

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月29日現在

機関番号：機関番号：13201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760289

研究課題名（和文） 社会システムにおける協利行動誘導手法の構築

研究課題名（英文） Research on designing cooperative behaviors in social systems

## 研究代表者

池本 有助 (IKEMOTO Yusuke)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・助教

研究者番号：10377822

## 研究成果の概要（和文）：

群ロボットシステムにおける協利行動の一つに役割分担行動がある。本研究では、環境条件に応じて、役割分担するかしないかを自律的に検定する、適応的役割分担アルゴリズムを提案する。提案したアルゴリズムを評価するために、実機実験に向けた、計算機シミュレーションを構築する。

## 研究成果の概要（英文）：

One of advanced functions for multi-robot systems is a division of Labor. In this study, we propose adaptive division-of-labor control, which enable adaptive selection of homogeneous or heterogeneous group state. We show adaptability of proposed method against working conditions and address the performance improvement by mathematical analysis. To evaluate the effectiveness of the proposed method, we treat foraging by multi-robot systems and confirm that the robot group inevitably organizes the division of labor state with group performance improvement with the computer simulations.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	452,034	135,610	587,644
年度			
年度			
総計	3,352,034	1,005,610	4,357,644

## 研究分野：

システム工学

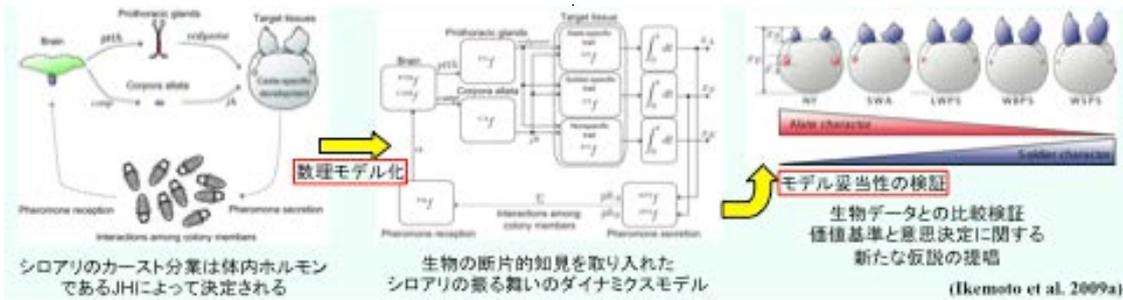
科研費の分科・細目：

キーワード：協利行動，群ロボット，役割分担

## 1. 研究開始当初の背景

協利行動は社会システムを支える最も重要な行動の一つである。協利行動に関する研究は、様々なモデル生物を対象とした現象解明(Pennisi 2009)や、モデリングなどの理論研究など、多岐にわたり、将来の社会システムのあり方を決定づける設計指針を得るための重要な研究である。J. M. Smithがゲーム理論を集団遺伝学に適用して以来、進化生物学、情報学におけるマルチエージェントシス

テム、群知能などの分野で協利行動に関する研究が盛んに行われ、「集団の振る舞い」と「個体の行動」の関係性が明らかになりつつある(Nowak 2006)。さらに、ミラーニューロンを中心とした脳内神経機構との関係性も重要視されており(Caggiano et al. 2009)、協利行動における「個体の行動」と「脳内機構」の関係にも踏み込んだ研究が展開されつつある。これらの研究では、「集団の振る舞い」、それを生成する「個体の行動」さらに、



意思決定機構を司る「脳内機構」の関係性を分割して議論されている。従って、社会システム工学、特に協力行動の誘導という視点から鑑みるに、片手間な研究であると言わざるをえない。つまり、個体の内部状態の何をパラメータとし、個体の行動を操作すれば、集団の協力行動を制御し得るか、という一連のシーケンスを明らかにする必要がある。このような研究主眼を背景に、申請者はシロアリの社会行動に注目し、「集団の振る舞い」と「個体の行動」及び「脳内機構」を統合的に取り扱った研究を推進してきた(Ikemoto et al. 2009a)。シロアリは高度な分業行動(カースト分化)を行い、協力行動の解明のための有用なモデル生物である。申請者は、生物学の断片的知見を可能な限り精査し、数理モデリングアプローチによる理論研究によって、フェロモン行動などの知覚情報が、体内の幼若ホルモン(JH)分泌に集約された後、分業行動を決定するという、いわば、社会システムと個体の意思決定を結ぶメディエータの役割を担う、体内機構モジュールの存在が重要であるという示唆を与えた。さらに、申請者は、その幼若ホルモンのメディエータとしての機構を群ロボットの制御アルゴリズムに適用し、計算機シミュレーション及び、数理証明によって評価した(Ikemoto et al. 2009b)。結果として、相転移を介して分業行動が組織化されるにもかかわらず、集団としても最適な振る舞いを選択することが実現され、アルゴリズムの有効性を示した。申請者は、これらの一連の研究を通して、社会における協力行動の発現ダイナミクスを構成論的に議論するとともに、社会システム制御という工学的視点を明確に意識した、極めて挑戦的な研究方法論を推進してきた。しかしながら、これまでの申請者の研究では、構成論的議論のみにとどまっていることが大きな問題となっており、被験者実験などによる科学的検証が不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究では、人の協力行動の発現機構を「集団の振る舞い」と「個体の行動」及び「脳内機構」を統合的に理解し、協力行動を誘導する手法を構築することを目的としてきた。申請者はこれまでに、シロアリの分業行動に注目し、協力行動の維持を可能としているのは、

一種類の体内ホルモンによっても可能であるということ、数理モデル化することにより構成論的に明らかにしてきた。これらの研究を進展させ、社会システムにおける協力行動に関する新たな知見を得た。

そのため、協力行動における価値判断基準生成と意思決定の機構のモデリングのための基礎研究を十分に行う必要性が生じたため、本研究では、さらに、群ロボットの分業制御アルゴリズムに提案モデルを適用し、協力行動の集団としての最適性を示す。

## 3. 研究の方法

群ロボットシステムにおける適応的役割分担アルゴリズムの構築：群ロボットシステムにおける役割分担に関する研究は、マルチエージェント強化学習を用いた手法や、生物の振る舞いをモデル化した例がある。マルチエージェント強化学習は、集団の振る舞いの最適化に主眼をおいているものの、収束までに多くの時間を要する。また、生物現象モデルを基盤にした手法では、自己組織化現象を介した役割分担を実現しており、収束時間などの問題はない。しかしながら、振る舞いの複雑さから、最適性に関する議論が欠如していることが問題である。

これまでの関連研究を鑑みるに、自己組織的振る舞いを役割分担制御に適用することは、実用性の観点からみても、有用な手法である。自己組織的な振る舞いによる役割分担を実現しつつ、集団としての最適性を保証することが大きな課題であり、そのためには、ロボットの行動を規定する意思決定ダイナミクスに、タスク効率の上昇原理を反映させることが必要不可欠である。我々は、ゲーム理論における利得行列をロボットの意思決定ダイナミクスに反映させることにより、適応的役割分担を実現することを試みた。本研究では、群ロボットシステムにおける適応的役割分担アルゴリズムを構築し、システムが集団パフォーマンスを上昇させるように、均質又は非均質を自律的に選択することが可能な群ロボットシステムを実現することを目的とする。はじめに、役割分担を必要とする群ロボット制御問題を設定する。さらに、数理解析によって、提案するアルゴリズムの最適性を議論する。最後に、計算機シミュレーションによって、提案アルゴリズムの有効

性を確認する。

#### 4. 研究成果

(1) アルゴリズムの提案： アルゴリズムを構成するためには主に以下の二つのことを決定しなければならない。一つは、行動戦略  $j_{x_i}$  の時間発展様式を決めること、二つ目はロボット間の相互作用様式を決定する事である。

まず始めに、 $j_{x_i}$  の時間発展を設計する。最適化問題を解く手法の一つである勾配法を単純に用いた。この最適化問題を Shahshahni 勾配に投影することにより、拘束条件上における勾配法を簡単に得ることができる。このダイナミクスはリブリエータ方程式によって表される。

$$d j_{x_i} / dt = j_{x_i} (j_{f_i}(j_{x_i}) - j_{\phi})$$

上式で定義される  $j_{x_i}$  のダイナミクスはシンプレックス多様体  $\sum_i j_{x_i} = 1$  のもとで、 $j_{\phi}$  を局所最適性を有する。

Table 1 シミュレーション設定

term	$t$	$\alpha$	$(j_{x_A}, j_{x_B})$
1	$0 \leq t < 10$	0	conforming to algorithm
2	$10 \leq t < 20$	0.1	conforming to algorithm
3	$20 \leq t < 30$	0.1	conforming to algorithm
4	$30 \leq t < 40$	0	fixed to division
5	$40 \leq t < 50$	0	conforming to algorithm
6	$50 \leq t < 60$	0.1	fixed to not division
7	$60 \leq t < 70$	0.1	conforming to algorithm
8	$70 \leq t < 80$	0.1	conforming to algorithm
9	$80 < t < 90$	0.1	fixed to (0, 1) at $t = 80$
10	$90 \leq t \leq 100$	0.1	fixed to (1, 0) at $t = 90$

次に、相互作用様式を以下のように定義する。ロボット間で相互作用する情報を  $j_{\phi}$  によって表す。この  $j_{\phi}$  は、個体のタスク要求度を表す値であるとともに、採餌行動における餌の物理的な交換量を表す。  $j_{h_i}$  を  $j_{\phi}$  の単純な拡散項で表す。従って、餌を交換することによってロボット間の餌の総量は変化しない。つまり、

$$j_{h_i} = D(p_i - j_{p_i})$$

ここで、 $D$  は、ロボット間の相互作用が生じたときのみ、

$$D = \alpha$$

とし、その他の場合は0とおく。

(2) シミュレーションによる評価： 群ロボットシステムにおける適応的役割分担アルゴリズムの構築： 本研究では群ロボットシステムによる採餌行動を取り上げた。作業環境

は二次元平面上の正方形の領域である。そこに 10 台のロボットが存在しているとする。作業環境上にはロボットの外、餌 A, B がランダムに配置されているとし、その個数のその割合は 7:3 に決まっているとする。ロボットは等速直線運動し、壁や他のロボットなどと接触した際は、角度を変えて移動する。ロボットにはアームが備わっており、餌と接触したとき、餌を拾い上げることができる。さらに拾い上げた餌はロボット間で接触したときのみ、一定のルールで交換可能であるとする。ロボットは自ら拾い上げた餌、又は他のロボットから受け渡された餌を保持する。

これらの問題設定に対し、ロボット間で接触し、餌の受け渡し量を変化させた場合の役割分担戦略を調査した。様々な条件下において、評価指標である集団適応度がどのように変化するかを計測し、適応的役割分担が実現されていることを示す。具体的には、Tab. 1 に示すように餌の受け渡し量 ( $\alpha$ ) を変化させる。前説の予備シミュレーションで示した結果より、 $\alpha=0.1$  の場合は非均質集団に収束

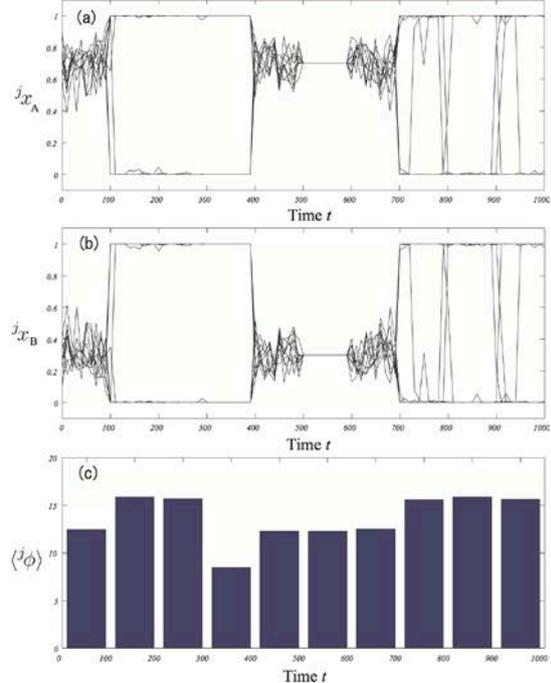


Fig. 2 シミュレーション結果

し、 $\alpha=0$  の場合は非均質集団に収束する。しかしながら、4 term では、3 term で収束した非均質状態の行動戦略の値に強制的に固定してシミュレーションを行う。また、6 term では、5 term で収束した均質状態の行動戦略の値に強制的に固定してシミュレーションを行う。4 term と 5 term の結果を比較することで、 $\alpha=0$  のとき、つまり相互作用がなされないにも関わらず、非均質集団を選択した場合の適応度を比較する。6 term と 8 term の結果を比較することで、 $\alpha=0.1$  のとき、つまり通常ならば非均質集団を選択するにも

かかわらず、強制的に均質集団を選択させた場合の適応度を比較する. 9, 10 term では, 群ロボットシステムの故障を想定し, 時刻 800[s], 及び 900[s]のときにすべてのロボットの戦略を (0, 1) 及び (1, 0) に固定する. その後, もとの非均質集団に戻るかどうかを観察し, 非均質集団の恒常性を確認した.

本研究では, 群ロボットシステムにおける適応的役割分担アルゴリズムを構築した. これにより, 群ロボットシステムが集団パフォーマンスを上昇させるように, 均質又は非均質を自律的に選択する群ロボットシステムが実現された. さらに, 数理解析によって, 提案するアルゴリズムのタスク効率の向上性を議論し, ロボットが均質又は非均質集団に遷移する条件を与え, 集団適応度が上昇する集団体制を選択することを示した. 最後に, 計算機シミュレーションによって, 提案アルゴリズムの有効性を確認した. 今後の課題は, 実際のロボットで実験することにより, 提案アルゴリズムの実用性を確かめることである.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. Ikemoto, T. Miura, and H. Asama: “Adaptive Division-of-Labor Control Algorithm for Multi-Robot Systems”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 4, pp. 514-525 (2010)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Y. Ikemoto, and K. Sekiyama, “Optimal Regulator Dredges Underlying Modularity in Input-outputs”, International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (2012)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

池本 有助 (IKEMOTO Yusuke)

研究者番号 : 10377822