

距離・周波数依存性を有する樹状突起モデルの頻度比較に対する一検討
 A Study on Frequency Comparison of Dendrite Models with Distance and Frequency Dependence

○山田泰史¹, 山口拓人², 佐伯勝敏³

*Hirofumi Yamada¹, Takuto Yamaguchi², Katsutoshi Saeki³

Abstract: Recently, it has been confirmed that not only cell bodies but also dendrites are involved in information processing in the brain. In this paper, we investigate a circuit that outputs voltage values by comparing waveforms with different firing frequencies in order to reproduce learning based on the input frequency of dendrite terminals. As a result, it is clarified that the difference in frequency of firing waveforms input from the dendrite model can be expressed as a voltage value by using a time constant circuit and the difference in input frequency.

1. まえがき

近年、脳内の情報処理は脳細胞における細胞体だけでなく、樹状突起も関連していることが確認されている。我々は、樹状突起で行われる情報処理に着目し、ハードウェアにてモデル化を行うことで、工学的応用を目標としている。先に、我々は、樹状突起内での発火波形伝送時、発火頻度に距離依存性と周波数依存性が存在することに着目し、伝送距離が延びたとき、もしくは入力周波数が上がった時、発火頻度が低下する樹状突起モデルを構築した^{[1],[2]}。

今回、新たに情報処理にかかわる要素として発火頻度によるスパインの成長に着目した。樹状突起への入力頻度が高いとき、樹状突起の末端であるスパインが成長し、シナプスの結合面が大きくなることにより信号を受け取りやすくする特性である^[3]。本論では、樹状突起から入力される信号の頻度差に応じた出力を行う頻度依存回路の検討を行った。

2. 本論

Fig.1 に樹状突起モデルのブロック図を示す。同図は、今回構築した頻度依存回路が、距離・周波数依存性を有する樹状突起モデルの IN1, IN2 をもとに頻度比較を行うモデルである。樹状突起モデルは距離・周波数によって発火波形の出力頻度が変化するため入力、出力の頻度の差を比較する。

Fig.2 に今回構成した頻度依存回路の回路図を示す。同図は、電流源、時定数回路、誤作動防止用の2重 NOT 回路に加え、高頻度の発火波形入力部と低頻度の発火波形入力部で構成されている。また出力部の抵抗 R3 は、後段の回路を想定して負荷抵抗として接続した。高頻度の発火波形は入力側の制限のかかっていない発火波形を、低頻度の発火波形は樹状突起モデル内を伝搬し、制限がかかった間隔の広い発火波形を入力する。高頻度の発火波形により、時定数回路の定電流源による充

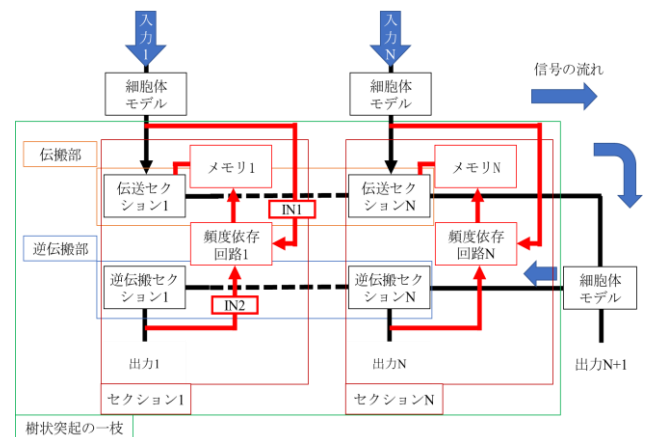


Figure 1. Block diagram of dendrite model

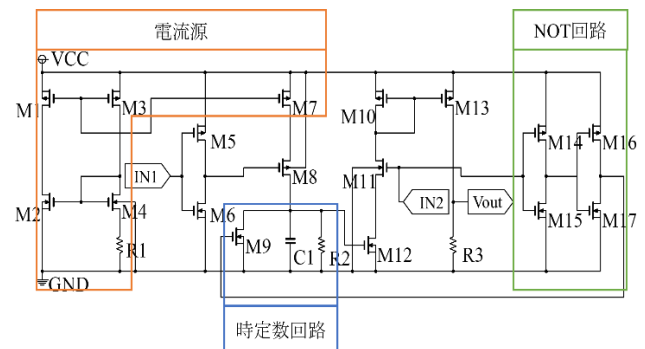


Figure 2. Frequency-dependent circuit

電を、高頻度の発火波形により制御することで頻度に応じた電圧を生成する。コンデンサ充電後、低頻度の発火波形により、コンデンサ電圧を基準に電流を生成することで、発火波形の頻度差に応じた出力を得ることを可能にした。

Fig.3 に今回構成した頻度依存回路のシミュレーション結果を示す。伝送セクション数 N が 4 段のモデルを用いて、入力 1 にオフセット 5μA, 振幅 5μA の正弦波を入力した。その際のセクション 1 における応答を用いて検証を行った。Fig.3 に示した波形は、入力正弦

1 : 日大理工・院 (前)・電子 2 : 日大理工・院 (後)・電子 3 : 日大理工・教員・電子

波の周波数が 5MHz の時の波形である。図中、横軸は時間、縦軸は電圧値を示している。同図は、(a) 高頻度の入力 IN1, (b) 低頻度の入力 IN2, (c) C1 の電圧値, (d) 頻度依存回路の出力結果を示している。IN1 のパルス入力に応じて C1 電圧が上昇, (a), (c)より, 発火と同タイミングで電圧値が上昇していることから, 高頻度の発火波形により, 充電が行われている。(b), (c), (d)から低頻度入力と同タイミングで出力電圧と放電が確認できることより, 低頻度の発火波形によりコンデンサのリセットと, 出力が行われていることを示している。

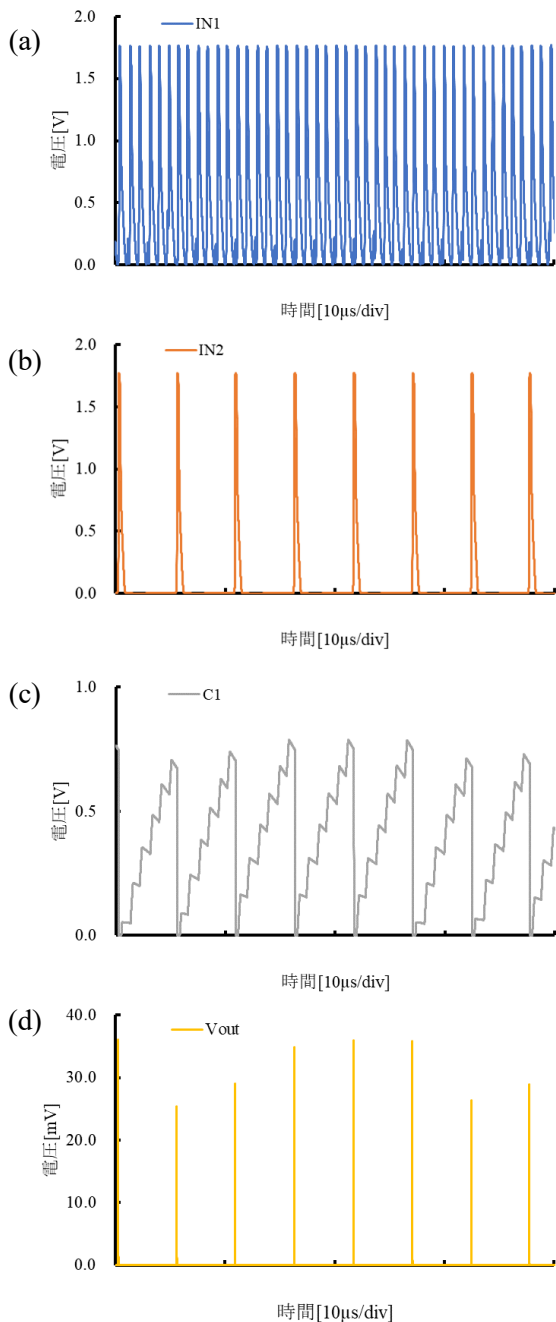


Figure 3. Output result of frequency dependent circuit (Input frequency = 5MHz)

Fig.4 に本回路の周波数特性を示す。同図は、青線が入力周波数に対する IN1 と IN2 の周波数比, オレンジ線がパルスの最大値, 灰線がパルスの平均電圧を示している。横軸は周波数, 縦軸は左が IN1/IN2 の周波数比を, 右が電圧値を示している。この結果より, 青線が示す IN1, IN2 の 2 つの入力によって発生した発火波形の周波数比にオレンジ線と灰線のパルス電圧 2 値が追従していることから, 本回路の示す出力の電圧値は, 入力 IN1, IN2 の周波数差に応じて変化していることを示している。よって, 発火頻度差に応じた電圧出力が得られることを示している。

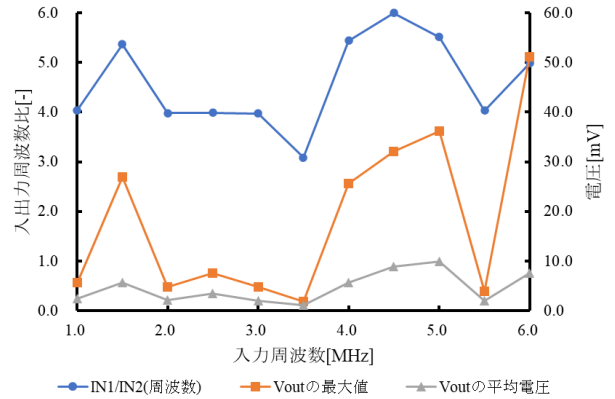


Figure 4. Characteristics of frequency dependence

3. まとめ

今回、樹状突起から入力される信号の頻度差に応じた出力を行う頻度依存回路の検討を行った。その結果、定電流源、時定数回路を用いた頻度依存回路へ樹状突起モデルから頻度の異なる発火波形 IN1, IN2 を入力することで、発火頻度差に応じた電圧出力が得られることを明らかにした。

今後は、頻度情報を保持する方法の検討を行う予定である。

4. 参考文献

- [1] 山田泰史, 近藤宏樹, 山口拓人, 佐伯勝敏, 佐々木芳樹:「距離・周波数依存性を有する樹状突起モデル」, 2023 年電子情報通信学会総合大会基礎・境界/NOLTA 講演論文集, p.10 (2023)
- [2] 山田泰史, 山口拓人, 佐伯勝敏:「距離・周波数依存性を有する樹状突起モデルの逆伝搬特性に対する検討」, 2023 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集 PS-5-2, pp.1786-1787, 2023.
- [3] N. Toni, P. A.Buchs, I. Nikonenko, C.R. Bron and D. Muller, “LTP promotes formation of multiple spine synapse between a single axon terminal and a dendrite”, NATURE, Vol.402, pp.421-425, 1999.