

# 行動表象を基盤とした学習理論に関する考察

## Learning Theory Based on Behavioral Representations

○ 増山 岳人 (東大) 正 山下 淳 (東大) 正 浅間 一 (東大)

Gakuto MASUYAMA, The University of Tokyo, masuyama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Atushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

For the purpose of designing autonomous robot that can be utilized at a social scene inhered in living environment of humans, developmental model of the robot based on internal behavior representation is presented. Framework of the model is discussed in terms of subjective interpretation of sensory-motor flow that reflects temporal interactions between behaviors of the robot and an external environment. Depending on constraints due to bodily natures and environmental characteristics, internal behavior representation is segmented in proposed framework. Alternatively, target-oriented time series would be induced by internal evaluator corresponding to emotion of living objects. The model is oriented to deal with an unsteady environment, including physical and social dynamics. In this paper, importance of equipping invariant criteria of value in such environment is advocated.

**Key Words:** Autonomous robot, Behavior differentiation, Symbol grounding problem

### 1. 緒言

人の生活空間に内在する社会的な場面において、適応的に活動可能なロボット技術に対する期待が近年高まっている。非定常な開放系においては、新たに現出する環境の特性をセンサ情報から分節化し、外部環境を構造化する能力が求められる。しかし、そのような予め網羅的にモデル化することが困難な環境においては、ロボット内部に明確な判断基準をア priori に埋め込むことができないという技術的な難しさがある。したがって、センサ情報や自身の行動の経時的な変動といった情報から外部環境を構造化する機能を設計することが必要となるが、ここで記号接地問題とフレーム問題が大きな課題となる。

そこで、本稿ではこれらの問題に対し、認識主体内部において表象される行動を基盤とするロボットの発達体系を提案する。また、検討中のシステム構成について議論し、ロボットが所与の身体を用いて、環境との相互作用の中から適応的に行動を創発する枠組みについて、人を中心とした生物の情報処理機構に関する知見との対比から考察する。

### 2. 行動表象の分化と外部環境認識

未知環境において自律的に活動するロボットの制御手法としては、特に強化学習の立場に基づく状態空間の構造化が盛んに研究されている[1]。強化学習では、環境と直接的に対応した価値関数のマップを生成する必要があるため、環境及びロボットの身体が複雑になると膨大な学習時間が必要になるという問題がある。そのため、蓄積されたシステムの入出力過程を逐一評価するのではなく、再利用可能な一般的形式に情報を圧縮し記憶すること、すなわち抽象化の機能が必要となる。

#### 2.1 記号接地問題とフレーム問題

抽象化を押し進める手段の一つとして、システム設計者がロボットに期待する機能に基づいて、予め十分と考えられるだけの外部環境を分節化するパターン認識器を用意する方法が考えられる。しかしながら、ロボットと設計者の身体及び知覚特性は著しく異なり、設計者がトップダウンに与えた評価基準がロボットのセンサー-モータ系によって実世界をギャップなく表象し得るかはわからない。また、無限定な環境に

対して、実用上十分なだけの認識器を作り込むためには膨大な設計コストが必要となる。

一方で、記号接地問題に対して、記号系が身体的な相互作用からいかにボトムアップに創発するかを論ずる記号創発の立場がある[2]。本稿では形式意味論的な記号操作を含めた意味での記号までは対象としていないため、記号という表現は用いないが、センソリモータフローの分節化の過程に関し、記号創発の観点からロボットの自律性を議論している。すなわち、実世界とそれを解釈するロボットの内部表象とのインターフェースについては、ロボットが他者を含む環境と相互作用する過程において漸次的に獲得するよう設計する。ロボットが人間社会の中で活動するためには、例えば局所的な慣習のような、時として新たに形成される制約を表象する術をもつことが望ましく、したがってロボットがその限定的なセンソリモータ系への入出力から環境の変化に気付き、解釈する機能が必要である。

また、そのような観点に立てば、フレーム問題も同じ枠組みの中で取り扱うべき問題であると捉えることができる。ロボットが環境と自身の行為に依存して変動するセンソリモータフローを抽象化して内部表象に取り入れるということは、その過程に無限の可能性の中から目的的に情報を構造化していくプロセスを包含することになる。さらにその結果、ロボットが一度ボトムアップに類型を獲得したならば、それ自体が新たなフレームとして機能することで、外部環境は漸次的に分節化されていく。

本稿では、上記のような環境とロボットの相互作用に伴うボトムアップな類型創出と、創出された類型によるトップダウンな環境の分節化の機能が相補的に発達する枠組みを提案する。

#### 2.2 提案システムの概要

環境との相互作用を通じて、認識主体が備えるセンソリモータ系の入出力を構造化するために用いられる認識器の発達初期における基盤は、一義的にはその身体に内在する構造であると考えられる。例えば、音声科学における音素に関する不変量が存在しないにも関わらず、その同一性が知覚されるのはなぜかという、知覚の恒常性問題に対して、ミラーニューロンの発見により Liberman らの音声知覚の運動理論[3]が近年注目を集めている。音声知覚の運動理論によると、音声の知

覚と生成には共通の符号が用いられており、それは調音器官の動きであるとされている。すなわち、音声知覚は、入力される音響信号を自身の調音運動に対する写像を用いて推定される。

この理論の是非と一般性はここでの議論の対象ではない。しかしながら、少なくとも非定常で拠るところのない環境において、唯一トップダウンに生成可能な認識主体の身体動作、あるいは運動指令を指標として、環境との相互作用の結果に現出する特徴を抽出するという認識の基盤へのアプローチについて議論することには工学的合理性があると考えられる。

内部的な行動表象を基盤として外部環境を認識するためには、まず自身の身体のマカニカルな特性に起因する制約を把握する必要がある。しかし、当然利用できるセンサの能力にも同様に限界があるため、直接的かつ十分にロボットの状態を記述することはできない。そこで行動に対する環境、すなわち運動指令に対するセンサ情報の応答のマッチングから順モデルを構築する。ここで、学習初期において環境の様態が大きく変動するようだと、安定したモデル学習が困難になるため、環境は静的、あるいは準静的であることを仮定する必要があると考えられる。また、Newport は子供が言語のような複雑なシステムの学習において大人以上の能力をもつのは、限られた情報処理能力に由来して限定的な解析を行うためであるとする *less is more* 仮説を提唱している[4]。このような考えに基づけば、学習初期段階においてはセンサ情報に制約を加え、見かけ上準静的とみなせるよう情報を単純化するプロセスを設計することで、より適応的な学習システムへと発展させることも期待できる。

上述のプロセスによって獲得される順モデルは、分化した行動に紐付けて複数構築する。ここで、さらに新たな内的表象をロボットが自律的に分化させるプロセスを考える。ロボットは既知の類型化された行動表象と順モデルによってトップダウンに環境を認識するが、環境が変動すればこれまで構築した順モデルでは予測できない応答が観測される。このとき、予測誤差に対応して、新たな行動表象の分化をボトムアップに実行することとなる。

以上のプロセスの並列的な処理により、トップダウンな環境認識とボトムアップな概念獲得を相補的に実行する、自律的なロボットの学習手法の構築を提案する。提案手法の概念図を Fig. 1 に示す。

### 3. 内部報酬系による行動分化機能の駆動

身体と環境、双方から生じる制約条件によって自然に発生する動作を抽出することは可能かもしれない。しかしながら、ロボットが時系列として何らかの意味をもつ動作集合を獲得していくためには、目的的な評価軸が必要となる。生物では情動がこれに相当するだろう。そこで、本稿では内部報酬系を設定することで、センソリモータフローの分節化に対する動機付けを行うこととする。ここで問題としているのは、報酬関数に関する動作の最適化ではないため、ロボットが知ることができるのはある状態と行動に対する報酬値のみである。また、タスク達成によって与えられる外部報酬を同時に設定することも考えられるが、ロボットの自律的な行動分化という観点においては経時的な環境との相互作用によって生成される行動系列の中から、所与の評価基準を用いて文脈的な特徴を観測し分節することが重要となる。したがって、分節化が進む前にタスク達成に対する最適性を議論することは難しいと考えられる。

現在筆者らは、本稿で述べた提案システムの概要に基づき、

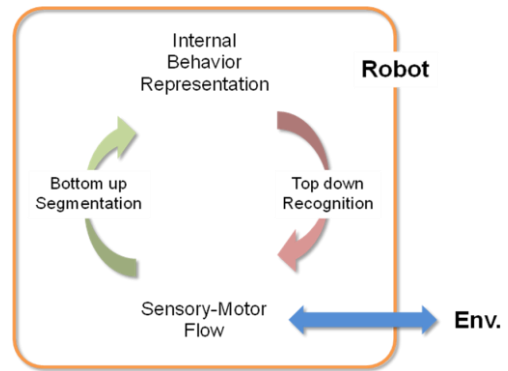


Fig. 1 Conceptual schema of proposed system

ロボットが開かれた環境において、適応的に動作集合を獲得していくための学習手法を開発中である。ロボットの自律的な新規行為獲得を目指した研究としては、Takahashi らの研究[5]などがあるが、本研究とは状態に対して行動を紐づけているという点で異なる。提案システムはパースの記号論の枠組みで捉えれば、代表項である記号と記号内容であるセンソリモータフローに対して、内的な行動表象を解釈項として捉えるモデルとなる。すなわち、ロボットが自身の限定的なセンサ、モータ系から、社会的な場面に内在する文脈的法則を解釈し、主観的な世界観を構築するという問題において、それらを記述する空間として内的な行動表象を選択している。それは発達の初期段階において、絶え間なく変化する環境を認識するためには外乱に対して頑健な評価基準が必要だからである。また、それだけでなく認知言語学的観点、とくに Lakoff らによる概念メタファー[6]からも、上述のモデル化には妥当性があると考えている。ロボットの環境に対する評価体系に基づいて分節化された行動表象は、同時にロボットが他者の行為を推定するためにも利用できるだろう。

### 4. 結言

本稿では、動的な開放環境に内在する社会的な場面でのロボットの運用を目指し、内的な行動表象を基盤とした自律的なロボットの行動創出システムについて考察した。状態そのものの抽象化ではなく、環境との相互作用の中からボトムアップに分化される表象は、ロボットが実世界を接地し適応的に動作するという目的に対して有効であると考えられる。

今後の展望としては、生物の情動に相当するシステムの駆動源である内部報酬系と行動表象のカップリングシステム、外部環境の表象であるセンソリモータフローから目的志向の行動表象を分化させるシステムを実装する予定である。

### 文献

- [1] Uchibe, E., Asada, M., Hosoda, K., "State Space Construction for Behavior Acquisition in Multi Agent Environment with Vision and Action," *International Conference on Computer Vision*, pp.870-875, 1998.
- [2] 谷口忠大, コミュニケーションするロボットは創れるか: 記号創発システムへの構成論的アプローチ, NTT 出版, 2010.
- [3] Liberman, A.M., Mattingly, I.G., "The Motor Theory of Speech Perception Revised," *Cognition*, vol.21, pp.1-36, 1985.
- [4] Newport, E.L., "Maturational constraints on language learning," *Cognitive Science*, vol.14, pp.11-28, 1990.
- [5] Takahashi, Y., Tamura, Y., Asada, M., Negrello, M., "Emulation and behavior understanding through shared values," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.58, pp.855-865, 2010.
- [6] Lakoff, G., Johnson, M., *Metaphors We Live By*, University of Chicago Press, 1980.