

タコの動きを模倣した梯子昇降ソフトロボット

著者	清水 宏晃
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/10.15002/00022841

タコの動きを模倣した梯子昇降ソフトロボット

LADDER CLIMBING SOFT ROBOT INSPIRED BY OCTOPUS LIKE BEHAVIOR

清水宏晃

Hiroaki SHIMIZU

指導教員 伊藤一之 教授

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 propose a climbing robot inspired by octopus like behavior. The robot has two soft arms inspired by octopus like behavior. The robot can be controlled only two-dimensional control inputs in spite of its many degrees of freedom, and it can grasp various bar and objects. We developed a prototype made of silicone, and experiments were conducted to demonstrate climbing motion over a ladder, aerial ladder and bumpy walls. Results confirmed that the proposed soft arm is effective, and the robot can climb various types of ladders and bumpy walls only two motors.

Key Words : ladder climbing, soft robot, octopus-inspired robot

1. はじめに

従来の枠組みでは、脳が適応的な行動の源であると考えられていた。そのため、多くの計測機器をロボットに搭載して環境をモデル化し、コンピュータによって行動を決定することが適応的な行動には重要であると考えられていた。だが、ロボットの動作が複雑になるにつれ、自由度が増していき、高度な制御則が必要になるため、実時間での動作が困難になってしまう。

一方、現実世界に注目すると、脳が適応的な行動の源とは言いきれない事例がある。例えば、下等な生物の中には脳を持たない生物もいる。しかし、脳を持たない生物でも、複雑な環境下で適応的に行動している。大抵の生物は多くの自由度を持ち、複雑な動作を実現している。ここでの疑問は、多自由度をどのように制御するかである。

これまでの研究で、この疑問を解消するために、ソフトボディと複雑な実環境との相互作用に焦点を当て、様々な生物の動作を模倣したロボットの開発を行ってきた[1-6]。これらのロボットから、ボディのダイナミクスを利用することが重要であり、その有用性について実証している。

本論文では、タコの振る舞いに着目し、複数の関節を有する1つの腕を1本の紐だけで制御する梯子昇降ソフトロボットを提案する。提案ロボットは、柔らかい腕を利用して様々な物体を掴むことができ、梯子や雲梯、障害物のある壁を登ることが出来る。提案するロボットの最大の利点は、多自由度にもかかわらず、わずか2次元の制御入力だけで複雑な動作を実現できることである。ロボットの有用性を実証するため、実験を行った。提案

ロボットは様々な未知物体を把持し、梯子や雲梯、障害物のある壁を登れることを確認する。

2. 関連研究

関連研究では、様々な手法で梯子を登るロボットが提案されてきた[7-11]。本論文では特に2つのロボットについて注目する。

1つ目のロボットは、T. Takemori や F. Matuno(Kyoto University)などが提案した蛇型ロボットである[12]。このロボットは、蛇の動きを模倣し、様々な環境を移動し、梯子を登ることが可能である。

2つ目のロボットは、S. Fujii や T. Arai(Osaka University)などが提案した、腕脚統合型ロボットである[13]。このロボットは、6本の脚を駆使し、2本の脚で踏棧を挟んで把持する。この手法により傾斜のある梯子の移動も可能である。

2つのロボットを含む従来の関連研究では、多くのモーターを使用して、ロボットの多くの関節を動かすため、複雑な制御が必要であった。言い換えれば、ロボットが適応的なふるまいを行うための制御信号を生成するために、多くの計算時間が必要であった。

本論文では、コンピュータの代わりにソフトボディのダイナミクスを使用し、多自由度を有するロボットの複雑な動きを単純な制御則で実現する。

3. 提案機構

以下のFig. 1に提案ロボットを、Fig. 2に制御システムの概要について示す。

提案ロボットは、柔軟性の高い2本のアームと各アー

ム 1 つのモーターのみで制御する。モーターはモータードライバーを介してパソコンに接続され、パソコンからの制御入力に基づいて駆動する。ロボットは、パソコンからの周期的で単純な制御パターンを入力することで、自律的に動作する。また、パソコンの GUI を使用することで、ロボットを手動で制御することも可能である。

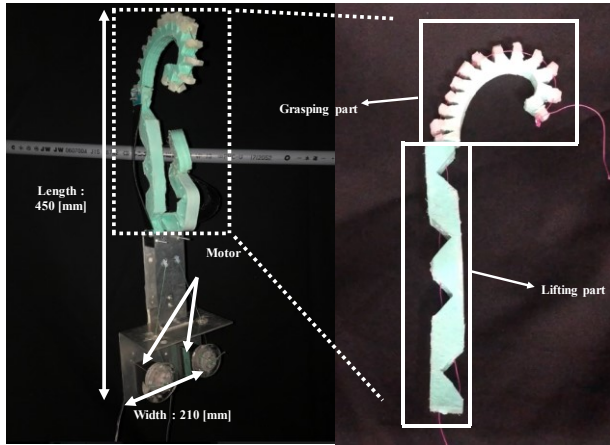


Fig. 1 提案ロボット

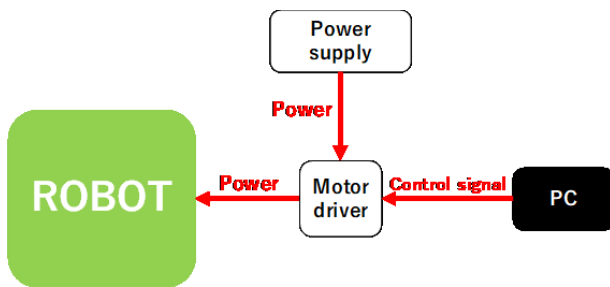


Fig. 2 制御システムの概要

(1) 把持部

提案するロボットは、把持部及び昇降部で構成されている(Fig. 1)。Fig. 3 に、把持部を示す。

把持部は、硬さ 60A のシリコンゴムで作成しており、ねじれを防止するため、把持部の側面に布を埋め込んでいる。硬さ 30A のシリコンゴムを取り付けることで、物体を掴むのに必要な摩擦を生み出している。把持部の内部に PTFE チューブを埋め込み、そのチューブの中に紐を通し、紐を引っ張ることにより把持部は屈曲する。

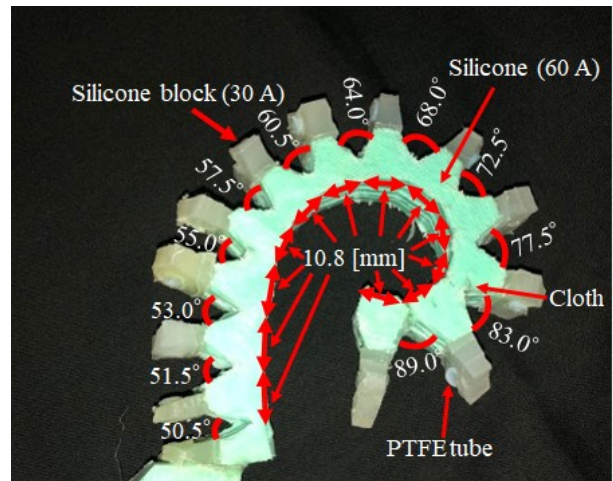


Fig. 3 提案ロボット(把持部)

各節間の角度は、Fig. 3 に示すように、根元から先端に向けて徐々に大きくなるように設定した。これにより、関節を閉じるために必要な力は、根元から先端に向けて大きくなる。この物理的性質を利用し、把持部は根元から徐々に屈曲する(Fig. 4)。この振る舞いは、タコの把持戦略を模倣した。

タコは形状を把持する際に、柔軟な足を根元から先端に向かって順に物体に接触させることで把持を行う [14-15]。この動作を提案ロボットに採用することにより、形状を計測せずに未知の物体を覆い把持する事が可能である。

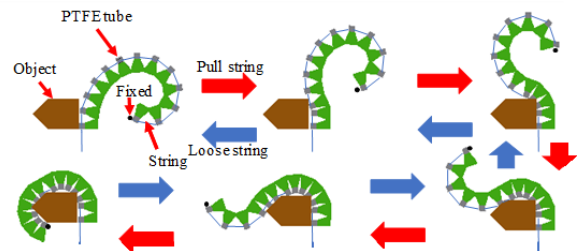


Fig. 4 把持部の動作メカニズム

(2) 昇降部

Fig. 5 に、昇降部を示す。昇降部は把持部と同様に硬さ 60A のシリコンゴムで作成し、内部に PTFE チューブを埋め込んだ。また、ロボット全体が捻じれることを防ぐために、昇降部の側面に布を埋め込んだ。

Fig. 6 に、実際に紐を引っ張った際の昇降部の動きを示す。紐を引くことで Fig. 6 のように昇降部は収縮する。昇降部が収縮し、三次元の動きを実現することにより、提案ロボットの他部分が持ち上がる。

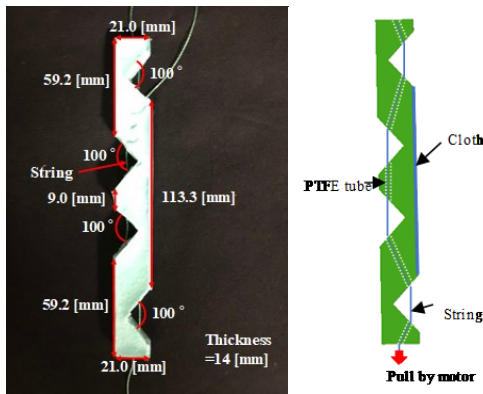


Fig. 5 提案ロボット(昇降部)

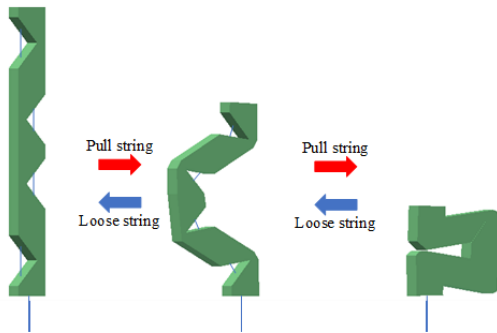


Fig. 6 昇降部の動作メカニズム

(3) メカニズム

Fig. 7に、提案ロボットのメカニズムを示す。

提案ロボットの腕は把持部と昇降部を1本の紐で連結している。紐はプーリーに接続し、モーターによって紐を引く・緩めることができる。

本研究の最大の利点は、わずかに二次元の制御入力のみで多自由度を有するロボットが適応的に動作する事である。つまり、提案ロボットにおいては、1本の紐を引く・緩めるのみで複数の関節を有する把持部と昇降部を、同時に制御する事である。

把持部及び昇降部がそれぞれ1本の紐を引く・緩めることで動作するのは、(1)と(2)で述べた。(3)では、たった1本の紐を引くことで踏棧を把持し、機体が梯子を昇降するメカニズムについて述べる。1本の紐のみで、梯子を昇降するには、先に把持部が屈曲し、後から昇降部が収縮する必要がある。ここで、紐を引っ張った際に、把持部の関節が全て屈曲する力を F_g 、昇降部の関節が、収縮し始める力を F_l とする。1本の紐で、未知の踏棧を把持し、梯子を昇降するには、以下の式が常に成り立たなければならない。

$$F_l > F_g \quad (1)$$

本研究では、式(1)をみたすために、昇降部の厚さを把持部より厚くし、さらに昇降部の側面に付けた布を多くすることで弾性力と剛性を高めた。

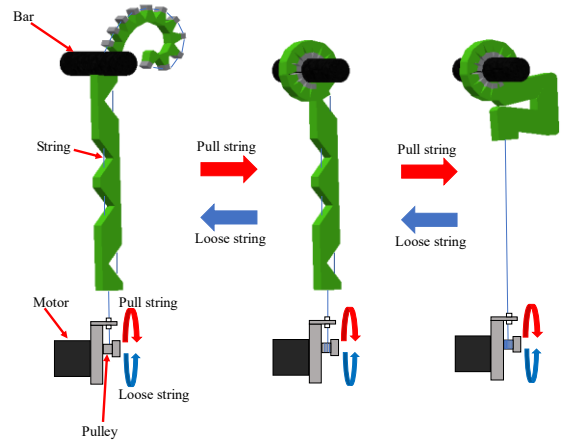


Fig. 7 提案ロボットのメカニズム

(4) 梯子登攀パターン

Fig. 8とFig. 9に、梯子の登攀パターンを示す。

Fig. 8とFig. 9に示すように、紐を引く・緩めるという単純なパターンを繰り返すことで、ロボットは梯子を昇降可能である

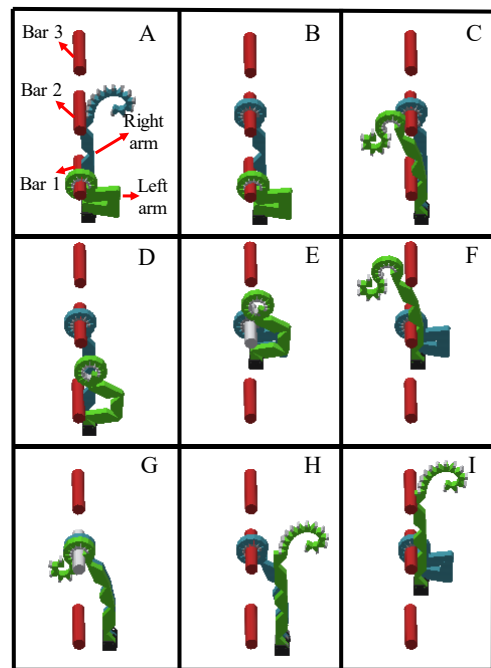


Fig. 8 梯子の登攀パターン

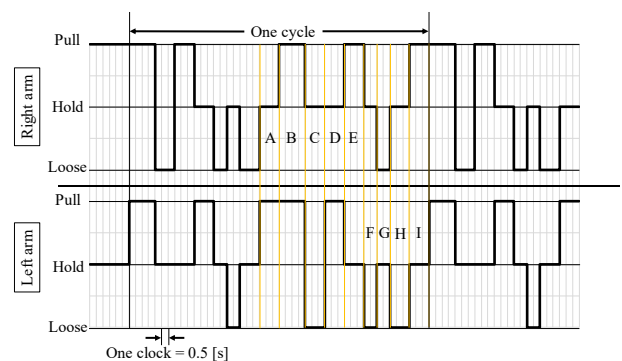


Fig. 9 タイミングチャート

(5) 雲梯渡りのパターン

Fig. 10 に雲梯渡りのパターンを示す.

制御則は、梯子と同様に、紐を引く・緩めるという単純な制御信号のみである.

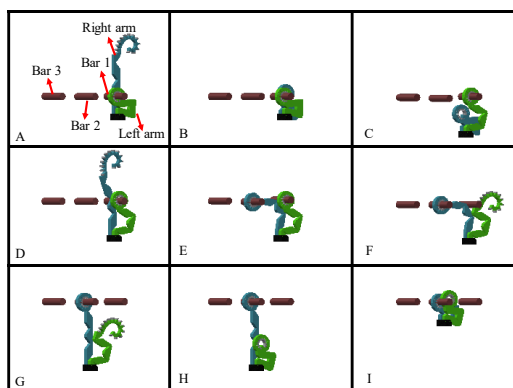


Fig. 10 雲梯渡りのパターン

4. 実験

(1) 実験環境(梯子)

Fig. 11 に梯子の実験環境を示す. また, Fig. 12 には予備実験で使用した2つの踏棧を示す.

梯子の間隔は90[mm]~120[mm]であり, 本研究で作成した提案ロボットのサイズで登攀可能な間隔である.

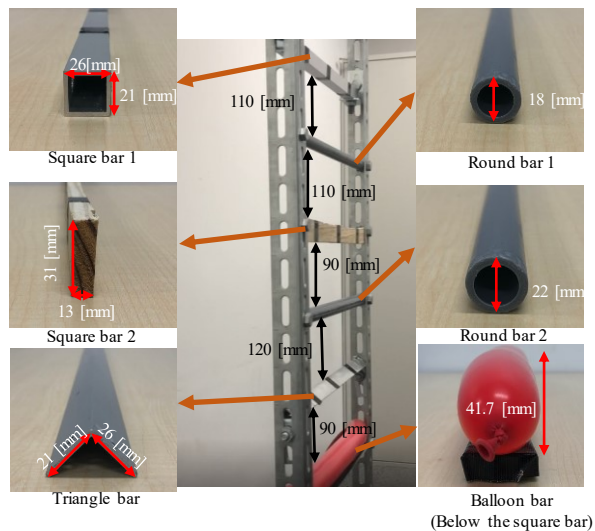


Fig. 11 実験環境(梯子)

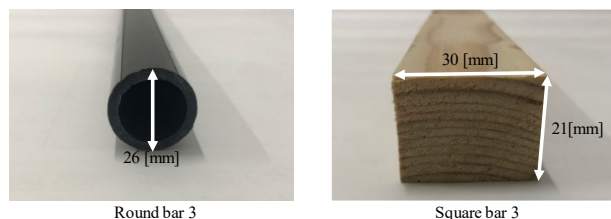


Fig. 12 把持実験用の踏棧

(2) 予備実験(把持実験)

Fig. 13~Fig. 17 に実際の把持した様子を示す.

予備実験に用いた把持部の制御系には踏棧の形状や大きさの情報は用いられておらず, 単にモーターで紐を引く制御のみであった. だが, Fig. 14~Fig. 18 から分かるように, 踏棧の形状, 材質, 硬さに関係なく把持できている. この事より, ソフトボディと踏棧が相互作用することで, 複雑な動作を単純な制御側で実現できること確認した.

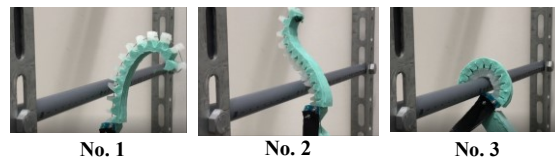


Fig. 13 把持実験 (Round bar 2)

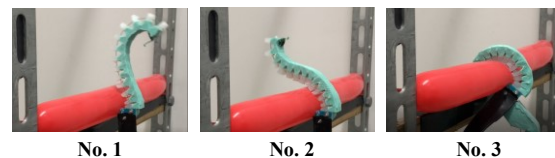


Fig. 14 把持実験 (Balloon Bar)



Fig. 15 把持実験 (Triangle bar)



Fig. 16 把持実験 (Square bar 3)

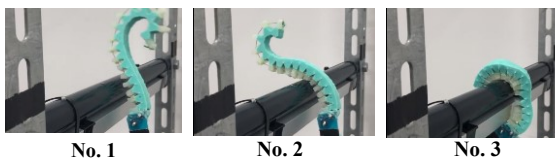


Fig. 17 把持実験 (Square bar 1 と Round bar 3)

(3) 梯子登攀実験

Fig. 18 に実際の梯子登攀実験の結果を示す.

この実験において, 制御信号は Fig. 10 に示した単純な制御パターンを繰り返し入力した.

Fig. 18 の実験結果から, 把持実験と同様に様々な断面および硬さ, 素材の異なる踏棧を把持できることを確認した. また, 多自由度を有するロボットをモーター2つだけで制御し, 様々な形状の梯子を昇降できることを確認した.

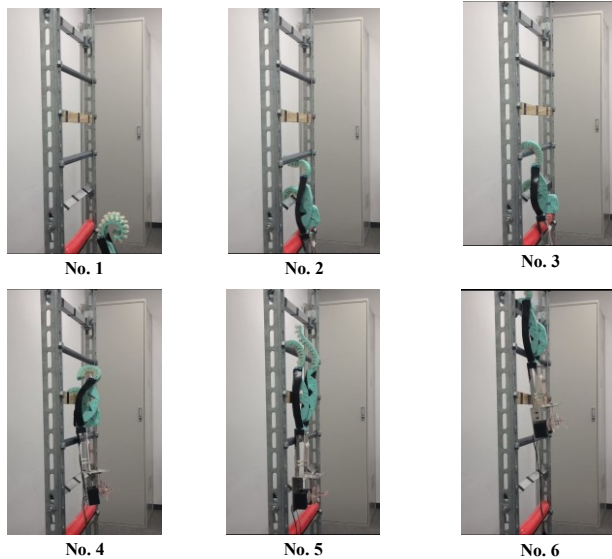


Fig. 18 梯子登攀

(4) 実験環境 (雲梯)

Fig. 19 に雲梯の実験環境を示す。雲梯には、梯子と同様に形、硬さ、素材の異なる 5 本の踏棧を使用した。雲梯の間隔は 90[mm]~100[mm]とした。

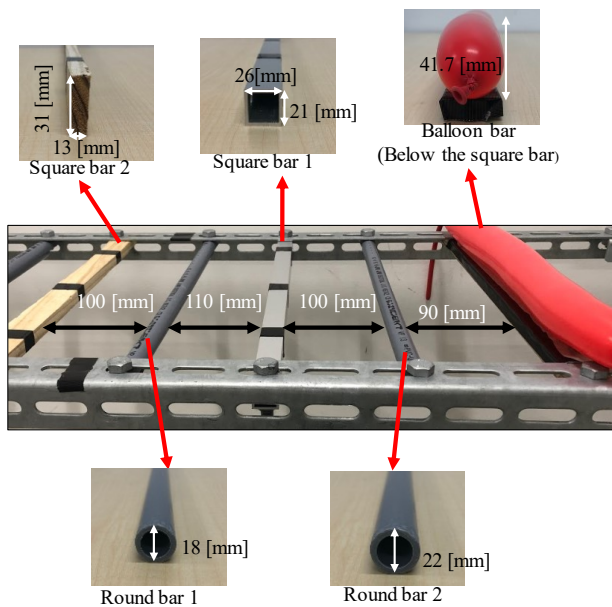


Fig. 19 実験環境 (雲梯)

(5) 雲梯渡り実験

Fig. 20 に実際の雲梯実験における結果を示す。

この実験において、梯子実験とは異なり、パソコンの GUI を使用し、ロボットを手動で制御した。

梯子を登攀する上下動作とは異なり、雲梯は前後の動作のため、ロボットのソフトボディはより複雑な動作をした(Fig. 20)。

より複雑な動作したにもかかわらず、サーボモーター 2 つのみの制御で、雲梯渡りが可能であることを確認した。このことによりソフトボディのダイナミクスによって、

実環境との相互作用を利用し、適応的な動作が実現したと考えられる。

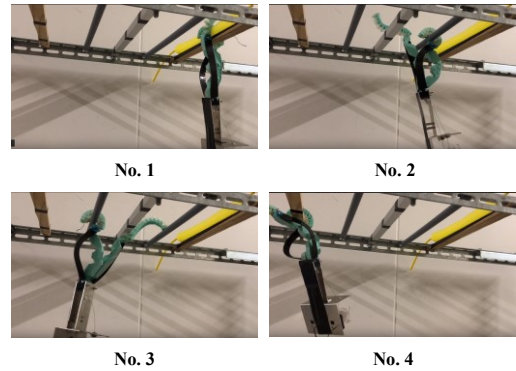


Fig. 20 雲梯渡り

(6) 実験環境 (障害のある壁)

Fig. 21 に障がい物のある壁の実験環境を示す。

Fig. 21 の障害物については、木材と塩ビ管を使用した。障害物の間隔は、梯子や雲梯より狭空間でも登攀可能であるか確認するため、35[mm]~85[mm]とした。

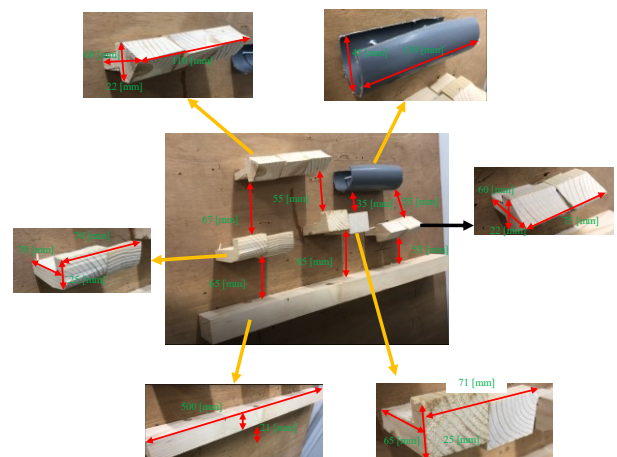


Fig. 21 実験環境 (障害のある壁)

(7) 障がいのある壁の昇降実験

Fig. 22~Fig. 24 に障害物のある壁の昇降実験における結果を示す。

この実験において、雲梯の実験と同様にパソコンの GUI を利用してロボットを手動で制御した。

Fig. 24~Fig. 26 から、障害のある壁を昇降するための複雑な動作は、単純な制御のみで実現できることを確認した。このことより、多自由度を有したソフトボディを制御し、ロボットのダイナミクスによって知情的な動作を生み出すことが可能であると結論付ける。



Fig. 22 障がいのある壁の登攀 (パターン 1)



Fig. 23 障害のある壁の登攀 (パターン 2)



Fig. 24 障がいの壁の登攀 (パターン 3)

5. 結論

本論文では、ソフトアームのダイナミクスに注目し、2本の紐のみで多自由度ロボットを制御する梯子昇降ソフトロボットの開発を行った。開発したロボットの有用性を実証するために梯子・雲梯・障害物のある壁と3種類の実験を行い、2次元制御入力のみで、適応的に動作することを確認した。

また、様々な形の把持や、前後上下の動作を確認することで、ソフトアームと環境との相互作用によって多自由度を有するロボットの複雑な動きが生成された。

今後の展望としては、把持部と昇降部の接続部分の角度を変更し、円形柱状物の登攀や平面の歩行を行う。さらには、強化学習を適用して制御入力を取得し、強化学習でソフトボディの有用性を実証する予定である。

謝辞: 最後に、本研究に際し多大なるご指導、協力をいただいた法政大学理工学部伊藤一之教授ならびに伊藤研究室の方々へ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) K. Ito, S. Hagimori, "Flexible manipulator inspired by octopus: development of softarms using sponge and experiment for grasping various objects", "Artificial Life and Robotics, Vol. 22, issue 3 pp. 283-288, 2017
- 2) K. Ito, R. Aoyagi, and Y. Homma, "TAOYAKA-III: A Six-Legged Robot Capable of Climbing Various Columnar Objects," J. Robot. Mechatron., Vol.31, No.1, pp. 78-87, 2019.
- 3) T. Mukai, K. Ito, "Flexible manipulator inspired by Octopi: Comparative study of pushing and pulling mechanisms in realizing intelligent behavior", Proc. of the Twenty-fourth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th), pp. 393-396, 2019
- 4) K. Ito, Y. Aso and K. Aihara, "Multi-legged robot for rough terrain: SHINAYAKA-L VI", Proc. of the International Conference on Advanced Mechatronic systems (ICAMech 2019)", pp. 32, 2019
- 5) K. Ito, H. Maruyama, "Semi-autonomous serially connected

multi-crawler robot for search and rescue", "Advanced Robotics", Vol. 30, issue 7, pp. 489-503, 2016.

- 6) A. Saito, K. Nagayama, K. Ito, T. Oomichi, S. Ashizawa, and F. Matsuno, "Semi-Autonomous Multi-Legged Robot with Suckers to Climb a Wall", "Journal of Robotics and Mechatronics", Vol. 30, No.1, pp.24-32, 2018.
- 7) H. Iida, H. Hozumi and R. Nakayama, "Development of ladder climbing robot LCR-1", Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 1, pp.311-316, 1989.
- 8) H. Yoneda, K. Sekiyama, Y. Hasegawa and T. Fukuda, "Vertical Ladder Climbing Motion with Posture Control Considering Gravitation Momentum for Multi-Locomotion Robot", "The Japan Society of Mechanical Engineers", Vol. 75, No. 751, pp. 12-19, 2009.
- 9) X. Sun, S. Hayashi, T. Matsuzawa, Y. Yoshida, N. Sakai, A. Imai, M. Okawara, K. Kumagai, T. Matubara, K. Yamaguchi and A. Takahashi, "Error Compensation System with Proximity Sensor for Vertical Ladder Climbing Robot "WAREC-1"", Proc. of the 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots, pp.40-46,2018
- 10) T. Yoshiike, M. Kuroda, R. Ujino, H. Kaneko, H. Higuchi, S. Iwasaki, Y. Kanemoto, M. Asatani and T. Koshiishi, "Development of Experimental Legged Robot for Inspection and Disaster Response in Plants," proc. of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4869-4876, 2017.
- 11) M. Kanazawa, S. Nozawa, Y. Kakiuchi, Y. Kanemoto, M. Kuroda, K. Okada, M. Inada and T. Yoshiike, "Robust Vertical Ladder Climbing and Transitioning between Ladder and Catwalk for Humanoid Robots", Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2202-2209, 2015.
- 12) T. Takemori, M. Tanaka and F. Matuno, "Ladder Climbing with a Snake Robot", Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 8140-8145, 2018.
- 13) S. Fujii, K. Inoue, T. Takubo, Y. Mae and T. Arai, "Ladder Climbing Control for Limb Mechanism Robot "ASTERISK"", Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3052-3057, 2008.
- 14) G. Sumbre, Y. Gutfreund, G. Fiorito, T. Flash and B. Hochner, "Control of Octopus Arm Extension by a Peripheral Motor Program", Science, Vol. 293, No. 5536, pp. 1845-1848, 2001.
- 15) Y. Gutfreund, T. Flash, G. Fiorito and B. Hochner, "Patterns of Arm Muscle Activation Involved in Octopus Reaching Movements", "The Journal of Neuroscience", Vol. 18, No. 15, pp. 5976-5987, 1998.