

本論文は、「Development of a Highly Stretchable and Deformable Fabric-based Tactile Distribution Sensor」と題し、これまで実現困難とされてきた伸縮・変形可能な触覚分布センサを、従来のアレイ型とは本質的に異なる、センシング領域内に配線等を持たない新たな構造および計測方式により実現し、さらに構造や材料の工夫により伸縮の影響なく圧力のみを検出を可能とし、これらの有用性を基礎実験や応用例により実証した研究をまとめたものであり、7章からなる。ロボットの触覚センサは20年以上の研究の歴史があるが、特に最近、人間支援ロボットにおける安全動作や全身接触動作等のために、全身を触覚で覆うことが重視されている。これを完全に達成するためには、関節部などの可動、変形部や柔軟な表面を覆うことが必要となるが、従来の分布触覚センサは大きな伸縮・変形を許容しないため、きわめて困難な課題であった。以下の各章では、逆問題解析に基づく触覚センシング方式の提案、センサ特徴および拡張性の検証、センサの開発及び基礎実験による評価、伸縮・変形可能な実装面への適応、アプリケーションにおける実用性の実証について記述し、学術的考察を加えている。

第1章“Introduction”では、触覚センシング研究の背景について述べ、伸縮・変形の観点から人間の触覚と既存触覚技術との比較を行い、解決すべき課題を呈示している。また、大伸縮・変形に対応しながら安定に触覚刺激を計測することを目的にし、この目的の学術的な貢献について論じている。

第2章“Stretchable and Deformable Tactile Sensors”では、本研究で扱っている「伸縮」および「変形可能」の用語を定義し、特にソフト・フレキシブルとの相違を明確化した上で、触覚センシングにおける伸縮・変形可能なセンサの重要性について論じている。また、伸縮性触覚分布センサを実現するための既存手法を紹介し、提案手法との関連性と相違について記述し、逆問題に基づく提案手法のオリジナリティを明確化している。また、提案手法による触覚センサが関連分野にもたらす影響やこれからの展望について議論している。

第3章“Tactile Sensors Based on Inverse Problem Analysis”では、逆問題の一種であるElectrical Impedance Tomography (EIT)の基本概念や順問題・逆問題の数理モデルを紹介し、EITに基づく触覚分布センサの原理について記述している。具体的には、触覚刺激で抵抗分布が変化する導電シートを用意し、その辺縁のみに設置した複数電極により電流注入と電位計測を行い、このデータからEIT手法により間接的に導電シート内部の抵抗分布を推定し、触覚刺激を推定する。原理説明に加えて、センサのサンプリング手法、空間分解能、感度、各種パラメータの影響など導電材料の特性に無関係な特徴をシミュレーションで評価している。

第4章ではセンサの具体的実現法を詳しく説明している。計測用の回路とアルゴリズム、各種導電材料の特徴を記述した後、導電性材料のヒステリシス問題や伸縮・変形の影響を解消できる導電性材料・構造の必要性について論じ、伸縮・変形に不感な感圧導電性構造 (PsSi: Pressure-sensitive Stretch-insensitive) を布材料で実現する方法を提案し、製作したPsSi構造の圧力や伸縮に対する応答を記述している。さらに、独自に開発した布製の伸縮性配線も統合し、電極も含めて布材料のみで実現されるセンサモジュールを提示している。

第5章“Tactile Sensing Scenarios”では、提案したセンサの適用状況として、①平らで固い面、②複雑な形状をした固い面、③変形可能な柔らかい面、④動的に変形する柔らかい面、の4種類を挙げ、各状況に対応するセンシング方法を提示した。特に、従来計測が難しいとされていた③と④において、PsSiセンサを利用して安定に圧力分布を計測できることを示している。

第6章“Application and Results”では、開発したセンサを人間の肘や臀部に実装し、人体の動きに影響を受けることなく外部からかかる圧力分布を計測できることを示した。これにより、既存の分布触覚センサで不可能とされてきた伸縮・変形可能な実装面における安定な圧力分布計測が可能であることを実証し、ウェアラブルセンサへの応用可能性を提示した。また、インテリジェント家具にむけた応用事例として、椅子に実装したセンサでの実験結果に基づき、触覚パターンを制御信号として利用する可能性を議論している。

第7章“Conclusions and Prospects”では、本研究を総括し、その寄与は、伸縮性触覚分布センサの原理の提案と基本特性の検証、安定な触覚センシングに必要な導電性材料・構造の開発、各適用状況に対応したセンシング方法の提示を行い、ウェアラブルセンサやインテリジェント家具等の応用事例の実験によってその実用可能性を示したことでありと結論づけている。

以上、これを要するに、本論文は、①EIT原理に基づく伸縮性触覚分布センサの実現、②シミュレーションによるセンサ基本特徴の検証、③伸縮・変形の影響を受けない触覚センシングの方法論、④各適用状況に応じたセンシング方法が明らかにし、⑤具体的な応用実験により提案センサの有効性を示している。これにより、従来不可能であった伸縮・変形可能な面における触覚分布センサの実装が可能になり、伸縮・変形の影響を受けない安定な触覚センシングが実現された。この成果はロボット学における一つの懸案を独創的な方法で解決したものであり、マンマシンインターフェース、人間工学、医療・リハビリテーション等への新たな応用可能性においても有意義と認められる。

以上の理由から、本論文は知能機械情報学上貢献するところ大である。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。