

情報流通においてデータ提供への対価を決定する 第三者エージェントを用いた自動交渉

戸嶋 丈士^{1,a)} 高橋 晶子^{1,2,b)} 阿部 亨^{1,3,c)} 菅沼 拓夫^{1,3,d)}

受付日 2020年5月14日, 採録日 2020年11月5日

概要: IoT 技術の進展にともない, 人々の生活空間に様々なセンサが入り込み, 多様なデータが日常的に収集されている. 収集されたデータには個人のプライバシーに関わるものも多く含まれるが, そのデータの提供者である個人 (データ提供者) と, データを収集・利用する企業など (データ収集者) との間で, データを安全かつ効果的に流通させる仕組みとして情報銀行が提案されている. 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いえない. このような既存の情報流通手法における課題に対し, 本研究ではデータ提供者の意思を考慮するデータ提供への対価決定手法として, 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を提案する. 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.

キーワード: 自動交渉, マルチエージェント, データ流通, 情報銀行

Automated Negotiation Using a Mediator Agent That Determines Incentives for Providing Data in Data Trading

JOJI TOSHIMA^{1,a)} AKIKO TAKAHASHI^{1,2,b)} TORU ABE^{1,3,c)} TAKUO SUGANUMA^{1,3,d)}

Received: May 14, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: With the development of IoT technology, various sensors are installed in people's living space and various data are collected on a daily basis. In Japan, "Information Banks" are proposed as a mechanism for safe and effective distribution of data between individuals (data providers) and companies (data collectors) that collect and use the data. However, in the current information distribution, the value (benefit) of data to data providers is determined unilaterally by information banks and data collectors, and it cannot be said that the intention of data providers is fully reflected in the determination of the benefit. In this study, we propose an automated negotiation that uses a mediator agent to monitor the negotiation between data providers and data collectors, and determines the benefits of the negotiation so that the data providers are not disadvantaged. Simulation experiments using a prototype system were conducted to confirm the effectiveness of this method. The results confirm the feasibility of automated negotiation with high social utility through the intervention of the mediator agent.

Keywords: automated negotiation, multi-agent, data trading, information bank

¹ 東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University,
Sendai, Miyagi 980–8579, Japan

² 仙台高等専門学校
National Institute of Technology, Sendai College, Sendai,
Miyagi 989–3128, Japan

³ 東北大学サイバーサイエンスセンター
Cyberscience Center, Tohoku University, Sendai, Miyagi
980–8578, Japan

1. はじめに

IoT 技術の進展にともない, 様々なセンサを内蔵したス

a) toshima@ci.cc.tohoku.ac.jp

b) akiko@sendai-nct.ac.jp

c) beto@tohoku.ac.jp

d) suganuma@tohoku.ac.jp

スマートフォンやスマートスピーカーをはじめとする 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、それらを通じて多種多様なデータが日常的に収集されている。収集されたデータには個人のプライバシーに関わるものも多く含まれる。たとえば、消灯するように指示するスマートスピーカーへの音声を含むデータは、デバイス利用者の就寝時間の推定に用いることができ、機微な個人データであるといえる。これらの個人データは一般的に、デバイスを提供している企業などによって管理されるため、データ提供の見返りとしての利用者のメリットは、デバイス管理企業の提供するサービスの範囲内に限定される。

一方、個人データの幅広い利活用を目指し、データの提供者であるデバイス利用者個人（データ提供者）と、データを収集・利用する企業など（データ収集者）との間で、データを安全かつ効果的に流通させる仕組みとして情報銀行が提案されている。現在までに、日本 IT 団体連盟 [1] によって、3 事業が情報銀行として認定されている [2], [3], [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させ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によって一方的に決定される可能性がある。そのため、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ず、データ提供者は便益に対して不満を持ち、またそれがデータ収集者の円滑なデータ収集を阻害する要因となる恐れがある。

本研究ではこの課題に対し、利益が競合する複数主体間の交渉において合意形成を行う手法の 1 つである自動交渉を、データ提供者とデータ収集者間の交渉に適用することで、両者の意思を考慮しつつデータ提供に対する対価を決定する手法を提案する。具体的には、情報銀行の中立的な立場を利用し、より公正な自動交渉実現のために第三者エージェントが介入する自動交渉を用いる。すなわち、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。

提案手法の実装を行い、シミュレーション実験を通じて評価を行った。その結果、自動交渉に介入する第三者エージェントは、交渉参加者の選好情報を直接取得しなくても、ベイズ推定によって選好情報を推定可能であることを確認した。また、推定した選好情報を用いて第三者エージェントが自動交渉に介入する方法を複数検討し、実験を通じて各方法の効果について比較を行った。その結果、複数の介入手法が自動交渉における社会的効用の向上に有効であることを確認した。

本研究の成果による貢献は以下のとおりである。

1) 自動交渉における第三者エージェントによる交渉参加者の選好推定と介入方法の導入

本研究では交渉参加者の交渉活動から選好情報を推定することで、既存手法に存在する虚偽の選好情報提供や選好情報漏洩の可能性を排除する。また、交渉参加者の自発的な交渉案作成を妨げない第三者エージェントによる介入方法により、取引の柔軟性を維持しつつ自動交渉の改善を実現する。以上のように、自動交渉における第三者エージェント利用の障壁を取り除くことで自動交渉分野における性能改善手法の 1 つを確立し、第三者エージェントが設置可能なユースケースにおける自動交渉の利用促進に貢献することが期待できる。

2) 情報流通における自動交渉の有用性の議論

情報流通においてデータ提供への対価は金銭のみでなく、提供データを利用したサービスも考えられている [5]。このような個人によってその価値が大きく異なる取引対象が存在するユースケースにおいて、自動交渉は交渉参加者の選好を考慮するため、固定的取引や一般的なオークションなどの既存の取引手法と比較して、効用の高い取引を実現することができる。このことから、本研究は情報流通における自動交渉の活用を促し、データ提供者とデータ収集者ともにデータ流通に参加することの利益を向上させることで、データ流通市場の活性化に貢献することが期待できる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 1 章で、本研究の課題と提案の概要を述べる。2 章では、現在提案されている情報銀行の概要、および自動交渉に関する既存研究とその課題について述べる。3 章では、第三者エージェントによる自動交渉への介入方法の設計について述べる。4 章では、設計に基づき実装したプロトタイプシステムを用いて行ったシミュレーション実験の結果から、提案手法の有効性を検証する。5 章では本論文をまとめ、今後の展望について述べる。

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。これらの情報銀行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 3 つの情報銀行において、対価の具体的な決定方法は現在述べられていないが、情報銀行としてすでにサービスを開始している MEY [6] では、情報銀行がその対価を決定している。

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

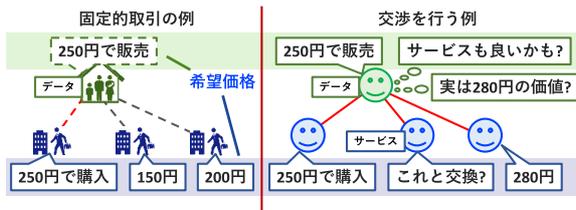


図 1 固定的取引のイメージ (左) と交渉による取引のイメージ (右)
Fig. 1 Illustration of conventional transaction (left) and transaction with negotiation (right).

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 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1つの合意を形成するために用いる手法であり [7], それらのエージェントの利害関係が衝突する場合に活用される。情報銀行におけるデータの対価 (便益) 決定は、より大きい便益でデータを提供したいデータ提供者と、支払う便益を抑えつつデータを収集したいデータ収集者の利害が衝突しているため、自動交渉の活用が可能である。特に自動交渉は交渉の一種であるため、一方的に決定された対価での取引などの固定的な取引では実現しえない、潜在的な取引を実現できる。たとえば図 1 のように、固定的取引ではデータ提供者とデータ収集者が提示する価格が一致したときのみ取引が成立する一方、交渉を行う場合は初期設定価格と異なる取引や、サービスなど金銭以外との交換成立を実現できる。実際に、情報銀行における便益として金銭のほかに、提供されたデータを活用したサービスがあげられている [5]。このような個人にとってその価値が大きく異なる取引対象が存在する情報流通のユースケースにおいて、自動交渉が持つ交渉参加者の選好を考慮する性質は重要であり、固定的な取引はもちろん、一般的なオークションシステムなどの既存の取引手法では実現できない、より個人に適した取引を実現可能にする。

自動交渉に必要な要素として主に交渉環境、エージェント、自動交渉プロトコルの3つが存在する。まず交渉環境とはその交渉の目的関数や交渉の論点などの情報を指す。交渉の目的関数に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るナッシュ交渉解 [8] が多く用いられる。また、交渉の論点とは本研究における便益のように交渉で決定する要素を指す。また、エージェントはどのような提案を行い、どのような提案を受け入れるかを定義する交渉戦略と、提案の良し悪しを定義する選好情報を持つ。交渉戦略としては、交渉の終了時間が迫るにつれて交渉相手の交渉を受け入れやすくなる時間依存戦略 [9], [10] や交渉相手に協調し交渉の失敗を避ける戦略 [9]

など様々な戦略が提案されている。最後に、自動交渉プロトコルは交渉に参加するエージェントが交渉を行う手順を定義するものであり、二者間で交互に交渉案の提案を行う Alternating Offers Protocol [11] やこれを多者間交渉に拡張した Stacked Alternating Offers Protocol [12] が多く用いられる。

以上で述べた自動交渉において、交渉内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 [13]。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 [14]。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とる必要がある。

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 [15] 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2に示す。図2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。

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る。具体的には、第三者エージェントが推定する効用空間 U とと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3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。この手法を制約-aとする。制約-a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どお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。

そこで、交渉参加エージェントが自身の選好どおりに交渉案を提案しつつ制約を課する方法を考える。具体的には、交渉参加エージェントが制約外の交渉案を提案した際に制約内にある最近傍の交渉案を採用する。すなわち、交渉参加エージェントが提案した交渉案 ω に対して

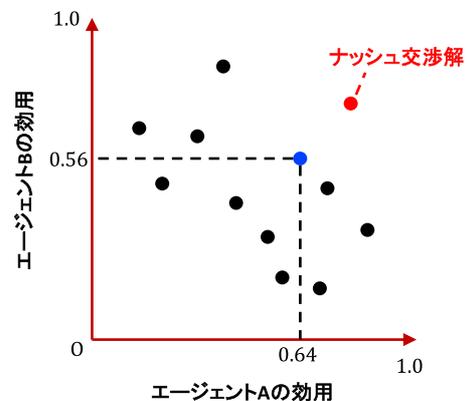


図2 効用空間の一例。この例では青い点が表す交渉案に対してエージェントAが0.64の効用を、エージェントBが0.56の効用を得る。赤い点はナッシュ交渉解である

Fig. 2 An example of utility space. In this example, Agent A obtains a utility of 0.64 and Agent B obtains a utility of 0.56. A red circle is the Nash bargaining solution.

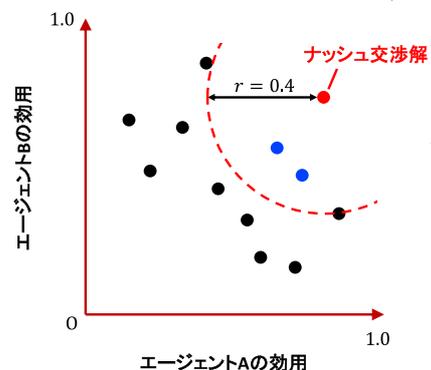


図3 第三者エージェントによる制約の一例。この例における交渉参加者は青い点もしくは赤い点のみを交渉案として提案することができる

Fig. 3 An example of constraint by the mediator agent. Agents in this example can propose only the blue points and the red point.

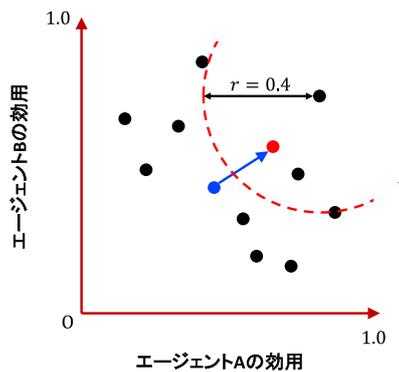


図 4 制約適用の一例. 交渉参加エージェントが青い点を提案した際に制約内の最近傍点である赤い点を交渉案として採用する

Fig. 4 An example of applying constraint. When an agent proposed the blue point, the mediator agent uses the red point as proposal instead of blue one.

$\arg \min_{\omega' \in \Omega'} \text{dist}(\omega, \omega')$ を採用する. たとえば, 図 4 に示すように, 交渉参加エージェントが制約外にある青い点を交渉案として提案した際に, 制約内に存在する交渉案で最も青い点に近い, 赤い点を交渉案として採用する. ここで第三者エージェントが制約適用前の交渉案を選好情報の推定に用いることで, 選好情報の推定精度に影響を及ぼさずに交渉に制約を課することが可能となる. この手法を制約-b とする.

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, 交渉参加者は第三者エージェントの提案を拒否できるため, 第三者エージェントの誤った選好推定を修正することが比較的容易である.

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各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 [16] を参考に Kotlin を用いて実装した. 1 回の交

Algorithm 1 プロトタイプシステムにおける 1 回の交渉

Require:

- すべての交渉案集合 Ω
- 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 ω を受諾 **and** A_c が ω を受諾 **then**
- 4: **return** ω
- 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-b) **then** ▷ 制約-b による介入の場合
- 11: $\Omega' \leftarrow A_m$ による制約
- 12: **end if**
- 13: $\omega \leftarrow A_p$ による提案
- 14: A_m は ω を基に A_p の推定モデルを更新
- 15: $\omega' \leftarrow \omega$ に対する Ω' 内の最近傍交渉案
- 16: **if** A_c が ω' を受諾 **then**
- 17: **return** ω'
- 18: **end if**
- 19: $\omega \leftarrow A_c$ による提案
- 20: A_m は ω を基に A_c の推定モデルを更新
- 21: $\omega' \leftarrow \omega$ に対する Ω' 内の最近傍交渉案
- 22: **if** A_p が ω' を受諾 **then**
- 23: **return** ω'
- 24: **end if**
- 25: $t \leftarrow t + 1$
- 26: **end while**
- 27: **return** ϕ ▷ 交渉決裂の場合は取引を中止

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. また, 本実験におけるナッシュ交渉解の導出アルゴリズムを Algorithm 2 に示す.

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, 交渉論点を支払う金額とサービスの 2 つとした. 金額は区間 $[0, 1]$ 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, たとえば $\omega = \{ \text{“金額”} = 0.5, \text{“サービス”} = \text{サービス C} \}$ の形をとる. 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 5 に金額に対する選好の種別を示す. たとえば, リスク回避的なデータ提供者は少しい金額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額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額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

表 1 $lim = 5, \alpha = 0.7, r = 0.2$ における各評価指標の平均値

Table 1 Average of each evaluation indices ($lim = 5, \alpha = 0.7, r = 0.2$).

	介入なし	介入 (制約-a)	介入 (制約-b)	介入 (提案)
ナッシュ交渉解との距離平均	0.351	0.263 (25%の改善)	0.258 (26%の改善)	0.268 (24%の改善)
交渉終了ラウンド	3.21	2.92 (9%の改善)	3.01 (6%の改善)	2.42 (25%の改善)

Algorithm 2 ナッシュ交渉解の導出

Require:

- すべての交渉案集合 Ω
- 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

Ensure:

```

ナッシュ交渉解  $\omega_{nash}$ 
1:  $u_{max} \leftarrow 0$ 
2:  $\omega_{nash} \leftarrow null$ 
3: foreach  $\omega \in \Omega$  do
4:    $u_p \leftarrow A_m$  が推定する  $A_p$  の  $\omega$  に対する効用
5:    $u_c \leftarrow A_m$  が推定する  $A_c$  の  $\omega$  に対する効用
6:   if  $u_{max} < u_p \times u_c$  then
7:      $u_{max} \leftarrow u_p \times u_c$ 
8:      $\omega_{nash} \leftarrow \omega$ 
9:   end if
10: end for
11: return  $\omega_{nash}$ 
    
```

▷ 計算量は $O(|\Omega|)$

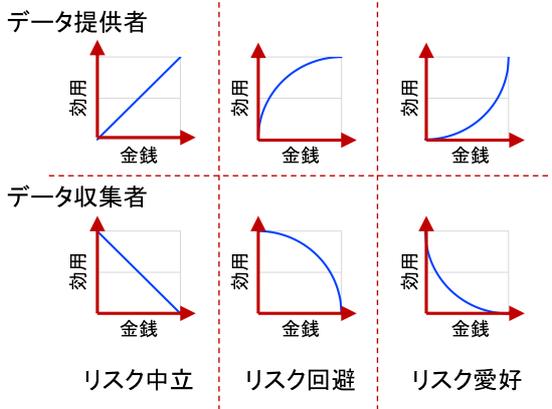


図 5 金額に対する各エージェントの選好. 各グラフの縦軸は効用の大きさ, 横軸は右側であるほど大きい金額を表す.

Fig. 5 Preferences of agents against the monetary incentive. A vertical axis shows the amount of the utility and a horizontal axis shows the amount of the monetary incentive.

好ましいサービスに効用 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. これらを金額の選好と合計して $3 \times 3! = 18$ 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額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 [17] 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 (制約-a, 制約-b), 提案による介入それぞれに対し, すべてのデータ提供者・データ収集者の組合せ ($18 \times 18 = 324$ 通り) についてそれぞれ 100 回の交渉を行った. また, パラメータセットとして Algorithm 1 における最大交渉ラウンド lim に $\{5, 60\}$, 確信度における閾値 α に $\{0.7, 0.9\}$, 制約距離 r に $\{0.05, 0.2\}$ を設定した. また, 連続値である論点 “金額” については 0.001 刻みの離散値として取り扱い, すべての交渉案集合の大きさ $|\Omega|$ は $|\{0.000, 0.001, \dots, 1.000\}| \times 3 = 3,003$ となる. なお, この条件において Algorithm 2 に示すナッシュ交渉解の計算時間を確認したところ, CPU Core i3-8100@3.60 GHz による計算 100 回の平均が 10.77 ミリ秒であったため, ナッシュ交渉解の利用は実用上問題ないといえる.

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ほかに, 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

表 1, 表 2, 表 3, 表 4 に, 実験の結果得られた各評価指標の平均値を示す. これらの表において, 括弧内の数値は介入なしと比較して改善された割合を示す.

まず, 確信度における閾値 $\alpha = 0.7$, 制約距離 $r = 0.2$ において, 最大交渉ラウンド数 $lim = 5$ の結果 (表 1) と $lim = 60$ の結果 (表 2) を比較する. 表 2 より, $lim = 60$

表 2 $lim = 60, \alpha = 0.7, r = 0.2$ における各評価指標の平均値
 Table 2 Average of each evaluation indices ($lim = 60, \alpha = 0.7, r = 0.2$).

	介入なし	介入 (制約-a)	介入 (制約-b)	介入 (提案)
ナッシュ交渉解との距離平均	0.300	0.237 (21%の改善)	0.202 (33%の改善)	0.214 (29%の改善)
交渉終了ラウンド	5.42	4.04 (26%の改善)	4.44 (18%の改善)	3.78 (30%の改善)

表 3 $lim = 60, \alpha = 0.9, r = 0.05$ における各評価指標の平均値
 Table 3 Average of each evaluation indices ($lim = 60, \alpha = 0.9, r = 0.05$).

	介入なし	介入 (制約-a)	介入 (制約-b)	介入 (提案)
ナッシュ交渉解との距離平均	0.300	0.217 (28%の改善)	0.173 (42%の改善)	0.231 (23%の改善)
交渉終了ラウンド	5.42	4.40 (19%の改善)	4.12 (24%の改善)	4.11 (23%の改善)

表 4 $lim = 60, \alpha = 0.9, r = 0.2$ における各評価指標の平均値
 Table 4 Average of each evaluation indices ($lim = 60, \alpha = 0.9, r = 0.2$).

	介入なし	介入 (制約-a)	介入 (制約-b)	介入 (提案)
ナッシュ交渉解との距離平均	0.300	0.240 (20%の改善)	0.226 (24%の改善)	0.231 (23%の改善)
交渉終了ラウンド	5.42	4.60 (15%の改善)	4.61 (15%の改善)	4.11 (24%の改善)

においては制約-bによる介入が最もナッシュ交渉解との距離平均を改善する結果となった一方、表 1 より、 $lim = 5$ においてはどの手法も 24%から 26%の改善と、改善程度に大差は見られない結果となった。

次に、最大交渉ラウンド数 $lim = 60$ 、制約距離 $r = 0.2$ において、確信度の閾値 $\alpha = 0.7$ の結果 (表 2) と $\alpha = 0.9$ の結果 (表 4) を比較する。表 2 より、 $\alpha = 0.7$ においては制約-bによる介入が最もナッシュ交渉解との距離平均を改善する結果となった一方、表 4 より、 $\alpha = 0.9$ においてはどの手法も 20%から 24%の改善と、改善程度に大差は見られない結果となった。交渉終了ラウンドについては α にかかわらず提案による介入手法が最も大きい改善を示した。

続いて、最大交渉ラウンド数 $lim = 60$ 、確信度の閾値 $\alpha = 0.9$ において、制約距離 $r = 0.05$ の結果 (表 3) と $r = 0.2$ の結果 (表 4) を比較する。表 3、表 4 より、制約-a と制約-b のどちらも制約距離 $r = 0.05$ における結果が $r = 0.2$ における結果と比較して、より大きな改善を示した。これらすべての表において、本研究で提案した介入手法の結果はいずれも介入なしの結果と比較して改善を示していることから、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いえる。

また、 $\alpha = 0.7, r = 0.05, lim = 60$ において第三者エージェントによる介入のない実験の際に採用された交渉解の分布を図 6(a)、制約-a における交渉解の分布を図 6(b)、

制約-b における交渉解の分布を図 6(c)、提案による自動交渉への介入における交渉解の分布を図 6(d) に示す。なお、結果がこのような分布を示すのは 4.2 節で述べた選好情報の組合せにより、とりうる交渉案の分布が図 7 のようになるためである。

図 8 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 8(a) は確信度の閾値 α が 0.7、図 8(b) は α が 0.9 のときの結果であるが、どちらの結果においても制約-b および提案による介入は交渉を重ねるごとに推定精度が 1.0 に近づくのに対し、制約-a による介入は確信度における閾値付近に到達後、推定精度が低下および停滞する結果を示した。なお、図 8 の横軸は 100 回の交渉における累計交渉ラウンド数であり、横軸がとりうる最大値は 4.3 節で述べた最大交渉ラウンド $lim \times 100 = 6,000$ となる。ただし、ほとんどの組合せにおいて累計交渉ラウンド数は 500 未満であったため、図 8 の横軸における最大値は 500 とした。

4.6 考察

まず、パラメータセットによる実験結果の変化について考察を行う。最大交渉ラウンド lim については、制約-a を除いて $lim = 60$ による改善程度が $lim = 5$ による改善程度を上回る結果となった。これは、 $lim = 5$ において最大交渉ラウンド数が小さくなることで第三者エージェントによる介入回数が減少したこと起因すると考えられる。現

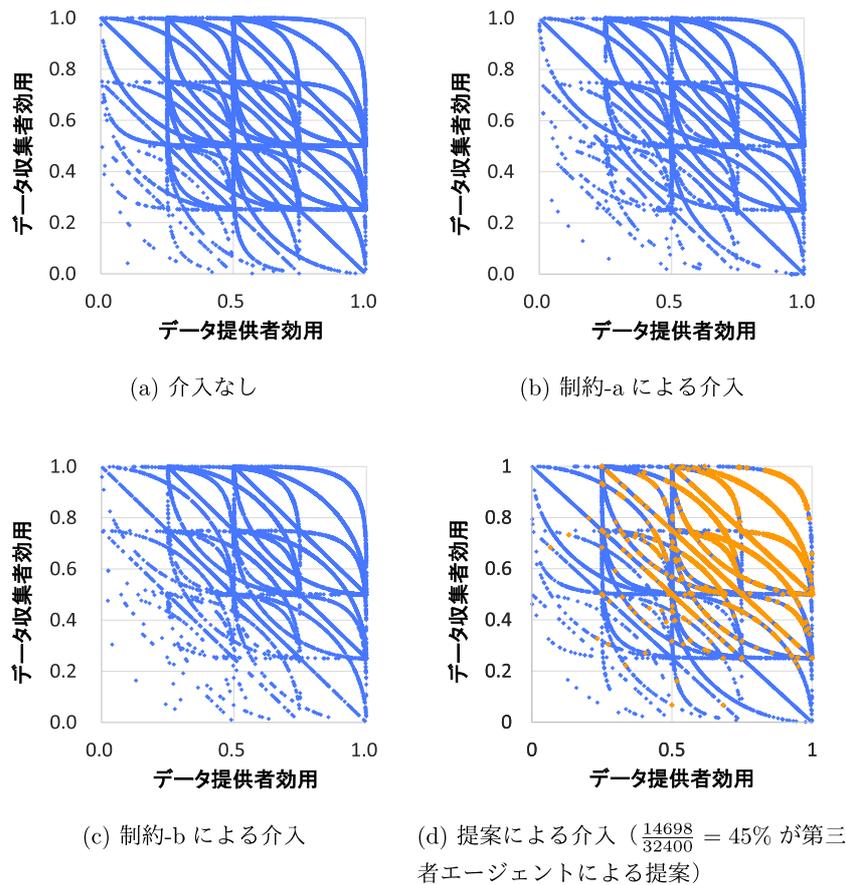


図 6 $\alpha = 0.7, r = 0.05, lim = 60$ における 32,400 回の交渉の結果. 各点は交渉結果に対するデータ提供者とデータ収集者の効用を表す. 橙色の点は交渉結果として第三者エージェントの提案が採用されたことを示す

Fig. 6 A result of 32,400 times of negotiations ($\alpha = 0.7, r = 0.05, lim = 60$). Each point shows the utility of data provider and data collector against the negotiation result. Orange points show negotiation results decided by the mediator agent.

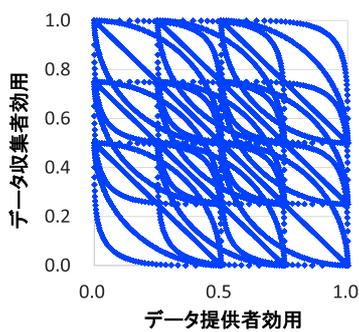


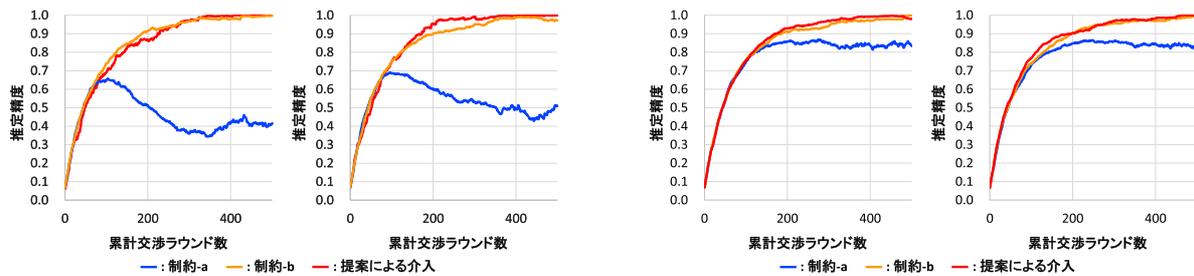
図 7 とりうるすべての交渉案を効用空間上にプロットしたグラフ
Fig. 7 All available proposal in the utility space.

に, $\alpha = 0.7, lim = 60$ において提案による介入手法を用いた場合に, 第三者エージェントが介入を行った交渉ラウンドは全体の 72.0%であったのに対し, $\alpha = 0.7, lim = 5$ においては第三者エージェントの介入は 57.5%にとどまった. このように, 実行された交渉ラウンド数が少ないことで第三者エージェントによる介入数が少なくなり, $lim = 5$

における交渉の改善程度が小さくなったと考えられる.

確信度の閾値 α については, すべての介入手法において $\alpha = 0.7$ による改善程度が $\alpha = 0.9$ による改善程度を上回る結果となった. これに関しても, $\alpha = 0.9$ において閾値が上昇することにより第三者エージェントによる介入回数が減少したことに起因すると考えられる. また, 本実験では交渉参加者の選好情報が 18 通りであるという仮定を設けているため, 選好情報の推定が容易な実験条件となっている. そのため, 本実験においては高い α の値は第三者エージェントの介入を妨げる結果となったが, 誤推定の可能性が高い実験条件においては α の値を高く設定することにより, 誤推定による影響を抑制できる可能性があると考ええる.

制約距離 r については, 制約-a, 制約-b ともに $r = 0.05$ による改善程度が $r = 0.2$ による改善程度を上回る結果となった. これについては, 制約距離が小さいことによってナッシュ交渉解により近い領域への制約となったことに起因すると考えられる. ただし, これに関しても誤推定の可



(a) $\alpha = 0.7, r = 0.05, \text{lim} = 60$ における推定精度

(b) $\alpha = 0.9, r = 0.05, \text{lim} = 60$ における推定精度

図 8 データ提供者の選好情報に対する推定精度 (各左側) とデータ収集者の選好情報に対する推定精度 (各右側)

Fig. 8 Estimation accuracies of data providers' preferences (each on the left) and data collectors' preferences (each on the right).

能性が高い実験条件においては r の値を高く設定することにより、誤推定による影響を抑制できる可能性がある。

次に、介入手法による実験結果の変化について考察を行う。表 1 から表 4 より、制約-b による介入は制約-a による介入と比較してナッシュ交渉解との距離平均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 8 が示すように、制約-a による介入では本来各エージェ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、自身の選好情報のとおり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 α を上回らない。これに対し、制約-b による介入は推定精度が低下することなく、精度良くナッシュ交渉解付近に交渉解を導くことで大きく交渉を改善した。また、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 6(d) から読み取れる。さらに、表 1 から表 4 より、多くのパラメータセットにおいて提案による介入手法が最も大きく交渉終了ラウンドを改善していること、および $\frac{14698}{32400} = 45\%$ 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、図 6(d) において、およそ $\frac{1}{2}$ 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制約-b 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し、計算機資源の消費を回避する面では、提案による自動交渉への介入が優れるといえる。

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り、データ提供者が不利にならないようにデータ提供に対する対価を決定する手法を提案した。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、データ提供者とデータ収集者の双方の意思を考慮した便益決定の手法を設計した。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] 日本 IT 団体連盟：一般社団法人日本 IT 団体連盟，入手先 (<https://www.itrenmei.jp/>) (参照 2020-04-22)。
- [2] 日本 IT 団体連盟：「データ信託」サービス (仮称)，入手先 (<https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134550.pdf>) (参照 2020-04-22)。
- [3] 日本 IT 団体連盟：地域振興プラットフォーム (仮称)，入手先 ([https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134621\(1\).pdf](https://www.itrenmei.jp/files/files20190626134621(1).pdf)) (参照 2020-04-22)。
- [4] 日本 IT 団体連盟：情報提供サービス (仮称)，入手先 (<https://www.itrenmei.jp/files/files20191225115025.pdf>) (参照 2020-04-22)。
- [5] 富士通総研：情報銀行とは何か？，入手先 (<https://www.fujitsu.com/jp/group/fri/business/topics/data-economy/information-bank/>) (参照 2020-08-19)。
- [6] 株式会社マイデータ・インテリジェンス：MEY，入手先 (<https://www.meyportal.com/>) (参照 2020-04-22)。
- [7] Jennings, N.R., Faratin, P., Lomuscio, A.R., Parsons, S., Sierra, C. and Wooldridge, M.: Automated negotiation: prospects, methods and challenges, *International Journal of Group Decision and Negotiation*, Vol.10, No.2, pp.199-215 (2001)。
- [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*, pp.61-88, Springer (2009)。
- [9] Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N.: Negotiation decision functions for autonomous agents (1998)。
- [10] Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Multi-issue negotiation under time constraints, *Proc. 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1*, pp.143-150 (2002)。
- [11] Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium in a Bargaining Model, *Econometrica*, Vol.50, No.1, pp.97-109 (1982)。
- [12] Aydoğan, R., Festen, D., Hindriks, K.V. and Jonker,

- C.M.: Alternating offers protocols for multilateral negotiation, *Modern Approaches to Agent-based Complex Automated Negotiation*, pp.153–167, Springer (2017).
- [13] 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).
- [14] Aydogan, R., Hindriks, K.V. and Jonker, C.M.: Multi-lateral Mediated Negotiation Protocols with Feedback, *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation* (2014).
- [15] 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).
- [16] Hindriks, K., Jonker, C.M., Kraus, S., Lin, R. and Tykhonov, D.: Genius: Negotiation environment for heterogeneous agents, *Proc. 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp.1397–1398 (2009).
- [17] デルフト工科大学: SimpleAgent.java, 入手先 (<https://tracinsy.ewi.tudelft.nl/pub/svn/Genius/src/main/java/agents/SimpleAgent.java>) (参照 2020-04-22).



戸嶋 丈士 (学生会員)

2019年仙台高等専門学校専攻科修了。現在、東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程在学中。自動交渉エージェントとその応用に関する研究に従事。



高橋 晶子 (正会員)

東北大学大学院情報科学研究科博士後期3年の課程修了。(独)日本学術振興会特別研究員(DC2), (PD)。仙台電波工業高等専門学校助教, 仙台高等専門学校助教を経て, 現在は同准教授(兼任)。知識処理, エージェント指向コンピューティング, P2Pネットワーク等の研究開発に従事。博士(情報科学)。



阿部 亨 (正会員)

1990年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。東北大学情報処理教育センター助手, 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授を経て, 現在, 東北大学サイバーサイエンスセンター准教授。パターン認識, 知識処理の研究開発に従事。博士(工学)。



菅沼 拓夫 (正会員)

1997年千葉工業大学大学院博士後期課程修了。同年東北大学電気通信研究所助手。同大学助教授, 准教授を経て, 2010年から東北大学サイバーサイエンスセンター教授。2019年から同センター長。ネットワーク管理技術, ネットワークミドルウェア, マルチエージェントシステム, 共生コンピューティング, サイバーフィジカルシステム等の研究開発に従事。博士(工学)。