

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500166

研究課題名(和文)コンパクトな論理記述に基づく協力ゲーム理論の再構築

研究課題名(英文)Proposing compact representations for coalitional games

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科(研究院・准教授)

研究者番号：10396137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：効率的な提携を形成すること(提携構造形成問題)は、人工知能やマルチエージェントシステムの研究領域において、重要な研究分野となっている。本研究課題では、多分岐ゼロサプレス型BDD~(MTZDD)を応用し、(1)あらゆる特性関数を記述可能、(2)既存の表現法よりも指数的に簡略化可能な場合が存在、(3)コアに関する問題をMTZDDのノード数の多項式時間で求解可能、(4)提携構造形成問題は混合整数計画法を用いることで、既存アルゴリズムよりも高速に解を求めることが求解可能といった性質を持つ簡略記述法の提案などを行った。これらの研究成果は、国際会議 PRIMA2011で優秀論文賞を受賞した。

研究成果の概要(英文)：Coalitional games, including Coalition Structure Generation (CSG), have been attracting considerable attention from the AI research community. Traditionally, the input of a coalitional game is a black-box function called a characteristic function. Previous studies have found that many problems in coalitional games tend to be computationally intractable in this black-box function representation.

We proposed a new concise representation scheme for a characteristic function based on a Zero-suppressed Binary Decision Diagram (ZDD). We received the best paper award at the 4th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent System (PRIMA 2011).

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 提携構造形成問題 二分決定グラフ

1. 研究開始当初の背景

ゲーム理論はフォン・ノイマン以来の伝統ある研究分野であり、近年ではインターネットの発展に伴って新たに確立された研究領域「情報経済」の中心的基盤となっている。情報経済は計算機科学(人工知能・マルチエージェントシステム)と社会科学(ゲーム理論・ミクロ経済学)の横断的学術領域である。情報経済はネットワークと情報が深く関わる経済活動を対象としており、計算機科学分野からの貢献が必須であり、欧米では盛んに研究が行われている。

ゲーム理論は非協力ゲームと協力ゲームの2つに大きく分類される。インターネットオークションの普及に伴い、これまで情報経済では非協力ゲームの研究が主流であった。しかしながら、クラウドソーシングなど、ネットワーク環境上で複数の企業や人が関わる協業が増加していることより、協力ゲームに関する研究の重要性が高まっている。協力ゲーム理論は複数のエージェントがどのように提携を形成し(提携構造形成)、提携内で得られた利得をどう配分するか(解の計算)に関する理論である。研究の重要性が高まりつつある一方で、協力ゲーム理論ではゲームの記述方法が技術の発展や応用領域の拡大に対するボトルネックとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、二分決定グラフに代表される論理関数のコンパクトな表現方法を応用した、協力ゲーム理論の再構築を目的とする。協力ゲーム理論は、電子商取引など、ネットワーク環境での人間の社会活動の増大に伴い、重要な理論となっている。しかしながら、ゲームの記述方法が技術の発展や応用領域の拡大に対するボトルネックであった。そこで、本研究ではデータ構造を用いた効率的な論理関数の処理技法として知られている二分決定グラフを応用し、新た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。

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。協力ゲームの代表的なゲームの記述方法として提携形ゲームがある。提携形ゲームでは提携に属するエージェントが協力することによって得られる利得を特性関数で与える。従来、特性関数は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。単純に表形式で記述する場合、 n 人のエージェントが参加する提携形ゲームでは特性関数の記述に 2^n の記述量が必要である。計算機科学では問題の記述量や計算量を課題とし、計算量は入力サイズに対するオーダーで評価される。特に、人工知能分野では、問題や知識の表現方法を重視している。どのように問題や問題に関する知識を表現するかによって、表現のコストや問題を解くコストが大きく変化する。

2^n の表を記述することはエージェント数が多くなれば非現実的となる。特性関数がブラックボックス関数で表現されている場合、提携構造形成や解の計算等の協力ゲームのほとんどの問題は計算困難である。従って、本研究では、新しいゲームの表現を導入することで、協力ゲームにおける、問題の記述量と計算量に関する問題点を解決する。

3. 研究の方法

これまで、協力ゲームにおける特性関数は何らかの性質を持つという仮定の下で、計算機科学者らによって特性関数を論理関数で記述する方法が提案されている。しかし、これらの研究は演算子が論理積のみであったり、各変数は一度しか出現しないといった限定的な論理関数しか対象にしていない。そこで、二分決定グラフ(Binary Decision Diagram, BDD)に代表される、論理関数のコンパクトな記述方法を応用し、協力ゲーム理論の再構築を行う。二分決定グラフはデータ構造を用いた効率的な論理関数の処理技法であり、主にVLSI設計自動化Aの分野で発展してきた。具体的には、図1に示すように二分木状のグラフで表現され、(1)冗長な接点を全て削除、(2)等価な接点を全て共有という2つの簡約化規則によってBDDが得られる。BDDは論理関数に対してグラフの形が一意に定まり、多くの実用的な論理関数をコンパクトに表現可能という利点を持つ。さらに、BDDの改良型としてZDD(Zero-suppressed Binary Decision Diagrams)が開発されている。ZDDは集合データの処理に優れており、データベース解析処理分野にて有効性が示されている。本研究では、BDDとZDDに関する長年蓄積されてきた膨大な研究成果や知見、開発パッケージを利用し、協力ゲーム理論の記述量と計算量に関する課題に適用できるように拡張を行う。さらに、BDD/ZDDの拡張技術を応用し、協力ゲームの新たなゲーム記述方法の提案及び、効率的な提携構造形成アルゴリズムの提案や解概念の計算アルゴリズムの提案を行う。

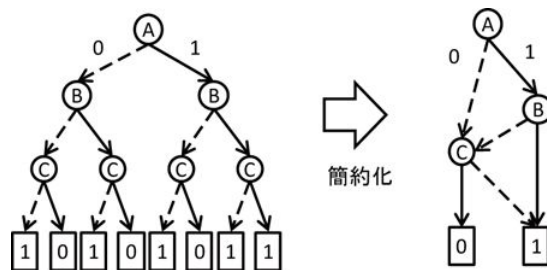


図1. BDD の例

4. 研究成果

本研究では、協力ゲームにおける代表的なゲーム記述法の提携形ゲームを対象とし、特性関数の簡潔化記述法の提案を行うとともに、その簡潔化記述法を用いて、提携構造形成問題を高速に解くアルゴリズムの提案、コ

アやシャプレイ値といった解概念に関する問題を多項式時間で求解可能なアルゴリズムの提案を行った。

具体的には、まず、ゼロサプレス型二分決定グラフ (ZDD) の一種である、多分岐 ZDD (Multi-terminal ZDD, MTZDD) を適用し、特性関数の簡潔なグラフ表現法の提案を行った。

具体例を図 2 に示す。各ノードがエージェントを表し、葉ノードが各提携値を表す。各提携に含まれるエージェントはルートノードからの葉ノードまでのパス上で 1-枝を取るエージェントである。たとえば、最も右端のパスでは、1, 2, 3, 4 のエージェントの 1-枝を通してあり、これはエージェント集合 {1,2,3,4} の提携値が 1 であることを示す。

提案手法は既存手法に比べ、エージェント数に対して指数的に簡略化可能となった。さらに、MTZDD を適用した記述法において、各提携で与えられる利得の和を最大化する、社会的に望ましい提携を形成するアルゴリズムの提案を行うとともに、協力ゲームでの重要な解概念の一つであるコアに対して、コアの非空性判定などを効率的に行うアルゴリズムの提案を行った。これらの研究成果は、マルチエージェントシステムの国際会議である The 14th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent S (PRIMA2011) にて発表し、最優秀論文賞を受賞した。

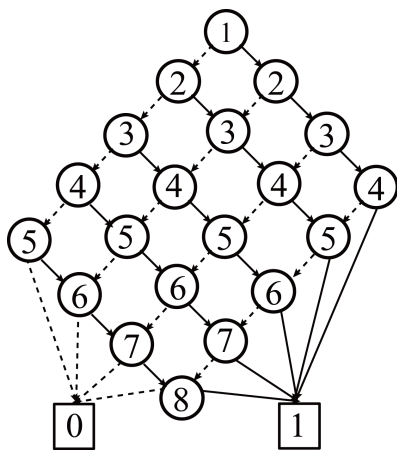


図 2. MTZDD の例

また、Oxford 大学のマルチエージェントシステム研究者らと共同研究を実施し、提携間に外部性が存在する場合を対象に特性関数の簡潔な記述方法を提案し、この記述方法を用いた場合、提携値の配分方法の一つであるシャプレイ値が多項式時間で計算可能であることを示した。

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)

櫻井祐子, 横尾真: 予算制約を持つ入札者を対象とした再配分メカニズムの提案, 人工知能学会論文誌, Vol.26, pp.217-227. (査読有)

〔学会発表〕(計 7 件)

Oskar Skibski, Tomasz P. Michalak, Yuko Sakurai, Michael Wooldridge, and Makoto Yokoo, A Graphical Representation for Games in Partition Function Form, The 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2015), 2015.01.28, アメリカ

Yuko Sakurai, Tenda Okimoto, Makoto Yokoo: Strategy-proof mechanisms for k-winner selection problem, The 16th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent System (PRIMA-2013), 2013.12.06, ニュージーランド

Yuko Sakurai and Makoto Yokoo: Generalized Partition Mechanism: Framework for Combining Multiple Strategy-Mechanisms, 2012.12.07, マカオ

Yuko Sakurai, Suguru Ueda, Atsushi Iwasaki, Shin-ichi Minato, Makoto Yokoo: A Compact Representation Scheme of Coalitional Games Based on Multi-Terminal Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams, The 14th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent System (PRIMA-2011), 2011.11.17, オーストラリア

櫻井祐子, 上田俊, 岩崎敦, 湊真一, 横尾真: MTZDD に基づく提携ゲームの簡略記述法の提案, 合同エージェント&マルチエージェントシステムワークショップ, 2011.10.27, 静岡県

櫻井祐子, 白井康之, 鶴間浩二, 小山聡: 大規模電子商取引データからの効果的な訴求表現の発見, 第 25 回人工知能学会全国大会, 2011.6.1, 岩手県

Yuko Sakurai, Suguru Ueda, Atsushi Iwasaki, Shin-ichi Minato, Makoto Yokoo: A Compact Representation Scheme of Coalitional Games Based on Multi-Terminal Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams, IJCAI Workshop on Social Choice and Artificial Intelligence, 2011.7.16, スペイン

〔その他〕

ホームページ等

<http://agent.inf.kyushu-u.ac.jp/~sakurai/index-j.html>

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所・准教授
研究者番号：10396137

(2) 研究分担者

横尾 真 (Makoto Yokoo)
九州大学・システム情報科学研究所・教授
研究者番号：20380678

(3) 連携研究者

湊 真一 (Shin-ichi Minato)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：10374612