

記号列変換機能の学習における認知について

富士通(株)国際情報社会科学研究所

高田裕志

1 はじめに

本稿では、あるアルファベットの記号列を別のアルファベットの記号列に変換する機能の帰納的学習において、

- 学習者が学習の達成、つまり、変換機能を学習したことを認知できるか、
- 学習者が課題の難易度をどのように認知するか、

を、変換機能のクラスと教師の能力に関する思考実験によって明らかにする。

記号列変換機能は線型文法と密接な関係があり、ここで用いる学習の形式モデルは、線型言語の文法推論である(線型言語の文法推論に関しては、文献[1]を参照)。

2 実験の設定

学習者はある記号列変換機能を学習しなければならない。その際、教師がいて、教師はその変換機能を知っている。学習者は教師から変換の具体例を入力出力記号列のペア (w_i, w_o) で与えられ、具体例の集合から変換機能を帰納的に学習する。また、学習の過程で、学習者は教師に「質問」することも許されている。教師は質問に常に正しく「応答」する。

形式的には、学習者の変換機能を6項組

$$T = (K, \Sigma, \Delta, \mu, q_0, F)$$

で定義する。 K は状態の空でない有限集合、 Σ は入力アルファベット、 Δ は出力アルファベット、 μ は $K \times \Sigma^* \times \Delta^* \times K$ の有限な部分集合、 q_0 は初期状態、 F は最終状態の集合である。 $K \times \Sigma^* \times \Delta^*$ 上の関係 $\vdash$ を、 Σ^* の各要素 w に対して、 $(p, x, y, q) \in \mu$ のとき、 $(p, xw, z_1) \vdash (q, w, z_1y)$ と定義する。関係 $\vdash$ は、 $\vdash$ の反射推移閉包である。変換機能 T が変換可能な入力記号列と、それに対応する出力記号列のペアの集合 $M(T)$ は、

$$M(T) = \{(w_i, w_o) \mid (q_0, w_i, \lambda) \vdash^* (q, \lambda, w_o), q \in F\}$$

である。

ここでは、学習の対象である変換機能を次の3つのクラスに分ける：

- T_e 任意の $T_e \in T_e$ において、 μ は $K \times \Sigma \times \Delta \times K$ の有限な部分集合である。
- $T_\#$ 任意の $T_\# \in T_\#$ において、 μ は $K \times \Sigma^* \# \Delta^* \# K$ の有限な部分集合である。ただし、記号 $\#$ は Σ にも Δ にも含まれないものとする。
- T 任意の $T \in T$ において、 μ は $K \times \Sigma^* \times \Delta^* \times K$ の有限な部分集合である。

クラス T_e の変換機能は1つの記号を必ず1つの記号に変換する。クラス $T_\#$ の変換機能では、区切り記号 $\#$ によって変換記号列中に変換の単位が明示されている。 T は変換機能全体からなるクラスである。

学習者が許される質問は次の3つである：

- ある入出力ペア (w_i, w_o) が正しい変換、つまり、 $(w_i, w_o) \in M(T)$ かどうかに関する質問。
- 変換機能の補助情報に関する質問 (補助情報の要求)。
- 変換機能の同値性に関する質問。

学習者からある入出力ペアが正しい変換であるかどうかを質問された場合、正しければ教師は「はい」と答え、そうでないならば「いいえ」と答える。補助情報が求められた場合には、教師は自分自身が想定する変換機能の代表標本を学習者に与える。ここで、変換機能の代表標本とは、直観的にはすべての状態と μ の要素を用いなければ変換できない入出力記号列のペアの有限部分集合である。変換機能の同値性に関する質問は、学習者の仮説である変換機能 T_H が学習の対象である変換機能 T と同じ能力、つまり $M(T_H) = M(T)$ かどうかという形で行なわれる。もし $M(T_H) = M(T)$ であるならば、教師は「はい」と答え、そうでないならば反例として $M(T)$ と $M(T_H)$ の対称差の要素を1つ学習者に与える。

答える質問の種類によって教師の能力は異なる。ここでは、次の3つの能力をもつ教師を仮定する：

- A_M 正しい変換であるかどうかに関する質問のみに答える能力。
- A_A 正しい変換であるかどうかに関する質問と補助情報の要求に答える能力。
- A_E 正しい変換であるかどうかに関する質問と変換機能の同値性に関する質問に答える能力。

したがって、変換機能のクラスと教師の能力の組み合わせから、9つの実験を行う。

3 実験結果

学習の達成の認知

学習者の学習手続きを P とする。学習者は P を学習の対象である変換機能 T のしだいに増加する具体例の集まりに対して繰り返し適用し、仮説の列 $T_{H_1}, T_{H_2}, \dots$ を生成するとする。ある数 m が存在して、 $M(T_{H_m}) = M(T)$ であり、 P が T_{H_m} を出力したあとと停止するならば、その学習者は有限の計算で

表 1: 同定に関する変換機能と教師の能力の関係

	T_e	T_s	T
A_M	極限同定	極限同定	極限同定
A_A	有限同定	有限同定	極限同定
A_E	有限同定	有限同定	有限同定

T を正しく同定する、または単に T を有限同定すると言う。一方、ある数 m が存在して $M(T_{H_m}) = M(T)$ であるが、 P は T_{H_m} を出力しても停止せず、ただし $T_{H_m} = T_{H_{m+1}} = T_{H_{m+2}} = \dots$ であるとする。このとき、学習者は極限において T を正しく同定する、または単に T を極限同定すると言う。

有限同定と極限同定の違いは学習の達成の認知を決定する。有限同定可能な学習手続きが存在する実験課題の場合、その学習手続きをもつ学習者は学習の達成を認知でき、認知したあとは変換機能を「知っている」と確信できる。一方、極限同定可能な学習手続きしか存在し得ない課題の場合、どのような学習手続きをもってしても、学習者は学習したことを決して認知できず、永遠に変換機能を「知っている」とは確信できない。

変換機能のクラスと教師の能力の組み合わせに対して、存在し得る学習手続きの同定能力を表 1 に示す。表 1 が示すように、能力 A_M をもつ教師を仮定すると、どのクラスの変換機能でも学習者は学習の達成を認知することはない。逆に、能力 A_E をもつ教師を仮定すると、すべてのクラスの変換機能に対して、学習者は学習の達成を認知することができる。ただし、クラス T の変換機能の同値性を判定するアルゴリズムは存在しない。したがって、クラス T の変換機能の学習において、能力 A_E を教師に仮定するのは不自然である。能力 A_A をもつ教師を仮定すると、クラス T_e, T_s の変換機能に対しては学習者が認知することがあるが、クラス T の変換機能の学習では、認知することはない。

課題の難易度の認知

記号列 w の長さを $|w|$ で表し、 w に含まれる記号の個数と定義する。さらに、変換記号列のペア (w_i, w_o) の長さを $|(w_i, w_o)|$ で表し、 $|w_i| + |w_o|$ と定義する。ある仮説を出力した時点から次の仮説を出力する時点までに実行する計算ステップの上限が、入力された変換記号列のペアの長さを引数とする多項式によって常に束縛されている学習手続き P_p を、多項式時間計算量の学習手続きと言う。また、指数関数によって束縛されている学習手続き P_e を、指数関数時間計算量の学習手続きと言う。

学習手続き P_p は、現在の計算機で効率良くシミュレーション可能であるが、学習手続き P_e は組み合わせ爆発などを起こし、うまくシミュレーションできない。したがって、(計算機を学習者のモデルとす

表 2: 変換機能と時間計算量の関係

T_e	T_s	T
多項式時間	多項式時間	(指数関数時間)

ることが妥当であるならば、) P_p によって学習する学習者は課題を「やさしい」と認知し、 P_e によって学習する学習者は「難しい」と認知する。

学習手続きの時間計算量は変換機能によって決まる。その際、少なくとも教師は A_M の能力をもつと仮定する。変換機能のクラスと学習手続きの時間計算量の関係を表 2 に示す。ただし、表中にかっこをつけて示したのは予想される時間計算量である。表 2 が示すように、クラス T_e, T_s の変換機能を学習する課題を与えられた場合、学習者は学習手続き P_p を用いることが可能であり、その課題を「やさしい」と認知する。しかし、クラス T の変換機能を学習する課題を与えられた場合は、 P_e を用いることになり、「難しい」と認知する。

4 結論

本稿では、思考実験により、学習者の学習達成の認知が変換機能のクラスと教師の能力によって、学習の課題の難易度の認知が変換機能のクラスによって決定されることを示した。実験結果より、学習の対象がクラス T_e または T_s の変換機能、教師の能力が A_A または A_E である設定が、学習者が記号列変換機能を学習する理想的な問題設定であることがわかる。

クラス T の変換機能では、入力記号列の消去がありうる。これを「ノイズ」の消去とみなすことが可能である。クラス T_e, T_s の変換機能では、学習者は変換の構造を入出力記号列から明確に知ることができる。また、 A_A を学習者にヒントを与える能力と解釈することができる。したがって、「ノイズ」の有無、変換の構造に関する情報、変換機能に関するヒントが、記号列変換機能を帰納的に学習する場合、非常に重要である。

謝辞

日頃、有益な助言をいただく国際研・学習システム研究グループの横森、榊原両研究員と西田研究員、ICOT の石坂研究員に感謝します。なお、本研究は第五世代コンピュータプロジェクトの一環として行ったものである。

参考文献

- [1] 高田裕志, “学習の形式モデルとしての文法推論の意義”, In *Proceedings of Workshop on Learning*, 北海道, 手稲, 1988.
- [2] S. Ginsburg, *Algebraic and Automata-Theoretic Properties of Formal Languages*, North-Holland, 1975.