マルチエージェントから構成された自律分散型 ロボットシステムとその協調的活動*

浅 間 一**

Distributed Autonomous Robotic System Configured with Multiple Agents and Its Cooperative Behaviors / Hajime ASAMA

Key words distributed autonomy, multiple agents, robotic system, group intelligence, cooperative problem solving, distributed artificial intelligence, communication

1. は じ め に

生産システムで柔軟性を重要視するきっかけとなったのは、社会環境の変化や速い生産技術の進歩などであった。しかし最近では、単に多品種少量生産に対応するためだけでなく、オンデマンドの迅速な対応や耐故障性という観点から新たな柔軟性が求められている。これは、FMSで議論されていた柔軟性に比べ、圧倒的に大規模でダイナミックなもので、生産設備の構造自体が状況に応じて機構的にかつ情報処理的に組み換えられるような柔軟性である。この柔軟性を実現する戦略として、複数の要素機構（エージェント）に機能を分散し、それを動的に協調させる自律分散化が極めて有効であると期待されている。この裏付けとして、柔軟性を実現するには局所性が重要であるとの指摘がある¹⁾。特にここ数年、柔軟で高度な生物的な自律分散型生産システムを開発する動きが活発になってきたが、ロボットシステムはそのコンポーネントとして内部に組み込まれ、動的柔軟性の主役となるであろう。したがって、このロボットシステムも自律分散的に組織化され、機器類や人間と協調的に働くことが要求される。

本稿では、柔軟で多機能なロボットシステムとして、マルチエージェントから構成される自律分散指向のロボットシステムに焦点をあてて解説する。自律分散型ロボットシステムは、柔軟性、頑健性、拡張性、高効率、多機能性などの点で優れている反面、最

性、整合性、同期性などの面で欠点もある。本来自律分散システムは、自律性と協調性という本質的に矛盾している2つの性質を持っており、これをどのように両立させるかが自律分散システム研究の最大のテーマである。そこでここでは、マルチエージェントから構成されるロボットシステムに関する様々な研究について紹介しながら、ここでの問題について述べ、さらにエージェント間で問題解決を行いながら協調的に動作させる問題について議論する。

2. 自律分散型システムの開発アプローチ

「自律分散」という言葉は最近非常によく使われるようになった。それは何か生物的で、知的な集合体を連想させるが、「自律分散」の工学的扱われ方は非常に多様である。「自律分散」に関する研究を行っている者同士でも、それぞれ異なった解釈でこの言葉をとらえているために、議論が噛み合わなくなることもしばしばある。

自律分散システムとは、「本来分かれていて、自ら立てた規範に従って行動する部分が、他の部分との協調によって自らの目的を達成すると共に、全体の目的を達成する集合体」と定義されている²⁾。自律分散システム研究の代表的な例として、伊藤らは複数の発振器の協調のさせ方をいろいろと変化させることによって様々な周期運動パターンを生成する研究を行っており、非常に興味深い成果が報告されている³⁾。このような自律分散システム研究は、サブシステムにどのような機構を内在させ、それらの間でどういう相互関係を持たせたときに、どのようなことができるかといった

* 原稿受付 平成3年10月12日

** 正 会 員 理化学研究所（和光市広沢2-1）

ことを議論する分析的な研究である。

一方最近では、生物的な生産システム⁴⁾をはじめとして、様々な自律分散型設備の開発が活発になってきている。FAの分野では、自律分散の概念は機器の制御システムにいち早く適用された⁵⁾。その後設備機器の構成自体を自律分散化したシステムが次々と登場し始めている。自走式のリアクタを有するバイブレス化学プラント⁶⁾、多数のAGVを利用した自動車エンジン組立ライン⁷⁾などは、自律分散的な発想で組換え自在性を持たせることによって、多品種生産にうまく対応した成功例である。生産においてだけでなく、保全の面からも、このような設計思想は極めて有効である。動力炉核燃料開発事業団で検討されている新しい核燃料再処理施設は、複数のラックを組み合わせたモジュール化構造になっており、故障時でも遠隔操作のロボットによって簡単に交換・修復が可能である⁸⁾。ここでは、故障時に自らそれを認識するような自律性はまだ有していないが、分散化による高保全性が図られている。こういった自律分散型施設の開発では、前述の研究とは逆のアプローチが必要となる。すなわち、全体のシステムで行わせる機能（生産、再処理など）があらかじめ要求仕様として与えられていて、それを実現するためには各サブシステム（エージェント）にどのような機能を持たせたらよいか、サブシステムの間でどのように協調させなければならないかを議論する総合的なアプローチである。分析的なアプローチでは全体として単純でプリミティブな挙動を対象としているのに対し、総合的なアプローチでは実際に工場で行われている工程など、かなり現実的で高度なものである。

自律分散システムの研究では、サブシステムの同質性を重視する議論もある⁹⁾。マルチエージェントから構成されるロボットシステムに関する研究では、このことはあまり陽に議論されていないが、多くの場合情報処理能力にある程度の均質性を仮定するものの、その機能や特性に関してはむしろ各エージェントが個性を持ち、それぞれ異なった仕事をするを前提としている。各サブシステムが別々の仕事を分担する場合には、どのように機能を分散させれば最適であるかの議論が必要となるが¹⁰⁾、それは各サブシステムの動作が独立であるか、相互に影響されるか、従属的であるかといったサブシステム間の関係に依存する。

3. マルチエージェントロボットシステム

ある程度自律性を有するエージェントの群で構成される自律分散型ロボットシステムの開発研究は、前述

の分類でいうと総合的な研究である。行うべき作業や環境が完全には予測できない場面で、何らかのミッションを遂行するロボットシステムを、ロボットの故障まで考慮して開発するには、自律分散的戦略を取らざるを得ない。マルチエージェントロボットシステムでは、何をエージェントとみなすかによって様々なレベルで多くの研究課題が存在している。

(1) エージェントがプロセス（タスク）である場合

ロボットシステムの高度な制御ソフトウェアを構築する際、マルチタスクのOSを用いて複数のプロセスを並列的に動作させる場合がある。ロボットシステムに知的行動を行わせるために必要となる、かなり複雑な処理のためのアーキテクチャをいかに設計するかが一つの課題となる。Brooksの提唱する包含アーキテクチャ（Subsumption Architecture）では、階層的な情報処理システム（移動ロボットの例では衝突回避、徘徊、探索など）を構成し、各階層での処理が並列的に働くような自律分散構造になっている¹¹⁾。複数のプロセスで別々のタスクを実行する場合、それを統合するためのプロセス間通信が必要となる。

(2) エージェントがプロセッサである場合

マルチCPUによってシステムが構成されている場合、各CPUは特定の処理が割り当てられる。筑波大学で開発された移動ロボット「山彦」では、超音波センサ系、視覚系、走行制御系、地図および計画系などの機能ごとに処理がモジュール化されており、機能分散が図られている¹²⁾。行動プログラムはその上位のモジュールで動作するが、モジュール間の処理結果の受け渡しは、State Information Panelと呼ばれる共有メモリーを介して行われる。複数のセンサの結果を別々のCPUで処理し、それを統合するセンサフュージョンの研究も、このレベルのマルチエージェントシステムの研究ととらえることができる。一般的に、あらかじめ各エージェントの処理分担が決まっていない並列処理システムでは、タスクをいかに分割するかが問題となる。

(3) エージェントがアクチュエータである場合

セルラーロボティクス（Cellular Robotics）¹³⁾は、各エージェントに単なる情報処理機能のみならず、それぞれ可動機構を持たせ、それらを複数協調的に動作させることを目的とした研究分野である。各関節のアクチュエータごとにプロセッサを配置した自律分散型ミニビュレータや¹⁴⁾¹⁵⁾、各脚ごとに制御用プロセッサを持つ6脚移動ロボット¹⁶⁾、各アクチュエータごとに処理機構を有する分散制御方式フラクタル構造¹⁷⁾なども

このレベルのマルチエージェントシステムと言える。全体として行わせる動作の条件が厳しいほど、エージェント間で同期をとるなど、協調制御する必要性が生じる。要素機構を自律的に複数結合することによって多様なロボットの機構を構成する自己組織化ロボットの研究も行われているが¹⁸⁾、この詳細に関しては他報に譲る¹⁹⁾。

(4) エージェントがロボットや機器である場合

複数のロボットや機器の協調によって、何らかの作業を行わせるマニピュレーションの研究として、特定の対象物を複数のマニピュレータによって操る研究や²⁰⁾、相互の腕が干渉しないような動作計画の研究が行われている²¹⁾。また、クレーンとマニピュレータによる協調制御の研究や²²⁾、複数の移動ロボットによって、対象物をハンドリングする研究も報告されている²³⁾。これらの研究では、協調制御に焦点があてられており、全体を管理・制御するホストあるいはリーダーが存在する場合が多い。しかし、各エージェントが自律性を有する場合、すなわち自らある程度意思決定を行いそれに基づいて行動する場合、エージェント間で競合・デッドロックなど多くの問題が生じることは必至であり、協調的行動をいかに行わせるかの議論が必要となる。次にこれについて述べる。

4. 複数の自律ロボットの協調

ロボットの機能が高度になるにつれ、ロボット内部の構造は、ハードウェア・ソフトウェアとも極めて複雑になる。1台1台のロボットが別々の人によって開発された場合、それらが協調的に動作するように誰かがこれをまとめ上げることはもはや不可能である。この問題を打開する道は一つしかない。すなわち各ロボット自ら自分の行動を管理する自律性と、他のロボットと協調する仕組みを各開発者がロボットに組み込むようにすることである。ここで問題となるのは、複数の自律ロボットを協調させる一般的な仕組みを考えなければならないことである。各ロボットがそれぞれの目標を持って並列的に動作する場合には、互いに妨害しないような協調（衝突回避など）が必要となる。また、同一の目標を達成するのに単独では処理できないような場合には、互いに支援し助け合う協調が必要になる。

複数の自律ロボットを協調させるアプローチには、二つの戦略がある。一つは、協調的な動作をするような機構を各ロボットに内在させる戦略である。Darioらは、各ロボットの個性を仮定した上で、包含アーキテクチャに類似した制御機構を設け、センサ情報など

に基づく反射神経的な本能的挙動によって、複数のロボットを群として協調的に組織化できると主張している²⁴⁾。また、大熊らは個体に正のフィードバックを含む非線形情報処理系を具備させ、これの群で構成されるロボットシステムの情報系のシミュレーションを行っている²⁵⁾。このような研究は、蟻のような虫の集団と同様な群知能ロボットシステムを実現しようとする試みであり、Swarm Intelligence と呼ばれる。したがって、ここでは各ロボットの情報処理能力や動作機能はかなり限定されていることを前提としている。

逆に個々のロボットが知能ロボットであることを前提に、協調的活動のための情報処理機構に関する検討が行われている。具体的な問題を取り扱った例として、武野らは移動ロボットが衝突しないような交通ルールを設計・構築し、衝突を回避する走行制御を行った²⁶⁾。また、Kimotoらは、ニューラルネットワークを用いながら、各移動ロボットが異なる振舞いをするように学習するシステムを実現した²⁷⁾。一方、Noreilsは、各ロボットにMRC (MultiRobot Control Level) と呼ばれる制御機構を既存のロボットの制御システムに付加し、複数の移動ロボットを協調的に行動させる枠組みを提案した²⁸⁾。これらの研究では、協調のメカニズムはあらかじめ各ロボットの内部にプログラムされていなければならない。したがって、どのような協調を行えばよいかを想定して、前もって記述できるようなケースでは有効であるが、予期せぬ事態や新たな作業要求に対する柔軟性に関しては不利である。

一方もう一つの戦略は、通信を積極的に協調の道具として用いることを前提として、情報交換に基づき協調的活動を実現する戦略である。油田らは、複数の自律移動ロボットの協調のあり方と意思決定の戦略について議論を行い、遠慮的協調 (Modest Cooperation) を提案した²⁹⁾。そして具体的な例として、移動ロボット間の通信ネットワークを利用して、交差点でのデッドロックを回避して道を譲り合う走行実験を行い、遠慮的協調の有効性を示した。また我々は、複数の移動ロボットや計算機をはじめとする機器類から構成される、自律分散型ロボットシステム ACTRESS (ACTor-based Robots and Equipments Synthetic System) の開発研究を行っており³⁰⁾、協調のための通信の枠組みに関する議論を行った³¹⁾。図1はACTRESSのプロトタイプシステムであり、2台の自律型移動ロボット、ヒューマンインタフェース用計算機、大局的環境管理用計算機、およびこれらの機器間

図1 自律分散型ロボットシステム ACTRESS のプロトタイプシステム

の情報交換のための無線通信システムから構成されている。

複数の自律ロボット間の通信の方法に関しては、議論の余地がまだ多く残されている。協調的活動に必要な情報をすべて自発的に送信する方法では、問題解決のためにいつか利用されるかも知れない情報を常に送信しなければならないので、通信が過大になりがちで、通信の負荷、バンド幅などの面で問題が出てくる。したがって、必要に応じて任意のエージェント間で情報交換を行えるような通信環境と仕組みを整えることが有効であると考えられる。自律分散型ロボットシステムを開発する上で、通信シミュレータは不可欠なツールとなる。複数のロボットを協調させる通信アルゴリズムの検証、プログラムの開発支援を目的とした、オブジェクト指向型の通信シミュレータが開発されている³²⁾。ここでは、各エージェントがそれぞれオブジェクトに対応するので、通信の様子が非常によく模擬できる。また、このシミュレータを用いることによって、機能分散の形態によって、通信量がどのように変化するかを評価することも可能である。

5. 群知能ロボットシステムにおける協調問題解決

長谷川らは、複数のエージェントから構成されるような、群知能情報処理機能を持つロボットシステムの利点を、宝捜し（分散探索）、御輿かつぎ（協調制御）、パケツリレー（拘束処理）、実行役と目付け役

（階層的管理）、猿橋などの具体的例を示しながら整理している³³⁾。これは、群知能ロボットシステムが、複数のエージェントの協調のさせ方によって、様々な形態を構成し得ることを示している。そして、この協調のさせ方に関しては、各エージェントの目的と全体の目的の関係によって、以下のように分類されている³⁴⁾。

- (1) 複数台のロボットが共通の場合でそれぞれ異なった作業を行う場合
- (2) 単一のロボットでは作業の遂行が困難で、複数台のロボットの協調によって初めて目的が達成される場合
- (3) 単一のロボットでも作業遂行は可能であるが、効率を上げるため、あるいは作業の信頼性を高めるために複数台のロボットでこれを分担する場合

しかし、実際に複数のロボットを動作させるには数々の問題を解決する機能が必要となる。例えば、複数の自律型移動ロボットによる荷片付け作業を行う場合を考えると、あるときには複数のロボットが並列的に単独で作業し、またあるときには協調作業を行う。ここで生じる具体的問題として、作業分担決定、環境情報管理、作業実行部隊編成、衝突回避経路計画、同期などが挙げられる。これらの問題は、エージェントによって自律的にかつ協調的に解決されなければならない。

問題解決の手法には、集中的手法、分散的手法、その混合手法がある。集中的手法では、情報処理の流れの制御と問題解決の判断を中心となって行うリーダー（マネージャ、コーディネータなどとも呼ばれる）が存在し、それが整合性ある解を導くための意思決定を行う。リーダーエージェントがあらかじめ決まっていなくても、交渉によって状況に応じて群の中から選出される場合もある。このような手法の具体的な例としては、油田らが行った複数の移動ロボットの走行におけるデッドロックの回避手法²⁹⁾でもこのような戦略に則っている。我々は複数の自律移動ロボットが直面する様々な問題を解決するための一般的ネゴシエーションの手法について検討し³⁵⁾、その応用としてルールと通信に基づいた衝突回避経路計画手法を開発し、簡単なデッドロック状態を自律的に回避することに成功した³⁶⁾。協調分散センシングに関しては、移動物体の認識を分散的に行うセンサネットワークとして、DVMT (Distributed Vehicle Monitoring Testbed) が開発されており³⁷⁾、坂根らは契約ネットプロトコル³⁸⁾ベースのネゴシエーションに基づいた分散視覚センシングシステムを提案している³⁹⁾。さらに、複数のロ

ボットによる作業計画に関する問題解決を扱った研究も報告されている⁴⁰⁾。

一方、分散的手法として、Wang らは分散処理環境における相互排除の問題やデッドロック検出問題について議論し、その解法について述べている⁴¹⁾。各エージェントが競合やデッドロックを生じないような協調的な動作を、通信を用いずに実現することを前提とした研究も行われている。この例として、移動ロボット同士の衝突回避経路計画の手法や⁴²⁾⁴³⁾、協調作業をプランニングする手法などが提案されている⁴⁴⁾。しかし、これらの手法はシミュレーション上での検証にとどまっており、実際のロボットへ適用する場合には、センシングに基づく認識・計測性能にあまり期待できないことが大きな障害となり、通信なしに実際に協調的行動をさせられる限界が存在しそうである。

混合手法の例として、Le Pape は複数のロボットの作業計画やスケジューリングについて議論している⁴⁵⁾。ここでは、各ロボットがそれぞれの計画を分散的に立て、中央プランナ・スケジューラと情報交換を行いながら、作業分担を最適化する枠組みが述べられている。本来、スケジューリングのような問題は、各エージェントの相互依存性が非常に強い問題なので分散的には解きにくいし、分散システムにおけるプランの最適化も難しい。ここでは、集中的な計画と分散的な計画をうまく組み合わせることでこの問題をクリアしている。しかし、両計画の整合性をうまく取るためには、集中的計画および分散的計画で互いにどの程度まで考慮して行うべきかについては、さらに多くの議論を必要とする。

自律分散的なロボットシステムにおける様々な問題を解決する手段として、分散協調問題解決技術の適用が期待される。これは、疎結合、複数の解決器（エージェント）による協調的な問題解決を扱うものであり、比較的最近研究が活発になった分散人工知能と呼ばれる知識情報処理技術の応用研究である⁴⁶⁾。これに関しては詳細には触れないが、契約ネット³⁸⁾やマルチステージネゴシエーション⁴⁷⁾、分散制約充足問題の解法⁴⁸⁾などの手法を、マルチエージェントロボットシステムにおけるプランニングやセンシング問題に有望である。しかし、必ずしも分散協調問題解決の手法がそのままマルチエージェントロボットシステムに役立つとは限らない。なぜなら、分散協調問題解決では、その仮定において扱う問題の構造が単純化されているのに対し、実際にロボットが直面する問題とは、もっと複雑に絡み合ったケースが少なくないからである。現在では、様々な具体的な例題についていろいろな手法が

試みられているといった状況であるが、この蓄積が今後の技術開発にとって重要な意味を持つであろう。

6. おわりに

自律分散的な概念に基づき開発されてきた、マルチエージェントから構成されるロボットシステムについて述べてきたが、これまでに十分な研究成果が上がっているとは言い難い。むしろ、これから開拓される研究分野である。したがって、柔軟性を実現するアプローチとして、自律分散システム技術がどの程度期待にこたえられるかは、今後研究が進むにつれて明らかになっていくだろう。しかし、マルチエージェントと協調による組織化という考え方は、様々な機能を動的に生み出すような機器システムの新しいパラダイムになり得ることは間違いない。

自律分散システム概念は、ホロニックな生物の構造を手本として生まれた。また、協同現象 (Synergetics)⁴⁹⁾ や散逸構造 (Dissipative Structure)⁵⁰⁾ などの自律分散システムの基盤となる理論体系や、数多くの応用システムが開発されているニューラルネットワーク技術、最近注目され始めている遺伝アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm)⁵¹⁾ などは、人間・生物・社会を手本としている。特に、遺伝アルゴリズムは、並列分散的に最適化問題を解くための、生物の進化を模倣した手法であり、自律分散システムで欠点となっていた最適性を扱える手法として期待される。生物の極めて高い適応能力についてはまだ明らかにされていないことが多いが、これをさらに解明しつつ生物に学ぶことが、ポストメカトロニクスのブレークスルーとして、大きな貢献となると確信している。

参考文献

- 1) 中島秀之：なぜ協調なのか，コンピュータ科学，1，3（1991）160.
- 2) 井原廣一：自律分散システム，計測と制御，26，1（1987）33.
- 3) 伊藤正美，湯浅秀男：自律分散システムと運動パターンの生成，理研シンポジウム自律分散型ロボットシステム講演要旨集，（1991）37.
- 4) 沖野教郎：生物型生産システム，精密工学会誌，56，1（1990）76.
- 5) 松本邦顕，解良和郎，加藤 猛，三井善夫，松丸 宏：ファクトリーオートメーションにおける自律分散制御システム，日立評論，65，12（1983）823.
- 6) K. Tanaka and M. Hirayama: Multi-Production Batch Plant Oriented Control System by KAYAKU "M-POCS-K 1", Chem. Economy Eng. Rev., 17, 4, (1985) 187.
- 7) 川瀬昌男，長田 弘，水野昌彦：自動車構成ユニット混合組付システムの開発，1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，（1991）1065.
- 8) T. Koizumi et al.: Remote Maintenance Test of Two-

- Arm Bilateral Servo-Manipulator System, Proc. 37th Conf. on Remote Systems Tech., (1989) 129.
- 9) 伊藤正美: 自律分散システムはいかにして構成されるか, 計測と制御, **29**, 10 (1990) 877.
 - 10) H. Asama et al.: Functional Distribution among Multiple Mobile Robots in an Autonomous and Decentralized Robot System, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Sacramento, (1991) 1921.
 - 11) R. A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE J. Robotics and Automation, **2**, 1, (1986) 14.
 - 12) S. Yuta and J. Iijima: State Information Panel for Inter-Processor Communication in an Autonomous Mobile Robot Controller, Proc. IEEE IROS '90, Tsuchiura, (1990).
 - 13) G. Beni: Concept of Cellular Robotic Systems, Proc. IEEE Int. Symp. Intelligent Control, Arlington, (1988) 24.
 - 14) 石井威望, 廣瀬通孝, 池井 寧: 自律分散型マニピュレータの開発, 第2回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1984) 25.
 - 15) 村山知寛ほか: 分散制御システム——第一報: システム・コンセプトとハードウェアについて, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1990) 113.
 - 16) 穂積久士ほか: 6脚式移動ロボットの開発(2)——分散制御システム, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1990) 281.
 - 17) 小鍛治 繁: 多自由度機構と分散制御, 精密工学会誌, **54**, 10 (1988) 1921.
 - 18) 福田敏男, 中川誠也: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第1報, セル間の自動接近・結合・分離制御実験), 日本機械学会論文誌(C編), **55**, 1 (1989) 114.
 - 19) 小鍛治 繁ほか: やわらかい機械におけるモジュール化, 自己組織化, 精密工学会誌, **57**, 12 (1991) 2113.
 - 20) R. Mehrotra and M. R. Varanasi ed.: Multirobot Systems, IEEE Computer Society Press, (1990).
 - 21) 福田敏男ほか: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第31報, 衝突回避を考慮した双腕マニピュレータの協調作業によるセル間マニピュレータの組立, 分解と再構成), ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集, (1991) 205.
 - 22) 新井民夫, 大隅 久: クレーンとロボットの協調作業による重量物ハンドリング, 精密工学会誌, **57**, 3 (1991) 467.
 - 23) 沢崎直之, 井上博允: 複数の知能ロボットによる協調作業, 第1回日本ロボット学会ロボットシンポジウム予稿集, (1991) 271.
 - 24) P. Dario et al.: Instinctive Behaviors and Personalities in Societies of Cellular Robots, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Sacramento, (1991) 1927.
 - 25) 大熊道雄, 藤堂勇雄: 群作業をするロボットの情報系について, 第32回自動制御連合講演会前刷, (1989) 319.
 - 26) S. Kato and J. Takeno: Fundamental Studies on the Application of Traffic Rules to the Mobile Robot World, Proc. 5th ICAR, Pisa, (1991) 1063.
 - 27) T. Kimoto, S. Nagata and K. Asakawa: Control of Mobile Robots with Neural Networks, INNS, Supl. 1, (1988) 349.
 - 28) F. R. Noreils: Integrating MultiRobot Coordination in a Mobile Robot Control System, Proc. IEEE/RSJ IROS '89, Tsukuba, (1989) 43.
 - 29) S. Premvuti and S. Yuta: Consideration on the Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots, Proc. IEEE IROS '90, Tsuchiura, (1990) 59.
 - 30) H. Asama, A. Matsumoto and Y. Ishida: Design of an Autonomous and Distributed Robot System: ACTRESS, Proc. IEEE/RSJ IROS '89, Tsukuba, (1989) 283.
 - 31) A. Matsumoto et al.: Communication in the Autonomous and Decentralized Robot System ACTRESS, Proc. IEEE IROS '90, Tsuchiura, (1990) 835.
 - 32) Y. Ishida et al.: Communication and Cooperation in the Autonomous and Decentralized Robot System, Proc. IFAC DIS '91, Arlington, (1991) 299.
 - 33) 長谷川 勉, 坂根茂幸, 佐藤知正: 知能行動のための情報処理, 日本ロボット学会誌, **9**, 1 (1991) 112.
 - 34) 長田 正: 自律分散システムと情報処理, 計測と制御, **29**, 10 (1990) 935.
 - 35) H. Asama et al.: Negotiation between Multiple Mobile Robots and an Environment Manager, Proc. 5th ICAR, Pisa, (1991) 533.
 - 36) H. Asama et al.: Collision Avoidance among Multiple Mobile Robots Based on Rules and Communication, Proc. IEEE IROS '91, Osaka, (1991) 1215.
 - 37) V. R. Lesser and D. D. Corkill: The Distributed Vehicle Monitoring Testbed: A Tool for Investigating Distributed Problem Solving Networks, The AI Magazine, Fall, (1983) 15.
 - 38) R. G. Smith: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, IEEE Trans. Computers, **C-29**, 12, (1980) 1104.
 - 39) 坂根茂幸, 佐藤知正, 丸矢英之: ロボット視覚のための分散協調センシングシステム, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1990) 907.
 - 40) M. P. Georgeff: Communication and Interaction in Multi-Agent Planning, Proc. AAAI-83, (1983) 125.
 - 41) J. Wang and G. Beni: Distributed Computing Problems in Cellular Robotic Systems, Proc. IEEE IROS '90, Tsuchiura, (1990) 819.
 - 42) T. Arai, H. Ogata and T. Suzuki: Collision Avoidance among Multiple Robots Using Virtual Impedance, Proc. IEEE/RSJ IROS '89, Tsukuba, (1989) 479.
 - 43) 登尾啓史, 橋目 譲: マルチロボットのパスプランニングアルゴリズムを設計する一手法とその応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集(A), (1991) 147.
 - 44) 伊藤嘉邦, 安西祐一郎: 自律エージェントの協調活動のプランニング, 情報処理学会研究報告, 91-AI-77, (1991) 31.
 - 45) C. Le Pape: A Combination of Decentralized and Distributed Methods for Multi-Agent Planning and Scheduling, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Cincinnati, (1990) 488.
 - 46) 北村泰彦: 分散協調問題解決, 1990年度人工知能学会全国大会論文集, (1990) T2-1.
 - 47) S. E. Conry, R. A. Meyer and V. R. Lesser: Multistage Negotiation in Distributed Planning, in A. H. Bond and L. Gasser ed., *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufman Publ., Inc., San Mateo, (1988) 367.
 - 48) 横尾 真, 石田 亨: ATMSを用いた分散制約充足問題の解法, 情報処理学会論文誌, **31**, 1 (1990) 106.
 - 49) H. Haken: 協同現象の数理, 東海大学出版会, (1980).
 - 50) G. Nicolis and I. Prigogine: 散逸構造, 岩波書店, (1980).
 - 51) L. Davis ed.: Handbook of Generic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York, N. Y., (1991).