

Ant-like Robot への反応拡散機構の導入

中村 真理 浅間 一

多数の自律エージェントからなる multi-agent system (MAS) で柔軟に協調動作を組織するには、適切な位置に適切な分量の個体を配置して適切な動作を分担させる必要がある。筆者らは、拡散信号を用いて間接通信する MAS において、エージェントの行動則を逐次修正しながら協調動作を設計する方法を提案した。本論文では、既存の分別収集タスクモデル (Deneubourg の *Ant-like Robot*, ALR) を題材に取り上げ、上記方法を適用して ALR を改良した。具体的には ALR のエージェントの行動則に「拡散信号への誘引動作」と「信号不応期のランダム移動」を付け加えて、信号拡散システムを新たに構築した。この信号拡散システムは反応拡散機構に従って動作し、ALR と比べて高い分別収集効率を示す。

To flexibly coordinate a multi-agent system (MAS) composed of a large number of autonomous agents, we must allot the proper actions to the proper number of agents allocated to the proper areas. We have proposed a trial and error method to design a coordinating system composed of many agents communicating indirectly with diffusing signals, by modifying an agents' behavior rule. In this paper, we improved a simple sorting task model (*ant-like robot*, ALR) by using this method. We introduced an attracted move toward the signal source and a random move in desensitization into the agent's behavior rule of ALR. We named this *signal-diffusion system*. The signal-diffusion system operates according to the reaction-diffusion mechanism, and shows higher performance in the sorting task than ALR.

1 はじめに

1.1 本研究の背景と経緯

多数の自律エージェントから成る自律分散系で適切な協調動作を実現するには、「適切な量のエージェント (以下個体と表記) を適切な位置に配置し、適切な動作を分担させる」必要がある。そのために従来、以下の二通りの対策が提案されてきた[4]。

- 個体が互いに個体識別しながら直接通信する系では、各個体が周辺状況を判断して適切な行動を選択することにより、チームで協調動作を組織できる[5][11][13]。この方式は個体数が少ない場合(約20個体以下)には有効だが、個体数の増加に伴い通信や状態数の爆発的増加に対応できなくなる。
- 個体同士が環境を介して間接的に通信する系では、個体数が増えても系全体で協調動作を自己組織できる[1][3]。この方式では個体識別の必要がなく、個体数増加に伴う計算の増加を抑えられるが、目的の協調動作が得られるよう個体の行動則を柔軟に設計するのは難しい。

筆者らは後者の方式をもとに、多数個体が拡散信号を介して間接通信する multi-agent system(MAS) の協調動作を柔軟に設計する方法を考案した[9]。個体は少数の状態に分化し、周囲の状況に応じて状態間を遷移する。拡散信号は個体のミクロな行動と集団の

Introduction of Reaction-diffusion Dynamics into Ant-like Robot.

Mari Nakamura, 独立行政法人産業技術総合研究所健康工学研究部門, Health Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

Hajime Asama, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻, Department of Precision Engineering, The University of Tokyo.

コンピュータソフトウェア, Vol.28, No.1 (2011), pp.116-126. [研究論文] 2009年12月18日受付.

マクロな挙動の間を繋ぐ時空間規模で動作するので、この拡散信号を介して個体の状態遷移と集団内部の作業分担を関連付ける。その上で作業間の個体配分比率を調整するよう個体の行動則を試行錯誤で修正することにより系の協調動作を柔軟に設計する。

筆者らはフェロモン通信を用いて集団採餌を行う蟻コロニーのモデルにこの方法を適用して、採餌効率を上げるようモデルの設計改良を繰り返し、最終的に反応拡散機構に従って動作する系を構築した[7][8][9]。この系は「未知の餌場の探索」と「既知の餌場への動員」に配分される個体比率を安定に調整できるため、高い採餌効率を実現する。

1.2 本論文の内容と構成

Deneubourg の *ant-like robot (ALR)* [2] は、地上に散乱する荷物を種類別に積み分けて分別収集する簡単なモデルである。本論文では上記の方法を用いて ALR に拡散信号と反応拡散機構を導入し、信号拡散システムを構築した。また ALR と信号拡散システムの分別収集作業効率を各々数値評価し、信号拡散システムが ALR より高い効率を示すことを確認した。

本論文の構成は次のとおりである。まず 2 章では ALR を再構築し、数値実験例を挙げてその動作を解説する。また 3 章では上記の設計方法を詳しく説明する。2 章と 3 章を踏まえ、4 章では上記の方法で ALR を改良して信号拡散システムを構築し、数値実験例を挙げてその動作を解説する。更に 5 章では ALR と信号拡散システムの分別収集効率を数値評価して比較する。6 章では本論文の結論と考察を述べる。

2 Ant-like robot (ALR)

2.1 ALR の構築と数値実験条件の設定

1991 年 Deneubourg は *ant-like robot (ALR)*、別名 *robot-like ant* というモデルを提案した [2]。ALR を構成する個体は荷物が散在する地上を常にランダムに歩き回りながら、手持ちの荷物と同種の荷物が密に分布する場所に荷物を置き、荷物分布が疎らな場所から荷物を拾い上げる。その結果 ALR は地上に散乱した荷物を分別収集するよう動作する。

本節ではこの ALR を再構築し、その数値実験条件

表 1 オリジナルと本論文の ALR の相違点

相違点	オリジナル	本論文
個体数	20 ~ 100	600
個体の状態	区別しない	複数モード
個体の重なり	不可	可能
個体の移動先	隣接 4 格子点	円周上の 1 点

を設定した。本論文の ALR は 600 個体で構成されており、オリジナルの ALR より個体数を増やしたので、個体間の衝突を回避できるよういくつか設定を変えた (表 1 にオリジナルと本論文の ALR の相違点を簡略に列挙した)。

オリジナルの ALR の個体は、ランダムに選んだ隣接格子点上を移動し、1 個体が 1 格子点を占有する。これに対し本論文の ALR 個体は次の性質を持つ。

- 1 点上に複数個体が重なって存在できる。
- これらの個体は 100×100 格子点の平面上を格子点に拘束されずランダムに歩き回る、即ち「一定速度で直進しながら一定の方向変換確率でランダムに進行方向を変える」。

ここでは 1step を「個体が状況を判断して行動するまでに要する時間」と定義し、個体の進行速度を 1.5 格子点/step、方向転換確率を 0.5 回/step と設定した。

本論文では上記の ALR の数値実験を「2 種類の荷物 A, B が 500 個ずつ存在する」条件下で行った。これらの荷物は次の性質を持つ。

- 地上に置かれた荷物 1 個は 1 格子点を占有する。
- 1 個体は一度に荷物を 1 個だけ運べる。

各個体は「時刻 t で自分の周囲 9 格子点に種類 i の荷物が $n_i(t)$ 個あった」ことを m step 間記憶し続ける ($i = A, B$)。各個体の周りの荷物 i の密度に関する記憶 $N_i(t)$ は次の (1) 式で与えられる。

$$N_i(t) = \sum_{j=0}^{m-1} \frac{n_i(t-j)}{m} \quad (1)$$

オリジナルの ALR では個体の状態は区別されないが、本論文では個体の状態を表すモードを設定した。個体が種類 i の荷物を持つ状態を輸送 i モード ($i = A, B$)、荷物を持たない状態を探索モードと定義する。各モード個体の行動を図 1 に図解する。その詳細な内容は以下のとおりである。

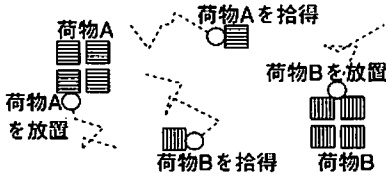


図1 ALRにおける荷物の空間配置と個体の動作

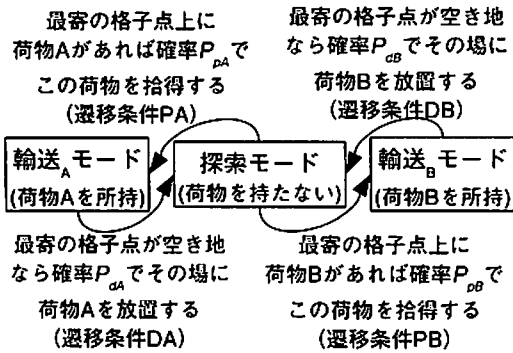


図2 ALRにおける個体の行動則。個体は図中の遷移条件を満たさない限り同じモードに留まる。

- 探索モード個体はランダムに歩き回る。
 - 最寄の格子点に種類 i の荷物があるとき拾得確率 P_{pi} でこの荷物を拾得し、輸送 i モードに移行する。
 - 荷物を拾得しなければ探索モードを続ける。
- 輸送 i モード個体はランダムに歩き回る。
 - 最寄の格子点が空き地なら放置確率 P_{di} で手持ちの荷物をこの点上に放置し、探索モードに移行する。
 - 放置しないなら輸送 i モードを続ける。

但し、拾得・放置確率 P_{pi} , P_{di} は次の式で表される。

$$P_{pi} = \left(\frac{k_p}{N_i(t) + k_p} \right)^2 \quad (2)$$

$$P_{di} = \left(\frac{N_i(t)}{N_i(t) + k_d} \right)^2 \quad (3)$$

本論文では k_p を 3.5, k_d を 5.5 と設定した^{†1}。

†1 k_d が小さいとき、孤立した荷物の隣に荷物を放置する確率 $P_{di} = \{(1/m)/(1/m + k_d)\}^2$ が高くなる。また k_p が小さいとき (特に記憶長 m が極端に短いとき)、孤立した荷物を収集する確率 $P_{pi} = \{k_p/(1/m + k_p)\}^2$ は低くなる。これらの効果により、 k_d , k_p が小さいときには絶えず小さなクラスターが生成されるため、分

以上に述べた ALR の個体の行動則を図 2 の状態遷移グラフで表す。この状態遷移グラフで個体は遷移条件を満たさない限り同じモードに留まる。

表 1 に示した相違点に関わらず、本論文の ALR はオリジナルと同様の振る舞いを示す。次節ではその数値実験例を示し、その挙動を解説する。

2.2 ALR の数値実験例

個体の記憶長 $m = 3, 15, 50$ step のときの ALR の数値実験例を図 3 に示し、図 3 左右に ALR の過渡状態と定常状態の分布図を並べる。ALR の分別収集に要する step 数は記憶長により変わるので、図 3-a, b, c では記憶長に応じて過渡状態や定常状態の step 数を変えた。図 3 の分布図で、横線及び縦線はそれぞれ地上に置かれた荷物 A 及び荷物 B を表す。黒の点は探索モード個体を表し、灰色の三角印は輸送 A, B モード個体を表す (右上及び左下の欠けた三角印がそれぞれ輸送 A 及び輸送 B モード個体を表す)。

これらの分布図上で「縦横斜めに隣接する 2 格子点に同種類の荷物が置かれている」とき、2 点は同じクラスターに属すると定義する。

ALR の数値実験結果を以下にまとめる。

- 記憶長が短い場合 ($m = 3$ step)、過渡状態 (図 3-a 左) では小さく緊密に結びついたクラスターが複数形成される。時間経過につれ、近接した同種のクラスター同士が融合したり、遠隔のクラスター間で競合が起こるため、徐々にクラスター数は減少する。最終的に定常状態では種類別に大きな単一クラスターが形成され、荷物の分別収集が達成されるが (図 3-a 右)、分別収集の達成までに長い step 数を要する。
- 記憶長が延びると ($m = 15$ step)、緩く結びついた単一クラスターが形成されるようになり (図 3-b 左)、より短い step 数で分別収集を達成する傾向を示す (図 3-b 右)。
- 記憶長が長すぎる場合 ($m = 50$ step)、荷物の分布が緩く散らばりすぎて定常状態でも分別収集を達成できない (図 3-c 右)。

別収集の終了判定が難しくなる。これを避けるため本論文では k_d , k_p を十分大きく設定した。

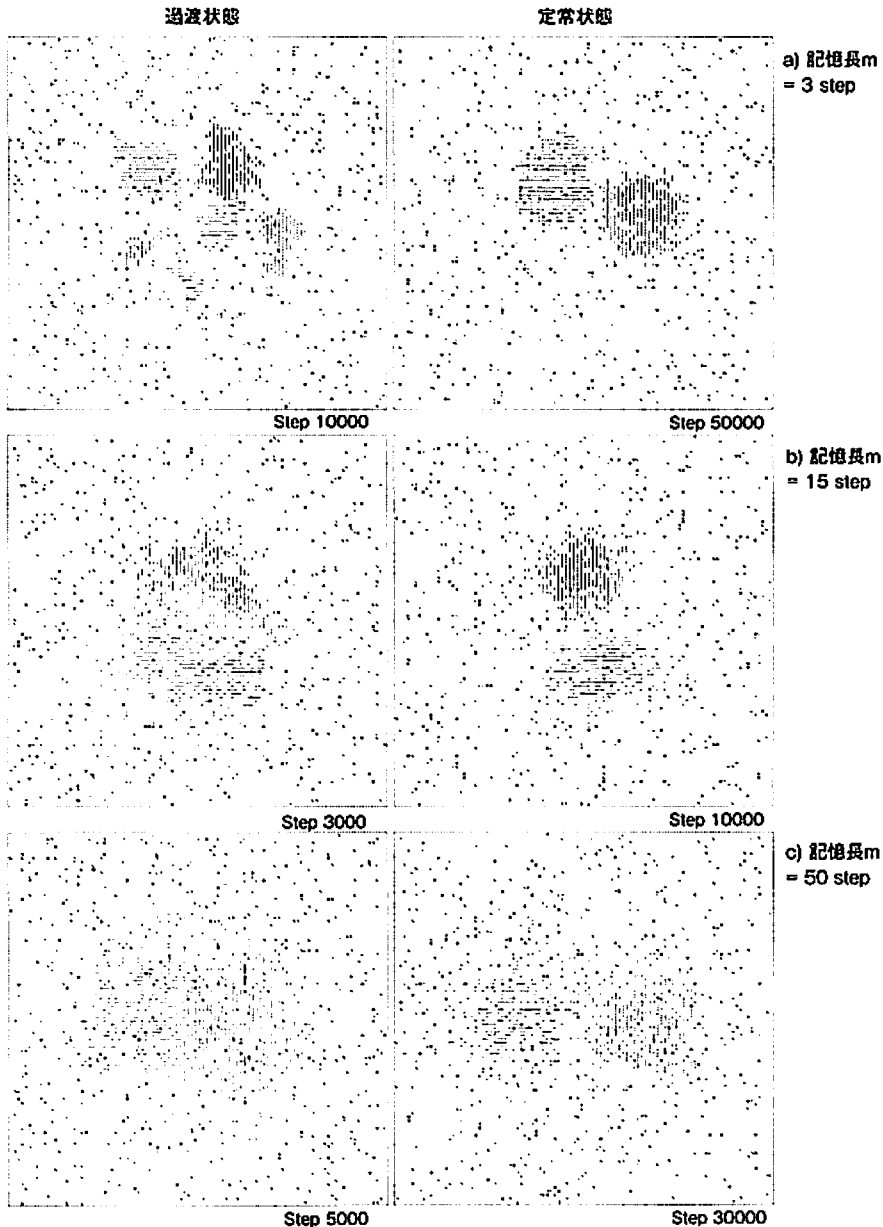


図3 記憶長を変えたときのALRの数値実験例

本論文のALRはオリジナルのALRと同様の振る舞いを示す。Oprisanは記憶長の代わりに忘却係数を持つALRの数値実験を行い、本論文のALRの数値実験(記憶長が短い場合～ある程度延びた場合)と同様の結果を得ている[10]。

3 拡散信号を用いるMASの設計方法

3.1 具体的な手順

筆者らは、拡散信号を用いて間接通信するMASの協調動作を柔軟に設計する方法を提案した[9]。この系で個体は少数の状態(モード)に分化し、状況に応じて状態を変える。そこで拡散信号の空間分布を介し

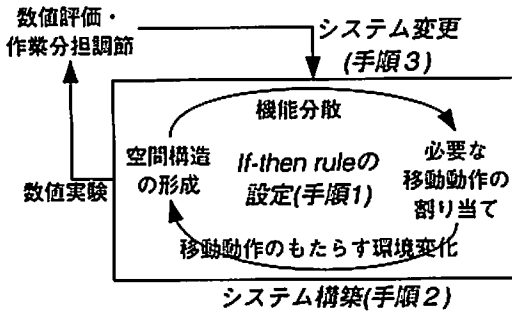


図4 協調動作を組織する系の設計方法

て個体の状態分化と集団内部の作業分担を関連付け、作業分担比率を調整するよう個体の行動則(状態遷移則)を修正していく。この方法を図4に図解し、以下にその具体的な手順を説明する。

手順1: if-then ルールの設定 個体は周辺環境や内部状態に応じて状態分化する。タスク遂行に必要な移動動作を各状態の個体に割り当てると、個体の移動が環境変化を引き起こして空間構造を形作る。以上より、空間構造(if部に対応)を目印に移動動作(then部に対応)を割り当て、各状態のif-thenルールを設定する。

手順2: 個体の行動則の構築 これらのif-thenルールに優先順位を付けて組み合わせ、決定的有限オートマトンの状態遷移則を構築する。この状態遷移則を行動則として全個体で共有する。

手順3: 集団の作業分担調節 系の作業分担比率は、空間構造上に分布する各状態の個体の分量で決まる。効率的な協調動作を組織するには、適切な分量の個体を適切な場所に配置して適切な作業を分担させる必要がある。(例えば「十分な分量の個体が必要な場所まで辿りつけず作業を遂行できない」或いは「大量の個体が一か所に集中したため系全体でデッドロックが起こる」等の事態を回避したい。) 過不足なく作業分担比率を調節して系の数値評価を上げるために、手順1に戻って個体の行動則を逐次修正していく。

本方法では「個体の状態分化」と「空間構造の形成」と「作業間の配分比率の調整」が密接に結びついている。これに対し配分比率調整を扱う従来のモデル[6][14]ではもっと長い時間規模の現象(カースト分化

など)を対象としており、空間構造を扱わない。

3.2 上記方法の適用例

これまで筆者らはフェロモン通信を用いた蟻コロニーの集団採餌を数理モデル化し、上記の方法を用いて採餌効率を上げるようモデルを設計改良した[8][9]。

採餌行動理論[12]の観点から見ると、蟻コロニーの採餌効率は「既知餌場への動員」と「未知餌場の探索」間の個体配分で決まる。文献[7][8][9]で筆者らは、上記手順に従って蟻個体の行動則に拡散信号源への誘引動作と信号不応期のランダム移動を組み込んだMASを設計した。この系では拡散信号源への誘引動作により、多くの個体が遠くから既知餌場へと効率的に動員される。また信号不応期のランダム移動により、拡散信号源への個体の集中が抑えられ、未知餌場の探索が促される。この系で信号不応期を十分長く設定すると、系全体は時間的に安定な反応拡散系と同様の動作を示す(この系では信号拡散と誘引動作が局所的な興奮系として作用するのに対し、信号不応期のランダム移動が広域の抑制系として作用する)。この系は探索と動員に配分される個体の比率を安定的に調整するため、高い採餌効率を実現する。

[8][9]では上記方法を用いて蟻コロニーの採餌タスクモデルの設計改良を行い、上記の反応拡散機構を備えた系が高い採餌効率を示すことを確認した。(8)ではハンドコーディングで試行錯誤しながらモデルを設計改良した。また[9]では、[8]で得られたif-thenルール群の優先順位をランダムにシャッフルして個体の行動則を構築し、採餌効率の高い系を残すよう進化計算を行ってモデルを自動設計した。)

採餌タスクだけではなく分別収集タスクのモデルでも上記方法が有効であることを示すため、本論文では上記方法を用いてALR個体の行動則に拡散信号源への誘引動作と信号不応期のランダム移動を付加し、新たに信号拡散システムを構築した。次章ではその詳細について説明する。

4 信号拡散システム

4.1 信号拡散システムの構築と設定

本節ではALRに拡散信号と反応拡散機構を順次導

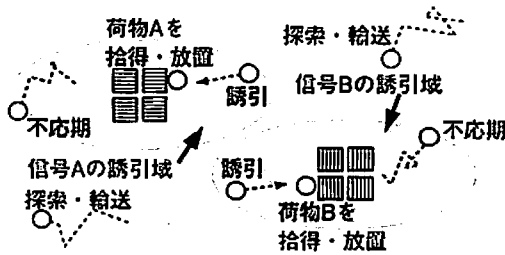


図5 拡散信号の作る空間構造と信号拡散システムにおける個体の行動

入して信号拡散システムを構築し、その数値実験条件を設定した。

4.1.1 拡散信号の導入

始めに信号拡散システムで遠隔情報を荷う拡散信号を導入する。このシステムでは、地上に放置された荷物 A, B から徐々に信号物質 A, B が蒸発し、大気中に広く拡散する。ここで3次元領域内の格子点 (x, y, z) 上における信号物質 i の濃度を $S_i(x, y, z)$ とおく ($i = A, B$)。「地上 ($z = 0$) の格子点 (x, y) 上に荷物 i が在るとき $D_i(x, y) = 1$ 、荷物 i が不在とき $D_i(x, y) = 0$ 」と定義すると、信号物質 i の蒸発や拡散は次の (4.1.1) 式で表される。

$$\left\{ \frac{d}{dt} - \gamma_{dif} \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right) \right\} S_i(x, y, z) = \begin{cases} \gamma_{vap} D_i(x, y) & (z = 0) \\ 0 & (z > 0) \end{cases} \quad (4)$$

信号拡散の数値計算には次の条件を用いた。

- 広さ $0 \leq x, y < 100$ 、高さ $0 \leq z < 3$ (格子点) に亘る3次元領域内の格子点上で $S_{A,B}(x, y, z)$ を離散計算し、1 step につき3回反復する。
- 信号拡散に関して、上記の3次元領域のつくる6境界面のうち、地面 $z = 0$ は反射端、その他の5境界面は吸収端とする。

信号 i の誘引域とは、「大気中の信号 i 濃度 $S_i(x, y, 0)$ が個体の感受性閾値 S_{thr} より高い領域」を指す ($i = A, B$)。図5には荷物 A, B から拡散した信号 A, B の誘引域を示す。

本論文では、誘引域が「荷物周囲の数格子点に数 step 間に亘って広がる」よう、信号物質の拡散係数を $\gamma_{dif} = 3 \times 0.14$ 、減衰係数を $\gamma_{vap} = 3 \times 0.1$ 、閾値を

$S_{thr} = 0.01$ に設定した。

4.1.2 反応拡散機構の導入

次に反応拡散機構を導入するため、ALR 個体の行動則に拡散信号源への誘引動作と信号不応期のランダム移動を付け加え (誘引モードと信号不応期を参照)、信号拡散システムを構築した。この信号拡散システムの個体の行動とその空間分布を図5に図解する。

また図6には信号拡散システムの個体の行動則を表す状態遷移グラフを示す。図6中の3つの灰色の楕円部分は、それぞれ図2のALR 個体の行動則の探索モード・輸送 A, B モードに対応する部分であり、それぞれに誘引モードと信号不応期が付加されている。図6では、荷物の受け渡しに関わる状態遷移 (ALR から引き継いだ部分) を灰色の線で表す (遷移条件 PA 及び PB に対応する部分を破線及び一点鎖線で表し、DA と DB に対応する部分を実線で表す)。また新たに付加された状態遷移を黒の太線で強調している。

以下、図6に示した信号拡散システムの個体の行動則を具体的に説明する。

- 探索モードの個体は地上をランダムに歩き回る。
 - 信号感受性の有無にかかわらず、探索モードの個体はその場に種類 i の荷物があれば確率 P_{pi} で荷物 i を拾得し、輸送 i モードに移行する ($i = A, B$)。これに伴い一定期間信号 i 感受性を喪失する (信号 i 不応期)。
 - 信号 i 不応期の個体は一定期間経過すると、信号 i 感受性を回復する (信号 i 感受期)。
 - 信号 i 感受期の個体が信号 i の誘引域に遭遇したら、誘引 i モードに移行する (±は荷物の有無を示す)。
 - 上記以外の場合、現状を維持する。
- 輸送 i モードの個体は地上をランダムに歩き回る ($i = A, B$)。
 - 信号感受性の有無にかかわらず、輸送 i モードの個体はその場に荷物がなければ確率 P_{di} で荷物 i を放置し、探索モードに移行する。これに伴い一定期間信号 i 感受性を喪失する (信号 i 不応期)。
 - 信号 i 不応期の個体は一定期間経過すると、信号 i 感受性を回復する (信号 i 感受期)。

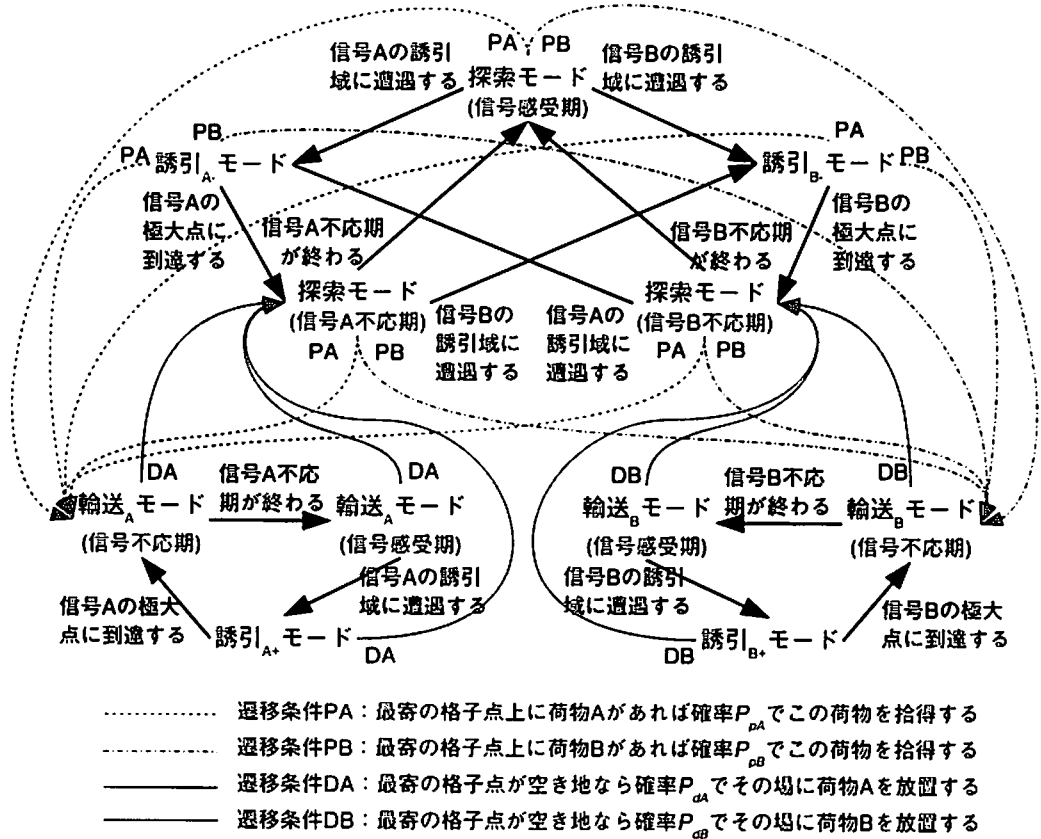


図6 信号拡散システムにおける個体の行動則。個体は図中の遷移条件を満たさない限り同じモードに留まる。

- 信号 i 感受期の個体が信号 i の誘引域に遭遇したら、誘引 $_{i+}$ モードに移行する。
- 上記以外の場合、現状を維持する。
- 誘引 $_{i+}$ モードの個体は信号 i 感受性を持ち、周辺9格子点の中で信号 i 濃度が最大となる点に移動する ($i = A, B$)。
 - 誘引 $_{i-}$ モード個体はその場に荷物 j ($j = A, B$)があれば確率 P_{pj} で荷物 j を拾得し、輸送 $_j$ モードへ移行する。これに伴い一定期間信号 j 感受性を喪失する (信号 j 不応期)。
 - 誘引 $_{i+}$ モード個体はその場に荷物がなければ確率 P_{di} で荷物 i を放置し、探索モードに移行する。これに伴い一定期間信号 i 感受性を喪失する (信号 i 不応期)。
 - 信号 i 局大点に到達すると、誘引 $_{i-}$ モード個体は探索モードへ、誘引 $_{i+}$ モード個体は

- 輸送 $_i$ モードへ移行する。これに伴い一定期間信号 i 感受性を喪失する (信号 i 不応期)。
- 上記以外の場合、現状を維持する。

このとき、信号極大点で信号感受性を失った個体が信号不応期を終えた時に誘引域外に達する確率を上げるよう、十分長い不応期 (50 step) を設定した。

4.2 信号拡散システムの数値実験例

個体の記憶長 m を3, 15, 50 stepと変えたときの信号拡散システムの数値実験例を図7に示す。信号感受期の探索・輸送モード個体や荷物 A, B の表示は図3と同じだが、図7では4.1節のシステム拡張に伴って次の記号を付け加えた。薄い灰色の領域は信号 A, B の誘引域を表し、濃い灰色の領域は両者が重なる領域を示す。黒い ∞ 字印及び δ 字印はそれぞれ誘引 $_{A-}$ 及び誘引 $_{B-}$ モード個体を表し、灰色の ∞ 字印及び

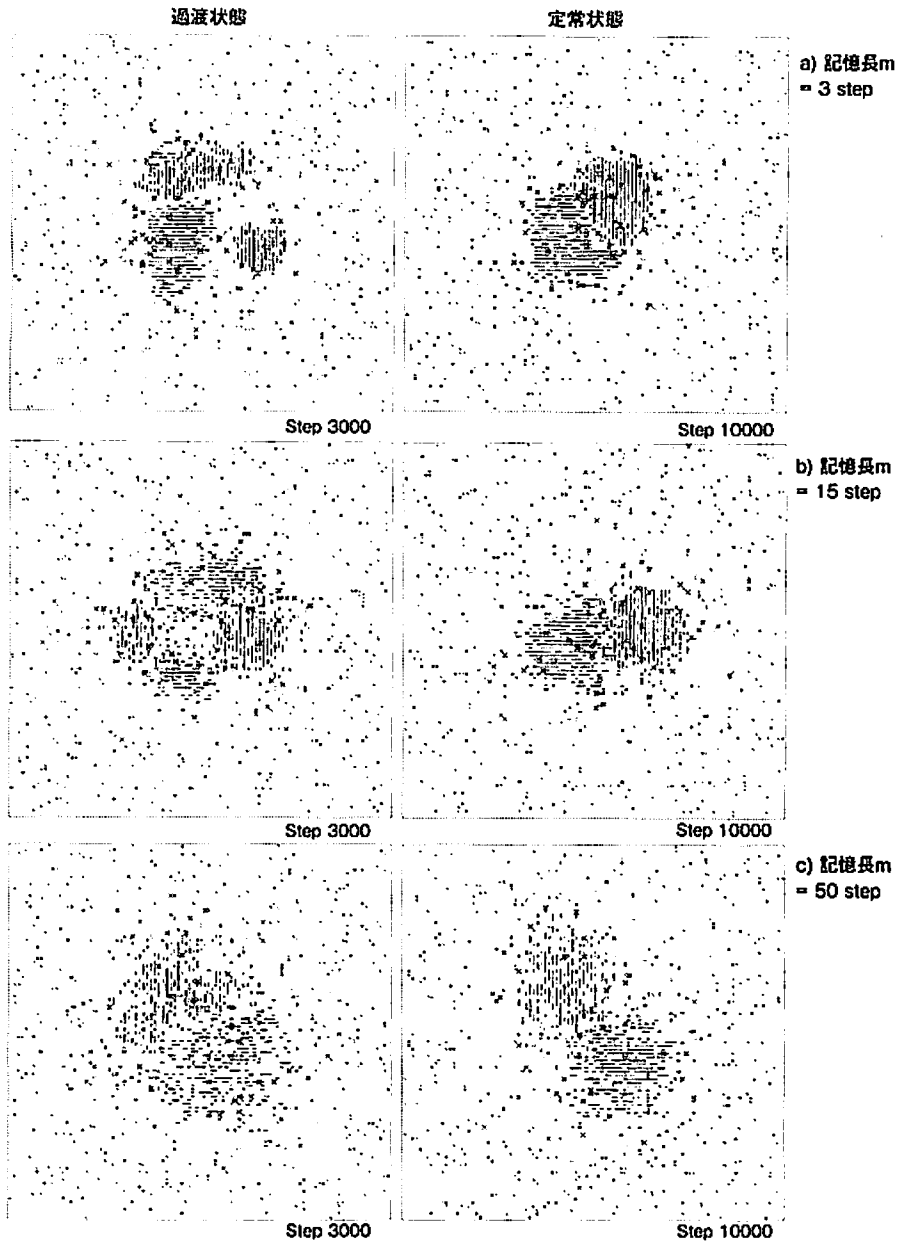


図7 記憶長を変えたときの信号拡散システムの数値実験例

8字印はそれぞれ誘因 A_+ 及び誘因 B_+ モード個体を表す。黒い×字印は信号不応期の探索モード個体を表し、灰色の横長及び縦長の×字印はそれぞれ信号不応期の輸送 A 及び輸送 B モード個体を表す。

信号拡散システムの数値実験結果を次にまとめる。

- 図7に示すとおり、信号拡散システムも定常状

態で大きい単一クラスターを形成する。

- ALR同様に信号拡散システムでも、記憶長 m の延長につれて、荷物が緩く広がって配置される傾向を示す。
- 同じ記憶長を持つALRと信号拡散システムを比較すると、信号拡散システムの方がより緊密に

結びついた単一クラスターをより短いステップ数で形成する傾向を示す。

本章では、拡散信号の遠隔作用で信号拡散システムの分別収集能力が ALR より向上することを確認する。

5 ALR と信号拡散システムの数値評価

本章では分別収集効率の評価基準を提案し、ALR と信号拡散システムを数値評価して比較した。

5.1 評価基準の設定

本論文では ALR と信号拡散システムの分別収集の作業効率を「初期状態から何 step で分別収集が終了するか」で数値評価した。具体的には「数値実験の間、地上に置かれた荷物 A, B の分布図を 100 step 毎に記録し続け、連続した 5 枚の分布図中 3 枚以上で以下の 2 条件が成立する」とき分別収集が終了したと自動判定した。

- 種類 A, B の最大クラスターの大きさが、地上に置かれた荷物 A, B 総数の 8 割を超える。
- 種類 A, B の 2 番目に大きいクラスターの大きさがそれぞれ荷物 5 個を超えない。

上記の数値を多少変えても次節の結論に大きい影響は与えないので、ここでは便宜的に設定した。

5.2 数値評価の結果

記憶長 $m = 3, 15$ step の条件下では、ALR も信号拡散システムも定常状態で分別収集を終了する。そこで両者の数値実験を 50 試行ずつ行って、各試行の分別収集終了 step 数を図 8 にプロットし、その平均値を求めた。図 8 より、信号拡散システムが平均して ALR より短い step 数で分別収集を終える。即ち高い分別収集効率を示すことがわかった。特に $m = 3$ step のときの効率向上は著しい。

これに対し $m = 50$ step の条件下では、ALR も信号拡散システムも定常状態で分別収集が終了しない。そこで、分別収集終了 step 数の代わりに「定常状態における最大クラスターの大きさ ÷ 地上の荷物総数の平均値 (40000 ~ 50000 step 間の 10 試行平均)」を用いて両者を数値評価した。上記の平均値は ALR で 48%、信号拡散システムで 73% となり、信号拡散

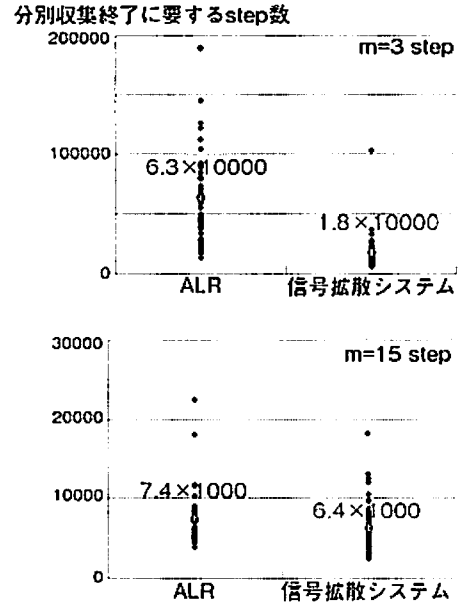


図 8 $m = 3, 15$ step の場合の ALR と信号拡散システムの作業効率の数値評価

システムは ALR に比べてより大きく緊密に結びついたクラスターを形成することがわかった。

5.3 信号拡散システムの作業効率向上の機序

ALR は記憶長 m が延びるにつれ、よりクラスターから離れた場所に荷物を分布するよう動作する。この遠隔作用が近接クラスター間の融合や遠隔クラスター間の競争を促すため、ALR では m の延長につれて単一クラスターの形成が速まる。反面、 m の延長につれて多くの荷物がクラスター外部に放置されるため、定常状態の ALR のクラスターのサイズは小さくなる。ALR の分別収集効率は、この遠隔作用のみならず単一クラスター形成時間の短縮とクラスターサイズの縮小との兼ね合いによって決まる。

一方、信号拡散システムでは拡散信号も遠隔作用を荷っている。記憶長が短い場合にも拡散信号の遠隔作用で複数クラスター間の融合や競争が促されるため、信号拡散システムは ALR に比べて少ない step 数で単一クラスターを形成する。記憶長が長い場合にも、誘引動作によって荷物がより効率的に誘引域中心部に集められるため、信号拡散システムは ALR に比べて

より緊密に結びついたクラスターを形成する。

このように信号拡散システムでは記憶長によらず ALR と比べて分別収集効率の向上がみられる。

6 議論と考察

筆者らは、多数個体が拡散信号を用いて間接通信する MAS において協調動作を柔軟に設計する方法を提案した。本論文ではこの方法を用いて既存の分別収集タスクモデル (Deneubourg の ALR) に拡散信号と反応拡散機構を導入し、信号拡散システムを構築した。ALR と信号拡散システムを数値評価したところ、前者に比べて後者は短い step 数で大きく緊密な単一クラスターに荷物を積み分ける、つまり高い分別収集効率を示すことを確認した。

以下、今回の論文で残された課題について考察する。

6.1 個体同士の空間的重なるの取り扱い

本論文で構築した ALR と異なり、オリジナルの ALR で個体同士は重なって存在できない。オリジナルの ALR の構成個体数を増やすと、個体間の接触頻度増加に伴い個体のランダムな移動が妨げられることが予想される。

筆者らの提案方法は個体間の直接的影響を極力排除しており、その中には個体同士の接触・衝突も含まれる。この方法を群ロボット制御等に応用するには個体間の接触や衝突への対応が不可避であり、そのために個体間の直接通信を介した個体間距離や接触個体数等の制限機構が必要となる。大規模な個体移動を扱うモデル (本論文や [8][9] 等) に上記の制限機構を導入するのは難しい。そこで次の課題として、上記の制限機構下で多数個体を空間配置する問題に対して提案方法を応用したい。

6.2 設計の自動化について

本設計方法において if-then ルールの生成は重要なプロセスであり (行動則の構築や系の評価は自動化できるが、if-then ルールの自動生成は難しい)、その難易度はタスクに大きく依存する。本論文では ALR の行動則を一旦 if-then ルールまで分解した上で、これらに誘引動作と信号不応期を付け加えて if-then ルー

ル群を生成し、ハンドコーディングで信号拡散システムの行動則を構築した。これらの if-then ルール群の優先順位を入れ替えて複数の系を構築し、その中から作業効率の高い系の選抜を繰り返す単純な進化計算を行えば、原理的には分別収集タスクモデルの自動設計が可能である ([9] では [8] で得られた if-then ルール群に同様の操作を行って数種類の採餌タスクモデルを自動設計した)。但し図 8 に示すように分別収集タスクモデルでは数値評価のばらつきが大きいため、ハンドコーディングで設計した系より効率のよい系を自動設計で得るのは難しい。

参考文献

- [1] Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G.: *Swarm intelligence*, Oxford Univ. Press, 1999.
- [2] Deneubourg, J.-L., Goss, S., Franks, N., Sendova-Franks, A., Detrain, C. and Chretien, L.: The dynamics of collective sorting robot-like ant and ant-like robot, in *Proc. of 1st intl. conf. on simulation of adaptive behavior: from animals to animals*, 1991, pp.356-363.
- [3] Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colomi, A.: Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Trans. on System, Man and Cybern. B*, Vol. 26-1 (1996), pp. 29-41.
- [4] Jones, C., Shell, D., Mataric, M. J. and Gerky, B.: Principled approaches to the design of multi-robot systems, in *Proc. of Workshop on Networked Robotics, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS-04)*, 2004, pp. 71-80.
- [5] Mataric, M.: Designing emergent behaviors: From local interactions to collective intelligence, in *Proc. of 2nd intl. conf. on simulation of adaptive behavior: from animals to animals 2*, 1992, pp. 432-441.
- [6] Mizuguchi, T. and Sugawara, K.: Proportion regulation in task allocation systems, *Trans. IEICE*, Vol. E89A, No. 10 (2006), pp. 2745-2751.
- [7] Nakamura, M. and Kurumatani, K.: Formation mechanism of pheromone pattern and control of foraging behavior in an ant colony model, *Artificial Life V*, The MIT Press, 1997, pp. 67-74.
- [8] 中村真理, 車谷浩一: 蟻コロニーモデルの設計手法の提案と二つの設計例, *情報処理学会論文誌 SIG*, Vol. 47 (2006), pp. 89-100.
- [9] 中村真理, 浅間一: 進化計算による蟻コロニーモデルの自動設計, *情報処理学会論文誌 TOM*, Vol. 1, No. 2 (2009), pp. 47-56.
- [10] Oprisan, S.: Task oriented functional self-organization of mobile agents team: memory optimization based on correlation feature, in

- ANTS2004*, LNCS 3172, Springer, 2004, pp.398-405.
- [11] Parker, L. E. and Fang, T.: Building multi-robot coalitions through automated task solution synthesis, in *Proc. of the IEEE*, Vol. 94, No. 7, 2006, pp. 1289-1305.
- [12] Stephens, D. W. and Krebs, J. R.: *Foraging theory*, Princeton Univ. press, 1986.
- [13] Sugawara, K., Yoshihara, I., Abe, K. and Sano, M.: Cooperative behavior of interacting robots, *Artificial Life Robotics*, Vol. 2 (1998), pp. 62-67.
- [14] Theraulaz, G., Bonabeau, E. and Deneubourg, J.-L.: Response threshold reinforcement and the regulation of division of labor in insect societies, in *Proc. R. Soc. Lond. B*, Vol. 265, 1998, pp. 327-332.