位相制御と筋緊張制御の有機的整合が可能な脚歩行ロボットの開発

Development of a Legged Robot That Enables
Well-balanced Coupling between Phasic and Tonic Control

○ 糸澤 祐太 (東北大) Skarka Martin (東北大)

佐藤 貴英 (東北大) 加納 剛史 (東北大)

正 石黒 章夫 (東北大 / JST CREST)

Yuta ITOZAWA, Tohoku University, itozawa@cmlpx.ecei.tohoku.ac.jp

Martin SKARKA, Tohoku University

Takahide SATO, Tohoku University

Takeshi KANO, Tohoku University

Akio ISHIGURO, Tohoku University / JST CREST

A systematic way of designing autonomous decentralized control system is still missing, despite its appealing concept. In order to alleviate this, we have so far focused on serpentine locomotion, and have proposed a design scheme of interaction between the control and mechanical systems in which both the phasic and tonic control are taken into account. In this paper, we aim to verify the validity and universality of this design scheme by applying it to legged locomotion. As a first step, we develop a cart-pulling biped robot which has a simple mechanical structure. The preliminary experimental results show that phasic and tonic control are well-coordinated.

Key Words: Autonomous decentralized control, Discrepancy function, Phasic/tonic control, Legged locomotion

1. はじめに

生物は非構造的で予測不能的に変動する環境下であっても、リアルタイムかつ合目的的に振る舞う適応的な知を有している。このような知を発現し、あたかも生物のごとく柔らかくしなやかに動き回ることのできるロボットを創り出すためには、ロボットの身体に生物同様の大きな自由度を持たせ、かつそれらを巧みに制御することが必要となる。そこで、大自由度系を扱う制御方策として着目されているのが自律分散制御である。自律分散制御とは、単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つ要素（自律個）が多数集まり相互作用することで、大域的に有用な機能を創発させる制御方策である。このような特性ゆえに、高い適応性を有する大自由度ロボットの設計に際して強力なツールとなることが期待されている。

しかしながら、自律分散制御に関する体系的な設計論はいまだ存在していないのが現状である。なぜならば、協働的振る舞いを発現するための「個（自律個）」と「全体」をつなぐロジックが依然として欠如しているためである。この問題を解決するためには、(1) 自律個のダイナミクス、(2) 自律個間の相互作用様式、そして(3) 制御系（自律個集団）と機構系（身体）の連関様式、に対して明確な設計指針を与えることが必要である。上記(1)と(2)に関しては、結合振動子系を用いた運動制御などの既存研究において議論されているものの[1]-[5]、(3)に関しては事例ごとにアドホックかつテーラーメイドに設計されているのが現状である。この事実を踏まえ、特に(3)に関する体系的な考察は喫緊の課題であるといえる。

そこで筆者らは、特に上記(3)に焦点を当て研究を行ってきた。具体的には、純粋に自律分散制御がなされている真性粘菌変形体のアメーバ様ロコモーションに着目することで、齟齬関数(discrepancy function)に基づく局所センサフィードバック則の設計スキームを得た[6][7]。これは、制御系・機構系・環境間に生じる齟齬を身体の局所情報に基づいて検出し、それを制御系を構成する振動子の位相にフィードバックすることで、制御系と機構系の連関を図るというものであった。この制御則は、さらに高等な生物であるヘビの這行用ロコモーションにも適用され、その

妥当性が検証されてきた[8]。

しかしながら、実際の生物が示すような高い適応能力を実現するには、このような位相のみに着目した制御則では不十分である。なぜならば、生物は身体各部の位相関係のみならず、筋緊張がもたらす作用力やスティフネスの空間分布を環境に応じて巧みに変化させているからである。最近、筆者らは位相制御と筋緊張制御の双方を考慮した局所センサフィードバック則を提唱した[9]。そして、この制御則をヘビの這行様ロコモーションに適用してシミュレーション実験を行い、優れた環境適応性が実現できることを示してきた。しかしながら、この制御則の普遍性を示すには、ヘビよりもさらに高等なロコモーション様式において、その妥当性を検証する必要がある。

そこで本研究では脚歩行に着目する。本研究は初動段階にあるため、問題の簡単化のために荷車を牽引する二脚ロボットの自律分散制御を採り上げる。そして、設計した制御則を実装した実機を開発し、位相制御と筋緊張制御が適切に行われることを実験的に検証する。

2. モデル

2.1 機構系

本研究で用いるロボットの模式図を図1に示す。ロボットは二本の脚と荷車から構成されており、各脚には股関節と膝関節が存在し、それぞれビッチ方向にのみ自由度を有している。そして、各関節は拮抗的に取り付けられた可変弾性要素(Real-time Tunable Spring: RTS)によって駆動される。可変弾性要素とは、自然長を実時間かつ動的に改変可能なバネであり、このような特性ゆえに、能動性と受動性の双方を兼ね備えた機械要素といえる。 i 番目の関節に取り付けられた可変弾性要素にかかる力 F_i^{RTS} は、次のように記述される：

$$F_i^{RTS} = \frac{\alpha}{l_i^{RTS}} \text{Max}[0, l_i - l_i^{RTS}]. \quad (1)$$

ここで、 l_i 、 l_i^{RTS} は可変弾性要素の実際の長さ、ならびに自然長である。 α/l_i^{RTS} は可変弾性要素のバネ定数であり、筋緊張度

Fig. 1 Schematic illustration of control and mechanical systems.

を特徴づけている。自然長 l_i^{RTS} が短くなるにつれ、筋緊張が高まることに注意されたい。各関節の両側の可変弾性要素にかかる力は拮抗的に働くため、差動トルクによって関節を曲げることができる。これにより脚歩行運動を実現することができる。

2.2 制御系

本節では、上記機構系を自律分散的に制御する設計論を示す。図1に示すように、制御系の自律個の素過程として各可変弾性要素ごとに振動子を導入し、結合振動子系を構成する。ここで、各可変弾性要素と振動子との対応関係は図中の番号によって与えられるものとする。本モデルでは拮抗筋の位相関係だけでなく筋緊張の空間分布のダイナミクスにも着目するため、 i 番目の可変弾性要素に対応する振動子を位相 ϕ_i と振幅 R_i の2変数で記述する。位相 ϕ_i の時間発展は以下の式(2)で記述される：

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + \sum_j \varepsilon_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \psi_{ij}) - \varepsilon_1 \frac{\partial I_i}{\partial \phi_i}. \quad (2)$$

ここで、 ω は振動子の固有角振動数である。右辺第2項は、振動子間の相互作用項であり、隣接する振動子間の位相差が ψ_{ij} に引き込まれるように設定されている。 ψ_{ij} の具体的な値は図1に示す。ここで、 ε_{ij} は振動子間の結合強度を表している。右辺第3項は機構系からの局所センサフィードバックを表している。 I_i は歪関数であり、当該自律個で生じた歪を何らかの局所情報に基づいて検出する関数である。本モデルでは、環境との相互作用の結果決定される実際の長さ l_i と、制御系からの指令値によって決定される可変弾性要素の自然長 l_i^{RTS} の差を用いて歪関数 I_i を式(3)のように設計した：

$$I_i = (l_i - l_i^{RTS})^2. \quad (3)$$

この位相への局所センサフィードバックは、従来研究[6][7][8]と同様に、自律個の位相の修正によって歪を軽減することで、制御系と機構系の有機的整合を図っている。

一方、振幅 R_i の時間発展は次のように記述される：

$$\frac{dR_i}{dt} = \varepsilon_2 (\alpha \sqrt{I_i} - R_i). \quad (4)$$

ここで、 ε_2 と α は正の定数である。(4)式は、歪の変化に追従して振動子の振幅が変化することを意味している。可変弾性要素の自然長 l_i^{RTS} は次式のように設定する：

$$l_i^{RTS} = a \cos \phi_i + b + ce^{-\beta R_i}. \quad (5)$$

ここで、 a, b, c, β は正の定数である。右辺第1項は、位相の周期的変動に対応した拮抗筋の収縮・弛緩の繰返しを表している。右辺第2項はバイアス項である。右辺第3項は、振幅 R_i が大きくなると可変弾性要素の自然長が短くなることを意味している。したがって、歪が生じると遅れて振幅 R_i が大きくなり、それにより自然長 l_i^{RTS} が短くなることで可変弾性要素のバネ定数が増加するという、筋緊張へのフィードバック機構が存在している。

3. 実機

本研究で用いる実機の全体像を図2に示す。本ロボットは脚部と荷車部から構成され、全長は約0.64[m]、全幅約0.27[m]、全高約0.45[m]、全質量約3.1[kg]である。脚部は二本の脚から構成されており、各脚には股関節と膝関節が存在している。関節動作はピッチ方向のみの自由度を有しており、各関節には拮抗的に配置された可変弾性要素が実装されている。可変弾性要素の部分を図3に示す。可変弾性要素は、シリコンゴムとサーボモータで構成されており、シリコンゴムをサーボモータで巻き上げることで弾性体の自然長を実時間かつ動的に変えることができる。脚部には、関節角度を検出することで可変弾性要素の実際の長さ l_i を算出するための可変抵抗、それぞれの可変弾性要素に対応する振動子を実装したマイクロコンピュータ (Atmel AVR Atmega128p)、ロボットの内部データ取得用の無線通信回路基板、電源バッテリーが内蔵されている。脚式ロコモーションは各関節に実装された可変弾性要素の自然長を周期的に変化させることで実現できる。

Fig. 2 Overview of cart-pulling biped robot.

Fig. 3 Detailed structure of the cart-pulling biped robot.

4. 予備実験

本節では、開発した実機を用いた予備実験の結果を報告する。具体的には、齟齬が生じたときに適切に位相制御と筋緊張制御が行われているかを確認した。実験方法は、図4で示すように、無負荷状態で周期運動する一方の股関節に前後方向から手で外力を与え動きを一定時間止めるというものである。結果を図5に示す。グラフは、上からそれぞれ当該脚の齟齬 I_i 、振幅 R_i 、位相 $\sin\phi_i$ を表しており、網掛け部分で前後から外力を加えた。図からわかるように外力が加わった時に齟齬 I_i 、振幅 R_i が大きくなり筋緊張制御が行われていることがわかる。一方位相は、本来の周期よりも遅れていることがわかる。このことから、位相制御も適切に行われていることが確認された。

5. まとめと今後の展望

本稿では、生物の示す多様なロコモーション様式に通底する制御のからくりを解明することを目指し、大自由度系の制御方策として自律分散制御に着目した。自律分散制御の設計論構築には制御系と機構系の連関様式に関する体系的な考察が喫緊の課題である。そこで、本研究では位相制御と筋緊張制御が連関した制御則を歩行に適用し、その初動段階として荷車を牽引する二脚ロボットの実機を開発した。予備実験の結果、制御系と機構系の

Fig. 5 Time evolutions of (a) discrepancy I_i , (b) amplitude R_i , and (c) phase ϕ_i . Shaded regions denote the period when an external force is applied (i) forward and (ii) backward, respectively.

間のずれ（齟齬 I_i ）が生じると振幅 R_i が大きくなるとともに位相速度が遅くなり、このことから筋緊張制御と位相制御が適切に行われていることが確認された。開発した実機を用いた不整地・上り坂・下り坂における歩行実験などの結果は発表当日に報告する。

Fig. 4 Preliminary experiment. An external force is applied (i) forward and (ii) backward on the hip joint, respectively.

文 献

- [1] Kimura, H., Fukuoka, Y. and Nakamura, H., "Biologically inspired adaptive dynamic walking of the quadruped on irregular terrain", in *Proc. of ISRR99*, pp.271-278, 1999.
- [2] Kimura, H., Akiyama, S. and Sakurama, K., "Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator", *Autonomous Robots*, vol.7, no.3, pp.247-258, 1999.
- [3] Taga, G., Yamaguchi, Y. and Shimizu, H., "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators", *Biol. Cybern.*, vol.65, pp.147-159, 1991.
- [4] Taga, G., "Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculo-skeletal system and the environment", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol.75, no.1-3, pp.190-208, 1994.

- [5] Taga, G., "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion - II. Real-time adaptability under various constraints", *Biol. Cybern.*, vol.73, pp.97-111, 1995.
- [6] Kobayashi, R., Tero, A. and Nakagaki, T., "Mathematical model for rhythmic protoplasmic movement in the true slime mold", *L.Math.Biol.*, vol.53, pp.273-286, 2006.
- [7] Umedachi, T., Takeda, K., Nakagaki, T., Kobayashi, R., and Ishiguro, A. "Fully Decentralized Control of a Soft-bodied Robot Inspired by True Slime Mold", *Biol. Cybern.*, vol. 102, pp. 261-269, 2010.
- [8] 佐藤貴英, 渡邊航, 石黒章夫, "制御系・機構系・環境間齟齬を活用したヘビ型ロボットの自律分散制御", 第27回日本ロボット学会学術講演会学会予稿集 CD-ROM, RSJ2009AC1M2-04, 2009.
- [9] 加納剛史, 佐藤貴英, 小林亮, 石黒章夫, "位相制御と筋緊張制御の有機的整合を可能とする自律分散制御則～ヘビ型ロボットを用いた事例研究～", 第22回自律分散システム・シンポジウム 資料, pp159-164, 2010.