

[研究助成 (A)]

生体電磁応答に基づく指識別の実現と拡張入力インターフェースの創出

Bioelectromagnetic-response-based Input Interface for Mobile Devices

— Finger Identification Using Bioimpedance Characteristics —

22I1027



研究代表者

電気通信大学
大学院情報理工学研究科

准教授

村 松 大 陸

[研究の目的]

スマートフォンやタブレットなどのモバイル機器の小型化は進み、携帯性はますます向上している。一方で小型化によりタッチパネル等の機器操作面は限定され、携帯性と操作性の間でトレードオフが生じている。この欠点を補うため、微小光ファイバーで映像投影と指紋識別を同時に行い、指紋に応じて操作機能拡張するディスプレイや、手首に高周波信号の送信機を装着し、指先で端末に触れた時の信号減衰と位相差を測定して指識別を行うシステムが検討されている。しかしこれらのアプローチでは、大型の据置型機器を操作対象としておりシステムの規模が大きく追加のデバイスを装着する必要もあり、モバイル機器との融合という観点から真に有力とはいえない。本研究の目的は、生体電磁応答によりタッチパネルを操作する指の種類を識別し、情報入力機能を飛躍的に向上させる次世代の拡張情報入力インターフェースを創出することである。考案にあたり、次の点に留意した。(1) ユーザーが特殊な準備や訓練なく操作可能な直感的インターフェース、(2) 小型のモバイル機器に搭載可能な規模(測定パラメータや周波数帯域)、(3) 操作対象となるモバイル機器以外に追加デバイス不要。申請者は下図のシステムにより、生体電磁応用(特にバイオインピーダンス)計測を応用して高精度かつ簡

便に指識別を目指す。

[研究の内容、成果]

1. 提案する指識別システムの原理

提案する指識別システムでは、図1に示すように、モバイル機器の側面と操作部(静電容量式タッチパネル)の裏面に電極を配置して人体に数 MHz 前後の高周波電流を流す。そして得られたバイオインピーダンスの大小関係や周波数特性に基づいて操作指を識別する。ユーザは左手でモバイル機器を把持し、拇指球(親指の付け根の柔らかな部分)で側面電極に触れると同時に、右手の各指で操作面の電極に触れる。このとき電流は、「側面電極→左手拇指球→左腕→体幹→右腕→右手指→正面電極」という経路で流れる。この経路の各部位のインピーダンスを、左手拇指球 Z_{tb} 、左腕 Z_{la} 、体幹 Z_{body} 、右腕 Z_{ra} 、右手指 Z_{fin} とすると、図2に示すように、測定されるバイオインピーダンス Z はこれらすべてのインピーダンスの合計となる。

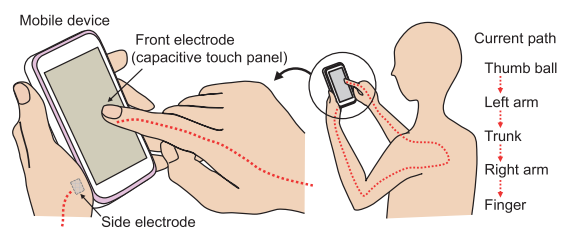


図1 生体電磁応答に基づく指識別システム

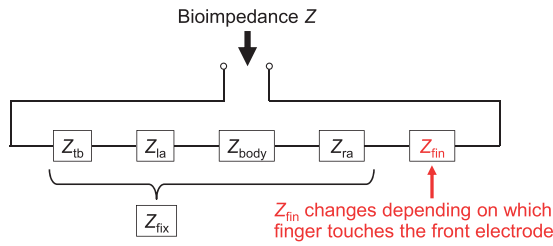


図2 測定経路のバイオイम्ピーダンス

ここで、右手のいずれの指で正面電極に触れている状態であっても、側面電極から右手にいたる電流経路は変わらないためバイオイम्ピーダンス Z_{fix} は変化しない。すなわち、右手の各指のバイオイम्ピーダンス Z_{fin} のみが Z の変化として現れるため、指識別が可能と予想される。

2. 実験条件と評価項目

モバイル機器を操作する指の識別に向けて、図3に示す測定系によって各指のバイオイम्ピーダンス特性を明らかにする。一般的なスマートフォンの寸法を想定した $140 \times 70 \times 10 \text{ mm}^3$ のプラスチック製ケースの側面に $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の電極（側面電極）、正面に $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の電極（正面電極）をそれぞれ配置した。各指で電極に触れたときに接触面積が一定に保たれるよう、現段階では正面電極は指の腹に対して十分小さな面積とした。各電極はケースの裏側で同軸ケーブルの内導体と外導体にそれぞれ繋がれており、同軸ケーブルはインピーダンスアナライザ（Keysight 4294A）に接続されている。すなわち、側面電極と正面電極の間に挿入され

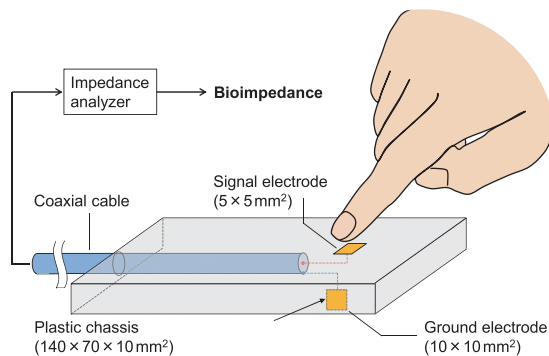


図3 バイオイम्ピーダンスの測定系

る被験者のバイオイम्ピーダンス $Z = Z_{\text{fix}} + Z_{\text{fin}}$ を測定する構造となっている。被験者は20代の男性5名（#1～#5）とし、左手でケースを把持し側面電極に触れ、右手の各指で正面電極に触れる。この状態で被験者のバイオイम्ピーダンス Z を4～10 MHzにおいて測定した。ケースの把持や指の触れ方の強弱に起因して電極と皮膚の接触状態がごく短時間で変化する可能性を考慮し、連続した16回の測定の平均バイオイम्ピーダンスを評価に用いた。次章では、本測定系を用いた被験者実験により5本の指のバイオイम्ピーダンス特性を評価し、指識別が可能であるかを定量的に見積もる。さらに、提案システムを利用するユーザごとにバイオイम्ピーダンス特性が異なる可能性を考慮し、複数被験者間での各指のインピーダンス特性を比較する。そして、ユーザがモバイル機器を把持しなすことで生じるバイオイम्ピーダンス特性の変動を確認する。最後に提案アルゴリズムによる指の識別精度を評価する。

3. 実験結果および考察

1名の被験者が右手の5本の各指で正面電極に触れた場合のバイオイम्ピーダンスの大きさ $|Z|$ の周波数特性を図4に示す。測定した全帯域にわたり親指は他の指に比較して小さな $|Z|$ を示した。一方で、親指以外の4本の指の $|Z|$ は、全体的には人差指、中指、薬指、小指の順で大きくなったが、7 MHz 超の周波数では人差指と中指の特性はほとんど同一となった。こ

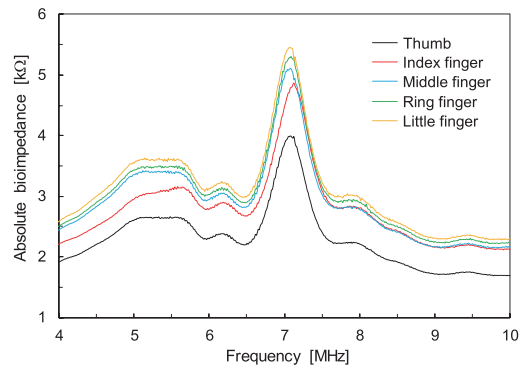


図4 各指のバイオイम्ピーダンス特性

れは親指が他の指に比較して太く短いのに対し、親指以外の指では太さや長さに明確な差がないことが理由と考えられる。例えば 4 MHz において、親指の $|Z|$ は人差指に比べて 270 Ω 、小指に比べて 570 Ω 程度小さな値となった。このように数百 Ω もの $|Z|$ の差違が再現性をもって生じる場合には、単一の周波数の値のみを用いて指識別を行うことも十分に可能であると考えられる。また、いずれの指においても 7.1 MHz 付近に $|Z|$ のピークが観測された。さらに、 $|Z|$ がピークをとる周波数は各指でわずかに異なっており、最大で 50 kHz 程度の差があった。これらのピーク周波数の差も、 $|Z|$ の大きさと同様に各指の太さや長さに起因して生じたと予想される。このため、単純な $|Z|$ の差違だけでなく、インピーダンスの周波数特性の利用も。将来的な指識別精度の改善に有用であると考えられる。より詳細に各指のバイオインピーダンス特性を検討するため、各測定周波数におけるすべての指の $|Z|$ の平均値を基準とした各指の $|Z|$ の変化率を図 5 に示す。点線が平均値、実線は各指の変化率である。親指の $|Z|$ は全帯域にわたって平均値から -18% 程度の差と十分大きな変化率となった一方、他の指は -6% から +12% 程度の変化率であった。また、7~9 MHz 付近では人差指と中指の変化率の大小関係が逆転した。この結果から、親指と他 4 本の指の識別については、小型のモバイル機器に搭載可能な精度のバイオインピーダンス測定回路で十分実現できると考えられる。そこで本研究

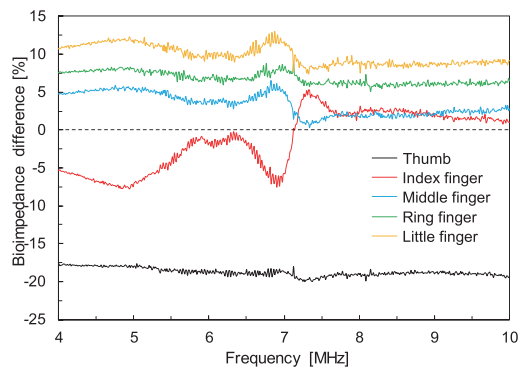


図 5 全指平均値に対するバイオインピーダンス

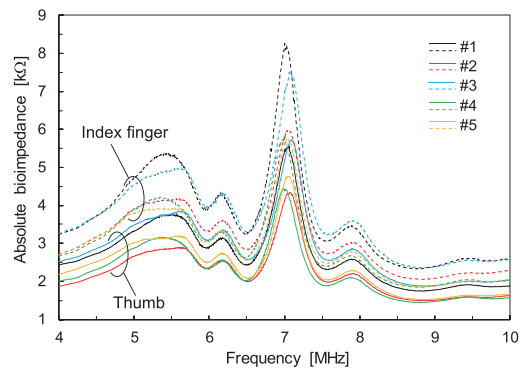


図 6 各被験者の指のバイオインピーダンス特性

では、親指とその他の指を高精度に識別可能なことを提案法実現の第一歩と考え、以降の検討では親指と人差指の識別に焦点を当てる。

ユーザの体型や皮膚の水分状態などによって、同じ測定経路であってもバイオインピーダンス特性はユーザごとに異なることが明らかになっている。本節では 5 名の被験者で測定を行い、親指と人差指を通る経路でバイオインピーダンスを比較する。図 6 に 5 名（#1~#5）の被験者で測定されたバイオインピーダンス $|Z|$ の周波数特性を示す。図より、同一の被験者では親指と人差指のバイオインピーダンス特性は明確に分離できることがわかる。一方、被験者間で $|Z|$ 特性を比較すると、測定周波数帯域によっては親指と人差指の $|Z|$ の大小関係が逆転している。親指と人差指の $|Z|$ は図 5 に示した通り分離しやすいため、親指以外の 4 本の指も含めた $|Z|$ の大小関係を複数被験者間で評価する場合、より複雑になると考えられる。すなわち、高精度の指識別を行うには被験者（ユーザ）ごとのバイオインピーダンス特性を事前に測定し、識別指標を作成するキャリブレーションが必要と考えられる。

提案システムを実用する際は、モバイル機器の把持や指の触れ方の強弱に起因して電極と皮膚の接触状態がごく短時間で変化する可能性を考慮する必要がある。このため 3 章で述べたように、本研究ではバイオインピーダンス特性を連続して 16 回測定した平均値を評価に用いている。本節ではさらに、ユーザが非連続的にモ

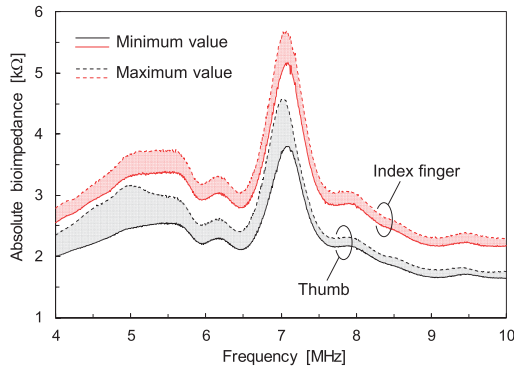


図7 非連続測定下バイオインプीडダンス特性

バイル機器を使用する状況を想定した検討を行う。具体的には、ユーザがモバイル機器からいったん手を離して把持しなおすことで生じる側面電極の接触位置や接触強さの変化や、時間経過にともなうユーザの皮膚表面状態の変化がバイオインプीडダンス特性におよぼす影響を、非連続測定によって評価する。被験者は前実験と同様の1名で測定回数は10回とした。各測定の間には10分の間隔をおき、測定ごとに被験者はケースから手を離し実験台に置いてあらためて把持しなおした。

図7に、非連続測定で得られたバイオインプीडダンス $|Z|$ の周波数特性の最小値を実線、最大値を点線で、親指と人差指についてそれぞれ示す。図7から明らかなように、時間をおいてケース把持の状態を変化させた非連続測定においても、親指と人差指の $|Z|$ 特性は明確に分離した。この結果から、モバイル機器の把持状態が多少変化しても高精度で親指と人差指を識別できると考えられる。

ここまで得られた知見を前提として、バイオインプीडダンスに基づく指識別が可能であるか検証するために、親指と人差指の識別を行うアルゴリズムを実装し精度を評価する。本研究では、実装が容易かつ計算負荷の小さい指識別アルゴリズムとして、事前測定から作成できる識別指標である基準バイオインプीडダンス $|Z_{\text{Ref}}|$ と、識別対象となる指で測定したバイオインプीडダンス $|Z|$ を比較する方法を採用する。 $|Z_{\text{Ref}}|$ および $|Z|$ は、(1)と(2)式に示すよう

に、全帯域(4 MHz~10 MHz)で測定したバイオインプीडダンスの平均値とする。

$$|Z_{\text{Ref}}| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|Z_T(f_k)| + |Z_I(f_k)|}{2} \quad (1)$$

$$|Z| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Z(f_k)| \quad (2)$$

ここで、 n は周波数領域の測定点数、 f_k は各測定点の周波数、 $|Z_T(f_k)|$ と $|Z_I(f_k)|$ はそれぞれ、親指または人差指で正面電極に触れた場合のバイオインプीडダンスの大きさを示す。すなわち、 $|Z_{\text{Ref}}|$ は事前測定で得られた測定帯域全体にわたる親指と人差指の平均的なバイオインプीडダンスを意味する。また、 $|Z(f_k)|$ は識別対象となる指で測定したバイオインプीडダンスであり、 $|Z|$ は測定帯域全体にわたる平均値を意味する。 $|Z_{\text{Ref}}|$ と $|Z|$ の大小関係を比較することで、測定対象の指が親指か人差指かを、(3)式のように識別する。

$$\text{Test finger} = \begin{cases} \text{Thumb, if } |Z| \leq |Z_{\text{Ref}}| \\ \text{Index finger, otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

本研究では基準となる $|Z_{\text{Ref}}|$ は識別を行うごとに新たに計算せず、図7に示した同一の被験者の測定データから計算した値を毎回の識別で繰り返し使用した。また、 $|Z_{\text{Ref}}|$ の計算に用いる測定と $|Z|$ の計算に用いる測定は、それぞれ異なる日に行った。周波数領域の測定点数は $n=501$ として識別を行った。図8に、10回の

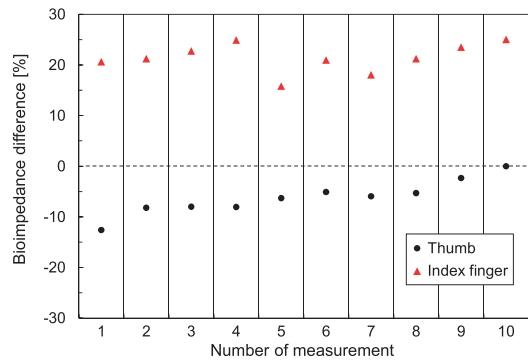


図8 親指と人差指の識別結果

異なる測定で得られたバイオインピーダンスを用いた識別結果を示す。縦軸は $|Z_{\text{Ref}}|$ と $|Z|$ の差を示し、(3) 式にしたがい、0 % 以下なら親指、0 % より大きい場合は小指と判定した。親指で測定した場合を丸、小指で測定した場合を三角でプロットした。図 8 からわかるように、10 回すべての測定で、親指と人差指を誤りなく識別することができた。この結果から、バイオインピーダンスの単純な平均を用いた識別アルゴリズムであっても、同一ユーザでの親指と人差指の識別という条件であれば、きわめて高い精度で識別が可能であることがわかる。一方で、人差指の場合は全ての測定で $|Z_{\text{Ref}}|$ と $|Z|$ に 20 % 程度の差が生じており余裕をもった識別が可能であるが、親指の場合は 1~10 % 前後の差で識別していることがわかる。より高精度の識別には、(1) 式で $|Z_{\text{Ref}}|$ を算出する際に各指バイオインピーダンスに重みをつけるなどして、ユーザごとに最適な識別指標を作成することも有効であると考えられる。さらに、本研究では測定した全帯域である 4 MHz~10 MHz のバイオインピーダンス特性を評価に用いたが、各指の差違が顕著に表れる帯域などが明らかになれば、適切な評価帯域を選択することで識別精度を向上できると予想される。

4. 結論

本研究では、モバイル機器への情報入力機能を向上させる拡張入力インターフェースの実現

を目指し、バイオインピーダンス特性に基づいて機器を操作する指の種類を識別する方法を提案した。被験者実験に基づいて 5 本の指のインピーダンス特性を明らかにしたうえで識別可能性について議論し、親指と人差指の識別に焦点を当てた。次に、被験者間で各指のバイオインピーダンス特性に生じる差違を評価し、異なる被験者ではバイオインピーダンスの大きさに差は生じるものの、同一被験者であれば親指と人差指のバイオインピーダンスの大小関係は不変であることを明らかにした。そして、同一の被験者でケースの把持や電極への触り方を変化させてバイオインピーダンス測定を行い、非連続的な測定でも親指と人差指のバイオインピーダンス特性は明確に分離することを示した。最後に、事前測定から作成した基準バイオインピーダンスを指標とした識別アルゴリズムを実装および評価し、高精度に親指と人差指の識別が可能であることを示した。今後は、適切な評価周波数帯域の選択による識別精度の向上や、5 本の指すべてを識別するアルゴリズムの実装について、被験者を増やして検討する予定である。

[成果の発表, 論文など]

D. Muramatsu: Bioelectromagnetic-response-based Input Interface for Mobile Devices —Finger Identification Using Bioimpedance Characteristics—, *Sensors and Materials*, Vol. 36, No. 3(4), pp. 1231-1241, 2024.