

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00296

研究課題名（和文）ヘテロジニアス計算機環境における並列探索アルゴリズムの研究

研究課題名（英文）Parallel Search Algorithms for Heterogeneous Computing Environments

研究代表者

福永 ALEX (Fukunaga, Alex)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：90452002

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：最適解（最小コスト解）を保証するヘテロジニアス並列探索アルゴリズム Block-Parallel IDA\*を開発した。Block-Parallel IDA\*はGPUのBlock毎に探索木の部分木を割り当てることにより、従来のスレッド並列GPU探索アルゴリズムより優れた性能を得られることを実証した。一方、最適解を求めるのは難しい問題において充足解を求めるヘテロジニアス並列探索アルゴリズムBatch Monte Carlo Random Walk(BMRW)を開発して、従来のRandom Walkより優れた結果を得られることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、従来型の演算コアを数十個搭載する主演算装置（CPU）に加えて、数千個の演算コアを搭載するGPUを両方搭載しているヘテロジニアスな計算機が普及している。人工知能においてエージェントやロボットの自動行動計画問題及び、経営工学における生産スケジューリング問題や施設配置問題等、多くの難解な探索・最適化問題に対して並列処理能力を十分に発揮できるグラフ探索アルゴリズムを設計することが必要である。本研究においてCPUとGPUを同時に有効に使う探索アルゴリズムを提案・解析した。

研究成果の概要（英文）：We developed Block-parallel IDA\*, an admissible search algorithm for finding optimal solutions for heterogeneous CPU/GPU environments. Block-parallel IDA\* allocates subtrees of a search tree to each GPU block. We showed that on the standard sliding tiles benchmark domain, Block-parallel IDA\* significantly outperforms thread-parallel IDA\*. We also developed Batch Monte Carlo Random Walk, a satisficing (non-optimal) search algorithm which significantly outperformed previous Random Walk search algorithms on a large set of domain-independent planning benchmark instances.

研究分野：人工知能

キーワード：探索 並列アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、複数コア CPU、及び、複数の計算機を結合した大規模クラスタ等、並列処理が広く普及している。人工知能においてエージェントやロボットの自動行動計画問題及び、経営工学における生産スケジューリング問題や施設配置問題等、多くの難解な(例えば NP-困難な)探索・最適化問題に対して並列処理能力を十分に発揮できるグラフ探索アルゴリズムを設計することが必要である。実際、これまでも並列資源を効率よく使用する探索アルゴリズムの研究は行われていて、ある程度高いスケラベリティを有する手法が提案されている。例えば決定的な環境における自動行動計画問題(プランニング問題)最も効果的な手法は A\* に基づいたグラフ探索アルゴリズムであり、A\* の効率的な並列化の研究は行われている。

一方、並列アルゴリズムが実行される計算機環境が従来と比べて飛躍的に複雑化している。従来の並列探索アルゴリズムの研究では並列計算機の演算装置は基本的に均質(ホモジニアス)であることが前提であり、例えば一台のサーバー内の複数の均質な計算機コアを使用、そのようなサーバーから構成された大規模クラスタを想定している。しかし、最近の計算機サーバーは従来型の演算コアを数十個搭載する主演算装置(CPU)に加えて、数千個の演算コアを搭載する GPU を両方搭載しているヘテロジニアスな計算機である(GPU とは従来画像処理専用開発された大規模並列演算装置 Graphics Processing Unit であるが、近年の GPU は演算の自由度が増した結果、汎用な高性能演算機として画像処理以外の多くの数値計算に広く応用されている)。

従来の並列探索アルゴリズムは CPU コアのみを使用して、GPU を使用しない[1,業績 14]。一方、GPU を用いた探索アルゴリズム(GA\*)も提案されているが、これは基本的には GPU を用いたアルゴリズムであり、GPU で探索を行っている間、CPU のコアは補助的な役割を任せられているだけで有効に使用されていない(CPU の複数コアのみで探索を行うグラフ探索アルゴリズムを「CPU 探索アルゴリズム」と呼び、GPU で主に探索を行う手法を「GPU 探索アルゴリズム」と呼ぶ)。尚、既存の GPU 探索アルゴリズムは GPU に搭載されているメモリ容量(数ギガバイト程度の GDDR)に依存していて数秒以内にそのメモリを完全に使い果たしてしまうため比較的小規模な問題にしか対応できなく、応用が限られている。従って、コア毎に非常に少ないメモリ内で探索を行うためには、各 GPU コア上、反復深化 A\* (IDA\*) のような木探索のように振る舞うアルゴリズムを実行することが必要だと考えられる。

## 2. 研究の目的

A\* 及び IDA\* の探索効率は探索状態の評価関数(heuristic function)に大きく依存する。特に、多くの問題において、元の問題を分解してその部分問題に対する解のコストをメモリ上のデータベースに記録してそれに基づいて任意の状態に対する評価値を計算する Pattern Database (PDB) 法が汎用で有効な heuristic function であるが、この手法も大容量のメモリへのランダムアクセスが必要であるため GPU 上の実装には向いていない。一方、元の問題の緩和問題を比較的比較的小容量のメモリ上で解く汎用な heuristic function

は GPU 上で効率良く実行できるように改良すれば GPU 探索における強力な汎用手法となる可能性が大きい。従って、本応募研究の一つの目的は汎用で効率良い GPU 探索アルゴリズムの開発である。

尚、複数コアを有する CPU 及び大規模並列の GPU を両方搭載しているヘテロジニアスな計算機サーバーが普及しているにもかかわらず、既存の並列探索アルゴリズムは CPU あるいは GPU の片方のみ有効に使用している。そこで、CPU と GPU を同時に有効に活用する、ヘテロジニアスな計算機に対応した探索アルゴリズムの開発が必要であり、本応募研究の二つ目の目的である。

### 3. 研究の方法

汎用な演算コアと GPU を両方搭載した計算機から構築されたヘテロジニアスな大規模計算機クラスタを用いて探索・最適化問題の解決を可能にする為

- (1) 効率良い GPU 探索アルゴリズムを開発して評価実験を行う。
- (2) 上記(1)で開発する GPU 探索アルゴリズムと、HDA\*のような CPU 探索アルゴリズムを同時に用いて探索を行うヘテロジニアス探索アルゴリズムを開発して評価実験を行う。

### 4. 研究成果

最適解（最小コスト解）を保証するヘテロジニアス並列探索アルゴリズム Block-Parallel IDA\*を開発した。Block-Parallel IDA\*は GPU の Block 毎に探索木の部分木を割り当てることにより、従来のスレッド並列 GPU 探索アルゴリズムより優れた性能を得られることを実証した。

一方、最適解を求めるのは難しい問題において充足解を求めるヘテロジニアス並列探索アルゴリズム Batch Monte Carlo Random Walk(BMRW)を開発した。BMRW は CPU 上の Open リストから有望な探索ノードを GPU のスレッドに割り当て、GPU で Random Walk 探索を行う。従来の Random Walk 探索は様々な原因により並列化の恩恵を得られにくいと実証した上、Open リストを用いた Batch Random Walk が CPU 単体及び CPU/GPU ヘテロジニアス環境両方にて従来の Random Walk より優れた結果を得られることを実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ryo Kuroiwa, Alex Fukunaga	4. 巻 1
2. 論文標題 On the Pathological Search Behavior of Distributed Greedy Best-First Search	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling	6. 最初と最後の頁 255-263
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Ryo Kuroiwa, Alex Fukunaga	4. 巻 1
2. 論文標題 Batch Random Walk for GPU-Based Classical Planning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling	6. 最初と最後の頁 155-160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Satoru Horie, Alex Fukunaga	4. 巻 1
2. 論文標題 Block-Parallel IDA* for GPUs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the Symposium on Combinatorial Search	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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0件

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

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