

# 複数同時交渉問題のための協調度に基づくマッチング

川田 涼平<sup>1,a)</sup> 藤田 桂英<sup>2,b)</sup>

**概要:** 近年, マルチエージェントシステムの研究において, 自動交渉が注目されている. 多数のエージェントが存在し, その中の任意のエージェントを交渉相手として選択し, 全体で複数の交渉が同時に行われる交渉問題を複数同時交渉問題という. 複数同時交渉問題において, すべてのエージェントと交渉することは現実的ではない. そこで, 本研究では複数同時交渉問題において適切なエージェントのマッチングを発見する手法を提案する. 提案手法では, エージェント間の協調度に基づいてマッチングを行う. 協調度には Hypervolume に基づく協調度を新たに提案し, 使用する. また, シミュレーション実験により, 提案した協調度が社会的余剰に対し強い相関を持つことを示す. さらに, 提案手法が社会的余剰について最適解に近いマッチングを発見可能なことを示す.

## 1. はじめに

マルチエージェントシステムにおいて複数のエージェントが協調することでより大きな利得が発生することが知られている [1]. しかし, 各エージェントが独自の効用関数を持つ場合, すべてのエージェントを集中的に制御し協調させることは困難である. そこで, エージェント同士が合意を形成し強調する手段として自動交渉が注目されている. また, 自動交渉は実社会においても, 異なる効用を持つ人工知能同士を協調させる機構として期待されている [2].

多数のエージェントが存在し, その中の任意のエージェントと交渉ができ, 全体で複数の交渉が同時に行われる複数同時交渉問題は, サプライチェーンマネジメントやスマートグリッドなど現実世界の問題に近い設定であるため, 自動交渉の分野において重要な課題の一つである. 交渉可能なエージェントが多数存在する場合, すべてのエージェントと交渉することは現実的ではない. 社会的により合意を形成できるエージェントのペアを事前に知ることができれば, それに基づいてマッチングを行うことで社会全体として良い合意が形成できる.

そこで, 本研究では複数同時交渉問題において適切なエージェントのマッチングを発見する手法を提案する. 具体的には, マッチングされるエージェント間の協調度が大きくなるようにマッチングを行う. また, マッチングに使用するエージェント間の協調度を定量的に評価する指標と

して Hypervolume に基づく協調度  $MOC_{HV}$  を提案する.  $MOC_{HV}$  はパレート最適な合意案候補が支配する空間の超体積 (Hypervolume) として定義される. また, シミュレーション実験により, 提案した協調度が社会的余剰に強い相関を持つことを示す. さらに, 提案したマッチング手法が社会的余剰について最適解に近いマッチングを発見可能なことを示す.

## 2. 問題設定

### 2.1 複数論点交渉問題

本研究では, 論点が複数存在する複数論点交渉問題を扱う. 論点や各論点の選択肢などが取りうる値を定義したものを交渉ドメインという. 交渉ドメインは論点集合  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}$  を持つ. また, 論点  $i_j \in I$  は選択肢集合  $V_j = \{v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jm_j}\}$  を持つ. ただし,  $M$  はドメインの論点数で,  $m_j$  は  $i_j$  の選択肢の数とする.

各論点  $i_j \in I$  について選択肢  $v_j \in V_j$  を一つずつ選んだものを合意案候補 (Bid) といい, 合意案候補  $s$  は  $s = (v_1, v_2, \dots, v_M)$  として表される. また, 全合意案候補の集合  $S$  は式 (1) と表せる.

$$S = \{s = (v_1, v_2, \dots, v_M) \mid v_j \in V_j, 1 \leq j \leq M\} \quad (1)$$

また, エージェントは各論点  $i_j$  について  $\sum_{j=1}^M w_j = 1$  を満たす重み  $w_j$  と選択肢の評価値  $eval(v_j)$  を持つ. ただし,  $eval(v_j)$  は最大値を 1 として正規化されている. このとき, エージェントの効用関数  $U$  は式 (2) となる.

$$U(s) = \sum_{j=1}^M w_j \cdot eval(v_j) \quad (2)$$

<sup>1</sup> 東京農工大学 工学部 情報工学科

<sup>2</sup> 東京農工大学大学院 工学研究院 先端情報科学部門

a) kawata@katfujilab.tuat.ac.jp

b) katfujic@cc.tuat.ac.jp

また、各エージェントに対し留保価格 (reservation value) が設定される場合がある。留保価格は合意形成に失敗した際にエージェントが獲得できる効用である。

## 2.2 複数同時交渉問題

本研究では、複数同時交渉問題を扱う。エージェント集合  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  が存在し、エージェントのペアの集合  $P = \{p \subset A \mid |p| = 2\}$  の任意のペア  $p \in P$  で交渉でき、複数の交渉が同時に行われる問題を複数同時交渉問題と定義する。エージェントが多数存在する場合、すべてのエージェントと交渉することは困難であるため、エージェントのマッチングが重要になる。

複数同時交渉問題におけるマッチングを、交渉に参加するエージェントの集合  $A$  について、エージェントのペアの集合  $P$  からエージェントの重複がないようにペア  $p \in P$  をいくつか選んだものであるマッチング  $m \in M (M = \{m \subset P \mid p_1, p_2 \in m, p_1 \cap p_2 = \phi\})$  を求めることと定義する。マッチング  $m \in M$  の評価値  $eval_M(m)$  は  $p \in P$  の評価値  $eval_P(p)$  を用いて式 (3) と表せる。 $eval_P(p)$  には組  $p$  で交渉をした際の社会的余剰などを使用する。

$$eval_M(m) = \sum_{p \in m} eval_P(p) \quad (3)$$

## 3. エージェント間の協調度

### 3.1 エージェント間の協調度に関する先行研究

遠山らは獲得効用の公平性に基づく合意形成の難易度の指標として MOL (Metric of Opposition Level) を提案している [3]。エージェントの集合  $A$  について、エージェント  $a \in A$  の効用関数を  $U_a$ 、MOL の計算の対象とする合意案候補の集合を  $\Omega$  とすると、MOL は式 (4) で表す。

$$MOL(A, \Omega) = z \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{a \in A} \left( \overline{U(\omega)} - U_a(\omega) \right)^2 \quad (4)$$

$$\overline{U(\omega)} = \frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} U_a(\omega), \quad z = \frac{|A|}{|A| - 1} \cdot \frac{1}{|\Omega|}$$

対象とする合意案候補集合  $\Omega$  をすべての合意案ではなく、パレート最適な合意案候補、留保価格以上の合意案候補などに限定することで、ドメインによっては社会的余剰と MOL の相関が改善されることが示されている [4]。

MOL はエージェントの効用の公平性にのみ注目しているため、全エージェントの獲得できる効用が低い場合に対立していないと評価してしまうという問題点がある。

### 3.2 Hypervolume に基づく協調度

エージェント間の協調度として、Hypervolume に基づく協調度  $MOC_{HV}$  (Measure Of Cooperativeness based on HyperVolume) を提案する。 $MOC_{HV}$  を交渉に参加する各

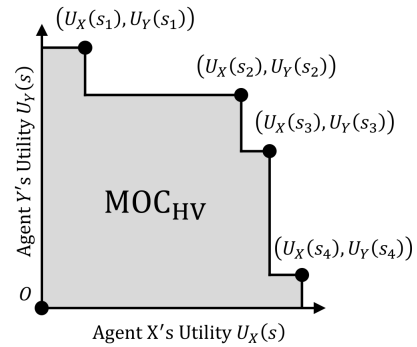


図 1 Hypervolume に基づく協調度の概念図

エージェントの効用関数の最大化を目的関数としたときの、パレート最適な合意案候補集合が支配する空間の超体積 (Hypervolume) として定義する。

エージェントの集合  $A$  と全合意案候補の集合  $S$  について、パレート最適な合意案候補  $s^* \in S$  が支配する空間の超矩形  $d_{s^*}$  の集合を  $D$  とすると、Hypervolume に基づく協調度  $MOC_{HV}$  は超体積を求める関数  $HV$  を用いて式 (5) で表す。

$$MOC_{HV}(A, S) = HV \left( \bigcup_{d \in D} d \right) \quad (5)$$

エージェント  $X$  と  $Y$  が交渉する場合の Hypervolume に基づく協調度  $MOC_{HV}$  の概念図を図 1 に示す。パレート最適な合意案候補の集合を  $S^* = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  とし、 $X, Y$  の効用関数をそれぞれ  $U_X, U_Y$  とすると、 $s^* \in S^*$  が支配する空間は点  $(U_X(s^*), U_Y(s^*))$  と原点  $O$  で定義される矩形となり、全ての  $s^* \in S^*$  が支配する矩形をあわせた部分の面積が  $MOC_{HV}$  の値となる。

本研究では、パレート最適な合意案候補の探索に NSGA-II [5] を使用し、協調度を計算した。

### 3.3 相関係数に基づく協調度

エージェント間の協調度として、相関係数に基づく協調度  $MOC_{CC}$  (Measure Of Cooperativeness based on Correlation Coefficient) を提案する。 $MOC_{CC}$  はエージェント間の効用の相関係数を区間  $[0, 1]$  に正規化したものと定義する。エージェント  $X, Y$  が全合意案候補集合  $S$  について交渉するとき、 $X, Y$  の効用関数をそれぞれ  $U_X, U_Y$  とすると相関係数に基づく協調度  $MOC_{CC}$  は相関係数を求める関数  $CC$  を用いて式 (6) で表す。

$$MOC_{CC}(X, Y, S) = \frac{1}{2} (CC(U_X, U_Y) + 1) \quad (6)$$

## 4. 複数同時交渉問題におけるマッチング手法

複数同時交渉問題において、エージェント間の協調度に基づいてマッチングを行う手法を提案する。エージェントの

表 1 二者間交渉における協調度と交渉結果の社会的余剰の相関係数

論点数	効用の分布	MOC <sub>HV</sub>	MOC <sub>HVRV</sub>	MOC <sub>CC</sub>	MOC <sub>CCRV</sub>	MOL <sub>ALL</sub>	MOL <sub>RV</sub>	MOL <sub>PO</sub>	MOL <sub>RVPO</sub>
3	(a)	0.931	0.876	0.629	0.523	-0.584	-0.180	-0.670	-0.296
3	(b)	0.932	0.909	0.768	0.583	-0.532	0.181	-0.740	-0.038
3	(c)	0.924	0.868	0.662	0.721	-0.373	-0.607	-0.567	-0.615
5	(a)	0.942	0.912	0.629	0.698	-0.367	0.159	-0.665	-0.576
5	(b)	0.946	0.914	0.663	0.643	-0.392	0.541	-0.693	-0.077
5	(c)	0.886	0.872	0.604	0.650	-0.264	-0.213	-0.678	-0.663
7	(a)	0.929	0.911	0.702	0.767	-0.532	-0.204	-0.704	-0.658
7	(b)	0.957	0.947	0.731	0.755	-0.536	0.585	-0.796	-0.255
7	(c)	0.845	0.840	0.572	0.605	-0.329	-0.271	-0.615	-0.605
全体		0.944	0.911	0.539	0.528	-0.501	0.065	-0.783	-0.445

表 2 三者間交渉における協調度と交渉結果の社会的余剰の相関係数

論点数	効用の分布	MOC <sub>HV</sub>	MOC <sub>HVRV</sub>	MOL <sub>ALL</sub>	MOL <sub>RV</sub>	MOL <sub>PO</sub>	MOL <sub>RVPO</sub>
3	(a)	0.903	0.879	-0.566	-0.540	-0.398	-0.460
3	(b)	0.847	0.804	-0.484	0.333	-0.476	0.476
3	(c)	0.739	0.750	-0.299	-0.369	-0.375	-0.338
5	(a)	0.908	0.936	-0.466	0.636	-0.645	-0.065
5	(b)	0.895	0.898	-0.262	0.624	-0.508	0.697
5	(c)	0.801	0.782	-0.103	-0.024	-0.423	-0.474
7	(a)	0.913	0.910	-0.567	0.170	-0.718	-0.473
7	(b)	0.938	0.950	-0.532	0.849	-0.768	0.681
7	(c)	0.700	0.696	-0.209	-0.133	-0.459	-0.438
全体		0.930	0.911	-0.574	0.243	-0.775	0.249

集合を  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  とする. まず, メディエータはエージェントの効用情報を収集する. 次に, エージェントのペアの集合  $P = \{p \subset A \mid |p| = 2\}$  について, メディエータは各ペア  $p \in P$  の協調度を求める. その後,  $p \in m^*$  の協調度の合計が最大 (協調度が負の相関のときは最小) となる  $m \in M (M = \{m \subset P \mid p_1, p_2 \in m, p_1 \cap p_2 = \phi\})$  を作成する. 具体的には, エージェント集合  $A$  をノード, エッジの重みを  $p \in P$  の協調度とする完全グラフの最大 (最小) 重みマッチング問題を解くことで協調度の合計が最大となるマッチング  $m^*$  を求める. 本研究では, blossom 法で増加路を探し, primal-dual 法で重みが最大となるマッチングを求めた [6].

## 5. 評価実験

### 5.1 実験設定

すべての対象エージェントと対象プロファイルに対して, 総当りで二者間交渉と三者間交渉を実施する. このときの交渉結果の社会的余剰と各協調度の相関係数を比較する. また, 提案手法で求めたマッチングの全体の社会的余剰の和と, 最適なマッチングの全体の社会的余剰の和を比較する.

実験では自動交渉エージェント競技会 (ANAC) におけるプラットフォーム Genius[7] を使用した. 交渉エージェントは ANAC2016 の上位 3 エージェント (Caduceus, YXAgent, ParsCat) を使用した. 交渉時間は最大 10000Round

とし, 各エージェントとプロファイルの組み合わせにつき 1 回ずつ, 二者間交渉と三者間交渉を行うこととする. また, 実験で使用する協調度を以下に示す.

- MOC<sub>HV</sub>: Hypervolume に基づく協調度
- MOC<sub>HVRV</sub>: 留保価格以上の効用の合意案候補を対象とした MOC<sub>HV</sub>
- MOC<sub>CC</sub>: 相関係数に基づく協調度
- MOC<sub>CCRV</sub>: 留保価格以上の効用の合意案候補を対象とした MOC<sub>CC</sub>
- MOL<sub>ALL</sub>: 全合意案候補を対象とした MOL
- MOL<sub>RV</sub>: 留保価格以上の効用の合意案候補を対象とした MOL
- MOL<sub>PO</sub>: パレート最適な合意案候補を対象とした MOL
- MOL<sub>RVPO</sub>: パレート最適かつ留保価格以上の効用の合意案候補を対象とした MOL

様々な特徴を持つドメインにおいて評価を行うために, 論点数と各合意案候補の効用の分布を変えた 9 つの交渉ドメインを対象とした. 各ドメインごとに 20 のプロファイルを作成した. 論点数は 3, 5, 7 の 3 通りとし, 各論点の選択枝数はすべて 5 とした. 選択枝の評価値の決め方を変えることで効用の分布を決定した. 具体的には (a):[0, 1] の一様乱数, (b):[0, 1] の一様乱数の 2 乗, (c):1 と [0, 1] の一様乱数の 2 乗の差の 3 通りとした. (b) は最大値に近い効用の合意案候補があまり存在せず, (c) は最大値に近い効

表 3 提案手法によるマッチングの社会的余剰と最適なマッチングの社会的余剰の比

論点数	効用の分布	MOC <sub>HV</sub>	MOC <sub>HVRV</sub>	MOC <sub>CC</sub>	MOC <sub>CCRV</sub>	MOL <sub>LALL</sub>	MOL <sub>RV</sub>	MOL <sub>PO</sub>	MOL <sub>RVPO</sub>
3	(a)	0.997	0.997	0.934	0.905	0.987	0.940	0.944	0.944
3	(b)	0.998	0.991	0.936	0.639	0.960	0.801	0.945	0.803
3	(c)	0.996	0.996	0.966	0.969	0.998	0.997	0.967	0.971
5	(a)	0.993	0.993	0.952	0.900	0.986	0.990	0.965	0.979
5	(b)	0.999	0.997	0.956	0.689	0.984	0.874	0.977	0.964
5	(c)	0.995	0.995	0.972	0.981	0.985	0.985	0.984	0.985
7	(a)	0.993	0.993	0.980	0.969	0.990	0.990	0.979	0.986
7	(b)	0.993	0.993	0.977	0.787	0.986	0.950	0.982	0.983
7	(c)	0.994	0.994	0.972	0.973	0.990	0.990	0.971	0.978
平均		0.995	0.994	0.961	0.868	0.985	0.946	0.968	0.955

用の合意案候補が多く存在する。すべてのドメインで留保価格は 0.5 とし、割引効用は設定しなかった。

## 5.2 協調度の評価結果

全エージェントと各ドメインの全プロファイルについて総当りで二者間交渉を行った。その際の社会的余剰と各協調度の相関係数を表 1 に示す。また、全エージェントと各ドメインの 10 個のプロファイルの組み合わせについて総当りで三者間交渉を行った。その際の社会的余剰と各協調度の相関係数を表 2 に示す。三者間交渉では組み合わせが膨大な数になるため全プロファイルを使用せず 10 個のみを使用した。また、相関係数に基づく協調度 MOC<sub>CC</sub> は三者間交渉に直接使用できないため比較対象から除外した。

全体の相関係数は二者間交渉と三者間交渉の両方で、提案手法の Hypervolume に基づく協調度 MOC<sub>HV</sub> が最も強い相関を示していた。これは、Hypervolume を用いることで、合意案候補全体の分布を考慮して協調度を評価できているためであると考えられる。一方、MOL は一部のドメインで強い相関を示したものの、相関が弱いドメインも存在する結果となった。この理由は、MOL が獲得効用の公平性にのみ注目していることにより、全エージェントの効用が低い場合にも協調的であると評価するためであると考えられる。また、効用の分布 (c) のドメインで各協調度の相関が弱くなる傾向が見られた。これは、分布 (c) ではエージェントのペアによる社会的余剰の差が他の分布と比べ小さいためであると考えられる。

## 5.3 マッチングの評価結果

全エージェントと各ドメインの全プロファイルについて総当りで二者間交渉を行った。その交渉結果から、最適解となる社会的余剰の和が最大となるマッチングを求めた。提案手法で求めたマッチングの全体の社会的余剰の和と最適解のマッチングの社会的余剰の和の比を表 3 に示す。

各ドメインごとの最適解に対する比の平均は MOC<sub>HV</sub> が最も良い結果をとった。この理由は、5.2 節で示した通り MOC<sub>HV</sub> が交渉結果の社会的余剰について最も強い相関

があり、社会的余剰が大きくなるエージェントをマッチングできたためである。また、提案手法で MOC<sub>HV</sub> に基づいてマッチングを行うことで、全体の社会的余剰の和について最適解に近いマッチングを発見可能なことがわかる。

## 6. まとめ

本研究では、エージェントの効用情報から協調度を求める指標としてとして Hypervolume に基づく協調度 MOC<sub>HV</sub> を提案し、評価実験によって交渉結果の社会的余剰について強い相関を持つことを示した。また、複数同時交渉問題において協調度に基づいてマッチングを発見する手法を提案した。さらに、提案手法で全体の社会的余剰の和について最適解に近いマッチングを発見可能なことを示した。今後の課題として、提案手法ではエージェントの効用情報がすべて公開されることへの対応が考えられる。

## 参考文献

- [1] Shoham, Y. and Leyton-Brown, K.: *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*, Cambridge University Press, New York, NY, USA (2008).
- [2] 産業競争力懇談会：人工知能間の交渉・協調・連携，<http://www.cocn.jp/thema98-M.pdf> (2017).
- [3] 遠山竜也，伊藤孝行：複数論点交渉問題における公平性に基づいた効用情報の対立度の提案，*The 31st Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence (JSAI2017)* (2017).
- [4] 遠山竜也，伊藤孝行：Multilateral Closed Negotiation Problem における合意形成の難易度評価のための定量的指標の提案，*Joint Agent Workshop and Symposium2017(JAWS2017)* (2017).
- [5] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197 (online), DOI: 10.1109/4235.996017 (2002).
- [6] Galil, Z.: Efficient Algorithms for Finding Maximum Matching in Graphs, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 18, No. 1, pp. 23–38 (online), DOI: 10.1145/6462.6502 (1986).
- [7] Lin, R., Kraus, S., Baarslag, T., Tykhonov, D., Hindriks, K. and Jonker, C. M.: Genius: An Integrated Environment for Supporting the Design of Generic Automated Negotiators, *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 48–70 (online), DOI: 10.1111/j.1467-8640.2012.00463.x (2014).