知識ベースを用いた可変形状トラスの形態および構造解析^{*1}Knowledge-Based Approach to Geometric and Structural Analysis of
Variable Geometry Trusses三木 光範^{*2}・室津 義定^{*3}

Mitsunori MIKI, Yoshisada MUROTSU

田合 弘幸^{*4}

and Hiroyuki TAGO

Key Words: Knowledgebase, Object-Oriented Approach, Variable Geometry Truss

Abstract

In order to perform the structural and geometric analyses of variable geometry trusses a knowledge-based approach is adopted. A truss structure is divided into small elements, and their responses are extracted and a knowledgebase is constructed in an object-oriented manner. The object-oriented structural analysis is capable of treating any material and geometric nonlinearities since the method is based on the iterative relaxation of nodal unbalanced forces by moving the nodes. The object-oriented geometric analysis where a kinematic problem is converted into a problem for a force equilibrium at the nodes is also found to be effective for determining the geometry of variable geometry trusses.

1. 緒 言

トラス構造において、静定構造部分における一部の部材が能動的にそれ自身の長さを変化させ、それによって構造全体の形状が変化するものをVGT (Variable Geometry Truss: 可変形状トラス) と呼ぶ。従来、構造は受動的に力を支え、形態を保つことがその基本的機能であった。しかし、こうした能動部材の利用によって構造はさらに高度な機能を果たすことができるようになり、特に宇宙構造の分野でVGTは重要な位置を占めている¹⁻⁴⁾

VGTの挙動を考えるためには形態解析、構造解析および振動/動的解析が重要である。ここではこのような解析に新しいアプローチを提案するものであり、その第1段階としてこのうち形態解析と構造解析につ

いて考える。

VGTの形態解析は一般に幾何学的な関係を基礎として部材長とトラスの節点座標に関する非線形の方程式を求め、それを式(1)のように線型化し、その線型方程式を繰り返しの解くことで行われる。

$$dX = \frac{\partial X}{\partial L} dL \quad (1)$$

ここで X は節点座標ベクトル、 L は部材長ベクトルである。

一方、構造解析は有限要素法によって行われるが、構造が柔軟な場合変形が大きく、大変形の非線形問題となり、ここでも繰り返しの計算が必要である。

これらの方法を用いてVGTの解析を行う場合の問題は次の通りである。第1に、部材の材料非線形およびオイラー座屈や薄肉の局所座屈などの部材の力学的応答の非線形性を考慮するのが容易でない。第2に、能動部材におけるアクチュエータの応答の非線形性を考慮することが容易でない。第3に、そのアクチュエータと部材との相互作用を考慮することが容易でない。第4に、不静定トラス構造における形態解析ができない、ことである。このうち、最後の点については、不静定構造では部材長と節点座標の間に1対1の関係が無く、部材の変形を考慮しなければならないこと、すなわち、形態解析と構造解析がカップリングしていることに起因する。一方、他の3点は、種々の複雑な非線形性を考慮するためには通常の構造解析手法に多くの複雑な付加的方法を加える必要が有ること、そのような解析の拡張は一般に多くの労力を必要とすることに起因する。

こうした問題は極めて軽量かつ柔軟に作られた宇宙構造用のVGTでは無視できない問題である。ここではこうした問題を解決するための方法として分散問題

*1 平成7年9月20日原稿受理

*2 同志社大学工学部知識工学科

*3 大阪府立大学工学部航空宇宙工学科

*4 大阪府立大学大学院

解決のアプローチを採用し、知識ベースシステムを用いてそれを具体化する方法を提案する。

2. 分散問題解決と知識ベース

分散問題解決とは、ある特定の問題を解く作業を複数のモジュール間で分割し、問題と問題の展開に関する知識を各モジュールが分割/共有し、相互に協力してその問題を解く方法を指す⁹⁾。重要なことは、全体としての大きな問題を解く方法に関する知識は明示的には無く、問題がより小さな部分問題に分割され、そしてその部分問題を解く知識が起動され、それら部分問題の解の集合あるいは統合として全体の問題が解決される点である。こうしたアプローチは生物が持つ問題解決能力と似ており、その有用性は最近多くの分野で示されている⁹⁾。後に詳しく述べるが、ここでは各モジュール固有の知識が記述されているのみで、構造解析と形態解析のための明示的な知識は存在しない。

分散問題解決では各モジュールが明示的な知識、すなわち主として宣言的な知識表現を有していることが重要な点である。ここではトラス構造物は階層的な要素集合に分解され、各要素固有の知識が抽出された。それらの知識は要素の本質的な挙動を規定する知識であり、トラスの形態および構造解析には直接関係のない知識である。この点は極めて重要である。解析のアルゴリズムを知識として記述した場合には目標とする解析は可能でも、異なった挙動の解析は不可能である。ここでは線形解析、非線形解析、形態解析、構造解析などに関係なく要素固有の知識を考えた。

分散問題解決のアプローチでは複数のモジュールが部分問題を解決するための知識ベースを有している。知識ベースを構築する方法にはいくつかの方法⁷⁾があるが、最近ではオブジェクト指向モデルが注目を集めている。そこでは、対象を階層構造を持つクラスのインスタンスとして考え、そのオブジェクトにメッセージを送信することによってアクションを生起させる。知識はクラス階層構造とメッセージによって起動されるアクションすなわちメソッドによって記述される。オブジェクト指向における知識は構造を持った知識であり、このため対象のモデル化が容易で、大規模の知識が容易にモジュール化でき、プロダクションシステムと比較して処理効率は高い。また、オブジェクト指向は複雑度の高いシステムを理解し、解析し、そして設計するための方法論として極めて有用である⁸⁾。

構造や制御の分野におけるオブジェクト指向の方法論の応用については複合材料の力学的解析⁹⁾、はりの変形解析¹⁰⁾、トラス構造解析¹¹⁾、物理量の処理¹²⁾、最適化¹³⁾、VGTの運動コントロール¹⁴⁾、および運動方

程式導出システム¹⁵⁾などの研究があるが、VGTの形態解析と構造解析を統合した研究はない。

本研究で対象とするVGTはすでに述べた種々の非線形性を考慮する観点から考えると複雑なシステムであり、こうしたシステムに関わる知識を記述するためにはオブジェクト指向の持つ優れたモデル化能力が重要となる。そして階層的に表現されたオブジェクトと、複数のオブジェクトを集約してモデル化される高機能のオブジェクトの集合が、それぞれに固有の知識を起動させながら問題解決を行うオブジェクト指向のアプローチが最も適したものと考えられる。重要な点は、各オブジェクトを可能な限り正確に記述することにより、全体の問題は自然な形で分割され、階層的な部分問題に変換され、最下位のレベルでの問題解決方法が記述されていれば全体の問題が自然に解けるという点である。

3. VGTのオブジェクト指向モデル化と分散知識

3.1 トラス構造のモデル化と分散知識

トラス構造は節点、部材、および支持からなる。各節点は座標、支持、それに結合している部材などのデータを有している。各部材は材料、断面形状、長さ、両端の節点などのデータを有している。支持は回転支持と可動支持に分類され、可動支持はさらに水平可動支持と垂直可動支持に分類される。各材料は名称、弾性定数、強度などのデータを有している。断面形状は円断面や矩形断面などに分類される。このような静的な知識は第1図に示すクラス階層構造と第1表に示すインスタンス変数で表されるオブジェクトの集約化によって表現される。

第1図においては、字下げはスーパークラスとサブクラスの関係を表しており、字下げしたものは上のクラスのサブクラスである。たとえば支点クラスは回転支点クラスと可動支点クラスをサブクラスとして有

第1図 トラス構造のクラス階層構造

し、可動支点クラスは水平可動支点と垂直可動支点クラスをサブクラスとして有する。なお、点クラスは Smalltalk 言語に標準で備わっているクラスであり、内部状態として x 座標と y 座標を有する。

メッセージに対応する応答としての知識は各クラスにおけるメソッド（これは Smalltalk における用語である。C++ ではメンバ関数と呼ばれる）として記述される。それらのメソッドはそれぞれのクラスにおける固有の知識である。トラス節点およびトラス部材の各クラスにおける代表的なメソッドを第2表に示す

3.2 能動部材のモデル化と分散知識 能動部材は部材の中にアクチュエータを有しており、その作用によって部材の長さが変化する。アクチュエータは基本的に、力を発生させるものと変位を発生させるものがある。いずれのアクチュエータも部材力との相互作用で非線型挙動が変化する可能性がある。また、限界の荷重を越えると動作しない、あるいは耐荷重性を失う

第1表 代表的なクラスと、そのインスタンス変数

ク ラ ス	インスタンス変数	変数の内容 (インスタンスのクラス名)
ト ラ ス	節点群 部材群	トラス節点群 トラス部材群
トラス節点	座標 支持 部材群 反力 外力 節点不平衡力	座標 支持 トラス部材群 3次元力 3次元力 3次元力
トラス部材	材料 断面形状 初期長さ 節点1 節点2 部材力	材料 断面形状 数値 トラス節点 トラス節点 1次元力
能動トラス部材	アクチュエータ	アクチュエータ

など、アクチュエータの種類に応じて複雑な特性がある。これらを正確にモデル化した。第2図はアクチュエータを持つ部材とアクチュエータのモデル化であり、アクチュエータ部分以外の部材の座屈などを評価するために部材はアクチュエータ両側で固有の長さを有している。なお、(a)のクラス階層構造においては、字下げはスーパークラスとサブクラスの関係を表しており、字下げしたものは上のクラスのサブクラスである。

アクチュエータは変位制御型と力制御型に分かれ、内部状態として変位、軸力、変位下限値、変位上限値、荷重下限値、荷重上限値、破損荷重、目標変位(力)および変位(力)速度を持つ。変位制御型アクチュエータの動作は次のとおりである。まず、アクチ

(a) トラス部材とアクチュエータのクラス階層構造

(b) アクチュエータのモデル化

第2図 アクチュエータを持つ部材とアクチュエータのモデル化

第2表 トラス構造に関するクラスのインスタンスに有効なメソッド

メッセージ送信先	メッセージ	メッセージに対する応答
トラス節点クラスのインスタンス	節点力を求めよ	接続部材から部材力を受け取り、それらと外力および節点反力との和を求める
	節点力の節点変位に対する感度を求めよ	節点力の節点変位に対する感度を求める
	平衡位置に移動せよ	節点不平衡力が0になる推定位置に移動する
トラス部材クラスのインスタンス	与えられた節点に関する方向を求めよ	与えられた節点に関する自節点からの方向を計算する
	部材力を計算せよ	部材力を計算する

アクチュエータには目標変位が与えられる。アクチュエータは目標変位と現在の変位を一致させる方向に伸縮するが、部材力が荷重限界を越えると動作は停止する。また、部材力がアクチュエータの破損荷重を越えると荷重保持力はなくなる。

部材とアクチュエータのこのような非線形挙動がトラス解析に正確に反映されるために、外部負荷とアクチュエータの動作の時間的順序、あるいは複数のアクチュエータが存在する場合のそれらの動作順序の追跡は極めて重要な問題である。なぜなら、非線形システムでは最終状態は同じでも異なる負荷経路で生じる結果は異なるからである。ここでは時間的順序については大域的な時計を設定し、微小時間ごとの各アクチュエータの変位の発生を繰り返すことによって全体挙動を追跡する。この繰返し中にアクチュエータの過荷重による動作停止が生じた場合には1ステップだけ時間を戻し、それが停止する時刻を二分法を用いて正確に評価し、その時点から再度同様の繰返しを始める。部材の塑性挙動や屈曲挙動なども同様にして追跡できる。構造解析はこうした繰返しの各ステップごとに実行される。

3.3 幾何学的対象および物理量のモデル化と分散知識 座標と断面形状のクラス階層構造は第1図に示されている。座標はSmalltalkの有するクラスPointのサブクラスとして設計し、それが持つ種々のメソッドを再利用する。一方、断面形状は構造力学において必要となる断面積、断面2次モーメント、図心、あるいは中立軸などの属性に関する知識を保持している。また、長さ、質量、力、あるいは応力といった工学的物理量についてもモデル化を行い、演算や変換に関する知識を埋め込む。

4. 形態解析と構造解析の統合

VGTの形態解析と構造解析を統合するには、従来用いられている幾何学的方程式と全体剛性方程式を用いるのではなく、能動部材が長さを変化させたときに生じる現象をモデル化することが必要になる。幾何学的方程式は現象の本質ではなく、結果として生じる状態の関係を表現したものに過ぎず、VGTの形状は力によって変化させられる。この観点から、形態解析と構造解析は容易に統合できる。すなわち、能動部材の長さが変化すると部材両端の節点には力が発生し、節点は力の平衡がとれる位置に移動する。もし外部負荷がなければ移動後の座標は幾何学的方程式を満足している。外部負荷が存在すれば幾何学的方程式と全体剛性方程式が同時に満足される位置に移動する。こうしてVGTの形態解析と構造解析は完全に統合される。

重要な点は、形態解析と構造解析は全体からの視点ではまったく異なった方程式によって支配されているが、節点という局所的な視点では何の区別も無い現象から生じており、局所的な現象のモデル化によって両者は統合できるということである。こうした概念は分散問題解決のアプローチの優位性を示している。

上の議論で形態解析と構造解析は節点における力の平衡という一つの単純な現象を積み上げれば行えることがわかった。すなわち、「ある質点の加速度はその質点に作用する外力の合力に比例し、その質点の質量に反比例する」というニュートンの運動法則の第2法則という知識から導かれる「力は静的状態で平衡条件を満足する」という知識は「静的条件においてトラスの節点で力は平衡を保つ」とことと等価であり、その宣言的知識を基に、平衡条件が崩れた場合の変化を「節点に負荷される複数の力が存在し、その合力が0でない場合、節点はその不平衡力が0になる位置に移動する」という操作的知識に変換することによって追跡することが可能になる。

平衡条件の満足のために節点が移動する知識は節点オブジェクトの知識として記述される。すなわち、トラス構造に平衡条件を満足せよというメッセージが送られたとき、トラス構造から各節点には平衡位置に移動せよというメッセージが送信される。このとき節点オブジェクトでは移動のための知識が起動される。その知識は第3図のように記述されている。

これは、「手続き1：その節点における節点力の節点変位に対する感度を求めよ」、「手続き2：その節点における節点力（不平衡力）を求めよ」、「手続き3：その感度の逆行列を求め、節点力と乗算し、節点移動量を求めよ」、「手続き4：現在の座標に節点移動量を加え、新しい座標とせよ」という4つの手続きからなっている。手続き1のために感度を求めるメッセージ（forceSensitivity）が自身（self）すなわち節点に送られ、感度解析のための知識が起動される。手続き2では自身（self）すなわち節点に節点力を求めるメッセージ（nodalForce）が送信され、節点オブジェクトの中の知識が起動される。手続き3では、節点力感

Method: moveToBalancePoint

```
forceSensitivity := self forceSensitivity.
nodalForce := self nodalForce.
displacement := (forceSensitivity inverse)
                  productOnVector3D: nodalForce negated.
^ coordinate := coordinate + displacement
```

第3図 節点オブジェクトにおける移動のための知識 (Smalltalk 言語による記述)

度オブジェクト (forceSensitivity) に逆行列を求めるメッセージ (inverse) が送信され、それはスーパークラスであるマトリックスオブジェクトでの知識を起動する。マトリックスの演算に関する知識はマトリックスオブジェクトに記述される。そして得られた節点変位感度オブジェクトに節点力オブジェクトの乗算が依頼 (productOnVector3D) され、これは節点変位感度オブジェクトのスーパークラスであるマトリックスオブジェクトでのベクトルとの乗算に関わる知識を起動する。なお、節点力には負符号をつけるメッセージ (negated) が送信され、この力と釣り合うための変位が求められることになる。手続き4では、こうして得られた移動ベクトル (displacement) を節点座標ベクトルに加えるメッセージ (+) を座標オブジェクトに送る。ベクトルの演算に関する知識はベクトルオブジェクトに記述される。

一方、当該節点における節点力の節点変位に対する感度を求めるメソッドでは、その節点が座標軸の各方向に微小量移動することにより得られる節点力の変動を基に感度行列が構成される。この場合、当該節点以外の節点の移動量は未定であるからそれらを0として感度を求める。このため、実際には各節点は移動し、節点力は0にはならない。このため、収束のための繰り返し計算が必要になる。また、この感度から得られる節点移動量は幾何学的にも材料の応答においても線型推定量であるため、この点からも収束のための繰り返し計算が必要になる。

なお、前者の繰り返し計算は連立1次方程式の Gauss-Seidel 法による解法と原理的には同じであり、収束は保証されている。一方、非線形に関する繰り返し計算における増分を十分小さな値に調節する必要がある。

こうして、知識は極めて明示的に記述され、しかもその知識は適切なクラスに格納され、合理的な階層構造を有していることがわかる。

注意する必要があるのは複数のアクチュエータが存在する場合、その同期の問題である。非線形解析においては変化の経路によって最終状態が変化する。したがって、複数のアクチュエータが動作する場合、その動作が意図している同期状態を正確に模擬しなければならない。すなわち、各アクチュエータの動作速度と動作時刻から伸縮の微小ステップ幅を調整し、そのステップ毎に構造解析を繰り返して同期をとることにした。これによって、アクチュエータと部材力との相互作用、すなわち、アクチュエータは過負荷により停止、もしくは破損する現象が解析できる。

5. 知識ベースシステムの開発と実行結果

ここでの解析システムの構築にあたっては、計算機として SunSPARCStation SS-10 TX-4 を用い、知識ベースの記述には Smalltalk (Visual-Works/Smalltalk) を用いた。開発した知識ベースにおいてここでの解析に直接必要となるクラス数は約30、メソッド数は約280である。

第4図 3次元VGTの解析結果

第5図 構造解析と形態解析の統合化

第4図は、アクティブ部材を6本有する Octahedron type の9節点3次元 VGT の解析結果を示したものである。ここで、組み込まれたアクチュエータは変位型のもので、作動限界荷重は5 kNである。図中、(a)は初期形状を示し、各部材の長さは200 mmであり、(b)はすべてのアクチュエータを25 mm 変位させたもの、(c)はすべてのアクチュエータを50 mm 変位させたものである。いずれも無負荷であり、この結果は形態解析が提案手法で行えることを示している。一方、(d)および(e)は図に示す荷重を作用させてからアクチュエータを同様に12.5 mm および25 mm 変位させたもので、この場合には部材7のアクチュエータが7.5 mm 変位したところで軸力が限界荷重を越えて動作を停止した。(b)と(d)および(c)と(e)の結果を比較すると、部材7のアクチュエータが伸び切れないことがわかる。アクチュエータの伸びによるこうした部材力の変化は形状の変化による非線形性に起因するものである。

一方、第5図は不静定トラス構造にアクチュエータ部材を組み込み、構造解析と形態解析を同時に行った結果で、左側の図ではアクチュエータは作動しておらず、右側の図では下から4および5段目の左右の部材がそれぞれ5 cm づつ伸縮した場合の結果である。従来の方法ではこのような不静定トラス構造の形態解析は行えなかった。一般には、不静定トラス構造にアクチュエータ部材を組み込んで大きな変形を生じさせることは困難であるが、負荷された荷重の伝達経路をある程度変化させることにより、破損した部材の荷重を減少させるなどの能動性を発揮できるものと思われ、新しい考え方として検討する価値がある。

これらの結果より、VGTにおいて従来なされていなかった形態解析と構造解析の統合化が行え、さらには、その統合化によってアクチュエータの動作停止などを含む複雑な挙動と部材の軸力との相互作用が容易に解析できることがわかる。

6. 考 察

6.1 機能と知識との関係 ここでオブジェクトとして考えたものは物理的な要素であり、その要素の入出力関係が知識として記述されている。これは知識と呼ぶより機能といった方が適切ではないかという議論が有るかもしれない。従来知識として一般的に考えられたものは物理現象における入出力ではなく、人間の判断に基づく、より高度な知識を考えてきた⁹⁾。こうした観点からすれば、材料に力が作用したときのひずみは知識によって記述されるべきものではなく、むしろ機能として関数を用いて記述する方が良いのではな

いかという考え方もある。しかしながら、次に示す観点から我々は物理的要素に関しても知識表現で記述するメリットは大きいと考える。一つは、知識の表現が明示的になること、一つは知識の追加や更新が容易であること、そして最後に物理現象に関する入出力といえども人間がある観点で切り取った恣意的な部分を含むまさに“知識”であること、であるからである。問題は効率であり、しかもその効率は最初のモデル化に始まって解析方法の定式化、コード化、そして結果を得るまでに支払うコストが一つの判断基準となる。こうした観点からも物理的要素の複雑な入出力を明示的な知識として記述することの利点は多いと考える。

6.2 知識ベースを用いた分散問題解決の優位性と問題点 ここで提案した方法によって複雑な挙動を示す VGT の形態解析と構造解析の統合化が行え、提案手法は有効であることがわかった。この方法の利点は、1)様々の非線形性、および連成現象を容易に解析できる、2)知識ベースにおける知識が明示的に記述されており、知識の追加および変更が容易である点である。これらの点はすでに明らかであるが、ここでは材料非線形性に関する知識の追加を行って、再度検証を行う

前述した実行結果ではトラス部材の材料は線型弾性体であった。この場合、応力とひずみに関する知識は第3表(a)のように記述されている。もし弾塑性材料を用いる場合には第1図に示したクラス階層構造において、材料のサブクラスとして弾完全塑性材料のクラスを作成し、その材料の一つのメソッドとして第3表(b)に示す応力とひずみに関係する知識を記述する。そして、VGTの生成においてそのクラスを使用するだけで、あとは何の変更もなく非線形材料に関する解析が行える。すなわち、全体の知識ベースの一部、しかも構造化されて適切に格納されている知識の一部に簡単な知識を追加するだけで良いことがわかる。こうしたことは異なった材料を用いる場合、複雑な挙動を有する材料を用いる場合、あるいは材料の熱膨張を新

第3表 応力とひずみに関する知識

(a) 線形弾性体	
メッセージ	応力を求める(引数：ひずみ)
応 答	(縦弾性定数×ひずみ)を返す
(b) 弾完全塑性体	
メッセージ	応力を求める(引数：ひずみ)
応 答	もし、ひずみが引張降伏ひずみより大きいなら、引張降伏応力を返す もし、ひずみが圧縮降伏ひずみより小さいなら、圧縮降伏応力を返す

第6図 2次元トラス構造の節点数と構造解析の計算時間の関係

たに考慮する場合などにも同様である。

一方、提案手法の問題点は、1) 計算時間が長い、2) クラス階層構造を適切に作成するのは容易でない場合があることである。前者については後で考察する。後者については、これはオブジェクト指向アプローチに普遍的な問題である。この方法がルールベースに比べて高速で大規模な処理と知識の体系的把握が容易である利点はこのクラス階層構造にあり、適切なクラス階層構造をある程度の時間をかけて作成する必要があるのはやむを得ないことである。むしろ、こうした構造を考えることによって人の頭にある知識の明確化が促進される利点があり、これは問題点とは考えない方がよいと思われる。

知識ベースシステムでは知識の検索が行われているため、処理速度は遅い。特に、ここで使用した Smalltalk は計算機上でのコードモジュール（実行可能な機械語コード）を生成する言語ではなく、中間コードを生成し、それをインタプリタ（解釈実行系）で実行するためさらに速度が遅くなる。第6図は2次元トラス構造の節点数と構造解析にかかる計算時間の関係を示したもので、計算時間が節点数の約5乗に比例して増大していることがわかる。このため、使用する計算機はできるだけ高速のものをを用いる必要がある。また、これ以上の速度を求める場合には使用する言語は Smalltalk ではなく、オブジェクト指向言語として最近よく用いられている C++ が望ましい。この言語では完全なロードモジュールが生成され、処理は高速となる。

7. 結 論

形状可変トラス構造における形態解析と構造解析を

統合し、材料非線形、構造非線形、アクチュエータの非線形応答性、そしてアクチュエータと部材力との相互作用などの複雑な現象を容易に解析する目的で知識ベースを用いた分散知識処理のアプローチによる新しい方法を提案し、次の結論を得た。

VGT を構成するすべての要素をオブジェクトとして捉え、それらの階層構造を考え、各オブジェクトに固有の知識を抽出し、知識ベースを構築することができた。

節点における力の平衡という知識が構造解析と形態解析を統合することを明らかにし、こうした分散問題解決のアプローチが多くの非線形現象を付加的な知識なしに解決することを明らかにした。

構築された知識ベースと分散問題解決のアプローチを基にいくつかの解析を行い、提案手法は有用であることがわかった。また、提案手法は柔軟な知識の追加によってさらに複雑な問題にも容易に対処できることがわかった。

構造解析と形態解析の統合により、アクチュエータと部材力との相互作用を容易に評価することができ、また、不静定の構造に対してもこうした統合解析ができることを示した。

参考文献

- 1) Miura, K. and Furuya, H.: Adaptive Structure Concept for Future Space Applications, AIAA J., 26 (1988), pp. 995-1002.
- 2) Wada, B. K. and Utku, S.: Adaptive Structures for Deployment/Construction of Structures in Space, Proceedings of the 33rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA, 1992, pp. 379-395.
- 3) Chen, F. S. and Wada, B. K.: On an Adaptive Truss Manipulator Space Crane Concept, Proceedings of the First Joint U. S./Japan Conference on Adaptive Structures, Wada, B. K., Fanson, J. L. and Miura, K., eds., 1991, pp. 726-742.
- 4) Murotsu, Y., Senda, K. and Hisaji, K.: Optimal Configuration Control of an Intelligent Truss Structure, Proceedings of the First Joint U. S./Japan Conference on Adaptive Structures, Wada, B. K., Fanson, J. L. and Miura, K., eds., 1991, pp. 157-175.
- 5) Bond, A. H. and Gasser, L. (eds.): Reasonings in Distributed Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann Pub., San Mateo, 1988, p. 3.
- 6) Manner, R. and Mandrick, B. (eds.): Parallel Problem Solving from Nature, Elsevier Science Pub., Amsterdam, 1992, p. 2.
- 7) 上野晴樹, 石塚 満: 知識の表現と利用, オーム社, 東京, 1987, p. 7.
- 8) Booch, G.: Object-Oriented Analysis and Design with Applications, The Benjamin/Cummings Pub. Co., Redwood, 1994, p. 3.
- 9) 三木光範, 杉山吉彦: オブジェクト指向による複合材料の力学的解析, 日本機械学会論文集, 56, 527-A (1990), pp. 1648-

- 1653.
- 10) 三木光範, 杉山吉彦, 内田雄治: オブジェクト指向によるはりの変形解析, 日本機械学会論文集, 57, 541-A (1991), pp. 2154-2159.
 - 11) 三木光範, 杉山吉彦, 内田雄治: トラス構造解析, 日本機械学会論文集, 57, 541-A (1991), pp. 2160-2165.
 - 12) 三木光範, 杉山吉彦, 内田雄治: オブジェクト指向による構造工学における物理量の処理, 日本機械学会論文集, 57, 543-A (1991), pp. 2830-2835.
 - 13) 笹田直伸, 轟 章, 三木光範: 複合材料積層板の剛性最適化エキスパートシステムの開発, 日本機械学会論文集, 58, 551-A (1992), pp. 1175-1180.
 - 14) Huang, S., Natori, M., Miura, K., Nakai, S. and Katsukura, H.: An Object-Oriented Approach to the Motion Control of a Free-Floating Variable Geometry Truss, Proceedings of the AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA, 1994, pp. 465-473.
 - 15) 藤井裕矩, 武田重之: オブジェクト指向言語を用いた多体柔軟宇宙構造物の運動方程式導出システム, 日本航空宇宙学会誌, 43 (1995), pp. 143-152.