

# エージェントの参加が不確実な場合の $k$ 分割問題

$k$ -partition problem with uncertainty of agents' participation

野本 一貴<sup>\*1</sup>

Kazuki Nomoto

櫻井 祐子<sup>\*2</sup>

Yuko Sakurai

岡本 吉央<sup>\*3\*4</sup>

Yoshio Okamoto

横尾 真<sup>\*1\*4</sup>

Makoto Yokoo

<sup>\*1</sup>九州大学

Kyushu University

<sup>\*2</sup>産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>\*3</sup>電気通信大学

The university of Electro-Communications

<sup>\*4</sup>理化学研究所 革新知能統合研究センター AIP

RIKEN, Center for Advanced Intelligence Project AIP

In this paper, we consider a  $k$ -partition problem with uncertainty of agents' participation. In a traditional  $k$ -partition problem, all agent are guaranteed to join the assigned partitions. However, some agents cannot join them in more real-world problem settings. In such a case, some remaining agents have to move from the current partition to another partition to guarantee  $k$ -partitions. However, it requires some costs and loses efficiency. Therefore, we need to determine a  $k$  partitions by taking into account the uncertainty of agent's participation. In our problem setting, we assume that at most one agent is not going to participate. If one agent cannot participate, we allow one agent among the remaining agents to move from her current partition to another partition. We formalize our problem as an integer programming and show the results of computational experiment.

## 1. はじめに

効率的な提携を形成することは、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。エージェントらは提携することで、個人では成し得ないことが可能になったり、より効率的に物事を行うことが可能となる。提携構造形成問題はエージェントの集合と任意のエージェントの部分集合 (提携) に対して提携値が与えられているとき、提携値の和が最大する、エージェントの分割 (提携構造) を決定する問題である [Sandholm 97]。最適な提携構造を見つけるためには計算量の課題があるため、マルチエージェントシステムの研究分野で盛んに研究が行われている [Rahwan 15]。

$k$  分割問題は提携構造形成問題の一形式であり、提携構造形成問題では任意の分割にエージェントを分割可能である一方、 $k$  分割問題では提携数が  $k$  個と固定された下で、提携値の和を最大化する分割を求める問題である。従来のほとんどの提携構造形成問題では、提携を組むエージェントの存在を保証している。数少ない例外として、文献 [Okimoto 17] で、エージェントの参加に対する不確実性を考慮した提携構造形成問題について議論されているが、 $k$  分割問題を対象にしたものではない。

本研究では、エージェントの参加に対する不確実性を考慮した  $k$  分割問題を検討する。エージェントらが実施すべきタスク数を事前に定められている状況は実世界でも数多く存在するため、このような状況でエージェントが不参加になることを検討する意義は大きい。本論文では、高々1人のエージェントが提携に参加できない可能性が存在する場合の  $k$  分割問題を整数計画問題として定式化し、商用ソルバーを用いた評価実験を示す。

## 2. 問題設定

一般的な提携構造形成問題では、提携を入力として提携値を出力する特性関数と呼ばれる、ブラックボックスの関数 (オラクル) により与えられることを仮定する。特性関数を表記するためには、エージェント数を  $n$  とすると  $O(2^n)$  の表記量が必要になる。そのため、特性関数を用いずに、問題を表現する簡潔記述法の提案も提携構造形成問題では重要な研究課題の一つである [leong 05, Conitzer 06]。本論文では、エージェント間の関係性をグラフで表現する簡略な記述法の下で、問題を表現する。

問題を重み付き無向グラフ  $G = (V, E)$  で表現する。ノード集合  $V$  はエージェント集合であり、各ノードはエージェントを示す。単独提携の提携値はノードの重みとして表現する。枝集合  $E$  に含まれる枝は正の値の重みを持つ重み付き枝である。重みは、2つのノードが示すエージェントらが同じ提携に入ることによってシナジーが生じることを示す。本論文では、全てのシナジーは非負の値とする。シナジーがゼロの場合、そのエージェント間には枝は存在しない。

重み付き無向グラフが与えられたとき、枝の重みが最大化されるように、ノードを  $k$  分割する。各分割には少なくとも1つのノードが含まれていなければならない。さらに、高々1名のエージェントが参加しない可能性があり、実際に参加しないエージェントが出てきた場合、 $k$  分割を維持する/提携値の和をより良くするために、1 エージェントを他の提携へ移動することができるとする。

**例 1** 4人のエージェントが存在するとする。このとき、図 1 に示すように、任意の 2 エージェント間にシナジーが存在するとし、各エージェントの単独提携の提携値は 0 とする。例えば、エージェント 1 とエージェント 2 の 2 人提携の場合、その提携値は 4 である。

さて、タスク数を  $k = 2$  としたとき、最適な提携構造は  $\{1, 2, 3\}$  と  $\{4\}$  に分割した場合であり、その値は 25 である。これが一時的な提携構造となる。

連絡先: 野本一貴, 九州大学大学院システム情報科学府, 812-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地, (092)802-3576, nomoto@agent.inf.kyushu-u.ac.jp

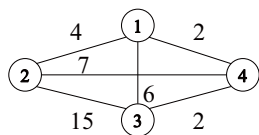


図 1: エージェント間の関係

例えば、エージェント 4 が不参加となった場合、提携数が 1 個のみとなり、残りの 3 エージェントで 2 個の提携を作る必要がある。この例では、エージェント 1 が今の提携から離れ、新たな単独提携を作ることとなる。よって、実際の提携構造は  $\{1\}$  と  $\{2, 3\}$  となり、値は 15 である。一方、全員が参加した場合、先に求めた提携構造が実際の提携構造となる。

### 3. 整数計画問題としての定式化

本章では、整数計画問題として定式化を行う。この整数計画問題を解くことで、エージェントがいなくなる可能性を考慮しない場合の最適な提携構造を得ることができる。実際にいずれかのエージェントが参加しないと判明した場合、残ったエージェント集合のうち、1 名を移動させることができる。各エージェントが他の提携（タスク）に移動したときの値を算出し、最も高い提携値の和が得られる提携構造が実際の提携構造となる。この操作は  $k(n-1)$  回の繰返しで実施されることになる。

まず、記法の定義を行う。 $i = 1, \dots, n$  ( $n \geq 2$ ) をエージェントとする。 $j = 1, \dots, k$  ( $k \geq 2$ ) をタスクとする。 $w_{i,i'}$  をエージェント  $i$  と  $i'$  の間の枝の重みとする。 $x_{i,j} \in \{0, 1\}$  をタスク  $j$  をエージェント  $i$  に割り当てるかどうかを決める決定変数とする。 $y_{i,i',j} \in \{0, 1\}$  をエージェント  $i$  と  $i'$  が同じタスク  $j$  に割り当てるかどうかを示す決定変数とする。

この記法を用いて下記の通り、目的関数と制約条件を定める。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{i'>i}^n \sum_{j=1}^k w_{i,i'} y_{i,i',j} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^k x_{i,j} = 1 \quad \forall i \end{aligned} \quad (1)$$

for each edge  $(i, i' (> i))$ ,

$$y_{i,i',j} \leq x_{i,j} \quad \forall j \quad (2)$$

$$y_{i,i',j} \leq x_{i',j} \quad \forall j \quad (3)$$

$$x_{i,j} + x_{i',j} \leq y_{i,i',j} + 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} \geq 1 \quad \forall j \quad (5)$$

各制約条件について、式 (1) は各エージェントが 1 つのタスク（分割）に参加することを示す条件である。式 (2) から (4) はエージェント  $i$  と  $i'$  に同じタスクが割り当てられた場合、目的関数に  $w_{i,i'}$  が足されることを操作する条件である。式 (6) は少なくとも 1 名のエージェントが各タスクに割り当てられることを示す条件である。

本論文では、エージェントの不参加を考慮せずに一時的な提携構造を求め、不参加が分かった後に、残りのエージェントを動かすという手法を紹介した。厳密な手法として、提携構造を求める際に、各エージェントが不参加になる確率を考慮し、1 名のエージェントが不参加になった場合に他のエージェントを移動させることも制約条件とした下で、提携値の和の期待値

を最大化する提携構造を求めるという手法もある。紙面の都合上、本手法の説明は割愛する。

### 4. 評価実験

本章では、商用ソルバー Gobi 7.5.0 を用いた評価実験の結果を示す。利用した計算機について、OS は Ubuntu 16.04 LTS, CPU は Intel Xeon E5-2680v4 @2.40GHz プロセッサ × 2 基、メモリは 128GB である。

実験の問題設定は、エージェント数が 7、タスク数は 3、2 つのノード間に存在する枝の発生確率を 0.5、各枝の重みを  $[1.0, 100.0]$  の範囲で一様分布に基づいて決定する。また、各エージェントが不参加になる確率を  $[0.00, 0.01]$  の範囲で一様分布に基づいて与える。この問題設定の下で 100 インスタンスを実行した。

表 1: 実験結果

不参加の エージェント数	インスタンス数	平均実行時間 (ms)
0	98	24.9
1	2	37.0
		25.1

表 1 に不参加の参加数に応じた平均実行時間を示す。不参加のエージェントが存在する場合、残りのエージェントを移動させる操作が必要のため、計算時間が増加している。また、得られた解の品質であるが、どのエージェントが参加するかが決定された後に得られた最適な提携構造と比較して、本手法では、不参加のエージェントがない場合は最適な提携構造が得られているのは自明である。また、不参加のエージェントがいる場合でも、本手法では最適な提携構造を得ることができた。

### 5. おわりに

本論文では、高々 1 人のエージェントが提携に参加できない状況が存在する場合の  $k$  分割問題を整数計画問題として定式化し、評価実験を行った。様々な問題設定での評価実験等が今後の課題として挙げられる。

### 参考文献

- [Conitzer 06] Conitzer, V. and Sandholm, T.: Complexity of Constructing Solutions in the Core Based on Synergies Among Coalitions., *Artificial Intelligence (AI)*, Vol. 170, No. 6, pp. 607–619 (2006)
- [Jeong 05] Jeong, S. and Shoham, Y.: Marginal contribution nets: a compact representation scheme for coalitional games, in *Proceedings of ACM EC*, pp. 193–202 (2005)
- [Okimoto 17] 沖本 天太, Schwind, N., 平山 勝敏, 井上 克巳, Marquis, P.: 不確実性を考慮した提携構造形成問題に関する一検討, 第 31 回人工知能学会全国大会 (2017)
- [Rahwan 15] Rahwan, T., Michalak, T. P., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Coalition structure generation: A survey, *AI*, Vol. 229, pp. 139–174 (2015)
- [Sandholm 97] Sandholm, T. and Lesser, V. R.: Coalitions Among Computationally Bounded Agents, *AI*, Vol. 94, No. 1-2, pp. 99–137 (1997)