

グループに基づく交渉手法で、論点グループの探索は減少型である。“(B) Basic Bidding”は文献 9) で提案されている論点グループを作成しない手法である。“(C) Q-Factor”は文献 12) において提案されている Maximum Weight Interdependent Set (MWIS) に基づく手法である。Maximum Weight Interdependent Set (MWIS) は基本的に Basic Bidding と同様である。異なる点は、エージェントの入札生成およびメディエータの勝者決定に用いる評価値を入札が持つ効用値ではなく Q-Factor という独自の値を使用する。Q-Factor の式は $Q = u^\alpha * v^\beta$ (u : 効用値, v : 入札が持つ範囲) であり、入札が持つ評価値と合意形成のしやすさを考慮している。本実験では、 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ とパラメータを設定する。

以下は、(A)–(C) で共通して用いる、入札の生成に関するパラメータ⁹⁾ である。

- サンプル数：(論点数) × 200
- 個々のエージェントがサンプリングの際に行うシミュレーテッドアニーリングでは初期の温度を 30 とし、処理を 30 回繰り返す。
- 入札生成時の閾値：100
- 1 エージェントあたりの入札数の上限： $\sqrt[3]{6400000}$ (N : エージェント数)。本設定は文献 9) において、勝者決定において、実用的な計算時間内で解が得られる値として使用されている。本論文でも、文献 9) と同様の値を使用するものとする。

論点グループに基づく交渉プロトコルにおいて、論点グループ分割の際に用いる近傍探索手法として SA を採用する。SA では初期の温度を 30 とし、処理を 10 回繰り返す。本設定は、論点グループ分割における計算コストはたかだが C_i (i : 論点数, l : 論点グループ数) である。以上から、繰り返し回数が少なくなるように抑えている。

最適率を求める実験において、網羅的な探索を行った場合、問題がスケールアップするにつれて計算量的困難が生じる。そこで、全エージェントの効用関数をすべてメディエータに公開し、シミュレーテッドアニーリング (SA)⁸⁾ を用いた探索により、発見した解を近似最適解とする。近似最適解を求めるための SA は初期の温度を 50 度として、500 回の繰り返し処理を経て温度を 0 まで下げることとし初期解はランダムに選択する。シミュレーテッドアニーリングに基づく手法は、エージェントが効用に関する完全な情報をメディエータに公開し、集中処理による求解を行うことになる。以上から、プライバシー情報の公開についてまったく考慮しておらず、実際にエージェントが効用に関する完全な情報を公開することは非現実的な設定である。本実験では、提案プロトコルの性能評価の際に、厳密解に近似した解が必要であるために、比較対象としてのみ本手法を採用する。最適性に関する実験における比較指標として (各手法で求めた最適解)/(近似最適解) を用いる。また、すべての手法のうち

どれか1つでも合意形成に失敗した場合は考慮しない。

実験に用いたプログラムは JAVA 言語で記述し、実行環境には J2SE 1.5 を用いた。また、実験は Mac OS 10.6 が動作している iMac (Core2Duo 2.33 GHz, メモリ 1.5 GB) 上で行った。

4.2 実験結果

図7は提案手法および既存手法の合意案の最適率の比較を示している。(A-1)~(A-3)の論点グループと“(B) Basic Bidding”を比較した場合、エージェント数が4など比較的合意形成が容易な問題は同様の値を示しているが、論点数が増えると(B)の最適率が急激に減少している。(B)の急激な減少の理由は、合意形成失敗の回数が増加しているからである。特に、エージェント数6で論点5以上の場合、合意案をまったく発見できていない。一方、提案手法(A-1)~(A-3)は論点数が大きくなっても合意案を確実に発見できており、高い最適率を示している。(A-1)、(A-2)と“(C) Q-Factor”を比較した場合、(A-1)、(A-2)の方が高い最適率を示している。(A-1)、(A-2)の方が有効な理由としては複数ラウンドで論点グループ数の調整を行いながら合意形成しているからである。

“(A-1) 論点グループ (全探索)”と“(A-2) 論点グループ (増加型)”を比較した場合、エージェント数4など比較的合意案を発見しやすい問題は同様の値を示している。同様の値を示す理由としては、論点グループを形成する前に“(A-2) 論点グループ (増加型)”が合意案を発見できるからである。一方、エージェント数6など、合意案を発見しにくい状況では、“(A-1) 論点グループ (全探索)”より“(A-2) 論点グループ (増加型)”の方が低い値を示している。(A-2)が低い値になる理由は、論点グループが少ないと最適率が高いことは確実性が保証されておらず、ごくたまにグループ数が少ない場合に最適性の高い合意案を発見できるからである。しかし、近似的にはいえる論点グループが少ないと最適率が高いため、大きく最適率が減少していない。一方、“(A-3) 論点グループ (減少型)”は他の手法と比較して、最適率が低い。(A-3)の最適率の低さの理由として、論点グループ数が多い状況で合意案を発見し、論点グループ数が多い状況では最適率が低い傾向があるためである。

図8は(A-1)~(A-3)の計算時間の比較を示している。すべての場合において“(A-1) 論点グループ (全探索)”が最大の計算時間を示している。(A-1)が最大になる理由としては、すべての論点グループ数を調査する必要があるからである。一方、“(A-3) 論点グループ (減少型)”は最小の計算時間を示している。(A-3)が最小の計算時間となる理由は、計算時間が少ない多くの論点グループを作成した状態で合意案の発見が行えるからである。また、“(A-2) 論点グループ (増加型)”はエージェント数が増えるほど、急激に計算時間が増加している。

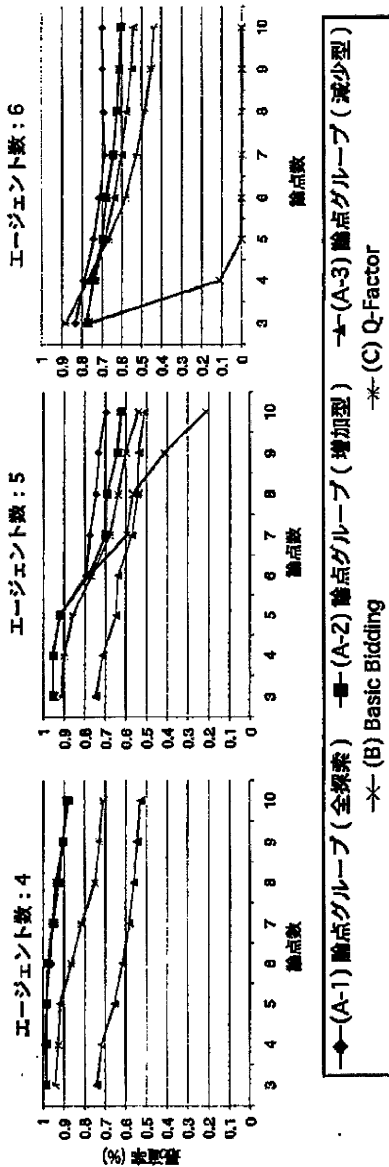


図7 最適率の比較
Fig.7 Optimality rate.

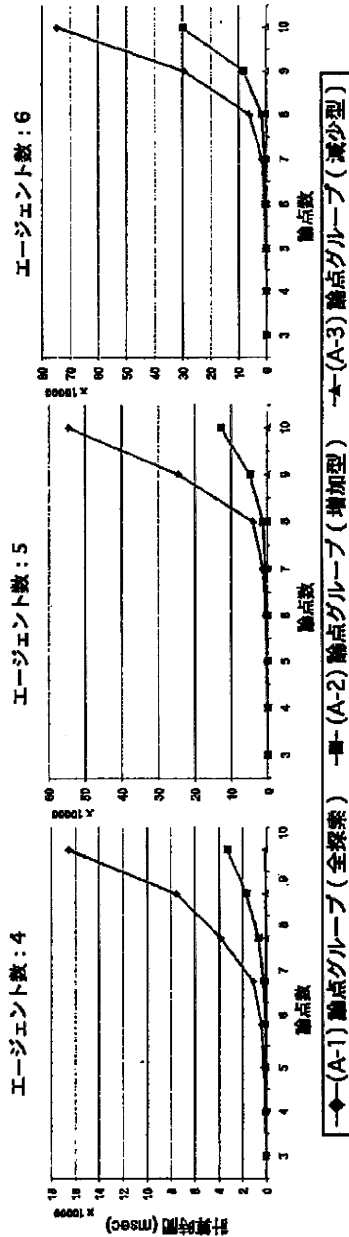


図8 計算時間の比較
Fig.8 Computational time.

この計算時間の増加の理由は、論点グループが少ない状況で合意案を発見できないため、複数ラウンドの交渉を行うためである。

最後に、3つの論点グループの調整手法に関する考察を以下に示す。

全探索型 3つの論点グループ調整手法において最も良質の合意案を発見できる。しかし、

増加型 3つの論点グループ数において計算時間、合意案の最適性の両方を兼ねた効率的な手法である。現実世界の交渉問題では、交渉問題が論点数が多くなり大規模な場合で

増加型 3つの論点グループ数において計算時間、合意案の最適性の両方を兼ねた効率的な手法である。現実世界の交渉問題では、交渉問題が論点数が多くなり大規模な場合で

も良質な合意案を発見できる可能性が高いと考えられる。特に、本論文では論点グループ数の増加量を1つまり最小量としていたが、交渉問題が大規模化すれば、増加量を調整することで合意案の質を保ちながら計算時間を削減することが可能である。

減少型 3つの論点グループ数において計算時間が最も少ない。しかし、合意案の質が低いという問題がある。現実世界での交渉問題では、論点数が多い大規模な交渉問題に対して、短時間で合意案の候補を発見する際に適用可能な手法である。

特に、増加型を用いた論点グループ数の調整手法は論点グループ数の増加量を適切に調整することで、最適性が高い合意案を短時間で発見することが期待できる。しかし、増加量の決定は現実的に困難な場合も存在する。

5. 関連研究

本研究の先行研究として効用空間の絞り込みに基づく交渉手法¹¹⁾と閾値調整交渉メカニズム¹⁵⁾が提案されている。効用空間の絞り込みに基づく交渉手法¹¹⁾において、メディエータは、クラスタ入札、最大制約入札そしてピーク入札を行うことで、ラウンドごとに合意形成を探索する範囲を絞り込みながら交渉を行っていく。この文献で提案されているメカニズムが論点数10を超える大規模な交渉問題においても実行可能であり高い解の最適性と低い合意形成失敗率であることが示されている。しかし、本研究のような論点を分割することで計算量を削減するのではなく、合意案が発見できそうな箇所を絞り込みながら複数ラウンドの合意形成を行っており、アプローチが大きく異なっている。また、閾値調整メカニズム¹⁵⁾は入札に関する閾値を調整しながら交渉を行うことで、メディエータに公開する範囲を最低限にすることに成功している。文献15)では、主にエージェントの効用情報公開の削減を目的にしており、本論文とは研究の目的が異なる。

Kleinら⁷⁾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。

Robuら^{16), 17)}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。この文献では効用が各属性のクラスタに分割できることを仮定することで、Keeneyらの理論⁶⁾を拡張している。形式化では、クラスタ C_i の大きさが1の場合(すなわち $|C_i| = 1$)は、その商品の価値を表し、クラスタ C_i の大きさが1より大きい場合(すなわち $|C_i| > 1$)は、その2つ以上の商品を買った場合のシ

ナジー効果 (synergy effect) を表し、補完財の場合は正をとり、代替財の場合は負の値になる。本効用グラフは本論文と同様に論点間の相互依存関係を考慮しているが、二者間に限定された設定になっており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

さらに、Fatima ら¹⁸⁾⁻²⁰⁾ は、時間制約がある場合の多属性交渉アルゴリズムを提案している。基本的には、Fatima らの多属性効用は、属性ごとに効用が分割できる多属性効用を用いており、属性間の依存関係は仮定していない。時間制約があり、時間がたてばたつほど、価値に対する割引 (Discount factor) が働く。文献 18) では、逐次的に属性ごとに交渉を続けることで、ナッシュ均衡が得られる戦略を導き出している。また、文献 20) では、PDP (Package Deal Procedure) という全部の属性をひとまとめにして交渉をするという方式を提案している。しかし、PDP では、均衡点を求めるのに計算量がかかりすぎるため、線形近似の方法と、並列実行をする方法を提案しており、実験で比較している。結果として、計算量に関しても、経済的な効率性に関しても、並列実行を行う方法がベターであるという結果を示している。これらの研究は主に二者間の交渉を対象にしており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

Wu ら²¹⁾ は、エージェント間のリソース配分のためのマルチエージェントによる多論点交渉アルゴリズムを提案している。彼らのフォーカスは完全情報をまず仮定しているが、時間制限を加えたうえで、パレート最適な合意案を得るためのプロトコルを理論的な証明をベースに提案している。本論文とは完全情報の公開を前提としているかに関して大きな違いがある。

Ren ら²²⁾ は、動的に状況が変化する場での多論点交渉問題を定式化し、そのための交渉プロトコルを提案している。たとえば、電子商取引の場などでは、状況が変化することによって、参加者の結果に対する期待値が変化してゆく。このため、効用空間自体にも変化が現れるため、参加者はそれにあわせて戦略を調整する必要がある。また、動的に戦略を調整しながら、望ましい解を得るための提案と逆提案に基づく交渉フレームワークを提案している。本論文は静的な場合を想定している点が文献 22) とは異なる。

Jonker ら²³⁾⁻²⁵⁾ は、不完全情報という状況でのエージェント間交渉のアーキテクチャを提案している。ここでは、相手の提案の履歴に基づいて相手のプリファレンス情報を予測するためのヒューリスティクスとして、「guessing」ヒューリスティクスを提案している。Hindriks ら²⁶⁾ は非線形効用関数を単純な効用関数へ重み付き近似を行い、合意形成の計算量を削減している。本手法は共通の知識を持っている前提を基に近似しているが本論文で提案している手法は共通の知識を持っていない場合でも計算量を削減しながら合意できる。

Liら²⁷⁾は Equal Directional Derivative Approach に基づいて、パレート最適解探索の方向を改善する手法を提案している。この文献では合意案の公平性を考慮しながら、合意案候補を調整している。この文献は2者間の複数論点交渉問題のみを対象としており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

Zhang²⁸⁾はタスク指向ドメイン (TOD) を含む交渉問題の分析を扱っている。この文献では古典的交渉解 (Nash solution, Egalitarian solution, Kalai-Smorodinsky solution) は混合戦略が存在するタスク指向ドメインでは、適用困難なことを示している。文献 28) では task-oriented domain を扱っており、効用を基本としている本論文とは交渉の前提が異なっている。

6. おわりに

本論文では、論点グループに基づく交渉手法を複数ラウンドの交渉プロトコルへ拡張を行った。特に、(1) すべての論点グループ数を調査して、合意案の最適性が一番高い場合を採用する。(2) 論点グループ数が少ない状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を増やして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。(3) 論点グループ数が多い状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を減らして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。以上の3つのアプローチをそれぞれ採用した場合における、交渉プロトコルの複数ラウンドへの拡張方法を提案した。また、シミュレーション実験を用いて、既存の手法と比較して複数ラウンドの提案手法が良解を発見できていることを示した。さらに、上記の(1)~(3)に関して、合意案の最適性および計算時間に関して比較を行った。特に、(2)の手法が合意案の最適性と計算時間の両方の観点から効率的であると考えられる。

今後の課題として、論点グループの変化量を適切に調整する機構が考えられる。また、本論文では基数的効用に基づいているが序数的効用の方が現実的な場合も存在する。今後、本論文で扱っている効用関数や交渉手法が序数的効用でも適用できるか解析する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Kraus, S.: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*, Cambridge University Press (2001).
- 2) Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N.R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-offs in Automated Negotiations. *Artificial Intelligence*, pp.142:205-237 (2002).

- 3) Soh, L.-K. and Li, X.: Adaptive, Confidence-Based Multiagent Negotiation Strategy, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems (AAMAS-2004)*, pp.1048-1055 (2004).
- 4) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Optimal Negotiation of Multiple Issues in Incomplete Information Settings, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems (AAMAS-2004)*, pp.1080-1087 (2004).
- 5) Lau, R.K.: Towards Genetically Optimised Multi-Agent Multi-Issue Negotiations, *Proc. 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-2005)* (2005).
- 6) Keeney, R.L. and Raiffa, H.: *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*, Cambridge University Press (1993).
- 7) Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Bar-Yam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *Group Decision and Negotiation*, Vol.12, No.2, pp.58-73 (2003).
- 8) Russell, S.J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall (2002).
- 9) Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces, *Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp.1347-1352 (2007).
- 10) 服部宏充, 伊藤孝行, Klein, M.: 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 D-I, Vol.J89-D, No.12, pp.2648-2660 (2006).
- 11) 服部宏充, 伊藤孝行, Klein, M.: 複数論点交渉問題のための効用空間の絞り込みに基づくマルチエージェント交渉手法, 電子情報通信学会論文誌 D-I, 「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol.J90-D, No.9, pp.2336-2348 (2007).
- 12) Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M.A., Velasco, J.R. and dela Hoz, E.: Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1057-1064 (2009).
- 13) Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M.A., Velasco, J.R., Ito, T., Fujita, K. and Klein, M.: Balancing Utility and Deal Probability for Negotiations in Highly Nonlinear Utility Spaces, *Proc. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-09)*, pp.214-219 (2009).
- 14) 藤田桂英, 伊藤孝行, Klein, M.: 複数論点交渉問題における論点グループに基づくスケーラブルな合意形成手法の提案, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.147-155 (2011).
- 15) 藤田桂英, 伊藤孝行, 服部宏充: 複数論点交渉問題におけるエージェントの効用空間の公開範囲に基づく交渉手段の実現, コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学

- 会論文誌)「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol.25, No.4, pp.167-180 (2008).
- 16) Robu, V., Somefun, D.J.A. and Poutre, J.L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, *Proc. 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2005)*, pp.280-287 (2005).
 - 17) Robu, V. and Poutre, H.L.: Retrieving the Structure of Utility Graphs Used in Multi-Item Negotiation through Collaborative Filtering of Aggregate Buyer Preferences, *Proc. 2nd International Workshop on Rational, Robust and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006)* (2006).
 - 18) 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).
 - 19) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Approximate and online multi-issue negotiation, *Proc. 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2007)*, pp.947-954 (2007).
 - 20) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: An Analysis of Feasible Solutions for Multi-Issue Negotiation Involving Nonlinear Utility Functions, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1041-1048 (2007).
 - 21) Wu, M., Weerdt, M. and Poutre, H.: Efficient Methods for Multi-agent Multi-issue Negotiation: Allocating Resources, *Proc. 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA2009)*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.97-112 (2009).
 - 22) Ren, F., Zhang, M., Miao, C. and Shen, Z.: A Market-Based Multi-Issue Negotiation Model Considering Multiple Preferences in Dynamic E-Marketplaces, *Proc. 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA2009)*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.1-16 (2009).
 - 23) Jonker, C.M. and Treur, J.: An Agent Architecture for Multi-Attribute Negotiation, *Proc. 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2001)*, pp.1195-1201 (2001).
 - 24) Jonker, C. and Robu, V.: Automated Multi-Attribute Negotiation with Efficient Use of Incomplete Preference Information, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2004)*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.1054-1061 (2004).
 - 25) Jonker, C.M., Robu, V. and Treur, J.: An agent architecture for multi-attribute negotiation using incomplete preference information, *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol.15, pp.221-252 (2007).
 - 26) Hindriks, K., Jonker, C. and Tykhonov, D.: Interdependencies between Issues for Multi-Issue Negotiation. *Cooperative Information Agents X*, Lecture Notes in Com-

- puter Science, Vol.4149, pp.301–316 (2006).
- 27) Li, M., Vo, Q.B. and Kowalczyk, R.: Searching for Fair Joint Gains in Agent-based Negotiation, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1049–1056 (2009).
- 28) Zhang, D.: Axiomatic Characterization of Task Oriented Negotiation, *Proc. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2009)*, pp.367–372 (2009).

(平成 22 年 7 月 1 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



藤田 桂英 (学生会員)

2008 年名古屋工業大学情報工学科卒業。2010 年同大学院産業戦略工学専攻博士前期課程修了。現在、同大学院情報工学専攻博士後期課程在学中。2010 年 6 月より米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management, Visiting Student。現在に至る。マルチエージェントシステムに興味を持つ。2009 年第 24 回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術学生賞) 受賞ほか。IEEE, 電子情報通信学会各学生会員。



伊藤 孝行 (正会員)

2000年名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1999年から2001年にかけて日本学術振興会特別研究員(DC2およびPD)。2000年から2001年にかけて南カリフォルニア大学 Information Sciences Institute (USC/ISI) 客員研究員。2001年北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター助教授。2003年より名古屋工業大学大学院情報工学専攻助教授。2005年から2006年にかけて米国ハーバード大学 Division of Engineering and Applied Science 客員研究員および、米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management 客員研究員。2006年より名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻准教授。2008年より米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management 客員研究員。2009年より科学技術振興機構(JST) さきがけ大挑戦型研究員。2010年より東京大学政策ビジョン研究センター客員研究員。現在に至る。2007年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。情報処理学会長尾真記念特別賞受賞。2006年 International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS2006) 最優秀論文賞受賞。2005年日本ソフトウェア科学会論文賞受賞。平成16年度IPA未踏ソフトウェア創造事業スーパークリエイター認定。第66回情報処理学会全国大会優秀賞および奨励賞受賞。マルチエージェントシステム、計算論的メカニズムデザイン、オークション理論、電子商取引支援、大学発ソフトウェアベンチャーに興味を持つ。ACM 上級会員、AAAI、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、計測制御自動学会、日本経済学会各会員。



マーク クライン

1989年イリノイ大学においてPhD取得。現在、マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院集合知研究センター常任研究員、人工知能研究所(CSAIL)およびニューイングランド複雑システム工学研究所(NECSI)所属。マルチエージェントシステム、複数論点交渉問題、協調的デザイン支援システム、ビジネスデザインの再設計、分散システムにおける緊急機能障害に関する研究を行っている。また、集合知を利用した地球温暖化に対する議論支援システムの開発にも従事している。AAAI, ACM, IEEE 各会員。

Paper:

Common Testbed Generating Tool Based on XML for Multiple Interdependent Issues Negotiation Problems

Katsuhide Fujita^{*,**}, Takayuki Ito^{*,**}, and Mark Klein^{**}

^{*}Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8555, Japan

E-mail: {fujita, ito}@itolab.mta.nitech.ac.jp

^{**}Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology

5 Cambridge Center, Cambridge 02139, USA

E-mail: {fujita, takayuki, m.klein}@mit.edu

[Received May 31, 2010; accepted September 13, 2010]

Multiple interdependent issues negotiations have been widely studied since most real-world negotiation involves multiple interdependent issues. Our work focuses on negotiation with multiple interdependent issues in which agent utility functions are nonlinear. In the field of multiple issue negotiations, there are no established common testbeds for evaluating protocols. In this paper, we propose a common testbed creating tool based on XML that mainly covers the utility functions based on cube-constraints and cone-constraints. First, we propose a testbed generating tool that inputs configuration data and outputs XML formatted files that represent agent utility spaces. The current tool can produce four types of utility spaces: Random, A Single Hill, Two-Hills, and Several Hills. These types are observed in real negotiation settings. Also we define the agent's utility space information based on XML formats. By defining the testbed data as XMLs, users can easily read the files and change the data structure.

Keywords: multi-issue negotiation, non-linear utility

1. Introduction

Multi-issue negotiation protocols represent an important field of study. While there has been a lot of previous work in this area [1, 2], most of it deals exclusively with simple negotiations involving independent multiple issues. Many real-world negotiation, however, are complex ones involving interdependent multiple issues. Thus, we focus on complex negotiation with interdependent multiple issues.

Most negotiation protocols are evaluated based on one's own testbed. For example, [3] and [4] are only evaluated on randomly generated utility spaces. However, the effectiveness of the negotiation protocols is evaluated based on the same testbed. Thus, in this paper we propose a tool that generates testbeds for evaluating multi-issue negotiation protocols by focusing on the utility function

based on cube-based constraints [5] and cone-constraints. Cone-constraints capture the intuition that agent utilities for a contract usually decrease gradually (rather than step-wise) by the distance from their ideal contract.

We propose a common testbed generating tool based on XML. The input is the configuration files that define the number of issues, the number of agents, etc. The testbed generating tool produces XML files that define the agent's utility spaces in XML format as output. This tool has four types of utility spaces: Random, A Single Hill, Two-Hills, and Several Hills. These types of utility spaces are based on actual negotiation settings.

In this paper, we define XML formats, which represent utility spaces, that consist of cone-based and cube-based constraints. By utilizing an XML format, users can easily understand, modify, and update the meaning of the data and exchange the data among research communities. In addition, our XML format does not depend on a certain environment. In this paper, we show cube-based and cone-based constraint formats that define the building blocks of utility function spaces.

We also demonstrate some examples that use our testbed. We show a JAVA program that searches for agreement contracts in agent utility spaces using Simulated Annealing (SA). In this program, the XML structure is analyzed using Document Object Model (DOM) [6], and then agreement points are searched for.

The remainder of the paper is organized as follows. First, we describe a model of nonlinear multi-issue negotiation. Second, we propose a testbed generating tool based on XML for multi interdependent issues. Third, we demonstrate examples using our testbed. Finally, we describe related works and draw a conclusion.

2. Nonlinear Utility Function

In the literature of multi-issue negotiations, we consider the situation where n agents want to reach an agreement with a mediator who manages the negotiation from the middle position. There are m issues, $s_j \in S$, to be negotiated. The number of issues represents the number of

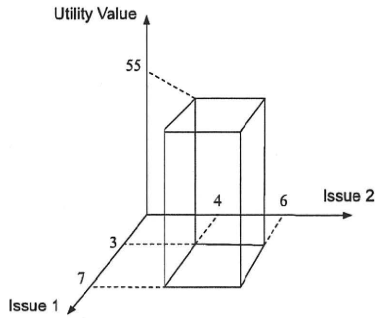


Fig. 1. Example of a cube-constraint.

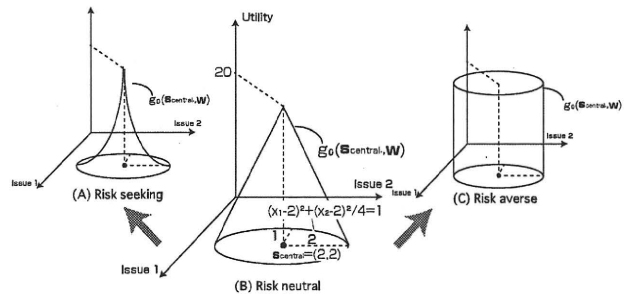


Fig. 2. Example of cone-constraints.

utility space dimensions. For example, if there are three issues, the utility space has three dimensions. The issues are not “distributed” over agents, who are all negotiating a contract with N (e.g., 10) issues in it. All agents are potentially interested in the values for all N issues. Issue s_j has a value drawn from the domain of integers $[0, X]$, i.e., $s_j \in [0, X] (1 \leq j \leq M)$. A contract is represented by a vector of issue values $\vec{s} = (s_1, \dots, s_m)$. The objective function for agreement search protocols can be described as follows:

$$\arg \max_{\vec{s}} \sum_{i \in N} u_i(\vec{s}). \dots \dots \dots (1)$$

The proposed protocols in the literature try to find contracts that maximize social welfare, i.e., the total utilities for all agents. Such contracts, by definition, will also be Pareto-optimal.

In this paper, we deal with cube-constraints and cone-constraints as the utility function. Every agent has its own, typically unique, set of constraints.

[Cube-constraints] An agent’s utility function is described in terms of constraints [5]. There are l constraints, $c_k \in C$. Each constraint represents a region with one or more dimensions and has an associated utility value. Constraint c_k has value $w_i(c_k, \vec{s})$ if and only if it is satisfied by contract $\vec{s} (1 \leq k \leq l)$. We call this type of constraint a “cube-constraint.” Fig. 1 shows an example of a binary constraint between Issues 1 and 2. This constraint, which has a value of 55, holds if the value for Issue 1 is in the range $[3, 7]$ and the value for Issue 2 is in the range $[4, 6]$.

In recent works (e.g., [7]), several types of cube-constraints were proposed. We also include a variety of cube-constraints in our testbed.

[Cone-constraints] An agent’s utility function can be described in terms of cone-constraints. By formalizing risk attitude in terms of the cone-constraints, utility function of agents captures the utility information in real world. Fig. 2 shows an example of a binary cone-constraint between Issues 1 and 2. This cone-constraint has a value of 20, which is maximum if the situation is $\vec{s}_{central} = [2, 2]$. The impact region is $\vec{w} = [1, 2]$. The expression for a segment of the base is $(x_1 - 2)^2 + (x_2 - 2)^2 / 4 = 1$.¹

1. The general expression is $\sum_{i=1}^m x_i^2 / w_i^2 = 1$

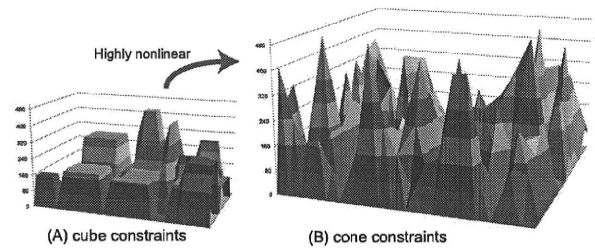


Fig. 3. Example of utility space with cone constraints.

Suppose there are l cone-constraints, $C = \{c_k | 1 \leq k \leq l\}$. Cone-constraint c_k has gradient function $g_k(\vec{s}_{central}, \vec{w})$, which is defined by two values: central value $\vec{s}_{central}$, which is the highest utility in c_k , and impact region \vec{w} , which represents the region where c_k is affected. We assume not only circle-based but also ellipse-based cones. Thus constraint c_k has value $u_i(c_k, \vec{s})$ if and only if it is satisfied by contract \vec{s} . In this paper, impact region \vec{w} is not a value but a vector. These formulas can represent utility spaces if they are in a n -dimensional space.

In addition, cone-constraints can include the risk attitude for constraints by configuring gradient function $g_k(\vec{s}_{central}, \vec{w})$. If the agent usually has a risk neutral attitude for c_k , g_k is defined as Fig. 2(B) (e.g., proportion). However, the attitudes (types) of agent can change from risk-seeking to risk-averse for making agreements. For example, if agents have a risk-seeking attitude for constraint c_k , g_k is defined as Fig. 2(A) (e.g., exponent). If an agent has a risk-averse attitude for c_k , g_k is defined as Fig. 2(C). If agents have the most risk-averse attitude for c_k , g_k stays constant. Therefore, c_k is shaped like a column if the agents have the most risk-averse attitude. In real world, there are at least two kinds of risk: 1) the risk of getting a bad deal, 2) the risk of failing to get a deal. In this paper, we assume “2) risk of failing to get a deal.”

An agent’s utility for contract \vec{s} is defined as $u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s})$, where $x(c_k)$ is a set of possible contracts (solutions) of c_k . This expression produces a “bumpy” nonlinear utility space with high points where many constraints are satisfied and lower regions where few or no constraints are satisfied.

Figure 3 shows an example of a nonlinear utility space with two issues. This utility space is highly nonlin-

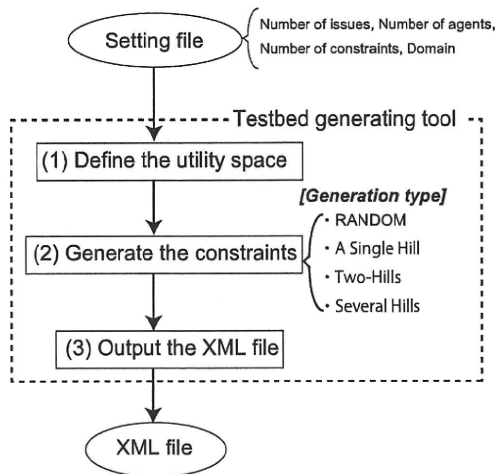


Fig. 4. Flow of testbed generating tool.

ear with many hills and valleys. [5] proposed a utility function based on “cube”-constraints. Compared with cube-constraints, highest point in the utility space is narrower. Therefore, the protocols for making agreements must search in highly nonlinear utility space. A simple simulated annealing method to directly find optimal contracts is especially insufficient in a utility function based on cone-constraints.

We assume, as is common in negotiation contexts, that agents do not share their utility functions with each other to preserve a competitive edge. Generally, in fact, agents do not completely know their desirable contracts in advance, because their own utility functions are simply too large. If we have 10 issues with 10 possible values per issue, for example, this produces a space of 10^{10} (10 billion) possible contracts, which is too many to evaluate exhaustively. Agents must thus operate in a highly uncertain environment.

3. Common Testbed Based on XML for Negotiation Protocols

3.1. Testbed Generating Tool

We have been implementing a common testbed generating tool for multi-issue negotiation protocols based on XML. The input of a testbed generating tool is a configuration file that includes the number of issues and the number of agents. The output is an XML file that defines the agents’ utility spaces. The source code for this tool is downloadable from: <http://www-itolab.mta.nitech.ac.jp/MultiIssueNegotiations>.

Figure 4 shows the program flow of our testbed generating tool. First, the utility space is defined based on the configuration file. Second, constraints are generated based on the specified type of utility spaces. Finally, an XML file is outputted. The details of the testbed generating tool are shown as follows:

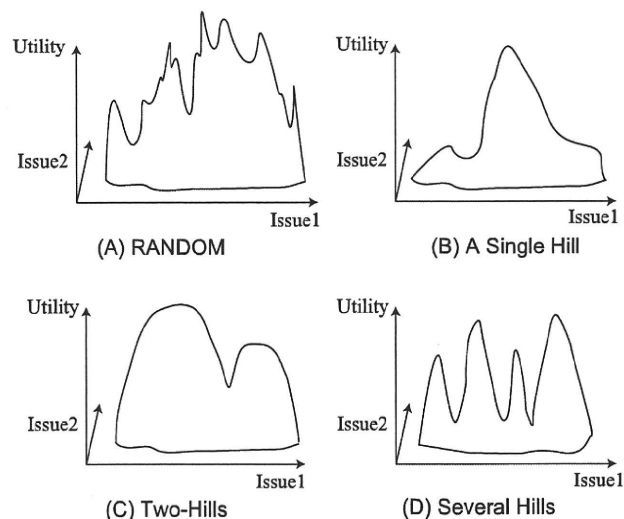


Fig. 5. Generation type.

(1) Defining utility space: The testbed generating tool defines the utility space information based on the configuration file. The configuration file includes the number of issues, agents, and constraints as well as the value domain per issue. Constraints are classified by the number of related constraints. For example, a unary constraint is related to one issue, a binary constraint is related to two issues, etc. In the configuration file, we write the number of constraints for each related constraint like “unary constraints include 10, binary constraints include 5, etc.”

(2) Generating utility spaces: In the current implementation, the testbed generating tool generates utility spaces based on four different types of utility spaces: Random, A Single Hill, Two Hills, and Several Hills. Statements about the details of each type are shown as follows.

Random: in this type, constraints are generated randomly. Such generation is used in the experiments in several works [5]. Fig. 5 shows an example of utility space plotted by all statements as agent constraints. This utility space plotted is highly nonlinear, as Fig. 5(A) shows.

A Single Hill: an example of this type is a collaborative negotiation among the same type of agents. The utility space plotted by all agents has one higher point, as Fig. 5(B) shows. In such utility spaces, reaching an agreement is usually easy.

Two Hills: an example of this type is a bilateral negotiation between two types of agents. In particular, such negotiation between buyers and sellers is popular. The utility space plotted by all agents has two higher points, as Fig. 5(C) shows. In such utility spaces, making agreements is hard because the agents are likely in a hostile relation.

Several Hills: an example of this type is collaborative negotiation among more than three other types of agents. Collaborative design for a car among designers, engineers, and business managers is a concrete example. The utility space plotted by all agents’ constraints has more

```

<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS" standalone="no"?>
<UtilitySpace>
<Dimension>4</Dimension>
<Domain>0-9</Domain>
<Agent no=0 name="Alice">
<ReservationValue>11</ReservationValue>
<Constraint no=0 name="0">
<Cardinality>2</Cardinality>
<Utility>69</Utility>
<Minimum>
<Issue no=2 name="size"> 4 </Issue>
</Minimum>
<Maximum>
<Issue no=2 name="size"> 8 </Issue>
</Maximum>
</Constraint>
...
</Constraint>
</Agent>
</UtilitySpace>
<Agent no=1 name="Bob">
<ReservationValue>15</ReservationValue>
<Constraint no=0 name="0">
<Cardinality>1</Cardinality>
...
</Constraint>
</Agent>
</UtilitySpace>
    
```

Fig. 6. Example XML for cube-constraints.

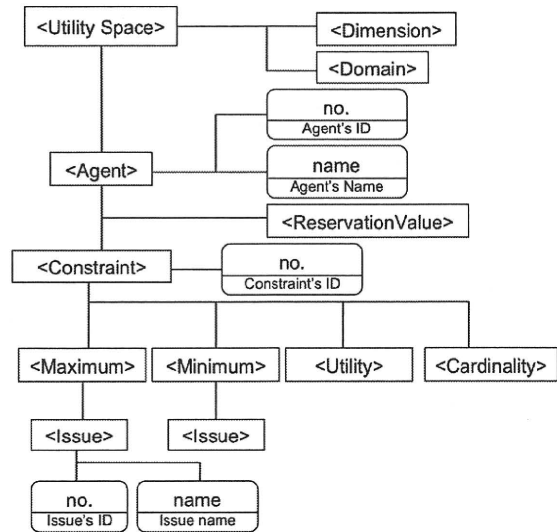


Fig. 7. Tree-structured XML chart for cube-constraints.

than three higher points, as Fig. 5(D) shows. In such utility spaces, finding agreement points is hard because there are too many hills. Thus search algorithms usually try to find the highest points.

(3) **Output XML file:** The testbed generating tool outputs the XML file on the testbed for negotiation. By outputting these files, users can easily understand the information. Additionally, users can modify, change, and update the data, and XML data are not dependent on a certain environment. Users like research communities can also easily exchange data with each other. The details of the XML formats are described in the next subsection.

3.2. XML Format for Testbeds

We propose the XML format for expressing the agent's utility function. In XML, this information is defined by tags. The specification of XML formats in cube-constraints and cone-constraints is described as follows.

XML format for cube-constraints: Fig. 6 shows an example of the XML format for cube-constraints. Fig. 7 shows a tree-structured chart for cube-constraints. The tree-structured chart enables us to understand the parent-child relation between elements. A detailed description of the elements is described as follows.

<UtilitySpace>: UtilitySpace element shows the specification information about the entire utility space. This element has the subelements of "Dimension," "ValueNumber," and "Agent."

<Dimension>: This element specifies the number of issues. In Fig. 6, the number of issues is four.

<Domain>: This element specifies the value domain for each issue. In Fig. 6, the domain of all issues is 0.9.

<Agent>: This element, which specifies the agents, has attributes of agent's ID and name. In Fig. 6, the agent's ID is 0 and its name is Alice. There could be multiple agent

elements in UtilitySpace element. This element has the subelements of ReservationValue and many Constraint elements.

<ReservationValue>: This element specifies the reservation utility value for determining whether to "agree" or "disagree" with the contract alternatives in a negotiation. In Fig. 6, the reservation value is 21.

<Constraint>: This element, which defines the constraints, has the ID of the constraint as an attribute. This element has the subelements of Issue, Utility, and Cardinality. In Fig. 6, the ID of the constraints is 0.

<Minimum>: This element defines the possible minimum values for each issue. In Fig. 6, the possible minimum value of Issue 2 is 4. This means that the value for the issue should have more than 4.

<Maximum>: This element defines the possible maximum values for each issue. In Fig. 6, the possible maximum value of Issue 2 is 8. This means that the value for the issue should have less than 8.

<Utility>: This element defines the utility value in this constraint. The constraints have this utility value if the value for each issue is in the range defined by Issue elements. In Fig. 6, constraint 0 has a value of 69, and it holds if the value for Issue 1 is 0, the value for issue 2 is 8, the value for Issue 3 is in the range [4, 8], and the value for Issue 4 is 4.

<Cardinality>: This element shows the number of issues related to this constraint. In Fig. 6, the cardinality is one. This is because this constraint is related to issue 2. In other words, this constraint is constrained by a issues. In our definition, the contract has a value if only the issues related to the constraints satisfy the possible values. In other words, all values are permitted in other issues not related to the constraint.

XML formats for cone-constraints: Fig. 8 shows an example of an XML for cone-constraints. Fig. 9 shows a

```

<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS" standalone="no"?>
<UtilitySpace>
<Dimension>5</Dimension>
<Domain>0-10</Domain>
<Agent name="Alice" no="0">
<ReservationValue>21</ReservationValue>
<Constraint no="0">
<Cardinality>1</Cardinality>
<MaxUtility>122</MaxUtility>
<RiskAttitude>1</RiskAttitude>
<CenterPoint>
<Issue name="4" no="4"></Issue>
</CenterPoint>
<Width>
<Issue name="4" no="4">2</Issue>
</Width>
</Constraint>
<Constraint no="1">
<Cardinality>1</Cardinality>
...
</Constraint>
</Agent>
</UtilitySpace>
    
```

Fig. 8. Cone-constraints XML.

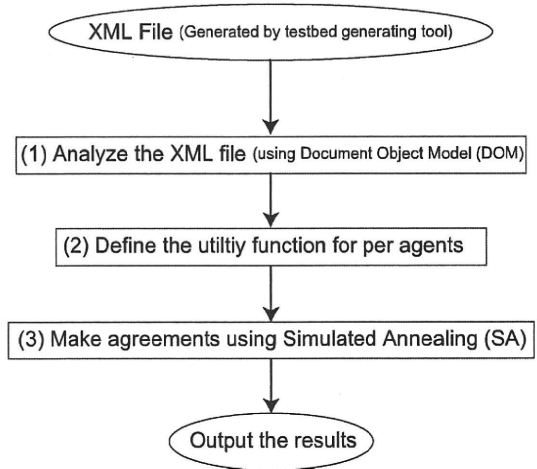


Fig. 10. Program flow using testbeds.

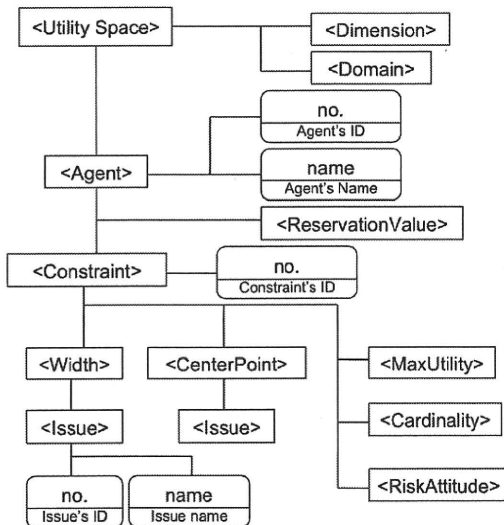


Fig. 9. Tree-structured chart for cone-constraints XML.

tree-structured chart for cone-constraints. The XML elements in the “UtilitySpace” and “Agents” elements are almost the same as the XML elements for cube-constraints. A detailed description of the elements in the cone-based constraints is described as follows.

<MaxUtility>: This element shows the central value, which is the highest utility in the constraint. In Fig. 8, the central value is 122, which is the maximum utility in the constraint.

<RiskAttitude>: This element shows a gradient function that represents the risk attitude for making agreements. In our testbed generating tool, we defined a gradient function for each number. For example, one is defined that a gradient function constant is constant. In Fig. 8, the risk attitude for making agreements is one. Future work includes an extension that enables users to simply define the gradient function.

<Width>: This element shows the impact region, which

represents the region affected by the constraint. The impact region is defined in each Issue element. In Fig. 8, the impact region in Issue 4 is two.

<CenterPoint>: This element shows the central point, where the utility is maximum. In the CenterPoint element, the central point is defined by Issue elements. In Fig. 8, the central point is 0 in Issue 4 and all values are permitted in other issues (Issues 0–3).

4. Java Program Using the Testbed

In this subsection, we describe the Java program using the testbeds proposed in the previous section. Our code was implemented in Java 2 (1.5). The program source codes are downloadable from: <http://www-itolab.mta.nitech.ac.jp/MultiIssueNegotiations/>.

Figure 10 shows the flow of the JAVA program using testbeds. This program inputs XML files generated by the tool. The following are the details of this program behavior:

Analyzing XML files: in this program, an XML file is analyzed by a Document Object Model (DOM) [6], which is a platform and a language-independent standard object model for representing HTML or XML documents as well as an Application Programming Interface (API) for querying, traversing, and manipulating such documents. The information of the structure of the utility space and the agent’s utility function are read from XML files.

Defining the utility function for each agent: the structure of the utility space and the agent’s utility function are defined based on the XML analyzed in the previous step.

Searching agreements using SA: in this program, we provide a simple agreement algorithm that gathers and aggregates all individual agent’s utility spaces into one central place and then finds the most optimal contract using Simulated Annealing (SA) [8]. In simulated annealing, the mediator moves randomly if the temperature is high, but he/she moves to the highest neighbor if the temper-

ature is low. A simulated-annealing method of making agreements was employed in previous works [5] because this search method is superior to other search methods, such as hill climbing search in multi interdependent issue negotiation.

In future work, we will generate this program using other programming languages such as C++, Ruby, Python, and Perl so that this testbed can be used by many users.

5. Related Works

As far as the authors know, this is the first attempt to create a testbed for multiple interdependent issue negotiation protocols. The following is a literature review of multi-issue negotiation problems. All of these protocols are evaluated on the original testbed. Our testbed might provide opportunities to compare these algorithms based on the same criteria.

Most previous work on multi-issue negotiation ([1, 2, 9]) has only addressed linear utilities. Some researchers have been focusing on more complex and nonlinear utilities. [10] explored a range of protocols based on mutation and selection on binary contracts. This paper does not describe what kind of utility function is used, nor does it present any experimental analyses, so it remains unclear whether this strategy enables sufficient exploration of utility space. [11] presents an approach based on constraint relaxation. [12] presented a protocol that was applied with near-optimal results on medium-sized bilateral negotiations with binary dependencies. The work presented here is distinguished by demonstrating both scalability and high optimality values for multilateral negotiations and higher order dependencies. [13] and [14] also presented a protocol for multi-issue problems for bilateral negotiations. [15] and [16] presented a multi-item and multi-issue negotiation protocol for bilateral negotiations in electronic commerce situations.

[17] proposed bilateral multi-issue negotiations with time constraints, and [18] proposed multi-issue negotiations that employ a third party to act as a mediator to guide agents toward equitable solutions. This framework also employs an agenda that serves as a schedule for the ordering of issue negotiations. Agendas are very interesting because agents only need to focus on a few issues. [19] proposed a checking procedure to mitigate this risk and showed that by tuning this procedure's parameters, outcome deviation can be controlled. These studies reflect interesting viewpoints, but they focused on just bilateral trading or negotiations.

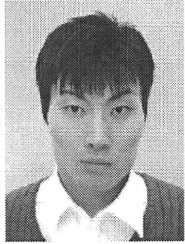
6. Conclusion

In this paper, we proposed a testbed generating tool based on XML for multi-issue negotiation. Our tool provides a common testbed to evaluate the effectiveness of multi-issue negotiation protocols. Moreover, users can

easily understand the meaning of data because it is based on a simple XML format. In this testbed, four types of utility spaces were provided that corresponded to real negotiation cases. Finally, we demonstrated examples of experiments using our testbed in which we analyzed the differences among types of utility spaces.

References:

- [1] T. Bosse and C. M. Jonker, "Human vs. Computer Behaviour in Multi-Issue Negotiation," In Proc. of 1st Int. 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 Trade-offs in Automated Negotiations," In *Artificial Intelligence*, Vol.142, pp. 205-237, 2002.
- [3] K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "Preliminary Result on Secure Protocols for Multiple Issue Negotiation Problems," In Proc. of The 11th Pacific Rim Int. Conf. on Multi-Agents (PRIMA-2008), 2008.
- [4] K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "A representative-based multi-round protocol for multi-issue negotiations," In Proc. of The 7th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2008), 2008.
- [5] T. Ito, H. Hattori, and M. Klein, "Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces," In Proc. of 20th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007), pp. 1347-1352, 2007.
- [6] W3C. "Document Object Model (DOM) Technical Reports." <http://www.w3.org/DOM/DOMTR>
- [7] J. R. V. I. Marsa-Maestre, M. A. Lopez-Carmona, and E. d. I. Hoz, "Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios," In Proc. of The 8th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009), 2009.
- [8] S. J. Russell and P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach," Prentice Hall, 2002.
- [9] S. S. Fatima, M. Wooldridge, and N. R. Jennings, "Optimal Negotiation of Multiple Issues in Incomplete Information Settings," In Proc. of Third Int. Joint Conf. on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems, (AAMAS-2004), pp. 1080-1087, 2004.
- [10] R. J. Lin and S. T. Chou, "Bilateral Multi-Issue Negotiations in a Dynamic Environment," In Proc. of AMEC-2003, 2003.
- [11] M. Barbuceanu and W.-K. Lo, "Multi-attribute Utility Theoretic Negotiation for Electronic Commerce," In Proc. of AMEC-2000, pp. 15-30, 2000.
- [12] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama, and Y. Bar-Yam, "Negotiating Complex Contracts," *Group Decision and Negotiation*, Vol.12, No.2, pp. 58-73, 2003.
- [13] G. Lai, C. Li, and K. Sycara, "A general model for pareto optimal multi-attribute negotiations," In Proc. of The 2nd Int. Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006), 2006.
- [14] G. Lai, K. Sycara, and C. Li, "A decentralized model for multi-attribute negotiations with incomplete information and general utility functions," In Proc. of The 2nd Int. Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006), 2006.
- [15] V. Robu, D. J. A. Somefun, and J. L. Poutre, "Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs," In Proc. of the 4th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2005), 2005.
- [16] V. Robu and H. L. Poutre, "Retrieving the Structure of Utility Graphs Used in Multi-Item Negotiation through Collaborative Filtering of Aggregate Buyer Preferences," In Proc. of The 2nd Int. Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006), 2006.
- [17] S. S. Fatima, M. Wooldridge, and N. R. Jennings, "Approximate and online multi-issue negotiation," In Proc. of th 6th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2007), pp. 947-954, 2007.
- [18] J. Shew and K. Larson, "The Blind Leading the Blind: A Third-Party Model for Bilateral Multi-issue Negotiations under Incomplete Information," In Proc. of The 1st Int. Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN-2008), 2008.
- [19] K. Hindriks, C. Jonker, and D. Tykhonov, "Avoiding Approximation Errors in Multi-Issue Negotiation with Issue Dependencies," In Proc. of The 1st Int. Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN-2008), 2008.



Name:
Katsuhide Fujita

Affiliation:
Nagoya Institute of Technology
Massachusetts Institute of Technology

Address:

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8555, Japan

Brief Biographical History:

2008 Bachelor's degree of Engineering from the Nagoya Institute of Technology
2010 Master of Engineering from the Nagoya Institute of Technology
2010- Visiting Student at Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology

Main Works:

- K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "Secure and efficient protocols for multiple interdependent issues negotiation," J. of Intelligent and Fuzzy Systems Vol.21, No.3, pp. 175-185, 2010.
- K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "A Secure and Fair Protocol that Addresses Weaknesses of the Nash Bargaining Solution in Nonlinear Negotiation," Group Decision and Negotiation, Springer, 10.1007/s10726-010-9194-6, 2010.

Membership in Academic Societies:

- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Information Processing Society of Japan (IPSI)
- The Institute of Electronics, Information, and Communicate Engineering (IEICE)
- The Japanese Society for Artificial Intelligence (JSAI)



Name:
Takayuki Ito

Affiliation:
Nagoya Institute of Technology
Massachusetts Institute of Technology

Address:

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8555, Japan

Brief Biographical History:

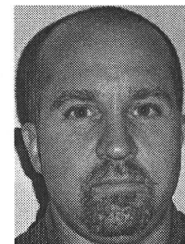
1995 B.E. of Engineering from the Nagoya Institute of Technology
1997 M.E of Engineering from the Nagoya Institute of Technology
2000 Doctor of Engineering from the Nagoya Institute of Technology
2000-2001 Visiting Researcher, USC/ISI
2001-2003 Associate Professor, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)
2003- Associate Professor, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
2005-2006 Visiting Researcher, Division of Engineering and Applied Science, Harvard University
2005-2006 Visiting Researcher, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology
2008-2009 Visiting Researcher, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology

Main Works:

- K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "A Secure and Fair Protocol that Addresses Weaknesses of the Nash Bargaining Solution in Nonlinear Negotiation," Group Decision and Negotiation, Springer, 10.1007/s10726-010-9194-6, 2010.

Membership in Academic Societies:

- The Association for Computing Machinery (ACM)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI)
- Information Processing Society of Japan (IPSI)
- The Institute of Electronics, Information, and Communicate Engineering (IEICE)
- The Japanese Society for Artificial Intelligence (JSAI)



Name:
Mark Klein

Affiliation:
Massachusetts Institute of Technology

Address:

5 Cambridge Center, NE25-754, Cambridge, MA 02139, USA

Brief Biographical History:

1989 Ph.D. in Computer Science, University of Illinois
1995- Research Faculty, the Applied Research Lab Information Systems Department, Pennsylvania State University
1997- Research Associate, the MIT Sloan School of Management
2000- Principal Research Scientist, the MIT Sloan School of Management

Main Works:

- M. Klein, P. Faratin, H. Sayama, and Y. Bar-Yam, "Negotiating Complex Contracts," Group Decision and Negotiation J., Vol.12, No.2, 2003.
- K. Fujita, T. Ito, and M. Klein, "A Secure and Fair Protocol that Addresses Weaknesses of the Nash Bargaining Solution in Nonlinear Negotiation," Group Decision and Negotiation, Springer, 10.1007/s10726-010-9194-6, 2010.

Membership in Academic Societies:

- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- The Association for Computing Machinery (ACM)
- Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI)

複数論点交渉問題における論点グループに基づくスケーラブルな合意形成手法の提案

Scalable and Efficient Protocols by Grouping Issues in Multiple Interdependent-Issue Negotiations

藤田 桂英
Katsuhide Fujita

名古屋工業大学大学院情報工学専攻*1
Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology*2
fujita@itolab.mta.nitech.ac.jp

伊藤 孝行
Takayuki Ito

名古屋工業大学大学院, 産業戦略工学専攻, 情報工学科*3
School of Techno-Business Administration/Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology*4
ito.takayuki@nitech.ac.jp

Mark Klein

マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院
Center for Collective Intelligence MIT Sloan School of Management
m.klein@mit.edu

keywords: Multi-issue negotiation, Interdependent issues, Non-linear utility function

Summary

Most real-world negotiation involves multiple interdependent issues, which create agent utility functions that are nonlinear. Our research focuses on developing algorithms that enable this kind of negotiation. We present a novel bidding-based negotiation protocol that addresses the excessively high failure rates that existing approaches face when applied to highly complex nonlinear utility functions. This protocol works by using issue dependency information as follows. First, agents generate an interdependency graph by analyzing the agent's constraints. Second, a mediator identifies issue-groups based on the agents' interdependency graphs. Third, agents generate bids that are divided into these issue-groups. Finally, the mediator identifies the winning contract by finding the best combinations of bids in each issue-group. In this paper, we demonstrate that our proposed protocol is highly scalable when compared to previous efforts in a more realistic experimental setting.

1. はじめに

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なってきた。特に、電子商取引などの分野において、自動交渉の枠組みやメカニズムを開発することで、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。しかし、エージェント同士の交渉において現実的な効用モデル提案、プライバシーの公開に対する危険性、合意を求める際の計算量爆発など現実の人間同士の交渉とは異なる問題が多数存在する。

マルチエージェントにおける複数論点交渉問題に関して多数の既存研究が存在している ([Faratin 02] 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、線形の効用関数に限定されている。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。本論文では各論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題を対象とする。各論点が相互依存関係にある場合、各エージェントの効用関数は非線形の効用関数で表現される。また、各論点に独立性が仮定された交渉問題において社会的効用最大な合意案を発見できる手法でも、各論点が相互依存関係にある場合には必ずしも社会的効用最大な合意案を発見できないことが示されている [Klein 03]。

各論点が相互依存関係の場合に対応可能な手法として入札に基づく交渉手法が提案されている [Ito 07, 服部 06]。入札に基づく交渉手法はエージェントの選好情報を過剰に開示することなく、個々のエージェントが個人効用の最適化を試み、かつ社会的にも効用の高い合意を得ることが可能である。しかし、エージェント数や論点数に関するスケーラビリティが低く、計算量を減らすことが重要な課題

*1 マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院

*2 Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology (MIT)

*3 東京大学政策ビジョン研究センター/ 日本科学技術振興事業団 (JST) さきがけ研究員

*4 Todai Policy Alternatives Research Institute/ PREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

の一つとなっている [服部 07, Marsa-Maestre 09b, Fujita 08].

本論文では、各論点の相互依存度に基づき論点グループを決定し、論点グループごとに合意形成を行なう手法を提案する。論点グループに基づく交渉手法では、まず、エージェントはすべての制約情報を調査し、正確な相互依存関係グラフを生成する。次に、メディエータはエージェントの相互依存関係グラフに基づいて存在する相互依存度が最大になるように、論点グループを決定する。その後、エージェントはグループごとに入札を生成し、それぞれの入札に評価値を設定する。本論文ではグループごとの論点がりうる最大の値を評価値として設定する。さいごに、メディエータは入札情報をもとに組み合わせ最適解を求め、最終的にグループごとに生成された合意案を統合して最終合意案を求める。

本論文で提案する論点グループに基づく交渉手法は既存の手法と比較して高いスケーラビリティがある。また、最適率を最適解と各手法で得られる解の効用値の差と定義した場合、合意案に対して高い最適率を保つことが可能である。本論文ではシミュレーション実験を用いて既存の手法と合意案の最適率とスケーラビリティを比較する。論点グループに基づく交渉手法は論点間の相互依存度と論点間の相互依存関係の存在が指数分布になる場合に、より適切な合意案を発見することが可能である。

本論文の構成を以下に示す。まず、2 章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。3 章では交渉における論点間の相互依存関係と依存関係抽出機構に関して述べる。4 章では論点グループに関する交渉プロトコルを提案する。5 章において評価実験の結果を示す。最後に、6 章において関連研究について示し、7 章に本論文のまとめを示す。

2. 論点に依存関係が存在する交渉問題

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。個々の論点を $i_j \in I$ と表し、論点が $|I|$ 個存在する。論点 i_j は $[0, X]$ の範囲の整数を値として持つ ($1 \leq j \leq |I|$)。交渉の結果得られる合意案は、各論点の値のベクトル $\vec{s} = (s_1, \dots, s_{|I|})$ と表現される。

エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。個々の制約は $c_k \in C$ と表し、 $|C|$ 個の制約が存在する ($1 \leq k \leq |C|$)。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。制約充足条件が存在しない場合は \emptyset となる。エージェントは制約 c_k に対して、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。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。

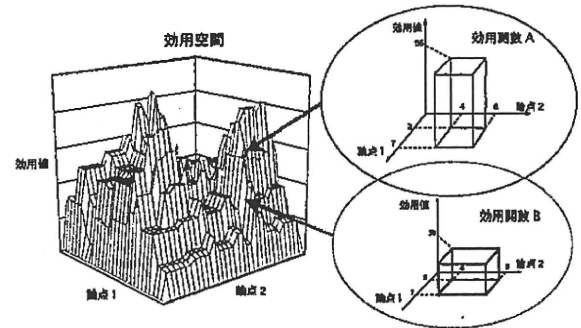


図 1 効用関数と効用空間の例

合意 \vec{s} に関するエージェント n の効用を $u_n(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s})$ 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、各論点がりう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。これにより、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图示したものである。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。現実世界の問題における非線形の効用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。

各論点相互依存関係がない場合、線形の関数として表現可能であるが、各論点相互依存関係の場合、非線形の関数として表現される。各論点相互依存関係が独立した場合しか考えてない既存プロトコルは、単純な線形計画問題となるため社会的効用最大な合意案を得やすい。一方、効用空間に不規則な凹凸が存在する非線形の効用関数では線形計画問題とならないため、既存のプロトコルを適用して社会的効用最大な合意案を得るのは困難である。また、各論点相互依存関係が独立している交渉問題では、個々の論点に関する単一最適化を行い社会的効用を求めれば社会的効用最大な合意案を得られるが、各論点相互依存の交渉問題では多目的最適化を行う必要がある。したがって、各論点相互依存関係が独立している場合に有効な既存の手法を適用して社会的効用最大な合意案を得ることが困難である。

本論文で提案する交渉プロトコルの目的関数は、以下