

マルチエージェント環境における 交渉のモデル

大沢 英一

公立ほこだて未来大学 情報アーキテクチャ学科

(分散協調システム論)

内容

1. 概論
2. ゲーム理論に基づく交渉のモデル
 - (a) 合理的エージェント
 - (b) 合意形成の枠組
 - (c) 統合的交渉プロトコル
 - (d) プロトコルに求められる性質
3. 交渉プロトコル

概論

§ マルチエージェント環境

複数のエージェントが独立の目標を持つ環境

⇒ ゴール間に競合や協調などの様々な利害関係が生じる

§ 交渉

相互の利益のために、

- 自分の要求に必要な情報を交換
- 相互の要求を局所的に評価
- 最終的には相互の利害を考慮した合意を形成

⇒ 合意は、目標の変更 (妥協) や行為の整合や共同などを含み、結果として、大局的な協調動作となる。

ゲーム理論に基づく交渉のモデル

Definition 1 (合理的エージェント) エージェントとは、その持つ基本意思決定原理/機構に基づき自己の信念や興味(願望, 意図)に応じて行動する主体.

⇒ 意思決定原理/機構としては、効用最大化原理(経済的合理性)や論理的整合性(論理的合理性)などがある.

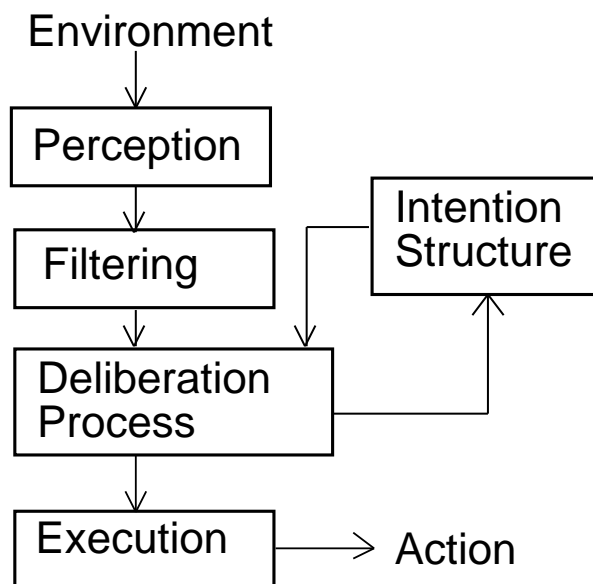


図 1: Agent architecture

合意形成の枠組

§ 合理的エージェント

自己の効用を最大化 (Select $s \in \{s^i\}$, s.t. $u(s) = \max_{s^i} u(s^i)$)

§ 妥結案

合意の候補 (一般には複数ある). $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$

§ 合意 (妥結点)

交渉の結果として得られる合意 (妥結点) は, 全てのエージェントによって受け入れられなければならない.

⇒ 複数の妥結案があったときに, どれを合意とするかは自明ではない

合意形成の枠組 (2/)

§ 交渉が成功する場合

- 交渉が成立した場合に得られる効用 u_s
- 交渉が不成立に終わった場合に得られると予想される効用 u_f

u_s が u_f よりも大きいという保証があること.

§ 合意 (妥結点) の満たす性質

個合理性: 妥結点における各エージェントの効用は, 交渉が不成立の場合に得られる効用未満であってはならない.

共同合理性 (パレート最適): 交渉は, 双方のエージェントの効用がよりよくなる妥結案があるある限り継続される. つまり, 合意が得られた場合, 双方のエージェントの効用をさらに改善する妥結案が存在しない.

⇒ この二つの性質を満たす妥結案の集合を交渉集合とよぶ.

プランニング –準備–

§ プランニング

初期状態から目標を含む状態へ至る行為(動作)系列の探索 [McCarthy and Hayes69]

Definition 2 (ゴール)

- 充足したい述語の集合 g
- G は g の全ての述語を充足する世界状態の集合

Definition 3 (オペレーション)

$$o : ST \longrightarrow ST$$

ただし, ST はすべての可能な世界の状態集合.

Definition 4 (プラン) オペレーションの合成. プラン p は, 世界を状態 $s \in ST$ から状態 $f \in ST$ へと変化させる.

$$p = [o_i]_{(i=1, \dots, n)} : s \longrightarrow f$$

$$(i.e. f = o_n(o_{n-1}(\dots o_1(s) \dots)))$$

Definition 5 (プランニング) プランの探索.

$$p : s \longrightarrow f, s.t. f \in G$$

プランニング –準備–(2/)

§ 古典的プランニング

問題空間に単一のエージェントしか存在しないと仮定 (例 STRIPS [Fikes and Nilsson 71]) したプランニング.

- 問題空間の変化は, そのエージェントの動作による

⇒ 問題空間の変化に関する推論は, 自己の動作のみを考慮に入ればよい.

プランニング –準備–(3/)

§相互作用の例

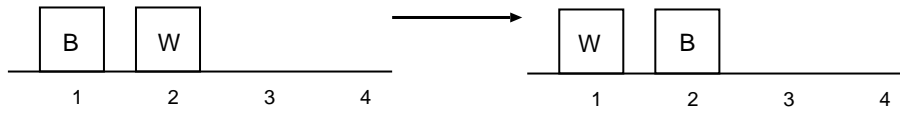


図 2: 協調状況

[ゴール]

エージェント A: $at(2, B), ontable(B)$

エージェント B: $at(1, W), ontable(W)$

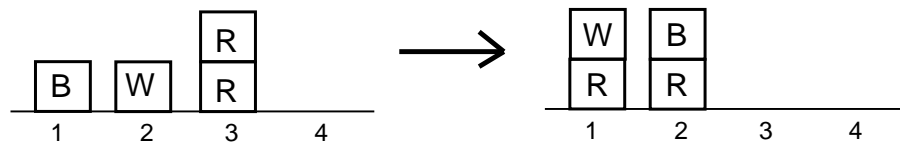


図 3: 妥協状況

[ゴール]

エージェント A: $at(2, B), \neg ontable(B)$

エージェント B: $at(1, W), \neg ontable(W)$

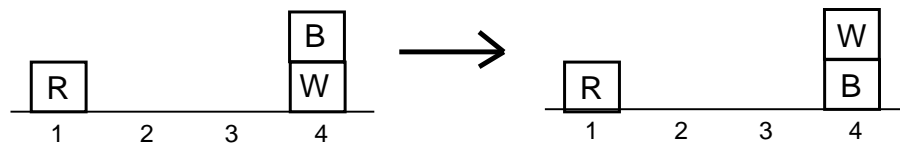


図 4: 競合状況

[ゴール]

エージェント A: $at(4, B), at(4, W), \neg ontable(W), at(2, R)$

エージェント B: $at(4, B), at(4, W), \neg ontable(W), at(3, R)$

プランニング –準備–(4/)

§ マルチエージェント・プランニング

問題空間に複数のエージェントが存在. 単一, もしくは複数エージェントの行動に関するプランニング.

- 協調, 競合を起こす
- 交渉 (競合解消) を行なう
- 共同する (例えば, 単独では達成できない目標)

⇒ 他のエージェントとの相互作用を考慮する必要
古典的プランニングでは扱える目標が極端に制限される

交渉プロトコル

§ 統合的交渉プロトコル [Zlotkin90]

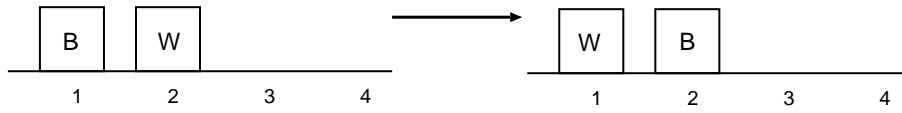


図 5: 協調状況

[ゴール]

エージェント A: $at(2, B)$

エージェント B: $at(1, W)$

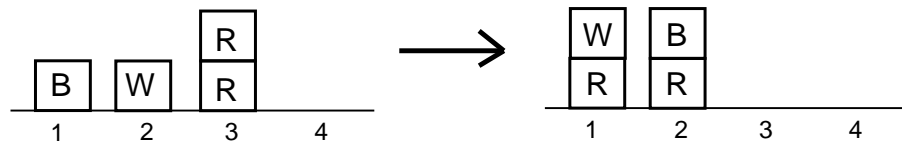


図 6: 妥協状況

[ゴール]

エージェント A: $at(2, B), \neg ontable(B)$

エージェント B: $at(1, W), \neg ontable(W)$

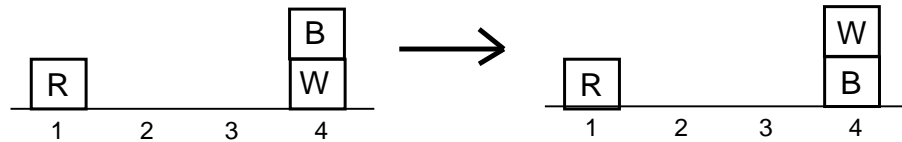


図 7: 競合状況

[ゴール]

エージェント A: $at(4, B), at(4, W), \neg ontable(W), at(2, R)$

エージェント B: $at(4, B), at(4, W), \neg ontable(W), at(3, R)$

交渉プロトコル (2/)

§ Zlotkin90 続き

Definition 6 (ゴール)

- エージェント $i \in \{A, B\}$ のゴール g_i は充足したい述語の集合
- G_i は g_i の全ての述語を充足する世界状態の集合

Definition 7 (プラン)

- オペレーションの合成. 世界を状態 $s \in ST$ から状態 $f \in ST$ へと変化させる 1 エージェント・プラン $p = [o_i]_{(i=1, \dots, n)}$.
ただし, $f = o_n(o_{n-1}(\dots o_1(s) \dots))$.
- ジョイント・プラン J は各エージェントのプランの対 (P_A, P_B) とスケジュール (和集合上の半順序).

Definition 8 (コスト)

- コスト関数 $cost : OP \rightarrow \mathcal{N}$ が存在する
- プラン $P = [o_1, o_2, \dots, o_n]$ のコスト $Cost(P) = \sum_{k=1}^n cost(o_k)$
- ジョイント・プラン $J = (P_A, P_B)$ に対して, $Cost_i(J) = Cost(P_i)$

交渉プロトコル (3/)

§ Zlotkin90 続き

Definition 9 (最小コスト・プラン)

- $s \rightarrow f$ (s, f は状態) は状態 s から f へと変化させる最小コスト 1 人エージェント・プラン
- $s \rightarrow F$ (F は状態集合) は状態 s から F 中の一つの状態へ変化させる最小コスト 1 人エージェントプラン

$$Cost(s \rightarrow F) = \min_{f \in F: s \rightarrow f \text{ is defined}} Cost(s \rightarrow f)$$

Definition 10 (ディール)

- ディール δ : 状態 s を状態 $G_A \cap G_B$ にするジョイント・プラン J .
ディール δ のエージェント i に対するユーティリティは
 $Utility_i(\delta) = Cost(s \rightarrow G_i) - Cost_i(\delta)$
- 個合理 : $\forall i \text{ } Utility_i(\delta) \geq 0$
- パレート最適 : ディール δ に対して, あるエージェントにとっては良く, 他のエージェントにとって悪くない他のディールが存在しない
- 交渉集合 NS : 個合理かつパレート最適なディールの集合

交渉プロトコル (4/)

§ Zlotkin90 続き

Definition 11 (和条件と最小条件)

- 和条件 : $\sum_{i \in A, B} \text{Cost}(s \rightarrow G_i) \geq \sum_{i \in A, B} \text{Cost}_i(J)$
- 最小条件 : $\min_{i \in A, B} \text{Cost}(s \rightarrow G_i) \geq \min_{i \in A, B} \text{Cost}_i(J)$

定理 [協調 1]

交渉集合 $NS \neq \emptyset$ のとき, またそのときに限りジョイント・プラン $J(s \rightarrow G_A \cap G_B)$ が存在し, J は和条件と最小条件を満たす.

Definition 12 (価値) W_i はエージェント i がゴール g_i を達成するのに払える最大予想コスト.

Definition 13 (ユーティリティの再定義)

$$Utility_i(\delta) = W_i - Cost_i(\delta)$$

交渉プロトコル (5/)

§ Zlotkin90 続き

定理 [協調 2]

Definition 10,11 の $Cost(s \rightarrow G_i)$ を W_i に変えても Theorem 1 が成立する.

相互作用の状況は以下の 3 つに分類される.

- 競合：交渉集合が空
- 妥協：交渉集合がある (他のエージェントの存在が歓迎されない). 交渉集合中のいずれかのディールを選ぶほうが, 初期状態のまま放置するよりも良い.
- 協調：交渉集合があり, その中に両エージェントが歓迎するディールが存在する (他のエージェントの存在が歓迎される)

§§ 協調状況と妥協状況の判定

If $\forall i, W_i \leq Cost(s \rightarrow G_i)$ and $NS \neq \emptyset$

then Cooperative situation

else Compromising situation

§ Zlotkin90 続き

§ 交渉プロトコル

A, B の両エージェントは、交渉の各ステップ $t \geq 0$ において、

$$Utility_i(\delta(i, t)) \leq Utility_i(\delta(i, t - 1))$$

であるようなディール $\delta(A, t), \delta(B, t)$ を交渉集合 NS から選んで同時に出し合う。そのとき、

$$\forall i \in \{A, B\}, Utility_i(\delta(i, t)) = Utility_i(\delta(i, t - 1))$$

ならば、競合状態。

$$\exists j \neq i \in \{A, B\}, Utility_j(\delta(i, t)) \geq Utility_j(\delta(j, t))$$

ならば、合意が成立し、

$j = A$ のとき、ディール $\delta(B, t)$,

$j = B$ のとき、ディール $\delta(A, t)$,

$j = A, j = B$ のときディール $\delta(k, t)$ を採用する。

ただし、

$$\pi((\delta(k, t))) = \max\{\pi(\delta(A, t)), \pi(\delta(B, t))\}$$

where

$$\pi((\delta(k, t))) = Utility_i(\delta(k, t)) \times Utility_j(\delta(k, t))$$

交渉プロトコル (6/)

§ Zlotkin90 続き

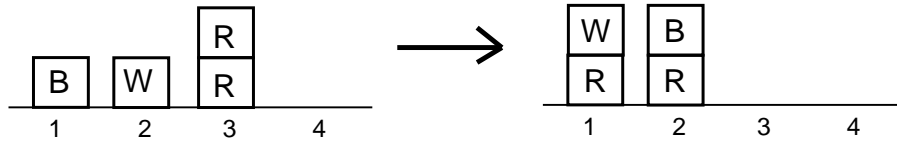


図 8: 妥協状況

ゴール

エージェント A: $at(2, B), \neg ontable(B)$

エージェント B: $at(1, W), \neg ontable(W)$

$W_A = 8, W_B = 8$

§ ジョイント・プラン

J1:

([(PU B 1) (PD B 1) (PU R 3) (PD R 2) (PU B 1) (PD B 2)]
 [(PU R 3) (PD R 1) (PU W 2) (PD W 1)])

J2:

([(PU R 3) (PD R 2) (PU B 1) (PD B 2)]
 [(PU W 2) (PD W 2) (PU R 3) (PD R 1) (PU W 2) (PD W 1)])

$$\sum Cost_i(J1) = 10, \sum Cost_i(J2) = 10$$

交渉プロトコル (7/)

§ Zlotkin90 続き

ステップ t0:

エージェント Aはジョイント・プラン J2をディール δ_A として提示.

$$Utility_A(\delta_A) = W_A - Cost_A(J2) = 8 - 4 = 4$$

エージェント Bはジョイント・プラン J1をディール δ_B として提示.

$$Utility_B(\delta_B) = W_B - Cost_B(J1) = 8 - 4 = 4$$

しかし, それぞれ相手のディールのユーティリティが低いため, 合意できない.

$$Utility_A(\delta_B) < Utility_A(\delta_A) \quad (Utility_A(\delta_B) = 8 - 6 = 2)$$

$$Utility_B(\delta_A) < Utility_B(\delta_B) \quad (Utility_B(\delta_A) = 8 - 6 = 2)$$

交渉プロトコル (8/)

§ Zlotkin90 続き

ステップ t1:

エージェント A はジョイント・プラン $J1$ をディール δ_A として提示.

$$Utility_A(\delta_A) = W_A - Cost_A(J1) = 8 - 6 = 2$$

エージェント B はジョイント・プラン $J2$ をディール δ_B として提示.

$$Utility_B(\delta_B) = W_B - Cost_B(J2) = 8 - 6 = 2$$

相手のディールのユーティリティが高くなったので, 合意は成立.

$$Utility_A(\delta_B) \geq Utility_A(\delta_A) \quad (Utility_A(\delta_B) = 8 - 4 = 4)$$

$$Utility_B(\delta_A) \geq Utility_B(\delta_B) \quad (Utility_B(\delta_A) = 8 - 4 = 4)$$

ジョイント・プラン $J1$ (or $J2$) が採用され, 交渉が終了. このとき, エージェント間相互作用は妥協状況.

プロトコルに求められる性質

[Rosenschein94]

有用性: 交渉の結果得られた合意は有用なものでなければならない (例えば, パレート最適の基準を満たすこと).

安定性: どのエージェントも合意した内容から他の戦略へ変更する動機を持ち得ない.

単純性: 交渉に必要な通信コストは低く, 計算の複雑さも比較的低い.

分散性: ボトルネックなどを回避するために, 意思決定のための中心的なエージェントを必要としない.

対象性: 交渉において, どのエージェントも特別な役割を負わない.