

# 任意の形状保持と可変剛性を実現する空圧式弾性線状体

## An Elastic Variable Stiffness Continuum Robot with Shape-Locking Mechanism

○正 渡辺 将広 (東北大) 正 多田隈 建二郎 (東北大)  
正 昆陽 雅司 (東北大) 正 田所 諭 (東北大)

Masahiro WATANABE, Tohoku University, watanabe.masahiro@rm.is.tohoku.ac.jp  
Kenjiro TADAKUMA, Tohoku University  
Masashi KONYO, Tohoku University  
Satoshi TADOKORO, Tohoku University

In this paper, we propose a novel pneumatic-driven variable stiffness mechanism capable of shape-locking. Various methods had been proposed to change the stiffness. However, there is no simple methodology to realize both controllable elasticity and shape locking. In this research, we present a continuum robot using flat tubes pathed through along the body inside the slits. The slit has multiple needle-like structures, which makes the tube grip with large friction when pressurized. This makes it possible to retain the robot in an arbitrary shape. First, we show the principle of the shape-locking mechanism and fabricate a prototype of the proposed mechanism. A basic test is conducted to check the performance of the mechanism.

**Key Words:** Continuum robot, Variable stiffness, Shape-Locking, Pneumatic actuator.

### 1. 緒言

剛性は部材にかかる力に対する変形量を表す物理量であり、スティフネス(Stiffness)や強さなども表現される。Variable Stiffness Mechanism は厳密な意味での工学的な“剛性”の調節だけではなく、摩擦や座屈に見られる降伏点の変化や、粘性に影響される動的弾性率の変化、固体から液体へ相を変えるような変形に関する性質そのものを大きく変えるものなど、見かけ上の剛性変化がある。これらは共通して、外力に抗する何らかの力を変化させる機能を活用し、構造の変形のしやすさを変えるものである。

近年盛んに研究されているソフトロボティクスの分野においても、ジャミング転移、機能性流体、流体アクチュエータ等、様々な可変剛性機構が研究されている(2.1節参照)。一般に、高剛性では位置や姿勢の保持、力の伝達に適する。一方、低剛性では形状適応、衝撃吸収に適する。これらの切替えることで、不定形・脆弱・軟弱物体を把持可能なグリッパや、生体内で使用する内視鏡、マニピュレータなどへの活用が試みられている。

本研究では、任意の姿勢保持と剛性可変な弾性線状体を提案する(図1)。剛性の調節だけでなく、従来には無い、外力を除荷すれば元の姿勢に戻る弾性と、剛性変化時の姿勢を任意に決めることが可能な形状記憶性を兼ね備える。すなわち、永久変形の残る塑性を有する機構や単一姿勢でしか剛性変化ができない機構では困難な、外乱による影響を抑えるロバスト性向上や、多自由度の構造体の高機能化・高性能化につながる。さらに軽量な空圧駆動で索状(線状)構造、中空構造が可能であるため、機構要素として様々な装置に組み込める。

本稿では、提案コンセプトの実現の方法論を明らかにするため、基本概念、必要な構成要素、設計例を論ずる。はじめに従来の主な可変剛性機構との機能の違いを整理する。次に提案機構の基本原則と構造を紹介する。最後に設計した試作機を示し、基本特性を明らかにする。

### 2. 可変剛性の基本原理

#### 2.1 可変剛性機構の原理と分類

表1のように可変剛性機構の原理は多岐にわたるが、任意形状の保持と弾性率を調整可能な効果的な方法は実現されていない。まず相転移を活用したものとして、熱可塑性樹脂[1]や低融点合金[2]、脂肪酸[3]、形状記憶合金[4]、過冷却[5]

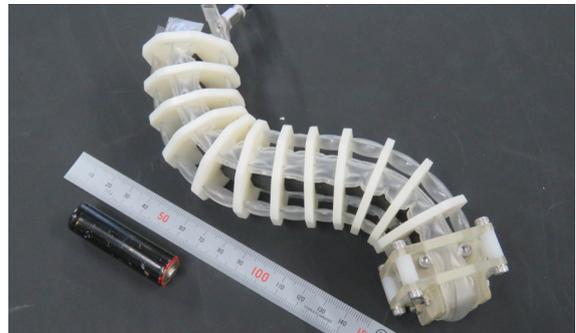


Fig. 1 Proposed shape-locking variable stiffness mechanism

がある。またガラス転移を利用したものとして、形状記憶ポリマ形状記憶ゲル[6]、形状記憶複合材料[7]がある。これらは分子や原子の熱的な状態によって流動性を変えるものであり、剛性の変化率が大きいものの、熱の移動を伴うため応答性が悪い。また、液体のような流動性のある材料は袋内に封入することが必要となる。

ジャミング転移現象方式は、袋内に充填した粉体部の真空化により流動性を失うことを利用する[8]。封入物として線状体[9]、面状体[10]がある。任意形状を保持できるが、0.1 MPaを超える圧力(真空)を与えることはできず、また硬化時は弾性が低く外力で降伏する。

リンクの固定を用いた方式も提案されている。数珠の中央を通るワイヤを引くことで生じる接触力による摩擦で形状を保持するもの[11]や、ピンや歯などの機械的なロックを利用したもの[12]がある。多くは二値的なフリー・ロック状態の切替えに適する。

機能性流体は、外部磁場で降伏応力が増加するMR流体[13]や電場で降伏応力が増加するER流体[14]がある。剛性の変化のためには、磁場環境や高電圧が必要となる。

流体圧方式は、流体の圧縮によって圧力が変化することを利用する[15]。一般に圧力に応じて弾性率を調整可能であるが、決められた形状でしか行うことができない。

断面二次モーメント方式は、断面形状を変えることで剛性を変える[16]。主に薄肉構造体の断面を屈曲・湾曲させることで、剛性を高める。直線状・面状の形に限定されやすいものの、薄くて幅広い剛性を実現可能である。

他にも機構的に剛性を変える方法として、バネを活用するもの[17]やモータを連結する方法[18]がある。

Table 1 Classification of variable stiffness mechanisms

可変剛性機構							
弾性率		降伏応力, 破壊応力		機能性	流体圧	断面二次モーメント	メカニカル
相転移	ガラス転移	ジャミング	リンクの固定				
・熱可塑性樹脂	・形状記憶	・粉体のジャミング	・摩擦的	・MR流体	・エアバッグ	・折り紙	・アクチュエータや弾性体との組み合わせ
・低融点合金	・ポリマ	・線状体のジャミング	・ロック (ピン, 歯等)	・ER流体	・シリンダ	・湾曲	
・脂肪酸	・形状記憶ゲル	・面状体のジャミング			・折り紙構造体	・可変セル構造体	
・形状記憶合金	・形状記憶複合材料				・紙構造体	・異剛性材の多層構造	

2.2 形状保持が可能な空圧式可変剛性機構の提案

エアバッグなどの形状が定められた袋状の圧力室に圧縮ガスを供給すると、袋は最大体積まで膨張し、圧力に応じて弾性率が変わる。このような膨らませた袋が弾性的な性質を持つこと、また袋が非加圧時・加圧時のそれぞれで扁平状態・膨張状態となる性質を利用し、機構的な方策によって任意形状の保持と剛性の調整が可能な線状体を構成する。

図2に提案する可変剛性機構を示す。本機構はスリット付きのプレートが柔軟構造材で多数直列に連結された多関節の線状構造体である。扁平チューブが根本から先端までのプレートのスリットを通っており、先端で滑車を介して再び先端から根本のプレートのスリットを通る。この構成により、線状体の湾曲変形時に曲げの外側で起こるチューブの長さの過不足が生じる問題が無くなり、さらに曲げの外側で張力を受けるチューブが滑車を介して内側のチューブを引くため、チューブの圧縮による座屈を防止できる。

以上の構成により、図2(a)のように扁平チューブが無加圧時には線状体の曲げ変形量に応じてチューブがスリットを滑らかに摺動するため、線状体は自由に変形できる。一方、図2(b)のように加圧時にはチューブがスリットとの接触力を高めるため、摩擦力によって摺動は発生しなくなる。これにより線状体の形状は保持される。さらに、線状体を曲げると各プレート間の距離が短くなり、膨張したチューブからの反発力を受ける。この反発力は圧力の大きさに調整可能なため、線状体全体の剛性の調節も可能となる。なお、チューブを2本通す構成にすれば、2方向の曲げ変形のみならず、ねじり変形の形状保持も可能である。

3. 原理検証実験

3.1 試作機

図3に製作した試作機を、表2に仕様を示す。試作した可変剛性機構の全長は200mm、太さは40mm、質量は85gである。3DプリントしたABS樹脂製のスリット付プレートを10mm間隔に配置し、プレート間を柔軟なニトリルゴムスポンジで接着して索状構造体とした。チューブは厚さが0.1mmで1000%の伸び率でも破断しないウレタンシートをシーラーで溶着して製作した。索状体先端部には3Dプリントしたアクリル系樹脂製のローラをベアリングで保持し、チューブの滑車とした。チューブは2方向の曲げ用に2本挿入されており、根本では継ぎ手を介して同じチューブで繋がれている。

図4に示すように、チューブは無加圧時には断面が扁平状であり、スリット壁面と両端が接触する。よって、無加圧

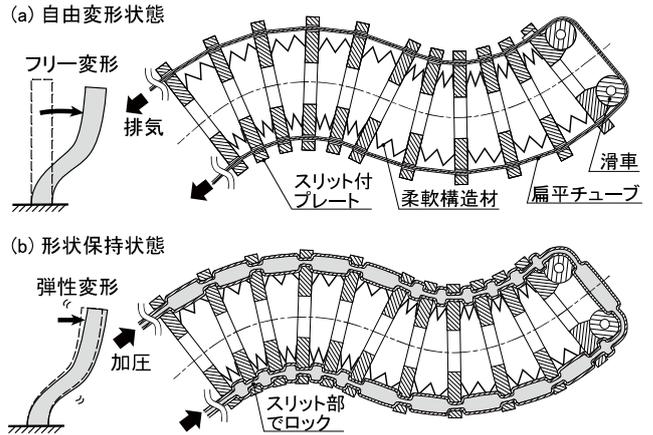


Fig. 2 Principle of the proposed shape-locking variable stiffness mechanism. The flat tube can lock its position when pressurization by friction generated between the plate and the tube.

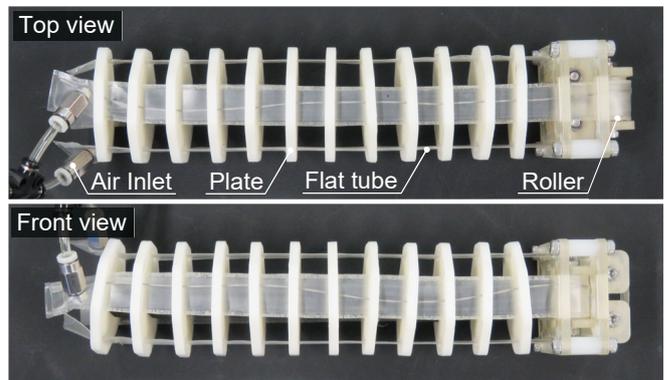


Fig. 3 Top view and front view of the fabricated prototype

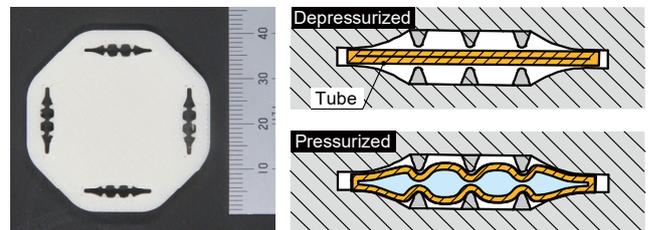


Fig. 4 Right side view of the plate. There are four slits with short needle-like structures that are equally arranged in the circumferential direction. The needle-like structure increases the friction compared to the simple flat wall.

Table 2 Specifications of the prototype

Dimensions	200 x 40 x 40 mm
Flat tube (welding area does not include)	10 mm, t0.1 mm
Plate material	Polyurethane
Maximum pressure	80 kPa
Mass	85 g

時にはチューブとスリットが滑らかに摺動する。一方、加圧すると断面が膨張し、チューブがスリットに付けられた突起に強く押し付けられる。この突起構造によって摩擦係数を高められるため、プレートが薄型で有りながら、加圧時には大きな保持力を生成できる。なお、突起の材質をチューブとの摩擦係数が高くなるものに変更することも有効である。

### 3.2 形状保持の確認

図5に試作機を用いて自由変形と形状保持を行ったときの様子を示す。①-③では、プレート間をつなぐスポンジの曲げのみが変形力として必要になるため、軽微な力で自由変形可能であった。④でチューブを加圧すると形状が保持されながら剛性が高まった。⑥で外力を加え、⑦で除荷すると、⑧のように⑤の形状に戻る弾性を示した。

さらに、図6に示すように捻り変形も保持可能なことを確認した。以上から、任意形状の形状保持と可変剛性の基本的な機能が確認された。

### 4. 結言

本研究では、任意形状の保持が可能な弾性線状体を提案し、基本構成と原理を明らかにし、実機による機能の確認を行った。

今後は加圧でチューブ突起にアンカーリングすることにより保持力が高まる原理を実験的・理論的に分析し、より高い保持性能を達成可能な条件を明らかにする。また、圧力に応じた剛性の変化量も調べる。さらに本機構は中空構造化が可能であり、1つのチューブ状の機械要素とみなすことも可能である。このため線状構造の装置の外側への取り付けや、内部に線状体を挿入する構成など、様々な装置に組み込みやすい。展開例として、検査カメラや人体の保持（アシスト）装置等への活用を図っていく。

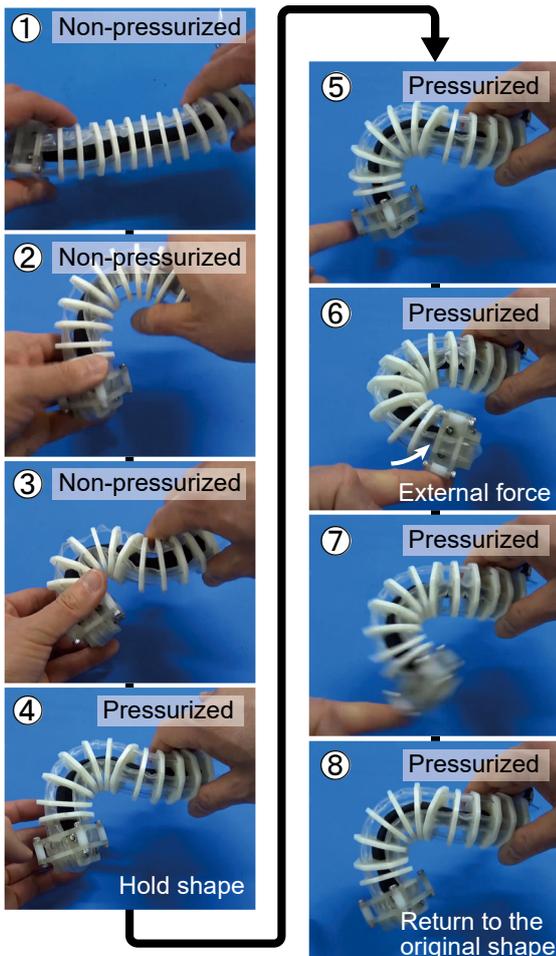


Fig. 5 Bending test. (1) Initial shape. (2)(3) Free bending deformation. (4)(5) Hold shape by tube pressurization. (6) Elastic bending. (7) Recovery motion. (8) Shape recovery.

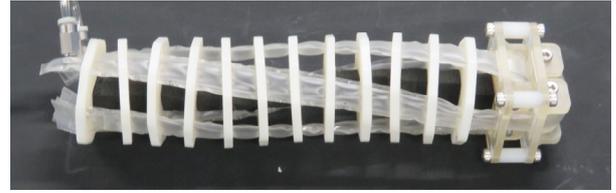


Fig. 6 Hold a twisted shape

### 謝辞

本研究はJSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」18H05471の助成を受けて行われました。

### 参考文献

- [1] M. Taghavi, T. Helps, B. Huang, and J. Rossiter, "3D-printed ready-to-use variable-stiffness structures", *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2402-2407, Jul. 2018.
- [2] 中井博之, 星野由紀子, 稲葉雅幸, 井上博充, "軟化変形ロボットの研究 —低融点合金の相変化を用いた形状適応変形ロボットの実現—", *日本ロボット学会誌*, vol. 20, no. 6, pp. 69-74, 2002.
- [3] N. G. Cheng, A. Gopinath, L. Wang, K. Iagnemma, and A. E. Hosoi, "Thermally Tunable, Self-Healing Composites for Soft Robotic Applications", *Macromol. Mater. Eng.*, Vol. 299, No. 11, pp. 1279-1284, Nov. 2014.
- [4] A. Arora, Y. Ambe, T. H. Kim, R. Ariizumi, and F. Matsuno, "Development of a maneuverable flexible manipulator for minimally invasive surgery with varied stiffness", *Artif. Life and Robot.*, Vol. 19, pp. 340-346, Nov. 2014.
- [5] 多田 隼二郎, 田中 大貴, 福田 拓人, 東森 充, 金子 真, "超柔軟形状・剛性可変移動体'MR Hot-Ice'", 第11回システムインテグレーション部門講演会(SI2010)(2010年12月23日~25日・仙台), pp. 1473-1476.
- [6] C. Liu, H. Qinb, and P. T. Mather, "Review of progress in shape-memory polymers", *J. Mater. Chem.*, Vol. 17, pp. 1543-1558, Mar. 2007.
- [7] Q. Meng and J. Hu, "A review of shape memory polymer composites and blends", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 40, No. 11, pp. 1661-1672, 2009.
- [8] M. Fujita, K. Tadakuma, H. Komatsu, E. Takane, A. Nomura, T. Ichimura, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Jamming layered membrane gripper mechanism for grasping differently shaped-objects without excessive pushing force for search and rescue missions", *Adv. Robot.*, Vol. 32, No. 11, pp. 590-604, May 2018.
- [9] M. Brancadoro, M. Manti, S. Tognarelli, and M. Cianchetti, "Fiber Jamming Transition as a Stiffening Mechanism for Soft Robotics", *Soft Robot.*, Vol. 7, No. 6, pp. 663-674, Dec. 2020.
- [10] Y. Kim, S. Cheng, S. Kim, and K. Iagnemma, "A Novel Layer Jamming Mechanism With Tunable Stiffness Capability for Minimally Invasive Surgery", *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1031-1042, Aug. 2013.
- [11] K. Tadakuma, T. Fujimoto, M. Watanabe, T. Shimizu, E. Takane, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Fire-Resistant Deformable Soft Gripper Based on Wire Jamming Mechanism", *2020 3rd IEEE Int. Conf. Soft Robot.*, pp. 740-747, May 2020.
- [12] M. Mizutani, Y. Shimodate, and K. Ito, "Application of Hearing Sense Assistance System to Three-dimensional Rescue Manipulator and Demonstration of Its Effectiveness", *2013 IEEE Int. Sym. Safety, Security, and Rescue Robot.*, pp. 1-6, 2013.
- [13] 津上祐典, 桑野僚大, 西田健, "磁力を用いる構造が簡単な柔軟ロボットグリッパ", *日本ロボット学会誌*, Vol. 36, No. 8, pp. 520-524, 2018.
- [14] A. Sadeghi, L. Beccai, and B. Mazzolai, "Innovative soft robots based on electro-rheological fluids", *2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, pp. 4237-4242, Oct. 2012.
- [15] T. Miller-Jackson, Y. Sun, R. Natividad, and C. H. Yeow, "Tubular Jamming: A Variable Stiffening Method Toward High-Force Applications with Soft Robotic Components", *Soft robot.*, Vol. 6, No. 4, pp. 468-482, Aug. 2019.
- [16] 高橋 優太, 高根 英里, 渡辺 将広, 多田 隼二郎, 昆陽 雅司, 田所 諭, "断面2次モーメント式柔剛切替機構", 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2E3-04, pp. 1841-1846, Dec. 2020.
- [17] A. Jafari, N. Tsagarakis, D. G. Caldwell, "AwAS-II: A New Actuator with Adjustable Stiffness based on the Novel Principle of Adaptable Pivot point and Variable Lever ratio", *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4638-4643, May 2011.
- [18] K. Kouno, H. Yamada, and S. Hirose, "Development of Active-Joint Active-Wheel High Traversability Snake-Like Robot ACM-R4.2", *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 25, No. 3, pp. 559-566, Jun. 2013.