

知覚－行動ループにおける観測行為の数理モデル

Mathematical Model of Observation in Perception – Action Loop

小川 健一郎¹, 三宅 美博¹
Ken-ichiro Ogawa¹, Yoshihiro Miyake¹

¹東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻

¹Department of Computational Intelligence and Systems Science, Interdisciplinary
Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology,
Ogawa@dis.titech.ac.jp, Miyake@dis.titech.ac.jp

1. 緒言

生物は環境を知覚し、それに基づき行動を行っている。このような知覚－行動ループの中で生物は環境に存在する対象の何をどのように観測しているのであろうか？この問題は従来認知科学や生態心理学などの分野で議論されてきた。認知科学においては、生物は観測対象から単純に物理的刺激を知覚するものとされる。そして、それ自体は意味を持たない刺激の総体が脳内で情報処理され、対象として認識されるものと考えられている。このような考えに基づく情報処理理論の代表例としてパターン認識の理論がある。それによるとパターン認識は、(1) 対象の観測 (刺激の入力), (2) 前処理 (ノイズの除去や平滑化), (3) 特徴抽出, (4) 対象の類別 (クラスへの分類) という4つのプロセスから構成される(Bishop, 2006)。このうちプロセス(4)は既に理論も確立されており、現在精力的に研究が行われている。一方、プロセス(1)～(3)については未だ理論が確立されておらず、現在でも試行錯誤の状態が続いている。

これに関し、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(Gibson, 1986)。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、本来環境は生物に与える意味情報を有しており、生物は行動によりその意味情報を知覚することができるという点にある。

このことは、生物と環境とは本来不可分な自己組織システムであり、生物が環境に存在する対象に対して観測行為を行うことにより、生物において対象が有する意味情報が生成することを意味する。この時、生物の観測器官はそれを構成する様々な生体要素が高次に自己組織化することでその役割を果たすものと考えられている。このような考えに基づき、現在までに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(Taga et al., 1991; Haken et al., 1985)。

しかし、その結果として生物が観測対象の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てはいるものの、統一された数理モデルは未だ構築されていない。そこで本発表では、この問題について「間合い」という観点から考察する。生物が対象を観測する時、対象から意味情報が知覚されるためには、生物と観測対象との間に時空間的に適切な間合いが必要となる。しかし、「適切な間合い」そのものは定性的であり、定式化が難しい。そこで本発表では、「適切な間合いが取れる」ということを「観測により対象から不変項が見出せる」とことと考へ、これを作用素代数における固有値の観点から定式化することを試みる。

具体的には、生態心理学の重要な知見であるダイナミックタッチの実験結果に基づき、生物が観測対象の何に基づき特徴量を抽出しているのかについて上記の観点から考察する。

そして、図形の知覚に関する簡単な数理モデルを用いて、「観測対象の状態」、「観測行為と観測対象の双対性」について数理的な考察を行う。

2. ダイナミックタッチ

コネチカット大学の実験心理学者 Turvey らの研究グループは、人間が物体の長さ、重さなどを観測対象の何によって知覚するかを明らかにするために触覚に関する一連の実験を行った (Solomon et al., 1988; Pageno et al., 1993, 1994; Fitzpatrick et al., 1994; Amazeen et al., 1996). 具体的には、被験者に観測対象となる物体を把持させ、当該物体の長さを直接知覚させない状況にて把持した手首を中心に自由に物体を動かすことにより、その長さを検出させるなどの課題を与えた。その結果、被験者は直接の物理的な観測対象ではない「主慣性モーメント」が物体の知覚と 1 対 1 の関係にあることが分かった。ここで注目すべきは、主慣性モーメントが数理的には慣性テンソルの固有値であるということである。これは直接計測可能な物理量ではないが、生物は自らが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）を知覚していると考えられる。このことは触覚に限らず視覚においても成り立ち、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。

3. 観測量としての固有値

主慣性モーメントのような不変項は生物による観測行為に基づき知覚される量であることから、数理的には観測行為をある種の変換作用素として定式化することができる。このような観点から生物における不変項の観測行為を数理的に解釈すると図 1 のようになる。

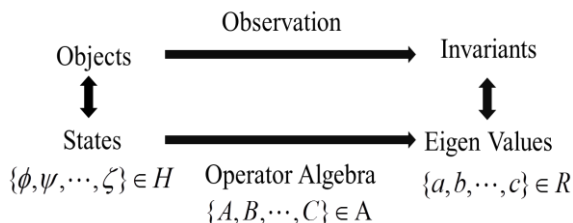


図 1 観測行為の代数的な数理モデル

図 1 によると、例えば観測対象の状態 $\phi \in H$ に観測を表す作用素 $A \in A$ が作用して固有値としての観測量 $a \in R$ が得られるという行為は数学的に

$$A: \phi \mapsto a\phi, \quad A\phi = a\phi \quad (1)$$

と記述される。ここで、 H は状態空間、 A は状態空間に作用する作用素代数系の要素、 R は実数空間を表す。

ここで一つの問題が生じる。それは、生物にとって観測量は固有値 a であり、観測対象の状態 ϕ 自体は観測量として知覚される必要はないということである。つまり、観測対象の状態 ϕ は生物にとって非明示的なものであり、生物にとって知覚される量はあくまでも観測結果として得られる固有値 a のみであると考えられる。このことは数理的には、観測対象の状態 ϕ が非明示的であったとしても固有値 a を抽出することはできるかという問題に置き換えることができる。例えば式(1)では固有値 a を算出するために状態 ϕ が明示的に記述されているが、果たして状態 ϕ を明示的に用いることなく固有値 a を算出することが可能であろうか？この問いに対して、統計力学や量子力学において固有値を期待値として算出する際に使用される密度作用素がヒントになる。密度作用素 ρ は

$$\rho^+ = \rho, \quad Tr(\rho) = 1, \quad Tr(\rho A^+ A) \geq 0 \quad (2)$$

を満たす作用素であり、これを用いると固有値 a は観測作用素 A の期待値として

$$a = \langle A \rangle = Tr(\rho A) \quad (3)$$

と記述できる。この定式化によれば観測対象の状態 ϕ を明示することなく固有値 a を得ることができる。またこのとき、観測対象の状態 ϕ と密度作用素 ρ の間にはある種の双対関係が存在することが数理的に示される。

4. 結言

以上の分析に基づき、本発表では「生物が環境に存在する観測対象の何を知覚しているのか」という問題に対して、「間合い」と「不

変項」というキーワードに基づき、数理的に考察する。具体的には、観測行為としての作用素代数と不変項としての固有値という数学的枠組みを通して、観測対象の状態を新たに定義し直すことにより考察する。そして、それにより観測行為を表す作用素代数と観測対象の状態との間に双対関係があることを明らかにし、その生物学的意味について考察する予定である。

文献

- Amazeen, E.L., & Turvey, M.T. (1996). Weight Perception and the haptic size – weight illusion are function of the inertia tensor. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**, 213-232.
- Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer-Verlag.
- Fitzpatrick, P., Carello, C., & Turvey, M.T. (1994). Eigenvalues of the inertia tensor and exteroception by the muscular sense. *Neuroscience*, **60**, 551-568.
- Gibson, J.J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Haken, H., Kelso, J.A.S., & Bunz, H.(1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51**, 347-356.
- Pagano, C.C., & Turvey, M.T. (1993). Perceiving by dynamic touch the distances reachable with irregular objects. *Ecological Psychology*, **5**, 125-151.
- Pagano, C.C., & Turvey, M.T. (1995). The inertia tensor as a basis for the perception of limb orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 1070-1087.
- Solomon, H.Y., Turvey, M.H. (1988). Haptically Perceiving the distances reachable with hand-held objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 404-437.
- Taga, G., Yamaguchi, Y., & Shimizu, H. (1991). Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics* **65**, 147-159.