

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650386

研究課題名(和文) 生体電気インピーダンスの高時間分解能測定による投球動作の判別

研究課題名(英文) Discrimination of throwing motion using a measuring system of bioelectrical impedance with high time resolution

研究代表者

中村 隆夫 (NAKAMURA, Takao)

岡山大学・保健学研究科・准教授

研究者番号：00249856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：前腕部電気インピーダンスの周波数特性であるCole-Cole円弧のパラメータを用いて投球動作の判別法について検討を行った。判別する投球動作は前腕部が自然に回内する投球、前腕部を強く回内させる投球、前腕部を強く回外させる投球、アーム式投球の一種であるボールをまっすぐ押し出す投球である。投球時に背屈が最大となる時刻から0.1、0.2、0.3、0.4、0.5秒後の5つのインピーダンスパラメータの合計25個のデータを用いて被験者3名、4種の投球、各投球10回の全120投球の判別分析を行った結果、その判別の中率は96.7%と高精度な判別ができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a measuring system of frequency characteristics of bioelectrical impedance with high time resolution and proposed the discrimination method for six forearm motions. The purpose of this research was discrimination of throwing motion of baseball. The four throwing motions were as follows: natural pronation, excessive pronation, excessive supination and hyperextension of elbow. In order to obtain higher hitting ratio of discrimination of four throwing motion, the optimal potential electrode location were the wrist joint side of a flexor carpi radialis muscle and 25 parameters of impedance parameters during throwing were used. As the results, the 96.7% of hitting ratio were obtained in 120 throwings of three subjects.

研究分野：医用生体工学

キーワード：インピーダンス 高時間分解能 Cole-Cole円弧 投球動作 判別分析

1. 研究開始当初の背景

(1) 生体電気インピーダンスによる生体計測は、歴史が古いものの、様々な理由により保健福祉や医療現場への実用化がなされていなかった。しかしながら、昨今、健康管理を背景として、個人レベルでインピーダンス式の体脂肪計が使用されることが多くなった。この測定においては被験者が静止した状態が測定上の必要条件となり、体動がノイズとなるが、本法は体動によるインピーダンス変化を動作分析に応用するという、逆転の発想によるものである。

(2) 生体電気インピーダンスの周波数 50 kHz の等価直列抵抗を用いてスポーツ動作における上肢および下肢電気インピーダンスや嚙下における頸部電気インピーダンス (IPG) から動作の特徴を抽出し、スポーツスキルや嚙下機能の評価を行ってきた [1-4]。この方法は以下の特長が挙げられる。

- ① 空間的もしくは時間的な制限がない。
- ② 被験者は無拘束に近い状態で計測可能。
- ③ 簡便かつ短時間に解析可能。
- ④ インピーダンス波形は動作の大きさ、フォーム、安定性を直観的に表現できる。

一方、この本法を用いた研究は、前述の特長を持つにもかかわらず、文献 [5] にて、運動解析のための電極装着について紹介されている程度である。本手法を用いた身体解析法の注目度が低い理由の一つとして、50 kHz 時の等価直列抵抗のみの情報のため単純な運動でも、例えば手関節の掌屈・背屈に対して尺屈・橈屈のような検出が困難であったことがあげられる。

(3) そこで、筆者は生体電気インピーダンスは Cole-Cole 円弧則の周波数特性に従い、4 パラメータ (Z_0 , Z_∞ , f_m , β) がわかれば、すべての周波数帯域でのインピーダンスを算出できることに注目した。数十 Hz 帯域の皮膚インピーダンスの周波数特性を連続的に測定するシステム [6] を参考に、体肢や体幹部のインピーダンスの周波数特性を測定する高時間分解能測定システムを構築した [7]。図 1 は前腕部電気インピーダンスの測定例である。

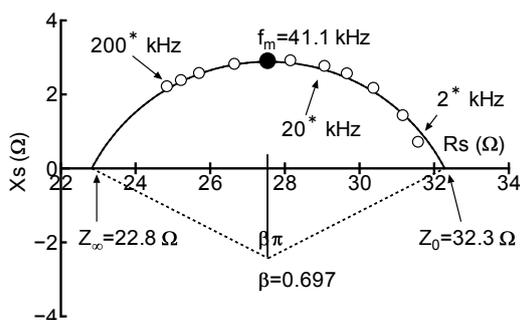


図 1 前腕部電気インピーダンスの測定例

動作判定の試験的研究として、掌屈、背屈、尺屈、橈屈、回内、回外の全 6 動作における前腕部電気インピーダンスの周波数特性を測定し、これから得られるパラメータを用いて判別分析を行った。その結果、判別率が 95.0% という結果を得た [8]。

2. 研究の目的

(1) 身体運動の分析については、ハイスピードカメラやデジタル処理の進歩により画像解析で行える場合が増えている。しかしながら、照明やカメラ位置の制約により、すべてに対応はできない。これに対して、本法は電極を装着するだけの低拘束で空間的制約がないため、あらゆる場面での動作分析が可能である。本インピーダンス法が有益な運動解析法として認知されることを目標とした。

(2) 本研究においてに実際のスポーツ動作への応用として野球の投球動作に着目した。投球時の回内・回外動作や肘関節の過伸展による前腕部電気インピーダンス変化を測定して動作判別について研究を行った。すなわち、①前腕部が自然に回内する投球 (以下、投球 1)、②前腕部を強く回内させる投球 (以下、投球 2)、③前腕部を強く回外させる投球 (以下、投球 3)、④アーム式投球の一種であるボールをまっすぐ押し出す投球 (以下、投球 4) の 4 種の投球動作の判別を検討した。投球動作の判別がインピーダンス法で行えれば、スポーツ領域において、その指導やバイオフィードバックに応用が予想されるばかりでなく、選手の肩や肘の障害予防にも期待ができる。

3. 研究の方法

(1) 生体電気インピーダンスの測定方法

生体電気インピーダンスの測定法は 4 電極法を採用した。2 つの電流電極 (I+, I-) から生体に定電流を通电し、この電流電極間の 2 つの電位電極 (P+, P-) 間の電位差を測定することで、電位電極間のインピーダンスを算出した。

これまでに筆者が開発してきた生体電気インピーダンスの高時間分解能測定システムを用いて、測定を行った。図 2 に本測定システムのブロック図を示す。

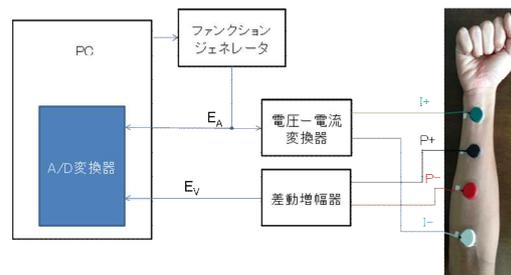


図 2 生体電気インピーダンスの高時間分解能測定システム

本システムは AD 変換器 (Interface、PCI-3525、12 bit) でサンプリングを行った後に FFT 解析を行うので、2 のべき乗個のデータが必要となる。AD 変換器のサンプリング件数を 2048 件、サンプリング周波数を 2 MHz で設定し、それにより基本波の周期は 1.024 ms、基本周波数は 0.9765625 kHz となる。基本周波数の 4、8、10、16、20、32、40、64、80、100 倍の 10 種類の複合波を、電圧 E_A として PC で制御されたファンクションジェネレータ (Agilent、33120A) から出力する。その後 E_A を電圧 - 電流変換器に入力して、実効値 $250 \mu\text{A}$ 電流に変換する。この電流を電流電極間に通電し、測定部位の電位差を差動増幅器と反転増幅器にて増幅して出力 E_V を得る。PC に内蔵された AD 変換器で E_A 、 E_V をサンプリングし測定終了後にデータファイルに保存する。ファイルのデータを読み取り、 E_A 、 E_V を FFT 解析して E_A から複素電流を求め、 E_V から複素電圧を求める。それらを用いて 10 種類の周波数成分毎のインピーダンスを得る。またインピーダンスの大きさと偏角を求める際には、使用したケーブル容量や OP アンプで発生する位相遅れの補正を加える。10 種類のインピーダンスの取得間隔を 4 ms とした。測定した 10 種類のインピーダンスと各推定点との距離をそれぞれ残差とし、これらの残差の 2 乗の和が最小になるように最適化計算法のうちの KH 法を用いて [9]、円弧パラメータ (Z_0 、 Z_∞ 、 f_m 、 β) と細胞内液抵抗 R_i を求める。生体の測定結果より得られた円弧パラメータにはノイズの影響が確認されたので、FIR フィルタで処理し、遮断周波数 (6 Hz) 以上のノイズをカットした。

(2) 最適な電極配置の探索法

本研究における最適な電極位置の探索のため前腕部において浅在部の 4 つの筋繊維上に電位電極を装着した。それぞれ橈骨手根屈筋 (FCR)、腕橈骨筋 (BR)、総指伸筋 (ED)、尺骨手根屈筋 (FCR) である。そして同筋繊維上で手関節側 (以下、w)、中央部 (以下、M)、肘関節側 (以下、E) の 3 通りの電位電極配置で最適電極配置を検討した。

FCR では I+、I- は前腕部手掌側とした。手掌側橈骨手根関節から肘関節中央までの長さを L としたとき電位電極配置は、

FCR_w (P+ は $2L/8$ [cm]、P- は $4L/8$ [cm])、
 FCR_M (P+ は $3L/8$ [cm]、P- は $5L/8$ [cm])、
 FCR_E (P+ は $4L/8$ [cm]、P- は $6L/8$ [cm]) とした。

BR では I+、I- は前腕部手掌側とした。手掌側橈骨手根関節から上腕骨の外側上顆の長さを Q としたとき、電位電極配置は、

BR_w (P+ は $2Q/8$ [cm]、P- は $4Q/8$ [cm])、
 BR_M (P+ は $3Q/8$ [cm]、P- は $5Q/8$ [cm])、
 BR_E (P+ は $4Q/8$ [cm]、P- は $6Q/8$ [cm]) とした。

ED では I+ は手掌、I- は上腕部中央とした。手背側手根関節中央から上腕骨の外側上顆の長さを M としたとき、電位電極配置は、

ED_w (P+ は $2M/8$ [cm]、P- は $4M/8$ [cm])、
 ED_M (P+ は $3M/8$ [cm]、P- は $5M/8$ [cm])、
 ED_E (P+ は $4M/8$ [cm]、P- は $6M/8$ [cm]) とした。
FCU では I+ は手掌、I- は前腕部手背側となった。手掌側尺骨手根関節から上腕骨の内側上顆の長さを N としたとき、電位電極配置は、
 FCU_w (P+ は $3N/8$ [cm]、P- は $4N/8$ [cm])、
 FCU_M (P+ は $4N/8$ [cm]、P- は $5N/8$ [cm])、
 FCU_E (P+ は $5N/8$ [cm]、P- は $6N/8$ [cm]) とした。
以上の合計 12 通りの配置を測定した。

(3) 手関節の基本動作の測定

被験者は運動機能に障害のない被験者 A (40 代、男性)、B、C (共に 20 代、男性) とした。まず、セロハンテープで表皮角質層を軽く剥離した。被験者は椅子に座り、上腕部の下に台を置き、直径 4 cm、質量 17 g の円筒を手で軽く持った。前腕の高さは常に一定で中間位を保った。電極は NS-114T (日本光電) を使用し、電極ペーストは、Gelaid (日本光電) を使用した。中間位から基本動作 (回内、回外、拳屈、背屈、橈屈、尺屈) を行った。測定開始から 4 秒間を安静状態とし、4 秒 ~ 6 秒で動作を行い、6 ~ 10 秒を安静状態とした。各動作を 5 回測定した。5 回の測定を比較しパラメータの変化が最も異なる 2 つを省き、3 つを採用した。これらの測定は各被験者に対し連続する 3 日間で実施した。その際のインピーダンスを測定し、インピーダンスパラメータの変化率 (ΔZ_0 、 ΔR_i 、 ΔZ_∞ 、 Δf_m 、 $\Delta \beta$) をそれぞれ求めた。

(4) 投球動作の測定

電極位置は手関節測定時の最適電極配置となった FCR_w の電極配置を採用した。被験者は 4 種の投球の投げ分けができる被験者 A (40 代、男性)、D、E (共に 20 代、男性) とした。被験者は投球方向へ足を肩幅に開いた状態で立ち、ストレートを投げる際の握りでボール (直径約 70 mm、重量約 160 g) を保持して手掌を体側に向け、上肢を自然に垂らした状態を安静状態とした。安静状態から、テイクバック後に各投球動作を行った。

(5) 投球時の判別式の導出と動作判別

まず、判別式導出のため被験者が投球 1 ~ 4 を 20 回ずつ行った。ボールを加速させる動作によって背屈が最大になり f_m が極大値をとる時刻を t_1 と定義した。そして、 t_1 から経時的に 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 秒後の 5 つのパラメータの変化率 (ΔZ_0 、 ΔR_i 、 ΔZ_∞ 、 Δf_m 、 $\Delta \beta$) の合計 25 個を判別分析のパラメータとした。各投球に対応した判別係数がそれぞれ算出され、投球法ごとの 4 つの判別式を求めた。次に、電極を貼り替えずに投球 1 ~ 4 を 10 回ずつ行い、各 10 球から得られたパラメータをそれぞれ 4 つの判別式に代入し、最も判別式の値 (判別得点) の大きい投球動作に判別される。

4. 研究成果

(1) 最適な電極装着位置の決定

掌屈、背屈、橈屈、尺屈、回内、回外の 6 動作を行った際の

- ①パラメータの変化量の平均値
- ②パラメータの変化率の平均値
- ③同日測定時の標準偏差
- ④異日測定時の標準偏差
- ⑤被験者ごとの変動係数

の 5 つの評価指数を定義し、計 150 個 (6 動作 × 5 パラメータ × 5 評価指数) の指標について比較した。以上より橈骨手根屈筋の手関節側 FCR_Wにおいて 150 項目中 81 項目のパラメータが最適となったため、FCR_Wが最適な電極位置とした。

(2) 投球動作判別のためのパラメータ決定

図 3 に電極位置 FCR_Wにおける投球 1 の動作が実際に開始された測定時刻 2 秒から投球動作終了時刻を含む 3.5 秒間の被験者 A のデータを示す。

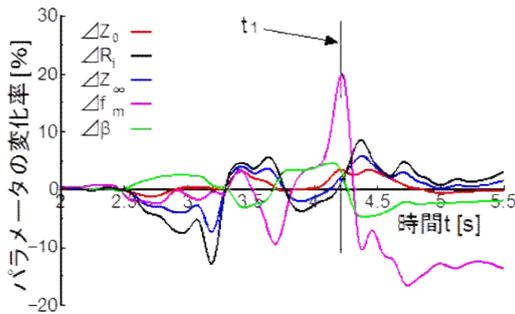


図 3 投球 1 におけるパラメータ変化率

本研究で取り上げた投球 1~4 は、同一被験者において、投球動作開始から t_1 までの動作が投球動作に関係なく共通であり、 t_1 以前に投球動作毎のパラメータ変化率の違いは見られなかった。これは各被験者共通の特徴であった。 t_1 以降、パラメータ変化率の経時変化が投球動作毎に異なる原因として、ボールリリース後の前腕部動作の回内、回外の違いおよび回内の程度、掌屈の程度の違いがあげられる。投球フォーム (投球過程) が違うため、筋群の働きが投球法毎に異なり、パラメータ変化率の経時変化が異なった。この手指関節、手関節、肘関節の一連の動作は共通の動作といえるため、パラメータの変化率の経時変化は投球過程を知る際の指標になると考えられる。

(3) 投球動作の判別分析

ボールを加速させる動作によって背屈が最大になり f_m が極大値をとる時刻を t_1 と定義した。そして、 t_1 から経時的に 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 秒後の 5 つのパラメータの変化率 (ΔZ_0 、 ΔR_1 、 ΔZ_∞ 、 Δf_m 、 $\Delta \beta$) の合計 25 個を用いた判別分析の結果、96.7% の判別の中率を得ることができた。表 1 に判別分析結果を示す。なお、被験者 3 名 × 投球 4 種 ×

各 10 投球で全 120 投球である。

表 1 4 つの投球動作の判別結果 (判別の中率 96.7%)

	判別された動作				計	
	投球1	投球2	投球3	投球4		
真の動作	投球1	28	0	0	2	30
	投球2	2	28	0	0	30
	投球3	0	0	30	0	30
	投球4	0	0	0	30	30
計	30	28	30	32	120	

(4) 投球動作の誤判別の原因について

誤判別は投球 1 と投球 2 もしくは投球 1 と投球 4 で起こった。投球 1 は前腕部を回内し、かつ伸展させる投球である。投球 2 と投球 4 を複合した動作である投球 1 で回内動作が大きくなれば投球 2 と判別され、逆に投球 2 の動作時に回内が小さくなれば投球 1 と判別される。同様に投球 1 の動作時に回内動作が小さくなると投球 4 に判別されてしまう。誤判別された投球のパラメータ変化と、誤判別された投球法の典型的なそれとを比較した結果、経時変化の特徴に大きな差異はみられなかった。判別得点に関して比較しても 10% 以内と非常に小さな差となった。よって、ボールリリース後の回内および掌屈の程度が真の動作のそれよりも、誤って判別された動作のそれに近くなったために誤判別が起こった。

(5) パラメータの判別分析への寄与

この判別分析のための 25 個のパラメータの中で、どのパラメータが判別への影響が大きいかについて分析を行った。すべての被験者で判別分析の F 値が 2 を超えて判別に特に寄与しているパラメータは 0.1 秒後の β 、0.3 秒後の Z_∞ 、0.3 秒後の f_m 、0.4 秒後の f_m 、0.4 秒後の f_m の 5 つであった。周波数特性の中心周波数 f_m が判別分析に大きく影響を与えた要因として、回内と回外、橈屈と尺屈における f_m の変化方向が他のパラメータ変化方向と逆方向でそれぞれ大きく変化し、それらの運動に対する感度が高かったためと考えられる。

<引用文献>

- [1] 中村ら、バイオメカニズム 11、pp. 43-55、東大出版会、1992。
- [2] T. Nakamura et al、Med. Biol. Eng. Comput.、vol. 30、no. 5、pp. 465-473、1992。
- [3] 山本、中村ら、電学論 A、vol. 118-A、no. 3、pp. 210-217、1998。
- [4] T. Kusuhara、T. Nakamura、et al、J. Int. Med. Res.、Vol. 32、No. 6、pp. 606-616、2004。

- [5] S. C. Kim et al、 Med. Biol. Eng. Comput.、 Vol. 41、 No. 1、 pp.141-145、 2003.
- [6] 福元ら、電学論 C、 vol.122、 no.9、 pp.1433-1440、 2002.
- [7] T. Nakamura、 et al、 Proceeding OF SPIE、 Vol. 6357、 pp. 63571S-1～63571S-5、 2006.
- [8] T. Nakamura、 et al、 ICEBI 2007、 IFMBE Proceeding 17、 pp. 671-674、 2007.
- [9] 黒田、: Visual Basic による工学計算プログラム. CQ 出版社、東京、2002

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 中村 隆夫、阿部 勇輝、楠原 俊昌、山本 尚武、前腕部電気インピーダンスを用いた投球動作の判別法の改善、電磁情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 113、No. 499、2013
- ② Takao Nakamura、Toshimasa Kusahara、Yoshitake Yamamoto、Influences of Parameters of Forearm Electrical Impedance in Discrimination of Throwing Motion、計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2014 論文集、査読無、pp. 277-278

〔学会発表〕(計1件)

- ① 中村 隆夫、阿部 勇輝、楠原 俊昌、山本 尚武、前腕部電気インピーダンスを用いた動作判別のための最適な電極装着位置の検討、第36回日本生体医工学学会中国四国支部大会、平成25年10月19日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 隆夫 (NAKAMURA、Takao)

岡山大学・大学院保健学研究科・准教授

研究者番号：00249856