

非線形効用関数を持つ エージェントの多対多交渉マッチング

Sensen Qiao^{1,a)} 伊藤 孝行^{1,b)} Ahmed Moustafa^{1,c)} 奥原 俊^{1,d)}

概要: マルチエージェントの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して注目されている。近年、実社会では、数多くの交渉マッチング問題の応用が存在する。例えば、男女の最適なペアを探し出すマッチングアプリケーションや輸送問題ではどの工場からどの店舗へどの分量の製品を輸送するのかが最適化するような問題が挙げられる。また、人が行う多対多の交渉も複数の買い手と複数の売り手が各々の効用空間から提案する offer のマッチングである。既存の研究では交渉マッチングにおいて複数論点問題を扱っているが、多くの研究では独立した論点と仮定しており、論点間に存在する相互依存関係を考慮していない。本論文では、実社会に近い問題にも適用できる各論点同士に依存関係が存在する交渉問題に注目し、複雑な効用空間に基づく交渉マッチングプロトコルを提案する。

1. はじめに

近年、マルチエージェントの研究分野において複数論点 (Multi-issue negotiation) が存在する交渉問題が多く研究されている。本研究では 2 つのエージェント集合の交渉の結果が最も良い組み合わせを探す問題を多対多交渉マッチング問題と呼ぶ。図 1 は多対多交渉マッチングの概念を示す。これまでに交渉マッチングにおいて、多くの複数論点交渉問題に関する研究が行われてきた [5][6]。既存の研究 [4][9] の多くは複数論点同士が互いに独立していると仮定している。故にエージェントの効用を線形の効用関数として表現することができる。しかし、実世界での交渉問題における複数論点間はより複雑な相互依存関係を持つことが多い。例えば、複数の責任者が会議や学会のために手配する会場の仕様を決定する問題を想定する。ここでは費用やキャパシティなどが具体的な論点となる。会場の費用は収まる人数と依存関係が存在する。責任者たちはこの依存関係を考慮しながら、仕様の選択を決定する必要がある。

論点間の依存関係を表現するためには複雑な形式の効用関数が用いられる。ようするに、エージェントの効用を多目的最適化を目的とした効用関数にて表現することになる。既存の研究に述べられた線形効用関数を用いた交渉プ

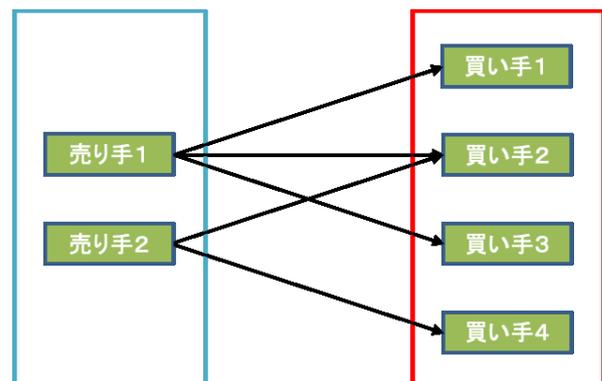


図 1 多対多交渉マッチングの概念

ロトコルでは非線形の交渉マッチング問題を扱うのには不十分である。

本研究では、実社会に近い問題にも適用できる各論点同士に依存関係が存在する交渉問題に注目し、複雑な効用空間に基づく交渉マッチングプロトコルを提案する。提案手法では、メディエータを設け、エージェントが入札をすることでメディエータが社会効用を最大にするマッチングの組み合わせを見つける方法を述べる。

複雑な効用空間を前提として多対多の交渉マッチングで最も良い組み合わせを探すのは計算量的に非常に困難な点が本研究の課題となる。

評価実験では、非線形の効用空間を前提として全探索で効用空間を探索する方法と提案するマッチングプロトコルの比較を行い、提案手法が複雑な効用空間での有効性を確認する。

¹ 名古屋工業大学大学院情報工学専攻
〒466-8555, 愛知県名古屋市昭和区御器所町
a) qiao.sensen@itolab.nitech.ac.jp
b) ito.takayuki@nitech.ac.jp
c) ahmed@nitech.ac.jp
d) okuhara@itolab.nitech.ac.jp

2. 複数論点問題と非線形効用関数

2.1 複数論点交渉問題

交渉とは相互利益のために競合解決と合意形成を行う重要な社会的行動である。交渉には単一論点 (single-issue) を扱う問題や、複数論点 (Multi-issue) を扱う問題がある。複数論点問題では独立した論点と論点間に相互依存関係を持つ2つに分けることができる。独立した論点はエージェントの効用を線形の関数として表現することができ、依存関係を持つ論点は実世界にて多く存在する、例えば、車の設計をする際に採用するエンジンとキャブレタには高い依存関係がある。故に依存関係を多目的最適化を要する非線形の関数で表現することができる。

既存の研究では、Kostas ら [9] は1人の買い手と複数の売り手が1つの商品の複数論点について同時交渉を行う研究をしている。図2に同時交渉の概念を示す。買い手と売り手は提案応答プロトコルをもとに提案と応答を繰り返すことにより合意を目指す。そして買い手は粒子群最適化で最適な offer を見つけ出し、その offer に基づきで交渉戦略を調整していくプロトコルを提案した。彼らの提案プロトコルは独立した論点と仮定した上では同時交渉にて効率よく合意形成できると証明した。しかし、実世では、論点間に依存関係を持つ交渉が多く、依存関係を考慮できる新しい交渉マッチングプロトコルが必要である。本研究では複数論点問題に着目し、論点間に存在する依存関係を考慮できる非線形効用関数を交渉マッチングプロトコルに用いる。

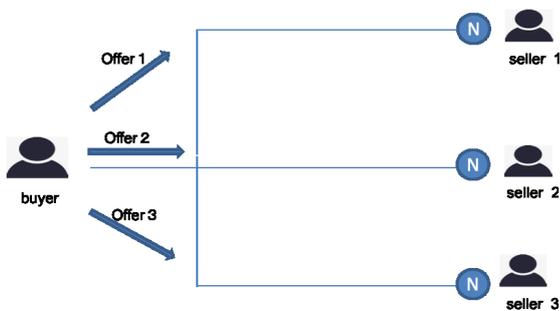


図2 同時交渉の例

2.2 非線形効用関数

本研究では制約表現を用いた効用関数でエージェントの効用を表現する。制約とは各論点に関して効用が得られる範囲を表現したものである。 $|N|$ 個のエージェントが交渉で合意を得る状況を想定する。論点が $|I|$ 個存在する、各論点を i_j と表す ($1 \leq j \leq |I|$)。論点の数は、効用空間の次元数を表す。例えば、論点が3個存在する交渉問題では、その次元数は3次元となる。各論点 i_j は $[0, X]$ の範囲で整数を値として持ち、合意案は各論点の値のベクトル $\vec{s} = (s_1, \dots, s_{|I|})$ として表現する。

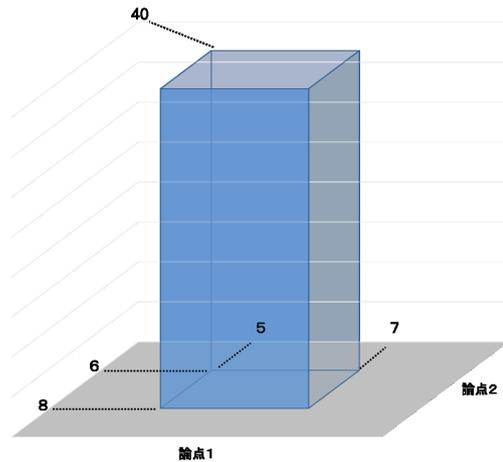


図3 2項制約の例

エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。 $|C|$ 個の制約が存在すると ($1 \leq k \leq |C|$)、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。 $\delta(c_k, i_j)$ は制約 c_k が論点 i_j に関して制約充足条件となる値の集合 (範囲) である。制約 c_k は、合意 \vec{s} によって充足される場合のみ、 $w_i(c_k, \vec{s})$ を効用値として持つことができる。図3は論点1、論点2に関する二項制約を表している、これは論点1が $[6, 8]$ の範囲で論点2が $[5, 7]$ の範囲の時に効用値40が得られることを示している。通常全てのエージェントは共有され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 の効用を以下の式で定義する。

$$u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s})$$

$x(c_k)$ は、制約 c_k を充足可能な合意の集合である。この式では多くの制約を充足する地点は高い効用値を得て、少ない制約を満たす地点では低い効用値を得ることとなる。本論文での効用空間は、各論点を取り得る値の全ての組み合わせについて、効用関数により効用値を空間上にプロットしたものであり、空間の次元は、論点数+1となる。図4に、非線形効用空間の例を示す。図に表すように実世界の問題における非線形効用空間では凹凸のある山と谷が入り組んだ複雑な効用空間になる。

本例では2つの論点が存在するため、効用空間は3次元のグラフとして表示されているが、単項制約 (1つの論点にしか関係しない制約)、2項制約 (2つの論点に関係する制約) や3項制約 (3つの論点に関係する制約) があり、そして、論点数が大きくなれば、更に複雑な効用空間ができる。各論点独立した場合しか考慮しない既存のプロトコルでは、単純に線形問題として社会的効用が最大となる合意案を求められるが、効用空間に凹凸が存在する場合、線形の効用関数では求めることが非常に困難である。従って、本

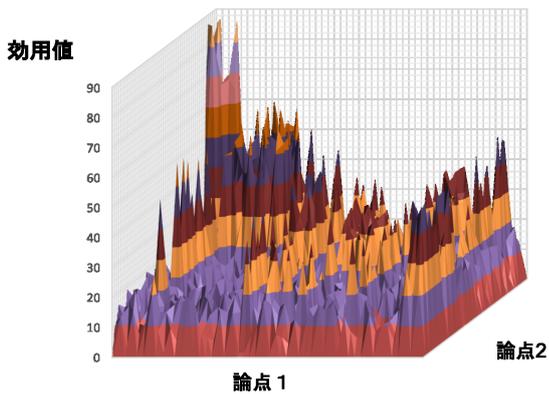


図 4 非線形効用空間

論文では、合意案を適切に評価できる効用関数を持っているが、最適な合意案を事前に把握することは困難である。

本論文で提案する非線形効用空間を前提とするメディエータに基づくマッチングプロトコルを提案する。提案するマッチングは図 5 に表すように、2つのグループに分かれ、それぞれのグループに複数のエージェントが存在する。グループの間にメディエータを設け、メディエータは各エージェントから入札を受け取り、合意できるペアを見つけ重み付き最大2部マッチングを行い、社会的効用が最大となるマッチングの組み合わせを探す。

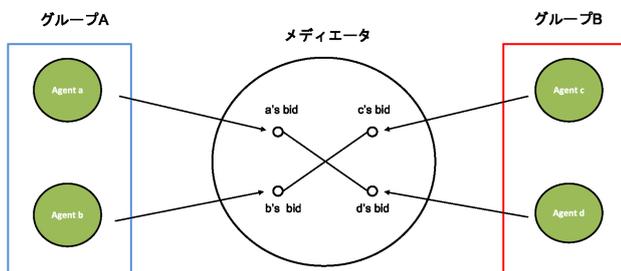


図 5 マッチングの例

各エージェントは複数の入札を行う。2つのエージェントの間で、入札が重なり合う点は合意点と考えられる。合意点における効用の和はその2つのエージェントの社会的効用となる。メディエータエージェントは図 6 のように、全てのペアの交渉結果としての社会的効用のマトリックスを求める。例えば、エージェント A とエージェント a の入札は合意でき、50 の社会的効用があることを意味する。また、エージェント B とエージェント b は合意できていないことを表す。すなわち、提出した入札の集合に重なりがないことを意味する。マトリックスの全てのペアの社会的効用を求めたら、重み付き最大2部マッチングアルゴリズムを使い、効率的に組み合わせを探し出す。実験では、有名な Munkres 法 [10] によって実際にマッチングを求めている。

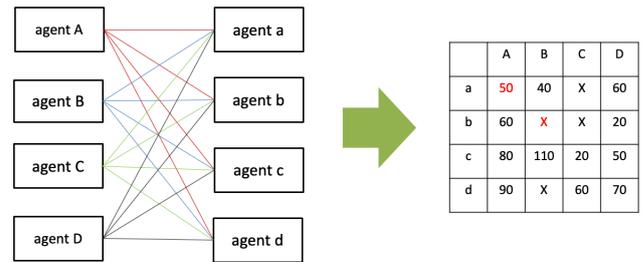


図 6 社会的効用のマトリックス

3. メディエータに基づく交渉マッチングプロトコル

本論文で提案する手法は、服部ら [1] のオークションメカニズムに基づく交渉プロトコル拡張し、交渉マッチングプロトコルとして応用する。

メディエータに基づく交渉マッチングプロトコルは以下の3ステップから成る。

[Step1: SA で局所最適解を探索] エージェントは各々の効用空間にてサンプリングを行う。これは効用の高い合意案が存在する範囲を特定するためである。そして、サンプリング点を起点としシミュレーテッドアニーリング (SA) を行い、サンプリング点の周囲の局所最適解を探索する。図 7 に SA による局所最適解探索の概念を示す。図では、可能な合意案から得られる効用が、複雑なグラフを描くことが示されている。図中の黒点はサンプリング点、白点は局所最適解 (合意点) を示している、エージェントは SA に基づきサンプリング点を起点として、周囲の点をランダムに探索し局所最適解を発見する。

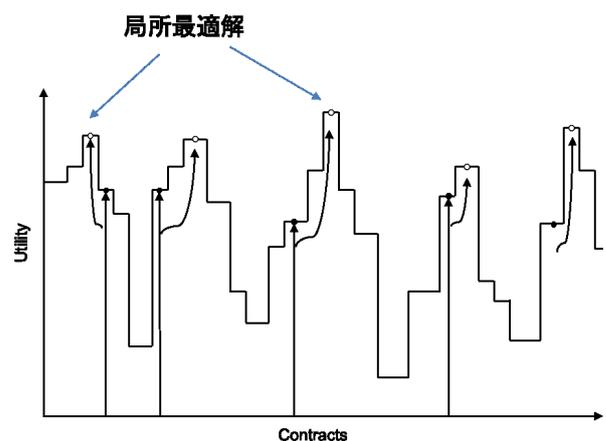


図 7 SA による局所最適解探索
出典：服部 [1] より一部改変

[Step 2: 入札の生成] エージェントはシミュレーテッドアニーリングで得た可能である合意案 s の効用値を計算する。効用値は合意案 s が充足する制約の効用の総和で求め

ることができる。合意案の効用値を計算した後は効用値の高い順に、事前設定された入札数分上位から入札として生成する。図8に概念を示す。図に示す通り、効用値の高い順番に合意案を入札として生成する。

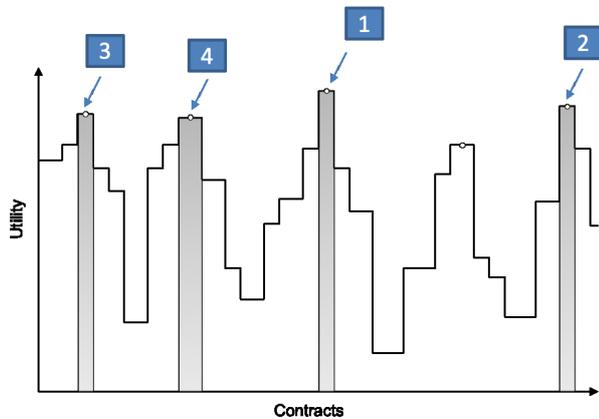


図8 入札の生成の概念
出典：服部 [1] より一部改変

[Step3:マッチングの決定] エージェントは生成された入札をメディエータに提出し、メディエータは全ての入札の組み合わせを考慮し最終のマッチング（合意）を決定する。図9はマッチングの決定の概念を示す。メディエータは提出された入札中、共通の部分を持つ入札を探し出す。具体的には、各入札が持つ論点に関する値の範囲の共通の部分を求める。共通の部分が存在するのであれば、その入札の組み合わせは可能性のある合意案となり、マッチング成功とする。そして、全てのペアに関しての効用を社会的効用マトリックスに格納する。メディエータは2章で述べたように社会的効用マトリックスに対して重み付き最大2部マッチングアルゴリズムを使い全てのエージェントに関する社会的効用が最大化するマッチングの組み合わせを求める。

上記のアプローチにより、社会的効用が最大となるマッチングの組み合わせの発見を保証できることは容易に説明できる。本提案手法では論点数 $|I|$ 、およびエージェント数 N の増加により問題スケールが指数的に増加するため、マッチングにかかる計算コストは非常に大きくなる。

4. 実験設定

本実験では入札数の増加に伴いエージェント数と社会的効用関係を測定する。比較対象として全探索で効用空間を網羅的に探索する方法と提案するメディエータに基づく交渉マッチングプロトコルを比較する。全ての実験は10回試行した結果の平均をとる。

実験に用いたパラメータは以下の通りである。

- エージェント数：4~6
- 論点数：3~4

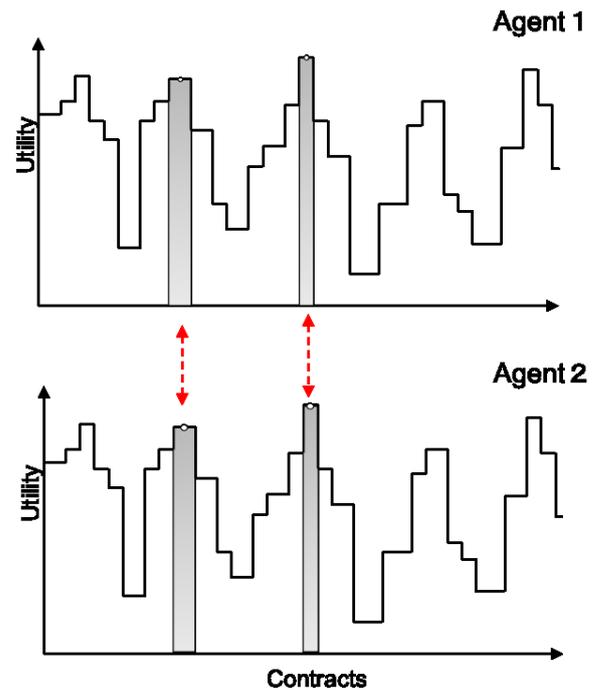


図9 マッチングの決定
出典：服部 [1] より一部改変

- 制約数：100。単行制約，2項制約，3項制約をランダムに生成
- 制約の最大効用：100x(論点数)。多くの論点に関して条件を満たす制約は、効用がより高くなり、制約を満たしたものが少ない場合は、効用が低い値となる。
- 制約の範囲：ランダムに中心を決め、ランダムで中心から最大、最小値の幅を決める。制約は以下のように生成される。(論点1, 論点2, 論点3) = ([3,6], [2,9],[3,8])。
- 1 エージェントあたりの入札数：0~100
- 各々のエージェントが行う SA では初期の温度を 100 とし、処理を入札数回繰り返す。

評価実験において、SA を用いた探索により、発見した解を近似最適解とする。また、マッチング失敗（合意形成失敗）の交渉は0の効用を得ると設定する。

また、本実験は Python 3(Ver. 3.7.4) で記述し、MacOS Mojave10.14.1 が動作している MacBook Pro(CPU 2.3GHz Intel Core i5・メモリ 8 GB) 上でシミュレーションを行った。

5. 実験結果

図10に論点数を3 ($|I| = 3$) とした時のエージェント数と社会的効用の関係を示す。縦軸は社会的効用、横軸は入札数、各々の折れ線は異なるエージェント数を示している。シミュレートでは入札がない状態から行うため、獲得した社会的効用は0から開始し推移している。全てのエージェント数では、入札数の増加により獲得効用値が指数的に増加しているのが観察できる。これは問題空間（論点数3）

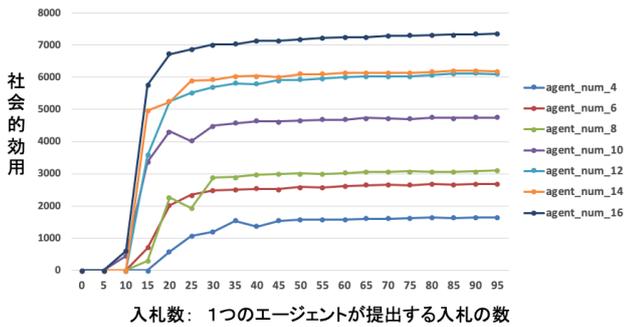


図 10 論点数 3 : 社会的効用とエージェント数の関係

がまだ十分に大きくない場合において提案した交渉マッチングプロトコルを用いて各入札が持つ論点に関する値の範囲の共通部分を探求できていることが説明できる。

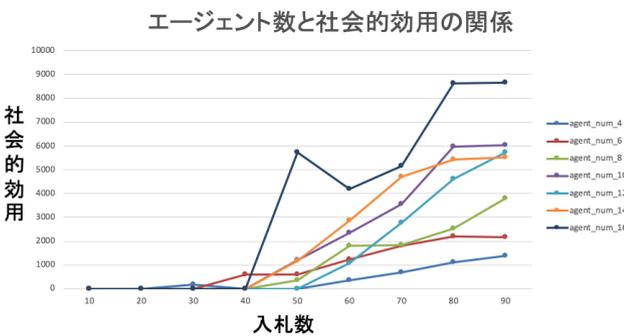


図 11 論点数 4 : 社会的効用とエージェント数の関係

図 11 に論点数を 4 ($|I| = 4$) とした時のエージェント数と社会的効用の関係を示す。縦軸は社会的効用、横軸は入札数、各々の折れ線は異なるエージェント数を示している。シミュレートでは入札がない状態から行うため、獲得した社会的効用は 0 から開始し推移している。全てのエージェント数では、入札数の増加により獲得効用値が指数的に増加しているのが観察できる。しかし、入札数が 40 以下の時ではほとんどのエージェント数でマッチング（合意形成）ができていないことがわかる。これは論点数が 1 つ増え、問題スケールが指数的に増加したため、少ない入札数では合意する可能性が低くなり、マッチングがうまくできていないと説明できる。

図 12 に論点数を 3 ($|I| = 3$) とした時の提案手法と全探索で効用空間を網羅的に探索する方法との比較実験の結果を示す。縦軸は獲得した社会的効用の平均値、横軸は入札数、青色のグラフが全探索、赤色が提案手法を示している。提案手法は全探索と比べ、ほとんどの入札数に関して社会的効用の差がないことが観察できる。これは、論点数が 3 の効用空間では提案手法が確実に最適解の近似解を求められていることから説明できる。

図 13 に論点数を 4 ($|I| = 4$) とした時の提案手法と全探索で効用空間を網羅的に探索する方法との比較実験の結果を示す。縦軸は獲得した社会的効用の平均値、横軸は入札

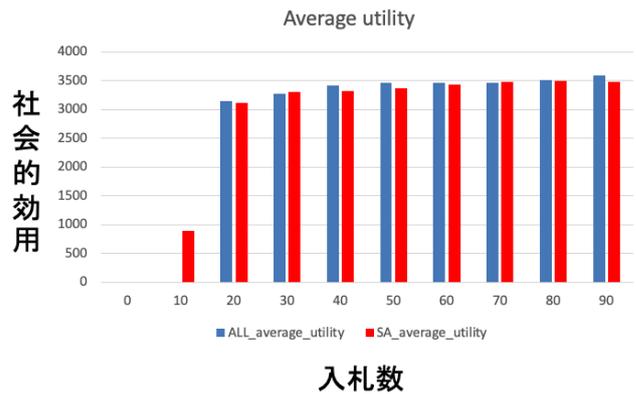


図 12 論点数 3 : 提案手法と全探索の比較結果

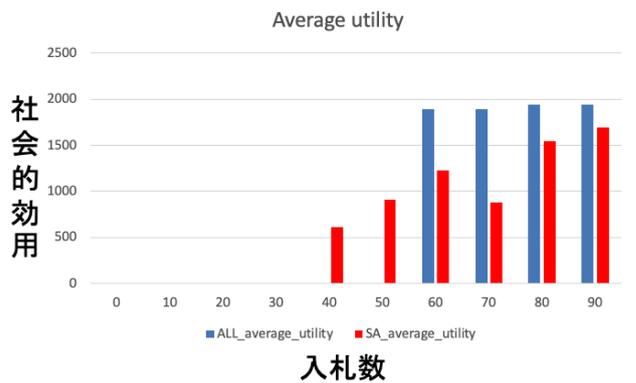


図 13 論点数 4 : 提案手法と全探索の比較結果

数、青色のグラフが全探索、赤色が提案手法を示している。入札数が 50 以下の時、全探索ではマッチングができていないことが観察できる。そして、入札数が 30 以下の時では提案手法もマッチングができていないことがわかる。論点数が 3 の時と比べ社会的効用が大幅に減り、大きい入札数では合意でき、少ない入札数では合意できていない結果となった。これは、論点数が 4 となり問題空間が 10^4 に拡大し、問題スケールが指数的に増加したため、効用空間の探索が不十分でマッチングが困難になり社会的効用が大幅に下がったことが理由である。

6. おわりに

本研究では、非線形効用関数を持つエージェントの交渉マッチング問題に着目し、多対多の交渉マッチングに対してメディエータを用いたマッチングプロトコルが社会的効用を最大化するマッチングの組み合わせを導くことを示した。本研究の問題点として、試行回数が少なく、データとして不十分である。次に、より大きい問題空間でも SA が探索可能な実装を考える必要がある。そして本研究で提案した手法では、エージェントの増加により計算量の増加も負担の 1 つとなる。本研究では、非線形効用関数を用いる事で論点間の複雑な関係を表現し、マッチング問題に対してより現実に近い問題でも最適なマッチングを得られることを示した。

本研究では、実験試行回数を10と設定し得た結果の平均を取っているため、少ない入札数ではマッチングができない結果しか得られなかった。そのため、今後の研究としては、データとして不十分な可能性があり、より多い試行回数でシミュレートする必要がある。次に、論点数が増えた場合、問題空間の次元も拡張する、その際にSAに基づいたマッチングプロトコルが全探索より計算時間が早く適している次元数を探さなければならない。本論文の実験においては、計算量が非常に多いため、合意案の探索が困難な問題を、解が存在しない問題と判断している。しかし、提案手法の利用を考えた場合は解が存在しない、もしくは合意案の探索が困難な問題において、最終的なマッチングを効率的に得るために、メタデータによる調整機能が必要である。

参考文献

- [1] 服部宏充, 伊藤孝行, and M. Klein.: 非線形効用関数を持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, J89-D, No. 12, pp.2648-2660, 2006.
- [2] 伊藤孝行.: マルチエージェントの自動交渉モデルとその応用, 知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌) Vol.22, No.3, pp.295-302, 2010.
- [3] T. Ito, H. Hattori, M. Klein.: Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces, in: Proc. of the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1347-1352, 2007.
- [4] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Multi-Issue Negotiation with Deadlines, J. Artif. Intell. Res.(JAIR), Vol.27, pp.381-417, 2006.
- [5] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Approximate and online multi-issue negotiation, in AAMAS2007, pp.159, 2007.
- [6] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: An analysis of feasible solutions for multi-issue negotiation involving nonlinear utility functions, in AAMAS2009, pp.1041-1048, 2009.
- [7] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Bargaining with incomplete information, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence 44 (3) 207-232, 2005.
- [8] P. Faratin, C. Sierra, N.R. Jennings, Negotiation decision function for autonomous agents, International Journal of Robotics and Autonomous Systems 24(3-4) 159-182, 1998.
- [9] K. Kolomvatsos, S. Hadjiefthymiades.: On the use of particle swarm optimization and Kernel density estimator in concurrent negotiations, Information Sciences, vol. 262, pp. 99-116, 2014.
- [10] Bourgeois F, Jean-Claude Lassalle.: An extension of the Munkres algorithm for the assignment problem to rectangular matrices, Communications of the ACM, Vol.14, Dec. 1971.
- [11] D. Gale, L. S. Shapley.: College Admissions and the Stability of Marriage, American Mathematical Monthly, Vol.69, pp. 9-15, 1962.
- [12] K. Kolomvatsos, S. Hadjiefthymiades.: Implicit deadline calculation for seller agent bargaining in information marketplaces, Proceedings of the 2nd International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems(CISIS 2008), Barcelona, Spain, pp. 184-190, 2008.
- [13] T. Bosse and C. M. Jonker.: Human vs. computer behaviour in multi-issue negotiation, In the Proceedings of 1st International Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiation in Multi-Agent Systems (RRS2005), 2005.
- [14] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama and Y. Bar-Yam.: Negotiating complex contracts, Group Decision and Negotiation, 12, 2, pp.58-73, 2003.
- [15] T. Ito, H. Hattori, M. Klein.: Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces, in: Proc. of the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1347-1352, 2007.
- [16] X. Luo, N. R. Jennings, N. Shadbolt, H. fung Leung and J. H. man Lee.: A fuzzy constraint based model for bilateral, multi-issue negotiations in semi-competitive environments, Journal of Artificial Intelligence, 148, pp.53-102, 2003.
- [17] Robu, V., Somefun, D. J. A., and Poutre, J. L. : Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, in AAMAS' 05, pp.280-287, 2005.
- [18] L. Niu, F. Ren, M. Zhang.: A Concurrent Multiple Negotiation Protocol Based on Colored Petri Nets. IEEE Transactions on Cybernetics, doi: 10.1109/TCYB.2577635, 2016.
- [19] E. Gerding, D. van Bragt.: Multi-issue negotiation processes by evolutionary simulation, validation and social extensions, Computational Economics 22 (1) 39-63, 2003.
- [20] D.Cheng, C. Chan, C. Lin.: Buyer-supplier negotiation by fuzzy logic based agents, 3rd International Conference on Information Technology and Applications, pp. 137-142, 2005.
- [21] J. Davin and P. J. Modi.: Impact of problem centralization in distributed constraint optimization algorithms, AAMAS05, pp.1057-1063, 2005.
- [22] T. Sandholm, S.Suri, A. Gilpin, D. Levine.: Winner determination in combinatorial auction generalizations, AAMAS02, pp.69-76, 2002.
- [23] M. Barbuceanu, W. K. Lo.: Multi-attribute utility theoretic negotiation for electronic commerce, AMEC00, pp.15-30, 2000.
- [24] J. Davin, P. J. Modi.: Impact of problem centralization in distributed constraint optimization algorithm. AAMAS05, pp.1057-1063, 2005.
- [25] L. K. Soh, X. Li.: Adaptive confidence-based multiagent negotiation strategy, AAMAS04, pp.1048-1055, 2004.