

结构约束型可编程柔性跃变结构蒙皮设计

Design of structure-constrained programmable compliant skin based on snap-through elements

期刊：	中国科学: 物理学 力学 天文学
稿件ID：	SSPMA-2023-0149.R2
稿件栏目：	论文
作者提交日期：	2023-06-07
参与作者列表：	柯星星, 柴治平, 雍昊臣, 丁汉, 吴志刚
关键词：	柔顺机构, 力学柔性蒙皮, 软体机器人
英文关键词：	Compliant mechanics, Mechanical compliant skin, Soft robotics
学科领域：	力学
注意：以下文件由作者提交以供同行评审, 但不能转换为PDF. 您必须在线查看这些文件.	
Figure-cdr.zip	



论文

专题名称: 软体驱控中的力学问题专题

结构约束型可编程柔性跃变结构蒙皮设计

柯星星^{1①②††}, 柴治平^{2①②††}, 雍昊臣^{3①②}, 丁汉^{4①②}, 吴志刚^{5①②*}

① 华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室, 武汉 430074;

② 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074

†† These authors contributed equally to the work

*联系人, E-mail: zgwu@hust.edu.cn

收稿日期: 2023-04-xx; 接受日期: 2023-xx-xx

国家自然科学基金(编号: 52188102)资助项目

摘要 可编程柔性蒙皮在软体机器人、柔性电子和柔顺机构等领域具有重要的应用价值。然而, 现有许多基于跃变结构蒙皮往往在进行力学阈值和工作行程设计时, 存在阈值和行程耦合且设计参数空间有限等问题, 限制了其在前述各个领域灵活应用。通过将约束结构引入跃变结构, 本文提出了一种力学阈值和工作行程可同时编程的柔性结构蒙皮设计方法。首先, 通过系统地表征基本跃变结构的力学阈值和工作行程与关键结构参数的关系, 本文拟合了力学阈值和工作行程与结构参数的数学关系; 进一步地, 通过引入约束结构对其工作行程进行约束, 建立了该约束结构的结构参数和工作行程的数学映射; 最后, 基于所提出结构约束型可编程柔性跃变结构蒙皮, 实现了在力学阈值几乎不变的条件下对蒙皮工作行程的精确调控, 并验证了该方案对多级梯度行为调控的可行性。简而言之, 本文所提出的方法极大简化了柔性蒙皮阈值和行程协同设计, 拓宽了其设计参数空间, 并使得跃变过程更加平顺, 有助于实现柔性蒙皮在软体机器人、柔性电子等领域广泛灵活的应用。

关键词 柔顺机构, 力学柔性蒙皮, 软体机器人**PACS:** 62.20.F-, 46.32.+x, 46.70.De, 45.20.dg, 07.10.-h

1 引言

由于其具有力学行为可编程、二维结构易于加工、在复杂曲面表面上顺形性好等特点, 基于柔顺结构的柔性蒙皮在软体机器人、柔性电子和软机构学上具有广泛的应用^[1-4]。针对不同的蒙皮应用场景, 为使其完成特定的力学功能, 通常需要对蒙皮柔顺结构进行精巧的设计。其中, 多稳态跃变结构具有可控

的非线性力学响应行为, 在能量冲击吸收、快速驱动响应和可编程的力学的柔顺结构中有很多可预见性应用, 从而得到广泛关注和研究^[5-20]。

现有的力学跃变结构大多都是通过柔顺的梁结构屈曲失稳实现的^[10,21-24], 特别是针对几何形态和材料参数较为理想的梁单元, 通过数学上的分析计算已经能够较为理想的预测其力学行为。其中, Qiu 等人使用模态分析和有限元预测的方法对弯曲梁机构的双稳态行为进行了分析^[24]。Holst 等人则建立了考虑

引用格式: 作者1, 作者2, 作者3. 题目(不超过24个汉字). 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 123456
Author A, Author B, Author C. Title (no more than 24 words) (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 123456, doi: 10.1360/SSPMA2016-00000

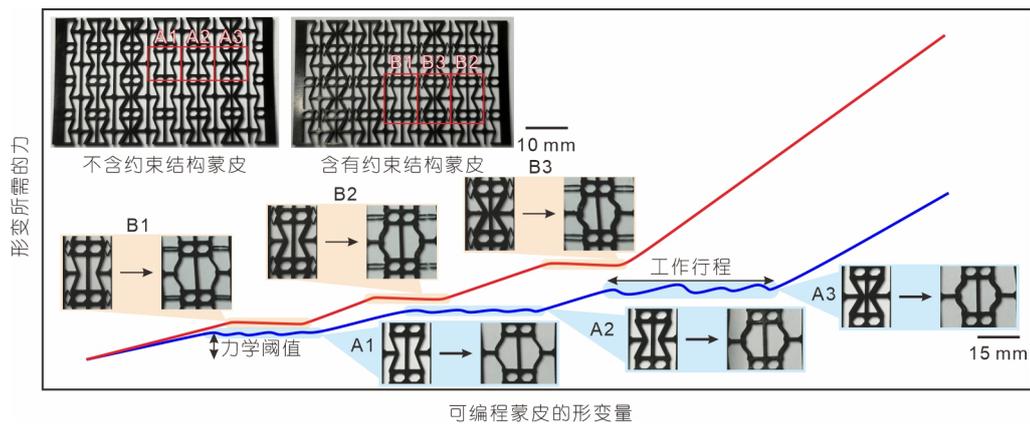


图 1 力学阈值和工作行程可调的柔性蒙皮工作概念图。其中含有约束结构和不含约束结构的蒙皮均为蒙皮实物，实物中结构单元在拉伸状态下的变化与力-形变量曲线每个梯度阶段相对应。

Figure 1 Working principle of compliant skins with tunable force threshold and working stroke. The fabricated compliant skin is shown in the figure. The behavior under deformation of each structure element is correlated to each level of the response.

柔性梁轴向压缩的分析模型，对两端受到固定约束的梁所受支反力与位移之间的关系进行了较为准确的分析^[21]。Haghpanah 等人提出了具有多个设计参数的双稳态梁的数学分析模型，并依据该模型设计了具有可重构能力的复杂多稳态结构^[25]。同一时期，针对在多稳态跃变过程中材料自身形变较大的结构或是形变非线性结构，研究者们大多只是定性地讨论了其力学过程^[16,23,26]。其中，哈佛大学 Shan 等人实验探索了多稳态跃变结构在不同能量冲击条件下用于可控和可编程的能量收集和吸收的效果^[23]。Raney 等人实验性展示了非线性大变形的储能双稳态梁单元对机械信号的过滤和保真传递的能力^[16]。Hao 等人通过剪纸设计使能的水凝胶实现了多稳态的开关结构，并展示了大量的从二维结构到三维结构转换的例子^[26]。因此，提出一种可定量预测非线性大变形的跃变结构单元行为的方法，对拓展该类力学结构的应用范围具有重要意义。

已有的研究表明，通过编程柔性蒙皮力-形变量曲线中的力学特征，可实现柔性蒙皮对软体致动器局部形变或动作模态转变等行为的编程。^[27]在软体致动器工作中最为重要的力学特征为驱动力及其结构变形，而这两项特征分别与柔性蒙皮的力-形变量曲线中的力学阈值和工作行程两个重要特性相关。因此对柔性蒙皮各阶段的力学阈值和工作行程进行独立编程设计的研究，将为多阶段变形的软体致动器提供有效的实现方法。但是，现有的许多基于跃变梁单元的

结构常常存在力学阈值和工作行程耦合的现象，难以实现相对独立的力学预编程。^[14]而且，其设计空间有限，极大限制了更加灵活地在时空维度上的编程，进而实现更加复杂的行为和应用。

通过将约束结构与跃变结构相结合，如图 1 所示，本文提出了一种结构约束型可编程柔性跃变结构蒙皮。通过系统地表征基本跃变结构的力学阈值和工作行程与其结构参数的关系，本文较好地拟合了力学阈值和工作行程与结构参数的数学关系；进一步地，通过引入菱形约束结构对其行程进行调控，建立了结构参数和工作行程的线性数学映射；最后，基于本文所提出结构约束型跃变结构及线性模型，实现了在力学阈值几乎不变的条件下对蒙皮工作行程的调控，并对波动的跃变曲线进行了平滑，消除了该跃变梁结构作为柔顺蒙皮时存在的变形波动，以确保多梯度变形行为的平滑过渡，同时验证了该方案在多级梯度行为调控的可行性。该方案提供了一种简单有效的力学结构的数学设计方法，有望实现通过结构编程简洁地实现较为复杂的具身人工智能等行为^[28,29,30]。

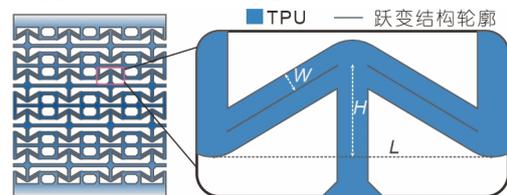


图 2 跃变梁结构示意图

Figure 2 Schematic of snap-through element.

2 可编程蒙皮结构设计实验

以典型的跃变梁结构为基础, 本文设计了如图 2 所示的跃变结构蒙皮, 并定义了三个关键的结构参数来定义其结构单元形式, 分别为跨度 L , 高度 H 和梁宽 W (其中, 本文中采用平行双梁结构)。除此之外, 定义在外力不变的情况下, 该结构所能发生形变的长度为工作行程, 而该工作行程所对应外力大小即为力学阈值, 如图 1 所示。具体来讲, 考虑到测试过程中曲线可能的波动和漂移, 本文中选用了工作行程段在平均值附近波动 $\pm 10\%$ 的区域作为力学阈值和工作行程的定义区域, 通过这样的定义, 无论力-形变量曲线是否存在跃变波动的部分, 我们都能够从曲线中提取出所需要的特征。在本文中, 定制化的 MATLAB

程序被用来对这两项特征进行提取。

该柔性蒙皮采用热塑性聚氨酯弹性体橡胶 TPU 为原料, 利用紫外激光 (HGL-LSU3/5EI, 华工激光, 中国) 加工得到具有所设计图案的蒙皮结构。进一步地, 使用静态试验机 (5944, Instron, 美国) 测试结构的准静态力学特性, 本文分别表征了不同 W , L 和 H/L 对其结构发生跃变的阈值和其工作行程的影响, 如图 3 所示。在图 3(a)和(b)中, 随着梁宽度 W 的增加, 结构发生跃变的阈值也随之增大, 这种变化随着跨度 L 的减小而表现得更加明显。另一方面, 结构的高跨比 H/L 同样与力学阈值成正相关, 但是影响效果不如梁宽度 W 显著。在图 3(c)和(d)中, 结构的高跨比 H/L 与工作行程正相关, 而梁宽度 W 对工作行程

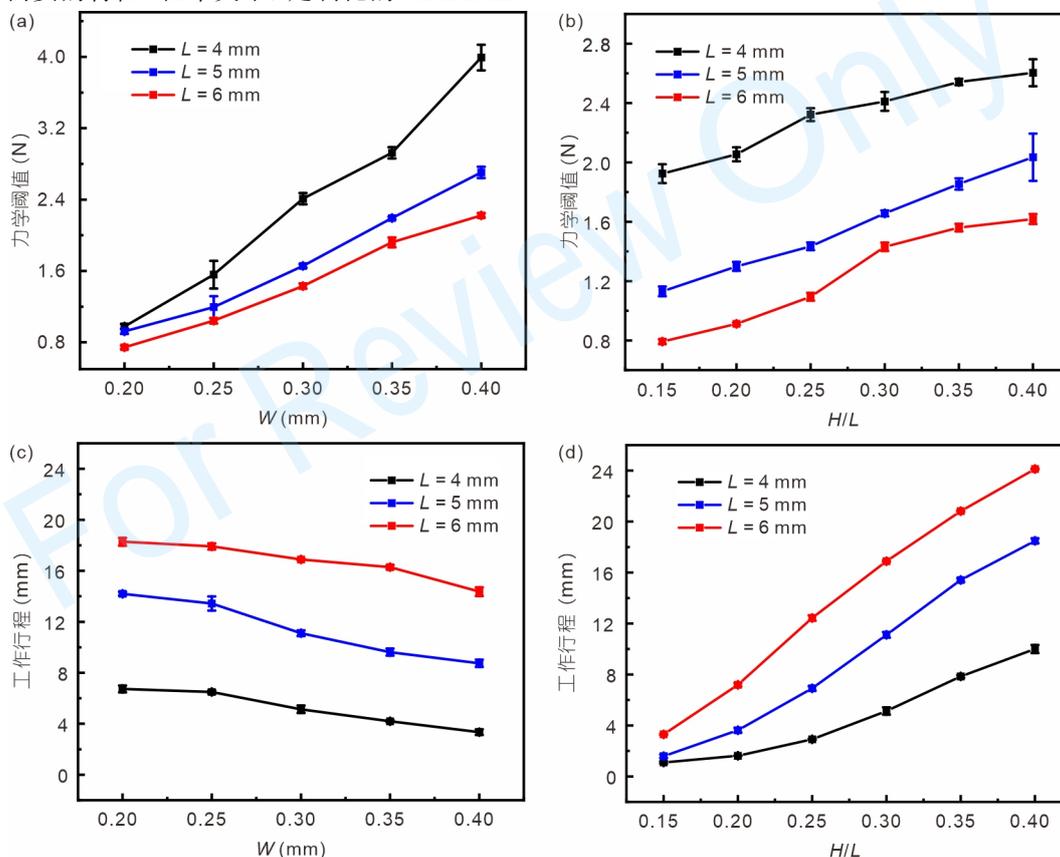


图 3 结构参数对柔性蒙皮力学阈值和工作行程的影响 (a)在 H/L 一定的情况下, 梁宽 W 及跨度 L 对力学阈值的影响 (b)在 W 一定的情况下, 高跨比 H/L 及跨度 L 对力学阈值的影响 (c)在 H/L 一定的情况下, 梁宽 W 及跨度 L 对工作行程的影响 (d)在 W 一定的情况下, 高跨比 H/L 及跨度 L 对工作行程的影响

Figure 3 The influence of structural parameters on the force threshold and working stroke. (a) The influence of width W and span length L on the change of force threshold, when H/L keeps constant. (b) The influence of height and span length H/L and span length L on the change of force threshold, when W keeps constant. (c) The influence of width W and span length L on the change of working stroke, when H/L keeps constant. (d) The influence of height and span length H/L and span length L on the change of working stroke, when W keeps constant.

123456-3

的影响较小, 随着 W 的增加, 结构的工作行程表现出减小的趋势。

上述结果表明, 更宽的梁宽 W 会显著的增加其力学阈值, 并一定程度上削弱其工作行程; 更大的高跨比 H/L 会增加其力学阈值并增加其工作行程; 更长的跨度 L 会降低其力学阈值并增加其工作行程。

基于以上发现, 我们分析建立了一个三参数模型, 以预测结构的力学阈值和工作行程。由图 3 可以分析出, 梁宽度 W , 高跨比 H/L 与力学阈值和工作行程具有较好的线性关系。同时, 可以近似认为跨度 L 对力学阈值和工作行程的影响也是线性的, 从而建立形式如下的参数模型:

$$Th = (a_1L + a_2) \times W + (a_3L + a_4) \times \frac{H}{L} + a_5L + a_6, \quad (1)$$

$$St = (b_1L + b_2) \times W + (b_3L + b_4) \times \frac{H}{L} + b_5L + b_6, \quad (2)$$

其中, Th 表示对应结构的力学阈值, St 表示对于对应结构的工作行程, a_{1-6}, b_{1-6} 分别为结构参数对应的拟合系数。

将实验数据代入模型, 并用 MATLAB 进行回归分析, 得到对应的拟合参数及其线性回归决定系数如表 1 所示。两项公式的拟合结果显示, 结构参数对力学阈值和工作行程的影响满足较好的线性关系。

上述拟合系数从数据角度定量地验证了梁宽度 W 与高跨比 H/L 对结构力学性能的调控能力。通过该三参数模型, 可预测并调控结构的力学阈值和工作行程。

表 1 $L, W, H/L$ 三参数模型拟合系数

Table 1 The value of $L, W, H/L$ three-parameter model coefficients

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	R^2
-3.557	28.312	0.532	0.830	0.417	-4.468	0.9651
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	R^2
-0.378	-20.266	24.778	-59.289	-1.802	7.374	0.9885

需要注意的是, 由于我们在实验中所使用的材料统一为 TPU, 且跃变梁的两端为非理想约束状态, 本参数拟合模型实际上是一种非理想条件下的跃变梁模型^[31]。另外, 由于跃变梁的宽度 W 与其跨度 L 相比不能忽略不计, 因此在变形过程中还应涉及非线性本构材料的大应变。针对该结构的逆向求解使用上述的线性方程则更为简便。

3 约束结构的设计与实验

三个独立结构参数足以实现对力学阈值和工作行程两个参数的逆解, 但在实际使用过程中仍然存在部分结构参数难以加工制造或者应用场景对结构参数存在设计约束或限制的情况。除此之外, 有时因为参数选择失当也会出现曲线无梯度变化或者跃变梁

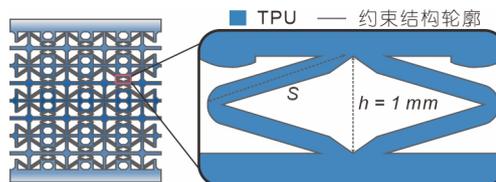


图 4 约束结构示意图

Figure 4 Schematic of constraint structure.

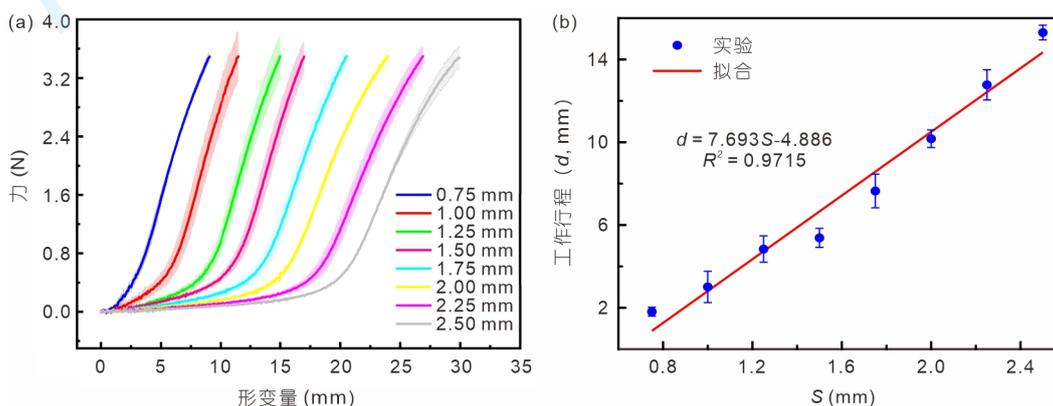


图 5 约束结构的不同参数对形变力和工作行程的影响 (a) 约束结构的力-形变曲线 (b) 约束结构边长对其工作行程的影响
Figure 5 The influence of structural parameters of constraints on the deformation force and working stroke. (a) The force – deformation curve of constraint structure (b) The impact of side length S on the working stroke of constraint structure

结构出现面外变形的情况, 这些都不利于后续该蒙皮结构的集成使用。因此, 在上述跃变结构的基础上, 本文进一步设计并引入了一种基于菱形单元约束结构, 如图 4 所示。其中菱形结构的对角线长 h 为定值 1mm , S 为约束结构的边长, 其直接决定了结构在受到拉力后的极限位移。约束杆的设计宽度本文中一般取 0.2mm 。实际由于激光热效应, 根据大量的 TPU 切割标定结果, 加工得到的结构实际宽度大约为 0.16mm 。为表征约束结构受拉时的性能, 蒙皮结构的其余部分与前述表征的跃变梁结构相同, 但仍需要对各单元之间的连接进行切割以消除其余结构对拉伸性能影响。

通过探究具有不同边长 S 的约束结构对应的力-形变量曲线, 发现该约束结构具有较好的约束能力, 同时, 在非约束行程不会引入太大的刚度。在图 5(a) 中, 约束结构的边长 S 可以有效地调控非约束行程的大小, 在非约束中, 约束结构对刚度几乎没有影响。当约束结构被拉直进入约束行程时, 结构刚度会有明显的突变, 从而快速地限制了结构的工作行程。

同时, 如图 5(b) 所示, 通过对不同 S 进行表征, 我们发现了所设计的工作行程和约束结构边长 S 具有较好的线性关系, 并通过线性拟合得到了以下公式:

$$d = 7.693S - 4.886. \quad (3)$$

通过该公式, 我们可以预测所设计结构的极限工作行程, 从而达到更加方便快捷地对跃变结构工作行程独立编程的目的。

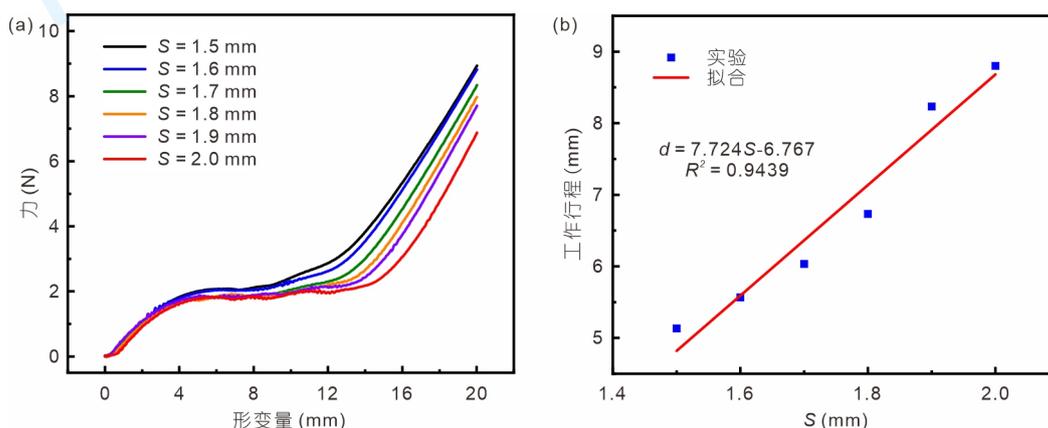


图 7 结构约束型跃变蒙皮的力学特性 (a) 结构约束型跃变蒙皮力-形变量曲线 (b) 约束结构边长对蒙皮工作行程的影响
Figure 7 The mechanical characteristics of structure-constrained snap-through skin (a) The force – deformation curve of structure-constrained snap-through skin (b) The impact of side length S on the working stroke of structure-constrained snap-through skin

4 基于约束结构的阈值与行程调控

将第 2 和第 3 节中的跃变结构和约束结构进行并联, 我们设计了如图 6 所示的结构。如前节所述, 对于该约束型结构, 通过逆解公式(1)和(2)所提出的参数模型可以实现对跃变梁结构的阈值和行程进行调控。通过调整约束结构的尺寸参数, 可以进一步对整体结构的工作行程独立编程, 实现力学阈值与工作行程相对独立的力学预编程。

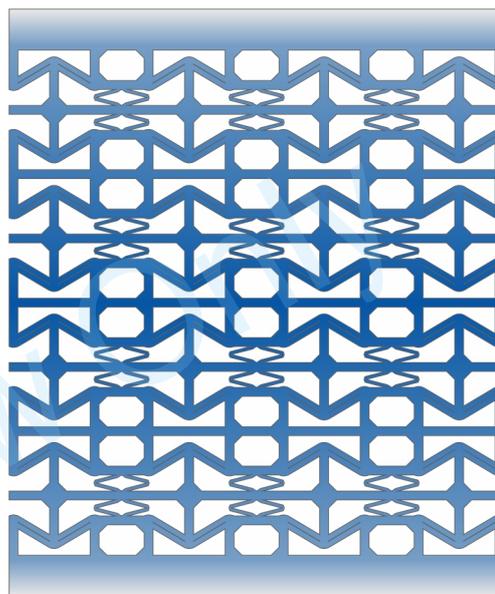


图 6 结构约束型跃变蒙皮
Figure 6 Structure-constrained snap-through skin

为验证所提出的约束结构对阈值和行程的影响, 本文选取了结构参数为梁宽 $W=0.3\text{mm}$, 高跨比 $H/L=0.3$, 跨长 $L=5\text{mm}$ 的蒙皮结构, 对具有所提出约束结构的蒙皮力学性能进行了实验表征, 得到了如图 7(a)所示的实验数据。实验结果表明, 随着约束结构边长的增加, 约束结构对工作行程的约束减弱。通过对同一跃变梁结构基底, 引入不同的约束结构可实现对其工作行程进行独立的控制, 而且该约束结构对跃变阈值的影响较小。

如图 7(b)所示, 根据所得到的力-形变量曲线可以发现, 工作行程的增加与约束结构的边长近似成线性关系, 且满足如下表达式:

$$d = 7.724S - 6.767. \quad (4)$$

该表达式具有与表达式(3)相近的斜率, 这说明约束结构在约束型蒙皮结构中的约束效果与其单独所展现的约束效果具有良好的一致性。该约束结构达到了对工作行程的良好约束效果, 且本文所提出的约束结构与工作行程预测方法具有较好的准确度, 这进一步简化了蒙皮阈值与工作行程的协同设计。

5 多级串联结构中的应用

利用前述所得的可编程蒙皮和约束的结构参数对力学特性的调控关系, 如图 8 所示, 本文设计出一种多级串联结构。其由三组不同的结构进行串联, 结构参数如表 2 所示。进一步验证了其在多级离散力学阈值和工作行程的结构中的有效性。

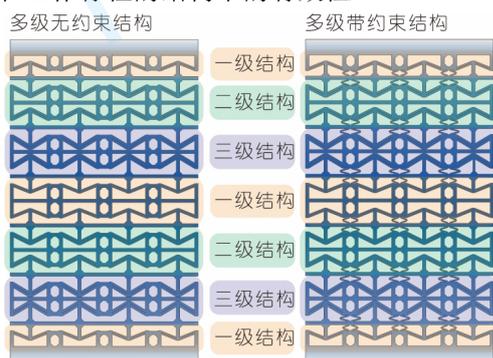


图 8 无约束与带约束的三级结构设计示意图
Figure 8 The design of multilevel structures with/without constraints

表 2 无约束与带约束的多级结构各级结构参数设置

Table 2 The structural design of multilevel compliant skins with/without constraints

级数	无约束结构参数	约束结构参数
1	$W = 0.2 \text{ mm}$	$S = 1.5 \text{ mm}$
	$H/L = 0.2$	
	$L = 6 \text{ mm}$	
2	$W = 0.3 \text{ mm}$	$S = 1.75 \text{ mm}$
	$H/L = 0.25$	
	$L = 6 \text{ mm}$	
3	$W = 0.35 \text{ mm}$	$S = 2.0 \text{ mm}$
	$H/L = 0.3$	
	$L = 6 \text{ mm}$	

当在多级串联结构的两端施加拉伸载荷时, 由于各级结构的力学阈值不同, 其结构会随着载荷的加大而依次发生如图 1 所示的跃变, 从而得到阶梯跃变的三级响应行为。此类多级结构在柔性传感和可编程的软体机器人多梯度动作方面有着广泛的应用场景。^[32]

如图 9 及表 3 和 4 所示, 通过单轴拉伸试验, 我们发现该多级结构可实现多级梯度响应的力学行为, 同时约束结构还能使得跃变过程更加平缓, 一定程度上消除了跃变过程中的曲线波动现象。

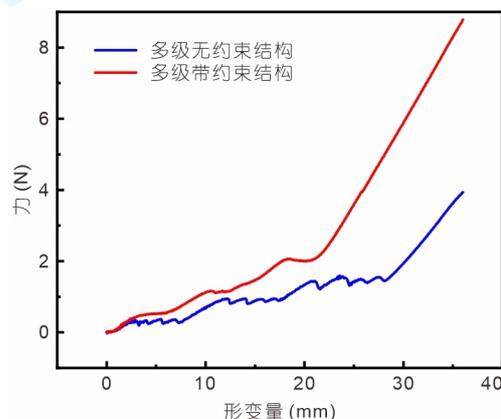


图 9 无约束与带约束的三级梯度行为
Figure 9 The behavior of multilevel responses with/without constraints.

其中约束结构对力-形变量曲线的形态的影响可以通过如图 10 所示的原理进行解释。通常多级梯度行为是多个单级梯度行为的串联, 图中仅对单级梯度行为的力-形变量曲线进行分析。对于如图 10(a)所示的单级梯度行为而言, 此级梯度行为中跃变峰的个数取决于相同结构参数的跃变梁串联的个数。在拉伸过程中, 每个串联的跃变梁逐步跃变, 因此形成了一段

具有 n 个跃变峰的梯度行为。如图 10(b), 当约束结构与跃变梁单元在结构上并联以后, 它们的力-形变量曲线也相应的进行了叠加。由于并联后结构的力-形变量曲线中, 跃变梁导致的拉力下降区域被约束结构导致的“J”型曲线所填充, 因此叠加后的曲线跃变导致的波动变小, 或不再存在跃变行为。与此同时, “J”型曲线的快速上升阶段也限制了该级梯度行为的工作行程。因此该约束结构的引入对柔性蒙皮在软体致动中的平稳应用具有较大意义。然而, 由于我们引入的约束结构在非约束阶段不是理想的无刚度构型, 其会使得整体的曲线一定程度的“上漂”, 同时工作行程的约束在多级行为之间也存在一定的相互影响现象。该现象可通过引入更加理想的约束结构, 如其关节加入理想的铰链结构来改善。

表 3 无约束与带约束的多级结构力学阈值比较

Table 3 The comparison of force threshold between multilevel structures with/without constraints

级数	无约束力学阈值(N)	带约束力学阈值(N)
1	0.3722	0.5502
2	0.9601	1.2933
3	1.5921	2.2248

表 4 无约束与带约束的多级结构工作行程比较

Table 4 The comparison of working stroke between multilevel structures with/without constraints

级数	无约束工作行程(mm)	带约束工作行程(mm)
1	5.5666	2.8666
2	7.2338	3.8331
3	8.9331	4.9333

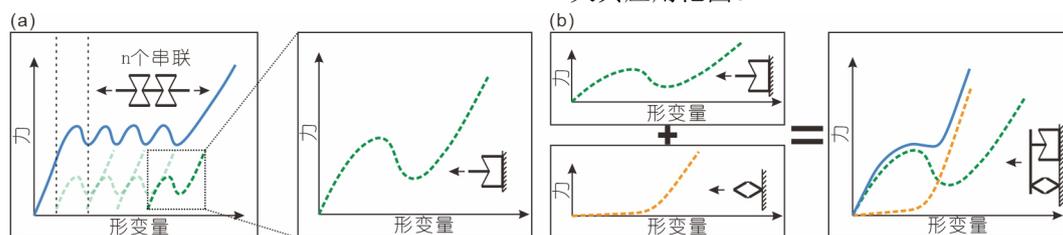


图 10 多级梯度行为中力-形变量曲线平滑原理 (a)单级梯度行为中的多步跃变分解 (b)跃变梁结构与菱形约束结构的并联叠加行为分析

Figure 10 The smoothing principle of force-deformation curve with multilevel responses (a)The decomposition of a single-level response that has multiple snap-through behaviors in series (b)The analysis of snap-through beams and constraint structures which are coupled in parallel.

6 结论

本文通过将约束结构引入跃变结构, 提出了一种结构约束型可编程柔性跃变结构蒙皮设计方法, 并验证了该方法在蒙皮力学阈值和工作行程调控中的可行性。具体地来讲, 本文系统的研究了跨度 L , 高跨比 H/L 和梁宽 W 三个结构参数对跃变结构力学阈值和工作行程两项性能的影响。通过对实验结果的拟合分析, 得到了该结构的由三个参数组成的设计空间。在此基础上, 本文提出了一种简单有效的约束结构, 其仅含一个结构参数, 且在几乎不改变力学阈值的情况下, 对于工作行程具有良好的约束效果。该约束结构的引入不仅拓展了蒙皮结构的设计空间, 同时由于其结构参数与工作行程的高度相关性, 弱化了力学阈值与工作行程的耦合效果, 简化了对整体结构的力学阈值和工作行程两项性能的设计, 并使得跃变过程的力-形变量曲线更加平滑。最后, 在所提出的结构约束型跃变结构的基础上, 本文验证了所提出的结构设计方法在多级梯度行为设计调控中的迁移能力。实验证明, 多级结构之间的力学阈值和工作行程影响更为显著, 可能需要引入更加理想化的约束结构(如理想的铰链连接的约束结构)实现对力学行为的独立编程。

本文所提出的结构约束型可编程柔性跃变结构将使软体机器人的复杂三维运动在二维蒙皮设计过程中得以实现。^[32]这种柔性蒙皮技术不仅可以更好的实现软体机器人的形态变化及交互, 还可用以赋予其逻辑操作, 感知和非结构场景的适应能力, 极大地提高该类软体机器人^[33]的功能性, 拓宽其使用场景, 扩大其应用范围。

致谢 向评审人和对该文有帮助的人士表示谢意.

参考文献

- 1 Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, Rubinstein SM, Bertoldi K. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Sci Robot*, 2018, 3: eaar7555.
- 2 Pei Z, Xiong X, He J, Zhang Y. Highly Stretchable and Durable Conductive Knitted Fabrics for the Skins of Soft Robots. *Soft Robot*, 2019, 6: 687–700.
- 3 Wang S, Wang Y, Chen Z, Mei D. Kirigami Design of Flexible and Conformal Tactile Sensor on Sphere-shaped Surface for Contact Force Sensing. *Adv Mater Technol*, 2023, 8: 2200993.
- 4 Jiang S, Liu J, Xiong W *et al.* A Snake skin-Inspired, Soft-Hinge Kirigami Metamaterial for Self-Adaptive Conformal Electronic Armor. *Adv Mater*, 2022, 34: 2204091.
- 5 Frenzel T, Findeisen C, Kadic M, Gumbsch P, Wegener M. Tailored Buckling Microlattices as Reusable Light-Weight Shock Absorbers. *Adv Mater*, 2016, 28: 5865–5870.
- 6 Pan F, Li Y, Li Z *et al.* 3D Pixel Mechanical Metamaterials. *Adv Mater*, 2019, 31: 1900548.
- 7 Liu S, Imani A, Burgueño R. Architected materials for tailorable shear behavior with energy dissipation. *Extrem Mech Lett*, 2019, 28: 1–7.
- 8 Findeisen C, Hohe J, Kadic M, Gumbsch P. Characteristics of mechanical metamaterials based on buckling elements. *J Mech Phys Solids*, 2017, 102: 151–164.
- 9 Coulais C, Overvelde JTB, Lubbers LA, Bertoldi K, Hecke M Van. Discontinuous Buckling of Wide Beams and Metabeams. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 044301.
- 10 Fargette A, Neukirch S, Antkowiak A. Elastocapillary Snapping: Capillarity Induces Snap-Through Instabilities in Small Elastic Beams. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 137802.
- 11 Bertoldi K, Vitelli V, Christensen J, Hecke M Van. Flexible mechanical metamaterials. *Nat Rev Mater*, 2017, 2: 17066.
- 12 Puglisi G, Truskinovsky L. Mechanics of a discrete chain with bi-stable elements. *J Mech Phys Solids*, 2000, 48: 1–27.
- 13 Lee J, Singer JP, Thomas EL. Micro- / Nanostructured Mechanical Metamaterials. *Adv Mater*, 2012, 24: 4782–4810.
- 14 Rafsanjani A, Akbarzadeh A, Pasini D. Snapping Mechanical Metamaterials under Tension. *Adv Mater*, 2015, 27: 5931–5935.
- 15 Florijn B, Coulais C, Van Hecke M. Programmable mechanical metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 175503.
- 16 Raney JR, Nadkarni N, Daraio C *et al.* Stable propagation of mechanical signals in soft media using stored elastic energy. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2016, 113: 9722–9727.
- 17 Che K, Rouleau M, Meaud J. Temperature-tunable time-dependent snapping of viscoelastic metastructures with snap-through instabilities. *Extrem Mech Lett*, 2019, 32: 100528.
- 18 Li Z, Zhu J, Foo CC, Yap CH. A robust dual-membrane dielectric elastomer actuator for large volume fluid pumping via snap-through. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 212901.
- 19 Meng Z, Liu M, Yan H, Genin GM, Chen CQ. Deployable mechanical metamaterials with multistep programmable transformation. *Sci Adv*, 2022, 8: eabn5460.
- 20 Zhang H, Wu J, Fang D, Zhang Y. Hierarchical mechanical metamaterials built with scalable tristable elements for ternary logic operation and amplitude modulation. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf1966.
- 21 Holst GL, Teichert GH, Jensen BD. Modeling and experiments of buckling modes and deflection of fixed-guided beams in compliant mechanisms. *J Mech Des*, 2011, 133: 051002.
- 22 Graule MA, Chirattananon P, Fuller SB *et al.* Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion. *Science*, 2016, 352: 978–982.
- 23 Shan S, Kang SH, Raney JR *et al.* Multistable Architected Materials for Trapping Elastic Strain Energy. *Adv Mater*, 2015, 27: 4296–4301.
- 24 Qiu J, Lang JH, Slocum AH. A Curved-Beam Bistable Mechanism. *J Microelectromechanical Syst*, 2004, 13: 137–146.

123456-8

- 1
2
3
4 25 Haghpanah B, Salari-Sharif L, Pourrajab P, Hopkins J, Valdevit L. Multistable Shape-Reconfigurable
5 Architected Materials. *Adv Mater*, 2016, 28: 7915–7920.
6 26 Hao XP, Xu Z, Li CY *et al.* Kirigami-Design-Enabled Hydrogel Multimorphs with Application as a
7 Multistate Switch. *Adv Mater*, 2020, 32: 2000781.
8 27 Shah D, Yang B, Kriegman S *et al.* Shape Changing Robots: Bioinspiration, Simulation, and Physical
9 Realization. *Adv Mater*, 2020, 33: 2002882.
10 28 Miriyev A, Kovač M. Skills for physical artificial intelligence. *Nat Mach Intell*, 2020, 2: 658–660.
11 29 Gupta A, Savarese S, Ganguli S, Fei-Fei L. Embodied intelligence via learning and evolution. *Nat Commun*,
12 2021, 12: 5721.
13 30 Hua-Ping L, Di G, Fu-Chun S, Xin-Yu Z. Morphology-based Embodied Intelligence: Historical Retrospect
14 and Research Progress (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2023, 49: 1–24. [刘华平, 郭迪, 孙富春, 等. 基于形
15 态的具身智能研究: 历史回顾与前沿进展, *自动化学报*, 2023, 49(6): 1-24.]
16 31 Ma F, Chen G. Influence of non-ideal fixed-end constraints on kinetostatic behaviors of compliant bistable
17 mechanisms. *Mech Mach Theory*, 2019, 133: 267–277.
18 32 Rafsanjani A, Bertoldi K, Studart AR. Programming soft robots with flexible mechanical metamaterials. *Sci*
19 *Robot*, 2019, 7874: eaav7874.
20 33 Buckner TL, Bilodeau RA, Kim SY, Kramer-Bottiglio R. Roboticizing fabric by integrating functional fibers.
21 *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2020, 117: 25360–25369.
22
23
24

Design of structure-constrained programmable compliant skin based on snap-through elements

KE XingXing^{1,2††}, CHAI ZhiPing^{1,2††}, YONG HaoChen^{1,2}, DING Han^{1,2}, WU ZhiGang^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China

² School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

35
36 Programmable compliant skin has important application value in the fields of soft robotics, flexible electronics, and
37 compliant mechanics. The design of many existing skins based on snap-through elements has suffered from limited
38 parameter design space and coupling of thresholds and strokes, which restrict their further applications in the
39 aforementioned fields. In this paper, through the proposal of structure-constrained snap-through elements, a
40 compliant skin with a simultaneously programmable force threshold and working stroke is proposed. By
41 systematically characterizing the relationship between the structural parameters of the snap-through element and its
42 force threshold and working stroke, a mathematical relation is derived between them. Furthermore, a constraint
43 structure is introduced to solely regulate the stroke. Then, a mathematical mapping of its structural parameters and
44 working stroke is established. Based on the proposed structure-constrained snap-through skin, precise regulation of
45 the skin's working stroke can be realized under the condition that the mechanical threshold is nearly unchanged.
46 Finally, the feasibility of our proposed method for the regulation of multilevel gradient behavior is further verified.
47 Our proposed method decouples the codesign of the force threshold and working stroke and broadens the design
48 space of compliant skins, making the snap-through process smoother. Our method is thus beneficial for the broad
49 application of compliant skins in the field of soft robotics and flexible electronics.

Compliant mechanics, Mechanical compliant skin, Soft robotics

PACS: 62.20.F-, 46.32.+x, 46.70.De, 45.20.dg, 07.10.-h

doi: 10.1360/SSPMA2016-00000

123456-9