

第三者エージェントを用いた自動交渉による 利用者指向情報流通手法の実装と評価

戸嶋 丈士¹ 高橋 晶子^{1,2} 阿部 亨^{1,3} 菅沼 拓夫^{1,3}

概要：

IoT 技術の進展に伴い，数多くの個人データが様々なデバイスによって日常的に収集されており，収集されたデータを流通させる情報銀行などが提案されている．しかし，現状の情報流通においてデータ提供者に与えるデータの対価（便益）は情報銀行やデータ収集者によって一方的に決定され，便益の決定に対しデータ提供者の意思が十分に反映されているとは言えない．本稿ではこの課題に対し，データ提供者とデータ収集者の交渉を監視する第三者エージェントを用いた自動交渉による便益決定手法を提案する．また，本手法の有効性を確認するためにプロトタイプシステムを用いたシミュレーション実験を行った．その結果，第三者エージェントの介入によって社会的に効用の高い自動交渉が実現可能であることを確認した．

Implementation and Evaluation of a User-Oriented Data Sharing Method with Automated Negotiation Using a Mediator Agent

JOJI TOSHIMA¹ AKIKO TAKAHASHI^{1,2} TORU ABE^{1,3} TAKUO SUGANUMA^{1,3}

1. はじめに

スマートフォンやスマートスピーカをはじめとした IoT デバイスが日常空間の中で幅広く利用されるようになり，それらのデバイス利用を通じてデバイス利用者の個人データが数多く収集されている．例えば，消灯するように指示するスマートスピーカへの音声を含むデータはデバイス利用者の就寝時間推定に用いることができ，個人データであると言える．これらのデータは一般的にデバイスベンダによって管理されるため，利用者によるデータの開示制御は可能でも，自身の意向を反映した利活用は利用者にとって困難である．

そこで，データ提供者であるデバイス利用者の関与の下でデータの流通を行う，情報銀行の枠組みが提案されており，日本 IT 団体連盟 [1] によって現在 3 事業が認定されている [2-4]．これらのサービスではデータ提供者が情報銀行を通じて自身のデータをデータ収集者である企業などに提供し，その対価として情報提供料や特典などの便益を受

け取ることができる．

しかし，現在提案されている情報銀行において，データ提供者に対する便益にデータ提供者の意思を反映することは考慮されておらず，その便益は情報銀行やデータ収集者である企業によって一方的に決定されることが予想される．そのため，便益に対して不満を持つデータ提供者から円滑にデータを収集することは困難となる．

本研究ではこの課題に対して，第三者エージェントを用いた自動交渉により，データ提供者とデータ収集者双方の意思を考慮した便益決定を行う手法を提案する．具体的には，データ提供者が持つエージェントとデータ収集者が持つエージェントの自動交渉に，情報銀行が持つ第三者エージェントが介入し，交渉参加者が得る効用の和である社会的効用が高い交渉を実現する手法を提案する．これにより，データ提供者の意思を反映した柔軟な便益決定が可能となり，便益への不満解消による円滑な情報流通の実現が期待できる．

本稿では，第三者エージェントによる自動交渉への介入方法に関する方針について述べる．また，データ提供者・データ収集者のエージェントと第三者エージェントをブ

¹ 東北大学大学院情報科学研究科

² 仙台高等専門学校

³ 東北大学サイバーサイエンスセンター

ロトタイプシステム上に実装し、シミュレーション実験によって提案手法の有効性を検証する。

2. 関連技術と課題

2.1 現在提案されている情報銀行

現在、日本 IT 団体連盟により認定された情報銀行には、『「データ信託」サービス（仮称）」[2] や「地域振興プラットフォーム（仮称）」[3]、「情報提供サービス（仮称）」[4] の 3 事業が存在する。これらの事業はすべてデータ提供者の許諾の下でデータを流通させており、その対価を情報銀行もしくは情報銀行からデータを収集するデータ収集者からデータ提供者に付与する形をとる。

これらの情報銀行により、従来デバイスベンダが管理していたデータをデバイス利用者（データ提供者）の意思に沿って流通させることで、デバイス利用者は自身のデータを便益に換えることが可能になり、データ収集者はより円滑で健全なデータ収集が可能となる。

2.2 第三者エージェントが介入する自動交渉に関する研究

自動交渉は複数のエージェント間で一つの合意を形成するために用いる手法であり、本研究ではこの自動交渉をデータ提供者のエージェントとデータ収集者のエージェント間の便益決定のために用いる。このような二者間の自動交渉において、自動交渉に第三者を介入させることでより社会的に効用の高い自動交渉を実現する研究が存在する。

Chalamish らは人間と人間の交渉に介入する第三者エージェントを提案している [5]。この第三者エージェントは交渉を行う前にあらかじめ交渉者の選好情報を収集し、交渉の途中で交渉者に対しより社会的に効用の高い提案を行う。これにより、介入のない交渉よりも人間にとって満足度の高い交渉を実現している。

Aydoğan らは第三者エージェントによる提案によって交渉が進行する自動交渉プロトコルを提案している [6]。このプロトコルでは第三者エージェントが生成する提案に対して各エージェントが「良い」「悪い」「どちらでもない」の応答を行うことで自動交渉を行い、全エージェントが「良い」もしくは「どちらでもない」と答えた提案を採用する。これにより、単純に各エージェントが提案に対し「承諾」「拒否」のみを行う場合よりも社会的に効用の高い交渉を実現している。

2.3 関連研究の課題

上記の関連研究から本研究では以下の 2 つの課題に着目する。

(P1) データ提供者の意思を反映した便益の決定

現在提案されている情報銀行はデータ提供者に対して付与する便益を情報銀行やデータ収集者側である企業によって一方的に決定している。これにより、便益に不満を持つ

データ提供者は情報銀行に対するデータ提供を停止し、円滑な情報流通が困難になる恐れがある。そのため、データ提供者とデータ収集者双方の意思を考慮した柔軟な便益決定手法が必要である。

(P2) 自動交渉内における各エージェントの選好情報推定と交渉者中心の自動交渉

Chalamish らの研究のように各エージェントの選好情報をあらかじめ収集する方法では、虚偽の選好情報を利用して第三者エージェントの提案を操作できる可能性がある。特に、交渉相手に自身の選好情報が漏洩した場合には交渉相手によってその選好情報の悪用が行われる可能性があるため、各エージェントの選好情報は自動交渉における各エージェントの行動から推定する必要がある。

また、Aydoğan らが提案するプロトコルにおいて具体的な交渉案は第三者エージェントのみが作成することができる。この場合、データ提供者とデータ収集者は幅広い便益の種類について柔軟に交渉することが困難になる。そのため、データ提供者とデータ収集者が主となる自動交渉に第三者エージェントが介入する形を採る必要がある。

3. 第三者エージェントを用いた自動交渉

3.1 概要

前節で述べた課題を解決するため、本研究では第三者エージェントを用いた自動交渉を提案する。これは第三者エージェントがデータ提供者の持つエージェントとデータ収集者の持つエージェント間の自動交渉に介入し、社会的に効用の高い自動交渉に導く手法である。これにより、どちらか一方のエージェントが持つ意思に偏ることを避けた便益決定が可能となる。本手法は以下の 2 つから構成される。

1. 交渉参加エージェントの選好推定と効用空間の導出
2. 推定した選好情報に基づいた自動交渉への介入

以降の節ではそれぞれについて詳しく説明する。

3.2 交渉参加エージェントの選好推定と効用空間の導出

本研究で用いる第三者エージェントは、データ提供者およびデータ収集者のエージェントが持つ選好情報を推定する。推定手法には Lin ら [7] が提案するベイズ更新に基づく手法を利用する。この手法で用いられる推定モデルは各エージェントが交渉案を提案するたびに更新され、あらかじめ仮定した数種類の選好タイプのうち最も尤度の高いタイプを推定結果とする。また、このときの尤度を推定の確信度 c として利用する。

交渉参加エージェントの選好情報を推定すると、効用空間とナッシュ交渉解が導出可能になる。効用空間グラフの例を図 1 に示す。図 1 における各点は交渉案を表しており、点の横軸上の位置はその交渉案に対するエージェント

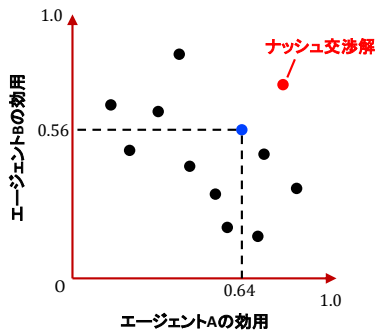


図 1 効用空間の一例. この例では青い点が表す交渉案に対してエージェント A が 0.64 の効用を, エージェント B が 0.56 の効用を得る. 赤い点はナッシュ交渉解である.

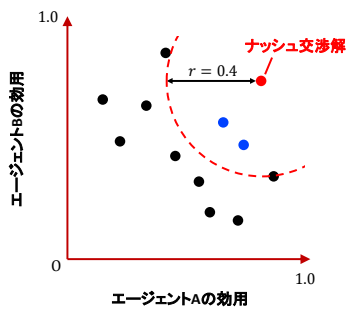


図 2 第三者エージェントによる制約の一例. この例における交渉参加者は青い点もしくは赤い点のみを交渉案として提案することができる.

A の効用を, 縦軸上の位置はエージェント B の効用を表す. また, ナッシュ交渉解は交渉参加エージェントの効用の積が最大となる交渉解であり, 社会的に効用の高い交渉解であるとされる [8].

3.3 推定した選好情報に基づいた自動交渉への介入

上記の手法で推定した選好情報および効用空間に基づき, 第三者エージェントは自動交渉への介入を行う. 本研究では現在以下の 2 種類の介入方法を検討している. ただし, 以下の介入は第三者エージェントによる選好推定の確信度 c が閾値 α 以上である場合にのみ行われる.

3.3.1 制約による自動交渉への介入

制約による自動交渉への介入では, 第三者エージェントが自動交渉内で作成することのできる交渉案に制約を課す. 具体的には, 第三者エージェントが推定する効用空間 U と取りうるすべての交渉案集合 Ω , 制約距離 r が与えられた際に, 各交渉エージェントが提案できる交渉案を集合 $\Omega' = \{\omega \in \Omega \mid \text{dist}(\omega_{\text{nash}}, \omega) \leq r\}$ に限定する. ここで ω_{nash} はナッシュ交渉解を, $\text{dist}(\omega_{\text{nash}}, \omega)$ は効用空間 U 上でのナッシュ交渉解と交渉案 ω のユークリッド距離である. すなわち, 第三者エージェントの制約により各交渉エージェントが提案できる交渉案を図 2 のようにナッシュ交渉解から一定距離内にある交渉案のみに限定する.

この手法は強制的に交渉参加者の交渉案をナッシュ交渉解に近づけ, 社会的に効用の高い交渉を実現することが可能であるが, 交渉参加エージェントは自身の選好通りに交渉案を提案することができないため, 第三者エージェントによる選好情報の推定に影響を及ぼす可能性がある.

3.3.2 提案による自動交渉への介入

提案による自動交渉への介入では第三者エージェントが各交渉開始時に現在推定しているナッシュ交渉解を交渉参加エージェントに対して提案する. これが両エージェントに受け入れられた場合, その交渉解を交渉結果として決定し交渉を終了する. どちらか一方でもその提案を拒否した場合はデータ提供者エージェントとデータ収集者エージェント間で自動交渉を行い, 第三者エージェントは両エージェントの選好情報を再度推定する.

この手法が強制的に社会的効用の高い交渉を実現することは不可能であるが, 交渉参加者は自身の選好に従って交渉案を提案できるため, 第三者エージェントによる選好情報の推定精度は高くなり, 交渉を重ねるごとに社会的に効用の高い交渉を実現できる可能性が高まる.

4. 実験

4.1 実験目的

構築したプロトタイプシステムを用いてデータ提供者・データ収集者・第三者エージェントによる自動交渉を想定したシミュレーション実験を実施し, 提案手法の有効性の検証および 2 種類の介入方法の比較を行った.

4.2 実験環境

プロトタイプシステムは既存の自動交渉シミュレータ GENIUS [9] を参考に Kotlin を用いて実装した. 1 回の交渉を行う擬似コードを Algorithm 1 に示す. Algorithm 1 の流れに従い, 交渉が成立した場合は決定した便益をデータ提供者に提供し, 交渉が決裂した場合はデータの取引を中止することとした.

実験ではデータの対価として金銭とサービスが利用されると仮定し, 交渉論点を金銭とサービスの 2 つとした. 金銭は区間 $[0, 1]$ において連続値をとり, サービスはサービス A, サービス B, サービス C の 3 つの離散値をとる. つまり, 交渉案は例えば $\omega = \{\text{“金銭”} = 0.5, \text{“サービス”} = \text{サービス C}\}$ の形を採る. また, 交渉の参加者であるデータ提供者とデータ収集者の選好をそれぞれ 18 通り仮定した. 図 3 に金銭に対する選好の種別を示す. 例えば, リスク回避的なデータ提供者は少しの金銭増加でも効用の上昇幅が大きく, 欲張らずに交渉の成功を重要視する. それに対してリスク愛好的なデータ提供者は大きく金銭を増加させなければ効用は上昇せず, 交渉が決裂する可能性よりも金銭の大きさを重要視する. 3 種類のサービスに対する選好は最も好ましいサービスに効用 1.0, 次に好ましいサービス

Algorithm 1 プロトタイプシステムにおける 1 回の交渉**Require:**

データ提供者エージェント A_p
 データ収集者エージェント A_c
 第三者エージェント A_m
 最大交渉ラウンド $lim \in \mathbb{N}$

Ensure:

データ提供者に付与する便益

```

1: if 介入 (提案) then                                ▷ 提案による介入の場合
2:    $\omega \leftarrow A_m$  による提案
3:   if  $A_p$  が  $\omega$  を受諾 and  $A_c$  が  $\omega$  を受諾 then
4:     return  $\omega$ 
5:   end if
6: end if
7:  $t \leftarrow 0$ 
8: while  $t < lim$  do
9:    $\Omega' \leftarrow \Omega$ 
10:  if 介入 (制約) then                                ▷ 制約による介入の場合
11:     $\Omega' \leftarrow A_m$  による制約
12:  end if
13:   $\omega \leftarrow \Omega'$  上における  $A_p$  による提案
14:   $A_m$  は  $\omega$  を基に  $A_p$  の推定モデルを更新
15:  if  $A_c$  が  $\omega$  を受諾 then
16:    return  $\omega$ 
17:  end if
18:   $\omega \leftarrow \Omega'$  上における  $A_c$  による提案
19:   $A_m$  は  $\omega$  を基に  $A_c$  の推定モデルを更新
20:  if  $A_p$  が  $\omega$  を受諾 then
21:    return  $\omega$ 
22:  end if
23:   $t \leftarrow t + 1$ 
24: end while
25: return  $\phi$                                           ▷ 交渉決裂の場合は取引を中止
  
```

に効用 0.5, 最も好ましくないサービスに効用 0.0 を感じるよう設定し, これらをサービス A, B, C に割り当てるすべての組合せ $3!$ 通りのデータ提供者・データ収集者を設定する. これらを金銭の選好と合計して $3 \times 3! = 18$ 通りのデータ提供者とデータ収集者を設定した. 1 つの交渉案に対する効用は金銭に対する効用とサービスに対する効用の平均値とする. また, 第三者エージェントはこれら 18 通りの選好タイプが存在するという仮定の下でベイズ更新による選好情報の推定を行う. 本実験の交渉において, 交渉ラウンドの経過とともに得られる効用を低下させる, 割引効用は適用せずに各エージェントの承諾戦略には GENIUS 上に実装された時間依存戦略 [10] を用い, 提案戦略には各エージェントの効用関数を確率分布とする方法を用いた.

4.3 実験内容

以上で述べた実験環境下で, 第三者エージェントによる介入なし, 制約による介入, 提案による介入に対し, すべてのデータ提供者・データ収集者の組み合わせ ($18 \times 18 = 324$ 通り) についてそれぞれ 100 回の交渉を行った. また, 確信度における閾値 α は 0.9, 制約距離 r は 0.2, Algorithm 1 における最大交渉ラウンド lim は 60 とした.

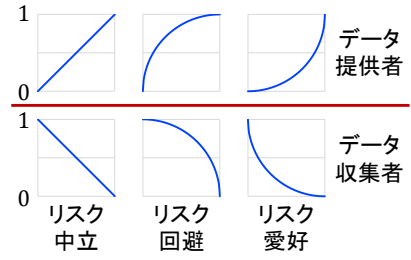


図 3 金銭に対する各エージェントの選好. 各グラフの縦軸は効用の大きさ, 横軸は右側であるほど大きい金銭の値を表す.

4.4 評価手法

実験では各交渉の結果に対する各エージェントの効用の他に, どれだけ社会的に効用の高い交渉を実現できたかを測る値としてナッシュ交渉解との距離の平均, どれだけ素早く交渉を合意に導くことができたかを測る値として交渉ラウンドの平均を評価指標として用いた. なお, これらの値は小さいほど優れた交渉であることを示すことに注意されたい.

4.5 実験結果

第三者エージェントによる介入のない実験の結果を図 4(a), 制約による自動交渉への介入の実験結果を図 4(b), 提案による自動交渉への介入の実験結果を図 4(c) に示す. また, すべての実験に対して評価指標をまとめたものを表 1 に示す. 表 1 より, 制約による介入は介入なしの場合に比べ, ナッシュ交渉解との距離平均において -16% , 交渉終了ラウンドにおいて -14% の改善が見られた. 提案による介入は介入なしの場合に比べ, ナッシュ交渉解との距離平均において -17% , 交渉終了ラウンドにおいて -20% の改善が見られた. 以上のことから, 第三者エージェントの介入により社会的に効用の高い自動交渉を実現することは可能であると言える. また, 図 5 に第三者エージェントによる選好推定精度のグラフを示す. 図 5 より, 提案による介入は交渉を重ねるごとに正解への確信度 (推定精度) が 1.0 に近づくのに対し, 制約による介入は $0.8 - 0.9$ 付近で推定精度が停滞する結果を示した.

4.6 考察

実験結果より, 提案による介入は制約による介入と比較して自動交渉をより大きく改善する結果を示した. これは 3.3.1 項で述べたように, 選好情報の推定精度に起因するものと考えられる. 現に図 5 が示すように, 本来各エージェ

表 1 実験結果: 各評価指標の平均値

	介入なし	介入 (制約)	介入 (提案)
ナッシュ交渉解 との距離平均	0.300	0.253	0.248
交渉終了ラウンド	5.42	4.66	4.33

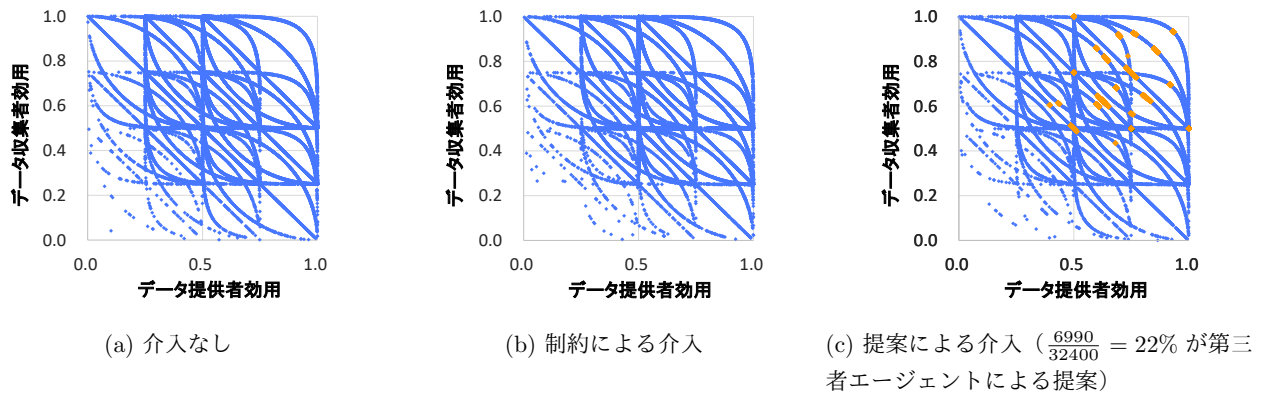


図 4 32400 回の交渉の結果. 各点は交渉結果に対するデータ提供者とデータ収集者の効用を表す. 橙色の点は交渉結果として第三者エージェントの提案が採用されたことを示す.

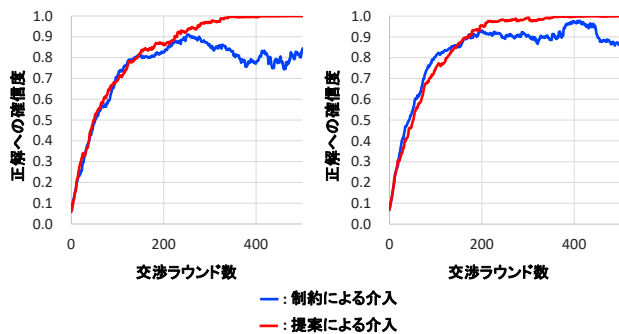


図 5 データ提供者の選好情報に対する推定精度 (左) とデータ収集者の選好情報に対する推定精度 (右).

ントが提案したい交渉案が第三者エージェントによる制約内に存在せず, 自身の選好情報の通りに交渉案を提案できないことにより選好情報の推定精度が閾値 $\alpha = 0.9$ 付近で停滞している. そのため, 制約による介入を行う場合には交渉案以外に別途選好情報を推定するための情報が必要となる. これに対し, 提案による介入における第三者エージェントの提案は, データ提供者とデータ収集者の効用の積が比較的大きい領域に位置していることが図 4(c) から読み取れる. また, $\frac{6990}{32400} = 22\%$ の交渉が第三者エージェントによる提案により終了していることから, およそ $\frac{1}{5}$ の交渉において自動交渉プロセスによる計算機資源の消費を回避した. これらのことから, 現在の実験環境においては第三者エージェントが提案を行うことによる自動交渉への介入が最も優れた自動交渉の改善を可能とする.

5. おわりに

本研究では第三者エージェントを用いた自動交渉による便益決定手法を提案した. 具体的には, 第三者エージェントが介入する自動交渉により, データ提供の対価としてデータ提供者に与える便益を決定する手法を設計した. さらに, 提案手法を実装したプロトタイプシステムを用いたシミュレーション実験により, 提案手法が社会的に効用の高い自動交渉を実現できることを確認した.

今後は他の第三者エージェントによる介入方法について検討すると同時に選好情報の推定手法の改善や, 既存のエージェントを利用した実験, より現実的な環境における実験を行い, 提案手法の拡張性について検証する.

参考文献

- [1] 一般社団法人日本 IT 団体連盟, <https://www.itrenmei.jp/>. (2020-04-22 参照).
- [2] 日本 IT 団体連盟: 「データ信託」サービス (仮称), <https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134550.pdf>. (2020-04-22 参照).
- [3] 日本 IT 団体連盟: 地域振興プラットフォーム (仮称), [https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134621\(1\).pdf](https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134621(1).pdf). (2020-04-22 参照).
- [4] 日本 IT 団体連盟: 情報提供サービス (仮称), <https://www.itrenmei.jp/files/files20191225115025.pdf>. (2020-04-22 参照).
- [5] Chalamish, M. and Kraus, S.: AutoMed: an automated mediator for multi-issue bilateral negotiations, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 536–564 (2012).
- [6] Aydogan, R., Hindriks, K. V. and Jonker, C. M.: Multilateral Mediated Negotiation Protocols with Feedback, *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation* (2014).
- [7] Lin, R., Kraus, S., Wilkenfeld, J. and Barry, J.: Negotiating with bounded rational agents in environments with incomplete information using an automated agent, *Artificial Intelligence*, Vol. 172, No. 6-7, pp. 823–851 (2008).
- [8] Shew, J. and Larson, K.: The blind leading the blind: A third-party model for bilateral multi-issue negotiations under incomplete information, *Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Springer, pp. 61–88 (2009).
- [9] Hindriks, K., Jonker, C. M., Kraus, S., Lin, R. and Tykhonov, D.: Genius: negotiation environment for heterogeneous agents, *Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems-Volume 2*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1397–1398 (2009).
- [10] デルフト工科大学: SimpleAgent.java, <https://tracinsy.ewi.tudelft.nl/pub/svn/Genius/src/main/java/agents/SimpleAgent.java>. (2020-04-22 参照).