

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11909

研究課題名(和文)GPUを用いた帰納論理プログラミングの高速化

研究課題名(英文)Accelerating Inductive Logic Programming Using GPU

研究代表者

滝本 宗宏 (Takimoto, Munehiro)

東京理科大学・理工学部情報科学科・教授

研究者番号：00318205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：説明可能AIの一つである帰納論理プログラミング(ILP)は、正例と負例からなる訓練データからその訓練データを説明する仮説を探索する。仮説の探索過程では、候補仮説を生成し、正例を導出し、負例を導出しないか検査することを繰り返す。本研究では、この検査をSQLに変換し、GPU上のRDBMSで並列実行することを実現した。また、複数の候補仮説をまとめて検査することによって、RDBMS実行のオーバーヘッドを低減し、6倍の高速化に成功した。さらに、仮説探索をメタヒューリスティクスである群知能の一種である粒子群最適化(PSO)で行う手法を実現し、2倍の高速化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在広く利用されているAIの深層学習は、学習内容がわからないために、分析ツールとして利用することは困難である。これに対して、ILPは、その学習内容を完璧に説明でき、新しいサンプルに対する推論も、推論過程を確認することができる。本研究は、説明可能AIであるILPを、並列化とメタヒューリスティクス化によって高速化し、ビッグデータに適用できるようにした。今後、本AIシステムを、がんの臨床データと遺伝子データに適用することによって、予後や再発予想を行えるモデルを作成する予定である。

研究成果の概要(英文)：Inductive Logic Programming (ILP), which is one of explainable A.I.s., generates a hypothesis based on training data consisting of positive examples and negative examples.

In the process generating the hypothesis, ILP search for the most suitable hypothesis while repeating generating hypothesis candidates and checking whether they deduct the positive examples and do not deduct the negative examples. In this project, we implement parallel checking of the examples on RDBMS with GPU execution through converting the checking into SQL operations. Furthermore, we have enabled the SQL operations to simultaneously check several hypothesis candidates, so that we have achieved making it six times faster through decreasing the overhead of RDBMS. Also, we have implemented the method that generates the hypothesis based on PSO that is one of swarm intelligence algorithms, so that we have achieved twice more speedup.

研究分野：計算機科学

キーワード：帰納論理プログラミング Progol GPU RDBMS SQL 群知能 粒子群最適化 PSO

1 . 研究開始当初の背景

帰納論理プログラミング(以下,ILP と呼ぶ)は,深層学習と比べ,小規模の訓練データで済み,予期しない振舞いに対して,導出過程を知ることができる機械学習の 1 手法である.しかしながら,訓練データから仮説と呼ばれる論理型言語のプログラムを生成する学習過程は,コストが高いことが知られていた.

2 . 研究の目的

本研究では,ILP を,GPU によって高速化する手法を実現し,ILP の大規模問題への適用に道を開くことを目的とする.一般に,ILP を GPU 上で実行するのは難しいが,導出過程を表の関係操作に置き換えることができる論理型言語 Datalog を記述言語とすることで,段階的に生成された各仮説候補が正しいか検証する過程を GPU によって高速化することができる.さらに,仮説の生成過程を仮説の探索とみなし,蟻コロニー最適化や粒子群最適化のようなメタヒューリスティクスを用いて高速化することも目指す.

3 . 研究の方法

本研究では,まず第 1 段階で,Datalog と ILP に関する文献調査と GPU 上で動作する Datalog のプロトタイプを作成し,第 2 段階で,仮説生成を GPU 上で高速化した ILP を完成させる.また,拡張 Datalog の仕様の決定と,メタヒューリスティクスの文献調査も同時に行う.そして,最終段階において,メタヒューリスティクスを ILP に実現するとともに,ILP の性能調査を行う.最終的に,国際会議を中心に成果発表を行う.各段階における実施内容の詳細は,次のとおりである.

第 1 段階:1) 文献調査:Datalog の GPU 上での実行と ILP の並列化,および,Datalog の拡張について文献を調査する.2) GPU 上で動作する Datalog のプロトタイプを作成し,問題点を整理する.

第 2 段階:1) GPU 上で動作する Datalog を用いて ILP の仮説生成部を実現し,Host-GPU 間通信を低減できるように改良を加える.2) Datalog の仕様拡張を進めるとともに,GPU 上で実行を確認することによって,拡張 Datalog の仕様を決定する.3) 仮説探索に有効なメタヒューリスティクスについて文献調査する.

最終段階:1) メタヒューリスティクスによって ILP を拡張するとともに,Host-GPU 間の通信コストを低減できるように改良を加える.2) 大規模問題に適用して性能を評価する.3) 成果の発表を行う.

4 . 研究成果

本基盤研究の成果は,1) AI における探索アルゴリズムの改善と,2) GPU 上で効率的に動作するコードの生成に分けられる.下記に,その詳細を述べる.

(1) AI における探索アルゴリズムの改善

説明可能 AI の一つである帰納論理プログラミング(ILP)は,正例と負例からなる訓練データからその訓練データを説明する仮説を探索する.仮説の探索過程では,候補仮説を生成し,正例を導出し,負例を導出しないか検査することを繰り返す.本研究では,この検査を SQL に変換し,GPU 上で SQL を実行できる RDBMS で並列実行することによって高速化を実現した.ここで,RDBMS

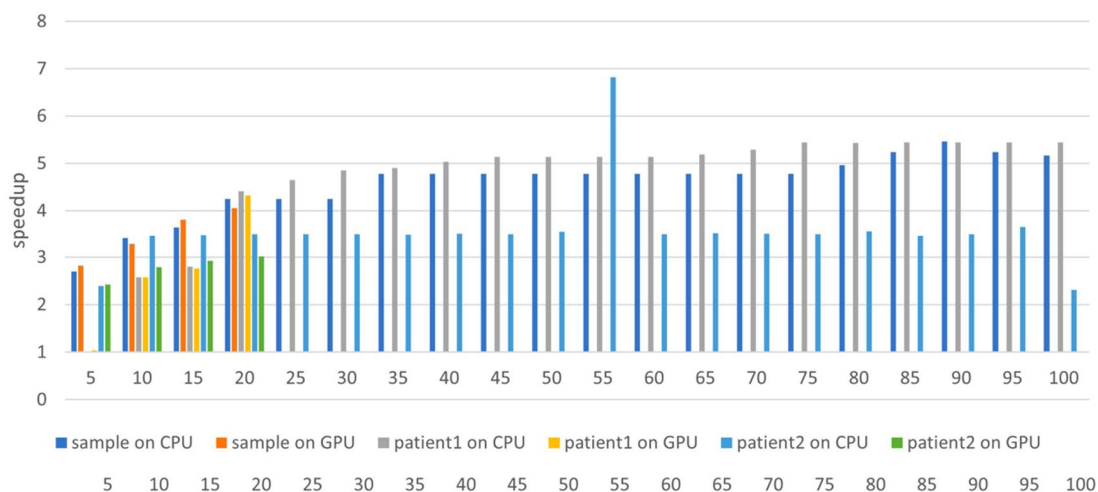


図 1 . まとめる仮説候補数に対する予測型 A*-like アルゴリズムの高速化率

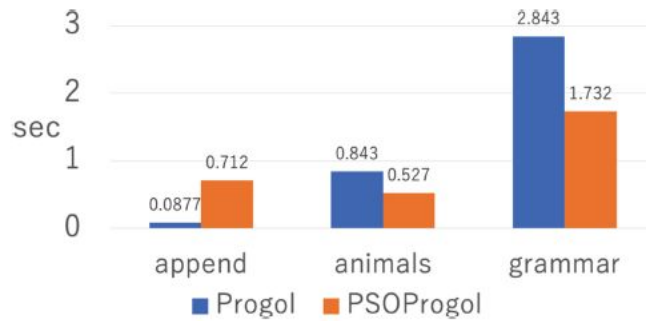


図2. 3問題に対する Progol と PSOProgol の実行時間

とのやりとりはオーバーヘッドが高く、並列化の効果が低減される場合があった。そこで、仮説探索が、その過程で現候補仮説に1リテラルだけを加え、評価関数の結果が最も高かった新しい候補仮説を生成する最良優先探索であることに着目し、評価関数の結果が上位の複数の候補仮説をまとめて検査することによって、RDBMS実行のオーバーヘッドを低減する手法を提案した。図1に示すように、本オーバーヘッド低減手法を実装し、3つの実践的問題 (sample, patient1, patient2) に対して実験を行った結果、最大で6倍以上の高速化を実現した。また、候補仮説の生成過程を生成回数分の次元空間の1点とみなし、メタヒューリスティクスである群知能の一種の粒子群最適化 (PSO) を適用することで、仮説の探索範囲を限定する手法を提案した。本手法をILP処理系であるProgolに実装したPSOProgolを試作し、3つの小さな問題 (append, animals, grammar) についてその効果を確認した。図2の実験結果が示すように、append, animals, grammarの順に問題サイズが大きくなるに連れて、実行効率が高まっていくことが分かる。今後、本手法を実践的な問題に適用することによって、これまで課題になっていた問題に解決の道筋をつけることが期待できる。

(2) GPU上で効率的に動作するコードの生成

また、これらのILPシステムの拡張と同時に、ILPを含めたGPU上のプログラムを効率化するコード最適化手法を実現した。GPU上のプログラムは、GPU上に割当てたカーネルをホストから呼び出す形で実行される。カーネルは複数のスレッドによって実行され、データ並列による並列実行を実現する。本手法は、プログラムの一部を他の場所に移動するコード移動を用いて、GPU向けのプログラムを効率化する手法を、カーネル内とカーネル間の2種類の粒度に対して提案している。カーネル内最適化としては、スレッドが、分岐の異なる方向を実行するとき、両分岐先を逐次的に実行する非効率性を、コード移動を用いて抑制する手法SSCMと、SSCMの効果をループの反復に渡って拡張したSSRQPを提案している。また、カーネル間最適化として、ホスト側のカーネル呼出しを、コード移動を用いて隣接させ、そのカーネル呼出しと本体をそれぞれ融合させることによって、カーネル起動コストを低減し、カーネル内の最適化を促進する手法KFCMを提案している。SSCM, SSRQPおよびKFCMをベンチマークで評価した結果、従来法と比較して、それぞれ、最大で60%以上、40%以上、35%以上の実行効率の改善が見られ、KFCMについては、最大で50%以上のカーネル起動数の削減を実現した。

今後、これらの成果を適用した一つのシステムとして、国立がんセンターとの共同研究において、臨床データと遺伝子情報からがん発症後の予後や発がん予想するために実践的に活用する予定である。

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 Junji Fukuhara and Munehiro Takimoto	4. 巻 30
2. 論文標題 Scalar Replacement Considering Branch Divergence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Inf. Process.	6. 最初と最後の頁 164--178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2197/ipsjip.30.164	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 Junji Fukuhara and Munehiro Takimoto	4. 巻 28
2. 論文標題 Branch Divergence Reduction Based on Code Motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Inf. Process.	6. 最初と最後の頁 302--309
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2197/ipsjip.28.302	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 福原 淳司, 滝本 宗宏
2. 発表標題 コード移動に基づく分岐発散の低減
3. 学会等名 情報処理学会第126回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyosuke Obara, Munehiro Takimoto, Tsutomu Kumazawa and Yasushi Kambayashi
2. 発表標題 Efficient Inductive Logic Programming Based on Particle Swarm Optimization
3. 学会等名 International Conference EAI AICON 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Meko Okawara, Junji Fukuhara, Munehiro Takimoto, Tsutomu Kumazawa and Yasushi Kabayashi
2. 発表標題 Efficient Inductive Logic Programming based on Predictive A*-like Algorithm
3. 学会等名 International Conference IHET-AI 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasushi Kabayashi, Ngoc Thanh Nguyen, Shu-Heng Chen, Petre Dini, Munehiro Takimoto	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Cham	5. 総ページ数 159
3. 書名 Artificial Intelligence for Communications and Networks	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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