

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3）

【2021年度 KR-083】

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

准教授 村松 大陸（前 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鞆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ーレス・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安定した通信を実現するアンテナ電極の設計、⑤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 年度および 2020 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はインピーダンス変化量とユーザ個人差の見積もりを完了、④は人体周辺の電界分布の解析を完了した。2021 年度は③④⑤を実現する通信方式およびアンテナ電極について調査した。以下に主な調査結果の概要を示す。

(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鞆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

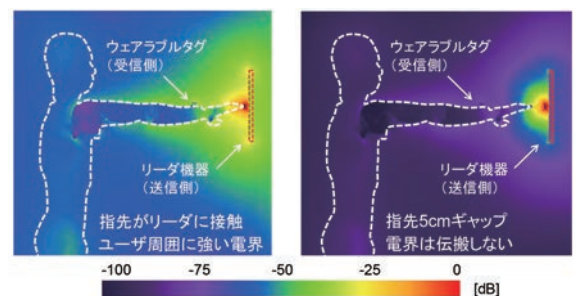


図 1 人体周囲に分布する電界の数値電磁界解析例

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、バッテリー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。

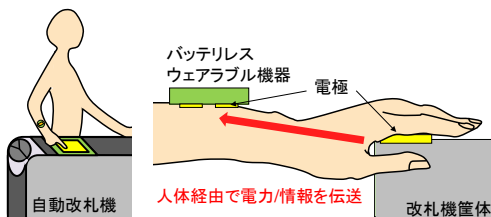


図2 パッシブ方式人体通信による自動改札システム

(2) 改札での運用に耐えうる超低遅延通信

鉄道改札を通過するユーザの流動を阻害しないために、入退場のタグ読み取りには高速低遅延の通信(通信開始から全処理完了まで 200 ms 以下)が求められる。このため、人体通信と組み合わせが可能な無線通信方式について調査を行った。スマートフォンや各種のセンサなどの普及にともない爆発的に増大する無線トラヒックを収容するため、第5世代移動通信システム(5G)の研究開発が行われ、一部は実用化されている。モバイルブロードバンド伝送に主眼をおいたLTE, LTE-Advancedのような第4世代移動通信システム(4G)に比較し、5Gでは、(i) 拡張されたモバイルブロードバンド(eMBB: enhanced mobile broadband)、(ii) 非常に高い同時接続性を有するマシン型通信(mMTC: massive machine-type communications)、(iii) 超高品質低遅延通信(URLLC: ultra-reliable low latency communications)など各種の無線通信サービスの提供が想定されている。このなかでも、(iii) URLLCのような伝送遅延を極限まで低減する方式が、鉄道改札における通信方式としてふさわしいと考えられる。著者は過去に、移動無線システムにおけるURLLCへの適用を想定した検討を行っている²⁾。特に、高信頼の通信を実現するために必要となるハイブリッド自動再送要求(HARQ: hybrid automatic repeat request)を用いた場合に増大する伝送遅延を低減する手法について検討した。具体的には、HARQでは主にチャンネル復号に要する

時間に起因した伝送遅延が課題となるため、チャンネル復号前情報(信号対雑音比など)を用いて、チャンネル復号完了を待たずに早期の再送要求を行う手法を提案し評価した。計算機シミュレーションの結果、提案法では若干のスループットの劣化を許容することで従来のチャンネル復号後の再送要求に基づくHARQに比較し、伝送遅延時間を大幅に低減できることがわかった。図3に示すように、本手法を人体通信による自動改札システムに適用することで、入退場のタグ読み取りを高速化することが可能と考えられる。具体的な遅延-スループット特性についても、これまでに得られた人体のチャンネル特性を用いて今後評価する予定である。

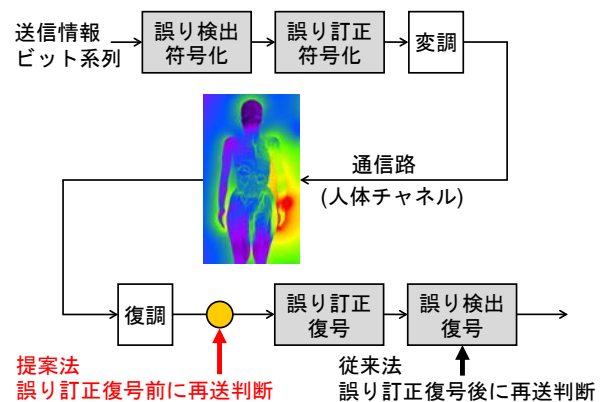


図3 人体通信における HARQ の構成

(3) 安定した通信を実現するアンテナ電極の設計

安定した人体通信の実現には、生体と電磁波の相互作用を考慮した上で人体に装着するタグ電極を設計することが重要である。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。2020年度は、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³⁾の各組織に周波数依存す生体組織の電気定数⁴⁾を割り当て、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。さらに被験者実験により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(図4)。本年度は、得られた特性に基づき図5に示すウェアラブルタグ電極を試作した。本アンテナはフレキシブル基板と生体適合メッキ処理した導体箔で構成され、

手首だけでなく人体の様々な部位に密着して配置でき、繰り返し使用も可能である。試作タグ電極の入力インピーダンス特性を図6に示す測定系を用いた被験者実験で評価した。その結果、歩行時の腕振りを想定してタグ電極を装着した被験者の腕を動かした場合、2021年度の入力インピーダンス特性評価に用いた板状電極と比較して、入力インピーダンスの変動を1/10以下に抑制することが可能であった。インピーダンス整合により伝送効率を向上することを考慮した場合、入力インピーダンスが安定する試作タグ電極は極めて有用であると考えられる。

(4) 生体安全性の評価

人体通信ではユーザの体そのものを伝送路として利用するため、電磁曝露の点で生体への安全性を担保することが極めて重要となる。BluetoothやWi-Fiなどの一般的な無線通信システムで使用される受信モジュールの受信限界感度である-70 dBmを想定した場合、今回提案するタグ電極では2V入力時にしたときに受信抵抗において受信限界感度を満足す

る、このとき、人体通信により生じる電界が生体を与える影響を確認するため比吸収率(SAR: specific absorption rate)を計算した。SARは体重1kgあたりで1秒間に吸収されるエネルギーとして定義され、高周波電磁界が生体に及ぼす熱作用の指標として用いられる。SARは電界強度 E [V/m]、導電率 σ [S/m]、生体組織の密度 ρ [kg/m³]を用いて、次式(1)のように表される。

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1)$$

また、図7に詳細腕部モデル断面のSAR分布を2W/kgを0dBとして規格化して示す。SARが最大となったのは送信機の電極間の皮膚部分であり、腕部組織10gあたりの局所SARの最大値は0.35W/kgとなった。これは総務省の電波防護指針⁵⁾に示される局所吸収制限である、任意の組織10g当たりの局所SARが職業的曝露で10W/kg、公衆の曝露で2W/kg以下であることを十分に満たしている。こ

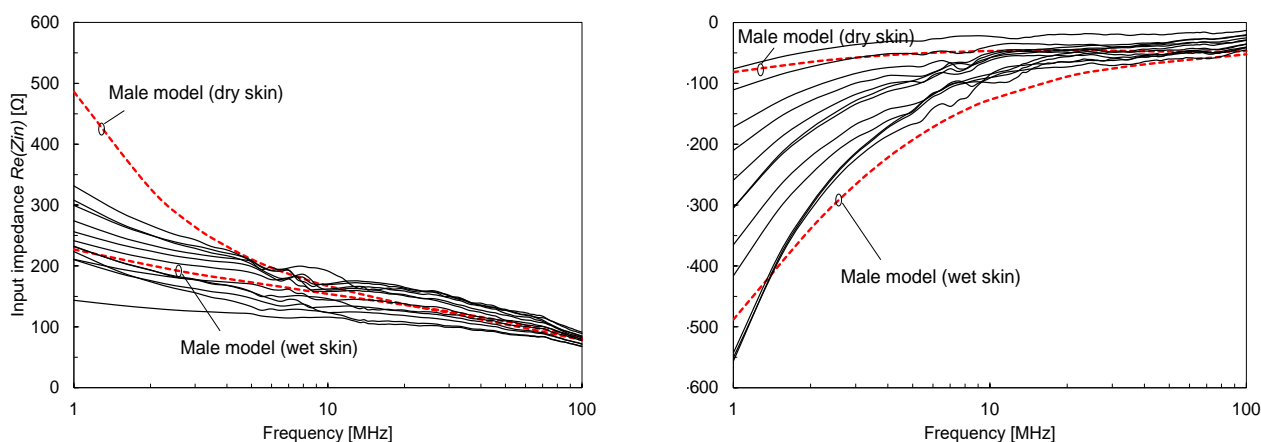


図4 被験者実験によるタグ電極入力インピーダンスの測定結果

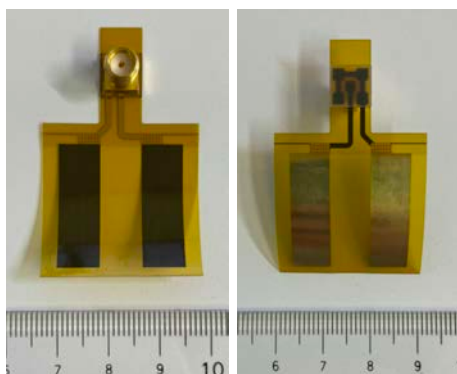


図5 試作したウェアラブルタグ電極

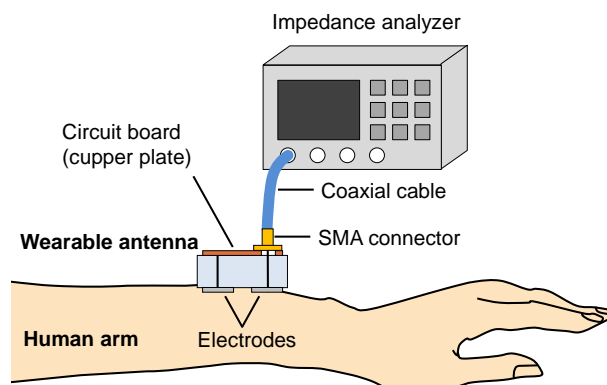


図6 入力インピーダンスの測定系

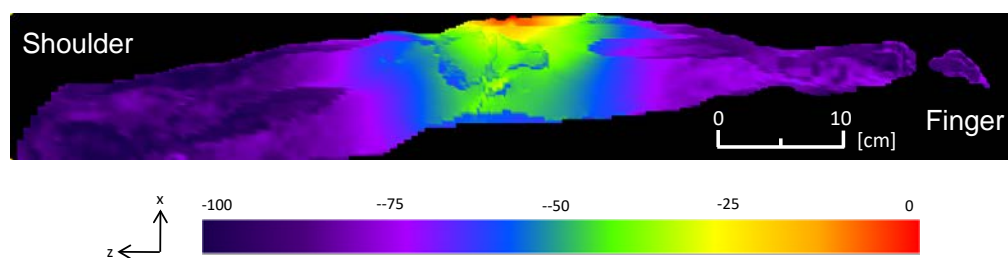


図7 腕モデル断面のSAR分布

のことから、電磁波の熱作用という点で、本技術は生体に対して十分に安全な通信技術といえることが明らかとなった。

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) Y. Imamura, et al. : "Low latency hybrid ARQ method using channelstate information before channel decoding," in Proc. APCC2017, Perth,Australia, 11-13 Dec. 2017.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 総務省電波防護指針 (<http://www.tele.soumu.go.jp/>)