

人体通信を使用したウェアラブル機器の開発とヘルスケアシステムへの試適用

山本恵理^{†1} 佐々木良一^{†2}

近年、自分で自分の健康を管理するヘルスケアへの関心が高まっている。ヘルスケアを目的とするデバイスとして用いられるウェアラブルデバイスは、WBAN(Wireless Body Area Network)とよばれる人体を中心とした無線通信により、ハブ端末であるスマートフォンやタブレットとの通信が行われている。このWBANは、IEEE 802.15.6によって規格が策定されており、物理層としてUHF帯狭帯域通信、超広帯域通信(UWB)、人体通信(電界方式)の三種類が技術仕様として定められている。我々はこの中でも、ウェアラブルデバイスへの搭載が期待されている、消費電力の少ない人体通信について着目した。人体通信機能がウェアラブルデバイスへ実際に搭載された事例はIDカードと玩具の数例しかなく、その通信の安定性については、まだいくつかの課題が残されている。そこで著者らは、ハブ端末とウェアラブルデバイス間の通信を、人体通信を用いて行う場合の人体上の伝搬特性と周波数特性について、21MHzと455kHzの搬送波周波数を用いて測定を行った。この結果、21MHzに比べ455kHzの搬送波周波数を使用した場合、安定した通信が行えることを確認した。この結果を用い、455kHzの搬送波周波数を使用し、人体通信で情報を送信または受信するウェアラブルデバイスの製作と、受信した情報をスマートフォンで可視化するためのアプリケーションの開発を行い、さらに、人体通信の実用化のため、通信の安全性を考慮し、AESを用いて通信傍受対策を行った。これにより、雑音にそれほど強くない符号化ASKでも、手先や顔の周辺では人体通信でウェアラブル機器同士の通信が十分行えることを確認したが、足付近では雑音によって情報が誤って受信されるという課題が残った。今後、雑音対策としてFECの実装を行い、消費電力に考慮した対策を行っていく予定である。

Trial application to the development and health care system of wearable devices using the human body communication

ERI YAMAMOTO^{†1} RYOICHI SASAKI^{†2}

1. はじめに

近年、高齢化社会の日本において、一人住まいの高齢者が安心して生活するための自分で自分の健康管理をするヘルスケアが注目されている。また、これらのヘルスケア情報である脈拍、血圧、心拍などの生体情報を取得するセンサを有するデバイスとして注目されているのが、ワイヤレス通信機能を搭載したウェアラブルデバイスである。ウェアラブルデバイスとハブとなるスマートフォンなどの端末間で通信を行う、人体を中心とした通信は、WBAN(Wireless Body Area Network)と呼ばれ、国際標準規格のIEEE 802.15.6で共通のMAC層を用い、物理層がUHF帯狭帯域通信、超広帯域通信(UWB)、人体通信(電界方式)の三つが提案されている[1]。

この中で今後、ウェアラブルデバイスへ搭載される通信方式として、消費電力の少ない人体通信への期待が高まっている[2]。人体通信は三種類あり、電流方式、電界方式、弾性波(超音波)方式の三つの方式が提案されている。電流方式に関しては、人体に影響のない程度の微弱な電気信号を流し、通信を行う通信方式であり、その安定性や電極構造が簡単なため、実用化を目指す企業で研究が行われている

る[3]。弾性波方式については拓殖大学の前山利幸氏のグループが研究を行っており、骨伝導、肉伝導の技術に近い[4]。

一方、人体の周りに存在している電界を使った電界方式については、直接電極に触れずに非接触で通信できるという特長があり、ウェアラブルデバイスへ搭載するのに適した方式であるが、シミュレーションによる伝搬特性などの報告事例はあるものの[5]、実験による測定結果の報告事例は非常に少ない[6]。また、実際に人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスと、ハブ端末との通信システムも前例報告は少なく、その実用化に向けて未知な部分が多い。そのため、ウェアラブルデバイスでの使用を想定した、人体通信の伝搬特性、周波数特性を調査し、調査結果を反映させ、実際にウェアラブルデバイスとハブ端末との通信システムを構築することでその実用性を検証することは大きな意味がある。

そこで、本研究では、IEEE 802.15.6の規格にある、21MHzの搬送波周波数を使用した人体通信機能を有するウェアラブルデバイスの試作を行い、人体上の伝搬特性の測定を行った。試作では送信機、受信機共に、人体上の電界に影響を与えないため、電池で動作する実験装置を製作した。また、KDDI研究所の発表した論文を参考にし[7]、ウェアラブル

^{†1} 東京電機大学大学院

^{†2} 東京電機大学

ルデバイス同士の通信として放射電界を抑圧した、伝搬ロスの少ない低い周波数(本論文では455kHz)の搬送波周波数を使用し、同様に人体上の伝搬特性の測定を行った。

本論文ではこれらの調査実験の測定結果と、調査実験により得られた結果を反映させ製作したウェアラブルデバイスの実用に向けての検討結果の報告を行う。

2. システムイメージと技術課題

現在、実際にヘルスケアを目的としたウェアラブルデバイスは、Melon社とNeurosky社の協力によって開発された、ヘッドバンド型デバイスの脳波を計測するMelonや[8]、Fitbit社によって開発されたブレスレット型デバイスの一日の消費カロリーなどを測定するFitbit flex[9]などがある。これらは、ウェアラブルデバイスから取得できる生体情報を、WPANの一方式であるBluetoothを使用しスマートフォンと共有する。そしてスマートフォンによりその情報を可視化することで、健康管理をすることを目的としている。ここでも、ウェアラブルデバイスに搭載されている通信方式としてWPAN規格のBluetoothが用いられているが、消費電力の大きさが問題となっている。IEEE 802.15.6(WBAN)の定義は、WPANに比べ通信距離は人から3m程度と短くなっているため低消費電力化が可能であるが、UHF帯近距離無線やUWBの無線システムも、ウェアラブルデバイスに内蔵できる形状の小形アンテナの設計が難しい。一方、人体通信は、電界方式の場合、無線通信のアンテナに相当する部品は電極と呼ばれ、これは人体に対し静電結合を行えばよいので小さな板金で構成できるため、ウェアラブルデバイスの筐体などがそのまま電極として利用できる。人体通信では、無線通信における技術課題の多い小形アンテナが不要となるためハードウェア構成が簡単になるメリットは大きい。

本研究では、図1に示すように今までのウェアラブルデバイスでハブ端末との通信に使用されていたBluetoothの代替として人体通信を使用し、ヘルスケアシステムの構築を想定した。システム設計の課題として、電界方式の人体通信では、人体上の伝搬特性が、実際の実験によって測定された結果が少ないため、高効率で安定した通信を行うために、人体上の伝搬特性や周波数特性を知ることの意味は大きい。そのため本研究では、人体上のどの位置が人体通信機能を搭載したウェアラブル機器と効率よく安定した通信ができるかを実験により確認した。また、IEEE 802.15.6の規格が策定した時期が2013年5月であり、その搬送波周波数である21MHzを使用した測定結果が少なく、搬送波周波数の違いにより電界強度への変化があるかの測定報告も少ない。そのため、ウェアラブルデバイス同士での効率の良い安定した通信を行える周波数帯を推測するための評価指標として、今回の実験の人体上の測定位置の中心である、胸部

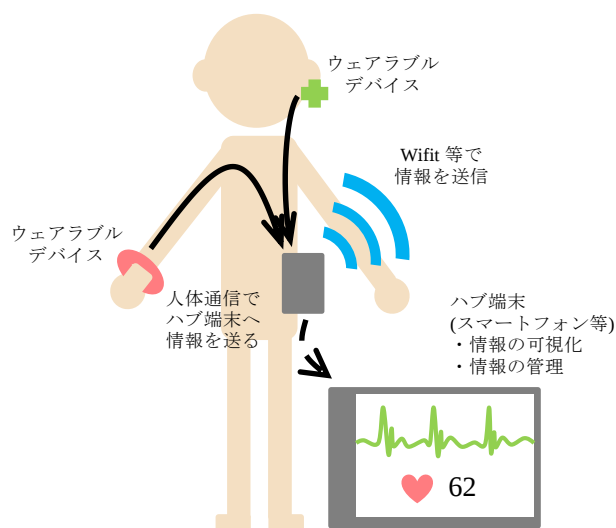


図1 ウェアラブルデバイスによるヘルスケアシステム

Figure1 Healthcare using Wearable devices

を基準にして(0dB)、ウェアラブルデバイスを装着すると予想される場所での電界強度を測定した。また、IEEE 802.15.6で規格されている21MHzの搬送波周波数と、ウェアラブルデバイス同士で伝搬ロスが少ないとされている500kHz周辺の搬送波周波数を使用してそれぞれ同じ手順で実験を行い、周波数による電界強度の違いを実測した。

また、これらから得た結果を用いて、人体通信を使用して温度情報を送信する送信機と、それを受信する受信機、また、受信した情報を可視化するための、アンドロイドスマートフォンのアプリケーションの開発を行った。これらの通信デバイスにより通信実験をおこない、人体通信の実用化に向けての課題を調査した。

3. 人体通信について

人体を伝送路とし、通信を行う方式を人体通信と呼ぶ。空間に比べ人体上の伝搬損失が小さいため通信を行う際の電力が少なく、空間を飛ばす無線とは異なり漏えいが少ないため、セキュリティ性も高いことが特徴である。この通信方式は、1996年にThomas G. Zimmerman氏が発表した、人体通信に関する論文「Personal Area Networks : Near-field Intrabody Communication」にて、一般にも知られるようになった[10]。人体通信には、前述のように三つの方式が提案されているが、本論文では電極に触れずに通信を行うことができる電界方式について述べる。

3.1 電界方式

3.1.1 電界

電気には正と負の電荷があり、物質によってその電気的性質は異なる。電荷が存在すれば、その周りの空間には電場または電界という電気的な空間が存在する。また、電界中に導体を置くと、静電誘導により導体の表面に誘導電荷

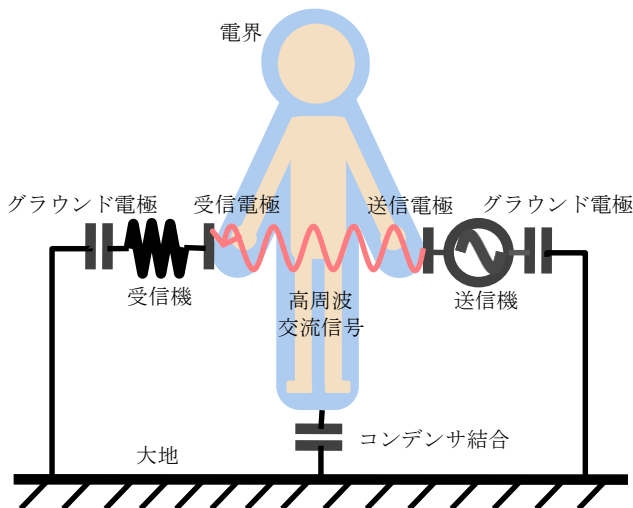


図2 電界方式の人体通信

Figure2 Human body communication based on electric field

が発生する。電界方式の人体通信は、人体を誘電体とみなし、この電界を用いて通信を行う。

3.1.2 電界方式の人体通信

電界方式の人体通信とは、人間の周りに存在している電界を利用して通信を行う通信方式である。従来、無線通信にはアンテナを用いて、ある特定の周波数に共振させることにより効率を高め通信を行っていた。人体通信では、人体を伝送路とするため、アンテナの代わりに送信機や受信機が人体と静電結合する電極を用いる。送信機の電極に印加される、高周波の交流信号により誘起された人体近傍の電界の変化を、受信機で読み取ることにより、送信機から受信機へ情報が伝えられる。このように、電極に直接手を触れることなく通信を行うことができる。ここで、電界方式の人体通信では、グラウンドに向けて電極を配置し、電流の帰還ループを形成する必要がある(図2)。従って、送信機、受信機のおかれる環境によって電流帰還ループの安定性が変わってくるため、電極配置や形状に難しさが出てくる。本論文では、すべてのウェアラブルデバイスは人体上に、また、ハブ端末であるスマートフォンはユーザーが身につけている衣服のポケットに入っていることを想定しているため、通信の安定性に大きく影響を与えると予想される。本研究では、これらの影響を測定実験により確認する。

4. 調査実験

我々は、電界方式の人体通信によるウェアラブルデバイスとハブ端末の通信における、人体上の伝搬特性と周波数特性を調べるため、IEEE 802.15.6で規格された人体通信の搬送波周波数である21MHzを使用した送信機を試作し実験を行った。また、KDDI研究所のデータを参考にし[7]、455kHzの搬送波周波数を使用した送信機を試作し同様に実験を行った。

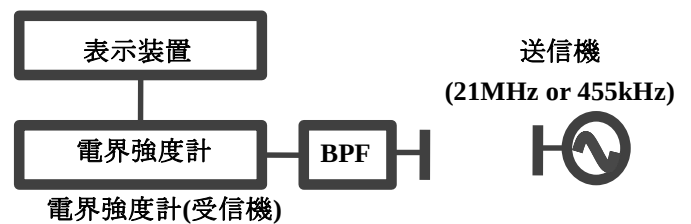


図3 送信機、受信機の構成図

Figure3 Block diagram of Transmitter and Receiver

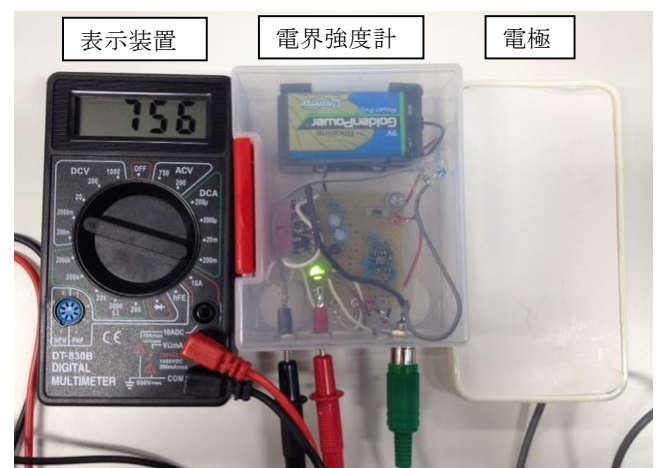


図4 電界強度計

Figure4 Level meter for Field Electric

送信機はヘルスケアを目的とした通信システムを想定し、体温、心拍、発汗などの生体情報を取得しやすい、両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももに送信機を近接させその伝搬特性の調査を行った。送信機および、受信機の構成を図3に示す。生体情報の受信はスマートフォンを想定し、実験に用いた受信機は、測定者が着用している衣服のポケットに、電界強度計から短いケーブルで接続した受信電極を入れ、測定を行った。また、2節で述べているように、電界方式の人体通信は電流帰還ループ用グラウンド電極のグラウンドとの結合具合により通信の安定性が変わることから、人間の姿勢の違いによる伝搬特の変化についても測定を行った。さらに、電界方式の人体通信の場合、服装の違いも電界に影響を及ぼすことも考えられるので、薄手、中間服、厚手の服装の違いについて測定を行った。

4.1 21MHzによる調査実験

本実験では、受信機としてスマートフォンを想定した電極を有する電界強度計を製作した。スマートフォンを用いている使用者の半数以上はポケットにデバイスを入れて持ち歩いているというマクロミルによる調査から[11]、本研究では、胸ポケットと腰ポケットに受信機を設置した。送信機の搬送波周波数として21MHzを用い、電極印加電圧を振幅9Vのsin波として図5のような測定系を用い実験を行った。

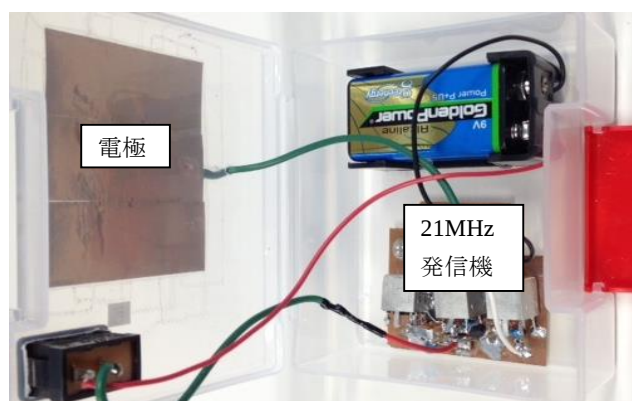


図5 21MHz 送信機
Figure5 21MHz transmitter

まず、胸ポケットに受信機の電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ各々の電界強度を測定した。この時、人体と電極間の距離は、厚さ1.6mmのガラスエポキシ基板($\epsilon_r = 4.8$)を介し、一定を保っている。次に、腰ポケットに電極を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ同様に各々の電界強度を測定した。

4.2 21MHz の調査実験結果

21MHzの搬送波周波数を使用し、胸部を基準とした電界強度の測定結果を、直立姿勢の場合を図6、座位姿勢のときを図7、寝た姿勢の場合を図8に示す。これらの結果から、電界に影響を与えやすいと考えていた服装の違いでの電界の変化はほとんど見られなかった。また、受信電極の位置による違いも電界強度にほとんど影響を与えないことが分かる。一方で、姿勢の違いは、電界に大きな影響があることが分かる。

まずは、姿勢によってもたらされる人体上の全体的な電界強度の差であるが、胸部を基準として直立姿勢のときは、約+3.04dB、座位姿勢のときは、約+6.96dB、寝た姿勢のときは、約+21.58dBの差があった。これは、電界方式の人体通信は、グラウンドとの結合が静電結合のため、人体のとり姿勢により、人体のグラウンドに対する静電容量が変化しているためと考えられる。直立姿勢のときは足の裏全体の面積が、座位姿勢のときは足の裏と両太もも全体の面積が、寝た姿勢のときは、体全体の面積がグラウンドと平行になっているため、グラウンドとの静電容量が人体のとり姿勢により変化し、このような差異が生じたと考えられる。

次に、姿勢によってもたらされる、人体上の部位に対する電界強度の差について、人体のとり姿勢によるグラウンドとの静電結合具合により、人体の表面に存在している電界の強さは全体的に変化すると予想していたが、今回の実験結果からはそのような傾向はみられなかった。姿勢を変えても、両耳、胸部、両脇で電界強度がほぼ変わらずに、低い値にとどまっている。

姿勢により大きく変化が出た人体上の部位は、座位姿勢の場合は両足、寝た姿勢の場合は両手となっている。これらの結果から、電界方式の人体通信は、人体から突起した部分の電界が強いことが分かった。

4.3 455kHz による調査実験

同様に、455kHzの搬送波周波数を使用した人体上の伝搬

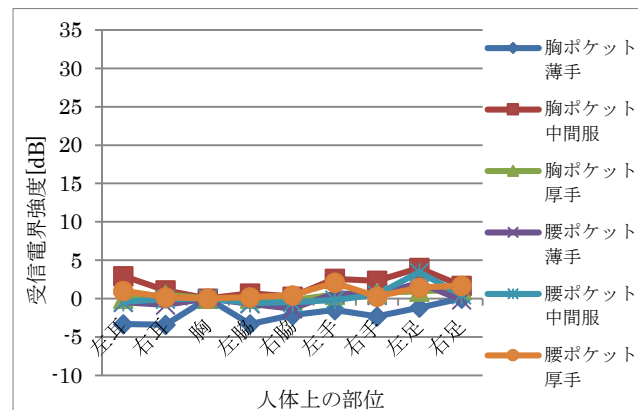


図6 直立姿勢の時の各部位の電界強度
Figure6 Field strength of 21MHz (Standing)

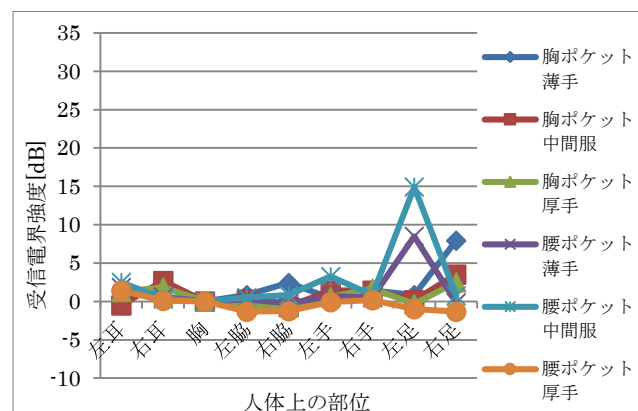


図7 座位姿勢の時の各部位の電界強度
Figure7 Field strength of 21MHz (Sitting)

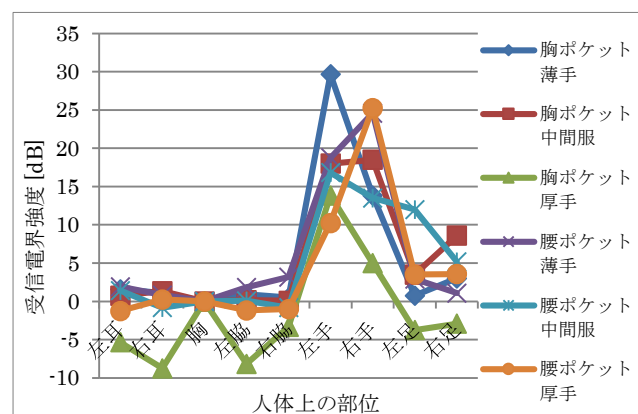


図8 寝た姿勢の時の各部位の電界強度
Figure8 Field strength of 21MHz (Lying)

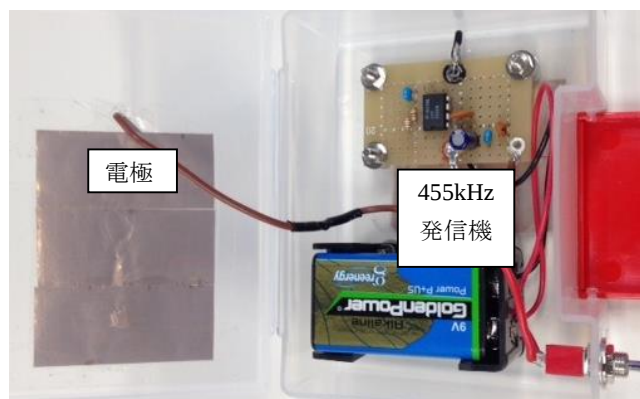


図9 455kHz 送信機
 Figure9 455kHz transmitter

特性の測定を行った。21MHzの測定の際に使用した受信機
 のバンドパスフィルタを455kHzに変更し、電界強度計を構
 成した。受信機は、腰ポケットと胸ポケットに設置した。
 送信機にはKDDI研究所の論文から得た知見により[7]、ウ
 ェアラブルデバイス同士の通信として放射電界を抑え、伝
 搬ロスが少なく、部品の入手がしやすい 455kHz の搬送波
 周波数を使用し、電極印加電圧を振幅 9V の矩形波として
 製作を行った。電極は 21MHz 測定時と同じものを用いた。
 図9にその構成を示す。まず、胸ポケットに受信機の電極
 を設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸
 部、両太ももの順に近接させ各々の電界強度を測定した。
 次に、腰ポケットに受信機の電極を設置し、その状態で、
 送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接
 させ各々の電界強度を測定した。

4.4 455kHz の調査実験結果

455kHz の搬送波周波数を使用し、胸部を基準とした電界
 強度の測定結果を、直立姿勢の場合を図10、座位姿勢の場
 合を図11、寝た姿勢の場合を図12に示す。これらの結果
 から、21MHzと同じく、服装の違い、また、受信電極の位
 置の違いによる電界への影響は見られなかった。次に、姿
 勢についての違いは、21MHzと同じく、電界に影響を与え
 やすいということが分かった。胸部を基準として直立姿勢
 のときは、約+1.23dB、座位姿勢のときは約+4.26dB、寝
 た姿勢のときは、約+3.71dBの違いがあった。これらの結
 果から、周波数を 21MHz よりも低に 455kHz では、人体が
 アンテナ化せずに、情報が外に飛び出しにくいということが
 分かった。すなわち、455kHzの方が、21MHzに比べて、
 送信機、受信機の場所の違い、人体のグラウンドに対する
 結合具合による影響を受けにくく、伝搬ロスが少ないため、
 より安定した通信が可能と考えられる。しかし、姿勢によ
 っては、電界が強く発生している部位もあり、直立姿勢の
 ときはどの部位も平均的な電界強度であるが、座位姿勢
 のときは 21MHz のときと同じく両足が、寝た姿勢のとき
 も両手が他の部位に比べ電界強度が強くなっているが、
 21MHz と比べると、それほど大きな差は出ていない。

21MHz の場合は、電界強度の最も弱い部位と比べて、直立
 姿勢の場合、胸ポケット、薄手、右足または胸部の条件で、
 約+3.42dB、座位姿勢のとき、腰ポケット、中間服、左足
 の条件で、約+14.92dB、寝た姿勢のとき、胸ポケット、薄
 手の服装、左手の条件で約+29.67dB 電界強度が最も強く
 なっている。それと比較して、455kHz の場合は、

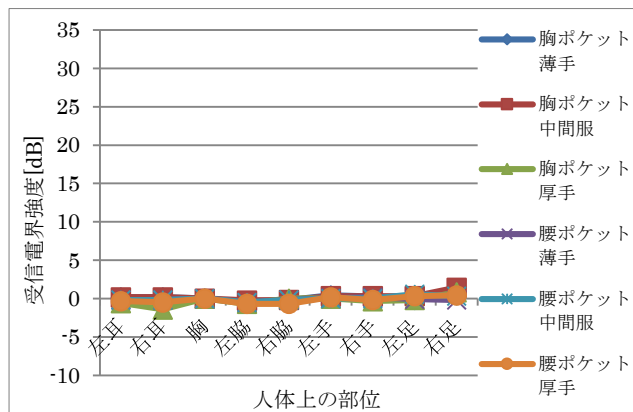


図10 直立姿勢の時の各部位の電界強度
 Figure10 Field strength of 455kHz (Standing)

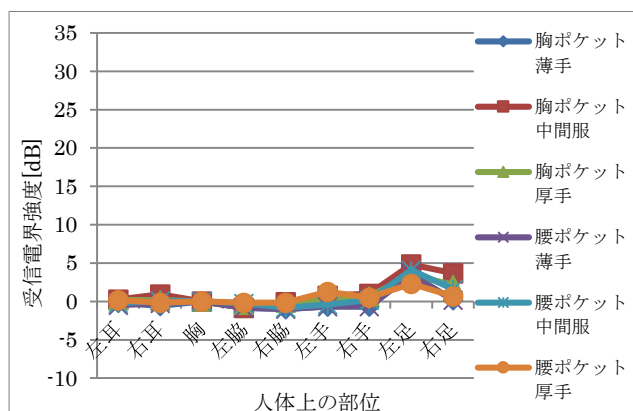


図11 座位姿勢の時の各部位の電界強度
 Figure11 Field strength of 455kHz (Sitting)

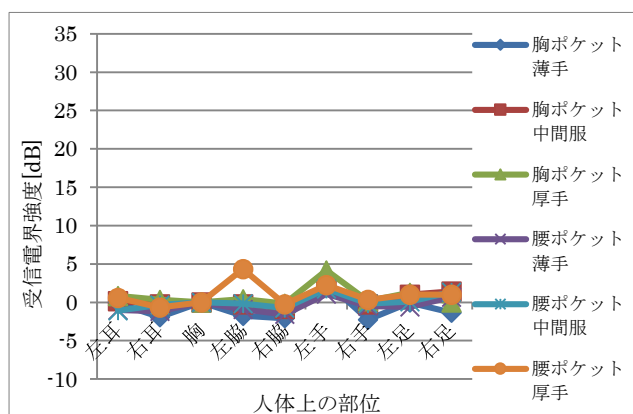


図12 寝た姿勢の時の各部位の電界強度
 Figure12 Field strength of 455kHz (Lying)

電界強度の最も弱い部分と比べて、直立姿勢の場合、胸ポケット、厚手の服装、右足の条件で約+2.25dB、座位姿勢の場合、胸ポケット、中間服、左足の条件で、約+5.66dB、寝た姿勢の場合、胸ポケット、厚手の服装、左手の条件で約+4.34dB 電界強度が最も強くなっている。

4.5 調査実験結果の考察

今回の実験から、455kHz は 21MHz と比べると、全体的な部位による電界強度のばらつきは少なく、安定していることが分かった。また当初、電界に影響を与えると予想していた服装の違い、受信機の場所の違いはあまり電界強度に影響を与えないことが分かった。また、胸ポケットと胸部間の電界強度にほとんど変化がなかったことから、従来の無線通信の通信距離が短いと通信しやすいような傾向は、電界方式の今回の実験では見られなかった。

これらの実験結果から、周波数としてはセキュリティの問題を考慮し、外に情報を飛ばさない無線通信として人体通信を搭載する場合は、波長が長く、情報が飛びすぎずに安定した通信の行える 500kHz 周辺の低い搬送波周波数を使用した通信が適していると考えられる。

電界強度が強くなる人体上の部位(両手, 両足)は、周波数を変更してもあまり変わらないが、その強さは周波数により変わることがわかる。受信機として想定しているスマートフォンなどのハブ端末は、今回の測定では、その位置による電界強度の違いは見られなかったため、人体の近くにさえあれば通信は可能だと考えられる。また、21MHz と 455kHz に共通して、両脇、両耳、胸部のあたりで電界強度が弱い傾向にあることが分かった。

現在、ネックレス型やイヤリング型のウェアラブルデバイスなどもあるが、ここでは人体通信を用いるときには電極構造に工夫が必要である。今後の実用化にむけ、今回得られた測定結果から、搬送波として 455kHz を使用した人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスを、小型で低消費電力化を意識し、電極構造も含めて検討する必要がある。

5. 送受信機の製作

4 節の実験から、455kHz は 21MHz と比べると、全体的な部位による電界強度のばらつきは少なく、安定していることが分かった。また当初、電界に影響を与えると予想していた服装の違い、受信機の場所の違いはあまり電界強度に影響を与えないことが分かった。そのため、455kHz の搬送波を使用した人体通信機能を搭載したウェアラブルデバイスの製作を行った。送信機から送信された情報は、受信機で受信されると、USB シリアル変換され、USB 端子からスマートフォンに取り込まれる。これにより、情報をスマートフォンのアプリケーションで管理できるようになっている。

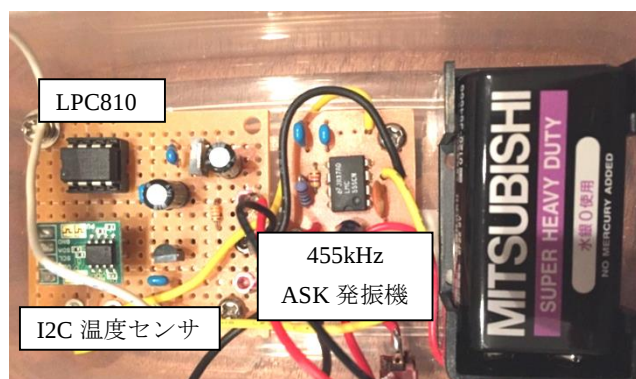


図 13 搬送波 455kHz の送信機

Figure13 455kHz transmitter

5.1 送信機の製作

今回製作した送信機の構成を図 13 に示す。送信する情報として、ヘルスケア情報を意識し温度情報を送信している。将来、小型のウェアラブル機器として製作されることを想定し、配線の少ない I2C で温度情報を送信するセンサを選択した。また、I2C センサのマスタとして働き、I2C センサから取得した情報をシリアル情報にして送信する働きをするマイコンとして、スマートフォンの CPU として多く採用されている ARM 系の一種であり、手軽に手に入る LPC810 を選択した。LPC810 から送信されるシリアル情報に、搬送波として 4 節での実験から得た結果から、455kHz でデジタル変調をして ASK(Amplitude shift keying)で情報を送信している。送信する情報には、センサから取得した温度の値に加え、“temp” というその値が何かを表す ID を付加している。また、前述のように人体通信は通常の無線機のアンテナにあたる部分が電極というものになっている。今回製作した送信機の電極は、厚さ 1.6mm のガラスエポキシ基板($\epsilon_r = 4.8$)を使用した。グラウンド電極を送信電極よりも十分大きくし、グラウンド電極が 12cm²、送信電極が 2cm²としている。ウェアラブル機器同士での人体通信の場合、グラウンドに向けて電極を配置し、電流の帰還ループを形成する必要があるためグラウンド電極を大きくした電極構造にしている。また、より実用化にむけ、通信の安全性を考慮し、鍵長 128bit の AES 暗号機能を実装した。AES 機能の実装の際、LPC810 マイコンのメモリ不足のため、よりメモリ容量の大きい LPC1114 を使用し実装を行った。

5.2 受信機

送信機から送信された情報を受信するための受信機の製作と、受信した情報を可視化するための、アンドロイドスマートフォン用のアプリケーションの開発を行った。

5.2.1 受信機の製作

今回製作した送信機の構成を図 14 に示す。情報の搬送波が 455kHz であり、これはラジオで 사용되는周波数帯であるため、AM ラジオの IC を使用し情報の受信を行っている。受信した情報は、AES で暗号化されているため、復

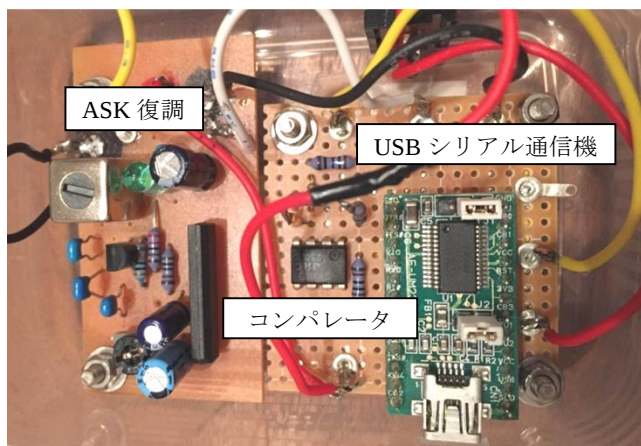


図 14 受信機

Figure14 Receiver

号の際に送信機と同様に LPC1114 を使用している。復号された信号は増幅された後、信号があるかないかを判別するためのコンパレータ回路を通り、元のシリアル情報に復調される。受信した情報を、スマートフォンの USB 端子から取り入れるために、USB シリアル変換デバイスを使用している。また、受信機の電源は、スマートフォンの USB 端子から取得できるものを使用し、将来スマートフォンの内部に人体通信受信機が搭載されることを意識して製作を行った。受信機のグラウンド電極が 12cm^2 、受信電極が 2cm^2 となっており、受信電極よりもグラウンド電極が十分に大きくなるように設計している。電極には、厚さ 1.6mm のガラスエポキシ基板($\epsilon_r = 4.8$)を使用した。

5.2.2 アプリケーションの開発

我々は、USB 端子で受信した情報を可視化するための 안드로이드スマートフォンのアプリケーションを開発した。USB 端子から受信したシリアル情報を可視化する際、ライブラリとして、FTDI 社が 안드로이드アプリケーション向けに提供している、シリアル通信用の USB ホストドライバライブラリを使用した[13]。受信した情報は、ID により何の情報かを判別し、ID と共に送られてくる数値を切り出して表示する。しかし、数値のみを表示しても、わかりやすさに欠けるため、受信した数値をグラフ化し表示するようなアプリケーションを開発した。この数値情報の表示とグラフ表示のページは、タブにより切り替えができるようになっている。受信した情報はテキストファイルとして 안드로이드アプリケーション内のフォルダに自動的に保存されるようになっている。

6. 実験

我々は、4 節において 455kHz の搬送波による人体通信が全身において安定して通信ができるという実験結果を得た。その結果を反映させた送受信機器を製作し、製作したデバ

イスで通信実験をおこない人体通信実用化に向けた課題を調査した。4 節の実験と同様に、身体の 9 か所のポイントを取り送受信の実験をおこなった。また、実験の際、AES で暗号化した情報を送信すると、受信の際に 1bit でも受信を誤ってしまうと、まったく別の文字として復号されてしまい、雑音の解析が複雑になってしまう。そのため、今回の実験では、AES の暗号化と復号の手順を除いた情報の送受信を行っている。

6.1 製作機を使用した通信実験

本実験では、製作した送受信機と 안드로이드スマートフォンを使用し、製作した機器での人体通信実験をおこない、人体通信の実用化に向けた課題の調査を行った。まず、胸ポケットに受信機とスマートフォンを設置し、その状態で、送信機を両耳、両指先、両脇、胸部、両太ももの順に近接させ各々 1秒 ごとに 1 回情報を送信し受信する、というサイクルを 100 回繰り返し、 100 回のうちの正しく受信できている回数を測定した。4 節の調査実験において、 455kHz の場合、スマートフォンとウェアラブルデバイスの位置関係と、服装と姿勢による影響はほとんどないという結果を得ているため、今回は、直立姿勢で中間服を着用している場合のみの環境で実験を行った。

6.2 製作機を使用した通信実験結果

受信機を胸の位置に設置した状態で、送信機から正しく受信できた回数を計測した実験結果を図 15 に示す。この結果から、左足での受信成功回数は 100 回中 10 回、右足での受信成功回数は 100 回中 24 回と、雑音により正しく受信できない回数が半数を大きく下回ったことが分かった。この時、足で受信した情報の一部を図 16 に示す。この図から分かるように、情報の一部分が $t \rightarrow v$, $p \rightarrow r$ などの決まった文字に誤って受信されていたり、\$ などの特定の文字に誤って受信されていることが分かる。また、その他の部位における誤受信に関しても同様の傾向であった。その他の部位の受信成功回数は、右耳が $67/100$ 回、左耳が $46/100$ 回、胸が $90/100$ 回、左脇が $98/100$ 回、右脇が $91/100$ 回、左手先が $80/100$ 回、右手先が $99/100$ となっている。

6.3 製作機を使用した通信実験の考察

今回の実験から、 455kHz の搬送波周波数を使用し、ASK でデジタル変調した人体通信送信機は、通信可能であるが雑音に弱いということが分かった。特に足部分においては、信号が送られてきているのは判別できるが、雑音により受信した情報が誤った文字として受信されていた。これは、受信機のグラウンドに向けた電極が、電流の帰還ループを形成する際に受信機のおかれる状態によってループが不安定になり、通信の安定性が崩れてしまうことが原因だと考えられる。また、今回低消費電力のために使用した、デジタル変調方式である ASK が雑音に弱いということもある。しかし、雑音の内容をみると、一部の受信誤りや特定の文字の受信誤りとなっており、エラーコレクションで十分に

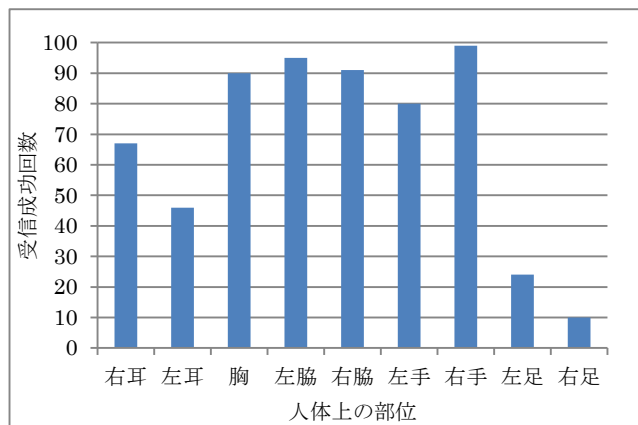


図 15 受信成功回数

Figure16 Number of successful receiver times

```
23.1.0"2$2,temp..3.2.$("$&.temt.23.1,"02"2.vemp,
23.2.00$$$.temt,23.2,$.>&$$.temr,23.2,...2r....
23.,,,"..b.....r.b. 20 $.temp.23.2.`$$.vemr
23....."b.....r.r.2"2 ..temt.23.2.$("$$.vemp
```

図 16 受信した情報の一部抜粋

Figure17 Number of successful receiver times

対応できる可能性がある。

今回の実験では、人体通信の装置構成のなかで、通信の安定性に大きな影響を与える電極についての実験を行っていない。人体通信では、従来の無線通信で使用されているアンテナに代わって、電極を使用して通信を行うが、電極構造は通信の安定性を増すために重要になってくると考えられる。

7. おわりに

ヘルスケアを目的とした人体通信を搭載するウェアラブルデバイスの製作の際は、手足からとれる体温や心拍数、歩行時のふらつきなどのヘルスケア情報との組み合わせに適している。

搬送波周波数が高いと姿勢によって人体上の電界強度が大きく変化するので、今回我々は、調査実験により得た結果から 455kHz の搬送波周波数を使用して、ウェアラブルデバイスの製作を行った。IEEE 802.15.6 の規格とは異なる周波数であるが、この周波数においても人体通信は、国内において微弱無線設備として合法的に用いることができる。これにより、455kHz を搬送波とする人体通信は雑音にそれほど強くない符号化 ASK においても手先や顔の周辺であれば通信が十分可能であるという結果が得られた。しかし、ウェアラブルデバイスの形体は今後さらに発展し、メガネ型デバイスや、足につけるものも考えられる。これに人体通信を使用する場合は、現段階のものでは雑音によって情報が埋もれてしまうと考えられる。そのため、今後の課題として、雑音対策のために FEC(Forward Error

Correction)を搭載することが必須となる。また、さらに実用化に向けて通信傍受対策として鍵長 128bitAES による暗号化を行ったが、雑音により情報が 1bit でも変化してしまった場合に、復号が不可能になってしまうため、この点から考えても FEC の導入は必須となると考えられる。さらに、暗号化や FEC を実装すると消費電力が増加し、人体通信の利点が損なわれてしまう点が懸念されることも今後の課題となる。

謝辞

本論文の作成にあたり、終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さいた東京電機大学 根日屋英之氏ならびに、実験にご協力いただきました東京大学 池上洋行氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 根日屋, "技術シーズを活用した研究開発テーマの発掘", 第 6 章第 6 節 人体通信, 技術情報協会. (2013.7.13)
- 2) "手ぶらで「ピッ」人体通信, 商用化へと隔離", 日経エレクトロニクス, pp.91-98, 日経 BP 社 (2008.6.30).
- 3) 高崎, 原, 唐沢, "B-1-44 電流方式を用いた人体伝送における電極面積の影響(B-1.アンテナ・伝播 A(電波伝搬, 非通信利用), 一般セッション)", "電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, vol. 2008, p. 44 (2008.09.02).
- 4) SB リサーチ株式会社, "飛ばない無線「人体通信」", IC カード研究会 196, Card Wave, pp.46-51 (2012.1-2).
- 5) 井上, 大石, 尾林, "B-1-175 人体通信における受信特性変化に関するシミュレーション検討(B-1.アンテナ・伝播 B(アンテナ一般))", "電子情報通信学会総合大会講演論文集, vol. 2013, p. 175 (2013.03.05).
- 6) 根日屋監修, "人体通信の最新動向と応用展開", 第 2 章, シーエムシー出版 (2011.6)
- 7) 前山, 高崎, 唐沢, "人体を伝送路とする高速通信方式", "電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播, vol. 106, pp. 53-58 (2006.12.07).
- 8) melon, <http://www.thinkmelon.com>
- 9) fitbit, <http://www.fitbit.com/jp/flex>
- 10) T. G. Zimmerman, "Personal Area Networks: Near-field intrabody communication, " IBM Systems Journal, vol. 35, pp. 609-617 (1996).
- 11) マクロミル株式会社, "スマートフォンに関する調査", http://www.macromill.com/r_data/20110228smartphone/20110228smartphone.pdf (2011.2.28).
- 12) 根日屋, "人体通信の最新技術・生体情報センシングと人体通信の融合がもたらすものは、"電波技術協会報, FORN (2010.1)
- 13) FTDI, "FTDI's Android Support", <http://www.ftdichip.com/Android.htm>