



Title	ソフトロボットの最適設計に関する計算力学基盤の構築
Author(s)	橋口, 勲武
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105525
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (橋 口 勲 武)	
論文題名	ソフトロボットの最適設計に関する計算力学基盤の構築
論文内容の要旨	
柔軟素材からなるソフトロボットは、幾何形状が機械特性を左右するため設計が重要である一方、内部空気圧により大変形が生じ、自己接触・他物体接触・外部境界接触が容易に発生するため、変形機構や運動特性の予測が難しい。本論文は、ソフトロボット設計に重要な (i) 変形挙動を予測する数値シミュレータの開発と、(ii) 自動設計に向けた構造最適化基盤の構築を目的とする。 (i) 数値シミュレータでは、FEMにMPMのマッピングを組み合わせたFEM-MPMを導入することで、従来のFEM解析では困難であった予期せぬ複雑な接触状態を堅牢に扱う。さらに、空洞体積と物質質量に基づき状態方程式から内部圧力を算出することにより、注入空気量駆動を再現するとともに、変形と圧力の近似的連成解析を可能とする。数値解析例として、空気圧による曲げ変形を利用したソフトグリッパを対象とし、複雑な接触現象を再現するとともに、圧力履歴のみから接触開始・解除時刻や把持成否を判定できる自己センシング機能を数値的に再現可能であることを示した。加えて、半球シェルのスナップを利用したジャンプマシンを対象に、圧力上昇-座屈-地面接触を含む一連のダイナミクスを再現し、床反力および跳躍高さが実験と概ね一致することから定量的妥当性を確認した。 (ii) 自動設計では、自己接触型ベンディングアクチュエータを対象に、複雑な自己接触状態を効率的に扱える簡易モデルを構築し、これに対して構造解析および感度解析に基づく形状最適化を実施した。その結果、得られた最適構造の把持力が自己接触を無視した設計に比べて大きく向上することを示した。さらに、ソフトロボット一般へ拡張するため、FEM-MPM解析にトポロジー最適化を統合し、大変形かつ動的摩擦接触を伴う問題に対する最適化フレームワークを開発した。三点曲げ梁のコンプライアンス最小化問題および回転球に対するブレーキ構造の最適化問題に適用し、接触面が時間発展に伴って大きく切り替わり、かつ摩擦散逸を伴う複雑な条件下においても、本手法により最適化が有効に実行可能であることを示した。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 橋 口 勲 武 ）			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	垂 水 竜 一
	副 査	教 授	尾 方 成 信
	副 査	教 授	中 村 篤 智
	副 査	准教授	矢 地 謙 太 郎 （大阪大学 大学院工学研究科）
論文審査の結果の要旨 本論文では、動・植物のようにしなやかな運動特性を持つソフトロボットの設計・解析に向けて、ゲルやエラストマーなどのソフトマテリアルが示す高度な非線形力学特性を精密に制御・設計するための、新しい計算力学基盤の確立を目的としている。ソフトマテリアルの変形過程では、座屈不安定化、自己接触および環境との接触、接触に伴う摩擦とエネルギー散逸など、極めて非線形性の強い力学現象が生じる。これらの力学現象を従来の有限要素法（FEM）単独の枠組みで汎用的に取り扱うことは困難であり、ソフトロボットの設計・製作に資するCAE（Computer-Aided Engineering）基盤はいまだ十分に確立されていない。この課題を解決するため、本論文ではLagrange粒子とEuler格子を組み合わせた数値計算スキームであるMaterial Point Method（MPM）に着目している。特に、MPMとFEMの利点を融合させたHybrid MPMを基盤とすることで、ソフトマテリアルに対する汎用的な力学解析を実現している。さらに、従来のFEMベースのトポロジー最適化アルゴリズムをHybrid MPMへ拡張・実装することにより、ソフトマテリアルに対する統合的な解析・設計プラットフォームを構築している。開発された計算力学基盤の有効性は、多岐にわたる非線形力学現象の解析および設計例を通じて実証されている。具体的には、スナック座屈現象を巧みに利用したジャンピングマシンの運動再現、自己接触を伴うベンディングアクチュエータの構造最適設計、切り紙カイラル構造体の力学解析などが挙げられる。とりわけ、接触面が絶えず切り替わる回転球に対するブレーキ構造の最適設計において、本手法は極めて複雑な接触境界問題を安定して解く能力を有することを示している。以上の成果は、次世代のソフトロボット設計において理論的かつ実践的指針を与えるものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。			