

昆虫間相互作用のモデル化と群ロボット設計

東京大学 ○太田 順, 浅間 一, 理化学研究所 川端邦明

Behavioral modeling of crickets and multi-agent robot system design

○Jun OTA, Hajime ASAMA, The Univ. of Tokyo, Kuniaki KAWABATA, RIKEN

Abstract: Many studies have recently been made in the field of multi-agent robot systems. However, the design methodology of adaptive behavior of the multiple robots in the systems has not been thoroughly understood. In this paper, we discuss how the adaptive behaviors were designed for the multi-agent robot systems in our former studies. Then, we discuss the importance of modeling of group behaviors of insects such as crickets. Finally, we present a plan for modeling of the crickets' behaviors.

Keywords: multi-agent robot systems, crickets, adaptive behavior

1. C02 班の研究計画

群ロボット研究が広く行われている。そこでは、従来型の人工物システムには存在しない、柔軟性や適応性を有したシステム概念が指向されている。しかしながら、そのような柔軟性、適応機能を発現するメカニズムは解明されておらず、真に適応的な群ロボット系の設計原理は今だ解明されていない。

一方、ほとんどの生物が他者とインタラクションしながら生息している。過酷な自然条件下で生きながらえてきた生物は高度な適応・調整機能を有するマルチエージェント系であると言える。そのような生物の振る舞いを研究対象として、その適応メカニズムの解明を目指すことは非常に有用であると考えられる。

本研究では相互に闘争行動（オス同士・メス同士のインタラクション）や交尾行動（オスとメスのインタラクション）を行うコオロギに関する生態学的・神経生理学的モデル化を目指す。ここでモデル化対象としてコオロギを選択した理由としては、以下の四点が挙げられる。(1) 群適応性の基本機能と我々が考えている行動選択メカニズム、具体的には、プログラム行動とその神経修飾メカニズムが各個体内に組み込まれている。(2) 挙動が比較的シンプルであり、振る舞いの解析が容易である。(3) 神経構造の解析が可能な程度に個体サイズが大きい。(4) 飼育が比較的容易である。

本報ではまず2章で群ロボット研究の現状について概観する。3章でコオロギを用いた研究内容について説明する。4章で本報を結論付ける。

2. 群ロボット研究の概要

2. 1 総論

単独のロボットでは実現できない／実現に多大なコストがかかる（たとえば非常に時間がかかる）作業を複数台のロボットにより実現する群ロボット系研究がここ数十年の間多く行われている。

群ロボット系研究には二つの立場が考えられる。

最初に、アリやハチに代表される社会性昆虫の多能性や柔軟性を工学的に実現することを考え、その行動原理を、多くの低機能ロボットが集まった群ロボット系に展開することを目指した研究分野が存在する。上記特性を満たす人工物システムは革新的であるため、概念レベルから盛んに議論されており、その実現を目指して多くの研究がなされている。この分野の研究はSwarm intelligence と呼ばれる場合もある。

もう一つの立場として、昨今、家庭・工場等の環境において、情報処理能力を有する実体（これをロボットと呼んでも良いだろう）が何らかの作業をしており、かつまたこのようなロボットが同一の環境内に複数存在する状況、が多く見受けられる。このような環境における作業実現を考えた場合、要求作業性能がそれほど高くない場合ならば、個々のロボットの行動のみを設計対象とすれば良かった（逆に言えば、そうせざるを得なかった）。しかしながら近年要求性能がよりシビアになってくるにつれ、作業するロボットと他のロボットとの相互作用をも考慮する必要が出てきた。上手くすれば近くの他ロボットの助けを得て作業性能を向上させられるし、逆に下手をすればロボット同士の相互干渉により作業効率が劣化してしまう。この議論には、周辺技術の進歩も大きく関連している。すなわち、ロボット同士が相互に通信ネットワークで接続している状況は普通になっている。また、ロボットの移動機能が向上し、各ロボットの可動範囲が広がっている。その結果として、ロボット同士の相互作用を考慮する局面が増えてきている。

このような背景から群ロボット系の概念は今後更に重要に

なることが予想できる。ロボットを単体としてではなく、系（システム）として考える必要がある、という意味である。

「与えられた作業を実現する群ロボット系の構築」という問題をここでは群ロボット設計問題と呼ぶ。この設計問題は解決が非常に困難である。なぜなら、(1) まず、設計対象が多様である。作業実現のためにどのような単体ロボットを準備するか、もっと具体的にはどのようなハードウェア（センサ、アクチュエータ等）が必要か、から始まって、ロボットにどのような行動を埋め込めばよいか、学習・適応機能はどの程度必要か、それらのロボットはどのような情報のやりとり（通信）をすればよいか、群ロボット系として均質かまたは異質か、更にそれらは何台必要か、ロボットが円滑に動作するためにどの程度の作業環境の作りこみが必要か、等々の問題をすべて解決する必要がある。(2) また、群ロボット系全体の機能が個々のロボットの機能の線形和として記述できれば単純である。しかしながら実際は、ロボット同士の相互作用により、その対応関係が非線形で複雑である（そもそもその非線形性の発現を期待して群ロボット研究に従事している研究者が大勢を占めている）。ロボットとは3次元実世界空間内で一定体積を有しつつ移動する実体であり、群ロボット系においては相互に衝突を避けながら動き回るため、その挙動を解析的に議論することはそれほどやすすくない。すなわち、群ロボット系としての機能は、個々のロボットをシミュレーションまたは実世界で動かして見ないとわからないことが多い。これには通常多大な時間がかかり問題である。ロボットが移動することは可動範囲を拡張し大変有効であるが、一方でその挙動解析を困難にするという側面も有している。現状のこの研究分野では、上記の設計問題を全て解決する一般的な方法論を提示できるフェーズには至っていない。その意味から、群ロボット系における適応的行動と協調の発現原理はまだほとんど解明できていない、と言っても差し支えない。

現在行われている研究の具体的な方向性としては、ロボットが遂行する作業等の設計対象を固定して問題を簡便化した際に、ロボット間インタラクションをどうするか、換言すれば、前述の非線形性をどううまく利用するかという、ロボットの適応・学習的な協調行動設計について述べているものが多い。

2.2 群ロボット系の作業

上記の意味から、従来研究を作業毎に分類して議論した方

Table 1: Task classification of multi-agent robots

	One-time	Many-times
point reaching	- motion planning - cooperative handling of a large object - pattern formation	coming and going between two positions
region sweeping	- sweeping - map generation	- periodical cooperative sweeping
compound	- cooperative transportation in unknown environments	- collecting objects/ foraging - robot soccer

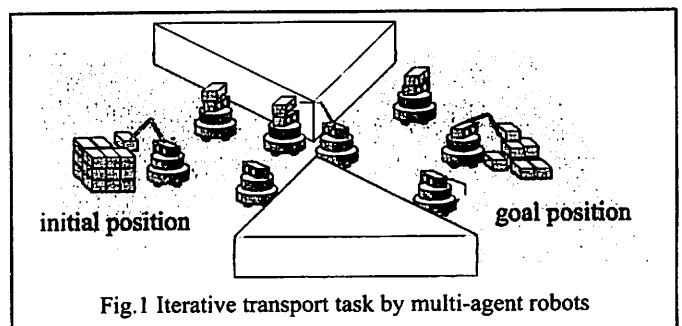
が理解しやすいと考える (Table 1)。ここでは、以下の二項目に基づいて分類している。(a) 作業目標次元：群ロボットで行う作業目標の次元に関する分類。以下の三種類により構成する。(a-1) 点到達作業、すなわち、目標状態が各ロボットの特定のコンフィグレーション（位置と姿勢）により記述されるもの。(a-2) 面被覆作業、すなわち、目標状態がある領域のロボットによる被覆で記述されるもの。さらに(a-3) 混在作業：点到達作業と面被覆作業の両者が混在する作業、とする。次の項目は、(b) 作業多様性：作業回数が何回か？である。これには(b-1) 単発作業、すなわち作業回数が1回であるもの、と(b-2) 繰り返し作業すなわち作業回数がn回であるもの、が存在する。「単発」作業を単純に繰り返すことで「繰り返し」作業が実現できるが、ここでの「繰り返し」とは、数回の試行によるロボットのなんらかの適応、学習を想定していることを意味する。項目が下に行く程、また右に行く程、作業要求は厳しくなる。

一般的に単発作業に対しては、完全なる環境情報の取得を前提としたロボットの事前行動計画・動作計画的側面が強くなる。点到達作業はグラフ探索における最短路問題や人工ポテンシャル法の形でモデル化可能であるし、面被覆作業の場合には、グラフ理論における巡回セールスマン問題解法やスタッカークレーン問題解法、一般化中国人配達人問題解法としてモデル化可能な場合が多い。

本報において我々が興味を持っている群ロボットの適応行動については、作業の繰り返し性が重要となる。そのような作業を対象とした著者らによる研究の概要を次節に述べる。

2.3 繰り返し作業

繰り返し動作は前述のように適応機能の導入を可能にする。点到達・繰り返し作業の一つとして、特定の場所に置かれた複数個の物体を別の場所まで搬送する繰り返し搬送問題は産業応用も指向した基本的な作業である。吉村らにより搬送対象物の性能が動的に変化しても適応する方法が提案されている¹⁾。これは(a) 可視グラフ法を用いて作業環境を双方向移動可能なグラフネットワークでモデル化し、(b) 確率学習オートマトンを用いて各ロボットが選択する経路の確率を学習することによって適切な搬送形態を獲得するものである。ここで、搬送対象物を受け渡すコストが小さいときには最短経路上をロボットが物体を受け渡ししながら並ぶリレー型の搬送形態に、逆に大きい時には初期位置と目標位置を結ぶ往復別々の経路を生成するループ型の搬送形態を構成する結果が得られている。井上らは上記アルゴリズムを未知環境に拡張して、グラフ



ネットワークを群ロボット自身が自律的に獲得する枠組みを提案した²⁾。作業環境の構造化とその環境下でのロボットの適応動作生成を分離した上記の二つの研究のアプローチは簡便性と見通しの良さという利点を有する。しかしながら、ロボット同士のインタラクションの有効利用という観点からは問題が残されていると思われる。

面被覆・繰り返し作業の例としては、環境探索、巡回作業等が考えられる (Fig. 2)。この作業は、ハミルトン閉路を複数台のロボットで分担して構成するMTSP (Multiple Traveling Salesmen Problem) 問題としてモデル化できる。Trevaiらは、以下のアルゴリズムを提案している³⁾。(a) 領域の外形が決まっているある特定の作業空間内で、認識された環境地図情報に基づき、その自由空間内に複数個観測点を配置している (それらの各点をすべて観測・巡回することで環境探索が完了する配置)。具体的には、湯浅らのグラフ上の反応拡散方程式⁴⁾を用いて、各観測点周囲の密集度を周囲の観測点との相対距離情報に基づいて評価し、その評価値を減少させる方向に各観測点を移動させることで配置を導出している。この手法は、観測点毎に自律分散的に計算することが可能であるため、計算の高速性と環境の動的変動への適応性が確保できる。(b) それらを巡回する経路を上述のMTSP 解を実時間で計算することで各ロボットの経路を導出し、動作生成する。シミュレーション結果ならびにその後の実験結果により、ロボットの台数効果 (台数が増大すると各ロボットあたりの経路長がほぼ台数比で減少する効果) ならびに障害物環境への適用可能性が示された。この研究では、一般的な自律分散系の設計原理であるグラフ上の反応拡散方程式を環境探索のための単位作業記述に利用することで、作業記述レベルにおいて、ある一定の適応性を付与することが可能となった。今後はそれらを観測レベル、行動レベルとどのように組み合わせて適応性を確保するか、という問題を解決する必要がある。

3. 今後の研究計画

ある一定の領域内に数匹のコオロギを放した状況を想定し、その際のコオロギの挙動をモデル化する。ここでは、コオロギの群適応性の解明を主目的とするため、コオロギの振る舞いの遷移の再現を目指し、より細かいレベルの挙動を例えば歩容の再現を目指すことはしない。

具体的には、

- ・機能を実現する神経回路網、神経回路モジュールのモデル化
- ・上記の機能を発現する信号伝達ならびに行動生成メカニズムのモデル化

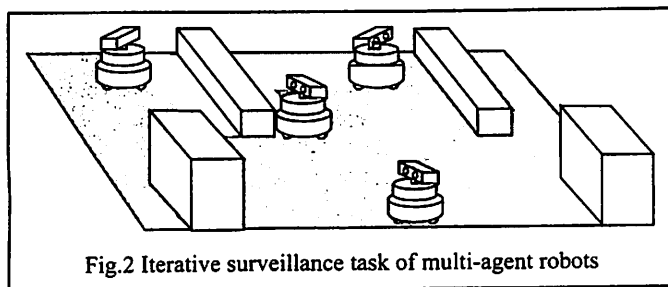


Fig.2 Iterative surveillance task of multi-agent robots

のそれぞれを行う。

前者については、通常のニューラルネットワークのモデルに素子間の位相の効果を組み入れたニューロモジュレータモデルの適用が不可欠である。具体的には既に提案されているいくつかの既存モデルの評価を行い、適切なモデル選択を行う。その後実際のコオロギの生理実験結果と比較することでモデルの改良を目指す (Fig.3)。

後者については、シミュレータを作成し、反射的な振る舞いをする仮想コオロギをその中に放つことでコオロギ間インタラクションモデルの構築ならびに改良を行う。ここで扱っているコオロギを Fig.4, Fig.5 に、観察結果に基づくオスコオロギの振る舞いモデルを Fig.6(a) に、作成したシミュレータのスナップショットを Fig.6(b)(c) に示す。モデル化に際し以下の手順をとる。

1. コオロギの群行動について、再現すべき挙動を複数個列挙する。
2. それぞれの挙動の再現状況についてスカラー値で表現できる評価指標を定める。
3. コオロギの振る舞いモデルを構成する。この際にコオロギに関する生理学的知見や、コオロギの振る舞いに関する観察結果をモデル中に組み入れる。
4. 詳細な振る舞いを規定する行動パラメータを少数個定義する。
5. 2を最適化する4の行動パラメータを何らかの最適化手法を用いて決定する。
6. その内容をシミュレータで再現し、観察し、実際のコオロギとの差異を議論する。その結果を踏まえて1に戻る。場合によってはコオロギの振る舞い観察実験や生理学実験を行うことで挙動計測結果の精度を向上させるべく努める。

このような構成によりコオロギの振る舞いモデルが構成できる。モデルの評価方法としては、現在のところ以下の事柄を考えている。

- ・ そのモデルに基づいて動いた仮想コオロギの振る舞いが、個々にとってある種の合理性を含んでいるかを調べる。それは例えば消費エネルギーの観点からも評価できる

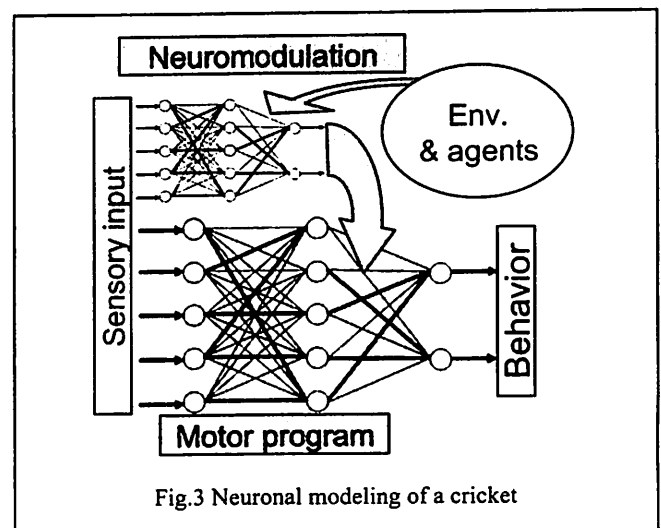


Fig.3 Neuronal modeling of a cricket

し、利用できる環境内のリソースの量と質という観点からも評価可能である。

- そのモデルが環境要因の変動等の外乱に強いものであるかを評価する。例えばコオロギの個体数等が変動しても同様な状態を保つことが可能かを評価する。コオロギに代表される生物群と人工物としての群ロボットの一番の相違点は系のロバスト性に存する。群ロボットの調和状態は外乱によって容易に解消されるが、生物のそれは非常にロバストである。

コオロギの群構成メカニズムの解明が、ロバストな群ロボットシステム構築のための方法論になり得る可能性がある。

4. 結論と今後の展望

本報では、まずC02班の研究の方向性に関する議論を行い、群ロボット系の適応行動に関する従来研究について述べた。最後に実際の研究計画について述べた。

参考文献

- (1) Yoshimura, Y., Ota, J., Inoue, K., Kurabayashi, D. and Arai, T., Iterative Transportation Planning of Multiple Objects by Cooperative Mobile Robots, Distributed Autonomous Robotics Systems 2, Eds. Asama, H., Fukuda, T., Arai, T., Endo, I., Springer, 171/182(1996).
- (2) Inoue, K., Ota, J., Hirano, T., Kurabayashi, D. and Arai, T., Iterative Transportation by Cooperative Mobile Robots in Unknown Environment, Intelligent Autonomous Systems 5, Eds. Kakazu, Y., Wada, M., Sato, T., IOS, 30/37(1998).
- (3) Trevai Chomchana, Yusuke Fukazawa, Hideo Yuasa, Jun Ota, Tamio Arai and Hajime Asama, Exploration path generation for multiple mobile robots using reaction-diffusion equation on a graph, Integrated Computer-Aided Engineering, 11, 3, 195/212 (2004).
- (4) 湯浅 秀男, 伊藤 正美, グラフ上の反応拡散方程式と自律分散システム, 計測自動制御学会論文集, 35, 11, 1447/1453 (1999).

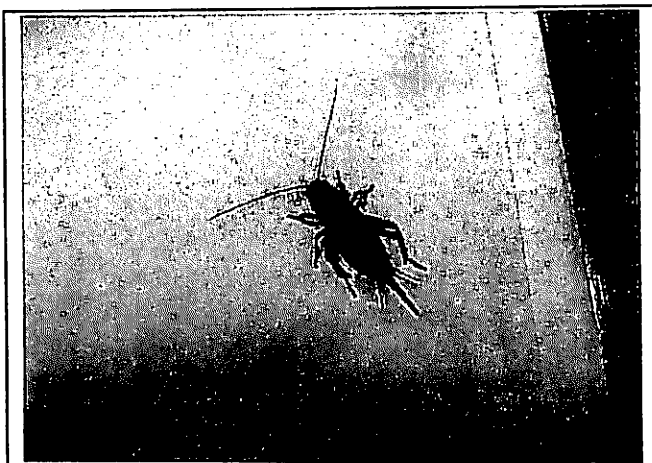


Fig.4 an actual cricket for the modeling

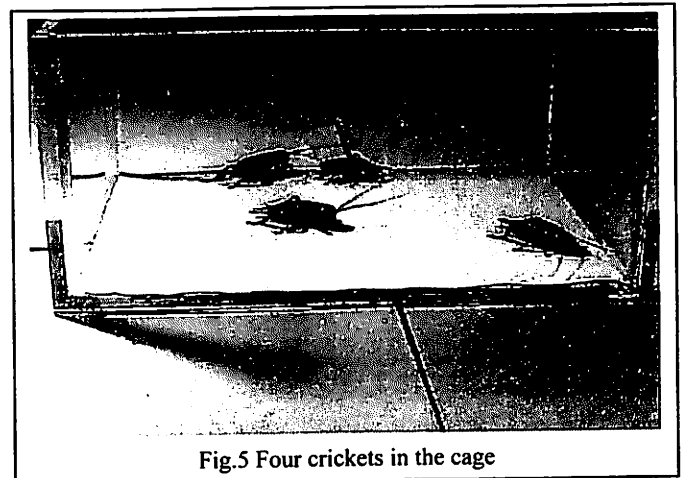


Fig.5 Four crickets in the cage

