

人体通信の信号伝送経路の解析と評価

47186739 山本 健太郎
指導教員 佐々木 健 教授

Direction of the electric field lines around the human body were investigated to clarify the signal path of Human body communication (HBC) using electromagnetic field analysis. Signal transmission from a transmitter on the subject's wrist to an off-body receiver was analyzed using the detailed human body model and two types of transmitter electrode settings. The effects of various conditions such as the position of the devices, the size of electrodes and the posture of the subject were investigated by analyzing distributions of electric field directions, the level of received signal and the partial voltage of the electric field lines. From these results, the signal transmission path and transmission model of HBC for two types of transmitters were proposed and the parameters of the part of these paths including the capacitive coupling was quantitatively evaluated.

Key words: Human Body Communication, Electromagnetic Field Analysis, Finite-Difference Time-Domain

1 序論

人体通信とは人体を高周波信号の伝送路として用いる近距離無線通信技術の一種であり、主にウェアラブル機器による通信において利用される。人体通信では人体内を流れる電流と人体近傍に励起される電界によって信号が伝送されるが、詳細な電流の流れや電界の繋がりは調べられておらず、信号の伝送される経路について十分に検討されていない。信号伝送路を明らかにすることで電界の方向や強度を経路の繋がりと電気容量といった情報として含み、実際の通信を反映したモデルを構築できると考えられる。また、信号伝送路を反映したモデルを用いれば、機器の形状や装着位置等の条件による通信特性の変化を経路の変化として検討することができ、人体通信の機器設計やシステム的设计に役立つ。

本研究では、ウェアラブル機器と外部機器との間の人体通信を対象とし、電磁界シミュレーションによる信号伝送路の解析を行った。人体に接触させる機器の形状として従来一般的であった一電極送信機と、異なる形状の二電極送信機の二通りを用意し、それぞれの電界ベクトル分布や受信効率を調べた。電磁界解析を行う際、実験による測定値と人体を均一な電気的特性で簡略化した単純なモデル、複数の人体組織を再現した詳細モデルそれぞれの解析結果を比較し、電磁界解析の妥当性を検証した。また、機器の装着位置や電極面積、装着者の姿勢など実際の機器設計で問題となる要素について、各条件が通信に与える影響を調べた。これらの結果から一電極送信機、二電極送信機それぞれを使用した場合での信号の伝送路と通信モデルを検討した。また、通信モデル内の各経路が持つパラメータについて検討し、特に通信において重要と考えられる空間中の容量結合について定量的に評価した。

2 電磁界解析モデル

2.1 解析モデル

本研究では、SPEAG社(スイス、チューリッヒ)が開発する電磁界解析ソフト SEMCAD X MatterhornV17.0 を用いて FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法による解析を行った。本研究で作成したモデルを Fig. 1 に示す。人体モデルは Fig. 1 (a)の詳細モデルと Fig. 1 (b)の単純均一モデルの二種類用意した。Fig. 1 (a)の詳細モデルは独立行政法人 情報通信研究機構より提供を受けた日本人の成人男性モデル TARO を使用している。このモデルは

電磁波が生体に及ぼす影響などを調べるための電磁界解析用モデルであり、日本人成人男性の平均的な体型を有し、詳細に再現された 51 種類の生体組織から構成されている。Fig. 1 (b)の単純均一モデルは人体の主要組織の中でも比較的導電率が高い筋肉の電気定数を持つ均一なモデルであり、形状も簡略化している。これらの人体モデルの左手首に人体通信送信機を装着し、左手の指先で据置型機器上にある受信電極に触れる状況をモデル化した。

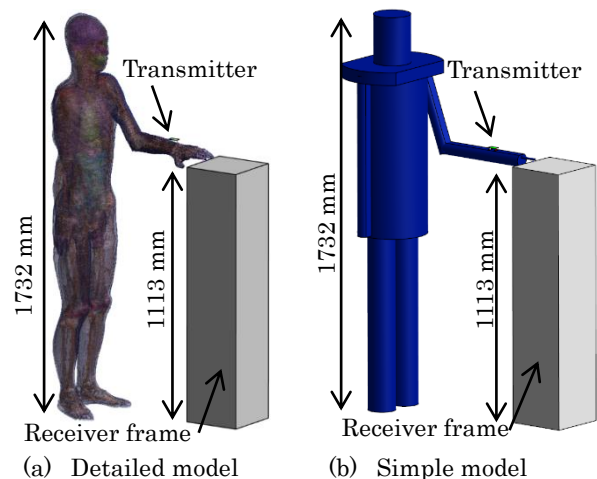


Fig. 1 Numerical simulation model

詳細モデルにおいて一電極送信機と二電極送信機を装着した場合のモデル手首部分をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示した。一電極送信機は 1 枚の回路基板(40 mm × 24 mm)と 1 枚の人体に接触させる信号電極(8 mm × 24 mm) からなり、電極と回路基板は導線につながれている。解析では信号電極と回路基板の間に周波数 21 MHz、振幅 2 V_{pp} の電圧を印加する。この周波数は IEEE 802.15.6²⁾ において人体通信の周波数として推奨されている値である。従来の人体通信の研究では、Fig. 2 のように人体に一枚の電極を接触させ、グラウンド側の電極を宙に浮かせる一電極型が一般的であった。しかし、近年グラウンド側の電極も人体に接触させる二電極送信機を用いることで通信効率が良好になることが報告されている。そこで本研究では、Fig. 3 のように人体に二枚目の電極を接触させる二電極送信機を用いた場合についても解析を行い、電極数による信号伝送路の違いについても検討する。二電極送信機は、一電極送信機の形状に二枚目の電極(グラウンド電極)

と回路基板とグラウンド電極をつなぐ導線を加えた形状をしている。受信機は指先で触れる受信電極(5 mm×5 mm)と箱型の受信機筐体からなり、電極と筐体の間に2000 Ωの抵抗が挿入されている。これら機器は電気抵抗のない完全導体としてモデル化しており、金属製の機器を用いた場合と近い状況となっている。

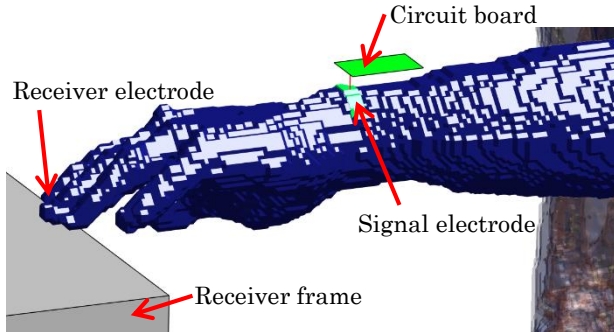


Fig. 2 Location of the one-electrode transmitter

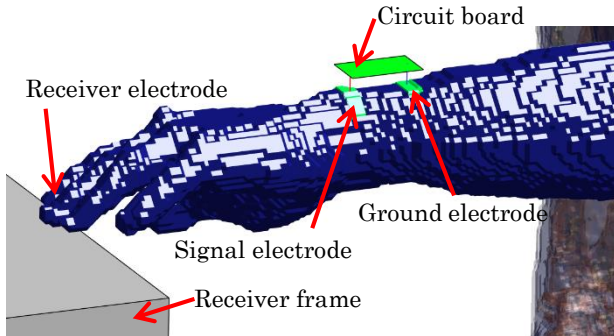


Fig. 3 Location of the two-electrode transmitter

3 実験による検証

単純均一モデルと詳細モデルを用いた解析結果に対して実験値との比較を行い、電磁界解析の妥当性を検証した。また、モデルの種類による結果の違いを調べた。

一電極送信機、二電極送信機を用い、機器の装着位置を変えて送信電圧と受信電圧の比を調べ、変化を Fig. 4 に示した。

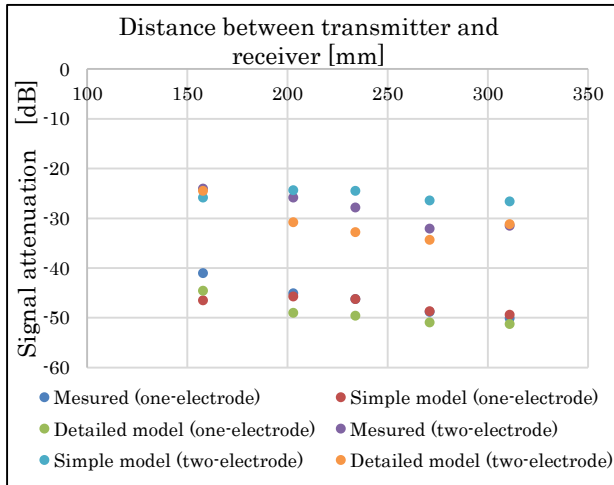


Fig. 4 Simulation and measurement results

単純均一モデル、詳細モデルいずれの場合でも信号減衰比の値は誤差 5 dB 以内で再現できていた。しかし、送受信機間距離を変えて変化の傾向を見た場合、単純均一モデルでは二電極送信機使用時で変化の割合が実験値より小さく、傾向が観察しにくくなっていた。よって様々な条件を変えて通信特性の影響を検討する場合には、詳細モデルを用いた方がよいと分かった。

4 送信機電極数と電界分布

一電極送信機を使用した場合、手首に送信機を装着したときの電界強度分布は Fig. 5 (a) のようになった。この電界強度は送信機の中心を通る断面における一周期での二乗平均値を表示している。一電極送信機では送信機を中心とし、電界が腕の上部に放射状に分布していることが分かった。また、腕上部以外の電界は弱く、受信機筐体と人体の胴体の間には電界が分布していないことが分かった。電界の分布をさらに詳しく見るため、同一の結果について受信電圧最大時の電界のベクトル分布を表示したところ、Fig. 5 (b) のようになった。Fig. 5 (b) から、電界の方向は送信機を中心に対称的に分布していることが分かった。この電界の繋がりは、腕の内部では電流の流れ、空間中では容量性結合が存在することを示している。

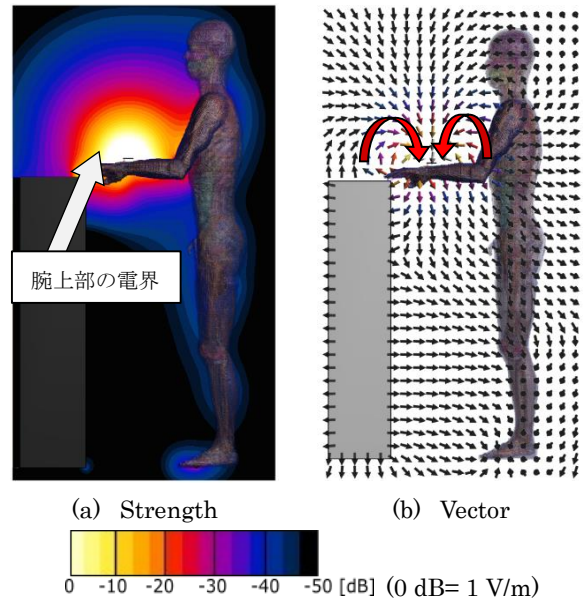


Fig. 5 Distribution of the electric field (one-electrode transmitter)

電界の繋がりを詳細に見るため、Fig. 6 に送信機を装着した腕部周辺の電界ベクトル分布を示した。Fig. 6 を見ると、送信機から人体内部に電界が放出され、腕部の表面から空間を介して送信機のグラウンドに戻ってきていることが分かる。

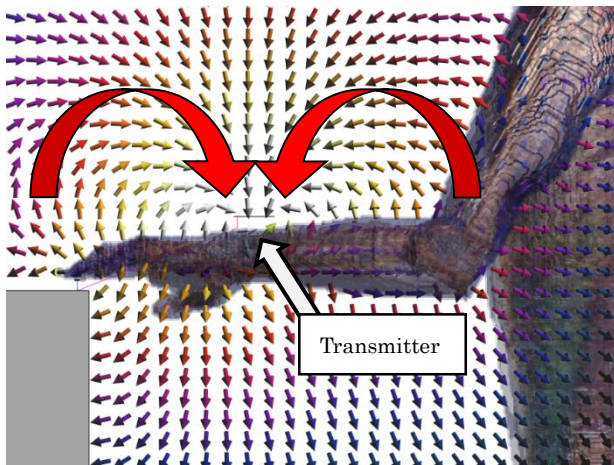


Fig. 6 Vector distribution of the electric field around the arm (one-electrode transmitter)

送受信機間の信号伝送にかかわる経路について着目すると、信号は送信機から人体内部を通して指先に至り、受信機で受信された後は空間の容量結合を介して直接送信機グラウンド(回路基板)まで戻ってきていると考えられる。信号経路のうち送信機から受信機に至るパス(以下、フォワードパスと呼ぶ)は人体内部を通る経路であり、受信機から送信機に戻ってくるパス(以下、リターンパスと呼ぶ)は受信機筐体表面から送信機グラウンドまでの空中の容量結合であると考えられる。

二電極送信機を使用した場合、手首に送信機を装着したときの電界強度分布は Fig. 7 (a) のようになった。二電極送信機では腕の上下左右の空間にいずれも強い電界が分布していることが分かる。また、一電極送信機使用時と比較して人体の胴部と受信機筐体の間にも強い電界が分布していた。

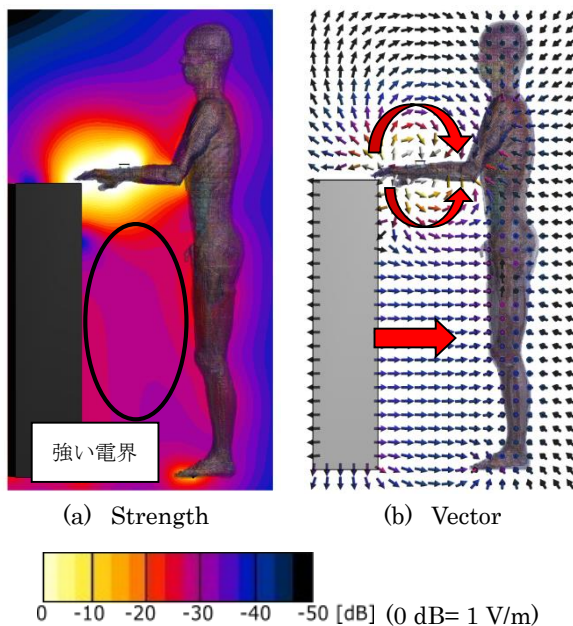


Fig. 7 Distribution of the electric field (two-electrode transmitter)

Fig. 7 (b) に示した受信電圧最大時の人体周辺のベクトル分布から、受信機筐体と胴体の間に分布している電界の方向は受信機筐体から胴体へ方向であると分かった。Fig. 8 に示す腕部周囲のベクトル分布から、送信機から出た電界は送信機の信号電極側(指や手の周囲)からグラウンド電極側(肘の周囲)に向く方向で分布していることが分かった。送受信に関わる経路は送信機から人体内部を通して指先に至るフォワードパスと、受信機筐体表面から人体の表面に至る容量結合を介してグラウンド電極周囲の人体表面に戻ってくるリターンパスから構成されている。

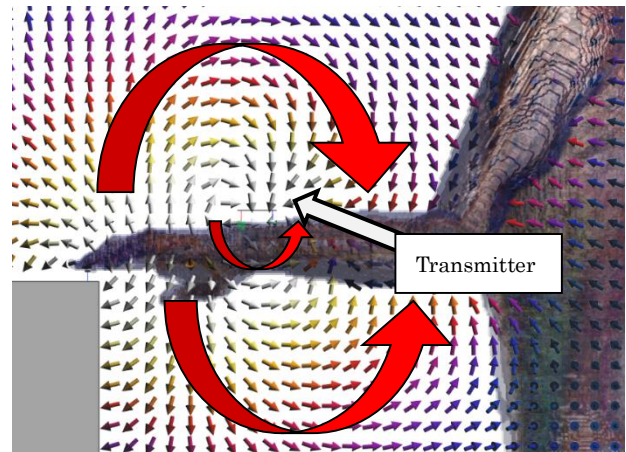


Fig. 8 Vector distribution of the electric field around the arm (two-electrode transmitter)

5 機器の装着位置の影響

人体通信の信号伝送に影響を与える要素として送受信機間の距離に着目し、詳細モデルを用いて送信機の装着位置を手首(送受信機間距離 158 mm)から肘(送受信機間距離 310 mm)までの 5 点で変化させたときの電界分布や受信電圧を調べた。

一電極送信機使用時には、手首装着時に 5.9 mV、肘装着時に 2.7 mV の電圧を受信しており、送受信機間の距離によって 0.46 倍まで信号が減衰することが分かった。また、フォワードパスとリターンパスの分圧を調べると、フォワードパスの電位は 30 mV 程度で推移しているのに対し、リターンパスの電位は 960 mV 程度であった。これは出力される電圧のほとんどがリターンパスである空中の容量結合で消費されていることを示している。電界強度と電界ベクトルを調べると、装着位置によって電界が強い部分は変わるものの、送信機を中心として腕の上部に放射状に分布する性質は変わらず、電界の方向も変化はなかった。

二電極送信機使用時には、手首装着時に 59.6 mV の電圧を受信したが、送受信機間距離によって 19.2 mV まで減少しており、約 0.32 倍まで変化した。フォワードパスの電位は 450 mV 程度、リターンパスの電位は 400 mV 程度であり、出力された電圧はフォワードパスとリターンパスで同程度消費されていることが分かった。また、電界強度や電界ベクトルの傾向は変化せず、4 節で述べた信号経路は変化していないと考えられる。

6 機器の電極面積の影響

次に、送信機の電極面積が通信に与える影響を調べた。送信機の装着位置を手首とし、送信機の電極の幅を 12 mm から 40 mm まで変化させて受信電圧の変化を解析した。また、受信機の電極を指先大の 5 mm×5 mm から手のひらで触れる 100mm×100mm に変え、受信電圧の変化を調べた。一電極送信機の場合は送信機の面積、受信機の面積の変化による受信電圧の変化は 0.2 mV であり、ほとんど変化しないことが分かった。電界強度分布や電界ベクトル分布に関しても面積による変化はなく、一電極送信機によって形成される経路は人体と機器の接触部分の影響を受けにくいといえる。一方、二電極送信機の場合は送信機の電極幅を大きくしていくことで分布する電界が強くなっていることが分かった。送信機の電極幅によって受信電圧は 42 mV から 88 mV の約 2 倍まで増加することが分かった。電極幅を増加していくことでフォワードパスの電位は 480 mV から 350 mV まで減少した一方、リターンパスの電位は 40 mV 程度の小さい変化であり、送信機の電極面積の増加によってフォワードパスのインピーダンスが下がったと考えられる。受信電極の面積を大きくしたときの受信電圧の変化は 5 mV で一電極送信機の場合と同様に 10 % 以下であり、受信電極の面積による影響は小さいと考えられる。

7 装着者の姿勢の影響

信号伝送路を構成する要素の一つと考えられる、受信機筐体と人体胸部の間の容量結合の影響を調べるため、装着者の姿勢を変えて受信電圧の変化を調べた。これまで使用していた肘を曲げて受信機に触れる体勢から腕をまっすぐに伸ばして受信機に触れる体勢とし、結果を比較したところ Table 1 のようになった。一電極送信機、二電極送信機ともに受信電圧の変化は小さく、これまでの条件と比較して装着者の姿勢による受信電圧への影響は小さいと考えられる。

Table 1 Posture and received voltage

Posture	Bending arm	Extending arm
One-electrode	5.92 mV	6.24 mV
Two-electrode	59.6 mV	59.3 mV

8 信号伝送路と通信モデル

これまでの結果を基に、一電極送信機、二電極送信機を用いた場合の通信モデルをそれぞれ Fig. 9 と Fig. 10 に示した。図中の経路のうち、赤い経路が送受信にかかわる信号伝送経路である。一電極送信機使用時は腕の上部に分布する「送信機—人体内部—受信機—空間の容量結合—送信機」の構造が信号伝送路であり、二電極送信機では腕や胴体を含む「送信機—人体内部—受信機—空間の容量結合—腕や胸部の人体表面—送信機」のループ構造が信号伝送路であった。

信号伝送路を構成する要素のうち、それぞれのリターンパスを形成する容量結合についてその電気容量のオーダ

一を近似的に求めた。一電極送信機では受信機筐体と送信機グラウンド(回路基板)の間の容量結合が、送信機の装着位置によって 1.1×10^{-2} pF から 2.3×10^{-2} pF 程度まで変化し、送受信機間の距離が長いほど小さくなることが分かった。また、それ以外の条件では大きく変化しなかった。二電極送信機では受信機筐体と人体の胸部や腕部との間の容量結合が 1.9×10^{-2} pF から 6.5×10^{-2} pF まで変化した。電気容量は送受信機間の距離が長くなるほど小さくなり、送信機の電極面積が大きくなるほど増加することが分かった。

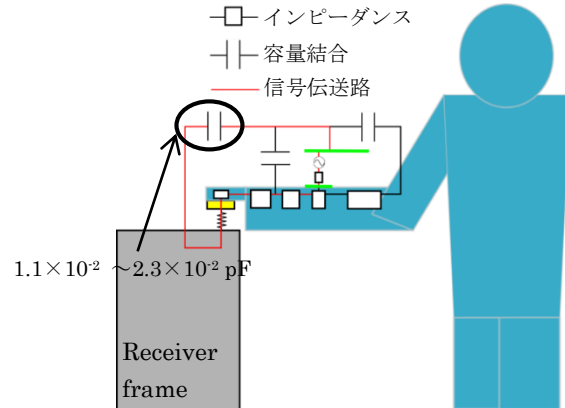


Fig. 9 Transmission model (one-electrode transmitter)

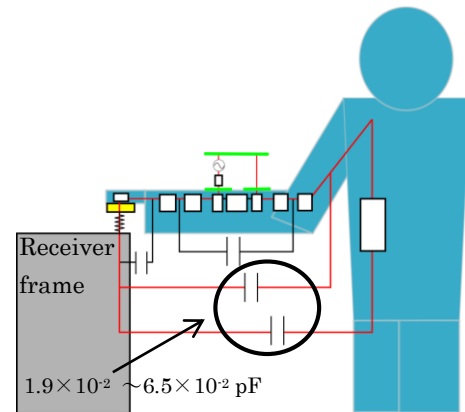


Fig. 10 Transmission model (two-electrode transmitter)

9 まとめ

人体通信における電界強度やベクトル分布を考慮した信号伝送路と通信モデルが示された。また、伝送路を構成する要素の一部についてパラメータを導くことができた。さらに装着位置や姿勢などの条件が信号の送受信に与える影響の大きさが明らかになった。これらの情報は人体通信の機器設計やアプリケーション開発に有用であるといえる。

文献

- 1) J. Hwang, T. Kang, J. Kwon, S. Park: "Effect of Electromagnetic Interference on Human Body Communication," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.59, pp.48–57, (2017).
- 2) IEEE Standard, Part 15.6: Wireless Body Area Networks, (2012).