

自律分散型ロボットシステムにおける 通信を用いた協調チーム編成手法の開発と評価*

尾崎 功一^{*1}, 浅間 一^{*2}, 石田 慶樹^{*3}, 横田 和隆^{*4}
松元 明弘^{*5}, 嘉悦 早人^{*2}, 遠藤 勲^{*2}

Evaluation of Team Organization Method Using Communication in a Distributed Autonomous Robotic System

Koichi OZAKI, Hajime ASAMA, Yoshiki ISHIDA, Kazutaka YOKOTA,
Akihiro MATSUMOTO, Hayato KAETSU and Isao ENDO

In this paper, a method of organizing for a collaborating team in a distributed autonomous robotic system, ACTRESS, is discussed. In this system, plural robotic agents are organized in a collaborating team, in which they cooperate to execute a common task. All agents are equipped with a communication system. An efficient negotiation method is developed to organize an optimal team. It utilizes the record of past negotiations. The robotic agents in a collaborating team exchange messages which contain the functional status of robotic agents, record these data in their own knowledge-bases, and select cooperative agents. In the learning mechanism, the robotic agent calculates suitability of cooperative agents in the collaborating team in advance, using its knowledge-base, and negotiates the organization of the collaborating team with a limited number of agents. With this learning mechanism, efficient negotiation is achieved, which is verified by simulation.

Key Words: Multi-Robot, Distributed Autonomous Robotic System, Collaborating Team Organization, Communication, Negotiation, Knowledge-Base, Knowledge Acquisition

1. はじめに

高度な作業のロボット化を実現する一つのアプローチとして自律分散型ロボットシステム(Distributed Autonomous Robotic System: 以下, DARS と呼ぶ)の開発研究が盛んである⁽¹⁾。DARS はマルチエージェントシステム⁽²⁾であり, ここではおのおののエージェントが協調的に動作することにより, 柔軟性やロバスト性を実現できると期待されている。著者らは、「機能分散」および「協調」という概念に基づいて設計されたDARSとして, ACTRESS(ACTor-based Robots and Equipments Synthetic System)の開発研究を行っている⁽³⁾。本システムは, さまざまな機能をもつロボットや計算機などの機器(以下, エージェントと呼ぶ), すなわち, 異質のエージェント群で構成されている。本研究では, 複数のエージェントによる協力的行動が必要な際に, 通信を用いて協調チーム(エージェン

ト群)をいかに組織するかについて論じる。

これまで, さまざまな複数台の移動ロボットによる協調行動が実現されてきたが⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 協調のためのロボット群をいかに組織するかについては十分な議論が行われていない。また, 群の協調的な行動に関連して, センサの自己組織化⁽⁶⁾, 協調行動戦略⁽⁷⁾⁽⁸⁾, 協調行動計画⁽⁹⁾の手法が提案されているが, ここでは組織化した群の最適性やエージェント間通信の効率化については論じていない。また, 植山らはランダム・ウォークを用いた構造組織化手法⁽¹⁰⁾やエントロピーを用いた構造の評価⁽¹¹⁾について議論しているが, 目的構造は与えられると仮定している。さらに, ロボット間のネゴシエーションの学習手法も提案されているが⁽¹²⁾, ここでは作業に応じて要求となる各エージェントの機能については考慮していない。

そこで本研究では, さまざまな作業要求(目的)に応じて, それを達成するのに必要な機能を判断し, 必要な機能を満足するような最適な群(協調チーム)を, ネゴシエーションの履歴から得た知識を利用しながら効率的に組織する手法を提案する。本手法では, 異質なエージェントが多数存在する際に, 各エージェントにすべてのエージェントの機能を前もって記述しておかなくても, ネゴシエーションを重ねるにつれ, その際

* 原稿受付 1994年9月19日。

^{*1} 正員, 埼玉大学大学院 (〒338 浦和市下大久保255)。

^{*2} 正員, 理化学研究所 (〒351-01 和光市広沢2-1)。

^{*3} 九州大学大型計算機センター (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*4} 正員, 宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市7丁目2753)。

^{*5} 正員, 東洋大学工学部 (〒350 川崎市鯉井中野台2100)。

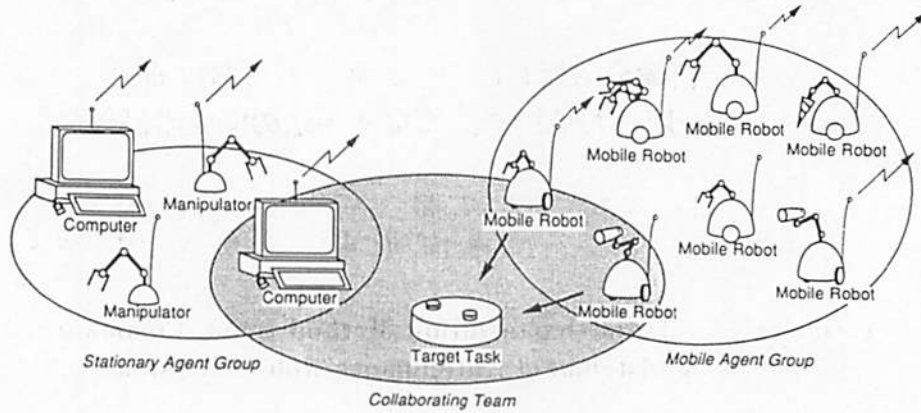


図1 協調チームの構成(概念図)

に得られた他のエージェントの機能に関する情報を知識として蓄積し、それをその後のネゴシエーションで有効に利用できる点(学習機能)が最大の特徴である。

2. 協調チームの組織化

2.1 協調チーム編成 ACTRESSでは、作業が集中的に管理されておらず、各エージェントは作業を選択すると、それを宣言し、実行を開始する⁽¹²⁾。その際、作業を処理するのに十分な機能がそのエージェントに備わっている場合には単独で処理するが、それが不十分である場合には複数のエージェントの協力行動による処理が必要となる。本研究では協力行動に参加するエージェント群を「協調チーム(Collaborating Team)」と呼ぶことにする。協調チームは、1台のエージェントが「Coordinator(調整者)」となり、ネゴシエーションを介して、1台あるいは複数台の「Cooperator(協調者)」を決定することによって、組織される。これを「協調チーム編成」と呼ぶ(図1)。本研究では、協力行動が必要であると判断したエージェントがCoordinatorになると仮定する。

2.2 エージェントの性能と機能 ACTRESSは異質なエージェント群で構成されるので、各エージェントの性能は異なる。また、各エージェントの機能は一定でなく、状況によって変化しうるものと仮定する。これは、作業によって負荷が変動したり、環境や自己の状態(故障など)によって機能が低下することが考慮されるためである。以上から、自律分散化による柔軟性を考慮し、動的に変化する各エージェントの状態や機能については管理しないこととした⁽¹³⁾。すなわち、各エージェントには、あらゆる瞬間における他のすべてのエージェントの状態や機能に関する大局的情報が逐次与えられるようなことはない。また、システム構築上の容易性、柔軟な拡張性を考慮し、各エージェン

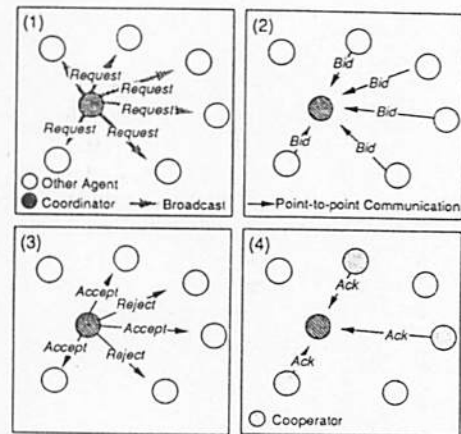


図2 ネゴシエーションにおける通信手順

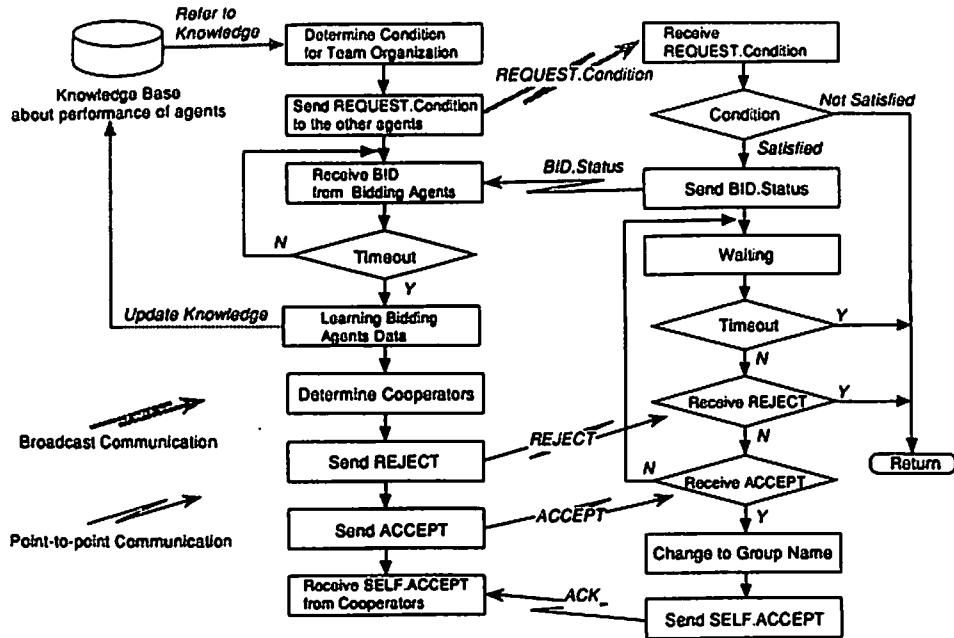
トのもっている性能に関する知識を、あらかじめすべてのロボットに記述することは行わないこととした。

2.3 協調チーム編成問題 本論文では、以上で述べた問題設定および前提条件のもとで、いかに協調チームを編成するかについて議論する。具体的には、以下の問題についての手法の提案を行う。

- (1) いかに最適なチームを編成するか
 - (2) いかに効率的にチームを編成するか
 - (3) いかに他のエージェントの機能を予測するか
- なお本論文では、エージェントの数が最小で、それらの機能のばらつきが最小であるようなチームを最適な協調チームとし、チーム編成に要する時間が短いほど効率が高いとした。

3. ネゴシエーションを用いた協調チーム編成手法

3.1 協調チーム編成のためのネゴシエーション 最適なチーム編成を行うために、通信によるネゴシエーション⁽³⁾を用いて、その時点におけるエージェントの機能に関する情報を収集し、その情報から適切な



(a) Coordinator の処理

(b) 他のエージェントの処理

図 3 通信を用いたネゴシエーションに基づく協調チーム編成手法

エージェントを Cooperator として選択することによって協調チームを組織することとした。ネゴシエーションには、契約ネットプロトコル(Contract-Net Protocol)⁽¹⁴⁾を利用することとし、すでに開発された通信機能(一対一通信、一対多通信が可能)⁽¹⁵⁾により実現することとした。ネゴシエーションの通信手順は(1)Requestのブロードキャスト、(2)Bidの受信、(3)Accept/Rejectの送信、(4)Ackの受信となる。図2はこれを図式化したものである。また、図3に協調チーム編成のためのネゴシエーションにおける、Coordinatorと他のエージェントの処理過程を示す。ここでは、まずCoordinatorが、Cooperatorに要求される機能を条件としたRequestをブロードキャストし、次に、この条件を満たすエージェントが、CoordinatorにBidすると同時にそのときの自己の機能を報告する。これにより、Coordinatorは返答したすべてのエージェント(Bidder)のそのときの機能を把握することができ、これらの情報に基づいて協調作業に最適なエージェントを選択することが可能となる。ここで本論文では、CoordinatorがRequestをブロードキャストする際の条件を「協調条件」と呼ぶことにする。

3.2 ネゴシエーション過程の効率化 Coordinatorが効率的なチーム編成を行うためには、適切な協調条件の設定が重要である。協調条件が緩やか過ぎると、あまりにも多数のエージェントがBidを行うこ

とになり、そのすべてのメッセージを受信するのに時間がかかることになる。逆に協調条件が厳し過ぎると、それを満足するエージェントが存在しないためにBidの返答がないような状況になる。このような場合、協調条件を変更しながらRequestの送信を繰り返す行わなければならないので、やはり時間がかかることになる。そこで、他のエージェントの機能を予測し、適切な協調条件を決めることによって、ネゴシエーションの効率化を図ることとした。その際、他のエージェントの機能に関する知識を利用して、期待できる機能を予測しながら適切な協調条件を決めることとした。

3.3 知識の獲得 エージェントの機能は一定ではない。本研究では、過去のネゴシエーションの履歴を記録し、これを他のエージェントの機能を予測するための知識ベースとして利用することとした。各エージェントがCoordinatorとしてチーム編成を行うたびに、Bidメッセージに含まれる他のエージェントの機能に関する情報を知識ベースに蓄積する。その後のチーム編成に際しては、その知識ベースを参照して他のエージェントの機能を予測する。システム内のさまざまなエージェントの機能をあらかじめ記述しておかなくても、チーム編成のネゴシエーションを繰り返すにつれ、他のエージェントの機能に関する知識が獲得されていく。これにより、効率的なネゴシエーションのための学習効果を得ることができる。

4. 協調チーム編成問題のモデル化と編成手法の構築

4.1 協調チーム編成問題のモデル 協調チーム編成問題のモデル化を行い、本協調チーム編成手法を具体的に構築した。協調作業に要求される機能および各エージェントの機能については抽象的に定量化し、ポイントで表現することとした。ポイントが高いほど機能が低いことを表す。ある状況でのエージェントの機能を表すポイントは、状況に応じて変化する。

協調チーム編成過程を以下のようにモデル化する。協調作業に必要な機能を tsk_p (task point: 以下作業要求と呼ぶ)、エージェント a_j がもつ最大機能を $pot_p(a_j)$ (potential point) とする (j はエージェント番号)。ある状況でのエージェント a_j の機能を $cur_p(a_j)$ (current point) とする。エージェント a_i が作業要求 tsk_p を選択した場合、 $tsk_p \leq cur_p(a_i)$ であれば単独で個別行動によって作業を処理できるが、 $tsk_p > cur_p(a_i)$ であれば他のエージェントとの協力的行動によって、それを処理しなければならない。この際、そのエージェント a_i が Coordinator となり、協調チーム編成を行う。Coordinator が協調作業のために、他のエージェントからの支援を必要とする機能 req_p (request point: 以下支援機能と呼ぶ) は、

$$req_p = tsk_p - cur_p(coor) \dots\dots\dots (1)$$

であり、式(2)を満たす n 台の Cooperator ($coop_k$; $k=1, 2, \dots, n$) を選択することによって協調チーム編成を行う必要がある。

$$req_p \leq \sum_{k=1}^n cur_p(coop_k) \dots\dots\dots (2)$$

前述のように、式(2)を満たす解(協調チーム)の中で、 n が最小で、 $cur_p(coop_k)$ のばらつきが最小となると、編成された協調チームは最適となる。

4.2 知識ベースの構築 ネゴシエーションの際に Bidder からのメッセージを図4に示すようなファイルに知識ベースとして記録することとした。Coordi-

nator はネゴシエーションごとに、Bidder の名前 ID_i 、協調条件 cnd_p_i 、Bidder の機能 cur_p_i 、および、その際の時刻 $time_i$ の記録を追加する。ただし、Bid メッセージを送信しなかったエージェントの機能 cur_p_i は 0 ポイントとして記録される。このネゴシエーションの履歴には、他のエージェントの機能情報が記録されており、Coordinator は、この情報に基づき他のエージェント a_j の予測機能 $inf_p(a_j)$ (inferred point) を、ネゴシエーションの履歴におけるエージェント a_j の平均的な機能として式(3)のように決定することとした。

$$inf_p(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n cur_p_i \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 n は、それまでのネゴシエーションの回数である。ただし、予測機能 $inf_p(a_j)$ を求める際、 $cur_p_i = 0$ として記録されているネゴシエーションに関しては、 $cur_p_i = 0$ のかわりに

$$cur_p_i = cnd_p_i - 1 \dots\dots\dots (4)$$

と置き換えて計算を行っている。これは、あるエージェントからの Bid の返答がなかった場合でも、そのエージェントの cur_p_i は実際に零であったわけではないので、そのエージェントの機能を、協調条件に達しない最高ポイントと仮定したためである。

4.3 協調条件の決定 Coordinator は、それまでのネゴシエーションにより存在が確認できたすべてのエージェントについて、機能の推定によって、 $inf_p(a_j)$ を決定し、

$$req_p \leq \sum_{j=1}^m inf_p(a_j) \dots\dots\dots (5)$$

を満たす最小台数の機能のばらつきの少ない m 台のエージェントを選択し、選択されたエージェントの予測機能の値で最も低い値を協調条件

$$cnd_p = \min_{j=1, 2, \dots, m} (inf_p(a_j))$$

とする。ただし、知識ベースに十分な記録がそろっていない場合(ネゴシエーションの回数が10回以下)は、多数のエージェントから Bid を得ることを優先し、協調条件を

$$cnd_p = 1$$

とする。

5. シミュレーション実験

5.1 無線通信のシミュレーション これまでに、複数の移動ロボットと計算機(ワークステーション)から構成される ACTRESS のプロトタイプシステムが開発されており⁽¹⁰⁾、本論文では、このプロトタイプシステムにおける移動ロボット間の無線通信を想定し、

Negotiation Record — Agent 1				
	No.	Request	Bid	Time
New	n	cnd_p_n	cur_p_n	$time_n$
↑	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	i	cnd_p_i	cur_p_i	$time_i$
↓	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	3	4	7	15:23
	2	5	0	15:21
Old	1	3	6	15:16

図4 知識ベースのフォーマット

ワークステーション上にシミュレータの構築を行った。さらに、本シミュレータを用いて実験を行い、協調チーム編成における学習機能の効果を評価した。

本実験では、実際の無線通信システムの性能を考慮して、通信時間を以下のように設定した。

(1) 送信時間は、無線通信システムにおける送信時間の実測値より、一対一通信(メッセージを送信し、受信確認を受信するまで)を 360 ± 40 [ms]、ブロードキャスト(メッセージの送信のみ)を 180 ± 20 [ms] とした(ただし、シミュレーションでは、誤差の値をランダムに変化させる)。

(2) 一対一通信において、受信確認を受信するまでのタイムアウトを1秒とした。

(3) 送信失敗時の再送信回数は3回とした。失敗を検出した場合(受信確認を受信しなかった場合)、0~1秒までのランダムな時間待機し、再送信を行うため、送信に要する時間は最大3秒となる。

5.2 シミュレーションの実験条件 シミュレーションの実験条件を以下に示す。

(1) 実験環境では、Coordinatorを1台、他のエージェントを10~50台とした。

(2) Coordinatorの最大機能 $pot_p(coor)$ は10ポイントとし、各時点での機能 $cur_p(a_j)$ も10ポイントで固定とした。

(3) 他のエージェントの最大機能 $pot_p(a_j)$ は10ポイントとし、各時点での機能 $cur_p(a_j)$ は0~10ポイントでランダムに変動するものとした(ただし、 $cur_p(a_j)=0$ の際は、通信不可状態となる)。

(4) 5.1節(3)より、送信の最大遅れ時間は3秒であるため、Bidの受信待ちは、Bidを受信してから最大3秒間とした。

5.3 協調チーム編成における戦略と学習機能の効果 以下に示す学習機能を用いない二つの戦略(Strategy I, II)と学習機能を有する本手法の戦略(Strategy III)によってシミュレーション実験を行い、その結果からネゴシエーションの効率を比較した。

(1) Strategy I Strategy Iは学習機能を用いない戦略である。Coordinatorは、協調条件を最も厳しく $cmd_p=req_p$ とし、協調チーム編成を行う。もし、この協調条件によりBidメッセージが得られない場合、Coordinatorは cmd_p を1ポイントずつ減らしながらRequestのブロードキャストを繰り返す。

(2) Strategy II 同様にStrategy IIは、学習機能を用いない戦略である。この戦略では、協調条件を最も緩く $cmd_p=1$ として協調チーム編成を行う。

(3) Strategy III この戦略では、学習機能

を利用した協調チーム編成を行う。初期状態では、エージェントの知識ベースは空であるため、この戦略における実験では、学習機能の効果を確かめるため、事前に10回のチーム編成の予備実験を行うこととした。

5.4 シミュレーション実験結果 $tsk_p=15, 30, 50$ の作業要求について、Strategy I, II, IIIによる協調チーム編成のシミュレーション実験を行った。図5~7は、その結果を受信エージェントの台数とチーム編成にかかる時間との関係としてまとめたものである。図5はCoordinatorに作業要求 $tsk_p=15$ を与えて協

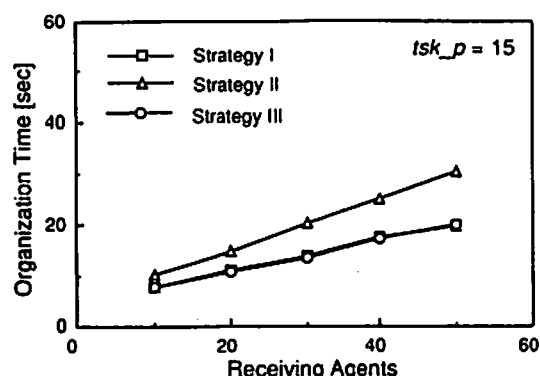


図5 シミュレーションによる協調チーム編成の実験結果

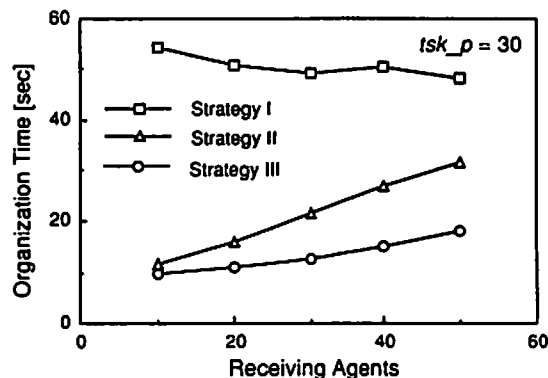


図6 シミュレーションによる協調チーム編成の実験結果

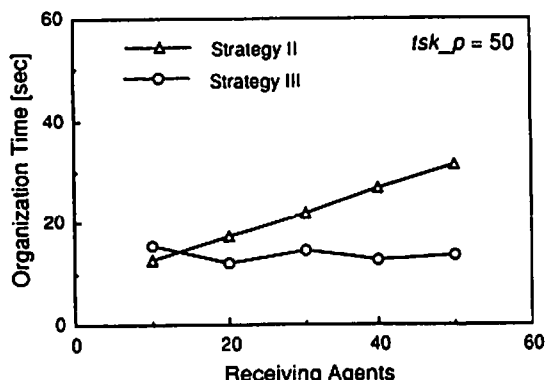


図7 シミュレーションによる協調チーム編成の実験結果

調チーム編成を行った結果であり、同様に図 6 は $tsk_p=30$ 、図 7 は $tsk_p=50$ の場合を示す。ただし図 7 では、Strategy I は、エージェントの台数によらずチーム編成に要した時間は約 270 [s] となった(図の範囲外)。

まず協調チームの構成に関する実験結果について述べる。作業要求 $tsk_p=15$ の場合では、Coordinator が要求する支援機能 req_p は 5 ポイントとなるため、すべての戦略において Coordinator は 5 ポイント以上の cur_p をもつ 1 台のエージェントと協調チームを編成することが確認できた。また同様に、作業要求 $tsk_p=30$ の場合は 3~4 台、 $tsk_p=50$ の場合は 5~7 台の協調チームが編成された。これらの結果から、ネゴシエーションを利用することにより、その状況に応じた最適な協調チームが編成できることが確認された。

次に、ネゴシエーションに要した時間について述べる。 $tsk_p=15, 30, 50$ のいずれの場合にも、ネゴシエーションにかかる時間については Strategy III が最短となり、最も効率が良いことが明らかになった(図 5~7)。Strategy I では、協調条件が厳しいので、 $tsk_p=15, 30, 50$ と作業要求が高くなるにつれ、チーム編成に要する時間が長くなり、効率が低下する。これに対し、Strategy III では、作業要求によらず、チーム編成に要する時間が短いことが確認できた。Strategy II では、協調条件が緩いので、エージェントの台数が多くなるにつれ、チーム編成に要する時間が長くなり効率が低下する。これに対し、Strategy III では、エージェントの台数にあまり左右されず、チーム編成に要する時間が短いことが確認できた。

したがってシミュレーション実験では、Strategy III が、いかなる作業要求においても、エージェントの台数によらず、適当な協調条件を設定できるために、むだなネゴシエーションを行わずに、最も効率的に協調チーム編成を行えることが確認できた。

6. おわりに

本研究では、DARS における群組織化問題を取りあげ、通信によるネゴシエーションを用いた協調チーム編成手法の開発を行った。動的に変化するエージェントの機能をネゴシエーションにより把握し、状況に応じた、最適な協調チームを編成する手法を提案した。また、ネゴシエーションの履歴を他のエージェントの機能に関する知識として格納し、それを利用することによって、効率的に協調チーム編成のためのネゴシエ

ーションを行う手法を提案した。さらに、協調チーム編成手法の評価を行うためのシミュレータを構築し、これを用いた実験を行い、本研究で提案した手法の有効性を確認した。

文 献

- (1) Asama, H., Trends of Distributed Autonomous Robotic Systems, Asama, H., Fukuda, T., Arai, T. and Endo, I.(Eds.), *Distributed Autonomous Robotic Systems*, (1994), 3-8, Springer-Verlag.
- (2) 浅間, マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望, 日本ロボット学会誌, 10-4(1992), 428-432.
- (3) 石田・浅間・尾崎・松元・遠藤, 自律分散型ロボットシステムのための通信機能の設計と通信シミュレータの開発, 日本ロボット学会誌, 10-4(1992), 544-551.
- (4) Parker, L. E., Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Autom.*, (1993), 582-587.
- (5) Noreils, F. R., Toward a Robot Architecture Integrating Cooperation between Mobile Robots: Application to Indoor Environment, *The Int. J. Robotics Research*, 12-1(1993), 79-98.
- (6) Hackwood, S. and Beni, G., Self-Organization of Sensors for Swarm Intelligence, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Autom.*, (1992), 819-829.
- (7) 沼岡, 自律ロボット集団のチームワーク, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, A(1992), 69-74.
- (8) 市川・原, 群ロボットにおける協同的行動の実験的一検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '94 講演論文集, A(1994), 11-16.
- (9) Osawa, E. and Tokoro, M.(Werner, E. and Demazeau, Y., 編), Collaborative Plan Construction for Multiagent Mutual Planning, *Decentralized A. I. 3*, (1992), 169-181, Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland).
- (10) 植山・福田・新井・杉浦・酒井・上杉, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第 15 報, ランダム・ウォークによる形態の自己組織化とその評価), 機論, 59-565, C(1993), 204-211.
- (11) Ohko, T., Hiraki K. and Anzai, Y., LEMMING: A Learning System for Multiple-Robots Environment, *Proc. of IEEE/RSJ int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, (1993), 1141-1146.
- (12) 浅間・尾崎・松元・石田・遠藤, 通信を用いた分散管理に基づく複数の自律型移動ロボットの協調的作業分担決定手法, 日本ロボット学会誌, 10-7(1992), 955-963.
- (13) 松元・浅間・石田・田中, 自律分散型ロボットシステムの開発研究(第 1 報)ーシステムの構想一, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989), 115-116.
- (14) Smith, S. E., The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *IEEE Trans on Computers*, C-29-12, (1980), 1104-1113.
- (15) Ishida, Y., Tomita, S., Asama, H., Ozaki, K., Matsumoto, A. and Endo, I., Development of an Integrated Communication System for Multiple Robotic Agents, *Proc. of Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems*, (1992), 193-198.
- (16) 浅間・尾崎・石田・松元・遠藤, 複数の自律移動型ロボットによる動的経路計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 講演論文集, A(1991), 195-198.