

氏名（本籍）	中村 あすか （千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 215 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法の探索ノード数削減による高速化に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 富井 規雄 (副査) 教授 宮崎 収兄 教授 前川 仁孝 教授 藤田 茂 国立情報学研究所 教授 合田 憲人

学位論文の要旨

階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法の探索ノード数削減による高速化に関する研究

本論文は、階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法を高速化するために、探索ノード数を削減する手法を提案し、その有効性を評価する。

分枝限定法は、NP 困難な組合せ最適化問題の厳密解を求めるための木探索アルゴリズムである。分枝限定法のアルゴリズムは、高い並列性を持つため、求解時間の短縮手法のひとつとして並列分枝限定法の研究が行われている。階層的挟み撃ち探索は、探索の早い段階に最適解を発見することで多くの探索ノードに枝刈りを行う並列探索アルゴリズムである。一方で、本手法は、問題規模が大きくなるほど探索ノード数の増加により求解に長い時間が必要になる。このため、大規模な問題を高速に解くためには探索ノード数の削減が必要となる。

そこで、本論文では、代表的な組合せ最適化問題のひとつである巡回セールスマン問題および、分枝限定法における階層的挟み撃ち探索が最初に提案されたタスクスケジューリング問題において、階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法の探索ノード数を削減し、高速化する手法を提案する。提案手法は、下界値を用いずに探索ノード数を削減できるため、探索の進行具合に関係なく高い効果が得られると期待できる。

以下に本論文の各章の概要を述べる。本論文は全 5 章より構成される。

まず、第 1 章「序論」では、本研究における背景および従来研究について述べ、提案手法の目的や位置づけを明らかにする。

2 章「分枝限定法」では、分枝限定法のアルゴリズムおよび、その高速化手法について述べる。分枝限定法は、分枝操作と限定操作を繰り返すことで組合せ最適化問題の厳密解を求める木探索アルゴリズムである。本手法は、問題規模が大きくなるほど探索ノード数が増加するため、探索ノード数の削減が重要である。このため、並列探索による高速化が有効であることが知られている。並列探索アルゴリズムのひとつである階層的挟み撃ち探索は、探索木中の最適解の位置に関係なく高速に求解可能であり、分枝限定法においても高い高速化率が得られることが示されている。

3 章「無駄な待ち状態の割当て削減」では、タスクスケジューリング問題を解くために提案された分枝限定法のひとつである DF/IHS およびその並列探索アルゴリズム PDF/IHS の探索ノード数を削減する手法を提案する。DF/IHS および PDF/IHS の分枝操作は、スケジュールが未確定となる時刻に実行可能なタスクの処理またはレディ状態を割り当てる全組合せを部分問題として生成する。このため、不必要なレディ状態が割り当てられた部分問題が探索ノードとして生成されることがある。そこで、本章では、まず DF/IHS および PDF/IHS においてレディ状態を割り当てられた部分問題の中には探索する必要の無い部分問題が存在することを明らかにする。次に、DF/IHS および PDF/IHS の探索ノード数を削減するために、レディ状態を割り当てる部分問題のうち、最適解が得られないことが保障できる部分問題を枝刈りする。評価の結果、提案手法は、提案手法を用いない探索アルゴリズムと比較して、DF/IHS において最大約 79 倍、PDF/IHS において最大約 96 倍高速に求解できることを確認した。

4 章「探索の重複領域削減」では、巡回セールスマン問題の求解において、階層的挟み撃ち探索を用いた分枝限定法の探索ノード数を削減する手法を提案する。分枝限定法における階層的挟み撃ち探索は、複数のプロセッサが左右から挟み撃つように探索するため、複数のプロセッサが同一のノードを探索する探索の重複領域が生じる。巡回セールスマン問題の求解で生成する探索木は、各探索ノードの分枝数が少ないため、スレーブプロセッサの割当領域に対する探索の重複領域の割合が大きくなる。そこで、本論文では、探索の重複領域を削減することで、階層的挟み撃ち探索の求解時間を短縮する。本削減手法は、スレーブプロセッサの探索済領域をリーダープロセッサが探索しないように、スレーブプロセッサだけでなくリーダープロセッサも探索の重複を検出する。また、複数のスレーブプロセッサが同じノードを探索しないように、スレーブプロセッサの探索経路を反映した再割当を行う。評価の結果、提案手法は階層的挟み撃ち探索に対して相乗平均で約 1.2 倍、最大約 2.1 倍高速に求解できることを確認した。

最後に第 5 章「結論」では、提案手法と評価結果をまとめ、論文全体の総括をする。本論文は、巡回セールスマン問題とタスクスケジューリング問題において、階層的挟み撃ち探索を用いた分枝限定法の探索ノード数を削減する手法を提案した。

審査結果の要旨

本論文は、階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法的高速化のために、探索ノードの削減を図る手法を提案するとともに、その有効性を評価したものである。

現実に出現する組合せ最適化問題は、NP 困難 (non-deterministic polynomial hard) であることがほとんどで、厳密に最適な解 (厳密解) を求めることは、計算時間の観点から非常に困難である。分枝限定法は、NP 困難な組合せ最適化問題の厳密解を求めるために考案された手法で、近年、広く用いられるようになってきている。

分枝限定法は、木の探索を行なうアルゴリズムで、高い並列性を有するために、処理をより高速化するために、探索を並列に進める手法 (並列分枝限定法) が注目を集めている。処理を高速にするためには、最適解を見逃すリスクを 0 にしつつ、なるべく探索範囲を限定する、言い換えれば、枝刈りを行うことが有効である。階層的挟み撃ち探索は、探索の早い段階で最適解を発見することで、多くの探索ノードに枝刈りを行なう並列探索アルゴリズムである。

本論文では、代表的な組合せ最適化問題の一つである巡回セールスマン問題 (TSP - Travelling Salesperson Problem) および、分枝限定法における階層的挟み撃ち探索が最初に提案されたタスクスケジューリング問題 (Task Scheduling Problem) を対象として、階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法において探索ノード数の削減を行ない、探索を高速化する手法を提案している。ここで提案されている手法は、下界値 (lower bound) を使用せずに探索ノード数を削減できるという特徴を有しており、探索の進行速度に関係なく高い効果が期待できる。

本論文は、次の 6 章から構成されている。

1 章「序論」では、本研究の背景と従来研究に関する survey を述べた上で、提案手法の目的と位置付けが明らかにされている。

2 章「分枝限定法」では、分枝限定法の考え方とその高速化手法が述べられている。

3 章「無駄な待ち状態の割り当て削減」では、タスクスケジューリング問題を解くために提案された分枝限定法の一つである DF/IHS およびその並列探索アルゴリズム PDF/IHS の探索ノード数を削減する手法が提案されている。ここでは、最適解が得られないことが保証できる部分問題を明らかにした上で、それらを枝刈りする手法が提案されている。また、評価結果として、提案手法を用いない場合と比較して、DF/IHS において、最大約 79 倍、PDF/IHS において、最大約 96 倍、高速に求解可能であることが示されている。

4 章「探索の重複領域削減」においては、巡回セールスマン問題を対象とする際に、階層的挟み撃ち探索を用いた分枝限定法の探索ノード数を削減する手法が提案されている。ここでは、TSP の特性に注目することによって、探索の重複領域の削減についての新たな手法が提案されている。それによって、提案手法は、単純な従来手法と比較して、相乗平均で約 1.2 倍、最大で約 2.1 倍高速に求解できることが示されている。

最後に第 5 章では、提案手法と評価結果がまとめられ、全体が総括されている。

本論文は、階層的挟み撃ち探索を用いた並列分枝限定法的高速化手法について、研究したも

のであり、特に当該手法におけるノード数の削減による高速化について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

従って、学位申請者の 中村あすか は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。