

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25330253

研究課題名(和文)大規模並列アルゴリズムポートフォリオの構築と実行の研究

研究課題名(英文)Research on Large-Scale Algorithm Portfolios

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はロボットの自動行動計画等、難しい組み合わせ最適化問題に対して並列計算資源を効率よく使用するアルゴリズム群(アルゴリズムポートフォリオ)の開発を目的とした。期間中、実行中に挙動を自動的に調整する対応型探索アルゴリズムの開発、及び並列計算におけるプロセッサ間の通信オーバーヘッドを削減する手法に着目した。主な成果として、適応差分進化アルゴリズムの開発及び並列グラフ探索アルゴリズムにおける新たな仕事の分配法の開発等が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated methods for effectively using parallel computational resources in difficult combinatorial search problems such as robot action planning. We investigated search algorithms which adaptively adjust their control parameters during execution, as well as methods for reducing the overhead of communication among processors in parallel computation. The major results of this project include a new, adaptive, differential evolution algorithm and a new approach to distributing work in a parallel graph search algorithm.

研究分野：情報科学

キーワード：探索アルゴリズム 並列アルゴリズム 人工知能

1. 研究開始当初の背景

近年、単一の CPU コアの性能が頭打ちになり、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ー等、並列処理が広く普及している。人工知能における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探索・最適化アルゴリズムを設計することが必要になりつつある。従来の並列アルゴリズム開発は基本的に処理を上手く分割することにより多数のプロセッサを効率良く使用することを目的としていて、負荷の均一化や通信オーバーヘッドの最小化等による性能向上を求めている。

一方、各プロセッサ上、異なるソルバ(アルゴリズム)、あるいは同じソルバを異なる初期状態・制御パラメータ・乱数シードを用いて実行する並列アルゴリズムポートフォリオ法(Algorithm Portfolio=AP)が最近注目されている。問題の処理を分割する従来の手法に対して、AP は各プロセッサで実行されるアルゴリズムの多様化(いわば、「ソルバ設計空間の分割」)、及び、そのポートフォリオの要素であるアルゴリズム集合の協調に焦点を当てている。例えば、積回路の設計及び検証やソフトウェアの検証等、様々な分野で重要な充足可能性問題(SAT)に対して、現在、全体的に最も有効な手法は AP 法を用いた SATzilla である[6,7]。

これまでの AP は人間が開発した既存のアルゴリズムを要素として構成されている。例えば最新版の SATzilla(2012 版)はバックトラック法や局所探索法を含む、31 個の state-of-the-art ソルバを要素に構築されている。AP 法の有効性は要素アルゴリズムの多様性に依存しているが、プロセッサ数は今後も増える傾向が続く一方、研究者による(AP の要素となる)ソルバ開発はプロセッサ数の増加に追いつけず、既存ソルバの制御パラメータ値のバリエーションによる多様化のみでは不十分である。使用するプロセッサ数が数百以上の場合、十分な多様性を持つソルバ集合を作成するのは極めて困難であり、AP 法の scalability bottleneck になりつつある。そこで、ポートフォリオの要素となる、多様性を持つ新たなソルバを次々と自動的に生成する技術が必要である。

尚、これまでの並列 AP における計算資源(プロセッサ数、メモリ)は予め定められていて、その計算資源制約の下で問題を解くのが目的とされている。一方、「京」等の大規模スパコンや、Amazon EC2 等のクラウド環境では、使用可能な資源は実質、無限である。解の質、あるいは実行時間のみを評価基準とすると、なるべく多くの計

算資源を一斉に利用するのが最適だが、使用資源量に対する利用料が掛かる為、予算が即座に底を突く。並列 AP を実行する際、計算資源の利用料に対して、解の質、及び計算時間のトレードオフを考慮する資源の要求法が必要である。

2. 研究の目的

大規模な並列アルゴリズムポートフォリオ(AP)を用いた探索・最適化問題の解決を可能にする為、二つの目的を追求する：

(1) 遺伝的プログラミング法を用いてポートフォリオの要素アルゴリズムを自動的に作成する手法を開発する。研究期間内に SAT、ドメイン非依存自動行動計画(Domain-independent planning)、実数値最適化問題等、複数の問題に対して提案手法を用いた並列 AP を構築して有効性を実証する。

(2) クラウド等、利用料が掛かる大規模並列環境で AP を実行する際、計算資源の利用料と得られる解の質・実行時間のトレードオフを図る資源要求法を開発する。研究期間内には、これまで開発したグラフ探索アルゴリズム用の反復資源要求法の更なる理論的解析・開発を行い、SAT や実数値最適化問題に対する AP に適応可能な汎用な資源要求法の開発、及び理論的解析を行う。

3. 研究の方法

大規模並列アルゴリズムポートフォリオの研究はアルゴリズムの構築及びその実験的検証により行った。全体的には、様々な探索アルゴリズムを開発・実装して、探索アルゴリズムの研究コミュニティで普及しているベンチマーク問題集に対して実験的な評価を行った。具体的な内容に関しては下記の研究成果を参照されたい。

4. 研究成果

本研究課題で得られた主な成果は以下の通りである。

目的(1)については発表論文 11 等の一定の成果を挙げられたものの、当初想定していた遺伝的プログラミングによる AP 要素(パラメータ化された探索アルゴリズム)の構築の問題点として、多くの自動生成された AP 要素は探索が早い段階から停滞していることが判明した。従って、探索挙動があらかじめ static な挙動の AP を大量に自動生成するより、探索中にパラメータを自動調整する探索アルゴリズムの方が良い性能を得られそうだ

と気付いた。結果、差分進化法(Differential Evolution)における新たな History-based パラメタ調整法を開発した。そのパラメタ調整法を用いた差分進化法 SHADE は単目的ブラックボックス最適化問題に対するベンチマーク問題において既存手法と比較して優勝な性能を得られることを実証した(発表論文 12, 10)。国際会議 IEEE Conference On Evolutionary Computation で毎年開催されている Real Parameter Single-Objective Optimization Competition において 2014 年、2015 年、2016 年、2017 年のトップ手法は SHADE に基づくアルゴリズムである。

目的(2)については並列 AP の計算機資源の要求を開発中、要求された計算資源を使用する探索アルゴリズムにおけるプロセッサ間の過剰な通信が原因で、そもそも計算資源が十分に有効に使用されていないことが判明した。このプロセッサ間通信オーバーヘッドの原因を追究した結果、新たなプロセッサ間の仕事の割り当ての方式 Abstract Zobrist Hashing (AZH) を開発した。AZH を用いたグラフ探索アルゴリズム AZHDA* は既存手法より高性能であることを実験的に実証した(発表論文 1, 2, 3)。

上記の通り、当初の目的(1)、(2)を追求しながら研究した結果、目的(1)、(2)に対するある程度の成果は得られたものの(例えば発表論文 11)、当初想定されていなかった成果に基づいた論文が多数の難関査読付き国際会議論文及び雑誌に採択・掲載され、特に差分進化法の自動パラメタ調整法の研究成果は既に進化計算研究コミュニティにおいて高く評価されて下で挙げられている発表論文の被引用数も 2018 年現在で数百件以上である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

(注: 情報科学分野において査読付き国際会議 Proceedings に掲載された論文は雑誌論文相当の扱い)

1. Jinnai Y, Fukunaga A. On Hash-Based Work Distribution Methods for Parallel Best-First Search. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 60:491-548, 2017 <https://doi.org/10.1613/jair.5225>
2. Jinnai Y, Fukunaga A. Abstract Zobrist Hash: An Efficient Work Distribution Method for Parallel Best-First Search. Proc. 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-16):717-723. <http://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI16/paper/view/11896>
3. Jinnai Y, Fukunaga A. Automated Creation of an Efficient Work Distribution Method for Parallel Best-First Search. Proc. 26th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS-2016) :184-192 <http://www.aaai.org/ocs/index.php/ICAPS/ICAPS16/paper/view/13081>
4. Imai T, Fukunaga A. On a Practical, Integer-Linear Programming Model for Delete-Free Tasks and its Use as a Heuristic for Cost-Optimal Planning. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 54:631-677, 2015 <https://doi.org/10.1613/jair.4936>
5. Aranha C, Tanabe R, Chassagne R, Fukunaga A. Optimization of Oil Reservoir Models Using Tuned Evolutionary Algorithms and Adaptive Differential Evolution, Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2015): 877-884 <https://doi.org/10.1109/CEC.2015.7256983>
6. Tanabe R, Fukunaga A. Tuning Differential Evolution for Cheap, Medium, and Expensive Computational Budgets, Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2015):2018-2025 <https://doi.org/10.1109/CEC.2015.7257133>
7. Imai T, Fukunaga A. A Practical, Integer-Linear Programming Model for the Delete-Relaxation in Cost-Optimal Planning. Proc. 21st European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2014) <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-419-0-459>
8. Tanabe R, Fukunaga A. Reevaluating Exponential Crossover in Differential Evolution, Proc. Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-2014):201-210 https://doi.org/10.1007/978-3-319-10762-2_20
9. Tanabe R, Fukunaga A. On the Pathological Behavior of Adaptive Differential Evolution on Hybrid Objective Functions. Proc. ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2014):1335-1342 <http://doi.acm.org/10.1145/2576768.2598322>
10. Tanabe R, Fukunaga A. Improving The Search Performance of SHADE Using Linear Population Size Reduction, Proc. IEEE

Congress on Evolutionary Computation
(CEC-2014)
<https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900380>

11. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Evaluation of a Randomized Parameter Setting Strategy for Island-Model Evolutionary Algorithms. Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2013):1263-1270
<https://doi.org/10.1109/CEC.2013.6557710>
12. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Success-History Based Parameter Adaptation for Differential Evolution. Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2013):71-78
<https://doi.org/10.1109/CEC.2013.6557555>
13. [Fukunaga A](#). An Improved Search Algorithm for Minimal Perturbation. Proc. 19th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2013):331-339
https://doi.org/10.1007/978-3-642-40627-0_27

[学会発表] (計 11 件)

1. Jinnai Y, [Fukunaga A](#). Abstract Zobrist Hash: An Efficient Work Distribution Method for Parallel Best-First Search. Proc. 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-16)
2. Jinnai Y, [Fukunaga A](#). Automated Creation of an Efficient Work Distribution Method for Parallel Best-First Search. 26th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS-2016)
3. Aranha C, Tanabe R, Chassagne R, [Fukunaga A](#). Optimization of Oil Reservoir Models Using Tuned Evolutionary Algorithms and Adaptive Differential Evolution, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2015),
4. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Tuning Differential Evolution for Cheap, Medium, and Expensive Computational Budgets, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2015),
5. Imai T, [Fukunaga A](#). A Practical, Integer-Linear Programming Model for the Delete-Relaxation in Cost-Optimal Planning. 21st European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2014)
6. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Reevaluating Exponential Crossover in Differential Evolution, Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-2014)

7. Tanabe R, [Fukunaga A](#). On the Pathological Behavior of Adaptive Differential Evolution on Hybrid Objective Functions. ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2014)
8. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Improving The Search Performance of SHADE Using Linear Population Size Reduction, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2014)
9. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Evaluation of a Randomized Parameter Setting Strategy for Island-Model Evolutionary Algorithms. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2013)
10. Tanabe R, [Fukunaga A](#). Success-History Based Parameter Adaptation for Differential Evolution. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2013)
11. [Fukunaga A](#). An Improved Search Algorithm for Minimal Perturbation. 19th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2013)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
福永アレックス (FUKUNAGA, Alex)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号 : 90452002

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()