器人进行了拉格朗日动力学建模来验证不同驱动模式的效果,结果表明,使用充放气模块位置间隔关系式分析所得的可行运动模式是准确有效的。本文得出的主要结论如下。

(1)使用统一的可实现单向前进的充放气模块位置间隔关系式($a \leq b$ 或 $a \leq c$)对软体机器人驱动模式的可行性进行分析,结果表明,相比于逐个分析运动模式,本文方法不仅结果准确,也更加简洁,对于串联型模块化机器人的运动分析具有借鉴意义。

(2)在不改变充气气压以及充放气周期的条件下,多模块软体机器人仅改变驱动模式,即可实现运动速度的多样性,体现出了多模块化机器人在运动控制上的优势。本文的 6 模块机器人具有 10 种单向前进运动模式(A1D2, A1D3, A1D4, A1D5, A1D6, A2D2, A2D3, A2D4, A2D5, A2D6),在同类型的机器人中具有较大优势。

(3)使用可单向前进的充放气模块位置关系模型,实现了对本文的 6 模块软体机器人的运动模式的细致分类。通过实验得到了机器人在 A1D2 运动模式下具有最大运动速度 13.2 mm/s,该速度在软体爬行机器人中具有较大优势。

参考文献:

[1] MOSADEGH B, POLYGERINOS P, KEPLINGER

C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly [J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2163-2170.

[2] SANAN S. Soft inflatable robots for safe physical human interaction [D]. Ann Arbor, MI, USA: Carnegie Mellon University, 2013: 45-65.

[3] FEI Y, XU H. Modeling and motion control of a soft robot [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1737-1742.

[4] SHIAN S, BERTOLDI K, CLARKE D R. Dielectric elastomer based “grippers” for soft robotics [J]. Advanced Materials, 2015, 27(43): 6814-6819.

[5] 李敏, 何博, 徐光华, 等. 柔性可穿戴的腕关节运动角度传感器 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 32-37.

LI Min, HE Bo, XU Guanghua, et al. A flexible wearable sensor for monitoring angles of wrist motion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 32-37.

[6] WANG Y, YANG X, CHEN Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish [J]. Science Robotics, 2017, 2(10): 8072-8081.

[7] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot [J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213-223.

[8] 朱圣晨, 李敏, 徐光华, 等. 多段连续结构的外骨骼手指功能康复机器人 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 17-22, 121.

ZHU Shengchen, LI Min, XU Guanghua, et al. Finger exoskeleton for rehabilitation of finger extension and flexion by multi-segment mechanism [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 17-22, 121.

[9] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(44): 18809-18814.

[10] GE J Z, CALDERÓN A A, CHANG L, et al. An earthworm-inspired friction-controlled soft robot capable of bidirectional locomotion [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(3): 3282-3400.

[11] BRANYAN C, FLEMING C, REMALEY J, et al. Soft snake robots: mechanical design and geometric gait implementation [C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 282-289.

- [12] QIN L, LIANG X Q, HUANG H, et al. A versatile soft crawling robot with rapid locomotion [J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(4): 455-467.
- [13] 杜勇. 具有多运动模式的可变形软体机器人研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 25-33.
- [14] 刘亭羽. 仿生气动软体蠕动机器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 11-20.
- [15] ZOU J, LIN Y, JI C, et al. A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion [J]. *Soft Robotics*. 2018, 5(2): 164-174.
- [16] 王江北, 方晔阳, 童歆, 等. 多气囊仿生软体机器人设计及其运动特性分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(1): 20-25.
WANG Jiangbei, FANG Yeyang, TONG Xin, et al. Design and locomotion properties of a multi-airbag bionic soft robot [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(1): 20-25.
- [17] 王绪, 费燕琼, 许红伟, 等. 仿尺蠖蠕动机模块化软体机器人的设计 [J]. *高技术通讯*, 2015, 25(8): 829-834.
- WANG Xu, FEI Yanqiong, XU Hongwei, et al. Design of modular soft robots imitating inchworm peristalsis [J]. *High Technology Letters*, 2015, 25(8): 829-834.
- [18] FECZKO J, MANKA M, KROL P, et al. Modular self-reconfigurable robot systems challenges and opportunities for the future [C]//2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 182-187.
- [19] 张玉华, 赵杰, 张亮, 等. 新型模块化可重构机器人系统 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(s1): 175-178.
ZHANG Yuhua, ZHAO Jie, ZHANG Liang, et al. Novel modular self-reconfigurable robot system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(s1): 175-178.
- [20] WU P, WANG J B, FEI Y Q. The structure, design, and closed-loop motion control of a differential drive soft robot [J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 71-80.

(编辑 陶晴)

(上接第 125 页)

- [13] 贺艳芳, 梁书田. 优化加权多视角 K -means 聚类算法 [J]. *计算机技术与发展*, 2019, 29(3): 81-84.
HE Yanfang, LIANG Shutian. Optimizing weighted multi-view K -means clustering algorithm [J]. *Computer Technology and Development*, 2019, 29(3): 81-84.
- [14] ZONG L, ZHANG X, LIU X, et al. Weighted multi-view spectral clustering based on spectral perturbation [C]//Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA, USA: AAAI, 2018: 4621-4629.
- [15] ZHANG C, FU H, LIU S, et al. Low-rank tensor constrained multiview subspace clustering [C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1582-1590.
- [16] XUE S, QIU W, LIU F, et al. Low-rank tensor completion by truncated nuclear norm regularization [C]//Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 2600-2605.
- [17] XIE Y, TAO D C, ZHANG W S, et al. On unifying multi-view self-representations for clustering by tensor multi-rank minimization [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2018, 126(11): 1157-1179.
- [18] LIU G C, LIN Z C, YAN S C, et al. Robust recovery of subspace structures by low-rank representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(1): 171-184.
- [19] Digital Technology Group. ORL dataset [DS/OL]. [2019-08-01]. <https://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/facedatabase.html>.
- [20] LAZEBNIK S, SCHMID C, PONCE J. A sparse texture representation using local affine regions [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(8): 1265-1278.
- [21] DUA D, GRAFF C. UCI machine learning repository [DS/OL]. [2019-08-01]. <http://archive.ics.uci.edu/ml/index.php>.
- [22] CLÉMENT G. Movies dataset [DS/OL]. [2019-08-01]. <http://membres-lig.imag.fr/grimal/data.html>.

(编辑 陶晴)