

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

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

1. 目的

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. 提案手法

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し、反対にタグからリーダへ決済情報や入出場の記録を送信する。このとき、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インピーダンス反射型通信と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。特に提案システムの基幹になると想定される「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」を実現する要素技術を、生体電磁環境、アンテナ伝搬、通信方式といった分野で調査研究する。

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。

3. 検討内容

送信側として設置機器を、受信側としてウェアラブル機器を想定した人体の伝送特性の測定系を構築した。設置機器筐体の寸法は $460 \times 450 \times 880 \text{ mm}^3$ で、現行の改札機の IC カードリーダ部を想定した筐体中央前面部に $25 \times 25 \text{ mm}^2$ の送信電極を配置した。送信電極は同軸線を介して信号発生器 (Tektronix、AFG1062) に接続し、金属製の設置機器筐体そのものを送信側回路グラウンドとして利用した。さらに、床面グラウンド (GND) が伝送特性におよぼす影響を確認するため、信号発生器を商用電源とバッテリーでそれぞれ駆動した。ウェアラブル機器はスマートウォッチを想定し手首に装着する方式とし、10 MHz で 50 W 系にインピーダンス整合した $8 \times 24 \text{ mm}^2$ の二電極構造を採用した。受信電極は同軸線を介してスペクトラムアナライザ (Tektronix、RSA306B) に接続し、ラップトップ PC で制御した。実用時のウェアラブル環境を再現するためにスペクトラムアナライザと制御 PC はともにバッテリー駆動とした。被験者は日本人の成人男女の 5 名とし、ウェアラブル機器の装着位置 (右腕/左腕)、設置型機器への手のひら接触 (有/無) を変化させた。本調査研究の被験者実験は東京理科大学 臨床研究に係る倫理審査委員会の承認【19024】を経て行った。

被験者実験 (条件は右腕にウェアラブル機器装着、設置機器の信号電極に接触、床面 GND 有) に対応する解析モデルを構築した。人体モデルは日本人の成人男性の平均体型を参考に寸法決定し、筋肉の電気定数を有する直方体の組み合わせで構成した。設置機器、ウェアラブル機器、各機器の電極の寸法は実験と同一とした。信号の送信ポートは設置機器側の信号電極と筐体間に、受信ポートはウェアラブル機器の電極間に配置した。解析は FDTD 法を用い、信号周波数は 10 MHz とした。

実験と解析により得られた設置機器 (送信) とウェアラブル機器 (受信) の間の伝送特性の大きさ $|S_{21}|$ を比較検討する。まず実験値について、設置機器の信号電極と手のひらの接触有無により $|S_{21}|$ には 45 ~ 63 dB の差が生じた。このことから、人体通信において人体と電極の電氣的接触は重要な信号伝送の条件であり、ユーザ自身が容易に通信を制御できると考えられる。また、設置機器に接続された信号発生器の駆動条件を商用電源 (床面 GND 有) とバッテリー (床面 GND 無) で比較すると、ユーザが信号電極に接触しない条件ではバッテリー駆動時に 3 ~ 7 dB 程度大きな $|S_{21}|$ となった。これは床面 GND が存在すると、設置機器の送信電極から人体やウェアラブル受信機を経由せずに設置機器筐体や床面 GND に戻る通信に寄与しない電界成分が増加するためと考えられる。一方でユーザが信号電極に接触する条件では両者の $|S_{21}|$ にほとんど差はなかった。これは接触時には送受信電極が空間的に近接して配置されるため、腕や周囲空間を介した送受信電極間の直接結合が支配的となり、離れた位置にある床面 GND の効果が無視できるためと考えられる。自動改札等のアプリケーションでは設置機器は商用電源駆動となり床面 GND へ接続される。この場合、通信したい接触時の $|S_{21}|$ を劣化させずに通信を望まない非接触時の $|S_{21}|$ を低減できるため、より優れたインターフェースを実現できるといえる。

次に $|S_{21}|$ の実験値と解析値を比較すると、右腕にウェアラブル機器を装着し送信電極に接触した条件を除き、実験の $|S_{21}|$ は解析に比較して 15 ~ 34 dB 程度大きくなった。これは実験で用いた測定器筐体や同軸線を介し容量結合が生じ、信号伝送に寄与したためと考えられる。一方で右腕にウェアラブル機器を装着し送信電極に接触した場合は、近接して配置された送受信電極間の直接的な結合が支配的となり、測定器や同軸線の影響が他条件に比較して相対的に減少したためと考えられる。

さらに、床面 GND の信号伝送への寄与を説明するため、解析で人体周囲の電界分布を計算した。右腕にウェアラブル機器装着、設置機器の信号電極に接触の条件で、床面 GND 有 / 無とした電界分布を計算した。床面 GND は主に伝送に寄与する手首から腕先端部周辺の電界にほとんど影響しない一方、人体と設置機器筐体および床面 GND 間の電界強度を増加させている。この電界分布の変化により、床面 GND 無の条件で $|S_{21}|$ が増加したと考えられる。これは人体通信の信号伝送に寄与すると考えられていた床面 (大地)GND が、伝送特性を劣化させることを示した重要な知見といえる。

以上のように本調査研究では、実験と電磁界解析により、設置機器とウェアラブル機器間のパッシブ方式人体通信の伝送特性を、特に床面 GND の寄与に着目して評価した。