

ラット聴覚野における情報処理容量の計測

石田 直輝, 高橋 宏知

Physical Reservoir Computing, Information Processing Capacity, Rat Auditory System, Neuronal Coding

1. 背景

脳の感覚野は、時間的に変化する感覚入力の情報処理を担う。こうした時間依存的な脳の情報処理を、リザーバーコンピューティング (Reservoir Computing; RC) というフレームワークでモデル化する考え方が浸透する一方、実際に神経ネットワークの情報処理能力をリザーバーとして特徴づけた研究は行われていない。これは、神経ネットワーク内部で生成される確率的な神経活動が、RCに対するノイズとして働くためと考えられている。こうした問題は、感覚入力に強く依存し、再現性が高い過渡的なダイナミクスのみで神経ネットワークを構成することや [1], 長時間計測でSN比を向上させることで解決できると考えた。

本研究は、RCのフレームワークで、聴覚システムの情報処理能力を定量化することを目的とする。そのためにまず (1) ラット聴覚野の過渡的な発火頻度から状態量を構成し、その状態量が入力依存的な情報処理を反映しているかを調べる。さらに (2) 聴覚システムの情報処理を情報処理容量 (Information Processing Capacity; IPC) で網羅的に評価できるか検証する[2]。

2. 手法

2匹の麻酔下のラット聴覚野の第4層に微小電極アレイを刺入し、音刺激に対する活動電位 (multi-unit activity, MUA) を多点同時計測した。刺激音は10000-30000ステップ (刺激間隔 (inter-step-interval; ISI) は10, 18, 32, 56, 100, 178または316 ms) のランダム系列で、各ステップでは50%の確率でクリック音を提示した (図1(a))。

各ステップ、各計測点における単位時間当たりのMUA、すなわち発火頻度を状態量として (図1(a)(iii), (iv)), 各ステップの状態量ベクトルに対するシフトレジスタタスクと論理計算タスクを行った。シフトレジスタタスクでは、 s ステップ前の状態量ベクトルを目標関数とした線形識別器を構成し、分類の正解率を得た (図1(b)(i))。論理計算タスクでは、 s_1, s_2 ステップ前の入力のAND, OR及びXORを目標関数として線形回帰推定器を構成して、損失関数、具体的には正規化平均平方二乗誤差 (Normalized Root Mean Squared Error; NRMSE) の値を得た (図1(b)(ii))。

さらに、発火頻度を状態量ベクトルとしたネットワークに対して、1次、2次のIPCを計算して [1], 前述のタスクのスコアと比較した。

3. 結果・考察

図1(c)に、聴覚野の発火頻度を用いたシフトレジスタタスクの正解率の代表例を示す。およそ20ステップ程度まで、タスクの正解率が50%以上であった。また、図1(d)(i)-(iii)に、論理計算タスクのスコアの例を示す。同スコアは、ランダムなデータに対するスコアからの差分を示している。1-3ステップ程度の範囲で、ランダムデータよりも高いスコアが得られた。これらの結果は、聴覚野の発火頻度が、入力依存的な情報処理を反映していることを示唆する。

また、聴覚野の発火頻度を状態量としたネットワークから1次のIPCを計算し、シフトレジスタタスクの正解率と比較したところ、強い正の相関が得られた (図1(e), $R^2=0.96$)。また、1次、2次のIPCと論理計算タスクのスコアとの間にも、有意な正の相関が得られ

た (図1(f)(i)-(iii), 1次IPCの R^2 =最大0.71, 2次IPCの R^2 =最大0.61)。これらの結果は、IPCが聴覚野の情報処理能力を定量化できることを示唆する。

4. 結論

本研究は、リザーバーコンピューティング (RC) のフレームワークで聴覚システムの情報処理能力を定量化することを目的とした。ラット聴覚野の発火頻度で構成したネットワークで、

- ・シフトレジスタは過去20ステップ程度、論理計算は過去3ステップ程度の範囲で、それぞれのタスクが実現できた (図1(c), (d))
- ・1次、2次のIPCと、上記タスクのスコアは正の相関を示した (図1(e), (f), $R^2=0.61-0.96$)

これらは、IPCが脳の感覚情報処理システムを数理的に解析する新しい手法として有用なことを示唆する。

参考文献

- [1] 窪田 智之, 中嶋 浩平, 高橋 宏知, “1次視覚野の過渡ダイナミクスの推定”, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), 140巻, 7号, (2020), pp.723-729.
[2] Dambre, J., Verstraeten, D., Schrauwen, B., & Massar, S., 2012. “Information processing capacity of dynamical systems”. Scientific reports, 2, 514.

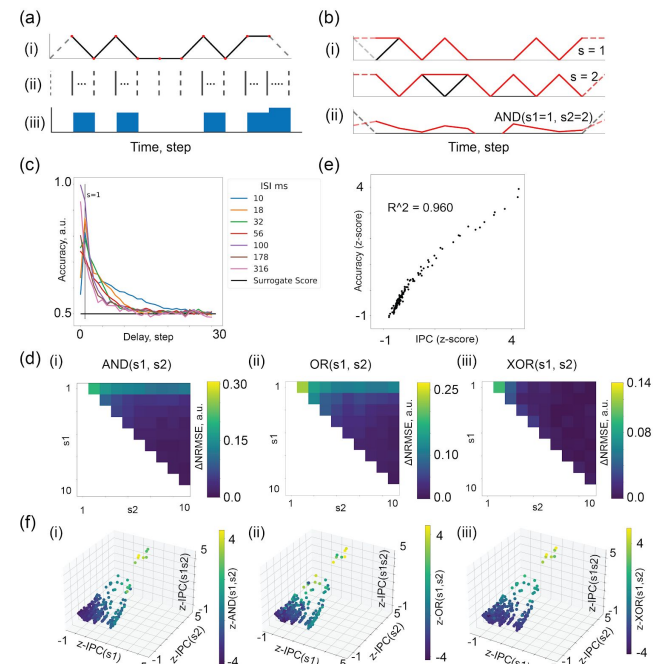


Fig1. (a)(i) Input Stimulus Series. (ii) MUA for acoustic stimuli. (iii) A series of state variables. (b)(i) Shift register task over past 1 and 2 steps. (ii) AND task objective function for a pair of past (11, 2) steps.(c) Result. Accuracy for shift register task, and an example of (d)(i)AND, (ii)OR and (iii) XOR task scores. (e) 1dIPC vs Accuracy of Shift Register Task. (f)(i)AND, (ii)OR, (iii) XOR task score vs 1d and 2dIPC.