不確定名辞系列問題のシミュレーションモデルの作成
Towards the creation of a simulation model for indeterminate term series problems

青井 孝史[†], 日高 昇平[†]
Takafumi Aoi, Shohei Hidaka

[†] 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology
shhidaka@jaist.ac.jp

概要

人の推論時の心的表象を調べる課題として名辞系列問題があり，特に名辞間の全順序関係がひとつに定まらない問題を不確定名辞系列問題と呼ぶ。不確定名辞系列問題では、名辞間の関係を半順序で表現する心的表象が形成されることが示唆されている(Aoi & Hidaka, 2024)。この実験では、対称な名辞が存在しない問題においても名辞を対称だとみなそうとする対称性バイアスも示唆された。本発表では、この実験結果を説明する計算モデルの構築を目指し、その設計方針について議論する。

キーワード : 不確定名辞系列問題, 半順序モデル、対称性バイアス、シミュレーション

1. 不確定名辞系列問題と半順序モデル

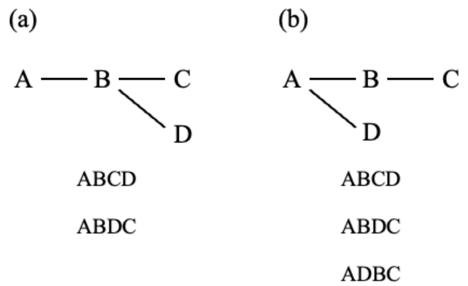
名辞系列問題とは「A は B より大きい」「B は C より大きい」などの前提から「A は C より大きい」「2 番目に大きいのは B である」などの結論を導き出す推論問題を指す。名辞系列問題の推論者は、名辞を順番通りに並べたメンタルモデルを構築すると言われている(Byrne & Johnson-Laird, 1989; De Soto, London & Handel, 1965; Huttenlocher, 1968)。たとえば上の例では ABC という全順序モデル(左側にあるほど大きいとした場合)が構築される。全順序(集合)とは、整数などのように、対象となるどの要素の間にも順序がつく性質を指す。

名辞系列問題には、複数の全順序モデルを構築できる問題がある。たとえば「A は B より大きい」「A は C より大きい」では、B と C のどちらが大きいかはわからないため、ABC と ACB という 2 つの全順序モデルが構築可能である。このような問題は全ての名辞間の順序関係が 1 つには確定しないことから、不確定名辞系列問題と呼ばれる(Sternberg, 1981)。

不確定名辞系列問題に取り組む推論者は全ての全順序モデルを構築するのではなく、複数の順序の存在を暗示する単一のメンタルモデルを構築すると言われている(Jahn, Knauff & Johnson-Laird, 2005)。そのような単一モデルとして有力視されるのが、順位が不確定な一部の名辞に注釈を付与する注釈付モデルである(Rauh et al. 2005)。注釈付モデルでは、前提文に基づいて特定の暫定的な全順序モデルを構築し、次に問いに答える時に必要に応じて、注釈付の名辞の位置を移動させることで順次、全順序モデルを改変していく。たとえば「A は B より大きい」「A は C より大きい」では B と C の順位が不確定である。そのうち C に「A より小さい」という注釈を付与した全順序モデル ABC を構築する。次に、必要に応じて、C に付与された注釈「A より小さい」を満たす任意の順位に C を移動させて、全順序モデル ACB をも構築する。このように注釈付モデル説では注釈という概念を導入することによって、単一の全順序モデルでも複数の順序の存在を指し示すことが可能だとしている。

一方、注釈付き全順序モデルとは異なる考え方として、半順序集合のような形で単一モデルを構築することも可能だと思われる。半順序とは、全順序と異なり、必ずしも順序つかない要素対を許容する順序関係を指す。具体的に、図 1 の(a)に「A は B より大きい」「B は C より大きい」「B は D より大きい」、(b)に「A は B より大きい」「B は C より大きい」「A は D より大きい」から構築できる半順序モデルをそれぞれ示す。半順序モデルは、前提で順序が明記された名辞間には線が引かれ、順序関係が不明な名辞間には線が引かれていない、枝分かれしたツリー状のモデルである。

図 1 半順序モデルの例



2. 半順序モデルにおける名辞の対称性

私たちは、不確定名辞系列問題に取り組む推論者は半順序モデルをメンタルモデルとして構築すると仮説を立てた。なぜなら半順序モデルは名辞の順序関係における対称性を把握しやすく、その対称性を利用することで推論時の認知負荷を減らせると考えられるからである。図 1(a)に示したモデルでは、C と D の位置を交換しても、与えられた前提文を満たす。こうした名辞の交換可能性を C と D に関する対称であると定義する。C と D が対称であることを認識していれば、C と D がともに「3 番目か 4 番目に大きい」と容易に判断でき、認知負荷が軽くなる。ただし図 1(b)のように対称な名辞のペアがない場合には、このような効率化はできない。

推論者は半順序モデルの対称性を利用して名辞の順序関係を推論しているのではないか。この仮説を検証するために、私たちは 4 つの名辞の順位について記述した 4 名辞系列問題を構築可能な半順序モデルの形状によって分類し、全種類の問題を被験者に解かせた (Aoi & Hidaka, 2024)。問題の種類ごとに正答率と回答時間を分析したところ、対称な名辞ペアを含む問題はそうでない問題より大幅に正答率が高く回答時間が短くなっていた。さらに対称な名辞ペアを含まない問題の誤答パタンを分析したところ、対称でない名辞ペアを対称あると誤認する対称性バイアスによってメンタルモデルを構築したと考えられる誤答が過半数を占めていた。たとえば図 1(b)のモデルにおいて、C と D の間に存在しないはずの線を引いて B と D が対称となるメンタルモデルを構築したと思わしき誤答が多く見られたのである。これらの結果は、本研究の仮説と一貫している。一方、対立仮説の一種である注釈付モデル説を実装した計算モデル PRISM (Ragni & Knauff, 2013)では、この実験結果を説明できないことも確認した。

半順序モデル説を実装した名辞系列問題の計算モデルは、私たちが知るかぎり、提案されていない。半順序モデルを構築して対称性を利用した推論が行われているという仮説を検証するために、半順序モデル説を実装した計算モデルを作成し、それが上述の実験結果を再現できたときに、半順序モデルが構築されるとする半順序仮説の妥当性が高まる。

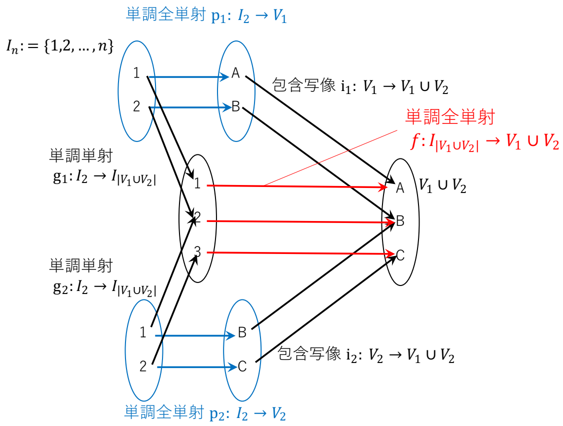
3. 前提統合プロセスの数学的な図式

計算モデルを構築するにあたって、まずは名辞系列問題において複数の前提の内容を統合する過程を数学的に定義したい。もっとも単純なケースとして、前提「A は B より大きい」と前提「B は C より大きい」を統合して結論「1 番目に A が大きく 2 番目に B が大きく 3 番目に C が大きい」を導く問題を考える。この場合、両方の前提に登場する名辞 B を媒介として、それ以外の名辞 A と C の順序を決定する必要がある。

まず、前提の内容を関数(写像)として表現する。1 つめの前提「A は B より大きい」は、前提内に登場する名辞だけで順序をつければ 1 番目に大きいのが A で、2 番目に大きいのが B であることを意味する。これは順位を名辞に写像する関数 p_1 として$\{p_1: 1 \rightarrow A, 2 \rightarrow B\}$と表現できる。同様に 2 つめの前提「B は C より大きい」は、関数 p_2 として$\{p_2: 1 \rightarrow B, 2 \rightarrow C\}$と表現できる。さらに抽象化して 1 以上 n 以下(n は 1 より大きい整数)の整数の集合を I_n、n 番目の前提に登場する名辞の集合を V_n とすれば、1 つめの前提と 2 つめの前提は、それぞれ$\{p_1: I_2 \rightarrow V_1\}$と$\{p_2: I_2 \rightarrow V_2\}$と表現することができる。関数 p_1 と p_2 は単調で全単射な関数だといえる。

結果「1 番目に A が大きく 2 番目に B が大きく 3 番目に C が大きい」は、関数 f として$\{f: 1 \rightarrow A, 2 \rightarrow B, 3 \rightarrow C\}$と表現でき、より抽象化して単調全単射$\{f: I_{|V_1 \cup V_2|} \rightarrow V_1 \cup V_2\}$と表現できる。2 つの前提を表現する関数 p_1 と関数 p_2 を統合して関数 f を導く図式は、図 2 のようになる。図 2 では関数 p_1 と関数 p_2 に加えて、ある単調写像$\{g_j: I_2 \rightarrow I_{|V_1 \cup V_2|}\}$と包含写像$\{i_j: V_j \rightarrow V_1 \cup V_2\}$を導入している。名辞系列問題における前提の統合を表現する関数とは、単調全単射な関数 f が $i_1 \circ p_1 = f \circ g_1$ かつ $i_2 \circ p_2 = f \circ g_2$ を満たすような、つまり図 2 の図式を可換にするような g_j(g_1 と g_2)である。

図 2 前提統合の数学的な定義

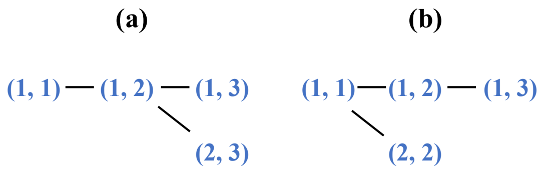


4. 半順序モデルへの応用

前述のような関数 g_j を半順序モデル説に当てはめると、写像先は全順序集合 I_n から半順序集合(P_n とする)に変わることになる。半順序集合は全順序集合を I_n としたように整数の集合として表現することはできない。この P_n をプログラムとしてどう表現するかが、半順序モデルの計算モデルを作るにあたって問題となる。

現時点では、P_n を(1, 1)や(2, 3)など 2 次元座標の集合として表現することを考えている。図 3 は図 1 に示した半順序モデルの名辞を、それぞれの名辞の位置を表す座標に置き換えたものである。

図 3　座標で表現した半順序モデル



P_n をこのような座標の集合として定義すると、座標間の順序関係をどう表現するかが問題となる。図 1 および図 3 のメンタルモデルでは左側にある名辞ほど大きいと定義しており、第 2 座標が小さいほど左側にあるように座標を定義しているので、第 2 座標の値が順序関係を定める要素となる。

全順序集合においては要素どうしに順序関係が成立することは確定している。しかし半順序集合においては順序関係が定められていない要素ペアがありうる。そこで P_n を実装するにあたっては、座標どうしのペアの順序関係が確定しているかという情報(これは図 3 における座標間に引かれた線に該当する)をどう表現するかが問題となる。これについては、たとえば座標ペアごとに順序関係が確定しているかを 1(確定)、0(不確定)を割り当てる辞書のようなものを用意し、前提で言及された座標ペアについては 1、それ以外の座標ペアについては 0 を割り当てることが考えられる。

こうした確定情報を付加するモデルは実質的に一種の注釈つきモデルに相当する。しかし、人間の認知リソースを考えると、すべての座標ペアについて 1 か 0 かを記憶しておくことは現実的ではない。現実の人間がこの辞書を使って半順序モデルを作るとすれば、前提に記載されている座標ペアに 1 が割り当てられていることだけを記憶し、それ以外の座標ペアについては考えないという処理をすることになるだろう。しかしそれでも、どの順位にどの名辞が配置されているかさえ記憶していけばよい全順序を構築するタイプの問題と比べて、半順序を構築する問題ではどの座標にどの名辞が配置されているか記憶しておくのと同時にどの座標ペアが 1 であるか(順序関係があるか)を記憶しておく必要があるので、認知的な負荷はかなり大きくなる。

5. 座標どうしの関係性についてのルール

そこで、現実の推論では、前提で順序関係の有無を記憶する座標ペアの数をさらに減らすような暗黙のルールを設けていると仮説を立ててみる。そのようなルールとしては、たとえば「第 1 座標の数値が等しければ順序関係が確定しているとみなす」というルールが考えられる。このルールを適用すれば、たとえば図 3 の(a)と(b)では(1, 1)-(1, 2)間と(1, 2)-(1, 3)間の関係について記憶しておく必要はなくなり、(a)では(1, 2)-(2, 3)間、(b)では(1, 1)-(2, 2)間に順序関係が成立していることだけを記憶すればよくなる。

また、半順序モデルを構築するときに前提で記述された名辞どうしは隣に置く(第 2 座標の数値の差が 1 しかない)ように決めれば、「第 1 座標が異なる場合は第 2 座標の差が 1 である場合のみ順序関係が定まっている可能性を考える」ことにすればよい。このルールのもとでは、図 3(a)においては(1, 2)-(2, 3)間の関係について記憶する必要はない可能性がある。なぜなら(2, 3)と第 2 座標の差が 1 しかない座標は(1, 2)しか存在しないので、その間に順序関係が存在しないのであれば座標(2, 3)はどの座標とも順序が成立しないことになる。前提に記載されている名辞が置かれた座標である以上、何の順序関係も有しないことはありえない。よってこのルールの下では必然的に図 3(a)における(1, 2)-(1, 3)間の関係は 1 になるのである。Aoi & Hidaka (2024)で対称な名辞のペアがあり高い正答率と正答速度を示した問題は、まさにこのルールによって必然的にどの座標ペアの関係が 1 になるかが必然的にきまるタイプの問題だった。

一方で、図 3(b)においては(2, 2)と第 2 座標の差が 1 しかない座標は(1, 1)と(1, 3)の 2 つ存在する。よって両方とも最低でもどちらか 1 つと順序関係が存在すると考えても、(1, 1)とだけ関係が存在するケース、(1, 3)とだけ関係が存在するケース、(1, 1)と(1, 3)の両方と関係

が存在するケースの3通りが考えられる。Aoi & Hidaka (2024)の実験では、(1, 1)と(1, 3)の片方とだけ順序関係が存在する問題において、両方と順序関係が存在すると誤認したと思わしき誤答が多発した。このパタンの誤答が、対称性バイアスと呼ぶ推論の傾向性の典型例である。

以上のことから、「第1座標が異なる場合は第2座標の差が 1 である場合のみ順序関係が定まっている可能性を考える」ルールをなんらかの形で確率モデルとして実装すれば、対称な名辞ペアをもつ問題が解きやすくなる現象や、対称な名辞ペアをもたない問題が対称な名辞ペアをもつかのように解かれて誤答される対称性バイアスなど、Aoi & Hidaka (2024)でみられた実験結果を再現する計算モデルを作れる可能性があると思われる。

6. まとめ

本研究の目的は、不確定名辞系列問題における人間の推論プロセスを解明することである。そのために、人間の被験者が不確定名辞系列問題を解いたときに観察された傾向、すなわち半順序モデルを形成して名辞ペアの対称性を利用しようとする推論の傾向を再現する計算モデルの構築を試みた。そのような計算モデルの設計方針としては、前提の内容を表現する全順序集合から単調写像される半順序集合を定義し、その半順序集合が座標の集合であると考える。そして、その半順序集合において座標どうしの順序関係を暗黙的かつ確率的に規定するルールが存在すると考える。次の段階として、この方針にしたがい作成した計算モデルが実験結果を再現するか検証し、人間が不確定名辞系列問題を推論するときの認知プロセスを計算論的に理解したいと考えている。

謝辞

本研究は科研費基盤研究 B(一般) JP23H0369, 挑戦的研究(萌芽) JP22K19790, JST さきがけ JPMJPR20C9 の助成を受けて行われた。

文献

Byrne, R., & Johnson-Laird, P. N. (1989). Spatial reasoning. Journal of Memory and Language, 28, 564 –575.

De Soto, C. B., London, M., & Handel, S. (1965). Social reasoning and spatial paralogic. Journal of Personality and Social Psychology, 2, 513–521.

Huttenlocher, J. (1968). Constructing spatial images: A strategy in reasoning. Psychological Review, 75, 550–560.

Sternberg, R. J. (1981) Reasoning with determinate and indeterminate linear syllogisms. British Journal of Psychology, 72, 407-420

Jahn, G., Knauff, M., & Johnson-Laird, P. (2005). Preferred mental models in spatial reasoning. Proceedings of the Twenty-seventh Annual Conference of the Cognitive Science Society (pp. 1036-1041). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Rauh, R., Hagen, C., Knauff, M., Kuß, T., Schlieder, C., & Strube, G. (2005). Preferred and alternative mental models in spatial reasoning. Spatial Cognition and Computation, 5, 239–269.

Aoi, T., Hidaka, S. (2024). Symmetric Bias in Reasoning: Error Analysis of Indeterminate Term Series Problems. Proceedings of the Forty-sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society.

Ragni, M., & Knauff, M. (2013). A theory and a computational model of spatial reasoning with preferred mental models. Psychological Review, 120, 561-588.