

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21812

研究課題名（和文）非公理的論理と潜在空間表象に基づく創造的記号処理モデル

研究課題名（英文）Creative Symbol Processing Model based on Non-Axiomatic Logic and Hidden Space Representation

研究代表者

船越 孝太郎（Funakoshi, Kotaro）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：30839311

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）：Wangの非公理的論理（NAL）を批判的に検討し、その良い性質を保存しつつ、深層学習技術に基づく潜在空間意味表現（多次元ベクトル）と統合するための方向性を考察した。ついで、その考察に基づいて考案した非公理的項論理（NATL）の構文論を人工知能学会論文誌に提出し、採録された。残念ながら、推論モデルの有用性の定量的な実証には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の着想点である非公理的論理を、深層学習を用いる近年の研究の流れと添う方向に大きく発展させた。提案した非公理的項論理は、人間の日常的推論・思考を計算機上に再現するための、意味と不可分な形式的表示手段の一案を提示したものである。研究期間中の外部技術（特に大規模言語モデル）の進展により、当初目指した役割が一部消失してしまったことは確かである。しかしながら、深層学習に基づく大規模言語モデルは依然としてブラックボックス的である。本研究の成果は、人間の思考の形式的表示とその経験的な運用を可能にするものとして、モデルブラックボックス性の解消や、人間心理の説明モデルとしての役割に貢献しうると考える。

研究成果の概要（英文）：We critically examined Wang's Non-Axiomatic Logic (NAL) and considered the direction for integrating it with latent space semantic representation (multidimensional vector) based on deep learning technology while preserving its good properties. We then submitted a syntax theory for Non-Axiomatic Term Logic (NATL) based on the considerations to the Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, which was accepted. Unfortunately, We were unable to demonstrate the usefulness of the inference model quantitatively.

研究分野：自然言語処理，人工知能，ヒューマンマシンインタラクション

キーワード：創造的推論 非公理的項論理 アブダクション 議論 メタファー アナロジー

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

Toulmin によれば論理の捉え方には、以下の4つがある。すなわち(1) 心理的立場：論理とは個人の内の思考の法則 (laws of thought) に関するものである。(2) 社会的立場：論理とは個人と世代を超えて親や教師から伝達される推論の習慣 (habits of inference) に関するものである。(3) 技術的立場：論理とは堅実な論証を行うための技巧 (art of argumentation) に関するものである。(4) 数理的立場：論理とは議論の内容によらずその形式 (form of argument) の正しさに関するものである。これまでに、(1)~(3)に関わる人工知能研究の多くの課題に対して、(4)の立場で開発された命題論理、述語論理が利用されてきた。しかしウィトゲンシュタインによれば、数理論理においては『現実の事態を表現することについては全く考慮されていない』。これまでも少数ながら、述語論理に代わる独自の論理・推論法が、現代においても時折提案されてきた。

一方で、深層学習技術の発展により、自然言語処理は大きな発展を遂げてきていたが、論理に関してはまだ人には及ばない水準にあった。本研究の出発点は、近年の深層学習による情報処理技術との融合により、(1)~(3)に関わる人間の日常的推論に対し、項論理とよばれる伝統論理が有用性を示すとする仮定である。

2. 研究の目的

本研究ではアリストテレスの項論理を拡張した非公理的論理[Wang, 2013]という枠組みの上で、アナロジーやアブダクションといった推論能力を基盤とした人間の認知的・創造的な記号処理モデルを構築することを目的とした。人間的な思考と親和性が高いと思われる分散系としての項論理を骨格とし、データから暗黙的・経験的に構成される多次元空間内における連続系としての意味表象に基づく情報処理技術を血肉とすることで、人間が行うような日常的推論、創造的な記号処理、記号を介した文化学習を行うシステムの実現を目指した。

3. 研究の方法

非公理的論理の構文論と意味論を拡張・修正し、それに基づいて推論モデルを深層学習の枠組みで実装する。推論制御アルゴリズム自体は暗黙知的に訓練されるが、それによって実施される推論は、データから自動獲得したタスク依存の記号的知識と、非公理的論理理論が用意した汎用推論規則に基づいて明示的に行われる。実装したモデルの性能・有効性実証は、研究分担者が持つ調理ドメインのデータを用い、言語表現のレシピからグラフ構造化された調理プランを生成するタスクで検証を行う。この際、テキストデータから得られる分散意味表現に加え、動画から調理状況や状態変化の情報も取り込んだ調理行為の潜在空間表象を構築しシステムに与える。

4. 研究成果

まず Wang の非公理的論理 (NAL) [Wang, 2023]を批判的に検討し、その良い性質を保存しつつ、深層学習技術に基づく潜在空間意味表現 (多次元ベクトル) と統合するための方向性を考察した[船越 2021]。ついで、その考察に基づいて考案した非公理的項論理 (NATL) の構文論を人工知能学会論文誌に提出した[船越 2022]。

提案した構文論に基づき、推移率に基づく比較的単純と思われるタスクで、意味表現とそれにもとづく推論モデルの学習を試みたが、残念ながら、研究期間内に十分な成果を得るに至らなかった。その間に、驚異的な推論能力を持つ大規模言語モデル GPT-3.5 が公開され、本研究が前提としていた背景が大きく更新されたため、本研究の進め方についても再検討が迫られた。一方で、上記論文を通じて、NAL の提唱者である P. Wang と親交を結び、研究議論をする機会を得た。大規模言語モデルの推論能力は、以前として学習した表層的パターンに強く依存している部分が見られ、十分ではないことも多方面から指摘されており[Arkoudas, 2023; Mondorf & Plank, 2024]、それに対して非公理的項論理をはじめとする記号推論に基づくアプローチがどのような貢献をなし得るかを明らかにすることが今後の課題である。また、研究全体としては、分担者を中心に、関連するいくつかの他の成果にも部分的に貢献したが、ここでは割愛する。

以下に、提出した非公理的項論理 (NATL) の構文論の概略と推論 (論理の適用例) を紹介する。

【項表示言語】

項：項 (term) は、今まさに知覚されている経験の認識 (例えば、眼前の1つのりんご、あるいはそのりんごが木から落下する様子)、それがエピソード化された記憶、エピソード記憶の集積から抽出・抽象化された意味記憶 (いわゆる概念、例えば一般的な意味としての「りんご」や「落下」) など、人間の心理的処理によって1つのまとまりをもって意識の中に立ち現れるものを表す。

複合項：複数の項の間の関係、または単独の項に関する2次的な認識を表現する構成項を複合項 (compound term) とよぶ。自然言語において一般動詞を用いて表現される「事態」は、(eat, sheep, grass) のように、いわゆる述語項構造と同じ要領で、複合項として表示できる。

陳述項：陳述項 (statement term) S は、2 つの任意の項を繋辞でつないだ構成項である。すなわち $S : (T1 \quad T2)$ 。 $T1$ を S の左項、 $T2$ を右項とよぶ。陳述項は、NAL における陳述におよそ対応するものであり、項に対する分類 (categorization) の認識を表す。

連関項：連関項 (linkage term) L は、NAL において高階陳述 (higher-order statement) あるいは含意陳述 (implication statement) とよぶものに対応する。陳述項同様、2 項を要素項としてとる構成項である。

【非公理的項論理】

項表示言語を用いて、 C, S, L の 3 種類の項のクラスに対して、5 つの種類の推論を認める論理である。意味論はモデル理論的意味論ではなく、証明理論的意味論を指向しているので、正しい推論かどうかは、(高い真理値を持って) 上の 5 つの導出により前提から結論を導出可能かどうかと同義になる。ただし、特定の推論が高い真理値を持つかどうかは、推論モデルの経験に依存する。従って、その評価は原則として経験的評価(人が正解を定めたデータセットを基準とした性能評価)でしか行えない。

表 1 項の種別と対応関係

項表示言語		非公理的項論理
項	基本項	C 事物項
	構成項	S 陳述項
		L 論理項
変数項		

$S_1 : human \rightarrow animal$ $S_7 : these-beans \rightarrow white$
 $S_2 : animal \rightarrow mammal$ $S_8 : beans-from-the-bag \rightarrow white$
 $S_3 : human \rightarrow mammal$ $S_9 : these-beans \rightarrow beans-from-the-bag$

$S_1 : polar-bear \rightarrow white$ $S_1 : polar-bear \rightarrow white$
 $C_1 : (like, John, white)$ $L_1 : (x \rightarrow white) \Rightarrow (like, John, x)$
 $C_2 : (like, John, polar-bear)$ $C_2 : (like, John, polar-bear)$
 $C_1 : (like, John, polar-bear)$ $L_1 : (like, x, polar-bear) \Rightarrow (like, x, penguin)$
 $L_1 : (like, x, polar-bear) \Rightarrow (like, x, penguin)$ $L_2 : (like, y, penguin) \Rightarrow (like, y, dolphin)$
 $C_2 : (like, John, penguin)$ $L_3 : (like, x, polar-bear) \Rightarrow (like, x, dolphin)$

【適用例】

前提：雨が降っている。雨に濡れるのは嫌だ。から、結論：傘を持っていく を導出する。

前提は右の通り： $S_D : weather-of-the-day \rightarrow raining$
 $S_W : getting-wet \rightarrow bad$

ここに右の通りの常識を仮定する： $L_1 : (causal-and, x, bad) \Rightarrow (avoid, people, x)$
 $L_2 : (weather-of-the-day \rightarrow raining) \Rightarrow getting-wet$
 $L_3 : (have, x, umbrella) \Rightarrow (avoid, x, getting-wet)$

推論結果： $\{S_D, L_2\} \vdash B_1 : getting-wet$
 $\{S_W, B_1\} \vdash B_2 : bad$
 $\{B_1, B_2\} \vdash C_1 : (causal-and, B_1, B_2)$
 $\{C_1, L_1\} \vdash C_2 : (avoid, people, getting-wet)$
 $\{C_2, L_3\} \vdash C_3 : (have, people, umbrella)$

(have, people, umbrella) は、この文脈では、傘を持っていく (傘を持つ) を意味する。

< 引用文献 >

Wang, P: Non-Axiomatic Logic, World Scientific (2013)
 船越 孝太郎：非公理的項論理に基づく推論システムに向けた検討, 人工知能学会第二種研究会資料, 第 SIG-AGI-017-04 巻 (2021)
 船越 孝太郎, 「非公理的項論理：認知的記号推論の計算理論」, 人工知能学会論文誌, 第 37 巻 (2022)
 Arkoudas, K. GPT-4 Can't Reason, doi:10.20944/preprints202308.0148.v2, (2023)
 Mondorf, P. & Plank, B. Beyond Accuracy: Evaluating the Reasoning Behavior of Large Language Models - A Survey, arXiv, (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 船越 孝太郎	4. 巻 37
2. 論文標題 非公理的項論理：認知的記号推論の計算理論	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 人工知能学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1527/tjsai.37-6_C-M11	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 寺尾光一郎, 岩橋直人
2. 発表標題 コレクティブLLMsのマイクロマクロリンクの多様性
3. 学会等名 人工知能学会 第100回 言語・音声理解と対話処理研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 寺尾光一郎, 岩橋直人
2. 発表標題 コレクティブLLMダイナミクスの数理分析
3. 学会等名 人工知能学会 第100回 言語・音声理解と対話処理研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩橋直人, 相良陸成, 田口亮, 船越孝太郎
2. 発表標題 動的計画共有と共同運動主体感モデルに基づく身体的共同行為における調整のための会話の分析
3. 学会等名 人工知能学会 第99回 言語・音声理解と対話処理研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩橋直人, 笹倉晴景, 古家祐介, 櫻本幸八, 趙敏廷, 樟本千里, 澤田陽一, 坂野純子
2. 発表標題 協力におけるパーソナリティと認知と行動: 個人内および個人分析
3. 学会等名 日本認知科学会第40会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船越 孝太郎
2. 発表標題 非公理的項論理に基づく推論システムに向けた検討
3. 学会等名 第17回人工知能学会汎用人工知能研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村太一, 橋本敦史, 牛久祥孝, 亀甲博貴, 森信介
2. 発表標題 手順構造を考慮した作業映像からの手順書生成
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 迫田航次郎, 西村太一, 森信介
2. 発表標題 手順構造を考慮した手順書からの作業画像検索
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会
4. 発表年 2021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	森 信介 (Mori Shinsuke) (90456773)	京都大学・学術情報メディアセンター・教授 (14301)	
研究 分担者	岩橋 直人 (Iwahashi Naoto) (90394999)	岡山県立大学・情報工学部・教授 (25301)	

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
---------	---------