

身体支持と推進の寄与変化に基づく低速から高速へのシームレスな四脚步容遷移の実現

Seamless Gait Transition from Low to High Speed Quadruped Locomotion by Changing the Contribution of Body Support and Propulsion

○福原洸^{*†}, 大脇大^{*}, 加納剛史^{*}, 小林亮^{**‡}, 石黒章夫^{*‡}

○Akira Fukuhara^{*†}, Dai Owaki^{*}, Takeshi Kano^{*}, Ryo Kobayashi^{**‡}, Akio Ishiguro^{*‡}

*東北大学, **広島大学, †日本学術振興会, ‡(独) 科学技術振興機構 CREST

*Tohoku University, **Hiroshima University, †JSPS, ‡JST CREST

キーワード : 自律分散制御 (decentralized control), 脚間協調 (inter-limb coordination),
四脚ロコモーション (quadruped locomotion)

連絡先 : 〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学電気通信研究所本館 4 階 石黒・加納研
究室 福原洸 Tel: 022-217-5465, Fax: 022-217-5464, E-mail: a.fukuhara@riec.tohoku.ac.jp

1. はじめに

四脚動物は身体的特徴や移動速度, 周りの環境に応じて様々な歩容 (脚間の位相関係) を示す¹⁾. 例えば, ウマは低速で walk, 中速では trot, 高速では gallop へと歩容を遷移させ, それぞれの移動速度において効率的なロコモーションを実現している²⁾.

こうした適応的な歩容の発現機序を明らかにする鍵となるのが, 除脳ネコを用いた神経生理学的実験から得られた知見である. 大脳を外科的に切除されたネコは, 脳への電氣的刺激に応じて移動速度を上昇し, それに伴う歩容遷移を示す. これらの実験から, 脚間の協調運動は, 大脳などの高次脳神経系が中央集権的に切り替えているのではなく, 脊髄に存在する神経回路網 (Central Pattern Generator: CPG) によ

て地方分権的に生成されることが示唆された³⁾.

これまで Owaki らは, 身体部位間の物理的相互作用に基づいた脚間協調制御則を提案し, 速度に応じた歩容遷移や身体的特徴を反映した様々な歩容を再現してきた⁴⁾. しかし, 高速領域の歩容である gallop については, 未だ再現されていない. Owaki らのモデルでは主に「身体の支持」という脚の機能に注目したモデルであったが, 高速領域の gallop を再現するためには, 身体の支持のみならず「身体の推進」という機能を考慮する余地がある.

そこで本稿では, gallop まで含めた低速から高速への四脚ロコモーションの歩容遷移の再現を目的とし, 身体の支持と推進の観点から構築した脚間協調制御則を提案する. また, 2次元シミュレーションでの走行実験について報告する.

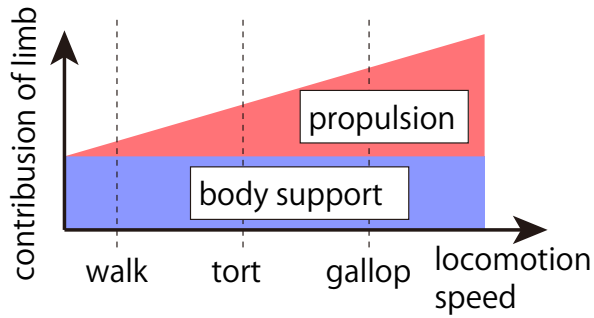


Fig. 1 Working hypothesis

2. 身体の支持と推進に着目した 脚間協調制御則

ここでは身体の支持と推進に関する作業仮説を示す。また、著者らが提唱する「手応え制御」に基づいて脚間協調制御則を構築する⁵⁾。

脚式ロコモーションにおいて、脚は「身体の支持」と「身体の推進」という2つの要請を同時に満足する必要がある。本研究では脚が果たす役割について次のような作業仮説を立てた (Fig.)。

- 身体を支持するという役割は、速度によらず変化しない。
- 身体を推進させるという役割は、移動速度の上昇に伴って重要になる。

この作業仮説を脚間協調制御則へ反映するために、先ず、「手応え」に基づいた脚間協調制御則⁵⁾に身体の支持と推進を導入する。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_i &= \omega \\ &+ \sigma^{support} \frac{\partial T_i^{support}(\phi_i, \mathbf{S}_i)}{\partial \phi_i} \\ &+ \sigma^{prop} \frac{\partial T_i^{prop}(\phi_i, \mathbf{S}_i)}{\partial \phi_i} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで ϕ_i は i 番目の脚の運動を司る位相振動子の位相 ($i = 0, 1, 2, 3$)、 ω は運動の周期に関わる固有角速度、 $\sigma^{support}$ は身体支持についてのフィードバック項の重み係数、 σ^{prop} は身体推進についてのフィードバック項の重み係数、 \mathbf{S}_i は i 番目の脚が検出するセンサ情報についてのベクトル、 $T_i^{support}(\phi_i, \mathbf{S}_i)$ は身体支持の手応え

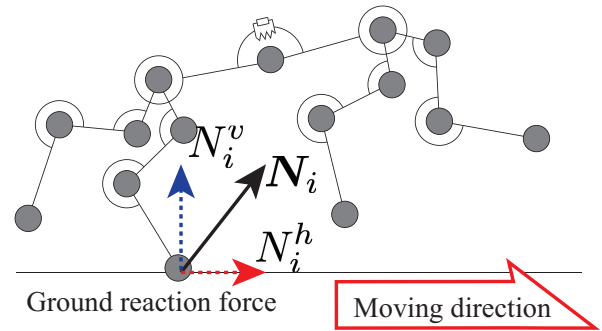


Fig. 2 Two dimensional kinematical model of quadruped robot

関数、 $T_i^{prop}(\phi_i, \mathbf{S}_i)$ は身体推進の手応え関数である。脚の周期的運動は位相振動子で記述され、 $\phi_i = 0 \sim \pi$ は遊脚相、 $\phi_i = \pi \sim 2\pi$ は支持相に相当する。式 (1) の第1項のみならば、 ϕ_i は ω に従い単調に増加するのみで、四脚動物が示すような多様な歩容は生まれない。適応的な脚間協調を生み出す鍵は第2項と第3項の手応えに基づいた局所センサフィードバックである。ここでの「手応え」とは制御器の意図と環境からの反応の整合性を意味しており、手応え関数として定量化されている。手応えが良くなるように制御変数 (ここでは ϕ_i) を修正するという制御を著者らは手応え制御と呼んでいる。本研究の身体の支持と推進に関する作業仮説は次式のように表現される。

$$\begin{pmatrix} \sigma^{support} \\ \sigma^{prop} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C^{support} \\ \alpha\omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 α と $C^{support}$ は正の定数である。 $\sigma^{support}$ が速度によらず変化しない一方で、 σ^{prop} は ω に比例して大きくなる。これにより、高速領域において、身体の推進に関する局所センサフィードバックの寄与が大きくなることが期待できる。

次に身体の支持と推進の手応えについて考える。身体の支持における良い手応えとは、支持脚相において検知される地面からの垂直抗力 (N_i^v) である (Fig.)。同様に、身体の推進における良い手応えとは、支持脚相において検出される推進力となる床反力の水平成分 ($N_i^h > 0$) であ

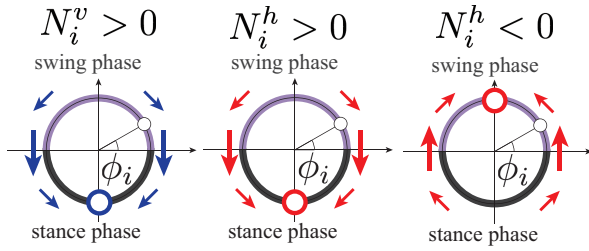


Fig. 3 Local sensory feedback

る。身体支持と推進の手応え関数はそれぞれ次式のように記述できる。

$$T_i^{support} = N_i^v (-\sin \phi_i) \quad (3)$$

$$T_i^{prop} = N_i^h (-\sin \phi_i) \quad (4)$$

また、これらを式 (1) に代入すると次式のようにになる。

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sigma^{support} N_i^v \cos \phi_i - \sigma^{prop} N_i^h \cos \phi_i \quad (5)$$

身体的支持についての局所センサフィードバックは、 $N_i^v > 0$ の時に位相を $3\pi/2$ に集める効果がある (Fig.). また、身体の推進については、 $N_i^h > 0$ のときに位相を $3\pi/2$ へ、 $N_i^h < 0$ のとき位相を $\pi/2$ へ集める効果がある。本モデルでは、脚間で位相情報のやり取りは行わないが、環境と身体の力学的相互作用によって床反力に他脚の情報は含まれる。例えば、支える脚の本数が減ると身体を支えている脚の垂直抗力は上昇する。床反力という情報を介した脚間の位相の調整により、状況依存的な協調運動を自己組織化される。

3. シミュレーション

本シミュレーションの目的は提案制御則によって、四脚動物が示す移動速度の応じた歩容遷移が発現するかを確かめることである。ロボットの身体は2次元平面のバネ・質点系で構成される。各関節トルクは仮想の巻バネ・巻ダンパによってモデルされている⁶⁾。また、肩や腰からみた足先の目標位置や各関節の目標角度は ϕ_i によってのみ決定され、 ω の変化しても、位相と

足先の目標軌道は変化しない。ロボットの全高は約 50 [cm]、総重量は 27 [kg] としてパラメータを試行錯誤的に決定している。Fig.(a) に示すように ω を 2.5, 10.0, 15.0 [rad/s] と段階的に上昇させ歩容の変化を確認する。

Fig.(b) は四脚動物が示す典型的な歩容と脚間の位相関係がどれだけ近いかを表している⁷⁾。値が低いほど、その典型歩容に近い脚間協調の位相関係にあるといえる。本シミュレーションは2次元モデルではあるため左右の区別がないが、左右があるものとして脚に番号割り振って評価している (0:前左脚, 1:後左脚, 2:前右脚, 3:前右脚)。まず、 ω が 0 から 2.5 [rad/s] に上がると、直ちに walk の位相関係へ収束していることが確認できる。また、 ω が 10.0 [rad/s] へ変化させると、前後の脚が同期する trot へ収束している。さらに ω を 15.0 [rad/s] へ上昇させると高速歩容である gallop へと歩容遷移していることが確認できた。

4. おわりに

本稿では、脚が果たす身体的支持と身体の推進という2つの役割に着目した脚間協調制御則を構築した。提案制御則によって低速から高速への歩容遷移を再現することをシミュレーションにて確認した。今後はロボット実機による実世界での制御則の検証と、分岐現象の側面から提案制御則の解析に取り組む。

参考文献

- 1) R. Muybridge: Animal locomotion: Muybridge work at the University of Pennsylvania. Ann Arbor, MI: University of Michigan Library (1888)
- 2) D. F. Hoyt, C. R. Taylor: Gait and the energetics of locomotion in horses, Nature, **292**, 239/240 (1981)
- 3) S. K. Shilk, F.V. Severin, G. N. Orlovskii: Control of walking and running by means of

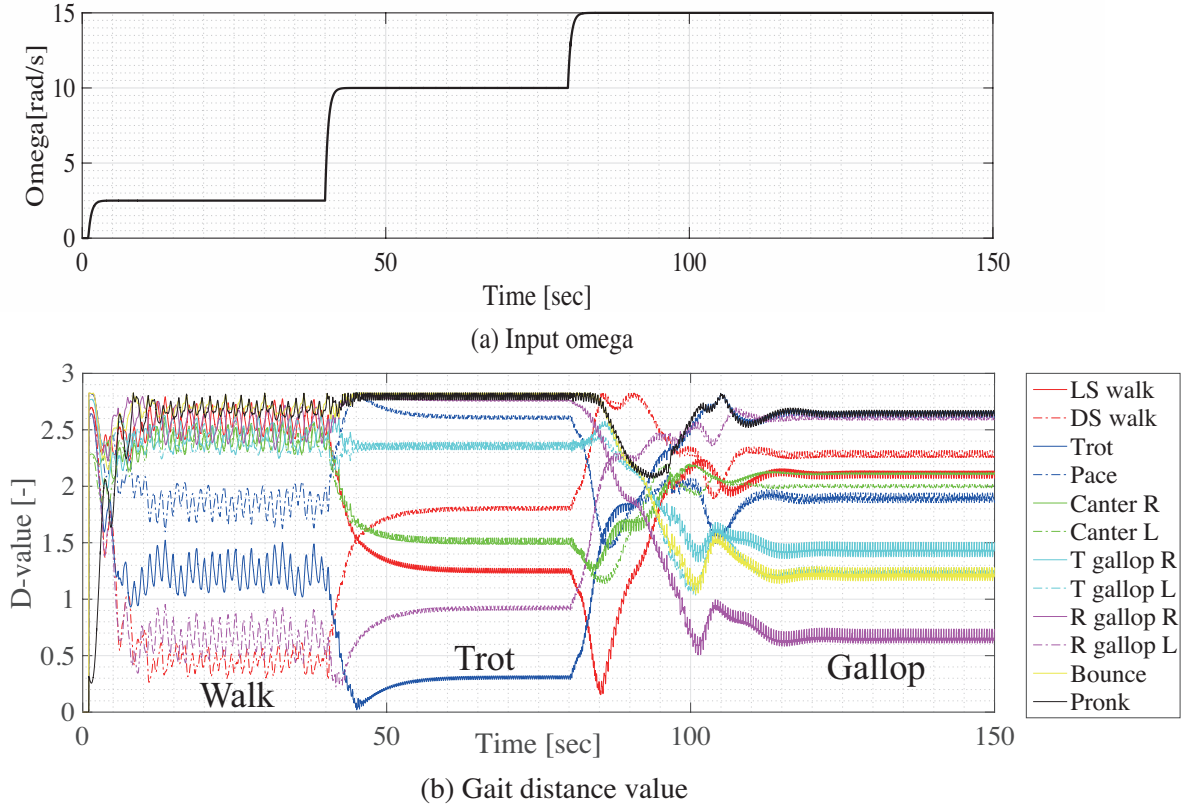


Fig. 4 Gait transition from low to high speed gait

electrical stimulation of the midbrain. *Biophysics* **11**, 756/765 (1966)

- 4) 大脇 大, 石黒 章夫: ミニマルな CPG モデルから探る四脚動物の脚間協調メカニズム, 計測と制御, **54-4**, 272/277 (2015)
- 5) M. Goda, S. Miyazawa, S. Itayama, D. Owaki, T. Kano, A. Ishiguro: Understanding interlimb coordination mechanism of hexapod locomotion via “TEGOTAE”- based control, *Living Machines 2016*, LNAI 9793, 441/448 (2016)
- 6) A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, A. Ishiguro: Leg stiffness control based on “TEGOTAE” for quadruped locomotion, *Living Machines 2016*, LNAI 9793, 79/84 (2016)
- 7) T. Kano, D. Owaki, A. Ishiguro: A simple measure for evaluating gait patterns during multi-legged locomotion, *SICE J. Control Measurement, and System Intergration*, **4-1**, 1/5 (2011)