

円筒型二重構造ソフトロボットの開発 : NEJIRI : 捻転動作による旋回及び並進運動の実現

著者	山下 晋
出版者	法政大学大学院理工学・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	63
ページ	1-7
発行年	2022-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00025353

円筒型二重構造ソフトロボットの開発: NEJIRI -捻転動作による旋回及び並進運動の実現-

DEVELOPMENT OF A DUPLEX-CYLINDRICAL FLEXIBLE ROBOT: NEJIRI
-REALIZATION OF TURNING AND TRANSLATIONAL MOTION BY USING TWISTING MOTION-

山下晋

Susumu YAMASHITA

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 propose a novel twisting mechanism for a cylindrical soft robot to move. The proposed mechanism has a duplex structure comprising a silicone rubber hose and a flexible shaft. Each side of the robot has a geared motor, and the robot shortens and lengthens by rotating each motor. When rotating one motor, the shape of the robot generates a spiral wave, and its length shortens. Then, by rotating the other motor to loosen the spiral, the shape of the robot returns to a natural shape, and the center of gravity moves as well. By simply repeating these motions, locomotive behavior is realized, and the robot moves toward the desired direction. To demonstrate the effectiveness of the proposed mechanism, we developed a prototype. Moreover, to confirm its mobility, experiments were conducted. According to the results, we confirmed that the desired turning and translational motion were realized, and the robot was able to move toward the desired direction on a flat horizontal plane and through a pipe.

Key Words : *Twisting motion, soft robot, cylindrical robot*

1. はじめに

近年、柔軟素材によって構成されるソフトロボットが高く注目されている[1-24]。多くのソフトロボットはシリコンゴムで作成され、空気圧で制御されている[1-8]。最近では、従来の制御手法に加え、紐を引くことにより制御する機構や、捻じる動作によって制御する機構が提案されてきた[9-24]。しかしながら、任意の方向への移動を目的とした、捻転動作を用いたソフトロボットは未だ開発されていない。本研究では円筒型の柔軟素材を捻転動作によって制御する機構に着目する。蛇腹ホースなど、柔軟な素材によって構成される円筒型の物体は両端を捻じると、らせん状の波が生成され、その物体の長さは縮まる。本研究では、この機構を用いた、捻転動作によって旋回及び並進運動を実現するための、円筒型二重構造ソフトロボットを開発した。提案するロボットはシリコンゴム素材の蛇腹ホースと柔軟なシャフトによって構成される二重構造である。機体の両端にはギヤードモータを搭載し、2つのモータを回転させることで機体の長さを伸縮させる。片側のモータを回転させることで、機体はらせん状の波を生成し、機体の長さは縮まる。この時、らせん状の波を解消させるために、もう片方のモータ

を回転させると、機体の形状は元へ戻り、重心は移動する。この動作を繰り返すことで、旋回及び並進運動は実現され、ロボットが任意の方向への移動することを可能にする。さらに、機体が有する対称性によって、モータの回転タイミングを反転させることで反対の方向へ移動する。本論文では、提案する機構の有用性を示すため、試作機を開発し、実験を行った。提案するロボットは平面上における前後左右への移動、旋回動作とパイプ内での移動ができることを確認する。

2. 関連研究

これまで、捻転動作を用いた移動ロボットは複数提案されてきた[25-26]。1つ目のロボットは、M. Hara や F. Matsuno (The University of Electro-Communications)などが提案したねじ推進ヘビ型ロボットである[25]。このロボットは、独自開発されたねじ推進ユニットを用いて、右ねじと左ねじ方向へ関節を捻転させることで実現させ、様々な環境での移動が可能である。

2つ目のロボットは、F. Matsuno や T. Kamegawa (Kyoto University) などが提案した、蛇型ロボットである[26]。このロボットは、関節と環境との干渉を減らすため、楕

形状の関節を持ち、不整地だけでなく梯子の昇降移動も可能である。

従来の関連研究では、ロボットが有する多くの関節をそれぞれ正確に動かすため、多くのモータを用いた複雑な制御が必要であった。これは、ロボットが適応的な振る舞いを生成することを目的としたとき、情報量が膨大になり、多くの計算時間を要するという課題がある。本研究では、ソフトボディが有する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. 機構の提案とロボットの開発

(1) 提案機構

Fig. 1 に示すように、捻転運動を実現するため、提案機体は柔軟な蛇腹ホースをメインボディとして有する。また、Fig. 2 に示すように、機体は二重構造によって構成され、機体の外側はシリコーン 30A により生成された蛇腹ホースであり、内側はシリコーンチューブと針金から構成される柔軟なシャフトである。機体の両端に取り付けられたモータの筐体は蛇腹ホースと固定され、モータの回転軸は柔軟シャフトと接続されている。従って、片方のギヤードモータが回転すると、柔軟なシャフトと蛇腹ホースが反対方向へ回転する。Fig. 3 に示すように、右側のモータが青矢印の方向へ回転すると、捻転力は柔軟なシャフトに対して赤矢印の方向へ加わり、機体の長さは、らせん状の波が生成されたことにより、短くなる。この時、らせん状の波を解消させるために、左側のモータを青矢印とは反対側へ、もしくは右側のモータを反対方向へ回転させる。すると、機体は真っ直ぐな形状へ戻り、重心は移動する。この動作を繰り返すことにより、ロボットは任意の方向への移動を可能にする。

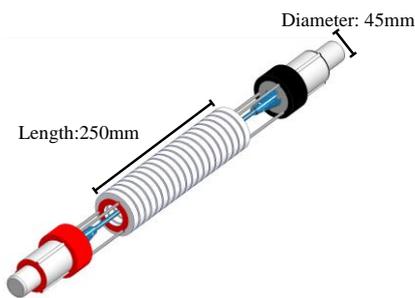


Fig. 1 提案機体

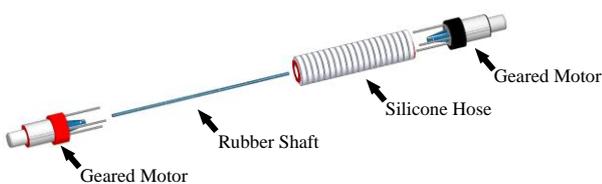


Fig. 2 提案機体の構造

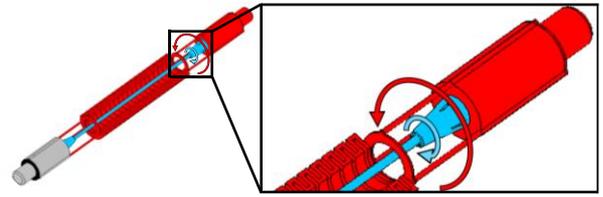


Fig. 3 内部の機構

(2) 機体の制御

提案するロボットは、パソコンにプログラムされた単純な移動パターンにより制御される。Fig. 4 に方向の定義を示す。Fig. 5 から Fig. 8 に示される移動パターンを単純に繰り返すことにより、旋回及び並進運動を実現する。

まず、右方向への旋回を例に、旋回運動について述べる。右旋回、左旋回制御のために用いるタイミングチャートを次の Fig. 5 に示す。また、Fig. 9 に想定される機体の動きを示す。旋回動作は Fig. 9 に示されるように、ピリオド A, B の 2 つ動作から構成される。ピリオド A において、右側のモータを CCW 方向へ高電圧で回転させ、機体を捻じることで、ロボットの右側が移動する。さらに、ピリオド B でねじれた機体を戻すために右側のモータを反対方向(CW)へ低電圧で回転させると、機体の右側は反対側へ移動し、元の位置へ戻ろうとする。しかし、この 2 つの動きにおいて、モータへ印加する電圧の差から、元の位置へと戻ろうとする時に回転した角度は、最初に移動した角度よりも小さい。従って、この動作を繰り返すことで、ロボットはねじれを蓄積させることなく、右旋回を行うことができる。また、Fig. 5 に示す Pattern B を用いることで、左旋回を行う。

次に、上方向への移動を例に、上下方向への移動原理について述べる。使用するタイミングチャートを、次の Fig. 6 に、各ピリオドにおける想定される動きの様子を次の Fig. 10 に示す。この動作も同様に、2 つの単純な動作の組み合わせによって構成される。Fig. 10 に示されるピリオド A において、右側のモータを CW 方向へ回転させ、機体を捻じることで、ロボットの右側が左方向へ旋回する。次にピリオド B において、左側のモータを、らせん状の波を解消させるために CCW 方向へ回転させると、ロボットは右方向へ旋回する。この 2 つの旋回動作を繰り返すことで、ロボットは、ねじれを蓄積することなく、上方向へ移動することができる。同様に、Fig. 6 の Pattern D を用いることで、ロボットは下方向へ移動する。

3 つ目に、右方向への移動を例に、左右方向への移動原理について述べる。本動作で使用するタイミングチャートを次の Fig. 7 に、各ピリオドにおける想定される動きを次の Fig. 11 に示す。Fig. 11 に示すように、4 つの動作から構成され、ピリオド A において、左側のモータを CW 方向へ回転させることにより、ロボットはねじれながら左方向へ旋回する。ピリオド B において、右側のモータを CCW 方向へ回転させると、ねじれを解消しながら

ら、右旋回する。同様にピリオド C と D においても, Fig. 11 に示すようにロボットの左側が動く。これらの、旋回、伸縮動作を繰り返すことにより、機体の重心は右側へ移動する。同様にして, Pattern E と対称の Pattern F を用いることで、ロボットは左側へ移動する。

最後に、パイプ内における右方向への移動を例に、パイプ内での左右方向への移動原理について述べる。使用するタイミングチャートを次の Fig. 8 に示す。この動作は2つの動作の組み合わせによって構成される。1サイクルのうち、0 msec から 900 msec までの信号をピリオド A、900 msec から 1000 msec までの信号をピリオド B とする。ピリオド A では、右側のモータを CW 方向へ回転させると、機体がねじれる。さらに回転を続けると、左側のモータのトルクよりもシャフトによる回転力が上回り、左側のモータは、入力信号が 0 にもかかわらず回転する。これにより、ロボットはらせん状の波を生成した状態を保ちながら、波を左方向へ移動させる。また、ピリオド B において、シャフトと蛇腹ホースが干渉し、右側のモータが動かなくなってしまうのを防ぐために、CCW 方向へ回転させる。この 2 つ動作を繰り返すことにより、ロボットは、らせん状の波を移動させながら、右方向へ移動することができる。同様に、Pattern G と対称の Pattern H を用いることでロボットはパイプ内を左方向へ移動する。

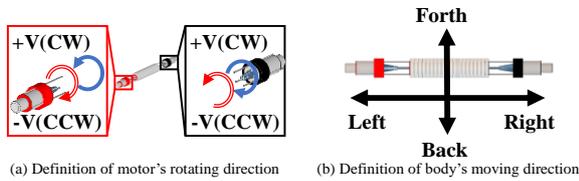


Fig. 4 方向の定義

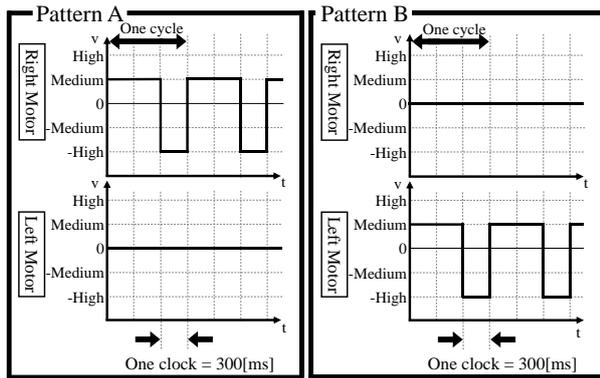


Fig. 5 旋回移動のためのタイミングチャート

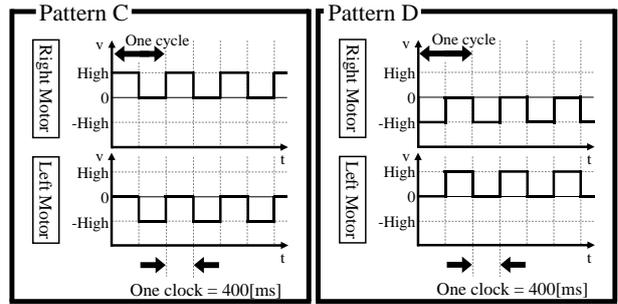


Fig. 6 上下移動のためのタイミングチャート

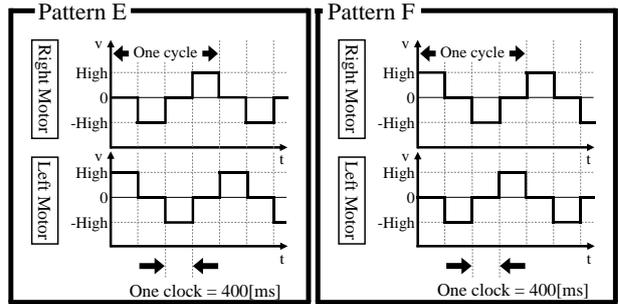


Fig. 7 左右移動のためのタイミングチャート

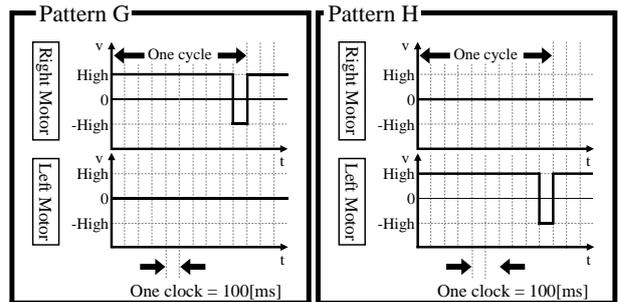


Fig. 8 パイプ内における左右移動のためのタイミングチャート

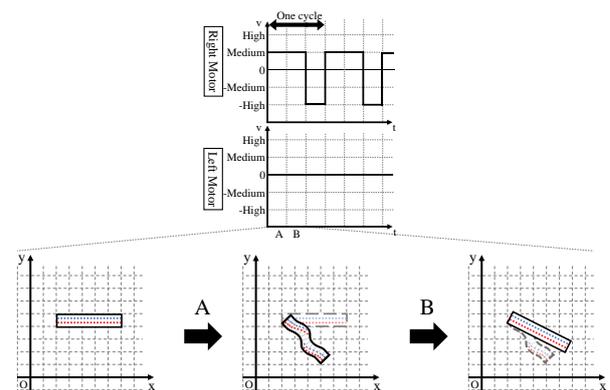


Fig. 9 想定される旋回時の動きの様子

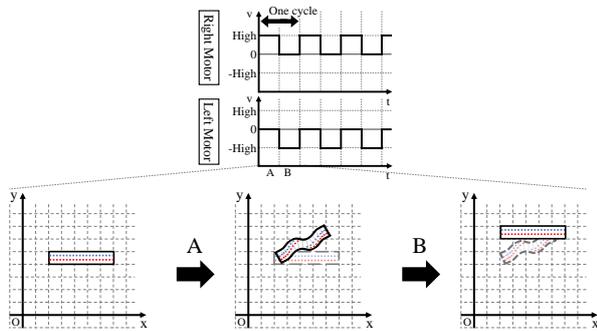


Fig. 10 想定される上方向への移動の様子

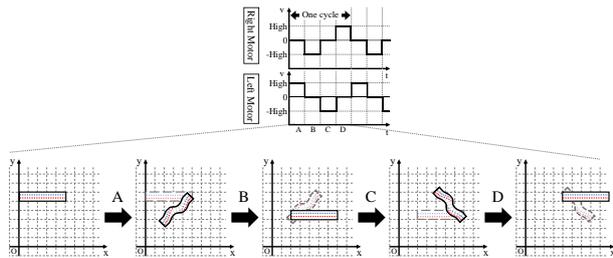


Fig.11 想定される右方向への移動の様子

(3) 開発機体

Fig. 12 に開発した試作機とその制御システムを示し、Table 1 にロボットの仕様を示す。また、Fig. 13 に機体の実際の動きを示す。

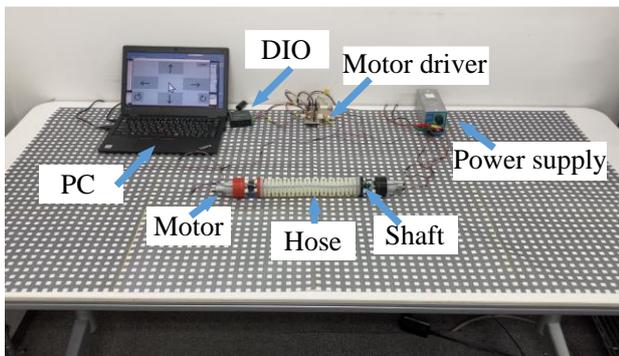


Fig. 12 試作機と制御システム

Specification of the robot		
Item		Value
Main Body	Total length of the robot	460 [mm]
	Size	Length of flexible hose 250 [mm]
		Exterior diameter 48 [mm]
		Total weight 373 [g]
Wight	Weight of motors	152 [g]
	Weight of flexible hose	200 [g]
	Operation voltage	3 [v]
Gear Motor	Loding torque	1.47 [mNm]
	On-load speed	10,500 [r/min]
	Current	1 [A]
Silicone Hose	Length	250 [mm]
	Diameter	45 [mm]
	Depth of folds	6 [mm]
	Height of folds	10 [mm]
	Distance of folds	2 [mm]
Shaft	Elasticity	30 [A]
	Diameter	CHIYODA touch-tube 3.5 [mm]
	Length	stainless bar 0.5 [mm]
	CHIYODA touch-tube 270 [mm]	
	stainless bar 270 [mm]	

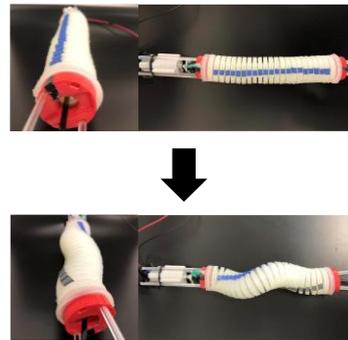


Fig. 13 試作機における捻転動作の様子

4. 実験

開発した試作機を用いて、提案する機構の有用性を示すために実験を行った。実験環境は水平面上とパイプ内であり、水平面上での実験においては、機体の移動量を計測するため、机を格子状のシートで覆った。Fig. 14 に絶対座標系を示す。図に示される通り、 θ はロボットの旋回量を示す。また、Fig. 15 に機体のねじれ角 φ の定義を示す。

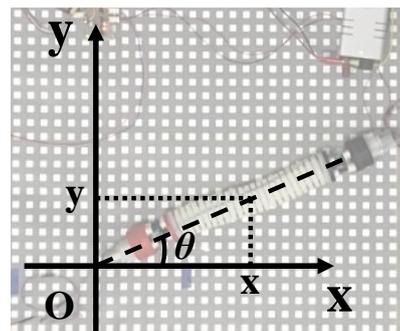


Fig. 14 絶対座標系

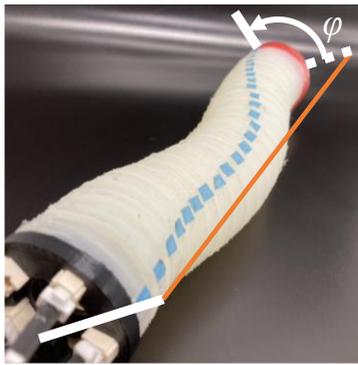


Fig. 15 ねじれ角 ϕ

(1) 旋回移動実験

ロボットは Fig. 5 に示すタイミングチャート, Pattern A, B を用いて制御を行った。Fig. 16 に実験結果を示す。旋回平均速度は 8.5 deg/sec であった。本実験より、機体が伸び縮みすること、ねじれ角 ϕ が蓄積されないことを確認した。一方、ロボットの旋回角 θ は変化し、旋回することを確認した。また、Pattern A と対照的な Pattern B を用いることで、対称的な結果が得られることを確認した。

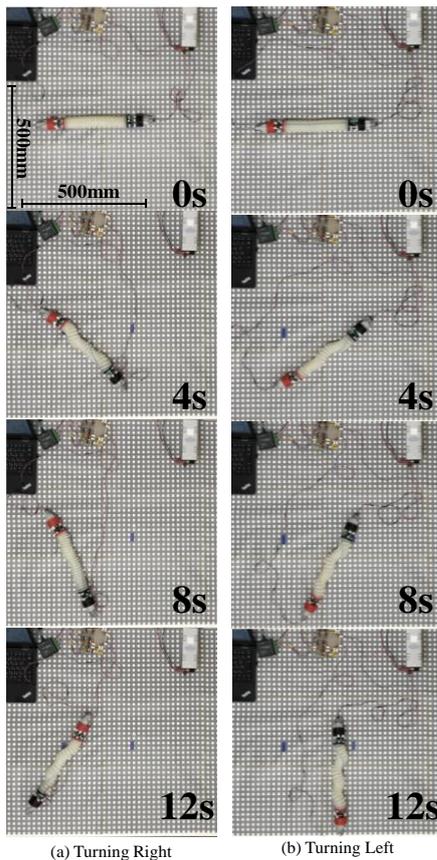


Fig. 16 旋回移動実験結果

(2) 上下方向への移動実験

ロボットは Fig. 6 に示すタイミングチャート, Pattern C, D を用いて制御を行った。Fig. 17 に実験結果を示す。移

動平均速度は 6.3 cm/sec であった。本実験より、機体が伸び縮みすること、ねじれ角 ϕ が蓄積されないことを確認し、Pattern C と対照的な Pattern D を用いることで、対称的な結果が得られることを確認した。

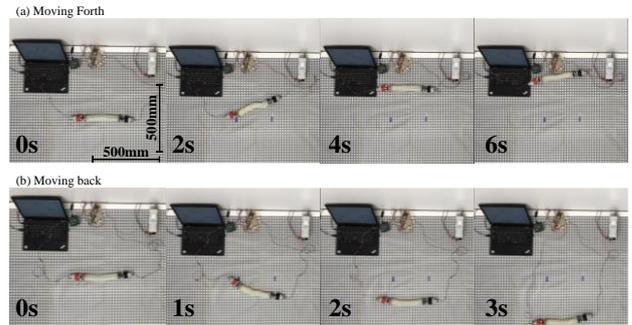


Fig. 17 上下方向への移動実験結果

(3) 左右方向への移動実験

ロボットは Fig. 7 に示すタイミングチャート, Pattern E, F を用いて制御を行った。Fig. 18 に実験結果を示す。移動平均速度は 1.1 cm/sec であった。本実験より、機体が伸び縮みすること、ねじれ角 ϕ が蓄積されないことを確認した。一方、ロボットの旋回角 θ は変化し、旋回することを確認した。また、Pattern E と対照的な Pattern F を用いることで、対称的な結果が得られることを確認した。

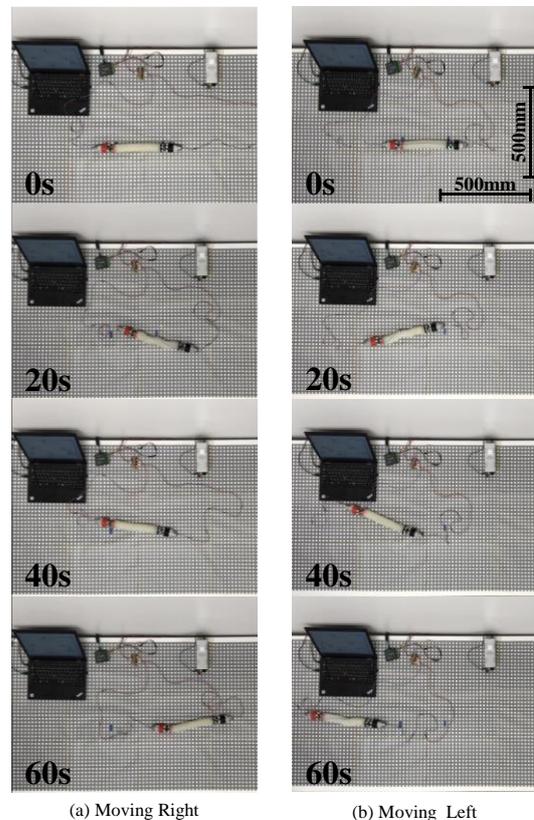


Fig. 18 左右方向への移動実験結果

(4) パイプ内での移動実験

ロボットは Fig. 8 に示すタイミングチャート, Pattern G, H を用いて制御を行った. Fig. 19 に実験結果を示す. 本実験では, 内径 75 mm のパイプを使用した. 本実験での右方向への移動実験では, ねじれ角 ϕ は蓄積され, 右ねじの原理で推進していることを確認した. また, Pattern G と対称の Pattern H を入力することで, 左ねじの原理で左方向へ移動し推進していることを確認した. また, Pattern G を用いて, 複数の大きさにおけるパイプ内実験を行った. この時の移動平均速度を次の Table 2 に示す. Table 2 より, 系の大きさによらず, 機体がパイプ内でも移動が可能であることを確認した.

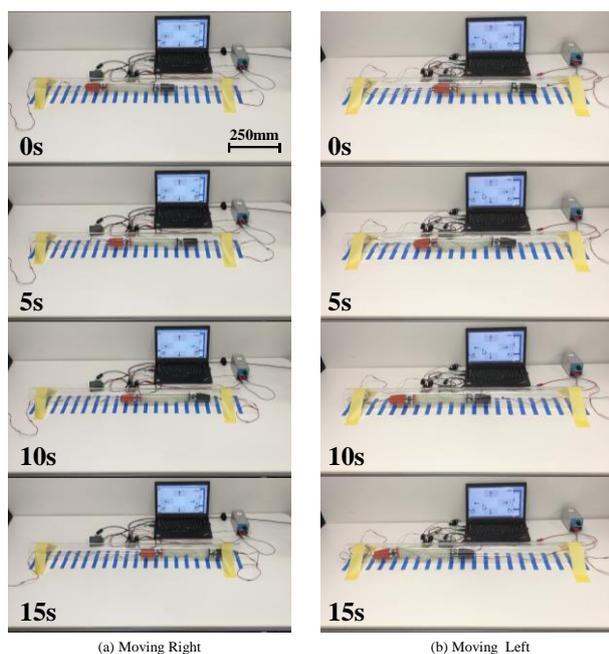


Fig. 19 パイプ内での移動実験結果

Table 2 各パイプにおける移動速度

diameter of the pipe [mm]	speed [mm/s]
75	20
100	18
150	17

5. 結論

本論文では, 旋回及び並進運動を実現する円筒型二重構造ソフトロボットの提案を行った. 提案機構の有用性を示すために, 試作機を開発した. また, 水平面上での旋回移動, 上下左右方向への移動及びパイプ内での移動実験を行った. 実験結果より, ロボットはシンプルな制御パターンによって, 任意の方向へ移動できることを確認した. 今後の展望としては, 建物のメンテナンスや検査, 災害現場での探索活動など, より実用的な環境で移動ができるように, 移動性能の向上を目指す予定である.

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) M. T. Tolley et al, "A resilient, untethered soft Robot," *Soft Robotics*, vol. 1, no. 3, pp. 213–223, 2014.
- 2) K. Suzumori and H. Suzuki, "A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied Manta swimming robot," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 4975–4980.
- 3) K. M. Digumarti, A. T. Conn, and J. Rossiter, "Euglenoid-inspired giant shape change for highly deformable soft robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 2302–W2307, 2017.
- 4) R. Goldoni et al, "Stretchable nanocomposite sensors, nanomembrane interconnectors, and wireless electronics toward feedback-loop Control of a soft earthworm robot," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, (39), pp. 43388–43397, 2020.
- 5) A. J. Partridge and A. T. Conn, "Passive, reflex response units for reactive soft robotic systems," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4014–4020, 2020.
- 6) A. Rafsanjani et al, "Kirigami skins make a simple soft actuator crawl," *Science Robotics*, vol. 3, no. 15, 2018.
- 7) C. D. Onal and D. Rus, "Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 8, no. 2, 2013.
- 8) M. T. Tolley et al, "An untethered jumping soft robot," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 561–566.
- 9) Y. Sakuhara and K. Ito, "Climbing soft robot inspired by octopus," in *Proc. IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 2020, pp. 463–468.
- 10) K. Ito and S. Hagimori, "Flexible manipulator inspired by octopus: development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects," *Artificial Life and Robotics*, vol. 22, no. 3, pp. 283–288, 2017.
- 11) K. Ito and T. Mukai, "Flexible manipulator inspired by octopi: advantages of the pulling mechanism," *Artificial Life and Robotics*, vol. 25, no.1, pp. 167–172, 2020.
- 12) J. E. Bernth, A. Arezzo, and H. Liu, "A novel robotic meshworm with segment-bending anchoring for colonoscopy," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1718–1724, 2017.
- 13) K. Ito, Y. Homma, and J. Rossiter, "Soft multi-legged robot inspired by octopus: climbing various columnar

- objects," *Advanced Robotics*, vol. 34, no. 17, pp. 1096–1109, 2020.
- 14) M. Cianchetti et al, "Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm OCTOPUS robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 10, no. 3, 2015.
 - 15) H. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 2, 2011.
 - 16) T. Umedachi, V. Vikas, and B. A. Trimmer, "Highly deformable 3-D printed soft robot generating inching and crawling locomotion with variable friction legs," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 4590–4595.
 - 17) W. Wang et al, "Locomotion of inchworm-inspired robot made of smart soft composite (SSC)," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, no. 4, 2014.
 - 18) S. Seok et al, "Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1485–1497, 2013.
 - 19) Y. Sugiyama and S. Hirai, "Crawling and jumping by a deformable robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 5–6, pp. 603–620, 2006.
 - 20) T. G. Sano and H. Wada, "Twist-induced snapping in a bent elastic rod and ribbon," *Physical Review Letters*, vol. 122, no. 11, 2019.
 - 21) V. G. A. Goss et al, "Experiments on snap buckling, hysteresis and loop formation in twisted rods," *Experimental Mechanics*, vol. 45, no. 2, pp. 101–111, 2005.
 - 22) T. Helps et al, "Twisted rubber variable-stiffness artificial muscles," *Soft Robotics*, vol. 7, no. 3, pp. 386–395, 2020.
 - 23) M. Gazzola et al, "Forward and inverse problems in the mechanics of soft filaments," *Royal Society Open Science*, vol. 5, no. 6, pp. 171628–171628, 2018.
 - 24) S. D. Olson, S. Lim, and R. Cortez, "Modeling the dynamics of an elastic rod with intrinsic curvature and twist using a regularized Stokes formulation," *Journal of Computational Physics*, vol. 238, pp. 169-187, 2013.
 - 25) M. Hara et al, "Control of a Snake-like Robot Using the Screw Drive Mechanism," *IEEE transactions on robotics*, vol. 28, no.3, pp. 541–554, 2007.
 - 26) F. Matsuno et al, "Development of tough snake robot systems," in *Disaster Robotics* Anonymous Cham: Springer International Publishing, pp. 267-326, 2019.