

生物の知覚－行動ループにおける観測行為の数理モデル

○小川 健一郎 (東工大), 三宅 美博 (東工大)

Mathematical Model of Observation in the Perception-Action Loop of Living Organisms

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

Abstract: Living organisms generate an act in the environment to perceive the environment. How do living organisms conduct an observation of an object in the action-perception loop? This problem has been studied in the fields of behavior science and ecological psychology. Many researchers in the fields have investigated how living organisms extract the feature quantities of an object from the environment. However, this problem has been left unresolved and therefore is still a hot topic in the fields today. In this presentation we consider this problem from a different mathematical perspective. Specifically, we analyze a simple mathematical model to clarify what living organisms extract feature quantities from the environment based on. Further we will discuss a mathematical duality between observation and an observed object.

Keywords: Environment, Action-Perception Loop, States of Objects, Observation by Living Organisms

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(対象のクラスへの分類)という4つのプロセスから構成される[1]。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(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[2]。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、生物はその意味情報を知覚するために行動を行うという点にある。この立場においては、生物と環境とは本来不可分な自己組織システムであり、生物の観測器官も同様に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と考えられる。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[3,4]。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、この問題について別の角度から考察する。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簡単な数理モデルを用いて分析する。それにより生物における観測対象と観測行為の双対性について数理的に考察を行う。

2. ダイナミックタッチ

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一連の実験を行った[5-9]。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(不変量)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. 生物的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 Fig.1 のようになる。

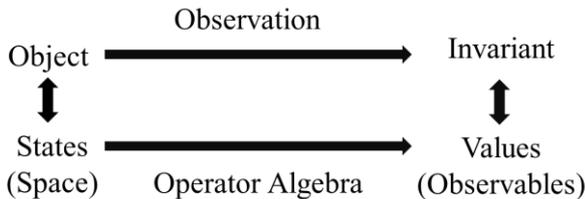


Fig.1: Mathematical representation of observation by living organisms based on ecological psychology.

Fig.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、 R は実数空間を表す。これを先ほどのダイナミックタッチの例に当てはめると、 ϕ は3次元ベクトル空間 V^3 の要素、 A は慣性テンソル、 a は主慣性モーメントを対角成分とする 3×3 対角行列となる。

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 a であり、観測対象の状態 ϕ 自体は観測量ではないということである。つまり、観測対象の状態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特徴量のみであると考えられる。このことは数理的には、観測対象の状態が非明示的であっても特徴量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)では観測量 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観測量 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観測量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、これを用いると観測量 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を明示することなく観測量 a を得ることができる。

4. 結言

本発表では、「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、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。それにより観測行為と観測対象の状態との間に数理的な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。

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] J.J. Gibson, The Ecological Approach to Visual Perception, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, (1986).
- [3] 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).
- [4] 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)
- [5] 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).
- [6] C.C. Pagano, M.T. Turvey, "Perceiving by dynamic touch the distances reachable with irregular objects", *Ecological Psychology*, **Vol. 5**, pp. 125-151 (1993).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).