

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246073

研究課題名(和文)人体近傍微弱電界通信によりユニバーサルインターフェイスを実現する研究開発

研究課題名(英文) Research and development of near-field coupling intra-body communication for universal interface

研究代表者

門 勇一 (Kado, Yuichi)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科 電気電子工学系・教授

研究者番号：90500223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円

研究成果の概要(和文)：人体近傍微弱電界通信の応用分野の拡大を狙って、カード型の装着型トランシーバと環境埋め込み型トランシーバを試作した。ユースケースに即して、両トランシーバ間の通信品質を評価するシステムを構築して、パケット誤り率を評価した。また、E0-OEプローブを開発して、実人体上や人体等価ファントム上での信号伝搬損失を正確に測定すると共に、電磁界シミュレーションによりその妥当性を確認した。ユニバーサルインターフェイスとして社会実装するための課題に対して、電界通信システムの等価回路モデル化に取り組み、通信品質改善や信号干渉抑制に対する指針を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We proposed a near-field coupling communication (NFCC) system composed of not only transceivers on the body (wearable TRX) but also transceivers embedded in floors, PCs, equipments, etc (embedded TRX). Therefore, our system broadens the fields of application. To estimate the transmission quality of our system, we measured the packet error rates (PER) between a wearable TRX and an embedded TRX. We also developed an electrically isolated probe consisting of an electrical-to-optical (E/O) converter and an optical-to-electrical (O/E) converter. It is demonstrated that the measurement system using an E/O and O/E conversion probe is effective to achieve a stable communication system. Based on the experimental and simulated results, an equivalent circuit of the NFCC system was proposed. From the analytical model, we identified the cause of the interference problem and quality deterioration. We also found that weakening the effects of this factor was important to achieve a stable NFCC link.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：電界通信 人体近傍通信 ボディエリアネットワーク ヒューマンインターフェイス

1. 研究開始当初の背景

人体表面に誘起された交流信号を通信に使う試みは人体に装着した複数の情報機器間の信号伝送に適用する狙いで、IBM の Zimmerman により 1995 年に発表された[1]。しかし、使用したキャリア周波数 (330KHz)は環境雑音レベルが大きな周波数帯であり、送信機から 30 Vp-p の大きな交流信号を発生しないと人体上の通信機器間での通信は成立しなかった。IBM は前述した用途には Bluetooth や WiFi 等の近距離無線通信技術を使うことにして、本技術の研究開発を中止した [2]。

一方、研究代表者らは人体近傍の交流電界通信技術は人体に装着している通信機と様々な機器や環境に埋め込まれている通信機とが“触れる”或いは“踏む”などの動作で通信を開始し、“離す”と通信を終了する極めて直観的で使い易いユーザインターフェイスになる事に注目した。また、信号がアンテナから放射され、10m 以上も信号が到達してしまう Bluetooth 等の近距離無線通信技術はこの用途に使えないと判断した。そこで、高感度な電気光学結晶 (EO 結晶) を用いたセンサで交流電界を検出するトランシーバのプロトタイプを試作して、人体上の任意の2点間で 10Mbps の高速データ伝送が出来ることを世界に先駆けて示し[3]、2005 年世界情報社会サミットなどに展示された。

しかし、EO 結晶を用いた方式は高価であり、普及しない等の指摘があった[2]。研究代表者らは電子部品だけからなる人体近傍電界通信用送受信機を研究開発し、電波法と人体への防護基準を満たすことを確認し[4]、商品としてサンプル出荷した。代表研究者らは双方向通信機能をもつトランシーバ用 LSI 試作に成功し、実装した結果を報告した [5]。

しかし、微弱電界通信技術の普及のためには通信路の高精度なモデル化、通信品質の評価システム、通信回線設計理論、ネットワーク構成法などの基盤技術と理論が未熟であり、標準化会議等に提案するだけの理論的裏付けと基礎データ蓄積が脆弱であった。こうした課題解決に加えて、省エネルギーと少子・高齢化の社会的ニーズに応える応用研究の構想を具体化して本研究開発を提案するに至った。

<引用文献>

[1] T. G. Zimmerman, “Personal Area Networks: Near-field intra-body communication,” IBM Systems Journal, Vol. 35, NOS 3&4, pp. 609-617, 1996.

[2] H. Goldstein, "NTT's shaky approach to data transfer targets a solved problem", IEEE Spectrum January 2006, pp. 24-25.

[3] M. Shinagawa, M. Fukumoto, K. Ochiai, and H. Kyuragi, “A near-field-sensing transceiver for intra-body communication based on the electro-optic effect,” IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 53, No. 6, pp. 1533-1538, 2004.

[4] Y. Kado and M. Shinagawa, "AC Electric Field Communication for Human-Area Networking" IEICE Transactions on Electronics, Vol. E93-C, No.3, pp. 234-243, 2010

[5] R. Kawano, F. Morisawa, M. Shinagawa, and Y. Kado, “LSIs for an Advanced Compact Electric-field Communication Module”, NTT Technical Review, Vol. 8, No. 3, pp.5-8, 2010.

2. 研究の目的

本研究では人体表面を伝送路にして微弱な交流電界信号を伝える通信技術と通信回線設計論を確立する。本通信技術でユーザが機器に“触れる”だけで認証されカスタマイズされたり、介護士や医療関係者が高齢者や患者の体に“触れる”だけで健康情報データを取得するなどの革新的ヒューマン・インターフェイスに発展させ、より安心・安全で快適・便利な生活環境やオフィス環境を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

研究期間を平成 23 年度から 26 年度までの 4 年間とし、人に優しく環境雑音に強い微弱交流電界を用いた人体表面を伝送路とする通信技術を確立するため、以下の 3 つの主要課題に取り組んだ。

- (1) 人体近傍微弱電界通信技術基盤の確立、
- (2) ヒューマンエリアネットワークの構成技術の確立、
- (3) 実空間への実装とヒューマンインターフェイス機能評価、

4. 研究成果

4.1 人体近傍電界通信トランシーバの試作と基本特性

<研究成果の報告>

試作した wearable TRX と embedded TRX の外観図と外形寸法を図 1 に示す。内部の写真と主な仕様を図 2 に示す。wearable TRX はコイン型リチウム電池駆動であり、wearable TRX は AC 駆動である。embedded TRX は同軸ケーブルを介して 35cm 角の床埋め込み電極が接続される。また、RS232C インターフェイスを有している。

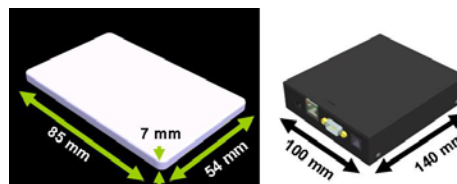
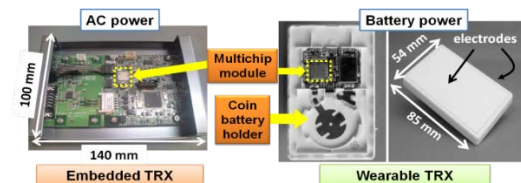


図 1 Wearable TRX の外観(左側) と embedded TRX の外観 (右側).



Wearable TRX		Embedded TRX	
Supply voltage	3.0 V	Supply voltage	6.0 V
Bitrate	420 kbps	Bitrate	420 kbps
Carrier Frequency	6.75 MHz	Carrier Frequency	6.75 MHz
		Interface	RS232C

図 2 Wearable TRX の内部(右側) と embedded TRX の内部 (左側)、及び主な仕様

試作した wearable TRX と embedded TRX 間の通信品質を評価する測定システムを図 3 に示す。埋

め込み電極の上に設置した直方体の人体等価ファントムの上面に wearable TRX を設置した。embedded TRX は同軸ケーブルと共通モード・チョークコイルを介して埋め込み電極に接続されている。また、wearable TRX とファントムの間に発砲スチロールを挿入して、信号を減衰させて通信品質を評価した。

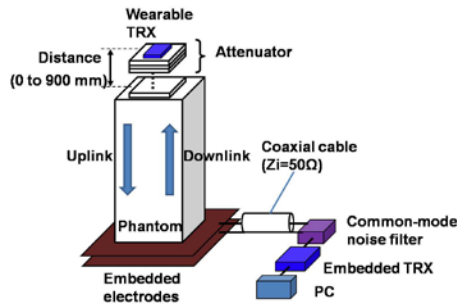


図3 通信品質測定システム

通常、embedded TRX は AC 駆動になるため、信号パスに同相雑音が入る。その様子を図4の回路モデルに示した。この同相雑音を除去するために共通モード・チョークコイルの挿入が有効である。

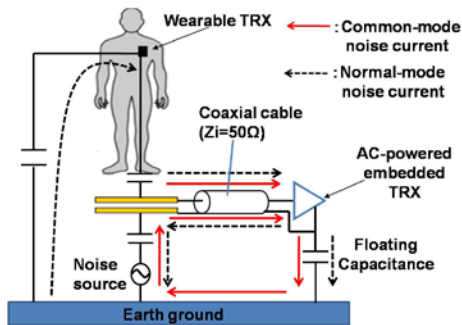


図4 信号パスへの雑音混入経路

図3の通信品質測定システムで示した位置に共通モード・チョークコイルの挿入して測定を行った。wearable TRX とファントムの間に挿入する発砲スチロールの厚みを変えながら、両トランスバ間のパケット誤り率を測定した。測定結果を図5に示す。チョーク・コイルを挿入しないと通信が成立しないが、挿入すると200 mm以下で誤り率は 10^{-4} 以下になる。次に、アップリンクとダウンリンクの両方のケースにおける受信電力の測定を行った。受信電力測定システムを図6に示す。受信電力はスペクトルアナライザで測定した。測定結果を図7に示す。特に、ダウンリンク時の受信電力測定において、スペクトルアナライザをバッテリー駆動とした場合とAC駆動とした場合の測定値が大きく異なる(2.3 dBm程度)。この原因を説明しているのが、図8である。AC駆動の測定器でダウンリンク時の受信電力を測定すると、信号のリターンパスを形成するC1と並列に測定装置の筐体起因する容量C7が入ることになる。これがリターンパスを強化して、測定値を過大評価することになる。本実験では、バッテリー駆動のスペクトルアナライザで受信電力を評価した。

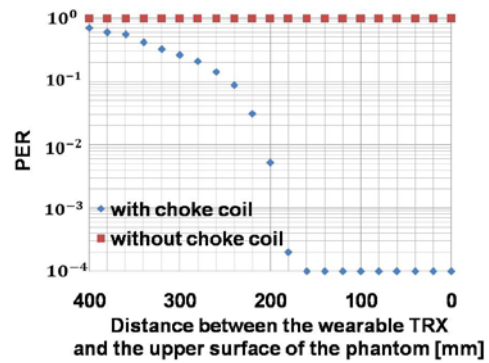


図5 パケット誤り率

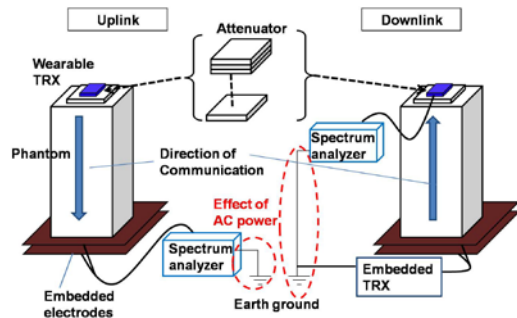


図6 受信電力測定システム

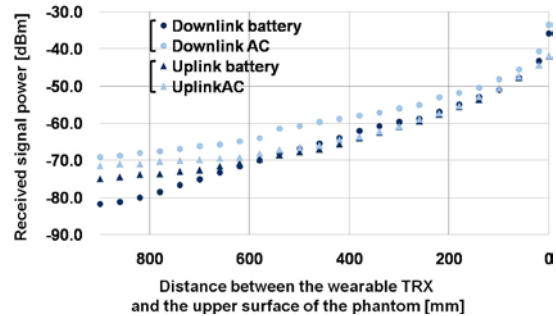


図7 受信電力測定結果

受信電力測定結果からパケット誤り率の受信電力依存性をプロットしたのが図9である。ダウンリンクの方がアップリンクより、通信品質が良い。アップリンクの品質劣化の原因は環境雑音の影響と考えられる。

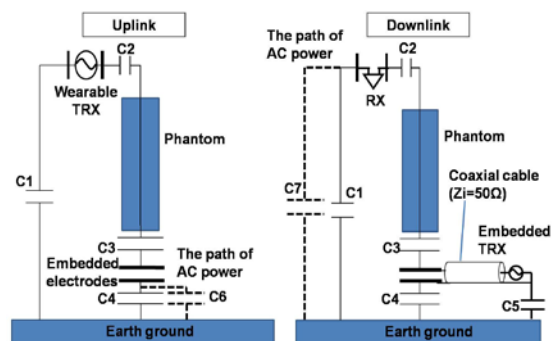


図8 AC駆動測定器の測定値への影響

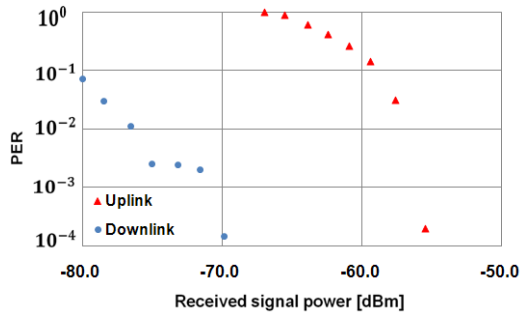


図9 パケット誤り率

<まとめ>

人体近傍電界通信の応用分野の拡大を狙って、カード型の装着型トランシーバ (wearable TRX) と環境埋め込み型トランシーバ (embedded TRX) を試作した。両トランシーバ間の通信品質評価をパケット誤り率で評価した。コモンモード・チョークコイルを信号パスに挿入すると顕著な効果があることを明らかにした。また、受信電力の測定では AC 駆動の測定器は測定値を過大評価することを明らかにした。バッテリー駆動の測定器を用いて実験を実施した。

4. 2 人体等価ファントム上での MHz 帯電界信号伝搬特性

<研究成果の報告>

・等価回路モデル

人体上におけるカード型トランシーバ間通信の等価回路モデルを図 10 に示す。応用例に対応して、人体が横になっている場合 (a) と立っている場合 (b) のモデルを表している。ここで Ca1, Cb1 はトランシーバのグラウンド電極間, Ca2, Cb2, Ca3, Cb3 はトランシーバのグラウンド電極とフロアグラウンド間, Ca4, Cb4, Ca5, Cb5 はトランシーバの信号電極と人体間, Ca6, Cb6, Ca7, Cb7 はトランシーバのグラウンド電極と人体間, Ca8, Cb8 は人体とフロアグラウンド間の容量を表す。

試作したカード型トランシーバは双方向通信が可能であるが、図 10 では一方が送信機 (TX) で他方が受信機 (RX) の場合における信号ループを示している。我々が通信に用いる 6.75 MHz 周波数帯において、人体は導体とみなせる。しかしながら、信号ループには靴や服、ベッドの高さから生まれる可変結合容量が介在し、信号損失はこれらの容量に依存する。数値法により信号伝搬損失を正確に定義することは困難であるため、実験的に損失を評価することが必要である。

・測定機器

バッテリー駆動送信機

カード型トランシーバは BPSK 変調信号しか出力しないため、信号減衰特性評価用に 6.75 MHz で約 10 Vp-p の正弦波信号を発生するバッテリー駆動のカード型送信機を試作した。送信機の写真とブロック図を図 11 に示す。送信機の大きさは、85 x 54 x 6.5 mm であり、信号電極は 36.8 cm²、グラウンド電極は 19.5 cm² である。図 11 (c) に示すように、これらは我々が以前に開発したカード型トランシーバの大きさと全く同じサイズとなっている。

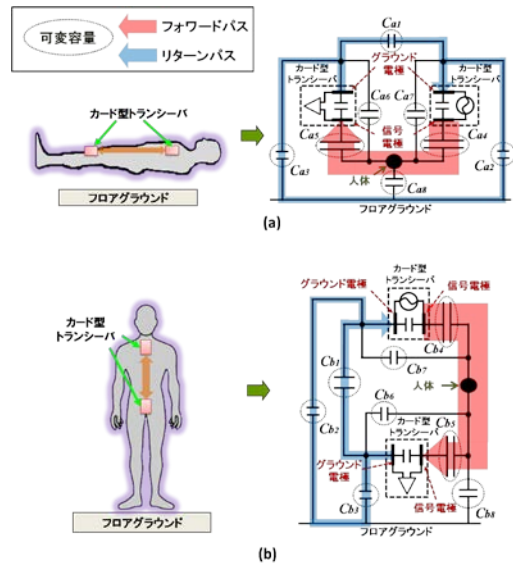


図 10 人体上におけるカード型トランシーバ間通信の等価回路モデル

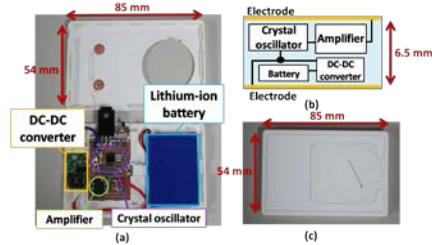


図 11 バッテリー駆動送信機 (a) 写真, (b) ブロック図, (c) カード型トランシーバの写真

・電気/光 (E/O), 光/電気 (O/E) 変換プローブ
被測定系に与える電氣的影響を抑制し、カード型トランシーバの受信信号を正確に測定するため、電気/光 (E/O) および光/電気 (O/E) 変換器から成るプローブを設計、試作した。E0-OE プローブのブロック図を図 12 に示す。プローブヘッドの E/O 回路につながる電極で信号を受信する。

この電極はカード型トランシーバと同じ大きさを持つ平行平板電極である。E/O 回路は電気信号を光信号に変換し、O/E 回路では光信号を電気信号に再び変換する。更に、E/O 回路はバッテリー駆動であり、O/E 回路は直流電源によって駆動される。E0-OE プローブ全体の回路利得は 6.75 MHz において 23.8 dB である。

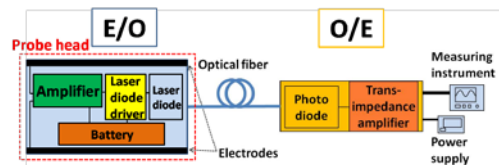


図 12 E0-OE プローブのブロック図

・信号伝搬損失評価システム

実験システムの概略図を図 13 に示す。二つのトランシーバを身に付けている人体がベッドの上で横になっている状態 (a) と床の上に立っている状態 (b) を想定している。ファントムは 6.75 MHz において導電率 0.59 S/m, 比誘電率 90 F/m を持つゲル状の物質であり (人体の導電率は 0.60 S/m),

人体と同じ電気的特性を持つ。ファントムの大きさは 950 x 190 x 190 mm である。(a)と(b)におけるバッテリー駆動送信機と E/O プローブ間の距離は、 d_1 と d_2 で表される。測定機器にはバッテリー駆動のスペクトラムアナライザ (ANRITSU MS2722C) を使用した。E0-OE プローブは受信機として使用している。バッテリー駆動送信機は位置を固定し、E0-OE プローブ先端部はファントム上を移動する。

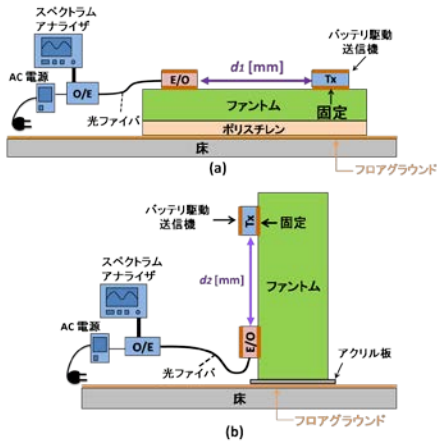


図 13(a) 横倒, (b) 直立ファントムにおける実験装置

・実験およびシミュレーション結果

実験で測定した受信電圧を用いて、下記の式で定義される信号伝搬損失を計算した。

$$\text{Loss} = -20 \times \log \left\{ \frac{\text{Received voltage}}{\text{Transmission voltage}} \right\} [\text{dB}]$$

また、有限要素法を用いた電磁界シミュレーション (Ansys 社 High Frequency Structure Simulator) でも受信電圧を計算し、評価した。実験とシミュレーションで評価した信号伝搬損失の結果を図 14 に示す。それぞれ横倒ファントム (a) と直立ファントム (b) の結果を示している。図 14 より、送受信機間距離が増加するほど受信信号が減少することがわかる。また、最小二乗法によるフィッティングを行い、近似値を算出した。近似線も図 14 (a) と (b) にプロットされている。横倒ファントムの信号損失は、実験では $d_1^{-1.30}$ に、シミュレーションでは $d_1^{-1.62}$ に比例し、直立ファントムの信号損失は、実験では $d_2^{-1.59}$ に、シミュレーションでは $d_2^{-1.94}$ に比例した。これらの信号損失変化の主な要因は、送受信機間距離が増加するにつれて Ca1 と Cb1 の容量結合が弱まるためである。その結果、グラウンド電極間のリターンパスにおける損失は増加する。

<まとめ>

人体等価ファントム上におけるカード型トランシーバ間の信号伝搬特性を実験的に評価した。信号伝搬損失を正確に測定することを目的として、カード型トランシーバと同じ大きさの E0-OE プローブおよびバッテリー駆動送信機を開発した。実験および HFSS による電磁界シミュレーションの結果を比較したところ、それらはファントム上において同様の信号伝搬損失の送受信機間距離依存性を示すことを明らかにした。

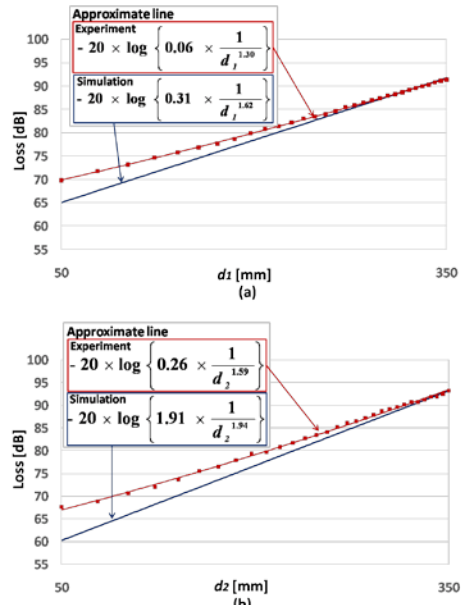


図 14(a) 横倒, (b) 直立ファントムにおける信号損失特性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① N. Haga, M. Shinagawa, Y. Kado, and K. Motojima, "A note on signal paths in intrabody communication channels," IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 12, no. 12, DOI: 10.1587/elex.12.20150402
 - ② N. Haga, K. Motojima, M. Shinagawa, Y. Kado, "Received noise voltage of wearable transceiver in the presence of fluorescent lamps using high-frequency electronic ballasts," IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 11, no. 21, pp. 20140920, DOI: 10.1587/elex.11.20140920
 - ③ K. Matsumoto, J. Katsuyama, R. Sugiyama, Y. Takizawa, S. Ishii, M. Shinagawa, Y. Kado, "Signal Measurement System for Intra-Body Communication Using Optical Isolation Method," Optical Review, 査読有, Vol. 21, No. 5, pp. 614-620, 2014, DOI: 10.1007/s10043-014-0098-6
 - ④ N. Haga, K. Motojima, M. Shinagawa, Y. Kado, "System of equations describing charges of multiple conductors immersed in electrostatic fields," IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 11, no. 19, pp. 20140803, DOI: 10.1587/elex.11.20140803
 - ⑤ M. Shinagawa, J. Katsuyama, K. Matsumoto, S. Hasegawa, R. Sugiyama, Y. Kado, "Noise Analysis for Intra-body Communication based on Parasitic Capacitance Measurement," Measurement, Elsevier, 査読有, vol. 51, pp. 206-213, 2014, DOI:10.1016/j.measurement.2014.02.020
- [学会発表] (計 18 件)
- (1) I. Yokota, M. Ishida, H. Shimasaki and Y. Kado, "Analysis of dependence of signal propagation loss on poses in intra-body communication," Proceedings of 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015.5.14, Lisbon (Portugal).
 - (2) Yokota, I., Shimasaki, H., Nakamura, T., Kado, Y., Ishida, M., "Analysis of signal propagation loss on the human body in intrabody

- communication,” Proceedings of 9th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), pp. 35-39, 2015.3.24, 湘南国際村(神奈川県・葉山町).
- (3) Y. Hayashida, R. Sugiyama, Y. Ido, A. Suzuki, Y. Takizawa, M. Shinagawa, Y. Kado, N. Haga, “Capacitance model of embedded transceiver for intra-body communication,” Proceedings of the 9th International Conference on Body Area Networks, pp. 222-228, 2014.9.29, London (Great Britain).
- (4) I. Yokota, M. Ishida, T. Nakamura, H. Shimasaki, Y. Kado, “Dependence of signal loss on different positions on the human body in near-field coupling communication,” Proceedings of the 9th International Conference on Body Area Networks, pp. 229-235, 2014.9.29, London (Great Britain).
- (5) Ishida, M., Nakamura, T., Nozawa, M., Watanabe, N., Kado, Y., Shinagawa, M. “MHz-Band RF signal propagation characteristics on human-equivalent phantom for intra-body communication,” Proceedings of 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 2284 - 2288, 2014.4.6, Hague (Netherlands).
- (6) Ishida, M., Nakamura, T., Nozawa, M., Watanabe, N., Kado, Y., Shinagawa, M., “MHz-band RF signal propagation characteristics on human body for intra-body communication,” Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 797 – 801, 2014.5.12, Montevideo (Uruguay).
- (7) Watanabe, N., Nakamura, T., Nozawa, M., Ishida, M., Shimasaki, H., Kado, Y., “Propagation characteristics of MHz-band RF signals for intra-body communication,” Proceedings of Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), pp. 1-4, 2013.12.9, Singapore.
- (8) Nozawa, M., Nakamura, T., Shimasaki, H., Kado, Y., Shinagawa, M., “Signal measurement system using electrically isolated probe for MHz-band near-field coupling communication,” Proceedings of IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 37 – 40, 2013.5.6, Minneapolis (USA).
- (9) Shinagawa, M., Katsuyama, J., Matsumoto, K., Hasegawa, S., Yanase, T., Sugiyama, R., Kado, Y., “Noise analysis for near-field intra-body communication systems,” Proceedings of IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 902 - 907, 2013.5.6, Minneapolis (USA).
- (10) Nagata, K.; Kado, Y. “Analysis of transmission quality in technology for in-body to off-body MHz band near field coupling communication,” Proceedings of 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 789 – 793, 2013.4.8, Gothenburg (Sweden).
- (11) Yanagawa, T., Nagata, K., Nozawa, M., Nakamura, T., Kado, Y., “Green and Secure Office Space Using Near Field Coupling Communication System,” Proceedings of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), pp. 1033 – 1037, 2013.3.25, Barcelona (Spain).
- (12) Nagata, K.; Kado, Y., “Transmission characteristics between in-body and on-body transceivers using mhz-band near-field coupling technology,” Proceedings of 7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), pp. 71 - 75, 2013.3.6, 明治大学 (東京都).
- (13) K. Nagata, T. Yanagawa, T. Kusunoki, R. Shimoda, H. Shimasaki, Y. Kado, “MHz-band near-field coupling communication technology,” Proceedings of the 7th International Conference on Body Area Networks, pp. 183-186, 2012.9.24, Oslo (Norway).
- (14) Kado, Y., “New communication paradigm by compelling wireless technology,” Proceedings of Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), pp. 1-2, 2012.5.9, 関西大 (大阪府・吹田市)
- (15) Kado, Y., Yanagawa, T., Nagata, K., Kobase, T., Kusunoki, T., Nagai, R., Ozaki, H., Shimasaki, H., Shinagawa, M., “Transmission characteristics between wearable and embedded transceivers based on near-field coupling: Body-channel communication system for human-area networking,” Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 3130 – 3133, 2012.3.26, Prague (Czech Republic).
- (16) Kado, Y., Kusunoki, T., Kobase, T., Takahashi, M., Shimasaki, H., Shinagawa, M., “MHz-band human centric communication technology using near-field coupling mechanism,” Proceedings of 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 737 - 741, 2012. 2012.3.26, Prague (Czech Republic)
- (17) Takahashi, M., Shimoda, R., Kusunoki, T., Yanagawa, T., Kobase, T., Nagai, R., Shimasaki, H., Kado, Y. “Characterization of MHz-band near-field coupling communication using finite element electromagnetic simulation: Body-channel communication system for human-area networking,” Proceedings of 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1127-1131, 2012. 2012.3.26, Prague (Czech Republic).
- (18) Kado, Y., Kobase, T., Yanagawa, T., Kusunoki, T., Takahashi, M., Nagai, R., Hiromitsu, O., Hataya, A., Shimasaki, H., Shinagawa, M., “Human-area networking technology based on near-field coupling transceiver,” Proceedings of IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), pp. 119 – 122, 2012.1.15, Santa Clara (USA).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

・門 勇一 (KADO, Yuichi)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授
研究者番号：90500223

(2) 研究分担者

・島崎 仁司 (SHIMASAKI, Hitoshi)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授

研究者番号：20226202

・上田 哲也 (SHIMASAKI, Hitoshi)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授

研究者番号：90293985

(3) 連携研究者

・品川 満 (SHINAGAWA, Mitsuru)

法政大学・理工学部応用情報工学科・教授

研究者番号：40597712