科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ６ 月 １６ 日現在

機関番号：１１４０１
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2013
課題番号：２４７６０１８０

研究課題名（和文）絶対節点座標法による数学モデルの構造を活用した膜状構造物の制御系構築と実験検証

研究課題名（英文）Proposition of the controller design method for flexible membrane-like structure by the use of mathematical expression derived by Absolute Nodal Coordinate Formulation

研究代表者
菅原　佳城（Sugawara, Yoshiki）

秋田大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：１０４２２３２０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　3,400,000円、（間接経費）　1,020,000円

研究成果の概要（和文）：2次元柔軟梁からなる構造物を対象として，絶対節点座標法の一種である連続体力学に基づく方法で得られたモデル（L1-T1モデル）を用いた制御の設計法（本申請以前に申請者によって提案）について，制御系設計モデルの低次元化手法を提案し，数値解析によってその有効性を示した．また，提案手法を3次元柔軟梁からなる構造物に拡張を行い，その有効性を数値解析によって示した．さらにグリッド構造およびグリッド状膜構造の構造について3次元柔軟梁との関連性に注目することで，それらの制御系設計の可能性を示した．そして提案手法に関する実験検証を行うために，実験装置を構築し基本的な機能確認を行い，問題点に対する改善を試みた．

研究成果の概要（英文）：Dimension reduction method was proposed for a controller design method of flexible multibody systems which used a mathematical expression derived by Absolute Nodal Coordinate Formulation. At first, the dimension reduction method was proposed for a system which consisted of 2-dimensional flexible beam and the method was demonstrated by numerical analysis. Then, the proposed method was extended to the system which consisted of 3-dimensional flexible beam and the method was also demonstrated by numerical analysis. Furthermore, possibility of extension of the proposed method to flexible grid structure was discussed in consideration of the relationship between the structure and 3-dimensional flexible beam. In order to carry out experimental validation of the proposed method, some experimental set up were developed and fundamental function of the set up was checked and some modifications have been attempted in order to improve the performance of the experimental set up.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：柔軟構造物　マルチボディダイナミクス　機械制御

１．研究開始当初の背景

（１）近年，宇宙空間において巨大構造を実現するために極めて柔軟な材料を用いた展開構造が採用されることがある．これは，ロケットで打ち上げる際に折り畳んで搭載する必要があるからである．例えば，観測ロケット実験「S310-36」では１辺が 10[m]以上の三角形状の網から構成されたアンテナの展開実験が行われた．このような柔軟な巨大構造物を任意方向に指向させることは実用上の観点から極めて重要であり，変形や振動を抑制しながら姿勢を所望の状態に制御する必要があるが，大変形を前提とした制御系の設計手法は発展途上である．

（２）絶対節点座標法（ANCF）は非線形有限要素法の一種であり，1990 年代後半に提案されて以来，前述のような大変形を有する柔軟構造物に対する解析手法の一つとして注目を集めている．ANCF 法では変形の座標と勾配が絶対座標によって表現され，得られた運動方程式における質量行列は定数行列となり，剛性項は極めて強い非線形性を持ち，従来の有限要素法に比べて大変形を有するシステムの姿勢運動を正確に表現できる．

これまで ANCF 法に関してさまざまな研究が非常に数多くなされてきているが，その多くの研究は柔軟構造物の挙動解析の能力の向上や改善に集中しており，ANCF 法で得られる数学モデルから制御系を設計するなどの研究は皆無と言っても過言ではない．

（３）申請者は一端が自由端でもう一端がピン支持されており，その支持された部分にトルクが印加できるような２次元柔軟梁(図１)を対象として ANCF 法による定式化を行い，その数学モデルの特徴を活用した制御系設計法を提案し，数値解析によって有効性を示している．提案手法では，ANCF 法の一種である連続体力学の方法に基づく定式化手法によって得られる数学モデル(L1-T1 モデル)にいくつかの変形を施し，平衡点に関する仮定を設けることで，ロバスト制御系設計の一つである μ 設計に大変都合のよい構造が容易に得られる．その結果，汎用ソフトウェアを用いた制御系設計手法を容易に適用することが可能となり，得られた制御系を用いることで，対象の安定化を行うことができる．しかし，対象の２次元柔軟梁は，柔軟部材から構成される実用的なシステムに比べると非常に簡単な構造であり，さらに実用的な複雑なシステムへの拡張を狙う際には，計算性の問題が大きく影響することが予想された．

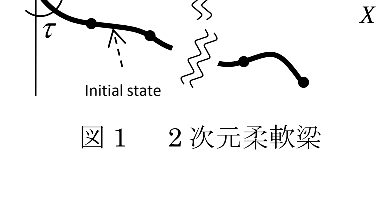

図１　２次元柔軟梁

２．研究の目的

（１）申請者が提案する制御系の設計手法では，最終的に μ 設計におけるイタレーション計算が必要となるため，制御系設計のための数学モデルの次元が設計効率に大きく影響する．少ない要素の L1-T1 モデルを用いて制御系を設計すると，十分な制御性能が得られないだけなく，安定化できないこともある．そのため，十分な要素数のモデルが必要となる一方，設計効率の悪化を招く．そこで，制御系設計モデルに対する低次元化を施し，設計効率を改善することを目的の一つとする．

（２）申請者の提案する手法をより実用的な柔軟構造に拡張するための第一段階として，３次元柔軟梁への拡張を試みる．その際に，制御系設計のためのモデルは次数が２次元柔軟梁に比べて大きくなり，計算効率の低下が予想される．そこで，前述の提案する低次元化手法の適用を同様に行う．

（３）前述の研究の目的の（２）に加えさらに実用的な柔軟構造物への拡張のために，グリッド構造およびグリッド状の網構造への拡張を行い，さらに提案する低次元化手法の適用を試みることを目的とする．

（４）申請者がすでに提案している制御系設計手法および前述の研究目的の（１）～（３）に関する実験検証を行うために，実験装置の構築を行い，それらを用いて実験を行うことを目的とする．

３．研究の方法

（１）２次元柔軟梁の L1-T1 モデルを解析のために用いる場合の低次元化手法については，モード合成法に基づく方法で申請者らによって提案されており，その方法を基にして低次元化手法の確立を行った．

まず，解析対象の L1-T1 モデルのうち Y 方向のみの運動に関するものを取り出すと以下のようになる．

$$\overline{\mathbf{M}}_Y \ddot{\overline{\mathbf{e}}}_Y + \overline{\mathbf{K}}_A \overline{\mathbf{e}}_Y + \sum_{i=1}^{\bar{N}} \overline{\Delta}_i \overline{\mathbf{K}}_{Bi} \overline{\mathbf{e}}_Y = \overline{\mathbf{B}}_Y \tau \qquad (1)$$

ただし，$\overline{\mathbf{e}}_Y$ は ANCF 法に基づく Y 方向の節点座標ベクトル，$\overline{\mathbf{M}}_Y$ は慣性行列，$\overline{\mathbf{K}}_A$ は曲げ変形に関する剛性行列，$\overline{\mathbf{K}}_{Bi}$ は軸変形に関する剛性行列，$\overline{\Delta}_i$ は軸歪みに関する不確かさ，$\overline{\mathbf{B}}_Y$ は制御入力 τ に関する係数行列である．このとき，式(1)から次の状態方程式を得る．

$$\dot{\overline{\mathbf{q}}} = (\overline{\mathbf{A}}_0 + \sum_{i=1}^{\bar{N}} \overline{\Delta}_i \overline{\mathbf{A}}_i)\overline{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{B}}_0 \tau \qquad (2)$$

ただし，$\overline{\mathbf{q}}$ は $\overline{\mathbf{e}}_Y$ に関する状態ベクトルであり，$\overline{\mathbf{A}}_0$ は $\overline{\mathbf{M}}_Y$ と $\overline{\mathbf{K}}_A$ から構成される行列，$\overline{\mathbf{A}}_i$ は $\overline{\mathbf{M}}_Y$ と $\overline{\mathbf{K}}_{Bi}$ から構成される行列であり，$\overline{\mathbf{B}}_0$ は $\overline{\mathbf{B}}_Y$ から構成されており，平衡点近傍で線形化したものである．このとき，式(2)と観測方程式（本報告書では割愛）から次のような Doyle 表記によるシステム表現が得られる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{q}}} \\ \bar{\mathbf{z}} \\ \bar{\mathbf{z}}_{\varepsilon} \\ \bar{\mathbf{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_0 & \bar{\mathbf{E}} & \mathbf{0} & \bar{\mathbf{B}}_0 \\ \bar{\mathbf{G}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{\mathbf{H}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{\varepsilon}\mathbf{I} \\ \bar{\mathbf{C}}_0 & \bar{\mathbf{F}} & \bar{\varepsilon}\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{q}} \\ \bar{\mathbf{w}} \\ \bar{\mathbf{w}}_{\varepsilon} \\ \tau \end{bmatrix} \tag{3}$$

ただし，左辺および右辺のベクトルは前述の状態量および制御系設計のために導入した新たな変数から構成されており，右辺の行列の $\bar{\mathbf{C}}_0$ は観測行列を構成する行列，$\bar{\mathbf{E}}$，$\bar{\mathbf{F}}$，$\bar{\mathbf{G}}$ および $\bar{\mathbf{H}}$ は式(2)を構成する行列から得られる行列，$\bar{\varepsilon}$ は制御系設計時に発生する特異性を回避するために導入したパラメータである．式(3)を用いてイタレーション計算に基づくアルゴリズムによって μ 設計による制御則を得ることができるが，その際に式(3)の右辺の行列の次元が大きくなるほど，計算時間を要する．そこで，式(3)の次元を小さくするために，式(1)に対してモード合成法に基づく低次元化の適用を試みる．

モード合成法に基づいた低次元化を式(1)に施すと次式を得る．

$$\tilde{\mathbf{M}}_Y \ddot{\tilde{\mathbf{e}}}_Y + \tilde{\mathbf{K}}_A \tilde{\mathbf{e}}_Y + \sum_{i=1}^{\bar{N}} \bar{\Delta}_i \tilde{\mathbf{K}}_{Bi} \tilde{\mathbf{e}}_Y = \tilde{\mathbf{B}}_Y \tau \tag{4}$$

ただし，$\tilde{\bullet}$ は式(1)の $\bar{\bullet}$ を低次元化したものに対応している．また，$\tilde{\mathbf{e}}_Y$ については

$$\tilde{\mathbf{e}}_Y = [\hat{\mathbf{e}}_{Y\_B}^T \quad \boldsymbol{\xi}_{(N_t)}^T]^T \tag{5}$$

であり，$\hat{\mathbf{e}}_{Y\_B}$ はモード合成法適用時に導入する境界領域についての節点座標ベクトルであり，$\boldsymbol{\xi}_{(N_t)}$ は内部領域についての座標ベクトルである．また，式(4)の導出では，式(1)の左辺第 3 項の軸変形に関する項を外部入力と見なして，それ以外から構成される線形系に対して低次元化を行っていることに注意されたい．このとき，式(4)に基づく状態方程式は

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = (\tilde{\mathbf{A}}_0 + \sum_{i=1}^{\bar{N}} \bar{\Delta}_i \tilde{\mathbf{A}}_i)\tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{B}}_0 \tau \tag{6}$$

となる．ここで，$\tilde{\bullet}$ は式(2)の $\bar{\bullet}$ に対応しており，低次元化の結果，式(6)の次元は式(2)よりも小さいものとなっていることに注意されたい．さらに，式(6)と観測方程式（本報告書では割愛）を用いて Doyle 表記によるシステム表現を得ると次式のようになる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \\ \tilde{\mathbf{z}} \\ \tilde{\mathbf{z}}_{\varepsilon} \\ \tilde{\mathbf{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_0 & \tilde{\mathbf{E}} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{B}}_0 \\ \tilde{\mathbf{G}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{H}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\varepsilon}\mathbf{I} \\ \tilde{\mathbf{C}}_0 & \tilde{\mathbf{F}} & \tilde{\varepsilon}\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \tilde{\mathbf{w}} \\ \tilde{\mathbf{w}}_{\varepsilon} \\ \tau \end{bmatrix} \tag{7}$$

ここで，$\tilde{\bullet}$ は式(3)の $\bar{\bullet}$ に対応している．このとき，式(7)は低次元化された式(4)から導出されているため，式(7)の次元も小さくなっていることが期待されるが，式(7)の次元を調べてみると，式(4)の低次元化の効果はほとんど現れていないことが明らかとなった．これは，式(7)における $\tilde{\mathbf{E}}$，$\tilde{\mathbf{F}}$，$\tilde{\mathbf{G}}$ および $\tilde{\mathbf{H}}$ の次元が，式(6)の中の $\tilde{\mathbf{A}}_i$ の階数に依存するうえに，$\tilde{\mathbf{A}}_i$ の階数は一般的に行列の次元よりも十分に小さな値であり，式(4)の低次元化は $\tilde{\mathbf{A}}_i$ の階数に影響を与えるほどの効果がないため，最終的に式(7)に対する低次元化の効果は現れなくなる．このとき，軸変形の性質を考慮し，いくつかの隣接する要素で等しい軸歪みが発生すると仮定する．つまり，第 i 要素から第 i+n 要素までの軸歪みが等しいとすると，以下のように表される．

$$\bar{\Delta}_i = \bar{\Delta}_{i+1} = \bar{\Delta}_{i+2} = \cdots = \bar{\Delta}_{i+n} \tag{8}$$

このとき，式(4)の左辺第 3 項の総和のうち第 i 要素から第 i+n 要素までの軸変形に対する剛性行列は次のようにまとめることできる．

$$\begin{aligned} &\bar{\Delta}_i \tilde{\mathbf{K}}_{Bi} + \bar{\Delta}_{i+1} \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+1} + \bar{\Delta}_{i+2} \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+2} + \\ &\qquad \cdots + \bar{\Delta}_{i+n} \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+n} = \\ &\bar{\Delta}_i (\tilde{\mathbf{K}}_{Bi} + \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+1} + \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+1} + \cdots + \tilde{\mathbf{K}}_{Bi+n}) \end{aligned} \tag{9}$$

ここで，L1-T1 モデルの構造から，式(9)の右辺の $\bar{\Delta}_i$ との積になっている右辺の第 2 因子である軸変形に関する剛性行列の和の階数は，それぞれの行列の階数よりも大きくなることが分かる．それゆえ，モード合成法による低次元化の効果が有効となり，最終的に得られる Doyle 表記によるシステム表現の次元も小さくなり，効率的に制御系設計が可能となる．しかしながら，このような仮定は n 個の要素に関する軸変形に関する剛性項が等しいとすることに相当するため，軸変形については曲げ変形に関するものよりも小さな要素で表現することになることに注意されたい．次章では，提案する低次元化手法に関して，いくつかのパラメータを変えたものを適用したモデルから制御則を導出し，得られた制御則による数値解析結果を比較することで，提案手法の有効性を示す．

（２）３次元柔軟梁

図 2 に示すように，3 次元柔軟梁の一端がピン支持されており，一端が自由端となっているものを制御対象として導入する．また，制御入力は Y および Z 軸まわりに加えられるものとし，目標状態は X 軸上への静止状態とする．このとき，制御目的は，任意の状態に静止している 3 次元柔軟梁を速やかに目標状態へと運び，残留振動を抑制することである．

このとき，3 次元柔軟梁に対して L1-T1 モデルを導出し，2 次元柔軟梁に対する提案する制御系設計手法の手順と同様にして軸歪みおよび制御入力に関する係数行列に関する仮定を導入すると，次式を得る．

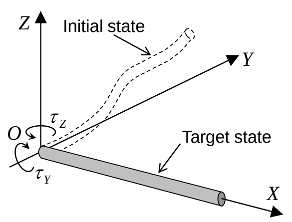

図２　３次元柔軟梁

$$\mathbf{M}_{YZ}\ddot{\mathbf{e}}_{YZ}+\mathbf{K}_{YZt}\mathbf{e}_{YZ}+\sum_{i=1}^{N_e}\Delta_i\mathbf{K}_{YZl\,i}\mathbf{e}_{YZ}=\mathbf{B}_{YZ}\boldsymbol{\tau} \quad (10)$$

ただし，$\mathbf{e}_{YZ}$，$\mathbf{M}_{YZ}$，$\mathbf{K}_{YZt}$，$\mathbf{K}_{YZli}$ はそれぞれ Yおよび Z座標に関する座標ベクトル, 慣性行列，曲げ変形に関する剛性行列および軸変形に関する剛性行列の部分行列である．また，Δ_i は軸歪みに関して導入した不確かさであり，$\mathbf{B}_{YZ}$ は入力トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}=[\tau_Y\ \tau_Z]^T$ についての入力係数行列であり，目標状態近傍で線形化したものである．式(10)に注目すると，各行列やベクトルの次元は異なるものの，式(1)と全く同じ構造を持つシステムであることが分かる．つまり，T1-L1 モデルの構造を考慮して，制御系設計を行うためのモデルとして，注目する運動の方程式を抽出すると，得られたモデルは提案する制御系設計手法を適用できるだけでなく，前節で提案した低次元化モデルも適用可能なモデルとなっている. そのため, 3 次元柔軟梁についても，前述の制御目的を実現できるような制御則を導出することは可能であると考えられる．次章では，式(10)に対して，提案する低次元化および制御系設計手法を適用することで得られた制御則を用いた閉ループ系に対して数値解析を行い，3 次元柔軟梁を基づく制御対象を制御できることを示す.

（３）ANCF 法をはじめとする柔軟マルチボディダイナミクスに基づく定式化手法では，得られる方程式は一般的に微分代数方程式（DAE）の形式であり，次の通りである．

$$\begin{bmatrix}\mathbf{M}_{org} & \mathbf{C}_{\mathbf{q}_{org}}^{\ T}\\ \mathbf{C}_{\mathbf{q}_{org}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{q}}_{org}\\ \boldsymbol{\lambda}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{Q}_{ext}\\ \boldsymbol{\gamma}\end{bmatrix} \quad (11)$$

ただし，$\mathbf{q}_{org}$，$\mathbf{M}_{org}$ および $\mathbf{Q}_{ext}$ は DAE における一般化座標，質量行列および外力ベクトルであり，$\boldsymbol{\lambda}$ はラグランジュ乗数，$\boldsymbol{\gamma}$ は拘束方程式に関する加速度に関する式によって得られる項，$\mathbf{C}$ は拘束方程式であり $\mathbf{C}_{\mathbf{q}_{org}}$ は $\mathbf{C}$ を $\mathbf{q}_{org}$ で偏微分することにより得られるヤコビ行列である. より実用的な柔軟構造物に対する制御系の構築を狙うとき，まず最初に定式化が必要となる．複雑なシステムに対して運動方程式を導出するには，上述の柔軟マルチボディダイナミクスに基づく方法で DAE を最初に導出することになる．しかしながら，様々な制御系設計のために，得られた DAE を次に示すようなニュートン・オイラー型の方程式に変形したものを用いて制御系設計を行う必要がある.

$$\mathbf{M}_{NE}\ddot{\mathbf{q}}_{NE}+\mathbf{K}_{NE}(\mathbf{q}_{NE})=\mathbf{Q}_{NE} \quad (12)$$

ここで，$\mathbf{q}_{NE}$，$\mathbf{M}_{NE}$，$\mathbf{K}_{NE}(\mathbf{q}_{NE})$ および $\mathbf{Q}_{NE}$ はそれぞれ，ニュートン・オイラー型の方程式における座標ベクトル，質量行列，剛性項および外力ベクトルである．前述の提案手法に関しても式(1)や式(10)が示すようにニュートン・オイラー型の方程式への適用となっており，実用的な柔軟構造物への提案する制御系設計手法と低次元化手法の適用可能性は，DAE から希望するニュートン・オイラー型の方程式への変換の可能性に依存する．その上で，次章ではグリッド構造が 3 次元柔軟梁を接続したもので構成できることに着目し，接続条件の検討により，提案手法によるグリッド構造制御の可能性を議論する．

（４）提案する制御系設計手法および低次元化手法の実験検証のために実験装置を構築した．構築した実験装置は，2 次元柔軟梁および 3 次元柔軟梁に対する制御ができるように構成している．また，当初の予定ではグリッド状の構造についても実験装置の構成を行う予定であったが，次章の成果でも示すように低次元化を施した後のシステムについても，計算性改善の余地があり，3 次元柔軟梁よりも複雑なシステムについての制御系設計については依然として解決すべき問題が残っている．そこで，本申請では 3 次元柔軟梁までの実験装置の完成度を上げることに注力している．構成した実験装置と最終的な実験を行うにあたっての問題点については研究の成果において示す.

４．研究成果

（１）低次元化の効果を検証するために表 1 に示すパラメータを持つ対象について数値解析結果を行った.

表 1 対象のパラメータ

Length	1.0 [m]
Width	5.0×10^{-2} [m]
Thickness	2.0×10^{-3} [mm]
Material	Aluminum
Young’s modulus	70 [GPa]
Mass density	2.7×10^{3} [kg/m^3]
Initial state	CCW 60° from +X axis

また，μ 設計法を用いた制御則の導出にあたり必要となる制御変数と制御入力の評価のための重み関数は，制御変数については低い周波数に大きな重み，制御入力については高い周波数に大きな重み設定している．（紙面の制限から，詳細については割愛）また，観測出力として，Y 座標の根本の勾配，中点の座標および勾配，先端の座標および勾配を採用しており，これらは低次元化時の境界変数としても使用している．この観測出力を 0 にするように制御することで，制御目的が達成される．図 3 に「Case A：100 要素でモデルを構築し，それに対して低次元化を施したものを用いて制御則を導出」および「Case B：4 要素でモデルを構築したものを用いて制御則を導出」についての数値解析によって得られた先端の Y 座標についての時刻歴応答を示

す．Case A では，採用モード数を適切に選ぶことによって Case B と同じ次元にしている．

図 3 より明らかなように，ニュートン・オイラー型の運動方程式の次元が同じであっても，多くの要素を用いたものを低次元化したシステムから導出した制御則の方が，少ない要素のものから導出した制御則よりも残留振動を十分に抑制できている．これは少ない要素の場合，モデルを表現する能力が劣化することが起因していると考えられる．同じ次元の運動方程式であるがために，制御則の導出の際のイタレーション計算の時間についても二つのケースにおいて大きな差はなく，それゆえ提案する低次元化手法は有効であることが示された．

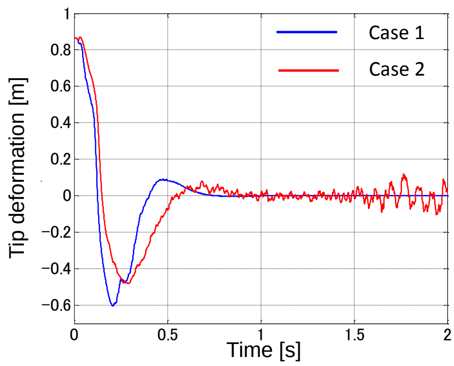

図 3 数値解析による先端変位の比較

さらに低次元化の有効性を示すため，イタレーション計算の比較を行った．要素数を 40 とし，式(9)で示した同じ軸歪みを持つと仮定した隣接する要素数を 10 として，採用モード数を変えて低次元化をしたものと，低次元化をしていないものについての 1 回あたりの計算時間の比較を表 2 に示す．

表 2 計算時間の比較

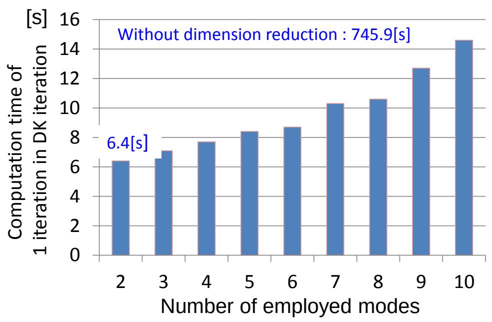

表 2 から明らかなように，採用次数が少なくなるにつれて，イタレーション計算の 1 回あたりの計算時間が減少する傾向にある．これは採用次数が減少することによって，最初に得られるニュートン・オイラー型の運動方程式の次数が減少するためであると考えられる．また，低次元化を施していない場合は 1 回の計算で 745.9[s]の時間を要し，低次元化を施した場合は 10 次モードまで採用したとしても，15[s]程度であるため，提案手法は導出過程において大きな効果があることが明らかになった．

結果的に，まだ十分に確立されていない大変形を有する構造物の制御系の設計について，効率的な方法を示したことで，極めて柔らかい様々な柔軟構造物の制御の可能性を広げる結果である．

（２）3 次元柔軟梁への拡張の有効性を示すため，表 3 に示すパラメータを持つ 3 次元柔軟梁について提案する低次元化手法および制御系設計手法を適用することで制御則を導出し，数値解析をおこなった．

表 3 対象のパラメータ

Cross-sectional shape of the beam	Circle
Length [m]	1.0
Radius [m]	0.001
Material of the beam	Aluminum
Young's modulus [Pa]	70e9
Mass density [kg/m^3]	2700

設計に必要な重み関数については，2 次元柔軟梁と同様の方針で設定した．また，初期状態については，図 4 に示す状態において，$\phi_1 = \phi_2 = \pi / 6$ としている．

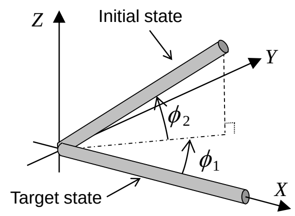

図 4 初期状態設定のためのパラメータ定義

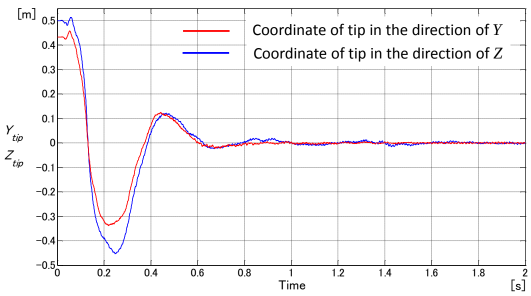

図 5 3 次元柔軟梁への提案手法の適用

図 5 に数値解析における先端の変位（Y座標および Z座標）を示す．図 5 より，両座標とも 1.5 秒程度で目標値である 0 に収束しており，安定化できていることが確認できる．

結果的に，前述の提案手法が 2 次元柔軟梁から 3 次元柔軟梁へと拡張できることを示すことができ，実用的な柔軟構造物の制御系の構築の可能性を高めることができた．

（３）前章のように，DAE からの変形の可能性について検討したところ，拘束方程式が次の形で表されるときに，提案する制御系設計手法及び低次元化手法が適用できること

が明らかになった．

$$\mathbf{C}=\mathbf{A}\mathbf{q}=\mathbf{0} \qquad (13)$$

ただし，$\mathbf{C}$ は拘束方程式を並べた行列であり，$\mathbf{A}$ は定数行列，$\mathbf{q}$ は一般化座標である．式(13)で表される条件は必要十分条件ではなく，他にも条件があると考えられるが，この条件を満たす限り，提案手法は様々な柔軟構造物へと適用可能となる．たとえば，グリッド構造については，図 6 に示すように，グリッドを構成する要素は 3 次元柔軟梁と見なすことが可能であり，それらがピン支持と同様の拘束で接続されている場合には，最終的に得られる運動方程式は，式(1)や式(10)と同じ構造となる．ピン支持での接続を想定することは，このような構造を構成するにあたって実用性を低下させないため，式(13)から得られる結果は，様々な宇宙機の柔軟構造の制御系を構築するうえで重要な条件となる．本申請では本質的な議論を重視したため，具体的な数値解析までに至ることはできなかったが，提案手法をグリッド状の構造に適用することに技術的な困難はないという結論を得ている．また，グリッド状膜構造については，グリッドの細分化により膜構造に近似できることから，十分な計算環境があれば，適用可能であるという結論に至った．

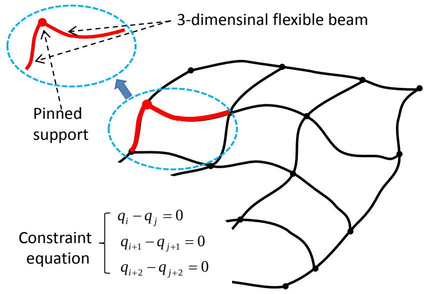

図 6 3 次元柔軟梁で構成されるグリッド構造

（4）実験装置

本申請における提案手法の実験検証のために，図 7 および図 8 のような実験装置を構築した．図 7 は 2 次元柔軟梁についての実験装置であり，レーザ変位計や歪みゲージからの情報によって制御則に必要となる節点変位を計算し，最終的に制御入力を得る．また，柔軟梁に接続した先端質量には小型ガスボンベおよびエアベアリングを搭載し，それによってガラステーブル上に浮上することで重力によるねじりの影響を排除している．

また本実験装置は，構成を変えることで，2 軸の回転ジョイントとそれに接続したモータを有する 3 次元柔軟梁に関する実験装置を構成することも可能である．図 8 にその構成を変えた際の機構部を示す．

各アクチュエータ部およびセンサを用いた計測部については個別の機能確認をしており，簡単な制御系ならば実行可能であるが，提案手法によって得られた制御則を実装するには，処理速度が不十分なシステムであることが明らかになった．そこで，制御システムを変更することで，その改善を試みており，最終的な実験検証は今後の課題である．

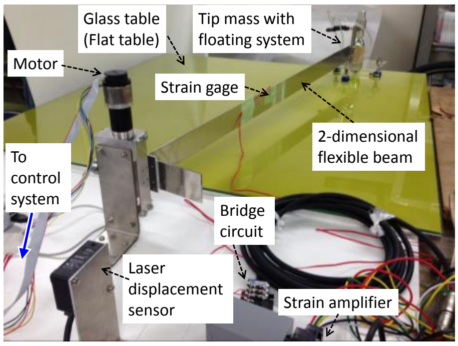

図 7 2 次元柔軟梁に関する実験装置の主要部

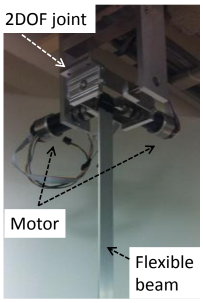

図 8 3 次元柔軟梁に関する実験装置の機構部

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計　0　件）

〔学会発表〕（計　5　件）

①Yoshiki Sugawara, Nobuyuki Kobayashi, Attitude and Vibration Control of Three-Dimensional Flexible Beam by the Use of ANCF Model, The 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, August, 2012

②Yoshiki Sugawara, Koki Takeda, Shinya Otsuki, Parameter Study on the Dimension Reduction Method of ANCF Modelfor Controller Design of Flexible Beam, ECCOMAS Multibody Dynamics 2013, July, 2013

〔図書〕（計　0　件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計　0　件）

○取得状況（計　0　件）

〔その他〕

ホームページ等

６．研究組織

(1)研究代表者

菅原　佳城（SUGAWARA Yoshiki）

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授

研究者番号：１０４２２３２０