

論文内容の要旨

論文題目 人体を伝送路とする通信方式に関する研究

氏名 蜂須賀 啓介

本論文は、「人体を伝送路とする通信方式に関する研究」と題し、人体を信号伝送路として利用し、触ることによってはじめて通信が可能になる新しい通信方式（人体内通信）に関する基礎研究をまとめたものであり、全6章から成る。

第1章は序論であり、Personal Area Network (PAN) の必要性、人体内通信の定義づけ、および本研究の目的と研究の流れについて述べた。PAN とは、人体を一つのネットワークと考え、人体表面や人体から近距離の位置にあるウェアラブル情報機器間の情報伝達を行うという、新しい個人内ネットワークのことである。近年、表面実装技術・超 LSI 技術・マイクロマシニング技術などが急速に進歩しており、情報機器がポータブルからウェアラブルへと進化しつつある流れの中で、PAN の重要性が高まってきた。ここで、PAN を有線で構築しようとする、配線が絡まるなど日常生活における動作の妨げになるため、無線 PAN の構築が必須となる。本研究では、無線 PAN 技術の中で耐ノイズ性や秘匿性に優れる人体内通信に着目し、各種センサやウェアラブル情報機器間の人体内通信を実現するため、人体の信号伝送モデルの提案および人体内通信デバイスの開発を行うことを研究の主眼としている。

第2章では、人体内通信に関する先行研究を調査した。先行研究では、さまざまな送受信電極配置・搬送周波数・サイズ・変調方式・通信速度を採用した人体内通信デバイスが試作されている。信号伝送モデルに関してもさまざまなモデルが提案されているが、静電結合により閉回路を構成するモデルと、人体上に電界を生じさせるモデルの2つに大別される。ここで、どのモデルにもいくつかの疑問点が存在したが、特に閉回路を構成するための空間的な結合の強度についてはすべてのモデルに共通の疑問点であったため、詳細に検討した。その結果、先行研究で考案されているモデルに含まれている結合は数 pF 程度の浮遊容量であり、回路やグラウンド線を構築できるほどの強固な結合ではないことが確認された。従来のモデルでは人体内通信を正確に説明

することができないため、人体内通信に関する新たなモデルの構築が必要になった。

第3章、第4章では、人体の電磁波吸収特性を考慮して、人体内通信に適すると考えられる数十 MHz 以下の周波数帯域における信号伝送モデルとして、閉回路を構成しないモデルの考案を行った。

まず、第3章では、人体内部のみが信号伝送に寄与すると考え、送受信機の4つの電極すべてが人体に接触する開放端のない電極配置において、入出力間で回路網を形成するモデルについて検討した。最初に、人体を均質なインピーダンス(抵抗とキャパシタの並列回路)の集合と考え、腕部を平面近似したモデルを作成して信号入出力ゲインを計算した。しかし、電極を信号伝送方向に沿った向きに配置した場合にゲインがゼロと計算され、実際の現象と異なる結果が得られた。この差異は均質なモデルを想定したために生じたと考え、不均質なインピーダンスも考慮できる四端子回路網モデルを作成した。ゲイン特性ではモデルの妥当性を検証するのが困難であったため、電極配置を変えたときの位相特性の変動を調べた。回路網であれば電極配置の反転により位相も反転すると予想されたが、電極配置を反転させても位相が反転しなかったことから、人体のみが信号伝送に寄与すると考えた回路網による信号伝送モデルのみでは、人体内通信を十分に説明することはできないことがわかった。

次に、第4章では、人体を良導性の誘電体とみなし、送信機を給電点とする線状アンテナへの給電にならった伝送モデル(良導性誘電体伝送モデル)を考案した。このモデルでは、人体内部だけでなく人体近傍の空間も含めて、人体に垂直な電界が人体表面を伝搬する。このモデルを適用することで、回路網モデルでは説明できなかった開放端を含む、人体へのあらゆる電極接触状態における信号伝送について、ゲイン変動を定性的に説明できるようになった。また、電極間距離・電極面積・電極方向・信号伝送距離・姿勢・伝送経路と逆側に存在する物体の大きさ・衣服の有無などの影響を予想し、実験によって予想が正しいことを確認した。得られた知見としては、

送信機は2電極、受信機は1電極のみを接触させる電極接触状態が、最も大きいゲインが得られる

送信機2電極の電極間距離・電極面積、および受信機1電極の電極面積・電極位置に関わらずゲインは一定であり、電極は人体に接触しさえすればよい

2電極を接触させる場合には、信号伝送方向に沿った向きに電極を並べると信号伝送が可能になるが、信号伝送方向に垂直な向きに電極を並べると信号は伝送できない消費電力を小さくするためには、人体に接触する送信機2電極の電極間距離を大きくするほうがよい

受信機の人体に接触していない電極が大きいほど受信電圧が大きくなる

伝送経路と逆側に存在する人体あるいは送受信機ケースが大きいほど、大きいゲインが得られる

信号伝送経路内に物体が接触すると、信号の吸い取りが生じてゲインが小さくなる電界は人体表面全体に分布するので、送受信機が同一平面状になくても通信が可能である

信号伝送経路の方向が180度反転するような場合には、発生する電界の干渉が起きてゲインが小さくなる

人体内通信では、必ずしも送受信機が人体に接触している必要はなく、人体に近接していて送信機からの電界変化が人体にも誘起される程度の距離であれば、受信感度を上げることにより通信が可能である

などが挙げられる。

第 5 章では、前章までで得られた知見をもとに、実用レベルに近い人体内通信デバイスの開発を行った。電極配置は、送信機 2 電極・受信機 1 電極で、送信電極は信号伝送方向に沿った方向に配置した。変調方式は、外部ノイズに強い周波数変調方式を採用した。開発したデバイスを図 1 に示す。基板サイズは 30mm×30mm、質量は約 5g、DC 3V 乾電池 1 つで駆動する。このデバイスを用いて、まず、アナログデータの伝送実験として、右手から左手まで一人内での音声帯域信号の伝送に成功した。次に、デジタルデータの伝送実験として、指輪型パルスオキシメータから得られた心拍・SpO₂・脈振幅を含んだ 9600bps の信号伝送を試み、特殊な専用アンテナを用いることなく空中伝搬より高い信号品質が得られることを示した。さらに、人体内通信を用いることで実現可能なアプリケーション（ヘルスケアへの応用・個人情報伝送・ウェアラブル情報機器間の信号伝送・電子マネーの授受・セキュリティ利用など）を提案し、得られた知見をもとにしてアプリケーションごとにデバイスの最適設計の指針を示すとともに、人体内通信の有望性を示した。なお、これらのデバイスの安全性についても詳細に調査し、国内外の安全基準を十分に満たしていることを確認した。

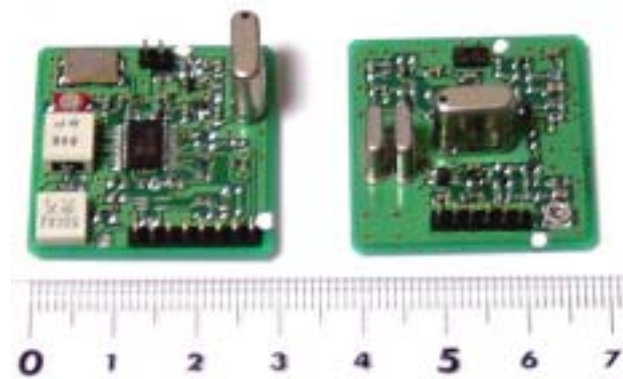


図 1 開発した人体内通信デバイス

第 6 章は結論であり、本研究を総括するとともに、今後の展望について述べた。具体的には、閉回路を構成して人体を導線とみなす信号伝送モデル、および人体を四端子回路網とみなしてインピーダンス行列で記述する信号伝送モデルだけでは、人体内通信を説明できないこと

人体表面に生じる電界が伝搬する良導性誘電体伝送モデルによって、開放端を含むすべての電極配置において人体内通信を説明できること

人体に電流が流れることで発生する 3 次元的な電界のうち、支配的なのは人体に垂直な成分であるため、直線的な信号伝送経路の場合には問題ないが、信号伝送経路の方向が 180 度反転するような場合には、発生する電界の干渉が起きてゲインが小さくなること

人体内通信では、送信機 2 電極、受信機 1 電極を人体に接触させる電極配置が最もゲインが大きくなること

送信機 2 電極を信号伝送方向に沿って配置するほうが、信号伝送方向に垂直に配置するよりも大きなゲインが得られること

送信機において信号経路と逆側の物体が大きくなることで、信号伝送方向により強い電界を生じさせることができること

信号伝送経路内に物体が接触すると、信号の吸い取りが生じてゲインが低下してし

まうこと

必ずしも送受信機が人体に接触している必要はなく，人体に近接していて送信機からの電界変化が人体にも誘起される程度の距離であれば，受信感度を上げることにより通信が可能であるため，衣服の上からでも人体内通信が可能であること
人体内通信を用いることによって，従来の空気伝搬による無線のように特殊な専用アンテナを用いることなく，耐ノイズ性に優れた高品質の通信が可能になること

などを示した．

今後は，MEMS 技術や集積化技術などを結集したウェアラブル人体内通信デバイスの開発，人体の 3 次元モデルを用いた数値計算によるデバイスの最適設計が行われ，人体内通信の実用化と通信方式の確立が進むと考えられる．また，ユビキタス情報社会に適した新しい通信手段である人体内通信を利用した新しいアプリケーションの実現によって，ウェアラブル情報機器の市場拡大にもつながると考えられる．