

環境からの手応えを活用した一次元這行運動の自律分散制御

Decentralized Control of 1D Crawling Locomotion by Exploiting “TEGOTAE” from Environment

○千葉大徳*, 加納剛史*, 梅舘拓也**,***, 石黒章夫*,†

○Hironori Chiba*, Takeshi Kano*, Takuya Umedachi**,***, Akio Ishiguro*,†

* 東北大学, ** タフツ大学, *** 日本学術振興会海外特別研究員, † JST CREST

*Tohoku University, **Tufts University, ***Postdoctoral Fellow for Research Abroad of the Japan Society for the Promotion of Science, † JST CREST

キーワード : 自律分散制御 (decentralized control), 力学的相互作用 (mechanical interaction), 手応え (TEGOTAE), 這行運動 (crawling locomotion), ミミズ (earthworm)

連絡先 : 〒 980-8577 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 M457

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

1 はじめに

生物は、複雑な未知環境において、驚くほど適応的かつ効率的にロコモーションを生成する。この生物の振る舞いは、身体に有する膨大な自由度を環境に応じて巧みに制御することで実現される。このような大自由度制御を実現する上で鍵となる概念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・行動出力を持つ要素（自律個）が多数相互作用することで、大域的に非自明な機能を創発させる制御方策である。実際、中央パターン発生器 (Central Pattern Generator; CPG) と呼ばれる脊髄レベルにおける自律分散的な神経回路網 [1] や真正粘菌変形体における生化学的振動子 [2] など、自律分散制御メカニズムの存在を示唆する生物学的知見がいくつか報告されている。しかしながら、適応的かつ効率的なロコモーションを生成するための自律分散制御の核となるメカニズムはいまだ解明されていない。

生物ロコモーションに内在する自律分散制御

メカニズムを理解するためには、各自律個間の相互作用様式を徹底的に解き明かす必要がある。自律個間の相互作用様式は大きく二つに分類することができる。一つは神経結合などを介した相互作用様式（以下、情報の相互作用と呼ぶ）、もう一つは場や身体を介した相互作用様式（以下、力学的相互作用と呼ぶ）である。情報の相互作用においては、結合振動子系などをベースとしてこれまでさまざまな議論が行われてきた [3][4][5]。しかしながら、力学的相互作用に関してはほとんど議論がなされていない。

そこで筆者らの研究グループでは、力学的相互作用に着目し、生物ロコモーションに内在する自律分散制御則の解明に取り組んできた [6][7][8]。そして、さまざまな生物の行動を観察する中で、一つの重要な作業仮説を得るに至った。それは、生物は環境から受ける反力（手応え）が推進に利するものであるか否かをリアルタイムに峻別し、推進に利する手応えのみを積極的に活用して推進しているのではないかということである。筆者らは、この特性が顕著に表出していると考え

られるクモヒトデをモデル生物として採り上げ、環境からの手応えを活用した力学的相互作用に基づく自律分散制御則（以下、「手応え制御」と呼ぶ）を提案した [9]。そして、提案制御則をロボットに実装し、実際のクモヒトデのロコモーションを再現することに成功した [10]。

ここで一つの疑問が生じる。筆者らが提案した手応え制御は、他の生物のロコモーション様式にも適用できるのだろうか。もし適用できるのであれば、あらゆる生物のロコモーション様式に通底する原理を理解することができるのみならず、環境に呼応した振る舞いを創発する人工物の設計論の確立にもつながると期待される。そこで本研究では、一次元ひも状のきわめてシンプルな身体を巧みに伸縮させて推進するミミズの這行運動に、手応え制御が適用できるかどうかについて検証する。シミュレーションの結果、ミミズの這行運動に類似する動きを再現することができたので報告する。

2 モデル

2.1 身体モデル

まず、ミミズの解剖学的知見および移動様式 [11][12] について簡単に説明する。ミミズは環形動物貧毛類であり、複数の体節が一次元ひも状に連なったきわめて単純な身体構造を有する。体腔は全長にわたっており、体腔液で充満されているため非常に柔らかい。各体節には、環状筋 (circular muscle) と縦走筋 (longitudinal muscle) という二つの大きな筋肉が存在し、これを巧みに操ることで体節の伸縮を行うことができる (Fig.1(a))。ミミズは、剛毛というかぎ針のような形をした毛を各体節に有しており、体節が体軸方向に伸張している時は身体内部に剛毛を収納しているが、体軸方向に収縮している時には身体表面から剛毛を出して地面に固着する (Fig.1(a))。ミミズは、この身体特性を活かし体節の伸縮の波を頭側から尾側に伝搬させることで効果的に推進する (Fig.1(b))。また、ミミズの身体表面には表在感覚受容器が存在し、これにより環境からの力覚情報を検出することができると考えられる。

上記知見をもとに、Fig.2 に示すようなモデルを構築した。 N 個の質点が自然長を実時間かつ

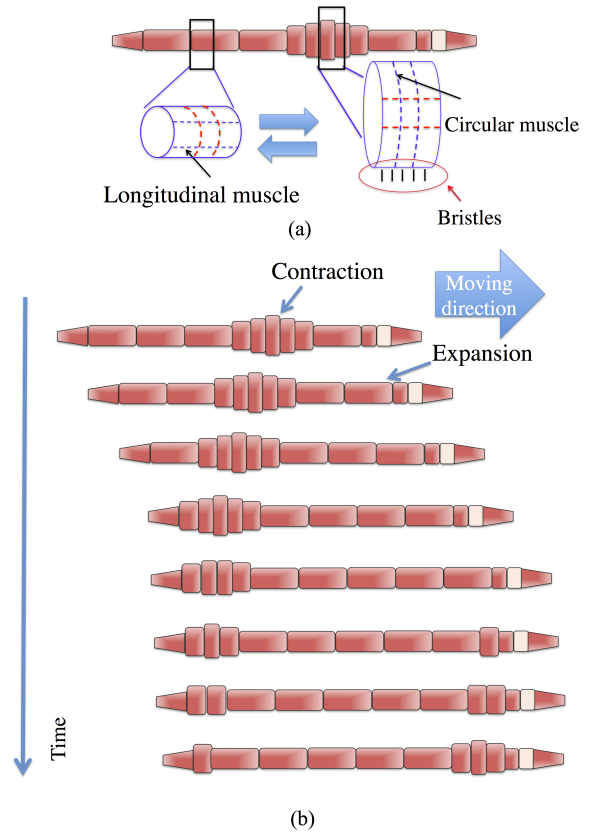


Fig. 1: Schematic of an earthworm: (a) body structure and (b) crawling locomotion

動的に変化させることができるバネ (Real-time Tunable Spring; RTS) [13] を介して一次元的につながれている。各 RTS には質量がなく、各質点と地面の間には粘性摩擦力が働くと仮定する。 i 番目と $i+1$ 番目の質点の間の RTS で発生する張力 $f_{i+\frac{1}{2}}$ は、当該部の自然長 $\bar{l}_{i+\frac{1}{2}}$ 、実長 $l_{i+\frac{1}{2}}$ 、バネ定数 k を用いて

$$f_{i+\frac{1}{2}} = -k(\bar{l}_{i+\frac{1}{2}} - l_{i+\frac{1}{2}}) \quad (1)$$

と表せ、 i 番目の体節における運動方程式は次のように記述できる:

$$m\ddot{x}_i = f_{i-\frac{1}{2}} - f_{i+\frac{1}{2}} - \eta_i \dot{x}_i \quad (2)$$

ただし、 m は各質点の質量、 x_i は i 番目の質点の位置 (進行方向を正とする) である。 η_i は i 番目の質点における粘性摩擦係数であり、以下のように記述する:

$$\eta_i = \frac{b}{\bar{l}_i^m} \quad (3)$$

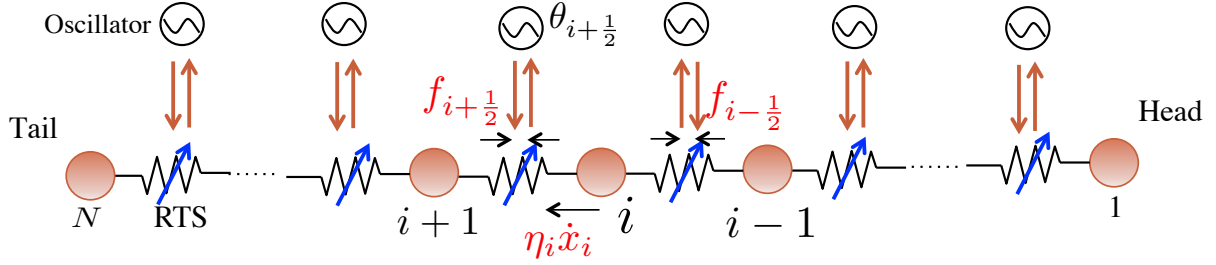


Fig. 2: Schematic of the proposed model.

ただし, $\tilde{l}_i = \frac{l_{i+1/2} + l_{i-1/2}}{2}$ ($2 \leq i \leq N-1$), $\tilde{l}_1 = l_{3/2}$, $\tilde{l}_N = l_{N-1/2}$ である. ここで, b, n は正の定数であり, $l_{i+1/2}$ は i 番目の質点と $i+1$ 番目の質点間の距離を表す. \tilde{l}_i は i 番目の質点付近における身体の伸縮度合いを表している. (3) 式より, 身体が体軸方向に伸張している時は粘性摩擦係数が小さくなり, 逆の場合は粘性摩擦係数が大きくなる. これは, ミミズの体節の伸縮による剛毛の出し入れにおける摩擦の変化の仕組みと合致する. また, ミミズの動きは通常きわめて遅く, 慣性がきいているとは考えにくいので, (2) 式の慣性項を無視すると, 以下の関係式が得られる:

$$\eta_i \dot{x}_i = f_{i-1/2} - f_{i+1/2} \quad (4)$$

2.2 自律分散制御則

身体は RTS の自然長を変化させることで駆動される. 自然長を制御することは, 実際のミミズにおいて各体節の縦走筋と環状筋を操ることに対応している. 縦走筋を弛緩させ, 環状筋を緊張させると体節は体軸方向に伸張する. これは可変自然長を長くすることに対応する. 逆に縦走筋を緊張させ, 環状筋を弛緩させることは体節が体軸方向に収縮することであり, 可変自然長を短くすることに対応する. ここでは, 手応え制御のコンセプトをもとに各 RTS の自然長の制御を試みる.

各 RTS にはそれぞれ振動子が実装されており, その位相に応じて自然長が次のように変化するとする:

$$\bar{l}_{i+1/2} = L - a \sin \theta_{i+1/2} \quad (5)$$

ここで, a は振幅を決める定数, L は RTS の平均自然長である. 振動子の位相の時間発展は次

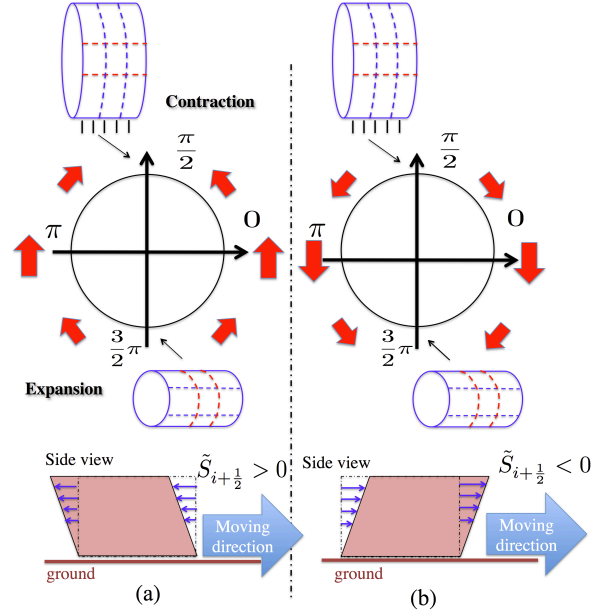


Fig. 3: Effect of local sensory feedback: (a) $\tilde{S}_{i+1/2} > 0$ and (b) $\tilde{S}_{i+1/2} < 0$.

のように与えられる:

$$\dot{\theta}_{i+1/2} = \omega + \sigma \tilde{S}_{i+1/2} \cos \theta_{i+1/2} \quad (6)$$

ただし, $\tilde{S}_{i+1/2} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2}$ である. ここで, ω は固有角周波数, σ はフィードバックの強さを示す正の定数である. S_i は i 番目の質点が地面から受ける反力, すなわち「環境からの手応え」を表し, 粘性摩擦力と等価であることから,

$$S_i = -\eta_i \dot{x}_i \quad (7)$$

と表される. これは, 実際のミミズにおいて身体表面にかかる剪断応力に対応する (Fig.3 下部). なお, S_i と S_{i+1} の平均 $\tilde{S}_{i+1/2}$ をフィードバックしているのは, RTS 自体は環境と相互作用しておらず, その両端の質点が環境からの手応えを受けているからである.

以下に, (6) 式右辺第二項の局所センサフィードバックがどのような働きをしているのか示す.

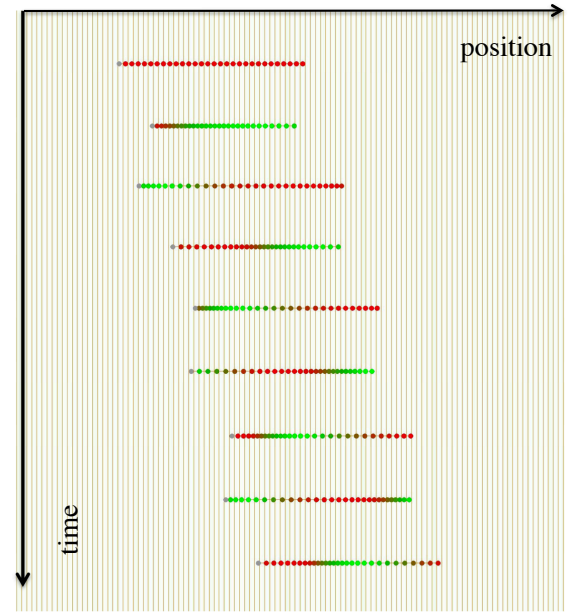
$\tilde{S}_{i+\frac{1}{2}} > 0$ のとき、つまり推進に利する手応えのとき、位相が $\frac{\pi}{2}$ へ収束する (Fig.3(a)). その結果 (5) 式より自然長は短くなり、(3) 式より摩擦係数が大きくなる. この効果により、推進に利する手応えを活用し続けることができる. 一方、 $\tilde{S}_{i+\frac{1}{2}} < 0$ のとき、つまり推進を妨げる手応えのとき、位相が $\frac{3\pi}{2}$ に収束する (Fig.3(b)). その結果 (5) 式より自然長が長くなり、(3) 式より摩擦係数が小さくなる. この効果により、推進を妨げる手応えを回避することができる. 以上からもわかるように、振動子間の直接的な結合がなくても、体節間の力学的相互作用によって位相が適切に修正される. これにより各体節間の協調が実現できると期待される.

3 シミュレーション実験

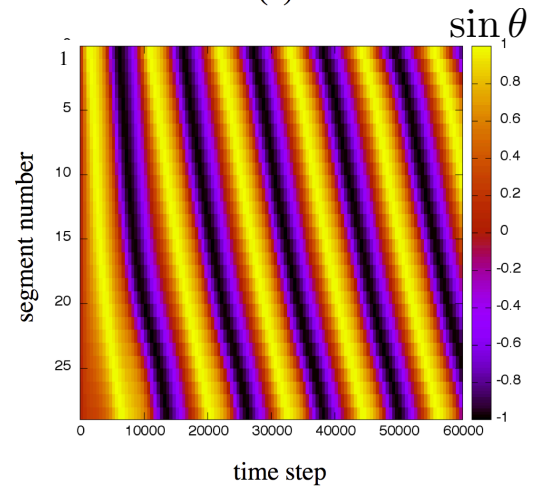
提案する制御則の妥当性を示すために、1) 這行運動の再現、2) 耐故障性に関する実験、3) 拡縮性に関する実験を行った. パラメータはそれぞれ、 $k = 1.0$, $a = 1.0$, $n = 3$, $b = 0.135$, $L = 2.5$, $\omega = 0.6$, $\sigma = 15.0$ とした. タイムステップの刻み幅は 0.001 とした. 初期位相は、各体節において 0 とした. また、環境からの手応え S_i には 1 タイムステップ前の粘性摩擦力を用いた. 以下にそれぞれの実験結果を示す.

1) 這行運動の再現

前節で提案した自律分散制御則を用いてミミズの這行運動のシミュレーションを行う. 体節数は 30 とした. 結果を Fig.4(a) に示す. シミュレーション開始後すぐに疎密波が生成され、それを頭側から尾側に伝搬させてロコモーションしていることがわかる. 実際のミミズも体節の伸縮によって疎密波を伝搬させながらロコモーションしていることから (Fig.1(b)), 本モデルと実際のミミズの振る舞いはおおむね一致している. また Fig.4(b) は位相の時空間プロットを表している. 身体の疎密波同様、位相についても頭側から尾側に向かって進行波が生成されていることがわかる. このように、振動子が直接結合していないにもかかわらず、力学的相互作用によって進行波が生成されたことは、非自明でありきわめて興味深い.



(a)



(b)

Fig. 4: (a) Locomotion of simulated earthworm. Contracted and expanded segments are indicated by green and red, respectively. (b) Spatiotemporal plot of phase.

2) 耐故障性に関する実験

提案制御則の耐故障性を検証する. ミミズの身体を切断した後に切断面を糸で結ぶと、身体の疎密波は切断部を越えて伝搬され、切断前と同様のロコモーションを生成することが知られている [14]. この知見をシミュレーションで再現できるか検証した. 本研究では、切断した後切断面を糸で結ぶということを、(5) 式の a を 0 とし RTS を受動バネにすることにより同等とみなした. 結果を Fig.5 に示す. Fig.5(a) より頭

側から疎密波が流れ、切断部を越えて疎密波が伝搬されていることがわかる。また Fig.5(b) より、非切断時と類似した位相の時空間プロットがみられた。よって上述のミミズの生物実験とおおむね一致する。

3) 拡張性に関する実験

提案制御則の拡張性を検証するため、体節数を変えてシミュレーションを行った。結果を Fig. 6 に示す。体節数を増やしても、進行波を生成し頭側から尾側へ伝搬させ、ロコモーションを生成することができた。

4 まとめと今後の展望

本研究では、環境からの手応えを活用した力学的相互作用に基づく自律分散制御則（手応え制御）がミミズの這行運動に適用できるかについて検証した。ミミズの身体特性を考慮した数理モデルを構築し、シミュレーション実験を行った結果、ミミズの這行運動と類似するロコモーションを再現することができた。また、耐故障性、拡張性についても実験し、耐故障性に関しては、ミミズと類似するロコモーションを再現することができた。拡張性に関しては、体節を100体節まで増やしても進行波を生成し、這行運動を再現することができた。

今後の展望として、ミミズにおいて実機実験を行い、実世界での手応え制御の適用性に関して考察するとともに、手応え制御が他の生物のロコモーション様式にも適用できるのかについて検証する。

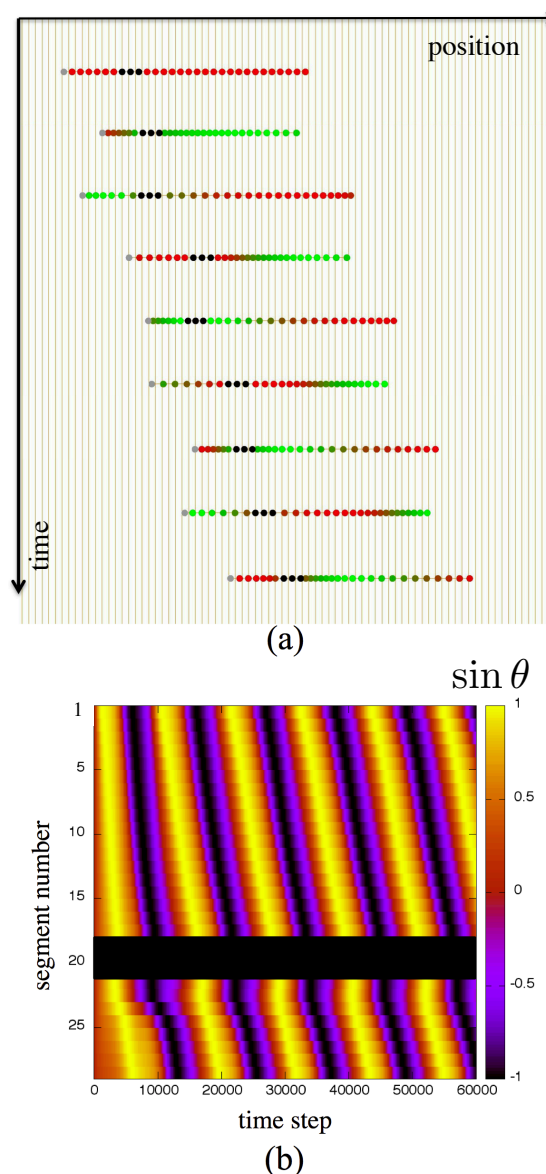
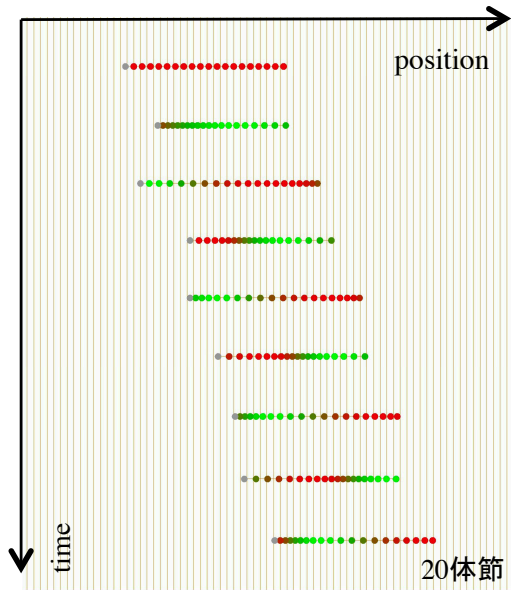
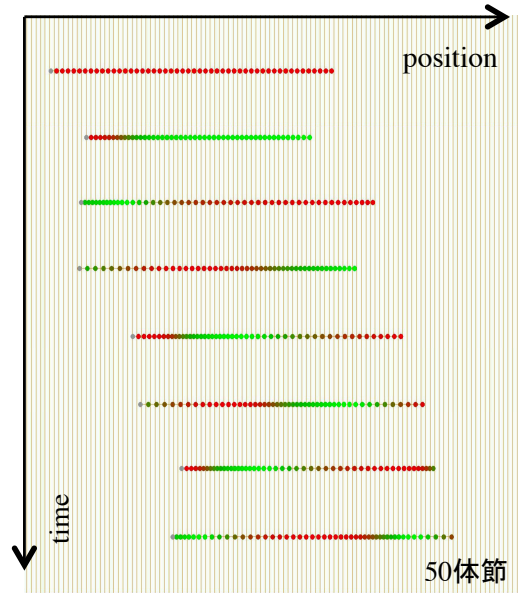


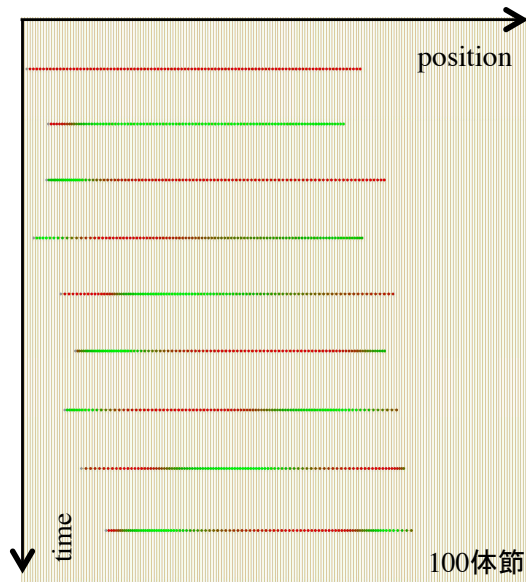
Fig. 5: (a) Locomotion of simulated earthworm when several RTSs were replaced by passive springs. Contracted segments, expanded segments and segments replaced by passive springs are indicated by green, red and black, respectively. (b) Spatiotemporal plot of phase. Black areas indicate the segments replaced by passive springs.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6: Locomotion of simulated earthworm. Contracted and expanded segments are indicated by green and red, respectively. (a) 20 segments, (b) 50 segments and (c) 100 segments.

参考文献

- [1] S. Grillner: Locomotion in Vertebrates: Central Mechanisms and Reflex Interaction, *Physiological Reviews*, 55-2, 247/304 (1975)
- [2] A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii and I. Endo: Spatiotemporal Symmetry in Rings of Coupled Biological Oscillators of Physarum Plasmodial Slime Mold, *Physical Review Letters*, 87, 078102 (2001)
- [3] H. Kimura, S. Akiyama and K. Sakurama: Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator, *Autonomous Robots*, 7-3, 247/258 (1999)
- [4] J. Duysens, H. Crommert: Neural control of locomotion; Part 1: The central pattern generator from cats to humans, *Gait & Posture*, 7, 131/141 (1998)
- [5] A. Boxerbaum, K. shaw, H. Chiel and R. Quinn: Continuous wave peristaltic motion in a robot, *The International Journal of Robotics Research*, 31-3, 302/318 (2010)
- [6] 佐藤 貴英, 加納 剛史, 石黒 章夫: 不整地走破が可能な大自由度ヘビ型ロボットの実機実現, 第 25 回自律分散シンポジウム講演論文集, 1/4 (2013)
- [7] T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi and A. Ishiguro: Fully decentralized control of a soft-bodied robot inspired by true slime mold, *Biological Cybernetics*, 102-3, 261/269 (2010)
- [8] D. Owaki, T. Kano, K. Nagasawa, A. Tero, and A. Ishiguro: Simple robot suggests physical interlimb communication is essential for quadruped walking, *Journal of The Royal Society Interface*, 10-78, 20120669 (2012)
- [9] 佐藤 英毅, 加納 剛史, 青沼 仁志, 石黒 章夫: 身体構造に応じた振る舞いが可能なクモヒトデのロコモーションに内在する自律分散制御則の解明, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A1-O02 (2013)
- [10] 佐藤 英毅, 小野 達也, 加納 剛史, 青沼 仁志, 松坂 義哉, 石黒 章夫: 身体構造に応じた振る舞いを発現するクモヒトデ型ロボットの実機開発, 第 32 回日本ロボット学会講演論文集, 1O2-03 (2014)
- [11] M. Avel : Classe des Annelides Oligochaeta, In *Traite de Zoologie*, 5, 224/270 (1959)
- [12] 内田 亨: 動物系統分類学 6 環形動物, 134/192, 中山書店 (1967)
- [13] T. Umedachi, Y. Yamada, T. Nakagaki and A. Ishiguro: Development of a Real-Time Tunable Spring - Toward Independent Control of Position and Stiffness of Joints -, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 19-1, 27/33 (2007)
- [14] 日本機械学会 (編) : メカノクリーチャー, 128/129, コロナ社 (2003)