オブジェクト指向言語を用いた多体柔軟構造物の運動方程式導出システム^{*1}Formulation System of Equations of Motion for Multibody Flexible Structures
by Using Object-Oriented Language藤 井 裕 矩^{*2}・武 田 重 之^{*2}

Hironori FUJII and Shigeyuki TAKEDA

Key Words: Large Space Structures, Structural Analysis, Object-Oriented Analysis

Abstract

Equations of motion for such multibody flexible structures as space structures containing a large number of degree of freedom is formulated by using a system written in a Object-Oriented language C++. This paper aims to achieve the following two accomplishment: The first is a general formulation of the equations of motion for multibody flexible structures applying the extended Hamilton's principle; The second is the development of the system for the formulation and the multibody structures are analyzed by utilizing the approach of Object-Oriented analysis. The developed system constitutes a mathematical simulation program for dynamical system and is formatted in C/C++ or Mathematica or Matlab.

1. は じ め に

近年のコンピュータの発達に伴って、連続系の離散化手法や数値計算法が数多く考案され、柔軟構造物の振動解析などの大規模な数値計算も、比較的容易に行うことができるようになった。しかし、人間のコンピュータに対する要求は留まるところがなく、より大規模な計算をさせようとしたり、より簡易な操作で直観的な出力を求めたり、と限りなくコンピュータを利用しようとする傾向がある。このようにコンピュータは、研究・開発において必然的なものとなってきている。

オブジェクト指向という言葉が現れて約20年になるが¹⁾、計算機の発達に伴い、近年ようやくコンピュータにそのコンセプトを導入できるようになった。オブジェクト指向の根本の思想は、問題領域の自然なモデル化であって、これは人間の直観的な発想と直接に結び付き、問題解決にあたって非常に有効となる手法の一つである。パーソナルコンピュータの世界では、

アップルコンピュータ社の製品であるマッキントッシュがオブジェクト指向を取り入れた直視覚的なコンピュータ環境を提供し、オブジェクト指向概念の先駆者となった。また最近では、マイクロソフト社のMS-Windowsの爆発的な普及により、ほとんどすべてのコンピュータに対して、直視覚的な環境が実現され、多くのユーザーにオブジェクト指向の概念を浸透させるのに貢献した。これらの実例は、繁雑なコンピュータ操作をオブジェクト指向的な環境を用いることで、容易なものとしている。

一方で、コンピュータプログラミングの世界でもオブジェクト指向を取り入れた開発環境は発達した。これは表面の操作環境だけでなく、開発環境からオブジェクト指向を取り入れることで、プログラムの開発効率、再利用性などを高める働きを持つようになった。現存する開発言語にはC++¹⁾やSmalltalk²⁾などのオブジェクト指向言語が有名で、ワークステーションはもちろん、PC上でのアプリケーション開発も十分可能となってきている。

このようにオブジェクト指向応用の分野は、コンピュータの領域には留まらず、工学、医学、生物学、経営学、管理工学など、未だに応用範囲は拡がり続け、実例報告は絶えない。

本研究では、比較的解析が複雑な多体柔軟構造物の動的解析を対象に、その運動方程式導出にあたって、オブジェクト指向言語を用いたシステム開発を試みたので報告する。

多体柔軟構造物は、一般に自由度が多く大規模な運動方程式を必要とする。通常、静的な解析においては、市販されている有限要素法を利用した解析プログラムが多く用いられている。一方で、三木³⁾はトラス構造物の静的解析問題を対象に、見事にオブジェクト指向を取り入れたシミュレータの開発に成功している。しかし、動的解析になると振動解析を除いて、汎

^{*1} 平成6年3月29日原稿受理^{*2} 東京都立科学技術大学

用プログラムがほとんど存在せず、各自が運動方程式を導出して、数値シミュレーションを行う以外にない。Muratsu 他⁴⁾が実施したようなロボットアームの解析などは、特に柔軟な腕を持つ場合、複雑な運動方程式の導出が前提となり、解析以外に時間が多く費やされる。

また、一度汎用の計算プログラムを開発したとしても、オブジェクト指向言語を用いないシステムであると開発効率、計算機資源の再利用性もほとんど期待できず、将来の拡張も望むことはできないであろう。

本論文では、第一に、複数の部材によって構成される大型宇宙構造物のような多体柔軟構造物の運動方程式導出過程の定式化を拡張ハミルトン原理を用いて行い、部材が構造物に拡張される過程において、いかにして運動方程式が構成されるのかを調査した。第二に、多体柔軟構造物をオブジェクト指向言語を用いて運動方程式導出システムに実装した。ここでは、多体構造物の部材の種類や接合方法の観点から、自然で人間に直観的なモデル化を検討した。第三に、運動方程式導出システム開発にあたって適用した、多体構造物を認識するアルゴリズムについて検討した。システムの自動化により、ユーザーの負担を軽減することを目的に、多体構造物の入力やシミュレータに利用される出力がより直観的なものであることに努めた。そして最後に、本システムによって得られる運動方程式の適用例を挙げ、その有用性を証明した。

2. 運動方程式導出の定式化

2.1 多体柔軟構造物の定義 本論文で取り扱う多体柔軟構造物のモデルを一例として第1図に示す。本論文では、暫定的な運動方程式導出システムの開発にあたり、導出されたモデルがシミュレータ実装に適当であり、かつ取り扱いが比較的容易であることが望ましいため、取り扱う多体柔軟構造物モデルについて、次に挙げる3つの仮定を設けた。

1) 2次元空間モデルであること。3次元モデルへの対応は今後の検討課題とする。

2) 剛体および柔軟体の2種類の部材により構成されること。部材はそれぞれが慣性空間での座標パラメータを有し、2次元空間では水平位置座標 ($:=x$)^{*3)}、垂直位置座標 ($:=y$) および姿勢角 ($:=\theta$) の3つのパラメータがそれに該当する。剛体は、部材重量 ($:=m$) および部材慣性モーメント ($:=I_a$) を物理特性パラメータとして持ち、任意形状かつ、部材上任意の位置で他部材と接合出来るものとする。柔軟体

第1図 多体柔軟構造物を構成する剛体(a)および柔軟体(b)

は、オイラー・ベルヌーイ梁を仮定し、材料密度 ($:=\rho$)、梁断面積 ($:=A$)、梁ヤング率 ($:=E$)、梁断面二次モーメント ($:=I_s$) および梁長さ ($:=L$) を物理特性パラメータとして持ち、梁の両端のみで他部材と接合可能とする。

3) 接合方法はピン接合および固定接合の2種類によること。また1箇所の接合部では、任意数の部材がこれら2つの接合方法を任意の組み合わせで実現することができるものとする。

2.2 拡張ハミルトン原理⁵⁾の適用 運動方程式の導出には、物体のもつ作用積分の変分を用いて極値問題を設定し、運動方程式を導出する拡張ハミルトン原理を適用した。拡張ハミルトン原理から得られるラグランジュ方程式を用いた導出方法は、他の論文にも多く見られる。最近では Lee と Junkins⁶⁾ によって、ラグランジュ方程式を使った、本体固定柔軟アームの運動方程式の一般的な定式化についての報告がある。特に柔軟体の扱いが重要であって、Fujii 他⁷⁾ や Junkins 他⁸⁾ が扱っているスルーマヌーバーモデルでは、偏微分方程式で表される運動方程式を導出しており、これは、柔軟体を最も厳密に定式化できるためである。これらの理由で、拡張ハミルトン原理の適用は、ユーザーが運動方程式を利用する場合に要求される、運動方程式の厳密性を備えた最適の導出方法であると考えられる。

ここで、多体柔軟構造物の運動方程式導出知識の基本となる、単部材の運動方程式を導出した場合、剛体および柔軟体である部材 (i) について、それぞれ式(1)および式(2)を得る。

$$\int_0^t \{m_i \delta \dot{X}_i^T \dot{X}_i + I_{ai} \delta \theta_i \dot{\theta}_i\} dt = 0 \quad (1)$$

$$\int_0^t \left\{ \int_{L_i} \left[E_j I_{sj} \delta V_j^T V_j'''' + \rho_j A_j \left(\delta \dot{X}_j^T \ddot{Z}_j + \delta \theta_j V_j^T \frac{\partial C_j^T}{\partial \theta_j} \ddot{Z}_j + \delta V_j^T C_j^T \ddot{Z}_j \right) \right] du_j \right\} dt = 0 \quad (2)$$

*3) ここで、($:=x$)は、例えば、 x で水平位置を表現することを示す。

ただし, $i=1, \dots, N$.

ここで, $m_i, I_{ai}, \rho_i, A_i, E_i, I_{si}$ および L_i はそれぞれ, 部材重量, 慣性モーメント, 部材密度, 梁断面積, 梁ヤング率, 梁断面二次モーメントおよび梁長さを表し, また, Z_i, X_i, C_i および V_i はそれぞれ慣性空間座標ベクトル, 並進座標ベクトル, 姿勢角行列および部材上局所座標ベクトルを表し, さらに $Z_i = X_i + C_i V_i$ の関係を満たしている. また, $(\dot{})$ は時間微分, $()'$ は空間微分を表す. ここでは, 簡単化のため, 制御入力については省略する.

2.3 構造物の運動方程式(1) 2つ以上の部材が接合して構造物を構成する場合, それぞれの接合部の慣性座標が等しいという関係から, 拘束式が生じる. つまり一方の座標変数により他方の座標が表現できることから, 構造物全体の自由度が減少する. ここでは, 本論文で取り扱う2種類の接合方法のそれぞれに対して検証する.

最も簡単な構造物として, 柔軟部材(i)の右端および柔軟部材($i+1$)の左端が接合して構成された構造物の場合, 接合による拘束式として次式を得る.

$$Z_{i+1|L} = Z_{i|R} \quad (3)$$

ここで, $Z_{i+1|L}$ および $Z_{i|R}$ はそれぞれ, 柔軟部材(i)右端の慣性座標および柔軟部材($i+1$)左端の慣性座標を表す. このときの拘束式として, ピン接合および固定接合の場合についてそれぞれ次のように, 式(4)および式(5)を得る.

$$X_{i+1} = X_i + C_i V_{i|L} - C_{i+1} V_{i+1|R} \quad (4)$$

$$X_{i+1} = X_i + C_i (V_{i|L} - C_{i+1} V_{i+1|R}) \quad (5)$$

ここで, 定数である $V_{i|L}$ および $V_{i+1|R}$ はそれぞれ部材(i)の左端局所座標および部材($i+1$)の右端局所座標を表し, 同じく定数である C_{i+1} は部材(i)に対する部材($i+1$)の相対姿勢角行列で, $C_{i+1} = C_i C_{i+1}$ の関係を満たす. 両式共に, 部材($i+1$)の並進座標 X_{i+1} をその他の座標パラメータで表すことで, 2次元慣性空間では自由度が2個減少することが分かる. また式(5)の固定接合の場合の拘束式では, 部材($i+1$)の慣性空間姿勢角行列 C_{i+1} を部材(i)の慣性空間姿勢角項 C_i で表すことで, さらに自由度が1個減少する.

2.4 構造物の運動方程式(2) 構造物を構成する部材が3つ以上である場合, 部材がループを構成する場合が考えられる. ここでは部材として部材(1), 部材(2), 部材(3)を構成要素とした第2図のような例を取り上げる. この場合, 2.3節の手順で3つの拘束式が得られる. さらにそれら3つの式を組み合わせると, 次式のような拘束式を得る.

$$C_1(V_{1|L} - V_{1|R}) + C_2(V_{2|L} - V_{2|R}) + C_3(V_{3|L} - V_{3|R})$$

第2図 ループを構成する部材

$$= 0 \quad (6)$$

つまり, それぞれの姿勢角行列が互いに拘束し合い, ループを構成する部材の1つの姿勢角行列 (例えば C_1) をその他のループ構成部材の姿勢角行列 (C_2, C_3) によって表すことができる. この性質は3部材ループの場合に限らず, 任意数で構成されるループでも同様で, 通常1ループにつき1自由度減少することが, 式(6)から容易に推測できる.

また2つのループが隣接している場合, それぞれの拘束式が得られる. そして連立方程式を解くことによって, 2つの姿勢角行列を他の部材によって表すことが出来, これより2自由度が減少する.

ここで注意することは, 冗長な拘束式を得た場合には, 必要十分な式を選択しなくてはならない. この選択についての判断に関して, 今後実装を検討する必要がある.

3. オブジェクト指向言語 C++ の適用

3.1 オブジェクト指向言語の特徴 近年オブジェクト指向を用いた研究が多くの研究者によってなされ, その有用性が示されてきた. 最近では三木³⁾により, トラス構造物をオブジェクト指向言語でモデル化し, 静的特性を解析するシミュレータの開発に成功している.

オブジェクト指向を用いた解析法は, 問題を細分化して, その小問題を互いに有機的に結び付けながらそれぞれの問題解決の役割を明確にする. 同様な性質を持つものは小問題グループにまとめ, 幾つかの小問題の組み合わせにより解が得られる問題はそれら小問題の上位問題として配置するなど, 各問題の適切な位置付けがオブジェクト指向解析を有効にする鍵となる. 三木³⁾の研究では大きな問題を1つのトラス構造物の静的挙動解析に設定し, 小問題をトラス構造物を構成する部材や接合点など, それぞれの静的特性問題とすることで問題解決に成功している. また, 機械部品の組み立てを問題の対象にした Chen 他⁹⁾のモデル化も, 各々の部品に関する知識を有機的に, また階層的に表現して, オブジェクト指向を応用したものであ

る。

オブジェクト指向の考え方には、開発効率、保守性、拡張性などが優れているという利点があり、多くはコンピュータプログラム上でその実力を発揮する。これらの利点は、1) カプセル化、2) 継承、3) 多態性といった、オブジェクト指向の3大特徴¹⁰⁾によりもたらされるものである。カプセル化とは、クラス(C++でのオブジェクトの呼称)で所持しているデータをクラス単位で管理し、データに対するクラス外部からのアクセス制限を行うものである。この機能により、内部のデータは保護され、不当な外部からのアクセスは受け付けない。また、既存のクラスに対してより特殊なデータ型や手続きを持つクラスを定義する場合、継承の機能を利用する。開発者は、既存クラスの機能に対して、追加や変更をするデータおよび手続きを、継承先クラスの定義で追加記述するだけで新しいクラスとして利用できる。多態性とは同じ手続き名であっても作用させるクラスによってそれぞれが固有の動作を定義できることである。つまり、手続き名の同一化により、さまざまなクラスに対する操作を統一的行うことができる。

一般に知られているオブジェクト指向言語には、Smalltalk, C++, Modula-2といったものがある。Smalltalkの歴史は長く、その開発環境はほぼ完成されており、今でも多くのユーザーの支持を得ている。三木⁹⁾の研究で開発されたシミュレータを記述しているのもSmalltalkである。一方、従来のC言語にオブジェクト指向機能を追加したC++は、未だ改版中ではあるにもかかわらず、機能的にはSmalltalkと同等もしくはそれ以上の性能を有する。現在ではオブジェクト指向言語といえば、SmalltalkもしくはC++が挙げられ、より柔軟なC++の需要が高まりつつある。

本研究でのオブジェクト指向言語の適用には、運動方程式の導出に目的を絞ったシステムの開発に際して、次のような理由によりオブジェクト指向言語C++を採用した。

- 1) 大学研究機関では、多くの研究者が数値計算プログラムをCで記述している。CのユーザーがC++に移行するのは自然な流れであり、近い将来C++のユーザー人口が増えることが予測される。
- 2) コンパイラ言語であるため、システムの実行速度が比較的速い。
- 3) ほとんどすべてのコンピュータに安価なC++コンパイラが存在する。つまり、ほとんどすべての環境で本システムが利用できることになる。

こうした理由から、オブジェクト指向言語C++を

選択したわけだが、多機能で高速なC++の性能を最大限に引き出すのはあくまでも開発者の能力にかかっている。本システムの開発にあたっては、十分なシステム設計と、随時再利用性のチェックや可読性向上の工夫を行うことで、最良のコードを記述するように努めた。

3.2 多体柔軟構造物への適用 多体柔軟構造物(=Structure; 以下クラス名を表す)に対してクラスを設計する場合、多体柔軟構造物モデルの第3図(a)のようなイメージから、オブジェクトは第3図(b)のような構成要素で構成されていると考えられる。ここでは、1つの多体柔軟構造物は、複数の部材(=Part)が接合点(=Joint)によって接合して、形成したものと考えられる。このように部材や接合点を有機的につなげる事で、直観的に各クラスを把握でき、システム開発のプログラム設計面で大いに役に立つ。この構造物の表現は、三木⁹⁾やChen⁹⁾のモデル化に類似する。

さらに構成要素を検証すると、第3図(a)のように部材同士の接合はそれぞれの部材上の接点(=Contact Point)を接合点が接合しているものと認識できる。

また、第4図(a)のように、各部材クラスはそれぞ

(a) 現実世界のモデル

(b) オブジェクトモデル

第3図 多体柔軟構造物モデル

(a) 部材クラス

(b) 物理量クラス

(c) 接合点クラス

第4図 多体柔軟構造物の構成要素

れが物理特性パラメータおよび座標パラメータを所持している。この図は、剛体(=Rigid)および柔軟体(=Flexible)のそれぞれのクラス構成図も示している。ここで共通パラメータは、共通部材クラス(=Part Base)にまとめた。この設定により、剛体クラスおよび柔軟体クラスは、それぞれが共通部材クラスからデータと手続きを継承し、固有のパラメータを追加記述することで実現した。また部材は一度に、剛体、柔軟体のうちどちらか一方の部材にしか成り得ないため、剛体クラスと柔軟体クラスの2つのポインタ

(メモリの場所を表す変数)を装備し、必要に応じてどちらか一方を生成するように設計した。

部材の要素である物理特性パラメータ(=Physical Parameter)および座標パラメータ(=Position)は、第4図(b)のようなオブジェクトモデルによって構成される。物理特性パラメータは定数の物理量であり、データとしてクラス名固有の名称と単位を所持している。この名称と単位は、ユーザーが入力する多体柔軟構造物のデータを読み取る際に必要になる。座標パラメータは、実数値を持つことが共通であるため、物理特性パラメータおよび一定属性(=Constant)から機能を継承して、定数を変数に拡張して実現した。

接合点は、任意数の部材が任意のピン接合および固定接合の組み合わせで接合している点を示す。よって接合点クラスのデータ構造は、第4図(c)のように2段の線形リスト構造より成り立ち、下段の固定接合では互いに姿勢角が拘束され、上段のピン接合では互いに独立な自由度である。下段の要素である接合部材要素クラス(=Part No Pos)には、接点クラスを示すポインタをデータ要素として装備している。このポインタは接合している部材クラスの接点の格納場所を示しており、これをアクセスすることで、接合している部材情報を得ることができる。

ここで、第3図で構造物の接合イメージを示したが、実際には部材および接合点クラスの管理を統一するために、構造物クラスには、部材集合クラス、接合点集合クラス、ループ構造集合クラス(=Loop Collection)およびベース部材クラス(=Base Part)をデータとして装備した。一方で、部材クラスと接合点クラスは、既に接点クラスによって有機的な結合がなされており、さらにリストで部材および接合点クラスを管理することは、冗長であるかのように思われる。しかし、部材集合を統括的に扱う場合には、線形リスト構造であるほうが効率的であると考えられるため、両方法を採用した。

構造物の要素であるループ構造集合クラスは、構造物内の部材によるループ構造クラス(=Loop)の集合である。本システムは、2.4節に示したようなループ検索を構造物に対して施し、運動方程式導出のための情報としてループ構造集合クラスに貯える。

またベース部材クラスは、構造物のベース部材の部材番号を保持したクラスである。

4. システム構成

4.1 全システム構成 運動方程式導出システムの全体構成を第5図に示す。全システムは、多体柔軟構

第5図 運動方程式導出システム

造物を設計するためのデザイナー、および実際に多体柔軟構造物データを解析して、運動方程式を出力するジェネレータの2つのサブシステムにより構成される。ここで、デザイナーは、オブジェクト指向システム構想の一環として加えたものであり、運動方程式導出には必須ではなく、ユーザーは、構造物データを直接ジェネレータに与えることで運動方程式を得ることができる。よって、本システムの運動方程式導出方法には、デザイナーを使用する場合と直接ジェネレータを使用する場合の2通りがあり、本論文では、既に実用段階にある後者の方法のみを紹介する。

運動方程式導出の手順は、次の通りである。1) ユーザーは、ワードプロセッサを用いて、多体柔軟構造物のデータを作成する。2) ジェネレータを起動して構造物データを与える。3) ジェネレータは構造物の解析を行い、出力として多体柔軟構造物の運動方程式を提供する。標準の出力形式は、C言語で記述されたシミュレータへの実装を想定した。

ここで重要なことは、ジェネレータの入出力データは、テキスト形式であることである。つまり、データ形式はハードウェアに依存しないため、この運動方程式導出システムが導入されているコンピュータ間で

は、容易にデータ交換ができるのである。

4.2 ジェネレータ 運動方程式ジェネレータは、1) 字句解析、2) 構成調査、3) 数式生成、4) 数式処理の4つの機能を装備し、構造物解析を順に実行していくことで、運動方程式導出を実現している。

これらの機能の中で最も重要なものは、2)の構成調査である。ここで正しく構造物を認識することで、ユーザーの設計した構造物の正確な運動方程式が導出される。

4.2.1 構造物データ記述書式 ジェネレータの各機能を解説する前に、構造物データを記述するための記述書式について紹介する。この構造物データ記述書式は、2.1節で定義した、任意の多体柔軟構造物を表現するための機能を持つ。第2表は各オブジェクトを定義するための書式表である。部材定義で用いられる物理量パラメータについての詳しい記述については第1表に、また、接合点定義で用いられる部材接合式の書式は第3表にまとめた。

4.2.2 字句解析 字句解析部の役割は、ユーザーが定義した構造物データを読み込んで構造物を認識することである。ユーザーが構造物データを記述した場合は、冗長性を持っているため、柔軟に対応する必要がある。また第1表にもあるように部材定義では、部材種類指定の後の物理量パラメータの指定は任意順であることが仕様となる。

4.2.3 構成調査 最初に、字句解析部で認識した部材定義と接合点定義の整合性を調べ、さらに構造物データの接合点定義中にある部材の存在の有無を調べる。次にそれらの部材が持つ接点を示すポイントをセットする。それから各部材の初期座標の他部材との整合性を検査する。

次に構造物内で、部材によってループが構成されていれば、ループデータとしてループ集合に貯える。ループ検出の必要性は、2.4節で述べた通りであるが、Wang 他¹¹⁾のロボットアームの運動に関する研究でも、複雑に連なったアームのループ構造を検出し、運動方程式の拘束条件として取り入れている。本論文では、ループ検出アルゴリズムを無向グラフ閉路探索問題として捉え、本システム用に独自に考案した。

ループ検索には、再帰という手法を用いている。再帰とは、ある関数が自分自身を呼び出してプログラムを実行するという技法である。ここでは、部材から部材へと移動を重ね、ループとなる部材の集合を検索している。同じ部材を検索しないためには何手目の移動でその部材に到達したかを記憶させ、以前より手数が少ない場合や検索を済ませてない場合に限り、他の部材への移動を許可する。移動先の部材がない場合は、

第1表 物 理 量

記号	命 令	値	単位 ^{*1)}	タイプ ^{*2)}	部材	依存性
m	Weight	0以上の実数	M1	定数	剛体	必須
I_a	Moment Of Inertia	0以上の実数	M1L4	定数	剛体	必須
I_{as}	Moment Of Inertia Of Area	0以上の実数	L4	定数	剛体	--> I_a
ρ	Density	0以上の実数	M1L-3	定数	柔軟体	-- ρA
A	Sectional Area	0以上の実数	L2	定数	柔軟体	-- ρA
E	Young Modulus	0以上の実数	M1L-2	定数	柔軟体	-->EI
I	Second Moment Of Area	0以上の実数	L4	定数	柔軟体	-->EI
ρA	Line Density	0以上の実数	M1L-1	定数	柔軟体	必須
EI	Rigidity	0以上の実数	M1L2	定数	柔軟体	必須
L	Length	0以上の実数	L1	定数	柔軟体	必須
t	Thickness	0以上の実数	L1	定数	柔軟体	--> $t \cdot h = A$
h	Width	0以上の実数	L1	定数	柔軟体	--> $t \cdot h = A$
x	X	実数	L1	変数	共通	-->pos
y	Y	実数	L1	変数	共通	-->pos
θ	Angle	実数	(R1)	変数	共通	-->pos
DX	DX	実数	L1	定数	剛体	-->cp
DY	DY	実数	L1	定数	剛体	-->cp
pos	Position	(x, y, θ)		複合	共通	必須
cp	Contact Position	((ID number, DX, DY)..)		複合	剛体	必須

*1) MLT(R)次元表示 [M: mass, L: length, T: time, R: angle]

*2) 定数であるパラメータの書式は, '[Command]=[Value][Unit]', 変数であるパラメータの書式は, '[Command]=[Value][Unit] <"const">', 複合であるパラメータの書式は, '[Command]=[Value]' などである.

第2表 多体柔軟構造物データ定義書式

定 義	書 式
部 材 (Part)	'partDef {部材番号, 部材種類, 物理量, ...}' \$ 部材番号: 部材識別用番号 \$ 部材種類: 剛体ならば「Rigid」, 柔軟体ならば「Flexible」 \$ 物理量: 第1表を参照
接合点 (Joint)	'jointDef {接合点番号, 接合部材式}' \$ 接合点番号: 接合点識別用番号 \$ 接合部材式: 第3表を参照
ベース部材 (Part Base)	'partBase={ベース部材番号}' \$ ベース部材番号: ベースになる部材番号, 部材定義の必要有
アクチュエータ (Actuator)	'actuatorDef={アクチュエータ番号, ...}' \$ アクチュエータ番号: アクチュエータ識別用番号
センサー (Sensor)	'sensorDef={センサー番号, ...}' \$ センサー番号: センサー識別番号
コメント (Comment)	'#コメント' \$ コメント: 構造物データファイル内の注釈, '#'以降の文は行末まで無視される

第3表 接合点定義における部材接合式

部材接合式 ^{*3)}	接合方法
A * B	A と B を固定結合
A + B	A と B をピン結合

^{*3)} A と B は、部材接点または、部材接合式。部材接点の書式は、剛体の場合、'[部材番号]D[接点番号]'、柔軟体の場合、'[部材番号]L'または、'[部材番号]R'。

一つ手前の部材へ後退して再びループを検索する。もしループが見つかった場合、保存してきた検索経路をもとに、多体構造物のループ集合にループデータを加える。

しかし、このアルゴリズムだけでは、必要十分なループによる拘束式を得ることはできず、冗長なループデータを検索する場合がある。これは、数式処理の段階で調査すべき問題であるとして、ループに関するここでの処理は完了する。

ついで、固定接合で、姿勢角項の自由度を共有する部材単位にグループ分けを行い、グループ番号をそれぞれの部材に与えることで、部材同士の依存関係を認識させる。

最後に、ベース部材から各部材への最短到達経路を調査し、グループ単位で最もベースに近い部材をサブベースとする。この段階でベース、サブベース、その他の部材という階層構造を作り出し、効率的な数式生成のための準備を行う。

4.2.4 数式生成 構成調査で求めた構造物に対する部材接合情報を元に、各部材について運動方程式を生成する。運動方程式の生成は、最短経路に沿って行われる。次に部材(*i*)について、その手順を示す

- 1) ベース部材の並進座標 X_{Base} に関する運動方程式を生成する。
- 2) ベース部材の姿勢角 θ_{Base} に関する運動方程式を生成する。
- 3) 部材(*i*)のサブベースの姿勢角 $\theta_{i,SubBase}$ に関する運動方程式を生成する。
- 4) もし柔軟体ならば、部材(*i*)の曲げ変位 V_i に関する運動方程式を生成する。
- 5) 最短経路情報中の部材(*k*)が、ベース部材になるまで、部材(*k*)のサブベースの姿勢角 $\theta_{k,SubBase}$ に関する運動方程式を生成する。
- 6) 終了

ここで生成される、連続系でかつ行列変数を用いた運動方程式を中間コードと呼ぶことにして、次の数式処理に渡す。

4.2.5 数式処理 この機能は実現していないが、近い将来に到達できるであろう動作使用の概要につい

て述べる。

ここでは、各部材に分散した運動方程式をまとめて、中間コードであった式を、数値シミュレーション用に展開および整理する。行列変数は、あらかじめ用意した変換テーブルを元に各要素に展開する。また、連続系の積分式は、ここでは柔軟体にのみに存在する式であるので、有限要素法を適用した一般解を準備し、それを元に各要素に変換する。そして、同類項ごとにまとめて、数値計算でそのまま使用できるファイル形式に変換する。出力ファイル形式は、C言語関数形式を標準とする。

5. 多体柔軟宇宙構造物モデルへの適用

5.1 運動方程式導出システムの適用環境 本論文で紹介している、運動方程式導出システムの開発には、ハードウェアとしてセイコーエプソン社の PC-486 SR、OS としてセイコーエプソン社の MS-DOS ver. 5.0R el. 2 および C++ コンパイラとしてボーランド社の Borland C++ ver. 3.1 を使用した。システムが使用する関数は、コンパイラやハードウェアに依存しないものを選び、現在まだ行っていないが、UNIX 上への移植も検討中である。

この節では、運動方程式導出システムの有効性を示すために、1つの多体柔軟構造物モデルに対してシステムを適用し、出力結果の確かさを検証した。ただし、現段階では、4.2.5 節の数式処理部が未完成であるため、4.2.4 節の数式生成によって得られた中間コードによる結果を用いている。ここでの中間コードによる表現は、システムの性能評価をする上で十分な出力であると思われる。

5.2 適用例—2 リンク双腕ロボットモデル— 第6図に示す、2リンク双腕ロボットモデルに対して、システムの適用を試みた。このロボットは、剛体を本体とし、2本の柔軟なマニピュレータを備えて、慣性空間内を自由に移動するものである。ただし、右腕の、本体から見て2リンク目は、1リンク目に対して直角に固定されているものとする。構造物データファイルには第7図(a)を用意した。第7図(b)は適用後の中間コードによる出力である。この出力結果を数式に変換すると、式(7)~(15)を得る。これらの式は、システムを用いないで導出した運動方程式と一致することは容易に確認できる。

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{X}_1 + \int_{L_2} \rho_2 A_2 \ddot{Z}_2 + \int_{L_3} \rho_3 A_3 \ddot{Z}_3 + \int_{L_4} \rho_4 A_4 \ddot{Z}_4 \\
 + \int_{L_5} \rho_5 A_5 \ddot{Z}_5 = 0 \quad (7) \\
 I_{a1} \ddot{\theta}_1 + \int_{L_2} \rho_2 A_2 V_1^T |_{D1} \frac{\partial C_1^T}{\partial \theta_1} \ddot{Z}_2
 \end{aligned}$$

$$+ \int_{L_3} \rho_3 A_3 V_1^T|_{D1} \frac{\partial C_1^T}{\partial \theta_1} \ddot{Z}_3 \\ + \int_{L_4} \rho_4 A_4 V_1^T|_{D2} \frac{\partial C_1^T}{\partial \theta_1} \ddot{Z}_4$$

第6図 2リンク双腕ロボットモデル

$$+ \int_{L_5} \rho_5 A_5 V_1^T|_{D2} \frac{\partial C_1^T}{\partial \theta_1} \ddot{Z}_5 = 0 \quad (8)$$

$$\int_{L_2} \rho_2 A_2 (V_2^T - V_2^T|_L) C_{2,2}^T \frac{\partial C_2^T}{\partial \theta_2} \ddot{Z}_2 \\ + \int_{L_3} \rho_3 A_3 (V_3^T - V_3^T|_L) C_{3,2}^T \frac{\partial C_2^T}{\partial \theta_2} \ddot{Z}_3 \\ + \int_{L_4} \rho_4 A_4 (V_4^T|_R - V_2^T|_L) C_{2,2}^T \frac{\partial C_2^T}{\partial \theta_2} \ddot{Z}_3 = 0 \quad (9)$$

$$\int_{L_2} (\rho_2 A_2 C_2^T \ddot{Z}_2 + E_2 I_{s2} V_2''') = 0 \quad (10)$$

$$\int_{L_3} (\rho_3 A_3 C_3^T \ddot{Z}_3 + E_3 I_{s3} V_3''') = 0 \quad (11)$$

$$\int_{L_4} \rho_4 A_4 (V_4^T - V_4^T|_R) C_{4,4}^T \frac{\partial C_4^T}{\partial \theta_4} \ddot{Z}_4 \\ + \int_{L_5} \rho_5 A_5 (V_4^T|_L - V_4^T|_R) C_{4,4}^T \frac{\partial C_4^T}{\partial \theta_4} \ddot{Z}_5 = 0 \quad (12)$$

```
# テストモデル
# --- 2 リンク 柔軟双腕ロボットモデル--- Copyright (c) 1994 Shigeyuki Takeda (Fujii Lab.)
# --- 部材定義 ---
# 中心本体剛体
partDef { 1, Rigid, Weight = 1.18e+05 kg, MomentOfInertia = 3.34e+05 kgm^4,
  Position = ( X = 0 m , Y = 0 m , Angle = 0 deg), ContactPosition = ((1, dx = 2.5 m , dy = 1.5 m)
  (2, dx = -2.5 m , dy = 1.5 m)) }
# 柔軟付属物
partDef { 2, Flexible, Density = 2.7e+03 kg/m^3, BeamWidth = 10 cm, BeamThickness = 10 cm, Rigidity = 6.0e+04 kg m^2,
  BeamLength = 3.0 m, Position = ( X = 4.0 m, Y = 1.5 m, Angle = 0 deg ) }
partDef { 3, Flexible, Density = 2.7e+03 kg/m^3, BeamWidth = 10 cm, BeamThickness = 10 cm, Rigidity = 6.0e+04 kg m^2,
  BeamLength = 3.0 m, Position = ( X = 5.5 m, Y = 3.0 m, Angle = 90 deg ) }
partDef { 4, Flexible, Density = 2.7e+03 kg/m^3, BeamWidth = 10 cm, BeamThickness = 10 cm, Rigidity = 6.0e+04 kg m^2,
  BeamLength = 3.0 m, Position = ( X = -4.0 m, Y = 1.5 m, Angle = 0 deg ) }
partDef { 5, Flexible, Density = 2.7e+03 kg/m^3, BeamWidth = 10 cm, BeamThickness = 10 cm, Rigidity = 6.0e+04 kg m^2,
  BeamLength = 3.0 m, Position = ( X = -5.5 m, Y = 1.5 m, Angle = 0 deg ) }
# --- 接合点定義 ---
jointDef { 1, 1D1+2L } jointDef { 2, 2R*3L } jointDef { 3, 1D2+4R } jointDef { 4, 4L+5R }
# --- ベース部材定義 ---
BasePart { 1 }
# end of file
```

(a) 構造物入力ファイル

```
Part(1)-->
X: {+M1*D[X1,{t,2}]+Integrate[Rou2*A2*D[Z2,{t,2}],L2]+Integrate[Rou3*A3*D[Z3,{t,2}],L3]+Integrate[Rou4*A4*D[Z4,{t,2}],L4]+Integrate[Rou5*A5*D[Z5,{t,2}],L5] }
C: {+Ia1*D[Theta1,{t,2}]+Integrate[Rou2*A2*Transpose[V1[1]]*Transpose[D[C1,Theta1]]*D[Z2,{t,2}],L2]+Integrate[Rou3*A3*Transpose[V1[1]]*Transpose[D[C1,Theta1]]*D[Z3,{t,2}],L3]+Integrate[Rou4*A4*Transpose[V1[2]]*Transpose[D[C1,Theta1]]*D[Z4,{t,2}],L4]+Integrate[Rou5*A5*Transpose[V1[2]]*Transpose[D[C1,Theta1]]*D[Z5,{t,2}],L5] }<---
Part(2)-->
C: {+Integrate[Rou2*A2*(Transpose[V2]-Transpose[V2[1]])*Transpose[C2,2]*Transpose[D[C2,Theta2]]*D[Z2,{t,2}],L2]+Integrate[Rou3*A3*(Transpose[V3]-Transpose[V3[1]])*Transpose[C3,2]*Transpose[D[C2,Theta2]]*D[Z3,{t,2}],L3]+Integrate[Rou3*A3*(Transpose[V2[2]]-Transpose[V2[1]])*Transpose[C2,2]*Transpose[D[C2,Theta2]]*D[Z3,{t,2}],L3] }
V: {+Integrate[Rou2*A2*Transpose[C2]*D[Z2,{t,2}]+E2*Is2*D[V2,{u,2}],L2] }<---
Part(3)-->
V: {+Integrate[Rou3*A3*Transpose[C3]*D[Z3,{t,2}]+E3*Is3*D[V3,{u,3}],L3] }<---
Part(4)-->
C: {+Integrate[Rou4*A4*(Transpose[V4]-Transpose[V4[2]])*Transpose[C4,4]*Transpose[D[C4,Theta4]]*D[Z4,{t,2}],L4]+Integrate[Rou5*A5*(Transpose[V4[1]]-Transpose[V4[2]])*Transpose[C4,4]*Transpose[D[C4,Theta4]]*D[Z5,{t,2}],L5] }
V: {+Integrate[Rou4*A4*Transpose[C4]*D[Z4,{t,2}]+E4*Is4*D[V4,{u,4}],L4] }<---
Part(5)-->
C: {+Integrate[Rou5*A5*(Transpose[V5]-Transpose[V5[2]])*Transpose[C5,5]*Transpose[D[C5,Theta5]]*D[Z5,{t,2}],L5] }
V: {+Integrate[Rou5*A5*Transpose[C5]*D[Z5,{t,2}]+E5*Is5*D[V5,{u,5}],L5] }<---
```

(b) 生成された中間コード

第7図 2リンク柔軟双腕ロボットモデルに対する適用

$$\int_{L_4} (\rho_4 A_4 C_4^T \ddot{Z}_4 + E_4 I_{34} V_4''''') = 0 \quad (13)$$

$$\int_{L_5} \rho_5 A_5 (V_5^T - V_5^T|_R) C_{5,5}^T \frac{\partial C_5^T}{\partial \theta_5} \ddot{Z}_5 = 0 \quad (14)$$

$$\int_{L_5} (\rho_5 A_5 C_5^T \ddot{Z}_5 + E_5 I_{55} V_5''''') = 0 \quad (15)$$

6. ま と め

複雑な多体柔軟宇宙構造物の運動方程式導出を支援する、運動方程式導出システムの設計・開発を試みた。このとき、システム開発の効率化、構造物の自然なモデル化、実用性、将来拡張の可能性を目的に、オブジェクト指向言語 C++ を適用した。

その結果、システム開発には十分に効力を発揮し、十分に検討した基礎部分により、システム全体の構築が進むにつれて、開発速度は上がった。また、構造物のモデルとプログラム上で扱うオブジェクトを1対1に自然に対応させることで、構造物各部のそれぞれの関係の把握が容易になり、コーディングをする上で常に構造物が対象であることを見失うことはなかった。また本来の目的である、多体柔軟構造物の方程式導出に成功し、構造物全体の運動方程式を検証するには十分な結果を得ることができた。

しかし未完成部分を含めて、問題点はいくつかある。

- 1) 構造物が含む、部材ループの検索は成功したが、必要十分な拘束条件式を得るにはどのような方法を取ればよいのか
- 2) 数式処理に最も適した中間コードとはいかなるものか。
- 3) 出力する運動方程式の書式は、C言語、Mathematica および Matlab への対応で十分か。

今後は、これらの問題を検討しながら、システムの未完成部分である、運動方程式ジェネレータ内の数式処理部の開発に努め、数値シミュレータ実装を早期に

実現するようにシステム構築が進められていく必要がある。

参考文献

- 1) 石塚圭樹著, 横手靖彦監修: オブジェクト指向プログラミング, アスキー出版局, 1993.
- 2) ピンソン, L. J., ウナー, R. S. 著, 富士ゼロックス情報システム株式会社邦訳, Smalltalk: オブジェクト指向プログラミング, 株式会社トッパン, 1990.
- 3) 三木光範他: 知的トラス構造のモデリングと解析へのオブジェクト指向アプローチ, 第8回宇宙構造物シンポジウム講演集, 宇宙科学研究所, 1992年12月3・4日, pp. 139-144.
- 4) Murotsu, Y., Tsujio, S., Senda, K. and Hayashi, M.: Dynamics and Positioning Control of Space Robot with Flexible Manipulators, Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Portland, Oregon, August 20-22, 1990, pp. 735-742.
- 5) Arnold, V. L., Translated by Vogtmann, K. and Weinstein, A.: Mathematical Methods of Classical Mechanics, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1989, pp. 59-61.
- 6) Lee, S. and Junkins, J. L.: Explicit Generalization of Lagrange's Equations for Hybrid Coordinate Dynamical Systems, J. Guidance, Control, and Dynamics, 15 (1992), pp. 1443-1452.
- 7) Fujii, H., Ohtsuka, T. and Udou, S.: Mission Function Control for a Slew Maneuver Experiment, J. Guidance, Control, and Dynamics, 14 (1991), pp. 986-992.
- 8) Junkins, J. L., Rahman, Z. H. and Bang, H.: Near-Minimum-Time Control of Distributed Parameter Systems: Analytical and Experimental Results, J. Guidance, Control, and Dynamics, 14 (1991), pp. 406-415.
- 9) Chen, C. L. and Pao, P. Y.: An Integration of Neural Network and Rule-Based Systems for Design and Planning of Mechanical Assemblies, IEEE Trans. System, Man and Cybernetics, 23 (1993), pp. 1359-1371.
- 10) Borland International 著, ボーランド株式会社 編訳: Turbo C++ Introduction, ボーランド株式会社, 1992, pp. 151-154.
- 11) Wang, L. T. and Chen, C. C.: On the Numerical Kinematic Analysis of General Parallel Robotic Manipulators, IEEE Trans. Robotics and Automation, 9 (1993), pp. 272-285.