

### エルゴード的セルオートマトンCPGを用いた4 脚歩行ロボットについて

KOMAKI, Sho / 小牧, 礁

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025333>

# エルゴード的セルオートマトン CPG を用いた 4 脚歩行ロボットについて

An Ergodic cellular Automaton of Central Pattern Generator for Quadruped Robot

小牧 礁

Sho KOMAKI

指導教員 鳥飼弘幸

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程

A novel ergodic cellular automaton (CA) oscillator and its theoretical analysis method are presented. Theoretical analyses reveal the oscillator is more suited to build a central pattern generator (CPG) compared to a standard non-ergodic CA oscillator. Further, it is shown the ergodic CA CPG can generate rhythmic signals suitable for realizing fundamental gaits of a quadruped robot. Then a prototype of the ergodic CA CPG is implemented by a field programmable gate array and experiments show it can realize the fundamental gaits of a physically implemented quadruped robot. Further, it is shown the ergodic CA CPG consumes much lower power and much fewer circuit resources compared to a typical conventional CPG implemented by a customized digital signal processor.

**Key Words** :Ergodic, Cellular automaton, Quadruped robot

## 1. はじめに

多くの動物は筋肉をリズムカルに動かし歩く、飛ぶ、泳ぐなど様々な運動をしている。このようなリズムカルな動きを指示する信号は脊髄にある Central Pattern Generator (CPG) から発生していると考えられる [1]。図 1 はヤツメウナギの脊髄から発生している CPG である [2]。

電気回路モデルを用いた CPG をもとにしている動作コントローラは多く設計されている。これまでのところ神経補綴、神経支援やロボットのアプリケーションなどに用いられている [3][4]。多くの生体模倣電気回路は以下の 3 つのような構造になっている。(1) アナログ非線形動的回路 [5][6]、(2) 非線形スイッチトキャパシタ回路 [7]、(3) デジタルシグナルプロセッサ [8][9]。一方、私たちは非同期シーケンシャルロジックを基に、以下のような数種類の生体模倣電気回路を開発している。

- 非同期シーケンシャルニューラルネットワークとニューロン [10][11]、
- 非同期シーケンシャル CPGs モデル [12][13]、
- 非同期シーケンシャル蝸牛モデル [14]、
- 非同期シーケンシャル遺伝子タンパク質ネットワーク [15]。

これらの非同期シーケンシャルロジックに基づく生体模倣電気回路はデジタルシグナルプロセッサに基づく生体模倣電気回路に比べ、低消費電力で回路リソースを少

なくすることができる。

本研究の目的は図 2 のロボットを制御できる新しい非同期シーケンシャルロジック CPG を提案することである。1 つ目は、非同期シーケンシャルの解析とロボットの所定の歩容を発生させるための発振器を設計するための体系的な手法の提案。2 つ目は、CPG に基づく動作コントローラを設計するための体系的な手法の提案。目標の歩容を発生させる適切なパラメータを探す方法の紹介。3 つ目は、field programmable gate array (FPGA) で設計された発振器モデルを実装し、4 脚歩行ロボットが目標の歩容を発生するコントローラを実験で示す。さらにデジタルシグナルプロセッサを用いた CPG に基づく動作コントローラに比べ提案モデルは低消費電力で回路リソースを少なくすること示す。本研究の結果以下のような新規性や重要性が示される。

(a) 本紙では非同期シーケンシャルロジック CPG を用いた 4 脚歩行ロボットコントローラを提案するのは初めてである。

(b) 提案モデルは低消費電力で回路リソースを少なくできるため、小型および低電力の埋め込み型神経補綴物や補助装置、小型および低電力の生物模倣ロボットコントローラなどアプリケーションシステムを開発するための重要な構成要素として役立つ。

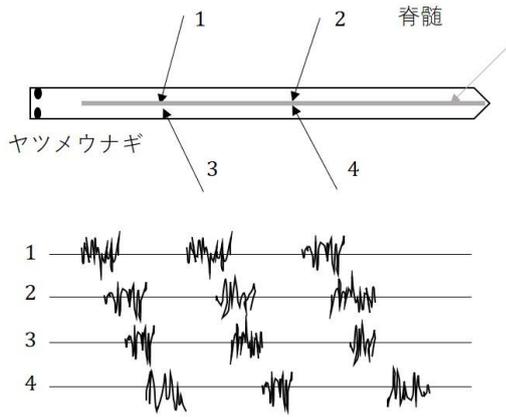


図1 ヤツメウナギの脊髄から発生される筋肉を動かすパターン。

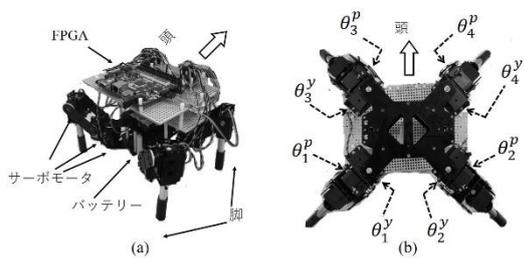


図2 (a) FPGAによって制御されている4脚歩行ロボット(Lynxmotion'sSQ3U). (b) 下から見た図。

## 2. 非同期セルオートマトンを用いた CPG

図3に非同期セルオートマトン CPG における発振器の構成を示す。この章では、非同期セルオートマトン CPG における発振器の内部ダイナミクスと結合ダイナミクスについて解説、非同期セルオートマトン CPG における発振器のパラメータ解析および非同期セルオートマトン CPG を用いて4脚歩行ロボットに基本的な歩容をさせるためにはどのように設計するのかは修士論文で説明する。

## 3. エルゴード的セルオートマトンを用いた CPG

図4にエルゴードセルオートマトン CPG における発振器の構成を示す。この節では、エルゴードセルオートマトン CPG における発振器の内部ダイナミクスについて解説する。発振器には 離散状態変数  $X_i$  と  $Y_i$  と 離散補助変数  $P_i$  と  $Q_i$  が定義され以下のようにになっている、

$$X_i \in \mathbf{Z}_N = \{0, \dots, N-1\}, Y_i \in \mathbf{Z}_N$$

$$P_i \in \mathbf{Z}_M = \{0, \dots, M-1\}, Q_i \in \mathbf{Z}_M$$

ここで  $N > 0$  と  $M > 0$  は整数であり、それぞれ  $\{X_i, Y_i\}$  と  $\{P_i, Q_i\}$  の解像度を特徴付け、変数はその可能な最小値と最大値で飽和していることを示しています。発振器は以下のような周期的なクロックになっている、

$$C_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p(t - nT_{C_i})$$

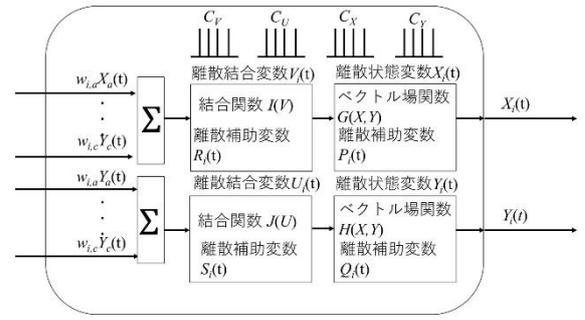


図3 非同期セルオートマトン CPG における発振器の構成。

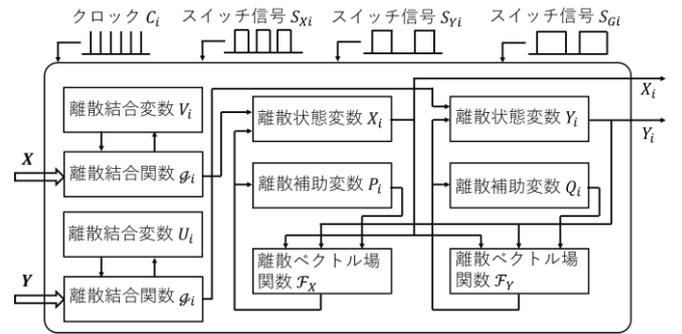


図4 エルゴードセルオートマトン CPG における発振器の構成。

ここで  $p(t)$  は瞬時パルスであり、 $t = 0$  ならば  $p(t) = 1$  となり、 $t \neq 0$  ならば  $p(t) = 0$  となり、 $T_{C_i} > 0$  ならば周期クロック  $C_i(t)$  のように定義されている。さらに状態変数を遷移させる信号として  $S_{X_i}(t) \in \{0,1\}$ ,  $S_{Y_i}(t) \in \{0,1\}$  になっている。本研究では周期信号  $S_{X_i}(t), S_{Y_i}(t)$  は以下のようにになっている、

$$S_{X_i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{X_i} - \phi_{X_i}, W_{X_i})$$

$$S_{Y_i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Y_i} - \phi_{Y_i}, W_{Y_i})$$

ここでは、 $q(t, W)$  はパルスであり、 $t \in [0, W]$  ならば  $q(t) = 1$ ,  $t \notin [0, W]$  ならば  $q(t) = 0$  となり  $T_{X_i} > 0$  と  $T_{Y_i} > 0$  は周期である。 $W_{X_i} \in [0, T_{X_i}]$  と  $W_{Y_i} \in [0, T_{Y_i}]$  はパルス持続時間であり、 $\phi_{X_i} \in [0, T_{X_i}]$  と  $\phi_{Y_i} \in [0, T_{Y_i}]$  は初期位相である。クロック  $C_i(t)$  は離散状態変数  $X_i$  と  $Y_i$  の遷移を誘発します。

$$\text{If } C_i(t) = 1, \text{ then}$$

$$X_i(t^+) = X_i(t) + S_{X_i}(t) \mathcal{F}_{X_i}(X_i(t), Y_i(t), P_i(t)),$$

$$Y_i(t^+) = Y_i(t) + S_{Y_i}(t) \mathcal{F}_{Y_i}(X_i(t), Y_i(t), Q_i(t)), \quad (1)$$

ここでは  $t^+ \rightarrow \lim_{\epsilon \rightarrow 0} t + \epsilon \in \mathbb{R}^+$ ;  $\mathcal{F}_X: \mathbf{Z}_N^2 \times \mathbf{Z}_M \rightarrow \{-1,0,1\}$ ,  $\mathcal{F}_Y: \mathbf{Z}_N^2 \times \mathbf{Z}_M \rightarrow \{-1,0,1\}$  は発振器のベクトル場を決める離散関数である。CPG の構成要素として、発振器を使うために離散ベクトル場関数は以下のように設計

される。

$$\mathcal{F}_X(X, Y, P) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_X(X, Y) \geq 0 \text{ and } P \geq |F_X(X, Y)|, \\ -1 & \text{if } F_X(X, Y) < 0 \text{ and } P \geq |F_X(X, Y)|, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\mathcal{F}_Y(X, Y, Q) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_Y(X, Y) \geq 0 \text{ and } Q \geq |F_Y(X, Y)|, \\ -1 & \text{if } F_Y(X, Y) < 0 \text{ and } Q \geq |F_Y(X, Y)|, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

ここで  $F_X: \mathbf{Z}_N^2 \times \mathbf{Z}_M^{\pm} \rightarrow \{-(M-1), -(M-2), \dots, M-1\}$  と  $F_Y: \mathbf{Z}_N^2 \times \mathbf{Z}_M^{\pm} \rightarrow \{-(M-1), -(M-2), \dots, M-1\}$  は  $F_X(X, Y) = [(\beta_x f_x(\alpha_{xx}(X - K), \alpha_{xy}(Y - K)))^{-1}]$ ,  $F_Y(X, Y) = [(\beta_y f_y(\alpha_{yx}(X - K), \alpha_{yy}(Y - K)))^{-1}]$ ,  $f_x(x, y) = \delta x - \omega y - x(x^2 + y^2)$ ,  $f_y(x, y) = \omega x + \delta y - y(x^2 + y^2)$ ,  $K = N/2$  によって離散関数は与えられる;  $[\cdot]$  はフロア関数である。  $F_X$  と  $F_Y$  は  $\pm(M-1)$  で飽和している。  $\alpha_{xx}, \alpha_{yx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yy}, \beta_x, \beta_y$  は正のスケーリングパラメータである。そして  $\delta \in \mathbf{R}$  と  $\omega > 0$  は非線形性を特徴付けるパラメータである。離散補助変数  $P_i$  と  $Q_i$  は次のように状態に依存する分周器として機能する。

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_{X_i}(t) = 1$ , then

$$P_i(t^+) = \begin{cases} P_i(t) + 1 & \text{if } \mathcal{F}_X(X_i(t), Y_i(t), P_i(t)) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_{Y_i}(t) = 1$ , then

$$Q_i(t^+) = \begin{cases} Q_i(t) + 1 & \text{if } \mathcal{F}_Y(X_i(t), Y_i(t), Q_i(t)) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

図5にエルゴートセルオートマトン発振器における内部ダイナミクスの状態遷移を表したグラフを示す。エルゴートセルオートマトン発振器はクロック  $C_i(t)$  とスイッチ信号  $S_{X_i}(t)$  および  $S_{Y_i}(t)$  の比が有理数比か無理数比によって以下の2つの発振器に分類できる。

- エルゴードセルオートマトン発振器
- レギュラーセルオートマトン発振器

以上の2つの発振器を解析し、両方の特徴について議論する。詳しくは修士論文で説明する。図2(a)は4脚方向ロボットである。  $k$  番目の脚にはそれぞれヒップヨー軸  $\theta_k^y$  とニーピッチ軸  $\theta_k^p$  を決める2つのサーボモータを持っている。図6のエルゴートセルオートマトン CPG のネットワークを用いて4脚歩行ロボットに基本的な歩容をさせる同 CPG を設計する。発振器を結合させるために以下のようなスイッチ信号を定義する。

$$S_{G_i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{G_i} - \phi_{G_i}, W_{G_i})$$

ここで  $T_{G_i} > 0$  は周期である。  $W_{G_i} \in [0, T_{G_i}]$  はパルス持続時間であり、  $\phi_{G_i} \in [0, T_{G_i}]$  は初期位相である。さらに、次の信号は式(1)の第1項と第2項に代数的に追加されます。

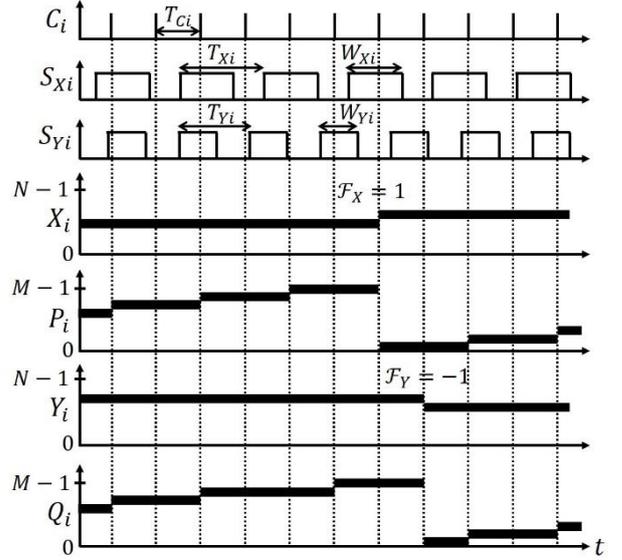


図5 エルゴートセルオートマトン発振器における内部ダイナミクスの状態遷移。

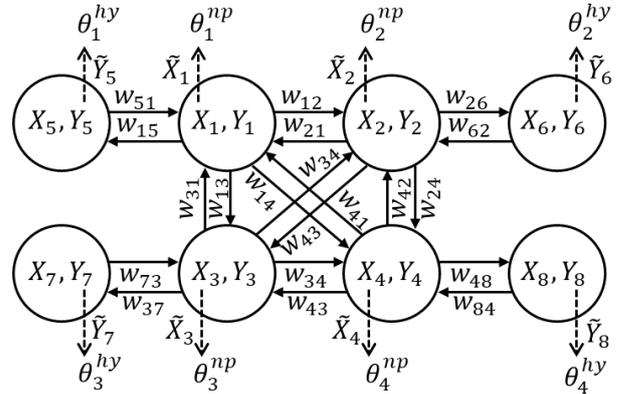


図6 エルゴートセルオートマトン CPG のネットワーク

$$S_{G_i}(t)g_i(\mathbf{X}(t), V_i(t)), S_{G_i}(t)g_i(\mathbf{Y}(t), U_i(t))$$

ここで  $g_i: \mathbf{Z}_N^8 \times \mathbf{Z}_M \rightarrow \{-1, 0, 1\}$  は離散結合関数である。  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_8)$  と  $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_8)$  は離散変数をベクトルで表したものであり、  $V_i \in \mathbf{Z}_M$  と  $U_i \in \mathbf{Z}_M$  は発振器の結合させるための離散結合変数である。その関数  $g_i$  は以下のように設計される。

$$g_i(\mathbf{X}, V) = \begin{cases} 1 & \text{if } G_i(\mathbf{X}) \geq 0 \text{ and } V \geq |G_i(\mathbf{X})|, \\ -1 & \text{if } G_i(\mathbf{X}) < 0 \text{ and } V \geq |G_i(\mathbf{X})|, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

ここで  $G_i: \mathbf{Z}_N^8 \times \mathbf{Z}_M^{\pm}$  は以下のように与えられる

$$G_i(\mathbf{X}) = \left[ \left( \sigma \sum_{j=1}^8 w_{ij}(X_j - N/2) \right)^{-1} \right]$$

ここで  $\sigma$  はスケーリングのための正パラメータであ

る。  $w_{ij}$  は結合行列である。この結合行列を調整することで4脚歩行ロボットは様々な歩容をさせることができる。離散補助変数  $V_i$  と  $U_i$  は次のように状態依存の分周器として機能する。

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_{G_i}(t) = 1$ , then

$$V_i(t^+) = \begin{cases} V_i(t) + 1 & \text{if } \phi_X(\mathbf{X}(t), V_i(t)) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

If  $C_i(t) = 1$  and  $S_{G_i}(t) = 1$ , then

$$U_i(t^+) = \begin{cases} U_i(t) + 1 & \text{if } \phi_X(\mathbf{Y}(t), U_i(t)) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

#### 4. 実装

エルゴードセルオートマトンCPGを用いて、Xilinx社のdesign suite Vivado 2020.1でコンパイルしXilinx'sのFPGA (Field Programmable Gate Array) デバイスXC7A100T-1CSG324Cの実装した。比較対象としてHopf CPGモデルを採用した。両方とも同じように4脚歩行ロボットが歩くこと条件にHopf CPGおよびエルゴード的セルオートマトンCPGを実装した。表1に比較結果をまとめたものを示す。この表からエルゴード的セルオートマトンCPGはHopf CPGの約40%消費電力の低減および回路素子を削減できたことがわかる。また4脚歩行ロボット前進する画像を図7に示す。詳しいパラメータやほかの歩容に関しては修士論文で説明する。

#### 5. 結論

本研究では、非同期セルオートマトンCPGおよびエルゴードセルオートマトンCPGの提案をした。そして非同期セルオートマトンCPGのパラメータ解析や設定をした。さらに目標とする歩容をさせるための結合行列のパラメータ探索は学習アルゴリズムを用いて求めた。またエルゴードセルオートマトンCPGにおいてはクロック信号とスイッチ信号の比による2つの発振器の理論解析をして、その2つの発振器の特徴の違いなどを説明した。そしてエルゴードセルオートマトンCPGをFPGAに実装させ、4脚歩行ロボットを基本的な歩容をさせることができた。コスト比較は従来のCPGモデルHopf CPGと比較して、エルゴードセルオートマトンCPGは低消費電力で回路素子数を少なくすることができた。今後の課題としては以下のようなことが挙げられる。(a)エルゴードセルオートマトンCPGを用いたニューラルアシスト機器や神経補綴装置の実装。(b)4脚歩行ロボットに様々な歩容の実装。

表1 比較結果

モデル	エルゴード的 セルオートマトンCPG	Hopf CPG
#Slice	2278	3150
#LUT	7365	12618
#FFs	507	289
消費電力[W]	0.327	0.567
発振周波数[Hz]	0.5	0.5



図7 4脚歩行ロボットが前進している画像

#### 参考文献

- 1) E. Kandel, et. al, Principles of Neural Science.
- 2) J. Yu, et al., "A survey on CPG-Inspired control model and system implementation," IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., vol. 25, no. 3, pp 441-456, 2014.
- 3) Y. Wang, et. al. "Control of Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robot Based on CPG Neural Network\*," Proc. Internat. Conf. Ubiquitous Robots, pp. 678-682, 2019.
- 4) Y. Uchiyama, C. Nagai, and G. Obinata, "Simulation of human walking with powered orthosis for designing practical assistive device," Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., pp. 4816-4819, 2012.
- 5) K. Nakada, T. Asai, and Y. Amemiya, "An Analog CMOS central pattern generator for interlimb coordination in quadruped locomotion," IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., vol. 14, no.5, pp. 1356-1365, 2003.
- 6) K. Nakada, et. al., "Analog current-mode CMOS implementation of central pattern generator for robot locomotion," Proc. Int. Joint Conf. Neural Netw., pp. 639-644, 2005.
- 7) L. Minati, et. al., "Versatile Locomotion Control of a Hexpod Robot Using a Hierarchical Network of Nonlinear Oscillator Circuits," IEEE Access, vol. 6, pp. 8042-8065, 2018.
- 8) U. Hu, J. Liang, and T. Wang, "Parameter Synthesis of Coupled Nonlinear Oscillators for CPG-Based Robotic Locomotion," IEEE Trans Ind Electron., vol. 61, no. 11, pp. 6183-6191, Nov. 2014.
- 9) A. Kamimura, et. l., "Automatic locomotion design and experiments for a Modular robotic system," IEEE ASME Trans. Mechatron., vol. 10, no. 3, pp. 314-325, 2005.
- 10) K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Asynchronous CA Neuron Model: Design of Neuron-like Nonlinear Responses based on Novel Bifurcation Theory of Asynchronous Sequential Logic Circuit," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 67, no. 6, pp. 1989-2001, 2020.

- 11) T. Noguchi and H. Hiroyuki, "Ghost Stochastic Resonance from Asynchronous Cellular Automaton Neuron Model", IEEE Trans. Circuits Syst. 2, Exp. Briefs, vol. 60, no. 2, pp.111-115, 2013.
- 12) K. Takeda and H. Torikai, "A novel hardware-efficient CPG model for a hexapod robot base on nonlinear dynamics of coupled asynchronous cellular automaton oscillators," Proc. Int. Joint Conf. Neural Netw., pp. 1-8, 2019.
- 13) K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Hardware-Efficient Central Pattern Generator Model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics for Controlling Hexapod Robot" IEEE Access, 2020.
- 14) K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Hardware-Efficient Gene Network Model based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics: Theoretical Analysis and FPGA Implementation," IEEE Trans. Circuits Syst. 2, Exp. Briefs, vol. 64, no. 9, pp.1107-1111, 2017.
- 15) T. Yoshimoto and H. Torikai, "A Novel Hardware-Efficient Gene Network Model based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics, NOLTA, IEICE, vol. 8, no. 4, pp. 302-318, 2017.
- 16) 非同期セルオートマトン CPG を用いた4脚歩行ロボットについて,信学技報, vol. 119, no. 485, CCS2019-34, pp. 1-4, 2020
- 17) 小牧 礁, 鳥飼 弘幸 非同期セルオートマトン CPG を用いた4脚歩行ロボットについて, the 2020 IEICE Society Conference, 2020.
- 18) S. Komaki, H. Torikai, An Ergodic Cellular Automaton Model of CPG, NOLTA2020
- 19) S. Komaki, K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Ergodic Discrete Difference Equation Model of Central Pattern Generator: Theoretical Analysis and Efficient Implementation," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs.