

タコの把持戦略を模倣したソフトマニピュレータ： 駆動機構の違いによる環境適応能力の比較研究

著者	向井 太一
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-6
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022865

タコの把持戦略を模倣したソフトマニピュレータ -駆動機構の違いによる環境適応能力の比較研究-

OCTOPUS INSPIRED FLEXIBLE MANIPULATOR
- COMPARATIVE STUDY OF THE MANIPULATOR'S ABILITY TO ADAPT TO ENVIRONMENTS USING
DIFFERENT MECHANISMS -

向井太一

Taichi MUKAI

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

In this study, we focus on a flexible manipulator made of silicone. In recent years, flexible manipulators are usually driven by air pressure. When air is added, the pressure in the arm increases and each part expands, and a pushing force is generated to bend the arm. In this research, we focus on the muscles of living creatures such as humans, which convert pushing force into a pulling force within their muscles and tendons. Therefore, we think that there is an advantage in using pulling forces compared to pushing forces. In this research, we made two manipulators, one with a pushing mechanism and another with a pulling mechanism, both made of silicone. Three comparative experiments were conducted. In this research, through experiments, we verify the essential differences between manipulators that use pulling force and pushing force.

Key Words : Flexible manipulator, grasping, many degrees of freedom, octopus

1. はじめに

近年、ロボットの活躍の場は、工場などの既知環境において動作を行うものから、未知環境において複雑な動作を行うものへ移行が求められている。既知環境において動作する産業用ロボットなどは、単純な環境において一律な動作を繰り返し行うため、制御が容易である。一方で、災害現場や原子力発電所の廃炉などの人間が立ち入ることが困難な未知環境においては、環境に適応するため、ロボット本体の構造の複雑化などの問題が生じ、制御が複雑になる。多くの関節を有する多自由度の機構は、行動パターンが増加するにつれ、ロボットを制御するために必要な情報量が膨大になり、未知環境に瞬時に適応することが困難になる。

そこで近年、シリコンなどの柔軟な素材を使用し作製されるソフトマニピュレータが注目されている。柔軟な素材を用い作製されたソフトマニピュレータは、環境の物理学的特性を利用することで、物体の形状を測定することなく物体を把持することが可能である。

従来研究において、さまざまなソフトマニピュレータが提案されている。それらのソフトマニピュレータは、アームに空気圧を加えることにより駆動されるものが主

であった[11-17]。空気圧を加えることで、アームに備え付けられた節のシリコンを風船のように膨張させ外側に押し出す力を生み出し、隣り合う節同士が押し合うことでアームが屈曲する。

一方で、実世界に生息する生物へ目を向けると、それらの生物は柔軟な筋肉で駆動されており、必ず引く力を利用し自身の身体を動作させている。さらに人間の筋肉は膨張する力を引く力に変換し体を動かしている。この構造は、身体を駆動する力を生み出すことにおいて非効率的だと思われる。これより、我々は引く力に何らかの利点が存在すると考え、その解明に向け検討を行う。

従来研究において我々はタコの把持戦略を模倣した軟体動物型3次元マニピュレータを開発している。本研究では、軟体動物型マニピュレータを発展させ、引く力を用い駆動するソフトマニピュレータおよび、押す力を用い駆動するソフトマニピュレータの2種類を作製する。押す力を用い駆動するソフトマニピュレータには、従来用いられている空気圧で駆動する構造を採用する。それら2つのマニピュレータを用い比較実験を行い、それぞれのソフトマニピュレータの利点について検討を行う。

2. タコの把持戦略およびそれを模倣したマニピュレータ

(1) タコの把持戦略

タコの脳は人間と比較し極めて小さい。それにもかかわらず、自身の柔軟な脚を生かすことで未知物体の把持など知的な振る舞いを行うことが可能である[1-4]。図1にタコの把持戦略を示す。タコは物体を把持する際、自身の脚を根元部分から先端に向け徐々に屈曲させていき、物体の表面に接触させる。さらに、物体と接触した箇所を軸とし、徐々に脚を物体に巻き付けていき、物体を把持する。この把持戦略を用いることにより、大きさや形状が未知である物体の把持を実現していると考えられる[5-6]。

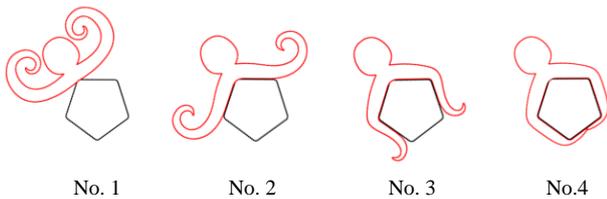


図1 タコの把持戦略

(2) 軟体動物型3次元マニピュレータ

従来研究において、タコの振る舞いを模倣したさまざまなソフトロボットが提案されている[7-9]。しかしながら、それらの研究においてアームの根元から屈曲することの重要性については言及されていない。

我々の従来研究において、タコの把持戦略を模倣した軟体動物型3次元マニピュレータを開発している[10]。図2に我々の従来機体を示す。本研究では、この3次元マニピュレータを発展させ、2種類のソフトマニピュレータを作製し比較実験を行う。

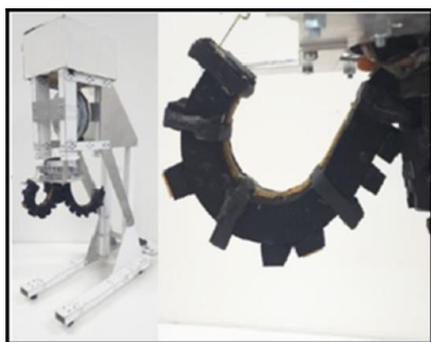


図2 軟体動物型3次元マニピュレータ

3. ソフトマニピュレータ

提案するソフトマニピュレータにおいて、比較実験を行うため、シリコンを用い、引く力により駆動するソフトマニピュレータおよび、従来の手法である空気圧を加え押し出す力を生み出すことで駆動するソフトマニピュレータの2種類を同サイズで作製した。

(1) 軟体動物型ソフトマニピュレータ（腱駆動型）

図3に提案する引く力で駆動するソフトマニピュレータを示し、図4と図5にソフトアームを示す。図4に示すように、それぞれのアームは硬度30Aのシリコンを用い作製され、5つの節を有する。物体と接触する側の側面にはケブラー糸(破断強度36kgf)が張られており、この糸を引くことで把持動作を行う。ソフトアームの初期形状は螺旋形の一部になるように設計している。図6にソフトアームの把持動作を示す。このソフトアーム自体の初期形状とシリコンの柔軟性により、単に糸を引くという単純な動作で、根元から順に屈曲するというタコの把持戦略を再現することが可能である。



図3 軟体動物型ソフトマニピュレータ（腱駆動型）

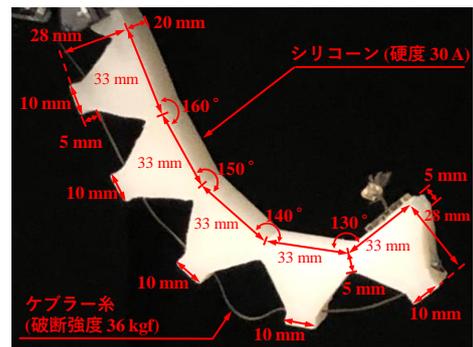


図4 軟体動物型ソフトアーム（腱駆動型）

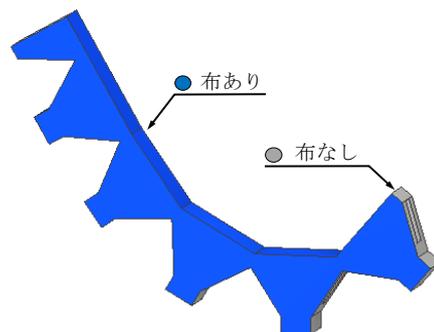


図5 布の位置（腱駆動型）

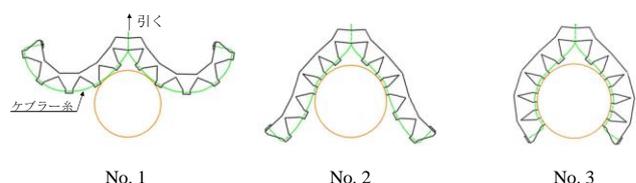


図6 把持動作（腱駆動型）

(2) 軟体動物型ソフトマニピュレータ (空気圧駆動型)

図7に従来の空気圧を用いて駆動するソフトマニピュレータを示し、図8と図9にそのソフトアームを示す。このソフトアームは従来の空気圧を用い押し出す力を生み出すことにより駆動する構造である。図8に示すように、それぞれのソフトアームは引く力で駆動するソフトアーム同様、硬度 30A のシリコンを用い作製され、5つの節を有する。ソフトアームの長さや節間の角度は、引く力で駆動するソフトアーム(図4)とほぼ等しくなるよう作製している。図10に空気圧を加えた場合のソフトアーム内部の状況を示す。図11にソフトアームの把持動作を示す。図11に示すように、このソフトマニピュレータは空気圧により駆動され、それぞれのソフトアームの節間以外の表面は全てシリコンの伸長を防ぐために布が埋め込まれている(図9)。したがって、空気圧を加えることにより、節間のシリコンが風船のように膨張し、それぞれの節同士が押し合うことでソフトアームが屈曲する(図10—11)。また、布は完全にシリコンで覆われているため、ソフトアーム表面の摩擦係数は布が埋め込まれている部分と埋め込まれていない部分で大きな差はない。



図7 軟体動物型ソフトマニピュレータ (空気圧駆動型)

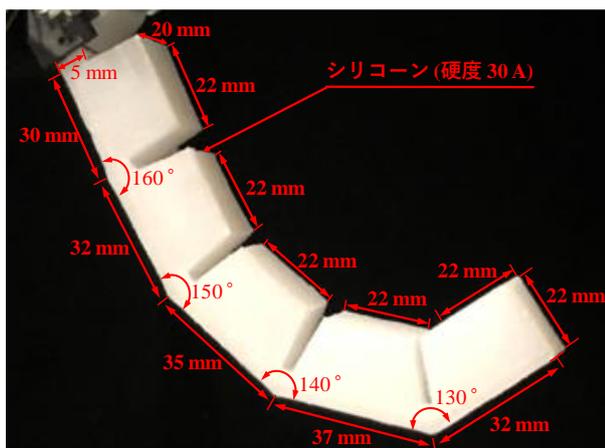


図8 軟体動物型ソフトアーム (空気圧駆動型)

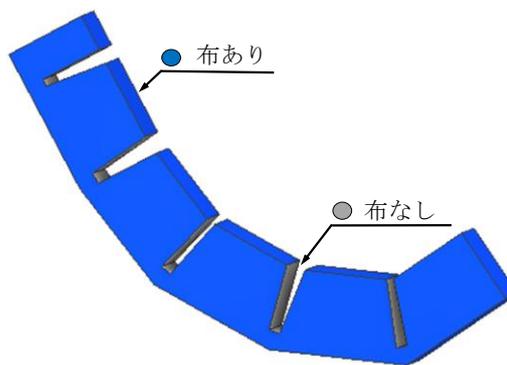


図9 布の配置 (空気圧駆動型)

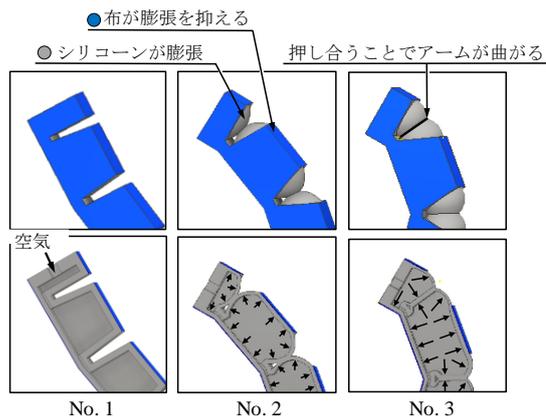


図10 ソフトアームの内部状況

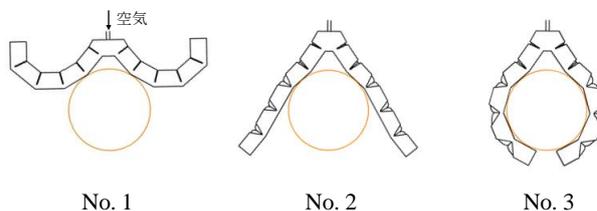


図11 把持動作 (空気圧駆動型)

4. 実験

作製した2種類のマニピュレータにおいて、最も異なる点は物体を把持した際の柔軟性である。引く力で駆動するソフトマニピュレータで把持動作を行った場合、力はモータが糸を引く方向にのみ発生する。そのため、それ以外のソフトアームの柔軟性は維持される。一方で、押す力で駆動するソフトマニピュレータの場合、空気を加えると、空気圧の力はソフトアーム内部から全方向に働く。高い空気圧を加えれば加えるほど、ソフトアーム全体は硬くなり柔軟性は失われる。

本比較実験において、我々は柔軟性の変化に着目し、それぞれのソフトマニピュレータの柔軟性の違いについて確認する。

(1) 柔軟性の測定

図12に実験環境を示す。それぞれのソフトアームに0.5 kgfの力を加えた場合の初期状態からの変位を測定した。図13にソフトアームの横方向へ力を加えたとき

の様子を示し、図 1 4 にソフトアームの縦方向へ力を加えたときの様子を示す。

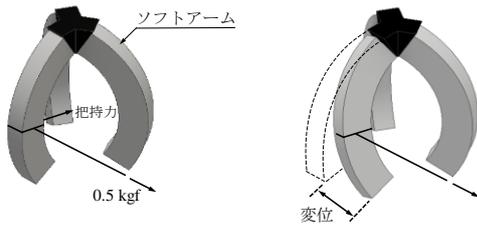


図 1 2 柔軟性の測定



図 1 3 横方向への柔軟性の比較

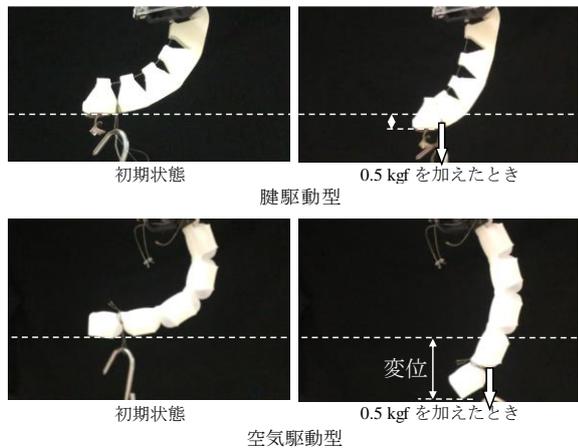


図 1 2 縦方向への柔軟性の比較

次に、ソフトアームの把持力を徐々に増加させ、さまざまな把持力において、この測定を行った。ばね測りを用いソフトアームが把持する方向へ加わる力を測定し、これをアームの把持力とみなし実験を行った。図 1 5 にソフトアームの横方向に力を加えた場合の測定結果、図 1 6 にソフトアームの縦方向に力を加えた場合の測定結果を示す。それぞれのグラフの横軸がソフトアームの把持力、縦軸がソフトアームの変位である。また、空気は圧縮性流体であるため、空気自体の伸縮も考慮し、非圧縮性流体である水でも同様に測定を行った。

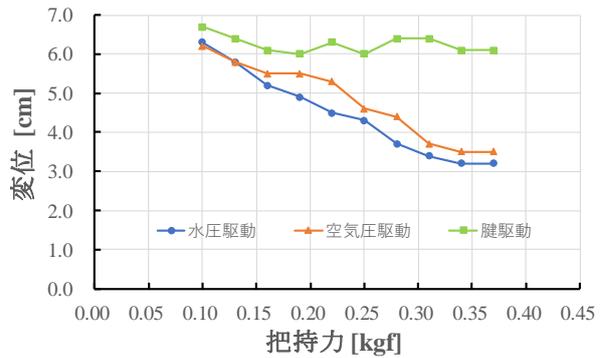


図 1 5 横方向への柔軟性

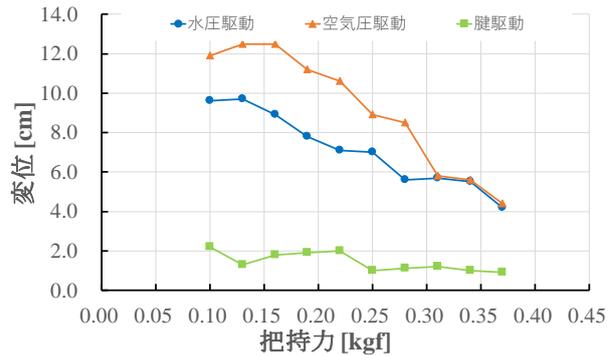


図 1 6 縦方向への柔軟性

(2) 把持実験

さまざまな物体を用い把持実験を行った。図 1 7 に実験で使用した物体を示す。図 1 8 に引く力で駆動するソフトマニピュレータの把持の様子を、図 1 9 に空気圧を用いた押す力で駆動するソフトマニピュレータの把持の様子を示す。把持実験の結果、どちらのソフトマニピュレータもさまざまな形状の物体を把持することが確認できたが、空気圧で駆動するソフトマニピュレータは物体 4 を把持することができなかった。

次に、物体 4 に形状が近いさまざまな物体を用い、それぞれのソフトマニピュレータが把持可能な物体の大きさの確認をした。図 2 0 に使用した物体を示す。表 1 に把持実験の結果を示す。実験結果より、作製した引く力で駆動するソフトマニピュレータは、押す力で駆動するソフトマニピュレータと比較し、より小さい物体を把持可能であることを確認した。

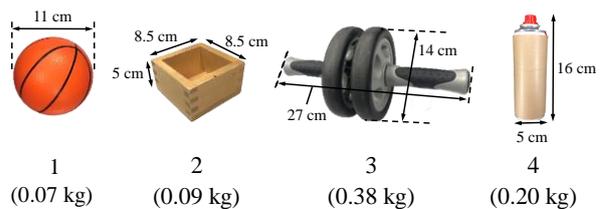


図 1 7 実験で使用した物体

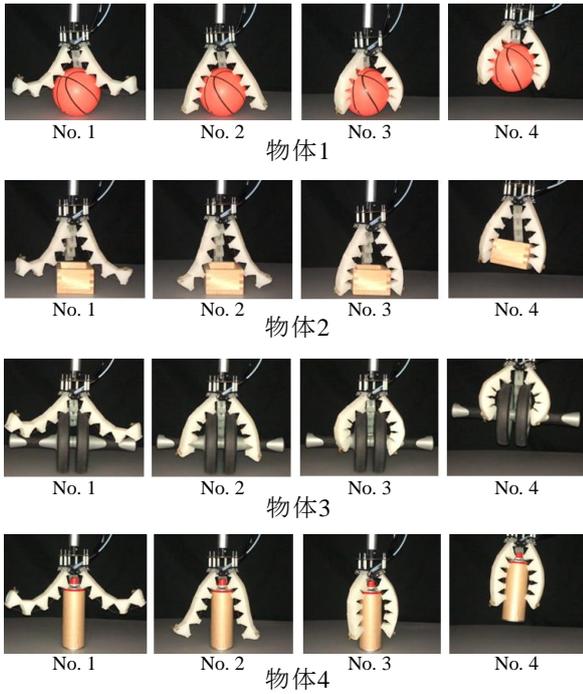


図 18 把持実験 (腱駆動型)

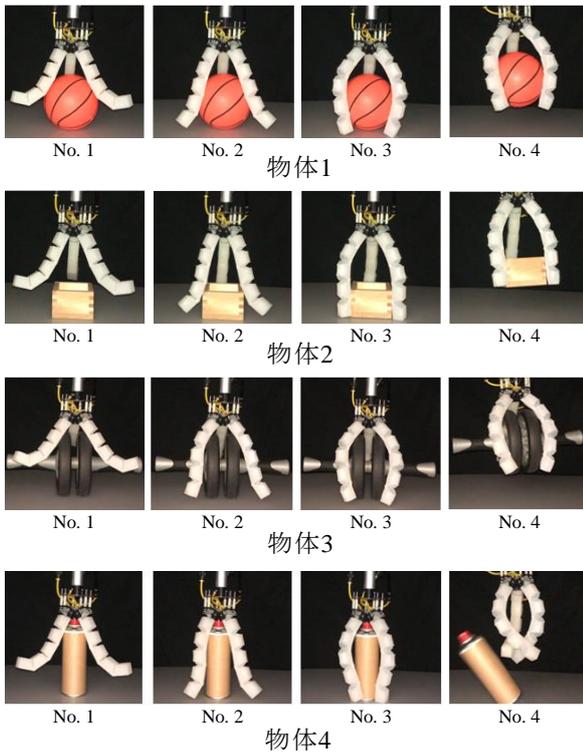


図 19 把持実験 (空気圧駆動型)

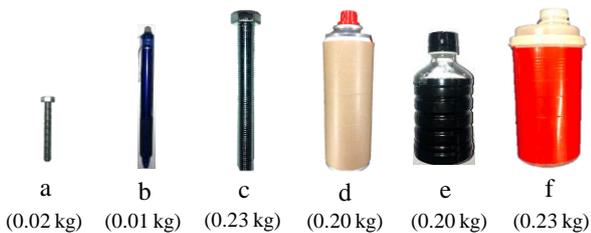


図 20 実験で使った物体

表 1 実験結果

	物体の大きさ			結果	
	長さ [mm]	直径 [mm]	幅 [kg]	空気圧駆動型	腱駆動型
a	70	7	0.02	把持不可能	把持不可能
b	140	10	0.01	把持不可能	把持可能
c	160	15	0.23	把持不可能	把持可能
d	160	50	0.20	把持不可能	把持可能
e	130	60	0.20	把持可能	把持可能
f	160	70	0.23	把持可能	把持可能

(3) 外力に対する適応性の検証

外力に対する適応性を検証するため、我々は振動実験を行った。この振動実験は、マニピュレータが物体を把持し移動するときに生じる振動を想定し行っている。図 21 に実験環境を示す。それぞれのソフトマニピュレータに物体 (0.3 kg) を把持させ実験を行った。表 2 に実験結果を示す。

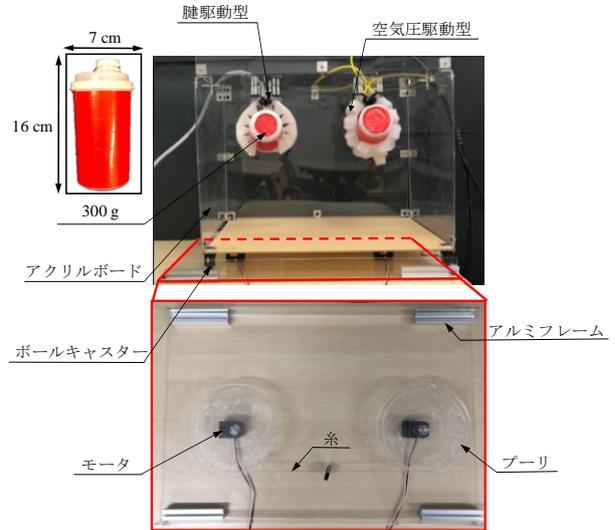


図 21 振動実験

表 2 振動に対する適応性

周波数 [Hz]	振幅 [cm]	空気圧駆動型	腱駆動型
0.30	11.0	把持可能	把持可能
0.45	11.0	把持可能	把持可能
0.60	11.0	把持可能	把持可能
0.75	11.0	把持可能	把持可能
0.90	11.0	把持可能	把持可能
1.05	11.0	把持不可能	把持可能
1.20	11.0	把持不可能	把持可能
1.35	11.0	把持不可能	把持可能
1.50	11.0	把持不可能	把持可能

5. 考察

本研究において、同サイズの軟体動物型ソフトマニピュレータを作製し、比較実験を行った。従来、一般的に提案されてきた空気圧で駆動する機構は、重い物体を把持するために、高い空気圧が必要であった。そのため、高い空気圧を加えるにつれソフトアームは硬くなり、未知環境へ適応的に動作するための柔軟性を失ってしまう。一方で、我々が提案した引く力で駆動するソフトマニピ

ューレータは糸を引く方向にのみ力が発生するため、重い物体を把持しているにも関わらず、ソフトアームの柔軟性を維持することが可能であった。したがって、我々が提案した引く力で駆動するソフトマニピュレータは、柔軟性を維持しながら物体を把持し続けることが可能であり、外力を受ける環境下においても柔軟性より、把持するというタスクをより確実に実行可能であることを確認した。

6. 結論

本研究では、引く力で駆動する軟体動物型ソフトマニピュレータを作製した。また、従来ソフトマニピュレータに多く用いられていた空気圧で駆動するソフトマニピュレータを同サイズで作製した。これら2つのソフトマニピュレータを用い、それぞれのソフトアームの柔軟性の測定や、物体の把持実験、振動実験を行った。

新たに我々が提案した引く力で駆動するソフトマニピュレータは、機体の柔軟性を維持しながら動作可能であり、外力に対する適応性をもつなどの利点を確認した。

謝辞：最後に本論文に際して多大なるご指導、ご協力をいただいた法政大学理工学部伊藤一之教授に心から感謝いたします。また、今後の皆様のご健闘を願うとともに、法政大学における各研究において、本論文がほんの僅かながらでも参考になればと願うものであります。

参考文献

- 1) Gray J. : The mechanism of locomotion in snakes. *J Exp Biol* Vol 23, pp. 101 – 123, 1946
- 2) Sumbre G, Gutfreund Y, Fiorito G, Flash T, and Hochner B. : Control of octopus arm extension by a peripheral motor program. *Science* Vol 293, No. 5536, pp. 1845 – 1848, 2001
- 3) Yekutieli Y, Sumbre G, Flash T, and B Hochner. : How to move with no rigid skeleton? *Biologist*, Vol 49, No. 6, pp. 137–139, 2002
- 4) Gutfreund Y, Flash T, Fiorito G, and Hochner B. : Patterns of arm muscle activation involved in octopus reaching movements. *J Neurosci*, Vol. 18, No. 15, pp. 5976–5987, 1998
- 5) Sumbre G, Gutfreund Y, Fiorito G, Flash T, and Hochner B. : Control of octopus arm extension by a peripheral motor program. *Science* 293(5536):1845 – 1848, 2001
- 6) Gutfreund Y, Flash T, Fiorito G, and Hochner B. : Patterns of arm muscle activation involved in octopus reaching movements. *J Neurosci* 18(15):5976 – 5987, 1998
- 7) Calist M, Giorelli M, Levy G, Mazzolai B, Laschi C, and Dario P. : An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots. *Bioinspir Biomim*, Vol. 6, 036002, 2011
- 8) Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, Margheri L, Follador M, and Dario P. : Soft robot arm inspired by the octopus. *Adv Robot* 26(7): 709 – 727, 2012
- 9) Nakanishi M, and Nakano T. : Simulation Analysis of an Octopus-Inspired Propulsion Mechanism, *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*, Vol. 4, No. 1, pp. 49-55, 2015
- 10) Ito K, and Hagimori S. : Flexible manipulator inspired by octopus: development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects. *Artif Life Robot* 22(3):283–288, 2017
- 11) Polygerinos, P., Lyne, S., Zheng Wang, Nicolini, L.F., Mosadegh, B., Whitesides, G.M., and Walsh, C.J. : "Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation", 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) , pp.1512 – 1517 , 3 - 7 Nov. 2013, 2013
- 12) Panagiotis Polygerinos, Zheng Wang, Johannes T. B. Overvelde, Kevin C. Galloway, Robert J. Wood, Katia Bertoldi, and Conor J. Walsh. : "Modeling of Soft Fiber-Reinforced Bending Actuators" , *IEEE Transactions on Robotics* , Vol. 31, pp. 778 – 789, 2011
- 13) Mohamed E. M. Salem, Qiang Wang, Ruoshi Wen, and Ma Xiang. : "Design and Characterization of Soft Pneumatic Actuator for Universal Robot Gripper" , *International Conference on Control and Robots (ICCR)* , 18235601, 2018
- 14) Hongying Zhang, Michael Yu Wang, Feifei Chen, Yiqiang Wang, A. Senthil Kumar, and Jerry Y. H. Fuh. : "Design and development of a soft gripper with topology optimization" , *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* , 17428189, 2017
- 15) Yingtian Li, Yonghua Chen, and Yunquan Li. : "Distributed Design of Passive Particle Jamming Based Soft Grippers" , *IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 17898465, 2018
- 16) Ryan L. Truby, Michael Wehner, Abigail K. Grosskopf, Daniel M. Vogt, Sebastien G. M. Uzel, Robert J. Wood, and Jennifer A. Lewis. : "Soft Somatosensitive Actuators via Embedded 3D Printing" , *ADVANCED MATERIALS* , Vol. 30 , pp. 1706383, 2018
- 17) HAO Yufei , GONG Zheyuan , XIE Zhixin , GUAN Shaoya , YANG Xingbang , REN Ziyu , WANG Tianmiao , and WEN Li. : "Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length" , 35th Chinese Control Conference (CCC) , 16265789, 2016