



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ロボットの動特性解析システムの研究
Author(s)	高取, 則彦; 嘉数, 侑昇
Citation	北海道大學工學部研究報告, 148, 61-72
Issue Date	1989-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42202
Type	departmental bulletin paper
File Information	148_61-72.pdf



ロボットの動特性解析システムの研究

高取 則彦 嘉数 侑昇

(平成元年 7 月 25 日受理)

A Study on the Analysis System for Dynamic Characteristics of Robots

Norihiko TAKATORI and Yukinori KAKAZU

(Received July 25, 1989)

Abstract

This paper deals with a CAD System for robots. A method is proposed for analyzing the dynamic characteristics of robots. The robot model is assumed to be an open-loop linkage and to have elastic arms and joints. In the proposed method, elastic displacement of the arms is evaluated which is caused by inertia forces as well as loads. The displacement is calculated by FEM (Finite Element Method). The evaluation is proceeded on each arm. Consequently, it is possible to treat the robot which has any degree of freedom. The analysis system is developed which is based on the method. The inputs for the system are geometry data of the arms, linkage data and motion condition which contains angular velocities and angular accelerations given by each joint. The geometry data is assumed to be prepared by CSG (Constructive Solid Geometry) geometric modeller. Examples of the system are shown.

1. ま え が き

CAD/CAM は、急速な進歩をとげ、機械工業の様々な分野に適用されつつある。また、産業用ロボットの発達も目覚ましいものがあり、その設計・製造そのものの自動化への要望も大きいものがある。

産業用ロボットによる作業は、現在高速化・高精度化される傾向にあり、今後もこれは続くものと予想される。作業の精度を上げるには、ロボットの剛性を高める必要があるが、それに伴って重量の増加を招き、高速化の障害になる恐れがある。そのため、必要な剛性を失わずに軽量化を行わなければならない。また、ロボットには、作業中の運動が起振力を生じるという特有の性質がある。これは、作業の高速化・高精度化の上で、重大な問題になる。

現状では、ロボットのこのような性質を把握することは、設計段階では難しく、多くの場合実物のロボットを用いた実験に頼っている。そこで、本研究では、これらロボットの諸特性がシミュレート可能な CAD システムを構築することを目的とする。対象を動特性にしぼり、その解析システムを考える。ロボットは、アームとこれらの間に存在するジョイントとの結合で表されるものとする。アームは、3 次元ソリッドモデルで表現されたものを用いる。

本研究では、このようなロボットモデルの運動中の変形と固有振動数を解析する有限要素法パッケージを開発し、それによる解析実験をコンピュータ上で行った。

2. ロボットのモデリング

2.1 ロボットの機構表現

産業用ロボットは、多関節型と呼ばれているものが多い。多関節型ロボットの機構は、機構学の分類によれば、開ループ・リンク機構に属する。

機構の表現方法は、古くから研究されており、D-H記法がよく知られている。この方法によれば、リンク機構は四つのパラメータによって記述される。いま、一つのリンクはその両端に一つずつジョイントをもつと仮定する。ジョイントの軸間距離を a_i 、ジョイントの軸のなす角を α_i 、ジョイント軸の法線間の距離を d_i 、その法線のなす角を θ_i とする。これらを用いると、リンク機構は、リンクに取り付けた座標系間の関係を表す 4×4 のマトリクスで表される。

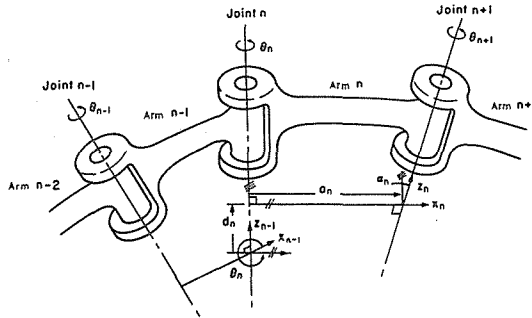


図1 回転型ジョイントのパラメータ¹⁾

ロボットの機構も同様に記述することができる。多関節型ロボットにしばしば用いられる回転型ジョイントの例を示す(図1)¹⁾。

$$[A_i] = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

回転型ジョイントでは、 θ_i が回転角を表し、これがジョイントの変数になる。

2.2 解析のためのロボットモデル

特性を解析するためには、ロボットのもつ様々な物理量を考慮する必要がある。最も基本的な解析用モデルは、機構を表現したモデルに集中質量を付加したものである。このモデルでは、機構によって定められた運動に対して、集中質量が示す特性(駆動力に対する速度・加速度特性など)しか扱えない。したがって、アームの変形などは評価できない。

次に、弾性変形を求めるためにアームを材料力学のはりで表現したモデルが考えられる。しかし、材料力学では形状を単純なものに限っているので、複雑な3次元形状をもつロボットアームに、このモデルを適用することは困難である。

CAD/CAM の分野では、3次元ソリッドモデルという概念が提案されており、実用化が進めら

れている²⁾。これによれば、より実体に近く、かつ複雑な3次元を表現し扱うことができる。本研究で扱うロボットのアームの表現に最適であると考えられる。

以上より、解析に用いるロボットモデルは、3次元ソリッドモデルで表現されたアームと、それらの関係を機構表現マトリクスで記述したジョイントから構成されるものとする。

3. ロボットの特性解析

3.1 部分分割による解析

一端を固定し他端(自由端)に外力が作用している構造物を考える(図2)。これを外力の方向に垂直な面で二つに分けると、この面には図に示すような力が作用しているはずである。したがって、固定端側は、断面の右側つまり自由端側の部分を考慮せずに解析することが可能である。構造物を三つ以上に分けた場合も同様である。

この考えをロボットに応用する。ロボットは一連のアームとジョイントから成ると仮定しているので、分割はジョイント部分でなされるのが自然である。このとき、ジョイントには結合力が作用してつりあっているから、これを考慮して解析を進める。

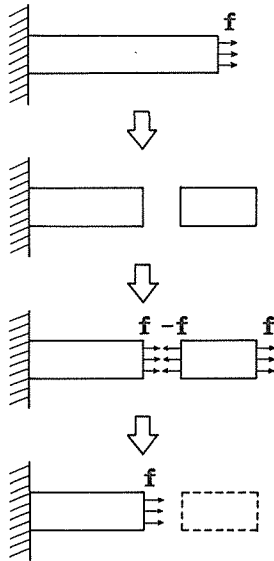


図2 構造物の分割

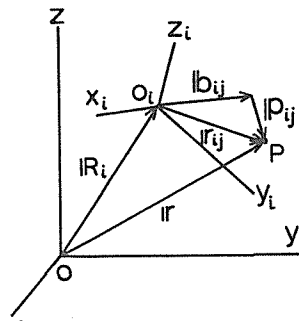


図3 静止座標系と運動座標系

3.2 アーム解析のための定式化

ロボットモデルをアーム単位に有限要素法によって解析するための定式化を行う。アームの微小変位に関する運動方程式をたてるにあたり、アームに固定した座標系に基づいて定式化を進める。

(1) 静止座標系と運動座標系 静止座標系 $oxyz$ と運動座標系 $o_ix_iy_iz_i$ を考える。空間上の任意の点 P を考え、 $oxyz$ と $o_ix_iy_iz_i$ に関する位置ベクトルをそれぞれ r , r_{ij} とする(図3)。静止座標系における、運動座標系の原点 o_i の位置ベクトルを R_i とし、 r_{ij} を $o_ix_iy_iz_i$ での運動成分 p_{ij} と静止成分 b_{ij} とに分けると、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{ij} + \mathbf{R}_i = \mathbf{p}_{ij} + \mathbf{b}_{ij} + \mathbf{R}_i \quad (2)$$

となる。静止座標系での時間微分を‘ $\cdot$ ’，運動反座標系でのそれを‘ d^*/dt ’で表し， $o_i x_i y_i z_i$ の回転角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_i$ として，式(2)を時間に関して微分すると，

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{d^* \mathbf{p}_{ij}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{p}_{ij} + \mathbf{b}_{ij}) + \dot{\mathbf{R}}_i \quad (3)$$

となる。さらに時間で微分して整理すると，

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{d^{*2} \mathbf{p}_{ij}}{dt^2} + \boldsymbol{\omega}_i \times \{\boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{p}_{ij} + \mathbf{b}_{ij})\} + 2\boldsymbol{\omega}_i \times \frac{d^* \mathbf{p}_{ij}}{dt} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times (\mathbf{p}_{ij} + \mathbf{b}_{ij}) + \ddot{\mathbf{R}}_i \quad (4)$$

が得られる。 $\boldsymbol{\omega}_i$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$, $\ddot{\mathbf{R}}_i$ は，それぞれ運動座標系 $o_i x_i y_i z_i$ のもつ角速度ベクトル，角加速度ベクトル，並進加速度ベクトルを意味している。

(2) 有限要素解析のための定式化 運動座標系 $o_i x_i y_i z_i$ をアーム i に固定した座標系とし， $\mathbf{r}_{ij}$ をアーム i の要素 j 内の点の位置ベクトル， $\mathbf{p}_{ij}$ をその点の変位ベクトルとみなす。有限要素内部の変位は，その要素の節点変位ベクトル $\mathbf{q}_{ij}$ と形状関数マトリクス $[\mathbf{N}]$ を用いることによって，次のように記述される³⁾。

$$\mathbf{p}_{ij} = [\mathbf{N}] \mathbf{q}_{ij} \quad (5)$$

また，ひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ ，応力ベクトル $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ も $\mathbf{q}_{ij}$ を用いて次のように表される³⁾。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = [\mathbf{B}] \mathbf{q}_{ij}, \quad \boldsymbol{\sigma}_{ij} = [\mathbf{D}] \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] \mathbf{q}_{ij} \quad (6)$$

ここで，密度を ρ ，単位体積あたりの外力を $\mathbf{f}_{ij}$ とし，仮想変位 $\delta \mathbf{p}_{ij}$ とそれに伴う仮想ひずみ $\delta \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ を導入すると，仮想仕事の原理より，次式が得られる。

$$\int_{V_j} \delta \mathbf{p}_{ij}^T \cdot \rho \dot{\mathbf{r}} dV + \int_{V_j} \delta \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^T \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ij} dV = \int_{V_j} \delta \mathbf{p}_{ij}^T \cdot \mathbf{f}_{ij} dV \quad (7)$$

これは，式(5)，(6)より，次のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{V_j} \delta \mathbf{q}_{ij}^T [\mathbf{N}]^T \cdot \rho \ddot{\mathbf{r}} dV + \int_{V_j} \delta \mathbf{q}_{ij}^T [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] \mathbf{q}_{ij} dV = \int_{V_j} \delta \mathbf{q}_{ij}^T [\mathbf{N}]^T \cdot \mathbf{f}_{ij} dV \\ & \therefore \rho \int_{V_j} [\mathbf{N}]^T \ddot{\mathbf{r}} dV + \int_{V_j} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] \mathbf{q}_{ij} dV = \int_{V_j} [\mathbf{N}]^T \mathbf{f}_{ij} dV \end{aligned} \quad (8)$$

また， $\ddot{\mathbf{r}}$ は式(4)，(5)より，

$$\ddot{\mathbf{r}} = [\mathbf{N}] \frac{d^{*2} \mathbf{q}_{ij}}{dt^2} + \boldsymbol{\omega}_i \times \{\boldsymbol{\omega}_i \times ([\mathbf{N}] \mathbf{q}_{ij} + \mathbf{b}_{ij})\} + 2\boldsymbol{\omega}_i \times ([\mathbf{N}] \frac{d^* \mathbf{q}_{ij}}{dt}) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times ([\mathbf{N}] \mathbf{q}_{ij} + \mathbf{b}_{ij}) + \ddot{\mathbf{R}}_i \quad (9)$$

と表されるから，式(8)に代入して整理すると，

$$[\mathbf{M}_{ij}] \frac{d^{*2} \mathbf{q}_{ij}}{dt^2} + [\mathbf{G}_{ij}] \frac{d^* \mathbf{q}_{ij}}{dt} + [\mathbf{K}_{ij}] \mathbf{q}_{ij} = \mathbf{F}_{ij} \quad (10)$$

を得る。ただし，各係数マトリクスは，次のとおりである。

$$[\mathbf{M}_{ij}] = \rho \int_{V_j} [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dV \quad (11)$$

$$[\mathbf{G}_{ij}] = 2\rho \int_{V_j} [\mathbf{N}]^T [\boldsymbol{\omega}_i] [\mathbf{N}] dV \quad (12)$$

$$[K_{ij}] = \int_{V_j} [B]^T [D] [B] dV + \rho \int_{V_j} [N]^T [\omega_i]^2 [N] dV + \rho \int_{V_j} [N]^T [\dot{\omega}_i] [N] dV \quad (13)$$

$$F_{ij} = \int_{V_j} [N]^T f_{ij} dV - \rho \int_{V_j} [N]^T [\omega_i]^2 b_{ij} dV - \rho \int_{V_j} [N]^T [\dot{\omega}_i] b_{ij} dV - \rho \int_{V_j} [N]^T \ddot{R}_i dV \quad (14)$$

$\omega_i = [\omega_{i1} \ \omega_{i2} \ \omega_{i3}]^T$, $\dot{\omega}_i = [\dot{\omega}_{i1} \ \dot{\omega}_{i2} \ \dot{\omega}_{i3}]^T$ に関して,

$$[\omega_i] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{i3} & \omega_{i2} \\ \omega_{i3} & 0 & -\omega_{i1} \\ -\omega_{i2} & \omega_{i1} & 0 \end{bmatrix}, \quad [\dot{\omega}_i] = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_{i3} & \dot{\omega}_{i2} \\ \dot{\omega}_{i3} & 0 & -\dot{\omega}_{i1} \\ -\dot{\omega}_{i2} & \dot{\omega}_{i1} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

である。式(11)~(14)は、それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクス、外力ベクトルを表す。この減衰マトリクスは、構造減衰や粘性減衰は含んでおらず、コリオリの力による影響のみから成り立っている。式(13)の右辺第2, 3項はそれぞれ遠心力、回転の加速による等価剛性を表している。式(14)の右辺第2~4項はそれぞれ遠心力、回転の加速による力、直進力である。

式(10)は要素に関する方程式であるから、各要素について計算し、全体系のマトリクスに重ね合せて、アーム i の弾性変形に関する運動方程式を得る。

$$[M_i] \frac{d^{*2} q_i}{dt^2} + [G_i] \frac{d^* q_i}{dt} + [K_i] q_i = F_i \quad (16)$$

$$[M_i] = \sum_j [M_{ij}], \quad [G_i] = \sum_j [G_{ij}], \quad [K_i] = \sum_j [K_{ij}], \quad F_i = \sum_j F_{ij} \quad (17)$$

ここで、記号 ' $\sum$ ' は、要素マトリクスの全体系への重ね合せを意味するものとする。

(3) アームの速度・加速度の計算

式(16)の係数を計算するためには、アームに固定した運動座標系がもつ角速度ベクトル ω 、角加速度ベクトル $\dot{\omega}$ 、並進加速度ベクトル $\ddot{R}$ を決定する必要がある。ここでは、回転型ジョイントに関して、これらの決定法を考える。

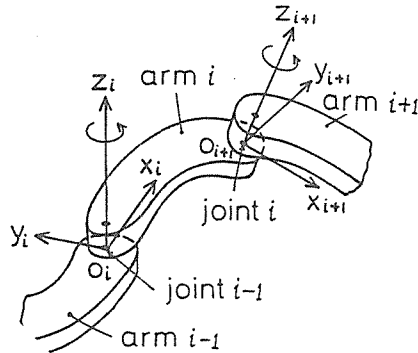


図4 アーム座標系

アームに固定した座標系（アーム座標系）を図4に示すように設定する。すなわち、アーム i 座標系は、原点 o_i をアーム $i-1$ との結合節点にとり、 z_i 軸を回転軸に一致するように定める。いま、アーム i に関して、 ω_i 、 $\dot{\omega}_i$ 、 $\ddot{R}_i$ が与えられている場合を考える。このとき、アーム $i+1$ 座標系の角速度ベクトル ω_{i+1} と角加速度ベクトル $\dot{\omega}_{i+1}$ は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\omega}_{i+1} = \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{z}_{i+1} \dot{\theta}_{i+1} \quad (18)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \mathbf{z}_{i+1} \ddot{\theta}_{i+1} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{z}_{i+1} \dot{\theta}_{i+1}) \quad (19)$$

ここで、 $\dot{\theta}_{i+1}$ 、 $\ddot{\theta}_{i+1}$ はそれぞれジョイント $i+1$ の角速度、角加速度であり、 $\mathbf{z}_{i+1}$ は z_{i+1} 軸方向の単位ベクトルを表す。並進加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{R}}_{i+1}$ は、 o_i から o_{i+1} へのベクトルを $\mathbf{a}_{i+1}$ とすると、

$$\ddot{\mathbf{R}}_{i+1} = \frac{d^* \mathbf{a}_{i+1}}{dt^2} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{a}_{i+1} + 2\boldsymbol{\omega}_i \times \frac{d^* \mathbf{a}_{i+1}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{a}_{i+1}) + \ddot{\mathbf{R}}_i \quad (20)$$

である。 $\mathbf{a}_{i+1}$ のアーム座標系における時間微分は、

$$\frac{d^* \mathbf{a}_{i+1}}{dt} = \mathbf{z}_i \dot{\theta}_i \times \mathbf{a}_{i+1}, \quad \frac{d^* \mathbf{a}_{i+1}}{dt^2} = \mathbf{z}_i \ddot{\theta}_i \times \mathbf{a}_{i+1} + \mathbf{z}_i \dot{\theta}_i \times (\mathbf{z}_i \dot{\theta}_i \times \mathbf{a}_{i+1}) \quad (21)$$

であるから、式(20)は、

$$\ddot{\mathbf{R}}_{i+1} = \mathbf{z}_i \ddot{\theta}_i \times \mathbf{a}_{i+1} + (\mathbf{z}_i \dot{\theta}_i + 2\boldsymbol{\omega}_i) \times (\mathbf{z}_i \dot{\theta}_i \times \mathbf{a}_{i+1}) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{a}_{i+1} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{a}_{i+1}) + \ddot{\mathbf{R}}_i \quad (22)$$

となる。以上より、 $\boldsymbol{\omega}_i$ 、 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 、 $\ddot{\mathbf{R}}_i$ は式(18)、(19)、(22)の漸化式で与えられ、基礎から先端のアームへ向かって順に計算される。ロボットを構成するアームの個数を L とすると、式(18)~(22)において、

$$\left. \begin{aligned} i &= 0, 1, \dots, L-1 \\ \boldsymbol{\omega}_0 &= [0 \ 0 \ 0]^T, \quad \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T, \quad \ddot{\mathbf{R}}_0 = [0 \ 0 \ g]^T \ (g: \text{重力加速度}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

である。

(4)アームの境界条件 アーム i の方程式を解くとき、適当な境界条件を与える必要がある。アーム i には、アーム $i-1$ と $i+1$ の両方との結合が作用している。このとき、アーム $i-1$ との結合部分を拘束し、アーム $i+1$ 以降のみを考えると、アーム $i-1$ との結合力は無視して扱うことができる。

アーム i には、剛体変位を妨げるように拘束を与えなければならないので、ここではアーム i 座標系の原点 o_i を通り長手方向に垂直な面を考え、その面上の節点を拘束することにする。このように拘束を与えた後、節点変位を計算すると、拘束した節点に関しては反力が得られる。これをアーム $i-1$ との結合力と考える。アーム i の解析のときには、アーム $i+1$ との結合力 $\mathbf{f}_{C_{i+1}}$ を考慮する必要があるから、式(16)の右辺にこれを加えて、

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{f}_{C_{i+1}} \quad (24)$$

として計算を進める。ロボットの最先端のアームには、その先にアームは存在しないから、結合力は作用しない。つまり、 $i=L$ のとき、

$$\mathbf{f}_{C_{i+1}} = \mathbf{f}_{C_{L+1}} = 0 \quad (25)$$

である。以上より、解析は結合力を含めて、先端から基礎に向かって進められる。

3.3 ジョイントの定式化

一般に、ジョイントの構造は複雑でモデル化が困難である。ここでは、対象を回転型ジョイントに限り、軸要素で表し軸回りのねじりのみを考えることにする。軸のねじり角 ϕ は、ねじりモーメント T により、次式で計算される。

$$\phi = \frac{l}{GJ} T \quad (26)$$

普通，円形断面の軸を用いるから，

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (27)$$

である。 l は軸長， d は軸径， G は剛性率を表す。

4. 特性解析システムの構築

4.1 構築の方針

前章の定式化に基づき，解析システムを構築する。この方法によれば，アームの個数には特に制限がなくなり，任意自由度のロボットを扱うことが可能になる。

アームの複雑な 3 次元形状を扱うために，3 次元形状モデラによって形状データを作成するものとする。ここでは，定義の容易さ，モジュール化のしやすさなどの理由から，CSG 構造の形状モデラの利用を前提とし，CSG ソリッドモデル表現されたアームを用いる。

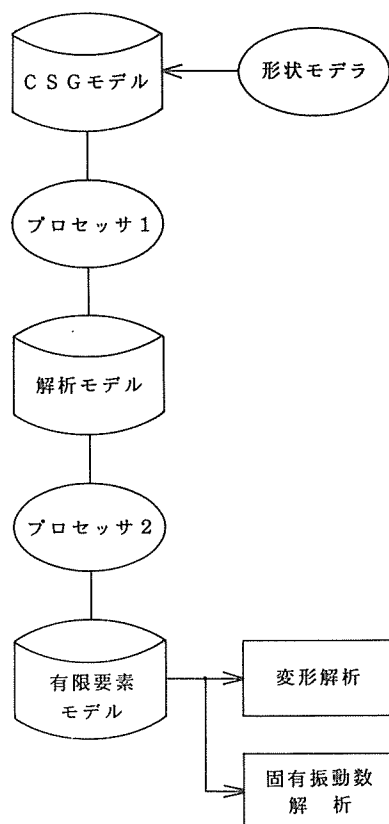


図5 システム構成

4.2 システムの構築

図5 にシステム構成を示す。形状モデラにより，アームの形状モデルが定義される。CSG 構造

を仮定しているの、これを CSG モデルと呼ぶ。CSG モデルは、構造定義データに基づき、プロセッサ 1 によって解析用のモデルに変換される。構造定義データは、機構記述パラメータに相当する情報とアームどうしの結合に関する情報から成る。これらの情報を付加することにより、CSG モデルは、運動を表現できるモデルになる。さらに、これから有限要素解析のために、有限要素モデルが作成される。

現在のところ、プロセッサ 1, 2 は研究中である。本研究では、運動中の変形解析と固有振動数解析の有限要素解析パッケージを開発した。

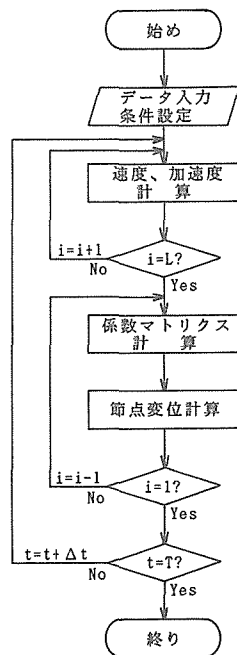


図 6 変形解析の手順

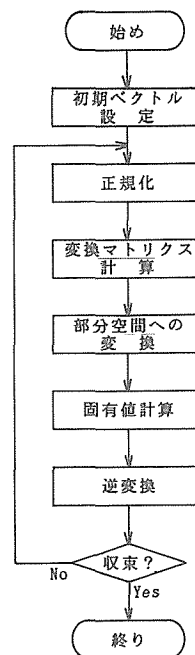


図 7 固有振動数解析の手順

(1)変形解析 節点変位の計算手順を図 6 に示す。有限要素データ、ジョイントの角速度、角加速度、解析する作業時間と時間ステップ、荷重の有無を入力データとする。それから、 ω_i , $\dot{\omega}_i$, $\ddot{R}_i$ を基礎から先端のアームに向かって計算する。次に、式(17)のマトリクス、ベクトルを先端のアームから基礎に向かって計算し、結合力を考慮して節点変位を求める。微分方程式の解法には、ウィルソンの θ 法を用いる。

物体を把持している場合は、ハンド部分に相当する節点に、物体の質量を付加して解析する。

(2)固有振動数解析 本システムの固有振動数計算は、サブスペース法による⁴⁾。図 7 に計算手順を示す。全体系の大きなマトリクスを扱うのを避けるため、変換マトリクス計算と部分空間への変換におけるマトリクスの乗算は、アーム単位に行っている。

5. 計算機実験

5.1 実験 1

本システムにより、図 8 の 6 自由度ロボットモデルを解析した。アームの材質はジュラルミン

を想定し、ヤング率 $7.15 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比 0.335、密度 $2.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた。このロボットの有限要素モデルを図 9 に示す。これには、20 節点六面体要素を用いている。各ジョイントに、図 10 に示した角速度、角加速度を与えたときの特性を解析した。

無負荷のとき節点変位の時間変化を図 11 に示す。これは、アーム 6 の先端の節点の場合である。ロボットの姿勢や作用している力の大きさが時間とともに変化するため、変位の変化は図のように複雑な形になったと考えられる。時刻 0 のとき、変位は 0 になっていないが、これは自重による静的なたわみを表している。

図 12 は、アーム 6 先端の節点における変位の、荷重の違いによる影響を示している。ここでは、 x 成分のみを比較した。負荷 2 kg のときの変形状態を図 13 に示す。時刻は 0.2 秒で、節点の弾性変位を 2 倍にして表している。アーム 2 のフィン状部分の変形が、全体に大きく影響を及ぼしている様子がわかる。図中の実線はアームを弾性体とみなした場合、破線は剛体とみなした場合である。

また、このモデルの固有振動数解析の結果、918Hz、925Hz、1324Hz という値が得られた。

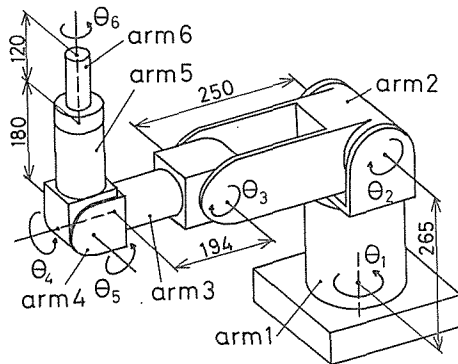


図 8 6 自由度ロボットモデル

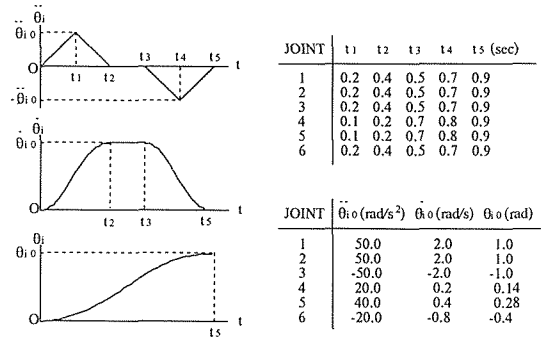


図 10 運動条件

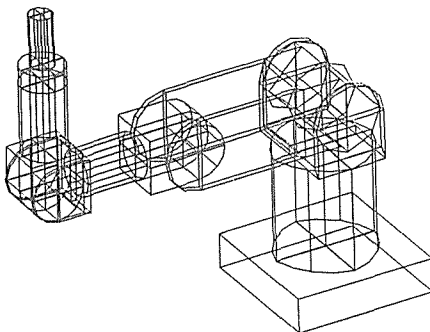


図 9 有限要素モデル

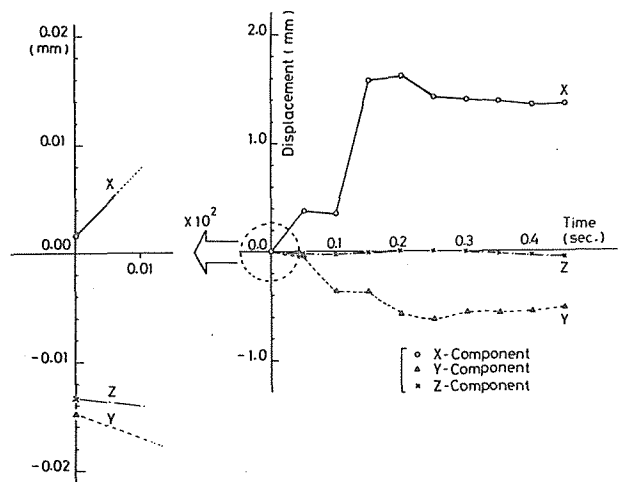


図 11 時間一変位曲線(1)

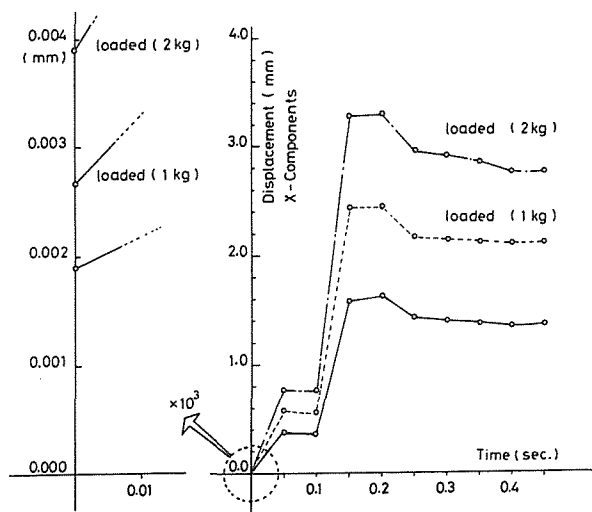


図 12 時間変位曲線(2)

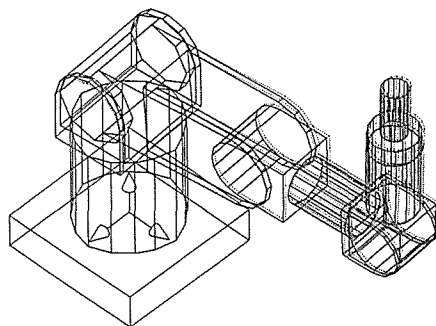


図 13 変形状態

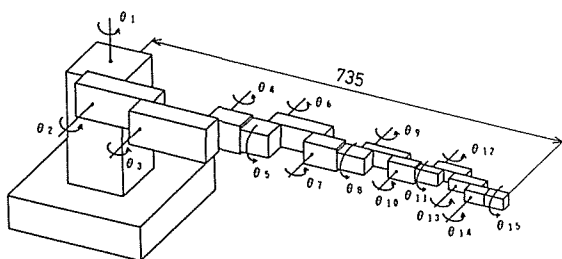


図 14 15 自由度ロボットモデル

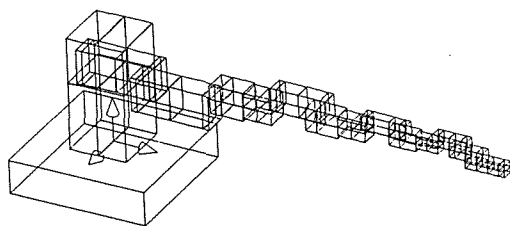
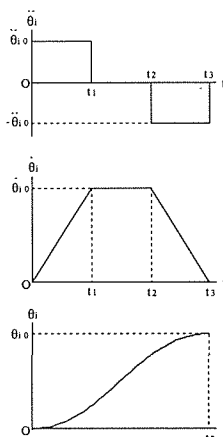


図 15 有限要素モデル



JOINT	t1	t2	t3 (sec)
1	0.5	0.5	1.0
2	0.5	0.5	1.0
3	0.5	0.5	1.0
4	0.5	0.5	1.0
5	0.4	0.6	1.0
6	0.4	0.6	1.0
7	0.4	0.6	1.0
8	0.3	0.7	1.0
9	0.3	0.7	1.0
10	0.3	0.7	1.0
11	0.25	0.75	1.0
12	0.25	0.75	1.0
13	0.25	0.75	1.0
14	0.2	0.8	1.0
15	0.2	0.8	1.0

JOINT	$\dot{\theta}_1$ (rad/s)	$\dot{\theta}_2$ (rad/s)	$\dot{\theta}_3$ (rad)
1	6.28	3.14	1.57
2	2.09	1.05	0.52
3	2.09	1.05	0.52
4	-2.09	-1.05	-0.52
5	2.18	0.87	0.52
6	-2.18	-0.87	-0.52
7	2.18	0.87	0.52
8	2.49	0.75	0.52
9	2.49	0.75	0.52
10	-2.49	-0.75	-0.52
11	2.79	0.70	0.52
12	2.79	0.70	0.52
13	2.79	0.70	0.52
14	3.27	0.65	0.52
15	4.91	0.98	0.79

図 16 運動条件

5.2 実験 2

より多くの自由度をもつロボットの解析結果を示す。図 14 は、15 自由度のロボットモデルである。有限要素モデルを図 15 に示す。このモデルに、図 16 のように運動条件を与えて解析した。材質は、実験 1 と同様、ジュラルミンと仮定した。

図 17 は、無負荷のときのアーム 15 先端の弾性変位の時間的変化を表す。この条件で時刻 0.35 秒の変形状態を図 18 に示す。図 19 は、荷重 1 kg を与えた場合との比較を示している。

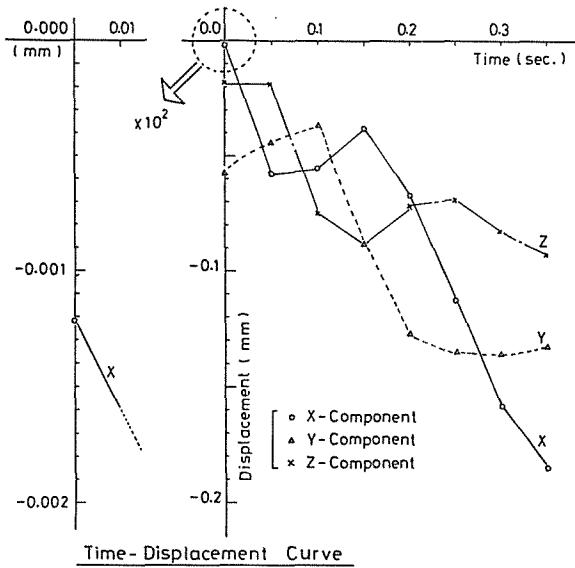


図 17 時間一変位曲線(1)

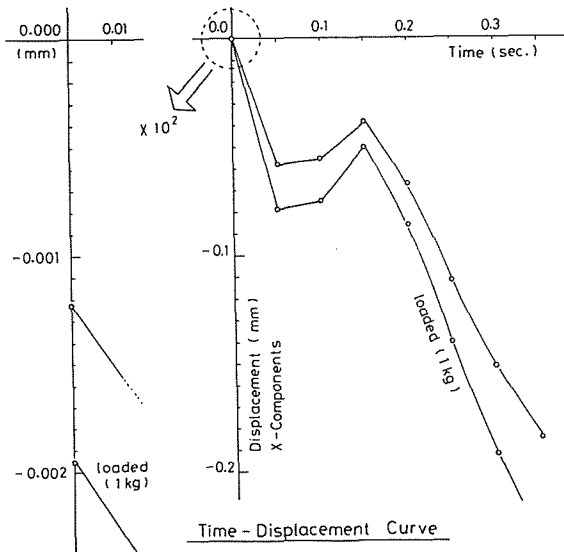


図 19 時間一変位曲線(2)

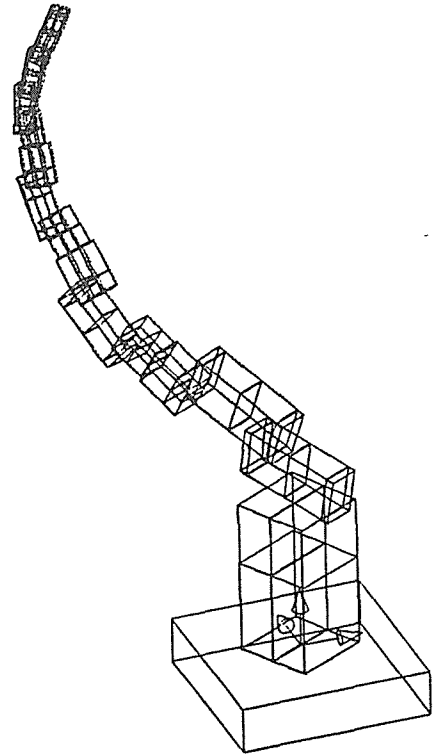


図 18 変形状態

6. 考 察

(1)システム全体について 本システムでは、アームの形状情報とロボットの構造情報とを可能な限り分離して扱い、アーム単位に解析を進めている。そのため、ロボットの機種や構造には全く制約されず、任意自由度のモデルが扱えるようになっている。この点で、本システムは高い汎用性をもつといえよう。

現在のところ、回転型ジョイントしか扱っていないが、適用範囲を広げるために直動型ジョイント程度は利用できるようにするべきである。

(2)アームのモデルについて アームは、一様なソリッド物体として扱ってきた。しかし、実際には、厚板をボルトなどで締結して組み上げている場合も多い。ボルト締結部などのように、境界面や接触面の効果が無視できない箇所では、極めて多くのファクターが関係をもっている。これらは、動特性に影響を及ぼすことが知られている。より精密な解析を行う場合、これらを十分に考慮したモデル化が必要である。

(3)ジョイントのモデルについて ここでは、ジョイントを簡単な軸要素でモデル化し、軸回りのねじりのみを考慮してきた。普通、ジョイント部にはベアリングなどが存在するため、これらの特性も考慮する必要がある。ベアリングには、がたや接触部といった非線性があるため、モデル化には困難が伴う。今後の研究が待たれる。

(4)固有振動数解析について 本システムによる固有振動数解析では、一般にかなり高い振動数が得られる。その主な原因は、ジョイント部分にあると考えている。実際のロボットでは、ジョイントの影響で低い固有振動数が現れているが、本システムでは、軸要素のみで近似しさらに拘束を与えているので、実物より剛性の高い系が構成されるためと考えている。

7. あとがき

本研究では、ロボットの動特性解析システムを扱った。結論として、以下のことがいえる。

- (1)本研究では、ロボットの動特性解析システムのうち、有限要素解析用パッケージを開発した。
- (2)解析の対象として、運動中の変形と固有振動数の計算を扱った。
- (3)解析の際、アーム単位に処理する方法を提案し、そのための定式化を行った。
- (4)その結果、アームの個数、ジョイントの個数には制限がなく、任意の自由度をもつロボットモデルの解析が可能になった。
- (5)ジョイントのモデリングには、まだ改良すべき点があり、今後の課題となろう。

参考文献

- 1) Paul, R. P.: Robot Manipulators — Mathematics, Programming, and Control —, MIT Press, 1982
- 2) 沖野：自動設計の方法論，養賢堂，1982
- 3) リブスレー，R. K. (神谷訳)：エンジニアのための入門有限要素法，サイエンス社，1984
- 4) 戸川：有限要素法による振動解析，サイエンス社，1975
- 5) 道村，長松他：日本機械学会論文集 (C)，50，449, (1984), pp. 72—80
- 6) Sunada, W. H. and Dubowsky, S.: ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 105, Mar. (1983), pp. 44—51
- 7) Sunada, W. H. and Dubowsky, S.: ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 103, Jul. (1981), pp. 643—651
- 8) Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P. C.: ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, Jun. (1980), pp. 69—76
- 9) 高取，嘉数，沖野：精機学会昭和 59 年度北海道支部講演論文集，(1984)，pp. 76—78
- 10) 高取，嘉数，沖野：昭和 60 年度精機学会春季大会講演論文集，(1985)，pp. 535—538