

氏名	Francesco Visentin			
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	博甲第8090号			
学位授与年月日	平成29年3月24日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	システム情報工学研究科			
学位論文題目	An Electrical Tomographic Approach to Detect Deformation over Soft and Flexible Materials (電気トモグラフィー法による柔軟・弾力性を持つ変形物の検出に関する研究)			
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	鈴木 健嗣	
副査	筑波大学 教授	工学博士	山海 嘉之	
副査	筑波大学 准教授	博士(情報科学)	望山 洋	
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	矢野 博明	
副査	筑波大学 准教授	博士(情報理工学)	嵯峨 智	

## 論文の要旨

従来の剛性の高い機構や関節を有するロボットがその高い精度により作業を実現することに対し、柔軟な材料を積極的に用いて新しい機能を発現したり、生物学的規範を参考にして動作をしたりする新たなロボットの研究分野として、ソフトロボティクスが世界的にも盛んに研究されている。また近年、人に装着して動作を支援するロボット技術が大きく進展しているが、ここでも対人親和性の高いロボットの実現に向けて様々な取り組みがなされている。しかしながら、新たな駆動機構やアクチュエータの開発と比較して、柔軟性を持ち、変形にも対応可能なセンサシステムの実現は未だ困難である。形態変化を伴う生体やロボットの物理的特性の理解に代表されるように、人とともに動作するロボットの実現においては、このようなセンサ技術が必要不可欠である。

そこで本論文の著者は、電気インピーダンスを用いて内部構造を可視化する技術である電気インピーダンス・トモグラフィー法（EIT）を用いて、柔軟・弾力性を持つ変形物の計測を実現する新しいセンサシステムを提案している。ここでは、EITを応用することで変形する柔軟物の計測を可能にする数理的なモデルを提案するとともに、装着型デバイスといったような人が身につけることが可能なサイズで実現するため、組み込みデバイスなど限られた計算資源における制約下においても十分適用可能な手法を提案し、実際に柔軟物に対し実装することでその有効性を明らかにして来た。

本論文は全6章からなり、これら一連の研究成果が纏められている。以下に概要と評価を述べる。

第1章は序論で、本研究の位置づけと研究の背景、及び研究目的を述べている。

第2章では、関連研究としてEIT技術の概要を述べるとともに、その数理モデルの背景、実装例、およびこれまでに行われて来ている産業・医学への応用例について紹介している。

第3章では、計測結果を2次元の画像として取得する際に、どのように物体変形を数学的に取り扱うかについて述べている。ヤコビ行列の導入による計算コストの低減と、逆問題の解法として重み付きヤコビ行列を用いた Tikhonov 正規化による手法を提案するものである。

第4章では、提案手法を検証するためのシステム開発について述べている。これらを組み込みデバイスのサイズにて実現するハードウェアシステムと、弾力性を持つ変形物に適用可能なソフトウェアシステムについて述べている。またこのセンサを導電性の高い柔軟物に実装することで、EIT 技術を応用した新たなセンサシステムが実現可能であることを示している。

第5章では、開発したセンサの基礎的な評価を行なっている。動作原理の検証とともに、センサ計測画像の特性、1点・複数点の圧力刺激の際の応答性について明らかにしている。

第6章では、提案センサを用いた応用について述べている。生体のような柔軟かつ変形する対象に主として、皮下における不純物に対する硬さ測定、及び表情表出における顔表面の物理的変形を計測する試みを行い、基礎的な評価実験を行い、人支援技術への応用可能性を検証している。

第7章では、全体としての考察と評価を行い、研究成果のまとめと将来展望を述べている。

## 審査の要旨

### 【批評】

本論文は、柔軟・弾力性を持つ変形物の検出に関する新たな手法の可能性を見出す新しいセンサ技術であり、ソフトロボティクス分野のみならず、対人親和性が要求される人間機械系の研究においても大きな貢献のある成果である。柔軟性と弾力性という工学的要件に加え、小型のデバイスで実現するための数理モデルを考案し、導電性を有する素材に実装し、実際に変形する物体表面における評価実験を通じ、提案手法の有効性を明らかにした。また、異なる硬さの柔軟物からなる複合物の弁別や、表情表出に伴う表面の幾何学的変形を計測する応用について述べている。

これまで柔軟物を対象とするセンサは、接触・非接触など様々な提案があるが、いずれも物理的なセンサの場所や形状による制約が大きいため、実際に計測する対象の物理的特性を保持しながらその変化や変形を計量することは容易ではない。そこで本研究は、柔軟・弾力性を持つ変形物における3次元的な物理的な変形に対し、その電気的な性質を巧みに利用することで、表面のみならずその内部の変形や硬さを検出するための手法の応用可能性を大きく拓く新たな手法を提案している。これにより、広く柔軟物を扱うインタフェース、ロボティクス、ハプティクス分野に対する応用の可能性を拓くものであるとともに、対人親和性が要求される人間機械系の研究として高く評価できる。

これらの成果は、基礎的な電気電子工学のみならず、人間機械系およびサイバニクス分野の発展に資すること大である。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として相応しいものであると認める。

### 【最終試験の結果】

平成29年2月8日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。