

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 陳 ハンビッ

近年のデータ活用社会の到来を受けて、非侵襲的かつ運動の妨げなく生体信号を計測するための次世代ウェアラブルセンサー技術の重要性が増している。この背景の中、本研究では、伸縮性導電複合材料を用いて衣服型センサシステムに関する研究を推進した。特に、伸縮性導電複合材料の繰り返し耐久性問題に注目し、今まで研究してきた二元複合材料（導電フィラーとエラストマーマトリクス）では防ぐことが難しかった伸縮時のクラック発生を、テキスタイルやナノファイバ構造体の導入により低減でき、繰り返し耐久性向上につながることを示した。さらに、プリストレッチ手法により自発生成されたシワ構造を併用することにより、材料に印加される引張応力を低減することで最大800%まで伸張、抵抗が2倍以下、50%歪の1000回繰り返し試験後の抵抗変化が1.64倍以下に維持されるなど、先行研究より4倍以上低い抵抗変化を示し、繰り返し耐久性に優れた伸縮性電極を実現した。このような伸縮性電極をテキスタイル上に集積し、投球時の筋電図を計測するセンシングスーツとともに、腕の筋トレ中に心電、筋電、肘の歪を計測するマルチモーダル計測スーツを具現し、高伸縮性衣服型センサシステムの実現可能性を示した。

本論文は「**Nanofiber-Reinforced Tough Elastic Conductors for Electronic Textile Applications**」と題して、伸縮性導電複合材料の繰り返し耐久性を材料内にナノファイバ構造体を導入することにより強化する方法と、強化した伸縮性導電複合材料の電子布地応用について論じており、全7章で構成され、英文で執筆されている。

第1章では、「**Introductions**」と題して、衣服型センサシステムの概念について説明し、その研究背景と先行研究を紹介する。また、衣服型センサの実現において重要な課題及び本研究の目的を述べ、最後に論文の構成と概略を示す。

第2章では、「**Printed Electronic Textiles and Elastic Conductors**」と題して、伸縮性導電材料の先行研究と印刷形成した電子布地の先行研究を紹介し、電子布地の作製において、印刷プロセスが持つ利点と解決すべき課題について述べる。また、印刷材料として利用できる伸縮性導電材料について紹介し解決すべき課題として機械的耐久性、繰り返し耐久性の脆弱性について述べる。

第3章では、「**Textile Fiber-Reinforced Elastic Conductors**」と題して、銀とフッ素ゴムからなる伸縮導電複合材料を用いて電子布地を印刷形成する方法について述べる。従来は平坦なゴム基板上に印刷されてきた伸縮導電複合材料をテキスタイル上に印刷

した場合にも高い伸張率と導電性を実現する手法について報告している。伸縮性導電複合材料のインクを作製、液性調整を行い、テキスタイルの編み構造を持っているテキスタイルファイバにインクを含浸する方法により、テキスタイル上に印刷形成した伸縮性配線の最大伸張率及び繰り返し耐久性を向上する方法について報告している。

第4章では、「**Nanofiber-Reinforced Elastic Conductors**」と題して、第3章で述べたテキスタイルファイバと構造による性能向上のメカニズムから学び、より詳細に制御できるナノファイバを用いて伸縮性と繰り返し耐久性を向上する方法を提案している。伸縮性導電複合材料に電子紡糸法で作製されたランダム配列の連続ナノファイバを用いて材料のタフネスを強化し、伸張時のクラック生成を低減することにより伸縮性電極および配線の繰り返し耐久性を向上する方法として有効であることを示す。さらに、ナノファイバで強化された伸縮性導電複合材料にプレストretch法にて生成されたシワ構造を導入し、材料に印加される引張応力を低減することにより繰り返し耐久性を向上した。その結果、同一条件のサイクル試験後、先行研究より4倍以上低い抵抗変化を示した。

第5章では、「**Low Hysteresis Strain-Responsive Elastic Conductors**」と題して、伸縮性導電複合材料を配線や電極だけでなく歪センサに応用するための材料設計について報告している。歪応答性に優れている導電ポリマ PEDOT:PSS とポリウレタンから構成される複合材料が先行研究により提案されていたが、10%以上の歪に対し抵抗変化のヒステリシスの問題があった。そのヒステリシスを低減するために、PEDOT:PSS とポリウレタン複合材料に多孔質カーボンパーティクルを添加し、導電ポリマ鎖の再配列を防ぐことにより、ヒステリシスを低減する方法を示している。その結果、PEDOT:PSS ポリウレタン複合材料において 50%歪を経験後、抵抗の非可逆的変化分(ヒステリシス)が 60%から 5%まで減少した。

第6章では、「**Electronic Textile System for Biomonitoring**」と題して、これらの3, 4, 5章で述べた配線、電極、センサ材料を用いて運動の妨げにならない伸縮性センサシステムを構築する方法及び作製したセンシングスーツを用いて野球の投球モーションや1時間の連続運動中の筋電、心電、動きの計測に成功した結果について述べる。

第7章では、「**Summary and Conclusions**」と題して各章の主要な研究成果を総括し、本論文の結論及び将来展望について述べている。

以上、これを要するに、本研究では、テキスタイル基材へ含浸させる方法ならびにファイバ構造体を用いて伸縮性導電複合材料の繰り返し耐久性を向上し、体表面で非侵襲的かつ運動の妨げなく生体信号を計測する衣服型センサシステムを実現したものであり、伸縮性エレクトロニクスと生体計測エレクトロニクス分野の新しい可能性示したもので、電子工学における貢献は大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格であると認められる。