

## 蛇行運動と蠕動運動の協調を可能とする自律分散制御則

### Decentralized control scheme that enables well-balanced coupling between serpentine locomotion and peristaltic locomotion

松井尚輝\*, 吉澤遼\*, 加納剛史\*, 石黒章夫\*,\*\*

Naoki Matsui\*, Ryo Yoshizawa\*, Takeshi Kano\*, Akio Ishiguro\*,\*\*

\* 東北大学, \*\* JST CREST

\*Tohoku University, \*\*JST CREST

キーワード：自律分散制御 (decentralized control), 蛇行運動 (serpentine locomotion), 蠕動運動 (peristaltic 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

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

## 1 緒言

生物は、限られた計算資源にもかかわらず、身体の膨大な自由度を巧みに操り、脚式運動や蛇行運動、あるいは蠕動運動といったロコモーション様式を即座に生成することで、動的に変化する非構造的な環境下であってもその中をしなやかに動き回ることができる。さらに、生物の驚くべき能力は、複数のロコモーション様式を状況依存的に組み合わせることで、多様な実世界環境下を自由に動き回る点である。例えば、サンショウオなどの両生類は脚式運動により陸上を動き回ることができるが、胴体の屈曲運動を活用した遊泳によって水中においても活動することが可能である。このように、生物は周囲の環境に応じて異なるロコモーション様式を発現させることで、多様な環境下における活動を可能としている。したがって、ロボットにおいても複数のロコモーション様式の環境適応的な活用を可能とすることで、生物に比肩するほど広大な稼働環境を獲得できると考えられる。

生物の示す身体の巧みな制御は、ロボット工学の分野でも注目され、これまでに数多くの生

物規範型ロボット [1] が開発されてきた。しかしながら、これらのロボットの多くは、生物の示すロコモーション様式のうち単一のロコモーション様式のみに着目しており、周囲の状況に応じてロコモーション様式を選択することができない。生物規範型ロボットの中には、少数ながら複数のロコモーション様式によって稼働することができるロボット [2][3] も存在するが、これらのロボットはロコモーション様式の切り替えをオペレータや上位からの指令によって行っており、環境に応じて異なるロコモーション様式を発現させる制御原理についての考察は十分なされていないのが現状である。

そこで本研究では、複数のロコモーション様式の環境適応的な活用を可能とする制御方策の構築を目的とする。初動段階として、不整地や狭窄空間における走破性に優れたロコモーション様式である蛇行運動と蠕動運動に着目する(図 1)。筆者らの研究グループは以前、蠕動運動によって不均一な摩擦環境をも推進できるミミズ型ロボットの自律分散制御則 [4] を提案した。また、地面に凹凸のある非構造環境や狭窄空間において、適応的な屈曲運動を生み出すヘビ型ロ

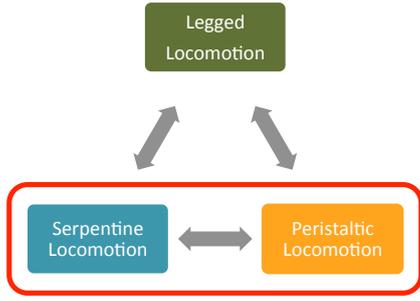


図 1: Schematic of locomotion patterns and the interplay between them.

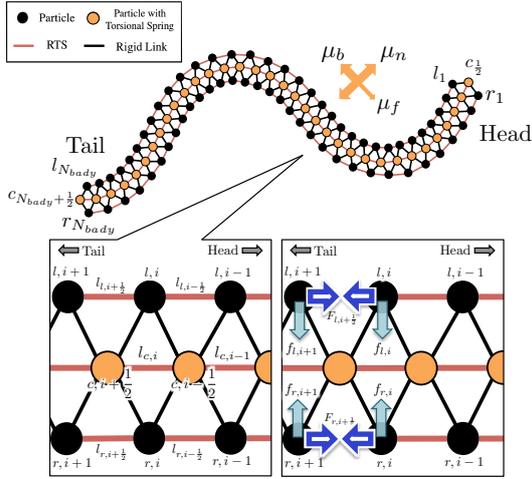


図 2: Schematic of the model.

ボットの自律分散制御則 [5] を提案した．本稿では，上記の自律分散制御則をもとに蛇行運動と蠕動運動の有機的なカップリングを可能とする自律分散制御則を構築し，シミュレーションにより妥当性を検証をしたので報告する．

## 2 モデル

### 2.1 機構系

本シミュレーションで用いる機構系を図 2 に示す．二次元平面において，体軸を表す中央の質点間が自然長を任意に変更できるバネ (Real-time Tunable Spring; RTS) とそれに並列するダンパによって接続され，その周囲には巻きバネが実装されている．また，体軸を表す中央の質点は，近傍の体側面を表す質点と剛体リンクによって接続されている．体側面を表す質点間は，RTS とそれに並列するダンパによって接続

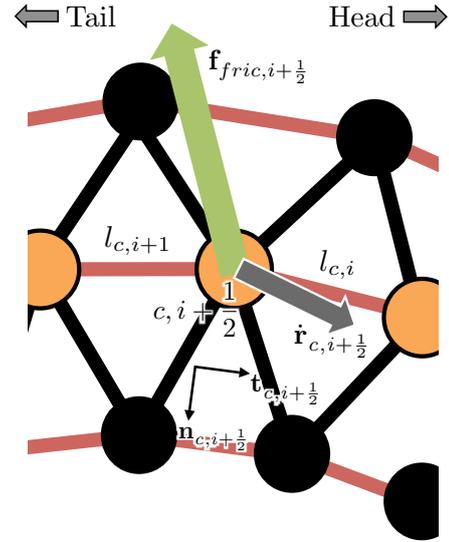


図 3: Schematic of the interaction between a body axis mass and the ground.

されている．RTS の自然長を制御することで，身体の屈曲運動と伸縮運動を生み出す．

身体と地面の間にはたらく摩擦力は体軸の質点にのみ作用すると仮定し， $i + \frac{1}{2}$  番目の質点に作用する摩擦力  $f_{fric,i+\frac{1}{2}}$  は以下のように表される：

$$\mathbf{f}_{fric,i+\frac{1}{2}} = \eta_{i+\frac{1}{2}} \left\{ -\mu_f \tanh(\max[\lambda \dot{\mathbf{r}}_{c,i+\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{t}_{c,i+\frac{1}{2}}, 0]) \mathbf{t}_{c,i+\frac{1}{2}} - \mu_b \tanh(\min[\lambda \dot{\mathbf{r}}_{c,i+\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{t}_{c,i+\frac{1}{2}}, 0]) \mathbf{t}_{c,i+\frac{1}{2}} - \mu_n \tanh(\lambda \dot{\mathbf{r}}_{c,i+\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{n}_{c,i+\frac{1}{2}}) \mathbf{n}_{c,i+\frac{1}{2}} \right\}, \quad (1)$$

ただし，

$$\eta_{i+\frac{1}{2}} = \frac{b}{(l_{c,i} + l_{c,i+1})^n}. \quad (2)$$

ここで， $l_{c,i}$  は体軸における  $i - \frac{1}{2}$  番目の質点と  $i + \frac{1}{2}$  番目の質点を結ぶ RTS の実長， $\dot{\mathbf{r}}_{c,i+\frac{1}{2}}$  は  $i + \frac{1}{2}$  番目の質点の速度ベクトル， $\mathbf{t}_{c,i+\frac{1}{2}}$ ， $\mathbf{n}_{c,i+\frac{1}{2}}$  はそれぞれ  $i + \frac{1}{2}$  番目の質点の体軸に対する接線ベクトル，法線ベクトルである (図 3)．また， $\mu_f$ ， $\mu_b$ ， $\mu_n$ ， $\lambda$ ， $n$ ， $b$  は正の定数である．

式 (1) において， $\mu_f$  は  $\mu_n$  や  $\mu_b$  より小さく設定されている．これは，ヘビに確認されるような摩擦力の異方性を表しており，これによって蛇行運動による推進を可能とする．また， $\eta_{i+\frac{1}{2}}$  の効果により，身体が体軸方向に伸長しているときは摩擦係数が小さく，収縮しているときは摩擦係数が大きくなる．これは，ミミズが体節の伸縮による剛毛の出し入れによって摩擦を変

化させる仕組みを参考にしており，これにより蠕動運動によって効率的に推進できる．

## 2.2 制御系

制御系は，先行研究 [4][5] をもとに設計する．体節は，頭部 ( $0 < i \leq N_\alpha$ )，頸部 ( $N_\alpha < i \leq N_\beta$ )，胴体部 ( $N_\beta < i \leq N_{body}$ ) に分かれている．頸部の RTS の自然長は上位の指令によって変更され，屈曲運動と伸縮運動が生み出される．ただし，先頭部が過度に曲がり進行不能になるのを防ぐために，頭部の RTS については自然長を変更しない．また，胴体部の RTS の自然長を自律分散的に制御することで，状況依存的な屈曲運動と伸縮運動を生み出す．胴体部の体側面の RTS は，局所センサフィードバックによって環境適応的な屈曲運動を生み出す．一方，胴体部の体軸の RTS は，蛇行運動に寄与する背骨としての役割と蠕動運動に寄与する伸縮運動を生み出す役割の 2 つを兼ねており，これらを状況依存的に切り替えることで蛇行運動と蠕動運動のカップリングを可能とする．以下では，頭部と頸部の RTS，胴体部の体側面の RTS，胴体部の体軸の RTS の順に説明する．

### 2.2.1 上位中枢による制御

頭部 ( $0 < i \leq N_\alpha$ )，頸部 ( $N_\alpha < i \leq N_\beta$ ) における体側面，体軸の各 RTS の自然長を以下のように制御する：

$$\bar{l}_{l,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_0, \quad (3)$$

$$\bar{l}_{r,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_0, \quad (4)$$

$$\bar{l}_{c,i}(t+1) = l_0 \quad (0 < i \leq N_\alpha), \quad (5)$$

$$\bar{l}_{l,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_0 + h_u(t) + h_p(t), \quad (6)$$

$$\bar{l}_{r,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_0 - h_u(t) + h_p(t), \quad (7)$$

$$\bar{l}_{c,i}(t+1) = l_0 + h_p(t) \quad (N_\alpha < i \leq N_\beta), \quad (8)$$

ここで， $\bar{l}_{l,i+\frac{1}{2}}$ ， $\bar{l}_{r,i+\frac{1}{2}}$  はそれぞれ身体の左側面，右側面における  $i$  番目の質点と  $i+1$  番目の質点を結ぶ RTS の自然長， $\bar{l}_{c,i}$  は体軸における  $i-\frac{1}{2}$  番目の質点と  $i+\frac{1}{2}$  番目の質点を結ぶ RTS の自然長である．また， $t$  はタイムステップ， $l_0$  は正の定数， $h_u(t)$ ， $h_p(t)$  は上位中枢からの指令値を表す．( $0 < i \leq N_\alpha$ ) の体節について，上位中枢からの指令値  $h_u(t)$  を変化させることで屈曲運

動を制御し， $h_p(t)$  を変化させることで伸縮運動を制御する．

### 2.2.2 屈曲運動の制御

胴体部 ( $N_\beta < i \leq N_{body}$ ) における体側面の各 RTS の自然長を以下のように制御する：

$$\bar{l}_{l,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_{l,i-\frac{1}{2}}(t) + \sigma \tanh \left( -\kappa_u \sum_{k=i-n_b}^{i+n_f} T_{k+\frac{1}{2}} \right), \quad (9)$$

$$\bar{l}_{r,i+\frac{1}{2}}(t+1) = l_{r,i-\frac{1}{2}}(t) + \sigma \tanh \left( \kappa_u \sum_{k=i-n_b}^{i+n_f} T_{k+\frac{1}{2}} \right) \quad (N_\beta < i < N_{body}). \quad (10)$$

ただし，

$$T_{i+\frac{1}{2}} = (F_{l,i+\frac{1}{2}}(t) - F_{r,i+\frac{1}{2}}(t))(\tilde{f}_{l,i+\frac{1}{2}}(t) + \tilde{f}_{r,i+\frac{1}{2}}(t)). \quad (11)$$

$$\tilde{f}_{l,i+\frac{1}{2}}(t) = \frac{f_{l,i} + f_{l,i+1}}{2}, \quad (12)$$

$$\tilde{f}_{r,i+\frac{1}{2}}(t) = \frac{f_{r,i} + f_{r,i+1}}{2}. \quad (13)$$

ここで， $l_{l,i+\frac{1}{2}}$ ， $l_{r,i+\frac{1}{2}}$  はそれぞれ身体の左側面，右側面における  $i$  番目の質点と  $i+1$  番目の質点を結ぶ RTS の実長， $F_{l,i+\frac{1}{2}}$ ， $F_{r,i+\frac{1}{2}}$  は同 RTS にて発生する力である． $f_{l,i}$ ， $f_{r,i}$  はそれぞれ左側面，右側面における  $i$  番目の質点に働く環境からの力である．また， $\kappa_u$ ， $\sigma$ ， $n_f$  は正の定数である．

式 (9)，(10) の右辺第 1 項は，伊達らが提唱した曲率微分制御 [6] に対応している．体側面の  $i+\frac{1}{2}$  番目の RTS の自然長が  $i-\frac{1}{2}$  番目の RTS の実長に従うことで，体幹がなす曲線の空間微分に比例した身体を屈曲させる力が発生する．

式 (9)，(10) の右辺第 2 項は，「手応え」に基づくセンサフィードバックを表す [5]．「手応え」とは，制御系の意図とその意図に基づく動作の結果として得られた感覚情報との整合性を表す概念である．このモデルにおいては，意図を体側面に発生する力  $F_{l,i+\frac{1}{2}}$ ， $F_{r,i+\frac{1}{2}}$  とし，環境からの反力情報を  $\tilde{f}_{l,i+\frac{1}{2}}$ ， $\tilde{f}_{r,i+\frac{1}{2}}$  として，「手応え」を定義する．このセンサフィードバックの効果より，身体が環境と接触して推進に利する反力を感じたときには身体を環境に押し付け活用し，推進を阻害する反力を感じた場合にはさらなる接触を回避する (図 4)．

### 2.2.3 伸縮運動の制御

胴体部 ( $N_\beta < i \leq N_{body}$ ) における体軸の各 RTS は、蛇行運動と蠕動運動のカップリングを可能とするために、身体の一部が状況に応じて自律分散的に2つの役割を切り替えられるように制御する。つまり、蛇行運動による推進時には背骨として機能させるために自然長を変化させず、蠕動運動による推進時には身体の伸縮運動を生み出すように自然長を制御する。具体的には、各 RTS の自然長を以下のように制御する：

$$\bar{l}_{c,i}(t+1) = (1 - \rho_i)l_{c,i-1}(t) + \rho_i l_0 \quad (N_\beta < i \leq N_{body}). \quad (14)$$

ただし、

$$\rho_i = \tanh \left\{ \kappa_p \left( [l_{l,i-\frac{1}{2}} - l_{r,i-\frac{1}{2}}]^2 + [l_{l,i+\frac{1}{2}} - l_{r,i+\frac{1}{2}}]^2 \right) \right\}. \quad (15)$$

ここで、 $\kappa_p$  は正の定数である。

式(14)の右辺第1項は、加納らが提唱した伸縮率微分制御 [4] である。体軸の  $i$  番目の RTS の自然長が  $i-1$  番目の RTS の実長に従うことで、体幹の伸縮の空間微分に比例した身体を伸縮させる力が発生する。式(14)の右辺第2項は、体軸の  $i$  番目の RTS の自然長を定数  $l_0$  にする効果である。また、式(15)の右辺は身体の局所的な屈曲の大きさを表しており、 $\rho_i$  は  $i$  番目の体節が直線状のとき0となり、屈曲が大きいほど1に漸近する。

式(14)は、 $\rho_i$  が小さいほど右辺第1項の効果が大きくなり、 $\rho_i$  が1に近いほど右辺第2項の効果が大きくなる。これにより、身体の屈曲が小さいときは、伸縮率微分制御によって蠕動運動による推進が可能となる。一方、身体の屈曲が大きいときは、体軸の RTS が背骨として機能することで、蛇行運動によって推進することができる。このように、体軸の RTS の自然長を身体の局所的な屈曲に応じて制御することで、蛇行運動と蠕動運動が互いの運動機能を阻害することなく、双方による推進が可能となると期待できる。

## 3 シミュレーション結果

前節で述べたモデルを用いて、シミュレーション実験を行なった。指令値  $h_u(t)$ ,  $h_p(t)$  は周期的関数によって制御した。シミュレーションに用いたパラメータは表1に示すとおりである。

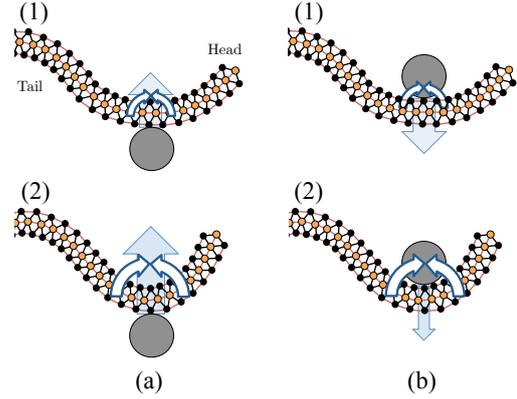


図 4: Mechanism of Tegotae-based control.

表 1: Parameter values employed in the simulations.

Parameter	Value
$n$	3
$\mu_f$	0.0589
$\mu_n$	0.294
$\mu_b$	0.294
$\lambda$	1500
$b$	1.0
$N_\alpha$	2
$N_\beta$	4
$N_{body}$	69
$l_0$	0.855
$n_f$	3
$n_b$	1
$\kappa_u$	0.002
$\sigma$	0.28
$\kappa_p$	3.0

図5に狭窄空間における実験結果のスナップショットを示す。狭窄空間は、身体を屈曲できないほど幅が狭く、2箇所の曲がり角がある環境に設定した。壁が直線上の部分では、蠕動運動によって推進することができた。また、曲がり角では、身体を屈曲させることで角に身体を押し付け、推進力を得るような振る舞いが自発的に発現する様子が確認できた。

## 4 結言

本研究では、複数のロコモーション様式の環境適応的な活用を可能とする制御方策の構築を

目的とした．そこで本稿では，蛇行運動と蠕動運動に着目し，これらの運動機能の有機的なカップリングを可能とする自律分散制御則を設計した．シミュレーション実験により，曲がり角のある狭窄空間における提案モデルの妥当性を検証した．実験の結果，提案モデルが蠕動運動と屈曲運動の双方を活用した推進が可能であることに加え，曲がり角を活用して推進力を効果的に得る振る舞いが自発的に発現可能であることを確認できた．今後は，実機実験により実世界環境下におけるモデルの妥当性を検証する予定である．

## 謝辞

本研究の一部は，JST CREST( グラント番号：JPMJCR14D5 ) からの援助によって行われた．

## 参考文献

- [1] R. Pfeifer, M. Lungarella, F. Iida, “The Challenges Ahead for Bio-Inspired ‘Soft’ Robotics”, *Communications of the ACM*, vol.55, no. 11, p. 76-87, 2012.
- [2] S. Sugita, K. Ogami, G. Michele, S. Hirose and K. Takita, “A Study on the Mechanism and Locomotion Strategy for New Snake-Like Robot Active Cord Mechanism —Slime model 1ACM-S1”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol20, no2, pp.302–309, 2008.
- [3] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, J.-M. Cabelguen, “From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model”, *science*, vol. 315, no. 5817, pp.1416-1420, 2007.
- [4] T. Kano, R. Kobayashi and A. Ishiguro, “Decentralized control scheme for adaptive earthworm locomotion using continuum-model-based analysis”, *Advanced Robotics*, vol.28, no.3, pp.197–202, 2014.
- [5] T. Kano, R. Yoshizawa and A. Ishiguro, “Tegotae-based decentralised control scheme for autonomous gait transition of snake-like robots”, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.12, no.4, pp., 2017.
- [6] H. Date and Y. Takita, “Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives”, *IROS f07: Proc.IEEE/RSJ Int.Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.3554–3559, 2007.

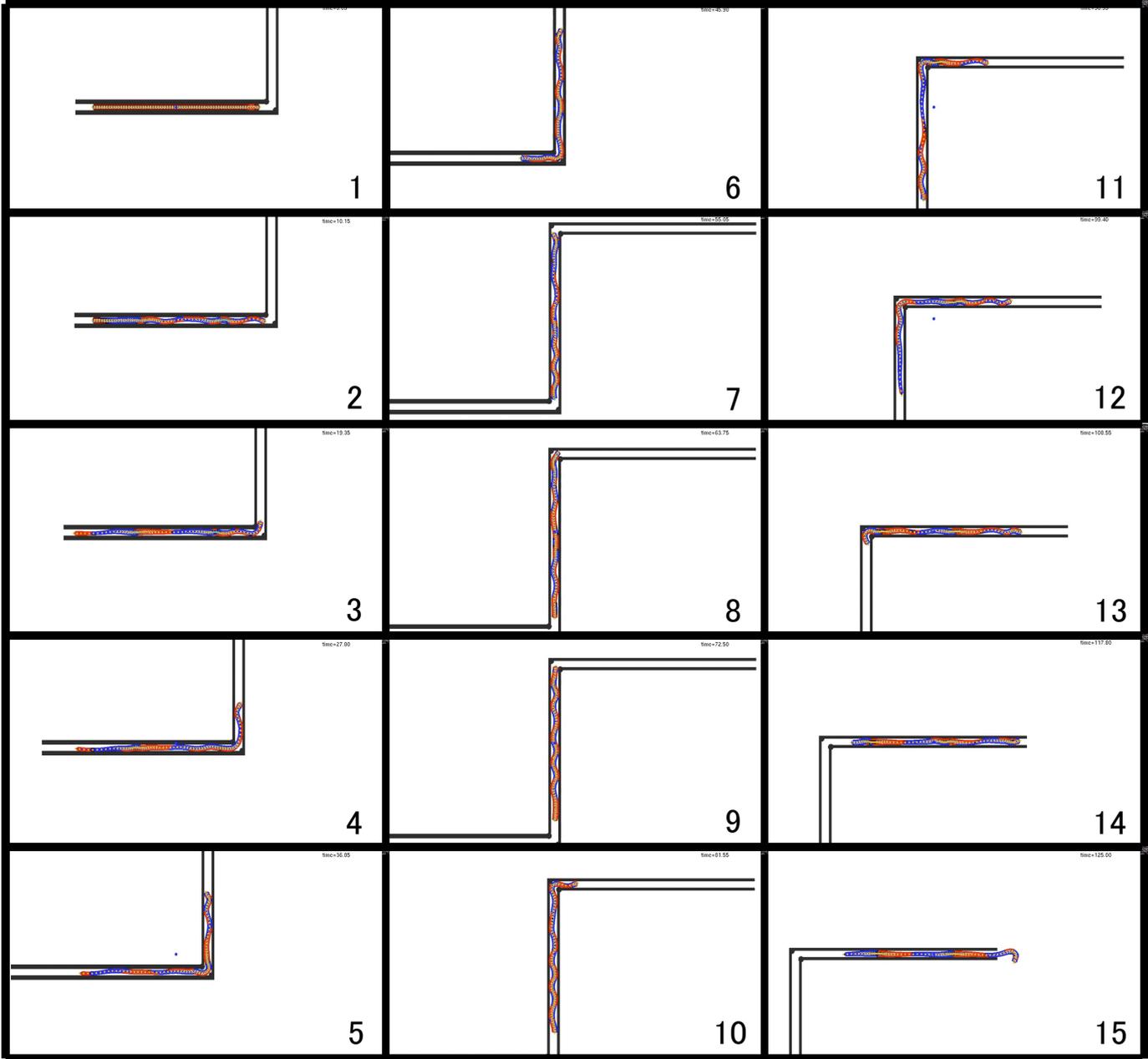


图 5: Simulation result. RTSs generating forces of contraction and expansion are colored by blue and red, respectively.