

分散メディアータに基づく交渉手法におけるパレート最適性の検証

藤田 桂英^{†a)} 伊藤 孝行^{†,††b)}

An Analysis of Pareto Optimality in Distributed Mediator Protocol for Multi Interdependent Issue Negotiation Problems

Katsuhide FUJITA^{†a)} and Takayuki ITO^{†,††b)}

Abstract. マルチエージェントシステムの研究分野において複数論点交渉問題が注目されている。特に、筆者らは各論点が相互依存関係の交渉問題に注目している。既存研究においてエージェントの効用情報の公開についてはあまり考慮されていなかった。しかしながら、交渉問題においては次回以降の交渉で不利になる等の理由からエージェントの効用情報の公開について考慮する必要がある。本論文では、メディアータを含めた他者に各エージェントの効用値を知られることなく合意形成が可能な分散メディアータに基づく交渉プロトコルとハイブリッド型セキュア交渉プロトコルを提案する。さらに、複雑な交渉問題下での目的関数に対する最適性とエージェントとメディアータ間の通信量の評価実験を行う。また、交渉問題においてエージェントにとってそれ以上望ましい状態が存在しないパレート最適性を考慮する必要がある。本論文ではパレート最適な合意案発見に対して有効な遺伝的アルゴリズムに基づく手法を提案し、評価実験を行う。

Keywords. 交渉と協調, 複数論点交渉問題, 非線形効用, パレート最適性

1. はじめに

マルチエージェント研究分野において複数論点交渉問題が重要な研究課題となってきた。特に、電子商取引などの分野において、マルチエージェントシステムを用いた自動交渉の枠組みやメカニズムの開発が必要といわれている。取引における合意形成のメカニズムを開発することで、将来的には人の代理として働くソフトウェアエージェントが交渉を行い、電子商取引の自動化が促進されると期待できる。ただし、エージェント同士の交渉の場合、効用情報などのプライバシーの公開に対する危険性、リアルタイムに取引相手が増える状況下での対応、また、合意を求める際の計算量爆発など実際の人間の交渉とは異なる問題が多数存在する。

複数論点交渉問題に関する研究はこれまでに進んでいる ([1], [2] etc.)。しかし、既存の研究では論点の

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。実世界の問題では複数の論点が全て独立していることは稀であり、複数の論点が相互依存関係にある場合が多い。そこで筆者らは、複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題に注目している ([3], [4])。

既存の研究においてエージェントのプライバシー情報の公開については議論されていなかった。例えば、あるエージェントの効用情報が他のエージェントに知られた場合、以降の交渉で不利な状況となり、本来得られるはずの効用が減少してしまう。以上から本論文は自分の効用情報をメディアータをはじめとした他者に知られることなく、最適な合意案を求めることを目的としている。

本問題に対する手法として、オークションに基づく交渉プロトコル [3] が提案されている。オークションに基づく交渉プロトコルは全ての効用情報を公開することなく合意形成が可能である。しかしながら、エージェント数の増加に伴い計算量が增大するという問題があった。そこで筆者らは代表者選択に基づく交渉手法 [4] を提案した。代表者選択に基づく交渉手法はエージェント数に対してスケラブルでありエージェ

[†] 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

^{††} マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院

a) E-mail: fujita@itolab.mta.nitech.ac.jp

b) E-mail: ito.takayuki@nitech.ac.jp

ントの効用情報の公開を最低限に抑えられる。

既存の手法を用いた場合以下の点において課題がある。(1) プライバシー面：既存の手法では何らかの効用情報をメディアータ等に公開する必要がある、エージェントの効用情報を他者に完全に隠すことは不可能である。(2) スケーラビリティ面：既存のプロトコルは効用空間の複雑さに対するスケーラビリティ性が低い。実際、論点数が 10 以上になると良い合意案を求めるのが困難となる。(3) パレート最適性 (Pareto Optimality)：既存の手法 ([3], [4]) は主に社会的効用が最大となる場合を注目していたが、交渉問題においてパレート最適な合意案を考慮する必要がある。以上 (1)～(3) よりメディアータを含めた他者にエージェント効用情報を全く知られることなく合意形成が可能な新たな交渉プロトコルを提案する必要がある。さらに、パレート最適な合意案にも注目する必要がある。

本論文では上記の (1) と (2) に対して有効である分散メディアータに基づく交渉手法と Take it or Leave it (TOL) 交渉プロトコルを提案する。分散メディアータに基づく交渉手法はメディアータを分散させ、マルチパーティプロトコル [5] を利用して個々の効用値を明かすことなく、効用値の和を求めながら合意形成を行う手法である。TOL は次状態へ変化を受け入れるかどうかのエージェントの返答をもとにして、状態を更新しながら合意形成を行う手法である。さらに、本論文で提案する分散メディアータに基づく交渉手法と TOL を組み合わせてハイブリッド型セキュア交渉プロトコルを提案する。ハイブリッド型セキュア交渉プロトコルは最初に TOL を実行してから、さらに分散メディアータに基づく交渉手法で局所的最適解を保証する手法である。ハイブリッド型セキュア交渉プロトコルは分散メディアータに基づく交渉手法で最大の問題であった通信量の増大を軽減しながら、目的関数に対する最適性の高い合意案が得られる。

さらに、(3) に対して有効である遺伝的アルゴリズム (GA) を分散メディアータに基づく交渉プロトコル導入する。また、シミュレーション実験を行い、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた手法がパレート最適な合意案を求めるのに有効であることを示すとともに、各手法がパレート最適な合意案の発見に対してどれほど有効かを評価する。

本論文の構成を以下に示す。まず、2. では本論文で扱う交渉問題の定式化と各エージェントがもつ非線形の効用空間について述べる。次に、3. では分散メディアータ

ータに基づく交渉手法、Take it or leave it 交渉プロトコル、そしてハイブリッド型セキュア交渉手法を提案する。その後、4. に交渉問題におけるパレート最適性と分散メディアータに遺伝的アルゴリズムを導入した手法について示し、5. において評価実験の結果を示す。最後に、6. に関連研究について示し、7. に本論文のまとめを示す。

2. 非線形効用関数に基づく交渉

本論文では、 N 個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 ($1 \leq j \leq M$)。交渉の結果得られる合意案は、各論点の値のベクトル $\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)$ として表現される。

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 $c_k \in C$ 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 c_k は、合意 \vec{s} によって充足される場合にのみ、 $w_i(c_k, \vec{s})$ を効用値として持つことができる ($1 \leq k \leq l$)。交渉に参加する全てのエージェントは、全く共有されていない独自の制約集合を持つ。

合意 \vec{s} に関するエージェント i の効用を $u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s})$ と定義する。 $x(c_k)$ は、制約 c_k を充足可能な合意案の集合である。この効用表現により、凹凸のある非線形の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状にプロットして得られるグラフを意味し、空間の次元数は、論点数+1 となる。この効用空間では、多くの制約を充足可能な地点は効用が高くなり、逆に充足する制約数が少ない地点では、効用が低くなる。これより、空間内に効用値による高低が生じる。

図 1 に、非線形の効用関数と効用空間の例を示す。図の効用関数 A と効用関数 B は、論点 1、および論点 2 に関連する二項制約の例を図示したものである。効用関数 A では、論点 1 に関しては $[3, 7]$ 、論点 2 に関しては $[4, 6]$ の範囲で合意が得られた場合に制約が充足可能であり、その場合の得られる効用は 55 であることを示している。図が示す通り、効用空間は各論点の取りうる値の全組み合わせを網羅した状態空間に、各エージェントが持つ全効用関数をプロットして得られるグラフである。実際の問題における非線形の効用

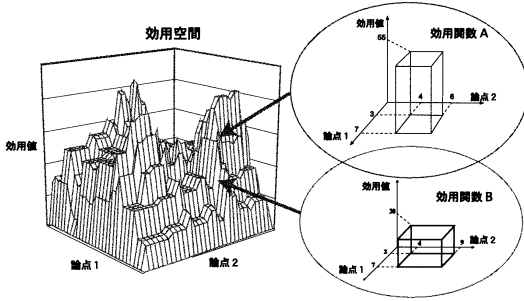


図1 非線形効用関数と効用空間の例

空間は図が示す以上に山と谷が入り組んだ複雑な効用空間を想定している。

線形の効用関数を前提とする既存のプロトコルでは、合意案の効用は個々の論点に関する効用の加重和であるため、平坦な超平面上での単一最適化により、良質の合意(解)を得ることができる。しかし、効用空間に不規則な凹凸がある非線形の効用空間では、既存のプロトコルを適用して、良い解を得ることは難しい。従って、本論文では、エージェントは合意案の効用を正確に評価するための完全な知識(効用関数)は持っているが、自身の効用関数に対して最適な合意案を事前に把握することが困難であることが前提となる。本論文で提案する交渉プロトコルの目的関数は、

$$\operatorname{argmax}_{\vec{s}} F(\vec{s}) = \sum_{i \in Ag} u_i(\vec{s}) \quad (1)$$

と表現できる。 Ag はエージェントの集合を表す ($|Ag| = N$)。提案プロトコルは社会的効用、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の発見を試みる。

本論文では実現可能な合意案集合 S の合意案 $\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)$ がパレート最適であるとは、 $F(\vec{s}') > F(\vec{s})$ である合意案 \vec{s}' が存在しない場合をいう。通常、各論点が相互依存となる複雑な効用空間ではパレート最適性をみだす合意案は単一ではなく、パレート解集合と呼ばれる複数のパレート解の集合となる。

本論文では全エージェントがすべての効用情報を公開して、非線形最適化手法を利用する手法を採用しない。本問題におけるエージェントは実世界におけるユーザの代行者として交渉を行う主体として考える。交渉の場で、効用に関する情報の公開は、実世界のユーザにとって好ましくない。例えば、エージェント A とメディエータが共謀しており、エージェント B の

効用情報をエージェント A に漏洩したとする。すると、効用情報が漏洩してしまったエージェント B は以降の交渉で極端に不利な状況となり、エージェント B の本来得られるはずの効用が減少してしまう。さらに、セキュリティの面からみても効用情報を全て公開することは危険である。以上から、本論文では交渉プロトコルの目的関数を達成するとともにメディエータ(中間者)も含めた他者に全く効用情報を知られないことを重要な条件の一つとしている。

3. セキュアな交渉手法の提案

本章では、メディエータを含めた他者にエージェントの効用情報を全く知られることなく目的関数を達成する手法の提案を行う。

3.1 分散メディエータに基づいた交渉手法

本節では通常交渉では単一の存在であったメディエータを分散させた、分散メディエータに基づいた交渉手法を提案する。分散メディエータに基づく交渉手法は山登り法に代表される反復改良探索アルゴリズム [6] を用いて合意案の探索を行う。さらに、マルチパーティプロトコル [5] を分散メディエータに導入し、メディエータを含めた他者に各エージェントの効用情報を知られることなく合意形成が可能である。以下に分散メディエータに基づく交渉手法を示す。

n 個のメディエータ ($M_0, \dots, M_j, \dots, M_n$) が存在し、任意の k 個以上のメディエータが集まると効用値の和が分かる場合を想定する。あらかじめマルチパーティプロトコルに必要な素数 q は共有してある。 m 個のエージェント ($Ag_0, \dots, Ag_i, \dots, Ag_m$) が存在する。**Step 1:** n 個のメディエータは探索空間を分割し、各メディエータに探索空間を割り当てる。各メディエータが分割して探索を行うことで、並列処理が可能であり、計算時間を削減可能である。

Step 2: 各メディエータは割り当てられた探索空間に対して反復改良探索アルゴリズム [6] を用いて探索を行う。もしメディエータが初めての状態を探索する場合、マルチパーティプロトコルを行うことを宣言する。その後、全メディエータのうち k 個のメディエータを選択し、全エージェントに v (シェア) の作成を行うように依頼を出す。

Step 3: エージェント i (A_i) は $f_i(0) = x_i$ をみだす高々 k 次の多項式 f_i をランダムに選び、 $v_{i,j} = f_i(j)$ を計算する。その後、 $v_{i,j}$ を M_j へ秘密で送信する。

Step 4: メディエータ j (M_j) は全エージェントから

$v_{1,j}, \dots, v_{m,j}$ を受け取り, $v_j = v_{1,j} + \dots + v_{n,j} \bmod q$ を計算する. その後, 他のメディエータに v_j を公開する.

Step 5: 全ての v_j から $f(j) = v_j$ を満たす高々 k 次の多項式をラグランジュの補完法を用いて求める. 最終的に $f(0) = s$ が全エージェントの効用値の和となる.

Step 2~5 は探索アルゴリズムの終了条件を満たすまで繰り返される. 探索終了後, 各メディエータは s 割り当てられた探索空間での最大値 (合意案候補) を報告する. そして, メディエータ達は合意案候補から最大の値を示す合意案候補を選択し, 最終的な合意案とする.

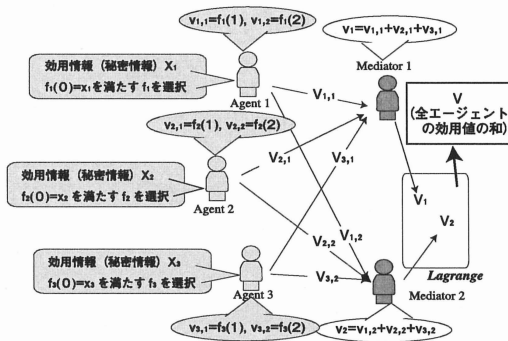


図2 分散メディエータに基づく交渉プロトコル

図2 はエージェント数3, メディエータ数2, $k=n$ と設定した場合の分散メディエータに基づく交渉プロトコルの一連の流れを示したものである. 灰色部分はエージェントが非公開で行うステップを示す. 図が示すように, 分散メディエータに基づく交渉手法は多項式を選択, シェアの作成, シェアの和の計算, そして, ラグランジュの補完法という一連の流れを実行することで他者に各エージェントの効用情報を知られることなく全エージェントの和を求めることができる.

また, 分散メディエータに基づく交渉手法は, プライバシー面とスケーラビリティの面において利点がある. 以下に提案した手法の特徴を挙げる.

[プライバシー面] 本プロトコルでは探索の際に必要なある状態における全エージェントの効用値の和をメディエータを含めた他者に知られることなく求められる. 本手法が全エージェントの効用値の和を他者に知られることなく正しく求められている証明はマルチパーティプロトコル[5]の場合と同様である. また, マ

ルチパーティプロトコルにおいて一定数以上の参加者が不正に結託しない限りは, 個人の秘密情報を解析できないことが保証されている.

本プロトコルにおいてマルチパーティプロトコルを行うメディエータの人数 k は, セキュリティの安全性と計算時間のトレードオフとなる. 本プロトコルにおいても k 個のメディエータが共謀して各エージェントから集められたシェア v を交換し合うと各エージェントの効用値が暴かれてしまう. そのため, k の値を大きくし, メディエータ同士が共謀するのが非現実である数値にする方がプライバシーの面からみると望ましい. しかし, k が多くなるにつれて, 探索を停止するメディエータが多くなり計算時間がかかる.

[スケーラビリティの面] 本プロトコルでは探索空間を分割して行うため, 大幅に効用空間の複雑度に対するスケーラビリティが向上する. ただし, メディエータの計算能力やメモリ量を考慮して, 適切に探索空間をメディエータに割り振る手法は今後の課題である.

分散メディエータに基づく交渉プロトコルは探索した状態全てに対してシェアを作成するため, メディエータとエージェント間やメディエータ同士で多くの通信を行う必要がある. また, 多くの通信量が必要となると計算時間がかかるだけでなく, メディエータの探索効率が減少するという欠点がある.

3.2 Take it or Leave it (TOL) 交渉プロトコル

メディエータに各エージェントの効用値を知られることなく合意案を求める手法として TOL を提案する. 本プロトコルでは, 評価関数の値が増える方向に連続的に動くことを繰り返す山登り法 [6] を基に探索を行う. ただし, メディエータにエージェントの効用値を知られないために, 評価関数はエージェントが現状態から次状態への変化を受け入れるかどうかの返答により決められる. 以下に TOL のステップを示す.

- Step 1:** ランダムに初期探索地点を決定する.
- Step 2:** メディエータは各エージェントに, 現在の状態と近傍の状態を比較して状態の更新を行いたいかの問いかけを行う.
- Step 3:** 各エージェントは現在の状態と問われた近傍状態の効用値を比較し, 近傍状態の方が効用値が高ければ “take it” を低ければ “leave it” と返答する.
- Step 4:** メディエータは近傍状態のうち “take it” と答えたエージェント数が最大の状態へと進む. ただし, “take it” と答えたエージェント数が最大の状態が多数存在する場合はランダムで選択を行う. このようなラ

ンダム選択により山登り法の欠点の一つである局所的
最大に陥ることを防ぐ。

Step 1～4の操作を、全エージェントが“leave it”と
返答するか、“take it”と答えるエージェント数に変化
がない高原に陥ったと判断した場合に合意を生成する。

本プロトコルの長所として、探索の際の評価関数が
単純であるためエージェント数が増加しても非常に高
速であることが挙げられる。ただし、エージェント数
が少ない場合、すぐに高原に陥ってしまい目的関数に
対する高い最適性を期待できないという問題がある。

3.3 ハイブリッド型セキュア交渉プロトコル

前節で提案した分散メディアータに基づいた交渉手
法と TOL はそれぞれシェア作成によるメモリ量と目
的関数に対する最適性において欠点があった。本節で
は前節で提案した二手法を順に実行して合意形成を行
う手法を提案する。本論文では本節で提案する手法を
ハイブリッド型セキュア交渉プロトコルと呼ぶ。以下
にハイブリッド型セキュア交渉プロトコルを示す。

Step 1: 複数のメディアータに対して探索空間を分割
し、各メディアータに割り当てる。

Step 2: 各メディアータは与えられた探索範囲に対
してランダムに決められた値を初期値として、3.2にお
いて提案した TOL を用いて交渉を行う。TOL を用い
ることで、シェアを作成せず、ある程度の高い社会的
効用を持った解を求められる。

Step 3: TOL で求めた解を初期値として、3.1にお
いて提案した、分散メディアータに基づく交渉手法を用
いて交渉を行う。分散メディアータに基づく交渉手法
により、他のエージェントやメディアータに効用情報
を知られずに局所最適解を保証できる。

Step 1～3の操作を初期地点をランダムに変えなが
ら繰り返し行う。

本節で提案しているハイブリッド型セキュア交渉プ
ロトコルは分散メディアータに基づく交渉手法と比較
して少ない通信量で高い目的関数に対する最適性が期
待できる。なぜならば、本プロトコルは、初めに TOL
交渉手法を実行することでマルチパーティプロトコル
を実行する回数を減少できるからである。また、TOL
は高原と判断され探索を終了することが多い。その結
果、分散メディアータに基づく交渉プロトコルにおい
て社会的効用に対する最適性を下げる原因であった局
所的最大に陥ることを分散メディアータの初期値が異
なる地点から探索することで防ぐことができる。

4. 交渉問題におけるパレート最適性の発見

交渉問題におけるパレート最適とは2章にも示し
たように、実現可能な合意案集合 S に対し、合意案
 $\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)$ が、 $F(\vec{s}') > F(\vec{s})$ である合意案 \vec{s}'
が存在しない場合をいう。通常、各論点が相互依存と
なる複雑な効用空間ではパレート解集合と呼ばれる
複数のパレート解の集合となる。なぜなら、各論点や
エージェント間にトレードオフが存在するからである。

各論点が相互依存関係な交渉問題において、パレ
ート解集合を求めることは多大な計算量を要する。この
計算量を要する理由は、交渉問題におけるパレート最
適な合意案とは社会的効用最大の状態を複数求めるこ
とであり、単一の社会的効用最大の状態を発見するだ
けでもかなりの計算量を要するからである。

本論文ではエージェント間においてパレート最適で
ある場合に注目している。このエージェント間におい
てパレート最適であるとは、これ以上各エージェント
の効用を下げることなしに、社会的効用を向上させる
状態が存在しないことをいう。また、複数論点交渉問
題には論点間においてパレート最適である場合も存在
する。例えば車を買う際には値段と大きさがトレード
オフ関係になり、各論点においてパレート最適な合
意案が存在する。この論点間におけるパレート最適性
は多目的最適化問題がもたっている。

本論文では新たに探索手法に遺伝的アルゴリズム [6]
を用いたプロトコルを提案する。遺伝的アルゴリズム
(GA) を用いたプロトコルとは分散メディアータに基
づく交渉プロトコルの探索手法として GA を採用し
たプロトコルである。交渉問題においては GA の個体
(individual) を状態ベクトル \vec{g} とし、2つの親となる個
体を組み合わせることで探索を行う。また、GA にお
ける評価関数つまり適合度関数 (fitness function) を全
エージェントの効用値の和とする。既存研究 [3] にお
いて主に山登り法 (HC) やシミュレーテッドアニーリ
ング (SA) を探索手法として用いていた。なぜならば、
HC や SA は凹凸の存在する探索空間に対して単一の
最適状態を発見するには優れているからである。一
方、パレート最適解集合を求めることに関しては、探
索手法として SA や HC より GA を用いる方が有効性
が高い。次章では、シミュレーション実験により GA
を用いた手法がパレート最適な合意案を求めるのに有
効であることを示すとともに、各探索手法がパレ
ート最適性に対して与える影響を評価する。

5. 評価実験

5.1 実験設定

本実験では、ランダムに生成された効用関数をもつエージェント間の交渉を 100 回試行し平均値を取る。全エージェント数は 6 である。また、分散メディアータにおける交渉手法における全メディアータ数は 2(論点数) でそのうち 4 メディアータ集まると全エージェントの効用値の和が求められる。

【効用関数の設定】各エージェントにおける効用関数の制約数は 10(単項制約), 5(単項制約を除く各次元) である。制約の最大効用は $100 \times (\text{論点数})$ で、制約の最大範囲は 7 である。

本実験では 6 つの手法の比較を行う。まず、“(A) 分散メディアータ (SA)” は手法として分散メディアータに基づく交渉手法を用いており、探索にはシミュレーテッドアニーリング (SA) を適用している。同様に“(B) 分散メディアータ (HC)” は手法として分散メディアータに基づく交渉手法を用いており、探索には山登り法 (HC) を適用している。“(C) 分散メディアータ (GA)” は手法として分散メディアータに基づく交渉手法を用いており、探索には遺伝的アルゴリズム (GA) を適用している。“(D) ハイブリッド型 (SA)” は手法としてハイブリッド型セキュア交渉プロトコルを用いており、Step3 に用いた探索手法として SA を適用している。“(E) ハイブリッド型 (HC)” は手法としてハイブリッド型セキュア交渉プロトコルを用いており、Step3 に用いた探索手法として HC を適用している。“(F) TOL” は手法として TOL を用いた。以下に各手法に用いている探索手法 (HC, SA, GA) の設定を示す。

【山登り法 (HC) の設定】HC はランダム再スタート山登り法 [6] を用いる。繰り返し回数を $20 + (\text{論点数}) \times 5$ 回とする。

【シミュレーテッドアニーリング (SA) の設定】分散メディアータに基づく交渉プロトコルでは初期温度を 50 度として、500 回の繰り返し処理で温度を 0 まで下げることとする。さらに、初期状態をランダムに変化させながら $20 + (\text{論点数}) \times 5$ 回探索を行う。一方、ハイブリッド型セキュア交渉プロトコルは初期の温度を 30 とし、処理を 30 回繰り返す。ハイブリッド型セキュア交渉プロトコルにおける SA の操作は TOL を用いて高くなった探索初期値をもとに局所最適解を保証することである。以上から、温度を低く設定してある。

【遺伝的アルゴリズム (GA) の設定】1 世代で発生す

る集団サイズを $20 + (\text{論点数}) \times 5$ として、世代交代回数を 500 回とする。交叉に関しては、1 点交叉法 (one point crossover) を用いた。また、突然変異は十分小さな確率で発生し、状態のベクトルのうち任意の論点 1 つをランダムに変化させるものとする。

実験は JAVA2(1.5) で記述し、Mac OS 10.5 が動作している iMac (Core2Duo 2.33GHz メモリ 1.5GB) で行った。

5.2 実験結果

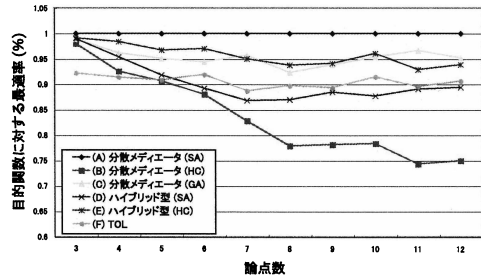


図3 最適率の比較

図3は目的関数に対してどれほど良質な解を求められているかを示している。本実験における各論点の値域は $[0, 9]$ であり、合意案となりうる状態数が膨大である。以上から、全探索で目的関数に対して最適となる合意案を求めることは不可能となるため、シミュレーテッドアニーリング (SA) を用いて探索した解を近似最適解としている。また、本実験では(最適率) = (各手法で求めた最適解) / (近似最適解) を指標して用いる。(B) は論点数の増加に従って急激に減少している。(B) の減少の理由としては論点数の増加にともない効用空間の広さが急激に増加するため、山登り法の欠点である局所的最大に陥る可能性が増加するからである。一方、(A) や (C) は論点数が増加しても大きく減少することはない。特に、(A) に関しては最適解とほぼ同じ値を示している。このほぼ同じ値を示す理由は (A) と近似最適解は同じ探索手法 (SA) を用いているからである。このように、分散メディアータを用いた手法における目的関数に対する最適率は探索手法に大きく依存することになる。(F) は論点数全体において最適率は高くないが大きく減少することのない安定する数値となっている。この安定の理由は多くのエージェントが受け入れる状態を目指し、全エージェントが共通して高い部分で合意を生成するため安定的な値を得られ

るからである。一方、(D)や(E)は(F)に比べて最適率が高い値を示しており、特に(E)は(D)よりも高い最適率となっている。この理由は(D)はSAの性質上、まれにTOLによって高くした探索初期値よりも低い値で探索を終了するが(E)は山登り法の性質上、必ず探索初期値より高い値で探索を終了からである。

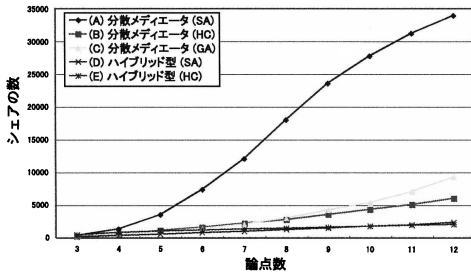


図4 シェア数の比較

図4は交渉の際に各メディエータが平均してシェア(v)をどれだけ作成したかを示している。本実験での各論点の値域は[0,9]とする。シェアの数を調べるにより各手法のメディエータがマルチパーティプロトコルを行ったかが分かる。以上から、メディエータやエージェント間の通信量を比較することができる。(A)はシェアの数が指数的に急増している。一方、(B)や(C)は(A)に比べてシェアの数が大幅に削減されている。これはSAの状態を網羅的に探索する性質による。また、ハイブリッド型を用いた場合、分散メディエータのみを用いた場合に比べてシェアの数が削減されている。この理由は分散メディエータによる交渉手法の探索初期値を高い値に設定できるからである。

以上の二つの実験からハイブリッド型セキュア交渉プロトコルはエージェントやメディエータ間の通信量を減らしながら、高い目的関数に対する最適性を持つ合意案を発見できることが分かる。

図5は交渉問題に存在するパレート最適な合意案集合のうちどれだけの割合で発見可能かについて示している。本実験により、各手法がどれほどパレート最適な合意案を発見するのに有効かを比較可能である。本実験での各論点の値域は[0,4]とし、パレート最適な合意案を発見しやすくしてある。(C)はパレート最適な合意案の発見率に対して最も高い値を示している。(C)が高い値を示す理由として遺伝的アルゴリズムがパレート最適となる解を1つ発見すると、そのパレ

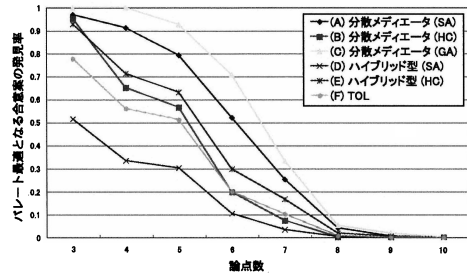


図5 パレート最適な合意案の発見率

ト最適な解を親として近傍に存在するパレート最適となる解を発見できるからである。一方、(A)、(B)、(D)、(E)のようなSAやHCを探索手法として用いたプロトコルは(C)のGAを探索手法として用いたプロトコルと比較して低い値となっている。以上から、パレート最適解集合を求める場合に対し、探索手法としてGAを用いたプロトコルの方が有効であることが分かる。また、(A)~(F)すべての手法において論点数が大きくなると発見率は低い値となる。以上から、本論文で用いているような非線形な効用空間においてはパレート最適となる合意案を発見するのはかなり困難であることが分かる。

6. 関連研究

多くの既存研究は線形の効用関数のみに対応したものの([1],[2] etc.)だが、複数論点交渉問題における非線形効用関数に注目した文献も増え始めている。文献[7]は、遺伝的アルゴリズムに基づく双方向型の交渉プロトコルを提案している。ここでは、エージェントが、他のエージェントの提案を取り入れながら自身の選好を更新し、高効用の解の決定を試みる。しかし、本文献では、売り手と買い手のような、立場の異なる2種類のエージェント間の交渉問題が想定されているが、エージェントの選好に、より多くのバリエーションが存在するケースに関する議論も行われておらず、大規模な問題に関する性能が不明である。

文献[8]では、二項制約を含む中規模の双方向型の交渉問題を対象とし、シミュレーテッドアニーリングに基づくメディエータが準最適解を得る手法が提案されている。一方、本論文では、さらに高次の依存関係と多数のエージェントが存在するより複雑な交渉問題に関して、高い最適性を議論している。

文献[9]は二者間の複数論点の交渉問題を取り扱っ

ており、提案した手法がパレート最適性を満たす解を探ることが可能であることが示されている。また、文献[10],[11]では電子商取引における二者間の複数の商品取引や複数論点の交渉問題に対して Utility Graph を用いて取り組んでいる。さらには、[12]は時間制約が存在する二者間交渉を提案している。これらの研究は興味深い観点から提案されているが、どれも二者間に限った交渉問題になっている。

文献[13]はメディアータを導入し交渉を行うフレームワークを提案している。さらに、agenda(議題)別に交渉を行っていく手法も導入されている。交渉問題において、効用関数の複雑性に対するスケラビリティが注目されてきており、本文献のようなアプローチはスケラビリティ性の向上に対して有効である。

また、分散制約最適化問題 (DCOP) の分野において、セキュリティを考慮した数々の論文が存在する([14],[15])。しかし、本論文が対象としている交渉問題は分散制約充足問題のアルゴリズムを単純に適用するだけでは不十分である。多くの分散制約充足問題における設定はエージェントを、利己的な効用最大化者であると仮定していない。しかし、本論文で扱う問題は真の申告が必ずしも期待できないという利己主義を仮定している。さらに、本論文が扱う問題は分散最適化問題の一種であり各エージェントは合意案における効用が高くなるようにインセンティブが働く。ただし、交渉が決裂した場合得られる効用は負となるため合意を形成することに対しては協力的である。

7. まとめ

本論文では各論点が相互に依存するような複雑な交渉問題について注目した。そして、メディアータを含めた他者にエージェントの効用情報を知られることなく合意形成を行う、“分散メディアータに基づく交渉手法”を初めとした手法を提案し、プライバシー面とスケラビリティ面に対して既存の研究の課題を解決した。また、複数論点交渉問題に対してエージェントにとってそれ以上望ましい状態が存在しないパレート最適性について評価実験を行い、新たに遺伝的アルゴリズム (GA) を分散メディアータに基づく交渉手法に導入した。

文 献

- [1] T. Bosse and C. M. Jonker: “Human vs. computer behaviour in multi-issue negotiation”, Proceedings of 1st International Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2005), pp. 11–24 (2005).
- [2] P. Faratin, C. Sierra and N. R. Jennings: “Using similarity criteria to make issue tradeoffs in automated negotiations”, *Artificial Intelligence*, **142**, 2, pp. 205–237 (2002).
- [3] T. Ito, H. Hattori and M. Klein: “Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces”, Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007), pp. 1347–1352 (2007).
- [4] K. Fujita, T. Ito and M. Klein: “A preliminary result on a representative-based multi-round protocol for multi-issue negotiations”, Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2008), pp. 1573–1576 (2008).
- [5] Y. Lindell: “Composition of Secure Multi-Party Protocols: A Comprehensive Study”, Springer (2003).
- [6] S. J. Russell and P. Norvig: “Artificial Intelligence : A Modern Approach”, Prentice Hall (2002).
- [7] R. J. Lin and S. T. Chou: “Bilateral multi-issue negotiations in a dynamic environment”, Proceedings of the AAMAS Workshop on Agent Mediated Electronic Commerce (AMEC V) (2003).
- [8] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama and Y. Bar-Yam: “Negotiating complex contracts”, *Group Decision and Negotiation*, **12**, 2, pp. 58–73 (2003).
- [9] G. Lai, K. Sycara and C. Li: “A decentralized model for multi-attribute negotiations with incomplete information and general utility functions”, Proceedings of the 2nd International Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006) (2006).
- [10] V. Robu and H. L. Poutre: “Retrieving the structure of utility graphs used in multi-item negotiation through collaborative filtering of aggregate buyer preferences”, Proceedings of Second International Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006) (2006).
- [11] V. Robu, D. J. A. Somefun and J. L. Poutre: “Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs”, Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2005) (2005).
- [12] S. S. Fatima, M. Wooldridge and N. R. Jennings: “Approximate and online multi-issue negotiation”, Proceedings of the 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2007), pp. 947–954 (2007).
- [13] J. Shew and K. Larson: “The blind leading the blind: A third-party model for bilateral multi-issue negotiations under incomplete information”, Proceedings of The 1st International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN-2008) (2008).
- [14] R. T. Maheswaran, J. P. Pearce, P. Varakantham, E. Bowring and M. Tambe: “Privacy loss in distributed constraint reasoning: A quantitative framework for analysis and its applications”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, **13**, pp. 27–60 (2008).
- [15] J. P. Rachel Greenstadt and M. Tambe: “Analysis of privacy loss in distributed constraint optimization”, Proceedings of the 17th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (2006).