

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610033

研究課題名(和文) 進化的視点から脚式ロコモーションの統一的理解を目指す数理的研究

研究課題名(英文) Mathematical study for unified understanding of legged locomotion from the evolutionary view point

研究代表者

小林 亮 (Kobayashi, Ryo)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60153657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：生物界の2大勢力、脊椎動物(魚類以外)と節足動物が採用している移動手段である脚式ロコモーションについて、力学の視点および進化の視点から研究を行った。進化の過程で、一度脚を得たらその後は減っていく一方に見える。節足動物の中では例外的に高速で走行することができ、速度に応じて使用脚数を変えるスナガニに着目し、数理モデルを用いて解析することで、脚数減少の理由付けを与えた。同時に進化の過程における脚数の減少に対する一応の解釈を得た。また、動物の運動と制御を解析するための記述法として、ダイナミックフログラフというプラットフォームを提案した。

研究成果の概要(英文)：We studied the legged locomotion which is adopted by vertebrate and arthropod (two biggest animal groups on earth) from the mechanical view point and from the evolutionary view point. Once animals obtain legs in the evolutionary process, it seems that the number of legs decrease (or at least, not increase). We observed the walking/running of ghost crab which can run exceptionally fast in arthropod and changes the number of operating legs according to the moving velocity. We proposed a mathematical model of the locomotion of ghost crab, and clarified why the number of operating legs decreases as the velocity increases by the analysis of the model. By this, we gave a plausible reason of decrease legs in evolution. Also, we proposed a platform for describing the locomotion of animals and its control, which was named "dynamic flow graph",

研究分野：数理生命科学

キーワード：脚式ロコモーション 進化 数理モデル スナガニ

1. 研究開始当初の背景

脚式ロコモーションは、生物界の2大勢力である脊椎動物と節足動物が採用している移動様式である。それゆえ、この移動様式は多くの人々の興味を惹き、理学的視点・工学的視点から様々な研究がなされてきた。しかし、それらはほぼ全て、2脚なら2脚、4脚なら4脚という個別的な歩行様式を扱った、いわば「点」の研究であり、脚式ロコモーションというものを統一的に理解しようという観点が欠落していた。

2. 研究の目的

本研究では、進化という時間軸を持ち込むことにより、すべての脚式ロコモーションを「線」で結ぶ統一的な理論を構築することを最終的な目標とする。さらに、この理論で捉えられた脚式ロコモーションの根源的理解をもとに、隘路に迷い込んだ感のある歩行ロボットの設計論の再構築に資することを第2の目標とする。

3. 研究の方法

現存する陸生節足動物の脚数は昆虫が6、クモ類が8、カニ類も8(歩脚数)、そして多足類が多数という構成になっている。脊椎動物においては、両生類が4、爬虫類が4(恐竜も含めると2が加わる)、鳥類が2、ヒト以外の哺乳類が4、ヒトが2である。ここで、いくつか素朴な疑問が生じる。

- (1) ひとたび脚を得たら、その後の進化では脚の数は減っていくように見える。それはなぜか。
- (2) 節足動物において、脚の数が6か8でとどまっているのはなぜか。4脚という可能性はないのか。
- (3) 脊椎動物において、6脚以上が現れなかったのはなぜか。

これらの疑問に対し、まず「なんらかの力学的理由により、慣性領域で生きている動物(脊椎動物)は4以下、粘性領域で生きている動物(節足動物)は6以上という脚数が採られている」という仮説を立てた。

それを確かめるために、節足動物の中で例外的に慣性領域に踏み込むほど高速で走行できるスナガニをモデル生物として採用した。スナガニはその速度が大きくなるにつれ、使用脚数を減らしていくことが知られている。そこでフィールドワークを行い、スナガニを捕獲して、高速度撮影による観察を行った。さらに、この観察結果をもとにスナガニのロコモーションモデルを構築し理論解析を行った。一方で、自律分散型脚式ロボットを作成することで、構成論的なアプローチを行った。

4. 研究成果

動物の進化に関し、ロコモーション(特に脚式ロコモーション)の観点から検証を行った。進化の系統に関しては、最近の分子系

統学の進歩で従来の定説が覆される状況が多々あり、明確な進化系統樹が描ききれていないようで、当初考えていたより状況は複雑である。とはいえ、進化のパスが明確に結ばれているところでは、「進化とともに脚数は減少する」という仮説は、ほぼ間違いなく成立していることを確認した。

例えば、エビからカニへの進化、そしてカニの中でも原始的なカニから最も進化したカニと言われる方頭群への進化は興味深い。エビは基本的に遊泳をメインの移動手段としていた。胸部に10対、腹部に10数対の脚を持ち、腹部の脚は遊泳用であった。イセエビのように海底を歩行するようになると、胸部の脚は大きく発達する一方、腹部の脚は退化する。さらに、歩くには邪魔になると考えられる腹部を退化させて、エビはカニに進化する。この時点で腹部の脚は失われ、脚数は半減する。実は、一般に考えられているように全てのカニが横歩きするわけではない。最も進化したグループである方頭群以外もつばら縦歩きを行うし、縦歩きをするカニの動きは遅い。これは構造的に脚を縦方向に自由に動かすににくいという事情による。そこでカニは、ほとんどの動物が採用している頭尾軸方向に進むという方針を捨て去り、頭尾軸に直交する方向に進むというユニークな方策を採り、その結果格段に速い動きを手に入れたのである。すなわち、エビから方頭群にいたる道のりで、脚式ロコモーションにおいては、量的変化と質的变化の2段階の進化が起こったことになる。方頭群の中でも、とりわけ高速で動けるのが、本研究でモデル生物として採用したスナガニである。

我々は、スナガニの歩行/走行時における、速度と使用脚数・duty比・歩容の関係を実験によって調べ、歩容ダイアグラムを作成した。その結果、低速時には8脚全部を用いているが、速度が増すにつれ、使用脚数が8脚から7脚、さらに6脚、5脚へと減少することが確認された。4対の歩脚に頭側から1, 2, 3, 4と番号をつけF, Hで進行方向前方と後方を示すとする。8脚から7脚への遷移ではF4脚が、7脚から6脚の遷移ではH4脚が使われなくなる。6脚から5脚の遷移においてはF1脚が使われなくなる場合とF3脚が使われなくなる場合の2通りが観察された。第2脚(F2, H2)は最も強い脚で、どのような状況でも使用されている。我々が行った計測では、4脚までの遷移は観察されなかった。高速走行時には、完全に接地脚のない時間帯が存在しており、厳密な意味で「走行」あることも確認された。この時スナガニは節足動物でありながら、明確に慣性領域の運動に踏み込んでいる。このとき6脚~5脚ですでに走行を実現していることから、当初立てた仮説である「慣性領域で生きている動物(脊椎動物)は4脚以下、粘性領域で生きている動物(節足動物)は6脚以上」という仮説はあっさり否定された。ただ、スナガニの走行におい

では、第1脚と第3脚がほぼ同期して使われることが多く、これをまとめて1脚とみると、4脚動物に典型的な歩容であるトロットに近い走り方をしていることがわかる。というよりも、横に移動することを選択した時点で、通常の節足動物の脚移動様式から外れて、進行方向に2組の脚（前脚と後脚）を持つという4脚動物的な脚配置になっているのである。それに対し通常の節足動物では、必ず進行方向に沿って3組以上の脚が配置されている。そこで新たな仮説「慣性領域に生きる動物は進行方向に沿って2組以下の脚を持ち、粘性領域に生きる動物は3組以上の脚を持つ」を提案した。

スナガニの歩行・走行を記述する数理モデルを構築した。水平方向のみの運動量の流れのみを記述することで、1次元的なシンプルなモデルとなっている。この数理モデルを用いて、スピードの上昇とともに、使用脚数が減少し、かつ duty 比も減少するという現象を再現することに成功し、理論的な裏付けも与えた。また同側の脚はできるだけ反位相で動かす方が速度を稼げるという理論的帰結から、トロットの歩容が観測される一方でギャロップ的歩容（同側の3脚が同期する）がみられない理由付けができた。

大きな移動速度を実現するためには、脚先を高速で水平方向に動かすと同時に、duty 比を小さくする必要がある。小さい duty 比を実現するには、鉛直方向に大きな運動量を流し込む必要があり、そのためには強い瞬発力を出せる強力な脚が必要となる。脚歩行を行う動物が、より速い移動速度を実現する方向に進化しようとするならば、脚に振り向ける資源を多くの脚に分配するよりも、少数の強力な脚に投下する方が有利であることがわかる。このことは、より速く動くことを進化が志向する限り（棘皮動物のようにあまり動かない省エネ方向に進化した動物群も存在するが、そもそも脚はより速い移動を目指して進化した器官である）、脚の数は減少するということを意味しており、疑問(1)に対する一応の解答は得られた。

疑問(2)に関しては、現段階では次のように考えている。少なくとも昆虫においては、飛行という移動手段をすでに手にしているため、より高速に脚で移動するという淘汰圧がかからなかったのであろう。また、脚が損傷したり失われたりすることは、節足動物ではよく見られるので、脚をむやみに減らすことは耐故障性という面からは不利な選択であったと解釈できる。

脊椎動物における4脚から2脚への遷移は、脚歩行としてより速い方向へ行っただけのことは言い難い。鳥類の2脚化は飛行能力獲得のために全脚を羽に使い回したことであり、脚歩行としてはスローダウンしている。霊長類の2脚化も移動速度的には退化とも言えるが、それを補ってあまりある脳の発達という副産物を得ている。残念ながら、

なぜ6脚以上の脊椎動物はいないのかという疑問(3)に、力学的観点から解答を与えることはできなかった。これは力学的な理由よりも、むしろシーラカンスのような直接両生類の先祖になった魚類のヒレの構造が、そのまま引き継がれたと考えるべきなのかもしれない。

本研究では、脚式ロコモーションの進化に力学的理由付けを与えようと試みた。一部は成功したが、明確でない部分も残っている。また、本研究であまり強調しなかった「制御」は実は運動と不即不離の関係にある。この問題に関しては、石黒のグループが、OSCILLEXという自律分散型4脚ロボットを用いた研究を行った。そもそも脚式ロコモーションにおいては、「体重保持」と「水平方向への加速」という2つのことを同時にこなすことが本質的であるが、4脚歩行／走行においては、体重保持に関する情報が制御において重要なファクターとなることを示した。一方、6脚以上では体重保持の重要性は薄れ、現段階では4脚と6脚の間に質的な相違があるという感触を得ている。このように、運動と制御の研究を進めるにあたり、ある程度のリダクションを効かせた力学モデルを回路化したものと、制御経路を重ね書きし、運動量と情報の流れを可視化できるようなプラットフォームとして、ダイナミックフロウグラフを提案した。

本研究のように、進化という時間軸を導入することで、脚式ロコモーションを統一的に理解しようとする視点は斬新であり、このパイロット的研究を「運動と制御の進化学」という形に発展させることで、内外の研究者に大きなインパクトを与えることができるだろう。またそれにより脚式歩行の一番芯にある本質をつかむことで、脚式歩行ロボットの設計に新しい視点を与えることが期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. S. Kuroda, I. Kunita, Y. Tanaka, A. Ishiguro, R. Kobayashi and T. Nakagaki : “Common mechanics of mode switching in locomotion of limbless and legged animals”, J. R. Soc. Interface, 11 : 20140205 (2014) 査読有 doi: 10.1098/rsif.2014.0205
2. T. Kazama, K. Kuroiwa, T. Umedachi, Y. Komatsu and R. Kobayashi : “Locomotion Diversity in an Underwater Soft-Robot Inspired by the Polyclad Flatworm”, 2013 IEEE/RSJ

International Conference on
Intelligent Robots and Systems (IROS
2013), : 2083 (2013) 査読有

DOI:10.1109/IROS.2013.6696646

3. Kano, R. Kobayashi and A. Ishiguro :
“Decentralized control scheme for
adaptive earthworm locomotion using
continuum-model-based analysis”,
Advanced Robotics, 28(3) : 197-202
(2013) 査読有
DOI:10.1080/01691864.2013.861770

[学会発表] (計 21 件)

1. 小林 亮 : 「生物と数学とロボットと」、
生命動態の分子メカニズムと数理、京都
大学 (2015.03.17)
2. R. Kobayashi: “Locomotion of Animals,
Design of Robots and Mathematics”,
RIKEN Joint Rerreat 2015 , ヤマハリゾ
ートつま恋 (2015.01.29)
3. 村松 拓哉: 「砂ガニの歩容の数理モデ
ル」、応用数学合同研究集会、龍谷大学
(2014.12.19)
4. 村松 拓哉: 「砂ガニの歩容の数理モデ
ル」、日本動物行動学会、長崎大学
(2014.11.02)
5. R. Kobayashi : “A Mathematical
Challenge for Modeling Animal’s
Locomotion --- Dynamic Flow Graph ---”,
International Workshop “Neuronal
principles of learning and memory and
its perspectives for designing
autonomic distributed systems”,
Honolulu, USA (2014.10.03)
6. R. Kobayashi : “Learning from the
behavioral intelligence of the true
slime mold”, 29th RBC-NIRS
International Symposium, Kyoto
(2013.11.29)
7. R. Kobayashi : “Locomotion of Animals,
Design of Robots and Mathematics”,
International Conference on
Mathematical Modeling and
Applications, Meiji University
(2013.11.28)
8. T. Kazama : “Locomotion diversity in an
underwater soft-robot inspired by the
polyclad flatworm”, IEEE/RSJ
International Conference on
Intelligent Robots and Systems 2013
(IROS 2013), Tokyo (2013.11.05)
9. R. Kobayashi : “A design principle of
the decentralized control based on the
discrepancy function”, EASIAM 2013,
Bandung, Indonesia (2013.06.19)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 亮 (KOBAYASHI Ryo)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 60153657

(2) 研究分担者

石黒 章夫 (ISHIGURO Akio)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号 : 90232280

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :