

ハイパーグラフ効用モデルによる 論点間の依存関係を考慮した自動交渉機構

森井 翔太^{1,a)} 森 顕之^{1,b)} 伊藤 孝行^{1,c)}

概要：自動交渉エージェントの研究分野において、論点間に依存関係を持つ非線形効用関数による、複数論点交渉問題について広く研究が行われている。しかしながら、既存研究では、現実的な時間内で交渉参加者全体にとって良質となる合意案を導出することが困難であった。本論文では Hadfi らによるハイパーグラフ効用モデルに基づき、メディエータ主導による新しい交渉プロトコルを提案する。具体的には、メディエータが論点間の依存関係を利用し、交渉を行う論点を逐次的に追加していくことで、交渉を円滑に進める。その後、シミュレーション実験により、本提案プロトコルが短時間で、かつ効率的な交渉を行えることを示す。

1. はじめに

マルチエージェントシステムの研究分野において自動交渉エージェントが注目されており、多くの研究が行われている [1–6]。特に、複数の論点が存在する交渉問題（複数論点交渉問題：multi-issue negotiation problem）が重要な研究課題となっており、合意形成支援に関して多くの研究が行われている [7–9]。既存の多くの研究では、複数の論点の各論点間で効用の独立性が仮定されており、エージェントの効用は線形の効用関数として表現可能であった。しかし、実世界での交渉問題を考えると各論点が独立している場合は稀であり、複数の論点は論点間で依存関係を持っている場合が多い。さらに、論点の独立性が仮定された交渉問題において良質な合意案が発見できる手法でも、複数の論点が相互依存関係にある場合には有効に働かないと Klein ら [10] は示している。本論文ではより現実的かつ計算量が膨大である、複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題について議論する。

複数の論点が相互依存関係にある効用空間では、論点数や相互依存関係を持つ制約数が多い場合、計算量が莫大である問題点が存在する。計算量のコストを減らし、

良質な解を維持するための一つの合理的なアプローチとしては、論点を逐次交渉する（issue-by-issue negotiation と呼ばれる）、ゲーム理論的なアプローチがある [11–13]。issue-by-issue negotiation は計算量のコストを低減させるものの、issue-by-issue negotiation によるアプローチは論点間における交渉の順序を考慮していない。例えば、 X と Y の 2 つの論点がある場合、問題なのは最初の論点をどのように決めるかという問題である。すなわち、 XY と YX の 2 つの順序はそれぞれ異なる結果になりうる。したがって、論点の順序を決定する必要があるが、特に実問題では多くの論点を含むことを考えると、最適な論点の順序を探索することは困難である。ゆえに本論文では、論点間の相互依存関係に注目し、依存関係に基づいた論点の探索手法を提案する。

非線形な効用関数の論点と制約を分割する手法として、Hadfi らは非線形な効用関数をハイパーグラフとして表現するモデルを提案している [14,15]。しかし、Hadfi ら [14,15] による探索手法は、自身の効用空間上から自身にとって最適な合意案の探索を行うことが目的であり、交渉参加者全体にとって最適な合意案の探索や、交渉を行うための手法については議論していない。そこで、本論文では非線形な効用関数における、ハイパーグラフを利用した自動交渉エージェントの交渉戦略手法について述べる。具体的には、非線形な効用関数における二者間交渉問題において、エージェントの選好情報をハイパーグラフとして表現し、お互いにとって最適な合意案候補を探索する手法を提案する。さらに、本論文では公平かつ円滑な交渉を行うためにメディエータを採用する。本論文で提案するメディエータ

¹ 名古屋工業大学大学院情報工学専攻
Department of Computer Science and Engineering

² 名古屋工業大学情報工学科
Department of Computer Science and Engineering

³ 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻
Master of Techno-Business Administration

a) morii.shouta@itolab.nitech.ac.jp

b) mori.akiyuki@itolab.nitech.ac.jp

c) ito.takayuki@nitech.ac.jp

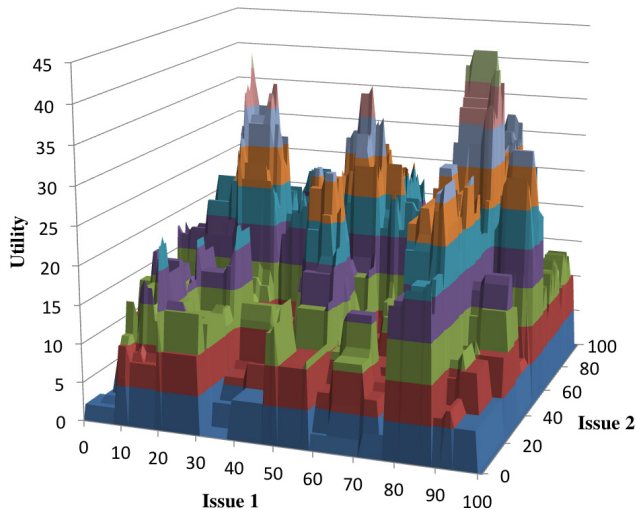


図 1 非線形な効用空間の例 (論点数 2)

は、最適な時間で論点を逐次拡大していくものであり、こうしたアプローチは実世界の交渉問題でもよく用いられている。その後、本提案モデルがいくつかの複雑な効用空間において、少ない交渉時間で良質な解を求められることを示す。

2. ハイパーグラフに基づく非線形な効用関数の表現モデル

2.1 非線形な効用関数

複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題において、制約に基づく効用関数が提案されている [16, 17]。各論点が独立している場合、効用関数は単純な線形関数で表現することができたが、複数の論点が相互に依存する場合は複雑で非線形な効用関数を定義する必要がある。非線形な効用関数について、以下に詳細を示す。

二者のエージェントが合意形成を試みる交渉の状況を考える。論点が M 個存在し、個々の論点を $i_j \in I$ と表す。論点 i_j は $[0, X]$ の範囲の整数を値として持つ。すなわち、各論点の値 s_j は $s_j \in [0, X]$ として表現され、交渉の結果得られる合意案候補は、各論点の値のベクトル $\vec{s} = (s_1, s_2, \dots, s_M)$ として表される。次に、エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。 l 個の制約が存在するとし、個々の制約は $\varphi_k \in \Phi$ と表す。制約は単一、もしくは複数の次元 (論点) に関して、制約充足条件となる値の範囲、および効用値を持つ。制約 φ_k は合意案候補 \vec{s} によって充足される場合のみ、 $w(\varphi_k, \vec{s})$ を効用値として持つことが可能である。

合意案候補 \vec{s} に関するエージェント $n \in \{0, 1\}$ の効用を以下の式 (1) で定義する。

$$u_n(\vec{s}) = \sum_{\varphi_k \in \Phi, \vec{s} \in x(\varphi_k)} w_n(\varphi_k, \vec{s}) \quad (1)$$

なお $x(\varphi_k)$ は、制約 φ_k を充足可能な合意案候補の集合で

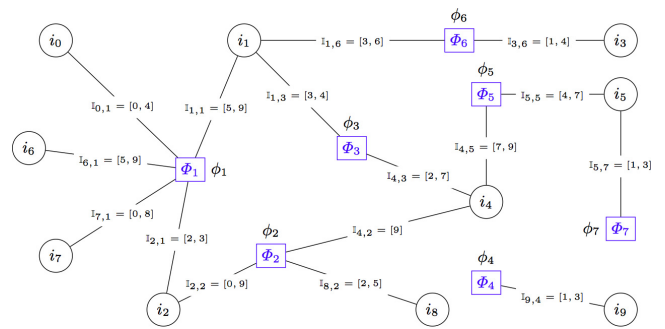


図 2 論点集合 I と制約集合 Φ で表されるハイパーグラフ Γ_{10}

ある。式 (1) の効用表現により、凹凸のある非線形な効用空間が形成される。本論文における効用空間とは、各論点を取り得る値のあらゆる組合せについて、効用関数によって得られる効用値を空間上にプロットして得られるグラフのことであり、空間の次元数は $M + 1$ 次元となる。非線形な効用空間では、より多くの制約を充足可能な地点で効用が高くなり、逆に充足する制約数が少ない地点では効用が低くなることで、空間内に効用値による高低が生じる。

図 1 は、論点数が 2 の非線形な効用空間の例であり、山と谷が入り組んだ複数の効用空間を形成していることが分かる。したがって、非線形な効用空間では既存のプロトコルを適用して、交渉参加者全体において最適な合意案候補を得ることは困難であった。ゆえに、本論文の目的は非線形な効用空間に対し、最適な合意案候補を発見を試みるプロトコルを提供することであり、以下の目的関数によって表される (式 (2))。

$$\arg \max_{\vec{s}} \sum_{n \in \{0, 1\}} u_n(\vec{s}) \quad (2)$$

すなわち、提供手法は社会的効用、すなわち全てのエージェントの効用の総和を最大化する合意案候補を発見することである。

3. 非線形な効用関数のためのハイパーグラフによる表現

非線形な効用関数においては、効用関数をグラフ構造として表現するためのいくつかのアプローチが考えられている [18, 19]。本論文では特に、Hadfira が提案している効用関数をハイパーグラフとして表現する手法を採用する [15]。以下にハイパーグラフによる効用モデルを定義する。

制約が l 個存在する効用関数上において、全ての制約は各制約の集合 $\Phi = \{\varphi_k\}_{k=1}^l$ で表される。このとき、論点集合 I と制約集合 Φ を持つハイパーグラフ Γ を表現することができ、 $\Gamma = (I, \Phi)$ と書く。例えば、図 2 は論点数が 10 で、制約数が 7 である非線形な効用関数について、ハイパーグラフ Γ_{10} として表現したものである。このとき、ハイパーグラフ $\Gamma_{10} = (I, \Phi)$ は論点集合 $I = \{i_j\}_{j=0}^9$ 、制約集合 $\Phi = \{\varphi_k\}_{k=1}^7$ をそれぞれ持つ。

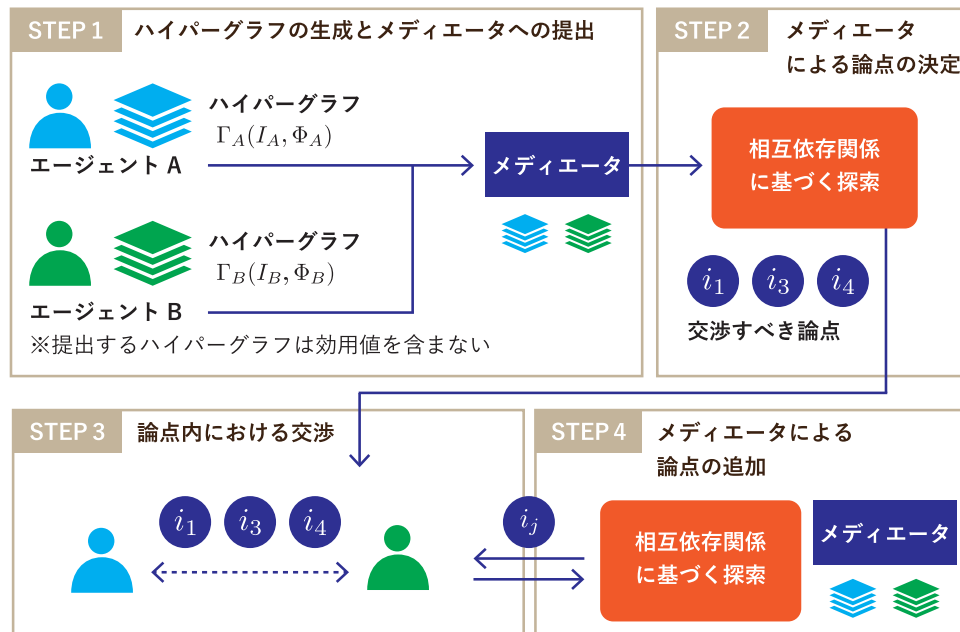


図 3 論点間の依存関係に基づくメディエータによる交渉プロトコル

4. 論点間の依存関係に基づいたメディエータを用いた交渉プロトコル

4.1 交渉プロトコル概要

本節では非線形効用関数における、二者間の複数論点交渉問題について議論する．二者間交渉問題の交渉プロトコルとして、Rubinsteinらによって提案された alternative offers プロトコル [20–22] を採用する．

非線形効用関数における二者間交渉問題では、各論点が互いに依存関係にあるため交渉空間が複雑となり、お互いに最適な合意案候補で合意を形成することが困難である．したがって、本提案プロトコルでは藤田らが文献 [18] においても採用している、メディエータによる交渉プロトコルを構築することで、交渉の効率化を目指す．具体的には、各エージェントが自身の論点と制約の集合から成るハイパーグラフの構造をメディエータに提出することで、メディエータが交渉を円滑に進められるようなプロトコルを提供する．なお、各エージェントはメディエータに自身の選好情報は送らないものとする．メディエータにエージェントの選好情報を送らない理由は、メディエータがエージェントの全ての情報を把握できないようにするためである．すなわち、メディエータがエージェントの選好情報を把握してしまうと、メディエータが交渉を意図的に操作できてしまう．ゆえに、メディエータはエージェントの選好情報を予測できないように交渉プロトコルを設計する必要がある．以下に本交渉プロトコルの流れを示す．また、図 3 に本交渉プロトコルの概要を示す．

[Step1: ハイパーグラフの生成とメディエータへの提出]

初めに交渉エージェント（以下 A および B）は自身の効

用関数に基づいたハイパーグラフ $\Gamma_A = (I_A, \Phi_A)$ 、および $\Gamma_B = (I_B, \Phi_B)$ を生成する．この時、論点集合は $I_A = I_B$ （すなわち、 $I_A \subset I_B$ かつ $I_B \subset I_A$ ）であるが、制約集合は $\Phi_A = \Phi_B$ であるとは限らず、多くの効用関数上では $\Phi_A \neq \Phi_B$ である．

各エージェントは生成したハイパーグラフ Γ_A および Γ_B をメディエータに提出し、メディエータは各エージェントのハイパーグラフの情報を得る．なお、提出されるハイパーグラフの情報において、エージェントの選好情報、すなわち制約 φ_k における関数 ϕ_k による効用値 $w(\varphi_k, \vec{s})$ は含まない．したがって、メディエータが知りうる情報は論点集合 I および制約集合 Φ におけるグラフ構造のみである．[Step2: メディエータによる論点の決定]

一般的に、論点が多くなれば効用関数は複雑になり得るため、エージェントはより多くの合意案候補を探索しなければならない．全ての論点を加味した探索では、冗長な合意案候補（すなわち、相手にとっては効用値が低い合意案候補）を発見してしまう事も多い．したがって、合意形成を円滑に進めるためには論点を少しずつ増やしていき、徐々に探索範囲を広げていく方法が考えられる．

Step2 では Step1 で提出されたハイパーグラフ Γ_A および Γ_B を基に、メディエータは論点を $n (> 0)$ 個決定する．また、メディエータによって提示される論点の集合を $I_m \subset I_A (= I_B)$ と定義する．論点はグラフ構造の依存関係から決定され、双方のエージェントが円滑に交渉を進めることができると予測される論点が、メディエータによって提示される．論点の探索方法については次節で詳しく述べる．

[Step3: 論点内における交渉]

Step2でメディエータから提示された論点において、エージェントは交渉を行う。すなわち、エージェントは論点集合 I_m について交渉を行い、適宜譲歩を行う。論点集合 I_m 以外の論点については、エージェントは自身の効用値が最大化されるように値を選択する。エージェントは論点集合 I_m によって得られる効用空間内で交渉を行うことで、自身にとって優先度が高い論点を重点的に交渉することが可能となる。

しかし、論点の個数 n が少ない内は効用空間も狭くなるため、交渉が上手く行われず、合意形成には至らない場合が多い。したがって、メディエータは論点を適切なタイミングで増やしていく必要がある。

[Step4: メディエータによる論点の追加]

メディエータはエージェントの交渉経過を観察しながら、交渉が上手く進まない場合はStep2にしたがい、論点を $n+1, n+2, \dots, n(I_A)$ ($=n(I_B)$) と増やしていく。これより、エージェントは徐々に効用空間を広げながら交渉を行うことで、既存の交渉モデルに必須であった譲歩関数 [23, 24] などを用いることなく交渉が可能となる。

4.2 論点間の依存関係に基づくメディエータの探索戦略

メディエータが論点を決定するにあたり、最も重要なのがどのように論点を決定するかということである。さらに、メディエータは各エージェントの選好情報(すなわち、制約における効用値 $w(\varphi_k, s)$)を知ることができないため、論点集合 I と制約集合 Φ から、お互いにとって最適な論点を判断する必要がある。本論文では、グラフ構造の依存関係に着目し、双方が依存関係にある論点を探索することで論点 I_m を決定する。以下にグラフ構造の依存関係に基づいた、メディエータの探索戦略について述べる。

初めに依存関係とは、ある論点 i_j が持つ制約の集合 $\nu(i_j) = \{\varphi \in \Phi \mid i_j \in \varphi\}$ に対し、 $\nu(i_j)$ と接続する (i_j を除く) 論点の集合である。すなわち、制約 φ_k に接続する論点集合 $\mathcal{N}(\varphi_k)$ を定義すれば、論点 i_j の依存関係は以下の式 (3) で表される。

$$\psi(i_j) = \{i \in I \mid i \in \mathcal{N}(\nu(i_j)) \wedge i \neq i_j\} \quad (3)$$

論点の決定は依存関係 $\psi_A(i_j)$ および $\psi_B(i_j)$ から、相互に依存する論点を選出し、 $\psi_{AB}(i_j)$ の中から論点集合 I_m が選ばれる(式(4))。

$$\begin{aligned} \psi_{AB}(i_j) &= \psi_A(i_j) \cap \psi_B(i_j) \\ &= \{i \in I \mid i \in \psi_A(i_j) \wedge i \in \psi_B(i_j)\} \end{aligned} \quad (4)$$

選ばれた論点集合はエージェント A および B 双方の依存関係が同じであり、論点に関するグラフ構造が同一である。すなわち、お互いにとって重要な論点を抽出することが可能であり、エージェントは円滑な交渉を進めることが

Algorithm 1 論点集合 I_m の探索と追加

Require:

$n > 0$ { n は現在の論点数}
 i_{random} { $i_{random} \in I$ はランダムに選ばれる論点}

Ensure: I_m

```

1: if  $I_m = \emptyset$  then
2:    $I_m \leftarrow I_m \cup \{\psi(i_{random})\}$ 
3:    $I_e \leftarrow I_e \cup i_{random}$ 
4: end if
5: while  $n(I_m) < n$  do
6:    $i_e \leftarrow \max_{i_k} (\{n(\nu(i_j, i_k)) \mid i_j \in I_m \wedge i_j \notin I_e \wedge i_k \in \psi(i_j)\})$ 
7:   if  $i_e = \emptyset$  then
8:      $i_e \leftarrow i_{random} \notin I_m$ 
9:   end if
10:   $I_m \leftarrow I_m \cup i_e$ 
11:   $I_e \leftarrow I_e \cup i_e$ 
12: end while

```

可能となる。

上述の方法により論点集合 I_m を導出することは可能であるが、論点を増やす場合はさらに探索を行う必要がある。例えば、論点 i_1 から依存関係 $\psi_{AB}(i_1) = \{i_2, i_3\}$ が得られたと仮定する。得られる論点集合は $I_m = \{i_1, i_2, i_3\}$ であるから、メディエータが4つ以上の論点を提示する場合は、さらに探索を行わなければならない。しかし、論点 i_2 と i_3 によって得られた依存関係 $\psi_{AB}(i_2)$ および $\psi_{AB}(i_3)$ の中から、どの論点を先に追加すれば良いのかという問題が存在する。すなわち、お互いにとって重要な論点を追加するためには、メディエータが論点 i_4 と i_5 を評価する必要がある。本論文では次にグラフ構造における依存数を定義し、メディエータは依存数に基づき探索を行うことで追加する論点を決定する方法を提案する。

依存数とは、ある論点 i_j の依存関係 $\psi(i_j)$ において、 $\psi(i_j)$ の各要素と論点 i_j に接続する制約の個数で定義される。言い換えれば、2つの論点 i_j および $i_k (\in \psi(i_j))$ に接続する制約集合 $\nu(i_j, i_k) = \{\varphi \in \Phi \mid i_j \in \varphi \wedge i_k \in \varphi\}$ の個数 $n(\nu(i_j, i_k))$ である。

メディエータは各エージェントの依存数 $n(\nu_A(i_j, i_k))$ および $n(\nu_B(i_j, i_k))$ を足しあわせた、 $n(\nu(i_j, i_k)) = n(\nu_A(i_j, i_k)) + n(\nu_B(i_j, i_k))$ を求め、より大きい依存数を次の探索論点とする。したがって、現在の論点集合 I_m より、以下の式 (5) を求めれば良い。

$$\max_{i_k} (\{n(\nu(i_j, i_k)) \mid i_j \in I_m \wedge i_j \notin I_e \wedge i_k \in \psi(i_j)\}) \quad (5)$$

ここで I_e は既に探索済みの論点集合とする。

制約集合の個数 $n(\nu(i_j, i_k))$ が多ければ、論点 i_j にとって論点 i_k は重要な論点であることが予想できる。また、依存数が多い論点は接続する制約が多いため、高い効用値を持っていることが予測される。したがって、より追加する必要がある論点であると言える。

依存数に基づいた論点の探索戦略を Algorithm 1 に示す。本探索戦略においては、最も依存数の多い論点を選ばれる

ため、論点の追加順は初期の論点に依存する。つまり、初期の論点を同じにしてしまうと、毎回メディエータが同じ順番で論点を追加してしまうため、局所解に陥ってしまう可能性がある。したがって、初期の論点をランダムに選択することで、論点が追加される順序の偏りを無くしている (Algorithm 1, 行 1-4)。

2 回目以降の論点の追加は前述した依存数に基づき、次の論点を決定する (Algorithm 1, 行 6)。しかしながら、相互依存関係にある論点を全て追加した場合は、依存数に基づいた探索手法では新たな論点を探索することができない。したがって、論点を新たに探索できなかった場合はランダムに論点を追加することとする (Algorithm 1, 行 7-9)。最後に探索した論点を論点集合 I_m 、および探索済みの論点集合 I_e に追加することで、論点の追加が終了する (Algorithm 1, 行 10-11)。

5. 評価実験

5.1 実験設定

本評価実験では同じ交渉戦略を持つエージェントを用意し、メディエータを用いない場合とメディエータを用いる場合について、それぞれの交渉回数と社会的余剰値 (各エージェントが得た効用値の合計値) を導出し比較する。

本評価実験では論点の追加方法について、以下の 3 つの手法を用意し評価実験を行う。

- メディエータを使用し、メディエータがお互いの依存関係 (依存数) に基づいて論点を追加する (Mediator)。
- メディエータを使用せず、エージェントは自身の依存関係 (依存数) のみを考慮して論点を追加する (Dependence)。
- メディエータを使用せず、ランダムに論点を追加する (Random)。

自身の依存関係のみを使用する場合は、4 章において述べたエージェントの自身の依存関係 $\psi(i_j)$ および依存数 $n(\nu(i_j, i_k))$ のみを考慮すれば良い。なお、追加された論点集合はエージェント A および B 双方の依存関係を維持しておらず、論点に関するグラフ構造が同一であるとは限らない。すなわち、自身にとって最適である論点を追加していく手法である。

本評価実験では交渉ドメインにおける論点間の依存関係をより分かりやすく表現するため、制約が持つ効用値を定数にする。すなわち、合意案候補 \vec{s} によって充足される制約 φ の効用値は、以下の式 (6) で表される。

$$w(\varphi, \vec{s}) = \text{const.} \quad (6)$$

したがってある 3 つの論点 i_j, i_k 、および i_l に対して、エージェントの依存数が $n(\nu(i_j, i_k)) > n(\nu(i_j, i_l))$ であれば、以下の式 (7) を満たす。

$$\sum_{\varphi \in \nu(i_j, i_k), \vec{s} \in x(\varphi)} w(\varphi, \vec{s}) > \sum_{\varphi \in \nu(i_j, i_l), \vec{s} \in x(\varphi)} w(\varphi, \vec{s}) \quad (7)$$

なお $x(\varphi)$ は、制約 φ を充足可能な合意案候補の集合である。制約の効用値を定数にする理由は、各制約の効用値がそれぞれ異なる場合、依存数が多い論点が重要な論点であるとは限らないためである。例えば、あるエージェントの依存数が $n(\nu(i_j, i_k)) > n(\nu(i_j, i_l))$ であつたとしても、各制約の効用値が異なるため、式 (7) を満たすとは限らない。効用値が高いということは、エージェントにとって重要な論点であると予測される。したがって、各制約の異なる効用値が異なる場合は、メディエータが重要な論点を優先的に追加できない可能性がある。

制約の効用値を定数にした場合、ある論点 i_j の依存関係 $\psi(i_j)$ の中で、依存数が最も大きい論点が i_j との制約間で最大の効用値を持つことが保証される。すなわち依存数に基づいた論点の追加手法がより効果的に働くため、本実験では制約の効用値を定数とする。

本評価実験では制約が持つ効用値が定数であり、論点数がそれぞれ 10, 30, および 50 の 6 つのドメインについて、上述した 3 つの論点の探索手法について比較を行う。なお、交渉時間は 1 回の交渉につき 180 秒とし、交渉回数は 100 回とした。本評価実験においては各ドメインにおいて交渉回数および社会的余剰値について、それぞれ最大値、最小値、および平均値を算出することで数値による評価を行う。さらに、箱ひげ図 (boxplot) によって交渉結果の散布図を簡潔に表示することで視覚的な評価も行う。

5.2 実験結果と考察

まず表 1 に各ドメインにおける社会的余剰値を示す。表 1 によると、社会的余剰値についてはメディエータを用いた論点の追加手法 (Mediator) が有効であることが分かる。特に社会的余剰値の最低値については、全てのドメインにおいてメディエータに基づく手法 (Mediator) が最も高い値を獲得している。すなわち、メディエータがお互いにとって重要な論点を優先的に追加することで、社会的余剰値が低い合意案候補で合意を形成することを回避できている。

箱ひげ図によって表した各ドメインの社会的余剰値の詳細を図 4, 図 5, および図 6 に示す。なお、箱ひげ図における長方形の縦の範囲を IQR と呼び、範囲内にデータ点が 50% 含まれていることを表している。すなわち、IQR の値が小さければ (箱の範囲が狭ければ) 交渉結果におけるブレが少ないことが示される。

図 4, 図 5, および図 6 から、メディエータに基づく追加手法 (Mediator) が多くのドメインで IQR が小さく、交渉が安定して行われていることが分かる。一方で、ランダムな追加手法 (Random) は IQR が大きくなることが多く、交渉結果のブレが大きい。特に論点数が少ないドメ

表 1 各ドメインにおける社会的余剰値の各指標値

ドメイン名		Random	Dependence	Mediator
10issuesA	Max.	1.736	1.736	1.736
	Min.	1.486	1.379	1.486
	Mean.	1.642	1.615	1.655
10issuesB	Max.	1.736	1.736	1.736
	Min.	1.443	1.421	1.486
	Mean.	1.619	1.627	1.656
30issuesA	Max.	1.812	1.812	1.812
	Min.	1.587	1.609	1.639
	Mean.	1.729	1.738	1.731
30issuesB	Max.	1.780	1.762	1.781
	Min.	1.609	1.684	1.685
	Mean.	1.746	1.740	1.747
50issuesA	Max.	1.770	1.787	1.787
	Min.	1.574	1.541	1.607
	Mean.	1.687	1.694	1.695
50issuesB	Max.	1.820	1.820	1.820
	Min.	1.703	1.700	1.713
	Mean.	1.771	1.780	1.776

インにおいて顕著であり(図4), 効用空間が狭いドメインにおいてメディエータに基づく手法(Mediator)が有効であることを示している. 効用空間が狭いドメインでは制約数が少ないため, 論点間の依存関係も同様に少なくなる. したがって, メディエータが論点間に依存関係も持つ論点を先に追加することで, 交渉結果を安定させ効率的な交渉を行うことができる. 一方で, 論点数が多いドメインにおいては効用空間が広く, 論点間の依存関係も多くなるため, メディエータを用いずに自身にとって重要な論点を優先的に追加する手法(Dependence)が良い結果となる場合も存在する(図6のドメイン50issuesB).

以上より, 論点の追加手法に対する社会的余剰値について, メディエータを用いる追加手法(Mediator)が有効であることが評価実験により示された. 特に効用空間が狭く, 論点間の依存関係が少ないドメインにおいて効果的に働くことが明らかとなった.

表2に各ドメインにおける交渉回数の結果を示す. 評価の指標値は社会的余剰値と同じく最大値, 最小値, および平均値を算出した. 表2より交渉回数の各指標値については, 自身の依存数に基づく追加手法(Dependence)とメディエータに基づく追加手法(Mediator)が有効であることが示された. 2つの手法はどちらも依存数に基づいて論点を追加しているため, すなわち依存数に基づく論点の追加(Dependence, Mediator)が効果的に働いていることが分かる.

箱ひげ図によって表した各ドメインの社会的余剰値の詳細を図7, 図8, および図9に示す. 図7によると, 論点が少ないドメインではメディエータに基づく手法(Mediator)が, 平均値および最大値において最も悪い結果となってい

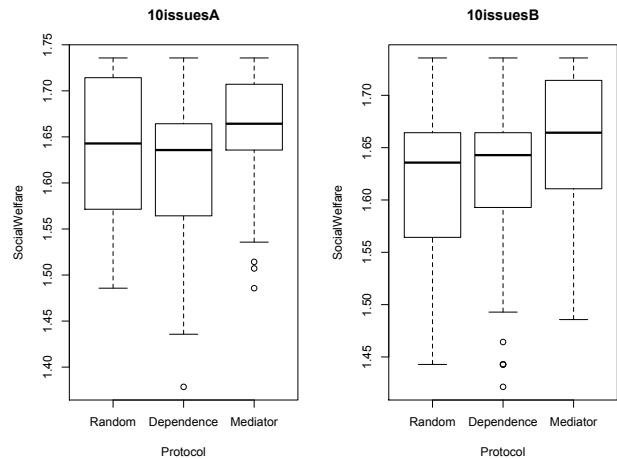


図 4 論点数 10 における社会的余剰値

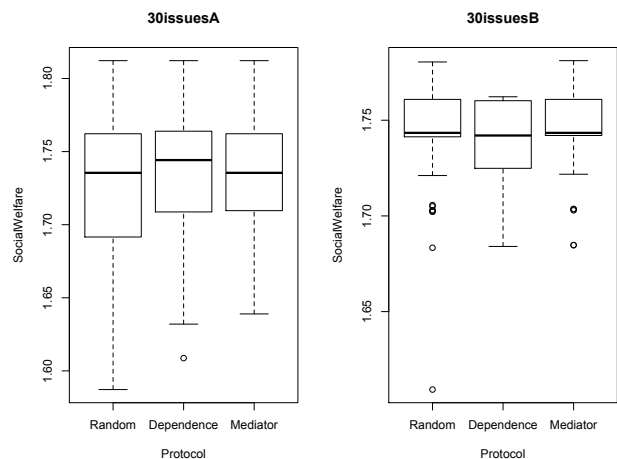


図 5 論点数 30 における社会的余剰値

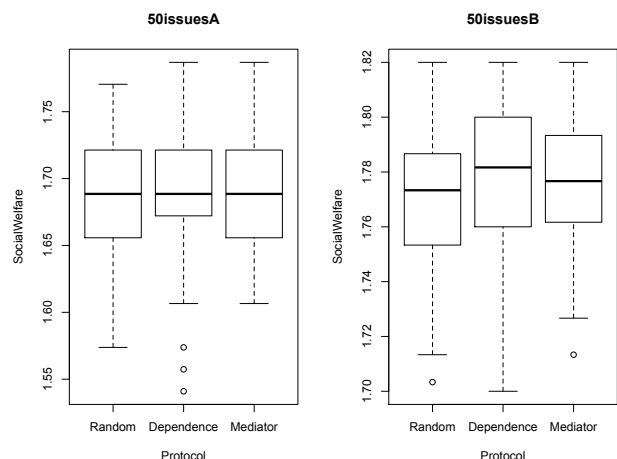


図 6 論点数 50 における社会的余剰値

る. 論点が少ないドメインでは効用空間が小さいため, 相互依存関係も少なくなる. したがって, お互いにとって重要な論点を探索するよりも, 自身にとって重要な論点を先に探索する手法(Dependence)がより早く交渉を進める

表 2 各ドメインにおける交渉回数各指標値

ドメイン名		Random	Dependence	Mediator
10issuesA	Max.	555.0	367.0	463.0
	Min.	51.0	17.0	35.0
	Mean.	238.9	182.3	273.1
10issuesB	Max.	485.0	314.0	471.0
	Min.	37.0	31.0	31.0
	Mean.	218.1	161.7	262.6
30issuesA	Max.	1003.0	523.0	412.0
	Min.	74.0	58.0	47.0
	Mean.	364.4	238.6	194.1
30issuesB	Max.	698.0	509.0	580.0
	Min.	3.0	11.0	7.0
	Mean.	248.3	191.7	251.9
50issuesA	Max.	854.0	731.0	731.0
	Min.	20.0	129.0	30.0
	Mean.	439.6	451.4	380.2
50issuesB	Max.	735.0	476.0	487.0
	Min.	143.0	52.0	34.0
	Mean.	349.6	254.6	208.4

ことができる。次に、図 8 から、論点が中程度のドメインでは依存数に基づく手法 (Dependence, Mediator) が良い結果を得ていることが分かる。特に図 8 のドメイン 30issuesA において顕著に現れており、ランダムに追加する手法 (Random) が上手く働かないことを示している。最後に、図 9 で示されるように論点が多いドメインではメディエータに基づく手法 (Mediator) が最も良い結果を得た。すなわち、効用空間が広いドメインではエージェントが双方にとって重要な論点を優先的に追加するため、交渉回数を抑えることができる。

以上より、論点の追加手法に対する交渉回数について、依存数に基づいた論点の追加手法が有効であることが評価実験により示された。特に効用空間が広く、論点間の依存関係が多いドメインにおいてはメディエータに基づく追加手法 (Mediator) が最も効果的であることが明らかとなった。

最後に本評価実験において得られた知見を以下に示す。

- 本提案交渉プロトコルはメディエータが依存数に基づいて論点を増やしていくことで、多くのドメインにおいて高い社会的余剰値を獲得できる。
- メディエータによる論点の追加手法 (Mediator) は依存関係を持つ論点を優先的に追加するため、論点間の依存関係が少なく効用空間が狭いドメインにおいて効果的に働く。
- 依存数に基づく論点の追加手法はランダムに追加する場合 (Random) に比べ、全てのドメインにおいて交渉回数を抑えることができる。特に論点が多く効用空間が広いドメインにおいては、お互いの依存数も考慮したメディエータに基づく追加手法 (Mediator)

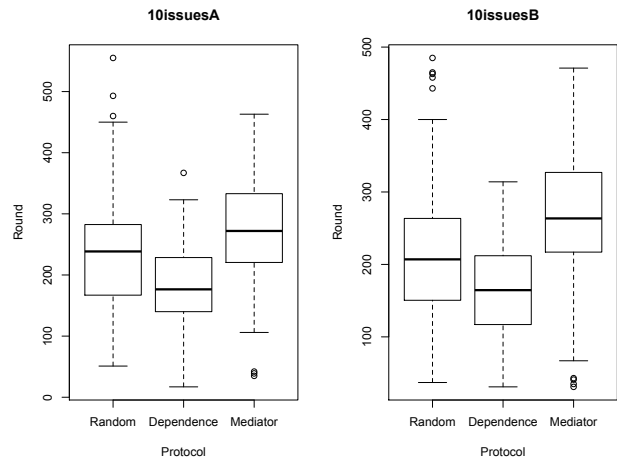


図 7 論点数 10 における交渉回数

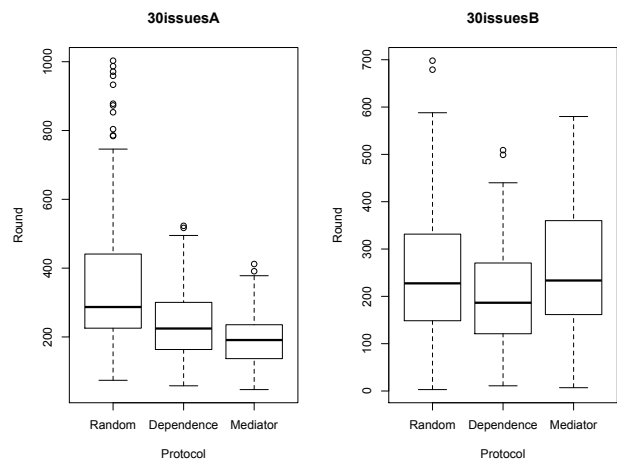


図 8 論点数 30 における交渉回数

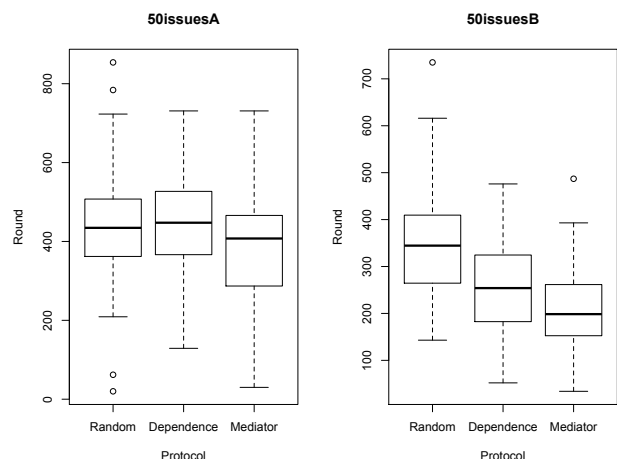


図 9 論点数 50 における交渉回数

を用いることで、交渉を円滑に進めることができる。

6. おわりに

本論文では複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉

問題に対し、エージェントの選好情報をハイパーグラフとして表現しメディエータを導入することで、短時間で良質な合意案候補を探索するための交渉プロトコルを新たに提案した。

短時間で合意形成を達成するために、メディエータが論点をエージェントに提示し、メディエータが論点を逐次追加していく手法を導入し、既存の交渉プロトコルに比べ円滑に交渉を進められることを評価実験により示した。さらに、良質な合意案候補を探索するために論点間の依存関係に基づく論点の追加手法を提案した。評価実験により論点間の依存関係に基づく論点の追加手法が、多くのドメインで効果的に働くことを示した。

以上の評価実験により、本提案交渉プロトコルが既存プロトコルよりも短時間で合意形成を達成でき、良質な合意案候補を探索できることが明らかとなった。すなわち、本提案交渉プロトコルの有効性が確認された。

今後の課題として、相互依存関係に基づいた論点の追加における探索手法の改善が挙げられる。本論文で提案した探索手法は単純な依存数に基づいた探索であり、依存数が大きければ重要な論点であるというヒューリスティックに基づいた探索手法である。しかしながら、依存数に基づいた探索によって得られた論点は必ずしも重要な論点であるとは言えず、双方にとって重要な論点が優先的に追加されない可能性が存在する。ゆえに、論点の探索と追加手法を更に改善していく。

参考文献

- [1] Shaheen S Fatima, Michael Wooldridge, and Nicholas R Jennings. Multi-issue negotiation under time constraints. In *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*, pp. 143–150. ACM, 2002.
- [2] Sarit Kraus, Jonathan Wilkenfeld, and Gilad Zlotkin. Multiagent negotiation under time constraints. *Artificial intelligence*, Vol. 75, No. 2, pp. 297–345, 1995.
- [3] Sarit Kraus. *Strategic negotiation in multiagent environments*. MIT press, 2001.
- [4] Martin J Osborne and Ariel Rubinstein. *Bargaining and markets*, Vol. 34. Academic press San Diego, 1990.
- [5] Martin J Osborne and Ariel Rubinstein. *A course in game theory*. MIT press, 1994.
- [6] Nicholas R Jennings, Peyman Faratin, Alessio R Lomuscio, Simon Parsons, Michael J Wooldridge, and Carles Sierra. Automated negotiation: prospects, methods and challenges. *Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, No. 2, pp. 199–215, 2001.
- [7] Peyman Faratin, Carles Sierra, and Nicholas R Jennings. Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiations. *artificial Intelligence*, Vol. 142, No. 2, pp. 205–237, 2002.
- [8] Tim Baarslag, Koen Hindriks, and Catholijn Jonker. Acceptance conditions in automated negotiation. In *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, pp. 95–111. Springer, 2013.
- [9] Tim Baarslag and Koen V Hindriks. Accepting optimally in automated negotiation with incomplete information. In *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pp. 715–722. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013.
- [10] Mark Klein, Peyman Faratin, Hiroki Sayama, and Yaneer Bar-Yam. Negotiating complex contracts. *Group Decision and Negotiation*, Vol. 12, No. 2, pp. 111–125, 2003.
- [11] Mehmet Bac and Horst Raff. Issue-by-issue negotiations: the role of information and time preference. *Games and Economic Behavior*, Vol. 13, No. 1, pp. 125–134, 1996.
- [12] Chaim Fershtman. The importance of the agenda in bargaining. *Games and Economic Behavior*, Vol. 2, No. 3, pp. 224–238, 1990.
- [13] Roman Inderst. Multi-issue bargaining with endogenous agenda. *Games and Economic Behavior*, Vol. 30, No. 1, pp. 64–82, 2000.
- [14] Rafik Hadfi and Takayuki Ito. On the complexity of utility hypergraphs. In *Proceedings of the Seventh International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations(ACAN2014)*, 2014.
- [15] Rafik Hadfi and Takayuki Ito. Modeling complex nonlinear utility spaces using utility hyper-graphs. In *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, pp. 14–25. Springer, 2014.
- [16] 服部宏充, 伊藤孝行, Mark Klein. 非線形効用関数をもつエージェントのためのオークションに基づく交渉プロトコル. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 89, No. 12, pp. 2648–2660, 2006.
- [17] Takayuki Ito, Hiromitsu Hattori, and Mark Klein. Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces. In *Proceedings of the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2007)*, Vol. 7, pp. 1347–1352, 2007.
- [18] Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein. An approach to scalable multi-issue negotiation: Decomposing the contract space. *Computational Intelligence*, 2012.
- [19] Valentin Robu, DJA Somefun, and Johannes A La Poutré. Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pp. 280–287. ACM, 2005.
- [20] Ariel Rubinstein. Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 97–109, 1982.
- [21] Ariel Rubinstein. A bargaining model with incomplete information about time preferences. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 1151–1172, 1985.
- [22] Tuomas Sandholm, Nir Vulkan, et al. Bargaining with deadlines. In *AAAI/IAAI*, pp. 44–51, 1999.
- [23] Shogo Kawaguchi, Katsuhide Fujita, and Takayuki Ito. Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiation agents competition (anac-10). In *Modern Approaches in Applied Intelligence*, pp. 501–510. Springer, 2011.
- [24] Katsuhide Fujita. Compromising strategy based on conflict mode for multi-times bilateral closed negotiations. In *Proceedings of the Seventh International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations(ACAN2014)*, 2014.