

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16056

研究課題名(和文) プロダクト=サービス・システムのための分散制約最適化技術の構築

研究課題名(英文) A Development of Distributed Constraint Optimization Algorithms for Product Service Systems

研究代表者

波多野 大督 (Hatano, Daisuke)

国立情報学研究所・ビッグデータ数理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：10709728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：プロダクト=サービス・システムに関わる問題として、動的に問題が変化する状況において、全体のコストが最小になる解を分散環境上で探索する問題と、利用者があるサービスを協調的に利用する場合において、全体で支払う額を協調関係が壊れないように配分する問題に注目した。これらの問題を解決する方法として、分散制約最適化問題と費用配分問題の2つの問題から解決を試みた。

まず分散制約最適化問題においては、乗算型重み更新法を用いて、動的かつ分散環境上での最適化問題を解くことが可能となった。一方で費用配分問題に対しては、優モジュラ性に着目することにより、効率的に配分を求められるアルゴリズムを構築できた。

研究成果の概要(英文)：Problems for users of product-service systems are mainly twofold: Problems for finding the optimal solution minimizing costs over all users in the distributed manner under a condition that the cost is dynamically changed, and problems for finding a distribution among a coalition of the users so that no user deviates from the coalition. The first problem can be represented as distributed constraint optimization problem, and the second problem can be represented as cost allocation problems, which is a problem of coalitional games.

At first, as for DCOP, I proposed two DCOP algorithms based on the multiplicative weight update method and achieved to solve the DCOP instance under a condition that the utilities are dynamically changed. Next, as for the cost allocation problem, I proposed an algorithm for finding a value division efficiently by assuming that the characteristic function of the game is supermodular function.

研究分野：情報学

キーワード：分散制約最適化 協力ゲーム

1. 研究開始当初の背景

余剰資源（モノ，時間，空間，スキル等）の共有，再分配，または共同利用，共同作成により成り立つ経済を共有型経済と呼ぶ [Rachel 2010]．共有型経済は，近年の SNS や WEB の発達により，個人と個人または個人と組織との間で余剰資源の共有が容易になったことで欧米を中心に広がりつつある．その最大の利点は，余剰資源の再利用により，エコかつ持続可能性のある経済を築くことができる点である．ここでは特に共有型経済のビジネスモデルの1つであるプロダクト＝サービス・システム（PSS）に注目する．PSS は，利用しない期間が多い資源（車など）を必要とする人に貸し，利用した人は利用した分の料金のみを支払うモデルで，代表的なサービスとして P2P カーシェアリングがある．一方，利用する人が増えるにつれ，流通に伴うコストやお金が膨大に必要となることが問題視されている．コストを最小限に抑えるためには各個人が適切な相手に適切な資源を移動させなければならない．現在，様々な PSS のサービスが提供されているが，個人間を結ぶためのプラットフォームを構築する段階であり，上記のコストを最小にするための最適化技術を導入するまでには至っていない．共有経済のさらなる発展のためには，PSS におけるコストを最小化するためのフレームワークの構築とその効率的な解法が必要である．

2. 研究の目的

上記のフレームワークを提案するにあたり，本研究課題では大きく2つの目的を設定する．

一つは余剰配分の効率的な配分を考える問題で，以下の3つの性質が重要と考えられる．

- 分散環境：PSS に参加する個人同士が情報交換し余剰資源を適切に移動させる．
- 動的環境：余剰資源は時間を経るごとに变化する．
- 移動コスト：余剰資源の移動に対してコストを設け，これを最小化したい．

これら3つの性質を満たす状況において余剰資源の配分にかかるコストを効率的に最小化したい．そこで，これらの性質をもつ問題の定式化とその問題を解くための効率的な解法の提案を一つ目の目的とする．

上記の目的に加えて，二つ目の目的では，本研究課題ではどのようにすれば共有型経済のサービスを積極的に利用してもらえるかという点についても分析する．つまり，顧客間で協調関係を築けるようなサービスの

仕組みの提供を目的とする．

3. 研究方法

(1)分散制約最適化問題による定式化とその解法の提案

一つ目の研究目的を達成するためには3つの性質（分散環境，動的環境，移動コスト）を満たす問題を定式化する必要がある．まず，分散環境の問題は，分散制約最適化問題（Distributed Constraint Optimization Problem, 以下 DCOP）を基に拡張することで実現できる可能性が高い．DCOP は分散協調問題解決の枠組みの1つであり，エージェント集合，変数集合，値域集合，コスト関数集合で定義される．エージェントは1つの変数を管理し，値域から値を選択し，その変数に割り当てられる．そして，割り当てた値（意思決定）によりコスト関数に定義されたコストを支払う．DCOP では，エージェントが情報を交換し，協調的に意思決定することでコストの総和を最小化することが目的である．そのため，個人間の情報交換が必要となる PSS における分散環境を適切に表現できる．次に，動的環境と移動コストに関する問題は，研究代表者の研究である値推移コスト付き動的 CSP [波多野 2013]により実現可能である．CSP(Constraint Satisfaction Problem) は制約問題の一種であり，変数集合，値域集合，制約集合で定義され，その目的は制約をすべて満たす変数への値の割当を探索することである．値推移コスト付き動的 CSP は，時間により变化する CSP を CSP の系列として表現し，ある時間とその直前の CSP の意思決定間に値推移コストが設けられている．これはまさに，PSS における動的環境と移動コストに対応でき，移動コストが最小となる意思決定が可能となる．一方で動的 DCOP に関して，幾つかの先行研究 [Pechu 2007] が存在するが，値の変化に対してコストを考慮した問題は存在しない．そこで本研究課題では，PSS における余剰資源の効率的な移動のために，3つの性質（分散環境，動的環境，移動コスト）を考慮する問題である値推移コスト付き動的 DCOP を構築し，その効率的な解法を提案する．DCOP アルゴリズムを構築する上で考慮すべき点は，他の非分散環境とは異なり，各エージェントは互いの情報を直接参照できないため，最適化に必要な情報を適宜エージェント間で通信をする必要がある．つまり，エージェント間での通信プロトコルを設計する必要があり，このプロトコルが上手く設計できるかが，良いアルゴリズムを構築する上で重要となる．また，提案アルゴリズムの評価のために，人工データと実データを用いて比較実験を行う．

(2)費用配分問題による定式化とその解法の提案

協調関係が上手く機能するかどうかを分析するための学問として協力ゲーム理論がある。この協力ゲームの中でも費用配分問題と呼ばれる問題に着目する。費用配分問題はプレイヤーの集合と特性関数で与えられる。特性関数はプレイヤーの部分集合に対して利得を返す関数である。直観的には、あるプレイヤーの部分集合で協力しあうときの利得を返す関数である。このとき、費用配分問題の目的の一つは、全体提携により得られた利得に対して、すべてのプレイヤーが納得する利得の配分を探すことである。そのような配分の一つとして、コアがある。コアは配分額が個人合理性、グループ合理性、効率性を満たす配分を指す。つまり、どの部分提携においても、部分提携による利得よりも配分された利得の方が大きくなるような配分を指す。具体的には、あるサービスの料金を利用した顧客で分割することを考える。このとき、ある顧客が複数人でサービスを利用するよりも一人で利用した場合の方が安くなる場合、その顧客は複数人でサービスを利用する動機がなくなり、一人でサービスを利用することを選ぶ。つまり、コアであるような配分が存在すれば、その提携はうまくいくことを表している。コアは安定性を示す解概念として知られている。費用配分問題の目的の一つはこのコアとなる配分が存在するか否かの判定である。本研究課題では、共有型経済におけるサービスを費用配分問題として定式化することでコアとなる費用配分を求めることを目的とする。しかし、一般的には費用配分問題においてコアとなる配分が存在するか否かを判定する問題は NP 困難に属する難しい問題とされている。そこで、これを解決するために、共有型経済がもつ問題の構造をうまく利用し、効率的に配分を求めるアルゴリズムを提案する。また、人工データ、実データを用いた評価実験によりアルゴリズムの有効性を示す。

4. 研究成果

(1)分散制約最適化問題に関わる成果

分散制約最適化問題の新しいアルゴリズムとして乗算型重み更新法に基づく分散制約最適化アルゴリズムを提案した。分散制約最適化アルゴリズムは基本的に繰返しベースのアルゴリズムで、各繰返しにおいて、エージェントがどのような意思決定を行えばよいかを探索する。乗算型重み更新法を用いたアルゴリズムでは、エージェントは各意思決定に対して、評価値を持っており、評価値が高い意思決定ほど全体のコストを下げやすい意思決定であることを意味する。この評価値の推定に乗算型重み更新法を用いる。つまり、

各エージェントが自身の意思決定の評価の推定のために乗算型重み更新法を使用するというアルゴリズムになっている。このときに、分散制約最適化問題をどのように変換するかにより、提案アルゴリズムは2つに分かれる。一つは線形計画問題(以下、LP とする)に基づくアルゴリズムで LP の最適解に収束する性質をもつ。もう一つは、非協力ゲームに基づくアルゴリズムで、均衡解の一種である、粗相関均衡に収束する性質をもつ。提案アルゴリズムの大きな利点としては通信プロトコルが非常に簡易な点である。具体的には、各繰返しにおいてエージェントは自身がどのような意思決定を行ったかを隣接エージェントに通信するだけでよい。提案した2つのアルゴリズムはエージェントの振る舞いが協調的か非協調的かという点において大きな相違点がある。LP に基づくアルゴリズムは各エージェントが協調的に振る舞い LP の最適解を探索するのに対し非協力ゲームに基づくアルゴリズムでは、各エージェントは自身のコストのみを最小にしようと振る舞う。一見、協調的に振る舞う LP に基づいたアルゴリズムの方が良質な解が得られると思われるが、実験結果より非協力ゲームに基づくアルゴリズムの方が良質な解を探索できることが示された。非協調的なアルゴリズムは、協調的なアルゴリズムを勘違いして実装したことにより生まれたアルゴリズムである。これは、当初想定していない成果の一つであり、非常に興味深い結果となった。

また、評価実験を行い既存のアルゴリズムと比較することで提案アルゴリズムの有効性を示した。具体的には比較実験のために使用したデータとして、人工データだけでなく、画像のセグメンテーションやプロテインフォールディング等のデータを用いた。どの問題においても既存の DCOP アルゴリズムに対して良質な解を約 10 ~ 100 倍早く求められることを示した。

(2)費用配分問題に関わる成果

もう一つは費用配分問題に関わる成果である。本研究では特性関数が優モジュラ性を満たす協力ゲームを対象とした。優モジュラ性とは、提携を表す2つの顧客集合 A と B があり A は B の部分集合になっている場合に、新たな顧客 i が参加する場合を考える。このとき顧客 i はより大きい提携である B に参加した方がその提携での利得が大きくなる。このような性質を優モジュラ性と呼ぶ。優モジュラ性は経済学においてもよく用いられる性質であり、本研究課題で対象とする共有型経済とも相性が良い。よく知られている事実として、優モジュラ性を満たす協力ゲームではコアが必ず非空になる性質がある。そこで、コアよりも一般的な解概念である最小コア

に注目する．最小コアは，一般的にはコアが空のときになるべくコアに近い配分を探すときに用いられる解概念であるが，優モジュラ性を仮定した場合，コアが必ず非空であるため，コアの中でもより良いコアを探索することに対応する．

本研究成果として，優モジュラ協力ゲームの最小コアを特徴付けし，いくつかの優モジュラ性を満たす協力ゲーム，誘導部分グラフゲームと空港ゲーム，に対して最小コアが簡潔な式で表現できることを示した．誘導部分グラフにおいては最小コアとなる配分を多項式時間で求められるアルゴリズムを提案した．また，実データを用いた例において提案アルゴリズムの有効性を示した．空港ゲームはタクシーをシェアしたときに各ユーザーがどの程度支払えばよいかという問題に対応するため，ニューヨーク市のタクシー乗降データを用いて，空港ゲームの問題例を作成した．本研究成果では，最適解が求められることが保証されているため，解がどの程度良いかは評価の対象とせずに，どれぐらい効率的に解を求められるかを評価の対象とした．そして，実験結果から数万人規模でのタクシーシェアが発生しても数秒で解が求められることを示した．

(3) 本研究成果の社会に対するインパクト

本研究課題の成果は人工知能の最難関国際会議である AAAI と IJCAI において採択されており，国内だけではなく，国際的にも高く評価されている．

また，二つ目の研究成果は特に共有型経済における価格付けに対する重要な成果であるといえる．近年タクシーのシェアリングサービスなどが盛んになっているが，シェアをしたユーザー間で誰がどの程度支払うかという問題は未だに難しい問題であり，どのサービスも根拠なく価格を決定しているのが現状である．本研究成果を用いることにより，価格に対する意味付けだけではなく，共有型経済のサービスに対する最適な価格設定も可能になると考えている．また，価格付けにかかる時間を非常に短くできる点は，サービスを提供する上で重要な点だと考えられる．

(4) 今後の展望

本研究成果をより発展させた内容として，協力ゲームの別の問題である提携構造形成問題と費用配分問題を組み合わせた問題が考えられる．タクシーのシェアを例に挙げて説明すると，タクシーの乗客は他の乗客が複数人存在するとき，どの人と一緒に乗ればよいかという問題を考える余地がある．このとき，なるべく目的地に近い乗客と一緒に乗車

することで運賃を安くできる．一方で，タクシー外車は会社の利益を最大化するために乗客に一人で乗ってもらうのが利益の最大化になる．このとき，タクシー会社と利用者の双方にとって利益になるような乗客の分け方かつ乗客への運賃の配分を探す問題が考えられる．この問題は提携構造形成問題と費用配分問題を組合せた問題として考えられる．この研究が実現すれば，シェアリングサービスを提供する会社の増加につながり，利用者にとってもサービスを安く利用できるようになると期待される．

< 引用文献 >

[波多野 2013] 波多野大督，平山勝敏，値推移コスト付き動的制約充足問題とその解法，人工知能学会論文誌，Vol.28, No.1, pp.34-42, 2013.

[Rachel 2010] Rachel Botsman and Roo Rogers, What's Mine Is Yours: The Rise of Collaborative Consumption, HarperBusiness, 2010.

[Petcu 2007] Adrian Petcu and Boi Faltings, Optimal Solution Stability in Dynamic, Distributed Constraint Optimization, In Proceedings of IAT, pp. 321-327, 2007.

5 . 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

Daisuke Hatano, Yuichi Yoshida, Computational Aspects of the Preference Cores of Supermodular Two-Scenario Cooperative Games, Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2018), 査読有 2018.

Daisuke Hatano, Takuro Fukunaga, Takanori Maehara, Ken-ichi Kawarabayashi, Scalable Algorithm for Higher-order Co-clustering via Random Sampling, Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2017), 査読有, 2017.

Daisuke Hatano, Yuichi Yoshida, Computing Least Cores of Supermodular Cooperative Games, Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2017), 査読有, 2017.

Daisuke Hatano, Takuro Fukunaga,
Ken-ichi Kawarabayashi, Adaptive
Budget Allocation for Maximizing
Influence of Advertisements,
Proceedings of the 25th International
Joint Conference on Artificial
Intelligence (IJCAI-2016), 査読有,
2016.

波多野大督, 花田研太, 分散 MaxSAT
に対する相関均衡点の求め方に関する
一検討, 2016 年度 人工知能学会全国
大会, 査読無, 2016 .

Daisuke Hatano, Yuichi Yoshida,
Distributed Multiplicative Weights
Methods for DCOP, Proceedings of
the 29th AAI Conference on Artificial
Intelligence (AAAI2015), 査読有, 2015.

Daisuke Hatano, Takuro Fukunaga,
Takanori Maehara, Ken-ichi
Kawarabayashi, Lagrangian
decomposition algorithm for allocating
marketing channels, Proceedings of the
29th AAI Conference on Artificial
Intelligence (AAAI-2015), 査読有,
2015.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

波多野大督 (HATANO Daisuke)

国立情報学研究所・ビッグデータ数理国際
研究センター・特任研究員

研究者番号 : 10709728