



大規模合意形成支援のための マルチエージェント自動交渉

藤田 桂英

東京農工大学 大学院工学研究院
〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

Multi-agent Automated Negotiation for Large-scale Consensus Building

Katsuhide Fujita

Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16, Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan

1. はじめに

マルチエージェントシステムに関する研究において、自動交渉が注目されている[1,2]. 人工知能間の協調を想定した場合に、複数の合理的なエージェント（人工知能）が対立している状況では、自動的に交渉する仕組みが必要となる。また、自動交渉の成果を現実世界に応用することで、電子商取引、バリューチェーン調整の自動化、現実世界の集団意思決定支援などが実現されることから、産業界や学術界からの期待が大きい。

しかし、自動交渉の理論を具体的なシナリオに対して適用させた研究はほとんど存在しない。その大きな要因として、自動交渉手法のプライバシー（交渉参加者の秘密情報をどのくらい保護できるか）やスケーラビリティ（参加者数や論点数が膨大な場合など様々な問題に対応できるか）への対応が不十分な点や、現実シナリオを自動的にモデル化する方法がない点が挙げられる。特に、自動交渉におけるプライバシーの問題は、人間が行う交渉においては参加者ごとのプライバシー情報の公開量は交渉等の参加者ごとに公平である方が望ましく、マルチエージェントでも同様のことが考えられる。

これまでの自動交渉のプライバシー情報の公開に関して、エージェントが公開したプライバシー情報が交渉に与える影響を考慮している研究はほとんどない。唯一の既存の指標としてFujitaらの指標である公開範囲[3,4]が存在するが、これらの指標は公開された情報の交渉中における重要度が

考慮されていない。以上から、新たな情報公開量と三者間以上での交渉が想定された交渉問題に対してエージェント間の情報公開量の公平性を考慮した自動交渉プロトコルが求められている。

本研究では、三者間複数論点交渉問題に対応したエージェント間の情報公開量の公平性を考慮した自動交渉プロトコルを提案する。まず、エージェントの予測効用関数の精度に基づいた交渉中の情報公開指標を提案する。本指標は各エージェントの好みの情報である効用関数の予測に有用な情報が交渉において重要という仮定に基づいて定義する。次に、提案する新しい指標に基づいてエージェントの提案回数を調整する機構を導入した自動交渉プロトコルを提案する。提案するプロトコルでは、情報公開量に応じて各エージェントの提案回数を調整し、情報公開の少ないエージェントにより多くの情報公開を促す。交渉シミュレーション実験により、提案手法がエージェント間の情報公開量の公平性を改善していることを示す。

本報告書の一部はPRIMA2017において発表した内容である[5].

2. 三者間複数論点交渉問題

三体のエージェント A, B, C が交渉を行った結果得られる合意案が s である場合、各エージェントが交渉において得られる効用値はそれぞれ効用関数 $U_A(s), U_B(s), U_C(s)$ により決定される。各エージェントは交渉を通じて自身の効用値を最大化する。交渉シナリオは、論点と論点内の選択肢から構成

され、各論点の重みおよび論点内の各選択肢の評価値から効用関数により効用値が決定される。本研究では線形効用関数を対象とし、効用値は選択肢の評価値の重み付き線形和で算出される。

交渉には時間的な制約として時間制限が存在する。交渉の経過時間が時間制限を超過した場合、合意形成失敗として交渉は打ち切られる。また、別の時間的な制約として、割引係数が存在し、交渉の時間経過による獲得効用の減少率を示す。さらに、合意を得られずに交渉が終了した場合に獲得できる留保価格が設定されている。

具体的な交渉の流れや交渉の終了条件は交渉プロトコルによって定義される。3者間の代表的なSAOP[6]では、図1が示すように交渉に参加したエージェントが順番にBidの提案(Offer)と承諾(Accept)を繰り返し、ある提案が提案者以外に合意された場合に交渉終了する。

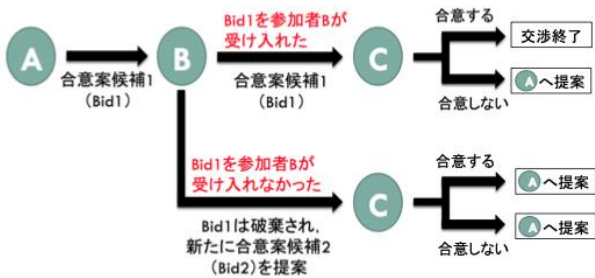


図1:Stacked Alternating Offers Protocol (SAOP)

3. 情報公開量を考慮した交渉プロトコル

3.1 交渉における情報公開量

本研究で提案する新しい指標は以下の2つの仮定に基づいている。

- 交渉においてプライバシー情報は各交渉参加者の効用情報とする。
- 広く知られている手法で予測可能な情報は既に公開されている情報と同義である。

上記より、新しく提案する交渉中に公開されるプライバシー情報量に関する指標は各エージェントの予測効用関数の予測精度により決定する。この指標において、効用関数の予測手法はすでに多くのエージェント戦略で用いられている提案頻度に基づく予測手法[7,8]を対象とする。提案頻度に基づく予測手法は、より多く提案される内容は提案者にとってより高評価であるという仮定に基づいた容易に利用可能な効用関数予測手法である。

I を交渉シナリオにおける論点集合、 V_i を論点 i 内の

の選択肢集合、 $eval(v)$ を選択肢 v の評価値、 $Estimated(v)$ を選択肢 v の予測評価値、 N_i を論点 i 内の選択肢数とした場合、エージェントの情報公開量は以下の式で計算される。

$$(\text{情報公開量}) = \frac{1}{\sum_{i \in I} N_i} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V_i} \frac{|eval(v) - Estimated(v)|}{eval(v)}$$

情報公開量は予測効用関数と実際の効用関数の誤差であるため、この値が低ければ対象のエージェントは効用関数の予測に対して有用な情報をより多く公開していることを示している。逆に情報公開量の値が高ければ、対象のエージェントは効用関数の予測に対して有用な情報をあまり公開していないことを示している。なお、効用関数の予測誤差を算出するためには正解値を把握する必要があるが、エージェントの効用関数の把握及び予測誤差の算出は中立的な立場であるメディエータが実施することを想定している。そのため、エージェントは提出した個人情報である効用関数の悪用を心配する必要はない。

3.2 情報公開量に基づいた提案順調整

提案手法では、エージェントの提案回数は情報公開量によって、個人情報である効用関数の予測に有用な情報の公開量が少ないエージェントに対してより多くの提案させることで情報の公開を促す。以下に提案順調整による提案エージェントの決定のアルゴリズムを示す。

```

Algorithm 交渉参加エージェントの情報公開量を考慮した自動交渉プロトコル
Agents: 交渉参加エージェントのリスト
Scores: 各エージェントの情報公開量
function SELECTING_NEXT_AGENT(Agent)
  for a ∈ Agents do
    Scores ← calculating_privacy_score(a)
    ▷ エージェント a の情報公開量を算出
  end for
  Scores ← normalizing_privacy_score(Scores)
  ▷ 各エージェントの情報公開量を合計 1 に正規化
  return determining_next_agent(Scores)
  ▷ 正規化した情報公開量に基づき、次に提案を作成するエージェントを決定
end function
  
```

最初に、提案指標である効用関数予測精度に基づいた情報公開量を交渉に参加する各エージェントについて算出する。提案指標の値が高ければ対象のエージェントは重要な情報をあまり公開していないことを示す。次に、算出されたエージェントごとの情報公開量を示す提案指標を全エージェント合計で1になるように正規化する。最後に、次の提案時に対象となるエージェントを正規化した提案指標にもとづいて決定する。

本手法では、提案指標は値が高いほど重要情報の

公開量が少ないため、正規化された値をエージェントの提案確率に用いることで情報公開が少ないエージェントに対して提案回数を増加させ、情報公開を促すことが可能になる。

4. 評価実験

4.1 提案手法の各エージェントへの影響

エージェント間での個人情報の公開量が公平でない場合に、提案プロトコルが各エージェントの個人効用に与える影響を検証する必要がある。個人情報の公開量と個人効用への影響を検証するため、検証用エージェントを作成した。検証用エージェントは提案手法である情報公開量と交渉中の個人情報の公開量に関する先行手法[3,4]である公開範囲のそれぞれを調整するように提案Bidを作成する。以下に、提案Bid作成のアルゴリズムの詳細を示す。

```

Algorithm 個人情報の公開量を考慮した提案 Bid の作成
TargetUtility: 提案 Bid 作成の基準効用値
IsMoreRevealing: 個人情報を公開するかどうか
CandidateBids: 候補 Bid のリスト
function BIDCREATION(TargetUtility, IsMoreRevealing)
  OfferBid ← Null
  SortOrder ← (IsMoreRevealing = True) ? ASC : DESC
  OfferedFlag ← (IsMoreRevealing = True) ? False : True
  CandidateBids ← get.bids.near.utility(TargetUtility, 10)
  ▷ 基準効用値付近の効用を持つ Bid を 10 個作成する
  CandidateBids ← sort.by.privacy.score(CandidateBids, SortOrder)
  ▷ Bid を提案した場合の情報公開量 (提案手法) で昇順/降順ソート
  for bid ∈ CandidateBids do
    if IsAlreadyOffered(bid) = OfferedFlag then ▷ 今まで未提案/既提案の Bid を選択
      OfferBid ← bid
      break
    end if
  end for
  return OfferBid
end function

```

まず、基準効用値付近の効用を持つBidを複数個作成する。その後、作成したBidの情報公開量により昇順もしくは降順にソートする。個人情報を公開するようにBidを作成する場合は昇順に、公開しないようにBidを作成する場合には降順にソートする。その後、ソートしたBidリストを走査し、公開する場合は今までに未提案のBid、非公開の場合は既提案のBidを選択する。提案Bid作成時の基準効用値は譲歩関数によって算出される。交渉の経過時間を t と表現した場合の検証用エージェントの譲歩関数は (基準効用値) = $1.0 - t$ となる。個人情報を公開する場合、しない場合、ともに共通の譲歩関数を用いることで、純粋に個人情報公開量が個人効用値に及ぼす影響を検証することが可能となる。

交渉中の個人情報公開量の差による個人効用値への影響検証のための交渉実験は、以下のエージェ

ントの組み合わせで実施した。

- パターン1: 個人情報を公開1体 + 個人情報を非公開2体
- パターン2: 個人情報を公開1体 + 個人情報を非公開2体
- パターン3: 個人情報を公開3体
- パターン4: 個人情報を非公開3体

表1に上記の各パターンにおける各エージェントの個人効用値、情報公開量、公開範囲のエージェント間の差を示す標準偏差の20回分の平均値を示す。提案手法である情報公開量ならびに既存手法の公開範囲はパターン1,2ではエージェント間で差が存在するのに対して、パターン3,4では明らかにパターン1,2より差が小さいことから、提案手法の個人情報公開量の調整が正しく機能していることが確認できる。また、パターン3,4ではエージェント間の個人効用値にほとんど差が存在しないのに対して、パターン1,2では数%の差が存在していることから、共通の譲歩関数を用いたエージェントであっても個人情報の公開量に差がある場合は得られる個人効用値にも影響する。

表1: 各指標の標準偏差の平均 (20回分)

	個人効用	提案指標	既存指標
パターン1	0.01647	0.4575	0.04885
パターン2	0.02236	0.4956	0.05929
パターン3	0.002753	0.02858	0.0002306
パターン4	0.001151	0.001390	0.0001885

4.2 理想的エージェントでの提案手法の有効性

本研究にて提案している交渉プロトコルは、効用関数予測誤差をもとにした情報公開量を示す指標を基準としている。提案プロトコルが対象とする交渉エージェントは、Bidの提案を通して個人情報を公開する。つまり、提案すればするほど効用関数の予測精度が向上するようBidを提案する。

しかし、既存の自動交渉戦略は提案するに従って効用関数予測精度が向上するとは限らない。以上から、提案する自動交渉プロトコルに対して理想的な行動をとるエージェントによる有効性の検証が必要となる。

提案プロトコルの有効性を検証するため、検証用エージェントを作成した。検証用エージェントは以下のように提案手法である情報公開量のみを調整するように提案Bid作成を実施する。以下に、検証用エージェントを示す。

```

Algorithm 提案手法である情報公開量のみを考慮した提案 Bid の作成
TargetUtility: 提案 Bid 作成の基準効用値
RevealingLevel: 個人情報の公開レベル (3 パターン: 1, 5, 10)
CandidateBids: 候補 Bid のリスト
function BIDCREATION(TargetUtility, RevealingLevel)
  CandidateBids ← get_bids_near_utility(TargetUtility, 10)
  ▷ 基準効用値付近の効用を持つ Bid を 10 個作成する
  CandidateBids ← sort_by_privacy_score(CandidateBids, ASC)
  ▷ Bid を提案した場合の情報公開量 (提案手法) で昇順ソート
  return CandidateBids[RevealingLevel]
end function

```

まず、基準効用値付近の効用を持つBidを複数個作成する。その後、作成したBidの情報公開量により昇順にソートする。交渉は3エージェントで実施するため、情報公開量は積極的に値を小さくする場合と大きくする場合、そしてその中間の3パターンに調整する。積極的に情報公開を少なくする場合には昇順ソート後のBidリストの先頭Bidを、逆に情報公開を多く調整する場合にはリストの最後尾Bidを、中間の場合にはリストの中央のBidを選択する。

提案作成の基準効用を示す譲歩関数は既存の交渉戦略を活用する。具体的には、Kawaguchiらの二者間自動交渉戦略を三者間に拡張した譲歩関数を用いる[9]。検証実験では、提案順調整の有無によるエージェント間の情報公開量の差の変化をエージェント間の情報公開量の差の標準偏差における20回分の平均値を比較する。

図2より積極的に情報公開するエージェントと中間のエージェントの情報公開量の値はほぼ同等であるが、情報公開しないエージェントの値は若干減少しており、個人情報の公開量の増加がみられる。以上から、提案手法にとって理想的な戦略をとるエージェントによる検証では、提案手法はエージェント間の個人情報公開量の公平性の改善に有効であることが示された。

4.3 最新の自動交渉戦略とのトーナメント対戦

提案手法であるエージェント間の個人情報公開量を考慮した自動交渉プロトコルを評価するため、ANAC2016[10]にて提案された最新の自動交渉戦略によるトーナメント対戦における交渉シミュレーション実験を実施する。

評価実験の具体的な設定を以下に示す。

- 実験方法：総当り戦
- エージェント数：6体 (ANAC2016の上位1~6位: Caduceus, YXAgent, ParsCat, Farma, MyAgent, Atlas3)
- 交渉シナリオ：party_domainシナリオ (プロファイル1~6)
- 交渉制限時間：180秒

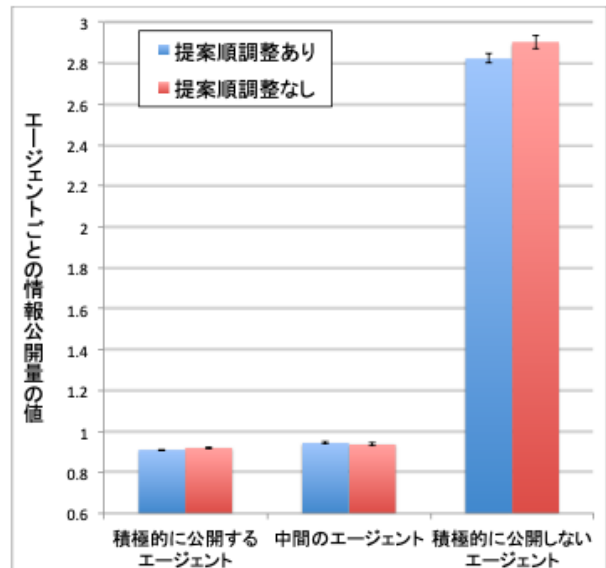


図2: 検証用エージェントの提案順調整の有無による情報公開量の値の変化

- 効用割引係数: 1.0
- 留保価格: 0
- 総当りの繰り返し回数: 20回
- 提案手法の利用パターン: 3パターン(提案順調整あり(基準: 情報公開量), 提案順調整あり(基準: 公開範囲), 提案順調整なし)

本実験では、提案手法である情報公開量、既存手法の公開範囲と獲得した個人効用値を比較する。

「提案順調整あり(情報公開量)」は提案手法である提案順調整を利用し基準指標が提案指標である情報公開量である。「提案順調整あり(公開範囲)」は基準指標として公開範囲を利用した場合、「提案順調整なし」は提案順調整自体を実施しない場合を示す。

図3に情報公開量の標準偏差の総当り20回分の平均値を示す。情報公開量の提案順調整を基準とした場合、各エージェントの情報公開量の標準偏差が明らかに減少している。しかし、公開範囲を基準とした場合には逆に公平性が悪化してしまい、情報公開量の値の公平性を改善するためには公開範囲を提案順調整の基準とすることは適していない。この理由は、公開範囲は全Bidに対する提案済Bidの単純な割合であるために効用関数の予測に影響を与える情報かどうかは考慮していないからである。以上から、提案手法である情報公開量ならびに提案順調整を導入した自動交渉プロトコルは、プライバシー情報の公開量の公平性の改善

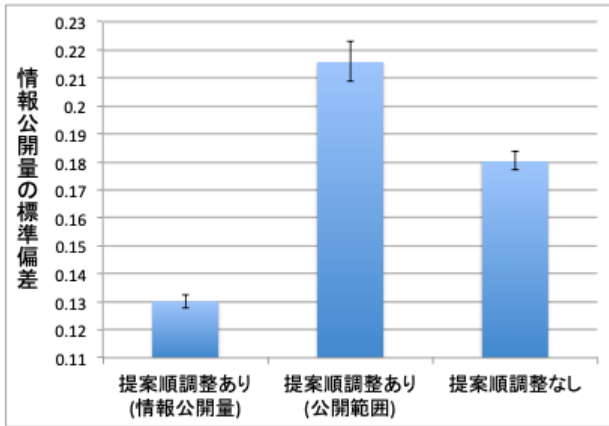


図3:情報公開量の標準偏差の平均値
(エラーバーは標準偏差)

に成功した。

図4に公開範囲の標準偏差の総当たり20回分の平均値を示す。公開範囲自身を基準とした場合、エージェント間の公開範囲の標準偏差は大きく減少している。また、公開範囲を基準とした場合よりも改善量は小さいが、提案指標である情報公開量を基準とした場合にも公開範囲が示す個人情報の公開量の公平性は改善している。これは、公開範囲を提案順調整の基準とした場合には情報公開量の公平性が悪化してしまったこととは逆の傾向である。以上から、提案順調整の基準には既存指標である公開範囲ではなく提案指標である情報公開量を採用することが、交渉中の個人情報の公開量の公平性改善に有効である。

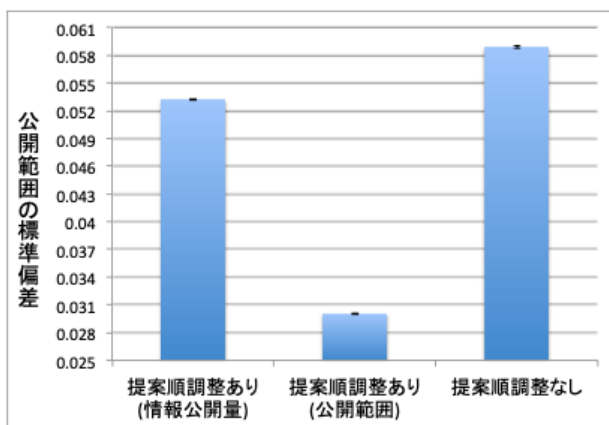


図4:公開範囲の標準偏差の平均値
(エラーバーは標準偏差)

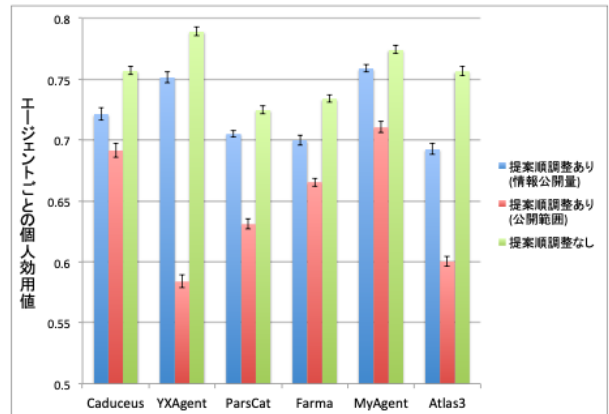


図5:各エージェントの個人効用の平均値
(エラーバーは標準偏差)

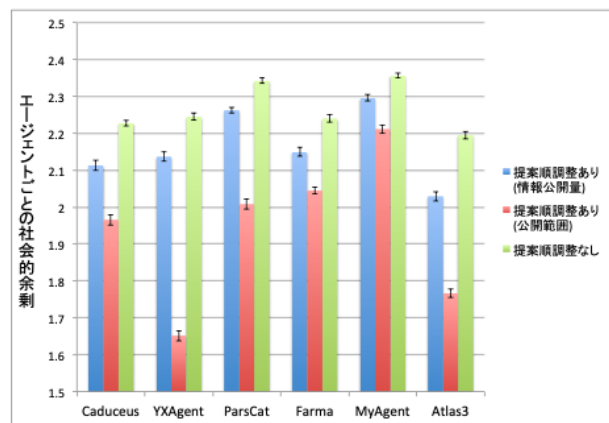


図6:各エージェントの社会的余剰の平均値
(エラーバーは標準偏差)

図5と図6に各エージェントの獲得した個人効用と社会的余剰の総当たり20回分の平均値をそれぞれ示す。提案順調整の基準によらず、個人効用および社会的余剰が提案順調整によって悪化した。個人効用および社会的余剰が減少してしまった理由としては、提案順調整によってエージェントごとに提案回数を変化させることは個人情報の公開量の公平性改善には有効であったが、提案回数不公平になったことが考えられる。特に、公開範囲を提案順調整の基準とした場合には、明らかにエージェント間で提案回数が公平ではない。思考時間が長いために提案回数が少なくなりがちなCaduceusの提案回数が倍以上になっているだけでなく、公開範囲が示す個人情報の公開量が多かったYXAgentとParsCatは提案回数が25%程度となった。

一方、提案指標である情報公開量を基準とした提

案順調整の場合には、提案回数は変化しているが、元々の提案回数からの乖離はそこまで大きくなく、個人効用、社会的余剰に関しても公開範囲を基準とした場合より小さい。以上から、交渉の効率低下の原因は提案回数の公平性の変化であり、提案回数の公平性への影響が小さい提案指標の情報公開量を提案順調整の基準にすることが適している。

5. まとめ

本研究では、交渉中のプライバシー情報の公開に関する新しい指標である情報公開量と、提案指標を基準としてエージェントの提案回数を調整する提案順調整手法を提案した。シミュレーション実験の結果、提案指標を基準とした提案順調整により各エージェントの個人情報の公開量の公平性が改善していることが明らかになった。

今後の課題として、提案手法による交渉の効率低下への対策や非協調エージェントが意図的に個人情報を公開しない場合への対応が考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人高柳健次郎財団の助成によるものであり、関係各位に謝意を表す。また、本研究を共同で実施した東京農工大学卒業生の篠原裕幸君に感謝する。

参考文献

- [1] Sarit Kraus. Strategic Negotiation in Multiagent Environments. Mit Press, October 2001.
- [2] Tim Baarslag, Katsuhide Fujita, et.al. Evaluating practical negotiating agents: Results and analysis of the 2011 international competition. *Artificial Intelligence*, vol.198, pp.73-103 (2013)
- [3] 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公開範囲の調整に基づく交渉手段の実現. *コンピュータソフトウェア*, Vol. 25, No. 4, pp. 4 167-4 180, 2008.
- [4] Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein. A preliminary result on a representative-based multi-round protocol for multi-issue negotiations. In 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2008), pp. 1573-1576, 2008.
- [5] Hiroyuki Shinohara and Katsuhide Fujita. Alternating Offers Protocol considering Fair Privacy for Multilateral Closed Negotiation. The 20th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA2017), pp.533-541, 2017.
- [6] Reyhan Aydogan, David Festen, Koen V. Hindriks, and Catholijn M. Jonker. Alternating offers protocols for multilateral negotiation. *Modern Approaches to Agent-based Complex Automated Negotiation*. Springer, pp 153-167, 2016.
- [7] Farhad Zafari and Faria Nassiri Mofakham. POPPONENT: highly accurate, individually and socially efficient opponent preference model in bilateral multi issue negotiations. In Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2017), pp. 5100-5104, 2017.
- [8] Okan Tunali, Reyhan Aydogan, and Victor Sanchez-Anguix. Rethinking frequency opponent modeling in automated negotiation. In Proceedings of 20th International Conference Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2017), pp. 263-279, 2017.
- [9] Shogo Kawaguchi, Katsuhide Fujita, and Takayuki Ito. Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiation agents competition (anac-10). In 24th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE2011), pp. 501-510, 2011.
- [10] Reyhan Aydoan, Tim Baarslag, Katsuhide Fujita, Koen Hindriks, Takayuki Ito, and Catholijn Jonker. The seventh international automated negotiating agents competition (ANAC 2016). <http://www.tuat.ac.jp/~katfujii/ANAC2016/>, 2016.