

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560268

研究課題名(和文)長さ変化を伴う柔剛混在多体系動力学における統一的解析手法の確立

研究課題名(英文) Numerical Approach for Rigid-Flexible Multibody Systems with Time-Varying length

研究代表者

曄道 佳明 (Terumichi, Yoshiaki)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：50262118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：系の固有特性が時変である長さに変化する柔軟体を対象とした運動解析手法の開発は、この分野の先端的かつ未着手な研究課題といえる。本研究では、柔軟多体系、および柔剛混在系への拡張を視野に入れ、計算効率が高く高精度な近似解法をマルチボディシステムの運動解析手法を開発したものである。系の無次元化および多重尺度法をAbsolute Nodal Coordinate Formulationに適用し、大变位、大回転を含む柔軟体の挙動解析を実現した。今般平面問題における精度検証を実験結果との比較において行い、その有効性が実証された。3次元問題への適用および柔剛混在系における統一的取り扱いに課題を残している。

研究成果の概要(英文)：Development of motion analysis technique that targets the flexible body with large displacement, large rotation and time-varying length has been completed for planar motion of the flexible body. For extending to 3D motion and rigid-flexible systems, the high accurate and low calculation cost technique has been developed as the approximate method for the total numerical approach to the multibody systems. The non-dimensional approach and multiple time scales were introduced to the Absolute Nodal Coordinate Formulation. The accurate verification has been confirmed in comparison with the experimental results. The validity of the proposed method was demonstrated.

研究分野：機械力学

キーワード：マルチボディダイナミクス 柔軟多体系 時変系 計算力学

## 1. 研究開始当初の背景

マルチボディダイナミクス(多体系の動力学)の学術的発展はまだ日が浅いが、現在の研究の興味は柔軟多体系へと移行してきた。代表的なアプローチとして、Absolute Nodal Coordinate Formulation が挙げられる。この手法の特徴は、柔軟体の剛体モードとしての運動を正確に記述し、かつ大変位、大変形を伴う柔軟性を考慮できる点にある。

今後着目されるべき先端課題として、時変柔軟多体系、柔剛混在多体系の運動解析手法の開発が挙げられる。柔剛混在系では、振動系として高い振動数と低い振動数が存在することで、その数値解析を困難にさせる。解の精度を保つために、多くの計算コストを犠牲にしなくてはならない。したがって、数値解法を見据えたモデリングと定式化を考慮しなくてはならず、マルチボディダイナミクスとしての総合的課題といえる。時変柔軟多体系の運動解析については、系の固有特性が時変であるため、計算コストが膨大となる課題を抱える。このような時変系としての柔軟体を含む柔剛混在多体系の運動解析手法の開発は、まさにこの分野の先端的かつ未着手な研究課題といえる。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究期間内に時変系としての柔軟体を含む柔剛混在多体系の運動解析手法の開発を、検証を含めて終了させる。まず、柔剛混在多体系の多重時間尺度解析手法を確立する。これは、多重時間尺度を導入することにより、系の振動的性質を統一的に扱うことができるようにするものであり、高い振動数と低い振動数の混在を、無次元時間尺度の中で見かけ上均一化する。次に、すでに検討中である固有特性が時変である柔

軟多体系の解析手法(現在は平面運動)と結合し、総合的な時変系としての柔軟体を含む柔剛混在多体系の運動解析手法として確立する。

## 3. 研究の方法

この手法の確立のために、次のような手順を経ることを計画し研究が進められた。

- (1) 時変な固有特性を持つ柔剛混在多体系に対する高精度、高速な数値解析手法の確立
  - (2) 多重尺度法の導入による精度管理された近時解法の確立
  - (3) 基礎実験の実施
  - (4) 数値解析結果と実験結果との比較による提案手法の妥当性の検証
  - (5) 3次元問題、柔剛混在系への拡張
- これらの研究の遂行は、研究室環境にて行われた。

## 4. 研究成果

- (1) フローティングフレーム法(FFRF)への Variable Finite Element 法の適用(FFRF-VFE)

軸方向に移動するはりを図1のように考える。慣性系と物体座標系を設定し、物体座標系の方向を記述する回転角を考える。要素座標系にて記述される、はり上の任意点の移動速度は次式のように表される。

$$\dot{x} = \frac{v}{n} \xi \quad \left( \xi = \frac{x(0)}{l_e(0)} = \frac{x(t)}{l_e(t)} \right)$$

この表現を用いることにより時間微分の演算子は次のように記述される。

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial}{\partial x}$$

この座標を FFRF に適用すると、要素変位は次の位置ベクトルで表される。

$$\mathbf{r}_{(x,t)} = \mathbf{R}_{(t)} + \mathbf{A}_{(t)} \mathbf{S}_{(x,t)} \mathbf{e}_{(t)}$$

ハミルトンの原理を用いて系の支配方程式を導くと次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_s + \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v + \mathbf{Q}_l \\ \gamma \end{bmatrix}$$

この支配方程式は微分代数方程式であるが、時間依存する係数を持つ項が存在する特徴を持つ。横変位と回転運動において、はり要素は  $\mathbf{Q}_v$  と  $\mathbf{Q}_l$  で示されるコリオリの力の作用を受け、非線形性を有する質量マトリクスとコリオリの力を計算するために 18 の形状積分を伴う。

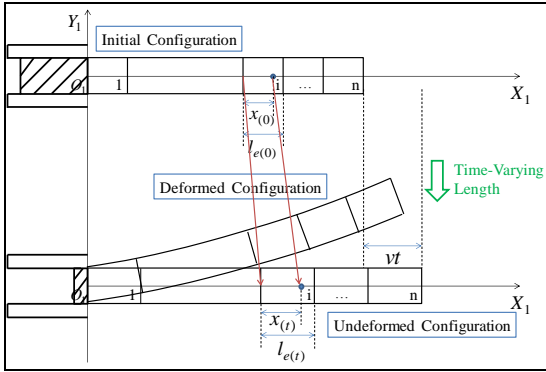


Fig. 1 Variable domain FE model

### (2) FFRF 法への 多重尺度法 (MTS) の適用 (FFRF-MTS)

摂動パラメータのオーダー評価によって、近似的数値解を求める。このために多重尺度法を導入し、時間と長さの代表値を設定し、無次元化された方程式を導出する。2 つの異なる時間尺度と空間座標を設定する。

$$t^+ = \int_0^t \frac{1}{L^*(\tilde{t})} d\tilde{t}, \quad \tilde{t} = \varepsilon t, \quad \xi = \frac{x}{l_e^*(\tilde{t})}$$

早い時間尺度  $t^+$  は、はりの基準モードの固有周期に対応する。緩やかな時間尺度  $\tilde{t}$  は、はりの長さ変化速度に対応する。したがって、早い時間尺度に比べてはるかに変化率は小さい。これらを用いると、時間微分演算子は以下のように表される。

$$\frac{d}{dt^*} = \frac{1}{n^2} \frac{1}{l_e^{*2}} \frac{\partial}{\partial t^*} + \varepsilon \left[ \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} + \frac{1}{n} \frac{1}{l_e^*} \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right]$$

$\varepsilon$  が充分小さいとき、一般座標と系の拘束式は、 $\varepsilon$  を用いて次のように展開される。

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_1, \quad \mathbf{C} = \mathbf{C}_0 + \varepsilon \mathbf{C}_1$$

2 つの異なる非線形時間尺度導入すると、運動方程式は、早い時間尺度、緩やかな時間尺度によって支配される。支配方程式は、オーダー  $O(\varepsilon^0)$  において、FFRF-MTS0 1 次のオーダー  $O(\varepsilon^1)$  において、FFRF-MTS1 と呼ばれる。

### (3) 従来法と提案手法との比較

大回転、長さ変化を伴う柔軟はりの平面運動間において、FFRF-MTS0, FFRF-MTS1 と、FFRF-VFE との比較を行う。図 2 は解析モデルを示している。はりの支持部は回転自由な結合であり、はりには強制角変位が与えられる。

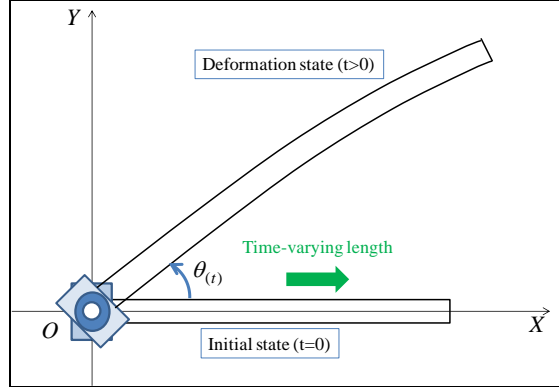


Fig. 2 Analytical model

図 3 は、はり先端の曲げ変位を示している。このときはりの長さ変化速度に対応する無次元パラメータは  $8.0 \times 10^{-4}$  であり、これは有次元で  $v=0.01$  [m/s] に相当する。図 4 はこの無次元パラメータ  $\varepsilon$  と、それぞれの数学モデルに対する計算時間の比較を行った結果である。

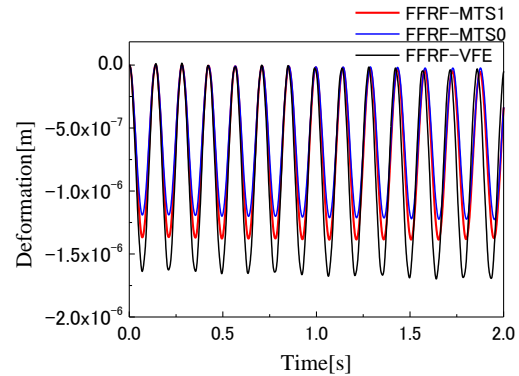


Fig. 3 Bending deformation

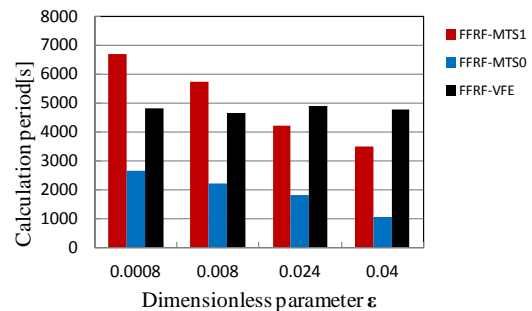


Fig. 4 Calculation period

#### (4) 成果

- ① 長さ変化を伴うはりの運動に対する有限要素法を FFRF (FFRF-VFE) に拡張し、大変位、大回転問題に対応する数値解析手法を開発した。
- ② 2 種の時間尺度を用いた多重尺度法を FFRF に導入し、新しい有限要素解析手法を提案した。得られる支配方程式をオーダー評価し、第 0 近似および第 1 近似の支配方程式を導いた。従来方法の比較の中でこの提案手法の妥当性を考察し、その適用範囲について明示した。
- ③ 単純化された実験装置による実験を行い、この手法の妥当性を確認した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

H. Hayashi and Y. Terumichi, Numerical Approach for flexible body motion with large displacement and time-varying length, The 7<sup>th</sup> Asian Conference on Multibody Dynamics, Pusan, Korea.

[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

<http://pweb.cc.sophia.ac.jp/terumichi/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

曄道 佳明 (TERUMICHI, Yoshiaki)  
上智大学・理工学部・機能創造理工学科・教授

研究者番号 : 50262118