

偵察蜂の定足数反応における意思決定作用のシミュレーション的検証に関する研究 —複数ロボットの協調行動と群知能のために—

西山 幸寛 指導教員：村上 和人

1 はじめに

複数台の移動ロボットによる協調行動、および群としての知能化技術による、所定目的（ミッション）の実現は、ロボティクス分野・人工知能分野における重要課題である [1]。自律分散型のマルチロボットシステムにおいては、個体群が秩序を維持しながらも、複雑な社会行動を営む社会性昆虫の知能行動を人工的に実現しようという試みが行われており、*Swarm Intelligence* という呼称で数多くの研究がなされている [2]。上記、社会性昆虫のなかでもとりわけ、高度に組織化された社会性構造を有するミツバチの意思決定行動に対する関心が集まっている。ミツバチの群衆意思決定行動は主に、①採蜜行動、②分蜂行動の二つが知られている。前者の採蜜行動に関しては、数多くの研究が研究対象としてフォーカスしており、すでに数多くの最適化アルゴリズムが提案されている。一方、後者の分蜂行動については、未だ分蜂行動に至るメカニズムが不明瞭であり、それが故に、意思決定問題への応用も未だ、なされていない。

そこで本研究では、後述の分蜂行動メカニズムの検証と複数の移動ロボットの群知能化への応用のために、分蜂群上の偵察蜂をエージェントとして捉え、分蜂行動プロセス [3] を行動規則としてモデリングし、定足数反応における意思決定作用に関して、マルチエージェント・シミュレーションによる検証を行ってきた。一連の研究成果から、本研究で提案したシミュレーションモデルの妥当性が、定足数という観点から確認された。また、分蜂群に対する巣箱の相対位置、ならびに巣箱の種類が、最適な巣作り場所を決定する“定足数”に影響を及ぼさない可能性を示唆した [4]。本稿では、分蜂群における偵察蜂数、ならびに分蜂可能領域内における設置巣箱数の変化に伴う、分蜂群全体の意思決定の迅速性、ならびに正確性の検証結果を示す。

2 分蜂現象のエージェント・ベース・モデリング

シミュレーションで用いる空間のイメージを図 1 に示す。ミツバチの分蜂可能領域の具体的なスケールは地平面方向にはおよそ 3km に及ぶのに対し、高さ方向にはたかだか数十メートルと 1/100 程度であるため、二次元平面で領域を近似する。シミュレーションモデルでは、60×60 の実数空間とし、中心 (30,30) に分蜂群が存在するものとした。領域内には巣箱エージェントと偵察蜂エージェントの存在を仮定した。以下では、それぞれ巣箱エージェントと偵察蜂エージェントの設定について説明する。

巣箱エージェントの数を N_B とした。巣箱エージェントの設置位置については、シミュレーション空間の中心 (30,30) からユークリッド距離 [30] 以内の領域に、ランダムに設置した。巣箱エージェントがもつ属性として、容積、外的侵入の困難度合いなど [5] を総合的に捉えた指標である *Score* を設定し、おのおのの巣箱エージェントの *Score* は 1 から 100 の離散一様乱数にて与えた。

偵察蜂エージェントの数を N_{SB} とした。偵察蜂エージェントは、シミュレーション開始直後は分蜂群上に存在し、その後、おのおのが分蜂群から飛び立ち、巣作り場所候補地（巣箱）を探し出すために分蜂行動の一連のプロセスにもとづいて行動をおこ

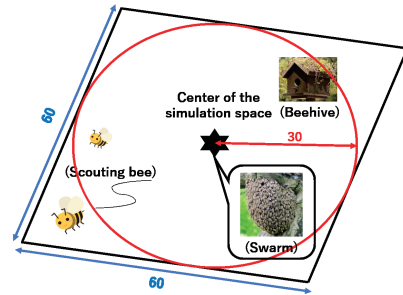


図 1 シミュレーションで用いる空間のイメージ

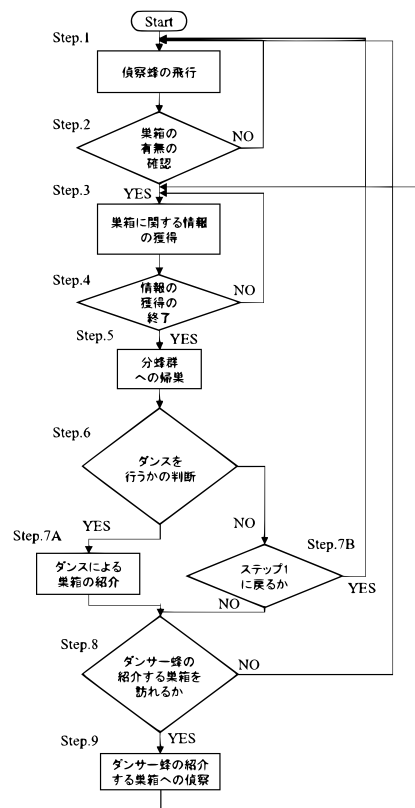


図 2 分蜂行動プロセスのフロー

す。このプロセスを図 2 に示す。

大まかな内容は、下記に示す 4 つの処理である。

① Step. 1 — Step. 3 : 偵察蜂の飛行と巣箱の評価

偵察蜂は中心 (30,30) から半径 30 以内を飛び回り、候補地が見つかれば評価をおこなう。

② Step. 4 — Step. 5 : 分蜂群への帰巢

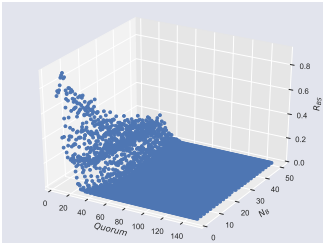
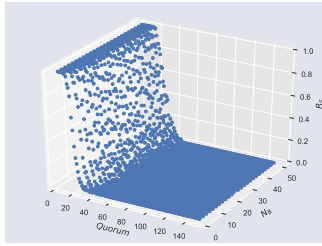
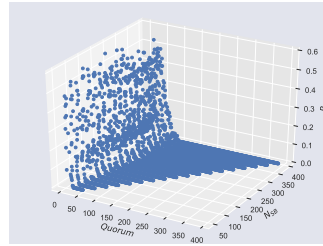
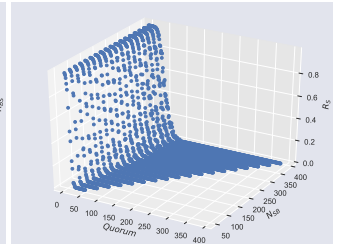
評価を終えた偵察蜂は分蜂群 (30,30) に帰巢する。

③ Step. 6 — Step. 8 : ダンスによる巣箱の紹介

帰巢した偵察蜂は、評価を行った巣箱が良ければ、ダンサー蜂としてダンスを行い、他の偵察蜂にその巣箱を紹介する。

④ Step. 9 : ダンスを行う蜂の紹介する巣箱への偵察

ダンサー蜂が紹介する巣箱へ向かい評価を行う。

図3 sim1: R_{BS} 図4 sim1: R_S 図5 sim2: R_{BS} 図6 sim2: R_S

このプロセスの終了条件として、各ステップごとに定足数反応による最適巣作り場所の決定規則を満たすか確認し、この規則を満たすのであれば、シミュレーションを終了するものとした。ここで、最適巣作り場所の決定規則とは、ある巣箱について、その巣箱を訪れている偵察蜂数の総和が、あらかじめ定められた定足数 *Quorum* を上回ったとき、その巣箱を最適巣箱とする規則である。

3 シミュレーション条件と結果

文献 [3][5] と比較検討を行うため、下記に示すシミュレーション条件にてシミュレーション検証を行った。分蜂可能領域内における設置巣箱数の変化に伴う、分蜂群全体の意思決定の迅速性、ならびに正確性の検証として、sim1; 巣箱エージェント数: $N_B = 2, 4, \dots, 50$, 偵察蜂エージェント数: $N_{SB} = 150$ とし、分蜂群における偵察蜂数の変化に伴う、分蜂群全体の意思決定の迅速性、ならびに正確性の検証として、sim2; 巣箱エージェント数: $N_B = 15$, 偵察蜂エージェント数: $N_{SB} = 50, 70, \dots, 390$ とした。

定足数 ($5 \leq \text{Quorum} \leq N_{SB}$) を逐次変化させ、100回のシミュレーション試行を行い、分蜂群が一番 *Score* の高い巣箱 (最適巣箱) を選択した率、ならびに分蜂群が最適巣箱を決定するまでに要したステップ数を正規化した値の平均値を算出した。以降、前者を R_{BS} と表記し、後者を R_S と表記する。

100回のシミュレーション試行で分蜂群が最適巣箱を選択した回数を N_{BS} とし、 R_{BS} を、

$$R_{BS} = \frac{N_{BS}}{100} \quad (1)$$

と定義した。この値を各定足数について算出した。

分蜂群が最適巣箱を決定するまでにかかる最小ステップ数は1である。一方、最適巣箱を決定するまでにかかる最大ステップ数 $MAXstep$ は10000ステップとした。 i 回目 ($1 \leq i \leq 10$) のシミュレーション試行について、シミュレーション終了ステップ数を $Step(i)$ と表記すると、 i 回目の試行における $R_S(i)$ は

$$R_S(i) = 1 - \frac{Step(i) - 1}{MAXstep - 1} \quad (2)$$

となる。 R_S は、 $R_S(i)$ の平均値と定義し、

$$R_S = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} R_S(i) \quad (3)$$

とした。この値を各定足数について算出した。

以下、sim1における最適巣箱の選択率 R_{BS} 、および正規化ステップ数の平均値 R_S を、それぞれ図??、図??に、sim2における最適巣箱の選択率 R_{BS} 、および正規化ステップ数の平均値 R_S を、それぞれ図3、図4に示す。

本シミュレーション結果から、図3、図4において設置巣箱数の増加に伴い、意思決定の正確性 R_{BS} は指数関数的に減少することが確認された。意思決定の迅速性は設置巣箱数の増減によらず、およそ1.0であることが確認された。また、図5、図6において分蜂群上の偵察蜂数の増減に関わらず、意思決定の正確性 R_{BS} はおよそ0.60であることが確認された。意思決定の迅速性 R_S についても同様のことがいえ、およそ1.0であることが確認された。

4 おわりに

本稿では、分蜂行動メカニズムの検証と複数の移動ロボットの群知能化への応用を目指し、定足数反応における意思決定作用に関して、マルチエージェント・シミュレーションによる検証を行った。紙面の都合上、分蜂群における偵察蜂数、ならびに分蜂可能領域内における設置巣箱数の変化に伴う、分蜂群全体の意思決定の迅速性、ならびに正確性の検証に絞り、その結果を提示した。

シミュレーションの結果から、設置巣箱数の増加に伴い (sim1)、意思決定の正確性 R_{BS} は指数関数的に減少するが、意思決定の迅速性は設置巣箱数の増減に依らないことが確認された。また、分蜂群上の偵察蜂数の増減に依らず (sim2)、意思決定の正確性 R_{BS} 、および意思決定の迅速性 R_S はある一定の値をとることが確認された。

これら一連の研究結果から、Thomasらの『自然界環境におけるミツバチらの定足数は、環境によらず常に一定である』とする仮説 [3][5] について、分蜂可能領域内の設置巣箱数が定足数反応における意思決定作用に影響を大きく及ぼす可能性が示唆された。今後の課題として、複数台の移動ロボットによる協調行動、および群としての知能化への応用が挙げられる。

参考文献

- [1] 浅間一, “複数の移動ロボットによる協調行動と群知能”, 計測と制御, Vol.31, No.11, pp.1155-1161, 1992.
- [2] 大谷紀子, 『進化計算アルゴリズム 生物の行動科学から導く最適解』, オーム社, 2018.
- [3] Thomas D. Seeley, Susannah C. Buhrman, “Nest-Site Selection in Honey Bees: How Well Do Swarms Implement the “Best-of-N” Decision Rule?”, Behavioral Ecology and Sociobiology, Vol. 49, Issue. 5, pp.416-427, 2001年4月.
- [4] 西山 幸寛, 村上 和人, “マルチエージェント・アプローチを用いた偵察蜂の定足数反応による最適巣作り場所の決定作用に関する研究”, 情報処理学会 第81回全国大会, 2P-05, 福岡大学, 2019年3月.
- [5] Thomas D. Seeley, “Honeybee Democracy”, Princeton Univ Pr, 2010.