

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12101

研究課題名（和文）大規模なネットワーク分析のための協力ゲーム理論の構築

研究課題名（英文）Cooperative game for the analysis of a large-scale network

研究代表者

櫻井 祐子（Sakurai, Yuko）

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：10396137

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模ネットワーク分析のため、チーム（提携）間に外部性がある場合の提携ゲームである分割関数ゲームにおけるチーム編成問題（提携構造形成問題）を解くための提携構造形成アルゴリズムの提案を行った。提携間に外部性が存在する場合、ゲームの記述量は膨大になるため、ゲームの簡潔な記述法を利用することで効率的に求解可能なアルゴリズムを提案し、人と人のネットワークをモデル化した問題を対象に計算実験によって性能評価を行った。マルチエージェントシステムの国内学会で優秀論文賞を受賞するなどの成果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We proposed efficient coalition structure generation (CSG) algorithms for analyzing a large-scale network. In a large-scale network, there are some externalities among agents. Thus, we formalize this abstract model as a partition function game which is a type of coalitional games. In this research, we develop the CSG algorithms by utilizing a concise graphical representation called partition decision trees and evaluated them on the problem settings based on human relations in a network. We were able to obtain results such as winning the excellent paper award at domestic conference of multi-agent system.

研究分野：人工知能

キーワード：マルチエージェントシステム 協力ゲーム 提携構造形成アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

協力ゲームは複数のエージェント協力関係(提携)の形成方法や提携内での利得の配分方法に関する理論である。

近年、ソーシャルネットワークなど、ネットワーク構造の分析が盛んに行われているが、協力ゲームの提携構造や解概念は、ネットワーク内でのエージェントのクラスタリングや中心性、各エージェントがネットワークに与える影響力などの分析やネットワークの安定性を検証するための有用な概念であるにも関わらず、協力ゲームにおける記述方法がボトルネックとなっている。

伝統的なゲーム理論の研究では抽象的かつ一般的に記述されたゲームを対象とし、望ましい解の存在可能性などを議論してきた。そのため、ゲームの記述量や解の算出に必要な計算量などの検討は行われておらず、従来の協力ゲーム理論では、特性関数をブラックボックスの関数で記述されることを仮定している。特性関数を単純に表形式で表現する場合、記述量はエージェントの数に対して指数的となる。

さらに、ネットワーク内では、誰と誰が提携するかによって、他の提携に与える影響(外部性)や提携を組むことが不可能なエージェントの関係(ライバル企業の関係)が存在するため、記述量はさらに増大する。また、ゲームの記述量に応じて、解概念の求解に必要な計算量も莫大なものとなり、現実的な時間内で求解することが困難である。

2. 研究の目的

提携間に外部性が存在する場合、提携の効用が提携のだけでなく、提携構造によって決定されるゲームとして表現される。例えば、A社、B社、C社の3つの企業が存在するとき、A社の売上はB社とC社が協力関係を結ぶ場合と結ばない場合で異なることが考えられる。このような外部性の存在する提携ゲームは、組み込み提携と呼ばれる提携構造と提携のペアを引数とし、提携の効用を返す関数(分割関数)で表現され、分割関数ゲーム(Partition Function Games, PFGs)と呼ばれる。分割関数の記述量はエージェント数が $n$ のとき、 $\Theta(n^n)$ であることが知られている。従って、提携間に外部性が存在する分割関数ゲームの記述には膨大な表記量が必要となる。

そこで、本研究では、大規模なネットワーク分析のため、グラフ表現技法やデータ構造を用いた効率的な論理関数の処理技法を応用し、エージェント間の関係性を考慮した、効率的に記述可能なゲームの記述方法に基づく、協力ゲーム理論の再構築を行う。

3. 研究の方法

本研究は大規模かつ複雑なネットワークに対して理論に裏付けられた分析を実現するために、伝統的な協力ゲーム理論と人工知

能における知識表現処理技術を組み合わせることによって解決を図る。例えば、三人のエージェント(a, b, c)が存在し、それぞれエージェント間の関係は図1で表されるとする。

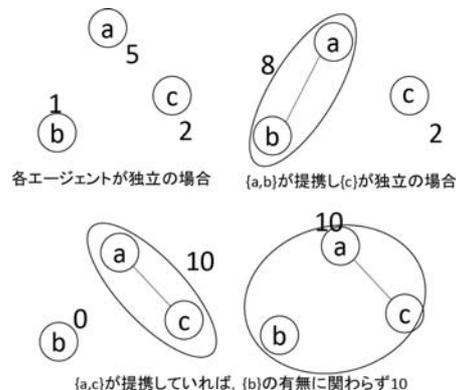


図1. エージェント間の関係と提携値の例

どのエージェントが協力(提携)関係を組むかによって、協力によって得られる値(提携値)が異なる。つまり、各エージェントが企業と考えた場合、企業提携によって得られる利益が異なる状況をモデル化したものである。このとき、従来の協力ゲームでは特性関数で表現することになるが、分割関数ゲームでは、他の提携によって影響を受けるため、単純に表形式で記述する場合、莫大な表記量となるため、記述不可能に陥ることが考えられる。

一方、計算機科学では問題の記述量、計算量を問題にしており、計算量は入力サイズに対するオーダーで評価する。特に、人工知能分野では問題/知識の表現方法を重視し、どのように問題、および問題に関する知識を表現するかで、表現のコスト、その後の問題を解くコストが大きく変化する。例えば、エージェント間には何らかの関係性が存在することが想定される。本研究では、エージェント間の関係性を明示的に扱う分割関数ゲームの簡潔記述法を利用し、効率的な提携構造形成アルゴリズムの提案などを行う。

4. 研究成果

本研究では、研究代表者が共同で開発した、分割関数ゲームの簡略記述法の分割決定木(Partition Decision Trees) (Skibski, et. al, AAAI2015)を利用することで、大規模なネットワーク分析に有用なアルゴリズムの提案を行った。

分割決定木はエージェント間の関係性に関して、提携値が加法的に表現されない状況のみを明示的に表現した記述法である。具体的には分割決定木はルート付多分木の集合で構成される。各期の内部ノードはエージェントを示し、各枝にはその枝が出ているノードのエージェントがどの提携に含まれるかを表す番号が付与されている。葉ノードは、根ノードからその葉ノードまでの経路上に存在するエージェントらで構成される分割

の各提携の効用ベクトルを示す。

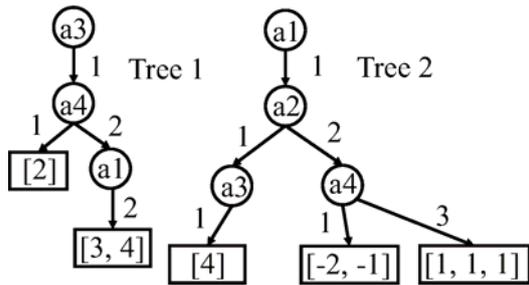


図 2. 分割決定木の例

一つの分割決定木において各経路は異なる分割に対応するため、一つの分割決定木の全ての経路において一つの提携に対応する経路は高々一つである。さらに、いずれの経路にも存在しないエージェントの効用はないものとする。すなわち、分割決定木の集合に複数の分割決定木が存在する場合、ある提携構造に対して、各分割決定木に高々一つの経路が対応することになる。従って、その提携構造に含まれる提携の効用は、対応する経路が複数存在する場合は、それら経路の葉ノードに示される提携の効用ベクトルを足し合わせることで決定される。

図 2 では、Tree 1 の右端の経路は、エージェント a1, a4 が同じ提携に含まれ、エージェント a3 が異なる提携に含まれる場合、a3 が含まれる提携の効用に 3, a1, a4 が含まれる提携の効用に 4 が加えられることを示す。

例えば、会社の人事部が部署の再編成を考えると、人事部は社内の人間関係を把握しており、各部署において誰がどのように関係性を持っているか、どのようなパフォーマンスを持っているかを知っていると仮定することができる。このように、実社会では、分割関数をブラックボックス関数として与えられていると考えるのではなく、分割決定木のように、エージェント間の関係性や特徴を利用したゲームの記述が可能となる。

本研究では、分割決定木を利用して、分割関数ゲームにおける提携構造形成問題の検討を行った。従来の協力ゲームでは、提携の値に優加法性と呼ばれる性質を仮定していた。優加法性とは、任意の二つの提携においてその提携を組み合わせることで新たに生成される提携の値は二つの提携の値よりも小さくならないことを保証するものである。しかしながら、現実社会での人間関係を考えた場合、必ずしも優加法性が保証されるとは限らない。特に、本研究課題である大規模ネットワーク分析においては、ネットワーク上の全てのエージェントの集合が最適な集合であるということは現実的に起こりえない。

そこで、本研究では、提携間に外部性がある場合を対象に、分割決定木に基づく、効率的な提携構造形成アルゴリズムの提案を行った。分割決定木では異なる木の効用ベクトルの間には加法性が保証されるため、葉ノード

下に示される全ての効用ベクトルが正の場合、すなわち、正の外部性だけが生じている場合は比較的簡単な問題となる。しかしながら、一方で図 2 に示すように、負の外部性が存在する、すなわち、負の効用ベクトルが存在する状況に対して最適な提携構造を見つける問題は難しい問題となる。そこで、本研究では、分割決定木の構造の特徴を利用した深さ優先探索に基づく分子限定法を利用した提携構造形成アルゴリズムの提案した。

深さ優先探索に基づく分子限定法を利用した提携構造形成アルゴリズムに関しては 3 種類のアルゴリズムの提案を行った。特に負の値の効用ベクトルを効率的に扱うために、図 3 に示すように分割決定木の表現の変更を行った。

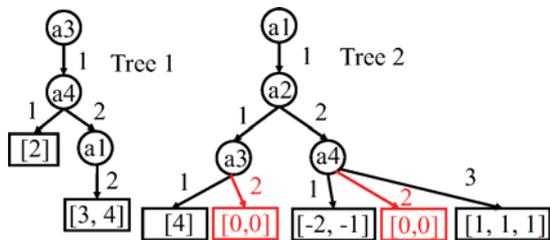


図 3. 改良分割決定木の例

負の効用ベクトルを含む分割決定木が存在する場合、具体的には、負の値を持つ分割が存在する分割決定木において、枝に付与されているラベル番号に注目する。ラベル番号が不連続な場合、連続するようにラベル番号を持つ枝を追加する。

分割決定木において効用の和がゼロとなる分割を明に表現したことで、分枝限定法を実行中に実施する必要があった例外処理を大幅に削減させることが可能となった。

提案手法の性能評価のために、人と人の間のネットワーク構造を考慮した問題を対象に計算機実験を行った結果、既存手法よりも大規模な問題を現実的な時間内で求解可能であることを示した。特に、改良分割決定木を利用した提携構造形成アルゴリズムの性能が最も良いことが示された。

今後、人工知能における代表的な問題の一つである命題論理の最大充足問題のソルバーを利用した手法の検討なども行い、人工知能と協力ゲームの融合を実現することで、更なる現実社会問題への適用を行っていきたい。

本研究成果は、日本国内のマルチエージェント関連の唯一の会議である合同エージェントシンポジウム&ワークショップ 2016 にて優秀論文賞を受賞した。

## 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 Takamasa Ihara, Shunsuke Tsuruta, Taiki Todo, Yuko Sakurai, Makoto Yokoo, “Strategy-proof Cake Cutting Mechanisms for the All-or-nothing Utility”, *Fundamenta Informaticae journal*, to appear

[学会発表] (計 5 件)

- ① Kazuki Nomoto, Yuko Sakurai, Makoto Yokoo, “Coalition Structure Generation Utilizing Graphical Representation of Partition Function Games”, *The 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2017)*, pp. 4977-4978, (2017)
- ② 野本一貴, 大田一徳, 上田俊, 櫻井祐子, 横尾真, 「分割関数ゲームの提携構造形成アルゴリズム」, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016 (JAWS2016), (2016), **優秀論文賞受賞**
- ③ 野本一貴, 伊原尚正, 鶴田俊佑, 櫻井祐子, 横尾真. 「外部性が存在する提携ゲームのための提携構造形成アルゴリズムの提案」, 2016 年電子情報通信学会総合大会, (2016)
- ④ Mingyu Guo, Hong Shen, Taiki Todo, Yuko Sakurai, Makoto Yokoo, “Social Decision with Minimal Efficiency Loss: An Automated Mechanism Design Approach”, *14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2015)*, pp. 347-355, (2015)
- ⑤ Oskar Skibski, Tomasz P. Michalak, Yuko Sakurai, Makoto Yokoo, “A Pseudo-Polynomial Algorithm for Computing Power Indices in Graph-Restricted Weighted Voting Games”, *The 24th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2015)*, pp. 631-637, (2015)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 祐子 (Yuko Sakurai)  
九州大学・システム情報科学研究院・准教授

研究者番号：10396137

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )