

機械システムの動特性解析の自動化* (運動伝達機構への適用)

綿 貫 啓 一^{*1}, 丸 山 一 男^{*2}, 大 滝 英 征^{*1}

Automatization of Dynamic Characteristic Analysis of Mechanical System (Application to the Motion Transmitting Mechanism)

Keiichi WATANUKI, Kazuo MARUYAMA and Hideyuki OHTAKI

Recently, the importance of system design in the field of mechanical engineering has been increasingly recognized. But suitable and useful methods for machine design are not yet established. An analytical method for the dynamic characteristics in the mechanical system, a method using linear graph theory, is proposed. In this paper, for the purpose of the practical use of this analytical method, a program which can analyze the dynamic characteristic automatically is developed. As an example, in the motion transmitting mechanism arranging the elements on the display of the computer, the system graph and the tableau equation are automatically produced, and the dynamic characteristics of the system are derived.

Key Words: Computer-Aided Design, Modelling, Linear Graph Theory, Automatic Analysis, Motion Transmitting Mechanism, Simulation

1. 結 言

近年, 機械システムの動特性解析の自動化, 省力化に関して, CAD による形状モデルの作成と, その自動要素分割による有限要素解析および境界要素法解析などの方法が用いられている。しかし, 機械システムの解析目的によっては, 設計者が解析モデルを作成した後, その運動方程式を導出し, 数値解析や理論解析によって求めている。そこで, 一般の機械システムに対して動特性解析を自動化, 省力化することが求められており, 解析モデルを簡単に入力でき, 運動方程式の導出や解析が自動的になされる対話形動特性解析プログラムがあれば, 非常に有用であると考えられる。

特に, ロボット, マニピュレータ等をはじめとする各種の機構の設計において, その運動学的特性, 静・動特性, さらに制御系まで含めた特性の把握が重要となってきた。一般に, 機械システムは機構の特性を表す方程式は, かなり非線形系となり解析が困難である。そのため, 解析システムのモデリングを自動的に行い, その評価まで一貫して行える CAE システムの

開発が盛んになってきた。これらの研究では, 主としてグラフ記述法による機構構造の自動生成および機構解析の自動化が行われている。

機構解析の自動化に関しては, グラフ理論を利用した解析方法として, リンク機構については黒岩ら⁽¹⁾が, また運動伝達機構については, 矢田・矢野により提案されている⁽²⁾が, まだ自動化には至っていない。また, モータ代数を用いた機構解析として, Yuan らによる空間 7 節単一ループ機構について解析され⁽³⁾, さらに城らによりそれらの方法とグラフ理論を統合することにより, 解析対象を複合ループ機構まで広げられている⁽⁴⁾が, まだ自動化まで至っていない。現在では, グラフ記述法以外による解析の自動化が試みられてきており, 藤田らによりオブジェクト指向言語 Smalltalk による二次元⁽⁵⁾および三次元振動解析の自動化⁽⁶⁾がなされてきているが, 一般の機械システムの適用には至っていない。以上のことを考慮すると, 機械システムの構造の自動生成および機構解析の自動化が一貫して行え, 動特性解析が自動的にできるプログラムの開発が望まれている。

そこで本報では, 以上で述べたことをかんがみ, 機械システムの動特性解析をパーソナルコンピュータ上で自動的に行えるアルゴリズムおよびプログラムをグ

* 原稿受付 平成 3 年 8 月 27 日。

^{*1} 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

^{*2} 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

ラフ理論による動特性解析方法⁽⁷⁾を応用して構築する。まず、解析モデルの作成をウィンドウ・システムにより入力容易化を図るとともに、システム全体の運動方程式に相当するタブロー方程式⁽¹⁰⁾の導出をグラフ理論を用いた方法により自動生成し、その自動解析を行う。本報では、減速歯車を有する運動伝達機構の解析に適用してその有用性の検討を行う。

2. 解析プログラムの構成

今回開発した機械システムの動特性解析プログラムは、グラフ理論を利用することにより、複雑な機械システムのシミュレーションを容易にすることを目的としている。

本解析プログラム MSSP は、図 1 に示すように、大きく分けて 3 種類のプログラムにより構成されており、それぞれ、プリ・プロセッサ部、解析プロセッサ部およびポスト・プロセッサ部である。

プリ・プロセッサ部では、形状モデラおよびトポロジカル解析により解析対象の入力データを算出する。解析対象が新規モデルであるか既存モデルであるかにより 2 種類のプログラムがあり、新規モデルの場合には、解析対象の構成要素の配置に応じて、解析モデルのシステムグラフおよび入力データを自動的に算出でき、既存モデルの場合には、すでに解析モデルのシステムグラフが登録されているので、解析対象の諸元を入力するだけで、入力データを算出するようにした。

解析プロセッサ部では、プリ・プロセッサ部で作成したデータをもとに、解析モデルの動特性解析をする。まず、解析モデルの構成要素の接続関係を示すカット・セット行列およびループ行列を算出し、また構

成要素の特性を示すターミナル方程式を作成し、システム全体の運動方程式に相当するタブロー方程式を算出する。それをクラウト法を用いて解析している。

ポスト・プロセッサ部では、解析プロセッサ部で作成されたデータから、CRT 上に作図するとともに XY プロッタおよびプリンタに動特性解析結果の図を出力する。

3. タブロー方程式の自動作成アルゴリズム

3.1 システムグラフの自動生成 新規モデルの解析のための入力データ作成アルゴリズムを図 2 に示す。プリ・プロセッサ部は、形状モデラにより解析対象の構成要素の配置を行い、グラフ理論を用いたトポロジカル解析により解析モデルのシステムグラフを自動的に算出し、それらと諸元を入力することにより解析プロセッサに受け渡す入力データを作成する。

まず、構成要素の配置を、図 3 に示すような形状モデラにより行う。図 3 (a) の画面の上方にある選択メニューは、図 3 (b) に示すようなファイル操作機能、編集機能などにより構成されている。例えば、構成要素の配置は、Edit の中の Component により、図 4 に示すような、部品表のウィンドウを開き、マウスでクリックすることにより選択し、ウィンドウ上に配置していく。ここで、使用できる部品は表 1 に示すように電源、荷重、トルク源、電気部品、機械部品および新規定義部品である。これらの操作を繰返すことにより、図 5 に示すようなシステムを作成していく。本プログラムでは各構成要素には配置位置および接続特性の属

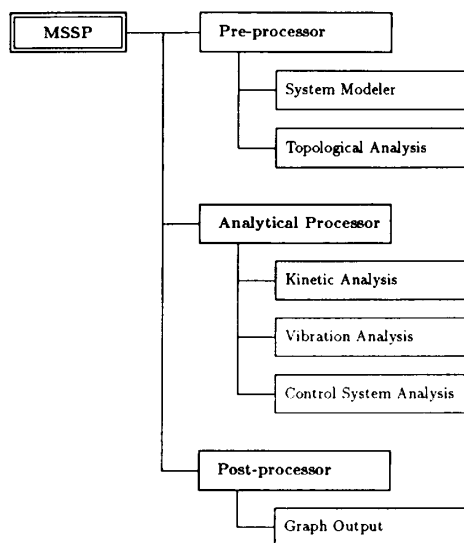


図 1 解析プログラムの構成

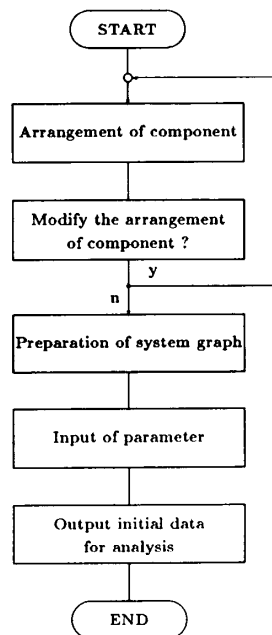


図 2 プリ・プロセッサ部のアルゴリズム

性が定義されている。したがって、構成要素の配置が終了した後、その配置情報によりシステムグラフの作成が行われる。ここで、システムグラフ作成に際しては、各構成要素について、その要素の属性を表2に示すように、3種類に分類した。

「I形」とは、構成要素の枝が節点xとグラウンドz(=g)との間で結び付いているタイプで、例えば機械要素のラジアル玉軸受のように、外輪が装置(グラウンド)に固定されて、内輪が軸などに取付けられて回転している場合、グラウンドに対する回転で動作が規定されるタイプである。

「II形」とは、構成要素の枝が節点xと節点yとの間で結び付いているタイプで、例えば機械要素の軸のように、両端間のねじれ量で動作が規定されるタイプである。

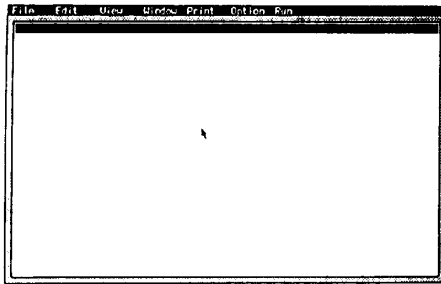
「III形」とは、二つの構成要素が一对となって機能し、

構成要素の枝が節点xとグラウンドzおよび節点yとグラウンドzとの間で結び付いているタイプで、例えば機械要素の歯車のように2個の歯車が一对となって動作し、それぞれの歯車のグラウンドからの回転運動により規定されるタイプである。

以上のように、各構成要素を3種類の属性に分類し、図6に示すようなアルゴリズムにより、システムグラフを自動生成する。つまり、構成要素の配置情報から順次構成要素名を入力していき、その属性により、枝および節点番号を決定し、解析システムの枝の数、節

表1 構成要素の一覧

[1] Voltage, Current	[4] Machine element
Constant Pulse Sine Trapezoid User definition Nonlinear	Spring Damper Load Axis Coupling Lead screw Gear Linear guide Slide table
[2] Load, Torque	[5] User defined element
Constant Pulse Sine Trapezoid User definition Nonlinear	
[3] Electric element	
Resistance Capacitor Inductor Transformer Electro-mechanical transducer DC-servo motor	



(a) 画面構成

File	View	Print
Create new file Load file Save file Set parameter Load library Save library DOS shell Quit	Restore window Change scale Show system graph	Analytical model System graph
Edit	Window	Option
Restart edit Component	Edit window Component window System graph window Refresh window	Palette Global setting
		Run
		Run

(b) 機能

図3 形状モデルの画面構成および機能

表2 構成要素の属性分類

Type	Terminal Graph	Element
I		Voltage source, Load Bearing
II		Resistance, Axis Coupling
III		Electro-mechanical transducer Lead screw, Gear

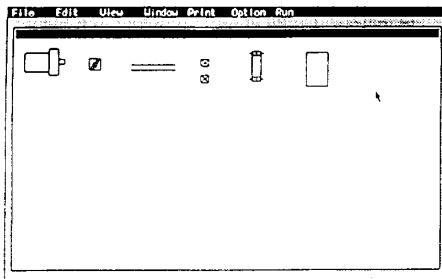


図4 エディタ・ウィンドウ

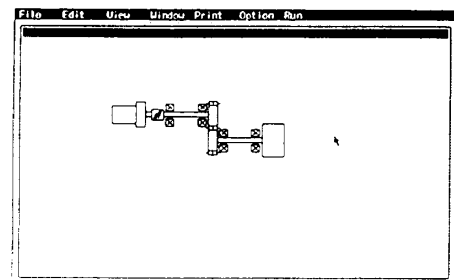


図5 構成要素の配置

点の数および各構成要素の接続状況からシステムグラフを決定する。次に、各構成要素に対して、図7に示す画面上で対話的に諸元を入力していき入力データを作成する。これらのデータはファイルに入力データとして、システムグラフの節点および枝の数、各構成要素の接続状況および諸元、シミュレーション時間が出力される。このデータを解析プロセッサ部に引き渡しシミュレーションする。

3.2 タブロー方程式の自動生成 解析プロセッサ部は、入力データをもとに機械システム全体の運動方程式を表すタブロー方程式を作成して、それをクラウト法により数値解析する。図8に示すように、本プロセッサ部は大きく分けてデータ入力部、6個のサブルーチン群を有するメインプログラム部およびデータ出力部により構成されている。以下で、それぞれの機能について概説する。

(1) データ入力部は、プリ・プロセッサ部で作成された入力データを読み込み、メインプログラムに引き渡すプログラムである。

(2) メインプログラムは、プロセッサの主要部であり、プリプロセッサ部で自動生成されたシステムグラフより作成したデータをもとにシステム全体のカットセット方程式、ループ方程式およびターミナル方程式を作成し、それによりタブロー方程式の自動作成を行うものである。前報⁽⁷⁾までは、解析モデルからシステムグラフを解析者が作成し、それをもとにタブロー方程式を作成しており、その過程において完全には自動解析されていたものではなかった。そこで本報では、各構成要素に接続属性と動特性を加味することで、3.1節で提案したシステムグラフの自動生成法によりシステムグラフを作成した後に、接続特性および動特性

を表すタブロー方程式を自動生成し、さらに自動解析を行っている。ここで、タブロー方程式を作成する際に、例えばDCモータのように電気回路部、電気-機械変換部および回転機械部に分割できるものについて、一つの要素として取扱ったり、場合によっては複数の要素として取扱ったり柔軟に対応できるようにグラフの表現法およびタブロー方程式の作成法を拡張している。

(3) 出力データ部は、解析プログラム部で計算されたデータをデータファイルに保存するプログラムである。

4. 運動伝達機構の解析

機械システムへの解析プログラムの適用例について

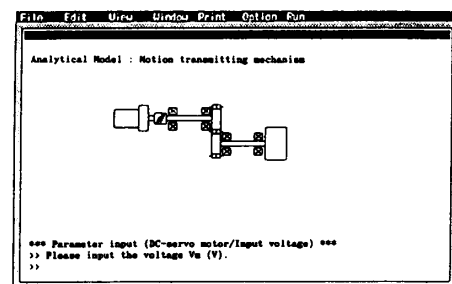


図7 諸元入力画面

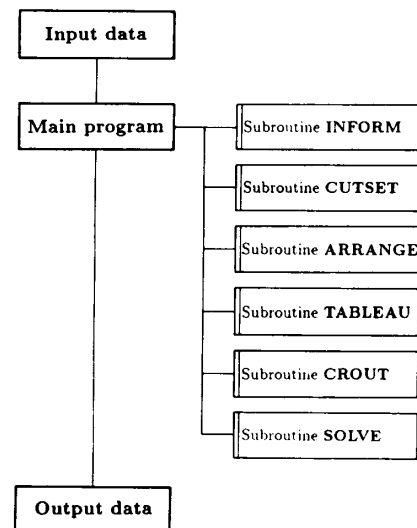


図8 解析プロセッサ部の構成

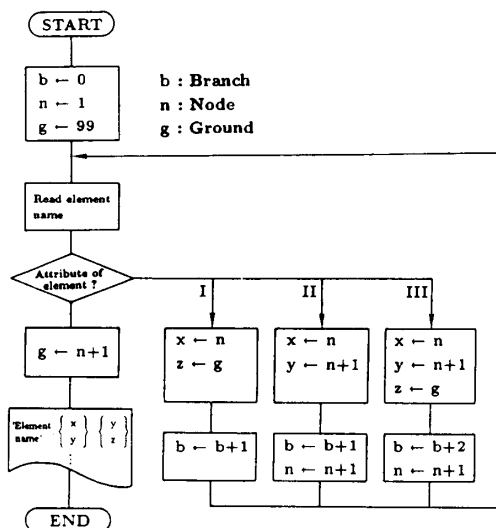


図6 システムグラフの自動作成アルゴリズム

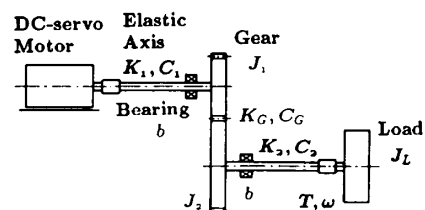


図9 解析モデル

```

8, 15 ... Number of node, branch
VIN, 1, 8 ... Input voltage, node 1, node 8
1, 00, 2, 00, 2, 00, 17, 60 ... Parameter( $i_0, i_1, i_2, V_0$ )
LL, 1, 2 ... Inductor, node 1, node 2
1, 1E-3, 0 ... Parameter( $L, i_0$ )
RL, 2, 3 ... Resistance, node 2, node 3
1, 00
DCMT, 3, 8
1, 000, 5
DCMT, 4, 8
6, 860E-2, 4

GEAR, 5, 8
30, 11, 90, 0
GEAR, 6, 8
40, 10, 90, 0
BEARING, 6, 8
1, 00, 0
AXIS, 6, 7
1, 00E+2, 0
LOAD, 7, 8
9, 825, 0
5, 00, 0, 01 ... Simulation time  $T, \Delta t$ 

```

図 10 入力データ

述べる。本報では、図 9 に示すような減速歯車を有する運動伝達機構を解析モデルとして取り上げる。この解析モデルは、DC モータ、カップリング、軸、軸受、歯車および負荷により構成されており、各構成要素を選択メニューより選択し、それぞれを接続することにより作成される。この構成要素の配置が終了すると、図 6 に示した手順によってシステムグラフが作成され、さらに構成要素の諸元を入力することにより図 10 に示す入力データが作成される。入力データは、図中にも示すように、システムグラフの節点、および枝の数、要素名とその接続状況、各構成要素の諸元、およびシミュレーション時間や刻み時間を表している。このデータをもとに、解析プロセッサにより計算される。図 11 は、図 10 の入力データから負荷の角速度を解析した結果である。

このように、本解析プログラムは構成要素選択メニューにより構成要素を選び出し、配置するだけでシステムグラフの作成および機械システム全体の解析が一貫して行える。また、本方法はグラフ理論を用いることにより機械要素の配置の変更、要素の特性の変更に対して柔軟に対処でき、従来のように個々の要素について運動方程式を立て、それらを連立させて機械システム全体としての運動方程式を作成して数値計算する方法に比べて比較的容易に解析することができる。

5. 結 言

本報では、機械システムの動特性解析をパーソナル・コンピュータ上で自動的に行えるプリ・プロセッ

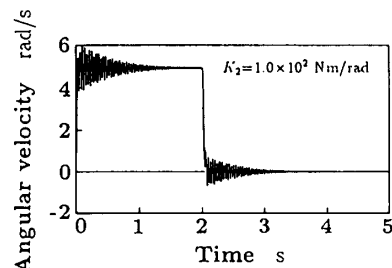


図 11 解析結果 (負荷の角速度)

サ部、解析プロセッサ部およびポスト・プロセッサ部からなるプログラムを開発した。ここで開発したプログラムの主要部についてまとめると以下のようになる。

(1) 機械システムの各構成要素をその機能形態から 3 種類の属性に分類し、おのおのを関数として定義した。

(2) エディタ・ウィンドウ上に機械システムの配置図を作成し、その配置から各構成要素の接続状況を示す位置データを出力し、さらにシステム全体の接続状況を表現するシステムグラフを自動的に作成するプリ・プロセッサ部のプログラムを開発した。

(3) プリ・プロセッサ部で作成された入力データをもとに機械システムの動特性解析をする解析プロセッサ部、およびそれより算出された出力データを CRT 上あるいはプリンタに出力するポスト・プロセッサ部のプログラムを開発した。

(4) 本プログラムにより、減速歯車を有する運動伝達機構について、その構成要素を配置するだけで、簡単に動特性が得られることを示した。

最後に、本研究の一部は平成 2 年度文部省科学研究費補助金 [奨励研究(A)特] の援助を受けたことを付記して謝意を表する。

文 献

- (1) 黒岩・本江・平岡, 機論, 52-484, C(1986), 3214.
- (2) 矢野・矢田, 機論, 50-454, C(1984), 1063.
- (3) Yuan, M. S. C. and Freudenstein, F., *Trans. ASME. J. Eng. Ind.*, 2, (1971), 61.
- (4) 城・鳥原, 精密工学会誌, 54-7(1988), 1272.
- (5) 丸山・藤田, 機論, 53-495, C(1987), 2208.
- (6) 荒巻・藤田, 機論, 54-507, C(1988), 2583.
- (7) 綿貫・丸山・大滝, 機論, 56-526, C(1990), 1570.
- (8) Chua, L. O. and Lin, P. M., *Computer-Aided Analysis of Electronics Circuit, Algorithms & Computational Techniques*, (1975), 131, Prentice-Hall.
- (9) Koenig, H. E. and Blackwell, W. A., *Electromechanical System Theory*, (1972), 11, McGraw-Hill.
- (10) Hachtel, G. D., ほか 2 名, *IEEE Trans.*, CT-18-1, (1971), 101.