

主体的観測行為に基づく不変項に関する数理的考察

○小川 健一朗 (東工大), 三宅 美博 (東工大)

Mathematical Study on Invariance based on Subjective Observation

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

Abstract: In the field of ecological psychology, invariance is an important keyword from a viewpoint of the affordance concept. Invariance is an invariant property of an observation object which is perceived by living organisms based on the interaction between the living organisms and the observation object. This property is a significant factor for investigating the cognitive mechanism of living organisms. In this regard, many researches on invariance have been conducted, and actually several invariances are found by experimental researches. On the other hand, few studies have focused on invariance from a mathematical viewpoint. However, a wide variety of mathematical models for invariance are needed to deeply understand the cognitive mechanism of living organisms. In this study, a new mathematical model is proposed to understand the mechanism of picking up invariance. We will discuss cognitive robustness based on this mathematical model in this presentation.

Keywords: Invariance, Subjective Observation, Cognitive Robustness

1. 緒言

生物は、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^{[1],[2]}。それに対して、生態心理学では、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直接的に知覚するものとする^[3]。この考え方はアフォーダンスとして知られており、システム論、設計論、オントロジーなど様々な分野で応用されている。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例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の中核をなす不変項をこれまでとは違う観点から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、不変

項について数理的な観点から考察する。

2. ダイナミック・タッチにおける不変項

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実験参加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。主慣性モーメント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。

2. 数理モデル

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、その結果得られる観測値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} が作用して観測値 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、観測量が主慣性モーメントの場合であれば、 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、すなわち不変項となる。

ダイナミック・タッチの場合、実験参加者は次の 2

つのプロセスを経て棒の長さを知覚していることが分かる：

[プロセス 1] 棒を振ることにより不変項を抽出する；
[プロセス 2] 不変項から棒の長さを知覚する。

ここで、プロセス 1 では、棒を振るという観測手段と棒の状態(角速度)とは不可分な関係にあり、実験参加者と棒との相互作用の中から不変項が見出される。またプロセス 2 は、棒を振るという観測手段を棒の長さの知覚と結びつけるものである。本研究では、これら 2 つのプロセスを主体的な観測行為を特徴づけるものとして、それぞれ上述の固有値形式にて記述する。

3. 認知的ロバスト

プロセス 1 の観測手段としては、例えば、{見る、振る、触る、聞く、・・・}などが含まれる。また、プロセス 2 の観測量としては、例えば、{長さの知覚、重さの知覚、大きさの知覚、色の知覚、・・・}などが含まれる。主体的な観測行為はこれらの組み合わせにより決定される。前述した Turvey らの研究では、「棒の長さを知覚する」という主体的な観測行為を、「棒を振る」という観測手段により行うことで、棒の長さの観測値を得たと解釈できる。一方、棒の長さは見ることでも知覚できる。この場合の不変項はまだ明確にはされていないが、本モデルによると、「棒を見る」という観測手段によりその固有値として棒の長さの観測値が得られるという形式になる。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手段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、観測手段と観測量とがそれぞれどのような組み合わせとして表されるのかに依りて、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。本モデルのような定式化において作用素代数系が特定の形式を満たすとき、観測行為に対する確率空間を構成することができる。それゆえ、これら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、人間の知覚行為における認知的ロバスト性の条件について模

索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).