

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17994

研究課題名(和文)拘束系の正準理論によるマルチボディシステム解析の並列処理最適化と状態推定への応用

研究課題名(英文)Development of the method for multibody system analysis based on the canonical theory for constrained system applicable to the parallel computation and the state estimation

研究代表者

原 謙介 (Hara, Kensuke)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：70508259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：浮体式生産貯蔵積出設備や浮体式洋上風力発電において、係留や送電等を目的としたケーブル状構造物を介して接続された複数の浮体構造や洋上設備の動揺問題が重要な課題となっている。本研究では、大規模なマルチボディシステムに対し、並列計算や状態推定器の設計へも拡張可能な動力学モデルの構築と運動方程式の導出を試みた。具体的には、時間増分量に着目した要素の回転運動の記述、局所Lagrange multiplier法による並列処理モデルの構築を行い、実験・既存手法との比較により妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In the design of a floating production, storage and offloading (FPSO) unit and a floating offshore wind turbine, it is important to evaluate dynamical behavior of systems with floating structures and devices connected by mooring lines and riser cables for carrying resources, supplying energy and so on.

This study focuses on a multi-body system with huge degrees of freedom and develops a model applicable to the parallel computation and the state estimation techniques. The present model introduces an incremental description of rotation of the body, which ensures a computation accuracy regarding a time step size. In addition, the local Lagrange multiplier method is employed for development of the model applicable to the parallel computation technique. Then, the proposed method is validated by comparisons with experimental results and a conventional method.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：マルチボディダイナミクス 流体関連振動 Rotationless formulation 並列計算 状態推定

### 1. 研究開始当初の背景

近年、海洋でのエネルギー資源開発を目的とした浮体式生産貯蔵設備や浮体式洋上風力発電が注目されている。こうした設備では、係留や送電等に用いられるケーブル状構造物を介して接続された、複数の浮体構造や洋上設備の動揺問題が重要な課題となっている。このような問題では、対象が大規模なマルチボディシステムとなるため、動力学解析の高精度化・効率化が極めて重要になる。また、対象の規模の大きさや安全かつ安定な運用のため、状態推定法のようなメンテナンスに関連した技術の発展も求められている。

### 2. 研究の目的

大規模なマルチボディシステムへの応用を想定し、以下を実施する。

#### (1) 回転自由度導入の回避による要素モデル高精度化・高効率化

計算負荷の増加と精度劣化の原因となる要素の回転を状態量として使用しない定式化により要素の定式化を行う。

#### (2) 拘束系の力学理論の応用による運動方程式の導出と並列処理モデルへの応用

全体モデルの構築の際、以下に示す代数方程式(意図的な拘束)を導入し、拘束系の正準理論により運動方程式を導出する。

##### ①非線形項を簡略化するための代数方程式:

弾性力や摩擦力などの計算を効率化

##### ②冗長自由度付加のための代数方程式: 自由度の拡大により運動方程式を簡略化

この定式化は、一切の近似を用いずに各方程式を計算効率化や並列処理モデルへの変換を行うことを目的としている。

#### (3) 画像処理による3次元計測システムの構築

縮小模型を制作し実験を行う。ステレオ撮影と画像処理によって3次元変位を測定する。

#### (4) カルマンフィルタを用いた状態推定器の設計

導出した運動方程式を対象に非線形性を考慮した拡張カルマンフィルタ、平衡点まわりで線形化を施したモデルを用いた線形カルマンフィルタをベースとした状態推定器の設計を行う。

導出した運動方程式をベースとし、非線形モデル、線形化モデルを対象としたカルマンフィルタを用いた状態推定器の設計を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 回転自由度導入の回避による要素モデル高精度化・高効率化

構造系の定式化に状態量として回転を用いないRotationless formulationを導入し、運動エネルギー(慣性力)に起因した非線形項による計算負荷の増加と精度劣化の抑制を試みる。また、流体系の定式化には、流体力(波浪外力, 流体慣性力, 抗力)を構造系の状態量の関数として表すことができる修

正 Morison モデルを導入する。

#### (2) 拘束系の力学理論の応用による運動方程式の導出と並列処理モデルへの応用

Rotationless formulationによって定式化されたモデルに「2. 研究の目的」で示した2種類の拘束条件を適用し、拘束系の正準理論を用いることで並列処理にも適用可能な運動方程式(微分代数方程式)の導出を行う。ここで導く運動方程式は、各物理量の時間発展を計算するための常微分方程式と計算の効率化(数式の簡略化・並列処理化)のための代数方程式(意図的な拘束条件式)から構成される微分代数方程式である。

#### (3) 画像処理による3次元計測システムの構築

洋上浮体式構造物の係留法として一般的な方法である弛緩型係留法を想定した実験を行う。波浪を模した入力によりチェーンの端部を加振し、空間運動をステレオ撮影により計測し、画像処理によって3次元変位を取得する。

#### (4) カルマンフィルタを用いた状態推定器の設計

(2)で導出した運動方程式を数学モデルとし、①系の非線形性を考慮するための拡張カルマンフィルタ、②静力学解析により算出した平衡点からの微小振動を表す線形化モデルを利用した線形カルマンフィルタを用いた2種類の状態推定器を設計する。時間離散化モデルの導入についても検討し、幅広い対象に対して適用可能な方法の構築を目指す。

### 4. 研究成果

#### (1) 構築したマルチボディシステムの解析手法の概要

対象となるシステムは、全体モデル→サブシステム→要素、という順番に細分化されていく。複数のサブシステムを拘束要素によって組み合わせ、全体モデルを構築するという過程はパーツから機械アセンブリを組み立てるといった概念に近く、サブシステムから要素というのは、パーツをメッシュ、あるいはバネマス系などで(計算のために)離散化するという概念に近いものである。

まず着手したのは、サブシステム(あるいは要素)の剛体回転の表現法である。回転自由度に関しては、計算負荷や精度劣化という観点から、特に大規模なマルチボディシステム解析のボトルネックとなっている問題であり、分野の国際動向を調査すると国内よりもはるかに盛んに研究が行われている。本研究で着目したのは、最終的に離散化して数値積分を行うという観点からモデル構築の段階から回転の時間離散表現を導入し、その後運動方程式を導出するという方法である(文献(1)Bauchau et. al, 2013)。この方法では、角速度と角度パラメータ(オイラー角等)との間に存在する代数関係式に精度保証付きの時間離散化を施すというもので、実質的に

数値積分の際に角度パラメータを独立変数とする必要がなくなる。特に、陰解法により数値積分法を行う際には原理上計算コストを半分程度にまで縮小可能である。この特徴は、特に以下で示す「位置拘束式」を用いたマルチボディシステム解析において極めて有用である。

また、サブシステムに分割するという特徴に着目した弾性要素部の効率的な計算法についても着手した。この方法では、全体系の構成に用いる全体座標とサブシステム（あるいは要素）の変形を記述するための要素座標を独立した自由度として導入し、両座標系間の代数関係を拘束式として矛盾を除去するというものである。これにより、弾性変形の計算を大幅に短縮することが可能になるとともに、従来研究では導入が難しかった変形モデルの導入が可能になった（文献(2)Hara, Kamiya, 2016）。

一方、構成要素（サブシステムあるいは要素）から全体系を構築する際には、「拘束」関係に着目したモデル化法とそれを応用した並列処理法の構築に着手した。国内の機械力学分野で用いられている方法は、一般に「力」により細分化された構成要素を接続するというものであり、これは拘束系の力学という観点からは「加速度」を使った接続と等価である。しかしながら、一般に「加速度」による連成関係は運動方程式の複雑化や構成要素間の幾何学的な整合性を満たさないといった問題を招くため、本研究で対象とするような多数の構成要素からなる対象の3次元問題への適用は現実的には不可能といえる。よって、本研究では構成要素間の「位置」関係を利用して接続を行う方法（以下、位置拘束式と呼ぶ）を採用したが、①一般的な常微分方程式の数値積分法が適用できない、②運動方程式が本質的に不安定（数値的）になる、という問題を解決する必要があった。そこで、①に対しては位置拘束式の収束プロセスを組み込んだEnergy-momentum法（文献(3)Betsch & Steinmann, 2002, 文献(4)Hara, 2017）に時間に関して重み付き積分を組み合わせた数値積分法を構築した。また、②に関しては、数値積分におけるタイムステップを代表時間とした運動方程式の各項のオーダの無次元化（文献(5)Bauchau, et al., 2009）を行うことで数値的不安定化の回避に成功した。

さらに、この位置拘束式の設定の際に要素接続のための仮想的な接続点の自由度を設ける局所Lagrange multiplier法（文献(6)Park, et al., 2000）を導入することで並列処理が可能なモデルとすることができた。しかしながら、導出したモデルは、一般的に並列処理が可能な形にはなっていないものの、上記のEnergy-Momentum法をベースとした方法以外の数値積分法や計算環境（GPUやCPUといったアーキテクチャ、さらにはプログラミング等の開発環境など）、あるいは対象そ

のものが持つ物理的特徴への依存性が強いことも明らかとなった。学術研究という観点からは、可能な限り一般的な形でモデルの有効性（精度・効率等）を示すことが重要と考えられるが、想定される数値積分法の種類や計算環境が多岐にわたることから短期間・少人数の研究体制での実施には限界があると判断した。この点は今後の継続課題としたい。

## （2）従来法ならびに実験との比較による妥当性の検証

洋上浮体式構造物の係留法として一般的な方法である弛緩型係留法を想定したカタナリー状のチェーン（図1）をベンチマーク問題とし、（1）で述べたモデルの妥当性を検証する。基本的な問題であるが、提案手法の妥当性を示しやすい問題であるため、この例を対象に結果を示す。なお、より複雑な問題は代表者らによる文献(7)（池内ら, 2016）に適用例が示されている。

剛体の回転パラメータにオイラー角を用いた一般的な定式化法による結果を従来法とする。実験では、CMOSカメラによりマーカの動きを計測し、動画データ（100fps）から変位を導出した。（文献(8)霜島ら, 2018, 今夏発表予定）

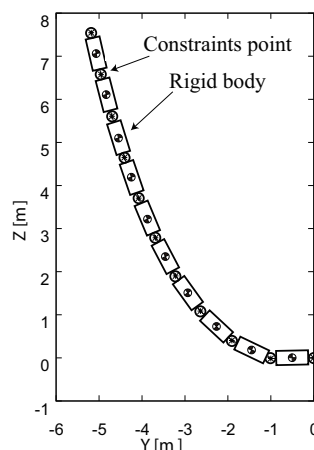


図1 係留チェーンのベンチマーク問題（奥行き方向にX軸を取っている）

図2にチェーン上端側にX方向の正弦波入力（振幅0.15 m, 振動数3 Hz）を加えた場合の計算結果（下端の要素の重心座標の開始3秒まで）を示す。従来法と提案手法の間に差はほぼ確認できず、誤差を計算したところ0.1%未満であった。一方、図2の計算に要した時間とNewton-Raphson法を用いて陰解法で問題を解く際に要した反復回数の平均を表1に示す。「3. 研究の方法」で述べた通り、回転パラメータを独立変数から取り除くことによる自由度の低減効果により、計算時間がほぼ半分となっている。また、解の収束までの反復回数に変化はないことから、自由度を低減させても解の収束性が保たれていることがわかる。

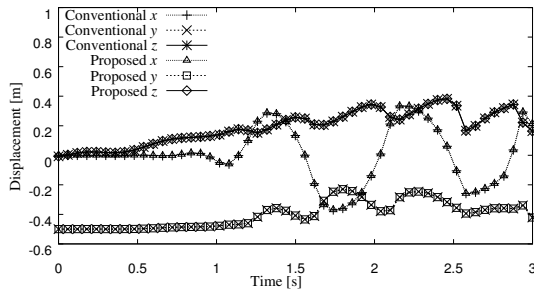
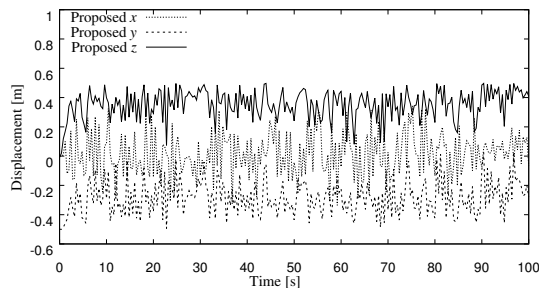


図2 提案手法と従来法の比較

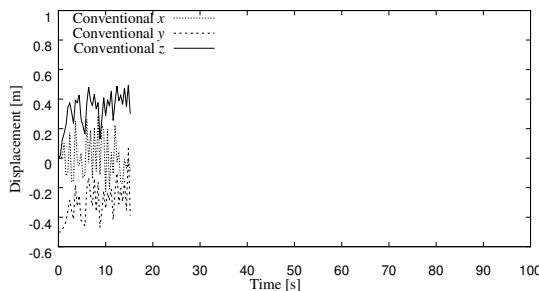
表1 図2の計算に要した時間と解の収束までの反復回数

	計算時間	平均反復回数
従来法	39.5	3
提案手法	20.5	3

次に、数値的安定性を検証するため図2よりもさらに長時間の計算を行なった結果を図3に示す。ここで、(a)は提案手法、(b)は従来法による結果である。従来法が15秒過ぎに発散しているのに対し、提案手法では100秒まで計算ができていことが分かる。特に、精度保証が付いているとはいえ、基本的には近似モデルである提案手法の方が長い時間のシミュレーションが可能であるという点は興味深い。



(a) 提案手法



(b) 従来法 (オイラー角)

図3 長時間のシミュレーションによる数値的安定性の検証 (計算条件は図2と同じ)

次に、Z方向に正弦波入力 (振幅 8.5mm, 振動数 1.95Hz) を加えた際の解析と実験の比較データ (Z方向) を図4に示す。実験結果は動画データの画像処理によりえられた変位である。変動振幅・振動周期に関しては良好な一致が得られているが、0.01程度のオフセット量が含まれており、それが結果のずれ

となっている。このずれは静解析でも確認されたことからキャレブレーション段階で生じている可能性が考えられる。

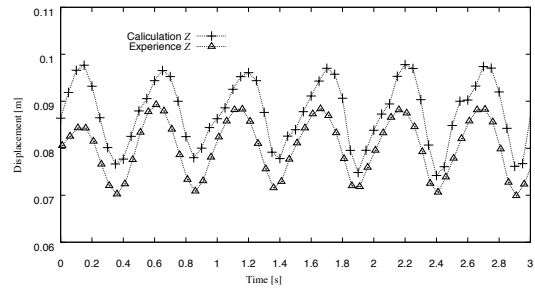


図4 提案手法と実験結果の比較

### (3) 状態推定器の設計

本研究で構築したモデルは時間離散系の使用を前提としているため、状態推定法としては拡張カルマンフィルタの適用を試みた。しかしながら、本研究の特徴である「位置拘束」を付随させた形の微分代数方程式は、この方法を直接導入するには適さず、拘束条件を消去したモデルを使用することが望ましいことが分かった。拘束式を除去するには拘束を「加速度」レベルに変更するのが自然であるが、本節の(1)で述べた通り、運動方程式が極めて複雑な形になることに加え、構成要素を厳密に結合することができなくなるといった問題が予想される。また、局所Lagrange multiplierを用いることの重要な利点である並列処理における計算工程の効率化の効果も限定的になる。拘束系を使用するという定式化のメリットを最大限に活かすには使用する微分代数方程式を状態推定法に合わせて調整する必要があるが、一般的な体系化 (汎用性が高いもの) が現時点では困難なため、今後の課題としたい。

### (4) まとめと課題

研究課題の第一の目的である、「大規模マルチボディシステムを想定した解析モデルの確立」に関しては概ね達成できたと考えられる。実際、構築したモデルは従来法で課題であった回転運動の扱いや数値的安定性・計算効率について十分な改善が確認でき、並列処理も想定された形となっている。ここで示した例は単純な例のみであるが、位置拘束で全体系を組み立て可能な形で手法を構築したことにより、各構成要素の位置情報を用いるだけでシステムティックに多数の浮体やチェーンからなる問題へ拡張が可能である。しかしながら、実際に並列計算や状態推定を行う際には、このモデルからさらに解析対象や計算環境に依存した調整を行うことがパフォーマンスの最適化のために必要であることも分かった。対象が複雑になるほど汎用性は重要であるが、対象に依存する最適化とはトレードオフの関係になるため、汎用性と性能を最大化するための一般的な方法論に関する検討を今後の継続課題としたい。

<引用文献>

- (1) O. A. Bauchau, et al., Intrinsic time integration procedures for rigid body dynamics, Transactions of the ASME, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 8 (2013), 011006.
- (2) K. Hara, H. Kamiya, Development of a calculation procedure for the ANCF shear deformable plate element by introducing local element coordinate systems, The 4th Joint International Conference on Multibody System Dynamics, (2016-5,6), Montreal, Canada.
- (3) P. Betsch, P. Steinmann, Conservation properties of a time FE method-part III: Mechanical systems with holonomic constraints, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 53 (2002), pp. 2271-2304.
- (4) K. Hara, Application of a DAE approach to Nonlinear Sloshing Problems, 8th ECCOMAS Thematic conference on Multi-body dynamics, (2017-6), Prague, Czech Republic.
- (5) O. A. Bauchau, et al., Scaling of constraints and augmented Lagrangian formulations in multibody dynamics simulations, Transactions of the ASME, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 4 (2009), 021007.
- (6) K. C. Park, et al., A localized version of the method of Lagrange multipliers and its applications, Computational Mechanics 24 (2000), pp. 476-490.
- (7) 池内公平, 原謙介, 山浦弘, 係留チェーンの数値解析モデルの構築と動的挙動の解析, 日本機械学会関東支部第 22 回講演会, (2016-3), 0S1304, 東京.
- (8) 霜島和明, 原謙介, 山浦弘, 離散時間系における回転の近似表現を用いたマルチボディシステムの動力学解析法の構築と実験的検証, Dynamics and Design Conference 2018, (2018-8), 東京(予定).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) Kensuke Hara, Masahiro Watanabe, Simulation and measurement of a nonlinear sloshing force on a rectangular tank with shallow water depth, Proceeding of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 4, Paper No. V004T04A005, (2015), doi:10.1115/PVP2015-45770. (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

- (1) 池内公平, 原謙介, 山浦弘, 係留ケーブルの動的挙動の数値解析, Dynamics and Design conference 2015, (2015-8), 弘前

- (2) Kensuke Hara, Formulation of a sloshing-structure interaction problem as a constrained system, The 11th international conference on Flow-Induced Vibration, (2016-7), The Hague, The Netherland. (査読有)

- (3) 霜島和明, 原謙介, 山浦弘, 離散時間系における回転の近似表現を用いたマルチボディシステムの動力学解析, Dynamics and Design Conference 2017, (2017-8), 豊橋.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 謙介 (HARA, Kensuke)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号 : 70508259