

## 論文の概要

- 1 申請者  
防衛大学校 フング ニュ ハイ
- 2 論文題目  
群れの意味決定能力に関する基礎研究
- 3 論文の概要

近年、群ロボットの分野では、群れの集団行動の意味決定の研究として the best-of- $n$  問題が注目されている。これは、リーダーを使用せず分散エージェントから成る群れが  $n$  個の候補の中から適した集団行動に合意する集団的意思決定問題である。2000 年頃に提案されたものの 2015 年まで長い間、the best-of- $n$  といっても、2 択のケースしか研究されてこなかった。2 次元での道路の方向を決めるなら、これらの 2 択の手法で十分だが、例えば、3 次元空間を自由に移動するドローン群の意味決定には新しい理論が必要と考えられている。このような背景から近年、2 択以上のケースのための開発が盛んになっている。その主な手法は、value-sensitive というコンセプトに則っている。これは、ミツバチ群が分蜂する際の意味決定メカニズムをモデル化したものである。選択肢の支持率が選択肢の良さに大きく依存するため、評価のバラツキや突出した候補がない場合などでは合意に到りにくく、結果として多数の選択肢を扱うのが困難である。

そこで、本論では、個体の意味決定は選択肢の良さに依存しない value-free という概念に基づく手法を提案する。岩永らは、個人の意味決定は自身の好みを表す個人属性だけでなく集団全体の雰囲気からも影響を受けると考え、集団に個人差を導入した社会モデルを提案している。このモデルでは、選択肢の良さに依存せず行動が選ばれながらも、速やかに社会が合意状態に達する事を明らかにしている。しかしながら、3 択以上の理論や適した選択肢を発見する集団の能力については研究がなされていない。そこで、本論では、この理論を元に多数の選択肢 ( $n \gg 2$ ) が扱える群れの意味決定フレームワークの開発を試みた。以下、本論文の概要を示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を示した。

第 2 章では、従来研究と本研究の位置付けを明確にした。

第 3 章では、岩永らのモデルに時間経過と共に増加する閾値 (BRT, Bias and Rising Threshold) を導入し、集団は適さない選択肢に合意するのをやめて、別の選択肢に合意するという試行錯誤ダイナミクスを発生する BRT モデルを提案した。計算機実験により、群れは唯一の選択肢に速やかに合意し、その合意行動を切り替えて、選択肢が多数の場合 ( $n \gg 2$ ) でも適した合意行動を発見できる事を示した。

第 4 章では、記憶機能を導入して BRT モデルの改善に取り組んだ。BRT モデルでは、個体は合意したものの適さなかった選択肢を記憶して、次時刻ではそれ以外のものを選択する。この短期記憶は直近の選択肢に限られるため、直近ではないが過去に適さな

った選択肢に繰り返し合意してしまう事がある。環境が変化していない場合にはこれは有効的な探索とはいえない。そこで、第4章では、合意したものの適さなかった選択肢を記憶する UEM(Unstable Experience Memory)エージェントを導入して、探索の効率化を試みた。計算機実験により、微少数の UEM エージェントを導入するだけでも、発見時間が劇的に改善する事を示した。

第5章では、提案した BRT モデルを通信範囲に限りがあるよりリアルな環境での可用性を検討した。個体の通信範囲を制限した移動エージェントのシミュレーションにより、パラメータを適切に設定すれば適した選択肢が発見できる事が確認できた。また、少し通信範囲を広げるだけで大幅に精度の改善がみられ、通信範囲とパフォーマンスには閾値的な関係がある事を推定した。

次に、生物の群れでは集団行動を異なる頻度で行い、生活環境の変化に上手に対応している事がよく知られている。群ロボットにもこのように集団行動のプリファレンス（優先度）を実現できればロボット集団は高度な応用力を持たせる事が可能と考えられる。第6章では、それぞれの選択肢に対して個体のバイアス分布の平均値を適切に変えれば、集団行動のプリファレンスを実現できる事が確認できた。

BRT モデルでは、ガウシアン分布に基づいた鐘型曲線を使用して個人属性を表すバイアス値を生成したが、収束について確率論から離れて議論する事が難しかった。そこで、第7章では、解析のしやすい2次関数を用いたバイアス分布を使用する Q-BRT モデルを提案した。数学的な分析と計算機実験により、唯一の選択肢に合意する事や、適した選択肢の発見に要する平均時間の概算など Q-BRT モデルの特性を明らかにした。

Q-BRT モデルでは、多数の選択肢からでも非常に高い精度で適した選択肢を発見することができるが、多くの計算機実験を通じて適した選択肢を見つけるのに非常に時間がかかるケースがある事がわかってきた。第8章では、通信帯域に余裕があると仮定して、Plural voting からヒントを得て、集団探索の高速化を試みた。 $k$  個の投票を導入する事により、適した選択肢の発見時間を約  $k$  倍短縮できる事がわかった。

第9章では、集団の意思決定の精度を議論する際に分散 AI の分野でよく使われる標準問題の1つであるエルファロール・バー(El Farol Bar)問題に Q-BRT モデルを用いて Q-BRT モデルの実装方法の例を示す。個体にバーに行くあるいは行かないというロール（役割項）を新たに導入し、事前に生成した個体のロールの組合せを選択肢として使用する。個体は合意した選択肢が適したものと判断できるまで各選択肢を取捨選択し続ける。計算機実験によって、適切に事前に個体のロールの組合せを設定すれば、バーに適した集団の割合を発見する事ができた。

第10章では、本論文の要約と今後の展望について述べた。

以上から、多数の選択肢の the best-of- $n$  問題 ( $n \gg 2$ ) でも適用できる群れの意思決定に関するフレームワークを構築できたと考える。

#### 4 キーワード

「群ロボット」、「The best-of- $n$  問題」、「BRT モデル」、「合意行動」、「集団探索」