

不確実性を考慮したタイプ付き提携構造形成アルゴリズム

藤本 真育¹沖本 天太²平山 勝敏²神戸大学海事科学部¹ 神戸大学大学院海事科学研究科²

1 はじめに

提携構造形成 (Coalition Structure Generation, CSG) 問題 [2] とは, エージェントの集合を社会的余剰が最大化されるように, いくつかの提携に分割する問題である. CSG 問題はエージェントの集合と特性関数と呼ばれるブラックボックス関数により定義され, 応用例として分散経路決定問題 [1] 等がある.

確率的提携構造形成 (Probabilistic Coalition Structure Generation, PCSG) 問題 [4] とは, 各エージェントの提携への参加の有無が確率により与えられている CSG 問題である. PCSG 問題では, 各提携で得られる利得の期待値の総和が最大化されるような提携構造を求めることを目的としている.

従来の CSG や PCSG 問題では, 各提携の利得は特性関数により与えられることを仮定しているため, その表記量はエージェント数に対して指数関数的に増加する. タイプ付き提携構造形成 (CSG based on Agent Types, CSG_t) 問題 [5] とは, エージェントの類似した能力 (タイプ) を用いた特性関数の簡略表記法に基づく CSG 問題である. タイプ付き確率的提携構造形成 (PCSG based on Agent Types, $PCSG_t$) 問題 [3] とは, エージェントの能力に関するタイプに加え, 各エージェントの任意の提携への参加率に関するタイプを用いた特性関数の簡略表記法に基づく PCSG 問題である. $PCSG_t$ 問題では, エージェントのタイプ数及び, 提携への参加率に関するタイプ数が固定されているとき, その計算量は多項式のオーダーとなる.

$PCSG_t$ に関するフレームワークは存在するが [3], この問題と解くアルゴリズムは存在しない. そこで, 本論文では動的計画法に基づく $PCSG_t$ アルゴリズムを開発し, 評価する. CSG_t 問題に関する既存研究 [5] では, 整数計画ソルバ CPLEX と比べ, 動的計画法が有効であることが示されている.

2 タイプ付き提携構造形成問題

提携構造形成 (CSG) [2] は, $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ をエージェントの集合, $v: 2^A \rightarrow \mathbb{R}$ を各提携における利得を与える特性関数とし, $CSG = \langle A, v \rangle$ の組により定義される. 集合 A の部分集合 $C \subseteq A$ を提携と呼び, ある提携 C で得られる利得は $v(C)$ により与えられる. また, 集合 A の分割 $CS = \{C_1, \dots, C_m\}$ を提携構造と呼び, CS の利得は各提携 C_i ($1 \leq i \leq m$) で得られる利得の総和 $V(CS) = \sum_{C_i \in CS} v(C_i)$ により与えられる.

タイプ付き提携構造形成 (CSG based on Agent Types, CSG_t) 問題 [5] とは, エージェントの類似したタイプを用い

た特性関数の簡略表記法に基づく CSG 問題である. この問題は $A^t = \{\langle n^1, \dots, n^t \rangle \mid 0 \leq n^i \leq n_A^i\}$ を全ての提携タイプの集合, $v_t: A^t \rightarrow \mathbb{R}$ をエージェントのタイプ付き特性関数とし, $CSG_t = \langle A^t, v_t \rangle$ の組により定義される. 集合 A^t の部分集合 $n_C = \langle n_C^1, \dots, n_C^t \rangle$ を提携 C の提携タイプと呼び, 各 $n_C^i \in n_C$ ($1 \leq i \leq t$) は C に属するタイプが i のエージェント数を表す.

以下, CSG_t 問題の例を示す. ある通訳派遣会社に 3 人の通訳がいるとする. *Alice* と *Bianca* は英語を, *Chan* は中国語の通訳が可能とする. 今, この通訳派遣会社にいくつかの通訳の依頼があり, *Alice* または *Bianca* を単独で派遣する場合は \$200, *Chan* を単独で派遣する場合は \$300 の報酬が得られるとする. また, 任意の 2 名を派遣する場合は \$500, 全員を派遣する場合は \$700 の報酬が得られるとする. ここで, 各通訳の能力に着目する. *Alice* と *Bianca* はどちらも英語の通訳が可能であり, 両者を一つのタイプとみなすことができる. 英語の通訳が可能な *Alice* と *Bianca* をタイプ 1, 中国語の通訳が可能な *Chan* をタイプ 2 とすると, 特性関数は $v_t(\langle 1, 0 \rangle) = \200 , $v_t(\langle 0, 1 \rangle) = \300 , $v_t(\langle 2, 0 \rangle) = \500 , $v_t(\langle 1, 1 \rangle) = \500 , $v_t(\langle 2, 1 \rangle) = \700 となる. このとき, 通訳派遣会社が得る報酬が最大となるような提携構造は, 英語の通訳 2 名と中国語の通訳 1 名を派遣した場合で $v_t(\langle 2, 0 \rangle) + v_t(\langle 0, 1 \rangle) = \$500 + \$300 = \800 となる.

従来の CSG 問題では, エージェント数を n とすると, 特性関数を表記するために $\Theta(2^n)$ の表記量を必要としている (全ての部分集合に対して特性関数を表記する必要があるため). 一方, CSG_t 問題では, エージェントのタイプ数 t が固定されている場合, 特性関数の表記量は多項式のオーダーとなり, 最適な提携構造が $O(n^{2t})$ で求解可能となることが知られている [5].

3 タイプ付き確率的提携構造形成問題

確率的提携構造形成 (Probabilistic Coalition Structure Generation, PCSG) 問題 [4] とは, 各エージェントの任意の提携への参加の有無が確率により与えられている CSG 問題である. PCSG 問題は, $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ をエージェントの集合, $v_e: 2^A \rightarrow \mathbb{R}$ を期待値に関する特性関数, $f: A \rightarrow [0, 1]$ を各エージェントの (任意の) 提携への参加の有無を確率で返す関数とし, $PCSG = \langle A, v_e, f \rangle$ の組により定義される. PCSG 問題では, 利得の期待値計算が重要となるが, ここでは, ある提携 C の利得の期待値 $v_e(C)$ は, C に属する全てのエージェントが参加したときのみ与えられるとする計算法を用いる.

表 1 参加率に関するタイプの割合が異なる PCSG_t 問題における求解時間の平均値 . タイプの割合 = (type1, type3, type5) .

タイプの割合	(16, 2, 2)	(14, 3, 3)	(12, 4, 4)	(10, 5, 5)	(6, 7, 6)	(5, 5, 10)	(4, 4, 12)	(3, 3, 14)	(2, 2, 16)
実行時間	162.8ms	318.8ms	1568.8ms	3211.6ms	8899.1ms	1936.7ms	636.9ms	145.2ms	49.6ms

タイプ付き確率的提携構造形成 (PCSG based on Agent Types, PCSG_t) 問題 [3] とは, エージェントの能力に関するタイプに加え, 提携への参加率に関するタイプを用いた特性関数の簡略表記法に基づく PCSG 問題である. この問題は A^t を提携タイプの集合, A^{t_p} を提携への参加率に関する提携タイプ集合, $v_e^{(t,t_p)}: A^t \times A^{t_p} \rightarrow \mathbb{R}$ を能力及び参加率に関するタイプ付き特性関数とし, $PCSG_t = \langle A^t, A^{t_p}, v_e^{(t,t_p)} \rangle$ の組により定義される. ある提携 C で得られる利得の期待値は, $n_C = \langle n_C^1, \dots, n_C^t \rangle$ を能力に関する, $m_C = \langle m_C^1, \dots, m_C^t \rangle$ を参加率に関する提携タイプとし, $v_e^{(t,t_p)}(n_C, m_C) = v_t(n_C) \cdot v_{t_p}(m_C)$ により求められる. $v_{t_p}(m_C) = \prod_{j=1}^{t_p} p_j^{m_C^j}$ は C に属する全てのエージェントの参加率の積を返す関数であり, p_j ($0 < p_j \leq 1$) はタイプが j であるエージェントの提携への参加率を表す.

以下, PCSG_t 問題の例を示す. 通訳派遣会社の例において, 各通訳は自身の任意の提携への参加率を {type 1: attend (90%), type 2: maybe attend (70%), type 3: unsure (50%), type 4: maybe not attend (30%), type 5: not attend (10%)} のカテゴリから事前を選択するものとする. 例えば, Alice と Bianca は「unsure (50%)」, Chan は「attend (90%)」を選択したとする. このとき, タイプ付き特性関数は $v_e^{(t,t_p)}(< 1, 0 >, < 0, 0, 1, 0, 0 >) = 100$, $v_e^{(t,t_p)}(< 0, 1 >, < 1, 0, 0, 0, 0 >) = 270$, $v_e^{(t,t_p)}(< 2, 0 >, < 0, 0, 2, 0, 0 >) = 125$, $v_e^{(t,t_p)}(< 1, 1 >, < 1, 0, 1, 0, 0 >) = 225$, $v_e^{(t,t_p)}(< 2, 1 >, < 1, 0, 2, 0, 0 >) = 157.5$ のように記述される. 例えば, $v_e^{(t,t_p)}(< 1, 1 >, < 1, 0, 1, 0, 0 >) = v_t(< 1, 1 >) \cdot v_{t_p}(< 1, 0, 1, 0, 0 >) = 500 \cdot (0.9^1 \cdot 0.5^1) = 225$ となる. この例において, 得られる利得の期待値の総和が最大となるような提携構造は単独のエージェントからなる提携構造となり, 得られる利得の期待値は $v_e^{(t,t_p)}(< 1, 0 >, < 0, 0, 1, 0, 0 >) + v_e^{(t,t_p)}(< 1, 0 >, < 0, 0, 1, 0, 0 >) + v_e^{(t,t_p)}(< 0, 1 >, < 1, 0, 0, 0, 0 >) = 100 + 100 + 270 = 470$ となる.

4 アルゴリズムと評価実験

CSG_t に関する既存研究 [5] では, 整数計画ソルバー CPLEX と比べ, 動的計画法が有効であることが示されている. そこで, 本論文では動的計画法に基づく PCSG_t アルゴリズムを開発する. 具体的には, PCSG_t 問題を多次元ナップサック問題として定式化し, 動的計画法を用いて最適な提携構造を求解する. PCSG_t は CSG_t の拡張であり, 従来のエージェントの能力に関するタイプに加え, 各エージェントの任意の提携への参加率に関するタイプを考慮している. PCSG_t 問題から多次元ナップサック問題への定式化の詳細については, CSG_t に関する文献 [5] と同様の方法を用いているため, ここでは, 割愛する.

実験では, エージェントの参加率に関するタイプの割合が異なる PCSG_t 問題における求解時間を調べた. エージェント数

は 20, エージェントの能力に関するタイプ数は 2 ($(t_1, t_2) = (10, 10)$), エージェントの参加率に関するタイプ数は 3 (type1, type3, type5) とした. また, 各提携タイプで得られる利得は [0.100] の範囲からランダムに決定した. 実験結果は 50 インスタンスの平均値を表す. 表 1 に実験結果を示す. 表中の上段はタイプの割合, 例えば, (16, 2, 2) は type1 が 16 人, type3 が 2 人, type5 が 2 人を示し, 下段は 50 インスタンスの実行時間の平均値 (ms) を表す. 実験結果より, エージェントの参加率に関するタイプの割合に偏りがあるときとないときとでは, 求解時間に大きな差が出るのが分かった. 実際, タイプの割合が (6, 7, 6) のとき, 求解時間は 8899.1ms であった. これに対し, タイプの割合に偏りがある場合, 例えば, タイプの割合が (16, 2, 2) のときは 162.8ms, (2, 2, 16) のときは 49.6ms であった.

5 おわりに

タイプ付き確率的提携構造形成 (PCSG_t) 問題とは, エージェントの能力に関するタイプに加え, 提携への参加率に関するタイプを用いた特性関数の簡略表記法に基づくタイプ付き提携構造形成問題である. 本論文では, タイプ付き確率的提携構造形成 (PCSG_t) アルゴリズムを提案し, 評価した. 実験では, エージェントの参加率に関するタイプの割合が異なる PCSG_t 問題における求解時間を調べ, タイプの割合に偏りがあるときとないときとでは, 求解時間に大きな差が出るのが分かった.

今後の課題として, より詳細な評価実験, 例えば, 異なるエージェント数及びタイプ数における提案アルゴリズムの評価が挙げられる. また, 文献 [4] で紹介されている, 他の期待値計算法を用いた問題の定式化及び, アルゴリズムの開発が挙げられる.

謝辞: 本研究の遂行にあたり, JSPS 基盤研究 (A) (課題番号: 17H00763) の研究助成を受けました. ここに感謝致します.

参考文献

- [1] T. Sandholm and V. Lesser. Coalitions among computationally bounded agents. *Artificial Intelligence*, 94(1-2):99-137, 1997.
- [2] 横尾真, 岩崎敦, 櫻井祐子, and 岡本吉央. 協力ゲーム. コンピュータソフトウェア, 30(2):33-51, 2013.
- [3] 沖本天太, 上田俊, 平山勝敏, 藤本真育, and 豊島大弥. エージェントのタイプに基づく確率的提携構造形成問題. In *FIT*, pages 25-30, 2018.
- [4] 沖本天太, 平山勝敏, N. Schwind, 井上克巳, and P. Marquis. 確率的な提携構造形成フレームワークの提案. In *FIT*, volume 第 2 分冊, pages 65-70, 2017.
- [5] 上田俊, 北木真, 岩崎敦, and 横尾真. 協力ゲームにおける特性関数のエージェントのタイプに基づく簡略表記法. 電子情報通信学会論文誌, J94-D(11):1716-1728, 2011.