

### 転がり移動可能な多脚型ロボット： SHINAYAKA-L VII：可逆変形可能な機体の提 案

OKAJIMA, Takeshi / 岡島, 武史

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030689>

# 転がり移動可能な多脚型ロボット: SHINAYAKA-L VII —可逆変形可能な機体の提案—

ROLLABLE MULTILEGGED ROBOT: SHINAYAKA-L VII  
-PROPOSAL OF A REVERSIBLE TRANSFORMABLE BODY-

岡島武史

Takeshi OKAJIMA

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

Robots that can operate in unknown environments, such as rescue operations at disaster sites and construction and maintenance inspections of infrastructure facilities, are attracting attention. Multilegged robots with high mobility and stability are needed to adapt to unknown environments. Aso and Aihara focused on centipedes and developed a multi-legged robot that uses the interaction between the body and the environment. However, it has a problem of slow walking speed. Therefore, we propose a multi-legged robot with two ways of moving: multi-legged walking in a centipede form and rolling in a cylindrical form. On uneven terrain such as rubble, narrow spaces, and steps, the robot moves by centipede walking. On flat ground, it moves at high speed while rolling its cylindrical body. This paper reports on the developed prototype and experiments to confirm its effectiveness.

**Key Words** : Multi-legged robot, flexibility, transformation, rough terrain

## 1. はじめに

近年、災害現場での救助活動やインフラ設備の建設・保守点検など多種多様な複雑な環境で活躍するロボットが注目を集めている[1-13]. しかし、これらのロボットは特定環境下での動きを想定して設計されているため、予期しない環境下では適応できない事、操作が複雑になる事や情報処理に時間が掛かる事が問題として挙げられる。

一方、自然界の生き物は、多関節を持ちながらも瓦礫や溝、段差などの不整地を自分自身の身体を巧みに使うことでリアルタイムに行動できる。これらの生物は微小脳しか持っておらず情報処理能力も低い、周辺環境に受動的に適應できるように進化している。そこで、そのような生物の機能を模倣したロボットが多く開発されている。従来研究では身体と環境の相互作用により計算コストを削減していると考えられており[14-16]、従来研究ではこの相互作用を利用した様々な多脚型ロボットが開発されてきた[17-20]。しかし、歩行速度が遅く機動性が低い問題があった。

本研究では、従来の SHINAYAKA-L VIを改良し、ムカデ型形態と円筒型形態の2形態を持ち双方に変形可能な多脚型ロボットを提案する。瓦礫や狭小部や段差などの不整地ではムカデ型形態で多脚歩行をし、平地では円筒型形態

で転がり移動をする。また、新たに剛性の変化する柔軟脚も開発した。更に、開発した機体の有効性を確認するための実証実験を行った。

## 2. 従来研究

多脚型ロボットは、瓦礫や段差などの起伏の激しい不整地でも安定した歩行が可能である。しかし、複雑な周辺環境をセンシングした上で、多くのモータを制御することは極めて困難である。なぜならば、周辺環境を捉える為に多くのセンサが必要であり、計算量もモータの数に比例して指数関数的に増加し、実時間処理が困難になるからである。このことは、1分1秒を争う災害救助活動下においては致命的である。また、災害現場などでの不整地で、ロボットを遠隔操作することは難しく、予めプログラムされた動作を命令するだけで、操作が難しい場面をロボット自身で補完する必要がある。

上記の問題を解決するために、阿曾らは身体と環境の相互作用に注目し、柔軟な機構を持つ多脚型ロボットをこれまでに開発してきた[20]。従来機体である SHINAYAKA-L VIを Fig. 1 に示す。



Fig. 1 SHINAYAKA-L VI

従来機体は、蛇腹でできた胴体と剛性の変化する脚により、単一步行パターンのみで瓦礫移動を可能にしている。しかし、移動速度が遅く機動性能が低いため、本研究では、転がり移動可能な機構を提案する。

### 3. 提案構造

#### (1) 基本構造

Fig. 2 に提案する機体のムカデ型形態と円筒型形態を示す。機体は5リンクで構成され、バッテリーやマイコン、サーボモータが内蔵されている。不整地ではムカデ型形態での多脚歩行、整地では円筒型形態での転がり移動を想定している。そのため、周辺環境に応じて使い分けが可能である。

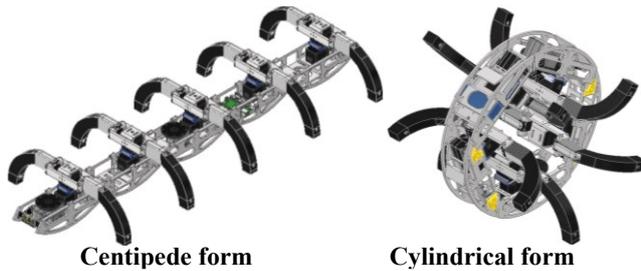


Fig. 2 Schematic of the developed robot prototype

#### (2) 胴体構造

リンク間には受動関節を採用し、瓦礫や段差などの不整地でも歩行できるようにした。Fig. 3 に障害物を避ける胴体を示す。この受動関節により、胴体は地面の凹凸や傾斜に適応できる。また、リンクの角度は地面との相互作用により制御されるため、追加の制御は必要としない。

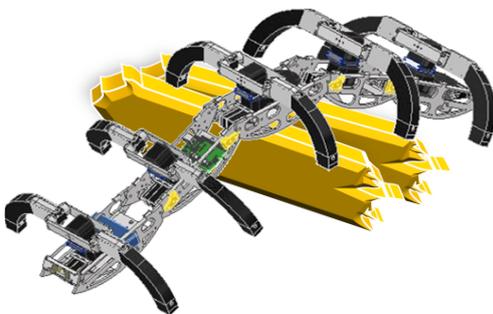


Fig. 3 The robot overcoming an obstacle

#### (3) 機体変形の仕組み

機体変形に用いるプーリは2つ設置し、胴体上端に通し

てある糸を繋げてある。Fig. 4 にプーリの仕組みを示す。また、頭部と尾部に磁石を設置している。Fig. 5 に示すように、頭部の磁石は可動式であり磁石をずらして連結と解結をする。

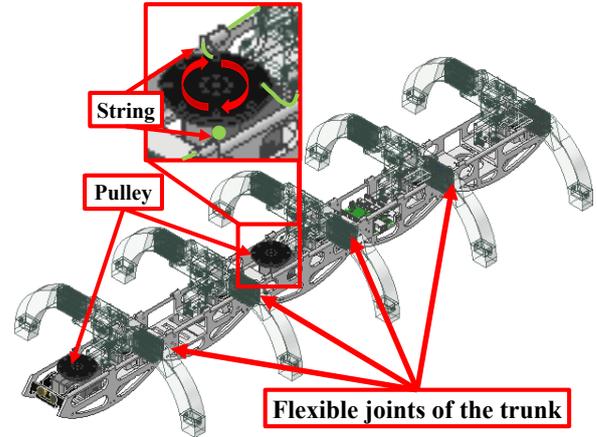


Fig. 4 Mechanism of the pulley

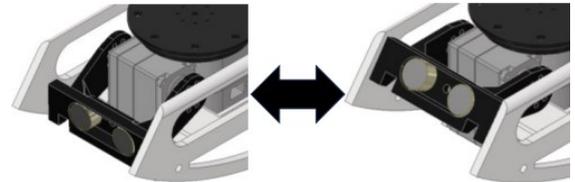


Fig. 5 Mechanism of magnetic coupling

#### (4) 脚部構造

脚部は硬直部分と柔軟部分で構成されている。着地時に糸が引っ張られると柔軟部分が収縮し剛性が増す。一方で、遊脚時に糸が緩む。これにより、地面に着地した時は剛性を出し、地面に着地していない遊脚時は柔らかくなる脚部を提案する。Fig. 6 に提案する脚部を、Fig. 7 に障害物に接触した時に折れ曲がる脚部を示す。ロボットが地面を蹴ることで得られる推進力と障害物に接触した時に受動的に曲がれる柔軟性を併せ持つ。

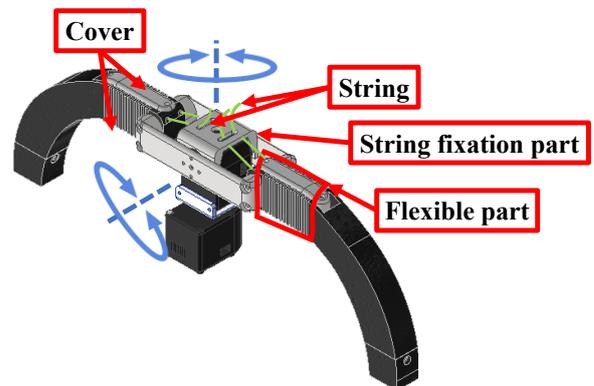


Fig. 6 Proposed leg

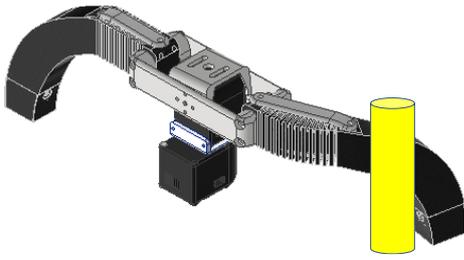


Fig. 7 Contact with an obstacle

### (5) ムカデ型形態の移動の仕組み

機体の安定歩行の為に、脚と地面の接触は常時3点は必要である。前進と後退の動きはそれぞれ式(1), (2)に示す。

$n$  はサーボ ID ( $0 \leq n \leq 9$ ) であり,  $\theta_v$  と  $\theta_h$  は、垂直方向と水平方向の動きの角度である。それぞれの脚の動きは Fig. 8 に示す。また、歩幅を大きくしすぎると前後の脚が干渉する問題がある。そこで、本機体は脚が干渉しない最大核角に設定した。(Fig. 9)

次に、左右方向への移動原理も述べる。奇数番目の脚部で曲がる側の地面を蹴り、偶数番目の脚で曲がる側の地面を引っかけることで方向転換が可能になる。

$$\begin{cases} \theta_v = \frac{\pi}{4} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}n\right), & \text{if } n \text{ is even} \\ \theta_h = -\frac{\pi}{6} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}n\right), & \text{if } n \text{ is odd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \theta_v = -\frac{\pi}{4} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}n\right), & \text{if } n \text{ is even} \\ \theta_h = -\frac{\pi}{6} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}n\right), & \text{if } n \text{ is odd} \end{cases} \quad (2)$$

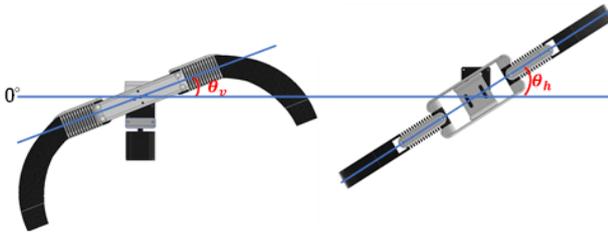


Fig. 8 Definition of the joint angle

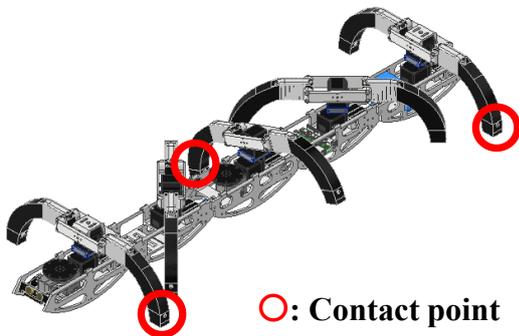


Fig. 9 Relation between the operating formula and legs

### (6) 円筒型形態の移動の仕組み

胴体には各リンクに地面を蹴るサーボモータが5つ搭載されている。Fig. 10 に示すような動きで地面を蹴ることで、機体は前転と後転ができる。

次に、左右方向への移動原理も述べる。地面に接触しているリンクの脚部で曲がる側と反対側を蹴り上げることで方向転換が可能になる。なお、機体内に設置した角度センサにより、どのリンクが地面に接触しているかを判定している。Fig. 11 に示すように、円筒型形態時の横側から見た中心点を基準に  $72^\circ$  ずつ5段階に区切ることによって計測している。

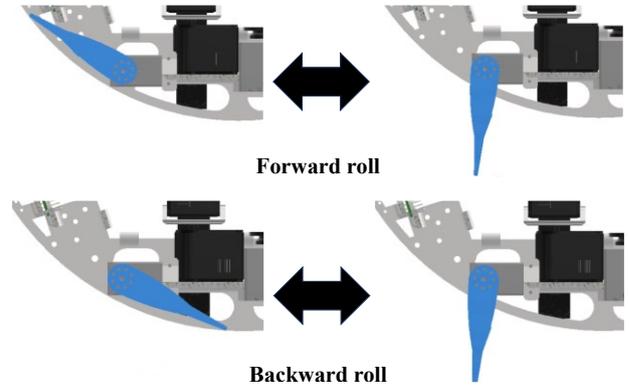


Fig. 10 Kick pattern

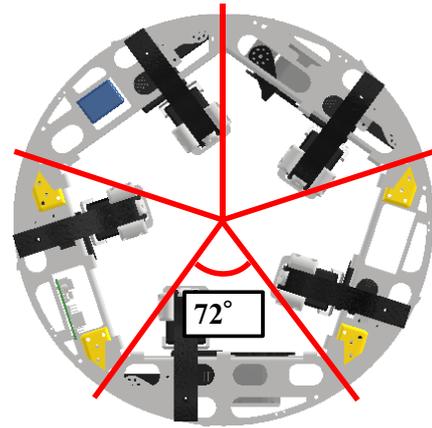


Fig. 11 Angle acquisition mechanism

### (7) システム構成

システム構成を Fig. 12 に示す。サーボモータはマイコン (Raspberry Pi Pico) からの角度指令で動作している。ワイヤレスコントローラは KRC-5FH、受信機は KRR-5FH とし、操縦はコントローラを用いて動作させる。プログラムの書き込みは有線接続した外部 PC から行う。

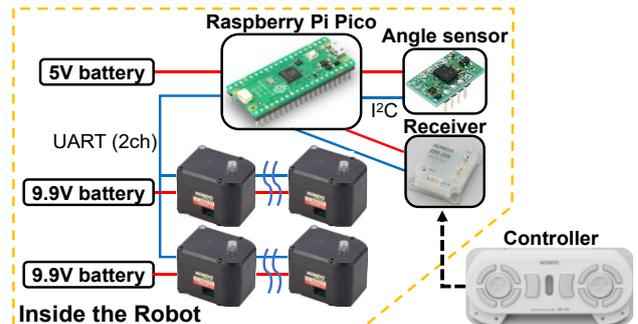


Fig. 12 An overview of the system configuration

#### 4. 開発した機体

機体部品はPLA樹脂で作製されており、3Dプリンタで出力した。制御機器は機体内部に搭載されている。開発した機体 (SHINAYAKA-L VII) と従来機体 (SHINAYAKA-L VI) の仕様を Table 1 に示す。また、開発した機体 (SHINAYAKA-L VII) を Fig. 13 に示す。

Table 1 Specifications of the robot

		VII	VI
Main body	Size (H×W×L) (cm)	14×33×10	15×50×120
	Diameter (cm)	34.5	
	Weight (kg)	3	5
	Number of legs	10 (5 pairs)	18 (9 pairs)
Motor for legs	Model number	KRS-4034HV ICS	KRS-4034HV ICS
	Number	14	18
Servo motor for pulley	Model number	KRS-5034HV ICS	
	Number	2	
Servo motor for linking	Model number	KRS-2542R2 HV ICS	
	Number	1	
Servo motor for kicking	Model number	KRS-2572R2 HV ICS	
	Number	7	
Power supply for motors	Model number	F3-1450 (Li-Fe)	H-360-12
	Voltage (V)	9.9	12
Power supply for microcomputer	Model number	DE-M01L-6030	
	Voltage (V)	5	
Microcomputer	Model number	Raspberry Pi Pico	ThinkPad X270
Angle sensor	Model number	BNO055	
Maximum speed (m/s)	Centipede form	0.29	0.083
	Cylindrical form	0.72	

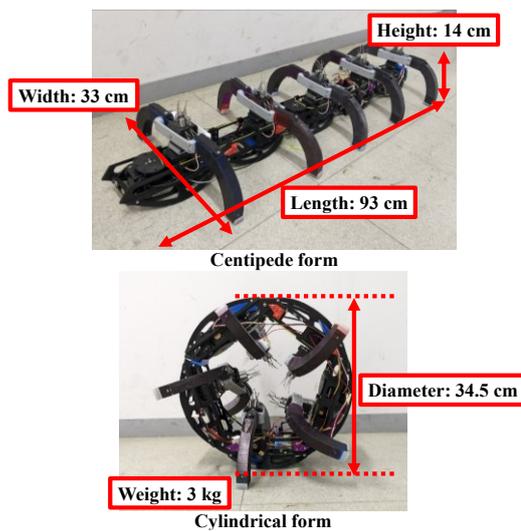


Fig. 13 SHINAYAKA-L VII

#### 5. 実験

##### (1) 機体の変形

静止した状態からムカデ型形態と円筒型形態へそれぞれ変形することを確認した。各形態から約2秒で移行が可能であった。Fig. 14 に実験結果を示す。

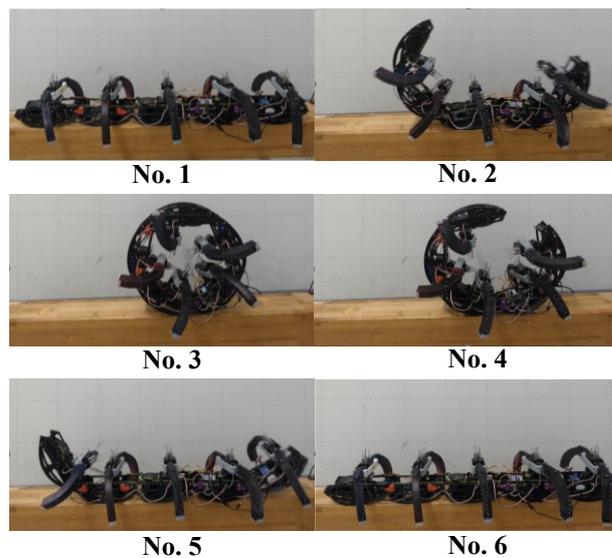


Fig. 14 Experimental results of the robot transformation

##### (2) 平地での転がり移動

平地での円筒型形態での転がり移動 (前進と後進) が可能であることを確認した。この時、脚部のサーボモータはセンターポジションに固定し支えになっており、蹴り上げ用サーボモータで地面を蹴ることで移動している。この時の最高速度は0.72 m/sであった。Fig. 15 に実験結果を示す。

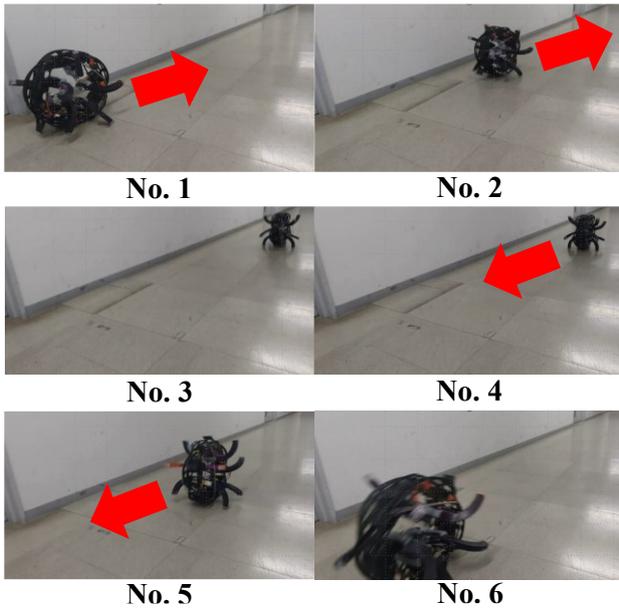


Fig. 15 Experimental results of the robot rolling on flat ground

### (3) 瓦礫上の移動

瓦礫上で胴体と脚部が受動的に適應するかの確認を行った。この時、ロボット操作は前進の制御しか行っていない。大小さまざまな木片を無作為に置いて実験を行った。Fig. 16 に実験結果を示す。

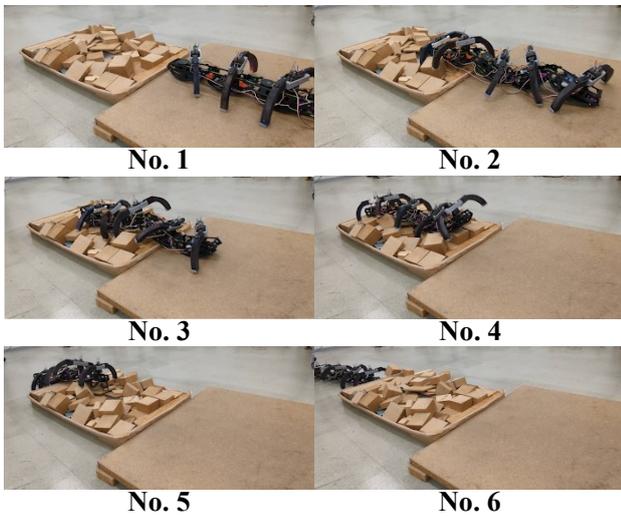


Fig. 16 Experimental results of the robot moving over rubble

### (4) 段差の移動

胴体の受動連接部が段差に受動的に適應するかの確認を行った。段差の高さは9 cmである。Fig. 17 に実験結果を示す。

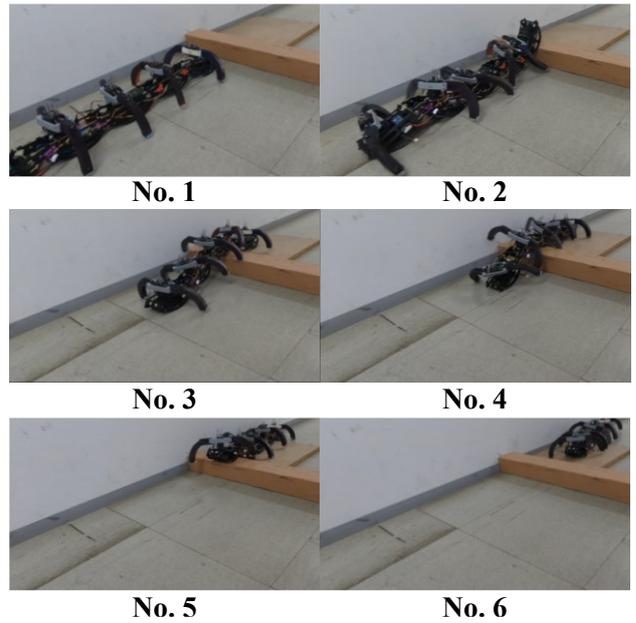


Fig. 17 Experimental results of the robot moving over a step

### (5) 脚部の剛性切替

開発した柔軟脚を遊脚時と着地時にそれぞれ垂直方向に引っ張ることで剛性が切り替わるかどうかを確認した。Fig. 18 に実験結果を示す。遊脚時は内部に通してある糸を引っ張らず、0.07 kgfの力で簡単に脚が折れ曲がった。着地時は糸が胴体側に引っ張られ、柔軟部が硬くなり、折れ曲がるのに必要な力は2.05 kgfであった。以上より、提案した剛性切替機構が実現されていることを確認した。

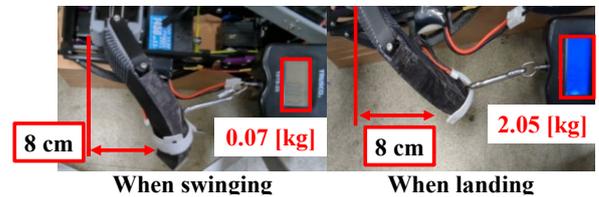


Fig. 18 Switching of leg stiffness

### (6) 狭小部の移動

脚部の柔軟性が発揮され機体幅未満の隙間も移動可能かどうかを確認した。ポール間の幅は21 cmである。Fig. 19 に実験結果を示す。この時、機体幅の約63.6%の移動が可能であった。

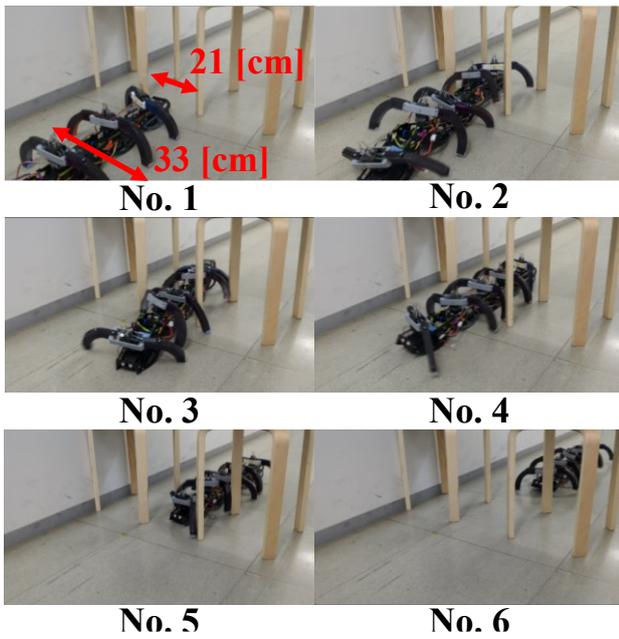


Fig. 19 Experimental results of the robot moving in a narrow space

### (7) 旋回移動

ムカデ型形態と円筒型形態で静止状態から左右への90°旋回についてそれぞれ確認した。実験結果を Fig. 20 と Fig. 21 に示す。ムカデ型形態では約20秒での旋回が可能であった。また、円筒型形態では約7秒での旋回が可能であった。

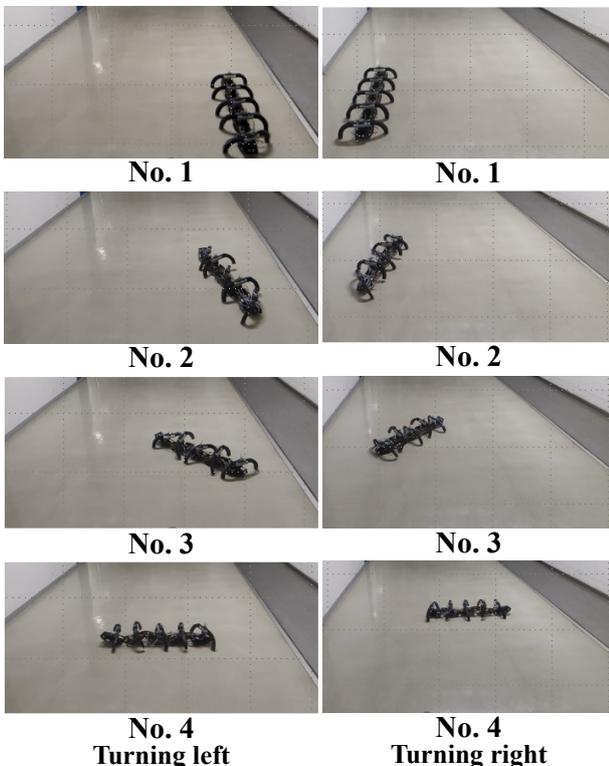


Fig. 20 Experimental results of turning movement in its centipede form

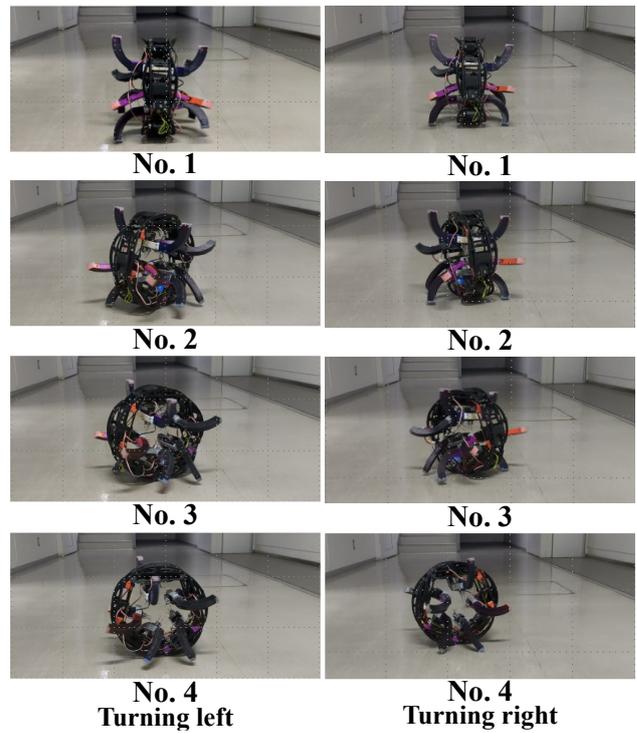


Fig. 21 Experimental results of turning movement in its cylindrical form

## 6. 結論

本論文では、移動速度と不整地での移動性能の向上を目指したムカデ型形態と円筒型形態に変形可能な多脚型ロボットと剛性が自動的に切り替わる脚部提案を行った。実験結果より、開発した機体が従来機体の約8.7倍の速度で移動できることを確認した。機体の動作は、マイコンによる制御が単純な歩行パターンの繰り返しに限定されており、従来の多自由度制御に必要な膨大な計算量を回避している。その一方で、胴体や脚の柔軟性を活かし、身体と環境との相互作用により、複雑で適応的な振る舞いが受動的に生じる機構を備えている。この仕組みにより、単純な歩行パターンがサーボモータに入力されても、ロボット全体としては複雑な振る舞いが実現された。

今後は、人間の歩行速度である4km/h程度を目指し機体の更なる移動速度の向上に努めていきたい。

**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。また、本研究の一部は、JSPS 科研費22K12155 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] F. Matsuno and Y. Uo, "Current trends in research and development of rescue robot systems," Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 129, no. 4, pp. 232–236, 2009

- [2] R. R. Murphy, "International cooperation in deploying robots for disasters: Lessons for the future from the Great East Japan Earthquake," *Journal of the Robotics Society of Japan* vol. 32, no. 2, pp. 104–109, 2014.
- [3] S. Tadokoro, "Technical challenge of rescue robotics," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 28, no. 2, pp. 134–137, 2010.
- [4] R. Murphy, "Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue", *Intelligent Systems and Their Applications*, IEEE, INTELLIGENT SYSTEMS, pp. 14–19, 2000.
- [5] J. Tanaka, K. Suzumori, M. Tanaka, T. Kanda, and M. Mori, "A Mobile Jack Robot for Rescue Operation" *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 99-104, 2005.
- [6] K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni, A. Naaktgeboren, "Differentiable and piecewise differentiable gaits for snake robots", *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1864-1869, 2007.
- [7] M. Arai, T. Takayama, S. Hirose, Development of Souryu-III: Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, Vol.1, 52-57, 2004
- [8] A. Kamimura, H. Kurokawa, "High-step climbing by a crawler robot DIR2 - realization of automatic climbing motion -", *Intelligent Robots and 43 Systems*, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, 618 - 624, 2009.
- [9] H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, S. Tsukui, H. Igarashi, and F. Matsuno, "Development of a unit type robot [KOHGA2] with stuck avoidance ability", in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, 2007, pp. 3877–3882.
- [10] E. Rohmer, K. Ohno, T. Yoshida, Konayagi, S. Tadokoro, "Integration of a sub-crawlers' autonomous control in Quince highly mobile rescue robot", 2010 IEEE/SICE International Symposium on, System Integration (SII), 78-83, 2010.
- [11] K. Nishigai, K. Ito, "Control of multi-legged robot using reinforcement learning with body image and application to a real robot", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2511 - 2516, 2011.
- [12] P. Birkmeyer, K. Peterson and R. S. Fearing, "DASH: A dynamic 16g hexapedal robot," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, 2009, pp. 2683-2689
- [13] D. Miaki, Y. Murakami, "Development of a multi-leg type micro rescue robot for disaster victim search", *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1801-1806, 2011.
- [14] K. Osuka, T. Kinugasa, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, and A. Ishiguro, "Centipede Type Robot i-CentiPot: From Machine to Creatures," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.31 No.5, pp. 723-726, 2019.
- [15] Dooyeol Koh, Jaemin Yang and Soohyun Kim, "Centipede robot for uneven terrain exploration: Design and experiment of the flexible biomimetic robot mechanism," 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, Tokyo, Japan, 2010, pp. 877-881.
- [16] Y. Ozkan-Aydin, B. Chong, E. Aydin and D. I. Goldman, "A systematic approach to creating terrain-capable hybrid soft/hard myriapod robots," 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), New Haven, CT, USA, 2020, pp. 156-163
- [17] H. Maruyama and K. Ito, "Semi-autonomous snake-like robot for search and rescue," *Advanced Robotics*, vol. 30, issue 7, pp. 489–503, 2016.
- [18] M. Masuda and K. Ito, "Semi-autonomous centipede-like robot with flexible legs," *Proc. of IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics 2014 (SSRR2014)*, October 27–30, 2014, Hokkaido Japan.
- [19] K. Aihara and K. Ito, "Adaptive switching mechanism of leg stiffness for multi-legged robot" *Proceeding of IEEE International conference on International Electrical Engineering Congress 2018(iEECON2018)*, March 7-9, 2018, Krabi THAILAND.
- [20] Y. Aso, K. Aihara and K. Ito, "Multi-legged robot for rough terrain: SHINAYAKA-L VI," 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS), Kusatsu, Japan, 2019, pp. 136-141