



# 世界初、速度に応じて自発的に足並みを変える四脚ロボット

～ 四脚動物が巧みに足並みを変化させ効率よく移動するからくりの解明へ ～

## 【概要】

東北大学電気通信研究所の石黒章夫（いしぐろあきお）教授，大脇大（おおわきだい）助教の研究グループは，四脚動物が移動速度に応じて足並みを自発的に変化させる現象（歩容遷移現象）を，四脚ロボットで再現することに世界で初めて成功しました。

これまで，どのように四脚動物が移動速度に応じて自発的に足並みを変化させるか，についての制御メカニズムは明らかではありませんでした。本研究では，「脚に荷重がかかっているときは，そのまま身体を支え続けようとする」という，きわめてシンプルな制御則をそれぞれの脚が実行するだけで，歩容遷移現象<sup>\*1</sup>を生み出すことに成功しました。さらに，四脚ロボットにより再現された足並みは，エネルギー効率<sup>\*2</sup>に優れたものであり，ウマなどから得られた特性とよく一致することがわかりました。この成果は，四脚動物が足並みを自発的に変化させることで効率よく移動する仕組みや，動物が身体に有する多くの自由度<sup>\*3</sup>をどのようにして巧みに操っているかの解明に資すると考えられます。また，この成果を発展させることで，四脚動物に比肩しうる運動能力を有するロボットの工学的実現のための基盤技術となることも期待できます。

本研究成果は，2017 年 3 月 21 日（日本時間 3 月 21 日 19 時）に英国の科学誌 *Scientific Reports* 電子版に掲載されました。

## 【参考図】 ※最終ページに動画 URL 案内あり

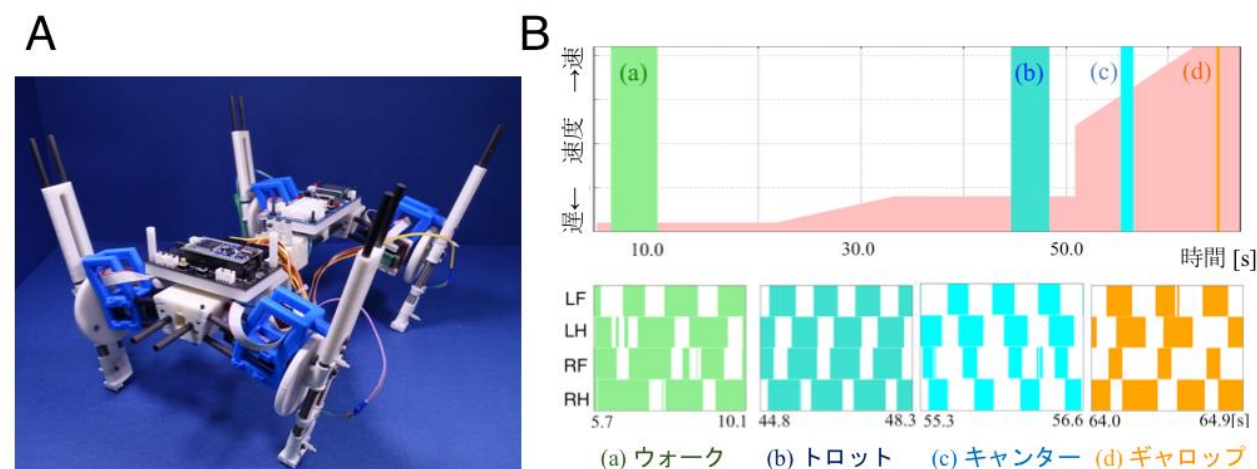
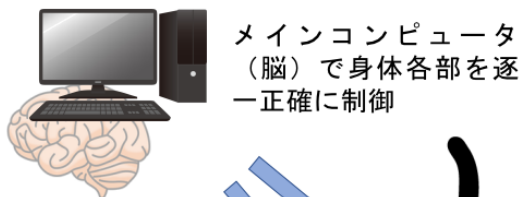


図 1 A 開発した四脚ロボット *Oscillex 3* B 再現された足並みの変化（歩容遷移現象） 上図：移動速度パラメータの変化。下図：色で示す期間は，各脚（左前脚 LF，左後脚 LH，右前脚 RF，右後脚 RH）が地面に接地している期間（身体を支えている期間）を示す。速度パラメータに応じて自発的に足並みが変わる。ウマなどと同様に，ウォーク，トロット，キャンター，そしてギャロップへの移り変わりを再現。

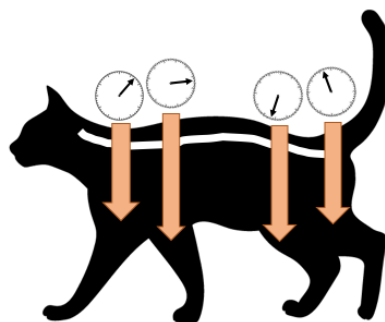
## 中央集権的な制御アプローチ



計算量：膨大  
環境適応性：低

## 自律分散的な制御アプローチ (地方分権的アプローチ)

各脚のコントローラが局所的な荷重のみから脚の運動リズムを調整するだけ！



計算量：少  
環境適応性：高

**図 2 中央集権的アプローチ**：脳に相当するメインコンピュータで逐一正確に身体の各自由度を制御しようとする。計算量はきわめて膨大となり、想定外の環境変化に対して脆弱。**自律分散的（地方分権的）アプローチ**：各脚で得られるセンサー情報（局所的な情報）のみを用いて脚の運動リズムを調整するだけで、速度に応じて適切な足並みを自発的に生成。計算量は少なく、環境適応性も高い。

### 【研究の背景】

四脚動物は、水中から地上への劇的な環境変化をともなう進化の過程で、捕食および生存のために実世界環境において柔軟かつ効率的に移動する能力を獲得してきたといわれています。これまでの地球上における哺乳類の繁栄は、このような環境適応的な移動（ロコモーション）能力に裏付けられているともいえます。この哺乳類の大半を占める四脚動物の多くは、移動速度に応じて、足並み（歩容）をウォーク（左後脚、左前脚、右後脚、右前脚の脚順で接地）からトロット（対角脚が同期して接地）、そして、ギャロップ（前同士、後同士がほぼ同期して接地）へと、エネルギー的に最も効率のよいとされる歩容へ自発的に遷移することが知られています [1]。この能力は、それぞれの脚の運動を巧みに協調させること（脚間協調）によって実現されています。この歩容遷移現象の背後にある脚間協調メカニズムを解明することは、脚式移動動物のロコモーションを生成するための鍵となる制御メカニズムを明らかにすることのみならず、実世界環境下において柔軟かつ効率的に移動可能な四脚ロボットの設計原理の構築につながることで期待されます。

### 【研究の方法】

本研究では、「動物の動きをロボットに再現させることで、そのメカニズムを明らかにする」というアプローチを採用しました。四脚動物の歩容遷移現象を再現するメカニズムを明らかにするために、以下の3つの単純化に基づく最低限の設定からロボットを設計しました：(1) 脚間協調メカニズムのみに焦点を当てるため、1本の脚の構造は1自由度のきわめてシンプルな構造（脚内の関節間の協調メカニズムは考慮しない）、(2) それぞれの脚のリズミックな運動を生成するコントローラとして、位相振動子というシンプルな振動子モデルを採用（一定のリズムで回転する時計の針のイメージ、このリズムに合わせて脚の上下運動を生成する）、(3) あらかじめプログラムして脚間の協調パターンを生成するのではなく、「脚に荷重がかかっている間は、そのまま身体を支持し続けようとする」という、きわめてシンプルな制御則によりそれぞれの脚が運動リズムを調整するだけで脚間協調パターンを生成。開発した四脚ロボットに提案した制御則を実装し、移動速度パラメータのみを変化させ、トレッドミル上にて歩行実験を行いました。

## 【成果の内容】

図 1B に示すように、移動速度のみの変化によって、(a) ウォークから (b) トロット、さらには (d) ギャロップへと自発的に歩容遷移することが確認されました。さらに興味深いことに、トロットからギャロップへの歩容遷移過程において、ウマの歩容遷移においてもみられる (c) キャンターとよばれる不思議な歩容も確認されました（例えば、右後脚、左後脚と右前脚、そして左前脚という 3 拍子で接地する左右非対称な歩容）。また、四脚ロボットのエネルギー効率を解析した結果、トロットおよびギャロップが各移動速度において効率のよい歩容となっており、ウマなどから得られた特性とよく一致していました [1]。

## 【研究の意義】

本研究は、生物学、ロボット工学、そして社会貢献の観点から、以下のような意義を有しています。

生物学的意義：四脚動物は地球上において脚を用いる移動様式を採用した最初の哺乳類です。したがって、この移動能力を司る脚間協調メカニズムを解明することは、その後の地球上における四足哺乳類の繁栄を理解する上で鍵となると考えられます。これまで、四脚動物の歩容を再現することを試みたさまざまな神経回路の数学モデルが提案されてきました。われわれが提案したモデルは、四脚動物のほとんどの歩容を実験的に再現した世界初のモデルといえます。さらに、「脚に荷重がかかっているときは、そのまま身体を支持しつづけようとする」という制御メカニズムは生物学的な知見とも一致しています [2]。

ロボット工学における意義：本研究の成果は、ロボットの身体に内在する大自由度をいかに巧みに制御し、適応的なロコモーションを生成するか、というロボティクスにおける一つの大きな課題に対して新たなアプローチを提供すると期待されます。脳に相当するメインコンピュータで逐一正確に身体の各自由度を制御しようとする既存の中央集権的な制御アプローチに対して、本研究では、各脚で得られるセンサー情報（局所的な情報）のみを用いて脚の運動リズムを調整するというきわめてシンプルな制御則だけで、速度に応じて適切な足並みを自発的に生成する、という自律分散的な制御アプローチを採用しました (図 2)。

社会的意義：実際の四脚動物の歩容の多くを再現する提案モデルは、災害現場など過酷な実世界環境を柔軟かつ効率よく移動するロボットの構築につながると期待されます。また、一つのパラメータのみにより足並みを変化させることができるため、飼い主の速度に合わせて自発的に足並みを変化させながら移動するユーザーフレンドリーな四脚ロボットの制御技術にも応用できます。さらに、コンピュータグラフィックス (CG) において、身体の物理的特性を与えると自動的に動物のアニメーション動作を生成するアルゴリズムの構築にもつながると考えられます。

## 【用語説明】

- \*1 歩容遷移現象：移動速度に応じて足並みを変化させる現象。多くの四脚動物は、低速ではウォーク、中速ではトロット、高速ではギャロップという足並みを発現することが知られている。
- \*2 エネルギー効率：移動距離に対するアクチュエーター（駆動部）で消費されたエネルギーの総和の比で定義される移動効率。
- \*3 自由度：ロボットにおいては、可動しうる関節の数。

【研究助成資金等】

科学技術振興機構 CREST(主たる共同研究者:石黒章夫)

日本学術振興会 科学研究費補助金 新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」26120008 (研究分担者:大脇 大)

日本学術振興会 科学研究費補助金 若手研究 (A) 25709033 (研究代表者:大脇 大)

【掲載論文名】

“A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping”

(ウォークからトロット, そしてギャロップへの自発的歩容遷移を示す四脚ロボット)

Dai Owaki and Akio Ishiguro

*Scientific Reports* 2017 年 3 月 21 日(英国時間・電子版)

【参考文献】

[1] Hoyt, D. F., and Taylor, C. R. Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature* **292**, 239–240 (1981).

[2] Pearson, K., Ekeberg, O., and Büschges, A. Assessing sensory function in locomotor systems using neuro-mechanical simulations. *Trends Neurosci* **29**, 625-631 (2006).

【動画 URL】

<https://youtu.be/F-5PbbFVwQ8>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学電気通信研究所

教授 石黒章夫

TEL : 022-217-5464

E-mail : [ishiguro@tohoku.ac.jp](mailto:ishiguro@tohoku.ac.jp)

(報道に関すること)

東北大学電気通信研究所総務係

TEL : 022-217-5420

FAX : 022-217-5426

E-mail: [somu@riec.tohoku.ac.jp](mailto:somu@riec.tohoku.ac.jp)