

フェロモンを用いた協調行動獲得に関する基礎研究

北見工業大学 ○鈴木雅詞, 岩館健司, 鈴木育男

要 旨

近年, 製造業やサービス業などを中心に搬送作業のロボットによる自動化が求められている. 本研究では, 複数のロボットによる群ロボットシステムを採用し, 協調と分業を状況に応じて調整したタスク達成能力の向上を目指す. 本稿では, アリなどの社会性昆虫にみられるフェロモン・コミュニケーションを応用し, フェロモンにより複数のロボットが集散するような行動の学習について検証する.

1. はじめに

製造業での材料や部品の搬送, 運送業や飲食業といったサービス業での商品の運搬などの搬送作業に対しロボットを用いた自動化が近年求められている. この自動化の研究には, 拡張性や環境適応性が高いことから自律分散型の制御方法が望まれることがある. 自律分散型では複数のロボットが自律して行動することを基本としており, これに関する研究として群ロボットシステムの研究があげられる. 群ロボットシステムは個の能力を超えた行動を群れが取ることから注目されており, ニューラルネットワークと進化計算を用いた研究が多数行われている^[1]. また, 優れた群行動を生み出す大きな要因の一つとして, ハチやアリなどの社会性昆虫にみられるフェロモン・コミュニケーションが注目されている^[2].

そこで, 本研究はニューラルネットワークとフェロモンを応用した自律分散型の群ロボットシステムを構成し, 搬送タスクの達成能力の向上を目的とする. 本稿では, 複数のロボットが集散する学習において, フェロモンの導入による学習効果について検証する.

2. 実験方法

本実験では物理シミュレーター上にロボットと餌を設置し, 餌へ向かい到着したら留まることをロボットに学習させる. ロボットの制御にはニューラルネットワークを使い, $(\mu/\mu_w, \lambda)$ -CMA-ES を用いてネットワークの重みを最適化し学習を行う. 物理シミュレーターには NVIDIA Corporation から提供されている PhysX を用いた.

餌とロボットの配置を図 1 に示す. 餌は 3 ヶ所に $(0, -10)$, $(0, -25)$, $(0, -45)$ に設置する. ロボットは 3 体用意し $(10, 10)$, $(0, 10)$, $(-10, 10)$ に設置する. またロボットは $(0, 1)$ 方向が正面になるようにし餌に背を向けた状態で配置する.

2.1. ロボットの構造

ロボットの構造を図 2 に示す. ロボットは 5 つの球体で構成されており, 半径 3m の胴体, 半径 0.5m の前後のキャスター, 半径 0.5m の左右のホイールを持つ. キャスターはどの方向にも自由に回転でき, ホイールは前方にのみ回転できる.

ロボットには次のように定める全方位センサ S_{omni} を 2 つ搭載する.

$$S_{\text{omni}} = \sum_p \frac{1}{\frac{2}{d_{1/3}} d_p + 1} \begin{bmatrix} \sin \theta_p \\ \cos \theta_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

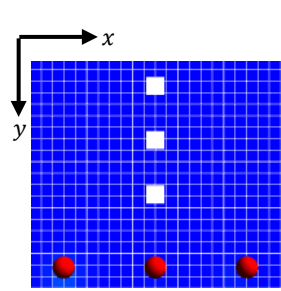


図 1: 環境設定

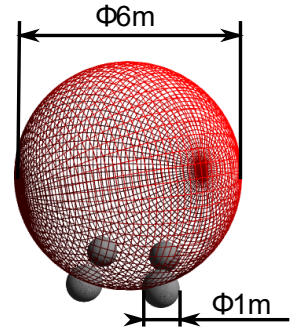


図 2: ロボットの構造

ここで, 知覚する主体が向いている方向と知覚される任意の対象 p が存在する方向とのなす角を θ_p (ただし $-\pi < \theta_p \leq \pi$), 主体と対象との距離を d_p , センサの感度が最大 $1/3$ になる距離を $d_{1/3}$ とした.

ロボットは, このセンサを一つは自身以外のロボットの知覚に, もう一つは餌を知覚することに使用する.

本実験では, ロボットを知覚するセンサは $d_{1/3} = 5$, 餌を知覚するセンサは $d_{1/3} = 35$ とした.

ロボットの移動は, ホイールの回転速度を制御することで行われる. 制御信号はニューラルネットワークにより出力される. 3 層の隠れ層を持ち, 入力層と隠れ層の活性化関数に \tanh , 出力層にはシグモイド関数を用いる. 各層のニューロン数は, 入力層側から順に 6, 12, 12, 6, 3 とする. 入力として 2 つの全方位センサから得られる値と後述するフェロモン濃度の勾配の値を使用する. 出力値の 2 つは左右のホイールの回転速度, 残りの 1 つはフェロモンの分泌量とする.

2.2. フェロモンの拡散

フィックの拡散方程式を参考に, (2) 式のように組み立てた. 本実験ではこれを用いてフェロモンの拡散を計算する.

$$\frac{C_{(x,y)}^t - C_{(x,y)}^{t-\Delta t}}{\Delta t} = s^{t-\Delta t} - \delta C_{(x,y)}^{t-\Delta t} + D \frac{C_{(x+\Delta x,y)}^{t-\Delta t} - 2C_{(x,y)}^{t-\Delta t} + C_{(x-\Delta x,y)}^{t-\Delta t}}{\Delta x^2} + D \frac{C_{(x,y+\Delta y)}^{t-\Delta t} - 2C_{(x,y)}^{t-\Delta t} + C_{(x,y-\Delta y)}^{t-\Delta t}}{\Delta y^2} \quad (2)$$

$C_{(x,y)}^t$: 時刻 t における座標 (x, y) のフェロモンの濃度,

s^t : 時刻 t にロボットが分泌したフェロモンの量,

D : 拡散係数, δ : 減少速度, Δt : ステップサイズ

s^t はフェロモンの分泌による濃度の増加量であり, ニュー

ラルネットワークからの出力値が代入される。その他のパラメータは $D = 70, \delta = 60, \Delta t = 1/60, \Delta x = \Delta y = 1$ とする。

2.3. 学習（結合重みの最適化）

$(\mu/\mu_w, \lambda)$ -CMA-ES を用いてニューラルネットワークの重みを最適化し学習を行う。損失関数: L_{loss} を(3)式のように定め、これを CMA-ES により最小化（最適化）する。

$$L_{\text{loss}} = \sum_t \sum_{f \in F} \min_{b \in B} \|f - b\|_2 \Delta t \quad (3)$$

T : 一試行にかかる時間, F : 餌の座標の集合,
 B : ロボットの座標の集合

実験では、評価のためのシミュレーション時間を 60 秒とし CMA-ES の初期の平均値を全て 0, 分散を全て 0.3 とし 200 世代行う。それ以外の CMA-ES のパラメータは N.Hansen が提案している推奨値に従って定める^[3]。

3. 結果と考察

世代ごとの損失値の推移を図 3 に示す。また比較のためフェロモンの分泌量を常に 0 で上書きしたときの推移を図 4 に示す。図中の赤色はその世代の平均的な損失値, 青色はその世代の最低値, 緑が全世代通しての最低値である。2 つのグラフを比べるとわずかにだがフェロモンを用いた方が早く収束している。そのためフェロモンの有無が学習効率に与える影響は少ないと考えられる。

次に、最良個体について試行中の損失値の遷移を図 5, 6 に示す。図中の赤色は損失値, 緑色が損失値の変位である。比較すると 15 秒を経過したあたりから損失値の変位に大きな差異が見られる。フェロモン有りが周期的であるのに対し、フェロモン無しには規則性がないのが分かる。

さらに、ロボットの挙動を図 6 に示す。図 6 は 30 秒から 45 秒にかけて 1 秒間隔ごとの画像を重ねて作成した。見比べると、フェロモン有りの場合は 3 体のロボットが餌の位置に存在しているのに対し、フェロモン無しの場合は上下の 2 体が振動していることによりぼやけて見える。このことから、フェロモンを導入することにより安定して餌の近傍に留まる行動を獲得できる効果があることがわかる。

4. おわりに

本研究では、フェロモンを応用した自律分散型の群ロボットシステムを提案した。実験結果からフェロモンを導入することでタスク解決能力に良い効果が得られることが分かった。今後は、実用を想定した複雑なタスク、例えば餌を運搬するようなより複雑な行動を要求するタスクなどで検証を行っていく。

参考文献

- [1] 大倉和博, 平賀元彰: "ロボティックスワームにおける群れの行動生成手法: 計算知能アプローチによる自動設計", 計測と制御, 59 巻, 2 号, pp.131-136 (2020).
- [2] 中道義之, 有田隆也: "フェロモン・コミュニケーションの起源に関する進化シミュレーション", 情報処理学会論文誌, 47 巻, pp.78-88 (2006).
- [3] Nikolaus Hansen: "The CMA Evolution Strategy: A Tutorial", Towards New Evolution Computation: Advances in the Estimation of Distribution Algorithms, pp.75-102 (2006).

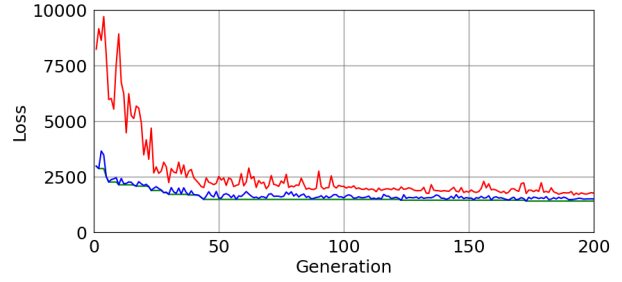


図 3: 世代ごとの損失値（フェロモン有り）

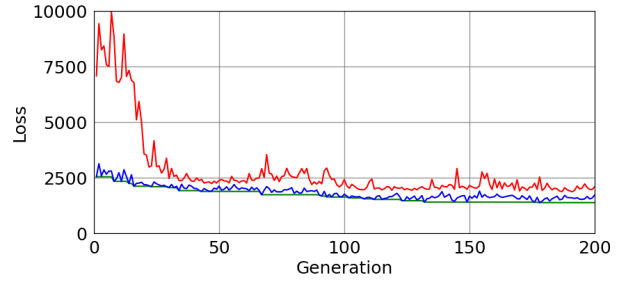


図 4: 世代ごとの損失値（フェロモン無し）

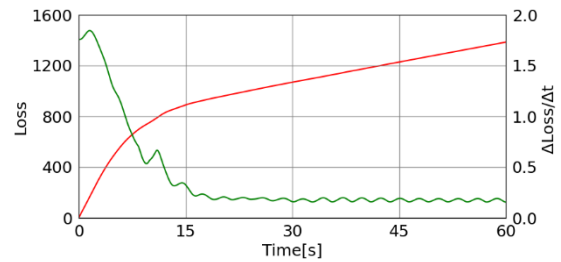


図 5: 最良個体の損失値の推移（フェロモン有り）

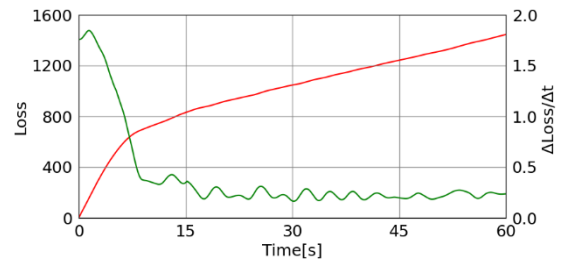
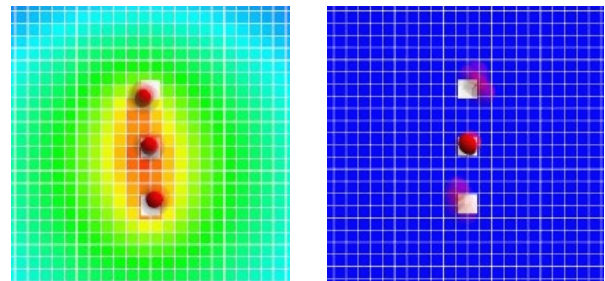


図 6: 最良個体の損失値の推移（フェロモン無し）



(a) フェロモン有り (b) フェロモン無し

図 7: 最良個体の挙動