人体通信技術を用いたシームレスな自動改札システム実現に向けた研究調査（その２）

【2020 年度　KR-077】

東京理科大学 理工学部電気電子情報工学科
助教 村松 大陸（現 東京理科大学 研究推進機構総合研究院 プロジェクト研究員）

１．調査研究の背景

Felica に代表される非接触 IC カードは 2001 年に Suica として利用が開始されて以来、鉄道改札の業務効率を劇的に改善し、自動販売機や店舗における電子マネー決済の普及にも貢献してきた。このシステムでは、IC カードをリーダ端末にかざすという動作を「入出場や決済の意思表示」と関連付けることで、セキュアな通信と利便性を両立している。一方で、情報読取時に利用者は鞄やポケットからカードを取り出す必要があり、混雑時は改札付近での流動を阻害し業務効率を低下させる一因となっている。本研究の目的は、改札業務のさらなる効率化に向け、対象に「触れる」という自然な動作のみで通信する「人体通信」技術 [1] を用いたシームレスな自動改札システムの実現を目指し、要求される仕様および必要となる要素技術について調査および研究することである。

２．調査研究の概要

本研究で提案するシステムは、手首等に既存システムの非接触 IC カードに相当するバッテリレスーウェアラブルタグを装着した状態で改札のリーダ電極部に触れることで、人体を介してからリーダからタグに電力給電すると同時に決済情報や入出場の記録を送信する。このとき、図 1 に示すようにリーダ（送信側）から指先へ入力された電気信号はユーザの周囲に電界としてオーラのように分布するため、ウェアラブルタグ（受信側）の装着位置やリーダ機器に触れる部位に制限がないことが特長である。一方で、ユーザの指がリーダ機器からわずかでも離れると電界は伝搬せず、従来システム同様にセキュアな通信が可能となる。本システムの実現には、①ウェアラブルタグを駆動するための人体を介した電力給電、②既存の非接触 IC カード技術におけるバックスキャッタ通信同様にタグのインピーダンス変化をリーダ側で検出、③改札での運用に耐えうる超低遅延通信かつ超高速処理（通信開始から全処理完了まで 200 ms 以下）、④意図しない通信を防止する電界の指向性制御、⑤近接や接触するユーザとの電波干渉の排除、⑥電力給電の媒体となる人体への電磁曝露の最小化、等が必要となる。これらを実現する要素技術を、申請者が専門とする生体電磁環境、アンテナ伝搬、無線通信方式といった分野で調査する。同テーマで 2019 年度調査研究助成を受け、①は解析実験の両面から十分な調査を完了、②は単純化された人体モデルでインピーダンス変化量の見積もりまで完了、④は人体周辺の電界分布の解析を完了した。2020 年度は②の通信実装および、ユーザ間で同じ使用のタグ電極を利用できるかを確認するため、タグ電極の入力インピーダンスについて数値電磁界解析と被験者実験を併用して調査した。以下に主な調査結果の概要を示す。

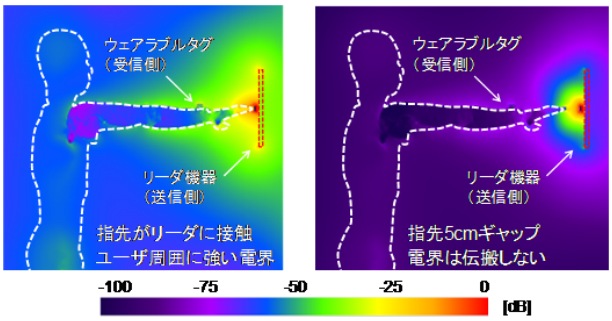

図 1　人体周囲に分布する電界の数値電磁界解析例

(1) 想定するアプリケーション

現在 Suica 等の非接触 IC カードで運用される自動改札システムでは、情報読取時にユーザは鞄やポケットからカードを取り出しセンサ部にタッチする必要がある。一方で、機器を身につけていれば「触れる」だけで通信可能な人体通信を自動改札システムへ適用することで、ユーザの利便性や改札の業務効率が劇的に改善されると考えられる。具体的には図 2 に示すように、バッテリレスのウェアラブル機器をユーザが装着し、手のひらで改札機の電極に触れることで、設置機器からユーザの体を介してウェアラブル機器に電力と情報を伝送するパッシブ方式人体通信を想定し評価する。

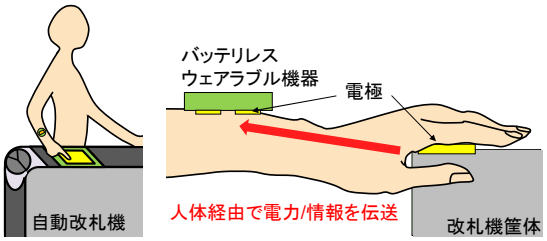

図 2　パッシブ方式人体通信による自動改札システム

(2) 数値電磁界解析によるタグ電極の入力インピーダンス計算

手首に装着したタグ電極の入力インピーダンスを数値電磁界解析によって計算し、性別 (で異なる組織構造) の影響および皮膚の水分状態の影響を見積もった。2019 年度の調査では、人体全身を均質な電気定数を持つ角柱の組みあわせで構成して伝送特性や電界分布を計算した。本年度は、より現実に近い精確なインピーダンスを計算するため、独立行政法人 情報通信研究機構から提供を受けた詳細人体モデル [2] から腕部を抜き出して解析に用いた (図 3)。この左腕部は、皮膚、脂肪、筋肉、腱、血液、皮質骨、海綿骨の 7 組織で構成され、各組織には Cole-Cole 型分散媒質の電気定数 [3] が適用されており、広帯域で実際の生体を模擬した解析が可能である。タグ電極は回路基板、信号電極、グラウンド電極、励振源およびワイヤで構成した。信号電極とグラウンド電極として、それぞれ 8 × 24 mm^2 の電極を採用した [4]。送信機構成材料は全て完全導体とした。本研究では手首部分に装着したタグ電極の励振源から、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、タグ電極の入力インピーダンス）について、Finite Difference Time Domain (FDTD) 法による電磁界解析 (XFdtd, Remcom Inc.) を用いて 1 ～ 100MHz の範囲で計算した。

計算の結果を図 4 に示す。性別による入力インピーダンスの差は、周波数が低いほど大きくなることが明らかになった。また、乾燥皮膚の場合は男女間で入力インピーダンスの差は最大 20％、湿潤皮膚の場合は最大で 10％となった。インピーダンスの変動による高周波信号の反射を考慮すると、性別による入力インピーダンスの差は十分に小さい。すなわち、同じタグ電極や後段の回路構成を男女ユーザに共通して使用できると考えられる。また、皮膚の水分状態に対する入力インピーダンスの差は低周波で増加し、1 MHz で最大となった。入力インピーダンス実部では最大差 53％、虚部では最大差 80％である。一方で、数 MHz を超えると、皮膚の水分状態の影響は十分に小さくなった。このため、伝送効率だけでなく入力インピーダンスの安定性を考えた場合、数 MHz 以上の帯域をキャリア周波数に用いることが望ましいと考えられる。

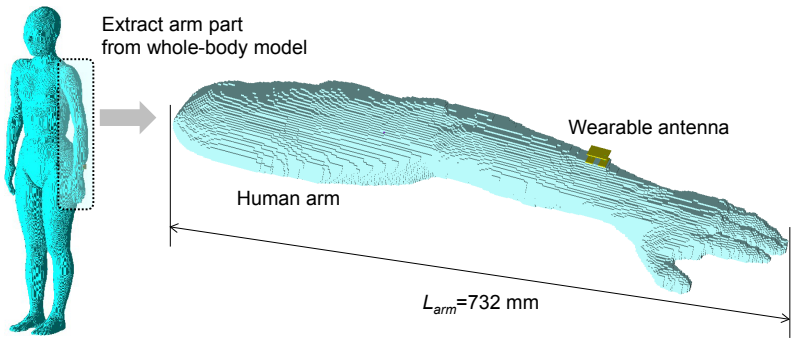

図 3　数値電磁界解析モデル

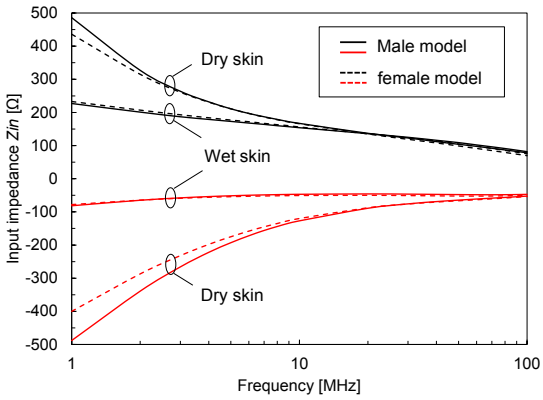

図 4　数値電磁界解析によるタグ電極入力インピーダンスの計算結果

(3) 被験者実験によるタグ電極の入力インピーダンス測定

つづいて、手首に装着したタグ電極の入力インピーダンスを被験者実験によって測定し、ユーザの個人差が入力インピーダンスに与える影響を見積もった。試作タグ電極と測定系を図 5 に示す。試作タグ電極は回路基板を模擬した銅板、ステンレス板による信号電極およびグラウンド電極、ワイヤ、アクリル板、SMA コネクタで構成した。また、着脱を容易にするため腕時計のケースにアンテナ電極を内蔵した。信号電極およびグラウンド電極は SMA コネクタの内導体および外導体にそれぞれ接続されている。アンテナ電極各部の寸法は (1) の電磁界解析モデルのものと同様である。タグ電極の入力インピーダンスは被験者の左手首に装着した試作タグ電極をインピーダンスアナライザに接続して測定した。本実験の被験者は 20 ～ 30 歳台の日本人で、男性 12 名、女性 10 名、合計 22 名の協力を得た。

測定の結果を図 6 に示す。被験者間の入力インピーダンスの差は周波数が低いほど大きくなった。これは電磁界解析の結果と一致しており、表皮効果によって高周波では電流が腕の表層のみに流れるのに対し、低周波では、電流が内部組織まで到達するため、皮膚や脂肪層の厚みなどの個人差が顕著に現れたと考えられる。一方で個人差に起因する入力インピーダンスの変動について、一例として電圧定在波比率 (VSWR) を用いて評価した。VSWR は入力インピーダンス変動による信号反射量を評価する指標であり、0(反射なし＝最良状態) ～∞ (全反射＝最悪状態) の値をとる。一般的なアンテナシステムでは VSWR ≦ 3 が望ましいとされる。個人差によって劣化する VSWR の最悪値は、1 MHz において男性と女性の被験者でそれぞれ 2.87 と 2.03 となった。また、5 MHz 以上の周波数では VSWR ≦ 2 となった。この結果は、5 MHz を超えるキャリア周波数が、個人差を低減し入力インピーダンスを安定させることを意味する。以上の結果から、最適なキャリア周波数を選択することにより、ユーザ個人差に対して耐性のある人体通信システムが実現できると考えられる。

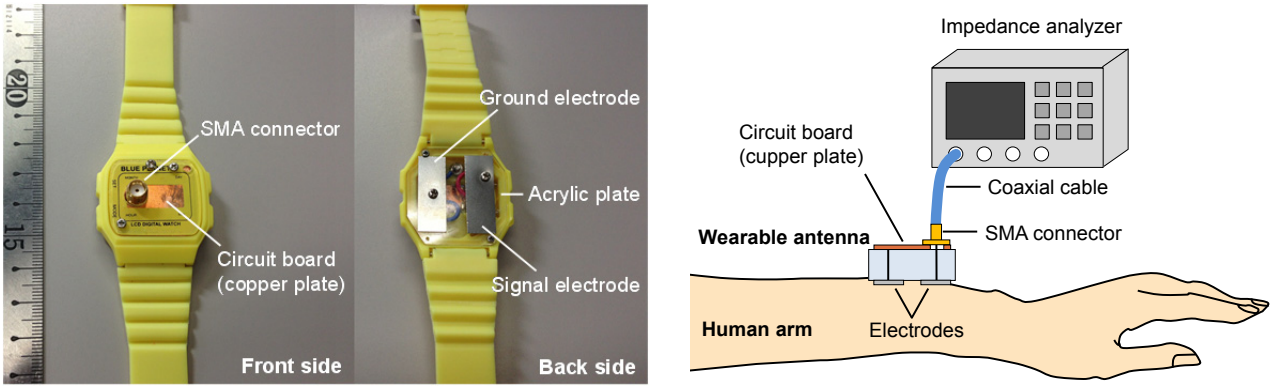

図 5　試作タグ電極と入力インピーダンスの測定系

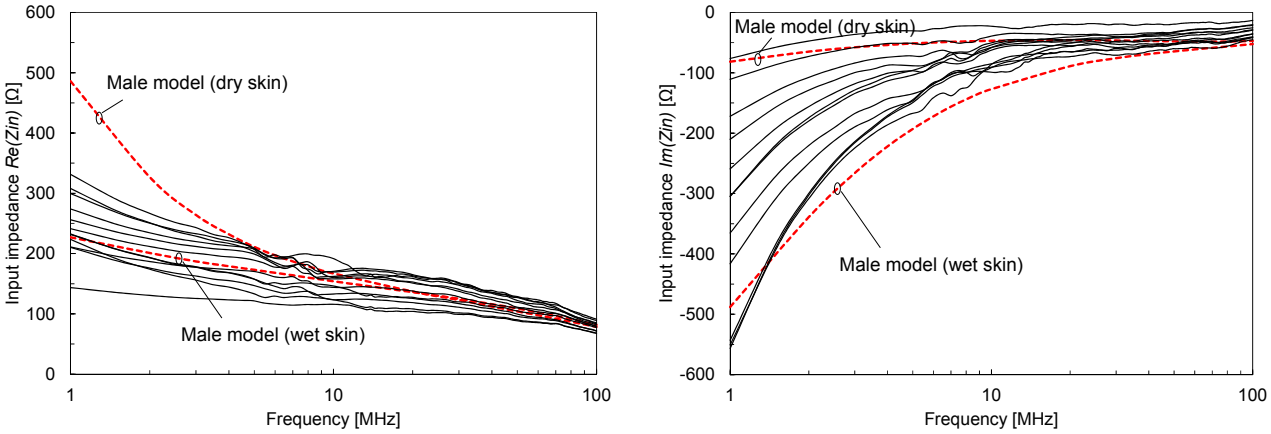

図 6　被験者実験によるタグ電極入力インピーダンスの測定結果

3. 調査を終えて

第 5 世代移動通信システム (いわゆる 5G) や人工知能など高性能かつ多機能な技術が次々に登場し、人類社会に多大な影響を及ぼしている。一方その進歩の速さに比べ、これらの技術を利用する主体たるべき人間からみた「使いやすさ」は後れをとってはいないか？本研究調査で対象とした自動改札、その他多くのシステムにおいて最終的なユーザはもちろん人間である。その人間の原初的な行動や動作 (例えば今回の自動改札であれば「触れる」という動作) を入力情報とし、様々なシステムを無意識にストレスなく利用できたら素晴らしい、こうした思想が私の研究の根底にある。今回の調査研究が自動改札システムのみならず、広い意味で人間と技術のシームレスな融合にわずかでも資するものとなれば幸いである。□

参考文献・引用文献

[1] T.G. Zimmerman: “Personal Area Networks: Near-Field Intra-Body Communication,” IBM Sys. Jour., Vol.35, No.3&4, pp.609-617, 1996.

[2] T. Nagaoka, et al.: “Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry”, Phy. Med. Biol, Vol.49, pp.1-15, 2004.

[3] S. Gabriel, R.W. Lau, and C. Gabriel: “The Dielectric Properties of Biological Tissues: II. Measurements in the Frequency Range 10 Hz to 20 GHz,” Phys. Med. Biol. Vol.41, pp.2251-2269, 1996.

[4] 村松大陸 , リサーチダイジェスト KR-070 人体通信技術を用いたシームレスな自動改札システム実現に向けた研究調査 , 研友社 Annual Review No.22, pp.31-33, 2020.5