

# 非線形効用空間における頻度モデルに基づく パレート優位な合意案候補の探索

Searching for Pareto Efficient Agreement Candidates  
based on Frequency Model in Nonlinear Utility Space

森 顕之\*<sup>1</sup> 伊藤 孝行\*<sup>2</sup>  
Akiyuki MORI Takayuki ITO

\*<sup>1</sup>名古屋工業大学 工学部 情報工学科

Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

\*<sup>2</sup>名古屋工業大学 産業戦略工学専攻/情報工学科

Master of Techno-Business Administration / Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

Bilateral multi-issue closed bargaining problems containing nonlinear utility spaces are critical in the research field of automated negotiating agents. To search for high quality agreement candidates is difficult in nonlinear utility spaces because nonlinear utility function have dependent relations between issues. In this paper, we propose a searching method that is based on simulated annealing and opponent's bid frequency. Furthermore, we show the evaluation results of simulations and we indicate that the proposed method can get high quality agreement candidates within a practical time.

## 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いる。自動交渉エージェントは数値化した選好情報をもとに、人間の代理として交渉を行うことを目的としている。自動交渉エージェント技術の応用としては、電子商取引システム [1] やスケジューリングシステム [2] への導入による自動化が挙げられる。交渉エージェントによる自動交渉の研究分野においては、互いに相手の選好情報が明らかでないような二者間複数論点交渉問題 (Bilateral Multi-issue Closed Negotiation Problem: BMCNP) が重要な研究課題である。近年では BMCNP の中でも、論点間に依存関係が存在する効用関数 (非線形効用関数) を持つ交渉者を含むような複雑な交渉問題も研究対象となっている。

交渉において、交渉者は合意案候補を交渉相手に提示する必要がある。しかし、交渉者の効用関数が非線形である場合には評価対象となる合意案候補数が膨大となるため、実用的な計算量で適当な合意案候補を探索する手法が必要となる。また、交渉において合意形成のためには、相手に提案する合意案候補は可能な限りパレート優位であることが望ましい。したがって、非公開である相手の効用関数を推定し、パレート改善を行うことが重要となる。

本論文では非線形交渉問題において、メタヒューリスティックアルゴリズムにパレート改善手法を併用する探索手法を提案する。本論文では、メタヒューリスティックアルゴリズムの一つである焼きなまし法 (Simulated Annealing: SA) [3] を用いて、非線形効用関数から実用的な時間内に任意の効用値をもつ合意案候補を探索する。また、相手の提案履歴に基づく近傍探索と頻度モデルに基づく頻度置換を併用することによって、交渉相手に提案する合意案候補のパレート改善を行う。

本論文の構成を述べる。2章では非線形効用関数の定義とその特徴について述べる。次に、3章では提案手法である SA と

パレート改善手法を併用する探索手法について述べる。また、4章では評価実験として自動交渉エージェントの国際競技会である Automated Negotiating Agents Competition (ANAC) [4] で実際に用いられた非線形交渉問題に対して提案する探索手法を適用し、その結果を示す。そして、5章に本論文のまとめと今後の課題を示す。

## 2. 非線形効用関数を含む交渉問題

効用関数とは合意案によって交渉者が得ることができる効用値を定義した関数である。BMCNP では互いに相手の効用関数が未知の状況下での交渉を想定している。相手の効用関数が未知の状況下での交渉を想定するのは、現実の交渉問題においてはプライバシーの観点から互いに交渉相手に自身の真の効用を知られることが好ましくないためである。本論文では既存研究で提案されている制約 (Constraint) に基づく効用関数を採用する [5]。効用を定義する  $l$  個の制約をもつ制約集合を  $C$ 、個々の制約を  $c_k (c_k \in C, \text{ただし}, k = 1, 2, \dots, l)$  と表す。制約は単一、もしくは複数の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。交渉者は個々にユニークな制約集合を持つ。制約  $c_k$  は合意案候補  $\vec{s}$  によって充足される場合のみ、交渉者は効用関数  $w(c_k, \vec{s})$  によって効用値を得ることができる。

制約  $c_k$  を充足可能な合意案の集合を  $S(c_k)$ 、制約  $c_k$  に対する標準化係数を  $\beta_k$  としたとき、 $[0, 1]$  で正規化された効用関数  $U(\vec{s})$  は式 (1) で定義される。

$$U(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in S(c_k)} \beta_k \cdot w(c_k, \vec{s}) \quad (1)$$

本論文では論点間が独立している効用関数を線形効用関数、論点間に依存関係をもつ効用関数を非線形効用関数と表現する。複数論点交渉問題では効用関数における論点間の独立性によって効用空間の形状が変化する。本論文における効用空間とは、各論点が取り得る値の全ての組合せについて効用関数によって得ることができる効用値をプロットして得ることができるグラフを意味する。効用空間では効用値の大きな合意案候補

連絡先: 森 顕之, 名古屋工業大学 工学部 情報工学科, mori.akiyuki@itolab.nitech.ac.jp, 伊藤 孝行 名古屋工業大学 産業戦略工学専攻/情報工学科, ito.takayuki@nittech.ac.jp

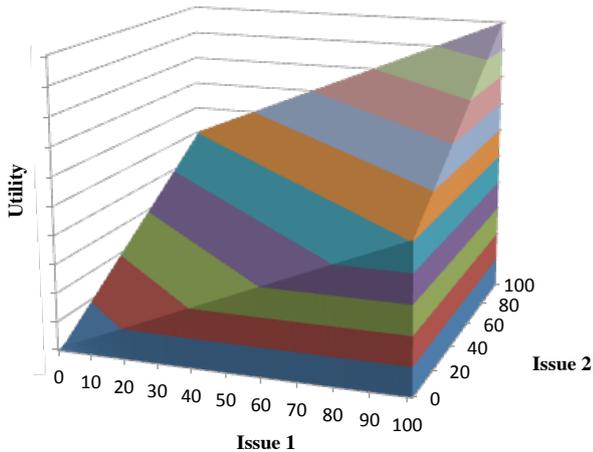


図 1: 線形効用空間の例

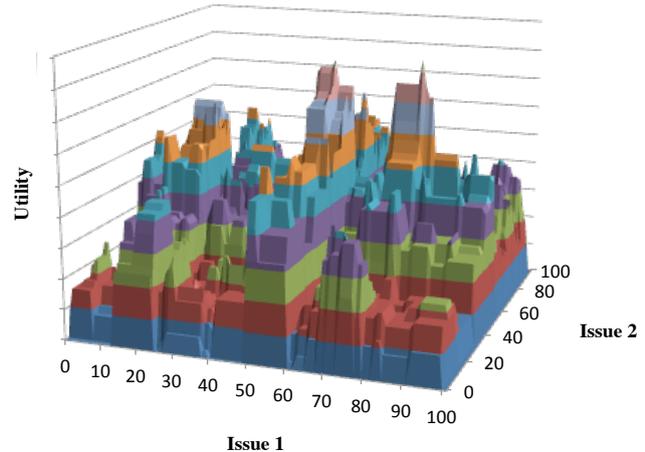


図 2: 非線形効用空間の例

が高くなり、小さな合意案候補が低くなることで空間内に高低が生じる。図 1 は線形効用空間、図 2 は非線形効用空間の例である。本例では各々が  $[0,99]$  の値域を持つ 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されている。図 1 の線形効用空間を描画する線形効用関数は 200 個の単項制約 (1 つの論点にしか関係しない制約) をもつ。また、図 2 の非線形効用空間を描画する非線形効用関数は単項制約を 50 個、二項制約 (2 つの論点に関係する制約) を 100 個もつ。論点間が独立した単項制約のみをもつ線形効用空間と比べて、論点間に依存関係をもつ二項制約のような制約を含む非線形効用空間の形状は図 2 のように山と谷が入り組んだ複雑なものになる。線形効用空間であれば、合意案候補の効用値は個々の論点に関する効用値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って交渉者は適当な合意案候補を実用的な計算量で得ることができる。しかし、不規則な凹凸が存在する非線形効用空間では、交渉者は線形交渉問題と同様の手法で適当な合意案候補を得ることは計算量的に困難である。本論文では、計算量的な問題を解決するために大域的最適化問題への汎用アルゴリズムである SA によって合意案候補を探索する。

また、合意案候補の探索においては、計算量的な問題とは別のパレート効率性の問題が存在する。パレート効率性は資源配分に関する概念であり、二者交渉問題においては一方の交渉者の効用を小さくしなければ、もう一方の交渉者の効用を高めることができないような状態をパレート最適であると呼ぶ。交渉問題では合意形成のために、交渉相手に提案する合意案候補は可能な限りパレート優位であることが望ましい。しかし、BMCNP では前提として交渉者は交渉相手の効用関数を参照できないため、交渉参加者の効用関数から直接的にパレート最適な合意案候補を導出することはできない。したがって、交渉者は相手の提案履歴に基づいてパレート優位な合意案候補を推定する必要がある。

ANAC2012 では、線形効用空間に対して頻度モデルを適用することでパレート優位な合意案候補を推定する CHUKAgent が最も良い成績を残した [6]。頻度モデルとは、相手の提案履歴において頻出する要素は相手の効用関数における重要な制約を充足するという仮定に基づくモデルである。本論文で提案す

る探索手法では、非線形効用空間に対して頻度モデルに基づく頻度置換を適用することでパレート改善を行う。

### 3. 非線形効用空間における合意案候補の探索

#### 3.1 合意案候補の提案プロセス

本論文では、二者間交渉問題では主流とされている Alternating Offers [7] を交渉プロトコルとして採用する。Alternating Offers に関する研究はこれまでに行われている [8, 9]。

本論文では、交渉者は次の手順にしたがって合意案候補を交渉相手に提案するものとする。

- 手順 1: 譲歩関数  $\text{threshold}(t)$  に基づき、交渉相手に提案する合意案候補の効用値の閾値を導出する
- 手順 2: 手順 1 で導出した閾値よりも効用値が大きな合意案候補を探索する
- 手順 3: 手順 2 で導出した合意案候補のパレート改善を行う

手順 1 の譲歩関数とは、時刻  $t$  における交渉者の合意判定値を定義する関数である。譲歩関数に関する研究はこれまでに行われている [10, 11, 12]。本論文では合意案候補の探索とパレート改善に関して述べるため、手順 1 の譲歩関数  $\text{threshold}(t)$  が既に決まっているものとして、手順 2 と手順 3 について述べる。

#### 3.2 手順 2: SA と近傍探索を併用する合意案候補の探索

本論文では手順 2 における探索手法として、SA と相手の提案履歴に基づく局所探索法である近傍探索を併用する。SA は大域的最適化問題を解くためのヒューリスティックな汎用的アルゴリズムの一つである。SA は物理現象の焼きなましから発案されたアルゴリズムであり、温度変数によって動作する。温度変数は当初は高い値を設定し、探索の度に冷却度に従って次第に低くなっていく。SA では、新しく評価する合意案候補の効用値が現在の解よりも大きい場合、新たな解として採用する。ただし、新しく評価する合意案候補の効用値が現在の解よりも小さい場合であっても、温度変数に基づく確率にしたがっ

**Algorithm 1** 近傍探索**Require:**

$I$  { 論点集合 }  
 $\vec{s}_c$  { 基準となる合意案候補 }

**Ensure:**  $L$  { 閾値以上の効用値をもつ合意案候補のリスト }

```

1:  $L \leftarrow \emptyset$ 
2:  $\vec{s}_n \leftarrow \vec{s}_c$ 
3: for all  $i \in I$  do
4:   for all  $v \in V(i)$  do
5:      $\vec{s}_n[i] \leftarrow v$ 
6:     if  $U(\vec{s}_n) > \text{threshold}(t)$  then
7:        $L \leftarrow \vec{s}_n$ 
8:     end if
9:   end for
10:  $\vec{s}_n \leftarrow \vec{s}_c$ 
11: end for
12: return  $L$ 

```

て、新たな解として採用する。温度変数に基づく確率は温度が低いほど小さくなる。したがって、探索初期では、効用値が小さくなる合意案候補であっても解として採用されやすいが、探索終期では、効用値が小さくなる合意案候補は解として採用されにくくなる。温度変数に基づく確率を探索に導入することによって、SA は山登り法 (Hill Climbing) の問題点である局所解に陥りにくい特徴をもつ。

本論文の提案手法では SA と近傍探索を併用する。SA と近傍探索を併用するのは、相手の提案した合意案候補の近傍の合意案候補は相手の効用関数において重要な制約を充足するという仮定に基づき、パレート優位な合意案候補を探索するためである。ただし、近傍探索の探索範囲内に閾値以上の効用値をもつ合意案候補が存在しないこともあるため、SA を併用する必要がある。近傍探索は探索範囲を広げることでも可能であるが、探索に必要な計算量が大きくなる。したがって、近傍探索において探索範囲と計算量はトレードオフの関係にある。

本論文で用いる近傍探索のアルゴリズムをアルゴリズム 1 に示す。アルゴリズム 1 における関数  $V(i)$  は論点  $i$  の取りうる値の集合を返す関数を表す。また、 $\vec{s}[i]$  は合意案候補  $\vec{s}$  の論点  $i$  の値を示す。近傍探索では交渉問題における論点集合  $I$  の各論点  $i$  について、合意案候補  $\vec{s}_c$  を基準とした要素置換を行うことで局所探索を行っている (アルゴリズム 1, 行 2-5,9-11)。もし論点  $i$  の要素を置換した結果、合意案候補が閾値  $\text{threshold}(t)$  よりも高くなれば、リスト  $L$  に合意案候補を追加する (アルゴリズム 1, 行 6-8)。論点集合  $I$  内の全ての論点を探索終了後、合意案候補のリスト  $L$  を交渉者に返し、アルゴリズムは終了する (アルゴリズム 1, 行 12)。

**3.3 手順 3: 頻度置換によるパレート改善**

頻度置換とは閾値以上の効用値をもつ合意案候補に対して、閾値以上であるという条件を充足しつつ、合意案候補の要素を可能な限り相手の提案履歴において頻出する要素に置換する処理である。頻度置換は、相手が頻繁に提案する合意案候補の要素が相手の効用関数において重要な制約を充足するという仮定に基づいたパレート改善手法である。非線形効用関数の場合、二項制約のように複数の要素によって充足される制約が存在する。したがって、頻出する要素を組み合わせた合意案候補が必ず相手にとって効用値が大きいは限らない。しかし、非線形効用関数であっても、SA のみよりも頻度置換を併用する SA のほうが、提案する合意案候補のパレート改善が期待できる。

**Algorithm 2** 頻度置換**Require:**

$I$  { 論点集合 }  
 $FrequencyList$  { 相手の提案履歴における各論点の要素の頻度リスト }  
 $\vec{s}_c$  { 基準となる合意案候補 }

**Ensure:**  $\vec{s}_c$  { 頻度置換後の合意案候補 }

```

1: for all  $i \in I$  do
2:    $\vec{s}_n \leftarrow \vec{s}_c$ 
3:    $\vec{s}_n[i] \leftarrow \text{MostFrequentAppearance}(i, FrequencyList)$ 
4:   if  $U(\vec{s}_n) > \text{threshold}(t)$  then
5:      $\vec{s}_c \leftarrow \vec{s}_n$ 
6:   end if
7: end for
8: return  $\vec{s}_c$ 

```

近傍探索と同様に、頻度探索も評価する選択肢を増やすことで探索範囲を広げることができるが、探索範囲と計算量がトレードオフの関係にある。

本論文で用いる頻度置換のアルゴリズムをアルゴリズム 2 に示す。アルゴリズム 2 における関数  $\text{MostFrequentAppearance}(i, FrequencyList)$  は  $FrequencyList$  を参照し、相手の提案履歴において最も出現する論点  $i$  の値を返す関数を表す。頻度置換では交渉問題における論点集合  $I$  の各論点  $i$  について、合意案候補  $\vec{s}_c$  を基準とした要素置換を行うことで局所探索を行っている (アルゴリズム 2, 行 1-3,7)。もし論点  $i$  の要素を置換した結果、合意案候補が閾値  $\text{threshold}(t)$  よりも高くなれば、合意案候補  $\vec{s}_c$  を更新する (アルゴリズム 2, 行 4-6)。論点集合  $I$  内の全ての論点を探索終了後、最終的な合意案候補  $\vec{s}_c$  を交渉者に返し、アルゴリズムは終了する (アルゴリズム 2, 行 8)。

**4. 評価実験と考察****4.1 SA による探索の評価実験**

非線形効用空間における、SA による合意案候補の探索の実用性について評価する。評価実験では、ANAC2014 で用いられた制約集合において、最大効用値をもつ合意案候補の探索を SA とランダム探索を用いてそれぞれ 10,000 回行う。評価実験で用いる SA のパラメータは、初期化温度 1 度 (最悪改善値である 1.0 の遷移確率が 0.5 となる温度)、終了温度を 0.0001、冷却度を 0.995 とする (合意案候補の評価回数: 9205 回)。また、SA の比較対象として用意したランダム探索は SA と同じ回数だけランダムに取得した合意案候補を評価するものとする。

表 1 は SA とランダム探索によって各制約集合 (効用情報:

表 1: 最大効用値の合意案候補を探索した場合の平均効用値 (試行回数: 10,000 回)

論点数	制約集合名	SA	ランダム探索	改善値
10	Profile1	0.979	0.892	+0.087
	Profile2	0.998	0.997	+0.001
30	Profile1	0.989	0.763	+0.226
	Profile2	1.000	0.769	+0.231
40	Profile1	0.999	0.759	+0.240
	Profile2	0.981	0.733	+0.248

Profile) における最大効用値 (1.0) の合意案候補を探索した場合に得られた合意案候補の平均効用値を示している。表 1 から、論点数が増加するほど、ランダム探索は最大効用値となる合意案候補の探索に失敗していることがわかる。対して、SA はほぼ全ての制約集合で最大効用値に近い効用値をもつ合意案候補を取得できることがわかる。評価実験の結果から、SA によって適当な効用値をもつ合意案候補を実用的な計算量で探索できるといえる。

#### 4.2 提案するパレート改善手法の評価

近傍探索と頻度探索を併用するパレート改善手法を評価するために、次のような Agent A と Agent B を作成する。

**Agent A:** SA による合意案候補の探索と、近傍探索と頻度探索によるパレート改善を行う

**Agent B:** SA による合意案候補の探索のみを行う

評価実験では、両エージェントが自身の最大効用値の合意案候補を 10,000 回提案し、提案した合意案候補の相手の平均効用値を測定する。Agent A は SA によって自身の最大効用値となる合意案候補を探索し、相手の提案履歴に基づき相手の効用空間を推定することによってパレート改善を行う。Agent B は相手の提案履歴に関係無く、SA によって自身の最大効用値となる合意案候補を探索する。評価実験では、SA の評価実験と同様に、ANAC2014 で用いられた制約集合を使用する。

表 2 は提案した合意案候補における交渉相手の平均効用値を示している。表 2 から、全ての制約集合において、Agent A が提案した合意案候補における交渉相手の平均効用値が、Agent B が提案した合意案候補における交渉相手の平均効用値よりも大きいことがわかる。両エージェントは共に自身の最大効用値の合意案候補を提案しているため、提案した合意案候補における交渉相手の効用値が増加するということは、パレート改善が行われているということである。評価実験から近傍探索と頻度探索を併用するパレート改善手法は有効であることがわかる。

表 2: 提案した合意案候補における交渉相手の平均効用値 (試行回数: 10,000 回)

論点数	制約集合名	Agent A	Agent B	改善値
10	Profile1	0.585	0.488	+0.097
	Profile2	0.450	0.361	+0.089
30	Profile1	0.629	0.455	+0.174
	Profile2	0.696	0.525	+0.171
40	Profile1	0.687	0.480	+0.208
	Profile2	0.672	0.529	+0.143

## 5. まとめ

本論文では、非線形効用空間におけるメタヒューリスティックとパレート改善手法を併用する合意案候補の探索手法を提案した。合意案候補の探索手法として、メタヒューリスティックな探索手法である SA を用いることによって非線形効用関数から適当な合意案候補を実用的な計算量で探索できることを示した。また、SA とパレート改善手法である近傍探索と頻度置換を併用することによって、パレート改善が行われることを示した。

今後の課題として、メタヒューリスティックな探索手法同士を比較する評価実験の実施が挙げられる。本論文では SA による探索手法のみを取り上げたが、メタヒューリスティックな探索手

法には SA の他にも遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) などが存在する。また、パレート改善手法においても、提案順序を考慮した重み付けなどの改善が挙げられる。

## 参考文献

- [1] X. Luo, N. R. Jennings, N. Shadbolt, H. Leung, and J. H. Lee. A fuzzy constraint based model for bilateral, multi-issue negotiations in semi-competitive environments. *Artificial Intelligence*, 148: pages 53–102, 2003.
- [2] X. Luo, H. Leung, and J. H. Lee. Theory and properties of a selfish protocol for multi-agent meeting scheduling using fuzzy constraints. In *ECAI*, pages 373–377, 2000.
- [3] S.J.Russell and P.Norving, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hal 2002.
- [4] T. Baarslag, K. Hindriks, C. Jonker, S. Kraus and R. Lin. The First Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2010). *New Trends in Agent-based Complex Automated Negotiations*, Series of Studies in Computational Intelligence, pages 113-135, 2012.
- [5] T. Ito, H. Hattori, and M. Klein. Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces. In *IJCAI*. Vol. 7. 2007.
- [6] T. Baarslag. What to Bid and When to Stop. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2014.
- [7] A. Rubinstein. Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica*, pp.97-109, 1982.
- [8] P. Faratin, C. Sierra and N. R. Jennings. Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiations. In *Artificial Intelligence*, volume 142, pp.205-237, 2002.
- [9] S. S. Fatima, M. Wooldridge, N. R. Jennings. Multi-issue negotiation under time constraints. In *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS 2002)*, pages 143-150, New York, NY, USA, 2002.
- [10] S. S. Fatima, M. Wooldridge, N. R. Jennings. Optimal Negotiation Strategies for Agents with Incomplete Information. In *Revised Papers from the 8th International Workshop on Intelligent Agents VIII, ATAL '01*, pp.377–392, Springer-Verlag, 2002.
- [11] Chen, S. and Weiss, G. An efficient and adaptive approach to negotiation in complex environments. In *Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence*, pp.228-233. IOS Press, Montpellier, France, 2012.
- [12] K 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 (ACAN 2014)*, 2014.