



# 生体電気インピーダンスを用いた 手指状態推定システムの開発 —1 指 3 関節の推定—

Development of fingers states estimate system by bioelectrical impedance  
-Estimation of 3 joints of 1 finger-

星野篤<sup>1)</sup>、高橋秀智<sup>2)</sup>

Atsushi HOSHINO, Hidetomo TAKAHASHI

- 1) 東京工科大学 工学部機械工学科 (〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, e51170979b@edu.teu.ac.jp)  
2) 東京工科大学 工学部 教授 (〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, takahashihdtm@stf.teu.ac.jp)

**概要:** 3D 空間上に手指の姿勢情報を入力できるデータグローブに変わる、新しい手指状態計測システムの開発を目指す。開発するシステムは、体組成計でも用いられる生体電気インピーダンスを使用する。これは身体の状態によって変化する。手指の姿勢変化も身体の状態が変化しているとし、測定が可能と考えた。測定方法は関連研究で用いられた筋長や関節液の状態を測定する手法から、新たに手指の腱の状態から測定する。この測定では手首のみに電極を張り付けて測定が可能であるため、デバイスを簡素化できると考えた。また、インピーダンス値は 2 関節以上の測定では、関節角度とインピーダンス値の相関関係が複雑化するため深層学習を用いて推定を行う。

本研究は 1 指 3 関節の推定が可能かを検証する。

**キーワード:** 生体電気インピーダンス、マンマシンインターフェイス

## 1. 緒言

### 1.1 背景

近年、仮想現実や拡張現実の技術は、産業での教育や開発等の利用だけでなく、スマートフォンアプリケーションや家庭用ゲーム機等、家庭や個人向けにもこれらの技術の利用がさらに増加した。仮想現実や拡張現実空間への身体の姿勢や状態の情報は、モーションキャプチャやデータグローブ等様々な入力デバイスによってコンピュータに入力する。身体の複雑な動作を取り組むことで、コンピュータ内に実空間と同様の操作をすることが可能になる。

しかし、身体の大まかな動きはコンピュータ内に取り込むことはできるが、指などの動きは複雑なデバイスを使用しなければならない。これらの装置はカメラやコンピュータなど外部機器が多く携帯性に優れない、複数の装置を身体へ取り付けることによる身体的負担、指などの細かな動作を取り込むには複雑かつ拘束感のある装置が必要といった欠点がある。

これらを解決するために携帯性に優れ、身体への負荷が少なく動作を取り込める新たな入力デバイスが必要と考えた。

### 1.2 目的

先行研究において生体電気インピーダンス法による運動中の関節角度変化の推定が行われた。動作計測において肘の関節角度とインピーダンス値に相関[1]があることがわかっている。この研究では自由度 1 のの簡単な動作での報告であり、手指のような多自由度については検討されていない。

本研究ではインピーダンス値から手指全体の関節角度の推定を行う。手指全体の推定を行うために、初めに基礎研究として 1 指 3 関節の計測が可能かを調べる。

## 2. 本論

手指状態を測定する手法として生体電気インピーダンス法(BIA 法)を用いる。本章では BIA 法による動作解析の可能性を検討する。

### 2.1 BIA 法による測定原理

身体の電気抵抗率は分子の比率、特に含水率によって決定する。含水率の大きい組織では電気抵抗率、すなわちインピーダンス値が小さくなる。れらからインピーダンスの大きさから体組成を推定することが可能である。

ヒトの細胞は大きく細胞外液、細胞膜、細胞内液の 3 つ

に分類できる。細胞外液と細胞内液は半流動性の電解液であり、ともにほぼ同じ伝導率と誘電率を有する。細胞膜は細胞外液と細胞内液を隔てるものであり電氣的絶縁性が高い。また膜の外側は親水性、内側は疎水性と2層構造となっている。親水性の部分は電気をよく通すが疎水性では電気を通さないことがわかっており、細胞膜は電極を挟んだコンデンサの状態と考えることができる[2]。

BIA法では2つの仮定をして人体をモデル化する。1つ目は人体の各組織を円柱モデルとし、それぞれを並列接続である。2つ目は細胞膜をコンデンサ、細胞内液と細胞外液をリアクタンスとし、電流の周波数によって経路が変わり、50kHz以下の低周波では細胞外液、100kHz以上の高周波は細胞膜を貫通する[3]。以上の仮定をすると身体を等価回路としてみなすことができる。

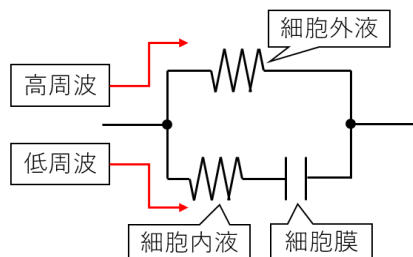


図1: 周波数による電流経路理論回路図

## 2.2 手指の解剖学的知見

手の骨格は8個の手根骨(大菱形骨、小菱形骨、有頭骨、有鉤骨、舟状骨、月状骨、三角骨、豆上骨)、5個の中手骨、14個の指節骨(基節骨、中節骨、末節骨)で構成されている。人差し指、中指、薬指、小指には指節骨は3個、親指は中節骨を除く2個が連結している。手根骨と中手骨はCM(carpometacarpal)関節、中手骨と基節骨はMP(metacarpophalangeal)関節、基節骨と中節骨はPIP(proximal interphalangeal)関節、中節骨と末節骨はDIP(distal interphalangeal)関節とそれぞれ呼ぶ。

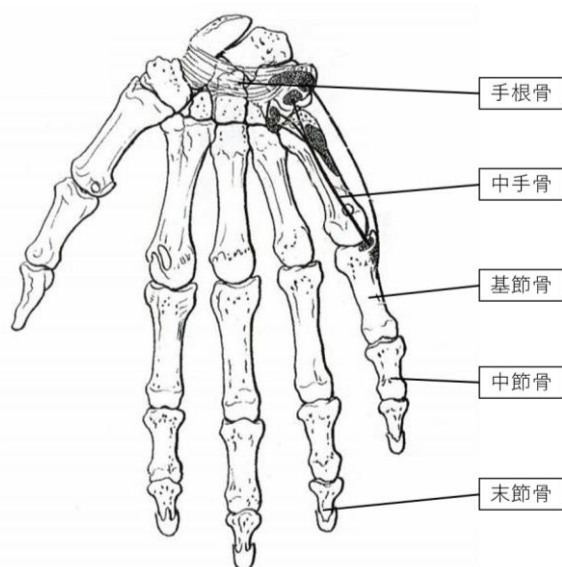


図2: 指の骨格

金子丑之助,日本人体解剖学上巻,1999,南山堂,pp328 [4]  
(一部改編)

次に腱と筋について、指を運動させる筋肉は主に2か所ある。1か所目は手のひらにある掌側骨間筋と背側骨間筋、2か所目は前腕にある浅指屈筋と深指屈筋である。

1か所目の掌側骨間筋と背側骨間筋は中手骨の間にあり、基節骨に接続している。2か所目の前腕の浅指屈筋と深指屈筋は4本の指を曲げる筋肉であり、それぞれの指と筋肉が腱で接続している。浅指屈筋は中節骨と、深指屈筋は末節骨に接続している。またこの腱は全て手首を通っている。

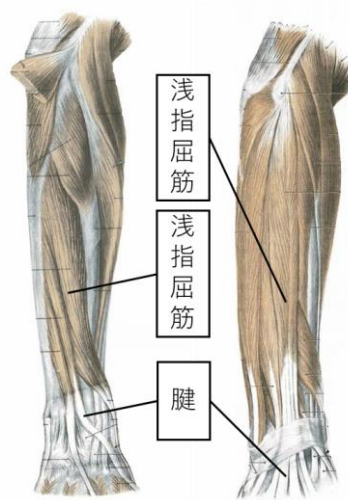


図3: 前腕にある指の腱と筋

金子丑之助,日本人体解剖学上巻,1999,南山堂,  
pp312-314 [4](一部改編)

## 2.3 測定手法の提案

関連研究では筋長を利用した測定方法[5]があったが、指と筋を接続する腱に着目した。この腱は指の動きに合わせて状態が変わるため手指の推定をするのが容易であること、腱は手首を経由して通っているため、手首のみに電極を貼り付けることで測定が可能であり、計測の容易さとデバイスの簡素化を図れると考えた。

以上から新たな測定手法として、手首に電極を貼り付け腱の状態を計測する方法を提案する。

## 3. 関節角度とインピーダンス値の測定

本研究での実験はIBA法を用いて手指状態を推定することを目指す。手首にインピーダンス値測定用の電極を張り付け、人差し指1指3関節の関節角度を推定できるシステムの開発を目指す。

### 3.1 実験装置の概要

実験装置はパソコン、LCRメータ、Leap Motion、カメラ、照明で構成されている。パソコンではprocessingとPythonを用いてLCRメータ、Leap Motion、カメラ、手指状態推定用の深層学習モデルを制御する。LCRメータではインピーダンス値測定、Leap Motionでは関節角度の測定、カメラではLeap Motionの測定データを修正する。インピーダンス値、間接角度は結果をCSVファイルで保存する。ProcessingではLeap MotionとLCRメータ、カメラ、

Python では深層学習を制御する。

なお今回の実験では人差し指 1 指のみの測定のため、多関節の角度計測に用いる Leap Motion は使用せず、画像解析である imageJ を使用した。

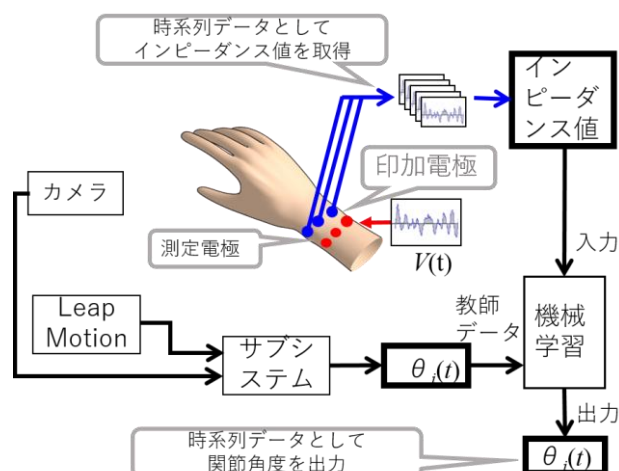


図 4: 実験装置の全体模式図

### 3.2 1 指 1 関節の測定

初めに人差し指第 3 関節のみの 1 指 1 関節の関節角度とインピーダンス値の測定を行った。測定周波数は。小さい値から順に 1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、75kHz、100kHz、125kHz、150kHz、200kHz の 10 種の周波数で行い、70 回データを取得した。以下の図 5 は最初の 25 回の測定結果であり、第 3 関節のみを 3 回屈伸運動させた結果を示したものである。

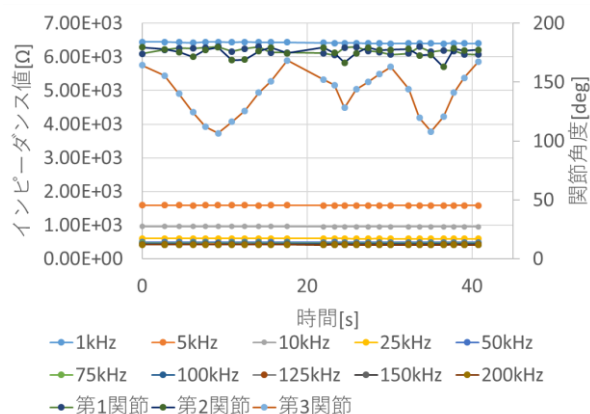


図 5: 1 指 1 関節の運動におけるインピーダンス値と関節角度の変化

図 5 での屈伸運動によるインピーダンス値の変化は 1kHz では 50Ω、5kHz では 10Ω、10kHz では 12Ω、25kHz では 10Ω、50kHz では 9Ω、75kHz では 9Ω、100kHz では 10Ω、125kHz では 11Ω、150kHz では 11Ω、200kHz では 13Ωが見られた。1kHz を除いてどの周波数も 10Ω 程度の変化が見られた。

### 3.3 1 指 3 関節の測定

続いて人差し指 1 指 3 関節の測定を行った。測定周波数は同様に 10 種の周波数とし、70 回データを取得した。以下の図 6 は最初の 25 回の測定結果であり、第 3 関節の

みを 3 回屈伸運動させた結果を示したものである。

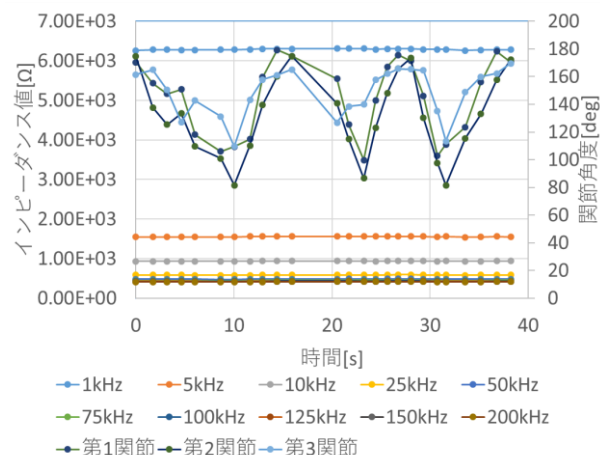


図 6: 1 指 3 関節の運動におけるインピーダンス値と関節角度の変化

図 6 での屈伸運動によるインピーダンス値の変化は 1kHz では 50Ω、5kHz では 20Ω、10kHz では 13Ω、25kHz では 12Ω、50kHz では 12Ω、75kHz では 12Ω、100kHz では 12Ω、125kHz では 12Ω、150kHz では 11Ω、200kHz では 10Ωが見られた。1kHz、5kHz を除いてどの周波数も 10Ω 程度の変化が見られた。

## 4. 手指状態の推定

前節で計測したデータを利用して手指状態の推定を行った。推定には機械学習用のオープンソースライブラリである Keras を使用した。

機械学習のモデルについて、使用するデータは前節で得た合計 140 のデータのうち 70 を使用し、70 個のデータのうち 20%をテスト用データとした。入力数は 7 つで、周波数成分ごとのインピーダンス値を入力する。このときデータの値が大きいのので 1kHz、5kHz、10kHz を除いた 7 つの周波数成分を入力した。中間層では 35 を使用しドロップアウト率を 0.2 とした。出力層は各関節角度を出力する。最適化関数は SGD 関数使用し、学習率は 0.0002、学習回数は 200 回で推定を行った。

以下の図 7 は学習の結果である。

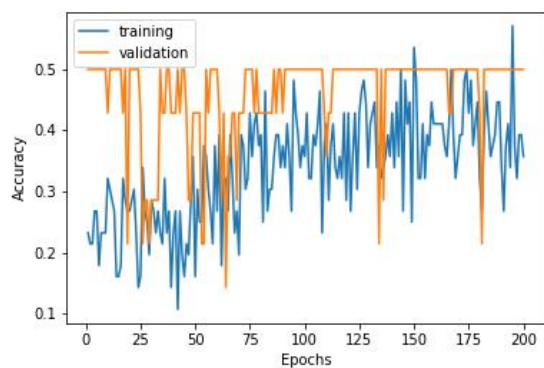


図 7: 学習結果

図 7 での学習結果から正答率は約 0.5 であることがわかった。

正答率が 0.5 であったため高い正答率とは言えない結果となったが推定できる可能性は上がったといえる。今後データ数を増やして更なる検証が必要である。

## 5. 結言

### 5.1 まとめ

手指の腱のインピーダンス値から機械学習を用いた手指状態の推定はできる可能性があると考えられる。今後更なる検証が必要である。

### 5.2 今後の課題

機械学習について検討すると、測定時の周波数は適切であるか、機械学習のモデルは適切であるか、学習用データを増やすことで正答率の向上が図れるかなどが挙げられる。

他の課題として、インピーダンス値は個人によって大きく変わる。この個人への対応にどのように対処していくのかを検討する必要がある。また運動を所定無くてもインピーダンス値が変化するドリフト現象が見られたのでこれについても検討したい。個人への対応は転移学習を利用、ドリフトへの対応は RNN を利用した時系列での学習を検討したい。

### 参考文献

- [1] 中村隆夫,山本尚武,上肢運動に伴う生体電気インピーダンスのパラメータの変動,岡山大学医学部保健学科紀要,10,pp.15-22,1999
- [2] 池田研二,島津秀昭,生体物性／医用機械工学,秀潤社,2000
- [3] 木村雄治,医用工学入門,コロナ社,2001
- [4] 金子丑之助,日本人体解剖学上巻,1999,南山堂,pp312-314,pp.328
- [5] 太田めぐみ,生体電気インピーダンス法を用いた筋長変化測定法の開発,早稲田大学大学院平成 18 年博士論文