

軟体動物型3次元マニピュレータの開発：未知物体の把持

萩森, 駿介 / HAGIMORI, Shunsuke

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013052>

軟体動物型 3 次元マニピュレータの開発 -未知物体の把持-

DEVELOPMENT OF FLEXIBLE MANIPULATOR INSPIRED BY OCTOPUS - GRASPING UNKNOWN OBJECTS -

萩森駿介

Shunsuke HAGIMORI

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 the intelligent behavior of an octopus and describe the development of a flexible manipulator. The manipulator is controlled by the dynamics of the body such as the flexibility of the sponges, resilience of the rubbers and constraint by the wires. By using the developed manipulator, we show that grasping behaviors and twisting behaviors similar to those of an octopus can be realized by the dynamics of the body without computation in its brain.

Key Words : *manipulator, octopus, many degrees of freedom, grasping.*

1. はじめに

近年、ロボットの活躍の場は、工場などの比較的単純な既知環境から、災害現場や宇宙空間、家庭などの未知環境への移行が望まれている。工場などで用いるロボットは、状態の変化が少ない環境で一律の動作を行うため制御が容易である。しかし、ロボットが未知環境で適応的に行動するためには複雑な動作が求められる。それに伴い、ロボットの機構は複雑となり、機構の多自由度化が進んだ。多くの関節を有する多自由度ロボットでは、各自由度の可動範囲、行動パターンを組み合わせると、情報が指数的に増加する。よって、ロボットに複雑な動作が求められると、機構や行動の複雑化が進み、制御が困難となり、使用するためには熟練性が必要となる。そのため、複雑な動きの抽象化を容易な制御で可能となるロボットが求められる。

そこで我々は、実世界に生息する生物に注目した。従来、生物の知的な行動は脳によって実現されと考えられてきた。しかし、生物は人間と比較し、極めて脳が小さいにもかかわらず、知的な振る舞いを行うことが報告されている[1-4]。そこで、海底に生息するタコに注目した。タコは、海底の歩行、物体の把持、ボトルのフタの開栓など、様々な知的な行動が可能である[2-4]。これらを実現する要因は、タコが複雑な行動のすべてを脳で考えて行っているのではなく、脚の構造を上手く環境に適応させ、身体の性質と環境の性質を相互作用させることで行動の抽象化を行うことにあると考えられる。このことから、生物の知的な行動を実現するためには脳では

なく身体が重要な役割をはたしていると考えられる。

従来研究において、身体の性質と環境の性質を相互作用させることで行動を抽象化する枠組みが提案されている[5-10]。

本論文では、生物の身体的特徴をロボットに取り入れ、身体と環境との相互作用により実現される知能の解明と、その工学的実現に取り組む。それを実証する一つの例として、具体的には、タコの脚を模した3本のスポンジアームを有するマニピュレータを制作する。そして、アームの柔軟性と環境の力学的性質より、形状が未知である物体の把持や、ボトルのフタの開栓を複雑な制御系を必要とせず、容易に実現可能であることを実験により示す。

2. タコの振る舞い

人間をはじめとする生物は、それぞれが生息する複雑な環境において適応的に振る舞い生活することが可能である[1-4]。しかし、脳が小さな生物が人間と同じように状況に合わせて考えながら行動することは困難である。脳が小さな生物は、人間のように細かい動作のすべてを脳で情報処理した後に実行しているのではなく、少ない情報を元に、自身の身体的性質を環境の性質に適応させ行動していると考えられる。本研究ではタコに注目した。

タコは、状態が一律でない複雑な海底という未知環境において、歩行、物体の把持などの知的な振る舞いを行い、また、ボトルのフタの開栓という複雑な行動も可能

であると報告されている[2-4]．人間と比べ極めて小さい脳しか有していないタコがこのような知的な振る舞いを可能としている要因として、タコの柔軟な脚の構造が重要な役割を果たしていると考えられる．タコの脚は任意の箇所を任意の方向へ受動的に曲げることが可能である．そしてタコは、この身体的性質を、環境の性質と相互作用させることで、必要最低限の情報のみで知的な振る舞いを可能としている．

タコが物体を把持する際の脚の動作を **Fig.1** に示す．

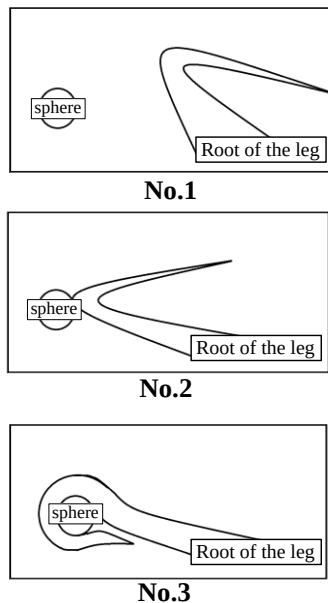


Fig.1 タコが物体を把持する際の脚の動作

タコは物体を掴む際、物体に対して自身の脚を根元部分から屈曲させ、物体と接触した箇所を軸とし、徐々に脚を巻き付け、物体を包み込むような把持戦略を用いる．タコはこの把持戦略を用いることで、物体との詳細な距離や物体の形状、脚の曲げる箇所や曲げる角度などの情報を脳で処理することなく、形状が未知である物体の把持という知的な振る舞いを行う．

3. 多自由度ロボットの問題点

多くの関節を有する多自由度ロボットは、各関節の状態と各関節の行動を組み合わせると情報が指数的に増加する．例えば、**Fig.2** に示すように関節が 10 か所で、各関節をモーターで制御し、モーターの動作範囲を 5 区間に分割した多自由度ロボットで考える．その場合、このロボットの状態の数は $10^5 = 100,000$ 通りとなり、行動の数も同様に増加する．よって、多自由度ロボットの制御は自由度の増加に伴い、難易度が上がると考えられている．

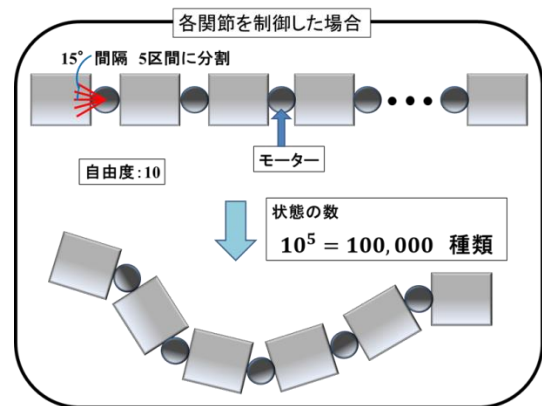


Fig.2 多自由度ロボットの状態の数

従来研究において、身体の性質と環境の性質を相互作用させることで行動の抽象化に成功した．ヘビ型ロボットでは受動関節を用いることで複雑な制御を必要とせず、瓦礫上を走行可能であることを示した[5-8]．また、従来研究の軟体動物型マニピュレータでは、複雑な制御を必要とせず、多くの物体を把持することが可能であることを示した[9-10]．しかし、従来研究の軟体動物型マニピュレータは各リンクが剛体となっており、3 次元的に物体を把持することや、異なるタスクを同一機体で行うことも困難であった．そこで、タコの脚を模した 3 本のスポンジアームを有する軟体動物型 3 次元マニピュレータを制作する．そして、アームの柔軟性と環境の力学的性質より、形状が未知である物体の把持や、ボトルのフタの開栓を複雑な制御系を必要とせず複数のタスクを実行可能となる機体が容易に実現可能であることを示す．

4. 軟体動物型マニピュレータ

複雑な行動の抽象化が可能となるマニピュレータを製作した．マニピュレータはスポンジとゴムを組み合わせた 3 本のアームを有する．製作した機体を **Fig.3** に示す．

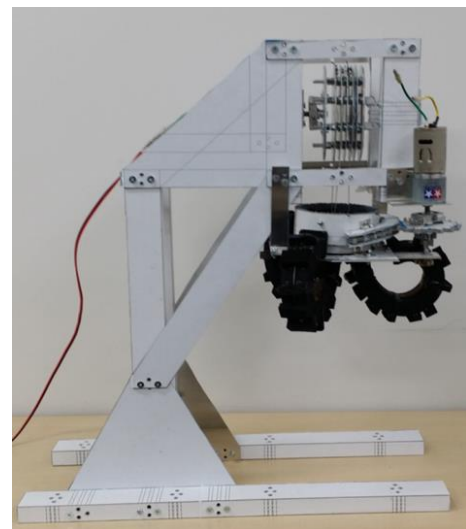
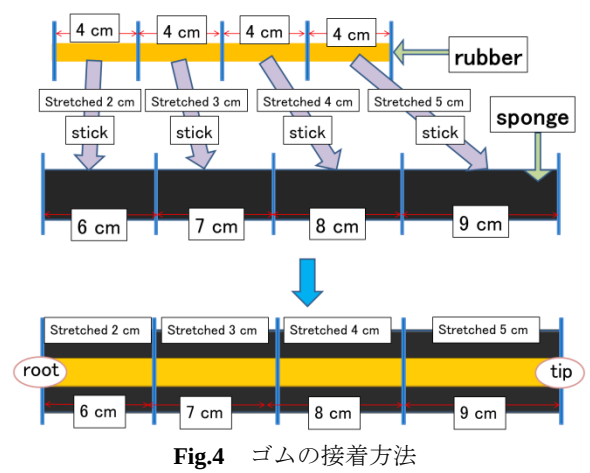


Fig.3 制作したマニピュレータ

タコの把持戦略である、物体に対して自身の脚を根元

部分から接近させる行動を実現させるため、アームの側面にはそれぞれ、ゴムとワイヤーを取り付けた。アームの製作方法を Fig.4 に示す。



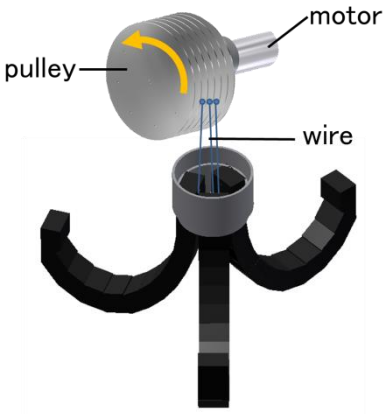
ゴムはアームの根元部分から先端部分に向け、徐々に伸ばす長さを増やしながらスポンジに接着する。具体的には、16 [cm]のゴムを4 [cm]間隔で分割する。ゴムの分割した部分をそれぞれ、2 [cm], 3 [cm], 4 [cm], 5 [cm]と伸ばして、アームの根元部分から順にスポンジに接着させる。そのため、アームはゴムの張力の差によりらせん形状となる。制作したアームを Fig.6 に、アームの仕様を Table 1 に示す



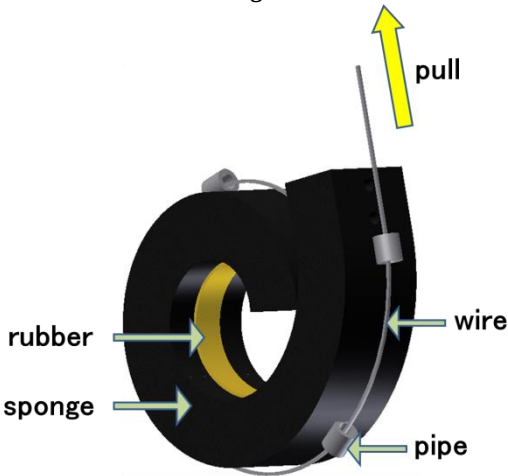
Table 1 アームの仕様

Length[mm]	300
Width[mm]	30
Height[mm]	20
Weight[g]	25

3 本のアームは Fig.7 のように 120° 間隔で配置し、ワイヤーの長さは、Fig.7 のように、機体上部に取り付けられたプーリーの回転で調整する。



アームの初期状態を Fig.9 に示す。



ゴムの張力を f_r とする。 f_r は係数を $-k$, ゴムの自然長からの伸び x として

$$f_r = -kx \quad (1)$$

と表せられる。

(1)式より、ゴムの張力はアームの根元から先端に向けて大きくなる。そのため、アームはワイヤーの長さを変化させると根元部分から屈曲を始める。アームはスポンジの柔軟な性質から、理論上、無限の自由度を持つ。これにより、自由度の制御を必要とせず、マニピュレータの形状は物体との相互作用により受動的に決定する。また、同じ動作でボトルのフタの開栓を行うためには3

本のマニピュレータの力のつり合いが崩れなければならない。アームの行動と力のつり合いの関係を Fig.10 に示す

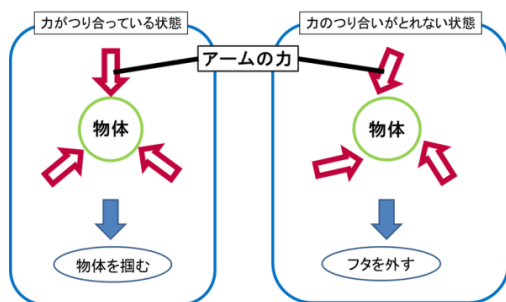


Fig.10 アームの行動と力のつり合いの関係

Fig.11 のような行動を実現するため、大きさの異なる2種類の円柱パイプを機体の胴体とし、アームの根元部分を取り付ける。アームはFig.に示すように2か所を胴体に固定する。2か所の内、根元に近い箇所をパイプ大に、もう一方をパイプ小に固定する。胴体部分のパイプ大のギヤとモーターを取り付けたギヤを Fig.12 のように噛み合わせる。



Fig.11 アームの根元部分 パイプ大 (左) , パイプ小 (右)



Fig.12 パイプとモーターのギヤの噛み合わせ

ギヤを回転させるとアームの Fig.13 のように傾く。

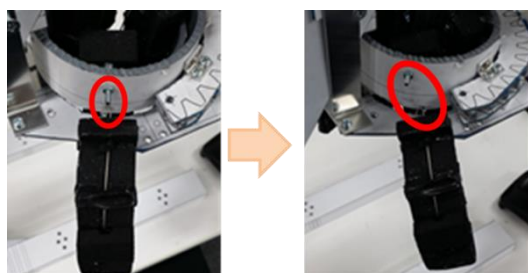


Fig.13 マニピュレータの傾き

この状態で、ワイヤーを巻き取りアームが閉じる動作を行うと、3本のアームの力が物体の中心に向かず、アームが回転し、フタが外れる。

5. 実験

(1) 比較実験

スポンジにゴムを接着していないアームを用い、物体の把持を行った。用いたアームを Fig.14 に、結果を Fig.15 に示す。



Fig.14 スポンジにゴムを接着していないアーム

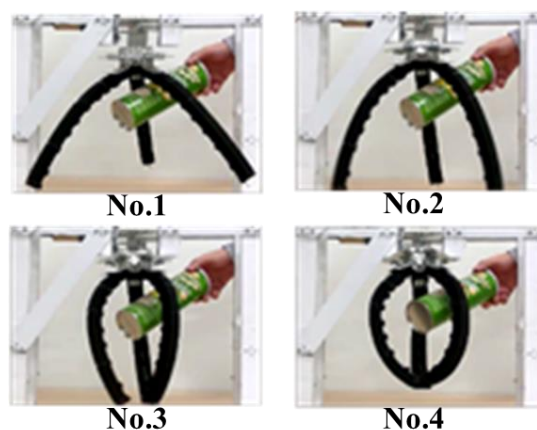


Fig.15 ゴムなしアームでの物体把持

Fig.15 に示すように、物体を把持することはできなかった。アームはワイヤーを引くと、先端のワイヤーを止めている部分に最大の力がかかる。そのため、アームは先端から屈曲を開始し、物体に接触することができず、それぞれの先端が衝突する。よって、このアームは物体を把持することはできない。

そこでワイヤーとゴムをスポンジの対面に取り付けた Fig.6 のアームで実験を行う。

(2) 物体の把持

作製したマニピュレータが同じ動作で形状の異なる物体を把持可能であることを実験により示す。実験に用いる物体を Fig.16 に、それらの物体の仕様を Table 2 に示す。

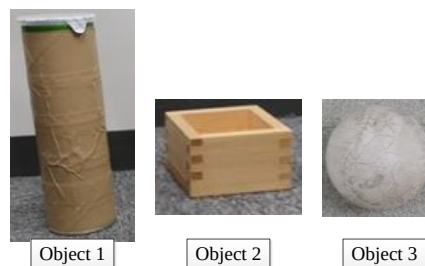


Fig.16 実験に用いた物体

Table 2 物体の仕様

	Object1	Object2	Object3
Height [mm]	240	51	80
Width [mm]	70	85	80
Length [mm]	70	85	80
Weight [g]	50	90	140

物体を把持する様子を **Fig.17-19** に示す.

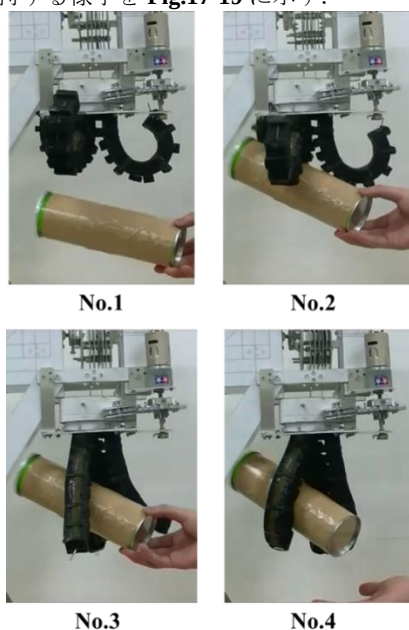


Fig.17 Object1 を把持する様子

右側のアームは動作方向に物体があるため、物体からの反力を受け奥にそれた。そのため、3本のアーム全てで巻き付くことができ、マニピュレータは Object1 を把持可能であった。

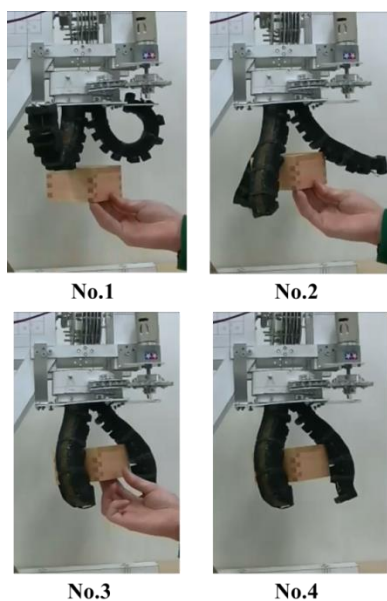


Fig.18 Object2 を把持する様子

3本のアームは同時に屈曲を開始するが、物体の位置によって、接触するタイミングは異なる。アームの形状は物体により受動的に決定されるためそれぞれ異なるが、マニピュレータは Object2 も同様に、把持することが可能であった。

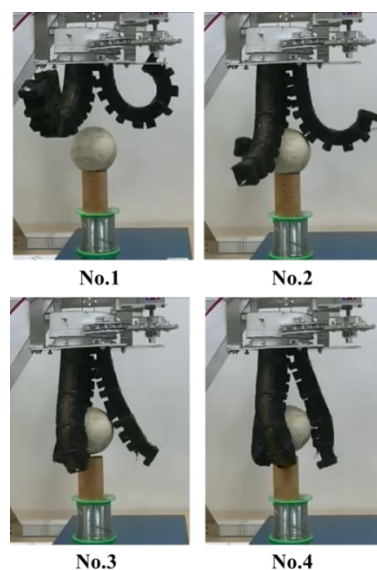


Fig.19 Object3 を把持する様子

また、製作したマニピュレータは台の上にある Object3 も把持可能であることを示した。

(3) ボトルのフタの開栓

製作したマニピュレータが物体の把持動作と同じ動作で、ボトルのフタの開栓が可能であることを実験により示す。実験に用いる物体を **Fig. 20** に、その物体の使用を **Table 3** に示す。

マニピュレータが動作を開始する前にアームの根元に設置したギヤを回転させ、アームにひねりを加えた状態で Object 4 に対しても同じ動作を行った。



Fig.20 実験に用いた物体

Table 3 Object4 の仕様

	Object4
Height [mm]	141
Width [mm]	68
Length [mm]	61
Diameter of the lid [mm]	65
Weight [g]	282
Weight of the lid[g]	14

物体4のフタを開栓する様子を Fig.21 に示す。

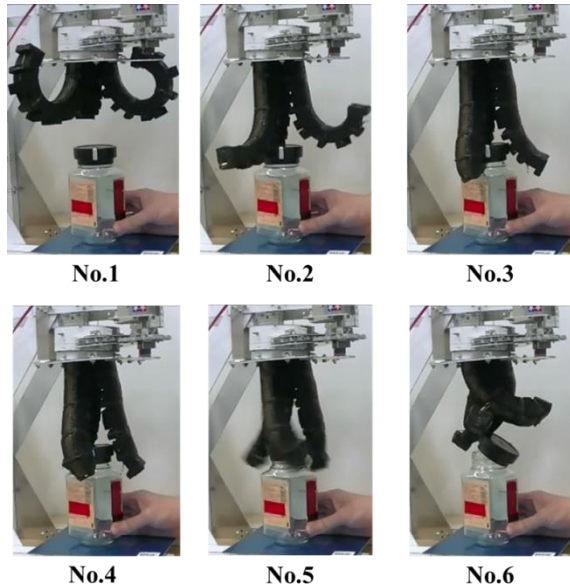


Fig.21 物体4のフタを開栓する様子

3本のアームの力がすべて物体に加わると、力の釣りが崩れ、マニピュレータは Object 4 のフタの開栓を行った。

6. 考察

製作した軟体動物型柔軟マニピュレータを用い、同一動作で異なる形状の物体を把持することができた。物体の形状や位置により、3本のアームが物体に同時に接触することはなく、また、同じ軌道をたどらない。しかし、アームの柔軟性を物体の形状に適應させることで、それぞれのアームが受動的に最適な軌道を描き、物体を把持する。マニピュレータが Object 1 を把持した際、手前右側のアームの軌道には物体があり、そのままの軌道では物体に巻き付けなかった。そのため、アームは奥へ逸れ、手前から巻きつく1本のアームと、奥から巻きつく2本のアームで物体を挟み込む形となった。3本のアームは同一円周上に取り付けられており、すべてのアームは閉じる動作を行うと、円の中心に向け力が加わる構造となっている。そのためマニピュレータは、それぞれのアームの動き方が異なる状態であっても、物体の把持が可能となる。マニピュレータは Object 2, Object 3 も同様に、把持可能であった。よって、形状が未知である複数の物体を同じ動作で把持可能であることを示した。

またマニピュレータは、動作を変えることなくアームの根元をひねるのみで、Object 4 のフタの開栓が可能であった。アームは根元部分をひねり、閉じる動作を行うと、把持動作同様、物体に巻き付く様子が観測された。しかし、アームにひねりを加えているため、物体に3本すべてのアームの力が加わると、アームは回転し、Object 4 のフタを開栓した。これまではアームの動作軌

道は、地面に対して垂直であったが、ギヤを回転しひねりを加えた分、角度をつけた動作軌道となった。そのため、3本のアームから物体に加わる力の向きは、円の中心へと向かわない。固定されていないフタにアームの力が加わると、すべてのアームはその力を流す方向へさらに軌道を変えながら動く。よって、3本のアームの力のつり合いは崩れで、マニピュレータの操作や動作を変えることなく、ボトルのフタの開栓が可能であることを実験により示した。

7. 結論

本論文では、複雑な行動の抽象化と、生物の知的な振る舞いから、身体と環境との相互作用により実現される知能について考えた。そこで、生物の身体的特徴をロボットに取り入れ、その工学的実現に取り組んだ。そして、環境の性質を利用可能な機構性質を備えるタコの脚の動きを模した軟体動物型柔軟マニピュレータを製作した。

仮説の有用性を示すため、製作したマニピュレータを用い、形状が未知である物体の把持と、ボトルのフタの開栓を行った。その際マニピュレータは、多くの自由度を制御することなく同一動作で異なるタスクを行うことが可能であった。一般的に多自由度ロボットの制御には多くの計算が必要であると報告されている[11]。しかし、製作したマニピュレータは脚の柔軟性と環境の力学的性質より、複雑な行動を、複雑な制御系を必要とせず、容易に実現可能であることを実験により示した。

したがってこの結果は、生物の身体的特徴をロボットに取り入れることで、ロボットの行動の抽象化は可能であり、生物の知的な振る舞いの実現には、脳ではなく身体が重要な役割をはたしているということを示す一つの例として有用性があると考えられる。

今後の課題は、より多くの例で実験を行い、この仮説の有用性を高めることである。

謝辞：最後に、本研究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准教授、伊藤研究室の方々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、本論文がほんのわず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) J. Gray, The Mechanism of Locomotion in Snakes Exp. Biol. 23:101-123, 1946
- 2) G. Sumbre, Y. Gutfreund, G. Fiorito, T. Flash, and B. Hochner, Control of Octopus Arm Extension by a Peripheral Motor Program. Science 293(5536): 1845-1848, 2001
- 3) Y. Yekutieli, G. Sumbre, T. Flash, and B. Hochner (2002),

How to Move with No Rigid Skeleton?. *Biologist* 49 (6) :137-139,

- 4) Y. Gutfreund, T. Flash, G. Fiorito, and B. Hochner , Patterns of Arm Muscle Activation Involved in Octopus Reaching Movements. *J. Neurosci*18(15): 5976-5987, 1998
- 5) K. Ito, Y. Fukumori , Autonomous control of a snake-like robot utilizing passive mechanism. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*: 381-386, 2006
- 6) K. Ito, A. Takayama, T. Kobayashi , Hardware Design of Autonomous Snake-Like Robot for Reinforcement Learning Based on Environment -Discussion of Versatility on Different Tasks. *IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*: 2622 – 262, 2009
- 7) K. Ito and R. Murai , Snake-Like Robot for Rescue Operations—Proposal of a Simple Adaptive Mechanism Designed for Ease of Use. *Advanced Robotics*22(6-7): 771-785, 2008
- 8) M. Mizutani, H. Maruyama, K. Ito , Development of autonomous snake-like robot for use in rubble. *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, College Station, Texas, 2012
- 9) S. Kuroe and K. Ito , Autonomous Control of Octopus-Like Manipulator Using Reinforcement Learning In Sigeru Omatu, Juan F. DePaz Santana, Sara Rodríguez-González, José M. Molina, Ana M. Bernardos, Juan M. Corchado Rodríguez, editors. *Distributed Computing and Artificial Intelligence Advances in Intelligent and Soft Computing*151: 553-556, 1995
- 10) 伊藤一之, 黒江聡, 萩森駿介 : 身体の性質と環境の性質を相互作用させることで行動の抽象化-タコ型マニピュレータの提案と実験による検証-, *知能と情報*, Vol.27, No.5, pp.701-710, 2015
- 11) Y. Zhang and R. P. Paul , Robot Manipulator Control and Computational Cost. *Scholarly Commons*: http://repository.upenn.edu/cis_reports/621, 1988