

主体的観測行為に基づく認知的ロバスト性

○小川 健一郎 (東京工業大学), 三宅 美博 (東京工業大学)

Robustness of Cognition based on Subjective Observation

○Ken-ichiro OGAWA (Tokyo Inst. Tech.) and Yoshihiro MIYAKE (Tokyo Inst. Tech.)

Abstract: Living organisms generate an action-perception loop recursively to recognize the environment. Many researchers have investigated the generation mechanism and structure of the action-perception loop. This is a hot topic in the field of cognitive psychology and ecological psychology. However, it is not fully unveiled how living organisms realize the robust cognition of objects under an uncertain environment. To address this issue, it is needed to explore a mechanism of separation of an object from the environment by the observer. In this presentation we consider theoretically this mechanism through a mathematical formulation of “invariants” as a main concept of the theory of affordances. Further, we discuss the robustness of cognition from a viewpoint of subjective observation.

1. 緒言

生物は、環境の中で行動すると共に環境を知覚し、それに基づき次の行動を行う。このような知覚-行動ループの中で生物は不確定な環境の中から観測対象をどのように認識しているのだろうか？この問題は認知心理学や生態心理学などの分野で長く議論されてきた重要なテーマである。

認知心理学によれば、生物は観測対象から単純に物理的な刺激を知覚するものとされる。そして、それ自体生物にとって無意味な刺激が脳内で情報処理され、その結果、対象として統合的に認識されるものと考えられている。この考えを代表する理論としてパターン認識の理論がある^[1]。この理論では、抽出されたパターンの類別に対しては様々なモデルが確立されているが、その前提となる対象からの特徴抽出については、近年ディープラーニングにおける進展はあるものの^[2]、未だ現実的な数理モデルは提出されていない。

それに対して、生態心理学では、生物はそもそも自身にとって意味を持つ情報として高次に統合された刺激情報を直接対象から知覚するものと考えられている^[3]。この考え方はアフォーダンスとして知られており、その要諦は、生物と環境とは本来不可分な自己組織システムであり、生物は環境との間で相互作用を行うことにより、環境から対象の意味情報を知覚するという点にある。この理論では、生物と環境との関係と同様に、生物の観測器官も様々な生体要素が高次に自己組織化することで構成されるものと考えられている。それに基づき、各種の生体運動が自己組織化現象として数理的にモデル化されてきた^[4,5]。しかし、その結果として生物が何を知覚しているのかということについては、「不変項」というキーワードが提唱され、個別の現象についてその候補が挙げられているものの、それら

を統一的に記述する数理モデルは未だ構築されていない。

そこで本発表では、アフォーダンス理論に基づき不変項を数学的にモデル化することで、観測者が不確定な環境から観測対象を因果的に切り分けるメカニズムについて考察する。具体的には、主体的な観測行為と観測対象の状態との対応関係を作用素代数に基づき定式化することで、認知的ロバスト性とその成立条件について数理的な観点から考察する。

2. 観測における不変項

Turvey らの研究グループは、人間が観測対象である物体の特徴を何によって知覚するかを一連の実験により明らかにした^[6-10]。具体的には、視覚情報を遮断した状態で被験者に観測対象となる物体を把持させ、把持した手首を中心に自由に物体を動かすことにより、その長さや重さなどの特徴を知覚させる課題を与えた。その結果、物体に固有の物理量である「主慣性モーメント」が物体の特徴の知覚と1対1の関数関係にあることが分かった。この量自体は直接計測可能な物理量ではないが、生物は自ら主体的に観測行為を行うことでこのような物体に固有の特徴量（不変項）を知覚するものと考えられる。このことは触覚に限らず視覚においても生物は光学的流動の中の不変項を知覚するものと考えられている。

不変項は生物による主体的な観測行為に基づき知覚される量であることから、本研究においては、観測行為を特定の作用素代数系、不変項を固有値の集合として数理的にモデル化する。具体的には、観測対象の状態 ϕ に観測行為を表す作用素 \hat{A} が作用して不変項 a が得られるという状況を

$$\hat{A} : \phi \mapsto a\phi; \hat{A}\phi = a\phi \quad (1)$$

と記述する。例えば、不変項が主慣性モーメントの場合

合であれば、 ϕ はトルクや角速度に依存した状態、 a は主慣性モーメントとなる。このモデルでは、不変項 a は観測対象の状態 ϕ と観測行為 \hat{A} を用いて式(1)から期待値の形式で求めることができる。

3. 認知的ロバスト性

アフォーダンス理論によると、観測対象の状態 ϕ と観測行為 \hat{A} とは自己組織化システムとして不可分な関係にあるものと見なされる。このことは、数理的には観測対象の状態 ϕ と対応した観測行為の状態 ϕ_A を想定できることを意味する。この前提の下、観測者が物体の特徴を知覚するという状況について考える。この知覚行為を \hat{X} とすると、 \hat{X} には、例えば{長さの知覚、重さの知覚、大きさの知覚、色の知覚、・・・}などの具体的な行為が含まれる。これに対して、観測行為 \hat{A} としては、例えば{見る、振る、触る、聞く、・・・}などの具体的な行為が含まれる。そして、知覚行為 \hat{X} と観測行為 \hat{A} には対応する状態 ϕ_X 、 ϕ_A がそれぞれ規定される。さらにこれらの状態 ϕ_X 、 ϕ_A には各要素の状態が含まれる。

以上の定式化により、前述した Turvey らの研究は、「棒の長さを知覚する」という知覚行為を、「棒を振る」という観測行為により行い、その結果、不変量 a を知覚したと解釈できる。一方、「棒を見る」という視覚による知覚行為については不変項が未定であり、今後の研究課題とされている。これについて本モデルによると、「棒の長さを知覚する」という知覚行為を、「棒を見る」という観測行為により行うことで、不変項 a を知覚するという状況として説明できる。これらの状況は、棒の長さを単一の感覚情報に基づき知覚する際の観測行為に対する認知的ロバスト性を示している。

一方、異種感覚情報に基づく物体の特徴の知覚行為についてはどうであろうか？例えば、棒を見ながら振った場合、棒の特徴はどのように知覚されるのであろうか？本モデルによれば、知覚行為 \hat{X} の状態と観測行為 \hat{A} の状態とがそれぞれどのような組み合わせとして表れるかに応じて、一方の知覚が優先したり、両方の知覚が干渉したりする場合があります。この違いは確率論的な因果関係に基づき判断することができる。

4. 結言

本発表では、アフォーダンス理論の知見に基づき、不変項を新たに数理モデル化することにより、「生物が不確定な環境の中で観測対象をどのように認識しているのか」について考察する。主体的な観測行為を作用素代数の観点からモデル化することによって、不変項

に基づき認知的ロバスト性を説明することが可能となる。当日は、本モデルの詳細と認知的ロバスト性が成立するための条件について説明する予定である。

参考文献

- [1] C.M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer-Verlag, 1st ed. (2006), Corr. 2nd printing, New York, (2011).
- [2] Q.V. Le, M.A. Lanzato, R. Monga, M. Devin, K. Chen, G.S. Corrado, J. Dean, A.Y. Ng, “Building high-level features using large scale unsupervised learning”, *ICML*, (2012).
- [3] J.J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, (1986).
- [4] G. Taga, Y. Yamaguchi, H. Shimizu, “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment”, *Biological Cybernetics* **Vol. 65**, pp. 147-159, (1991).
- [5] H. Haken, J.A.S. Kelso, H. Bunz, “A theoretical model of phase transitions in human hand movements” *Biological Cybernetics*, **Vol. 51 (5)**, 347-356, (1985).
- [6] H.Y. Solomon, M.T. Turvey, “Haptically Perceiving the distances reachable with hand-held objects”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **Vol. 14**, pp. 404-437 (1988).
- [7] C.C. Pagano, M.T. Turvey, “Perceiving by dynamic touch the distances reachable with irregular objects”, *Ecological Psychology*, **Vol. 5**, pp. 125-151 (1993).
- [8] P. Fitzpatrick, C. Carello, M.T. Turvey, “Eigenvalues of the inertia tensor and exteroception by the muscular sense”, *Neuroscience*, **Vol. 60**, pp. 551-568 (1994).
- [9] C.C. Pagano, M.T. Turvey, “The inertia tensor as a basis for the perception of limb orientation”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **Vol. 21**, pp. 1070-1087 (1995).
- [10] E.L. Amazeen, M.T. Turvey, “Weight Perception and the haptic size – weight illusion are function of the inertia tensor”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **Vol. 22**, pp. 213-232 (1996).