大脳皮質モデルにおける感覚運動学習を通じた情報統合構造の変化

The change of Information Integration of cortex mode through sensori-motor learning

◯高 培鐘[1]　藤井 敬子[1]　大村 吉幸[1]　金沢 星慶[1]　國吉 康夫[1]

◯Peizhong GAO　Keiko FUJII　Yoshiyuki OHMURA　Hoshinori KANAZAWA　Yasuo KUNIYOSHI

[1] 東京大学

While certain sensation, such as vision, gives rise to consciousness frequently, sensation like proprioception, a sensation also vital to daily activities, hardly does. Conscious experience, according to Integrated Information theory, can be explained by the information structure generated by the conscious system. It is known that human's perception is influenced by the integration of sensory and motor information, which relies on sensorimotor learning. Therefore, as an explanation to the different ways of sensations giving rise to consciousness, we focuses on the relationship between sensory and motor information. In this study, we investigated it by simulating body as well as neural network models, then the integrated information was computed as an index of the ratio sensations giving rise to consciousness. The results show that the relationship between sensory and motor information do influence the system's integrated information. However, there may be other factors that also have an impact on system's integrated information.

研究背景・目的

視覚（意識に上る）⇔ **固有感覚**（意識されない）

Colavita visual Dominance 現象[2]

先行研究：

- 視覚システムの不確実性が低いから、よく意識される[3]
- **感覚強度は自己の運動に影響される**[4]

仮説：

感覚の強度と運動情報の関係性　が　**感覚の意識される度合い**　に寄与する

検証：ネットワークモデル と 身体モデルを用いる

モデル構築

神経ネットワークモデル

- ニューロンモデル：Leaky Integrated-and-Fire(LIF)[6]

$$c\frac{dV}{dt} = -I_{leak} - I_{spike} - I_{syn}$$

$$I_{spike} = c\left(\frac{dV}{dt}\right)^{-1}_{V=V_{th}}(V_{th}-V_r)\delta(V-V_{th}),$$

$$I_{syn} = \sum_{k=e,i} c a_k (V-V_k)\mathcal{P}_k(t),$$

$$I_{leak} = c\frac{V-V_p}{\tau_p}$$

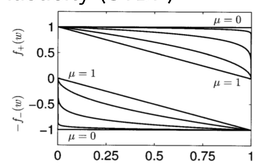
V：膜電位　I：電流　C：膜容量

- 学習則：Spike Timing-Dependent Plasticity (STDP)[7]

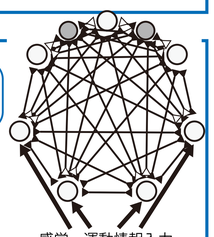
$$\Delta w = \begin{cases} -\lambda f_-(w)\times K(\Delta t) & \text{if } \Delta t \le 0 \\ \lambda f_+(w)\times K(\Delta t) & \text{if } \Delta t > 0. \end{cases}$$

$$f_+(w) = (1-w)^\mu \text{ and } f_-(w) = \alpha w^\mu \quad (0 < \mu \le 1)$$

$$K(\Delta t) = \exp(-|\delta t|/\tau)$$



- 初期重み付けランダム
- 全結合をする



身体モデル（感覚、運動情報生成）

- 筋指令 m で「手」が左右動く

$$v_{hand}(t) = m_r(t) - m_l(t)$$

$$x_{hand}(t+1) = x_{hand}(t) + v_{hand}(t)$$

$$M_{l,r}(t) = m_{l,r}(t)\times g_{motor}$$

- 「手」の速度により固有感覚情報が生成

$$\begin{cases} P_l(t) = v_{hand}(t)\times g_{somatic},\ P_r(t) = 0 & \text{if } v_{hand}(t) > 0 \\ P_l(t) = 0,\ P_r(t) = v_{hand}(t)\times g_{somatic} & \text{if } v_{hand}(t) \le 0 \end{cases}$$

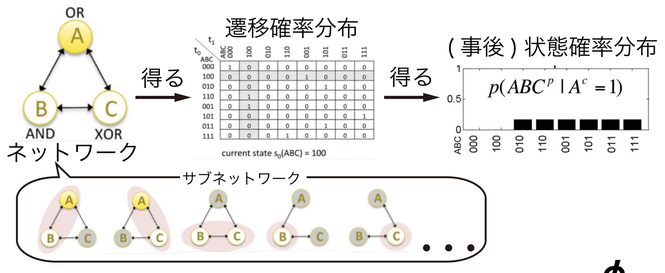
- 「手」が視野に入る時だけ視覚情報が生成

$$V_{l,r}(t) = \mathrm{O}(x_{hand}(t))\times g_{visual}$$

- **ネットワークへの入力：**
  運動情報 M
  固有感覚情報 P
  視覚情報 V
- **変数：**
  筋指令 m
  手の位置 x
  手の速度 v
  調節ゲイン g
- **関数：**
  手と視野との重なり具合を計算する O

指標

ネットワークの統合情報量 (ϕ, Φ)[5]



ϕ

各サブネットワークの素子間の相互作用の強さを
もとの状態確率分布 と **相互作用を切断した時の状態確率分布**
の間の差で過去と未来について定量化

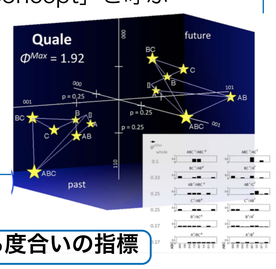
$$\phi_{past} = D((P_{intact}(X(t-1)|X(t)=x_0)||(P_{cut}(X(t-1)|X(t)=x_0))$$

$$\phi_{future} = D((P_{intact}(X(t+1)|X(t)=x_0)||(P_{cut}(X(t+1)|X(t)=x_0))$$

Φ

- 正のϕを持つサブネットワークは「concept」と呼ぶ
- 「concept」は意識の要素に対応する
- 「concept」は空間上の点で表す
  （座標は状態確率分布の値で決まる）
- 「concept」の統合具合を計算する

$$\Phi = D(C_{intact}||C_{cut})$$

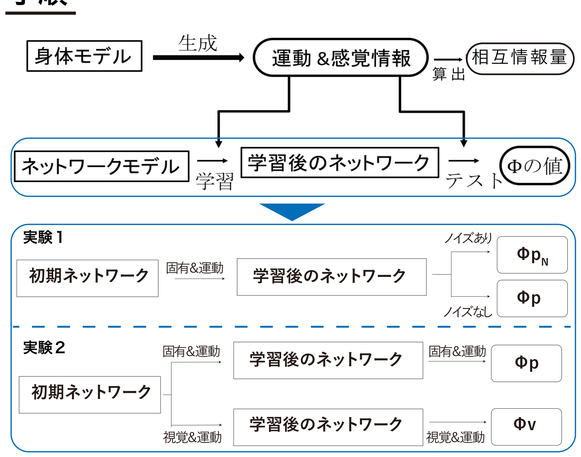


D: Earth mover's distanse
C_{intact} ：切断する前の意識空間
C_{cut} ：切断した後の意識空間

Φ：意識される度合いの指標

実験

手順



相互情報量

- 二つの確率変数の相互依存の尺度

$$I(X;Y) = \sum_{y\in Y}\sum_{x\in X} p(x,y)\log_2\frac{p(x,y)}{p(x)p(y)}$$

X Y：確率変数

I：感覚情報と運動情報間の関係性の指標

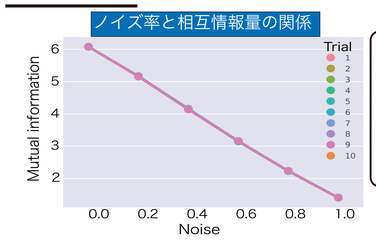
実験 1

固有感覚にノイズを加えることで、運動との関係性を減少させたときの統合情報量の変化を調べる

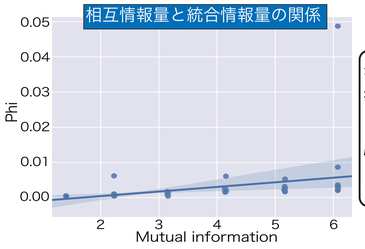
実験 2

視覚と運動、固有感覚と運動の間の関係性の強さを比較し、ネットワークが持つ統合情報量との間の関係性を調べる

実験結果

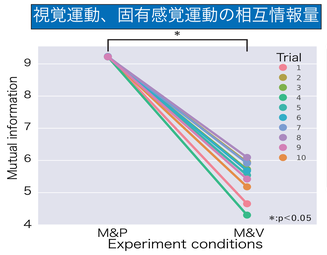


固有感覚に加えるノイズ率が高くなるにつれ、感覚と運動の間の相互情報量が減る (p = 0.0005)

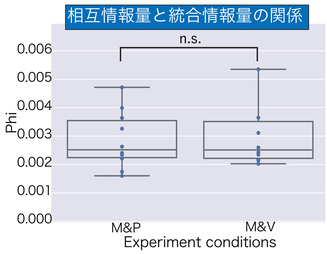


感覚運動間の相互情報量が高い場合、ネットワークの統合情報量が高くなる (p = 0.008)

Φが相互情報量と相関する



固有感覚と運動との相互情報量は視覚と運動との相互情報量と比べて有意に高い (p =0.0005)



視覚と固有感覚のネットワークの統合情報量の間に有意差がなかった (p = 0.77)

視覚は運動との相互情報量が低いにも関わらず、体性感覚と同程度のΦを持つ

結論・考察

- **視覚の方は高いΦを持ちやすい**
- このモデルは視覚が固有感覚より意識されやすい機序の一端を説明する可能性がある
- ネットワークの規模と発火率が統合情報量に及ぼす影響は今後の課題である

[2] F. B. Colavita, "Human sensory dominance," Perception & Psychophysics, vol. 16, no. 2, pp. 409-412, 1974
[3] M. O. Ernst and M. S. Banks, "Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion," Nature, vol. 415, no. 6870, pp. 429-433, 2002.
[4] S. J. Blakemore, C. D. Frith, and D. M. Wolpert, "Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli," Journal of cognitive neuroscience, vol. 11, no. 5, pp. 551-559, 1999.
[5] M. Oizumi, L. Albantakis, and G. Tononi, "From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Intergrated Information Theory 3.0," PLoS Computational Biology, vol. 10, no. 5, 2014.
[6] H. Meffin, A. N. Burkitt, and D. B. Grayden, "An analytical model for the 'large, fluctuating synaptic conductance state' typical of neucortical neurons in vivo," Journal of computational neuroscience, vol. 16, no. 2, pp. 159-175, 2004.
[7] R.Gutig, R. Aharonov, S. Rotter, et al., "Learning input correlations through nonlinear temporally asymmetric hebbian plasticity," Journal of Neuroscience, vol. 23, no. 9, pp. 3697-3714, 2003.