

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K16058

研究課題名(和文) 動的環境におけるレジリエントな提携構造形成アルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Developing resilient algorithms for dynamic coalition formation

研究代表者

上田 俊 (Ueda, Suguru)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40733762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は動的に変化する環境での提携形成アルゴリズムの開発を目的とし、主にマッチング理論に関する研究を行った。マッチング理論では、異なる2種類のグループ(男性/女性、学生/学校、研修医/病院)を如何に割り当てるかを考える提携形成問題の一種である。本研究課題の主な成果として、環境が変化した場合に割当の再配置を求めるマッチングアルゴリズム(メカニズム)として、既存のアルゴリズムであるDeferred AcceptanceとTop Trading Cyclesをベースとしたものを開発した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research project is to develop coalition formation algorithms for dynamic environment. The main focus is the matching theory, which studies how to "match" two agents/players from two different groups (e.g. man/woman, student/school, residency/hospital) and is one of the important coalition formation problem. As the outcomes of this research project, two new matching algorithms (mechanisms) were developed. These mechanisms can be used to re-matching problems when the environment changes. One algorithm is based on the deferred acceptance mechanism, which satisfies stability of obtained allocations. The other algorithm is based on the top trading cycles mechanism, which considers efficiency of obtained allocations.

研究分野：ゲーム理論

キーワード：マッチング理論 メカニズムデザイン 協力ゲーム理論

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 協力ゲーム理論は利己的に行動する主体 (エージェント) 間で拘束力のある合意が可能な場合のエージェントの振る舞いに関する理論であり、(a) エージェントがどのような協力関係 (提携) を形成するかという問題 (提携構造形成問題) と、(b) 提携内で得られた利益 (利得) をどのように配分するかという問題 (提携形ゲームの解概念) を対象とするフォン・ノイマン以来の伝統ある研究分野である。従来、議会における政党の影響力の分析や公共施設の費用分担問題などに適用されていたが、近年、ネットワークの発展によりその適用分野が拡大しつつある。協力ゲーム理論は伝統的には経済学分野で研究されているが (b) の解概念に関する研究がほとんどであり、安定性や公平性といった望ましい性質を持つコアやシャプレイ値等の様々な解概念が提案されている。

(2) 従来の協力ゲーム理論では、2つの提携を1つの大きな提携にした場合、大きな提携が得られる利得は少なくとも小さな提携が得られる利得の和以上となること (優加法性) を仮定していた。そのため、全員で協力することが最適であることを前提として議論が進められてきた。しかし、エージェント数の膨大な環境において協力ゲーム理論を適用する場合、大きな提携を維持するためのコスト、つまり提携内部でのエージェント同士による通信・調整のコストが無視できなくなる。このため、優加法性が成立するとは限らない環境におけるエージェントの最適なグループ分けを行う (a) の提携構造形成問題に関する研究が計算機科学分野において活発に行われている。

(3) これらの経済学および計算機科学における従来の協力ゲーム理論に関する研究は静的な環境を扱っていた。つまり、与えられた問題におけるエージェント数や提携が得られる利得は変化せず、一定であるという仮定がおかれていた。しかしながら、現実問題においてこれらの状況が一定であるということではなく、状況は刻一刻と変化することが自然である。このような動的な環境を従来の協力ゲーム理論で扱うことはほとんど議論が行われていなかった。そのため、環境が変化した場合、はじめから問題を解きなおさなければならない、非効率である。また、従来の協力ゲーム理論では、特性関数というブラックボックス関数を用いて問題を表現しており、通常は提携の利得を表記した表で与えられる。よって、動的な環境の変化はこの表が更新されるといって与えることができる。しかし、表のサイズはエージェント数  $n$  の問題に対して  $2^n$  の巨大なものとなり、問題の表現法を工夫しない限り、動的な環境を表現できないだけでなく、大規模な問題を表現できなくなる。

### 2. 研究の目的

(1) 研究の背景で指摘した通り、従来手法では、大規模かつ動的なマルチエージェントシステムの分析・設計に応用することは非現実的である。したがって、協力ゲーム理論を動的な環境に適用するためには、(i) 動的な環境を簡潔に表現する問題表現法とその構造を利用した効率的なアルゴリズムの開発が不可欠である。

(2) 動的な環境では単純に行動を最適化するだけでは不十分であり、システムは環境の変化に頑健であることが望ましい。例えば、災害時における救助チーム形成といった提携構造形成問題では、機械の故障や人員の損失といった不測の事態が発生した場合でも、システムの当初の目的を達成しなければならない。このような不測の事態に頑健なシステムは、システムズ・レジリエンスとして研究されており、東日本大震災以後、注目を集めている。このような提携構造における冗長性の確保は単純な利得最大化とトレードオフの関係になっていることが多い。そのため、レジリエンスの確保と利得最大化といった (ii) 複数の目的を満足するためのアルゴリズム設計が重要となる。

### 3. 研究の方法

(1) 協力ゲーム理論の従来研究では、問題の状況、つまり提携を形成したときに得ることのできる利得は特性関数というブラックボックスの関数で与えられてきた。これは非常に抽象的な表現方法であるため、この表現方法を用いて問題の動的な環境を表現することは非現実的である。そのため、分散制約最適化問題に基づく協力ゲームの簡潔な表記法を拡張し、環境の動的な変化の記述法を開発する。これは、申請者の既存研究であり、特性関数をエージェント間の制約問題として表現することで、問題を簡潔に表現しており、精度保障付きの近似提携形成アルゴリズムの開発を可能としている。分散制約最適化問題は、複数のエージェントが協調して系全体の全域的最適解を求める分散協調問題であり計算機科学分野において、現在最も活発な研究分野の1つである。この問題における1つの拡張として、制約の動的な変化を扱った動的分散制約最適化問題が存在する。そこで、動的分散制約最適化問題の技術を用いて申請者の既存研究である分散制約最適化問題に基づく協力ゲームの表記法を拡張し、動的環境に適した表現法を開発する。ここでは、環境の動的な変化は、分散制約最適化問題における制約ネットワークの変化として表現できる。つまり、制約ネットワークにおけるエージェントの増減、および制約の変化によって動的な環境を表現する。

(2) さらに、拡張した表記法を基に、動的な環境における提携形成アルゴリズムの開

発を行う。申請者は既存研究において、すでに静的な環境における提携形成アルゴリズムを開発している。動的な環境におけるアルゴリズムは、表記法の拡張と同様に、既存アルゴリズムの拡張から検討をはじめめる。

#### 4. 研究成果

(1) 前述のとおり、当初本研究課題では、動的分散制約最適化問題の知見を用いて動的な環境での提携構造形成問題に取り組む予定であった。しかしながら、一般的な問題での検討は想定より困難であったため、研究が当初の予定通りに進行しない可能性が生じた。そのため、検討する問題を一般的なものから限定することを試みた。

(2) 提携構造形成問題を限定した問題に関する研究のひとつとして、マッチング理論が挙げられる。マッチング理論では、異なる2つのグループ(例えば、男性/女性、学生/学校、研修医/病院)の間の組合せを求める問題である。つまり、提携構造形成問題において、形成できる提携に制限がおかれた問題と考えることができる。また、マッチング理論では、金銭授受による利得の譲渡が不可能である点が、一般的な提携構造形成問題と異なる。しかしながら、マッチング理論は、現実世界の様々な問題をモデル化でき、理論研究の成果が実際に運用されているメカニズムに応用されている稀有な分野である。例えば、研修医と病院のマッチを考慮する研修医配属問題では、理論的に優れた性質を持つとされる受入れ保留(deferred acceptance, DA)メカニズムを拡張したメカニズムが実際の我が国における研修医配属に用いられている。また、欧米等では、児童とその親に就学する学校を選択する機会を与える学校選択制という制度が普及している。

(3) 学校選択制度に関して、我が国での導入事例はまだ数が少なく、その理由に、我が国の環境に適したメカニズムが開発されていないことが挙げられる。我が国で学校選択制を導入するためには、一度指定校として就学することが決まっている学校と児童の割当を再配置するという動的な問題と、特定の学校に児童が集中する、もしくはその逆の児童がまったく就学しないという状況を避けなければならないという2つの問題があった。そこで、本研究課題では、これを解決するマッチングメカニズムの開発に取り組んだ。

(4) 上記の問題に対して、平成27年度に、本研究課題では、2つのメカニズムが開発された。ひとつは前述の研修医配属問題にも応用されているDAアルゴリズムをベースに開発したアルゴリズムである。このアルゴリズムを用いた場合、児童の間で割当に羨望が生じず、マッチング結果が安定するという理論的な性質が得られる。また、もうひとつのアルゴリズムとして、Top Trading Cyclesというメカニズムをベースに開発した。このメカニズムでは安定性は犠牲にするが、児童にとって満足度の高いマッチング結果を出力するという性質を持つ。平成28年には、これらの成果を発展させるとともに、ひとつの論文として成果をまとめ、その論文が国際論文誌Artificial Intelligenceに採録されている(発表論文)。学校選択制は世界中で導入が検討されている制度であり、その制度で使用可能なメカニズムを開発したことが本研究課題の貢献として挙げられる。

(5) 上記に加え、平成28年度には、前年度の成果を踏まえ、マッチングのように利得の譲渡が不可能であるが、提携に関して制限がない問題であるヘドニックゲームに関する研究を行った。ヘドニックゲームでは、形成した提携構造に関する望ましい性質として様々な解概念が提案されている。本研究課題では、マッチング理論での解概念である無羨望性に着目し、形成した提携構造において、どの参加者も他社に対して羨望を持たない、つまり、全員にとって公平である提携構造に着目した。本研究課題における成果として、羨望がないという意味で公平な提携構造を計算するアルゴリズムの開発を行った。この研究はまだ初期段階であり、口頭発表をおこなった段階ではある。しかしながら、当初の本研究課題の大きな目的であった、提携形成に関する技術を現実問題に応用可能にするためには、重要な研究課題であると考えている。実際に、金銭の授受が不可能な場合の提携形成には、被災地におけるボランティア活動や、教育活動におけるグループ分け等が挙げられ、そのときに形成される提携構造の公平性は重要である。そのため、この研究を通して、重要な研究テーマを発見することができ、一定の成果を得ることができたため、本研究課題の目的の達成に近づくことができたと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

Naoto Hamada, Chia-Ling Hsu, Ryoji Kurata, Takamasa Suzuki, Suguru Ueda, Makoto Yokoo, Strategy-proof school choice mechanisms with minimum quotas and initial endowments, Artificial Intelligence, Vol. 249, Pages 47-71, 2017 (査読有り)

Ryoji Kurata, Naoto Hamada, Chia-Ling Hsu, Takamasa Suzuki, Suguru Ueda, Makoto Yokoo, Pareto Efficient Strategy-proof School Choice Mechanism with Minimum Quotas and Initial Endowments, in proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents and Multiagent

Systems (AAMAS), Pages 59-67, 2016 (査読有り)

Naoto Hamada, Ryoji Kurata, Suguru Ueda, Takamasa Suzuki, Makoto Yokoo, Strategyproof Matching with Minimum Quotas and Initial Endowments, in proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Pages 1349-1350, 2016 (査読有り)

[学会発表](計 1件)

上田 俊, 掛下 哲郎, チーム形成問題における羨望に基づく公平性の考察, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016, 2016年9月15日, かんぼの宿 岐阜羽島 (岐阜)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

上田 俊 (Suguru Ueda)

佐賀大学大学院工学系研究科知能情報システム学専攻 助教

研究者番号: 40733762