

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-09-17

コオロギの聴覚系の特性のデジタルハードウェアを用いた再現

MAKABE, Yuto / 真壁, 勇人

(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)

3

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030682>

コオロギの聴覚系の特性の デジタルハードウェアを用いた再現

A NOVEL HARDWARE-EFFICIENT AUDITORY NEURAL NETWORK MODEL OF FEMALE CRICKET BASED ON ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATON DYNAMICS

真壁 勇人

Yuto MAKABE

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後期課程

A novel auditory neural network of female cricket is proposed, where its nonlinear dynamics is designed based on asynchronous cellular automaton. It is shown that the proposed network can reproduce nonlinear responses of female crickets to several kinds of sound stimuli. The proposed network is implemented by an FPGA and experiments validate its operations. It is shown that the network can be implemented by fewer circuit elements and consumes lower power than an ODE neural network.

Key Words : FPGA, neural network

1. はじめに

人間の言葉から動物の鳴き声まで、生物が発生する音響通信は振幅と周波数の変調に基づく。メスのコオロギの聴覚神経系においては、5つのニューロンがオスの鳴き声のパルスパターンの検出回路を形成しており[1]、図1はその一例を示している。

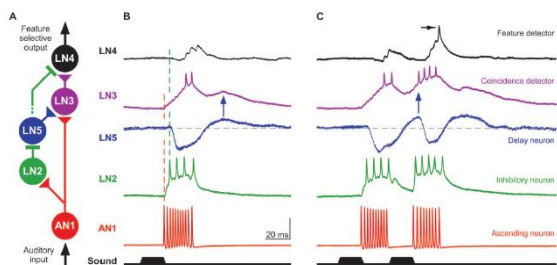


図1 聴覚ニューロン。(A) 概念図。(B)1 入力への応答。(C)2 入力への応答[1]。

生理学的実験により、このネットワークが音刺激の特定のパターンを検出できることが明らかになった[1]。本稿ではこの波形を Izhikevich モデルを用いて C 言語で再現する。またその再現をハードウェア記述言語によっても再現を行う。様々な神経系システムをハードウェアに模擬するための手法の一つとして、非同期セルオートマトンと呼ばれる手法がある[2]。非同期セルオートマトンを用いて聴覚ニューロンモデルの再現を行う。また、非同期セルオートマトンを用いた聴覚ニューロンモデルが数

値微分モデルより消費電力やハードウェアコストが優れていることを比較して示す。本研究の目的は、コオロギの雌の聴覚神経回路網のハードウェア効率に優れた電子回路モデルを設計することである[3][4]。

2. 数値微分モデルによる聴覚ニューロンの再現

(1) Izhikevich モデル

聴覚ニューロンの波形を再現するための Izhikevich モデルとして以下の式を用いる。

$$\begin{aligned}v(t+h) &= v(h) + h(k(v(t) - vr)(v(t) - vt) - u(t) + I) / C, \\u(t+h) &= u(t) + h(a(b(v(t) - vr) - u(t))), \\ \text{if } v \geq v_{\text{peak}}, & \text{ then } v \leftarrow c, u \leftarrow u + d.\end{aligned}\tag{1}$$

(2) 聴覚ニューロンの再現

図1 A に示されたコオロギの聴覚神経系のネットワークを参考にして Izhikevich モデルのネットワークを設計した。必要に応じて式の一部を変更した。入力刺激が4回の時のネットワークの反応を図2に示す。

また同ネットワークの FPGA 実装と実機実験によって得られた実験結果を図3に示す。

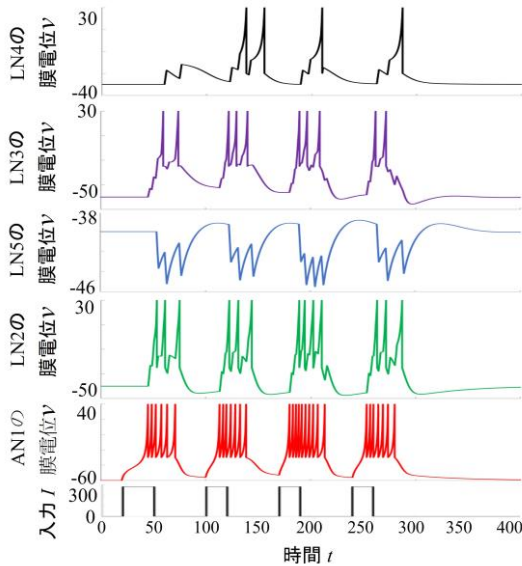
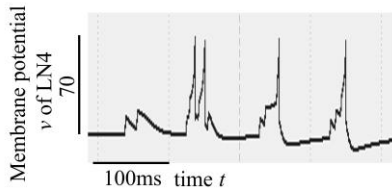


図2 設計モデルのシミュレーション.



Measured cricket's membrane potential

図3 ハードウェア記述言語における4入力のLN4の再現

3. 非同期セルオートマトンを用いた聴覚ニューロンモデル

非同期セルオートマトンを用いた聴覚ニューロンモデルは、2つの非同期クロック $C_v(t)$, $C_i(t)$ と膜電位 V , 回復変数 U , 周波数変数 P , Q の4つの離散状態を保持する2つのレジスタを持つ。それに加え、ベクトル場関数 F_v , F_u を持つ。また、図4は非同期セルオートマトンを用いた聴覚ニューロンモデルの概略図である。これらの離散状態変数が遷移するための非同期クロック C_v , C_u を以下に示す。

$$C_v = \begin{cases} 1 & \text{if } t = 0, T_v, 2T_v, \dots \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$$C_u = \begin{cases} 1 & \text{if } t = 0, T_u, 2T_u, \dots \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

$T_v(V, U)$ と $T_u(V, U)$ は、非同期クロック $C_v(t)$, $C_u(t)$ の周期である。両クロックの周期比 T_v/T_u は一般的に無理数比であると、内部クロック $C_v(t)$, $C_u(t)$ は非同期とする。これらの内部クロック $C_v(t)$, $C_u(t)$ は、以下のように離散状

態周波数変数 P , Q の非同期遷移をもたらす。

$$\text{If } C_v = 1, \text{ then} \\ P(t_+) = \begin{cases} P(t) + 1 & \text{if } P(t) < |F_v(V(t), U(t))| \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{If } C_v = 1, \text{ then} \\ Q(t_+) = \begin{cases} Q(t) + 1 & \text{if } Q(t) < |F_u(V(t), U(t))| \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

シンボル " t_+ " は を表し, " $:=$ " は瞬時代入を表す。次に内部クロック $C_v(t)$, $C_u(t)$ は、以下のように膜電位 V と回復変数 U の非同期遷移をもたらす。

$$\lim_{\epsilon \rightarrow +0} t + \epsilon \\ \text{If } C_v = 1, \text{ then} \\ V(t_+) := \begin{cases} V(t) + \text{sgn}(F_v) & \text{if } P(t) \geq |F_v| \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{If } C_u = 1, \text{ then} \\ U(t_+) := \begin{cases} U(t) + \text{sgn}(F_u) & \text{if } Q(t) \geq |F_u| \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

次にこの遷移に必要なベクトル場関数 F_v , F_u を以下のように設定する。

$$F_v(V, U) = /TV(k(V - vr)(V - vt) - U + Iw)/C/, \quad (8)$$

$$F_u(V, U) = /T_u a(b(V - vr) - U)/. \quad (9)$$

これらの離散状態変数の遷移を図5に示す。

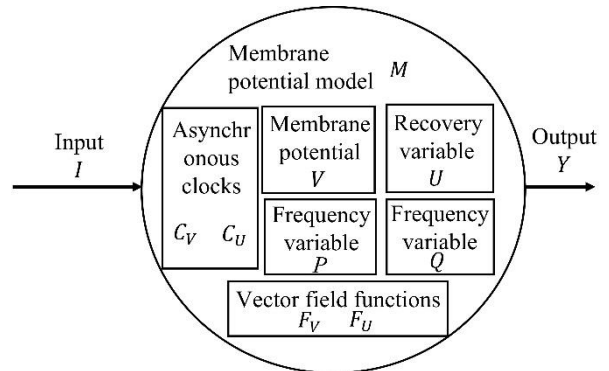


図4 非同期セルオートマトンに基づく膜電位モデル

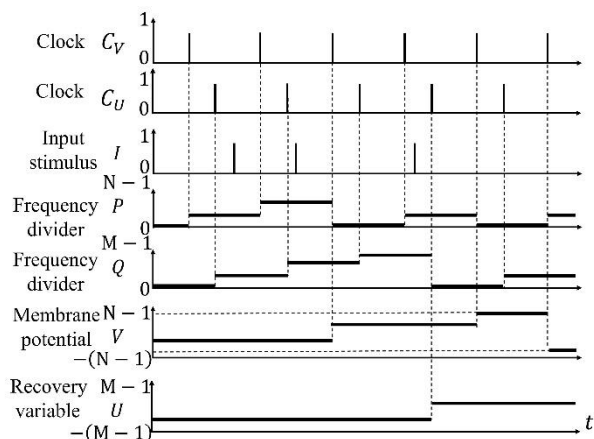


図5 離散状態変数の遷移

以上を踏まえて FPGA を用いて提案したネットワークを実装した。実装したネットワークの波形を測定した結果を図6に示す。

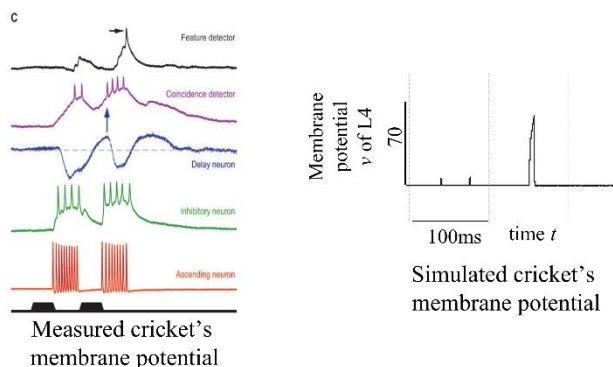


図6 非同期セルオートマトンモデルの実機実装における測定結果

4. モデルの比較

非同期セルオートマトンを用いた聴覚ニューロンモデルと数値微分モデルの消費電力やハードウェアコストの比較を表1に示す。

表3 比較結果

	Proposed asynchronous cellular automaton network	Network of Izhikevich model
Bit length	16	32
Look up table	5609	15016
Flip flop	576	662
Power consumption[W]	0.258	0.656

5. まとめ

まず、Izhikevich モデルのネットワークを設計し、様々な音刺激に対するコオロギの反応を再現できることを示した。次に、非同期セルオートマトンモデルのネットワークを提案し、コオロギの反応を再現できることを示した。第三に、両ネットワークを同じFPGA デバイスで実装し、提案モデルの方がハードウェア効率が高いことを示した。

今後の計画としては、様々な昆虫の大規模聴覚システムの非同期セルオートマトンモデルを設計することである。

参考文献

- 1) Stefan Schöoneich, Konstantinos Kostarakos and Berthold Hedwig, An auditory feature detection circuit for sound pattern recognition, Science Advances, vol. 1, no. 8, e1500325, 2015.
- 2) Matsubara and Torikai, IEEE Trans. NNLS, vol. 24, no. 5, 2023.
- 3) Makabe and Torikai, IEICE, 2021.
- 4) Makabe and Torikai, NLSW, 2021.