

非同期セルオートマトンを用いた哺乳類の蝸牛の模倣について

Onodera, Shun / 小野寺, 駿

(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)

4

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025324>

非同期セルオートマトンを用いた 哺乳類の蝸牛の模倣について

IMITATION OF MAMMALIAN COCHLEA BASED ON
ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATON

小野寺駿

Shun Onodera

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 analyze the frequency response characteristics and tuning curve of an asynchronous cellular automaton cochlear model, and search for parameters that can reproduce the frequency characteristics of the cochlea of living and dead guinea pigs and the tuning curve of a bat. In addition, the model is implemented in FPGA, and the hardware cost is compared to an ODE cochlear model.

Key Words : *Asynchronous cellular automaton, FPGA, Cochlear model.*

1. はじめに

人の耳の構造は外耳、中耳、内耳の3つの部分に分かれている。外耳は耳介によって集められた音波を外耳道を介して鼓膜に伝達する役割がある。中耳は3つの小さな骨を介して内耳の入り口にある前庭窓と呼ばれる小さな膜を通して鼓膜の振動を増幅させ伝える役割がある。内耳は蝸牛と呼ばれる螺旋状の管（蝸牛管）と三半規管で構成され、また、蝸牛は音響受容器となり、非線形フィルタ特性、適応特性、整流特性などの多岐にわたる音声処理を行っている[1]。蝸牛では音の周波数が基底膜上での位置であり、音の振動はリンパ液を介して膜迷路内にある基底膜を振動させる。基底膜の基部（蝸牛の入り口側）から先端部（蝸牛孔側）へ向かう進行波であると言われており、基底膜は全長にわたって一様の性質を持っているわけではなく、根元の方が狭く厚く先端へ行くほど広く薄い。これにより、根元から先端に向けて剛性が低くなる。このため、正弦波入力に対する進行波の振幅包絡のピークは、入力音の周波数に依存することがわかっている[2]。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1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[3][4]。従来までの神経系のモデル化手法を時間と状態の4つに分類したものを以下に示す。

- ・連続時間と連続状態(CTCS)を持つモデル
 - ・離散時間と連続状態(DTDS)を持つモデル
 - ・連続時間と離散状態(CTDS)を持つモデル
 - ・離散時間と離散状態(DTDS)を持つモデル
- 今回は4つのうち、CTDSモデルを用いた。

CTDSモデルの特徴の特徴を以下に示す[5]。

- ・離散状態、連続時間を有する
- ・状態変数の更新が非同期で行われる
- ・解軌道性に多様性が生まれる
- ・数値積分のモデルよりコストが低い

これらの特性を生かして非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの解析を行う。本研究では、非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルが生物の周波数特性やチューニングカーブを非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルのパラメータの値を変更し、再現できることを示す。また、非同期セルオートマトンを用いた蝸牛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も比較して示す。

2. 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデル

非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルは以下に続く4つの離散状態を持つ。非線形振動現象起こす基底膜のふるまいを示す離散状態 $X \in Z_N = \{0, \dots, N-1\}$, $Y \in Z_N$, X, Y が遷移するためのカウンター変数を表すレジスター $P \in Z_M = \{0, \dots, M-1\}$, $Q \in Z_M$ であり、 N, M は離散変数 X, Y, P, Q も範囲を表すパラメータである。また、図1は非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの概略図であり、図1が示すように、CAオシレーターには2つの離散状態変数 X, Y と2つのカウンター変数 P, Q がある。これらの離散変数が遷移するための非同期クロック $C_X(t), C_Y(t)$ を以下に示す。

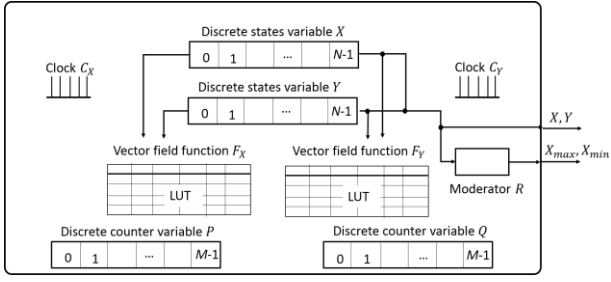


図1 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの概略図

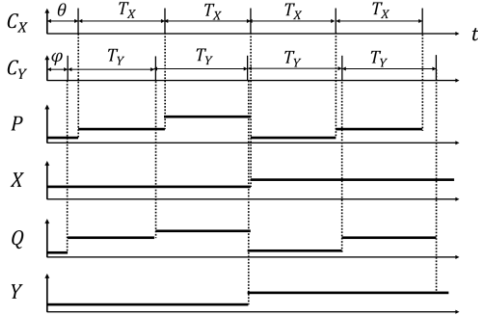


図2 本モデルにおける状態遷移. 音刺激なし

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

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

$T_X(X, Y), T_Y(X, Y)$ は, 非同期クロック $C_X(t), C_Y(t)$ の周期である. 両クロックの周期比 T_X/T_Y は一般的に無理数比であるとし, 内部クロック $C_X(t), C_Y(t)$ は非同期とする. これらの内部クロック $C_X(t), C_Y(t)$ がカウンタ変数 P, Q の下記に示す遷移をもたらす.

If $C_X(t) = 1$, then

$$P(t_+) := \begin{cases} P(t) + 1 & \text{if } P(t) < |F_X| \\ 0 & \text{if } P(t) \geq |F_X| \end{cases} \quad (3)$$

If $C_Y(t) = 1$, then

$$Q(t_+) := \begin{cases} Q(t) + 1 & \text{if } Q(t) < |F_Y| \\ 0 & \text{if } Q(t) \geq |F_Y| \end{cases} \quad (4)$$

シンボル“ t_+ ”は $\lim_{\epsilon \rightarrow +0} t + \epsilon$ を表し, “ $:=$ ” は瞬時代入を表す. 次に内部クロック $C_X(t), C_Y(t)$ が状態変数 X, Y にもたらす遷移を以下に示す.

If $C_X(t) = 1$ and $P(t) \geq |F_X|$, then

$$X(t_+) = \begin{cases} X(t) + 1 & \text{if } X(t) \neq 0 \text{ and } F_X \geq 0, \\ X(t) - 1 & \text{if } X(t) \geq 0 \text{ and } F_X < 0, \\ X(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

If $C_Y(t) = 1$ and $Q(t) \geq |F_Y|$, then

$$Y(t_+) = \begin{cases} Y(t) + 1 & \text{if } Y(t) \neq 0 \text{ and } F_Y \geq 0, \\ Y(t) - 1 & \text{if } Y(t) \geq 0 \text{ and } F_Y < 0, \\ Y(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

これらの離散変数の遷移の例を図2に示す. 次にこの遷移に必要なベクトル場を設計するための式を以下に示す.

$$f_x(X, Y) = a_{10}lX + a_{01}lY + a_{20}l^2X^2 + a_{11}l^2XY + a_{02}l^2Y^2 + a_{30}l^3X^3 + a_{21}l^3X^2Y + a_{12}l^3XY^2 + a_{03}l^3Y^3 \quad (7)$$

$$f_y(X, Y) = b_{10}lX + b_{01}lY + b_{20}l^2X^2 + b_{11}l^2XY + b_{02}l^2Y^2 + b_{30}l^3X^3 + b_{21}l^3X^2Y + b_{12}l^3XY^2 + b_{03}l^3Y^3 \quad (8)$$

またパラメータが $a_{20} = a_{02} = a_{03} = b_{02} = b_{30} = b_{12} = 0$ と設定すると, 従来研究[1]で使用された非線形関数であり, 本研究ではそれを一般化した関数を使用している. 次にこの非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルに入力するための単音信号 $s(t)$ を以下に示す.

$$s(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (9)$$

このとき, システムに対して音刺激として入力される信号 $S(t) \in \{1, 0, -1\}$ は $s(t) \in R$ により密度変調を経て以下のように定義される.

$$S(t) = \begin{cases} 1 & t = \tau_p(1), \tau_p(2), \dots, \\ -1 & t = \tau_n(1), \tau_n(2), \dots, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

各パルスの位置 $\tau_p(1), \tau_p(2), \dots$ は $s(t) > 0$ は範囲で $s(t)$ に瞬時密度が比例する. また, $\tau_n(1), \tau_n(2), \dots$ は $s(t) < 0$ は範囲で $-s(t)$ に瞬時密度が比例する. このような音刺激 $S(t)$ がカウンタ変数 P にもたらす遷移を以下に示す.

If $S(t) = 1$, then

$$P(t_+) := \begin{cases} P(t) + 1 & \text{if } P(t) < |F_X| \text{ and } F_X \geq 0 \\ P(t) - 1 & \text{if } P(t) > 0 \text{ and } F_X < 0 \\ |F_X| & \text{if } P(t) = 0 \text{ and } F_X < 0 \\ 0 & \text{if } P(t) \geq |F_X| \text{ and } F_X \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

If $S(t) = -1$, then

$$P(t_+) := \begin{cases} P(t) + 1 & \text{if } P(t) < |F_X| \text{ and } F_X < 0 \\ P(t) - 1 & \text{if } P(t) > 0 \text{ and } F_X \geq 0 \\ |F_X| & \text{if } P(t) = 0 \text{ and } F_X \geq 0 \\ 0 & \text{if } P(t) \geq |F_X| \text{ and } F_X < 0 \end{cases} \quad (12)$$

次に同音刺激 $S(t)$ が状態変数 X にもたらす遷移を以下に示す.

If $S(t) = 1$ and $F_X \geq 0$, then

$$X(t_+) = \begin{cases} X(t) + 1 & \text{if } X(t) \neq N - 1 \text{ and } P(t) \geq F_X, \\ X(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

If $S(t) = 1$ and $F_X < 0$, then

$$X(t_+) = \begin{cases} X(t) + 1 & \text{if } X(t) \neq N - 1 \text{ and } P(t) \geq F_X, \\ X(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{If } S(t) = -1 \text{ and } F_X \geq 0, \text{ then} \\ X(t_+) = \begin{cases} X(t) - 1 & \text{if } X(t) \neq N - 1 \text{ and } P(t) = 0, \\ X(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{If } S(t) = -1 \text{ and } F_X < 0, \text{ then} \\ X(t_+) = \begin{cases} X(t) - 1 & \text{if } X(t) \neq N - 1 \text{ and } P(t) = 0, \\ X(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

このシステムを用いて哺乳類の蝸牛の再現を行う。

3. モルモットの周波数特性の再現

状態変数 X の振幅を A とし、十分な時間が経過した後の状態変数 X の最大値 X_{max} 、最小値 X_{min} から $A = X_{max} - X_{min}$ で算出する。算出した振幅 A を各入力周波数 f に対してプロットしたグラフを周波数応答のグラフとする。本章では式(7),(8)のパラメータを設定し、モルモットの生きている状態と死後の周波数特性の再現を行う。パラメータ設定は試行錯誤を繰り返し見つけていく。その結果、パラメータを $a_{10} = 125, a_{01} = -9420, a_{03} = -0.75, b_{10} = 11775, b_{01} = -100, b_{11} = -0.75, N = M = 300, l = 0.25$ と設定した場合図3の生きているモルモットの周波数特性に類似する周波数特性が確認できた。

次に、パラメータを $a_{10} = 100, a_{01} = -7220, a_{03} = -0.5, a_{12} = -1, a_{03} = b_{10} = 14444, b_{01} = 50, b_{11} = 1, b_{21} = -0.5, N = M = 180, l = 0.6$ と設定した場合図4の死後のモルモットの周波数特性に類似する周波数特性が確認できた。再現を行った死後のモルモットの周波数特性を再現したモデルをFPGAに実装する。実装したモデルと前進オイラー法で実装したものでハードウェアコスト比較を行う。比較結果を表1に示す。表1より、非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルが前進オイラー法を用いたモデルよりLUTsと消費電力が約 $\frac{1}{3}$ に抑えられていることがわかる。よって、非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルはハードウェア効率が優れているといえる。

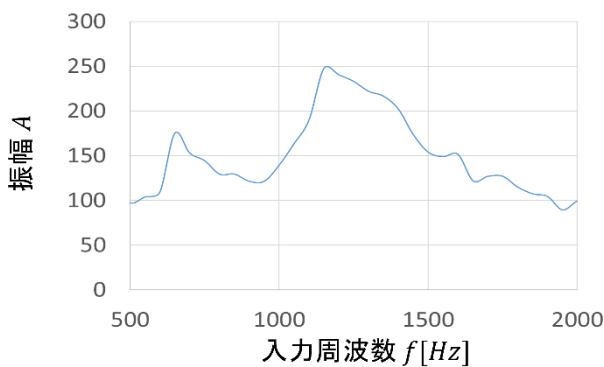


図3 式(7),(8)のパラメータを $a_{10} = 125, a_{01} = -9420, a_{03} = -0.75, b_{10} = 11775, b_{01} = -100, b_{11} = -0.75, N = M = 300, l = 0.25$ とした場合の周波数特性

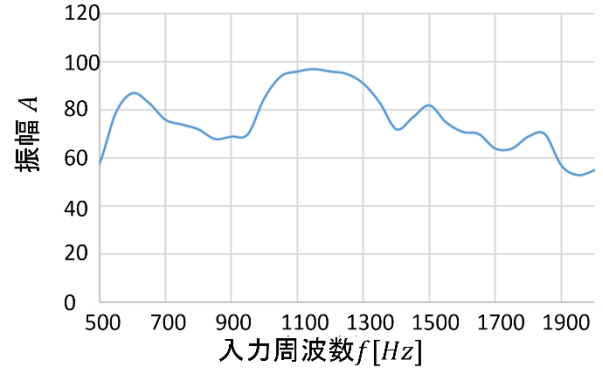


図4 式(7),(8)のパラメータを $a_{10} = 100, a_{01} = -7220, a_{03} = -0.5, a_{12} = -1, a_{03} = b_{10} = 14444, b_{01} = 50, b_{11} = 1, b_{21} = -0.5, N = M = 180, l = 0.6$ とした場合の周波数特性

表1 ハードウェアコストの比較

	提案モデル	前進オイラー法
LUTs	15958	40260
FFs	3334	395
Power	0.574[w]	1.776[w]

4. 蝙蝠のチューニングカーブの再現

本章では蝙蝠の蝸牛の特性を再現できることを示す。再現方法として、Minimum sound power level (SPL) 使いチューニングカーブで再現を行う。Minimum sound power level は入力刺激 $S(t)$ の音圧を徐々に高くしていったとき、状態変数 X のRMS値が任意の閾値を超える瞬間での最小のSPLである。このMinimum sound power levelと刺激入力における入力周波数 f を用いてプロットしたグラフがチューニングカーブである。Minimum sound power levelを求めるために必要な基底膜の反応の大きさを表す状態変数 X のRMS値をいかに示す。

$$RMS(X) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{l^2}{T} \int_{T_s}^T \left(X(t) - \frac{N}{2} \right)^2 dt \quad (17)$$

続いて、音刺激 $S(t)$ の強度を表す $\rho(S)$ を以下に示す。

$$\rho(S) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\text{Number of spikes } |S(t)| = 1 \text{ for } t \in [0, \tau]}{\tau} \quad (18)$$

さらに $\rho(S)$ を利用して $S(t)$ における SPL, すなわち音圧を以下に定義する。

$$SPL(S) = 10^{(\rho(S) - \rho_0) \times 10^{-5}} \quad (19)$$

$\rho_0 = 1.0 \times 10^6$ で基準値である。これらを用いて蝙蝠のチューニングカーブの再現を行う。3章と同様に式(7),(8)のパラメータを試行錯誤を繰り返し探した結果、 $a_{10} = 75, a_{01} = -9420, a_{21} = -1, a_{11} = -0.75, b_{10} =$

7065, $b_{01} = 700, b_{30} = -1, b_{11} = -0.75, N = M = 256, l = 0.25$ とした場合, 図5のような蝙蝠のチューニングカーブに類似するチューニングカーブが再現できた. このモデルを FPGA に実装する. 実装後, 前進オイラー法を用いたモデルも同様に実装し, 実機での消費電力を比較する. 計測方法として, FPGA の給電口に USB 型の電圧電流チェッカー(RT-USBVAC&QC)を使い計測した. また, 計測時にモデル一つでは電力が微弱であったり, FPGA 本体の電力が入っているため, モデルを複数個重ねて実装し, モデル一つ当たりの平均電力を求めた. その結果を表3に示す. 表3より, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルが前進オイラー法を用いたモデルより消費電力が約 $\frac{1}{4}$ に抑えられていることがわかる. よって, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルは消費電力が優れているといえる.

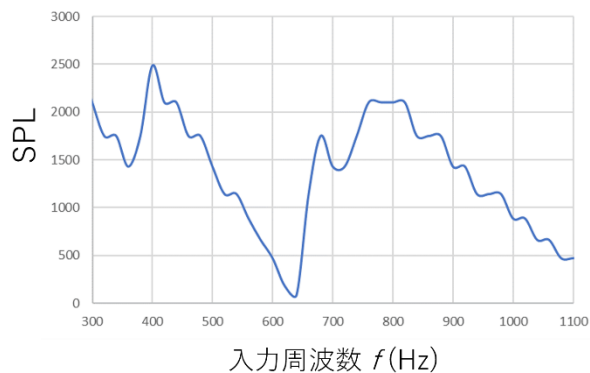


図5 式(7),(8)のパラメータを $a_{10} = 75, a_{01} = -9420, a_{21} = -1, a_{11} = -0.75, b_{10} = 7065, b_{01} = 700, b_{30} = -1, b_{11} = -0.75, N = M = 256, l = 0.25$ とした場合のチューニングカーブ

表3 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルと前進オイラー法を用いた蝸牛モデルの消費電力の比較

	提案モデル	換算値	前進オイラー法	換算値
Vivado	0.197[w]		0.727[w]	
1個	1.053[w]	0.0076[w]	1.073[w]	0.0242[w]
2個	1.057[w]	0.0058[w]	1.159[w]	0.0551[w]
3個	1.072[w]	0.0089[w]	1.160[w]	0.0371[w]
4個	1.072[w]	0.0067[w]	1.170[w]	0.0303[w]
5個	1.081[w]	0.0071[w]	1.185[w]	0.0272[w]
6個	1.091[w]	0.0076[w]	1.194[w]	0.0242[w]
平均		0.0073[w]		0.0330[w]

5. まとめ

本研究では, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルを用いて, 基底膜のふるまいを C 言語と Verilog-HDL でシミュレーションを行い, シミュレーション結果をもとに FPGA へ実装した. また, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの非線形ベクトル場設計関数を一般化し, モルモットの周波数特性と蝙蝠のチューニングカーブを再現できるパラメータを試行錯誤を繰り返し発見した. そして, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルと前進オイラー法を用いた蝸牛モデルの FPGA 実装した際のハードウェアコストを比較し非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルがハードウェア効率が優れていることを示した. また, 蝙蝠のチューニングカーブ再現では実機での消費電力比較を行った. このことより, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルを用いれば様々な生物の周波数特性やチューニングカーブが再現可能である.

参考文献

- 1) J. O. Pickes, An introduction to the physiology of hearing, 4th ed., Emerald Group Publishing 2012.
- 2) 古川茂人, 聴覚末梢系の概要, 日本音響学会誌, 73 巻, 10 号, pp. 639-644, 2017.
- 3) K. Isobe and H. Torikai, A novel hardware-efficient asynchronous cellurautomaton model of spike-timing dependent synaptic plasticity, IEEE Trans. CAS-II, vol. 63, no. 6, pp. 603 -607, 2016.
- 4) T. Noguchi and H. Torikai, Ghost Stochastic Resonance From an Asynchronous Cellur automaton Neuron Model, IEEE Trans. CAS-II, vol. 60, no. 2, pp. 111-115, 2013
- 5) K. Takeda and H. Torikai, A nobel hardware-efficient Cochlea Model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics: Theoretical Analysis and FPGA Imlemntation, IEEE Trans. CAS-II, vol. 64, no. 9, pp. 1107-1111, 2017
- 6) 和田仁, 高橋辰, 大山健二, 高坂知節, Audiology Japan, 38 巻, 4 号, pp. 305-312, 1995.
- 7) M. J. Ferragamo, T.Haresign and J. A. Simmons, Frequency tuning, latencies, and responses to frequency-modulated sweeps in the inferior colliculus of the echolocating bat, Eptesicus fuscus, Journal of Comparative Physiology A 182, pp. 65-79, 1997.
- 8) 小野寺駿, 鳥飼弘幸, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの非線形応答について, 信学技報, vol.119, no.485, pp. 13-16, 2020.
- 9) 小野寺駿, 鳥飼弘幸, 非同期セルオートマトンを用いた蝸牛モデルの周波数応答特性について, the 2020 IEICE Society Conference, 2020.
- 10) Shun Onodera and Hiroyuki Torikai, An asynchronous cellular automaton model of cochlea, NOLTA 2020, pp. 72-75, 2020.