

無意識的推論を行う神経細胞の分散培養系のリザーバー性能

清水聡太、高橋宏知

Dissociated neural culture, free-energy principle, physical reservoir computing, information processing capacity, microelectrode array

1. 序論

外界を適切に認識し環境に適応することは生命にとって重要である。一方で、外界の手がかりである感覚入力是不完全であり、その情報から正確な外界の状態を知ることが難しい。Helmholz は、知覚とは外界の状態を単に受動的に感知したのではなく、脳が得られた感覚入力をもとに背後にある外界の状態を推論した結果であるとする無意識的推論を提唱した[1]。Friston は知覚を無意識的推論とするだけでなく行動も能動的な推論であるとした自由エネルギー原理を提唱した[2]。

近年の自由エネルギー原理の研究では、神経回路は感覚刺激をもとに隠れた信号源の状態を推論することができる [3]。この変化は自律的なものではあるが、環境から生成される感覚刺激に晒されることで起こる環境駆動的な変化とも言える。一方で神経回路を用いた物理リザーバー計算によって、神経回路は様々な情報処理性能を有することが分かっている [4]。本研究の目的は、先行研究[3]の実験系を用い、外界の状態を推論する神経回路がもつ様々な情報処理能力をリザーバー計算の枠組みで評価することである。

2. 手法

ラット胎児の大脳皮質から取り出した神経細胞を高密度 CMOS 電極アレイ上に分散培養した。2つの信号源の状態が確率的に混合された感覚刺激を神経細胞の分散培養系に入力し、神経回路の発火を記録した。刺激は1秒間隔で入力された。1Session を 256 回刺激とし、全部で 100Session 実験を行った。Session ごとに自由エネルギーを計算し、その推移を調べた。

無意識的推論が行われていると示唆された実験について、各電極で記録された発火数をリザーバーの状態と、32個の感覚刺激を入力とみなして、正規化精度(NA)を計算した。情報処理容量(IPC)[5]を計算した。解析には同じ実験系を用いた[3]のデータも用いた。

3. 結果

9個の分散培養系で全12回の実験を行った。自由エネルギーは Fig.1 のような推移となり、統計的に有意に減少していた(ウィルコクソン符号付順位検定, $p < 0.05$)。

また、感覚刺激入力为目标として NA の変化を調べた。結果を Fig.2 に示す。本研究データではおよび[3]データの双方で有意に NA は上昇していた(同検定, $p < 0.01$)。また、[3]の実験データで計算された total IPC の推移を Fig3. に示す。total IPC は統計的に有意に上昇していた(同検定, $p < 0.001$)。

4. 考察

隠れた信号源の状態が確率的に混合された刺激が加わると自由エネルギーが減少する方向に神経回路が自己組織化するという結果は、自由エネルギー原理に従い信号源の状態を推論するという[4]の結果が再現されたことを意味する。

NA の上昇は無意識的推論を行う神経回路ではリザーバーとしての情報処理性能が上昇することを示唆する。先行研究の考察[5]によれば定期的な刺激にさらされることで神経回路の自発活動のレベル低下が要因だと考えられる。無意識的推論と自発レベルの低下の間の関係を調査することで無意識的推論とリザーバー性能の関係について

新たな知見が得られることが期待される。

一方で、total IPC の上昇は [3]のデータでは見られたものの、本研究データでは見られなかった。Total IPC を上昇させる要因の調査は今後の課題である。

5. 結論

本研究の目的は、外界の状態を推論する神経回路がもつ様々な情報処理能力をリザーバー計算の枠組みで評価することであった。研究の結果、無意識的推論を行う神経回路においてリザーバー性能が上昇する可能性が示唆された。

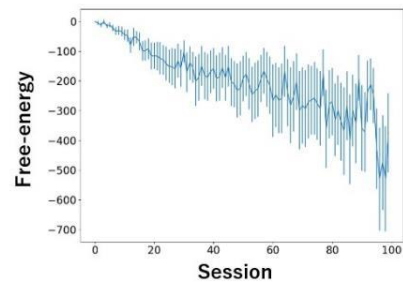


Fig.1 Transition of free-energy

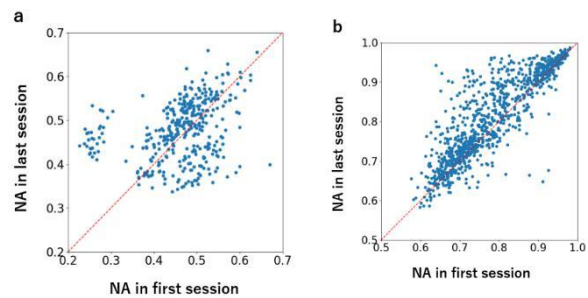


Fig.2 Change of NA (a: this study b: [3] experiments)

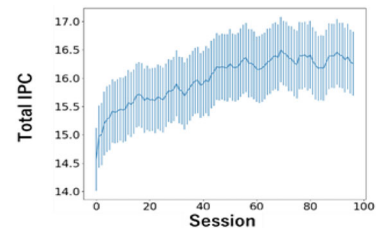


Fig.3 total IPC transition in [3] experiments

参考文献

- [1] Helmholtz, H. V. Treatise on physiological optics, 3 vols. (1924).
- [2] Friston, K. The free-energy principle: a unified brain theory?. Nature reviews neuroscience, 11(2), (2010). 127-138.
- [3] Isomura, T., Kotani, K., Jimbo, Y., & Friston, K. J. Experimental validation of the free-energy principle with in vitro neural networks. Nature Communications, 14(1), (2023) 4547.
- [4] 諏訪瑛介, 窪田智之, 石田直輝, & 高橋宏知. 神経細胞の分散培養系の情報処理容量. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), 142(5), (2022).578-585.
- [5] Dambre, J., Verstraeten, D., Schrauwen, B., & Massar, S.. Information processing capacity of dynamical systems. Scientific reports, 2(1), (2012). 514.