法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-12

柔軟な胴体と脚を有するムカデ型半自律ロボット

MASUDA, Masahiro / 増田, 昌浩

(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)
6
(発行年 / Year)
2016-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00013056

柔軟な胴体と脚を有するムカデ型半自律ロボット

SEMI-AUTONOMOUS CENTIPEDE-LIKE ROBOT WITH FLEXIBLE BODY AND LEGS

増田昌浩
Masahiro MASUDA
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 a centipede. The thin shape enables it to move into narrow spaces, and its length and many legs endow it with high mobility. However, when designing its robotic counterpart, these features cause operational disadvantages. In general, it is extremely difficult to control the many degrees of freedom adapting to complex environments such as rubble. The main objective of our research was determining how to address this disadvantage without losing the benefits. We observed the movements of a real centipede and found that the key to realizing this is flexibility. In this study, we propose a flexible mechanism for a multi-legged robot that can adapt to a rubble environment.
***Key Words** : centipede, flexibility, multi-legged*

１．はじめに

近年，複雑な実環境で活動可能なロボットの活用が注目されており，瓦礫下の生存者探索を目的としたレスキューロボットの開発が盛んに行われている[1-7]．一般に従来のロボットの多くは，高い機動性を実現するためにクローラーを搭載しており，様々な障害物を走破することが可能である[1-4]．しかし，クローラーは砂地などの低摩擦環境下においては，空転により進行が困難となる問題が報告されている．また，草地やケーブルの散在する環境ではクローラーの車輪にこれらが巻き込まれることにより回転不能となり，同じく進行が困難となることが報告されている．これに対し，多脚ロボットは回転運動を伴わないため，草やケーブルの巻き込みが少なく，また，力を加える方向を自在に変化させることが可能であるため，低摩擦環境下での活動にも有利であり，レスキュー活動への応用が期待されている．一方，多数の足を瓦礫の複雑な形状に合わせて制御することは非常に困難である．そのため，高い走破性と狭小空間への侵入性を兼ね備えたロボットの実現には至っていない．

この問題に対し従来研究において，生物のムカデに注目し，ムカデの制御戦略を模倣した多脚ロボットを提案した［8-9]．ムカデは，環境の状態に左右されずに，絶えず多数の足を周期的に動かすことで，制御系が複雑となるという問題を回避する一方で，体幹や足の構造的な柔軟性により，環境の凹凸に受動的に適応することで高い走破性を実現している．

本研究では，我々の従来研究をさらに発展させ[8-9]，環境の状態に合わせて柔軟性が適応的に変化する柔軟脚を搭載することで，従来ロボットに比べ高い走破性と狭小空間への侵入性を兼ね備えたロボットの実現を目標とする．

２．ムカデ

高速度カメラを用いて，ムカデの振る舞いを観察し，脚の動きに波のような法則性を確認した．その歩行パターンを Fig.1 に示す． Fig.1 より，ムカデの脚は一定の周期で前部から後部へと波が伝播するような動きを行っていることが分かる．また，ムカデが凹凸を歩行する際の脚と胴体の動きを Fig.2 に示す．Fig.2 より，柔軟な胴体と脚が地面の隆起に適応することで，複雑な環境下での歩行を可能としていることが確認できる．我々は，ムカデの胴体および脚の柔軟性と規則的な歩行パターンに注目し，これらの特徴をロボットに模擬し，単純な機構で制御可能で実環境下でも適応的に振る舞えるムカデ型ロボットの開発を目標とする．

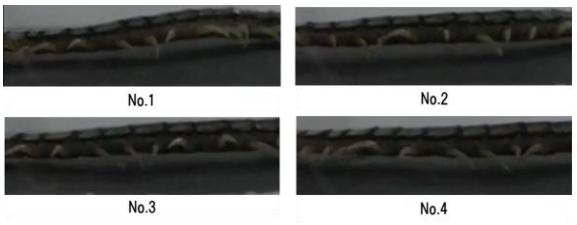

Fig. 1. Locomotive pattern

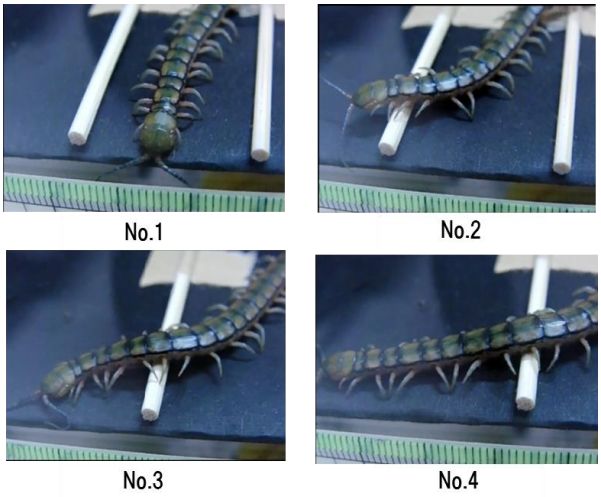

Fig. 2. Locomotion of rubble

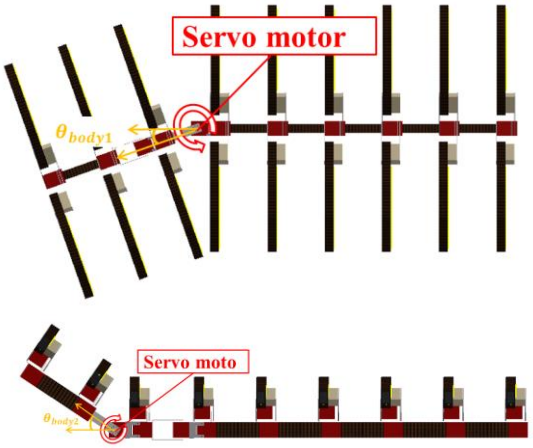

Fig. 4. Control of the passive joint

３． 提案機構

（１）体幹の構成

我々は，ムカデの柔軟な体幹を再現するために，複数のユニットをジャバラにより結合した機構を採用する．Fig.3 にロボットの構造図を示す．ジャバラは，受動的に障害を避ける柔軟性と，体幹のねじれを防止させることが可能である．機体の前方には，左右と上下の方向転換させるためのモータが設置されている．Fig.4 に示すように，モータが回転することで，柔軟性を残したまま変形し，進行方向を変えることができる．この機構では， 2 自由度を制御するだけで，多自由度のロボットの進行方向を制御することが可能である．また，この際，各関節の柔軟性は保持されていることから，各関節は環境の凹凸に対して受動的かつ適応的に運動し，明示的な制御を行うことなく，高い走破性を実現することができる．

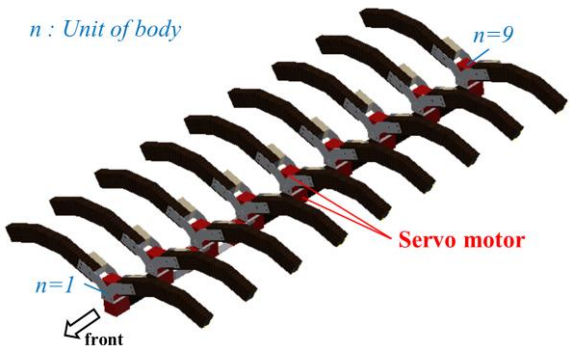

Fig. 3. Structure of the body

（２）脚の機構

本研究では，障害物に接触した際にそれを受動的に回避するための柔軟性と，体幹を支えるための剛性を併せ持つ脚の実現を目標とする．この柔軟脚を実現するため，我々はアーチ構造を採用する．脚の機構を Fig.5 に示す．脚は 3 つの木材ブロックで構成される．これらの木材ブロックは，ジャバラで補強され，側面に張られたワイヤーで固定している．また，機構に力が印可された際の柔軟な動きを Fig.6 に示す．この機構では，水平方向の力に対しては，木材ブロック間に隙間が生まれ，十分な柔軟性が確保される．また，垂直方向の力に対しては，アーチ構造によりブロックがかみ合い，十分な剛性が生まれる．これに加え，Fig.6 で示すように脚の背側にワイヤーが設置されているため，後部から力が印可されても，脚が湾曲することがない構造となっている．これにより，受動的に障害を避ける柔軟性と，機動力を地面に伝達する剛性を両立させることが可能である．

また，体幹の柔軟性と脚の柔軟性が環境の凹凸を吸収するため，各脚は規則的な運動を繰り返すだけで高い走破性を実現することが可能となる．本研究では，各ユニットに 2 つのモータを搭載し，マイクロコンピュータを用いて，これらのモータを制御する．ムカデの脚の運びを再現するため，各脚は Fig. 7 に示すように，①～④のように周期的に運動させ，$\pi/2$ [rad]の位相差で，前方の脚に伝播させることとする．十分な脚の上げ幅と，前後の脚が互いに干渉しない角度を考慮し，θ_{xi}，θ_{yi} の可動域を式(1)および(2)に設定した．

$$-\frac{\pi}{6} \le \theta_{xi} \le \frac{\pi}{6} \text{ [rad]} \quad (1)$$

$$0 \le \theta_{yi} \le \frac{\pi}{4} \text{ [rad]} \quad (2)$$

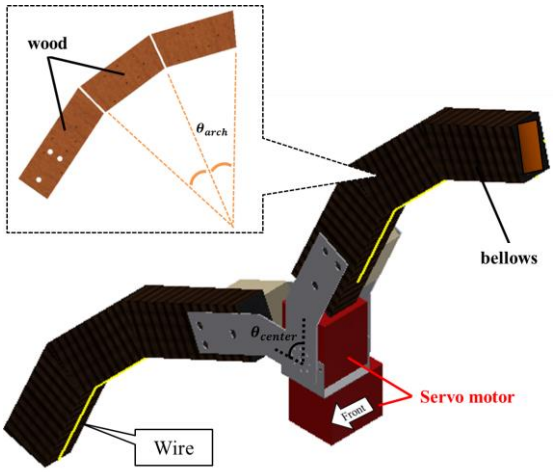

Fig. 5. Structure of the leg

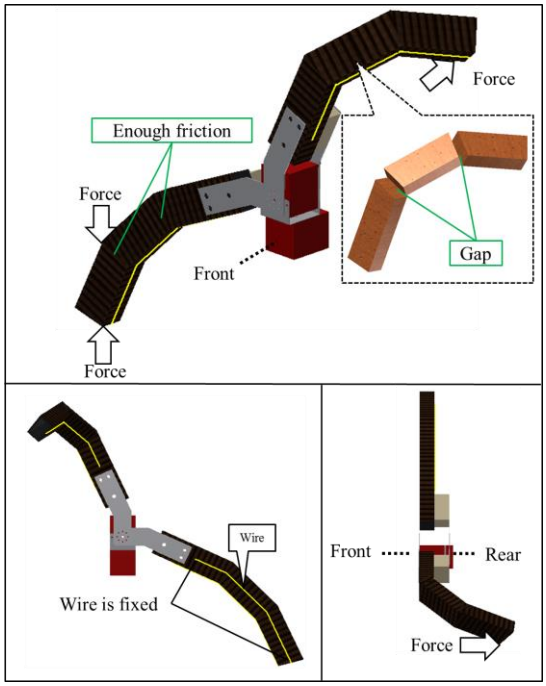

Fig. 6. Passive movement

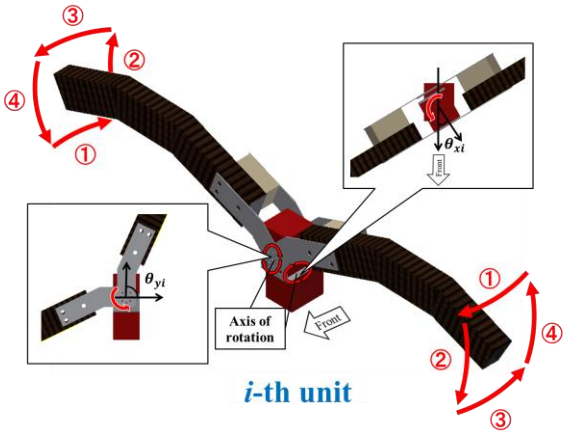

Fig. 7. Units that make up the robot

（３）開発した機体

提案機構の有用性を確認するため，プロトタイプを開発した．開発したロボットを Fig. 8 に示す．θ_{arch}は 20°に設定し，θ_{center}は 90°に設定した． 進行方向を制御するモータは，Fig. 9 に示すように無線のコントローラによって遠隔操作する．Fig.10 に提案機構に基づいて開発した柔軟な脚を示す．各脚は，ジャバラと 3 つの木材ブロックで構成されており，先端の隙間テープは地面と足との摩擦をより増加させる役割を果たしている．

開発した機体の仕様を TABLE Ⅰ および TABLE Ⅱ に示す．

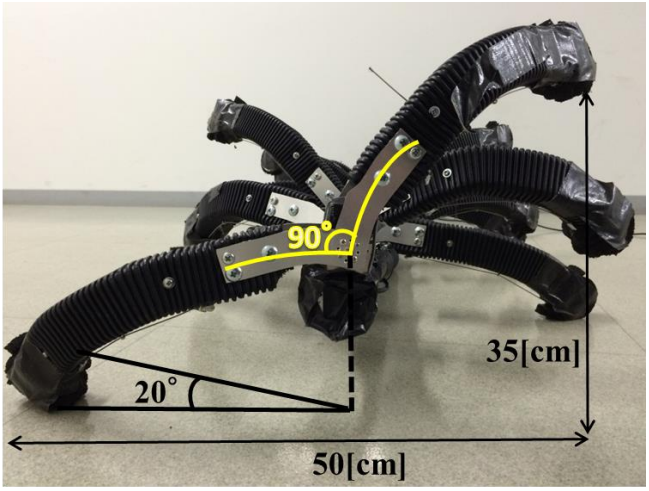

Fig. 8. Developed robot

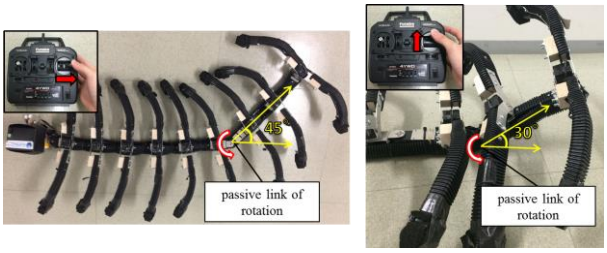

Fig. 9. Servomotor and active pulley

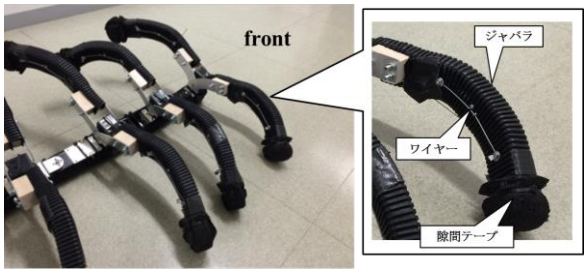

Fig. 10. Developed leg

TABLE I. ROBOT SPECIFICATIONS

Power supply for motors and circuit	POWER LANDVH type11.1 V,1300 mAh (Li-ion)
Motor for driving legs and rotating active pulley	KONDO KRS-4034HV ICS
Microcomputer	Renesas STK-7125

TABLE II. SPECIFICATION

	proposed mechanism
Length[cm]	125
Width [cm]	50
Height[cm]	40
Weight[kg]	4.5
Number of servos	20

４． 実験

まず初めに，柔軟脚の動作確認を行う．Fig.11 に柔軟脚の動きを示す．Fig.11(a)から，地面からの力に対し，アーチ構造により十分な剛性が確保されていることが確認できる. Fig.11(c)では, 力が正面から印加されると，脚は受動的に湾曲する様子を示している. 逆に, Fig.11(b)は足が地面を押す方向に力が印加されると脚に設置されたワイヤーにより，足は湾曲せず，推進力を地面に伝える様子を示している．以上のことから，目的とする柔軟脚を実現していることが確認できる．

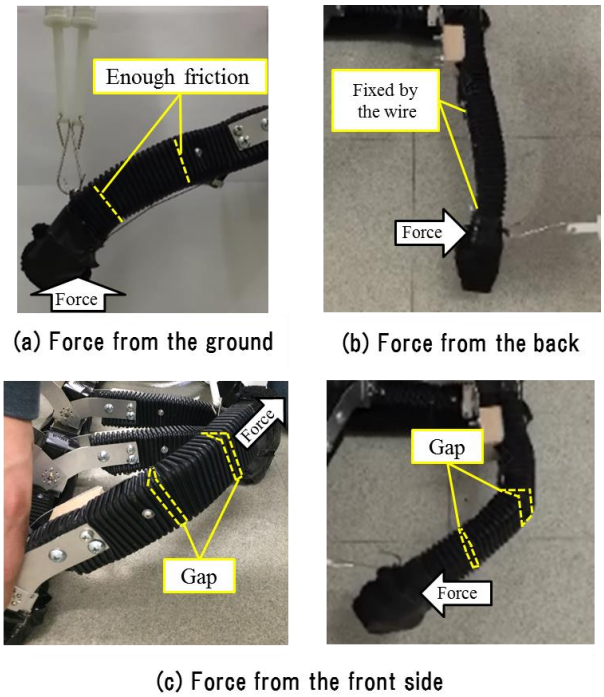

Fig. 11. Passive movement of flexible leg

次に，歩行パターンの確認を行う．Fig.12 に脚の動きを示す．この結果から，脚が波状運動を繰り返し行っている様子が確認できる．

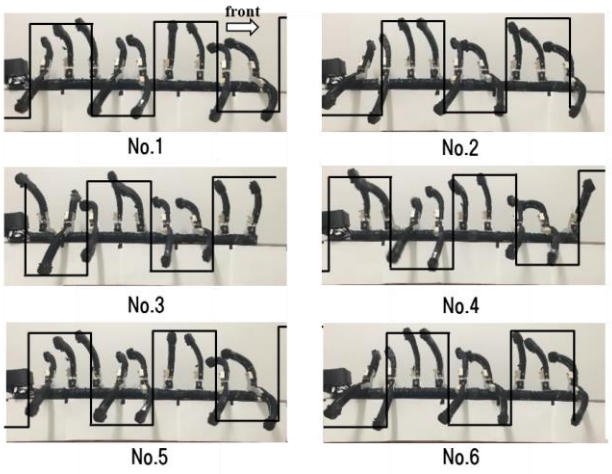

Fig. 12. Experimental results of observed locomotion patterns

次に，開発されたロボットの基本的な性能の検証実験として，段差および溝の走破性能を確認する．ロボットの操作は，上下左右の進行方向の制御のみとし，脚の操作などの特別な操作は行わない. Fig.13–15 に実現された動作の例を示す．また，TABLE III に走破可能な最大の大きさを示す.

TABLE III.EXPERIMENTAL RESULTS

Dent [cm]	**30**
Bump [cm]	**15**
Stairs [cm]	**11 × 30**

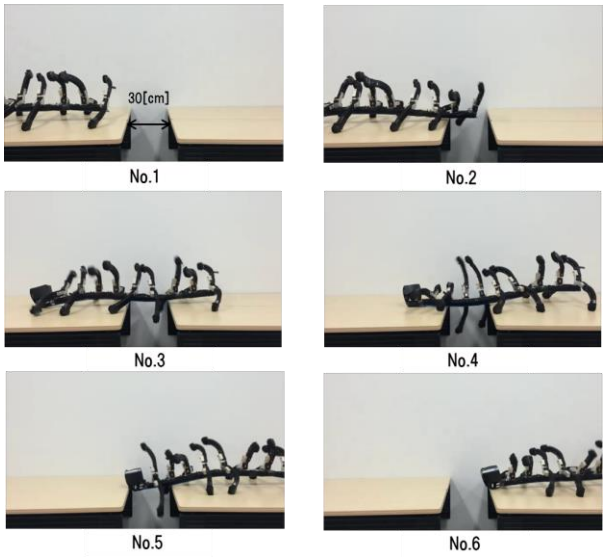

Fig. 13. Experiment results over an indentation

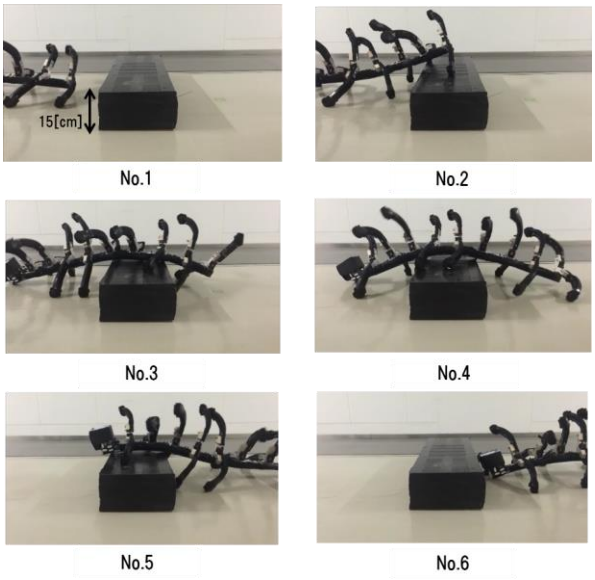

Fig. 14. Experimental results over a bump.

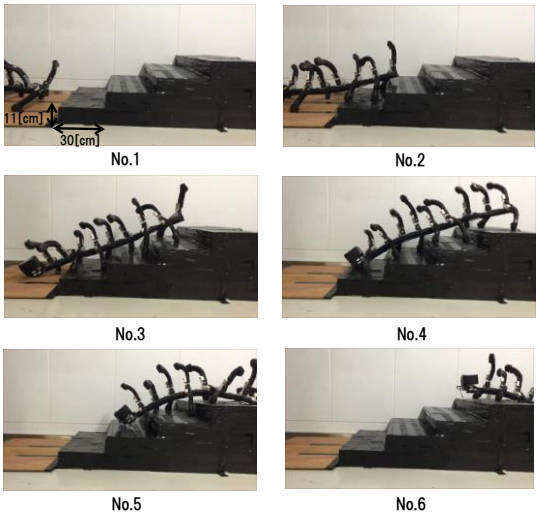

Fig. 15. Experimental results going up stairs

実験結果から，ロボットは上下左右 2 自由度の操作のみで段差や溝を走破可能であり，レスキューロボットに必要とされる高い走破性を有していることが確認できる．

次に，柔軟な脚の有用性を確認するため，狭小空間での実験を行う．Fig.16 に実験結果を示す．

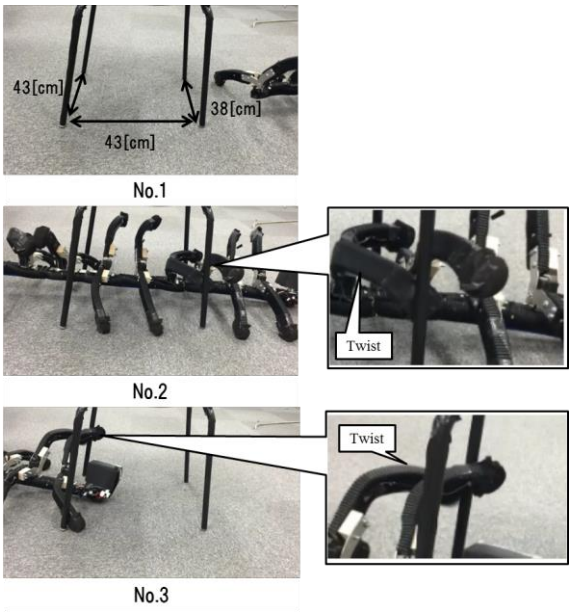

Fig. 16. Experimental results in narrow space

Fig.16 から，ロボットの脚が一切の操作を必要とせず，受動的に湾曲することで，通常時のロボットの横幅よりも狭い空間へ侵入可能であることが確認できる．

最後に，複雑な環境を模したランダムステップフィールドで目標地点への移動が可能であることを確認する．Fig.17 に実験結果を示す．

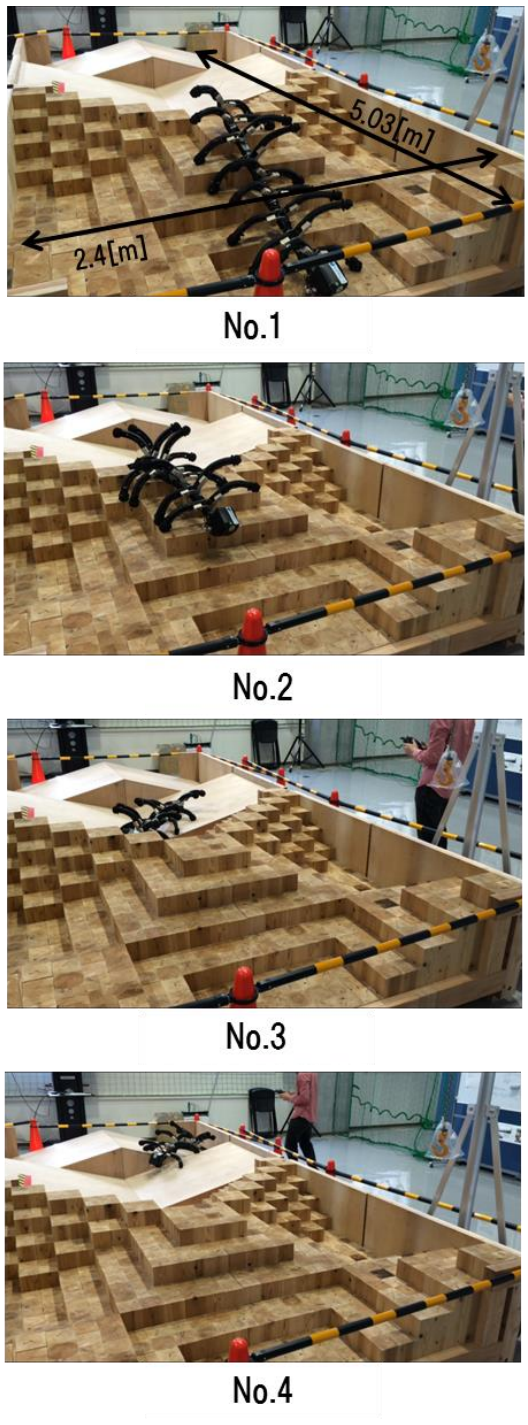

Fig. 17. Experimental results over rubble.

Fig. 17 から，体幹のモータを制御することで，進行方向を変え，目標の位置へ向けて移動可能であることが確認できる．また，この際，ランダムステップフィールドの凹凸には，体幹及び脚の柔軟性により受動的に適応しており，瓦礫を乗り越えるための一切の操作を必要とせず高い走破性が実現されていることが重要である．この結果から，従来の多脚ロボットが持っていた制御の複雑さに起因する問題が解決されていることが確認できる．

５． 結言

本研究では、災害時における生存者探査を目的とした多脚型ロボットの実現を目標とした．提案手法における体幹および脚の柔軟性が不整地の凹凸を受動的に吸収する機構をロボットに取り入れることで，多自由度にもかかわらず単純な操作で様々な環境を走破可能なロボットを実現した．

今後は，実際の災害現場を想定し，パイプや壁の昇降なども可能にし，実用性を示していきたい．

参考文献

1) A. Kamimura,H.Kurokawa,“High-step climbing by a crawler robot DIR-2 - realization of automatic climbing motion -”,Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on,618–624,2009.

2) H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, S. Tsukui, H. Igarashi, F. Matsuno, “Development of an unit type robot [KOHGA2] with stuck avoidance ability”,Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3877–3882, 2007.

3) E.Rohmer,K.Ohno,T.Yoshida,K.Nagatani,E.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.

4) H. Maruyama, K. Ito, “Semi-autonomous snake-like robot for search and rescue”, Proceedings of 8th IEEE international Conference on Safety, Security, and Rescue Robotics, 1–6, 2010.

5) 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.

6) P. Birkmeyer, K. Peterson, R.S. Fearing, ”DASH: A dynamic 16g hexapedal robot”, Intelligent Robots and Systems(IROS),2683–2689, 2009.

7) D. Miaki, Y. Murakami, “Development of a multi-leg type micro rescue robot for disaster victim search”, Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1801–1806, 2011.

8) S. Kashiwada, K. Ito, “Proposal of semiautonomous centipede-like robot for rubbles”, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, 1127–1130, 2012.

9) Y. Ishigaki, K. Ito, “Proposal for semiautonomous centipede-like robot for rubble”, International Conference on Advanced Mechatronic Systems , 2014.