

## 逐次 2 者間交渉問題における協調および競争スイッチング戦略

望月 和真<sup>†</sup> 藤田 桂英<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京農工大学 工学部 知能情報システム工学科 <sup>‡</sup> 東京農工大学大学院 グローバルイノベーション研究院

### 1. 序論

近年, マルチエージェントシステム (MAS) における合意形成は重要な研究課題となっている. 特に, 利害の対立するエージェント間での自動交渉は, 実社会での効率的な資源配分やタスク割り当てを実現するのに不可欠である. 本稿では, エージェント自動交渉の国際競技会 ANAC[1] の Automated Negotiation League (ANL) を対象とした, 新たなエージェント **a4e (Agent for Equilibrium)** を提案する. a4e は, 相手の譲歩度合いを動的に推定するモデルを用いて交渉戦略を柔軟に切り替えることで, 自身の獲得効用最大化および合意率の向上を目指す.

### 2. 問題設定

今大会 ANL2025 の題材は, **逐次 2 者間自動交渉問題**である. 本ルールの概要を以下の図 1 に示す.

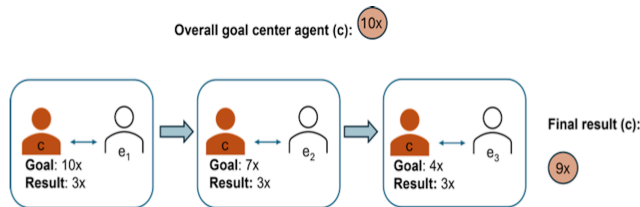


図 1 : ANL2025 のルール (逐次 2 者間交渉)

ここで  $c$  はセンター,  $e_i (i \in \mathbb{N})$  はエッジのエージェントを指す.  $c$  は, エッジ  $e_1, e_2, \dots$  と順に 1 対 1 交渉を行う. それぞれの交渉は独立しており,  $c$  は将来対戦する  $e_i$  の情報を事前に知ることはできない.

$c$  は, 全交渉を通じた目標 (Overall goal: 10x) を持つ.

- まずは最初の相手  $e_1$  と交渉し, ここでは 3 個の獲得で合意したとする (Result: 3x). すると,  $c$  の残りの必要数は  $10 - 3 = 7$  個となる (Goal: 7x).
- 次に  $e_2$  と交渉を行う. 同じく 3 個で合意した場合,  $c$  の残りの必要数は  $7 - 3 = 4$  個となる (Goal: 4x).
- 最終的に  $e_3$  と 3 個で合意した場合,  $c$  の合計獲得

Switching Strategy for Cooperation and Competition in Sequential Bilateral Negotiation

<sup>†</sup> Department of Electrical Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

<sup>‡</sup> Institute of Global Innovation Research, Tokyo University of Agriculture and Technology

数は  $3 \times 3 = 9$  個となり, 初期目標 10 個には届かない (Final result : 9x < Overall goal : 10x).

それぞれの二者間交渉は AOP プロトコル (交互提案) で実施される. また, エージェントの獲得効用は, 交渉の達成度合いや予算制約の順守状況に応じて Center/Edge の役割別に導出される ( $u_c, u_e [0 \leq u_c, u_e \leq 1]$ ).

### 3. 提案エージェント a4e

a4e は Begga[2] の手法のように, 単一の戦略に固執せず, [Nash/Individual/Hybrid] の 3 つの戦略モードを併せ持つ. 相手が協調的であれば協調的な Nash で社会的余剰の最大化 (Win-Win) を目指し, 相手が競争的あるいは自分が優位であれば利己的な Individual で自身の利益確保を優先する (Selfish). これらのふるまいを交渉の状況に応じて柔軟に切り替える点が本エージェント最大の特徴である.

#### 3.1 Bidding Strategy (提案戦略)

提案の基本効用レベル  $L(t) = 1.0 - t^e$  ( $e$  は戦略依存) は, PolyAspiration 曲線 (図 2) に従う. 交渉初期は強気に最大効用 1.0 を目指すが, 時間経過とともに譲歩し, 決裂を回避するため終盤は 0.2 まで急激に目標を下げる.

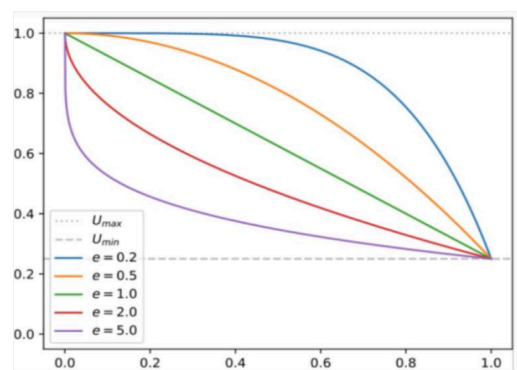


図 2 : a4e 譲歩曲線 (横軸: 時刻, 縦軸: 提案 Bid 効用値)

Individual は戦略的上乗せ (攻撃性  $\alpha$ , 相手の弱み  $\omega$ ) により, その時点で提案すべき目標効用値を決定する.

$$L_{agg} = L(t) + (0.4 \times \alpha) + 0.3 \times (\omega - 0.5) \dots (1)$$

時間  $t$  における提案の効用  $U(t)$ , 交渉決裂のリスク評価  $R [0 \leq L(t), R \leq 1.0]$  は, 以下の表 1 のように定義される.

表1 : 戦略モードごとの Bidding

項目	Nash	Individual
$U(t) =$	$NP_{max}(\geq 0.95 \times L(t))$	$L_{agg} \leq U \leq L_{agg} + \delta$
$R =$	$\min(1.0, R_{time} + R_{opp} + R_{var} + R_{per-f}) \cdot \dots \cdot (2)$	

また、相対時間  $t$  や算出リスク  $R$  に基づいて、以下のロジックで自身の交渉戦略を選択する。

- **序盤** ( $t < 0.3$ ): 相手が協調的なら Nash, それ以外は Individual を選択
- **中盤** ( $0.3 \leq t < 0.7$ ): リスクが高い ( $R > 0.2$ ) 場合、安全策として今までで最も成績の良い戦略を選択
- **終盤** ( $t \geq 0.7$ ): リスクが非常に高い ( $R > 0.5$ ) 場合は Individual を選択, それ以外は Hybrid を選択

### 3.2 Opponent Modeling (相手モデリング)

全戦略共通の機能である。相手の効用関数は未知であるため、過去提案との類似度  $Sim$  や頻度分析を用いたトレンドから効用の推定を行う。効用の平均値が高く増加傾向にあれば Cooperative, 低く減少傾向にあれば Competitive と判定する。これにより提案  $\omega$  におけるナッシュ積 NP を導出できる (式 3)。

$$NP = U_{self}(\omega) \times U_{opp\_est}(\omega) \quad \dots \cdot (3)$$

### 3.3 Acceptance Strategy (受入戦略)

相手からの提案を受諾するか否かは、戦略に応じて補正された有効閾値 Effective Level を用いて判定する。

$$Accept[if]: U_{self}(offer) > EffectiveLevel \quad \dots \cdot (4)$$

- **Nash 戦略時**: NP が高い ( $> 0.4$ ) 提案には負のボーナスを与え、閾値を下げることで合意を促進
- **Individual 戦略時**: 自身の攻撃性 (Aggression) に応じて閾値を引き上げ、安易な妥協を防ぐ
- **Hybrid 戦略時**: Nash 要素と Individual 要素をそれぞれ重み付けして閾値を決定

### 3.4 パラメータ設定

a4e の主なパラメータを示す。Hybrid の初期重みは Nash=0.2, Individual=0.8 で値は相手に応じて変動する。学習率 (=0.2) は、対戦ごとの成績を緩やかに学習し将来の交渉に活かす。リスク  $R$  が閾値 (中盤 0.2, 終盤 0.5) を超えた場合は、実績のもと最良戦略に強制的に切り替える。

以上より、本手法 a4e は、柔軟性が高く相手のタイプやリスク評価に合わせて動的に振る舞いを変えることができる。その一方で、複数の戦略を統合しているためパラメータ調整が複雑である点が課題である。

## 4. 提案手法の評価

### 4.1 ANL2025 の結果

a4e の有効性を検証するため、ANL2025 に本エージェントを提出し、実践形式の対戦を実行した。今回の評価指標としては、提出エージェントが Center/Edge の場合についてトーナメントを N 回実行し ( $u_c = \sum_{i=1}^N u_c(i)/N, u_e = \sum_{i=1}^N u_e(i)/N$ ), 効用平均の累計  $Score = \frac{u_c + u_e}{2}$  が高いものから順位付けされた。予選で定期的に行われたトーナメント (パラメータ違い) の結果として 3/4/6 位など上位成績を多く残し、IJCAI で催された ANL 決勝では最終 4 位を獲得した (表 2)。

表2 : ANL2025 決勝結果 (上位 5 名の評価を抜粋)

Rank	Agent	Center	Edge	Score
1	RUFL	0.7136	0.0843	0.3990
2	Sac	0.7333	0.0638	0.3985
3	UfunAT	0.6856	0.0777	0.3817
4	<b>a4e</b>	<b>0.6498</b>	<b>0.0874</b>	<b>0.3686</b>
5	W	0.6095	0.0897	0.3496

### 4.2 考察

a4e が上位入賞できた主な要因は、リスク評価に基づく動的な戦略スイッチング機能がうまく機能したためと考えられる。実際の大会環境には多様な戦略が混在していたが、a4e は、協調的相手に対しては Nash 戦略をとることで社会的余剰の恩恵を受けつつ、利己的相手に対しては Individual 戦略へ切り替えることで不当な合意を強要されることを防止した。大敗を防ぎつつ取れるところで確実に得点を伸ばす適応的振る舞いが、スコア (特に  $u_e$ ) を底上げし、総合 4 位という結果に繋がったと推察される。

## 5. まとめ

本稿では、ANAC2025 の ANL に自動交渉エージェント a4e を提案し、その有効性を評価した。提案手法は、戦略スイッチングによる交渉相手への動的で柔軟な適応戦略により、従来手法よりも効率的な合意形成を実現し、IJCAI で行われた決勝で 4 位という成果を挙げた。今後の課題として、非線形でモデリングが困難な効用関数を持つ交渉相手への対応や、3 者以上が関わるより複雑な多者間交渉問題への拡張などが考えられる。

### 参考文献

- [1] 16th Automated Negotiating Agents Competition, <https://scml.cs.brown.edu/anac>.
- [2] Pallavi Bagga, Nicola Paoletti, Kostas Stathis. "Deep Learnable Strategy Templates for Multi-Issue Bilateral Negotiation," AAMAS'22, pp.1533-1535, 2022. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3535850.3536025>.