

流体素子内包型柔剛切替メカニズム — 封入人工筋の収縮力と復元力による駆動効果 —

Variable stiffness mechanism including fluid components
- Effect on the actuation by the contractive and restoring forces of
inner pneumatic artificial muscle -

○ 恩田一生, 劔持優人, 高橋景虎,

吉本悠人, 佐竹陽一, 渡辺将広,

多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭 (東北大学)

○Issei ONDA⁽¹⁾, Yuto KEMMOTSU⁽¹⁾, Kagetora TAKAHASHI⁽¹⁾,

Yuto YOSHIMOTO⁽¹⁾, Youichi SATAKE⁽¹⁾, Masahiro WATANABE⁽¹⁾,

Kenjiro TADAKUMA⁽¹⁾, Masashi KONYO⁽¹⁾, Satoshi TADOKORO⁽¹⁾, Tohoku University

キーワード

機構 (Mechanism), 流体素子, 柔剛切替

連絡先 〒980 - 8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学大学院情報科学研究科 応用情報科学専攻 恩田一生

Tel : 022-795-7025 Fax : 022-795-7023 E-mail : onda.issei@rm.is.tohoku.ac.jp

1. 研究背景

1. 1 柔剛切替機構

柔剛切替機構は, 柔軟な状態と高剛性な状態を切り替えることが可能なメカニズムである. 柔軟な構造は外力を与えられたときに変形しやすく, 高剛性な構造は接触時に外部に力を伝えることが可能である. この柔剛切替機構は, 柔軟時に押し付けることで対象物の形状になじみ, 高剛性な状態に切り替えることで, 把持が可能なグリップとして利用できる.

柔剛切替機構としては様々な報告がされている. 表 1 にそれぞれの柔剛切替機構の特徴を示す. まず, 粉体に負圧を与えることでジャミング転移現象を起こす方法がある[1]-[2]. これは粉体を用いているため, 大変形し, 物体の形状に良くなじむ. また数珠を通るワイヤに張力を加える方式[3]-[4]があり, 数珠は硬い材料で構成できるため高強度・高耐久化が可能である. 温度によって柔剛切替を行う低融点合金方式[5]は, 極大な剛性変化を実現できる. 磁力によって制御する MR 流体方式[6]は, 騒音が少なく装置の小型化を実現できる.

これらの柔剛切替メカニズムには様々な問題が存在している. 負圧方式は 0.1MPa の圧力が限界であるため, 高剛性化が困難である. また, ワイヤ方式を用いて長尺化を行う場合, 数珠とワイヤの接触する面が増えることから摩擦による力の損失が大きくなり, 高剛



Fig. 1: 人工筋を封入した軸方向収縮型加圧式柔剛切替機構の実機外観. (本研究で新考案・具現化した実機. 特許出願準備中.)

性が困難である. 低融点合金を利用した方式では, 温度によって柔剛の切替を行うために, 冷却するときにかかる. そして MR 流体方式は磁場や電荷といった, 柔剛切替動作に対する周囲環境からの影響を受けやすいという問題がある.

1. 2 加圧式ジャミング機構

加圧により高剛性化するジャミング転移機構を本機構は加圧を利用することで柔剛切替えを実現できるため、従来とは異なる性質を付与することが可能となる。例えば流体圧の特性を活用した分岐構造への柔剛切り替え構造、長尺な柔剛切替装置の実現や、圧力による剛性の調整、高硬度材料使用による高剛性化、高圧入力による柔剛切替応答性の改善、防爆性・非磁性が必要な環境での使用が想定される。本機構は中空のボールジョイント型セグメントをつなげたリンク構造となっており、線状体内部にゴムチューブを通して、チューブに内圧を加えた際に押付力が発生することでスリットが入った内殻がたわみ、外殻に接触することで径方向と軸方向に保持トルク（関節が固定されるのに必要なトルク）が発生し、線状体は高剛性化する。従来の負圧方式のように駆動圧が制限されることはない。

1. 3 従来の加圧式ジャミングの問題点

前述した従来の加圧式ジャミング機構は内圧をかけた際にチューブが径方向のみならず、軸方向にも伸展してしまうため、ボールジョイント型セグメントが分離してしまうといった問題があった。また、このセグメントは内殻がたわむことにより摩擦力を増加させることにつながり、セグメント間の組付けも可能になるのに対して、一方では軸方向に抜けにくくする必要もあるという相反する性能が必要であった。さらに、セグメントのくびれた形状のため、接触対象物に対しての接触が滑らかでなく、グリッパ機構に使用する場合には接触点が離散的になる、加えてスライド動作の際に抵抗が大きくなるという問題があった。

本稿で説明する軸方向収縮型加圧式柔剛切替えメカニズムは上記問題を鑑み取り組みとなる。



Fig. 2: ジャミング膜機構.

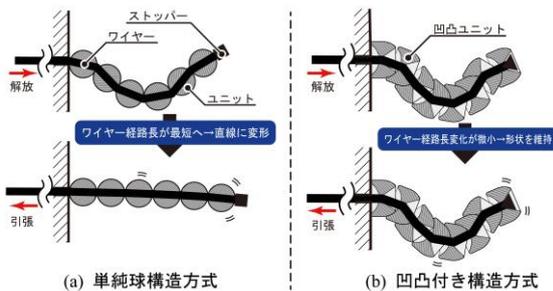


Fig. 3: 一次元ジャミング機構.

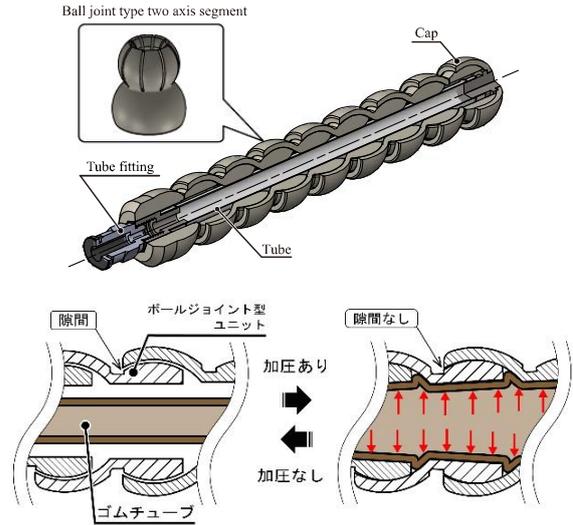
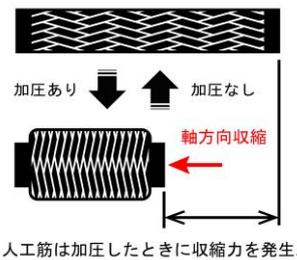


Fig. 4: 加圧式柔剛切替機構 (ボールジョイント型) の原理図.

2. 考案構造の基本原則

考案した軸方向収縮型加圧式柔剛切替えメカニズムにおいては、これまでのワイヤー方式のお椀構造のセグメントを用いるが、内包するものはワイヤーではなく加圧することで軸方向に縮む流体素子とする。この構成により、前述の軸方向の膨張によるセグメントの外れ問題およびセグメントのくびれ形状による接触対象との大抵抗問題を解決する。具体的な流体ソソ氏として、ゴム人工筋肉の中でも一般的なマッキベン型人工筋を封入する。考案した軸方向収縮型加圧式柔剛切替えメカニズムは以下のような利点があると考えている。セグメント形状にくびれがなくお椀構造にしたことによる簡易形状化、および可動範囲の拡大、たわみ部を除外したことによる高強度化が挙げられる。



人工筋は加圧したときに収縮力を発生.

Fig. 5: ゴム人工筋の構造.

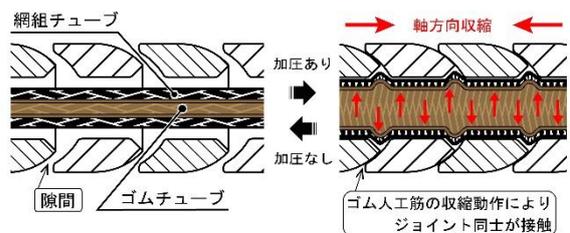


Fig. 6: 考案した軸方向収縮型加圧式柔剛切替え機構の原理図。半径方向への膨張と同時に軸方向への収縮動作が発生し、セグメント同士の摩擦でも保持力発生。セグメントの抜け防止にもつながる。

また、ゴム人工筋肉の外側構造に配置されているメッシュチューブにより、ゴムチューブ自体のねじれ問題を復元力により防ぐことができる。さらに、加圧時の収縮動作により、ジョイントの抜け防止が可能となる。加えて、加圧したときの保持力の損失を半径方向にセグメントを変形させていた従来版より少なくできると期待できる。加圧をやめたあとに、軸方向に復元力があるため、ジョイント同士が離れることでの噛み込み防止にもつながると考えられる。

また、この人工筋肉構造は加圧したときにメッシュチューブの膨張、収縮、復元力（真っ直ぐに戻ろうとする力）の三段階の動作が順番に起こる可能性があり、応答性の調整によって、ステアリング機能を付与することが期待できる。任意形状で固めることを優先したいときは流路を絞らず、ステアリングを優先するときは、流路を絞るという流量に応じた動作変化を起こすことが可能になれば、1種の劣駆動機構としての位置づけられる機構となる。

3. 実機具現化

考案した原理に基づいて試作した実機の外観を図1に、また、実機の使用を表1にそれぞれ示す。

従来の試作機との比較を行いやすくするために、セグメントの外形サイズを従来機と合わせた設計としている。内径サイズも合わせた設計が望ましいが、マッキベン型人工筋肉の構成には、その外側にメッシュチューブを用いる必要があり、市販のメッシュチューブのサイズに合わせざるをえないのが現状であるため、内径サイズを合わせた比較は今後の課題とする。

素材も従来の試作機と合わせてアクリル系紫外線硬化樹脂（三次元造形機により出力）した。またゴムチューブ自体の素材は硬度55のシリコンゴムを使用している。

従来のボールジョイント型との可能曲げ半径の比較をおよび、ジョイント間距離の比較を図7・図8にそれぞれ示す。各図からも見てとれるように、ボールジョイント型ではジョイント間距離

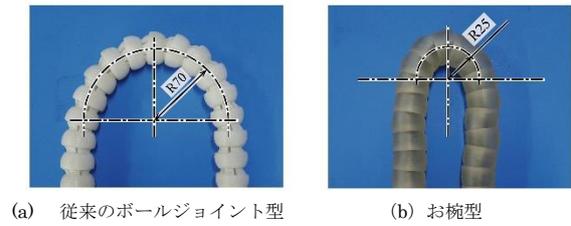


Fig. 7: 可動範囲の比較図.

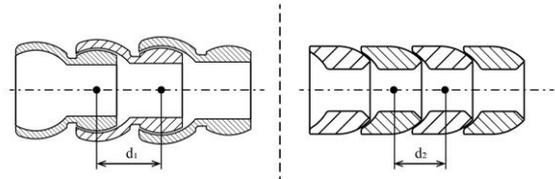


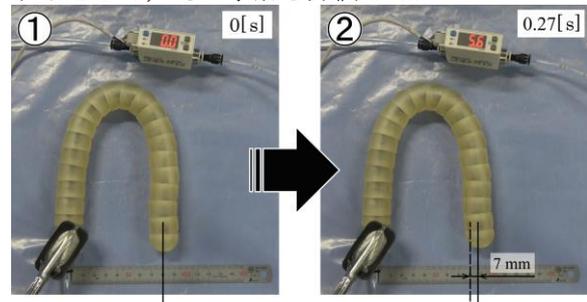
Fig. 8: ジョイント間距離の比較図.

離が 19mm であったため、取りうる曲率半径も 80mm までであったところ、同じセグメント直径値で設計した今回の考案構造では、ジョイント間距離が 14mm であるため、曲率半径も 25mm まで取ることが可能な構成となっている。そのため、従来よりも接触対象物の凹凸になじむ機能を向上させている。

4. 実機試験

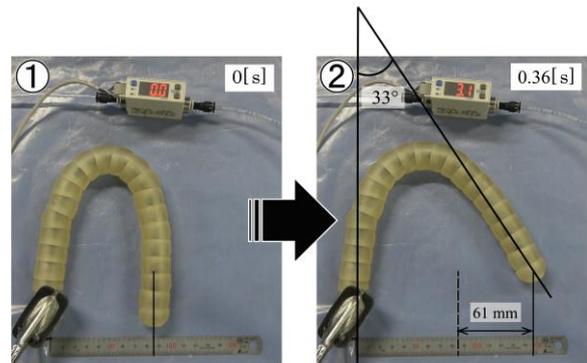
4. 1 人工筋の復元力による駆動効果

人工筋を内部に封入したことによって加圧時に、湾曲状態から直線形状に戻ろうとする復元力が生じる。この復元動作による影響を調べるために、流量を変えて高剛性化するまでの時間を調節することで、その挙動を評価した。



(a) 流量 5.6 L/min

Fig. 9: 流量 5.6 L/min のときの復元力の影響.



(b) 流量 3.1 L/min

Fig. 10: 流量 3.1 L/min のときの復元力の影響.

Table. 1: 実機仕様.

全長	330 [mm]
重量	130.6 [g]
セグメント外径	25.0 [mm]
セグメント内径	12.0 [mm]
人工筋外径	10.0 [mm]
人工筋内径	9.0 [mm]
ゴムチューブ外径	7.0 [mm]
ゴムチューブ内径	6.5 [mm]

測定方法は平面上に敷いたテフロンシートの上に実機を置き、流量を変えて加圧することで、実機先端の初期位置からの変化量を測定した。内圧を0.1MPa、流量は5.6L/minと3.1L/minとした。

それぞれの測定結果を図9,10に示す。流量が5.6L/minのときは、実機先端の位置変化は7mm程度であった。それに対して、3.1L/minのときは先端位置の変化が大きく、水平状態から33°も姿勢が変わり、その移動距離は61mmとなった。

この結果より、加圧したときの復元動作を制御する手法の一つとして、流量を変化させることが有効であることが明らかとなった。この手法の他には、ジョイント内径と人工筋直径の値によって復元動作を調節することも考えられる。人工筋の直径に対してジョイント内径を限りなく大きくすると、人工筋はより膨張し大きな収縮力を得られるが、湾曲したときに人工筋が最短経路長になり、加圧したときの復元動作が大きくなると考えられる。対して、人工筋直径とジョイント内径を等しくしたとき、人工筋は最短経路長にならないが、膨張せず収縮力を得られない。

復元力の特性を明らかにすることで、例えば構造の剛性を高めるだけでなく、能動的に湾曲させて任意姿勢を保つことに活用できると考えられる。今後は、加圧時の収縮と復元動作による駆動効果の原理を明らかにする必要がある。

4. 2 保持トルク測定試験

考案機構の保持性能を評価するために関節を任意の角度で保持するトルクを測定し、ボールジョイント型の保持トルクとの比較を行った。実験装置の斜視外観と三面図をそれぞれ図11, 12に示す。本試験では加圧した状態で、先端にローラを取り付けた接触体でジョイントを押し込み、各圧力に対する押し込みに必要な力を5回ずつ

Table. 1: 実験条件

数珠型	内圧	0.025, 0.05, 0.075, 0.1 [MPa]	
	回転中心距離	0.014 [m]	
	押し込み速度	3.5 [mm/min]	
ボールジョイント型	内圧	0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2 [MPa]	
	回転中心距離	0.1 [m]	
	押し込み速度	10 [m/s]	
	ジョイント外径	25 [m/s]	
	ゴムチューブ	外径	7.0 [mm]
	内径	6.5 [mm]	

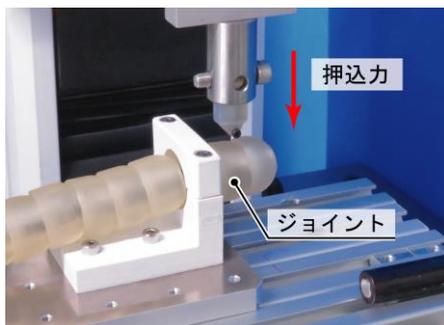
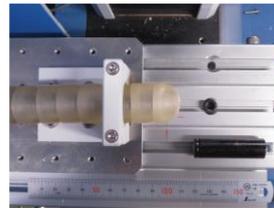
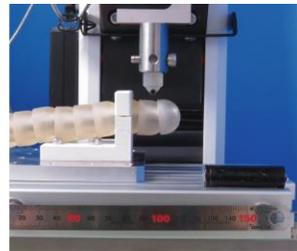


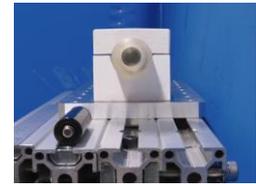
Fig. 11: 実験装置の斜視外観.



(a) 平面図



(b) 正面図



(c) 側面図

Fig. 12: 実験装置の三面図.

計測する。求めた値に回転中心からの距離を乗ずることで保持トルクを算出した。それぞれの実験条件は表2に示す。考案機構の実機は現在、人工筋端部の耐圧性が低いことから、加える内圧は数珠型とボールジョイント型で異なっている。また、ボールジョイント型に使用しているゴムチューブの外径7mm、内径6.5mmとなっている。

これらの条件のもと測定した保持トルクの結果を図13に示す。グラフ上のプロットは各内圧に対する保持トルクを示しており、最小二乗法を用いて近似直線をとった。またエラーバーは標準偏差を示している。

結果より0.1MPaで数珠型の保持トルクは0.62Nm、ボールジョイント型は0.40Nmが得られることが分かった。これは内部に封入しているゴムチューブの径が異なることが一つの原因となっている。しかし、チューブの長さや内圧が一定で直径を変化させた場合、膨張力は直径と比例関係にあることから、同じゴムチューブ径を使った場合でもそのトルクの値に大きな差はないと考えられる。また、ボールジョイント型はたわみ

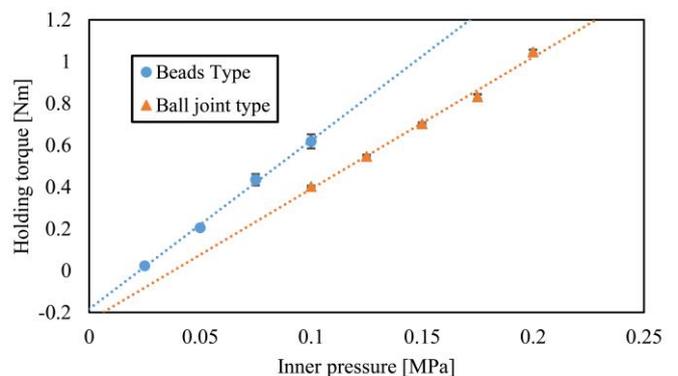


Fig. 13: 測定試験の結果.

部があるがゆえに耐圧性を上げることが困難であることから、数珠型においては耐圧性の向上によって、より大きなトルクが得られると言える。ただし、前述したように人工筋の耐圧性が課題となるため、人工筋の材質や端部の接着加工について検討していく必要がある。今後は、保持トルクが最も効果的に得られるジョイントや人工筋の、最適な設計手法を保持トルクのモデル化によって確立する。

5. 流体素子封入の観点からの機構展開

今回の機構において内部に封入した流体素子はマッキベン型人工筋肉であったが、ワルシャワ型やプリーツ型、トーラス型構造など、多種多様な流体素子を封入した機構についても今後検討を進めていく。また、作動流体も今回は空気をを用いたが、非圧縮性の水・油に加えて、磁性流体などの機能性流体、低沸点流体、揮発性流体なども候補となる。また、線状体においては、長尺化・中空化・分岐構造化を目指して研究を進める。

また、素材についても各種方面からの検討を行う。例えば、我々の研究チームでは可食性の機構に2016年から取り組んでおり、上下動する可食浮沈子により含めた外部圧駆動方法も含めた柔剛切り替えを行う機構も考えられる。また、可食を生分解性として視ることもできるが、応答性がより高い氷などの熱分解性や、山形大学で取りまれている髪の毛などの素材を溶かす溶剤でロボット本体を構築することを、化学剤分解性と位置づけることで、Bio-Degradableだけでなく、Heat-Degradable, Chemically-Degradableとし、ありとあらゆる分解性ロボット、メカトロニクスを包括した概念のX-Degradable Robotics, もしくはX-Degradable Mechatronicsという概念を構築できるものと考えられる。これらは、meltable, combustibleの機能も含まれる。能動自己修復機能を有するロボット血管機構の研究開発を続けているが、これらの分解から再合成のプロセスを循環的に機能させることで healable, organic mechatronics, sustainable robotic mechanismや、環境をも含有させた Robotic Soilとして発展させることも期待できる。これら多様分解性ロボティクスにおいては、我々のチームが提案している位相機構学や Intra-Effector と合わせて、可変位相・態変化ロボティクスの概念も包括されている。

また、柔剛切り替えや分解性機構に連結時に圧力側からエネルギーを受け取り接続時の力を抑えることが可能なカプラやバルブなどの連結方式ジャミングやベルト巻付式柔剛切り替えヘラ構造、無限循環流体素子内包機構につながる要素、可変粘稠性につながる自己粘着性材料を用いたグリップやアクチュエータの構成にもつなげていく。

6. まとめと今後の予定

本稿では、流体圧のうち、加圧時に収縮力と復元力が発生する人工筋を封入することで柔剛切り替えを行う機構を考案した。また、考案した原理に基づき、実際に実機を具現化した。さらに試作した実機を用いた実機実験を通して、流量を変えたときの復元力による駆動効果と、保持トルクの測定を行うことで考案機構の性能を評価し、考案した機構の基本的な効果・有効性を確認した。

今後は保持トルクのモデル化を行い、収縮力と復元力を最も効果的に活用するセグメント形状、内包する人工筋の最適化設計につなげていく。また、内部に流体素子を封入する機構についても原理抽出・具現化の双方から取り組んでいく。

謝辞

本研究の一部は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2034】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Yong-Jae Kim and Shanbao Cheng “A Novel Layer Jamming Mechanism With Tunable Stiffness Capability for Minimally Invasive Surgery”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 29, NO. 4, pp. 1031-1042, AUGUST 2013.
- [2] 藤田政宏, 藤本敏彰, 清水杜織, 高根英里, 小松洋音, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭. “房状ジャミング膜グリップ機構”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2P1-J06, June 2018.
- [3] Amir Degani and Howie Choset, “Highly Articulated Robotic Probe for Minimally Invasive Surgery”, IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, pp. 4167-4172, May 2006.
- [4] 藤本敏彰, 清水杜織, 藤田政宏, 高根英里, 林聡輔, 渡辺将広, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭. “1次元柔剛切り替えメカニズムを活用したトーラスグリップ機構 — 線状ジャミング転移機構を基軸とした構造例”, 第36回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2018A C3K1-01, 2018.
- [5] 津上祐典, 福崎琢也, 西田健. “改質 MR 流体を用いるユニバーサルグリップの構成要素の検討”, 第35回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2016.
- [6] 瀬戸徳文, CANETE LUIS, 高橋隆行 “原子炉内部調査用ロボットの開発 - 低融点合金を用いたサンプリングアームユニットの強度評価 -”, 第19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, 2018.
- [7] 恩田一生, 小澤悠, 渡辺将広, 高根英里, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “加圧により高剛性化するジャミング転移機構”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 1P2-H10, 金沢, 2020/05.