

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

論文題目

生体表面における
無線計測に関する研究

申請者

高松 泰輝

情報生産システム工学専攻
先端バイオエレクトロニクス研究

2021年 11月

近年加速する少子高齢化や世界的パンデミックの影響により，医療従事者の負担軽減を目的とした医療用計測機器の開発とそのネットワーク化が期待されている．特に，体表・体内で駆動するバイオデバイスは，生体からの電気および化学的な信号を検出することが可能となるため，IoMT (Internet of Medical Things) に向けた新規デバイスとしての期待が高い．しかしながら，体表や体内で利用するデバイスにおいては，柔軟性や生体安全性が求められることに加え，如何にしてウェットな環境でデバイスを駆動させるかが大きな課題として残されていた．本論文では，ウェット環境で駆動可能な無線式バイオデバイスを開発し，特に眼表でデバイスを利用することで生体適合性やデバイス性能を評価することを主な研究目的とした．具体的には，近年，研究が進むコンタクトレンズ型デバイスを開発対象とし，磁界共鳴方式を用いた無線給電と生化学物質の無線計測に取り組んだ．無線給電においては，古典的な共振結合系の実装に加え，量子力学的効果を含むパリティ・時間(PT)対称性共振結合回系という新しい原理の無線システム開発にも取り組んだ．さらに，酵素電極と共振器型アンテナを組み合わせたパッシブ型バイオセンサを開発することで，涙中グルコースや血中ラクテートの濃度変化を無線計測することに成功した．これら成果は，体表・体内で駆動するバイオデバイスの開発において共通する諸課題（生体適合性，電源確保，無線計測）を解決するための新技術を提供するものであり，ひいては，次世代の IoMT デバイス開発に寄与すると言える．

以下に本論文の構成とその詳細を記述する．

第1章「序論」では，バイオデバイス開発の意義とその課題を概説する．その後，本研究で主体的に取り扱うスマートコンタクトレンズについて世界の研究動向をまとめた後，本研究の目的を述べる．

第2章「ワイヤレス給電システム」では，コンタクトレンズ上に搭載可能な給電素子を設計・実装することで，生体付近で駆動するバイオデバイスへの無線給電に関して記述する．本章では，まずワイヤレス給電システムの方式や生体への電磁波影響について概説し，本研究で作製するシステムのデザインや周波数帯域を決定する．次に，磁界共鳴結合系を用いた高効率なワイヤレス給電システムの開発について，理論計算と実験によって得た研究成果を紹介する．具体的には，高周波回路の電子素子パラメータや共振器間の位置関係によって，電力伝送効率が変化することを示し，最大で約 50%の電力伝送効率が得られることを確認した．これは，コンタクトレンズ表面に実装可能な給電用コイルの巻き数と眼鏡側送電コイルとの限界距離を鑑みた結果である．一方で，眼鏡側から眼球に向けた無線給電においては，眼球運動に伴う電力伝送効率の低下を考慮する必要がある．そこで，眼球回転運動に即した電力伝送効率の安定性検証や発光ダイオード(LED)の輝度変化を利用した実証試験を行い，眼球回転角が15度以上に達した際，電力伝送効率が著しく低下することを明らかにした．最後に，作成した給電素子とコンタクトレンズの異種材料を統合する実用的な課題

に対して、導電性高分子を用いた電解重合法を適用することで解決した。また、実際に作製したコンタクト型デバイスの周波数特性や変形試験を実施することで、電解重合を利用した電着法の有効性を検証した。第 2 章は本論文の根幹を成す研究内容であり、以降の章で述べる応用研究の基盤となる部分である。

第 3 章「ハイブリッド・ウェアラブル電源」では、体表・体内特有のウェット環境を積極的に利用した新しいワイヤレス給電システムを提案する。第 2 章で作製した 1 巻きの無線給電用コイルは、溶液の影響を受けないという利点がある一方で、その電力伝送効率が僅か 10%以下であったため、コンタクト側で高電圧が要求される場合、送電側コイルに印加する電力を増大させる必要があった。このことは、生体組織への高周波磁界暴露に繋がるため、安全性に課題を有していた。そこで、本研究ではワイヤレス給電システムと金属空気 1 次電池を組み合わせたハイブリッド電源を開発する。本章では、まず生体向けハイブリッド電源の開発動向について概説した上で、コンタクト向けハイブリッド電源の提案と開発結果をまとめる。具体的には、卑金属である亜鉛製共振器アンテナを金属空気電池のアノードとして併用し、バイオカソードである酵素電極と組み合わせることで、常時 1.5 V の直流電源を実現させた。さらに、無線給電により受信した交流電圧（電力伝送効率：約 5%）が先の直流電圧に加算されることで、電源の昇圧化に成功した。これは、ワイヤレス給電システムと金属空気 1 次電池を組み合わせた世界初の交流/直流電源であり、最大電圧 $0.5 V_{pp} + 2.3 V$ を実現させた。また、従来の無線給電システム単体と比較した場合、外部からの印加電力は 18.5 分の 1、発生磁界強度は 4.3 分の 1 に成功した。

第 4 章「酵素電極を用いたパッシブ型バイオセンサ」では、第 2 章で作製した無線給電素子を基盤としたバイオセンサを開発し、体液に含まれる生化学物質の定量的無線計測に取り組んだ。本研究で考案したパッシブ型バイオセンサは、これまでに研究開発が進む NFC (Near Field Communication) や ASIC (Application Specific Integrated Circuit) タイプのバイオセンサと比較して、集積回路を必要としないシンプルな構造により実装可能となるため、レンズ 1 枚辺りの単価を抑えることが可能となるなどの優位性を示す。本章では、まずバイオセンサと無線情報伝送方式について概説し、最終的に実装するデバイスの通信規格や特性についてまとめる。その後、第 2 章で取り上げた共振器型アンテナと酵素電極を組み合わせたパッシブ型バイオセンサの提案を行う。具体的には、簡易的な 2 極式電気化学測定器を実装し、LCR (L: インダクタンス, C: キャパシタンス, R: レジスタンス) 共振器の可変抵抗成分として組み込むことで、生化学情報の濃度変化に起因した共振器型アンテナの負荷変調を実証した。その結果、電気化学測定部をそのまま化学抵抗器として利用し、溶液中グルコースの変化を共振周波数における振幅の変化として無線で測れることを実証した。さらに、化学抵抗器の触媒酵素 (GOD: グルコースオキシダーゼ、

LOD:ラクテートオキシダーゼ)を変えることで、涙中グルコース濃度と血中ラクテート濃度を無線で測ることに成功し、提案したパッシブ型バイオセンサの汎用性を示した。

第5章「PT対称性を用いた高感度なワイヤレス・バイオセンシング」では、第4章で作製したパッシブ型バイオセンサの無線計測感度を向上することを主な目的とする。一般的に、体液中の生化学物質は非常に微量であり、従来までの無線計測システムでは、センサ感度が非常に低いという問題が残されていた。そこで、本研究では量子力学的知見であるPT対称性を導入することで、無線計測システムの共振特性、即ちQ値を改善し、センシング感度を大幅に改善した。本章では、まずPT対称性について概説した後、無線バイオ計測としてPT対称性を導入する意義について記述する。次に、従来の磁界共鳴結合系（ロス-ロス結合）に対して、PT対称性を満たす磁界共鳴結合系（ゲイン-ロス結合）では、Q値が約125倍向上することを確認した。このように劇的なQ値の向上は、従来型のエネルギーを消費する散逸系では達成不可能であり、PT対称性を導入した保存系においてのみ観測される現象である。次に、このPT対称性を有する磁界共振結合系と第4章で作製したパッシブ型バイオセンサを組み合わせた高感度な生化学情報の無線計測について記述する。PT対称性を満たす結合系は、その結合係数の変化により、Broken-PTとEP（特異点）という状態をもつことが分かっており、それぞれ線形増幅されたシステム応答（センシング感度：2000倍）と閾値的なシステム応答を示すことが明らかとなった。また、本共振器は、生体組織を介した無線計測が可能であることを実証した。すなわち、将来的に本システムを用いて体内埋め込み型のバイオデバイス開発へと応用できることを確認した。

第6章は「結論」であり、各章のまとめを含めた総括を行う。