

令和 7 年 6 月 17 日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2023～2024

課題番号：23K18497

研究課題名（和文）知識ネットワークの階層的構造の解明と階層的類推推論の実現

研究課題名（英文）Hierarchical structure of knowledge networks and hierarchical analogical reasoning

研究代表者

高橋 達二（Takahashi, Tatsuji）

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：00514514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：現在の生成AIは能力の向上を見せており、推論機能もあるが、特に関係のない概念の間の、遠距離の対応づけである、類推推論については、学習データに含まれていない場合には対応できない。類推推論の理解は認知科学の課題であり、その実装は工学的な価値も高い。そこで本研究では、類推推論の理解と実装、特に階層的なデータ構造で自ら「粒度」も探索して類推を行うアルゴリズムの実現を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

階層的ネットワークとして感情語の間の類似性、関連性、遷移的關係についての精細なデータ（重み付き有向完全グラフ）を取得・分析した。従来仮定されてきた構造の妥当性の検討が可能となったほか、感情空間の構造が明らかにできる。また、不定自然変換理論（TINT）の新しいアルゴリズムを与えた。特に「蝶は踊り子である」のような比喻を類推的に理解する実験とシミュレーションで、従来よりも優れた結果を得た。

研究成果の概要（英文）：Current generative AI systems demonstrate improving capabilities and possess reasoning functions, but they cannot handle analogical reasoning yet; the long-distance mapping between seemingly unrelated concepts; when similar patterns are not present in their training data. Understanding analogical reasoning remains a challenge in cognitive science, and its implementation holds significant engineering value. Therefore, this research aims to advance both the understanding and implementation of analogical reasoning, particularly focusing on developing algorithms that can autonomously explore appropriate levels of 'granularity' within hierarchical data structures to perform analogical inference.

研究分野：認知科学

キーワード：類推推論 マルコフ連鎖モジュール分解 不定自然変換理論 自然変換 感情語 比喻理解 階層的クラスタリング Plutchikの感情の輪

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在の生成 AI は、急激な能力の向上を見せている。言語や画像、音声や動画などの構造を大規模なデータから圧縮し、プロンプトに応じて様々な出力が可能である。しかし、従来特に関係のない概念の間の、遠距離の対応づけである、類推推論については、学習データに含まれていない場合には対応できない。類推推論の理解は認知科学の課題であり、その実装は工学的な価値も高い。

従来の類推推論のアルゴリズムは大別すると二種に分かれる。研究者が作り込んだ知識構造の上で力ずくの探索をするアルゴリズム（構造写像理論に基づく構造写像エンジン；SMT）(Falkenhainer et al., 1989) と、知識構造を自動処理できるが類推能力の限られたアルゴリズム（関係の変換を伴うベイズ的類推；BART）(Lu et al., 2019) である。SMT は、手作業によるデータの前処理やタスクの準備に支えられた上で、総当たりの組み合わせ探索を行う。前者のため工学的アルゴリズムとしての価値は低く、後者のため認知モデルとしては現実性がない。BART は、word2vec のような単語埋め込みモデルと比較できるようなタイプと複雑性の類推的推論のみを適用範囲としており、人間が電気の流れを水流に喩えて理解するような実際の類推推論には対応できない。

そこで本研究では、不定自然変換理論（TINT）(Fuyama et al., 2020) に着目し、類推推論の理解を深め、また新しい類推アルゴリズムの実装を目指す。不定自然変換理論は、圏論の自然変換の概念に基づく、人間の比喩理解のプロセスの数学的モデルである。具体的には、重み付きの有向ネットワークがあるとき、その上である比喩、例えば「蝶は踊り子である」を理解しようとする際の、蝶から連想する他の諸々のイメージ（蝶の属性を含む）から、踊り子から連想する他の諸々のイメージ（踊り子の属性を含む）への対応づけを構築しようとするものである。

TINT については、基本的な実験により動作のためのデータが収集され、また予備的な計算論的実装も与えられているが（池田ほか 2021）、データ、計算論的実装、評価のそれぞれで不十分であった。そこで、より大きな規模で多様なデータの収集し、アルゴリズムとしての実装を元々の理論と整合的な形で進め、また認知的に妥当な形でアルゴリズムの出力を評価する、ということが、課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、TINT の実験的・計算論的な実装と評価により、工学的に価値があり、認知的に妥当性のある類推推論の新しいアルゴリズムを構築することを目的とする。これにより、類推推論の認知科学的研究を進め、また類推推論の計算論的実装を目指す。

またその際、類推推論の「粒度」の問題にも着目する。類推推論は、二つの知識領域の中での構造のある種の類似性に基づいた写像関係の探索・構築と言える。このとき、その構造的な類似性がどのレベルで存在するのかについて考慮することが必要である。この点についての考慮も目的の一つである。具体的には、知識領域を階層的に組織化することで、複数の解像度の知識の組織化を同時に扱う。これにより、「粒度合わせ」の問題を解決する。

3. 研究の方法

類推推論の「粒度」の問題であるが、たとえば知識領域 A の構造がとて精細になっており、他方で知識領域 B の構造はかなり粗いという場合には、たまたま A の精細な構造と B の粗い構造の間に構造的類似性がなければ、類推的關係を構築することができない。

このような問題はどのような類推推論にも存在する。つまり、類推推論は、構造的類似性を探索・構築するに際して、どのレベル（粒度・解像度）で知識領域を探索し組織化するのか、という問題を暗に含んでいる。これにより、類推的探索はより困難なものになってしまう。

これに間して、マルコフ連鎖モジュール分解 (MDMC) を用いる (Okamoto & Qiu, 2022)。これは、ページランクとマルコフ連鎖によりネットワーク構造を階層的にクラスタリングする手法である。特に、その階層性（精細か粗いか）についてパラメータにより連続的に設定でき、またクラスターへの所属も程度の問題を確率的に考慮できる点に、高い一般性がある。これをもとに、知識ネットワークの階層的構造の解明に向けて、実験によるデータ収集と分析を行った。

データとしては具体的には、Plutchik らによりネットワークの構造に理論的な 3 次元的循環構造が仮定されている、感情語のネットワークを三種類オンライン実験から構築し、その階層性を分析した。その三種類は、感情語の間の類似性、関連性、遷移的關係であり、これ自体貴重なデータである。このデータの分析により、「プルチックの感情の輪」と呼ばれる構造が、おおむね取得したネットワークデータの階層的クラスタリングの結果と一致し、しかし部分的に逸脱することが分かった。実験は日本語で日本人を対象に行ったため、この点については文化差も含めた分析が必要な可能性がある。

また、TINT に関しては、従来の実装の問題であった対応付け探索のグリーディ性（決定論的に、最良と思える候補を選んでしまう）について、ソフトマックス法による確率的な対応付けの定式化により解決した。他にも計算論的実装をより適切なものにブラッシュアップした他、TINT による対応付けの適切な評価指標を考案した。これにより、TINT による類推推論の結果が、(1) 人間の比喩理解のデータにフィットすること、(2) より広範な「うまい」対応付けであること、そして (3) 対応付けに新奇性があること、の 3 点から評価した。最後の新奇性については、単語のベクトル埋め込みを用いて、コサイン類似度が低いこととして定義した。その結果、様々な候補アルゴリズムの結果の比較により、TINT の理論に最も忠実なアルゴリズムが、最も高いデータフィット、最も広範な対応付け、そして最も新奇性の高い類推、を可能とすることを示した。

4 . 研究成果

感情語の MDMC による階層的分析和、TINT による比喩理解・類推推論の実装についてはそれぞれ論文を投稿中である。この他、社会学習（社会的強化学習）において、TINT の根本的なアイデア（ある関係の設定により、それに導かれる対応付けを実現し、それをベースとして新奇な対応付けを探索・構築する）を用いて、「社会的満足化」というモデルを提案した (Uragami et al., 2024)。また、MDMC のアイデア（確率的な関係の上でのシミュレーション的な計算によるクラスタリングという、より大きい関係の構築）を用いて、人間がどのように因果関係を共起情報から帰納的に構築するのかについて、期間内に論文を出版した (Higuchi et al., 2025)。これら自体が類推推論の実例となっている。

文献

1. Falkenhainer, B., Forbus, K. D., & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine: Algorithm and examples. *Artificial Intelligence*, 41(1), 1–63. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(89\)90077-5](https://doi.org/10.1016/0004-3702(89)90077-5)
2. Lu, H., Wu, Y. N., & Holyoak, K. J. (2019). Emergence of analogy from relation learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(10), 4176–4181. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814779116>
3. Fuyama, M., Saigo, H., & Takahashi, T. (2020). A category theoretic approach to metaphor comprehension: Theory of indeterminate natural transformation. *Biosystems*, 197(March), 104213. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2020.104213>
4. 池田駿介, 布山美慕, 西郷甲矢人, & 高橋達二. (2021). 不定自然変換理論に基づく比喩理解モデルの計算論的実装の試み. *認知科学*, 28(1), 39–56. <https://doi.org/10.11225/cs.2020.065>
5. Okamoto, H., & Qiu, X. (2022). Detecting hierarchical organization of pervasive communities by modular decomposition of Markov chain. *Scientific Reports*, 12(1), 20211. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24567-x>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Uragami Daisuke, Sonota Noriaki, Takahashi Tatsuji	4. 巻 243
2. 論文標題 Social satisficing: Multi-agent reinforcement learning with satisficing agents	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 BioSystems	6. 最初と最後の頁 105276 ~ 105276
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.biosystems.2024.105276	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Higuchi Kohki, Shirakawa Tomohiro, Ichino Hiroto, Takahashi Tatsuji	4. 巻 15
2. 論文標題 A dependence detection heuristic in causal induction to handle nonbinary variables	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11638
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-025-91051-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岩城 史享, 横須賀 天臣, 高橋 達二
2. 発表標題 感情語類似度ネットワークの偏在的コミュニティ抽出による解析
3. 学会等名 人工知能学会全国大会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩城 史享, 高橋 達二
2. 発表標題 感情語の類似性と連想性の解析による感情モデルの構造の検討
3. 学会等名 2023年度日本認知科学会第40回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Iwaki, F., & Takahashi, T.
2. 発表標題 Investigating the structure of emotions by analyzing similarity and association of emotion words
3. 学会等名 Proceedings of AROB-ISBC-SWARM 2024 (GS9-4) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 洋 (Okamoto Hiroshi) (00374067)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任研究員 (12601)	
研究分担者	布山 美慕 (Fuyama Miho) (30797311)	立命館大学・文学部・准教授 (34315)	
研究分担者	西郷 甲矢人 (Saigo Hayato) (80615154)	長浜バイオ大学・バイオサイエンス学部・教授 (34204)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------