

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23700158

研究課題名（和文） モンテカルロ木探索の汎用的高速化手法の研究

研究課題名（英文） A Research on General Purpose Fast Monte Carlo Tree Search

研究代表者

美添 一樹 (Yoshizoe Kazuki)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・東工大特別研究員

研究者番号：80449115

研究成果の概要（和文）：

汎用性が高いことで知られる確率的な探索アルゴリズム、モンテカルロ木探索の大規模並列化を可能とした。これは TDS-df-UCT アルゴリズムの提案によるものである。仮想ゲームでの実験では最大 3,200 倍の高速化を達成した。収束が遅くなる場合の性能を向上させるために Accelerated UCT アルゴリズムを提案し、複数のゲームで効果を実証した。また、大規模並列囲碁プログラムおよび汎用並列探索ライブラリを実装した。

研究成果の概要（英文）：

We have successfully parallelized the Monte-Carlo Tree Search algorithm which is known for its broad range of application. Our TDS-df-UCT algorithm achieved 3,200-fold speedup in the best case for synthesized game trees. Also, Accelerated UCT was invented to improve the speed of convergence for the cases existing algorithms fail to converge quickly. It was effective for several games. We have implemented a massively parallel Go program and a general purpose parallel search library on top of TDS-df-UCT.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：知能情報学

キーワード：探索・論理・推論アルゴリズム・モンテカルロ法・囲碁

1. 研究開始当初の背景

(1) 並列化の必要性

本研究計画はグラフ探索アルゴリズムの並列化を主目的としている。

物理的な制約により、単一 CPU コアあたりの計算速度が頭打ちになり、今後の計算機の速度向上はコア数の増大、つまり並列化によってもたらされることが明確になりつつある。本研究計画の立案時には GPU の利用が一般的になりつつあり、また Intel 社の Xeon Phi の原型も発表されているという時期であった。今後 10 年以内に、1 万 CPU コア程度の計算機は安価に入手可能となると思われる。

つまりそれまでに全てのアルゴリズムは大規模並列環境で動作する必要に迫られている。しかし実際には、十分な並列化が達成されているアルゴリズムは 3 次元物理シミュレーションや、一部の規則正しい数値計算などに偏っており、多くの重要なアルゴリズムの並列化の研究が不足していた。

グラフ探索アルゴリズムは、最短経路問題、制約充足問題、ゲーム、最適化などに用いられる重要なアルゴリズムの一つである。特に実用的なグラフ探索問題は、探索の途中経過に基づいて見込みのない選択枝が枝刈りされるため、自明に並列な部分が存在せず、並列化が非常に難しいことが知られている。

(2) モンテカルロ木探索

本研究では近年、コンピュータ囲碁の研究の中から発明された、汎用性の高い探索アルゴリズムであるモンテカルロ木探索の汎用的な並列化手法を開発することを目指して研究を行った。

モンテカルロ木探索は囲碁でめざましい成果を上げたことで有名だが、枠組みの汎用性が高く、様々な応用が研究されている。2012年に発表されたサーベイ論文にはゲーム以外での応用例も多数含む、240件の論文が引用されている。モンテカルロ木探索の発明自体が2006年の出来事であったことを踏まえると、この急速な広まり方はモンテカルロ木探索の汎用性、有用性を示していると言える。

モンテカルロ木探索の特徴を、図1に示した。通常の探索アルゴリズムは探索の先端で評価関数を用い、その数値の大小比較によって探索の方向を決める。対して、モンテカルロ木探索は探索の先端でランダムサンプリングを行い、数値で報酬を得る。その結果として先端の節点が確率分布を得る。それぞれの節点を持つ確率分布を比較して、最も有望と思われる節点を探索する。さらに有望な節点の下をさらに展開して探索するため、探索木は有望な部分だけが深く伸びることになる。

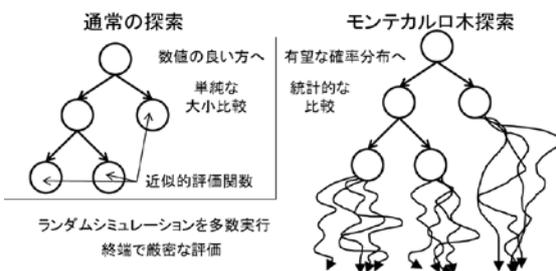


図1, モンテカルロ木探索の特徴

有望な手の基準としては様々な物が考えられる。一番単純な方法は報酬の平均値を用いることであろう。しかしこれはあまり性能が良くない。モンテカルロ木探索の代表例であり、様々な応用されているものがUCB1値を基準として用いるUCTアルゴリズムである。(それぞれUpper Confidence Bound, UCB for Treesの略)

ある節点で子節点が $i=1\dots n$ 個あったとする。各子節点でそれぞれ何回かランダムサンプリングが行われていたとする。その際に、以下の式の値が最も大きくなる子節点を、次にランダムサンプリングを行う対象とする。

$$\bar{X}_i + \sqrt{\frac{2 \ln t}{s_i}}$$

\bar{X}_i は i 番目の子節点の平均の報酬を示す。

第2項はバイアス項と呼ばれる項で、 s_i は i 番目の子節点で行われたランダムサンプリングの回数、 t はトータルのサンプリングの回数を示す。ランダムサンプリングの回数が少ない子節点ほど、大きなバイアスを持つことになる。

本研究ではUCTアルゴリズムの汎用的な高速化を目的とする。(実際にはUCB1値以外の式を用いても並列化手法に大きな影響はないことに注意。)上述の様に、今後は汎用的な高速化手法としては並列化が必須である。しかしながらモンテカルロ木探索の並列化の既存研究はほとんど全てが対象を囲碁に限定されている上に非常に単純な手法が主流であり、最大でも数十倍の速度向上が得られるにとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、囲碁を対象を限定しない汎用的な並列化手法を開発することにより、モンテカルロ木探索自体が持つ汎用性を失わない形で数百倍以上の速度向上を実現することである。二人ゲームにも適用可能な探索アルゴリズムは、枝刈りの頻度が高いために並列化が特に困難である。現実的な条件では過去に得られた最高の速度向上は数十倍程度である。

我々は分散メモリ並列計算機上で速度向上を得ることを目的とした。主な対象は東工大のTSUBAME2スーパーコンピュータのようにInfiniBandなどの高速なネットワークで接続されたクラスタである。

共有メモリ計算機と比較すると通信が必要となるためにアルゴリズムの構築が難しく、プログラムの実装にかかる労力も多い。しかし、共有メモリと分散メモリにはアルゴリズムの観点からは本質的な違いはない。相違点はメモリアクセスの速度差の大小のみである。分散メモリ環境でも他の計算機上のメモリを通信を介して参照することは可能であり、単に速度の遅いメモリとみなすことができる。共有メモリ環境でもキャッシュメモリは高速にアクセス可能だがメインメモリは遅い。

近い将来に一つの筐体に数千～数万のCPUコアを持つ計算機が安価に入手可能となると思われるが、数百のCPUコアから高速にアクセス可能なメモリを構築することはコストの面から見ても現実的ではなく、並列度が増大するにつれ、必然的にメモリの階層が増える。既にキャッシュメモリの効率的な利用は高速なアルゴリズムの実現に必須である。今後のアルゴリズムは、小容量だが高速なメモリと大容量だが遅いメモリの間の差が極端に増大した環境で効率よく動作する必要に迫られている。

3. 研究の方法

並列化手法の効率を高めるためには各計算機に均等に計算、通信の負荷分散がされる必要がある。以下、順を追って我々の用いた解決策を述べる。3次元物理シミュレーションなどではほぼ均等に計算の負荷を分散することは自然と実現可能だが、探索アルゴリズムにおいてはこれが第一の難点である。

(1) 計算の負荷分散

問題の性質をうまく利用すれば計算負荷を予測することも程度は可能だが、汎用的な負荷分散手法として知られているものは、現状では分散ハッシュテーブルを利用する並列化手法のみである。

合流の検出などのためにハッシュ表を用いることは探索アルゴリズムにおいては普及したテクニックである。何らかのハッシュ関数を用意し、探索対象のグラフの各節点にハッシュ値を割り当てる。(ハッシュ値の衝突の確率を十分に下げたため、ハッシュ値は128bit程度以上あると望ましい。)ハッシュ表を各計算機に均等に分散して保持するためには、ハッシュ値のうちの一部を計算機のIDとして利用することが自然である。このようにグラフを分散して保持すると、枝をたどるたびに通信が発生するという欠点があるが、各計算機が担当する節点の数は均等に保たれる。この手法は呼称が定着していないが、「データ駆動ワークスケジューリング(DDS)」と呼ぶことにする。

(2) 通信の負荷分散

DDSによって探索木を各計算機上に均等に配分することができる。しかしこれだけでは大きな速度向上を得ることはできない。その理由は、通信が一極集中することによる。

モンテカルロ木探索は探索の末端でランダムサンプリングを行い、その結果を基に探索木の有望な部分に集中して探索を行う。複数のプロセスが同時に探索を行うと、ランダムサンプリングの結果の更新が探索木の根に近い部分に集中し、並列化の速度向上を阻害する。

そこで、モンテカルロ木探索の動作を深さ優先型に変形したdf-UCTアルゴリズムを並列化に用いたところ、通信の一極集中が解消され、大きな速度向上を得ることに成功した。深さ優先変形の詳細は発表論文を参照されたい。

(3) 収束速度の向上

UCTアルゴリズムは充分多くのランダムサンプリングを行えば最善解に収束することが証明されている。しかし、探索木の構造が偏っている場合、UCTの収束が非常に遅くな

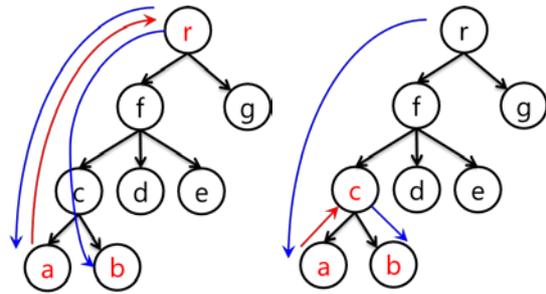


図2,深さ優先変形

る場合があることが知られている。そのような場合に収束を早める手法としてAccelerated UCTアルゴリズムを提案し、囲碁などのゲームにおいて効果を検証した。

Accelerated UCTはUCBの式を変更することによって収束を早める手法であり、問題の性質を利用した手法ではないため汎用性が高い。詳細は発表論文を参照されたい。

4. 研究成果

研究の成果として、大規模並列モンテカルロ木探索アルゴリズムTDS-df-UCTを提案し、仮想的なゲーム木では東工大TSUBAME2スーパーコンピュータの4,800コアを用いて最大3,200倍の速度性能を達成した。ランダムサンプリングが1.0ミリ秒かかると想定した場合の性能であるが、これはモンテカルロ木探索の適用例の中では現実的な想定である。分岐数によって速度向上が多少の影響を受けることが実験結果によって示されている。本結果は当初の目標であった数百倍の速度向上を大幅に上回り、また既存研究の速度向上よりもほぼ二桁高い性能である。

本手法を囲碁プログラムFuegoに適用し、1024コアを用いたプログラムを用いてコンピュータ囲碁大会に出場した。囲碁において

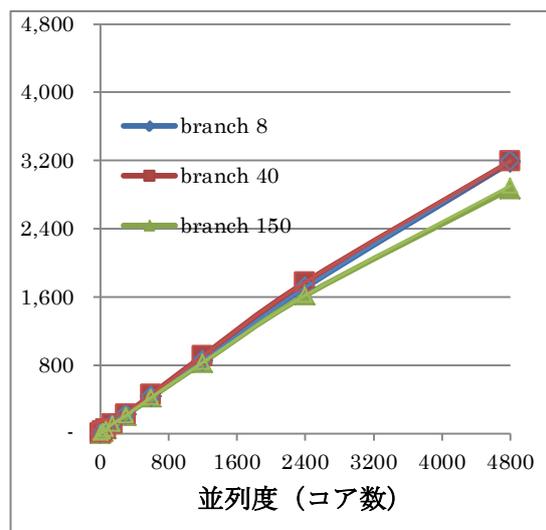


図3, 仮想ゲーム木での速度向上

1,000 コア以上を用いた効率の良い並列化は初である。さらに上記の Fuego は囲碁専用プログラムではなく、ゲーム木探索ライブラリである。これを並列化することで大規模並列探索ライブラリ MP-Fuego を実装した。今後は自動チューニング機構などと組合せ、様々な問題の並列化に利用し汎用性の向上を目指す。

また、確率的探索であるための弱点の補完について Accelerated UCT アルゴリズムを提案、論文を発表し、国際会議第 13 回 Advances in Computer Games において BEST PAPER AWARD を受賞した(日本人初)。

社会的な成果の発信として、モンテカルロ法を用いた囲碁プログラムに関する初の書籍を執筆した。(理論編と実践編からなり、理論編を担当。) これはモンテカルロ木探索の理論面を述べた初の書籍でもある。

当初の研究計画と比較して、アルゴリズムの性能は大幅に上回り、探索の弱点の補完についても成果を挙げ、さらに書籍の執筆やコンピュータ囲碁大会への出場を通じて社会的に情報発信を行った。

応用範囲の拡大は自ら達成したとは言えないが、モンテカルロ木探索の応用例が幅広く研究されている現状を踏まえると、汎用の大規模並列モンテカルロ木探索ライブラリを実装したことにより間接的には達成したと言える。

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 1 件)

(1) Junichi Hashimoto, Akihiro Kishimoto, Kazuki Yoshizoe and Kokoro Ikeda, “Accelerated UCT and Its Application to Two-Player Games”, Advances in Computer Games 13 (ACG13), Vol. 13, pp. 1-12, 2012, DOI. 10.1007/978-3-642-31866-5_1. (査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

(1) Kazuki Yoshizoe, Akihiro Kishimoto, Tomoyuki Kaneko, Haruhiro Yoshimoto and Yutaka Ishikawa, “Scalable Distributed Monte-Carlo Tree Search”, The Fourth Annual Symposium on Combinatorial Search (SoCS 2011), pp. 180-187, Jul. 15th, 2011, Barcelona, Spain. <http://www.aai.org/ocs/index.php/SOCS/SOCS11/paper/view/4023> (査読有り)

[図書] (計 1 件)

(1) 美添 一樹 (著), 山下 宏 (著), 松原 仁 (編集), 「コンピュータ囲碁 —モンテカルロ法の理論と実践—」, 共立出版, 222 ページ

(担当 1~60 ページ), 2012 年 11 月出版.

6. 研究組織

(1)研究代表者

美添 一樹 (Yoshizoe Kazuki)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・東工大特別研究員

研究者番号：80449115