

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500106

研究課題名（和文） 人体通信を利用したウェアラブル機器の設計に関する研究

研究課題名（英文） Design of wearable intra-body communication devices

研究代表者

佐々木 健（SASAKI KEN）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40178645

研究成果の概要（和文）：人体を伝送路の一部とする人体通信という通信方式を利用した情報機器の設計に必要な伝送特性の数値電磁界解析において、従来の詳細な人体モデルの代わりに、皮膚・脂肪・筋肉の三層構造で近似した簡易モデルによっても実用上、十分な解析精度が得られ、形状の変更も容易であることを示した。三層構造は実験用ファントムとして製作することも容易であり、均一な材質のファントムより人体の特性に近い結果が得られる可能性を持つ。

研究成果の概要（英文）：Intra-body communication is a new data transmission method that uses human body as part of the transmission medium. Detailed numerical human body model for electromagnetic analysis has been simplified by using only three layers of body tissues, namely, skin, fat, and muscle, without sacrificing the accuracy of analysis. Shape modification is much easier with this three-layered model, and this structure is also suitable for fabricating phantom for experiments. Its electrical characteristic is closer to human body than that of the ordinary phantom made of homogeneous material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：ウェアラブル機器

1. 研究開始当初の背景

人体通信とは人体が導電性であることを利用し、身につけた複数の情報機器間の通信、あるいは情報機器を身につけた人が外部の機器に触れる、他人と握手をする、など身体的な接触が生じた時にのみ通信する新しい通信方式であり、以下のような特徴がある。

(1)触れた時にのみ通信が成立する。ユーザの体の動きに合わせた新しい形態のアプリケーションに利用できる。

(2)低消費電力化。人体が通信媒体の一部として機能するので同じ空間的距離であれば空中の電波のみを利用する従来の無線より低消費電力で通信できる可能性がある。

(3)秘匿性。近傍空間への電波の漏れが少ないので傍受される危険性が低く、秘匿性を高めることができる。

国内外においてはいくつかの研究グループが人体通信を利用した試作システムを発

表しており、新しい通信方式に関する社会の関心は高い。しかし、従来の報告はいずれも事例報告的あるいはプロトタイプを発表であり、この人体通信技術を広く利用するための基礎知識を示したものではない。人体通信の原理は、送受信機のアンテナ端子を人体に接触あるいは近接させることにより、人体内に微小な電流が流れるとともに人体近傍の空間に電場が形成され、これらの作用により他方の送受信機へ信号が伝播するというものである。送受信機は普通の無線用送受信機とほぼ同じ構成で代用可能であるが、いわゆるアンテナ端子とグラウンド端子を人体に接触あるいは近接させる向きや方向および電極の大きさ、また用いる周波数などにより伝送効率が大きく変わることが実験的に確かめられている。これらの特性は人体通信をウェアラブル機器に利用する設計に不可欠な知識であるが、既存の学術的な知見からは得ることができない。

研究代表者はこれまでに手首に情報機器を装着して指先で外部機器に触れる場合の伝送モデルを提案するとともに、回路設計に必要な人体とのインピーダンスマッチングに関する実験式を提案し、人体通信の基礎研究を進めてきた。しかし現状では腕時計型機器と指先で触れる外部機器の間という限定された利用形態に関して概略的な設計指針が得られているのみであり、様々な利用形態に関して定量的な設計を行うための設計手法として確立するには至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人体が導電性であることを利用して人体と情報機器が接触、あるいは近接したときにのみ通信が行われる「人体通信」をウェアラブル機器に広く利用するために必要な設計技術を確立することである。

従来、断片的に報告されてきた伝送モデルを整理するとともに、想定される具体的な応用機器について伝送特性の解析と計測を行い、人体通信技術を応用しようとする技術者が回路や電極形状の設計を行うための解析モデルや評価の方法を示すことを目指す。

3. 研究の方法

ウェアラブル機器に人体通信を応用するために必要な伝送モデルの考え方と具体的な機器設計に必要なデータを集積するために、数値電磁界解析を用いて伝送特性および人体通信におけるアンテナに相当する電極のインピーダンス特性の評価を行う。解析には人体の電気的特性を模擬するモデルを用いるが、人体の各組織が電気的特性におよぼす影響を評価することにより、特に重要な組織のみで構成する簡略モデルを構築する。

4. 研究成果

(1)電磁界解析用の人体と送受信機モデル

人体前腕部に送信機を装着した場合を想定し、送信機励振源から電極を介して人体および空間側を見込んだ入力インピーダンス（以降、電極の入力インピーダンス）解析を行うためのモデルを Fig. 1～Fig. 4 に示す。Fig. 1 は NICT（独立行政法人 情報通信研究機構）の提供する、7 組織（皮膚、脂肪、筋肉、腱、血液、皮質骨、海綿骨）で構成される詳細人体モデルの左腕部³⁾である。Table 1 に 10 MHz における腕モデル各組織の電気的特性を示す。腕モデルの各組織には、Cole-Cole 型分散媒質の電気特性⁴⁾を適用した。また、Fig. 2 に従来用いられてきた、筋肉媒質のみで構成される均質円柱モデルを示す。Fig. 3 は送信機モデル、Fig. 4 は受信機モデルであり、各部の寸法は、腕モデルを筋肉で構成される均質媒質とした場合に最適化を行ったものである^{5,6)}。送信機励振源の内部抵抗および受信抵抗は 50Ω とし、送信機構成材料は全て完全導体とした。

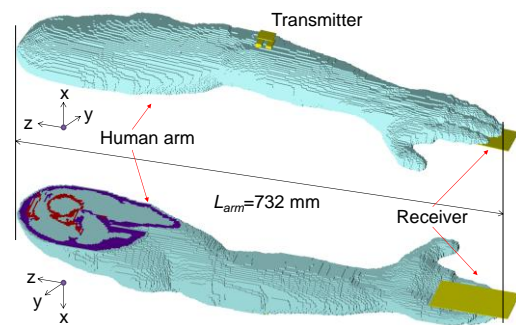


Fig. 1 Detailed human arm model

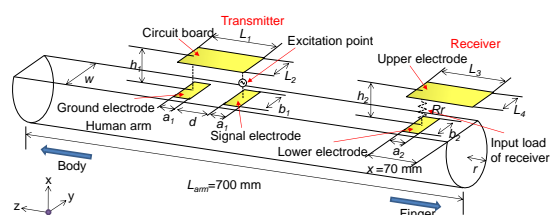


Fig. 2 Homogenous muscle cylinder model

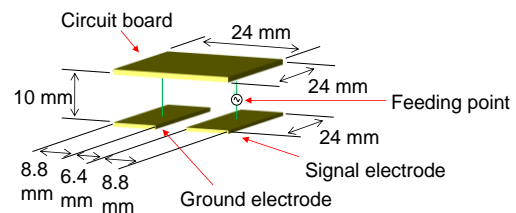


Fig. 3 Transmitter model

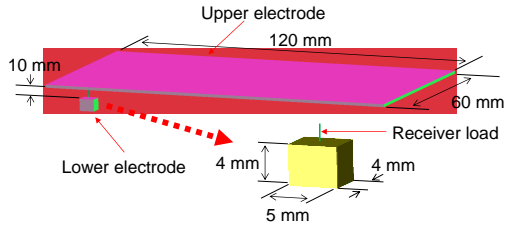


Fig. 4 Receiver model

Table 1. Electrical properties of biological tissues at 10 MHz

Tissue name	Conductivity [S/m]	Relative permittivity
Skin (dry)	0.20	360
Skin (normal)	0.28	290
Skin (wet)	0.36	220
Fat	0.029	14
Muscle	0.62	170
Blood	1.1	280
Tendon	0.41	100
Cortical bone	0.043	37
Cancellous bone	0.12	71

(2)均質円柱モデルと詳細腕部モデルの比較

詳細腕部モデルに接触した送信機電極の入力インピーダンス特性を電磁界解析により算出した。比較のため、解析結果を詳細腕部モデルの全組織を筋肉としたモデルおよび、均質円柱モデルを用いた場合の、10 MHzにおける入力インピーダンス特性とあわせて Table 2 に示す。さらに詳細な比較のため、1 MHz~1 GHz における、詳細腕部モデルと均質円柱モデルを用いた場合の入力インピーダンス特性を Fig. 5 に示す。Table 2 および Fig. 5 より、各生体組織で構成される多層構造を有する詳細腕部モデルの場合、他の 2 種類のモデルに比較し大きく入力インピーダンス特性が異なることが明らかになった。一方で、Table 2 より、厳密に人体を模擬した形状は入力インピーダンスにほとんど影響を与えないことが明らかになった。以上より、人体通信における電極の入力インピーダンス解析には、組織構造を有するモデルが必要不可欠といえる。

Table 2 Input impedance in each simulation models

Simulation model	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Detailed human arm model	179	-86.4
Detailed human arm model (muscle homogenous)	45.4	-5.88
Muscle homogenous cylinder model	50.1	-6.60

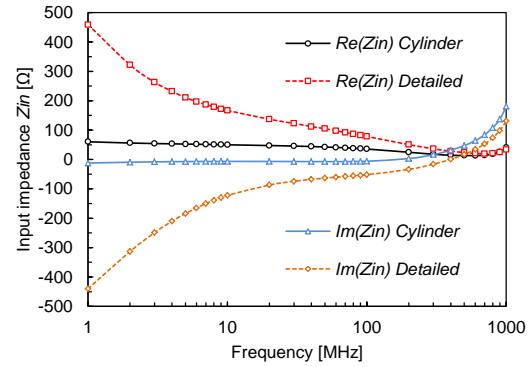


Fig. 5 Input impedance characteristics of the transmitter electrodes

(3)皮膚状態の入力インピーダンスへの影響

本研究で用いている送信機は、人体に直接接触させるため、電流が最も多く流れる皮膚の状態により送信機の入力インピーダンスは大きく変化する可能性がある。そこで、皮膚の状態として、乾燥、湿潤、通常の 3 種類に関して解析を行った。各状態における皮膚の電気的特性は Table 1 に示した値を用いた。解析の結果、Table 3 に示すように、皮膚の状態によって入力インピーダンスの実部はあまり変化しないことが明らかになった。以上より、機器装着者の皮膚の水分状態によって入力インピーダンスは大きく変化せず、例えば発汗が生じる運動時にも安定した通信が可能であると考えられる。また、送信機の入力インピーダンスは皮膚の状態ではなく、皮膚より下層の構造に大きく依存すると予想される。

Table 3 Input impedance in each skin conditions

Skin condition	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Dry	180	-127
Normal	179	-86.4
Wet	165	-51.8

(4)各組織の入力インピーダンスへの影響

皮膚より下層に位置する組織が入力インピーダンスに与える影響を調べるため、各組織を空気(導電率: 0 S/m, 比誘電率: 1)で置換した場合および、筋肉(10 MHz において、導電率: 0.62 S/m, 比誘電率: 170)で置換した場合の 10 MHz における入力インピーダンスの変化を算出した。ただし、皮膚は通常状態とし、腱と血液および皮質骨と海綿骨は同時に置換を行った。Table 4 および 5 に示した解析結果より、詳細腕部腕部モデルの脂肪および筋肉組織が他の組織で置換された場合、入力インピーダンスが大きく変化することがわかる。これは、送信機の入力インピーダンスを決定する主要な組織は脂肪と筋肉(および皮膚)であることを意味している。一方で、筋肉より下層の組織である腱、血液、

皮質骨、海綿骨を置換した場合の入力インピーダンスの変化はほとんどない。これは、筋肉層より下の部分には、ごく微小な電流しか流れず、入力インピーダンスの決定にはほとんど関与しないためと考えられる。これらの結果より、入力インピーダンス算出の際には、筋肉より下層の組織は任意の組織または空隙としてよいことが明らかになった。

Table 4 Input impedance calculated by air substitution

Tissue replaced by muscle	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Without replacement	179	-84.9
Fat	263	-166
Muscle	236	-131
Tendon, Blood	180	-85.4
Bone	179	-85.1
Tendon, Blood, Bone	180	-85.4

Table 5 Input impedance calculated by muscle substitution

Tissue replaced by muscle	Re(Z_{in}) [Ω]	Im(Z_{in}) [Ω]
Without replacement	179	-84.9
Fat	59.0	-16.2
Tendon, Blood	179	-85.0
Bone	177	-84.2
Tendon, Blood, Bone	177	-84.3

(5)各組織が電界分布に与える影響

人体通信における伝送特性を決定する要因を考えると、人体表面および内部を流れる電流だけでなく、送信機によって励起される電界も重要である。そこで、筋肉より下層の組織を他の物質で置換した場合の腕モデル周囲の電界分布について検討を行った。

Fig. 6 に、詳細腕モデル周囲および内部に励起される電界の分布を示す。電界分布の観察面は、送信機の励振源を含む zx 面とした。Fig. 6(A)は、詳細腕モデルの組織を置換しない場合の、(B)、(C)は筋肉より下層の生体組織を空気および筋肉で置換した場合の電界分布を示している。Fig. 6 より、筋肉より下層の組織を他の物質で置換した場合の電界分布は、置換を行わない詳細モデルの場合に比較して若干の違いがあることがわかる。これは、置換する物質の電気的特性、特に導電率により電界強度が決定されることを示しており、筋肉より下層の組織も腕部周辺の電界分布に影響を与えることを意味している。しかし、実人体における個人差等を考慮した場合、組織の置換による電界分布の変化はほとんど無視できる範囲と考えられる。

(6)各組織の送受信機間伝送特性への影響

(5)で検討した電界分布の変化にとともに、送受信機間の伝送特性 S_{21} もわずかに変化すると予想される。Table 6 に、筋肉より下層の組織を空気および筋肉で置換した場合の S_{21} 特性を示す。Table 6 より、 S_{21} の差は、置換なしと空気による置換で 1.1 dB、置換なしと筋肉による置換でも 2 dB と、非常に小さいことがわかる。このため、例えば筋肉より下層の組織をすべて筋肉で代替し、皮膚、脂肪、筋肉のみでモデルを構成しても、実人体を想定した精度の高い解析が十分可能であると考えられる。

(7)多層円柱モデル

以上の結果を基に、腕を層構造を有する円柱で簡略化したモデル（以降、多層円柱モデル）を考案し、これを用いて人体通信機器の入力インピーダンス解析を行う。Fig. 7 に多層円柱モデルおよび送信機モデルを示す。(1)~(6)の検討により、詳細モデルに含まれる内部の4組織（腱、血管、皮質骨、海綿骨）は送信機の入力インピーダンス特性、電界分布、伝送特性にほとんど影響を与えないことが明らかになったため、モデルは皮膚、脂肪、筋肉の三層で構成した。各組織の厚みは、Table 7 に示す実人体腕部の各組織の体積比 η を参考として決定した。また、送信機は3章 Fig. 3 に示したものと同様の寸法である。

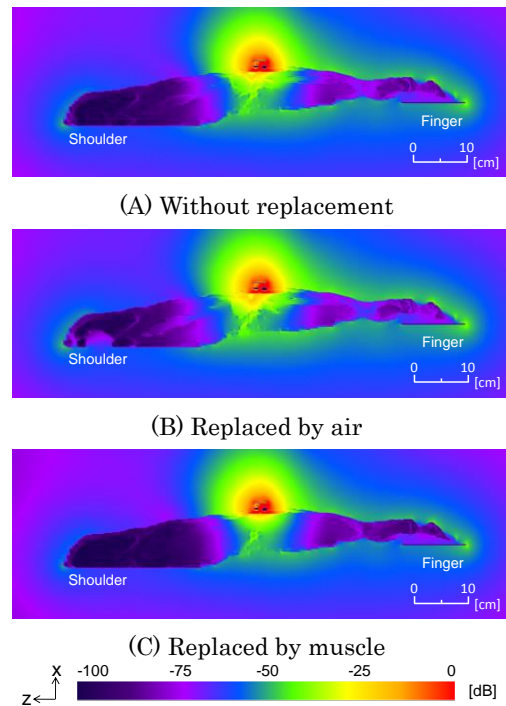


Fig. 6 Electric field distributions around and inside arm models

Table 6 Transmission characteristics between transmitter and receiver

Material below the muscle	S_{21} [dB]
Without replacement	-78.3
Air	-77.2
Muscle	-80.3

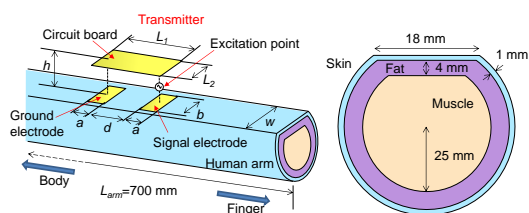


Fig. 7 Multilayered cylindrical model

Table 7 Electrical and anatomical parameters of tissues

Tissue name	Conductivity [S/m]	Relative permittivity	Volume [%]
Skin	0.20	360	6.6
Fat	0.029	14	24
Muscle	0.62	170	69.4

(8)入力インピーダンス特性の比較

Fig. 8 に、1 MHz~1 GHz における詳細人体モデルおよび円柱多層モデルを用いた場合の送信機電極の入力インピーダンス特性を示す。Fig. 8 から、詳細腕部モデルと多層円柱モデルの入力インピーダンスは、1 MHz~1 GHz の範囲ではほぼ一致することがわかる。各成分について詳細にみると、実部は 1 MHz~1 GHz において両モデルで 5~6%程度差しかない。一方虚部は、4 MHz~1 GHz においては両モデルで 5~6%程度の差しかないが、1 MHz~4 MHz においては、10~20%程度の差がある。これは低い周波数においては表皮効果の影響が小さくなり、皮膚の厚さの差が入力インピーダンスに影響しているためと考えられる。これらの結果より、3 種類の組織で構成したモデルでも、広帯域にわたって詳細モデルと同様のインピーダンス特性が解析できることが明らかとなった。

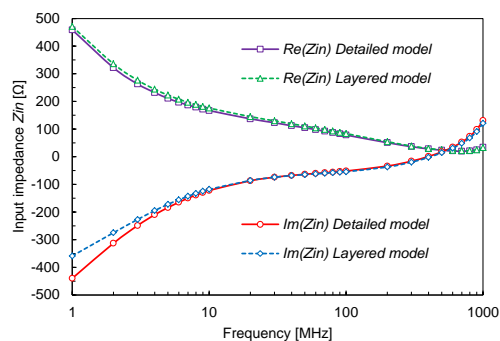
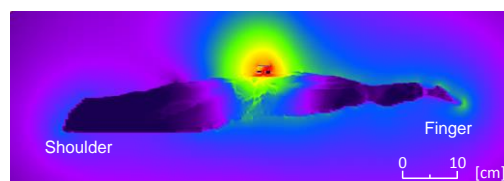


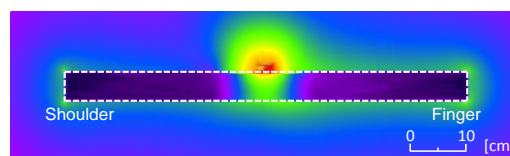
Fig. 8 Input impedance characteristics of the transmitter electrodes

(9)電界分布の比較

送信機電極の入力インピーダンス特性を検討する場合には、円柱多層モデルを用いて問題無いことが確認された。加えて、人体通信では送信機により励起される電界により通信を行うため、入力特性に加えて正確な電界分布を算出する必要がある。Fig. 9 (A)に詳細腕部モデルの、Fig. 9 (B)に円柱多層モデルの、送信機励振源を含む zx 面での 10 MHz における電界の実効値分布を示す。Fig. 9 より、両モデルで、電界分布がほとんど変化しないことがわかる。以上の検討から、人体通信送信機の入力インピーダンス特性および電界分布を電磁界解析により算出する際には、皮膚、脂肪、筋肉の 3 組織で構成される円柱多層モデルを用いれば十分であることが明らかになった。



(A) Detailed model



(B) Multilayered cylindrical model

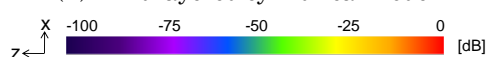


Fig. 9 Electric field distributions around and inside arm models

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 村松大陸, 山本隆彦, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “インピーダンス整合を考慮した人体通信送信機の電極設計と周辺電界に関する検討”, ライフサポート学会誌, Vol.24, No.7, pp.70-78, 2012 (査読有り)

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① Dairoku MURAMATSU, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, Ken SASAKI, “Development and Study of Electrical Property on Phantom for Human Body Communication Considering Tissue

- Structure of Human Arm”, International Conf. on Electronics Packaging 2013, Osaka International Convention Center, Japan, Apr. 10-12, 2013. (Oral)
- ②馬場 英彰, 村松大陸, 佐々木健, “人体通信用 10 MHz 帯ファントムの組成と電気特性に関する基礎検討”, 電子情報通信学会 2013 年総合大会, 岐阜大学, 2013 年 3 月 19-22 日
- ③ Dairoku MURAMATSU, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, Ken SASAKI, “Input Impedance Analysis in Human Body Communication Using Detailed Human Body Model”, The 15th Biennial IEEE Conf. on Electromagnetic Field Computation (CEFC2012), pp.31, Oita, ANA Hotel Oita, Japan, Nov. 11-14, 2012. (Poster)
- ④ Dairoku MURAMATSU, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, Ken SASAKI, “Multilayered Cylindrical Human Arm Model for Impedance Analysis in Human Body Communication”, The 18th Asia-Pacific Conf. on Communications (APCC 2012), pp.478-479, Jeju Island, Korea, Oct. 15-17, 2012. (Oral)
- ⑤ Dairoku MURAMATSU, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, Ken SASAKI, “Transmission Characteristics of Wearable Devices Between Two Human Bodies”, The 1st IEEE Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE 2012), pp.365-366, Makuhari Messe, Japan, Oct. 2-5, 2012. (Oral)
- ⑥村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “1 MHz~1 GHz での異なる腕モデルによる人体通信電極の入力特性”, 電子情報通信学会 2012 年ソサイエティ大会予稿集, B-1-143, 富山大学, 2012 年 9 月 11-14 日
- ⑦村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “詳細および簡易モデルを用いた人体通信機器の特性解析”, 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.585-588, 富山国際会議場, 2012 年 5 月 16-18 日
- ⑧Dairoku MURAMATSU, Fukuro KOSHIJI, Kohji KOSHIJI, Ken SASAKI, “Input Impedance Characteristics of Human Body Communication Transmitter Using Realistic Human Model”, Intl. Conf. on Electronics Packaging 2012, pp.735-738, Tokyo Big Sight, Japan, Apr. 18-20, 2012. (Poster)
- ⑨村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “多層円柱モデルによる人体通信送信機の入力インピーダンス解析”, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, pp.181, 岡山 岡山大学, 2012 年 3 月 20-23 日
- ⑩横山義晃, 村松大陸, 佐々木健, “頭部を信号の伝送路として利用した人体通信 - 電磁界解析における頭部形状・内部構造の詳細モデリングの重要性 -”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.951-952, 首都大学東京, 2012 年 3 月 14-16 日
- ⑪Kevin Darne, Dairoku Muramatsu, Ken Sasaki, “Application Development and Analysis for Human Body Communication System”, 第 10 回人間情報学会講演会, pp.10-14, 東京大学, 2012 年 3 月 14 日
- ⑫村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “詳細人体モデルによる人体通信機器の入力特性および生体暴露に関する検討”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011, O1-1, pp.1-3, 東京 芝浦工業大学, 2011 年 11 月 3-5 日
- ⑬村松大陸, 越地福朗, 越地耕二, 佐々木健, “詳細人体モデルを用いた人体通信機器の入力インピーダンス特性に関する検討”, 2011 年度精密工学会秋季学術講演会, pp.956-957, 金沢大学, 2011 年 9 月 20-22 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 健 (SASAKI KEN)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 : 40178645