

# 発達段階に基づく汎用人工知能の考察

Discussion about Artificial General Intelligence based on Stages of Development

市瀬 龍太郎\*1

Ryutaro Ichise

\*1国立情報学研究所

National Institute of Informatics

In this paper, we analyze current AI technology based on Piaget's theory of cognitive development and discuss about problems for artificial general intelligence.

## 1. はじめに

人工知能の分野では、これまでに、様々な人工知能システムが設計されてきた。そのようなシステムの例として、チェスや将棋をプレイするシステムなどが挙げられる。しかし、これらは、個別の課題を解決することは可能であるが、人間のように様々な課題に対応することができない。そのため、人間のような汎用性を持つ知能の実現には、全く別のアプローチが必要となる。一つの考え方として、人間の知能発達と対比させながら人間と同様な知能の構成を目指す考え方がある。そのような考え方に基づき、Adamsらは、人間の知能発達を整理したピアジェの発達理論を用いて、汎用人工知能の全体的な位置づけを表すことを提案している [Adams 12]。ピアジェの発達理論では、人間の生まれてからの発達を感覚運動期、前操作期、具体的操作期、形式的操作期の4つの段階に分けている。それぞれの段階により、獲得される事項、そのメカニズムが異なり、段階を追うことによって、人間は高度な知能を獲得するとしている。人間の知能発達と人工知能の関係の考察は、汎用人工知能を作成する際の一つの鍵であるが、ピアジェの発達理論と現在までの人工知能技術との関係の分析はほとんど行われていない。そこで、本稿では、[滝沢 80]に基づき、ピアジェの発達理論を概観しながら、現在の人工知能技術に基づき、汎用人工知能への道筋を考察する。以下、感覚運動期、前操作期、具体的操作期を順番に取り上げ、人工知能技術との関係を議論し、最後に汎用人工知能に必要な技術について考察する。なお、形式的操作期に関しては、現在の人工知能技術との差が大きいと考えられるため、具体的操作期までを本稿の対象とした。

## 2. 感覚運動期

ピアジェの発達理論において、最初の段階は、感覚運動期と呼ばれる。感覚運動期は、およそ生まれてから2歳ぐらいまでとされている。ピアジェは、この期間の発達を6段階に分け、以下のような発達段階を通るとしている。

- 第1段階 (0-1ヶ月) 行動は反射によって行われる。反射活動を通して、行動を安定化させる。
- 第2段階 (1-4ヶ月) 様々な行動を試して、結果を取得する(第1次的循環反応)。

- 第3段階 (4-8ヶ月) 様々な行動を繰り返し試して、状態と結果の関係を理解する(第2次的循環反応)。ただし、結果のために手段を選択することはできない。
- 第4段階 (8-12ヶ月) 目的と手段が分化し、すでに持つ手段を目的のために選択することが可能となる。
- 第5段階 (12-18ヶ月) 手段を様々に変化させて結果の違いを観察し、知識を修正(第3次的循環反応)。
- 第6段階 (18-24ヶ月) 内部で知識の協調が可能。表象機能の獲得。

この発達過程を人工知能技術の観点から考察する。まず、第1段階は、予め組み込まれた知識に従って、行動を決めているに過ぎないので、単純反射エージェント [Russel 09] として理解できる。第2段階では、エージェントが組み込まれた知識以外を探索行動を行っているとして解釈することが可能である。第3段階では、状態と行動の間の関係を分析し、共起関係を学習していると考えられる。これは、エージェントにおける行動規則の学習と捉えられる。しかし、この段階では正例のみから学習しており、学習後の推論も現在の状況を出発点とする前向き推論だけが行われている。第4段階では、目的を持った手段の選択が可能となる。そのため、第3段階において学習された行動規則を選択するメタな知識を学習していると考えられる。また、結果から行動を選択する後ろ向き推論ができるようになるのもこの段階であると言える。第5段階では、探索の要素を取り入れ、正負の例に基づき、第3段階で学習された行動規則の修正、および、その規則を利用するためのメタ知識の修正が行われる。そして、第6段階においては、知識同士の連携、つまり規則同士を纏めあげて大きな知識を作れるようになると考えられる。そのような知識の塊が表象になるのであろう。

この段階で行われていることを、マクロなレベルで見ると、センサ情報を入力、行動を出力として、エージェント内部の構造を生成していると解釈することができる。内部で作られる構造としては、以下が考えられる。

- 第1段階 (0-1ヶ月) センサとエフェクタの安定化。ノイズの除去。
- 第2段階 (1-4ヶ月) 行動選択肢の拡大化。
- 第3段階 (4-8ヶ月) 状態と結果の共起関係の保持。
- 第4段階 (8-12ヶ月) 状態と結果の関係の更新。前向き推論の利用。
- 第5段階 (12-18ヶ月) 状態と結果の関係の更新。後ろ向き推論の利用。
- 第6段階 (18-24ヶ月) 状態と結果の関係の連携(表象)。

連絡先: 市瀬 龍太郎, 国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系, 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2, Tel:03-4212-2000, E-mail:ichise@nii.ac.jp

つまり、感覚運動期では、センサ情報を入力として、表象を形成し、それと同時に上記のような内部構造を作成する。このようなことを行う人工知能手法はいくつか存在する。たとえば、Leらの使った深層学習 [Le 12] では、画像をセンサ情報として、表象を生成していると捉えることができる。また、異なるアプローチとしては、ピアジェの発達段階に基づき学習を行う Drescher のスキーマメカニズム [Drescher 91] などが挙げられる。

### 3. 前操作期

ピアジェの発達理論において、感覚運動期の次の段階の前操作期は、およそ2歳ぐらいから、6,7歳ぐらいまでとされている。ピアジェは、この期間の発達を2段階に分け、以下のような発達段階を通るとしている。

前概念的思考段階 (2-4 歳) この段階では、目の前に存在するもの以外を考えることができ、概念を形成することができるようになる。

直観的思考段階 (4-6,7 歳) 数の概念などが理解できるようになり、単一概念間の関係を理解できるようになる。

この発達過程を人工知能技術の観点から考察する。まず、前概念的思考段階は、インスタンスからクラスを生成していると考えられる。感覚運動期で作られた表象を属性とし、概念の形成を行う。これは機械学習技術における概念形成技術に相当するであろう。次の直観的思考段階では、形成された概念間の関係 (構造) を構築していると考えられる。概念間の関係としては、基礎となる IS-A 関係や大小関係などを学習している。これは、人工知能における関係学習技術に相当するであろう。

### 4. 具体的操作期

ピアジェの発達理論において、前操作期の次の段階の具体的操作期は、6,7歳ぐらいから11,12歳ぐらいまでとされている。ピアジェは、この期間における発達を下位論理的群性体の理解と論理的群性体の理解として整理している。下位論理的群性体は、時間、空間に関する操作を扱い、論理的群性体は論理操作を扱う。本稿では、ピアジェの扱った8つの論理的群性体について取り上げる。論理的群性体は4つのクラスに関する群性体と4つの関係に関する群性体に分かれ、以下のようになっている。

群性体 I クラスの1次加法。階層構造のクラス操作を理解。たとえば、犬のクラスと犬以外のクラスを合わせると上位の動物クラスになるといったクラスの合成操作などができるようになる。

群性体 II クラスの2次加法。あるクラスの分類基準を変更したクラス間の関係を理解。たとえば、猫のクラスよりも犬でないもののクラスの方が大きいといったことが理解できるようになる。

群性体 III クラスの2重1義的な乗法。互いに関係の無いクラスの乗法関係を理解。たとえば、クラス  $A$  と  $\bar{A}$ 、クラス  $B$  と  $\bar{B}$  があった時に、それらを組み合わせた  $AB, A\bar{B}, \bar{A}B, \bar{A}\bar{B}$  を操作できるようになる。

群性体 IV クラスの多重1義的な乗法。関係のあるクラスの乗法関係を理解。たとえば、犬のクラスを  $A$ 、猫のクラスを  $B$  としたときに、 $AB$  は存在しないことを理解。

群性体 V 非対称的な関係の加法。非対称になっている関係の加法関係を理解。たとえば、 $A$  は  $B$  より大きく、 $B$  は  $C$  より大きいという関係から、 $A$  は  $C$  より大きいということを理解。

群性体 VI 対称的な関係の加法。対称になっている関係の加法関係を理解。たとえば、 $A$  と  $B$  は兄弟であり、 $B$  と  $C$  は兄弟であれば、 $A$  と  $C$  は兄弟であることを理解。

群性体 VII 関係の2重1義的な乗法。2つの関係を相関的に扱うことを理解。たとえば、粘土を潰して形を変えても、同じ重さであることを理解。

群性体 VIII 関係の相互1義的な乗法。対称的、非対称的な関係の乗法を扱うことを理解。

ピアジェの群性体は、数理的に書かれているため、比較的論理の枠組みに乗りやすい。そのため、群性体を公理化する試み [橋本 76] なども行われている。人工知能技術としては、関係を取り扱うことができる帰納論理プログラミング (ILP) が一部の群性体を学習できる可能性があると考えられる。しかし、群性体の幅は広く、高階の関係も含まれているため、今後、大きな研究の余地があると考えられる。

### 5. ピアジェ理論から見た汎用人工知能の課題

本稿では、ピアジェの理論に基づき、人間の12歳程度までの発達過程を人工知能技術の観点から考察した。その結果、現状の人工知能技術により、人間と同様の知能の一部は、構成し得ることが分かったが、一部に関してはまだ研究が必要であると考えられる。感覚操作期から前操作期の前概念的思考段階までに関しては、深層学習の技術により、センサー情報から概念の獲得までは実現可能であると考えられる。しかし、エージェントの観点から考えた際には、感覚運動期で実現されている推論機構を深層学習で取り扱うのは難しく、これらを統合する必要があるであろう。直観的思考段階以降では、概念化された記号を操作する論理型的人工知能技術が必要となる。従来の人工知能研究では、予め論理の設計を行い、それに付随する知識ベースとともに機械に与えてきた。しかし、知識ベースに相当する概念化された事象が、センサ入力により変化する環境では、どのような場合にどの論理を適用可能であるのかというメタな知識を学習する必要がある。したがって、概念化された記号とその記号の操作の間を整合性を持たせながら、つなぐ方法に関しては、十分な研究が必要となるであろう。

### 参考文献

- [Russel 09] Russel, S. J., Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd Edition, Prentice Hall (2009).
- [滝沢 80] 滝沢 武久, 山内 光哉, 落合 正行, 滋賀 純: ピアジェ知能の心理学, 有斐閣 (1980).
- [Drescher 91] Drescher G. L.: Made-Up Minds, The MIT Press (1991).
- [Le 12] Le, Q. V., Ranzato, M., Monga, R., Devin, M., Chen, K., Corrado G. S., Dean, J., Ng, A. Y.: Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning, In Proc. of the 29th Int. Conf. on Machine Learning (2012).
- [Adams 12] Adams, S. S., Arel, I., Bach, J., Coop, R., Furlan, R., Goertzel, B., Hall, J. S., Samsonovich, A., Scheutz, M., Shelesinger, M., Shapiro S. C., Sowa, J. F.: Mapping the Landscape of Human-Level Artificial Intelligence, The AI Magazine, 33(1), pp. 25-41 (2012).
- [橋本 76] 橋本 是浩: ピアジェの群性体の公理化について, 数学教育研究, Vol. 6, pp. 16-27 (1976).