

進化計算による蟻コロニーモデルの自動設計

中村 真理^{†1} 浅間 一^{†2}

筆者は蟻コロニーの協調作業を参考にしたマルチエージェント (MA) 系の設計方法を提案している。中村ら (2006) ではこの方法に基づいて、蟻コロニーの採餌タスクモデルの採餌効率を上げるよう試行錯誤で設計改良した結果、簡潔な行動則を持つ 3 つのモデルを構築した。本論文では上記方法を簡単な進化計算に適用して、採餌タスクモデルを自動設計する。進化計算の数値実験では、4 種類の採餌戦略と通信不成立状態をとるモデルが繰り返し出現し、短い世代数で準最適戦略 (不応期戦略) だけが次代に残る状態に収束する。この準最適戦略は中村ら (2006) の 3 つのモデルのうち最も採餌効率の高いモデルとよく一致する。また 4 種の採餌戦略のうち上位 3 種の戦略をとるモデルは、それぞれ中村ら (2006) の 3 つのモデルとよく一致した作業分担や挙動を示す。以上より本論文では中村ら (2006) の設計の妥当性を確認した。

Automatic Design of Ant Colony Model by Using Evolutionary Computation

MARI NAKAMURA^{†1} and HAJIME ASAMA^{†2}

I have proposed a method to design multi-agent (MA) model, inspired by cooperation in ant colony. In Nakamura, et al. (2006), I have modified foraging model of ant colony by applying this method, and have designed three models with brief behavior rule, by trial and error. In this paper, I apply this method to automatic design of foraging model, by using simple evolutionary computation. In simulation, four foraging strategies and bad-communication states appear repeatedly. The three best strategies out of the four correspond to the three foraging models in Nakamura, et al. (2006), respectively. Within short generations, a quasi-optimal strategy corresponding to the best of the three models grows dominant. This supports validity of the design in Nakamura, et al. (2006).

^{†1} 独立行政法人産業技術総合研究所セルエンジニアリング研究部門

Research Institute for Cell Engineering, Advanced Institute of Science and Technology

^{†2} 東京大学人工物工学研究センター

RACE (Research into Artifacts, Center for Engineering), The University of Tokyo

1. はじめに

多数要素が自律的に動作する自律分散系では柔軟性・適応性・頑健性・効率性を備えた協調動作が期待されている。従来の自律分散系の協調手法は次の 2 通りに分類できる²⁾⁻⁴⁾。

(1) 少数 (20 台以下) 個体間で個体識別しながら柔軟にタスクを割り当てる方式。この方式は不均質な個体間にも適用可能であり、精緻で効率的な作業連携が可能になる。その反面、動作の頑健性に欠け、個体数増加にともなう状態や通信の激増に対応できない。

(2) 多数の互換的な個体群が環境を介して間接通信する方式。この方式では、柔軟なタスク割当てが難しいため効率的な協調作業は難しいが、頑健な協調作業を実現できる。

以上のように、従来の協調手法で柔軟性・適応性・頑健性・効率性を同時に成立させることは困難である。そこで筆者は蟻の協調作業を参考にして、後者の協調手法で柔軟なタスク割当てが可能になるよう工夫した。

歩行性の社会性昆虫である蟻は、徐々に地上から蒸発し広く大気中に拡散するフェロモンを介して間接通信を行う。蟻はフェロモン信号の生成する空間構造を利用して役割を分担し、コロニー全体で複数作業を並列処理する。

筆者はこのような蟻コロニーの協調作業を参考にしたマルチエージェント (MA) モデルの設計方法を開発した^{1),5)}。本方法は下記手順に従う。その概要を図 1 に示す。

手順 1. if then rule の設定：個体が移動しながらフェロモン通信を行うと、環境に空間構造が生成される。各個体は自らの内部状態と周辺環境情報に応じて状態遷移する。このとき各状態の個体の行動を if then rule (以下「ルール」と表記) で書き表し、ルールの if 節に上記の「内部状態と環境情報」を設定し、then 節に「タスク遂行に必要な移動動作」を割り当てる。

手順 2. 行動則の構築：複数のルールを組み合わせ、決定的な有限オートマトンの状態遷移則の形で個体の行動則を構築する。

手順 3. 行動則の構成論的設計：系全体に適切にタスクを割り当てるには、空間構造に動作を割り当てる (手順 1) だけではなく、空間構造上の個体数を調整して系の作業分担を調整する必要が生じる。そこで上記行動則を共有する MAS の数値実験を行い、作業分担や作業効率を数値評価する。さらにこれらの評価を上げるようルールを操作し、構成論的に行動則を設計する。

従来の蟻コロニーの MA モデル⁶⁾⁻⁹⁾ では「タスク割当て・空間構造形成・作業分担調整」のうちの 2 つまでしか取り扱えなかった (たとえば Mataric⁶⁾ や菅原⁷⁾ の群口ポットモデ

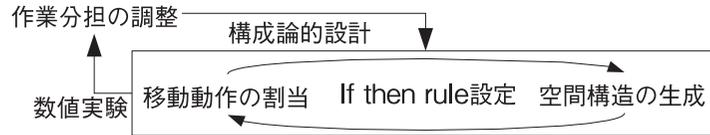


図1 蟻コロニーを模倣したMASの設計方法
Fig.1 Method for designing MA model for ant colony.

ルでは、必要な動作を割り当てて柔軟に行動則を設計できるが、多数個体間の作業分担調整は想定されていない。Stigmergyに基づくBonabeauら⁸⁾のモデルでは間接通信を重視して行動則を設定しているため、柔軟なタスク割当てが難しい。菅原の分業調整モデル⁹⁾は空間構造を持たない。これに対し、上記の方法ではこれらの3要素を同時に取り扱うことにより、効率的に動作するモデルをタスクに応じて柔軟に設計することが可能になる。そのかわり本設計方法を運用するには図1の逆問題を解く手間がかかる。

文献1)で筆者はこの方法に従って蟻コロニーの採餌行動を試行錯誤でモデル化し、少数のルールから成る簡潔な行動則を用いて、以下の3種の採餌タスクモデルを構築した。

非誘引モデル：地上にフェロモントレイルを分泌し、餌場の位置を記録する。

誘引モデル：非誘引モデルに「大気中へのフェロモン拡散」と「信号源への誘引動作」を付加し、信号動員を強化するよう改良する。

不応期モデル：誘引モデルに「信号不応期」を付加し、個体の信号感受性を切り替えるよう改良する。コロニー全体が「新規餌の探索」と「既知餌信号への動員」間の作業分担を調整するため、高い採餌効率を実現できる。

文献1)の結果をふまえ、本論文では前述の手法に簡単な進化計算を適用して蟻コロニーの採餌タスクモデルを自動設計する。進化計算の際、行動則の構成要素には文献1)で設計したルール群を再利用する。この進化計算の数値実験により下記の結果が得られた。

- 進化過程では4種の採餌戦略と通信不成立状態をとるモデルが繰り返し出現する。
- 短い世代数で準最適解（不応期戦略）だけが継代される状態に収束する。
- 上記の4種の採餌戦略のうち高い採餌効率を示す上位3種は、上記3つの採餌タスクモデルと同様の挙動を示し、よく一致した作業分担を示す。

これらの結果により文献1)のモデル設計の妥当性が確認できる。

本論文の2章では上記の進化計算の詳細について説明する。3章ではその数値実験結果について説明する。4章では進化計算により得られた各種採餌戦略について説明する。

2. 方法

2.1 蟻コロニーのモデル構築

文献1)の採餌タスクモデルと同様に、本論文の蟻コロニーモデルは下記要件に従う。

2.1.1 採餌行動における作業分担と採餌効率

蟻の採餌行動は以下の3つの部分作業に分解される。

餌探索サブタスク：地上をランダムに歩き回って未知餌場や信号の探索を行う。

餌輸送サブタスク：餌場の位置を他個体に知らせるためフェロモンを分泌し、餌を巣まで輸送する。

信号動員サブタスク：フェロモン信号に従って既知の餌場へ向かう。

このときランダムに移動する餌探索中の蟻よりも、既知の餌場への信号に動員される蟻の方が短い時間で餌場に到達できる。ただし餌探索中の蟻の密度が減ると、コロニー全体で未知の餌探索に費やす時間が増大する。蟻コロニーの採餌効率（時間あたり餌輸送量）を上げるためには、餌探索・信号動員サブタスク間で適切な作業分担が必要となる¹⁰⁾。

2.1.2 フェロモン信号の生成する空間領域

蟻が地面に分泌したフェロモンは徐々に蒸発し、大気中に広く拡散する。地上および大気中のフェロモン濃度をそれぞれ $T(x, y)$ 、 $P(x, y, z)$ とすると、フェロモンの蒸発・拡散作用は下のように定式化される。

$$(d/dt + \gamma_{vap})T(x, y) = 0 \quad (1)$$

$$\{d/dt - \gamma_{dif}(d^2/dx^2 + d^2/dy^2 + d^2/dz^2)\}P(x, y, z) = 0 \quad (z > 0)$$

$$\text{or} = \gamma_{vap}T(x, y) \quad (z = 0) \quad (2)$$

数値実験の際に上2式を差分化し、 $0 \leq x, y < 100 \text{ grid}$ 、 $0 \leq z < 3 \text{ grid}$ の格子点上で1stepにつき3回反復計算する。フェロモン拡散の境界条件は、地面 $z = 0$ が反射端、他境界が吸収端とする。

図2にはフェロモン信号の生成する空間領域、トレイル（地上のフェロモン濃度の高い領域 $T(x, y) \geq T_{thr}$ ）と誘引域（大気中のフェロモン濃度の高い領域 $P(x, y, 0) \geq P_{thr}$ ）を示している。このとき、フェロモン通信のパラメータを次のように設定する。

- トレイルの持続時間は「フェロモン分泌量/ $(T_{thr} \times \gamma_{vap})$ 」で決まる。蟻1個体が残したトレイルにより他個体が餌場まで動員されるよう、減衰係数 γ_{vap} を 3×0.07 、閾値 T_{thr} を0.01、分泌量を10.0/stepに設定する。
- 誘引域の広さは「分泌量 $\times \gamma_{vap} / (P_{thr} \times \gamma_{dif})$ 」で決まる。誘引域が蟻の視野（次項で

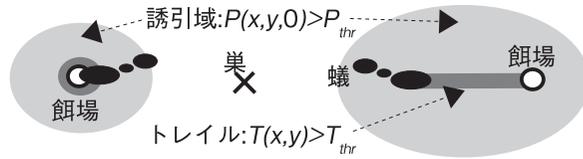


図2 フェロモンの蒸発・拡散と信号領域
Fig.2 Pheromone signal regions.

設定)より広がるよう, 蒸発係数 γ_{vap} を 3×0.14 , 閾値 P_{thr} を 0.01 に設定する.

2.1.3 数値実験パラメータの設定

採餌行動の数値実験には次のパラメータを用いた.

- コロニーモデルは地上 ($z = 0 \text{ grid}$, $0 \leq x, y < 100 \text{ grid}$) を歩き回る蟻 600 個体から構成されている.
- 巣は上記領域の中心に位置している. 蟻はつねに巣の匂いから巣の方向を感知する.
- 蟻が刺激に反応して行動するまでの時間を 1 step と定める. 蟻は半径 1.5 grid の視野を持ち, 地上を最速 1.5 grid/step で移動する. フェロモン信号に従う蟻は視野内の格子点上を移動する.
- 「ランダムに歩行する」蟻は, 上記の最高速度で真っ直ぐ移動しつつ, 0.1 回/step の割合でランダムに移動方向を変える.
- 蟻 1 個体が運ぶ餌の量を 1 ユニットと定義する.

数値実験の際には「つねに餌場数を一定に保つため, 餌場がなくなると一定の大きさの餌の塊をランダムな場所に供給する」という給餌条件を用いている. 文献 1) では上記の条件下で餌の塊の大きさや餌場数を変えて数値実験を行い, 採餌効率に及ぼす影響を確認した. 本論文では, 餌の塊の大きさを 150 ユニット, 餌場数を 3 カ所に固定する.

2.2 進化計算の適用

進化計算を適用するため, 本論文ではモデル化の手順を次のように修正する.

2.2.1 ルール設定

文献 1) では単純なルールを組み合わせた簡潔な行動則を持つ蟻コロニーモデルをハンドコーディングで設計した. 本項では, 前論文で用いた 11 個のルールを改めて「ルール名: 「if 節」, 「then 節」」の形式で列挙し, ルール間の相違点を強調して表す.

餌場_{rec} ルール: 「餌を持たない蟻が餌場を見つける」と, 「餌を拾う」.

餌場_{sen} ルール: 「餌を持たない蟻が餌場を見つける」と, 「餌場にフェロモンを分泌し餌

を拾う」.

巣_{rec} ルール: 「餌を持つ蟻が巣に帰る」と, 「餌を巣に置き, ランダムに歩行する」.

巣_{rec} ルール: 「餌を持つ蟻が巣に帰る」と, 「餌を巣に置き, 巣周辺のトレイルの 1 つをランダムに選び, たどってゆく」.

輸送_{rec} ルール: 「餌を持つ蟻」は「巣に向かって歩く」.

輸送_{rec} ルール: 「餌を持つ蟻」は「地面にフェロモンを分泌しながら巣に向かって歩く」.

探索ルール: 「餌を持たない蟻」は「ランダムに歩行する」.

誘引ルール: 「餌を持たない蟻が誘引域を見つける」と, 「視野内で最も大気中フェロモン濃度の高い点に移動する」.

追跡_{rec} ルール: 「餌を持たない蟻がトレイルを見つける」と, 「巣と反対方向にトレイルをたどる」.

追跡_{swi} ルール: 「餌を持たない蟻がトレイルを見つける」と, 「巣と反対方向にトレイルをたどり, 行先がなければ不応期カウントを 20 としてランダムに歩行する」.

不応期ルール: 「不応期カウント > 0 の蟻」は「カウントを 1 つ減らし, フェロモン信号を無視してランダムに歩行する」.

上記ルール名の添字の *sen* は send (発信: フェロモン分泌), *rec* は receive (受信), *swi* は switch (フェロモン感受性切替え) の略である.

文献 1) と同じく, 本論文では蟻個体のフェロモン不応期長を 20 step とした. 「不応期終了後に多くの個体が誘引域外へ拡散する」には長い不応期長が必要だが, 長すぎる場合には採餌効率が低下するため, これらの兼ね合いで上記の不応期長を設定した.

2.2.2 遺伝子型の符号化

これら 11 個のルールを実行優先順に並べた配列を蟻の遺伝子型とする. 同一コロニーの蟻は遺伝子型を共有しており, 個々の蟻は内部状態 (蟻の進行方向・餌保持の有無・フェロモン不応期の残りカウント) や周辺の局所手がかり (フェロモン信号・餌や巣の存在) に該当するルールを優先順に 1 つ選んで実行する.

図 3 は上記 11 ルールの発現条件の遮蔽関係を示す. この遮蔽関係は主に信号領域どうしの包含関係を反映している. 図 3 の外側にあるルールの優先順位が内側にあるルールより高いとき, 内側のルールは発現を妨げられる. 一方, 採餌行動には図 3 の最内部に位置する巣・餌場ルールの発現が不可欠である. そこで巣・餌場ルールを最優先し確実に発現させるため, つねに遺伝子配列の最前部にこれらのルールを配置するよう制限する.

本論文では以後, ルール間の遮蔽関係の判別を容易にするため, 図 3 に示すように「各

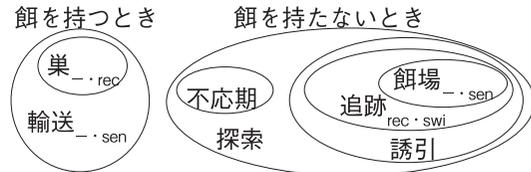


図3 ルール間の遮蔽関係

Fig. 3 Masking effect among eleven if-then rules.

蟻が餌を持つ/持たない」に応じて遺伝子型を2分割し、1組の配列として表記する(この組表記により $6 \times 21 = 126$ 通りの等価なルール配列を略記できる)。

2.2.3 進化計算の詳細

本論文では、5つの蟻コロニーモデルからなる集団に対し単純な進化計算を適用して、より高い採餌効率を示す行動則を自動設計する数値実験を行う。

進化計算の初期状態では全5コロニーで(優先順位の高い順に)「巣 → 巣_{rec} → 餌場 → 餌場_{sen} → 輸送 → 輸送_{sen} → 探索 → 誘引・追跡_{rec/swi}・不応期」という遺伝子型が与えられている。この遺伝子型は「蟻がフェロモン通信を行わず、餌の探索と輸送だけを行う」行動則に対応する(その詳細については4.1節で説明する)。

このコロニー集団に対し、各コロニーのルール配列の中から一定数(=突然変異率)のルール対をランダムに選んで順序を交換し、変異コロニーのルール配列を作る(ただし順序交換の際に、つねに巣・餌場ルールを最優先するよう順序を制限している)。さらに、変異前後の各5コロニー、計10コロニーの数値実験を1,000step間ずつ行い、その中から採餌効率の高い5コロニーを選抜して次代に残す。以上の操作を20世代にわたって繰り返す。

3. 数値実験結果

進化計算を用いた行動則の自動設計の数値実験により、次の結果が得られた。

- 通信不成立状態と4種の採餌戦略(餌場誘引・トレイル・誘引・不応期)をとるモデルが進化過程で繰り返し出現する(これらの採餌戦略については4章で詳述する)。
- 短い世代数で準最適解(不応期戦略)だけが次代に引き継がれる(=採餌効率の上位5割を占める)状態へ収束する。
- 4種の戦略のうち採餌効率の高い不応期・誘引・トレイル戦略をとるモデルは、文献1)の3つの採餌タスクモデル(不応期・誘引・非誘引モデル)と類似した挙動を示し、同条件で数値実験を行うときよく一致した作業分担(対応する比率配分の差が5%程度に

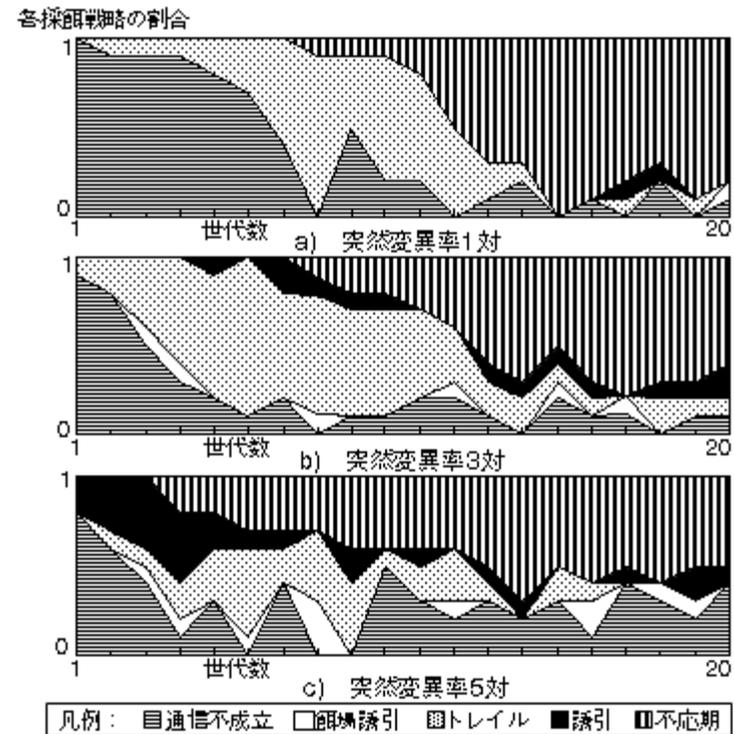


図4 突然変異率と進化過程の例

Fig. 4 Evolutionary processes varying mutation rate.

収まる)を示す。

確認のため同条件で100世代まで進化計算の数値実験を行ったが、別種の採餌戦略は現れなかった。進化計算の数値実験例を図4に示す。

各戦略の採餌効率(単位時間あたり餌輸送量, unit/step)の5試行平均と変動係数(標準偏差 ÷ 平均)を表1に比較する。その概要は次のとおりである。

- 通信不成立状態の採餌効率は一律に低い。
- 餌場誘引・トレイル・誘引戦略はほぼ同程度の採餌効率を示す。特に餌場誘引・誘引戦略のモデルは不安定な挙動を反映して、高い変動係数を示す。
- 不応期戦略をとるモデルは、著しく高い採餌効率と安定な挙動を示す。

表 1 各種採餌戦略時の採餌効率 (5 試行平均) とその変動係数
Table 1 Foraging efficiency (averaged for 5 sessions)
and its variation coefficient of each strategy.

採餌戦略	通信不成立	餌場誘引	トレイル	誘引	不応期
採餌効率 (unit/step)	1.0 以下	2.76	3.13	3.07	4.04
変動係数 (標準偏差 ÷ 平均)	広く変異	0.067	0.018	0.067	0.021

4. 各種採餌戦略の説明

進化計算で得られた各種採餌戦略をとるモデルの挙動やその作業分担について説明する。本論文の MA モデルでは必ず巣・餌場・輸送・探索ルールが発現するので、蟻は基本的に「ランダムに餌を探して歩き回り、餌を見つけたら真っ直ぐ巣まで持ち帰る」よう動作する。その他のルールの発現次第でフェロモン通信が成立するとき、各種の採餌戦略が形成される。本章では以下の各種採餌戦略について順次説明していく。

通信不成立状態：様々な原因（蟻がフェロモンを分泌しない、発信信号を受信できない、不適切な集合現象が生じる等）によりフェロモン通信が阻害される状態を指す。

餌場誘引戦略：蟻は餌場上にフェロモンを分泌し、誘引域内の蟻を餌場へ動員する。

トレイル戦略：蟻は餌場と巣の間にフェロモントレイルを残し、トレイル上の蟻を餌場へと動員する。

誘引戦略：蟻は餌場と巣の間にトレイルを残し、誘引域内の蟻を餌場へ動員する。

不応期戦略：蟻は餌場と巣の間にトレイルを残し、誘引域内の蟻を餌場へ動員する。動員された蟻が餌獲得に失敗すると、しばらくの間フェロモン信号感受性を失う。

これらの採餌戦略をとるモデルの数値実験例を図 5 に列挙する。図 5 各図左にはフェロモン信号（誘引域：赤紫、トレイル：青紫）や巣（灰色の×印）・餌場（灰色の印）や蟻（点）の空間分布を示す。蟻の色は発現するルールの種類を示している（赤：餌場_{-sen}・巣_{-rec}ルール、橙色：輸送_{-sen}ルール、水色：探索ルール、黄緑：誘引ルール、黄：追跡_{rec/swi}ルール、青：不応期ルール）。また図 5 各図右には、同じ配色を用いて各ルールの発現頻度の時間変化（200 step 間）を示している。

4.1 通信不成立状態

本節では「蟻がフェロモン信号を発信も受信もしない」初期状態を通信不成立状態の代表例として取り上げる。初期状態のコロニーの蟻は次の遺伝子型を共有する。

餌があるとき：巣₋ > 巣_{rec} > 輸送₋ > 輸送_{sen}

餌がないとき：餌場₋ > 餌場_{sen} > 探索 > 誘引・追跡_{rec/swi}・不応期

このとき図 6 a のチャートに示すように、蟻は巣₋・餌場₋・輸送₋・探索ルールを発現する。これらのルールを発現する蟻の空間分布を図 6 b に図解する。

これらのルールをつなぎ直すと図 6 c 左の状態遷移グラフが作図できる。ここで一過性の巣₋・餌場₋ルールを探索・輸送₋ルール間の遷移条件に繰り込んで簡略化すると、蟻の行動則を表す図 6 c の状態遷移グラフが得られる。この行動則を共有するモデルの数値実験例を図 5 a に示す。

図 6 d には数値実験結果より、各ルールを遂行する蟻の割合（斜体）と発現ルールを変えた蟻の割合（立体）を 5 試行 × 1,000 step にわたって平均したものを示している。これより初期状態のコロニーの作業配分はほとんど餌探索サブタスクで占められる（探索ルール 97.6%）ことが分かる。

この初期状態の例で示したように、多様な理由によってルール間の状態遷移が妨げられるとき、通信不成立状態が生じる。

4.2 餌場誘引戦略

餌場誘引戦略下の蟻は以下の遺伝子型を共有する。

餌があるとき：巣_{-rec} > 輸送₋ > 輸送_{sen}

餌がないとき：餌場_{sen} > 餌場₋ > 誘引 > 探索・不応期・追跡_{rec/swi}

この中から蟻は巣_{-rec}・輸送₋・餌場_{sen}・誘引・探索ルールを発現するので、図 7 a の行動則チャートが得られる（これらのルールに加え不応期・追跡_{rec/swi}ルールを発現する場合にも、モデルの挙動にほとんど影響はない）。

これらのルールを発現する蟻の空間分布を図 7 b に図解する。局所手掛りを介してこれらのルールをつなぎ直し、グラフを簡略化すると、蟻の行動則を表す図 7 c の状態遷移グラフが得られる。この行動則を共有するモデルの数値実験例を図 5 b に示す。

図 7 d には数値実験結果から作業分担と状態遷移を 5 試行 × 1,000 step にわたって平均したものを示している。誘引域に動員された蟻が巣まで餌を輸送するため、「探索 → 誘引 → 輸送」ルール間を循環する強い状態遷移が生成されている。

初期状態に比べれば餌場誘引戦略下では作業配分の餌探索サブタスクへの偏りは緩和されている（探索ルール 83%）。とはいえ餌場誘引戦略下の蟻は餌の輸送後に既知の餌場を再探索するのに長時間を費やすため、その作業配分はまだ大きく餌探索に偏っている。

4.3 トレイル戦略

トレイル戦略下の蟻は以下の遺伝子型を共有する。

52 進化計算による蟻コロニーモデルの自動設計

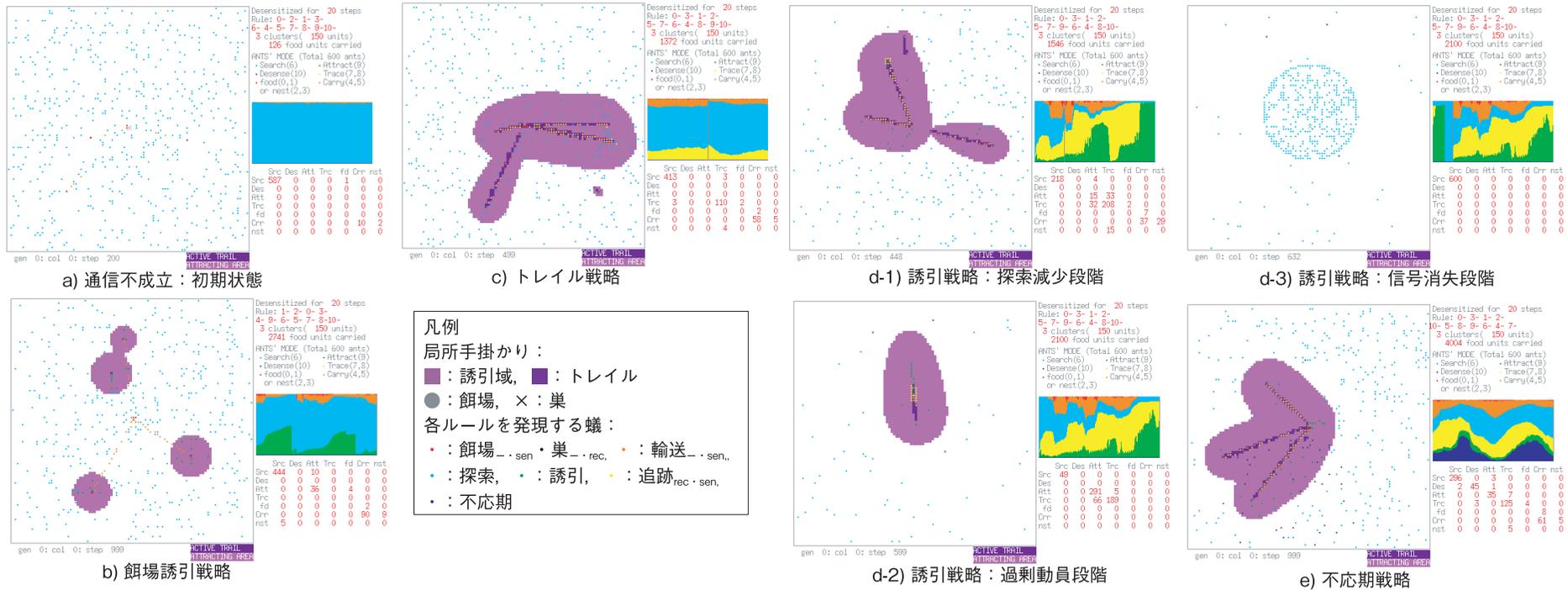


図5 各種採餌戦略をとるモデルの数値実験例
 Fig. 5 Snapshots of ant colony models with different foraging strategy.

餌があるとき：巣 rec > 輸送 sen > 輸送 -

餌がないとき：餌場 sen > 追跡 rec/swi > 探索・不応期 > 誘引

この中から蟻は巣 rec ・輸送 sen ・餌場 rec ・追跡 rec/swi ・探索ルールを発現するので、図8aの行動則チャートが得られる（これらのルールに加え不応期ルールを発現する場合にも、モデルの挙動に大きい影響はない）。

これらの各ルールを発現する蟻の空間分布を図8bに図解する。局所手掛かりを介してこれらのルールをつなぎ直し、グラフを簡略化すると、蟻の行動則を表す図8cの状態遷移グラフが得られる。この行動則を共有するモデルの数値実験例を図5cに示す。この戦略下の蟻は誘引域に反応しないので、誘引域の上をランダムに歩き回る。

図8dには数値実験結果より作業分担と状態遷移を5試行×1,000stepにわたって平均し

たものを示している。トレイル端に餌があるとき、トレイル上の蟻は巣と餌場を往復しながら「追跡 ⇄ 輸送」ルール間で状態遷移を繰り返す。ただしトレイルが狭くて強い動員を起こせないで、この戦略下でも餌探索サブタスクに偏った作業分担が形成される（探索ルール70%）。餌場誘引戦略と比べると、トレイル戦略下では餌輸送後に既知餌場の再探索にかかる時間を省ける分、作業配分の餌探索サブタスクへの偏りはかなり改善されている。

4.4 誘引戦略

この戦略下で蟻は以下の遺伝子型を共有する。

餌があるとき：巣 rec > 輸送 sen > 輸送 -

餌がないとき：餌場 sen/rec > 不応期・追跡 rec > 追跡 swi > 誘引 > 探索、または、餌場 sen > 追跡 rec/swi > 誘引 > 探索・不応期

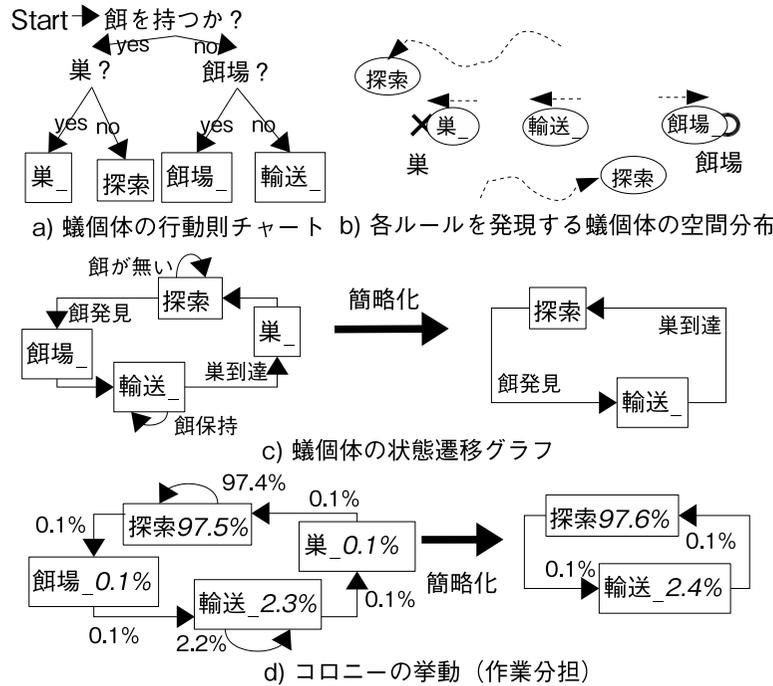


図6 通信不成立状態の一例：初期状態
Fig.6 Initial state: an example of bad-communication.

この中から蟻は巣_{-/rec}・輸送_{sen}・餌場_{-/sen}・追跡_{rec/swi}・誘引・探索ルールを発現するので、図9aの行動則チャートが得られる(上記の配列を持つ蟻では実質的に不応期ルールの発現が妨げられる。前者の配列を持つ蟻は不応期のトリガとなる追跡_{swi}ルールを発現しないので、不応期が作動しない。後者の配列を持つ蟻では誘引ルールが不応期ルールより優先されるため、誘引域内で不応期ルールが発現しない)。

これらのルールを発現する蟻の空間分布を図9bに図解する。局所手掛りを介してこれらのルールをつなぎ直し、グラフを簡略化すると、蟻の行動則を表す図9cの状態遷移グラフが得られる。この行動則を共有するモデルは図5dに例示したように不規則で不安定な長期変動を示す。この長期変動は「餌探索サブタスクへの作業配分」を指標として、次の3段階に分けられる。

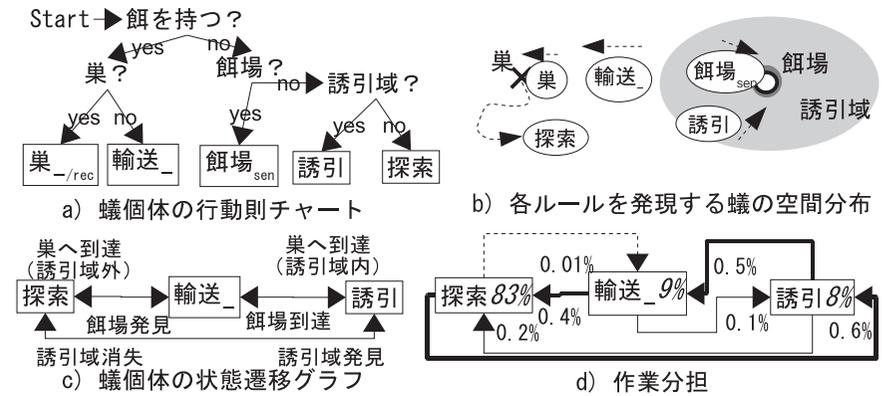


図7 餌場誘引戦略
Fig.7 Attraction-to-food strategy.

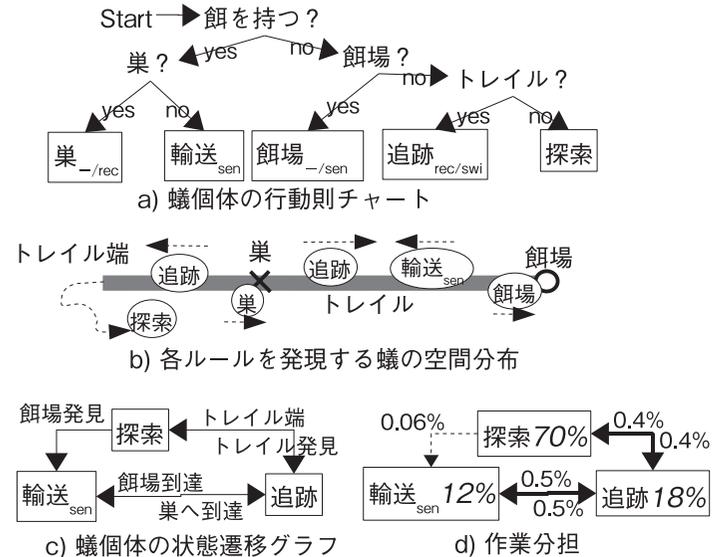


図8 トレイル戦略
Fig.8 Trail strategy.

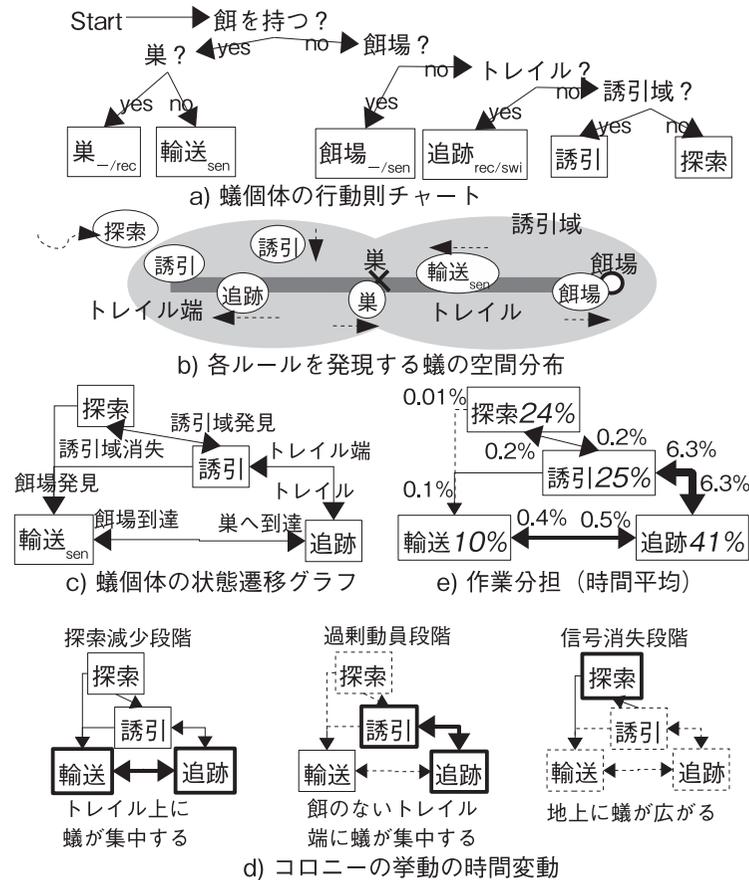


図 9 誘引戦略

Fig. 9 Attraction-to-trail strategy.

探索減少段階 (図 5 d-1, 図 9 d 左): この段階では蟻が徐々に誘引域に囲い込まれる。それにつれて餌探索・信号動員サブタスクへの作業分担は漸減・漸増する。極端に餌探索サブタスクへの作業分担が減少するとき、系の挙動は次段階に移行する。

過剰動員段階 (図 5 d-2, 図 9 d 中): この段階では餌を運び終わった後に残された誘引域内に大量の蟻が囲い込まれるため、極端に信号動員サブタスクに偏った作業分担が見られ

る。これらの蟻はトレイル端付近に拘束され、「追跡 ⇄ 誘引」ルール間で頻繁に状態遷移を繰り返す。これらの蟻が新規餌場への信号を感知すると、一団となって短期間で餌を探りつくし、再びトレイル端に拘束され続ける。この段階では餌探索サブタスクへの作業分担が極端に減るため、新規餌場探索に長い時間を要する。信号消失までに新規餌場発見が間に合わない場合、モデルの挙動は次段階に移行する。

信号消失段階 (図 5 d-3, 図 9 d 右): 誘引域消失にともない、囲い込まれていた大量の蟻が探索ルールへと状態遷移する。このとき作業分担は餌探索サブタスクで占められる。蟻が餌を見つけると、再び探索減少段階に移行する。

図 9 e には数値実験結果より作業分担と状態遷移を 5 試行 × 1,000 step にわたって平均したものを示している。誘引戦略下では過剰動員段階を反映して、誘引・追跡ルール間に極端に強い状態遷移が生じ、信号動員サブタスクに大きく偏った作業分担を示す (誘引・追跡ルール 66%)。

4.5 不応期戦略

この戦略下で蟻は以下の遺伝子型を共有する。

餌があるとき: 巣 $_{/rec}$ > 輸送 $_{sen}$ > 輸送 $_{-}$

餌がないとき: 餌場発信 \cdot \rightarrow 不応期 \cdot { 追跡 $_{swi}$ > 追跡 $_{rec}$ } > 誘引 > 探索

上記のルール配列を持つ蟻は 巣 $_{/rec}$ \cdot 輸送 $_{sen}$ \cdot 餌場 $_{/sen}$ \cdot 不応期 \cdot 追跡 $_{swi}$ \cdot 誘引 \cdot 探索ルールを発現するので図 10 a の行動則チャートが得られる。この遺伝子型を持つ蟻では追跡 $_{swi}$ \cdot 不応期ルールの両方が発現するのでフェロモン不応期が作動し、さらに不応期ルールが誘引ルールより優先されるので不応期は有効に作用する。

これらのルールを発現する蟻の空間分布を図 10 b に図解する。局所手がかりを介してこれらのルールをつなぎ直し、グラフを簡略化すると、蟻の行動則を表す図 10 c の状態遷移グラフが得られる。この行動則を共有するモデルの数値実験例を図 5 e に示す。

図 10 d に示すとおり、トレイル端に餌があるとき蟻はトレイル上に集中し、餌がないとき蟻はフェロモン信号を無視して地上に広く分散して新規餌を探索する。このモデルはトレイル端の状況に応じて蟻の空間分布や作業分担を自動調整するよう動作する。この機構により、不応期戦略をとるモデルでは採餌効率の向上もたらされる (表 1 参照)。

図 10 e には、数値実験結果より作業分担と状態遷移を 5 試行 × 1,000 step にわたって平均したものを示している。不応期戦略下では餌探索 (探索 \cdot 不応期ルール 54%) および信号動員 (誘引 \cdot 追跡 $_{swi}$ ルール 31%) サブタスク間で作業分担が調整されている。

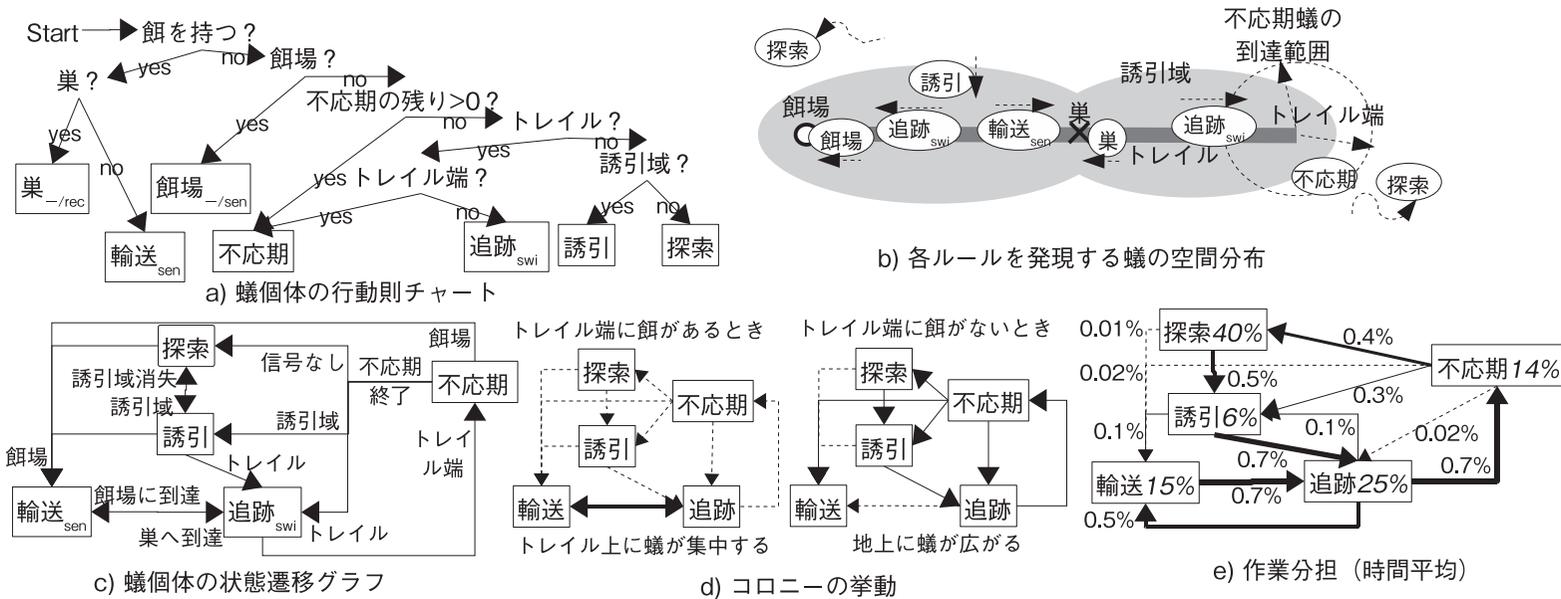


図 10 不応期戦略
Fig. 10 Desensitization strategy.

5. 考 察

筆者は蟻のフェロモン通信を模倣して、「タスク割当て・空間構造の形成・作業分担調整」を同時に取り扱う MAS の設計手法を開発した。文献 1) ではこの設計手法を蟻コロニーの採餌行動のモデル化に適用し、少数の単純なルールを組み合わせることで簡潔な行動則を持つ 3 つの採餌タスクモデルを試行錯誤で設計した。また 3 つのモデルの中で「拡散信号源への誘引動作」と「信号不応期」を備えた不応期モデルが最も高い採餌効率を示すことを確認した。

これをふまえ本論文では進化計算を適用して文献 1) で用いたルール群をシャッフルし、採餌タスクモデルの自動設計を行った。進化計算の数値実験では通信不成立状態と 4 種類の採餌戦略が繰り返し出現するが、短い世代数で準最適解 (不応期戦略) だけが次代に引き継がれる状態に収束した。また 4 種の戦略のうち上位 3 種をとるモデルが文献 1) の 3 つのモデルとよく一致した挙動や作業分担を示すことから、文献 1) のモデル設計の妥当性を確認

した。

本論文では MAS の行動則を自動設計するにあたり、ルールの組合せを限定して信号に関するパラメータを固定している。パラメータの学習や新規ルールの自動生成へ応用する場合には、確率的な状態遷移を扱えるような工夫が必要になるであろう。

謝辞 本研究に関して金沢工業大学の鈴木良次教授に有益なご助言を賜りましたこと、深く感謝いたします。また (独) 産業技術総合研究所セルエンジニアリング部門の皆様のご協力に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 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 2 つの設計例, 情報処理学会論文誌 SIG, Vol.47, No.14, pp.89-100 (2006).
- 2) Parker, L., et al.: Building multirobot coalitions through automated task solution

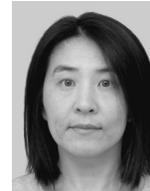
synthesis, *Proc. IEEE*, Vol.94, No.7, pp.1289–1304 (2006).

- 3) Gerkey, B.: A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems, *Intl. J. of Robotics Research*, Vol.23, pp.939–954 (2004).
- 4) Jones, C., et al.: Building multirobot coalitions through automated task solution synthesis, *Proc. workshop on networked robotics, IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2004).
- 5) Nakamura, M., et al.: Formation mechanism of pheromone pattern and control of foraging behavior in an ant colony model, *Artificial Life V*, pp.67–74, The MIT Press (1997).
- 6) Mataric, M.: Designing emergent behaviors: From local interaction to collective intelligence, *Proc. 2nd intl. Conf. on simulation of adaptive behavior: from animals to animats 2*, pp.432–441 (1992).
- 7) 菅原 研: 群れロボットの協調と群知能, *数理科学*, Vol.431, pp.69–75 (1999).
- 8) Bonabeau, E., et al.: *Swarm intelligence*, Oxford Univ. Press (1999).
- 9) 菅原 研ほか: 社会的適応行動から学ぶ群ロボット—アリのコロニー形成と維持を対象として, *計測と制御*, Vol.46, No.12, pp.928–933 (2007).
- 10) Stephens, D.W., et al.: *Foraging theory*, Princeton Univ. Press (1986).

(平成 20 年 1 月 11 日受付)

(平成 20 年 7 月 28 日再受付)

(平成 20 年 9 月 16 日採録)



中村 真理

1989 年 3 月東京大学工学部計数工学科卒業．同年 4 月通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所．生物の数理モデル研究に従事．現在（独）産業技術総合研究所主任研究員．



浅間 一（正会員）

1984 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．1986 年 9 月理化学研究所化学工学研究室研究員補．同研究所研究員，副主任研究員を経て，2002 年 11 月東京大学人工物工学研究センター教授．2001 年日本機械学会ロボメカ部門学術業績賞等受賞．2005 年より科研費特定領域「移動知」領域代表．2007 年より IEEE Robotics and Automation Society AdCom member，2007 年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門部門長．日本機械学会フェロー．日本ロボット学会フェロー．工学博士（東京大学）．