

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Shape-changing and Variable-stiffness Interface using Pneumatic Actuators
著者(和文)	JeffersonPardomuan
Author(English)	Pardomuan Jefferson
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12594号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小池 英樹,三宅 美博,徳永 健伸,金崎 朝子,下坂 正倫
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12594号, Conferred date:2023/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	Jefferson Parudomuan	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	小池英樹	教授	金崎朝子	准教授
	審査員	徳永健伸	教授		
		三宅美博	教授		
下坂正道		准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文では、「Shape-changing and Variable-stiffness Interface using Pneumatic Actuators」と題し、空気圧の調整により物体の形状及び硬度を変化させるユーザインタフェース機構、及びそれを用いたプロトタイピングツールについて述べている。本論文は英文9章からなる。

第1章「Introduction」では、本論文の背景として既存の形状及び硬度変化インタフェースにおける問題点と、こうした形状及び硬度変化インタフェースのためのプロトタイプの意味を述べている。

第2章では「Related Work」と題し、形状及び硬度変化インタフェースに関する既存手法について述べている。

第3章「Research Proposal」では、空気圧式アクチュエータを用いて形状と硬度を変化させる手法について述べている。第1に、圧縮空気の利用方として空気圧式人工筋肉と3次元プリンタで出力された部品を組み合わせることで、その形状を変化させ、かつ硬度を変化させる手法を提案している。第2に、減圧空気を用いた”jamming”と呼ばれる手法を用いることで、物体の硬度を変化させる手法を提案している。

第4章「ClaytricSurface: An Interactive Deformable Display with Dynamic Stiffness Control」では、2.5次元のモデリング作業を対象とした、硬度変化ディスプレイについて述べている。本手法は、空気を通過させにくい特殊な布で密閉された空間に直径1mm程度の発泡ビーズを満たし、この空間内の気圧を減圧することで硬度変化を起こす”jamming”と呼ばれる手法をユーザインタフェースに利用したものである。申請者の開発したClaytricSurfaceは、2次元のテーブルトップ型の形状をしており、通常の状態ではテーブルトップ表面が粘土のように柔らかいが、真空ポンプを利用して減圧すると硬くなる。テーブルトップ上方にはプロジェクタと深度カメラが設置され、プロジェクタは映像を投影し、深度カメラはテーブルトップの高さと手指の高さを計測しタッチ検出が可能となっている。具体的な利用方法としては、利用者は粘土のように柔らかい表面を両手で成形する。次にテーブルトップ上に投影されているスライダを指でタッチすることで、真空ポンプに接続されたレギュレータを連続的に制御し、気圧を変化させることで表面硬度を任意の硬さに調節し詳細部分の成形を行う。最後はテーブルトップに投影されたカラーパレットを指で選択し、物体表面に着色を行う。こうしてモデリングされた物体の3次元形状は深度カメラでデジタル化され、3次元プリンタから出力することができる。ClaytricSurfaceはjamming機能をユーザインタフェースに応用した世界初のシステムである。

第5章「ASTRE: Programmable Shape-changing and Variable-stiffness Mechanism using Artificial Muscle」では、細径人工筋肉と3次元プリンタ出力された関節モジュールの組み合わせにより、形状変化と硬度変化を同時に実現する手法について述べている。細径人工筋肉はソフトロボティクス等のアクチュエータとして一般に使用されているが、基本的には直線方向の長さ変化の機能しかない。これに対し、申請者は3次元プリンタで出力された関節モジュールを複数個考案し、人工筋肉との組み合わせにより、bending, twisting, contractible という3つの形状変化機構、locking, malleable, rotational brake という3つの硬度変化機構が実現できることを示した。また、それぞれのプリミティブモジュールについて圧力と変化量の関係を明らかにした。

第6章「AstreToolkit: Constructive Assembly Tools with Shape-changing and variable-stiffness capabilities」では、第5章で考案したASTREメカニズムの応用として、形状変化及び硬度変化の可能なプロトタイプ作成ツールキットAstreToolkitについて述べている。まず、従来研究との比較により、bending, twisting, contraction/expansion, rigidity, malleability, springinessを全て実現できるのがAstreToolkitだけであることを述べている。さらに、各プリミティブモジュールを用いたプロ

トタイプ例を示し、細径人工筋肉とプリミティブモジュールの組み合わせだけで様々な形状が作成可能で、かつ形状変化及び硬度変化を行えることを示している。

第7章「VabricBeads: A Design Exploration for Shape-changing and Variable-stiffness Fabric」では、AstreToolkitがトラス構造を基本としていたのに対し、3次元曲面を成形可能なVabricBeadsについて述べている。VabricBeadでは新たな関節を考案し、この関節パーツを用いて人工筋肉を2次元的に連結することで、形状と硬度変化の可能な3次元曲面を実現できることを示した。そのプロトタイプ例として、形状・硬度変化する腕輪、手袋、帽子、バッグ等を示した。さらに関節の各形状の違いによる気圧と硬さの関係などを明らかにしている。

第8章では、空気圧を利用した形状及び硬度変化機構の利点をまとめると同時に、その限界について言及し、今後の研究の方向性について論じている。

第9章「Conclusion」では、本論文の貢献について再度まとめている。

以上、本論文では、空気圧を用いた駆動機構に着目し、まず減圧を用いたjammingによる硬度変化機構のユーザインタフェースへの応用を提案、実装、評価し、その有効性を確認した。次に、加圧で駆動する細径人工筋肉を、3次元プリンタ出力された関節モジュールと組み合わせることで、形状・硬度の変化する機構を提案、実装、評価し、その有効性を確認した。以上は学術的に高い貢献がある。よって、本論文は博士（学術）の学位として十分価値があると認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。