



分散ラグランジュ緩和プロトコルとその応用に関する研究

花田, 研太

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2016-03-25

(Date of Publication)

2017-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6664号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006664>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 花田 研太

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

分散ラグランジュ緩和プロトコルとその応用に関する研究

指導教員 平山 勝敏

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

分散最適化問題は、地理的に分散した情報を保持した複数のエージェントが協調的に解の探索を行うことによって、大域的な最適値および最適解を求める問題である。本研究では、エージェント間の局所通信のみによって分散最適化問題を解く分散ラグランジュ緩和プロトコル (DisLRP: Distributed Lagrangian Relaxation Protocol) に注目する。DisLRP は分散最適化問題を解くためのヒューリスティック解法であり、エージェント間の通信や処理方法を規定したプロトコルである。DisLRP の特徴は、どのような問題に対しても、分散最適化問題が最大化問題の場合は最適値に対する良い質の上界値、最小化問題の場合は最適値に対する良い質の下界値をプロトコルの変更無しに求めることが出来ることである。また、問題に対して適切なアルゴリズムの実装を行えば、良い質の実行可能解 (分散最適化問題が最大化問題の場合は下界値、最小化問題の場合は上界値) を求めることも可能である。

本研究の目的は、(1) DisLRP に新しいアルゴリズムを適用し、最大化問題に対するより良い質の上界値 (最小化問題に対するより良い質の下界値) を導出できるようにすることで DisLRP の性能を向上させること、(2) 分散最適化問題に対する新しい定式化を提案し、その定式化に対する実行可能解 (上界値または下界値) を求めるためのアルゴリズムを DisLRP に適用して、その有効性を検証すること、(3) DisLRP を応用して実社会の問題に対する新しいアプリケーションを提供することの3点で構成される。

まず本研究では、バンドル法と DisLRP を組み合わせた新しいプロトコルであるバンドル法を用いた分散ラグランジュ緩和プロトコル (BDisLRP: Bundle DisLRP) を提案する。この研究の目的は、目的 (1) に該当する。DisLRP では、Dantzig-Wolfe 分解またはラグランジュ分解と呼ばれるテクニックを用いて原問題を部分問題に分解し、ラグランジュ乗数と呼ばれるパラメータを変更しながら部分問題を繰り返し解くことによって、原問題の最良の上界値または下界値を探索する。この問題はラグランジュ双対問題と呼ばれる。従来の DisLRP では、ラグランジュ双対問題の最適値 (最良の上界値または下界値) を探索するアルゴリズムとして劣勾配法を使用していた。劣勾配法では、エージェント間の局所的な同期のみでラグランジュ乗数を更新することができ、大域情報が全エージェントに行き渡るのを待つ必要がないという利点がある。しかし、劣勾配法は計算コストが小さい反面、上界値または下界値がラグランジュ双対問題の最適値に収束したかどうかを判定できない、解の振動が発生するなどの問題がある。そこで本研究では、ラグランジュ乗数の更新にバンドル法を用いる。既存のバンドル法——安定化切除平面法は、集中環境において目的関数が凸関数である無制約最適化問題を解く効率的なアルゴリズムである。しかし、バンドル法を分散環境で使用した先行研究は存在しない。分

散環境でバンドル法を用いる場合、ラグランジュ乗数を更新するためには必ず大域情報が必要となる。従って、エージェント間の局所的な同期のみではラグランジュ乗数を更新することができず、大域情報が全エージェントに行き渡るのを待つ必要がある。そこで本研究では、すでに行き渡った古い大域情報でラグランジュ乗数の更新を行うことによってプロトコルの遅延発生を防ぎ、最適値の効率的な探索を可能とした。本研究では、Dantzig-Wolfe 分解を用いた定式化で表現される一般化相互割当問題 (GMAP: Generalized Mutual Assignment Problem) と、ラグランジュ分解を用いた定式化で表現される重み付き最大充足化問題 (WMax-SAT: Weighted Maximum Satisfiability Problem) の問題例を用いて実験を行い、BDisLRP と従来の DisLRP との間で比較を行った。その結果、GMAP の問題例を用いた実験では、大域情報収集の時間遅れがあったとしても、BDisLRP が劣勾配法を使用した従来の DisLRP に比べて良い質の上界値が得られることが分かった。また、WMax-SAT の問題例を用いた実験では、制約式の分割方法によって得られる下界値の質が大きく変わり、問題例の構造に強く依存することが分かった。

次に本研究では、従来の GMAP では扱えない問題例を扱えるようにした過制約な GMAP (OC-GMAP: Over-Constrained GMAP)を提案し、OC-GMAP の実行可能解導出に対応する 2 つの DisLRP を提案する。この研究の目的は、目的 (2) に該当する。GMAP は、オペレーションズリサーチの分野で古くから研究されている一般化割当問題 (GAP: Generalized Assignment Problem) を拡張した問題であり、財をもつ複数のエージェントが、それぞれの財を系内で相互に割り当てる——すなわち交換する——際、各エージェントの資源制約を満たしつつ系全体の効用和が最大となる割当てを求める分散最大化問題である。従来の GMAP では、エージェントは財を割り当てるのに十分な資源容量を持つと暗黙のうちに仮定していた。しかし、現実にはエージェントが十分な資源容量を持たない、いわゆる過制約な状況も当然考えられる。そこで、エージェントの資源容量が著しく少ない過制約な最大化問題を新たに 2 つの方法で定式化し、それぞれの定式化に対する実行可能解を導出する DisLRP をそれぞれ開発した。1 つ目の定式化では、割り当てられない財を全て引き受ける disposal エージェントを新たに加え、全ての財は disposal エージェントを含めてただ 1 つのエージェントに割り当てられる。この定式化で実行可能解を求めるための DisLRP を、disposal エージェントを用いた DisLRP (DisLRP-DA: DisLRP with a Disposal Agent) と呼ぶ。disposal エージェントは資源制約がなく (資源容量が無限大)、仮に財が disposal エージェントに割り振られても得られる効用は 0 である。disposal エージェントの導入は、既存の手法を変更無しに適用できるというメリットがあるが、一方でエージェントが 1 つ増えることによる通信量増大と

いうデメリットがある。しかし、disposal エージェントの挙動は非常に単純なので、仮定化することが可能である。これにより、エージェント数を disposal エージェント導入前と同じ数にすることができ、通信量増大を回避することができる。2 つ目の定式化では、割当制約と呼ばれる制約式を不等式として記述して問題を解く。すなわち、全ての財がただ 1 つのエージェントに選ばれるか、全くエージェントに選ばれないという制約に変更するものである。この定式化で実行可能解を求めるための DisLRP を、不等式制約を用いた DisLRP (DisLRP-IBF: DisLRP with Inequality-Based Formulation) と呼ぶ。DisLRP-IBF では、定式化そのものが変更されているため、実行可能解を求める手順に対して若干の変更が必要になる。OC-GMAP は本研究で初めて扱う問題であり比較対象が存在しないため、DisLRP-DA と DisLRP-IBF の性能を比較する実験を行った。エージェントの資源容量を加工した GAP のベンチマーク問題例を上記両手法で解き、得られたデータを比較、考察した。その結果、前者の方法は過制約度の低い問題例に対して、後者の方法は過制約度の高い問題に対して有効であることがわかった。

次に本研究では、従来の GMAP と OC-GMAP の齟齬を解消する多層一般化相互割当問題 (ML-GMAP: Multi-Layered Generalized Mutual Assignment Problem) を提案し、ML-GMAP の実行可能解導出に対応する DisLRP を提案する。この研究の目的は、目的 (2) に該当する。GMAP と OC-GMAP には 2 つの問題点がある。まず、OC-GMAP において、従来の GMAP の問題例をどう扱うかという問題点である。OC-GMAP のプロトコル (DisLRP-DA もしくは DisLRP-IBF) で通常の GMAP の問題例を解くと、従来の DisLRP で解いた最適値及び最適解とは違う答えを導出する可能性がある。また、OC-GMAP のプロトコルで最小化問題を解くと最適値が必ず 0 となり、意味のある答えを導出することができない。そこで ML-GMAP では、これらの問題点を解消するために、まず割り当てられない財をできるだけ減らした上で、コスト最小 (または効用最大) となる財の割当てを求める。本研究では、割り当てられない財の数の最小化を行う定式化とコスト最小となる財の割当てを行う定式化をそれぞれ行い、2 つの定式化を用いて ML-GMAP を解く 2 段階最適化手法と、割り当てられない財の数の最小化と財の割当てコスト最小化を 1 つの定式化で行うペナルティコスト最適化手法の 2 つを提案する。また、DisLRP-DA と DisLRP-IBF に基づいて、2 段階最適化手法に対する DisLRP とペナルティコスト最適化手法に対する DisLRP をそれぞれ開発した。ベンチマーク問題例を用いて両手法を実験的に評価した結果、ペナルティコスト最適化手法における DisLRP-DA が最も有効であるが、ペナルティコストの設定によって、割り当てられない財の数の最小化における達成度と財の割当てコスト最小化の達成度にトレードオフの関係があることがわかった。

(氏名： 花田 研太 NO. 4)

最後に、本研究では実社会における分散最小化問題として増床計画付き患者搬送問題 (PTP: Patient Transportation Problem with bed capacity management) を新たに提案し、PTP の実行可能解導出に対応する DisLRP を提案する。この研究の目的は、目的 (3) に該当する。PTP の目的は、救急車による患者の搬送コストの最小化と、受け入れ病院がベッドを増床した場合にかかるコストの最小化を同時に行うことである。本研究では、Dantzig-Wolfe 分解を用いた定式化を使用し、GMAP と施設配置問題を組み合わせて PTP の定式化を行った。また、PTP の実行可能解を求めるアルゴリズムを開発して DisLRP に適用した。本研究は比較できる先行研究が存在しないため、ラグランジュ乗数の更新に大域情報を必要としない DisLRP_U と、乗数の更新に大域情報を必要とする ADisLRP の間で比較を行った。病院の増床コストと単位病床数の設定を付加した GAP のベンチマーク問題例で実験を行った結果、DisLRP_U の方が少ない通信量でより良い質の実行可能解を早く導出できることが分かった。

以上より、DisLRP は様々な分散最適化問題に対して適用可能であり、それぞれの問題に対して良い質の上界値または下界値を得られることが実験的に確かめられた。

(別紙1) 論文審査の結果の要旨

氏名	花田 研太		
論文 題目	分散ラグランジュ緩和プロトコルとその応用に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	平山 勝敏
	副 査	教 授	堀口 知也
	副 査	教 授	今井 昭夫
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
分散最適化問題とは、複数のエージェントに分散された最適化問題であり、断片的な情報を保持するエージェント同士が協調的に探索を行うことにより、大域的な最適値および最適解を求めるプロトコルを開発することが求められる。分散ラグランジュ緩和プロトコル (Distributed Lagrangian Relaxation Protocol (DisLRP)) は、そのようなプロトコルの一つであり、双対分解 (ダンツィグ・ウルフ分解、ラグランジュ分解等) と分散アルゴリズムの技術を融合することにより、ピアツーピア通信環境で分散最適化問題を解くことができる。 本研究の目的は、一般化相互割当問題 (Generalized Mutual Assignment Problem (GMAP)) に対する既存の DisLRP の性能向上を図るとともに、拡張された一般化相互割当問題やより現実的な応用問題に対する新たな DisLRP を開発し、その有効性を検証することにある。 まず、第1章では序論が展開され、本研究の3つの目的、1) 一般化相互割当問題に対する DisLRP の性能向上、2) 拡張された一般化相互割当問題に対する新たな DisLRP の開発、3) 現実的な応用問題に対する新たな DisLRP の開発、およびそれぞれの目的に対応した論文の章構成等が述べられる。 続く、第2章では、DisLRP の基礎となる一般論が展開され、代表的な双対分解の手法であるダンツィグ・ウルフ分解およびラグランジュ分解の詳細が述べられる。また、ラグランジュ双対問題を解く基本的なアルゴリズムである劣勾配法の詳細が述べられる。 第3章以降が本論であり、論文提出者による独自の研究成果が報告される。第3章では、DisLRP の性能向上を目的として、双対問題を解く際に一般的な劣勾配法ではなくバンドル法という手法を組み込んだ新しいプロトコル BDisLRP が提案され、GMAP のベンチマーク問題例を使った評価結果が報告される。また、同様のアイデアを、集中型の問題である重み付き Max-SAT 問題に適用した結果も報告される。 第4章では、従来の GMAP が「過制約」となる場合の対応方法が示される。ここで過制約とは、財の割り当てに伴って潜在的に要求される資源の総和が、すべてのエージェントの資源容量の総和を越えることを意味している。その場合、系内のすべての財をエージェントに割り当てることはできず財を取捨選択する必要がある。本章では、この問題を特に OC-GMAP と呼び、2つの解法として disposal エージェントを用いた DisLRP と不等式制約緩和に基づく DisLRP が提案され、それぞれの性能を比較した実験結果が報告される。 第5章では、従来の GMAP と OC-GMAP を統一的に扱うための仕組みである多層一般化相互割当問題 (Multi-Layered GMAP (ML-GMAP)) が提案される。ML-GMAP では、割り当てられない財をできるだけ減らした上で、コスト最小 (または効用最大) となる財の割り当てを求める。本章では、この ML-GMAP の解法として、2段階最適化手法とペナルティコスト最適化手法が提案され、それぞれの性能を比較した実験結果が報告される。			

氏名	花田 研太
第6章では、より具体的な応用事例として、大規模都市災害時に発生する多数の負傷者を複数の病院に搬送する際、各負傷者をどの病院に搬送するか、また、各病院が病床を何床設置するかを、搬送コストおよび増床コストを考慮して決める増床計画付き患者搬送問題が提案される。本章では、この問題に対して、GMAPおよび施設配置計画問題を融合した教理計画モデルが示され、それに対応した DisLRP が提案される。また、同プロトコルの性能を評価する予備実験の結果が報告される。 最後に第7章では、各章の内容と結果を取りまとめるとともに、今後の課題として、1) プロトコルの非同期化、2) プロトコル実行中における完全なプライバシーの確保、3) 第5章の多層一般化相互割当問題の多目的最適化への拡張、4) 第6章の増床計画付き患者搬送問題の拡張、の4点が挙げられている。 なお、本論文を構成する主な内容を記した対外公表論文は、和文ジャーナル論文3編（いずれもフルペーパー査読付きで第1著者）、国際学会プロシーディングス2編（フルペーパー査読付き国際会議（採択率24%）で第1著者かつ本人発表、フルペーパー査読付き国際ワークショップで第1著者かつ本人発表）の計5編である。 以上で述べたように、本論文は、一般化相互割当問題を解く分散ラグランジュ緩和プロトコルの性能向上を図ると共に、従来の定式化では扱えない問題をカバーすべく新しい定式化を複数提案し、その定式化に合うよう分散ラグランジュ緩和プロトコルの機能を拡張した点に意義がある。また、汎用的な定式化上での議論に留まることなく実問題のモデル化の問題にも取り組み、分散ラグランジュ緩和プロトコルの実問題への応用について1つの方向性を示した点にも一定の意義が認められる。よって、本論文は海事科学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の花田研太氏は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。	