

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540044

研究課題名(和文) 不連続性と極端な変形を許容する連続体力学シミュレーションのための実時間数値積分

研究課題名(英文) Realtime Integration Schemes for Continuum Mechanics Simulation Allowing Nonsmoothness and Extreme Deformations

研究代表者

菊植 亮 (Kikuwe, Ryo)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90362326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦・接触などの力学現象は不連続関数を含む微分方程式(微分包含式)として表現できるが、一般にそれらはシミュレーションにおける取り扱いが難しい。これらの現象を包含して、かつ、変形する連続体が含まれる場合、さらに、そのシミュレーションを実時間で行う必要がある場合は、超多自由度非線形連立方程式を数十分の一秒毎に解く必要がある。このためには正確さよりも安定性を重視した計算技術が必要であり、従来のオフライン数値解析のための計算技術とは全く異なる観点からの技術開発が必要である。本研究では、上記のような問題認識にもとづいた要素計算技術と数学的ツールの研究開発を網羅的に行った。

研究成果の概要(英文)：Mechanical systems involving friction and contact are represented by differential equations involving discontinuities, which are referred to as differential inclusions. They are mathematically elegant but are cumbersome in numerical simulations. Moreover, if the system also involves deformable continua and if the simulation needs to run in realtime, one must solve a huge system of nonlinear equations every timestep, which is typically about 0.001 to 0.03s. Computational techniques needed for such applications should assure the stability rather than quantitative accuracy or physical faithfulness. Such requirements are different from those for conventional applications of simulation software such as those for offline numerical analysis. In this research project, we have developed various elemental computational techniques and mathematical tools to deal with mechanical systems involving continua and discontinuities for realtime simulation.

研究分野：制御工学

キーワード：実時間シミュレーション コンピュータグラフィックス 非線形連立微分包含式 数値積分

1. 研究開始当初の背景

摩擦・接触などの力学現象は不連続関数を含む微分方程式(微分包含式)として表現できるが、一般にそれらは数値計算やシミュレーションにおける取り扱いが難しい。これらの現象を包含して、かつ、変形しうる連続体が含まれる場合、さらに、そのシミュレーションを実時間で行う必要がある場合は、数値的に悪条件な多自由度非線形連立方程式を数十分の一秒毎に解く必要がある。このためには正確さよりも安定性を最重要視した計算技術が必要である。このような技術を実現するためには、従来の構造解析用ソフトウェアなどのための数値解析技術とは全く異なる観点からの研究開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記のような問題認識にもとづき、不連続性を含む連続体力学系のシミュレーションのための新しい計算技術群を確立することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的に沿ったさまざまな要素計算技術と数学的ツールの研究開発を網羅的に行った。理論的・解析的考察においては数式処理ソフトウェアを用いた。得られた単純な数式の数値的性質の調査のためには数値計算ソフトウェアを用いた。また、より実用に近い、実時間・相互作用的な計算プログラムの開発はC言語を用いた。

研究期間全体にわたって、大学院生および学部生5名を研究協力者とした。また、理論的基盤の整備のためには国外の研究者とも

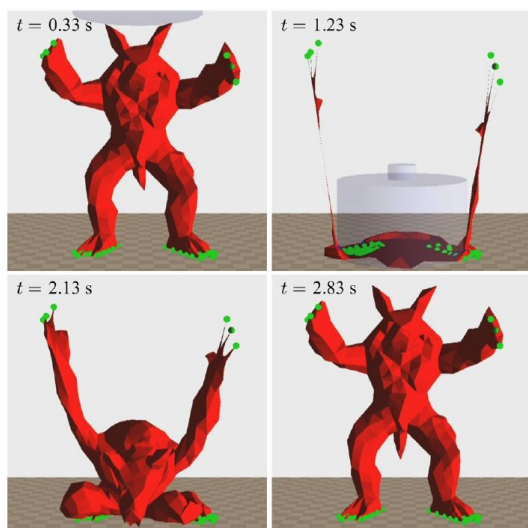


図1: 成果(2)の技術による実時間シミュレーション。弾性体を外力によって平坦になるまで押しつぶしたような状況でも、安定して計算を続行できる。また、外力を取り除いた後も、安定した挙動で元の形状を復元する。

協力して研究を行った。

4. 研究成果

(1) 摩擦接触力を受ける柔軟連続体のための摩擦モデル

研究代表者らは以前、摩擦と接触を含むシステムの動特性を、不連続な性質を失わずに連続な常微分方程式であらわす手法を提案した。それを、多数の節点から構成される連続体モデルに適用する手法を考案した。このようなシステムは不連続関数を含む偏微分代数方程式として表現されるが、本研究では、その式の一部をテイラー展開して近似し、陰的積分法で時間積分するという手法を提案した。この成果については学術講演会で発表済みである。

(2) 極端に変形する柔軟体のシミュレーションのための数値積分法

実時間シミュレーションにおいては数十分の一秒毎に非線形の連立方程式を解く必要があるが、計算が発散したり、節点がパルス状に飛び出したりするような不自然な挙動を示したりすることがある。本研究では、この問題を解決するための非線形連立方程式の求解法を提案した。

提案手法は、非線形連立方程式を線形近似したうえで QMR (Quasi-Minimum Residual) 法によって解き、その後、線形近似によって生じた誤差を補正するという手法である。図1に、この成果を用いた弾性体モデルの実時間シミュレーションのスナップショットを示す。モデルが平坦になるまで押しつぶされた状況でも安定して計算を継続できる。従来の同様の手法と比較して、物理的に不自然な挙動が少なく、安定した挙動を実現することができる。

本期間中には、詳細な数値実験と文献調査を行った上で、論文を完成させた。この論文

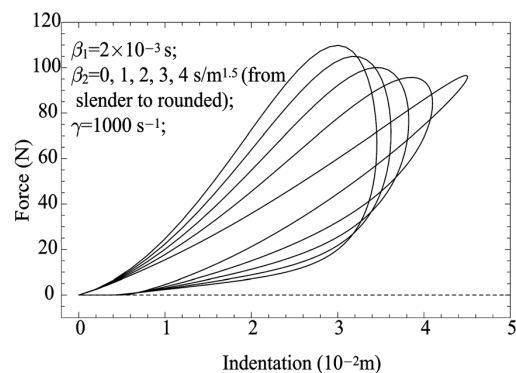


図2: 成果(3)。生体材料などの柔軟物が接触・離脱を繰り返す際の、変位と反力の時間変化をよく再現する微分代数包含式を発見した。

は論文誌に採録済みである。

(3) 柔軟体の非線形接触力モデル

物体と物体が接触したり離脱したりする状況において、変位と力の関係は不連続性をもつ。また、その関係は履歴にも依存する。特に生体材料においては、変位と反力の関係が非線形であり、また、粘性の影響で、反力がゼロになったとき（離脱時）にも変位がゼロにならないことがある。本研究では、接触・離脱の不連続変化と、ヒステリシスを持つ非線形弾性を兼ね備えた接触力モデルを提案した。この接触力モデルは単純な微分代数包含式であり、また、この微分代数包含式は簡単な操作で常微分方程式と等価変換できる。この成果については学術論文として発表済みである。

(4) 転がり面接触摩擦モデル

弾性体が他の物体と面で接触し、高速な転がりと滑りが発生する状況のシミュレーションは、節点毎に接触力を計算する方法では実現しにくい。この状況の例として、走行と停止を繰り返す自動車のタイヤと路面との間の相互作用が挙げられる。本研究ではこれ



図3：成果(4)の技術を実装したドライビングシミュレータ

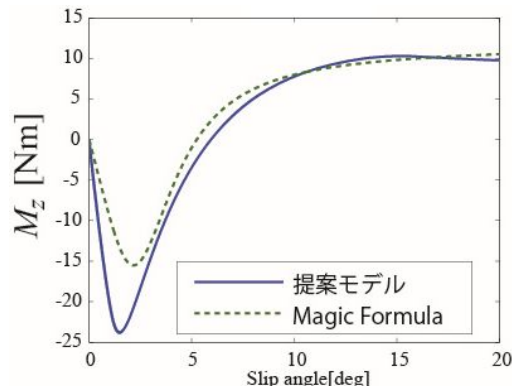


図4：成果(4)で得られた力学モデル（「提案モデル」）の出力値と、既存の実験式（マジックフォーミュラ）の出力値の比較。マジックフォーミュラに十分に近い特性を示す数式（モデル）を得ることができた。

に焦点を絞り、タイヤと路面の間の摩擦力（縦力・横力・セルフアライニングトルク）を力学ベースのモデルで再現する方法について検討を行った。

タイヤが発生する反力は、実験データをフィッティングして得られた実験式で与えられることが多い。従来研究により、「マジックフォーミュラ」と呼ばれる十分に信頼性のある実験式がすでに得られているが、その物理的意味は不明確であった。物理的意味が明確な式の積み上げで同様の計算結果を出力することができれば、より拡張性が高く、幅広い状況に対応できるシミュレータが実現できると期待できる。

本研究期間内では、研究代表者が近年考案したタイヤの物理モデル（偏微分代数包含式）に、いくつかの非線形項を組み合わせることで、その出力値をマジックフォーミュラの出力値に近づけることが出来た。この結果は学術講演会で発表済みである。

(5) ラグランジュ未定乗数の拡張

両側拘束（等式拘束）をうける力学システムは、ラグランジュ未定乗数を含んだ運動方程式として簡潔に定式化できることが知られている。しかし拘束が不等式拘束である場合、すなわち、片側接触やクーロン摩擦を含む場合は、統一的な記述の方法がなく、特に、連続時間領域における解析が面倒であった。本研究ではこのような力学システムを、有界なラグランジュ未定乗数と「法錐（Normal Cone）」を含んだ簡潔な数式で表現する手法を提案した。

また、その式を数値計算するための手法として、不連続性を維持したまま不等式拘束を緩和する手法を提案した。この手法は、Baumgarte 安定化法と呼ばれる古典的な手法の自然な拡張となっている。

本研究期間では、詳細な文献調査を行った上で、上記の二つの数学的手法についての理論体系を確立し、論文を完成させた。この論文も論文誌に掲載済みである。これらの手法は摩擦接触を含む力学システム全般の解析やシミュレータ開発のための理論的基盤となると期待できる。

$$M(q)\ddot{q} + \Phi(q, \dot{q}, t) = \begin{bmatrix} J_v(q) \\ \frac{\partial \Psi_p(q)}{\partial q} \end{bmatrix}^T \lambda$$
$$\begin{bmatrix} J_v(q)\dot{q} \\ \Psi_p(q) \end{bmatrix} \in - \lim_{\epsilon \rightarrow +0} \mathcal{N}_{\mathcal{F}}^{U_\epsilon}(\lambda)$$

図5：成果(5)の成果として得られた運動方程式。片側摩擦接触を表現できる。古典的な等式拘束付きの運動方程式の自然な拡張となっている。

(7) 「バネ剛体モデル」による長尺・膜状・ソリッド物体の表現

研究代表者はかねてより、ひもなどの柔軟長尺物体のシミュレーション手法の研究を行ってきたが、本研究期間ではこの手法を拡張し、薄膜状物体や薄肉物体、中実物体など、幅広い幾何形状の弾性体に対応できる柔軟体モデル化手法を考案した。このモデルでは、節点は質点ではなく、慣性モーメントを持つ剛体要素として定義される。提案モデルは、これらの剛体要素を、曲げ、ねじり、引っ張りの弾性力を発生するバネで結合したものである。このモデルを四元数をベースとした多自由度の運動方程式として表現し、陰的積分法で数値積分する手法を確立した。この成果については2016年6月の学術講演会で発表予定である。

(6) バリッジ・ノポフモデルのための積分法

摩擦力を受ける一次元の連続体モデルとして知られる「バリッジ・ノポフモデル」を後退オイラー法で時間積分する計算手法を開発した。この成果は学術論文誌に掲載済みである。

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4件)

Ryo Kikuuwe: "A Time-Integration Method for Stable Simulation of

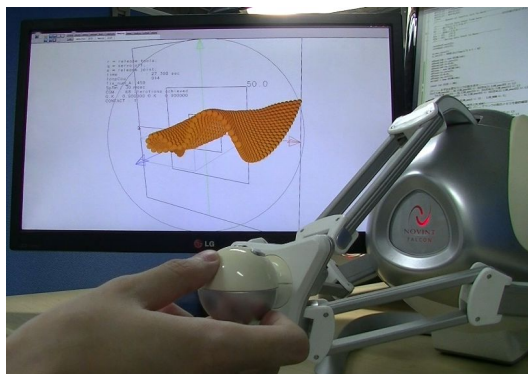


図6: 成果(7)の計算技術による実時間シミュレーション。

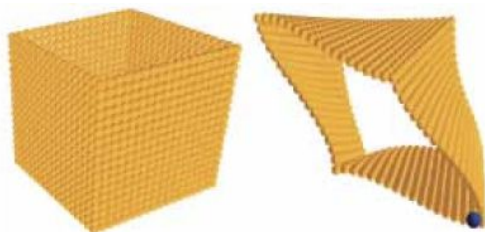


図7: 成果(7)の計算技術によって実現された物体の変形。

Extremely Deformable Hyperelastic Objects," The Visual Computer, doi:10.1007/s00371-016-1225-0, April 2016.

Ryo Kikuuwe and Bernard Brogliato: "A New Representation of Systems with Frictional Unilateral Constraints and Its Baumgarte-Like Relaxation," Multibody System Dynamics, doi: 10.1007/s11044-015-9491-6, December 2016.

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "Backward Euler Simulation of One-Dimensional Burridge-Knopoff Model of Earthquakes with Set-Valued Friction Laws," Advances in Computational Mathematics, Vol.41, No.6, pp.1039-1057, December 2015.

Xiaogang Xiong, Ryo Kikuuwe and Motoji Yamamoto: "A Contact Force Model with Nonlinear Compliance and Residual Indentation," Transactions of ASME: Journal of Applied Mechanics, Vol.81, No.2, Article 021003, February 2014.

[学会発表](計5件)

野澤勇貴, 菊植亮: "実時間シミュレーションのための曲げねじりに対応するばね剛体モデル", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2016年6月発表予定。

東誠人, 菊植亮: "柔軟タイヤの転がり面接触摩擦モデルとMagic Formulaの比較", 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2015)論文集, 3H3-5, 2015年12月。

Ryo Kikuuwe and Bernard Brogliato: "Lagrange Multipliers and Baumgarte-like Relaxation for Frictional Unilateral Constraints," 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3L2-03, 2015年9月。

杉本正将, 菊植亮: "柔軟体の変形シミュレーションにおける摩擦接触モデルの改善", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, 1A1-M01, 2015年5月。

岡文香, 菊植亮, 山本元司: "摩擦接触を伴う柔軟体の変形シミュレーション", 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2N1-2, 2013年9月。

[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://rk.mech.kyushu-u.ac.jp/>

<http://www.youtube.com/user/kikuuwe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊植 亮 (KIKUJWE, RYO)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：96362326

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし