

# 環境に呼応して足並みが柔軟に変化する多脚ロボットの脚間協調制御則

## Inter-limb Coordination Mechanism of Multi-legged Robot that Shows Flexible Gait Changes in Response to Environment

○高野俊輔 (東北大) 安井浩太郎 (東北大)  
加納剛史 (東北大) 小林 亮 (広島大) 石黒章夫 (東北大)

Shunsuke TAKANO, Tohoku University, t-shun@riec.tohoku.ac.jp  
Kotaro YASUI, Tohoku University  
Takeshi KANO, Tohoku University  
Ryo KOBAYASHI, Hiroshima University  
Akio ISHIGURO, Tohoku University

Centipedes can move adaptively in unstructured environments by coordinating a large number of legs. Clarifying the underlying control mechanism for walking will help not only contribute to biology but also develop highly adaptive multi-legged robots. We previously observed the centipedes' response to the removal of a part of the terrain during walking and reported that the adaptive locomotion could be generated by a control mechanism using ground reaction forces detected at the legs. In this paper, we additionally observed the response to the appearance of a part of the terrain and found that centipedes utilized the newly obtained scaffold for propulsion. Based on this finding, we proposed an inter-limb coordination mechanism for multi-legged robots that enables adaptation to irregular terrain, and as a first step, we demonstrated via simulation that the proposed model could reproduce a steady gait pattern of centipedes.

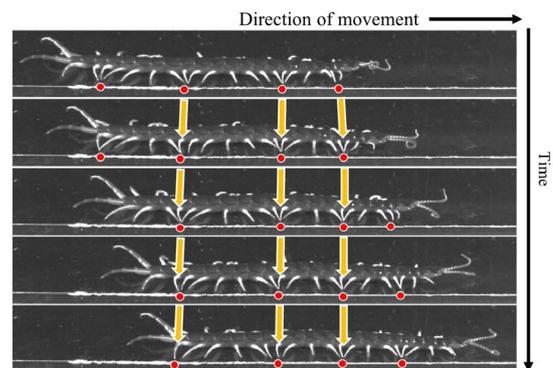
**Key Words:** Centipede locomotion, Decentralized control, Multi-legged robot

### 1 緒言

ムカデは多数の脚を状況に応じて巧みに操ることで時々刻々と変化する実世界環境に対して適応的に動き回ることができる。そのムカデの歩行運動は前方の脚の接地点に追従するように後方の脚を接地させる接地点追従と、足並みの疎密波を体軸方向に伝搬させることで実現されている(図1)。またその足並みは一樣ではなく、足並みの疎密波の波数を歩行速度や環境に応じて柔軟に変化させることが報告されている[1, 2]。このようなムカデが示す多数の脚の巧みな協調(脚間協調)の発現メカニズムを理解することができれば生物学に資するにのみならず、工学分野においても多様な環境を踏破可能な多脚移動ロボットの制御方策として応用できると期待される。

これまでムカデをモデル生物とした不整地環境を踏破可能なロボットや制御メカニズムに関する研究は盛んに行われてきたが、その多くは受動的な胴体関節が環境に応じて柔軟に動作することで実現されており、脚の運動はあらかじめ決められた足並みを生成するにとどまっていた[3, 4, 5]。一方で脚間協調制御に焦点を当てた研究もいくつかあり、Inagakiら[6]は、ムカデの歩行運動の振る舞いである接地点追従から着想を得た「接地点追従法」によって階段状の環境を踏破させることに成功した。また、Mattheyら[7]は、カオスを用いた各脚と胴体の状況依存的な制御によって、高低差のある不整地環境に対する適応性を示した。しかし、これらの先行研究はムカデの行動学的知見の再現には至っておらず、実際の足並みの疎密波の波数や向きがムカデの運動とは異なっている。したがって、実際のムカデが示す環境適応的な脚間協調メカニズムはいまだ明らかになっていない。

この現状を打破すべく、われわれの研究グループでは実際の生物の行動観察結果に基づき、数理モデルを構築するという構成論的アプローチを採用してきた。筆者らの先行研究では、歩行運動中のムカデが接地している足場の一部を撤去する行動観察実験を行い、その知見からムカデの歩行運動には脚先の接地感覚が重要であるとの仮説を立て、数理モデルを構築してきた[8]。しかし、先行研究では行動観察実験を行なった環境が限定されており、ムカデの不整地環境における脚間協調メカニズムを議論するには不十分であった。これらを踏まえ、本稿では歩行運動中のムカデが接地している足場を撤去し、その後設置するという先行研究を発



**Fig.1** Snapshots of centipede locomotion. The red markers indicate foot contact points. The yellow arrows indicate propagating leg density waves.

展させた行動観察実験を行なった。さらに実験で得られた知見をもとに各脚が反射ルールによって制御される数理モデルを構築し、2次元物理シミュレーションによって提案モデルの妥当性を検証した。そして初動段階としてムカデの平地における歩行パターンが定性的に再現できたことを報告する。

### 2 行動観察実験

本節では状況に応じた足並みの変化を観察するために、図2に示すように、歩行運動中のムカデが接地している足場の一部を取り除き、再度足場を設置する実験を行なった。図3は実験の様子を真横から撮影したスナップショットである。この実験で観察された定性的な振る舞いは以下の2点である：

1. 図3(a)より、脚が支持脚中に足場を失うと、間隙部分の脚の運動が停止した。この知見に関してはすでに先行研究によって報告されている[8]。

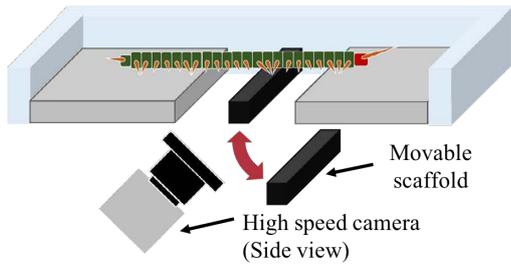


Fig.2 Schematic of the experimental set up.

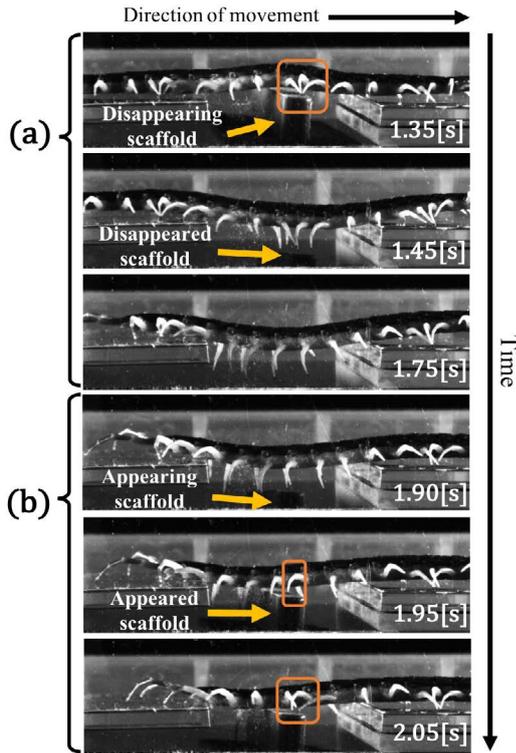


Fig.3 Snapshots of experimental result. (a) Centipede locomotion on the disappearing scaffold. (b) Centipede locomotion on the appearing scaffold. Orange squares indicate foot contact point on scaffold.

2. 図 3(b) より, 間隙中の静止している脚が足場を得ると, 支持脚として運動を再開し, 後方の脚も当該脚の接地点に追従するように運動を開始した.

これらの実験の結果から, 足場が限られた環境であっても, その限られた足場上で接地点追従を行うことで, 身体を支持するために必要な接地脚数を確保していることが示唆された.

### 3 提案モデル

#### 3.1 機構系

図 4 に, バネ・質点系でモデル化した多脚ロボットの全体像を示す. 体軸方向の脚間協調メカニズムに着目するため, 各体節に 1 脚を有する 2 次元の身体モデルを考えた. 付番形式は, 先頭の脚から  $i = 1, 2 \dots, N$  とする. 胴体は剛体リンクを介して, 脚の基部を有する質点 C と pitch 方向に回転可能な巻バネ・ダンパが実装された質点 T が交互に接続されることで構成される. 各脚の構造は, 脚先に質点 L を有し, 質点 L は自然長を動的に変更可能なバネ (Real-time Tunable Spring: RTS) とダンパの並列

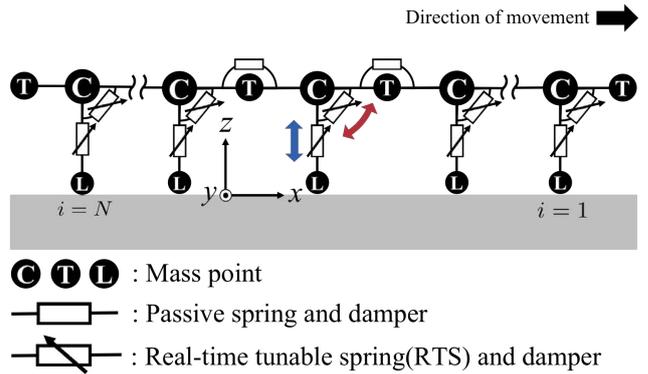


Fig.4 Schematic of the physical model of multi-legged robot.

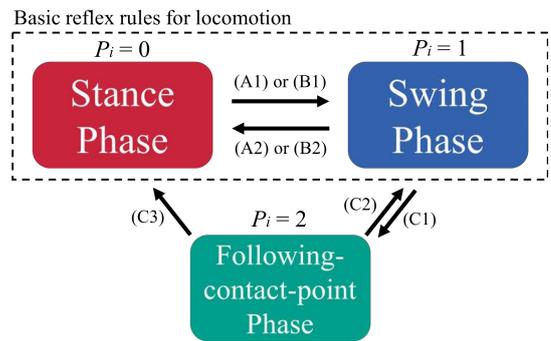


Fig.5 Schematic of the proposed leg control rule.

構造によって胴体の質点 C と接続され, 各脚の基部には巻 RTS とダンパの並列構造を実装する. それぞれの RTS は, アクチュエータとして機能し, 脚の運動制御を実現する.

#### 3.2 制御系

前節で述べた行動観察実験から得られた知見に基づき, 多脚ロボットの自律分散制御則を設計する.

##### 3.2.1 制御メカニズムの概要

行動観察実験から, ムカデは足場の状況に応じて柔軟に遊脚と支持脚を切り替えながら歩行していることが観察された. そこで本制御則では, 各脚に遊脚期 (swing phase) と支持脚期 (stance phase) の二つの状態を設定し, これを設計した遷移条件によって切り替えることで, 脚運動を制御する. このことに加え, 足場が少ない環境でも身体を支持するのに十分な接地脚数を確保できる接地点追従を実現するために, 支持脚期と遊脚期とは別に接地点追従期 (following-contact-point phase) とよばれる状態を定義した. したがって, 本モデルの脚の状態は図 5 のように表すことができる. また図 5 中の  $P_i$  は脚  $i$  の状態を表す変数であり,  $P_i = 0$  のときは支持脚期,  $P_i = 1$  のときは遊脚期,  $P_i = 2$  のときは接地点追従期である. 各状態の遷移条件については 3.2.3 節で詳しく述べる.

##### 3.2.2 脚の運動制御

支持脚期と遊脚期における脚運動の様子を図 6 に示す. 提案モデルにおいて, 遊脚期では脚を持ち上げながら前方に振り戻し, 支持脚期では脚を接地させながら後方に蹴り出すような軌道を設計する. また接地点追従期においては, 図 7 のように後方に脚を振り戻す設計とした. 提案モデルでは脚の基部に実装された巻 RTS・ダンパには目標角速度  $\dot{\theta}_i$  が, 脚の RTS・ダンパには目標自然長  $\bar{l}_i$  が与えられる. ただし,  $\dot{\theta}_i$  は後方に蹴り出す方向を正とする. したがって, 目標角速度  $\dot{\theta}_i$  は以下の式のように制御される:

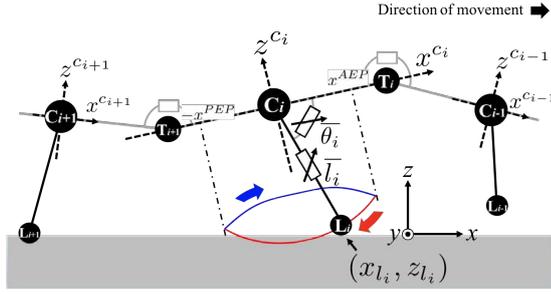


Fig.6 Leg trajectory and definition of coordinate system.

$$\bar{\theta}_i = \begin{cases} V_{stance} & (P_i = 0) \\ -V_{swing} & \{(P_i = 1) \wedge \neg X\} \\ 0 & \{(P_i = 1) \wedge X\} \\ V_{landing} & (P_i = 2). \end{cases} \quad (1)$$

$$X := (N_{i-1} < N_{contact}) \wedge (x_{L_i} > x_{wait}). \quad (2)$$

ここで,  $V_{stance}$ ,  $V_{swing}$ ,  $V_{landing}$  は角速度を表す正の定数,  $N_{i-1}$  は,  $i-1$  番目の質点  $L$  が環境から受ける床反力情報,  $N_{contact}$  は脚の接地を判定するしきい値,  $x_{L_i}$  は  $i$  番目の脚 (自脚) の質点  $C_i$  を基準とした  $C_i$  座標系における, 質点  $L_i$  の  $x^{C_i}$  座標である. ただし,  $C_i$  座標系は  $x^{C_i}$  軸を質点  $T_{i+1}$  と質点  $T_i$  を結ぶ方向,  $z^{C_i}$  軸をその法線方向として定義した (図6). また,  $x_{wait}$  は  $x^{C_i}$  上のしきい値である ( $-x_{PEP} < x_{wait} < x_{AEP}$ ). ここで, 遊脚期 ( $P_i = 1$ ) の時に,  $X$  の条件を満たした場合,  $\bar{\theta}_i = 0$  となるよう設計した. これは先行研究の行動観察実験にて報告されている, 前方の脚が接地していない場合, それよりも後方の脚は持ち上がった状態で停止するという振る舞いを再現したものである [8]. 本モデルでは, 前方の脚が離地している場合 ( $N_{i-1} < N_{contact}$ ), 脚をある程度振り戻した位置 ( $x_{L_i} > x_{wait}$ ) で脚の運動が停止するように設計した.

また, 目標自然長は  $\bar{l}_i$  は以下の式のように制御される:

$$\bar{l}_i = \begin{cases} \bar{L} - \beta \sin \frac{x_{L_i} + x_{PEP}}{x_{AEP} + x_{PEP}} \pi & (P_i = 0) \\ \bar{L} & (P_i = 1) \\ \frac{|\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_i^c| - (\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_{i-1}^l) \cdot \mathbf{e}_{t,c_{i-1}c_i}}{\cos \phi_i} & (P_i = 2). \end{cases} \quad (3)$$

ここで,  $x_{AEP}$ ,  $x_{PEP}$  は脚の可動限界を表す正の定数,  $\bar{L}$ ,  $\beta$  は脚の軌道の大きさを決定する正の定数,  $\mathbf{r}$  は各質点の位置ベクトル,  $\phi_i$  は質点  $C_{i-1}$ ,  $C_i$ ,  $L_i$  がなす角である. 条件  $P_i = 2$  の式は, 脚を後方に一定の目標角速度 ( $\bar{\theta}_i = V_{landing}$ ) で振り戻しながら, 自脚の脚先が前脚の接地点に徐々に近くような目標自然長  $\bar{l}_i$  を逆運動学を用いて計算したものである (図7).

### 3.2.3 脚の状態を切り替える遷移条件

本項では, 図5での脚の各状態を切り替える遷移ルールについて詳しく説明する. 遷移ルールは, 脚の可動限界による遷移ルール (A1, A2), 接地情報の有無による遷移ルール (B1, B2), 接地点追従を実現するための遷移ルール (C1, C2, C3) の3種類を設計した.

#### (A) 脚の可動限界による遷移条件

脚の基部の巻バネの可動域に限界位置,  $x_{AEP}$ ,  $x_{PEP}$  を設定し, 以下のような遷移条件を設計する:

$$\text{if : } (P_i = 0) \wedge (x_{L_i} < -x_{PEP}) \quad \text{then : } P_i = 1. \quad (4)$$

$$\text{if : } (P_i = 1) \wedge (x_{L_i} > x_{AEP}) \quad \text{then : } P_i = 0. \quad (5)$$

条件式 (4) は遷移ルール (A1) に対応している. 支持脚期において ( $P_i = 0$ ), 後方限界に達した際には ( $x_{L_i} < -x_{PEP}$ ), 遊脚期

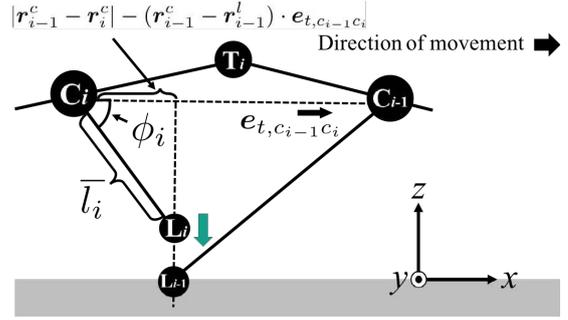


Fig.7 Leg movement during following-contact-point phase.

に遷移し前方に脚を振り戻す. 条件式 (5) は遷移ルール (A2) に対応している. 遊脚期において ( $P_i = 1$ ), 前方限界に達した際には ( $x_{L_i} > x_{AEP}$ ), 支持脚に遷移し後方に脚を蹴り出す. この遷移条件により, 脚の一定振幅内の周期的な運動が生成される.

#### (B) 接地情報の有無による遷移条件

行動観察実験の知見から, 接地情報の有無によって脚の運動状態が変化することが観察された. この振る舞いを再現するために以下のような遷移条件を設計する:

$$\text{if : } (P_i = 0) \wedge (x_{L_i} < x_{lost}) \wedge (N_i < N_{contact}) \quad \text{then : } P_i = 1. \quad (6)$$

$$\text{if : } (P_i = 1) \wedge (x_{L_i} > x_{get}) \wedge (N_i > N_{contact}) \quad \text{then : } P_i = 0. \quad (7)$$

ここで,  $x_{lost}$ ,  $x_{get}$  は  $x^{C_i}$  上のしきい値である ( $-x_{PEP} < x_{lost}$ ,  $x_{get} < x_{AEP}$ ). 条件式 (6) は遷移ルール (B1) に対応している. 支持脚期において ( $P_i = 0$ ), 後方に脚をある程度蹴り出したとき ( $x_{L_i} < x_{lost}$ ), 荷重を感じていなければ ( $N_i < N_{contact}$ ), 接地できる足場がないと判断し, 支持脚期から遊脚期に遷移するよう設計した. また, 条件式 (7) は遷移ルール (B2) に対応している. 遊脚期において ( $P_i = 1$ ), 前方に脚をある程度振り戻したとき ( $x_{L_i} > x_{get}$ ), 荷重を感じたら ( $N_i > N_{contact}$ ), その足場に接地できると判断し, 支持脚期から遊脚期に遷移するよう設計した.

#### (C) 接地点追従を実現するための遷移条件

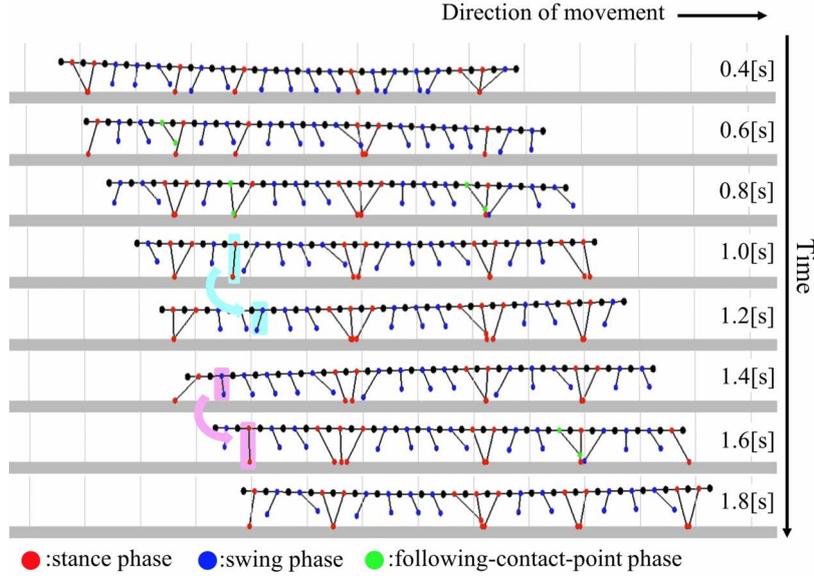
行動観察実験から, 足場が限られた環境においても接地点追従をすることによって, 接地脚数を確保できることが観察された. この振る舞いを再現するために以下のような遷移条件を設計する:

$$\text{if : } (P_i = 1) \wedge (N_{i-1} > N_{contact}) \wedge \left( |\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_i^c| < \{(\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_{i-1}^l) + (\mathbf{r}_i^l - \mathbf{r}_i^c)\} \cdot \mathbf{e}_{t,c_{i-1}c_i} \right) \quad \text{then : } P_i = 2 \quad (i \neq 0). \quad (8)$$

$$\text{if : } (P_i = 2) \wedge (N_{i-1} < N_{contact}) \quad \text{then : } P_i = 1 \quad (i \neq 0). \quad (9)$$

$$\text{if : } (P_i = 2) \wedge (N_i > N_{contact}) \quad \text{then : } P_i = 0 \quad (i \neq 0). \quad (10)$$

条件式 (8) は遷移ルール (C1) に対応している. 遊脚期において ( $P_i = 1$ ), 前方脚が接地していて ( $N_{i-1} > N_{contact}$ ), 自脚の脚先が前方脚の脚先の位置を追い越したとき ( $|\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_i^c| < \{(\mathbf{r}_{i-1}^c - \mathbf{r}_{i-1}^l) + (\mathbf{r}_i^l - \mathbf{r}_i^c)\} \cdot \mathbf{e}_{t,c_{i-1}c_i}$ ), 遊脚期から接地点追従期に遷移するよう設計した. 条件式 (9) は遷移ルール (C2) に対応している. 接地点追従期において ( $P_i = 2$ ), 前方脚が離地 ( $N_{i-1} < N_{contact}$ ), すなわち追従していた接地点が消失し, 接地点追従を継続できない場合, 接地点追従期から遊脚期に遷移するよう設計した. 条件式 (10) は遷移ルール (C3) に対応している. 接地点追従期において ( $P_i = 2$ ), 自脚が接地 ( $N_i > N_{contact}$ ) したとき, 接地点追従を終了し, 支持脚期に遷移するよう設計した. また, 先頭脚 ( $i = 0$ ) に関しては, 前方に脚がないため, 遷移ルール (C) は適用されず, 遷移ルール (A), (B) のみで運動が制御される.



**Fig.8** Snapshots of the simulation result. Light blue and purple squares indicate the effect of transition rule (B1) and transition rule (B2), respectively.

**Table 1** Parameters employed in the simulation experiment.

Parameters	Value	[unit]
$V_{stance}$	5.0	[rad/s]
$V_{swing}$	5.0	[rad/s]
$V_{landing}$	15.0	[rad/s]
$ \mathbf{r}_i^t - \mathbf{r}_i^c $	$2.0 \times 10^{-3}$	[m]
$ \mathbf{r}_i^c - \mathbf{r}_{i+1}^t $	$2.0 \times 10^{-3}$	[m]
$x_{AEP}$	$4.6 \times 10^{-3}$	[m]
$x_{PEP}$	$4.6 \times 10^{-3}$	[m]
$N_{contact}$	$4.0 \times 10^{-4}$	[kgm/s <sup>2</sup> ]
$x_{wait}$	$1.38 \times 10^{-3}$	[m]
$x_{get}$	$0.00 \times 10^{-3}$	[m]
$x_{lost}$	$1.38 \times 10^{-3}$	[m]

#### 4 予備実験

初動段階として、定常歩行における提案制御則の妥当性を検証した。本実験では、制御則を実装したロボットの各パラメータは表1のように設定した。すべての脚の初期状態は、支持脚期が遊脚期のランダムであり、脚の位置は前後の脚が交差しない範囲という条件のもとランダムに設定した。図8は発現した運動のスナップショットである。徐々に足並みの疎密波の波数と接地点の間隔が収束し、図1のようなムカデの平地における歩行パターンが定性的に再現できた。また、図8における水色の箇所で遷移ルール(B1)によって接地点の消失が、紫色の箇所で遷移ルール(B2)によって接地点の生成がそれぞれ確認された。

#### 5 まとめと今後の展望

本稿は、ムカデの不整地踏破能力に対する脚運動制御の寄与を明らかにすべく、行動観察実験を行なった。そしてその知見をもとに制御則を構築し、ムカデの定常歩行の再現に成功した。今後は凹凸面等の不整地環境をシミュレーション上で構築し、提案制

御則の不整地踏破能力を定量的に検証する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (A)(課題番号: 16H02351), JST CREST(Grant Number: JPMJCR14D5), Human Frontier Science Program (RGP0027/2017), 科研費挑戦的研究(萌芽)(Grant Number: 19K21974) および JSPS 科研費特別研究員奨励費(課題番号: 17J01042)の助成、ならびに東北大学学際高等研究教育院からの支援を受けたものである。また、本研究に対し、京都大学白眉センターの加賀谷勝史特定助教には数々のご助言およびご支援をいただいた。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] Manton, S.M., "The Arthropoda: Habits, Functional Morphology and Evolution", Clarendon Press, 1977.
- [2] 黒田茂, 中垣俊之, "這行ロコモーションにおける歩容とその遷移", 第28回自律分散システム・シンポジウム, pp. 185-186, 2016.
- [3] Masuda, M. and Ito, K., "Semi-autonomous centipede-like robot with flexible legs", IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp.1-6, 2014.
- [4] Koh, D., Yang, J. and Soohyun, K., "Centipede robot for uneven terrain exploration: design and experiment of the flexible biomimetic robot mechanism", Biomedical Robotics and Biomechanics, pp.877-881, 2010.
- [5] Kinugasa, T., Osuka, K., Hayashi, R., Miyamoto, N. and Yoshida K., "Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics", Artificial Life and Robotics, Vol.22-4, pp.429-434, 2017.
- [6] Inagaki, S., Niwa, T. and Suzuki, T., "Follow-the-Contact-Point gait control of centipede-like multilegged robot to navigate and walk on uneven terrain", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5341-5346, 2010.
- [7] Matthey, L., Righetti, L. and Ijspeert, A. J., "Experimental study of limit cycle and chaotic controllers for the locomotion of centipede robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1860-1865, 2008.
- [8] Yasui, K., Sakai, K., Owaki, D. and Ishiguro, A., "Decentralized control scheme for myriapod robot inspired by adaptive and resilient centipede locomotion", PloS one 12.2, e0171421, 2017.