

身体の力学的特性を活用した脚間協調に基づく 四脚ロボットの適応的ロコモーション生成

Adaptive Locomotion of Quadruped Robot Based on Inter-Limb Coordination by Exploiting Body Properties

○長澤 昂*, 大脇 大*, 森川 玲於奈*, 加納 剛史*, 石黒 章夫*,**

Kou Nagasawa*, Dai Owaki*, Leona Morikawa*, Takeshi Kano*, Akio Ishiguro*,**

*東北大学, **JST CREST

*Tohoku University, **JST CREST

キーワード: 四脚ロコモーション (Quadruped locomotion), CPG (Central pattern generator),
脚間協調 (Inter-limb coordination), 物理的相互作用 (Physical interaction)

連絡先: 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1-1

東北大学電気通信研究所2号館4階 石黒研究室 (W406,407),

東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 石黒研究室 長澤昂,

Tel.:022-217-5465, Fax.:022-217-5464 E-mail: nagasawa@cplx.riec.tohoku.ac.jp

1. はじめに

四脚動物は歩行速度や周りの環境に応じて適応的に様々な歩容 (walk, trot, pace, bound) を発現する¹⁾。さらに, walk歩容においては, 四脚動物の種の違いに応じて異なったロコモーションが生成されることが知られている^{2, 3)}。例えば, 猿などの霊長類は左後脚 (LH), 右前脚 (RF), 右後脚 (RH), 左前脚 (LF) の順で脚が接地する ‘diagonal-sequence’ walk (D-S walk) と呼ばれるwalk歩容を示す。一方, 霊長類以外 (馬など) の四脚動物はLH, LF, RH, RFの順で脚が接地する ‘lateral-sequence’ walk (L-S walk) を示すことが知られている。このようなロコモーションは各脚の運動をうまく協調させることで生成されている。しか

しながら, このようなロコモーションを生成するメカニズムは未だに明らかになっていないのが現状である。

四脚動物のロコモーション生成に関する興味深い生物学的知見として, 除脳ネコの実験が知られている⁴⁾。この実験から, 四脚動物のロコモーションは脳 (中枢) が逐一身体を制御しているわけではなく, 脊椎に内在する神経回路網 (Central Pattern Generator:CPG)⁵⁾が中核的な役割を果たし, 自己組織的に各脚の運動を協調させることで発現すると考えられている。このような生物学的知見に基づいて, 四脚歩行における脚間協調を実現するために様々な研究が行われてきた^{6, 7, 8, 9, 10, 11)}。これらの研究は有用な知見を提供したものの, CPGの素過程はその事例ごとにテイラーメイドかつ

アドホックに設計されている。また、脚間協調の制御方策においてもCPG networkの構造のみに焦点を当てて議論されているため、CPGに基づいた脚間協調に関する体系的な設計論はいまだ確立されていないのが現状である。

このような背景から本研究では、CPGに基づく制御方策の体系的設計論を確立し、適応的な脚間協調のメカニズムを解明するため、CPGに基づく制御方策について再考察することを試みる。近年、四脚動物を含む生物のロコモーションはCPG network等の制御系のみで生成されているのではなく、制御系、機構系、環境の三者間の相互作用によって生成されていることが着目されている¹²⁾。このような考察に基づき、著者らは、適応的な脚間協調の実現のためには、脚間の神経的作用のみならず、身体の力学的特性に起因する脚間の物理的相互作用を積極的に活用することが肝要である、という仮説に至った。

本研究では、このような問題を効果的に議論するため、ロボットを用いた構成論的アプローチを採用した。ロボットを用いたアプローチは、実験可能なパラメータが多様であるため、現在知られている四脚動物と同様の機構系を有するロボットから、非常に単純な機構系のロボットまで様々な条件で実験を行うことが可能である。また、シミュレーションを用いた数学的アプローチにおいては、環境をある程度理想的なものとしてモデル化してしまうため、身体と環境間の物理的な相互作用の影響を解析することが困難である。一方、ロボットを用いたアプローチにおいては、制御系、機構系、実世界環境の三者間の相互作用の解析が比較的容易になる。そのため、生物学的・数学的アプローチだけでは得ることが困難な新たな知見や、適応的な四脚ロコモーションの脚間協調を生成するための核となる

メカニズムを抽出が期待できる。

本研究では、低速領域の歩容であるwalk歩容に焦点を当てて議論を進める。具体的には、制御方策として、身体を介した脚間の物理的状态を反映する脚の力覚情報をフィードバックすることで位相修正可能なオシレータモデルを提案する。そして、上記のような最低限の設定に基づく四脚ロボット実機 (OSCILLEX) を開発し、本提案手法の妥当性を検証した。実験の結果、定常状態での安定的な歩行のみならず、自身の荷重の分布に応じた適切なロコモーションの創発、静止状態と歩行状態間のスムーズな遷移や歩行速度の変更が可能となることが確認されたので報告する。

2. 提案手法

2.1 四脚ロボット (OSCILLEX) の概要

本研究では最低限の設定から考察を進めるために、四脚ロボットの設計に際し、以下の3つの単純化を採用した。

- 1) CPGの構成要素として位相振動子モデルを起点とする。
- 2) 各脚内の関節間の協調を無視し、1本の脚は単純な構造とする。
- 3) 脚間協調における身体を介した物理的相互作用の役割を明確にするため、CPGを構成するオシレータ間の神経的結合は考慮しない。

以下の節では、上記の単純化に基づくロボットの制御系と機構系について詳細に説明する。

2.2 機構系

筆者らが開発した四脚ロボット実機 (OSCILLEX) を Fig.1 に示す。実機の全長は

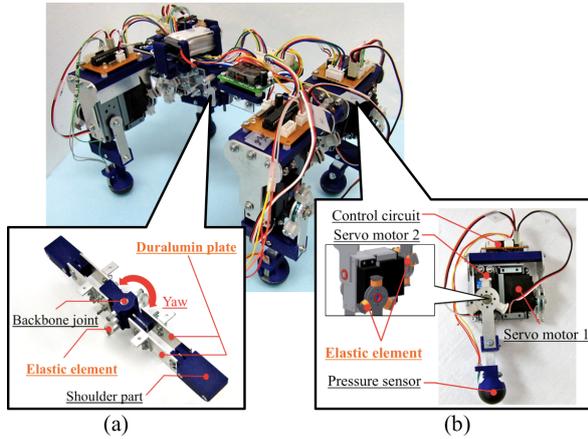


Fig. 1 The real physical quadruped robot. (a) Backbone segment and (b) a single leg segment.

0.28[m], 幅は0.19[m], 高さは0.16[m], 質量は1.6[kg]である。各脚は背骨と垂直になるように結合されている。Fig.1 (a) に示されるように背骨は計4枚の板と弾性要素で構成されている。その構造は、前後の脚の固定点から伸びる平行な2枚の板が、中心でヨー方向の回転バネとなる弾性要素を介して結合している。これにより、各脚先の動きに起因して生まれる、背骨にかかる無理な曲げモーメントをある程度吸収することができる。また、Fig.1 (b) は1本の脚の詳細を示している。脚を駆動させるために2つのサーボモータ (servo motor 1, servo motor 2 (Kondo Kagaku Co., Ltd.: KRS-HV Series RED Version)) を実装している。各脚先には圧力センサ (Interlink Electronics Inc. : FSR400) が実装されており、これによって脚にかかる力を検出している。また、ある程度衝撃を吸収させるために、各サーボモータと関節の結合部分に弾性要素を実装している。さらに各脚にはそれぞれマイクロコンピュータ (AVR ATmega 88P) が実装されており、これにより各脚の振動子の位相を制御し、各サーボモータを駆動している (2.3節参照)。

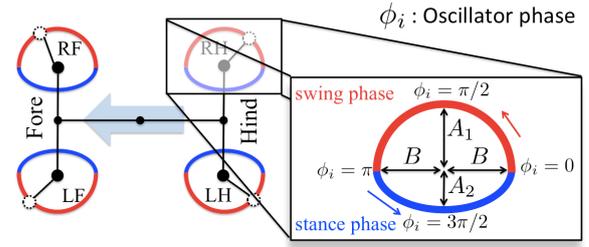


Fig. 2 Target trajectories of the feet of each leg.

2.3 制御系

各脚を周期的に駆動するために単純な位相振動子を用い、振動子の位相 ϕ_i の時間発展を以下のようにモデル化した：

$$\dot{\phi}_i = \omega + f_i, \quad (1)$$

ここで ω は固有振動数である。右辺第2項の f_i は機構系からの局所センサフィードバック項であり、詳細は後述する。

この振動子の位相によってFig.1 (b) のservo motor 1, servo motor 2 に示される2つのサーボモータを駆動している。 i 番目の脚のサーボモータの目標位置を振動子の位相 ϕ_i を用いて、次式のように制御する (Fig.2)：

$$\begin{aligned} Y_i &= A_1 \sin \phi_i & (0 \leq \phi_i < \pi), \\ Y_i &= A_2 \sin \phi_i & (\pi \leq \phi_i < 2\pi), \\ X_i &= -B \cos \phi_i & (0 \leq \phi_i < 2\pi). \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 A_1 , A_2 , B は正の定数($A_1 > A_2$)を表している。また、 X_i と Y_i はそれぞれ体軸方向の駆動 (servo motor 1) と体軸に垂直な方向の駆動 (servo motor 2) を生成するように実装しているため、この2つのサーボモータによりFig.2で示されているような楕円軌道が生成される。ここで、 Y_i は身体の外側方向が正となるように定義する。1本の単純な構造の脚を1つの位相振動子で制御するという設定のもとで議論するため (単純化1, 2)), Fig.2のよう

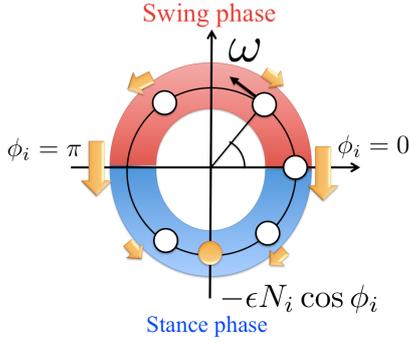


Fig. 3 Schematic of the dynamics in an individual component of the GPG depending on local sensory feedback $-\epsilon N_i \cos \phi_i$. The phase is pulled toward $(3/2)\pi$ based on the local sensory feedback (arrows).

に脚先を楕円軌道で駆動する方策を採用した。この理由を以下で説明する。もし、4本の脚に均等に荷重がかかって立っている状態から1本の脚を上げると、上げた脚の方へ倒れてしまう。これは、支持脚となっている脚の支持多角形の中に重心が入っていないために起こる。つまり、支持脚の支持多角形の中に重心が入るように脚を駆動することが重要であり、重心が支持多角形の中に入った状態で脚を上げると転倒を回避できる。そのため、脚先の目標位置がFig.2のような軌道を描くように設計した。これにより、身体の重心移動がスムーズに行われ、自発的な遊脚期と支持脚期の切り替えが可能となる。具体的には、 $0 < \phi < \pi$ では脚先の目標位置が身体の重心から遠くなるため遊脚に、 $\pi < \phi < 2\pi$ では脚先の目標位置が重心の近くに引き寄せられて体重を支えるため支持脚になりやすくなる。

次に、身体特性を活用した脚間協調を実現するために本研究で提案する局所センサフィードバック則について説明する。 f_i を含む、位相 ϕ_i の時間発展を次式のようにモデル化した：

$$\dot{\phi}_i = \omega - \epsilon N_i \cos \phi_i. \quad (3)$$

右辺第2項の N_i は接地により脚が地面から受け

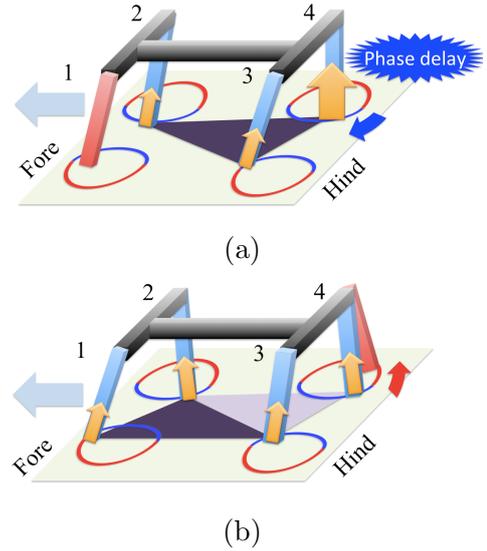


Fig. 4 Schematic showing the physical effect of the local sensory feedback.

る力であり、 ϵ は機構系から制御系へのフィードバックの大きさを表す正の定数である。右辺第2項によりFig.3に示されるように、振動子の位相 ϕ_i は脚に力がかかると $3\pi/2$ に近づくように修正される。つまり、脚に力がかかっている状況ではその脚は支持脚であり続けるといった効果を表している。この効果により、身体の物理的状況を反映した力学的に理にかなった支持脚と遊脚の遷移が起きる。例えば、Fig.4 (a)で示されるように右後脚に大きな力がかかっているような状況では当該脚は位相を遅らせ自身を支え続けようとする。しかし、Fig.4 (b)のように対角の左前脚が支持脚に遷移すると、右後脚にかかる力が小さくなり、その結果、遊脚に遷移することができる。このように、振動子間の相互作用 (Neural communication) がなくとも、身体を介した力学的な相互作用 (Physical communication) によって位相を修正し、適切な歩行の生成が期待できる。

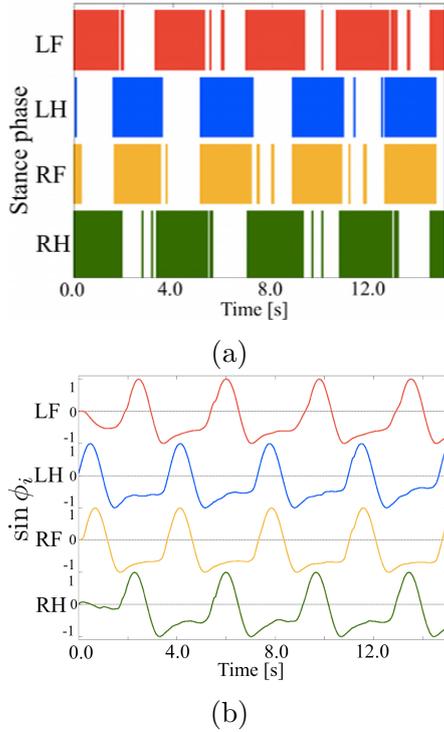


Fig. 5 Experimental results of the steady walking motion: (a) the gait diagram, and (b) the phases.

3. 実験結果

本稿で提案するモデルおよび局所センサフィードバックの妥当性を検証するために定常歩行の確認，身体特性の変化に対する適応性の検証，および，歩行速度の変更に対する適応性の検証を行った．まず実験を行うにあたり，実機のパラメータとして $\varepsilon=0.0052$ ，サーボモータの最大振幅を $A_1=0.09[\text{m}]$ ， $A_2=0.03[\text{m}]$ ， $B=0.04[\text{m}]$ とした．次に初期条件として，脚の初期位相はすべて $0.0[\text{rad}]$ ($\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = 0.0[\text{rad}]$)とし，また，各脚に実装されている振動子の角周波数 ω は $\omega = 0.4[\text{rad}/\text{sec}]$ とした．

3.1 定常歩行

定常歩容の実験結果をFig.5に示す．Fig.5は実験開始から14[s]までのゲイトダイアグラム（同図 (a)）と振動子の位相（同図 (b)）を表

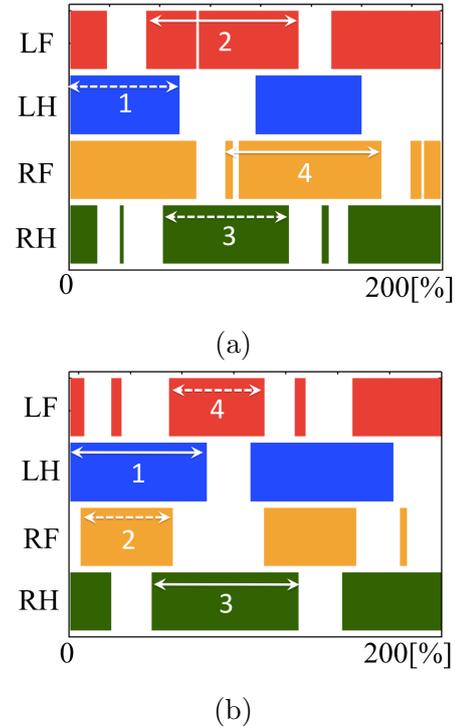


Fig. 6 Experimental results of the gait for changes in body properties: (a) with a load of 0.12 kg on the fore legs and (b) with a load of 0.29 kg on the hind legs.

している．ロコモーション実験の開始直後から位相の引き込みが起こり，瞬時に定常歩行に落ち着いている様子が確認できる．これにより，提案する局所センサフィードバック則を用いることで適切に各脚の振動子の位相を修正し，歩行が行われることが確認できた．

3.2 身体特性の変化に対する適応性

身体特性の変化として脚の前後で脚にかかる荷重を変化させて実験を行った．Fig.6(a)は各前脚に0.12kgの重りを搭載した場合の定常状態における2歩行周期分のゲイトダイアグラムを表している．重りを搭載していない定常歩行のFig.5 (a) と比べると，重りを搭載した前脚の支持脚期が増加している様子が見て取れる．また，脚運びがLH, LF, RH, RFの順のL-S walkが発現していることがわかる．Fig.6(b)

Table 1 Duty factors for different loading configurations

	LF	LH	RF	RH
No load	0.66	0.52	0.59	0.61
Fore leg load	0.81	0.63	0.85	0.58
Hind leg load	0.53	0.75	0.52	0.75

は各後脚に0.29kgの重りを搭載した場合の定常状態における2歩行周期分のゲイトダイヤグラムを表している。同図(a)とは逆に、重りを搭載した後脚の支持脚期が増加しており、歩容も脚運びがLH, RF, RH, LFの順のD-S walkが発現していることがわかる。

各試行における各脚10歩分のDuty比の平均値をTable.1に示す。また、Fig.7に各荷重分布におけるDuty比およびDiagonalityの関係を示す。ここで、Duty比およびDiagonalityは以下のように定義されている：

- Duty比：
 - 各脚の支持脚期間の1歩行周期に対する割合
- Diagonality：
 - 後脚が接地してから同側の前脚が接地するまでの時間の1歩行周期に対する割合

Table.1より定量的にみても、荷重なしに比べ荷重のかかっている脚のDuty比が増加している様子が分かる。

Fig.7は各荷重で3回ずつ試行したデータをプロットしたものである。荷重なしを緑色、後荷重をオレンジ色、前荷重を緑色でそれぞれプロットしている。Diagonalityが50%以上の場合、猿などの霊長類が示すD-S walkと呼ばれる歩容に対応し、50%以下の場合、馬などの四脚動物が示すL-S walk と呼ばれる歩容に対応する。Fig.7より、荷重なしの場合は50%付近の

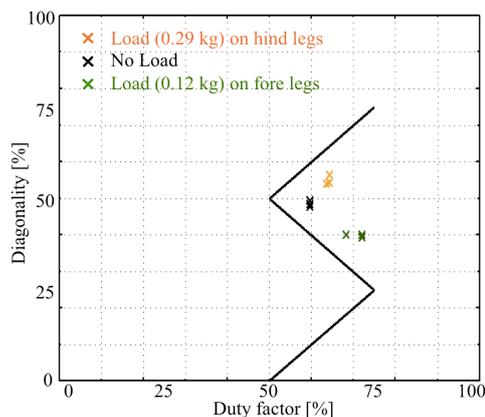


Fig. 7 Hildebrand diagram³⁾ of the duty factor and diagonality in our experimental results.

walking trotといわれるあたりに分布していることがわかる。また、後荷重の場合、50%を上回る位置（D-S walk）に分布しており、一方、前荷重の場合、50%を下回る位置（L-S walk）に分布していることがわかる。この結果から、単純な制御則にもかかわらず荷重の分布の違いに応じたロコモーションが発現していることが確認された。さらに、提案する制御則は、四脚動物の種の違いによって異なるwalk歩容（L-S walkとDS-walk）が発現する理由の一つが、生物種の荷重分布の違いによって発現しているという可能性を示唆している。

3.3 歩行速度の変更に対する適応性

歩行速度の変更に対する適応性の検証を行うために2つの実験を行った。まず、静止状態と歩行状態間での遷移を検証するためにFig.8に示されるように16～26[s]の間で角周波数 $\omega = 0.0[\text{rad/sec}]$ とし、それ以外の時間は $\omega = 0.4[\text{rad/sec}]$ として実験を行った。また、歩行速度の遷移を検証するためにFig.9に示されるように16～26[s]の間で角周波数 $\omega = 0.6[\text{rad/sec}]$ とし、それ以外の時間は $\omega = 0.4[\text{rad/sec}]$ として実験を行った。

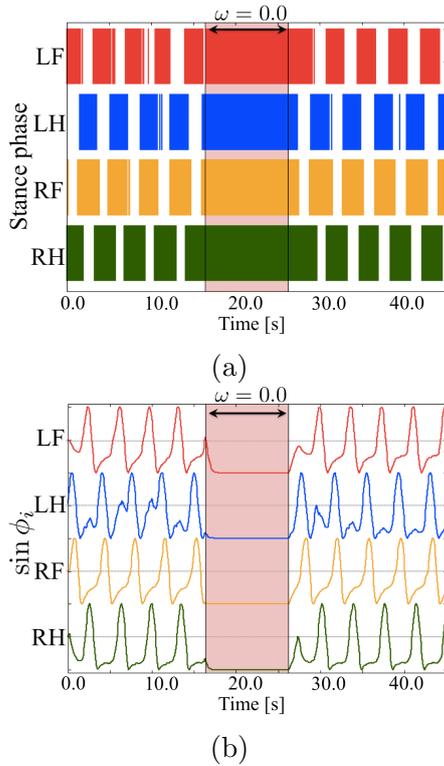


Fig. 8 Experimental results showing the transition between walking and standing motion by changing ω : (a) the gait diagram and (b) the phases. The hatching region (16.0–26.0 s) indicates the time during which $\omega = 0.0$ rad/s.

Fig.8より、実験開始直後に即座に位相が引き込まれ定常歩行が行われていることが確認できる。さらに、 $\omega = 0.0$ [rad/sec]となっている赤で影をつけている範囲内において非常にスムーズに歩行状態から静止状態へと遷移し(16[s], $\omega = 0.4$ [rad/sec] \rightarrow 0.0 [rad/sec]), その後、ロコモーションが再開している様子(26[s], $\omega = 0.0$ [rad/sec] \rightarrow 0.4 [rad/sec])が確認できた。また、Fig.9においても、 $\omega = 0.6$ [rad/sec]となっている青で影をつけている範囲内において、歩行が停止することなく自身の歩行速度に応じたロコモーションが発現し、その後、 $\omega = 0.4$ [rad/sec]となってもロコモーションが継続していることが確認された。

この結果を数学的観点から考察したところ、

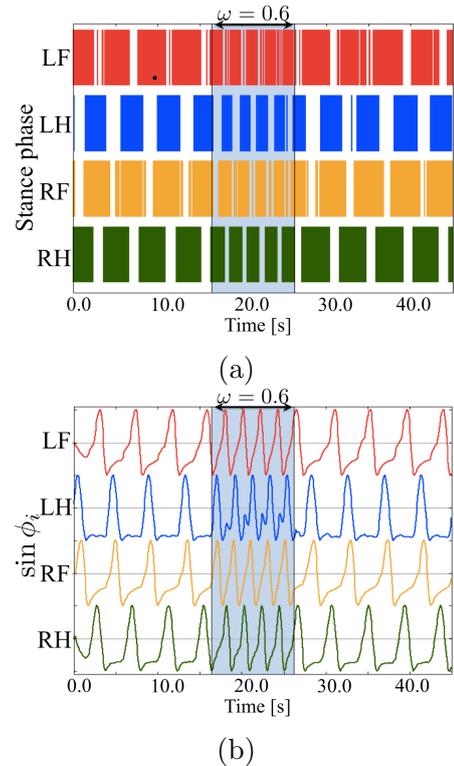


Fig. 9 Experimental result showing the transition during a change in walking velocity by changing ω : (a) the gait diagram and (b) the phases. The hatching region indicates the time during which $\omega = 0.6$ rad/s.

非常に興味深い知見が得られたので以下で説明する。(3)式の右辺第2項を

$$a_i = -\varepsilon N_i \quad (4)$$

とおくと、(3)式は次式の振動性と興奮性を兼ね備えたActive Rotatorモデルの一般形¹³⁾：

$$\dot{\phi} = \omega - a_i \cos \phi. \quad (5)$$

と整合する。

Active Rotatorが振動性・興奮性のどちらの性質で振る舞うかは、この a_i の値に依存する。Fig.10に $a_i < \omega$ の場合(左図)と $a_i > \omega$ (右図)の場合のActive Rotatorの特性を示す。同左図の場合、角速度 $\omega - a_i \cos \phi$ で単位円上を回転する振動性の性質を示す。一方、同右図の場合、 $\omega - a_i \cos \phi = 0$ を満たす安定解と不

安定解（それぞれ図中の白丸と黒丸）が存在し，外乱などが加わらない場合は安定解の位相に収束する．もし，外乱などにより不安定解の位相を超えると単位円上を一周し，再び安定解に落ち着く興奮性の性質を示す．また，図中の単位円付近の破線がActive Rotatorの振動性と興奮性の性質が切り替わる指標 ω/a_i を表している．すなわち(4)式から，脚にかかる力である N_i の値によって安定解と不安定解の値が変化する．このため， a_i の値が脚の状態によって動的に変化することで振動性・興奮性の性質が自発的に変化し，両者の拮抗関係によってロコモーション生成が行われていると考えられる．

Fig. 11は振動性と興奮性の時空間的励起を示したものであり，(a)がFig. 8の結果，(b)がFig. 9の結果に対応している．また，図中の青が振動性($\omega/a_i > 1$)，赤が興奮性($\omega/a_i < 1$)を示している．Fig. 11 (a)において，興奮性の性質を活用することで静止状態から歩行状態，歩行状態から静止状態への迅速な引き込みが起き，静止状態と歩行状態間のスムーズな遷移が発現していることが確認できる．一方，Fig. 9のように ω が大きくなり，歩行速度が速くなるとFig. 11 (b)のように ω が大きくなっている期間(16[s]~20[s])は振動性の性質が活用されている様子が確認できた．これらの結果から，提案する局所センサフィードバック則を用いることにより，ロボットが自身の状況に合わせて振動性と興奮性の性質を時空間的に励起させることで位相を適切に修正し，静止状態と歩行状態間の遷移や歩行速度間の遷移を行っていることが確認された．

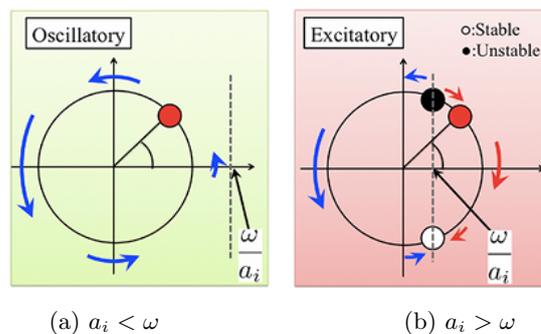
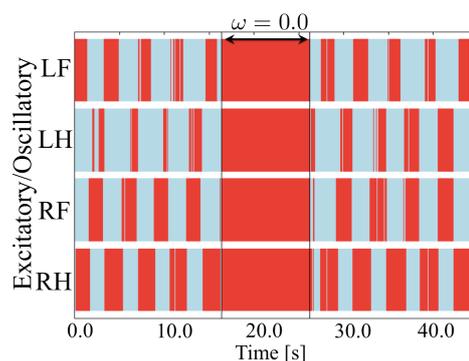
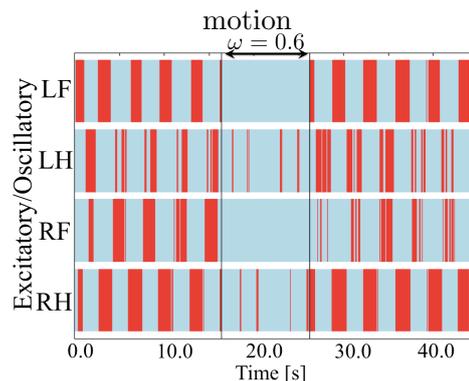


Fig. 10 Phase dynamics of the active rotator for the cases of (a) $a_i < \omega$ and (b) $a_i > \omega$. The active rotator exhibits oscillatory behaviour in the case of (a) and excitatory behaviour in the case of (b).



(a) transition between walking and standing



(b) transition during a change in walking velocity

Fig. 11 Spatio-temporal pattern of the excitatory and oscillatory regimes in the proposed CPG model. In these figure, the red and sky blue areas represent the excitatory and oscillatory regimes, respectively.

4. まとめと今後の課題

本稿では、身体の力学的特性に起因する脚間の物理的相互作用を積極的に活用することが可能なCPGモデルを提案した。その妥当性を検証するため非常に簡素な四脚歩行ロボットを開発し、検証実験を行った。実験の結果、定常状態での安定的な歩行のみならず、自身の荷重の分布に応じた適切なロコモーションの創発、静止状態と歩行状態間の遷移や歩行速度間の遷移が可能となることが確認された。以上のことから、神経的な結合を用いずとも身体の力学的特性に起因する脚間の物理的相互作用によって適応的なロコモーションを生成可能であることがわかった。さらに、得られた結果は生物学のデータとも類似することから、四脚動物のロコモーション生成メカニズムの一部を抽出できていると考えられる。

今後は、歩容間での遷移における本提案手法の妥当性の検証を行っていく予定である。

謝辞

広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻 小林亮教授からは、本研究に対し多くの有益な助言を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Muybridge, “Animal locomotion: The Muybridge work at the University of Pennsylvania”, University of Michigan Library, 1888.
- 2) D. F. Hoyt, and R. Taylor, “Gait and the energetics of locomotion in horses”, *Nature*, vol. 292, pp. 239-240, 1981.
- 3) M. Cartmill, P. Iemelin, and D. Schmitt, “Support polygons and symmetrical gaits in mammals”, *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 136, pp. 401-420, 2002.
- 4) M. L. Shik, F. V. Severin, and G. N. Orlovskii, “Control of walking and running by means of electrical stimulation of the mid-brain”, *Biophysics*, vol. 11, pp. 756-765, 1966.
- 5) S. Grillner, “Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates”, *Science*, vol. 228, pp. 143-149, 1985.
- 6) A. J. Ijspeert, “Central pattern generators for locomotion control in animals and robots : a review”, *Neural Networks*, vol. 21(4), pp. 642-653, 2008.
- 7) M. Golubitsky, I. Stewart, P. L. Buono, and J. J. Collins, “Symmetry in locomotor central pattern generators and animal gaits”, *Nature*, vol. 401, pp. 693-695, 1999.
- 8) H. Kimura, S. Akiyama, and K. Sakurama, “Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator”, *Autonomous Robots*, vol. 7, no. 3, pp. 247-258, 1999.
- 9) Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. H. Cohen, “Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts”, *International Journal of Robotics Research*, vol.22, no.3-4, pp. 187-202, 2003.

- 10) K. Tsujita, K. Tsuchiya, and A. Onat, “Desentralized Autonomous Control of a Quadruped Locomotion Robot using Oscillators”, *Artificial Life and Robotics* 5, Springer Verlag, pp. 152-158, 2003.
- 11) L. Righetti, and A. J. Ijspeert, “Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion”, *In Proc. of ICRA2008*, pp. 819-824, 2008.
- 12) R. Pfeifer, and C. Scheier, *Understanding Intelligence*. Cumbreland: The MIT Press, 1999.
- 13) S. Shinomoto, and Y. Kuramoto, “Phase transitions in active rotator systems”, *Prog. Theor. Phys.* **75**, pp. 1105-1110, 1986.