

# 進化型スワームロボティクスにおける超冗長性と混雑がもたらす創発的機能分化

広島大学 平賀 元彰, 森本 大智, 福頼 征弥, 〇大倉 和博

## 要 旨

スワームロボティクスは、多数のロボットによって構成される超冗長なシステムに関する研究分野である。一方で、この超冗長性をどのように利用するかに関する議論はほとんど行われていない。本稿では、スワームロボティクスにおける超冗長性およびそれによって生じる混雑現象とロボット群が発現する機能分化の関係について議論する。混雑時に創発するロボット群の機能分化について、同一条件下でロボット同士の衝突を考慮しない場合について実験を行い、混雑と機能分化の影響について考察する。

## 1. はじめに

スワームロボティクス [1] は、生物の群れに動機付けられたロボットシステムに関する研究分野である。スワームロボティクスに基づくシステムは、全体を統括する機構を持たず、局所的な相互作用から集散的な振る舞いを創発する。一般的に、スワームロボティクスで用いられるシステムは、多数のロボットにより構成される超冗長なシステムである。一方で、ロボットの数が過剰である場合、ロボット同士が互いに干渉・妨害し、群れ全体の性能を低下させる [2]。

本稿では、ロボットの数が多い場合に発生する混雑とロボット群が創発する機能分化の関係について議論する。具体的には、ロボット群による経路形成タスクをシミュレーション環境上で行う。ロボットの制御器設計に進化ロボティクスアプローチ [3] を適用し、混雑が発生する状況下での機能分化の発生を観測する。同一条件下で、ロボット同士の衝突を考慮しない場合について実験を行い、混雑がロボット群の機能分化に与える影響について考察する。

## 2. タスク設定

本稿では、スワームロボティクスにおける基礎的なタスクの一つである経路形成タスクを扱う [4]。このタスクでは、ロボット同士の協調によりロボットの経路を作り、二つの目的地の間を往復することを目標とする。

Fig. 1(a) に実験で用いられたシミュレーション環境のスクリーンショットを示す。二つのランドマークが環境の対角線上に配置されており、その周囲に半径 0.5 m の目標エリアが設けられている。ロボットは、7 個の距離センサ、地面センサ、全方位カメラ、フルカラー LED が実装されている。距離センサおよび全方位カメラの感知範囲をそれぞれ Fig. 1(b), (c) に示す。ロボットの LED は、前方に青色、後方に赤色を用い、ランドマークはロボットの後方と同色の赤色 LED が実装されている。

## 3. 進化ロボティクスアプローチ

典型的な進化ロボティクスのアプローチでは、進化アルゴリズムを用いて、人工神経回路網で表現されるロボットの制御器のパラメータを獲得する。進化アルゴリズムに従って生成された制御器のパラメータをロボットへ組み込んだときのタスクの達成度に基づいて適応度を計算する。

本稿では、ロボットの制御器には Fig. 1(d) に示すような、

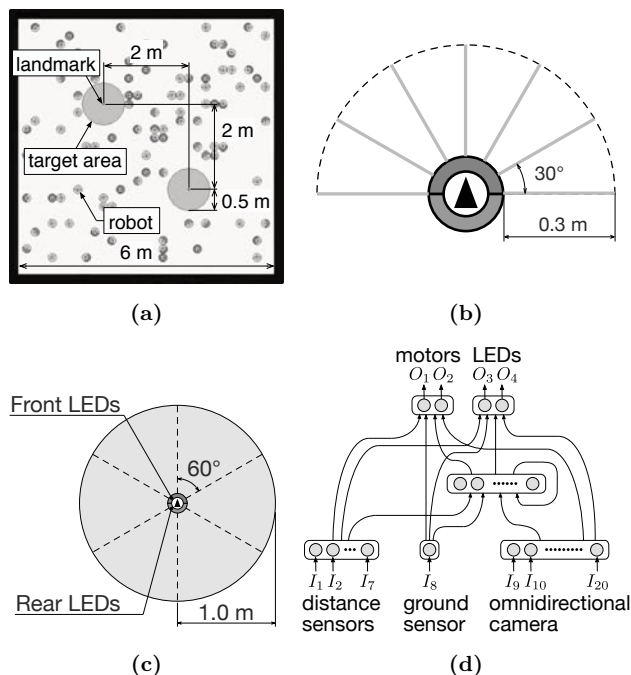
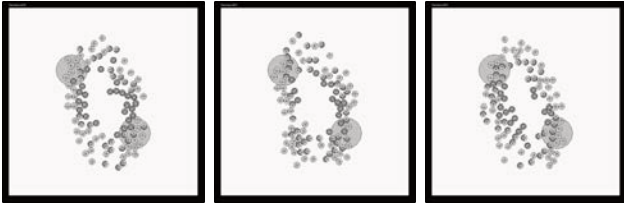


Fig. 1. (a) Screenshot of the environment in the computer simulations. (b) Configuration of distance sensors. (c) Configuration of the omnidirectional camera. (d) Structure of the robot's controller.

入力層 20 ニューロン、中間層 10 ニューロン、出力層 4 ニューロンによって構成されるリカレントニューラルネットワークを用いる。出力層のモータを制御するニューロンの値は、実機ロボットの観測から算出した関数をもとにロボットの速度へ変換している。また、前後の LED は、対応するニューロンの値によって独立的に点灯・消灯する。

制御器に用いるニューラルネットワークの結合荷重値を進化アルゴリズムの一種である  $(\mu, \lambda)$ -ES [5] によって獲得する。制御器のパラメータの適応度は、ロボット群の経路形成タスクにおける往復回数のみをもとに計算する。すなわち、それぞれのロボットがどのように往復するかに関する評価は行わない。0 世代目をランダムに生成された個体群とし、一回の進化の最大世代数を 1000 世代とする。ロボットの制御器と進化アルゴリズムに関する詳細は文献 [6, 7] を参照されたい。



(a) 4200 time steps. (b) 4800 time steps. (c) 5400 time steps.

Fig. 2. Behavior observed with considering collisions.



(a) 4200 time steps. (b) 4800 time steps. (c) 5400 time steps.

Fig. 3. Behavior observed without considering collisions.

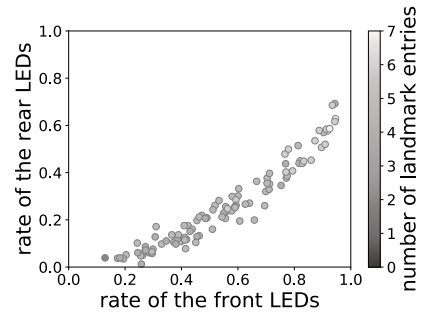
#### 4. 実験結果

本研究では、ロボットの数が多く場合に発生する混雑とロボット群が創発する機能分化の関係について着目している。先行研究 [6] より、ロボット数 25 台でタスクの遂行が可能であることが確認できる。本稿では、まず混雑が発生するロボット数 100 台を用いて、ロボット同士の衝突を考慮した場合について議論する。Fig. 2 に獲得した群れ行動の例を示す。経路の内側のロボットは LED を点灯し、外側のロボットは消灯する機能分化が発現している様子が確認できる。また、Fig. 3 にロボット同士の衝突を考慮しない場合についての振る舞いの例を示す。ロボット同士の衝突を考慮しないため、Fig. 2 と比較してより密集した経路を形成している。

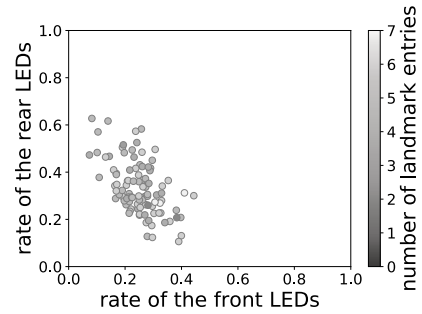
ロボットの振る舞いについて考察するため、前方および後方の LED の点灯率の関係を Fig. 4 の散布図に示す。散布図上の各点はそれぞれのロボットに対応しており、色の濃淡は各ロボットのランドマーク到達回数を示す。ロボット同士の衝突を考慮する場合、Fig. 4(a) に示すように、前方および後方 LED の点灯率の間には正の相関がある。また、LED の点灯率が高いロボットほど、ランドマーク到達回数が増える傾向が確認できる。したがって、経路の内側の方がランドマーク間を効率的に往復できることから、経路の内側のロボットが LED 点灯し、外側のロボットは LED を消灯していることがわかる。一方で、Fig. 4(b) に示すロボット同士の衝突を考慮しない場合では、LED 点灯率と各ロボットのランドマーク到達回数に明確な傾向は確認できない。また、LED 点灯率に関して、Fig. 4(a) と比較して、一点に集まっているように見える。このことから、ロボット同士の衝突を考慮しない場合では機能分化を創発せず、すべてのロボットが比較的類似した振る舞いを示していることが考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、混雑時に創発するロボット群の機能分化について、同一条件下でロボット同士の衝突を考慮しない場合について実



(a) With collisions.



(b) Without collisions.

Fig. 4. Scatter plot of the activation rate of the LEDs.

験を行った。ロボット同士の衝突を考慮しない場合では機能分化を創発せず、すべてのロボットが比較的類似した振る舞いを示した。このことから、スワームロボティクスにおける超冗長性や混雑現象と機能分化には密接な関係があることが想定される。今後の展望として、この混雑現象を利用することによって生じる機能分化について、その仕組みの解明を試みる。

#### 参考文献

- [1] E. Şahin, “Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application,” *Swarm Robotics, Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 3342, pp. 10–20, 2005.
- [2] H. Hamann, *Swarm Robotics: A Formal Approach*. Springer, 2018.
- [3] S. Nolfi and D. Floreano, *Evolutionary robotics: The biology, intelligence, and technology of self-organizing machines*. MIT press, 2000.
- [4] V. Sperati, V. Trianni, and S. Nolfi, “Self-organised path formation in a swarm of robots,” *Swarm Intell.*, vol. 5, no. 2, pp. 97–119, 2011.
- [5] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer, 2003.
- [6] M. Hiraga, T. Yasuda, and K. Ohkura, “Evolutionary acquisition of autonomous specialization in a path-formation task of a robotic swarm,” *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics*, vol. 22, no. 5, pp. 621–628, 2018.
- [7] M. Hiraga, Y. Wei, T. Yasuda, and K. Ohkura, “Evolving autonomous specialization in congested path formation task of robotic swarms.” *Artif. Life Robotics*, in press.