多自由度機構と分散制御*

小 鍛 治 繁**

A Mechanism of Very Many Degrees of Freedom and a Distributed Control System

Shigeru KOKAJI

A mechanical link system is designed which is composed of identical units. There is no limit to the total size of the mechanism and any size is possible so long as enough units are available. Each unit has its dedicated controller and there is no central controller which supervises the total system. Each controller has the same software and it knows neither the total system size nor its location in the system at first. The controllers can talk to their neighbour units' controllers and while talking, they gradually get information and establish a well-organized distributed control system. The system accepts external commands and realizes movement on a plane. The system composed of nine units has been realized and experiments have been carried out.

Key words : distributed control, link mechanism, walking robot, fractal

1. は じ め に

高集積度素子による情報処理技術は機械システムの制御に飛躍的な自由度を与えた。価格、体積、処理能力などの問題のために1台の計算機を貴重な資源として扱って制御システムを設計した段階から、必要に応じて例えばアクチュエータ1台ごとに小型処理装置を割り当てられる段階に変わりつつある。このような傾向をもとに将来を展望すると、豊富な情報処理資源をいかに効果的に使いこなすかという方法論の必要性が浮かび上がる。複雑なシステムの実現に対して十分な量の資源をハードウェア的には投入することが可能でも、全体システムを統括する技術が未発達であれば結局人間が個別に対応しなければならない。そのような状況では全体システムの完成に必要な労力が規模と共に急激に増大し、使用可能な資源を使いこなせなくなる可能性がある。

このような問題点を解決する1つの手段として、制御システム自身に全体システムを認識させ、全体を統括する制御手法の細部を自律的に生成させる手法が考えられる。本論文ではこのような手法の基礎的研究を目的として、以下のような条件を満たす機械システムを設計し、具体的に実現し、動作させた例について述べる。

- [条件1] 目標とする機械システムはユニットの集合体として実現され、これらのユニットは同一のハードウェアとソフトウェアを持つ。
- [条件2] この機械システムには全体の大きさに制限がなく、十分な数のユニットが用意できればいくらかでも大きなシステムを構成できる。
- [条件3] 全体を統括する集中型の制御部は存在せず、各ユニットが持つ制御部が分散的に全体を制御する。
- [条件4] この機械システムはなんらかの意味のある動作を行う。

これらの条件を満たすシステムは自己の構成を認識して動作様式の細部を生成する。また一度ユニットを正確に設計すれば、システムの規模が変更されても新たにハードウェア、ソフトウェアを開発する必要がない。

2. 多自由度機構

次のような方法によって全体の規模を任意に設定できる機構を構成した。

- (1) セグメントを設計する。
- (2) 結合様式を設計する。
- (3) セグメントを結合様式に従って結合し1次の機構を構成する。
- (4) 2次以降の n 次の機構は $n-1$ 次の機構を結合様式に従って結合することにより得る。

* 原稿受付 昭和62年12月17日、昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

** 正 会 員 機械技術研究所(つくば市並木1-2)

Fig. 1 The basic segment

(a) 1-dimension

(b) 2-dimension (c) 3-dimension

Fig. 2 The basic configuration

(a) 1st order (b) 2nd order (c) 3rd order

Fig. 3 Series of the 1-dimensional fractal mechanism

(a) 1st order

(b) 2nd order (c) 3rd order

Fig. 4 Series of the 2-dimensional fractal mechanism

具体的なセグメントを図1のように可変長リンクとノードで構成した。結合様式は図2に示すように1, 2, 3次構造にそれぞれ対応できるものを使用した。図3に1次元の、図4に2次元のそれぞれ1次、2次、3次の機構を示す。ここで n 次元構造のリンクは、ノードの回りに $n-1$ の自由度で回転できるとする。以下の説明では、主として2次元の結合様式を例にとる。

上記で採用した方法は一般に n 次の機構の内部に

Fig. 5 The 2-dimensional fractal mechanism of 2nd order

$n-1$ 次の機構が埋め込まれた再帰的な構造を実現する。このような方法を採用する利点の一つは、機械システムが持つ特質を一般的に示すときに帰納的な手段を利用できる点である。例えばこのメカニズム(2次元)を可変長リンク機構とみたときに、任意の n 次の機構において各リンク長は独立変更の自由度をもち、またリンク長を変化させないときは全体として平面上の移動回転の3自由度をもつことを次のようにして示すことができる。

- (1) 1次の機構については成立する。
 - (2) n 次の機構についてリンク長を独立に設定できるなら、まず3つの n 次の機構についてそれぞれのリンク長を自由に設定した後互いに結合して $n+1$ 次の機構を作る。従って、各リンク長の独立変更の自由度が $n+1$ 次の機構でも保存されている。
 - (3) 移動回転の3自由度については、3つの n 次の機構が持つ合計9自由度のうち、6自由度が各結合点でのノードの座標一致条件によって失われるので、3自由度が保存される。
- (但し、一部のリンク長が極端な値をとると成立しないが、暗黙のうちにこの場合を除外した。)

上に述べた機構の再帰的な構造はMandelbrot¹⁾が提唱している「フラクタル構造」と一致するものであり、次数を極限まで拡張した場合にはフラクタル図形と形態が一致する。これはシステムの規模に制限をおかないという条件2の内容をよく表現しているの、以下では m 次元の結合様式に従って生成された n 次の機構を「 m 次元 n 次のフラクタル機構」と呼ぶ。

図5に製作した2次元2次のフラクタル機構を示す。リンク長はモータによって可変であり、またノード部はソレノイドの制御により床面に対する固着/自由モードを選択できる。

Table 1 The feature of the parallel machine MX 2

CPU	8086 compatible CMOS LSI
Numerical processor	8087 compatible LSI
Number of units	16
Inter-unit communication	communication memory ²⁾⁴⁾
Inter-unit data transfer rate	64 M bit/s

Fig. 6 The parallel processing machine MX 2

3. 制御ハードウェア

フラクタル機構の各セグメントに対して専用の制御ハードウェアを割り当てる。制御部とセグメントを合わせてユニットと呼ぶ。制御部はユニット内のリンク長とノードの固着/自由モードを制御し、また隣接ユニットとの情報交換を実行する。実験用の制御ハードウェアとしては機械技術研究所で開発された汎用並列制御システム MX 2 が使用されている²⁾⁴⁾⁵⁾。このシステム上では複数の制御ユニットを自由に結合して並列処理型の制御実験を実行できる。MX 2 の概要を表 1 に、全体ハードウェアを図 6 に示す。

前章で述べたように 2 次元フラクタル機構では $n-1$ 次のフラクタル機構を 3 個結合して n 次のフラクタル機構を構成している。その際に結合点において 2 つのノードを縮合しているので厳密には 1 つのノードが 2 つのユニットに属することになる (図 7)。以下での記述の混乱を避けるためにこの点を次のように整理する。 n 次のフラクタル機構は論理的にはあくまで $n-1$ 次の構造を 3 個集めたものと定義し、これを図 7 のように示して論理構造と呼ぶ。しかしハードウェア

Fig. 7 The logical structure **Fig. 8** The hardware structure

的にはノードを縮合するので、実際の物理的構造は図 8 のようになる。これをハードウェア構造と呼ぶ。あるノードに対してハードウェア構造上 2 つの制御部が対応する場合は任意の 1 つとのみ結線する。

4. 分散型制御

第 1 章に述べたようにフラクタル機構には集中型の制御部を置かない。さらに条件 1~3 を次のように解釈する。

- [解釈 1] 初期状態では各ユニットは全体システムの規模 (次数) を知らない。
- [解釈 2] 初期状態では各ユニットは全体システム中の自己ユニットの位置を知らない。
- [解釈 3] 各ユニットは隣接ユニットのみと情報交換可能とし、隣接ユニット間以外には交信経路は存在しない。
- [解釈 4] 同一動作に対するユニット間の交信情報量はシステム規模 (次数) によらない。

一方、以下の点に関しては当面条件を緩め例外を認める。

- [例外 1] フラクタル機構の頂点に当たるノードを頂

点ノード (vertex node)と呼び、これを含むユニット (以下頂点ユニット) はユニット内に頂点ノードを持つことを知っている (条件1の例外).

- [例外2] 各ユニットはIDコード (認識番号) をもち同一のIDコードは存在しない (条件1の例外).
- [例外3] 各ユニットは自分が属するフラクタル機構の最大可能次数を知っている (条件2の例外).

頂点ノードについては図7に例を示した. これらの条件, 解釈を満たす制御手順として図9に示す手順を構成した. 以下に主に2次元2次のフラクタル機構を例にとって概略を説明する.

4.1 交信経路

交信の手段としては非同期型ラインと同期型ラインが設定されている. 非同期型ラインはクロック信号など16ビット以下の情報単位の交信に使用される. 同期型ラインはユニット間でクロック位相合わせが終了した後に使用可能となり, 比較的長いメッセージを送信できる.

4.2 目覚まし動作 (wake up)

マスタリセットのようなハードウェア的初期化を禁止しているので, 何らかのメカニズムで全ユニットが動作状態に入ったことを保証しなければならない. まず各ユニットは初期化の段階で目覚ましフラグを0にし, その後隣接ユニットに対してクロック信号を送出する. 各ユニットはすべての隣接ユニットからクロックを受け取るまで待機し, クロック受信を確認した後は隣接ユニットの目覚ましフラグ値を調べ, その中で最小のものに1を加えた値を自己の目覚ましフラグ値として更新していく. 目覚ましフラグの値があるスレシヨルドを越えた時点で全員が動作状態に入ったと認識する. このスレシヨルド値は最大可能次数の関数として与えられる. 1次元フラクタル機構の例を図10に示す. システム内に1つでも動作状態に入っていない

Fig. 9 The control flow

いユニットがあるときには, どのユニットの目覚ましフラグもある値以上には上昇できない.

4.3 同期動作 (synchronization)

各ユニットは独立のハードウェアタイマを持っているのでこれを分周して同一周期のクロック信号を生成し, 隣接ユニットと交換する. 同期型交信を可能にするために相互に位相を調整して統一クロックを生成する. 2次元フラクタル機構のように交信経路にループがある時は位相差のない統一クロックに収束しない場合があるので³⁾, 動作開始に先立ってまず交信経路上に木を構成し, この木の上で動作を実行している.

(a) at the beginning (#4 is sleeping)

(b) near the last phase of the procedure

Fig. 10 The wake up procedure

Fig. 11 The LMS and LMS* coordinates

4.4 座標決定動作 (location)

同期が成立した後に3つの頂点ユニットは座標決定用コマンドを送出する。このコマンドは次項で述べるようにコマンド到達遅れを知るための減算カウンタおよび発信ユニットのIDコードを含んでいる。各ユニットは頂点ユニットからのコマンドを中継すると共に各頂点ユニットからの距離（介在した中継ユニットの数+1）を知り、自己座標を生成する。図11に示すようにまず論理構造に対応する座標系LMSが構成され、これに基づいてハードウェア構造に対応する座標系LMS*が決定される。図中でLは頂点ユニットの中で最もIDコードが大きなもの、Mは中間、Sは最小のものを意味する。

4.5 コマンド伝達 (command)

任意のユニットはコマンドを発信でき、コマンドは全ユニットに中継される。フラクタル機構のコマンドシステムには次のような機能が組み込まれている。

1) エコー防止

各コマンドには発信ユニットIDと発行番号がつけられている。各ユニットは各発信ユニットの最新発行番号を記録したコマンドリストを持ち、同一コマンドを2回目に受信した場合はこれを無視する。従って交信経路にループが存在してもコマンドが無限に中継されることはない。

2) 遅延コマンド実行

各コマンドの内部パラメタとして減算カウンタ値が組み込まれており、各ユニットは中継時にこの内容を1だけ減じる。また受信したコマンドの減算カウンタ値が0でない時はこれを実行せずに一時テーブルに保存する。統一クロック周期に同期してカウンタの内容を1ずつ減算していき0になった時点で実行を開始する。この機能によりシステム全体でコマンドの実行開始時刻を同時にすることができる。

5. 移動機能の実現

2次元フラクタル機構はノードの固着/自由モードとリンク長を制御することにより平面上の移動を行うことができる。1次元1次のフラクタル機構の移動はよく知られた尺取虫型移動となる。2次元フラクタル機構ではまずハードウェア座標LMS*をもとにしてノードの類別を行う。各ノードのLMS*座標が $(1^*, m^*, s^*)$ の時、 $\{(m^* + 2s^*) \bmod(3)\}$ の値0, 1, 2に応じて、A, B, Cの類に分ける(mod(n)は n で除したときの剰余を示す)。1つの単位移動ごとに3つの基本タイミングT1, T2, T3を同期生成し、図12のようにノードのモードとリンク長を制御して移動を実現する。この移動は機構上の座標系を基準として実現され、任意の方向への並進と回転が可能である。

6. 考 察

第4章でフラクタル機構の分散制御を実現するにあたり3つの例外を許した。これらの例外の必要性について検討する。

[例外1] 頂点ノードに関する例外

この例外は次のようにして取り去ることができる。2次元フラクタル機構の場合頂点ノードを含むユニットは論理構造上2つの隣接ユニットを持つ。これに対して頂点ノードを持たないユニットはすべて3つの隣接ユニットを持つ。2次元以外のフラクタル機構においても論理構造上の隣接ユニット数を調べることでユニット内のノードが頂点か否かを決定することができる。従って初期化手順に隣接ユニット数を調査する手順を付け加えればよい。

[例外2] IDコードに関する例外

この例外も次のような手順を導入すれば除くことができる。頂点ユニットは自己のハードウェアタイマの独立性に基づいて独立な乱数を選択し、これを自己

Fig. 12 The walking procedure of the fractal mechanism

ID コードとする。次に非同期型の交信によってこれ

らの中に同一の ID が存在するかを調査し、もし存在すれば別の乱数を選択する。各頂点ユニットに対して異なる ID コードが決定されたならこれをもとに論理座標を生成し、この論理座標から各ユニットは唯一性の保証された ID コードを生成できる。

[例外 3] 可能最大次数に関する例外

ここで採用した目覚まし動作の実現には一定のスレショルドが必要である。これは可能最大次数によって定めるしかなく、従ってこの例外は取り除けない。しかし現実には余裕のある可能最大次数を設定することで大きな問題は生じない。

7. おわりに

すべて同一のユニットから構成される機械システムを製作した。集中型の制御部が存在しない場合でも、各ユニットに分散配置された制御部が相互に情報交換を行って統合的な動作を実現できることを示した。

参考文献

- 1) B. B. Mandelbrot: The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Co., (1977).
- 2) S. Kokaji: Collision-Free Control of a Controller Composed of Sixty-Four Microprocessors, IEEE Control Systems Magazine, 6, 5, (1986) 9.
- 3) C. R. Rao: Linear Statistical Inference and its Applications, John Wiley, (1973)
- 4) 小銀治 繁: 並列制御機構によるマニピュレータの制御, 精密機械, 51, 4 (1985) 796.
- 5) 小銀治 繁: 並列制御機構によるマニピュレータの制御 (第 2 報), 精密機械, 51, 12 (1985) 2328.

学術情報センター、研究論文のデータベース化

文部省の学術情報センター（東京・大塚、所長・猪瀬博氏）は学・協会の協力を得て 63 年度から学会誌に掲載された研究論文をデータベース化し、大学や研究機関に提供する。

当面、化学、医学の 2 分野を対象とし、逐次増やす計画である。このため、センター内に関係学会との連絡機関を設け、技術的問題点や経費負担などの検討に入った。特に化学関係の論文は、全文を収録したデータベースとして構築する考えで、科学技術情報の全文検索に先鞭をつけることになる。また、民間にも磁気テープとして加工、販売する考えである。

学術情報センターの今回の構想に参画している化学関係の学・協会は高分子学会、日本化学会、日本生化学会、日本農芸化学会、日本薬学会、窯業協会、化学情報協会の 7 つである。

これまでオンライン検索システムによる科学技術データの提供はほとんどが要約文である。しかし要約文は加工者の知識量に左右され、質的にムラが出るという欠点があった。なかでも化学関係の論文では、重要な化合物名や構造式が漏れる心配があり、研究者の間には全文データの提供を求める声が強かった。

(p. 1956 へ続く)