

研究終了報告書

「機械理解の創成に向けた随伴関手の統計的推定理論の構築」

研究期間: 2020 年 12 月～2024 年 3 月

研究者: 日高 昇平

1. 研究のねらい

近年機械学習分野を主導する深層学習は、多様な課題で高性能を誇る一方で、巨大なブラックボックスで理解困難な技術である。そうした理解困難性は、高性能のみならず高信頼が必要な社会での応用を妨げる懸念がある。本研究では、学習のみならず、人の理解の認知過程を捉える「機械理解」の分野・技術を創成すべく、次世代の基礎技術の構築を目指した。具体的には、学習に拠らず、視覚的オブジェクトを認識するための数学的な理論を構築し、次に同理論の応用先を視覚的オブジェクトのみならず、言語理解の領域まで拡張することを目指した。

視覚・言語の領域は一見して全く異なるデータを扱うように見える。しかし、本研究で構築した理論では、視覚・言語のいずれも、その深層構造として、群構造が現れる。これは、いずれもベクトル空間(実数体)上に埋め込まれたデータが持つ特性を記述する方程式を、直接解くのではなく、群の世界に橋渡し(ガロア接続)することで、有限・離散(組み合わせ論)により問題を捉えなおしたことによる。連続的なベクトル空間は統計的モデルや距離(誤差)と相性がよく、実データを統計的に扱うために適しているが、データに潜在する規則性や代数構造を抽出するには向いていない。ガロアが体を群に変換して方程式の可解性を分析したように、本研究の理論では視覚・言語のいずれの領域でも、そのデータ構造に応じたガロア接続が現れる。本研究はこうした数理的アプローチにより、連続空間のみ、あるいは離散のみに閉じた従来の機械学習の枠組みを昇華させ、両方の世界を自在に行き交うことで見えてくる数理的な手法を提示する。

2. 研究成果

(1) 概要

主に、「視覚的オブジェクトの理解」および「言語構造の理解」の2つの領域に重心を置き、本研究を進めた。視覚的オブジェクトの理解においては、人が線画データから知覚する立体構造を説明する数理モデルを構築し、その数理モデルの認知心理学的な検証を行った。言語構造の理解においては、自然言語処理分野における近年の大規模言語モデルの発展を念頭に、一般に n -グラム言語モデルのもつ構造を数理的に解析し、 n -グラムに潜在する代数系の構造を明らかにした。

(2) 詳細

視覚的オブジェクトの理解: 線画データに潜在する群構造の解明

人の視知覚は、ネッカーキューブなどの同じデータに対しても複数の立体的な知覚像を生起させ、また類似のデータに対しては立体像を生起しないなど、未だ解明されていない面が多い。本研究は、視覚を単に画像を分類する情報処理としてではなく、群構造の最大化による曖昧性を解消する情報処理として捉えた数理モデルを提案した。このモデルにより、多様な線画に対して、それが立体に知覚される程度を定量的に予測でき、また対称性を保存する、あるい

は崩す変形を施すことにより、立体性を統制した画像を生成することができる。この画像生成法では、あたかも、平面線画を与えたときに、それから仮想的に推定される3次元空間における視点を変換したかのような画像が得られる。視覚の心理学等の分野では、長年、視覚的オブジェクトの認知的な表現として、立体ベースと平面ベースの2つの仮説に関する論争があった。これに対し、本研究の提示するモデルは、その両方の側面をもつと包括的な説明を与える。

言語構造の理解: 言語の代数構造の解明

深層学習時代に最も顕著な発展を遂げた分野の一つは自然言語処理(NLP)である。近年のNLPで主流となる技術は、単語や文を高次元ベクトル空間の点として表現する言語ベクトルモデルである。Word2vecモデル(Mikolov, 2013)に始まり、BERT、GPTs等の大規模言語モデルと呼ばれる一群の技術も、その基礎的なデータ構造として、単語等をベクトル表現したモデルを用いる。本研究では、なぜこうした言語モデルが、バイグラム等2次の統計量(2つの単語の間の共起関係)を基礎データとする学習によって構築可能かを説明する基礎理論の構築を行った。その結果、一定次数までのバイグラムやスキップバイグラム等の2次の統計量と、取りグラム統計量の間に同型が存在すること、またその条件を特定するに至った。この結果を一般化すれば、高次 n グラム統計量が、 $(n-1)$, $(n-2)$, ..., 2-グラム統計量へと分解できる可能性がある。言い換えれば、高次 n グラム統計量に潜在する言語構造を学習するのに、スキップバイグラム等の2次の統計量の集合が十分であり、現代の大規模言語モデルの成功を説明する基礎理論になりうる。また、興味深いことに、この理論構築の過程において、 n -グラム統計量が n 階テンソルで自然に表現できること、そしてその n 階テンソル積を、二項演算にもつ代数系が存在することも明らかになった。この結果は、一般の n グラム言語モデルが、低次の m グラムで表現できる条件を、その方程式に潜在する群構造の解析で特定できることを意味する。

3. 今後の展開

視覚的オブジェクトの理解に関しては、一定程度の理論の構築ができ、その認知心理学的な実証も行った。今後はこの成果を論文や書籍として出版するとともに、その周辺的・発展的な課題にも取り組んでいく。本研究で開発したモデルでは、実は暗に線画データに内在するグラフ構造を付与とした数理的な解析を行った。しかし、人の視覚系はこのグラフ構造も含めてデータから推定しているはずであり、またそうした理論の拡張は可能である。このような発展により、視覚的オブジェクトの重ね順や、補完などの、関連する視覚的な推論にまで提案モデルを一般化することが可能になるだろう。

言語構造の理解に関しては、現時点で特定した言語構造を捉えた代数系の全貌は未だ明らかではなく、未だ理論を整備する余地がある。開発されるべき理論は、確率論、テンソル代数、群論、二部グラフ理論、などにまたがり、全貌の記述はおそらく書籍1冊程度の分量を要する。したがって、成果の一部を論文等にまとめつつ、長期的なプロジェクトとして、全貌を記述する作業を進めていく予定である。言語代数ともいべきこの理論が完成すれば、「大規模言語モデルの中では何が起きているのか」、「なぜ単語の共起データの学習で意味的な構造が推定可能なのか」、などの本質的な問いに答えることが可能になるだろう。また、場合によっては、現代の巨大ブラックボックスである大規模言語モデルを解体し、“人間規模”の小さなデータ・小さな計算資源から効

率的に学習・理解するモデルを作り直すことが可能かもしれない。

4. 自己評価

以上の研究プロジェクトの大半は、主に群論を基礎とする視覚や言語データから構造を構築する認知処理に関する理論構築に充てられた。さきがけの領域の一員として、刺激を受け、切磋琢磨しながら、私がこれまでに取り組んできた意味認知において中心的な2つの課題に没頭できたのは幸せなことであった。表面的には出版物・論文としての成果は乏しいものの、私自身は、この約3年の進捗としては、十分に満足している。さきがけで得られた基礎的な成果を基に、そして認知科学や人工知能分野の次世代の情報処理の理論・技術を推し進めていけるであろうと確信している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 7件

1. Torii, T. & Hidaka, S. (2021). Completion of the infeasible actions of others: Goal inference by dynamical invariant. <i>Neural Computation</i> . 33 (11): 2996–3026.
2. Hidaka, S. & Torii, T. (2021). Designing bivariate auto-regressive timeseries with controlled Granger causality. <i>Entropy</i> . 23(6), 742.
3. 日高昇平 & 高橋康介 (2021). なぜネッカーキューブはあの立体に見えるのか. <i>認知科学</i> , 28(1), 25–38.

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	
	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	
2	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	
	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Maeda, A., Torii, T., & Hidaka, S. (accepted). Interpretability of Formal Concepts in Word Co-occurrence Matrices. First international joint conference on Conceptual Knowledge Structures (CONCEPTS 2024).
2. Maeda, A., Torii, T., & Hidaka, S. (accepted). Decomposing Co-occurrence Matrices into Interpretable Components as Formal Concepts. The 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL2024 Findings).
3. Hidaka, S., Kato, T. & Takuma, T. (2023). Two-stem Analogy Task is a Better Test for Relational Reasoning. The 45th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2023).
4. 前田晃弘, 鳥居拓馬 & 日高昇平. (2023). なぜ単語分散表現に代数的構造が現れるのか—二部グラフを用いた単語共起関係の類型化の提案—. 日本認知科学会第 40 回大会論文集.
5. 前田晃弘, 鳥居拓馬, 日高昇平. (2023). 単語ベクトルの平行四辺形を特徴づける図形距離, NLP2023 (Q11-6).
6. 日高昇平, 鳥居 拓馬, & 高橋康介. (2023). 対称性に基づく主観的な立体度の予測モデル: 立体的多面体の射影ではない線画による実験的検討, 第 17 回錯覚ワークショップアブストラクト集.
7. Torii, T., Maeda, A., & Hidaka, S. (2022). Embedding parallelepiped in co-occurrence matrix: simulation and empirical evidence. Joint Conference on Language Evolution (JCoLE2022).
8. Maeda, A., Torii, T., & Hidaka, S. (2022). Parallelogram structure of analogy in word co-occurrence matrix. NATURAL LOGIC MEETS MACHINE LEARNING III,(NaLoMa2022). August 11th, 2022.
9. Kanayama, H. & Hidaka, S. (2022). Impossible Solids of Your Choice: Designing any 3D Figure from a Given 2D Line Drawing, NICOGRAPH International 2022. (F4)
10. 日高昇平. (2022). 知覚的な構造補完による不可能立体の不可能性の説明, 日本認知科学会第 39 回大会論文集. (OS-05).
11. 高橋康介 & 日高昇平. (2022). 高次元空間構造の視覚的認識の可能性, 第 16 回錯覚ワークショップ.
12. 日高昇平 & 高橋康介. (2021). 符号化効率性によるネッカーキューブの立体知覚の計算論的説明. 日本認知科学会第 38 回大会論文集. P1-54.

オーガナイズドセッション等の開催

13. 鳥居拓馬・日高昇平 (2022) 知識・学習の転移可能性〜ヒトとAI〜(OS-16). 2022 年度人工知能学会全国大会(第 36 回)(OS16)
14. 日高昇平・高橋康介・鳥居拓馬 (2021) 認知バイアス・多重解釈性と AI (OS-02). 2021 年度人工知能学会全国大会(第 35 回).

受賞

1. 委員特別賞 (言語処理学会, NLP2023) (前田晃弘, 鳥居拓馬, 日高昇平. (2023). 単語ベクトルの平行四辺形を特徴づける図形距離, NLP2023 (Q11-6).
2. 論文誌「認知科学」論文賞 (於: 日本認知科学会第 39 回大会, 2022 年 9 月 9 日; 高橋康介氏との共同研究の発表に対して). 受賞論文: 日高 昇平 & 高橋 康介(2022). ネットワークキューブはなぜあの立体に見えるのか. 認知科学, 28(1), 25-38.

プレスリリース

1. 失敗する他者の行動からその意図を推定する人工知能技術を開発. JAIST. ([Press release](#))([link](#))

メディア報道

2. 「失敗から意図を察知〜“気の利いた”A I へ一歩」, 北國新聞 (2021 年 11 月 3 日, 31 面).
3. 2021/11/05 マイナビニュース 「失敗する他者の行動から、その意図を推定する AI 技術を開発 JAIST」 ([link](#))
4. 2021/11/05 Yahoo ニュース 「困っている人を判断・・・“気が利く A I ” の技術を研究」 ([link](#))
5. 2021/11/04 北陸朝日放送 スーパー J チャンネル 「“気が利く A I ”の技術〜困っている人の動き判断」 ([YouTube](#))