

氏名・(本籍)	宮本 直輝 (岡山県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第工51号
学位授与の日付	令和3年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当(課程博士)
学位論文題目	多足類の形態学的特徴を模擬したロボットの実現とそのロコモーションに関する考察
論文審査委員	主査 教授 衣笠 哲也 副査 教授 藤本 真作 教授 吉田 浩治 教授 林 良太 教授 大須賀 公一 (大阪大学大学院工学研究科)

論文内容の要旨

申請者氏名 宮本 直輝

論文題目

多足類の形態学的特徴を模擬したロボットの実現と そのロコモーションに関する考察

生物は予測不能で時々刻々変化する環境で適応的な移動を行うことができる。その中でもムカデやゲジ、ヤスデなど多足類は、多脚で細長い形態学的特徴を有し、移動時に地面に対して離散的に脚を接地するため凹凸地形等において高い移動能力を持つだけでなく、胴部を伸縮させることで土壤に潜ったり、ヘビのように胴部をうねらせながら泳いだりするなどさまざまなロコモーションをみせることが知られている。この多足類の持つ高い移動能力、さらには移動のための知能は非常に興味深く、これまでに生物学だけでなくロボット学の視座から考察する試みがなされてきた。多足類の歩行メカニズムを解明する生理学的研究は、運動の映像や筋電位などの生体信号を計測し、その運動や脳神経系の働きを明らかにすることに主眼が置かれている。しかし、表面的な運動観察や限られた生体信号だけでは運動の制御方法や知能的振る舞いの源泉を理解ことはむずかしい。生物の特徴（細長く多くの脚を持つ）に学びロボットを開発する工学的研究は、基本的に不整地での高い走破性を持つ移動機構の開発に主眼が置かれている。そのためロボットがどのような歩容を示し、生物の知能とどのような関係にあるのかという視座に欠ける。さらに多足類の脳は非常に小さいため、従来のロボット工学的手法のように関節を細かく制御する、さらに無限定環境下で移動を妨げる要因をすべて想定するといったことは不可能と思われる。

このようにロボット工学および生物学的な研究手法に対し、生物の生理学的、解剖学的な知見に基づいてロボットを構成し生物と同様の振る舞い（つまり知能）が再現されるかどうか検証する構成論的手法が注目されている。この手法において、知能は脳だけでなく身体と環境との相互作用が必要であるという身体性が重要であり、身体の形態学的特徴が脳神経系の計算を分担（形態学的計算）し、その負荷を低減しているという観点が従来のロボット工学の問題点を解決する緒と考えられている。具体的に多足類に対しては、受動要素を用いた単純なロボットや接地感覚をフィードバックする位相振動子を用いたロボットが示す歩容について実際の多足類と比較する研究がいくつか行われてきた。その結果、生物に類似した歩容の創発や環境や脚切断などへの適応性が確認されている。しかし、これらのロボットは多足類が持つ形態学的特徴としての滑らかさや柔軟性を犠牲にしていたため、自然環境において自律的に移動させることが困難であった。さらに、この身体と環境との相互作用の中には制御則（陰的制御則）が隠れており、それによって無限定な環境でもうまく制御が可能となると考えられ、高度な知能（明示的な制御としての陽的制御）ではなく知能が生まれる源泉「知能の源泉」が身体と環境との相互作用、さらに踏み込んで環境にあるとし、明示的な知能を可能な限り排除する

ことで知的な（に見える）振る舞いがロボットによって実現できるのかどうか検証することの必要性が説かれてきた。

そこで本論文は、多足類の持つ形態学的特徴が見せる知能的な振る舞いとしての歩容に注目し、多足類に形態学的特徴である細長い胴体、多脚、なめらかな表面形状および柔軟性を巧く利用することで比較的小型かつ軽量のロボットを構成し、多足類に見られる歩容と比較することで形態学的特徴がどのような役割を果たしているのかを考察することを目的とする。具体的には、できる限り明示的な知能を取り除くことで、ほぼ形態学的特徴のみによって自律的に移動可能なロボットを実現する。また、自然環境でどのように移動するのか、つまり、単純な形態学的特徴と自然環境との相互作用でどのような振る舞いをみせるのか実験により明らかにする。さらに、動力学モデルを構築し、脚の動きと歩容の関係を詳細に解析する。多足類の移動能力は工学的にも有用である。そこで、実現される多足類の形態学的特徴を再現したロボットに自律移動性能の向上を目的とする機構を導入し、その有効性を検証する。

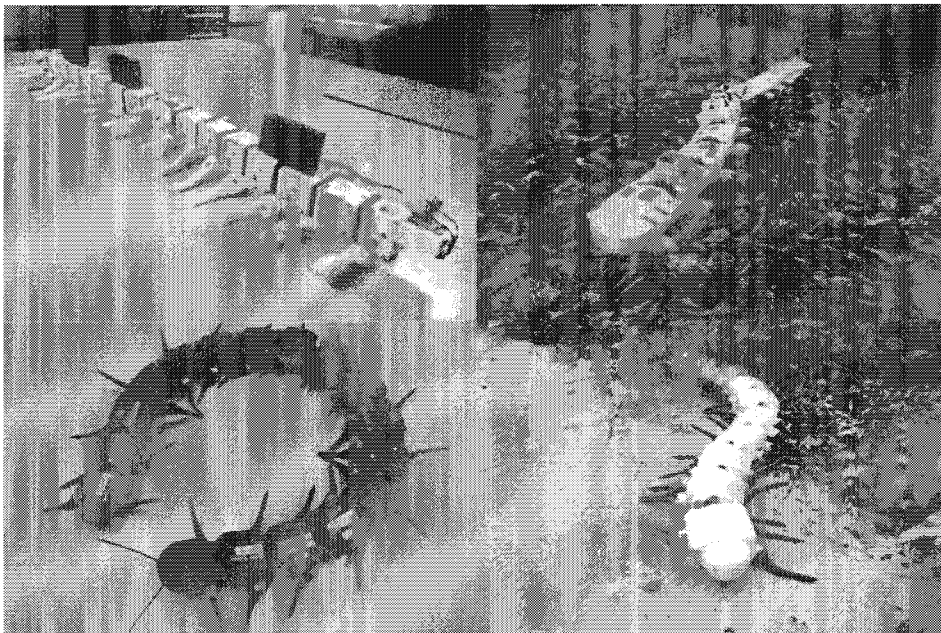


Fig. 1 i-CentiPots: P (top left), 01 (top right), 02 (bottom left), and 03 (bottom right)

得られた結果は以下の通りである。

1. 細長く多くの脚を持つというムカデの形態学的特徴を可撓性シャフトによる駆動機構と受動的で柔軟な胴体と脚によってシンプルに構成することで比較的小型で軽量のロボット i-CentiPot シリーズ (Fig. 1) を実現した。i-CentiPot を落ち葉や小枝が散乱する傾斜地で動作させると、状況に応じて障害物の回避もしくは乗り越えるなど、従来の多脚ロボットでは困難であった自律移動が形態学的特徴と環境との相互作用によって実現されることを確認した。
2. i-CentiPotの脚の配置を変化させることで、オオムカデ、イシムカデ、ヤスデなどが用いている様々な脚の動作を構成し、得られた歩容について解析を行った。まず、オオムカデのように左右逆相で後退波を与えると、遊脚の振幅を増加させるような左右方向の後退波が胴部に生じるというオオムカデと同様の歩容が創発されることを確認した。次にイシムカデのように左右逆相で進行波を与え

た場合、胴部のうねりがイシムカデとは逆相となることを確認した。さらに、ヤスデのように左右脚を同位相にすると胴部に上下方向の波が生じ、前後の位相差によって移動速度が変化することを観察し、条件によっては後退するという現象を確認した。

3. i-CentiPotを用いた実験結果を詳細に解析するために、動力学モデルを用いた数値シミュレーションを行った。その結果、左右脚が逆相の場合、前後の位相差が $\pi/2$ 未満で後退波を発生させると移動速度が最も大きくなり、進行波を発生させると体幹のうねりは増幅されるが歩幅が減少し移動速度が小さくなることが示された。

i-CentiPotはモータのオンオフのみで駆動されるにも関わらず、自然環境下における自律移動を実現している。その重要な要因は多足類の形態学的特徴として細長く多くの脚をもち、胴体や脚が柔軟でなめらかな形状を持つ点にあった。また、落ち葉などが散乱する屋外環境で動作することで、屋内の平坦な路面などと比較してより「自然な」ふるまいを示している点は、i-CentiPotの形態だけでなく環境との相互作用が重要であることを意味している。したがって、i-CentiPotが環境と交わることで生物の持つ知能のエッセンスの一端を表現しているものと期待する。これに関連して、i-CentiPotに対して人は不気味さを感じる点について考察した。多足類の不気味さは、人と全く異なる形態やふるまいに強く依存するものと考えられる。つまり、人がi-CentiPotに不気味さを感じる点も、このロボットが多足類の特徴やふるまい、その背景にある知能のエッセンスを捉えている可能性を示唆している。

i-CentiPotの歩容解析から、オオムカデは昆虫と比較して小さい前後位相差をもつなめらかな後退波を脚に生じさせ、胴部を受動要素によって共振させながら能動的にうねらせることで歩幅を広げることにより高速に移動可能であると言える。逆に、進行波を生じるイシムカデの歩容については、胴部の受動的なうねりは速度低下を招くため、これを逆相で発生させるために体節形状や筋配置を進化させ、能動的にうねりを発生させる必要性を示唆している。イシムカデは大小の背板を交互に配置した体節によって胴体が構成されており、これがうねりを抑制していると考えられている。この結果は、AndersonやHoffmanが得た「オオムカデは胴部を能動的にうねらせる」ことで「歩幅を増幅させ移動速度を向上させている」という結果から更に踏み込んで、「なぜオオムカデは脚に進行波ではなく後退波を生じさせるのか？」という問いに一つの答えを与えるものでもある。さらに、ヤスデの脚の配置については「脚の振動方向が同じであってもアンカーを打つタイミングによって移動方向を変化させることができる」という田中らが示した数理的な結果を実証するものである。

さらに、比較的軽量で小型の多足類ロボット i-CentiPot が自然環境下で自律移動を可能とした点は、多足類の形態学的特徴を巧く構成すればスイッチのオンオフや簡単な触覚による単純な制御でも（つまり小さな脳、もしくはより原始的な神経のみでも）ある程度有効な移動ロボットを実現できることを示すものである。例えば、i-CentiPot にカメラなど簡単なセンサを取り付け複数屋外に放つことで探査活動を自律的に行える可能性がある。知能としてははかかなり原始的で、移動能力は限定されるが、安価で単純な複数のロボットを配置することで効果的な探査が行える可能性がある。

発表論文：

1. 研究論文 (査読有)

- [1] **N. Miyamoto**, T. Kiungasa, K. Osuka, R. Hayashi, K. Yoshida, " Analysis of body undulation using dynamic model with frictional force for myriapod robot," *Artificial Life and Robotics*, DOI: 10.1007/s10015-020-00610-w (2020, published online).
- [2] T. Kiungasa, K. Osuka, R. Hayashi, **N. Miyamoto**, K. Yoshida, "Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics," *Artificial Life and Robotics*, Volume 22, Issue 4, pp. 429-434, (2017)

2. 国際学会発表ほか (査読有)

- [1] **N. Miyamoto**, T. Kinugasa, R. Hayashi, K. Yoshida, K. Osuka, "Effect of Leg Density for Uncanniness of Myriapod Robot," *Proc. of the SICE Annual Conf. 2018*, pp. 321-323, 11-14 Sept., 2018, Nara Japan (2018).
- [2] T. Kinugasa, **N. Miyamoto**, K. Osuka, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, A. Ishiguro, "Myriapod Robot i-CentiPot via Passive Dynamics - Emergence of Various Locomotions for Foot Movement -," *Proc. of SICE Annual Conf.2017*, pp.7-9, 20-22 Sept., 2017, Kanazawa Japan (2017).
- [3] T. Kinugasa, K. Osuka, **N. Miyamoto**, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, A. Ishiguro, "Myriapod Robot i-CentiPot01 via Mechanical Passivity," *Proc. of CLAWAR 2017*, 11-13, Sept., 2017, Porto Portugal (2017).
- [4] T. Kinugasa, K. Osuka, R. Hayashi, **N. Miyamoto**, K. Yoshida "Development of Lightweight and Small Myriapod Robot using Mechanical Passivity," *Proc. of AROB 2017*, pp.429, 19-21 Jan., 2017, Beppu Japan (2017).

3. 国内学会発表ほか (査読有)

- [1] **宮本直輝**, 衣笠哲也, 大須賀公一, 吉田浩治, 林良太, "小型多足類ロボット i-CentiPot の歩容解析", 第 25 回ロボティクスシンポジウム, p140-p144, オンライン (2020).

審査結果の要旨

生物は身体の形態学的な特徴と環境との相互作用を積極的に用いることで脳神経系の計算負荷を低減し時々刻々変化する環境下で自在に移動することが可能である。本研究は、明示的な制御を可能な限り取り除き形態学的特徴を積極的に利用した多足類ロボットを開発し、その振る舞いが実際の多足類、特にムカデのロコモーションと多くの共通点を持つことを明らかにした。

具体的には、多足類の細長くなめらかな形状と柔軟性を受動要素と 3D プリンタによる曲面を多用した設計によって再現し、比較的小型軽量な多足類ロボット i-CentiPot シリーズを実現した。この i-CentiPot を用いた実験により、これまでの大型な多脚ロボットでは実現できなかった自然環境下における自律移動が可能であることを示した。この結果は、自律移動可能な小型軽量の多脚ロボットである i-CentiPot を応用することで災害現場や惑星などの効率的な探査を実現できる可能性を示している。

また、i-CentiPot と水平面内における動力学モデルに対し、脚の配置を変化させることで、唇脚綱の多様な歩容を再現し、体幹の受動的性質とうねりおよび移動速度の関係を明らかにした。その結果、移動速度を増加させるためには、オムカデ目が用いる脚の後退波を発生させた場合、受動的な体幹のうねりを能動的に増幅させ、イシムカデ目やゲジ目が用いる進行波の場合は受動的なうねりを抑制させる必要があることを明らかにした。得られた結果は、オオムカデは速度の上昇とともに能動的に体幹のうねりを増幅させ、イシムカデやゲジは脚を相対的に長く、体長を短く、さらに背板形状を進化させることで機械的にうねりを抑制しているというこれまでの生物学分野における唇脚綱の歩容や形態学的進化に関する仮説を脚の配置という観点からロボットを用いて統一的に解を与えている。

さらに、i-CentiPot は単純に脚を回転させるだけ、つまり複雑な計算は不要であり、ほぼ純粋に形態学的特徴のみで移動することから、生物の形態と自然環境との相互作用によって自律的な振る舞い、つまり知能的な振る舞いが再現できる可能性を示唆している。

以上の結果は、バイオミメティクス的なロボットの開発から生物の知能を探るというテーマに踏み込んだものでロボット工学的な意味だけでなく生物学的な意味で重要な知見を与えるものであり、博士論文としてふさわしいものである。