

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06281

研究課題名(和文) 身体の受動性を活かした多足ロボットの実現とそのロコモーションに関する研究

研究課題名(英文) Study on myriapod robot via passive dynamics and its locomotion

研究代表者

衣笠 哲也 (Kinugasa, Tetsuya)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：20321474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、身体の機械的特性を活かしたより単純・軽量で、しかも適応的な多足類ロボットを実現することである。研究成果として、柔軟な歩肢となめらかな形状の胴体を持つ多足類ロボットを実現し、落ち葉や小枝の散乱する自然環境において自由に移動可能であることを確認した。また、脚の位相を変化させてムカデやヤスデの歩容と比較し、胴体の柔軟性や脚の位相が歩容に強く影響していることを明らかにした。さらに、動力学モデルを用いた解析によって、細かい脚の位相や回転数に対する胴体の運動や移動速度などの関係を明らかにした。以上の結果は多足類の脚の配置の力学的意味を理解する糸口となるものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

胴体と脚の柔軟性と滑らかさをもつ多足類ロボットにより、これまでのロボットでは見られなかった自然環境における自在かつ自然な歩容を実現した点は学術的に意義がある。また、ロボットと動力学モデルにムカデの歩肢の運びを再現すると胴体のうねりが結果として再現された結果は、歩肢の配置と動きおよび胴体の柔軟性が歩容を決定していることを示唆し、多足類の形態と歩容の関係解明につながることを期待できる。また、ロボットと動力学モデルに多足類や自然界には存在しない歩肢の動きを設定することで歩容や移動速度がどのように変化するのかが明らかにした点は、多足類の持つ形態や歩肢の運びの力学的意味を解明することにつながる。

研究成果の概要(英文)：This study aims at developing a simple, lightweight, and adaptive myriapod robot that takes advantage of the mechanical aspects of body. As a result of our study, we have realized a myriapod robot with flexible limbs, passive joints of body segments, and a smooth body, and confirmed that the robot could travel on a natural environment with fallen leaves and small branches. We compared the gait of the myriapod robot with that of centipedes and millipedes by changing the phase arrangement of the limbs, and found that the flexibility of the body and the phase arrangement affected significantly to the locomotion. A dynamic model of the myriapod robot was used to analyze the body undulation and travel velocity with respect to the phase difference and frequency of limbs. These results might provide a clue to elucidate the mechanical meaning of the leg arrangement for Myriapoda.

研究分野：ロボティクス

キーワード：多足類ロボット 多足類のロコモーション解析 構成論的アプローチ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多脚による歩行は多点で離散的に接地しながら移動する方法のため、車輪や履帯と比較し、不整地での適応的な移動実現に有利であるものと考えられる。しかし、多足類などの生物については、胴体の湾曲動作と歩肢の運びなどを含め、様々なロコモーションがどのような原理に基づいて生成されているのか未だ不明な点が多い。例えば、移動中のムカデの筋電を計測することで一部の代表的な筋肉の活動が移動とともに後方へ伝播し、移動速度の増加とともに伝播速度と胴体の振幅が増大することが知られている[1]。しかし生態信号を計測する手法では、生態内部の信号などを詳細に観察することは難しい。このような問題に対し、ロボットなどにより人工的に生物と同等の機能を構成することで、動作原理を明らかにする構成論的アプローチが注目されている。一方、従来の多脚ロボットは関節や歩肢を能動化するために大きく、しかも重いため、ムカデなどの多足類が有する多様な環境に適応した移動能力を再現しているとは言い難い。実際、多脚ロボットで実機を製作するほとんどの研究において軽量化が第一課題と言ってよい。例えば、移動速度の変化に対して体幹剛性が胴体の湾曲促進に寄与していることを示す青井らの結果[2]や位相振動子によってヤスデ歩容を解析する加納らの研究[3]があるが、多足類と同様の柔らかさや表面の滑らかさといった身体的特性がロコモーションに影響しているかどうか検証するものではない。また、体幹剛性に注目している研究もあるが、柔軟性や接地タイミング(位相)と体幹剛性など、様々な身体の機械的特性の相互作用がロコモーションにどのような影響を与えるのか明らかにするものは少ない。Hoffmanらはピエゾアクチュエータによって非常に小型な多脚ロボットを実現し、胴体の受動的特性によって生じるうねりが移動速度を増加させていることを示した[4]。この結果は体幹の受動的な性質とロコモーションに密接な関係があることを示している点で興味深い。しかし、これらのロボットが自然環境に置かれた場合、自在に移動することは困難であるものと予想され、身体的特徴やロコモーションの制御手法が自然環境下でどのような意味があるのかを直接的に検証するものではない。Kohらの研究では、災害対応ロボットの評価フィールドを移動可能な多脚ロボットが実現されている[3]が、体幹形状を維持するために剛性が高く、多足類の歩容を再現しているとは言い難い。

[1] B.D.Anderson, et al., Axial kinematics and muscle activity during terrestrial locomotion of the centipede Scolopendra Heros, J. Exp. Biology, 198, 1185-1195, 1995

[2] S. Aoi, et al., Advantage of straight walk instability in turning maneuver of multilegged locomotion: a robotics approach, Scientific reports, 6, 2016.

[3] T. Kano, et al., Decentralized control mechanism underlying interlimb coordination of millipedes, Bioinspiration & Biomimetics, 12, pp. 1-11, 2017

[4] D. Koh, et al., Centipede robot for uneven terrain exploration: design and experiment of the flexible biomimetic robot mechanism, Proc. of BioRob, 2010.

[5] K. L. Hoffman and R. J. Wood, Passive undulatory gaits enhance walking in a myriapod millirobot, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1479-1486, 2011.

2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、身体の機械的特性を生かしたより単純・軽量で、しかも適応的な多足類ロボットを実現することである。具体的には、伝達機構として可撓性シャフト、多様な柔軟素材による関節、拮抗駆動を導入することで歩肢部の位相制御と体幹の湾曲、および、多脚ロボットの課題である駆動系軽量化を実現する。また、多脚ロボットの体幹だけでなく歩肢にも多様な柔軟性を持たせることで身体の受動的特性を変化させ、この受動的特性と柔軟性および歩肢の運び方がロコモーションにどのような影響を与えるのか明らかにする。

3. 研究の方法

- ✓ 受動要素と胴体の滑らかさを利用した多足類ロボット i-CentiPot を実現し、このような身体形状を積極的に用いることで自然環境を自在に移動できることを示す。
- ✓ 身体の機械的性質がロコモーションに与える影響について実機と動力学モデルにより解析：機械的性質(体幹の受動性と歩肢の柔軟性等)がロコモーションにどのような影響を与えるのか、多足類ロボット i-CentiPot を用いて解析する。さらに、動力学モデルを構築しロコモーションを解析する。特に歩肢の接地と体幹のうねりが受動性や歩肢の位相差によって変化する様子を明らかにする。

4. 研究成果

・多足類ロボット i-CentiPot シリーズの実現

受動要素と胴体の滑らかさを利用した多足類ロボット i-CentiPot シリーズを実現した。まず、16 体節 32 肢をもつ壱号機(図 1 右)を実現し、さらに、上下左右に能動湾曲機構を数対持つ 17 体節 34 肢をもつ貳号機(図 1 中)を実現した。16 もしくは 17 対の歩肢は位相差を前後 45°左右 180°とすると少なくとも 4 点で体重を指示できる構成となりムカデの身体に近い機能を実現す

る．体節は受動要素で連結され，柔軟性が部位によって異なる歩肢を用いている．また，制御装置やバッテリーなどもすべて実装することで無線による遠隔操作が可能である．



図 1 . 多足類ロボット i-CentiPot 壱 (左), i-CentiPot 弐 (中), i-CentiPot 参 (右)

実現した壱, 弐号機を落ち葉や小枝が散乱する屋外環境下で歩行させたところ (図 2), ある程度の段差を含む自然環境において自律的に移動することを確認した．特に, 柔軟な胴体と歩肢およびなめらかな胴体形状によって地面の凹凸に馴染むとともに, 障害物を回避しながら移動していることがわかる．

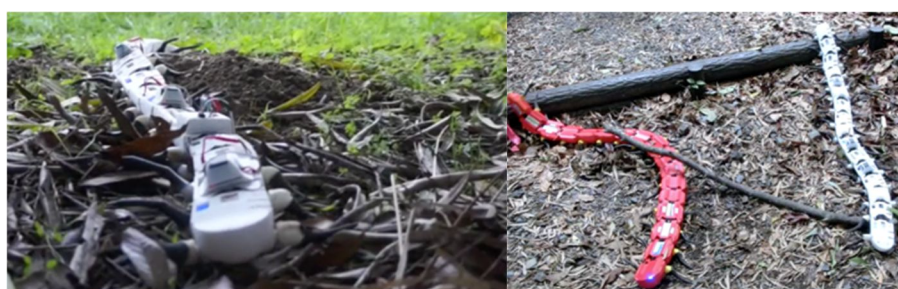


図 2 . i-CentiPot 壱号機および弐号機の屋外環境下における歩行実験

・ i-CentiPot の歩容解析

i-CentiPot の歩容を解析するためにいくつかの条件の下で歩行実験を行った．まず歩肢の左右の位相差を 180° (逆位相) とし, 前後は進行方向と逆方向へ伝播する retrograde wave を発生するように前肢に対して -45° となる位相差を与える．図 3 左に移動中のスナップショットを示す．赤い楕円で囲まれた領域は接地点を示し, この周辺で歩肢が密になる．体幹は接地点に対して逆方向へ凸となるように湾曲していることが確認できる．創発された体幹のうねりは, 歩肢で retrograde wave を作りながら移動するムカデと同様のうねりである (図 3 右)．



図 3 . Retrograde wave による i-CentiPot の歩容 (左), ムカデの歩容 (右)

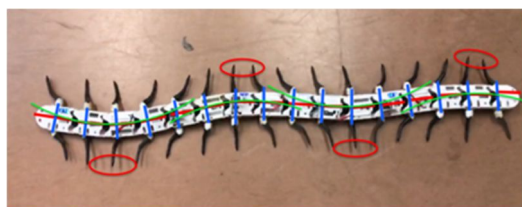


図 4 . Direct wave による i-CentiPot の歩容

次に左右肢を逆位相とし, 前後の位相差を 45° として歩行実験を行った．この場合, 歩肢は進行方向と同方向に伝播する Direct wave を発生する．図 4 に移動中の写真を示す．図内赤楕円で囲まれた領域で歩肢が密集し, 反対側の開いた歩肢が接地している．体幹は接地肢と逆方向へ凸となるように湾曲することが確認できる．

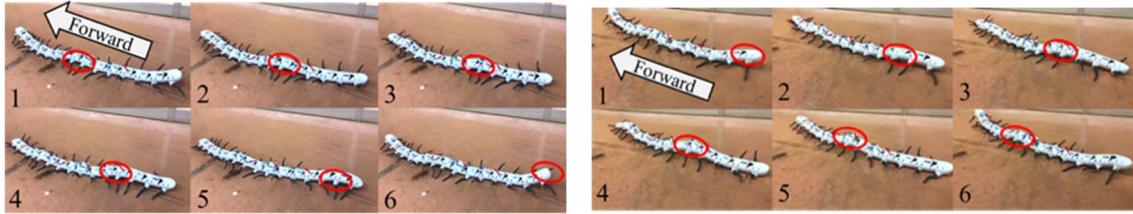


図5 . 左右同位相とした i-CentiPot の歩容 . 左 (retrograde wave) , 右 (direct wave)

さらに左右肢を同位相とし, 前後位相を -45° (retrograde wave)と 45° (direct wave)に変化させて実験を行った. 図5左に retrograde wave によるロコモーションを示す. 赤楕円は上方向へ体幹が持ち上がりながら移動している領域を示している. この図から体幹のうねりが前から後ろに伝播していることが確認できる. 体幹が上方向に持ち上がる領域で歩肢が接地していることも確認できる. 図5右に direct wave を発生する歩肢配置とした場合の結果を示す. 左図と同様に赤楕円領域は体幹が上方向に持ち上がり移動している部分を示している. この図から, 歩肢の direct wave と同様に前方に向かって体幹のうねりが伝播していることがわかる. 左右肢が逆位相の場合, 体幹のうねりは左右方向の波となり, 同位相の場合は, 垂直方向の波となっている. また, retrograde wave と direct wave では移動速度に大きな差が見られた. さらに, 前後肢の位相差によっては後退する現象も確認された. これは体幹のうねりによって接地点が移動し, 歩肢の接地タイミングが変化することで生じるものと考えられる. これらの実験により, 体幹のうねりは胴体の受動要素による柔軟性によって創発されるものであり, 歩肢の配置によって波の伝播方向, 振幅および方向も含めた移動速度が変化することが示された.

・ 動力学モデルの構築と歩容解析

i-CentiPot を図6に示す2次元2Nリンク系としてモデル化し, ラグランジュの方法により運動方程式を導出した. 歩肢は左右1対を1つのリンクとし, これに正弦波による往復運動を与える. 推進力は, 後方に回転する歩肢先端に体節と歩肢の荷重を集中させることで発生する摩擦力によって与えられる. シミュレーションでは, 歩肢8対, 胴体8体節の合計16リンクモデルを用いた.

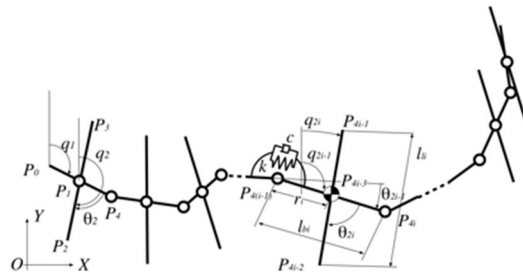


図6 . 2N-link 動力学モデル

i-CentiPot の物理パラメータを参考に, 歩肢と体節の長さをそれぞれ 0.280 m および 0.144 m とし, 質量は 0.360 kg および 0.364 kg とした. また, 振幅を $\pi/8$ rad, 位相差を $-\pi/4$ rad, 関節のばね定数と粘性係数はどちらも 0.02 としている.

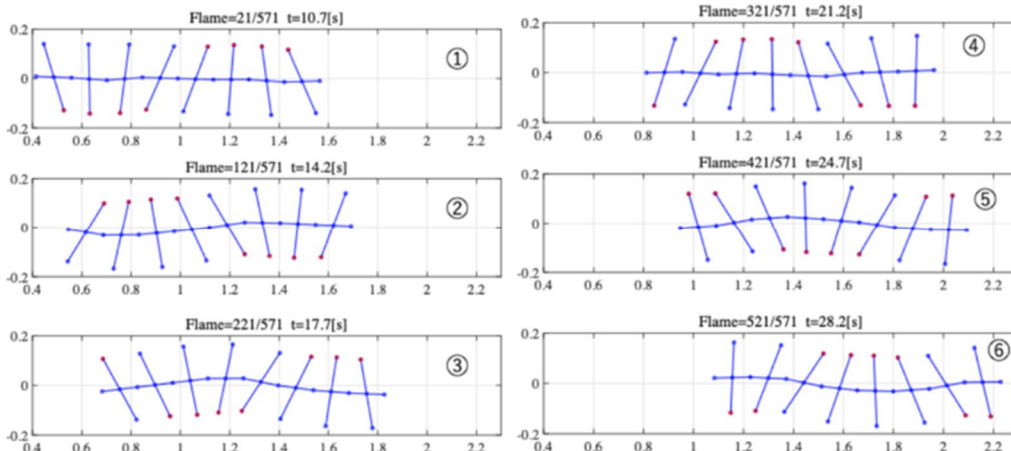


図7 . 歩行の様子

図7は歩肢の角速度を $\pi/4$ rad/s としたロコモーションを 3, 4 秒ごとに図示したものである。図左側が頭部で右を進行方向としている。赤丸は接地点を表している。歩行開始時は過渡的な動作となるため、定常的となった 10.7 秒付近から図示している。この図より、歩行中、歩肢先の疎密波と体幹のうねりが前から後ろへ伝播していることがわかる。

歩肢の波と体幹のうねりとの関係を明らかにするため、歩肢の位相差とうねりの関係を図8に示す。左上図は歩行のスナップショットであり、中央図は歩肢の位相差（赤線）、各体節の振動（青線）を表している。左下図において、歩肢（赤線）は第4肢付近で右肩下がりとなりながら横軸を横断し、体幹は左側に湾曲するとともに P16(第5関節)が極大となっている。これはムカデや i-CentiPot と定性的に同じ傾向を持つ歩容であり、歩肢の位相差に対し体幹のうねりが 1/4 周期遅れることがその条件となっている。図8右図は各関節の y 軸の変化と歩肢の位相差の時間変化を表したものである。黄色は高い値、濃い青色は低い値を示している。歩肢は頭から尾に伝播する retrograde wave を発生し、体幹のうねりは歩肢から約 1/4 周期遅れて伝播していることから、このシミュレーション結果において歩行中継続的にムカデや i-CentiPot と同じ歩容を示していることがわかる。

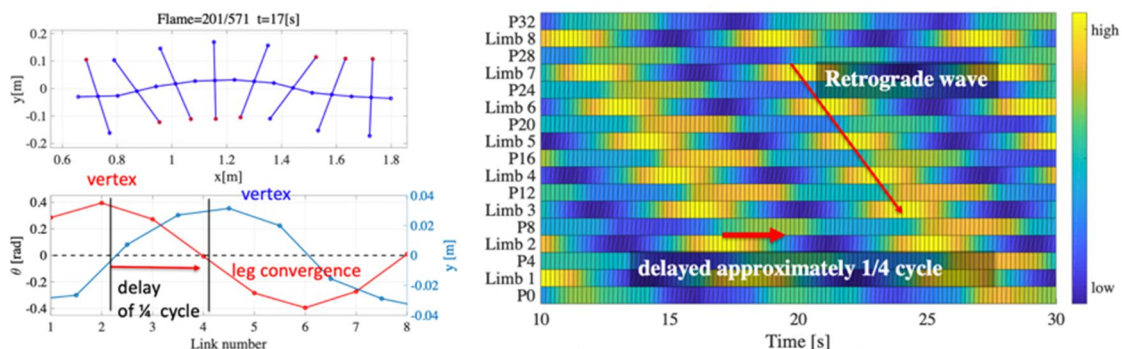


図8．体幹のうねりと歩肢の位相（歩肢の角速度 $\pi/4$ rad/s）。

次に角速度 4π rad/s における結果を図9に示す。図9右上図より体幹のうねりを確認できる。しかし、 4π rad/s の時とは逆に歩肢の接地部と同じ方向に体幹が凸型となるように湾曲している。図9左下図は第6肢付近において赤線が右肩下がりとなりながら x 軸を横断し、同時に体幹が右側に湾曲し P20(第5関節)の極小となっている。これはムカデや i-CentiPot とは逆方向に体幹がうねっていることを意味し、歩肢の位相に対して体幹のうねりが 1/4 周期進むことが条件である。図9右図は、各関節の y 軸の変化と歩肢の位相差の時間変化を示している。この図から、シミュレーションを通して体幹のうねりが歩肢の位相差から約 1/4 周期すすんで伝播していることがわかる。

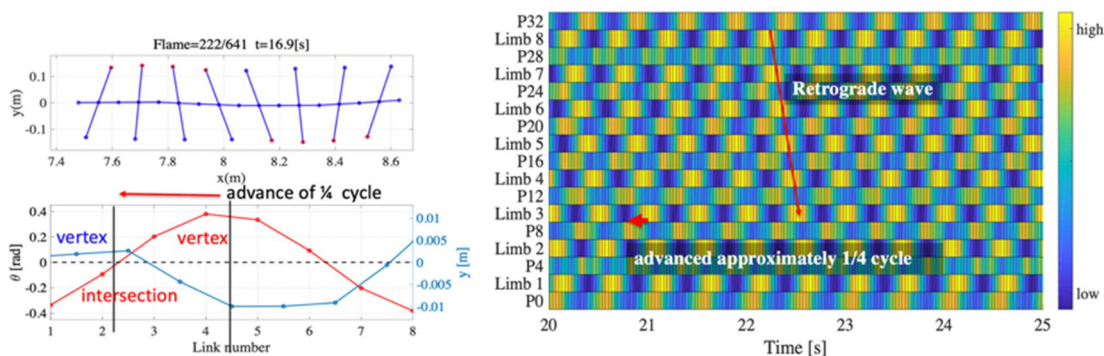


図9．体幹のうねりと歩肢の位相（歩肢の角速度 4π rad/s）

以上、本研究では多足類ロボットに注目し、歩肢位相を変更することでロコモーションが変化することを実際のロボットと動力学モデルを用いて明らかにし、体幹の機械的受動性と歩肢の配置と位相および地面との相互作用によって体幹のうねりが創発されることを示した。体幹のうねりは体節側面から体幹に直交するように配置され、左右で逆位相となる歩肢により Retrograde wave を発生させながら移動するムカデに類似したものが確認された。構成論的な解釈をすると、i-CentiPot はムカデに近い形状を持つことから、体幹の機械的受動要素が移動時に発生するうねりに強く関わっていることを示唆しているものと考えられる。ロボットと動力学モデルに多足類や自然界には存在しない歩肢の動きを設定することで歩容や移動速度がどのように変化するのが明らかにした点は、多足類の持つ形態や歩肢の運びの力学的意味を解明することにつながる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Kiungasa, K. Osuka, R. Hayashi, N. Miyamoto, K. Yoshida	4. 巻 Vol. 22, Issue 4
2. 論文標題 Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 429-434
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-017-0378-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 N. Miyamoto, T. Kinugasa, K. Yoshida, R. Hayashi, K. Osuka
2. 発表標題 Effect of Leg Density for Uncanniness of Myriapod Robot
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya Kinugasa, Naoki Miyamoto, Koichi Osuka, Ryota Hayashi, Koji Yoshida
2. 発表標題 Development and gait analysis of lightweight and small myriapod robot with denser leg based on passive dynamics
3. 学会等名 AROB 24th 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷 牧恵, 宮本 直輝, 衣笠 哲也, 大須賀 公一, 林 良太, 吉田 浩治
2. 発表標題 受動要素を利用した小型多足類ロボットi-CentiPotの開発
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部卒研発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本直輝, 大谷牧恵, 衣笠哲也, 大須賀公一, 吉田浩治, 林良太
2. 発表標題 多足類ロボット i-CentiPot の形態学的特徴と不気味さの関係について
3. 学会等名 第31回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本直輝, 衣笠哲也, 吉田浩治, 林良太, 大須賀公一
2. 発表標題 受動要素を利用した小型多足類ロボットi-CentiPot 参考機の実現と歩容解析-足の密度の増加に伴う移動性能の変化-
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Miyamoto, T. Kinugasa, K. Osuka, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, A. Ishiguro
2. 発表標題 Myriapod Robot i-CentiPot via Passive Dynamics - Emergence of Various Locomotions for Foot Movement-
3. 学会等名 SICE Annual Conf. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsuya Kinugasa, Koichi Osuka, Naoki Miyamoto, Ryota Hayashi, Koji Yoshida, Dai Owaki and Akio Ishiguro
2. 発表標題 Myriapod Robot i-CentiPot01 via passive Dynamics
3. 学会等名 The 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Osuka, T. Kinugasa, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, A. Ishiguro
2. 発表標題 i-CentiPot: A Centipede-like Robot Wonders in the Wilderness
3. 学会等名 AMAM2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsuya Kinugasa, Koichi Osuka, Ryota Hayashi, Koji Yoshida, Dai Owaki and Akio Ishiguro
2. 発表標題 i-CentiPot: a myriapod robot using mechanical passivity
3. 学会等名 AMAM2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsuya Kinugasa, Naoki Miyamoto, Tatsuya Amasaki, Koichi Osuka, Ryota Hayashi, Koji Yoshida
2. 発表標題 Dynamic model of myriapod robot using frictional force
3. 学会等名 AROB 25th 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本直輝, 衣笠哲也, 大須賀公一, 林良太, 吉田浩治
2. 発表標題 小型多足類ロボット i-CentiPot の歩容解析
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	吉田 浩治 (Yoshida Koji) (00254433)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	
研究 分担者	林 良太 (Hayashi Ryota) (40288949)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	
研究 協力者	大須賀 公一 (Osuka Koichi)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	