

# エルゴード的順序回路CPGモデルとチョッパ型混合歩容の分岐現象について

KAMITOKO, Jumpei / 上床, 潤平

---

(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)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030694>

# エルゴード的順序回路 CPG モデルと チョッパ型混合歩容の分岐現象について

ERGODIC SEQUENTIAL CIRCUIT CPG MODEL AND  
CHOPPER-TYPE MIXED YIELD BIFURCATION

上床潤平

Jumpei KAMITOKO

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修士課程

In this paper, we propose a generalized ergodic cellular automaton model of a central pattern generator. The proposed model can realize synchronization phenomena, which can realize typical gaits of a quadruped robot. It is shown that by mixing coupling matrices based on a chopper manner, the proposed model can realize mixed gaits of the quadruped robot depending on the ratios of the matrices in the chopper. Also, it is shown that the proposed model is more hardware-efficient compared to a straightforward implementation of an ordinary differential equation central pattern generator model.

**Key Words :** Quadruped robot, CPG, FPGA

## 1. はじめに

アリやクモのような多脚の生き物、あるいは蛇や魚のような無脚の生き物は、リズムカルなパターンで動かされる屈筋と伸筋によって歩く、這う、泳ぐといった様々な種類の歩行運動を行うことができる。このようなリズムパターンは、中枢神経系の Central Pattern Generator (CPG) によって生成されると考えられている[1][2]。図 1 はヤツメウナギから抽出した脊髄標本で観察された膜電位のパターンを示しており、これらの電位がヤツメウナギの運動を制御している。このような生物学的証拠に基づいて、ロボット制御のための様々な CPG モデルが設計されている。本研究では、エルゴード的順序回路 CPG を用いてハードウェアへ実装した。先行研究[3]より、エルゴード的順序回路の特徴として少ない回路素子と低消費電力で回路を設計できる。従って、本研究ではエルゴード的順序回路 CPG モデルと従来の常微分方程式モデルをハードウェア効率の点で比較した。また、エルゴード的順序回路 CPG モデルの回路構造を一般化し、結合行列をチョッパ的に変更できるようにした。提案モデルの結合行列のチョッパ比を調整することにより、四足歩行ロボットが様々な歩容を行うことを示す。

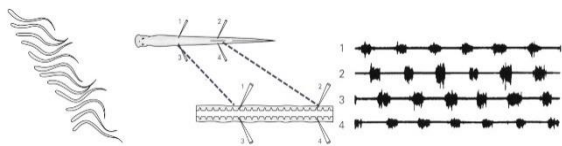


図 1 ヤツメウナギの永動[1].

## 2. エルゴード的順序回路 CPG モデル

本章では、エルゴード的順序回路 CPG[3]を紹介する。図 2 にエルゴード的順序回路の回路図、図 3 に CPG における発振器の結合図を示す。発振器には 6 つのレジスタがあり、離散状態変数  $X_i$ ,  $Y_i$ , 離散補助変数  $P_i$ ,  $Q_i$ , および離散結合変数  $V_i$ ,  $U_i$  が格納されている。

$$\begin{aligned} X_i &\in Z_N = \{0, \dots, N-1\}, Y_i \in Z_N, \\ P_i &\in Z_M = \{0, \dots, M-1\}, Q_i, V_i, U_i \in Z_M. \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $X_i$  と  $Y_i$  は状態変数、 $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $V_i$ ,  $U_i$  は状態依存文周期として機能する。発振器には、周期クロック  $C_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p(t - nT_{Ci})$  が入力され、 $t = 0$  なら  $p(t) = 1$ ,  $t \neq 0$  なら  $p(t) = 0$  となる。また、スイッチ信号  $S_{Xi}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Xi} - \Phi_{Xi}, W_{Xi})$ ,  $S_{Yi}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Yi} - \Phi_{Yi}, W_{Yi})$ ,  $S_{Gi}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} q(t - nT_{Gi} - \Phi_{Gi}, W_{Gi})$  が入力される。このとき、 $q(t, W)$  は  $t \in [0, W]$  のとき  $q(t) = 1$ ,  $t \notin [0, W]$  のとき  $q(t) = 0$  となるパルスであり、 $T_{Xi}$ ,  $T_{Yi}$ ,  $T_{Gi}$  は周期、 $W_{Xi}$ ,  $W_{Yi}$ ,  $W_{Gi}$  はパルス時間である。クロック  $C_i(t) = 1$  のとき、離散状態変数  $X_i$ ,  $Y_i$  は以下の状態遷移を起こす。

$$\begin{aligned} X_i(t^+) &= X_i(t) + S_{Xi}(t) \mathcal{F}_X(X_i(t), Y_i(t), P_i(t)) \\ &\quad + S_{Gi}(t) \mathcal{G}_i(X(t), V(t)), \\ Y_i(t^+) &= Y_i(t) + S_{Yi}(t) \mathcal{F}_Y(X_i(t), Y_i(t), Q_i(t)) \\ &\quad + S_{Gi}(t) \mathcal{G}_i(Y(t), U(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\mathcal{F}_X \in \{-1, 0, 1\}$ と $\mathcal{F}_Y \in \{-1, 0, 1\}$ は離散ベクトル場関数、 $g_i \in \{-1, 0, 1\}$ は離散結合関数、 $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_8\}$ 、 $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_8\}$ 、 $\mathbf{V} = \{V_1, \dots, V_8\}$ 、 $\mathbf{U} = \{U_1, \dots, U_8\}$ である。

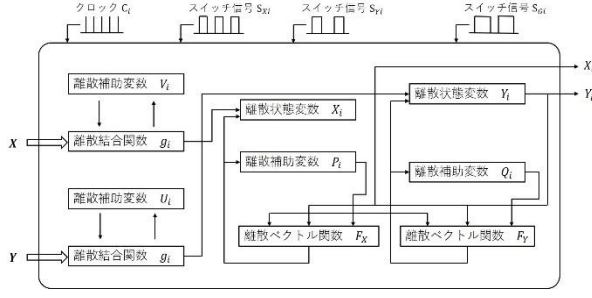


図2 エルゴード的順序回路の回路図[3].

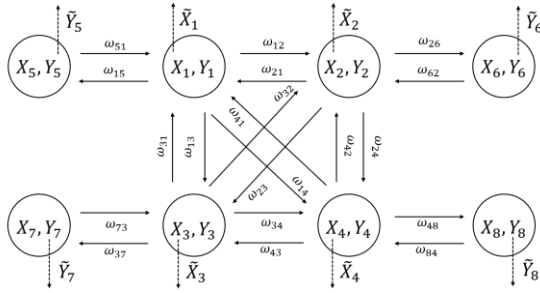


図3 CPGにおける発振器の回路図[3].

### 3. チョッパ型混合歩容と分岐

本章では、CPGモデルを一般化し、離散結合関数 $g_i$ を以下のようにチョッパ的に変化させる。

$$g_i(\mathbf{X}(t), \mathbf{V}(t), \mathbf{W}^{(1)}, \mathbf{W}^{(2)}, CP(t)) = \begin{cases} (\sigma \sum_{j=1}^8 w_{ij}^{(1)} (X_j - N/2))^{-1} & \text{if } CP_i(t) = 1, \\ (\sigma \sum_{j=1}^8 w_{ij}^{(2)} (X_j - N/2))^{-1} & \text{if } CP_i(t) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{W}^{(k)} = \begin{pmatrix} w_{1,1}^{(k)} & w_{1,2}^{(k)} & \dots & w_{1,8}^{(k)} \\ w_{2,1}^{(k)} & w_{2,2}^{(k)} & \dots & w_{2,8}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{8,1}^{(k)} & w_{8,2}^{(k)} & \dots & w_{8,8}^{(k)} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$CP(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \pmod{T^{(1)} + T^{(2)}} \leq T^{(1)}, \\ 0 & \text{if } t \pmod{T^{(1)} + T^{(2)}} > T^{(1)}. \end{cases} \quad (5)$$

図4に結合行列 $\mathbf{W}$ を変化させるチョッパ信号 $CP(t)$ の時間波形の例を示す。図4より、チョッパ信号 $CP(t)$ は2つの結合行列 $\mathbf{W}^{(1)}$ と $\mathbf{W}^{(2)}$ のチョッパ型混合を実現するために用いられる。このとき、チョッパ信号 $CP(t)$ の周期 $T^{(1)} + T^{(2)}$ はエルゴード的順序回路の周期よりはるかに短いとする。本研究は以下の2つの結合行列を用いた。

$$\mathbf{W}^{(1)} = \mathbf{W}^F = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{W}^{(2)} = \mathbf{W}^R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

四足歩行ロボットは、結合行列 $\mathbf{W}^F$ のとき前進運動、結合行列 $\mathbf{W}^R$ のとき右回転をする。本研究の目的は、これらの結合行列のチョッパリングの効果を解析することである。そのために、以下のチョッパ比 $T_R$ を用いる。

$$T_R = \frac{T^{(2)}}{T^{(1)} + T^{(2)}}. \quad (8)$$

図5にチョッパ比 $T_R$ の値に対するエルゴード的順序回路CPGモデルの典型的な時間波形を示す。ここで、エルゴード的順序回路CPGのダイナミクスは、Verilog-HDLコードで記述され、XilinxのVivado 2021.2でコンパイルした。生成されたビットストリームファイルは、XilinxのFPGAデバイスXC7A35T-1CPG236Cの実装に使用した。また、図6に示すように、FPGAはAdept社の四足歩行ロボットDark Pawに搭載した。

- 図5(a)のとき、チョッパ比 $T_R$ は0.0である。これは $\mathbf{W} = \mathbf{W}^F$ に対応する
- 図5(b)と(c)のとき、チョッパ比 $T_R$ はそれぞれ0.2と0.5である。これらのとき、結合行列 $\mathbf{W}$ はチョッパの要領で $\mathbf{W}^F$ と $\mathbf{W}^R$ が混合して与えられる。
- 図5(d)のとき、チョッパ比 $T_R$ は1.0である。これは $\mathbf{W} = \mathbf{W}^R$ に対応する。

図7にチョッパ比 $T_R$ を変化させたときの四足歩行ロボットの歩容の様子を示す。図6の(a), (b), (c), (d)は、それぞれ図5の(a), (b), (c), (d)の時間波形に対応するロボットの動きを示している[10][11]。

- 図7(a)のとき、チョッパ比 $T_R$ は0.0である。このときロボットは前進運動をする。
- 図7(b)のとき、チョッパ比 $T_R$ は0.2である。このとき、ロボットは左曲がりの歩容をする。結合行列 $\mathbf{W}$ はチョッパの要領で $\mathbf{W}^F$ と $\mathbf{W}^R$ が混合して与えられる、すなわち、結合行列 $\mathbf{W}$ は左曲がりの要素を含まないが、左曲がりの動作をした。
- 図7(c)のとき、チョッパ比 $T_R$ は0.5である。このとき、ロボットは転倒を含む複雑な歩容をした。
- 図7(d)のとき、チョッパ比 $T_R$ は1.0である。このときロボットは右回転する。

このようにロボットの歩容の分岐現象が確認された。図8にチョッパ比 $T_R$ 、チョッパ信号 $CP(t)$ の周期 $T^{(1)} + T^{(2)}$ を変更したときのロボットの歩容結果を示す。

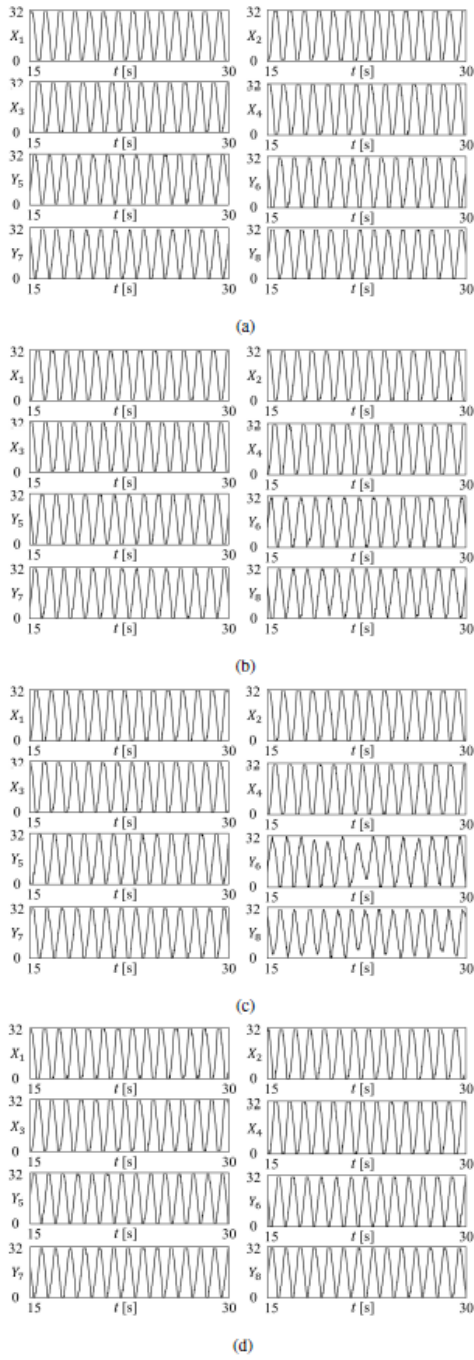


図5 エルゴード的順序回路 CPG モデルの時間波形.  
(a)  $T_R = 0.0$ , (b)  $T_R = 0.2$ , (c)  $T_R = 0.5$ , (d)  $T_R = 1.0$ .

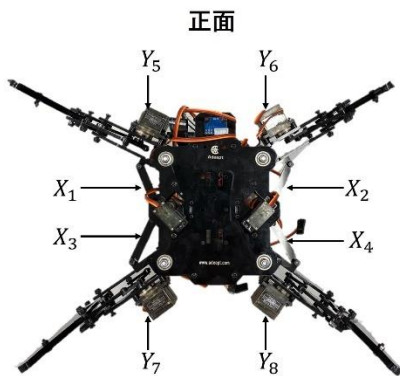


図6 本実験で用いた四足歩行ロボット

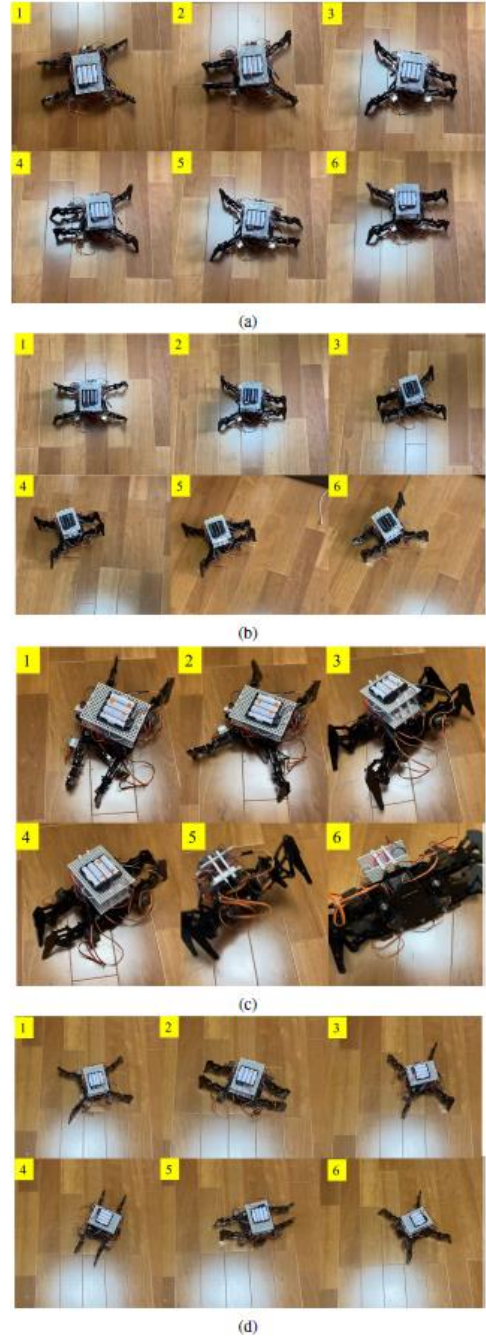


図7 四足歩行ロボットの歩容の様子.

(a)  $T_R = 0.0$ , (b)  $T_R = 0.2$ , (c)  $T_R = 0.5$ , (d)  $T_R = 1.0$ .

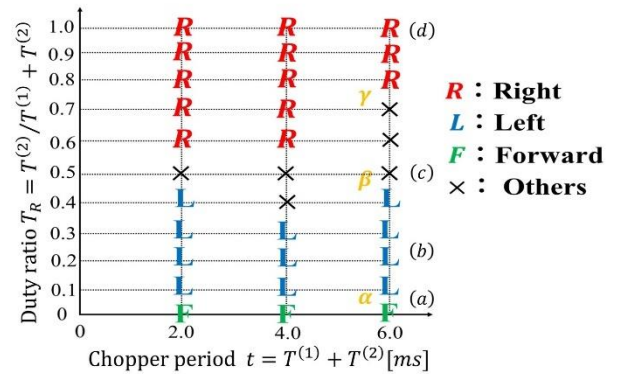


図8 チョップ型混合歩容による歩容の分岐図[9].

(a) - (d) はそれぞれ図5の(a) - (d) に対応する.

- 図 8 点  $\alpha$  付近でチョップパ比  $T_R$  が増加すると、前進運動から左曲がりの歩容へ変化した。
- 図 8 点  $\beta$  付近でチョップパ比  $T_R$  が増加すると、左曲がりの歩容から転倒を含む複雑な歩容へ変化した。
- 図 8 点  $\gamma$  付近でチョップパ比  $T_R$  が増加すると、転倒を含む複雑な歩容から右回転へ変化した。

#### 4. 実装比較

表 1 にエルゴード的順序回路 CPG と微分方程式モデル (Hopf CPG) の素子数と消費電力を示す。表 1 の結果より、エルゴード的順序回路 CPG は微分方程式モデル (Hopf CPG モデル) に比べ LUT が約 35%, 消費電力は約 40% 削減されたが、FF は約 60% 増加した。しかし、FF の実装に使用されるトランジスタの数は、LUT の実装に使用されるトランジスタの数よりはるかに少ないことから、エルゴード的順序回路 CPG では Hopf CPG に比べ、ハードウェア効率が高いことが確認できた。

表 1 各モデルの素子数と消費電力[12].

|           | エルゴード的順序回路CPG | 微分方程式モデル (Hopf CPG) [4] |
|-----------|---------------|-------------------------|
| # LUT     | 12600         | 19529                   |
| # FF      | 1602          | 617                     |
| Power (W) | 0.099         | 0.162                   |

#### 5. まとめ

本研究では、エルゴード的順序回路 CPG を用いて四足歩行ロボットの歩行を実現し、結合行列をチョップパ的に切り替えることで歩行の分岐現象が発生することを確認した。また、エルゴード的順序回路モデルと従来の微分方程式モデル (Hopf CPG モデル) を比較した。その結果、LUT の数は約 35 % 減少、FF の数は約 60 % 増加し、消費電力は約 40 % 減少した。今後の課題としては、(a) エルゴード的順序回路 CPG による屈筋・伸筋を用いた姿勢制御への応用、(b)[6] のような様々な時変結合重みに対する同期現象の解析などが挙げられる。

**謝辞:** 本研究を行うにあたり、研究内容、方針について熱心なご指導をいただいた法政大学の鳥飼弘幸教授に深く感謝いたします。加えて、6 年間講義など様々な場面でお世話になった法政大学理工学研究科の教授方、日々共に研究した鳥飼研究室の皆様に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) E. Kandel, et al., "Principales of Neural Science," McGraw-Hill, 4th ed., 2000.
- 2) S. Grillner, "Neurobiological bases on of rhythmic motor acts in vertebrates," Science, Vol. 228 No.4969, pp. 143-149, 1985.

- 3) S. Komaki, K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Ergodic Discrete Difference Equation Model of Central Pattern Generator: Theoretical Analysis and Efficient Implementation, IEEE Trans. on Circuits Syst. II, vol. 69. no. 3, pp. 1767-1771, 2022.
- 4) J. Yu, M. Tan, J. Chen, and J. Zhang, "A Surveyon CPG-Inspired Control Models and System Implementation," IEEE Transactins on Neural Networks and Leaning Systems, Vol. 21, pp. 441-456, 2014.
- 5) K. Takeda and H. Torikai, "A novel hardware-efficient CPG model for a hexapodrobot basedon nonlinear dynamics of coupled asynchronouscellular automaton oscilla-tors," Proc. of The2019 International Joint Conference on NeuralNetworks, .N-19758, 2019.
- 6) S. Anzai, T. Suzuki, T. Saito, Dynamic binary neural networks with time-variantparameters and switching of desired periodic orbits, Neurocomputing, Volume 457, 2021.
- 7) K. Takeda and H. Torikai, A Novel Hardware-Efficient Central Pattern Generator Model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics for Controlling Hexa-pod Robot, IEEE Access, Vol. 8, pp. 139609-139624, 2020.
- 8) K. Takeda and H. Torikai, A novel hardware-efficient CPG model based on asyn-chronous cellular automaton, IEICE Electronics Express, Vol. 15, No. 11, pp. 1-11, 2018.
- 9) J. Kamitoko and H. Torikai, A generalized ergodic cellular automaton model of centralpattern generator and its bifurcation analyses induced by chopper type gaits, Proc. of NOLTA, pp.491-494, 2022.
- 10) J. Kamitoko and H. Torikai, A chopper-type mixed gait controller based on ergodic cellular automaton central pattern generator, Proc. Of ISOCC, pp. 231-232, 2023.
- 11) 上床, 鳥飼, エルゴード的順序回路 CPG モデルによるチョップパ型 4 脚ロボット制御, 電子情報通信学会信学技報, NLP2023-57, 2023.
- 12) 上床, 鳥飼, エルゴード的順序回路 CPG による屈筋と伸筋を有する 4 脚ロボットの制御, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, N-2-4, 2022.
- 13) 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. CAS-I, Vol. 67, No. 6, pp. 1989-2001, 2020.
- 14) T. Naka and H. Torikai, A Novel Generalized Hardware-Efficient Neuron Model based on Asynchronous CA Dynamics and its Biologically Plausible On-FPGA Learnings, IEEE Trans. CAS-II Vol. 66, No. 7, pp. 1247-1251, 2019.
- 15) T. Matsubara and H. Torikai, An Asynchronous Recurrent Network of Cellular Automaton-based Neurons and its Reproduction of Spiking Neural Network Activities, IEEE Trans. NNLS, Vol. 27, No. 4, pp. 836- 852, 2016.

- 16) K. Takeda and H. Torikai, A novel spike-train generator suitable for QCA implementation towards UWB-IR applications, *IEICE NOLTA Journal*, Vol. 9, No. 4, pp.436-452, 2018.
- 17) C. Matsuda and H. Torikai, A Novel Generalized PWC Neuron Model: Theoretical Analyses and Efficient Design of Bifurcation Mechanisms of Bursting, *IEEE Trans. CAS-II*, Vol. 65, No. 11, pp. 1738-1742, 2018.
- 18) Y. Hu, J. Liang and T. Wang, Parameter Synthesis of Coupled Nonlinear Oscillators for CPG-Based Robotic Locomotion, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 11, pp. 6183-6191, 2014.
- 19) Y. Wang, A. Zhu, H. Wu, P. Zhu, X. Zhang, and G. Cao, Control of Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robot Based on CPG Neural Network, *Proc. Int. Conf. on Ubiquitous Robots*, pp. 678-682, 2019.
- 20) L. Minati, M. Frasca, N. Yoshimura, and Y. Koike, Versatile Locomotion Control of a Hexapod Robot Using a Hierarchical Network of Nonlinear Oscillator Circuits, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 8042-8065, 2018.