解説

<マイクロマシンの制御>

マイクロマシンの自律分散制御

Distributed Control for Micromachine

福田 敏 男* 石 原 秀 則* *名古屋大学工学部

Toshio Fukuda* and Hidenori Ishihara* *Dept. of Mechano-Informatics and Systems, Nagoya University

1. は じ め に

マイクロマシンが注目を集め、様々な研究成果が報告されている。これまではICプロセス等を応用したマイクロマシニング技術を用いて製作した静電モータやグリッパ等に関する報告が主であった。しかし、それらの研究の次の段階としてマイクロロボットシステムの開発を行う動向が見られるようになってきている。マイクロロボットシステムの開発のキーテクノロジーとしてアセンブリ技術などが取り上げられると同時にマイクロマシンの特徴を活かした制御技術の開発が求められている。

マイクロマシンはその小ささから狭い空間に入っているなどの利点を多く持っている反面、力が小さいなどのマイナス面も持ち合わせている。したがって、マイクロマシンを実用化するにはこの特徴を考慮した工夫が必要となる。そのひとつの方法として考えられているのがマイクロマシンを大量に投入し、ロボット群として使用する方法である。これは、マイクロマシンはバッチプロセスなどによる大量生産が可能であることを利用し、ロボットを大量に投入することによって、単体の非力さを補い、ロボット群として対応できる仕事の領域を拡げることが目的である。この様なマイクロマシンシステムの実用化には投入された大量のロボットに対する群制御が必要となってくる。

マイクロマシンの群制御を考える前にロボットシステムの制御を考えると、制御は図1のようなオペレーターがインターフェースを通してロボットシステムを制御する形態となる。ここで問題となるのがオペレーターとロボット間のインターフェースとロボットシステム内の制御方法である。インターフェースに関してはバーチャルリアリティーなどの研究が行われているがその紹介は他の文献[1]にゆずるとして、システム内の制御を考えてみる。

これまでのロボットシステムの制御は一台の管理者(コ

ントローラー, CPU) による集中管理型の制御で情報が一ヶ所に集中する点では有効な制御方法である。しかし、ロボティクスの発達にともない複数のロボットによる協調作業が実現していく中で、システムを構成するロボットの数が多くなり、制御器に対する負担が大きくなってきている。この点を克服するために提案された制御方法が自律分散理論を用いた制御方法である[2][3]。自律分散制御の最大の特徴は制御対象が多数であることとおののロボットが自律的に存在していることである。さらにこのような多数のロボットが集まって作る群知能(Swarm Intelligence)を利用したマイクロマシンの制御方法が研究されている。

本稿では、自律分散理論の概念を紹介し、マイクロマシンシステムへの応用例をいくつか挙げる。また、自律分散制御以外にも興味深い研究がいくつか行われておりそれら

図1 ロボットシステムの制御

図2 集中管理型システムと自律分散型システム

原稿受付 1994年2月7日

キーワード: Micromachine, Distributed Robotic System, Self-organizing, Swarm Intelligence, Artificial Life

*〒464-01 名古屋市千種区不老町
Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya

図3 なぜ自律分散制御がマイクロマシンにとって重要なのか

についても紹介していく。

2. 自律分散制御

ロボットシステムの自律分散制御の特徴を集中管理型制御と異なる点に着目して考えると次のような点が挙げられる[3].

(1) システムを形成するロボットが自律的に存在し、その数に制限がないのでシステムの大きさを任意に変えることができる。(拡張性)

(2) システムの中心が固定されていないために仕事に対して柔軟に対応できる。(柔軟性, 自己組織化)

(3) また、システムの一部が故障または破損した場合でも全体に対して影響を及ぼすことなく局所的な対応が可能である。(耐故障性)

(4) システム全体の状況を認知する必要がないために情報量が少なく済み、通信系及び情報処理系の簡略化ができ、ロボット自体の小型化にも有利となる。(簡略化, 小型化)

これらの特徴を活かし、著者らは自己組織型ロボットシステムを提案し、その応用例としてセル構造化ロボットシステム (Cellular Robotic System, 以下 CEBOT) を発表し、研究を行ってきた[4][5][6]. CEBOT は機能を制限した複数のロボットが自律的に動作しつつ、タスクに応じてロボット同士が結合、分離を繰り返し最適な形状を取りながら仕事を行うシステムである。この特徴により CEBOT は図4のように侵入路が狭く作業領域が広いガスタンクのような環境において有効となる。

この概念はロボットシステムの実用化に際して非常に重要なことである。進入路が狭い環境や障害物により移動空間が十分にとれない環境では、移動時には可能な限り大きさを小さくし、作業時に必要な大きになることにより、ロボットは作業空間を選ばず仕事ができるようになる。こ

図4 セル構造化ロボットシステム概念

こで、図4のような環境においてロボットシステムに仕事をさせる場合について考えると、まず管理者(制御器)をどこにおくかが問題となる。作業領域と外部の通信が可能であれば管理者の位置はさほど問題とはならない。しかし、通信が困難な場合には管理者を内部に配置するしかないが、管理者に故障が生じたとき、作業領域のロボット群を制御することができなくなる。また、外部と通信できないので故障したことを知らせることができないので外部から対応することもできない。そこで、集中管理型システムの替わりに分散型システムを導入すると、作業領域に分布するロボット群の中に特定の管理者が存在しないので何台かが故障した場合でも故障していないロボットで仕事を管理することができる。

図4の例からいえることは分散型システムにおいてはロボットシステムを構成しているロボットの中ですべてのロボットが管理者となりうるということである。ところで分散型システムにおける管理者の存在について考えてみると自律分散理論の定義からは矛盾する点も存在する。それは、システムを構成する各ロボットは完全自律であることが自律分散の定義であるとしたときロボット間の関係に上下が存在しないことである。ところが、現実的なシステムにおいてはすべての個体が完全自律である集団は存在しないといえる。これは、ロボット間で全く同等の支配力を発揮するロボット群ではシステムとして協調がとれず、システムとしての意志決定ができないことを意味する。

それでは、理想的なロボットシステムとはどのようなシステムかという点と図5のような集中管理型と自律分散型を融合させたシステムであると考えられる。つまり、管理者(オペレーター)の存在を容認した自律分散システムという点とわかりやすいかもしれない。図2の集中管理型システムと異なる点は図2のそれが管理者の故障に対処するすべがないのに対して図5の階層型システムでは管理者の故障時にも他のロボットが交代可能であるところである。図5のシステムを別の点から見ると図2の分散型システムにおいて巡らされている情報のネットワークは仕事の実行過程で

図5 分散型ロボットシステム (管理者を容認した自律分散システム)

通信頻度の高いネットと低いネットに分類される。通信頻度の低いネットを切り放していくと最終的にはツリー上のネットワークができてくると思われる。

3. マイクロマシンへの自律分散制御の導入

自律分散制御をマイクロマシンシステムに導入した場合の効用はマイクロロボットであるが故の機能の制限や非力さを群で用いることにより補うことである。一つの例として化学プラントのような複雑な配管系を考えてみる。配管メンテナンスにおいて内部の汚れの程度や探傷など外部からでは検査できないものなどは内部にセンサーなどを入れるしかない。マイクロマシンを配管内部に投入したとしてもマイクロマシン自体は移動速度も遅く、特に大規模な配管系では配管系全体を網羅するには時間もコストも大量に必要である。そこで単体のコストの安いマイクロマシン(マイクロセンサー)を大量に投入し、配管系に分布させ全体を網羅することによりコスト低減を可能にする。

現在考えられているマイクロマシン群の形態は自律分散型とマザーシップ型に大別できる。マザーシップ型は管理者や運搬車などをかねたマザーシップがマイクロマシン群を作業領域まで運び、そこでマイクロマシンを放出し、仕事をする。それに対して自律分散型では移動から作業領域での作業までロボット単体またはロボット群による協調によって行う。それぞれの特徴をまとめると表1のようになる。

マザーシップ型はマイクロマシンにおける集中管理型システムであるといえるが、前述のようにマザーシップの故障時の対処などに問題がある。それに対して自律分散的にマイクロマシン群を用いた場合には移動能力が小さいことや電源の問題などがある。このような問題を考えるとマイクロマシンシステムの一つの形態として図6のシステムが考えられる。図6ではマザーシップはロボット群の輸

表1 自律分散型マイクロロボットシステムとマザーシップ型マイクロロボットシステム

	自律分散型	マザーシップ型
制御	自律分散	集中管理
移動能力	小	大
エネルギー	小	大
耐故障性	大	小

図6 マザーシップを用いた自律分散マイクロロボットシステム

送や電源、通信機を持つのみでロボットシステムの制御は行わず、放出したロボット群が分散的に仕事をする。このシステムによってお互いの欠点を補いつつ理想的なシステムを形成できると考えられる。

筆者らは第2章のCEBOTの概念を取り入れたセル構造化マイクロロボットシステム (Micro Cellular Robotic System, 以下 μ -CEBOT) を提案、研究を行ってきた[7][8]。図7はエアにより浮上させたロボットを光によるエネルギー供給によって移動させるロボットシステムである。著者らはこのシステムを用いて図8のようなマイクロアセンブリシステムの構築を目標としている。

また、東大生研の藤田研究室においては自律分散型の搬送システムを試作している[9]。この研究においても、おのこの浮上子の力が小さい点と移動の自由度が小さい点をマトリクス状に移動子を配置することによって解決している。

また、自律分散型マイクロマシンシステムにおいてシステムを形成するロボットの数考えたとき、通常からは考えられない数が投入されることが考えられる。つまり、ロボットが小さいために通常人間が生活する空間であれば数万個のロボットを投入することが可能である。このとき、用いられる自律分散理論は数個から数十個のロボットによって形成された分散システムとは異なった制御方式になると考えられ、このような大規模なシステムは超並列または

図7 エア浮上型マイクロロボットシステム

超分散システムと名付けられている。分散システムと超分散システムの定義は明確ではないが、的確な例えではないかもしれないが人間社会における会社組織と国家組織に例えることができると考えている。会社組織はピラミッド的な構造を取りながら（そうでないところもあるだろうが）おのおのが分散的に行動し会社としての利益を追求している。そこには会社としての利益を上げるという共通の目的が存在する。それに対して、国家は会社のような組織をいくつか内在させながら存在しているが国家の目的のために会社は活動を行っていない。言い換えると、分散システムはある目的のためにシステムを構成するロボットが自律的な動作と協調動作を行うのに対し、超分散システムでは全体に目標がないままに局所的な目標に対して局所的に対処していくシステムであると考えている。

このようにマイクロマシンは分散システムから超分散システムまで広がる可能性を持ち、制御方法にしても従来のロボティクスの概念だけでは充足させることができない可能性が大きい。自律分散制御はそれらの要求を完全に満たすことができるかどうかははっきりした回答はまだ出せないが、その可能性を持つ制御方法としては最も有力であると考えている。現在問題とされているのは、

1) 分散的な意志決定法

各ロボットの意志決定及びロボットシステム全体の意志決定。各ロボットが自律的に存在している中でロボットシステム全体としての統一した意志をどのように決定させるかが問題となっている。

2) 分散システムとのインターフェース

自律分散システムと管理者間のインターフェース。自律分散システムにおいてはシステムが中心が決定されていないために管理者とのインターフェースをどのように設定するかが問題となっている。

大きな問題としてはこの2点が上げられているがその他の問題点も含め解決せねばならない問題が多く存在する。これらの問題を解決することによって自律分散システムの構築が可能になると考えられ、今後の研究が期待される。

図8 自律分散型マイクロアセンブリシステムの概念

4. A-Life とマイクロマシン

これまで述べた自律分散型の制御に近い概念を持っているアルゴリズムとして群知能 (Swarm Intelligence, 以下 SI) が、近年研究されるようになってきている[10]. SI は動物、特に昆虫などの挙動に模してアルゴリズムを考察したもので、少ない入力信号によってタスク処理を行うところに特徴がある。通常、様々なタスクを実行するときにはタスクに応じて最低必要な入力 (情報) 数が決められる。複雑なタスクを実行するシステムにおいては情報を取り入れるセンサーの数が多くなり、それらの情報の処理系の設計が重要になる。ところがマイクロマシンのようにその大きさの制限などによりセンサーの数に制限が加わった場合十分な情報を得られない状況が起こりうるわけで、その場合に SI のようなシステムが必要となってくる。これまで述べてきたような自律分散システムの場合外部環境を認識するセンサー情報や他のシステムとの通信によって協調を行うためにセンサー、通信機などが多く必要となる。しかし、これまでに述べてきたような異なる機能を有する機能分散型マイクロマシンにおいてはマクロ的な自律分散システムとは異なるシステムを導入する必要があり、SI がそれらの要求を満たすシステムと考えられている。

SI と定義的に重複するところもあるが自律分散理論と並んで、プランニング問題などに人工知能 (Artificial Intelligence, 以下 AI) の分野で注目を集め始めているのが、人工生命 (Artificial Life, 以下 A-Life) である[11]. 人工生命というと、科学小説などでは人造人間、クローン人間などを想像してしまうが、A-Life は生物の行動原理または行動パターンに模したシステムの挙動を重視したアルゴリズムである。

A-Life による研究の一例を紹介すると、蟻の行動原理に基づいた Ant Algorithm[12][13]や、昆虫の持つフェロモンに着目した行動計画法などが研究されている。これらのアルゴリズムにおいても汎用性を求めることは困難ではあるが特定の作業において有効なアルゴリズムを示すこ

図9 A-Life と自律分散システムの位置づけ

とができておりロボットシステムを簡略化する上では非常に有効なアルゴリズムであると考えられる。

これまでのロボットシステムは状況認識やそれに基づく判断などをすべて数式などの一定のアルゴリズムを与えることにより行っていた。ところが、これらのアルゴリズムは一つの大きな欠点を持っている。それは評価に対して最適かどうか設計者に依存しており、必ずしも汎用性を有していないことである。また、AIの分野において研究されているニューラルネットワーク(NN)、ファジー(FUZZY)、ジェネティックアルゴリズム(GA)などでも、そこに用いられる評価式がそれらのアルゴリズムの特性を決定してしまう。この点にそれらのアルゴリズムに一般性を求めることの困難さの一端がある。これらの問題を解決する一端として、ロボットやシステムの挙動を重視したアルゴリズムとしてA-Lifeが提案された。A-Lifeの定義は広く、自律分散システム、SI、NN、FUZZY、GAなどをすべて含めており、A-Lifeの動向が今後のAIの研究ならびにロボティクスの研究の鍵を握っているといっても過言ではないように思われる。言い換えてみると自律分散システム、SI、NN、FUZZY、GA、A-Lifeなどを区別して研究するのではなくそれぞれのよいところを抽出して、それらを統合した研究を行なう段階にきていると考えられる。そして、それらの研究においてA-Lifeが、あるいは生物の挙動が問題を解決する上で重要な役割を担っていると考えられる。

5. 終わりに

次世代のロボットシステムとして注目を集めているマイクロマシンの研究も製作技術を開発する段階から次の段階へ発展しようとしている。その中でマイクロマシンシステムの制御技術は重要な位置を占めており、実用化に当たっては欠かせない技術である。その制御技術の問題点を整理

してみると最も大きな問題はロボットの数が多数であることとロボットが小さいためにインターフェースを十分な量搭載できないことである。つまり個々のロボットにアクセスしながら作業を実行することは困難でありその点から自律分散システムが注目を集めている。

自律分散システムの研究ではシステムの制御の問題やシステム全体としての行動計画、意志決定など今後の課題も多く残されているが今後大きく発展していくことを望みたい。また、自律分散システムは一つのキーテクノロジーではあるがA-Lifeなど将来的にマイクロマシンにおいてキーテクノロジーとなる可能性を秘めたものも多数見られる。これらを含めたAIの研究活動の今後にも期待したい。

参考文献

- [1] IEEE: "Proceeding on Virtual Reality Annual International Symposium," Seattle, September 18-22, 1993.
- [2] 森, 宮本, 他: "自律分散概念の提案", 電気学会論文誌C, 104-12, pp. 303-310, 1984.
- [3] 特集: "自律分散システム", 計測と制御, 29-10, 1990.
- [4] 福田, 中川: "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, 55-509, pp. 114-118, 1989.
- [5] 福田, 植山, 他: "動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第7報, ネットワークのエネルギー評価方法に基づくマス・セル決定方法)", 日本機械学会誌C編, 57-537, p. 234-242, 1991.
- [6] 植山, 福田, 他: "動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第10報, CEBOTの軍構造に対するネットワーク・エネルギー評価を用いた組織の分散制御構造化)", 日本機械学会誌C編, 58-549, p. 132-139, 1992.
- [7] 福田, 石原, 他: "分散型マイクロロボットシステムに関する研究(第1報, 移動機構用アクチュエータの開発と実験)", 日本機械学会誌C編, 58-549, pp. 1458-1465, 1992.
- [8] Fukuda, Ishihara: "Micro Optical Robotic System with Cordless Optical Power Supply," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1703-1708, 1993.
- [9] 小西, 藤田: "多数のマイクロモジュールによる自律分散型搬送システム", 第4回自律分散システムシンポジウム, p. 179-182, 1993.
- [10] Huang, Beni: "Stationary Waves in 2-Dimensional Cyclic Swarms," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 433-440, 1993.
- [11] 日本ファジー学会, 日本ロボット学会: "Artificial Life 講習会資料", 1993.
- [12] Colnari, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V.: "Distributed Optimization by Ant Colonies," First European Conference on Artificial Life, MIT press/Bradford Books, p. 134-142, 1991.
- [13] 久保, 嘉数: "アントコロニーモデルにおける自律エージェント群の協調動作学習の性質", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'93, 札幌市, July 6-7, 1993.

福田敏男 (Toshio Fukuda)

1948 年 12 月 12 日生. 1952 年東京大学大学院博士課程修了, 工学博士, 通産省商工業技術院機械技術研究所研究員, 東京理科大学工学部機械工学科助教授を経て, 現在名古屋大学工学部機械情報システム工学科教授. 自己組織化ロボット, マイクロロボット, ニュー

ロ・ファジー制御の研究等に從事. IEEE Industrial Electronics Society Vice President (1991-), IEEE Robotics & Automation Society 理事及び 1995 年開催同会議の実行委員長.

(日本ロボット学会正会員)

石原秀則 (Hidenori Ishihara)

平成 3 年名古屋大学工学部電子機械工学科卒業, 同年名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻進学, 現在同大学院博士後期課程電子機械工学専攻在籍. マイクロロボット及び自律分散システムの研究に從事. 日本機械学会, 自動計測制御学会の会員.