OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Structural Features and Design Frameworks for Pneumatic Soft Actuators with Tongue-like Variable Surface Shapes
Author(s)	水野, 海渡
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105439
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　水野　海渡　）	
論文題名	Structural Features and Design Frameworks for Pneumatic Soft Actuators with Tongue-like Variable Surface Shapes (舌状可変表面形状を有する空圧ソフトアクチュエータのための構造的特徴と設計フレームワーク)

論文内容の要旨

空圧ソフトアクチュエータ（Pneumatic soft actuator: PSA）は，圧縮空気によって駆動される柔軟なアクチュエータであり，ソフトロボティクス分野において広く用いられている．本研究では，多様な表面形状を能動的に生成可能な可変表面形状PSAの実現を目指す．従来のPSAの能動変形は，曲げや伸縮といった比較的単純な挙動に限られてきた．しかし，柔軟素材は本来ほぼ無限の自由度を有しており，構造や入力を工夫することで，より複雑かつ多様な表面形状を能動的に生成できる潜在能力を備えていると考えられる．このような複雑な変形挙動を可能とするPSAの構造的特徴とその設計手法を見出し，可変表面形状PSAを実現することは，ソフトロボティクスの応用範囲を飛躍的に拡大させる可能性を有している．

従来のPSAでは，柔軟素材の計算的取り扱いが容易ではないことから，設計者の経験や勘に依存した設計や，試行錯誤的なパラメータ調整に基づく順問題的設計アプローチが主流であった．しかし，複雑な構造や多数の設計パラメータを有することが想定される可変表面形状PSAに対しては，これらの設計手法では十分な性能を引き出すことが困難である．可変表面形状PSAを実現するためには，目標とする表面形状から，それを達成するために最適な構造および入力を導出する逆問題を解くことにより，効率的に設計を行う逆問題的アプローチを確立する必要がある．

本研究では，膨張時に多様な表面形状生成を可能とする構造的特徴を明らかにするとともに，構造と入力を統合的に設計するための逆問題的設計フレームワークを確立することを目的とした．また，可変表面形状PSAの特性が最も有効に活用される応用例として，咀嚼シミュレータのための舌ロボットを想定し，その実現を見据えて研究を展開した．

第１章では，本研究の背景および動機について述べ，従来研究との比較を通じて本研究の位置づけを明確にした．

第２章では，順問題的アプローチによって開発された単一チャンバPSAを用いた咀嚼シミュレータについて議論した．食品を模擬した粘弾性体に対する成形マニピュレーションを実施するとともに，従来の舌型PSAでは不十分であったセンシング機能について検討し，視触覚センサを埋め込むことでアクチュエーションとセンシングを両立させた構成を提案した．これらの検討を通じ，センシング機能の有効性を確認するとともに，単純な能動変形のみが可能な単一チャンバPSAを用いた咀嚼再現の限界，および順問題的アプローチによる設計手法の限界を整理した．

第３章では，第２章で用いた長方形チャンバをアレイ状に複数配列し，内圧パターンの切り替えによって可変表面形状を実現するPSA（Pneumatic soft actuator with arrayed chambers: PSA-AC）に着目した．PSA-ACは順問題的設計によって決定された画一的な構造を有しており，これに対して逆問題的に内圧を設計する手法を提案した．線形弾性要素の連結によりPSA-ACにおける内圧と表面形状の関係を表す解析モデルを導入し，このモデルを用いた最適化によって，目標形状から内圧パターンのみを導出する部分的な逆問題的設計手法を示した．さらに，実際に製作したPSA-ACを用いて基本的な舌形状を模擬した目標形状の再現実験を行い，本手法の有効性を検証するとともに，構造を固定した条件下で内圧のみを設計対象とする部分的逆問題的アプローチの限界を明確にした．

第４章では，構造および内圧パターンの両方に逆問題的設計を適用することを前提とした，積層膜構造を有する空圧ソフトアクチュエータ（Pneumatic soft actuator composed of layered membranes: PSA-LM）を新たに提案した．第２章および第３章で構造の最小構成要素として用いた長方形チャンバは，隣り合うチャンバとの変形連動が大きく挙動の予測が困難であることに加え，内壁の膨張が表面形状生成に十分に活用されておらず，効率的な表面形状生成の観点から課題を有している．第４章では，長方形チャンバをさらに分解し，最小構成要素として膜に着目することで，膜の膨張を効果的に表面形状生成へ活用可能な積層構造の特徴を整理した．膜要素は挙動の予測が比較的容易であり，かつ形状を幾何学的に近似しやすいという特性を有するため，計算的設計手法の適用に適していると考えられる．この特性を活かし，幾何学的プロセスに基づいて目標形状から膨張膜構造および折りたたみ膜構造を設計するアルゴリズムを提案した．さらに，設計された構造に対して，解析モデルとFEAを併用したベイズ最適化により内圧パターンを決定する手法を示し，構造と内圧の両方を設計可能な完全な逆問題的設計手法を実現した．

第５章では，本論文で得られた結果と今後の展望について述べた．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　水野　海渡　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	東森　充
	副 査　教授	石川　将人
	副 査　教授	森島　圭祐
	副 査　准教授	石原　尚

論文審査の結果の要旨

空圧ソフトアクチュエータ（Pneumatic soft actuator：PSA）は，圧縮空気によって駆動される柔軟なアクチュエータであり，ソフトロボティクス分野において広く用いられている．本論文では，多様な表面形状を能動的に生成可能な可変表面形状 PSA の実現を目的としている．従来の PSA の能動変形は，曲げや伸縮といった比較的単純な挙動に限られてきた．しかし，柔軟素材は本来，無限の自由度を有し，構造や入力を工夫することで，複雑かつ多様な表面形状を能動的に生成できる潜在能力を備えていると考えられる．このような複雑な変形挙動を可能とする PSA の構造的特徴およびその設計手法を見出すことは，ソフトロボティクスの応用範囲を飛躍的に拡大させる可能性を有している．

本論文では，膨張時に多様な表面形状生成を可能とする構造的特徴を整理するとともに，目標形状から構造および入力の双方を体系的に設計可能なフレームワークの確立を目指している．また，応用例として咀嚼シミュレータ用の舌ロボットを想定し，その実現を見据えた検討を行っている．

第一の結果として，第２章では，試行錯誤的に開発された単一チャンバ PSA を用いた咀嚼シミュレータについて検討し，その限界を明らかにしている．提案 PSA に視触覚センサを埋め込むことで，アクチュエーションとセンシングの両立を可能とし，食品を模擬した粘弾性体に対する成形マニピュレーションを通じてその有効性を確認するとともに，単一チャンバ PSA で実現可能な動作および試行錯誤的な設計手法の限界を示している．

第二の結果として，第３章では，長方形チャンバをアレイ状に配列した構造を有し，内圧パターンの切り替えにより可変表面形状を実現する PSA（Pneumatic soft actuator with arrayed chambers：PSA-AC）に着目している．PSA-AC の予め決定された画一的な構造に対し，線形弾性要素の結合により内圧による膨張を表現するモデルと非線形最適化を導入し，目標形状から内圧パターンのみを逆算する設計手法を提案するとともに，実機実験によりその有効性および限界を示している．

第三の結果として，第４章では，構造および内圧パターンの双方を設計することを前提とした，積層膜構造を有する空圧ソフトアクチュエータ（Pneumatic soft actuator composed of layered membranes：PSA-LM）を提案している．ここでは，第３章で用いた長方形チャンバをさらに分解し，最小構成要素として膜に着目することで，高い挙動予測性と設計性の両立が可能な積層構造の特徴を明らかにしている．また，目標形状から幾何学的アルゴリズムによって膜構造を導出する構造設計と，弾性膜の解析モデルおよび FEA を併用したベイズ最適化による内圧設計の二段階からなる体系的な設計フレームワークを構築している．

以上のように，本論文は，空圧ソフトアクチュエータにおいて，目標形状に基づき構造および入力の双方を体系的に設計可能なフレームワークを確立した，学術的および実用的に意義深い研究である．得られた成果により，ソフトロボティクスシステムの機能および応用範囲の拡大に向けた新たな基盤を提供することが期待される．よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．