# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

## エルゴード的順序論理回路を用いた蝸牛モデ ル: 哺乳類の非線形音声処理特性の再現と 効率的なFPGA実装

岸本, 唯 / KISHIMOTO, Yui

(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) 2 (発行年 / Year) 2024-03-24

(URL) https://doi.org/10.15002/00030695

### エルゴード的順序論理回路を用いた蝸牛モデル: 哺乳類の非線形音声処理特性の再現と効率的な FPGA 実装

A NOVEL INTEGRATED COCHLEAR MODEL BASED ON ERGODIC SEQUENTIAL LOGIC DYNAMICS: REPRODUCTION OF NONLINEAR SOUNDPROCESSING AND EFFICIENT FPGA IMPLEMENTATION

> 岸本唯 Yui KISHIMOTO 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, a novel hardware-efficient integrated cochlear model, whose nonlinear dynamics is described by ergodic sequential logics, is presented. It is shown that the presented cochlear model can reproduce pitch shift and combination tone generation of a mammalian cochlea. In addition, the presented model is implemented by a field-programmable gate array (FPGA) and its operations are verified by experiments. It is then shown that the presented model consumes much less hardware resources and much less power compared to a standard ordinary differential equation model of cochlea.

Key Words : Cochlear model, Ergodic sequential logic, Field programmable gate array (FPGA)

#### 1. はじめに

哺乳類の耳は一般的に,外耳,中耳,内耳から構成され ており,中でも内耳に位置する蝸牛は,主要な音響処理を 行う渦巻き状の器官である。[1]. 図1は、リンパ液で満 たされ,基底膜を含む哺乳類の蝸牛の展開図である.基底 膜は、入力された音の周波数によって振動する位置が変 わる周波数選択性を持つ. 例えば, 高い(低い) 周波数の 音が入力されると、その音に近い(遠い)基底膜が振動す る. 蝸牛を中心とした聴覚系では非線形フィルタ特性, 多 重トーン抑制, 適応特性, 第1及び第2ピットシフト効 果など多岐にわたる非線形音声処理が行われている [1]~[3]. 図 2(a) は哺乳類の蝸牛における非線形音声処理 の特性を示したもので、グラフは、 $f_1 \ge f_2 > f_1$ から成る結 合音入力に対する基底膜のある部分のフーリエ振幅スペ クトラムを表している.入力周波数f1, f2において基底膜 振動は強い振幅スペクトラムを有しているが、蝸牛の非 線形音声処理の影響で基底膜はn<sub>1</sub>f<sub>1</sub>±n<sub>2</sub>f<sub>2</sub>(n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub> ∈ {1,2,…})で構成される周波数においても振動を有してい る. つまりf1, f2から構成される結合音入力が蝸牛の非線 形性により $n_1f_1 \pm n_2f_2$  ( $n_1, n_2 \in \{1, 2, \dots\}$ )で構成される周 波数の基底膜振動を発生させている. このような蝸牛の 非線形音声処理を結合音現象と呼ぶ. これらの蝸牛の持 つ様々な非線形音声処理を再現する手法として様々なモ デルが提案されてきた[4]~[6].

本研究では,エルゴード的順序論理回路を用いた統合 蝸牛モデルを提案する.その結果,哺乳類の蝸牛の非線形



### 図 2 (a) 結合音現象の概要図 [2]. (b) 統合蝸牛モデル でのシミュレーションによる結合音現象の再現結果.

音声処理特性(結合音現象)を再現できることを示す(図 2(b)を参照). さらに、このモデルは、標準的な ODE モ デルに基づく統合蝸牛モデルと比較して、はるかにハー ドウェア効率がよいことを示す[7].

本研究の意義は非常に明確である: エルゴード的順序 論理回路に基づく統合蝸牛モデルが,蝸牛の非線形音声 処理特性を再現できる将来の人工内耳の設計に有用であ る.また,哺乳類の蝸牛をより厳密に模倣するには,より 広い範囲の周波数領域に対応させる必要があるため,異 なる特徴周波数をもつ複数の基底膜セクションモデルを つなげた統合モデルを設計することが重要である. エルゴード的順序論理回路を用いた基底膜セクションモデル

#### (1) モデルの設計

本章では、エルゴード的順序論理回路を用いた基底膜 セクションモデルを提案する.提案モデルは以下の4つ の離散変数 $X_i, Y_i \in \mathbf{Z}_N = \{0, \dots, N-1\}, P_i, Q_i \in \mathbf{Z}_M =$ {0,…,M-1}を持つ. ここで, *i*はモデルのインデックス である.X<sub>i</sub>とY<sub>i</sub>は離散状態変数で,非線形振動現象を起こ す基底膜のふるまいを表している. Piと Qiは離散補助変 数で,状態依存分周期として動作する. N > 0 かつM > 0 は自然数で、提案モデルの解像度を決定するパラメータ である.また,提案モデルは以下の2つの離散関数 $G_i, H_i \in$  $\mathbf{Z}_{N}^{2} \times \mathbf{Z}_{M} \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ を持つ. 関数 $G_{i}$ および $H_{i}$ は離散ベク トル場関数で、提案モデルの非線形ベクトル場を決定す る. また, 提案モデルは, *t* = 0,1,2 … のとき *C*(*t*) = 1, その他の場合 C(t) = 0 である内部クロックCと, 2 つの 2 値スイッチ信号 $S_X, S_Y \in \{0,1\}$ によって動作する.また、3 値の入力信号U ∈ {-1,0,1}を受け取る.これは提案モデル への音刺激に対応している.内部クロックCは2値スイッ チ信号  $(S_x, S_y)$ と離散ベクトル場関数  $(G_i, H_i)$ , 入力信号U に依存した以下の離散状態変数 ( $X_i, Y_i$ )の遷移をもたらす.

If C(t) = 1, then  $\begin{cases}
X_i(t^+) = X_i(t) + S_X(t)G_i(X_i(t), Y_i(t), P_i(t)) + U_i, \\
Y_i(t^+) = Y_i(t) + S_Y(t)H_i(X_i(t), Y_i(t), Q_i(t)).
\end{cases}$ 

ここで,  $t^+ = \lim_{\epsilon \to 0} t + \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$ である. これらの状態遷移 において, 離散状態変数 ( $X_i, Y_i$ ) は最小値0, 最大値N - 1において飽和する.

#### (2) 統合蝸牛モデルによる結合音現象の再現

次に, モデルに入力する信号を

 $U_1 = PDM(u), \qquad U_2 = PDM(X_1)$ 

とする. 音入力 $u(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t)$ とし,  $A_1 > 0, A_2 > 0$ および $f_1 > 0, f_2 > 0$ はそれぞれ,入力 信号uの振幅,周波数である. 音入力uは3値入力信号 $U_1$ ~ PDM を用いて密度変調され、1 つ目のセクションモデ ルに入力される.  $X_1$ は1 つ目の基底膜セクションモデル の出力である.  $X_2$ は2 つ目の基底膜セクションモデルの 出力を表し、これは2 つのセクションを結合した統合蝸 牛モデルの出力である.図2(b)は離散状態変数 $X_2$ のフー リエ振幅スペクトラムの数値シミュレーション波形であ る.図からもわかるように、入力周波数 $f_1$ および $f_2$ の他に、  $2f_1 - f_2$ をはじめとする $n_1f_1 \pm n_2f_2$ において強いピークを 有しており、図2(a)のグラフと比較しても、結合音現象 を再現しているといえる.

#### 3. FPGA 実装とコスト比較

次に,提案モデルを FPGA へ実装する. 離散状態変数 ( $X_i, Y_i$ )はビット長が $n = [\log_2 N]$ の符号付レジスタで実装 され,離散補助変数 ( $P_i, Q_i$ )はビット長が $m = [\log_2 M]$ の 符号付レジスタで実装される.さらに,離散ベクトル場関 数 ( $G_i, H_i$ )はルックアップテーブルで実装される.また, 比較のために,常微分方程式 (ODE)[8]の標準形に基づく 統合蝸牛モデルも同じ FPGA ボードを使って実装した. その結果,提案するエルゴード的順序論理回路統合蝸牛 モデルは, ODE 蝸牛モデルよりも少ない回路素子かつ低 消費電力で実装できることが確認された.

#### 4. まとめ

本研究では、エルゴード的順序論理回路に基づき、結合 音現象を再現できるハードウェア効率のよい統合蝸牛モ デルを提案した.提案モデルは、ODEモデルよりも少な い回路素子と消費電力で FPGA に実装可能であることを 示した.この結果は、人間の内耳が持つ非線形の音声処理 特性を知覚できる、小型かつ低消費電力の人工内耳開発 に役立つと考えられる.今後の課題としては、蝸牛の他の 非線形機能の再現や、より広い周波数範囲に対応する、よ り大きな統合蝸牛モデルの設計が挙げられる.

#### 参考文献

- J. O. Pickles, An Introduction to the Physiology of Hearing, 4th ed. Bingley, U.K.: Emerald Group, 2012.
- 2) M. A. Ruggero, "Responses to sound of the basilar membrane of the mammalian cochlea," Curr. Opin. Neurobiol., vol. 2, no. 4, pp. 449–456, 1992.
- 3) M. A. Ruggero, et al, "Basilar-membrane responses to tones at the base of the chinchilla cochlea," J. Acoust. Soc. Am., vol. 101, no. 4, pp. 2151–2163, 1997.
- 4) R. Stoop, "From Hearing to Listening: Design and Properties of an Actively Tunable Electronic Hearing Sensor," Sensors, vol. 7, no. 12, pp. 3287–3298, 2007.
- 5) T. J. Hamilton et al., "A 2-D Cochlea with Hopf Oscillators," in Proc. The 2007 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BIOCAS), pp. 91–94, 2007.
- 6) K. Takeda and H. Torikai, "A Novel Hardware-Efficient cochlea model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics: Theoretical Analysis and FPGA Implementation," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 64, no. 9, pp. 1107–1111, 2017.
- 7) Y. Kishimoto and H. Torikai, "A hardware-efficient FPGA cochlear model for next generation nonlinear cochlear implant," in Proc. The 20<sup>th</sup> IEEE International SoC Design Conference (ISOCC), pp. 253-254, 2023.
- 8) A. Kern and R. Stoop, "Essential Role of Couplings between Hearing Nonlinearities," Phys. Rev. Lett., vol. 91, no. 12, 128101, 2003.