

令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03288

研究課題名（和文）テンソル空間における巨大知識グラフのための高次推論技術の開発

研究課題名（英文）Development of advanced inference technologies for huge knowledge graphs in tensor spaces

研究代表者

坂間 千秋（Sakama, Chiaki）

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：20273873

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、知識グラフのような大規模知識ベースにおいて人工知能における高次推論を高速計算するために、従来の定理証明手法とは異なる効率的な新しい計算手法を提案した。具体的には、論理プログラムで記述された知識ベースをテンソル空間における代数表現に変換し、演繹推論、デフォルト推論、アブダクションを線形代数的に計算するための基礎理論を構築した。次に本システムを実装し、人工データ及び実データを用いて実験評価を行った。さらに計算高速化のための最適化技術の開発を行い、実験検証でその有効性を確認した。提案手法は GPU を活用した並列代数計算により、記号推論のスケーラビリティを飛躍的に向上させる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニューラルネットワーク(NN)による機械学習の結果に説明可能性を与え信頼性を向上させるための手法として、NNと記号処理を融合したニューロシンボリックAIが提案されている。しかし、従来の記号処理計算を大規模データに適用する場合、計算効率がボトルネックとなる問題があった。本研究で提案したテンソル空間における高次推論技術は、NNで扱われているような高次元のベクトル表現されたデータを使った推論を線形代数的に計算することを可能にする。その学術的意義は、大規模データからのスケーラブルで高速な推論を実現するための新しい計算技術の提案であり、社会的意義はNNと記号処理の融合に向けた要素技術としての貢献である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a new efficient computation method for advanced reasoning in artificial intelligence on a large-scale knowledge base such as a knowledge graph, which is different from conventional theorem proving methods. More precisely, we developed a theory for converting a knowledge base represented as a logic program into an algebraic representation in tensor space, and computing deductive inference, default inference, and abduction using linear algebra. Next we implemented the system and conducted experimental evaluations using both artificial and real data. Furthermore, we developed optimization techniques for computational speed-up and confirmed their effectiveness in experimental verification. The proposed method has the potential to dramatically improve the scalability of symbolic reasoning through parallel algebraic computation using GPUs.

研究分野：人工知能

キーワード：テンソル空間 線形代数計算 論理プログラミング 演繹推論 デフォルト推論 アブダクション

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 実世界の事実関係を集めた巨大知識データベースとしての知識グラフがインターネット上のデータを利用して構築され、その基盤技術として行列やテンソルなどの線形代数によるデータ表現、あるいは自然言語処理における **Word2Vector** に見られる記号のベクトル化などが注目されていた。一方、巨大知識グラフから有用な情報を抽出するための演繹推論や不完全知識からのデフォルト推論、事実の説明を求めるアブダクションといった高次の推論技術の研究は世界的にもあまり進展していなかった。

(2) 巨大知識グラフにおける推論技術が進展しない一因として、これらの推論を従来の定理証明的手法で実装すると計算量が膨大になるという問題が挙げられる。**AI**分野で長年研究されてきた高次推論技術を巨大知識ベース上で実現するためには、従来の定理証明的技法とは全く異なるスケーラブルで効率的な新しい計算手法の開発が必要であった。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、巨大知識グラフにおいて高次推論を実現するために、テンソル空間における線形代数的推論計算とその高速化のための技術開発を行うことである。

(2) **AI**の推論計算に線形代数的アプローチをとる理由は少なくとも**3**つある。第一に線形代数は科学技術の多方面において核となる計算技術で応用範囲も広く、線形代数計算と記号処理の統合は**AI**における挑戦的課題の一つと考えられていること。第二に線形代数計算は**Web**スケールの記号データを扱う潜在能力があり、線形代数を使って巨大関係知識ベースをスケーラブルに計算するための研究が世界レベルで開始されていること。第三に線形代数的手法を使って高次推論を計算することにより、並列計算技術や次元削減による近似計算が可能になり**GPU**などのハードウェア利用によりさらなる高速化が期待できることである。

## 3. 研究の方法

(1) 2項関係で表された関係知識は隣接行列で表現され、関係データベース上の演算を線形空間で操作できることが知られている。この手法を発展させ、関係データベースに演繹推論機能を付加した言語である **Datalog** の線形代数的計算の開発を行い、ベクトル空間上で2項関係に基づくアブダクションを実現する。

(2) 非単調なデフォルト推論を実現するために、**Datalog** に否定知識を記述した一般論理プログラムをテンソル空間で記述し、そこからのデフォルト推論やアブダクションを線形代数的に計算する手法を開発する。

(3) テンソル空間において線形代数計算の計算量を削減するための最適化手法を導入し、推論計算を高速化するための技術を開発する。その後、人工データや実データを用いた実験評価を行い、既存システムと比較することでその効果を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 演繹推論を代数的に計算するために、選言付論理プログラムを3次元テンソル空間で表現し、極小モデルを線形代数的に計算する手法を開発した。また、一般論理プログラムの **supported** モデルと **stable** モデルを線形代数的に計算する手法を導入した。本研究の成果は、国際会議 (**ICAART 2020**)、及びジャーナル論文 (**Annals of Mathematics in AI, vol.89, 2021**) で発表した。

(2) 論理プログラムの線形代数計算アルゴリズムを実装し、人工データと実データを使って性能評価を行った。また計算効率化のための部分計算と行列縮約の手法を導入し、パフォーマンスが向上することを実験により検証した。本研究の成果は、国際会議 (**MIWAI 2018, ASPOCP2018**)、及びジャーナル論文 (**Journal of Logic and Computation, vol.31, 2021**) で発表した。

(3) 観測事象から説明を計算するために、線形空間で論理プログラムの2項関係に基づくアブダクションの手法を開発した。また、知識グラフなどの巨大知識ベース上で実現するための計算手法を導入し、ルール発見や関係の学習が行われることを実験により確認した。本研究の成果は、国際会議(IJCAI 2018)で発表した。

(4) スパース行列の効率的な計算手法を利用して、確定論理プログラムの最小モデルを高速に計算する方法を開発した。スパース行列手法を使うことで、時間・メモリを消費していた問題におけるパフォーマンスの向上を確認し、論理プログラムのモデル計算として用いられているASPソルバー **clingo** を凌ぐ性能を発揮した。本研究の成果は、国際会議(ICLP 2020)及びジャーナル論文(New Generation Computing, vol.40, 2022)で発表した。

(5) 確定論理プログラムにおけるアブダクションを転置行列を使って計算する手法を導入し、部分計算やスパース行列などの最適化手法と組み合わせることにより、既存のアルゴリズムと比べて高いパフォーマンスが得られることを実験により検証した。本研究の成果は、国際会議(ICTAI 2021, PADL2023)で発表し、ジャーナル論文として投稿中である。

(6) 論理プログラムに関わるスケーラブル且つ厳密なアブダクションをテンソル空間に於けるコスト最小化問題として定式化し、SAT問題と知識グラフに適用して実験的に効果を確認した。また解集合確率モデリングも同様に定式化し、実装実験を行った。本研究の成果は、国際会議(NeSy 2019, DeLBP 2019)で発表した。

(7) テンソル空間における推論計算を高速化するために、テンソル分解法を量子化し知識グラフを低次元のバイナリベクトル空間へと埋め込む手法を開発した。この結果、低次元の線形空間で推論を行うモデルの省メモリ化、及び高速化が実現され、バイナリ埋め込みモデルが任意の知識グラフデータベースを再構成できることが保証された。また、量子化を介さずにバイナリベクトル空間で直接学習を行う手法を考案した。本研究の成果は国際会議(ECIR 2019, EMNLP2020)、及びジャーナル論文(IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol.35, 2023)で発表した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chiaki Sakama, Katsumi Inoue, Taisuke Sato	4. 巻 89
2. 論文標題 Logic programming in tensor spaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Mathematics and AI	6. 最初と最後の頁 1133-1153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10472-021-09767-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hien D Nguyen, Chiaki Sakama, Taisuke Sato, Katsumi Inoue	4. 巻 31
2. 論文標題 An efficient reasoning method on logic programming using partial evaluation in vector spaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Logic and Computation	6. 最初と最後の頁 1298-1316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/logcom/exab010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nguyen Tuan Quoc, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama	4. 巻 40
2. 論文標題 Enhancing linear algebraic computation of logic programs using sparse representation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 225-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-021-00142-2	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 該当する
1. 著者名 Katsuhiko Hayashi, Koki Kishimoto, Masashi Shimbo	4. 巻 35
2. 論文標題 Binarized embeddings for fast, space-efficient knowledge graph completion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE)	6. 最初と最後の頁 141-153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TKDE.2021.3075070	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Tuan Nguyen Quoc, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama
2. 発表標題 Linear Algebraic Computation of Propositional Horn Abduction
3. 学会等名 IEEE 33rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tuan Nguyen Quoc, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama
2. 発表標題 Enhancing Linear Algebraic Computation of Logic Programs Using Sparse Representation
3. 学会等名 36th International Conference on Logic Programming (ICLP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taisuke Sato, Ryosuke Kojima
2. 発表標題 Logical inference as cost minimization in vector spaces
3. 学会等名 4th International Workshop on Declarative Learning Based Programming (DeLBP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Kojima, Taisuke Sato
2. 発表標題 T-PRISM: A tensorized logic programming language for data modeling
3. 学会等名 14th International Workshop on Neural-Symbolic Learning and Reasoning (NeSy) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taisuke Sato, Chiaki Sakama, Katsumi Inoue
2. 発表標題 From 3-valued semantics to supported model computation for logic programs in vector spaces
3. 学会等名 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Kishimoto, Katsuhiko Hayashi, Genki Akai, Masashi Shimbo, Kazunori Komatani
2. 発表標題 Binarized Knowledge Graph Embeddings
3. 学会等名 41st European Conference on Information Retrieval (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Sakama, Hien D. Nguyen, Taisuke Sato, Katsumi Inoue
2. 発表標題 Partial Evaluation of Logic Programs in Vector Spaces
3. 学会等名 11th International Workshop on Answer Set Programming and Other Computing Paradigms (ASPOCP 2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hien D. Nguyen, Chiaki Sakama, Taisuke Sato, Katsumi Inoue
2. 発表標題 Computing Logic Programming Semantics in Linear Algebra
3. 学会等名 12th International Conference on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence (MIWAI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taisuke Sato, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama
2. 発表標題 Abducing Relations in Continuous Spaces
3. 学会等名 Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tuan Nguyen Quoc, Katsumi Inoue, and Chiaki Sakama
2. 発表標題 Linear Algebraic Abduction with Partial Evaluation
3. 学会等名 25th International Symposium on Practical Aspects of Declarative Languages (PADL 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuhiko Hayashi, Koki Kishimoto, Masashi Shimbo
2. 発表標題 A Greedy Bit-flip Training Algorithm for Binarized Knowledge Graph Embeddings
3. 学会等名 The 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Lorenzo Magnani (ed.)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 1948
3. 書名 Handbook of Abductive Cognition (分担執筆)	

〔産業財産権〕

[ その他 ]

http://web.wakayama-u.ac.jp/~sakama/pub.html

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	井上 克巳  (Inoue Katsumi)  (10252321)	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授   (62615)	
研究分担者	林 克彦  (Hayashi Katsuhiko)  (50725794)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教   (12601)	

	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
研究協力者	佐藤 泰介  (Sato Taisuke)		
研究協力者	グエン ヒエン  (Nguyen Hien)	ベトナム国家大学・Faculty of Computer Science・Senior Lecturer	
研究協力者	グエン トゥアン  (Nguyen Tuan)  (10978696)	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・Project Researcher   (62615)	



6. 研究組織（つづき）

	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
連携研究者	新保 仁  (Shinbo Masashi)  (90311589)	奈良先端科学技術大・情報科学研究科・准教授    (14603)	

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		
ベトナム	University of Information Technology	Vietnam National University	