

## 第22回青葉工学研究奨励賞



## 四脚動物の多様な運動パターン生成を司る 脚間協調機序の解明

東北大学  
電気通信研究所  
助教 大 脇 大

脚式ロコモーション（移動運動）を行う動物は、地球上に数多く存在し、両生類から哺乳類、さらには昆虫など節足動物にもおよぶ。これらの動物の祖先は、水中から陸上へとという劇的な環境変化をともなう進化の過程において、脚という運動器（効果器）を獲得した。これにより重力に抗し身体を支持するのみならず、脚間の運動を巧みに協調させること（脚間協調）によって移動のための推進力を生成し、地上での高効率かつ柔軟なロコモーションを可能としてきた。本研究の主たる対象である四脚動物は、地上において脚式ロコモーションを行った最初の哺乳類である。現在までの地球上における四脚動物の大繁栄は、長い進化の過程で獲得された、この適応的な移動能力に裏付けられているといっても過言ではない。実際、四脚動物は、移動速度に応じてエネルギー的に最適な歩容（足の接地順序によって分類される歩行パターン）を発現するのみならず、自身のおかれた環境、さらには動物種に応じてさまざまな歩容を発現することが知られている。このような状況依存的な歩容生成メカニズムを解明することができれば、生物学に資するだけでなく、環境適応性や耐故障性など、四脚動物に比肩する能力を秘めたロボットの工学的実現への基盤技術を創出することが期待できる。

このような四脚動物の脚間協調を司る神経メカニズムを示唆する知見として、除脳ネコを用いた神経生理学的実験が有名である。除脳ネコとは、間脳の部分を切断し大脳皮質と皮質下の連絡を断ったネコである。このネコの中脳の特定の場所を電気刺激するとトレッドミル上を歩行し、さらには、トレッドミルの速度と電気刺激の強度に応じて歩容を変化させる。この知見から、四脚動物の歩容は、脳などの上位の神経系による中央集権的な制御メカニズムによって生成されているのではなく、脊髄以下の比較的下位の神経系によって、自律分散的かつ自己組織的に生成されていることが示唆されている。このような知見に基づき、脊髄に内在しているといわれる神経回路網（CPG: Central Pattern Generator）を数学的にモデル化し、シミュレーションやロボットを用いた実機実験により四脚動物の歩容を再現する試みが多くなされてきた。これら既存のアプローチにおいては、あらかじめプログラムの定義された神経結合ネットワークによって各脚の運動位相の関係を明示的に設計する手法がほとんどであった。しかしながら、このアプローチでは歩容の再現性は保証されるものの、移動速度の変化、環境の変化、さらには自身の身体特性の変化に応じて自己組織的に歩容を変化させることは不可能であり、適応性は不十分であった。

本研究では、このような現状を打破し、四脚動物が示す

多彩な歩容の発現メカニズムを明らかにするため、比較的抽象度の高いモデルを用いて最低限の設定から脚間協調の本質を探る「ミニマリストアプローチ」を採用した。そして、各脚の局所的な力覚フィードバックのみを有する4つの非結合振動子から構成されるシンプルな自律分散制御則（図1 B）を提案した[1]。同制御則を実装したロボットによる実験の結果、身体の重量分布や移動速度に応じて高い適応性を示した[1, 2]。また、Roll方向への振動を励起する物理的振子を実装したところ、中速領域において、trot（対角の脚が同期して接地する歩容）とpace（同側の脚が同期して接地する歩容）が振子の有無で排他的に発現することを示した[3]。さらに、最新の結果（査読中）では、脚の振動子の固有角周波数 $\omega$ のみを変化させるだけで、低速歩容walkから中速歩容trotのみならず、高速歩容gallop（前、後同士の接地がほぼ同期）まで再現することに成功した（図1 A, C）。あらかじめプログラムした歩容を用いることなく、低速から高速領域までの歩容遷移をロボットを用いて再現した結果は世界初である。さらに、得られたさまざまな結果は実際の四脚動物の知見とよく一致するため、提案した制御則が脚間協調メカニズムの本質を据えていることを示唆している。現在は、同制御則を基盤として、二脚歩行、六脚歩行、さらには、超多脚歩行（ムカデ、ヤスデ）における脚間協調制御へと発展させ、脚数の異なるロコモーション様式の再現にも成功している。

- [1] D. Owaki et al., *J. R. Soc. Interface* **10** (2012) 20120669.  
 [2] D. Owaki et al., in *Proc. of IROS2012* (2012) pp. 1950-1955  
 [3] D. Owaki et al., in *Proc of Dynamic Walking 2013* (2013)

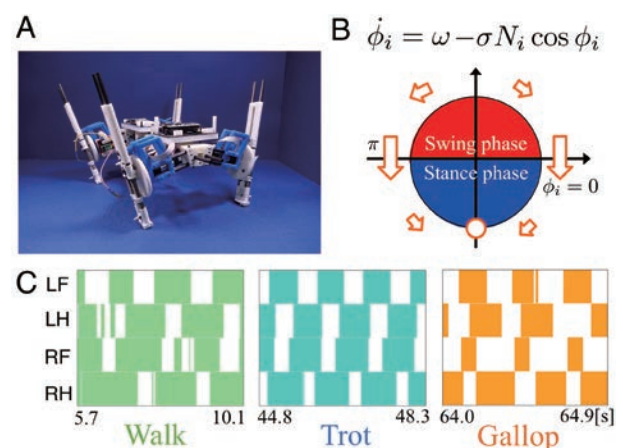


図1：(A) 開発した四脚ロボット。(B) 提案した脚間協調制御則。(C) 再現された歩容遷移。