

# TAOYAKA-VII：柱状物の登攀と 不整地の歩行が可能な多脚型ロボットの開発

TAOYAKA-VII：A MULTI-LEGGED ROBOT CAPABLE OF  
CLIMBING COLUMNAR OBJECTS AND WALKING ON ROUGH TERRAIN

富川翔英

Shoei TOMIKAWA

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 recent years, robots have applied not only to known environments such as factories, but also unknown complex environments, such as rescue missions and agriculture. In our previous works, we have developed a six-legged robot that can climb various columnar objects without measuring their shape and size by imitating an octopus-like behavior. In addition, it could walk on a flat horizontal plane. However, its legs were not sufficiently stiff to enable rough terrain such as rubbles and steps. The goal of this research is to improve our previous robot to adapt it to various environments such as steps and rough terrain. Experiments were conducted, and as the results, we confirmed that the robot can climb columnar objects as well as walk on rough terrain and steps.

**Key Words:** Six-legged robot, climbing robot, octopus-like behavior, rough terrain.

## 1. はじめに

近年、ロボットは工場のような既知環境だけでなく、災害現場での救助作業や農業といった未知環境での活躍が期待されている。しかし、従来のロボットを未知環境で動作させようとすると、環境を正確に把握する必要があり、多くの自由度が必要となる。それゆえ、情報量が莫大になり、実時間での制御は非常に困難である[1-8]。

一方で、現実世界に住む生物は人間よりも知能が劣っているにもかかわらず、複雑な環境に適応することができる。これは生物が自身の身体を巧みに振舞い、環境と相互作用することで実環境に適応しているためである。

例えば、タコは柔らかい脚を根元から先端まで徐々に曲げるだけで、さまざまな未知の形の物体を覆い、つかむことができる。タコの脚の動きは、柔らかい脚と物体との相互作用によって制御されるため、物体の形状を測定したり、制御するための計算を必要としない。

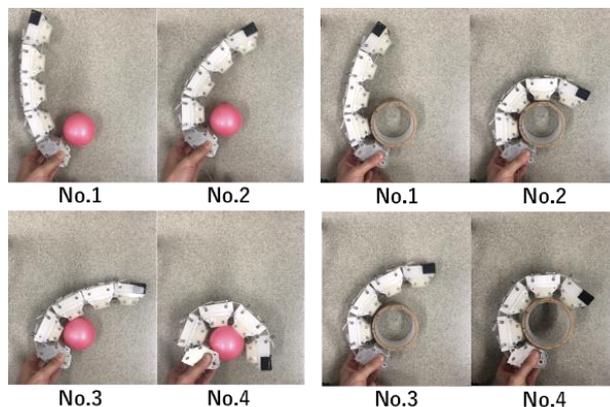
従来研究では、タコの脚の振る舞いに着目し、形状や材質によらず物体を把持することができる柔軟脚を搭載した多脚型ロボット (TAOYAKA-V) が開発され、柱状物の登攀と平面の歩行が可能となった[9-13]。

しかし、従来機体は歩行時にバランスが取りにくいいため、段差や不整地での歩行や障害物を走破するといった複雑な環境で動作させることは不可能であった。

本研究では、従来機体であるTAOYAKA-Vの歩行機能を改善し、段差や不整地、障害物といった従来よりも複雑な環境に適応し、走破できるようにすることを目的とする。

## 2. 従来研究

図1にタコの振る舞いを再現した柔軟脚による把持実験を示す。図1のように、形状や材質によらず物体を把持することができる柔軟脚が開発された[13]。



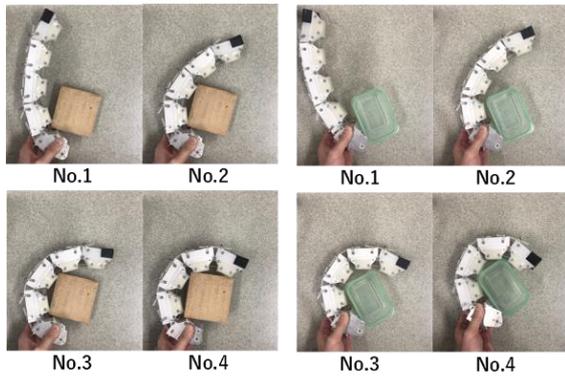


図1 柔軟脚による把持実験

図1で作製した柔軟脚をロボットに搭載することで、図2のようにパイプのような柱状物の登攀と平面の歩行が可能なる多脚型ロボット「TAOYAKA-V」が開発された [13]。



図2 従来機体 (TAOYAKA-V)

しかし、従来機体のTAOYAKA-Vは歩行時の重心が高くなり、バランスが取りにくいため、段差や不整地といった複雑な環境で歩行することができないという問題がある。

本研究では、この問題を解決するために従来機体の歩行機能を改善し、より複雑な環境においても動作できるようにすることを目的とする。

### 3. 提案機体

#### (1) 概要

図3に提案機体 (TAOYAKA-VII) を示す。



図3 提案機体 (TAOYAKA-VII)

表4に提案機体の仕様を示す。

表4 提案機体の仕様

長さ[cm]	125
重さ[kg]	4.2
高さ[cm]	15
幅[cm]	61
電源	直流安定化電源12[V] 36[A]
脚を駆動するモータ	KONDO KRS-4034, KRS-5034
糸を引くモータ	TAMIYA 4速ウォームギアボックスH.E.

受動関節を備えた6本の脚があり、各脚は2つのサーボモータによって垂直、水平に動かすことができる。胴体は柔軟な蛇腹でできており、先端に取り付けられたサーボモータを動かすことで伸縮する。それぞれの動作は後で詳しく説明する。

#### (2) 作製した柔軟脚

図5に作成した柔軟脚を示す。

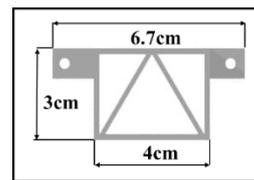


図5 作製した柔軟脚

節はプラスチック製で、軽量かつ強度のあるトラス構造を採用した。

図6に柔軟脚の詳細を示す。

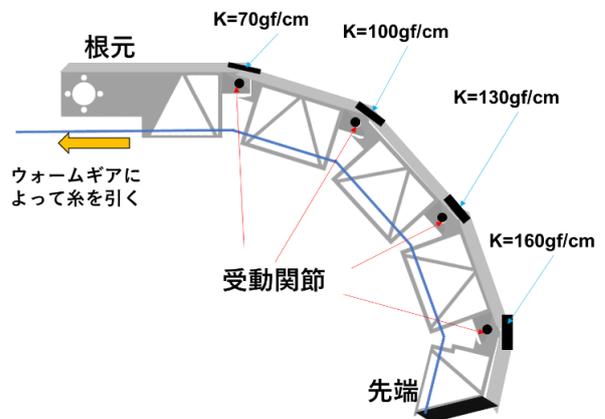


図6 柔軟脚の詳細

柔軟脚には受動関節がついており、糸を引くことで脚を曲げることができる。各節のつなぎ目には弾性力の異なるシリコンゴムがついており、脚が閉じる角度はシリコンゴムの弾性力に依存する。根元から先端にかけて、弾性力が大きくなるようにシリコンゴムをつけているため糸を引くだけで柔軟脚はタコのような振る舞いをする。

### (3) 把持の原理

図7に柔軟脚がパイプを把持する様子を示す。

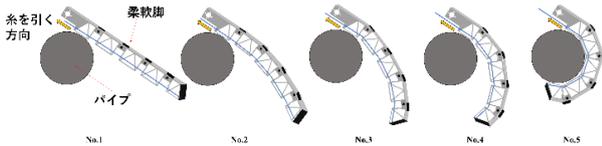


図7 パイプを把持する様子

図8に把持時のウォームギアの動きを示す。

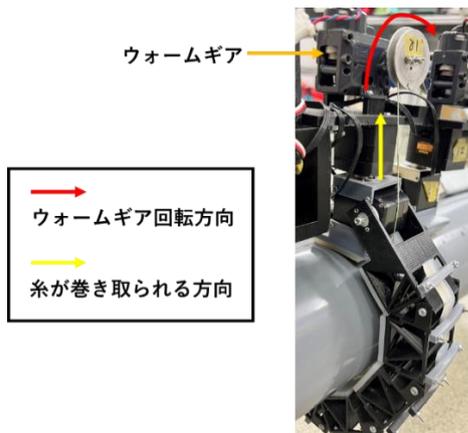


図8 ウォームギアの動き

ウォームギアを回転させることで、糸が巻き取られる。その結果、柔軟脚が根元から先端にかけて順番に閉じてパイプを掴むことができる。図9に実際の柔軟脚がパイプを掴む様子を示す。

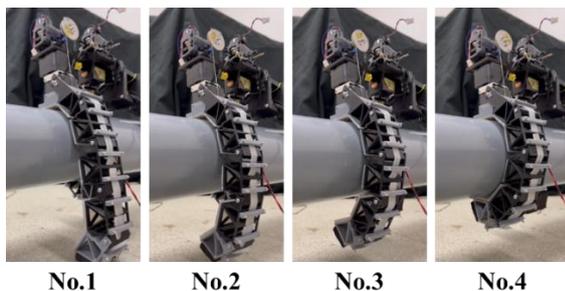


図9 実際に把持する様子

### (4) 歩行時の柔軟脚の動作方法

柔軟脚の先端にはスポンジがついており、歩行時にスポンジが接地し、摩擦が生じることで前進する力が生み出される。また、歩行中は糸を引き切った状態にすることで柔軟脚は固定される。図10に前脚を示す。

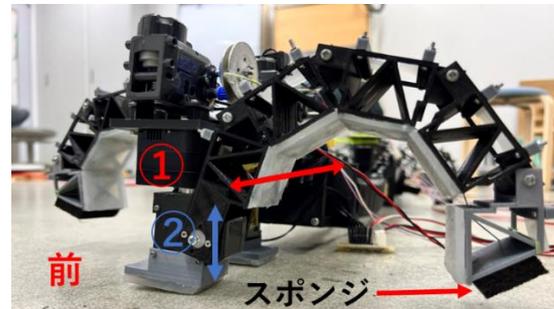


図10 前脚

柔軟脚は1番のサーボモータによって水平に、2番のサーボモータによって垂直に動く。また、これらの動きを組み合わせることでロボットは歩行することができる。

図11に水平方向の動き、図12に垂直方向の動き、図13に組み合わせた動きを示す。

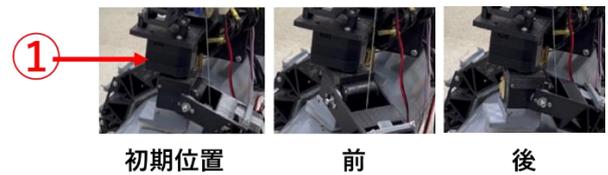


図11 水平方向の動き

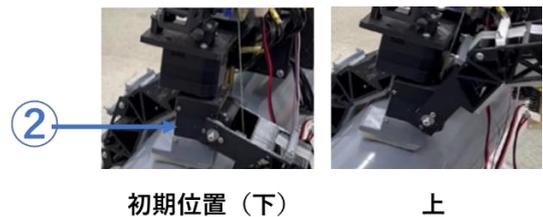


図12 垂直方向の動き

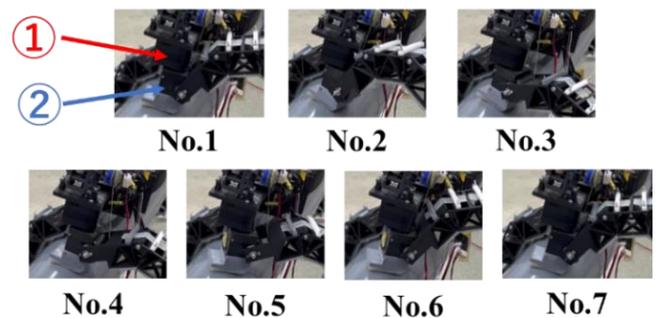


図13 組み合わせた動き

### (5) 前胴体の機構

図14に前胴体の機構を示す。ロボットの胴体は蛇腹の両端にある4つのサーボモータを動かすことで伸縮できる。また、図15に前胴体が縮む様子を示す。

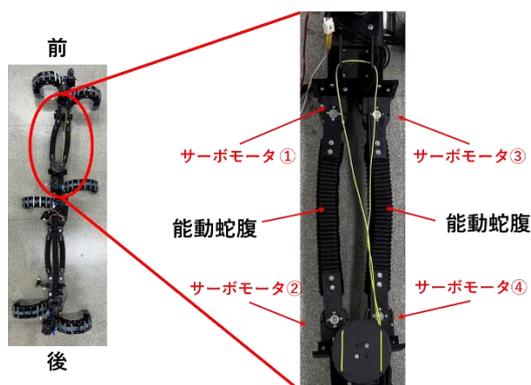


図14 前胴体の機構

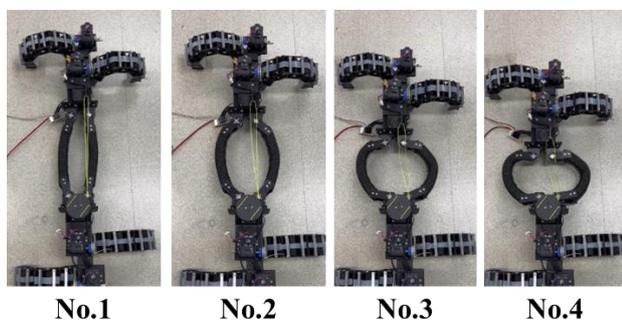


図15 前胴体が縮む様子

### (6) 後胴体の機構

図16に後胴体の機構を示す。後胴体も前胴体と同様に4つのサーボモータによって動く。後胴体は3本の蛇腹で構成されており、3つのうち2つは能動蛇腹、1つは受動蛇腹である。この受動蛇腹は後胴体を縮ませるときに、後脚が反ることを防ぐ役割がある。また、図17に後胴体が縮む様子を、図18に横から見た様子を示す。



図16 後胴体の機構

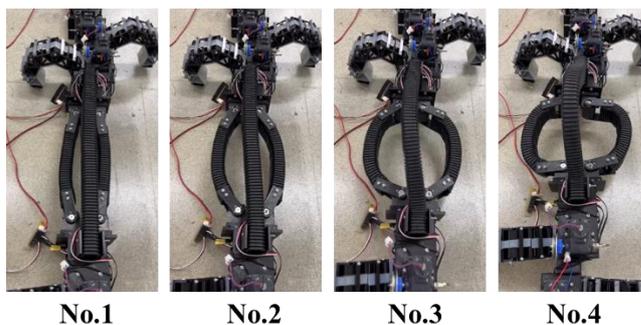


図17 後胴体が縮む様子

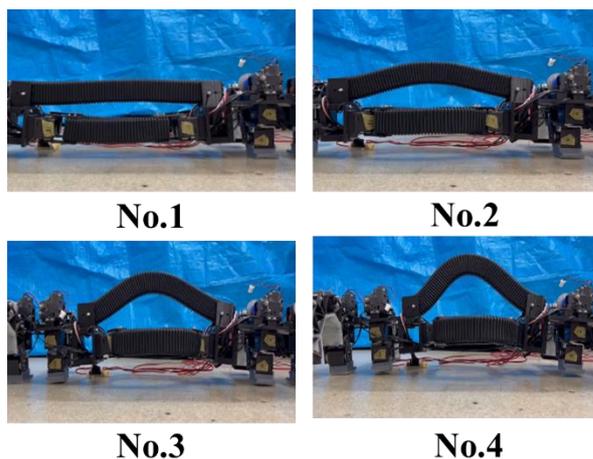


図18 横からの様子

### (7) 前脚持ち上げ機構

10cmを超える障害物を走破するために、図19に示す前脚持ち上げ機構を提案する。サーボモータが前胴体と中脚の間に取り付けられており、時計回りにサーボモータを回転させることで糸が巻き取られる。その結果、前脚を持ち上げることができる。この機構を用いることで、10cmを超える障害物の走破が可能になった。図20～図22には前脚持ち上げ機構を後ろから見た様子、前から見た様子、上から見た様子を示す。

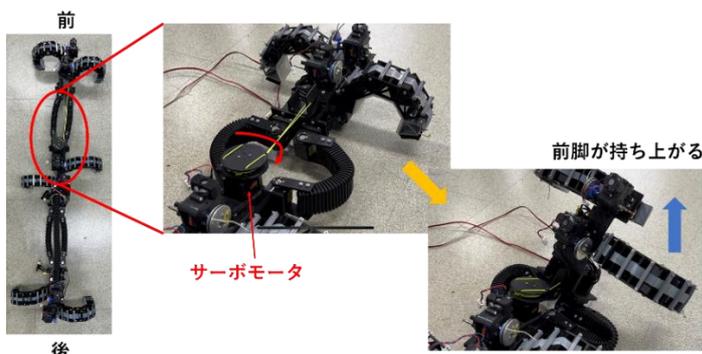


図19 前脚持ち上げ機構

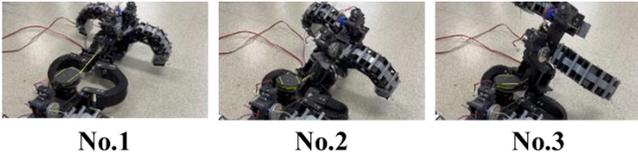


図 2 0 後ろからみた様子

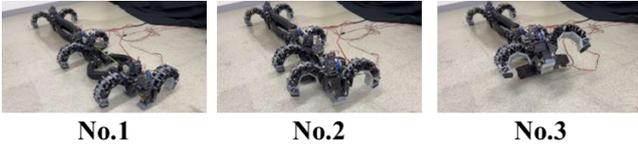


図 2 1 上からみた様子

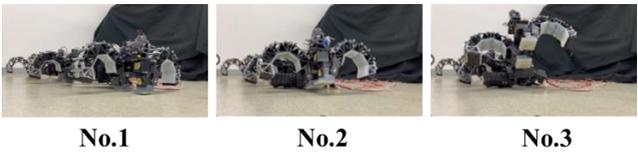


図 2 2 前からみた様子

(8) 登攀パターン

図 2 3 に登攀パターンを、図 2 4 にタイミングチャートを示す。従来機体と同様にロボットは物体を掴み、離す動作と胴体を伸縮させる動作を繰り返すことで柱状物を登ることができる。

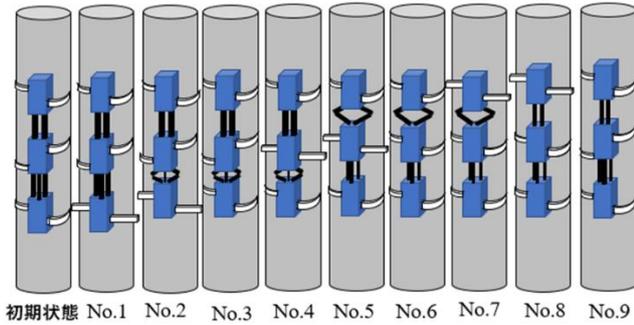


図 2 3 登攀パターン

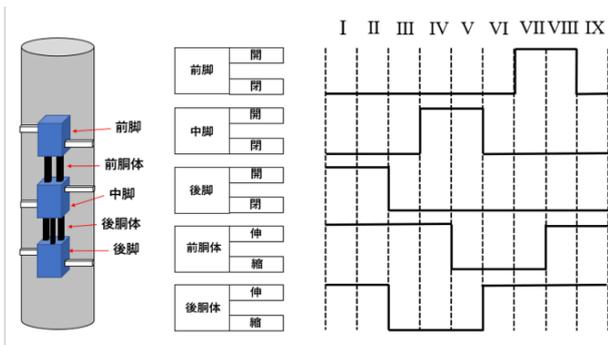


図 2 4 タイミングチャート

(9) 歩行パターン

図 2 5 に従来機体が歩行している様子を示す。従来機体は、常に 5 脚で機体を支えながら 1 脚ずつ脚を前に出して前進するという歩行パターンだったが、この方法は機体全体の重心が高くなるためバランスがとれず、段差や不整地での歩行は不可能であった。



図 2 5 従来機体の歩行

この問題を解決するために図 2 6 に提案機体の歩行パターンを示す。安定した歩行を実現するために、初期状態では機体の底面が接地しており、前進するときのみ機体を持ち上げるという歩行パターンを採用した。この歩行パターンで歩行することで、平面だけでなく段差や不整地でも安定して歩行することが可能となった。また図 2 7 にタイミングチャートを示す。

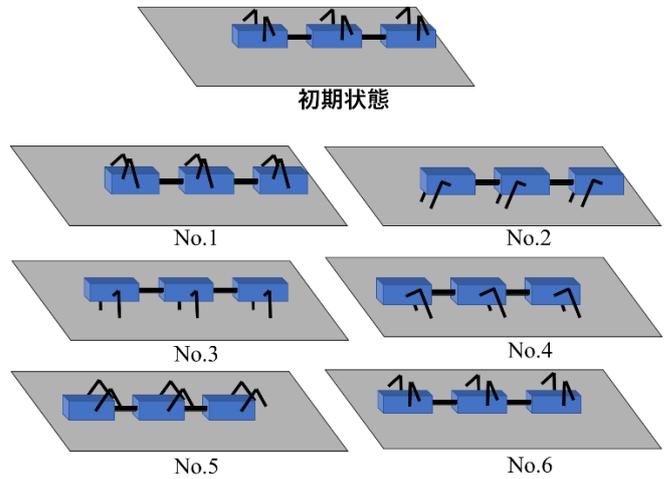


図 2 6 提案機体の歩行パターン

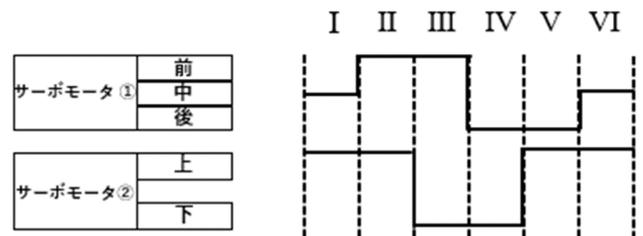


図 2 7 タイミングチャート

## 4. 実験

### (1) 登攀実験

直径 10cm のパイプを登る実験を行った。図 2 8 に登攀実験を示す。

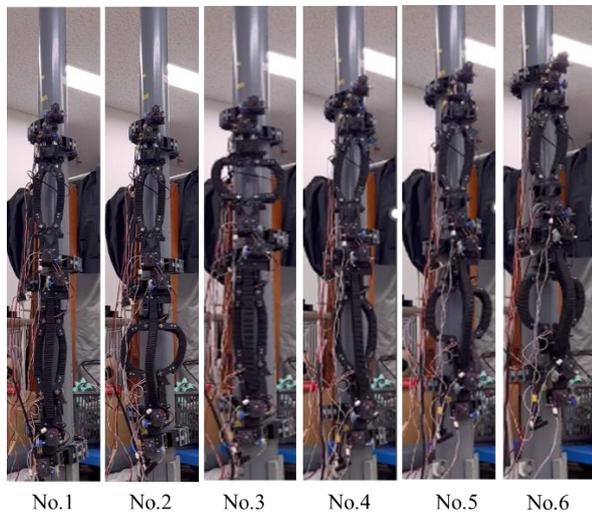


図 2 8 登攀実験

### (2) 平面歩行実験

平面での歩行実験を行った。図 2 9 に歩行実験の様子を示す。

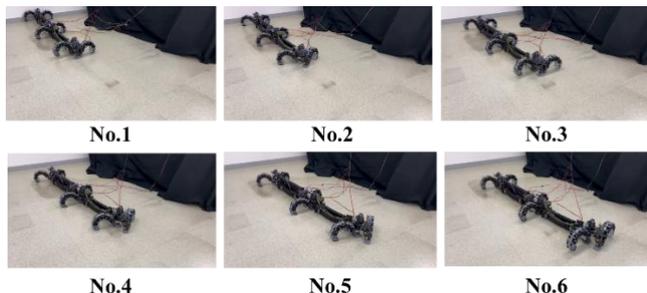


図 2 9 平面歩行実験

(1)、(2) の結果から、従来通り柱状物の登攀と平面の歩行が可能であることを確認した。

### (3) 不整地歩行実験

従来機体が歩行できなかった不整地での歩行が可能かを確かめるために不整地歩行実験を行った。

実験環境は木材やアルミの板、パイプなどがランダムに置かれた不整地である。図 3 0 に不整地歩行実験の様子を示す。

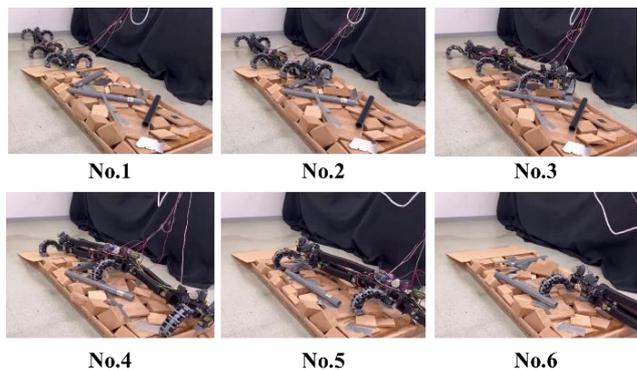


図 3 0 不整地歩行実験

### (4) 段差歩行実験

同じく、段差での歩行が可能かを確かめるために、図 3 1 に示す 5cm の段差を歩行する実験を行った。図 3 2 に段差歩行実験の様子を示す。



図 3 1 段差実験環境

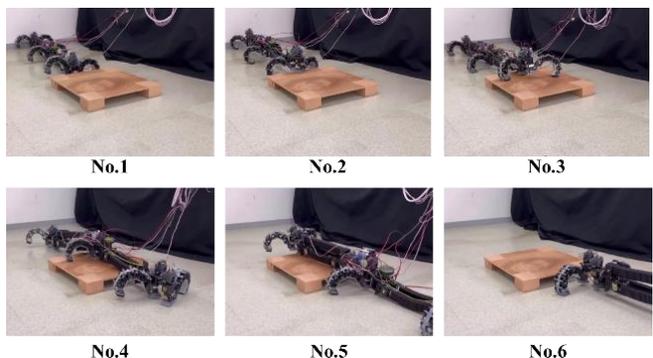


図 3 2 段差歩行実験

(3)、(4) の結果から、従来機体が歩行できなかった不整地や段差での歩行が可能であることを確認した。

### (5) 障害物走破実験 (パイプ)

前章で説明した「前脚持ち上げ機構」を用いてパイプを乗り越えることができるかを確かめるために、図 3 3 に示す高さ 12cm のパイプを走破する実験を行った。図 3 4 に走破実験の様子を示す。

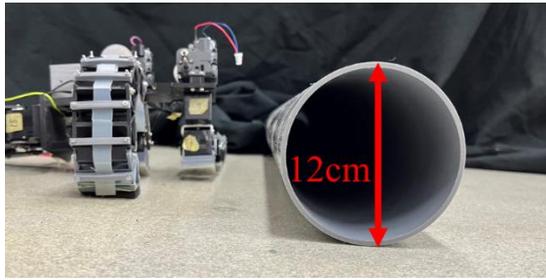


図 3 3 パイプ走破実験環境

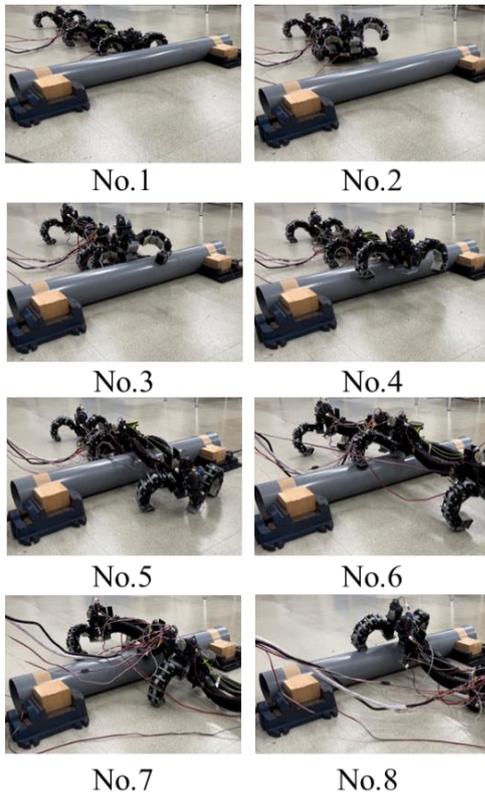


図 3 4 パイプ走破実験

**(6) 障害物走破実験 (角柱)**

同じく、「前脚持ち上げ機構」を用いて角柱を乗り越えることができるか確かめるために、図 3 5 に示す高さ 11cm の角柱を走破する実験を行った。図 3 6 に走破実験の様子を示す。

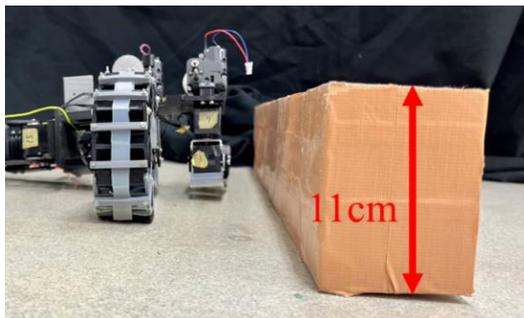


図 3 5 角柱走破実験環境

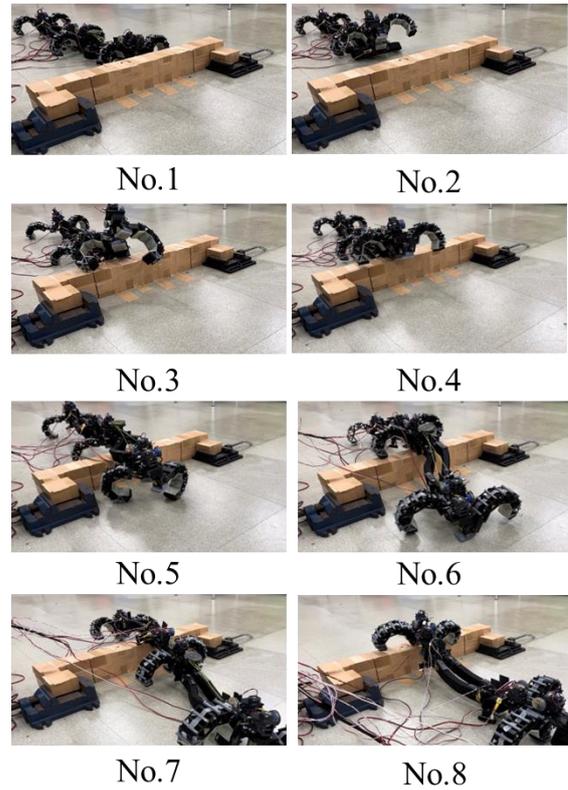


図 3 6 角柱走破実験

(5)、(6) の結果から、「前脚持ち上げ機構」を用いることで、従来機体が走破できなかった障害物の走破が可能であることを確認した。

**5. 結論**

本研究では、柱状物の登攀と平面の歩行が可能な従来の多脚型ロボット「TAOYAKA-V」に関して、段差や不整地、障害物といった従来よりも複雑な環境に適応し、走破できるようにすることを目標とした「TAOYAKA-VII」を開発し、歩行方法の改善や新たな機構の提案を行った。提案機体の有効性を確認するために実験を行った結果、柱状物の登攀や平面での歩行に加え、段差や不整地での歩行、障害物の走破に成功し、提案機体が従来機体よりも複雑な環境に適応できることを実証した。

今後はより高い障害物を乗り越えたり、平面から柱状物に移動して登攀ができるようにすることでロボットが適応できる環境をさらに拡大していく予定である。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 22K12155 の助成を受けたものである。

**参考文献**

[1] Maruyama H, and Ito K (2016), "Semi-autonomous serially connected multi-crawler robot for search and rescue," Advanced Robotics, pp.1-15.

- [2] Matsuno F, and Uo Y (2009), “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.
- [3] Sato Y, and Ito K (2016), “Semi-autonomous modular robot for maintenance and inspection,” *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS2016)*, June 26-30, 2016-Lisbon, Portugal, pp. 1–3.
- [4] Kawai Y, Ito K (2014), and H. Aoki, “Passive stabilizing mechanism for snake-like rescue robot,” *Proceeding of 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2014)*, December 10-12, 2014, Marina Bay Sands Singapore, pp. 1740-1745.
- [5] Tadokoro S (2010), “Technical challenge of rescue robotics,” *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 28, no. 2, p 134-137.
- [6] Ito K, and Ishigaki Y (2006), “Semiautonomous centipede like robot for rubble—Development of an actual scale robot for rescue operation,” *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, vol. 6, no. 2/3, pp. 75-83.
- [7] Aihara K and Ito K, “Adaptive switching mechanism of leg stiffness for multi-legged robot” *Proceeding of International Electrical Engineering Congress 2018(iEECON2018)*, pp.759-762, March 7-9, 2018, Krabi THAILAND
- [8] Paul C (2006), “Morphological Computation, Robotics and Autonomous Systems, Special Issue on Morphology,” *Control and Passive Dynamics*, August 2006, 54(8)-: 619-630.
- [9] Gutfreund Y, Flash T, Fiorito G, and Hochner B (1998), “Patterns of Arm Muscle Activation Involved in Octopus Reaching Movements,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 18, No. 15, pp. 5976-5987.
- [10] 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.
- [11] Ito K, Hagimori S (2017), “Flexible manipulator inspired by octopus: development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects,” *Artificial Life and Robotics*, Vol. 22, Issue 3, pp. 283-288.
- [12] Ito K, Aoyagi R, and Homma Y (2019), “TAOYAKA-III: A Six-Legged Robot Capable of Climbing Various Columnar Objects,” *JRM*, Vol. 31, No. 1, pp78-87.
- [13] Ito K, Ninomiya Y (2020), “TAOYAKA V: A multi-legged robot successfully combining walking and climbing mechanisms” *Artificial Life and Robotics* Vol.26, No.4, pp.97–102.