

武術的立位が身体動揺に与える影響

Effects of Japanese Martial Standing Method on Body Sway

渡部 悠也[†], 阪口 豊[†]

Yuya Watanabe, Yutaka Sakaguchi

[†]電気通信大学

University of Electro-Communication

yuya.watanabe@uec.ac.jp

概要

本研究では、「浮くように立つ」武術的立位である「垂直離陸」の機能的意味を理解することを目的として、重心動揺特性及び筋活動を解析した。床反力計を用いて床反力中心 (COP) を計測し、Detrended Fluctuation Analysis (DFA) により COP の時系列解析を行った結果、垂直離陸状態では通常の立位状態に比べ、静的安定性が低下する一方、動的安定性が向上していることが明らかになった。また、筋活動解析の結果から、膝関節の屈曲と伸展を行う筋の同時活性が実験的に確認できた。これらの結果は、垂直離陸が前後方向の身体動揺を抑え左右方向の身体動揺を増やすことで静止立位時の身体動揺パターンを変化させることを示唆する。

キーワード: 武術的立位, 拮抗状態, 足底圧中心 (Center of pressure), Detrended fluctuation analysis, 動的安定性

1. はじめに

1.1. 武術的立位「垂直離陸」について

武術では、身体を素早く動かすことに加えて、自分の運動意図を相手に伝えないことが重要である。例えば、「ナンバ」と呼ばれる武術的な歩法では、身体パーツ間の連鎖的な動きを抑えて身体を動かすため、動き出しを相手に悟られにくくなることが指摘されている[1]。武術では、このような相手に自分の動きの意図を悟られないための身体操作法が数多くみられる。

本研究では、さまざまな武術的な身体操作法のうちその基本である立位法に着目し、その特性を実験的に検討する。具体的には、「垂直離陸」と呼ばれる武術研究家の甲野善紀氏が考案 (命名) した立位法を題材としてとりあげる。甲野氏によると、これは「浮くように立つ」立位法であり、この立位法をとることにより「足裏に体重がかからず地面を蹴らない動きを実現できる」という (注: この表現はあくまで感覚的な表現である)。垂直離陸の状態は、「片足立ちを両足で行うようにする」、「縄跳びを両足で踏んで縄ごと身体を持ち上げる感覚で立つ」、「脚を曲げる動作と伸ばす動作を同時に行おうとする」といったように、現実には実現不可能な状況を仮想的にイメージしながら立位することによって実現される。このように、二つの足を一緒に持ち

上げるような感覚が「浮くように立つ」という主観的感覚につながると考えられる一方で、その物理的、生理的な実態は明らかではない。ただし、これらの教示内容を考えると、少なくとも、足を伸ばす方向の動作と足を曲げる方向の動作を同時に行おうとする一種の「拮抗状態」を作り出すことが重要であると推察できる。その点で、垂直離陸は動筋と拮抗筋を同時に駆動して関節ステイフネスを高める「同時活性化」の状態に類似しているように思われるが、垂直離陸の状態における身体感覚は「力をいれて身体を固める」ものとは明確に異なることから、一般的な同時活性化の状態とは異なる状態とも考えられる。

また、武術研究家中島章夫氏によると、「人には、相手と接触していると無意識のうちに体重の一部を相手に預けて自身の身体の安定化を図ろうとする作用が働く」という。つまり、「相手と触れることにより、相手とのあいだに「関係性」を作り出す生来的な性質がある」という。このことは、相手と接触することにより自らの姿勢制御に関する情報を相手に伝えてしまうことを意味するが、これは冒頭で述べた「相手に自分の意図を伝えない」という武術の原則からすると望ましくない。そして、垂直離陸は、相手との接触によってもたらされる関係性を絶つ効果があると考えられている。相手との関係性を絶つ効果には二つの側面がある。一つは、上で述べたように自分の状態を相手に伝えない効果である。もう一つは、相手を自分に頼らせない効果である。自分が垂直離陸の状態をとると、相手は自分に対して通常のように体重を預けることができなくなるため、体勢が崩れやすくなると考えられている。

本研究では、以上の背景の下で、自然に立位した状態と垂直離陸の状態での立位した状態において、それぞれ重心動揺、筋活動を計測し、垂直離陸の状態における身体動揺特性および筋活動特性を実験的に明らかにする。また、その結果に基づいて、垂直離陸がもたらす機能的意味とそのメカニズムについて考察する。

2. 実験方法

2.1. 被験者

被験者は武術的動作の経験がない成人男性 4 名，武術的動作の指導者 1 名の計 5 名である。本実験は，電気通信大学における「ヒトを対象にする実験に関する倫理委員会」の承認を得て実施した。

2.2. 実験装置

測定に用いた床反力計はテック技販社製 TF4060 であり，サンプリング周波数は 200 Hz に設定した。

筋活動は皮膚表面電極を用いた双極誘導により測定した。生体アンプは TEAC 社製 polymateAP-1000 を用い，サンプリング周波数 2000 Hz で測定を行った。測定の前処理として，電極貼付位置には日本光電工業社製スキンプィアを用いて皮膚抵抗を低減させた。測定筋は足関節の底屈・背屈に関わる前脛骨筋(TA)，腓腹筋(GA)，膝の伸展・背屈に関わる大腿直筋(RF)，大腿二頭筋(BF)の 4 つである。

2.3. 手続き

被験者には，足は内側間で 15-20 cm 程度開いた状態で楽に立位するように指示した。実験は全て開眼で行い，目とほぼ同じ高さで正面 1.8 m 程度先に設けた指標を注視するように指示した。1 試行は 40 秒間である。試行数は，通常立位条件，垂直離陸条件各 5 回であり，二つの条件を交互に行った。最初の試行における両足間位置を記録し，全試行においてその位置を保つようにして実験を行った

実験に先立ち，被験者は垂直離陸の実現方法について説明を受けた。1.1 節において垂直離陸の教示法について述べたが，本実験では主に，「脚を曲げる動作と伸ばす動作を同時に行う」という表現で教示した。その後，被験者の状況に応じて補足的に「縄跳びを両足で踏んでいる状態で縄ごと身体を持ち上げようとする」，「片足立ちを両足で行おうとする」といった比喩的表現を用いた。また，垂直離陸の状態では「浮くように立つ」感覚が得られると説明し，被験者がこれに近い感覚を得られたと回答した段階で垂直離陸の説明を終え，実験を開始した。

2.4. 分析

全ての解析は MathWorks 社のソフトウェア MATLAB を用いて行った。床反力計の測定データは，カットオフ周波数 5 Hz の 4 次バターワースフィルタで低域遮断した。また，筋活動電位の測定データはカットオフ周波数 50 Hz のハイパスフィルタで低域遮断したのち，カットオフ周波数 5 Hz のローパスフィルタで平滑化を行った。

床反力計，筋電位ともに 40 秒の測定時間のうち 5 秒から 35 秒までの 30 秒間のデータを解析対象とした。

安定した立位姿勢は，身体重心(COM: center of mass)の垂線が両足間の支持基底面内に収まっているときに維持される。COM は支持基底面内の圧中心(COP: center of pressure)に反映されることから[2]，身体動揺計測の指標として COP が用いられる。

本研究では，床反力計により計測した COP の時間変化に基づいて重心動揺を評価する。用いた指標は前後方向(AP: anterior vs. posterior)と左右方向(ML: medial vs. lateral)の移動速度 dCOP(derivative of COP)および，軌跡長 COP_{length} であり，それぞれ次式で与えられる。

$$dCOP_{AP}[n] = \frac{AP[n+1] - AP[n]}{\Delta t}$$

$$dCOP_{ML}[n] = \frac{ML[n+1] - ML[n]}{\Delta t}$$

$$COP_{length} = \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(dCOP_{AP}[n])^2 + (dCOP_{ML}[n])^2} \Delta t$$

ここで，AP[n], ML[n] はそれぞれ計測時点 n における COP の前後方向，左右方向位置， Δt はサンプリング周期 (= 5 ms) を表す。この式からわかるように，軌跡長は COP の移動の速さを時間的に積分したもので，COP 移動の平均的な速さを表すものである。また，COP の時系列の特性を分析するため，本研究では，DFA (detrended fluctuation analysis) の手法を用いる。この手法はスケール指数 α を用いて時系列データのフラクタル性を推定する手法である[3-6]。 α は時系列データの複雑性に関する値であるとされ[7]，姿勢制御の研究においては，重心動揺の動的安定性を表す指標として用いられる[8]。

DFA の具体的な方法は以下の通りである。データ長 N である時系列データ $x(j)$ からその平均 \bar{x} を引いたうえ

で1番目から*i*番目までの総和をとったものを*i*番目の値とする新たな時系列*y(i)*を得る。

$$y(i) = \sum_{j=1}^i [x(j) - \bar{x}]$$

得られた時系列*y(i)*をデータ*n*個毎に分割し、それぞれの区間において線形回帰計算を行って、各データに対しその線形近似値*y_n(i)*を求める。最後に、時系列*y(i)*と近似値*y_n(i)*の二乗誤差平方根をとる。

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}$$

この計算を異なる*n*に対して行い、 $\log_{10} n$ を横軸、 $\log_{10} F(n)$ を縦軸としたときの近似直線の傾きがスケールリング指数 α である。

3. 実験結果

3.1. 床反力中心の運動特性

通常立位条件および垂直離陸条件におけるCOPの前後移動速度、左右移動速度を図1、軌跡長を図2に示す。条件間の違いを統計的に調べるため、被験者ごとに二つの条件間で*t*検定を行った。その結果、一部の被験者を除きほぼ共通して、垂直離陸状態では前後・左右双方の移動速度、および軌跡長が統計的に有意に増加していた。

この結果より、垂直離陸により静止立位時の重心動揺が増加し、身体が不安定化していることが明らかになった。

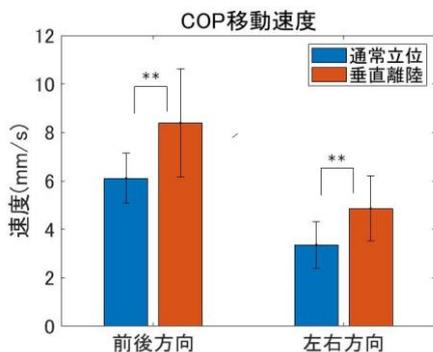


図1 平均COP移動速度

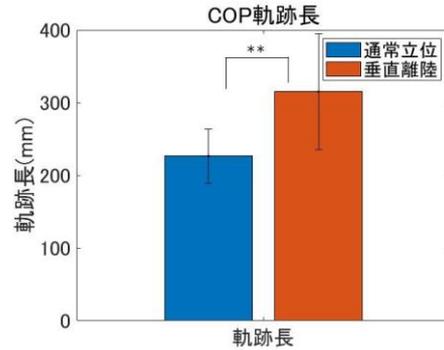
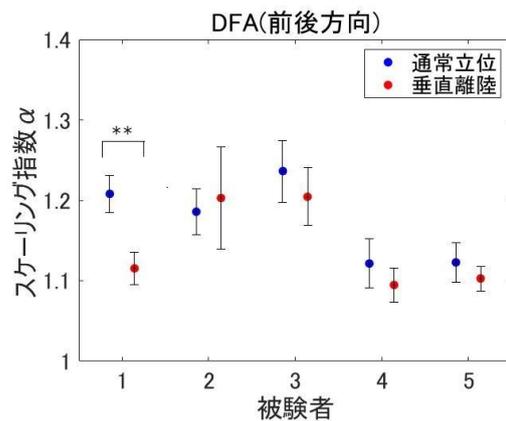


図2 平均COP軌跡長

3.2. DFAを用いた重心動揺のゆらぎ解析

次に、DFAを用いて床反力中心の動きの時系列解析を行った。各被験者の通常立位条件及び垂直離陸条件の前後方向、左右方向のスケールリング指数を図3に、全被験者の平均を図4に示す。DFAにより得られたスケールリング指数 α は前述の通り、系の複雑性を表し、動揺の動的安定性が上昇していることを表す意味する。

被験者ごとに比較した場合は、有意な減少を示したのは被験者1の前後方向、被験者5の左右方向のみであったが、図4に示すように、被験者全体でみると、垂直離陸条件では通常立位条件に比べて α が有意に減少した。また、すべての被験者において、通常立位条件と垂直離陸条件ともに、前後方向に比べ左右方向の方が α の値が高かった。



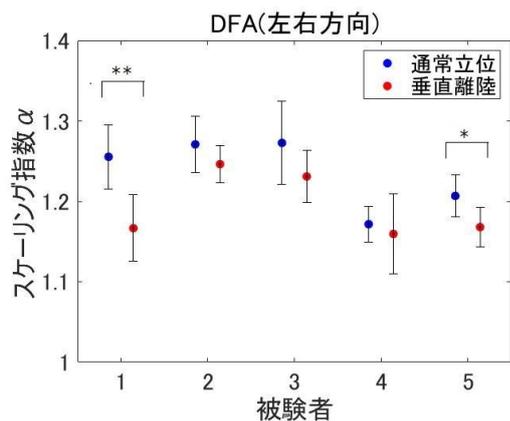


図 3 各被験者の平均スケーリング指数 α

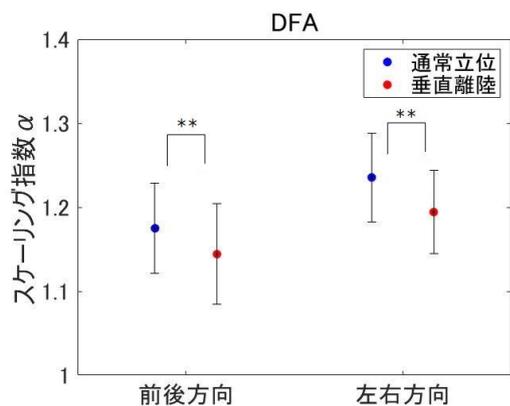
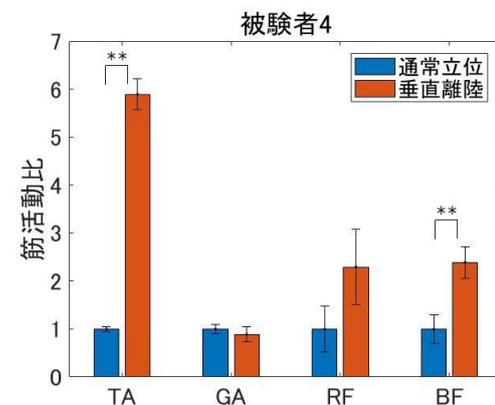
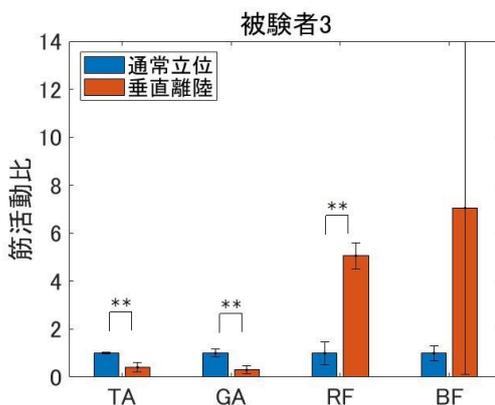
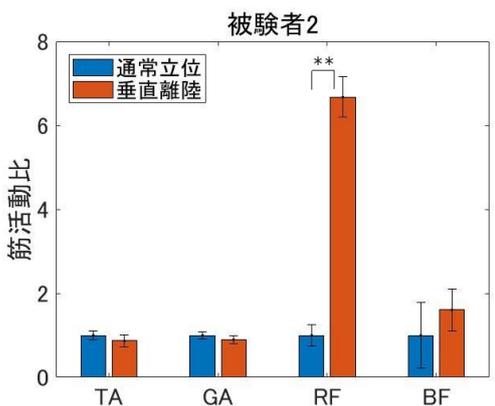
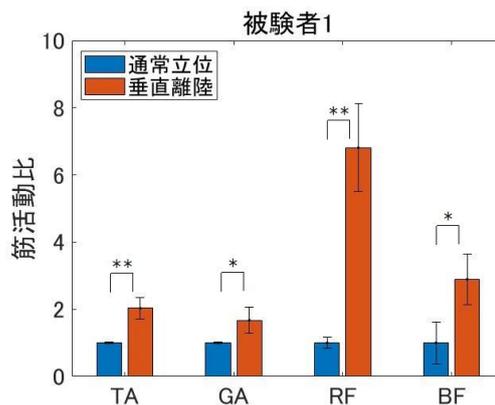


図 4 全被験者の平均スケーリング指数 α

3.3. 筋活動量

前述の前処理をした筋電位の二乗平均平方根 (RMS) をとることにより, 各被験者の四つの筋活動量の平均値を算出した. 被験者間および被験筋間の比較のため, 各筋の通常立位時の平均筋活動を 1 としたときの垂直離陸時の平均筋活動を図 5 に示す. また, 全被験者の平均筋活動比を図 6 に示す. すべての被験者が垂直離陸では大腿二頭筋 (RF) の筋活動量が増加した. また, 被験者 5 以外の 4 名が垂直離陸では大腿直筋 (RF) の筋活動量が増加し, そのうちの 3 名は 4 倍以上の増加であった.



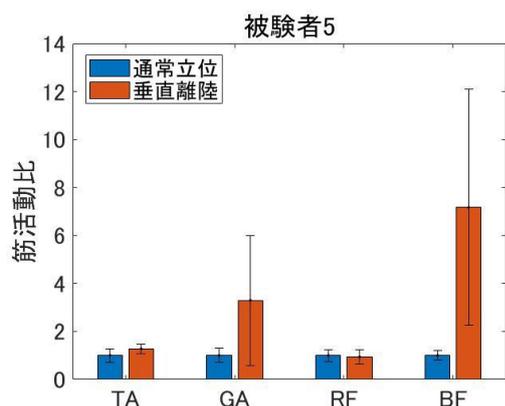


図5 被験者毎の平均筋活動比

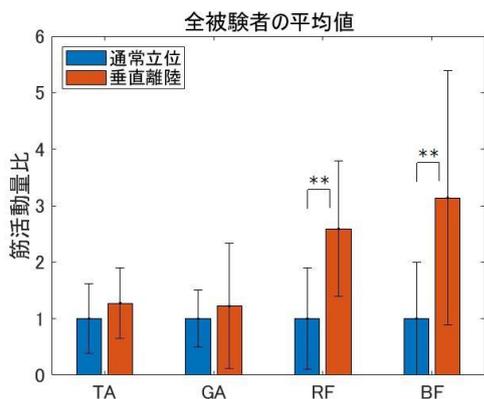


図6 全被験者の平均筋活動量比

4. 考察

4.1. 垂直離陸の立位特性について

垂直離陸条件では、通常立位条件と比べて床反力中心の速度及び軌跡長が増加していたことから、垂直離陸の状態では、COPの動きが少ない（重心動揺が小さい）という意味での安定性（これを「静的安定性」と呼ぶ）が低下していると考えられる。これは、「垂直離陸では身体が不安定になる」という中島氏の説明と一致する。一方で、垂直離陸条件ではDFAにより得られたスケーリング指数 α が低下する傾向が見られたことから、動的安定性が上昇していると考えられる。

これら2つの結果を踏まえると、通常立位は重心を同じ場所に留めるとする（つまり、COPの移動範囲を狭く保つという意味で）安定化を図る立位であるのに対し、垂直離陸は絶えず動くことで（COPの移動範囲を広くとって）安定化を図ろうとする立位であると考えられる。

武術の立ち合いにおいて、同じ場所に留まろうとする立位は、動き出しの遅れや対応力の低下に繋がると

いわれていることから、静的安定性が高いことは武術においては必ずしも望ましいことではなく、むしろ動的安定性こそ望ましい特性であると考えられる。また、「浮くように立つ」という主観的な感覚は、COPが静的に安定していないこと（浮くことで揺らいでいる感覚）を反映しているのではないかと考えられる。

4.2. 垂直離陸状態の筋活動量について

垂直離陸を実現する際の要点が脚の屈曲と伸展を同時に行うように感じる一種の「拮抗状態」であることを考えると、脚各関節の筋の同時活性が垂直条件を実現するための条件であると考えられる。各被験者の平均筋活動（図5）を見ると、垂直離陸条件において、測定した4つの筋のすべての筋活動量が増加したのは被験者1のみである。被験者1はDFAにより得られたスケーリング指数 α が前後方向、左右方向ともに有意に（ $p < 0.01$ ）減少していることから、動的安定性が最も上昇しているといえる。

一般に、拮抗筋対の同時活性化は関節まわりのステイフネスを高める効果をもたらす。したがって、拮抗状態を作ることは身体の動きを止める方向の作用が生じると考えられるが、それにも関わらず、垂直離陸条件において身体動揺が大きくなるのはなぜであろうか？

その原因として考えられることは二つある。一つは、間欠的制御[9]との関係性である。ヒトの神経系は情報伝達速度が遅いことから、制御系としてみるとむだ時間が長い系であるといえる。このため、筋線維や皮膚の機械受容器からの感覚情報を用いてフィードバック制御を行うことが難しい。ヒトの運動制御系がもつこのような制約の下で安定した立位バランス制御を実現するうえで、望ましい位置からの重心のずれが小さな領域ではあえて制御をおこなわず、ずれがある程度大きくなってから制御をかける戦略が有効であることが指摘されている（間欠的制御[9]）。この仮説が正しいとすると、静的安定性が悪くなることは、制御を行わない領域が大きくなっていることを示唆している。一方で、関節を堅くすることで制御に対する応答が悪くなる（同じトルクをかけても身体が動きにくくなる）可能性があることを考えると、これは単に制御が悪くなっているだけで、動的安定性を高める効果があるとはいえないことから、垂直離陸状態で動的安定性が上昇しているという結果とは矛盾するように思われる。

もう一つの可能性は身体（筋）の多自由度性である。

立位バランスの維持には身体中のほぼすべての筋が関与していると思われるが、垂直離陸の拮抗状態において同時活性化される筋はそれらのうちの一部のみである。したがって、それらの同時活性化によって身体自由度の一部が堅く（スティフネスが高く）なったとしても、それ以外の身体自由度は堅くならず保たれる可能性が考えられる。つまり、拮抗状態は、特定の自由度の動きを封じてそれ以外の自由度の動きを引き出す効果をもたらすことが考えられる。実際、武術における身体操作法では、ある動作を実行する際に、働いてほしくないが働いてしまいがちな身体の動きを妨げて、働いてほしい身体の動きを引き出すような操作を行うことが多い。このことを考えると、垂直離陸は、通常立位バランスにおいて中心的役割を果たす足関節や股関節の屈曲伸展の動きを抑えて、それ以外の自由度の参加を促す手法である可能性が考えられる。実際、垂直離陸を行うと、通常立位条件に比べて床反力中心の左右方向の動きが大きくなるが、これは、股関節や足関節の外転・内転方向の自由度が動いていることを意味している。このような、通常と異なる自由度による身体バランスの制御が、相手にとって予測しにくい動きを生み出すものと考えられる。

このような考え方は現時点では一つの仮説にすぎないが、垂直離陸時の関節の動き方を分析することで検証可能であると考えている。

5. むすび

本研究では、「浮くように立つ」武術的立位である「垂直離陸」の機能的意味を理解することを目的として、重心動揺特性及び筋活動の解析を行った。本研究では、垂直離陸が静的安定性を崩し、動的安定性を実現する立位であり、各関節周りの筋が同時活性化していることが実験的に確認できた。素早い動き出しや高い対応力が要求される武術の立ち合いを想定すると、垂直離陸が動的立位であるという考察は幾分理にかなっていると考えられるが、考察でも検討したように、関節を堅くする効果がある拮抗筋対の同時活性化が動的立位の実現にどのように寄与しているかについてはさらなる考察が必要である。

本研究の一部は JSPS 科学研究費補助金基盤研究 (B) 18H03167 を受けて行った。この場を借りて謝意を表す。

文献

- [1] 甲野善紀, 田中聡, 身体から革命を起こす, 新潮社, 2005.
- [2] 長谷公隆, “立位姿勢の制御”, リハビリテーション医学, vol.48, no.6, pp. 542-553, 2006.
- [3] Duarte, M. and Sternad, D. “Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing”, *Exp Brain Res*, vol. 191, pp. 265-276, 2008.
- [4] Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E. and Goldberger, A.L., “Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series”, *Chaos*, vol. 5, pp. 82-87, 1995.
- [5] 水田,久世,青木,山田,伊藤,時田,“重心動揺に対するフラクタル解析”, *Equilibrium Res*, vol.75, pp.154-161, 2016.
- [6] 木村,横山,小田,永田,“Detrended Fluctuation Analysis (DFA) を用いて高齢者の歩調の揺らぎを測る”, *テサントスポーツ科学*, vol. 29, pp. 88-97, 2008
- [7] Amoud, H., Abadi, M., Hewson, D., et al., “Fractal time series analysis of postural stability in elderly and control subjects”, *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, vol. 4, pp. 1-12, 2007
- [8] Hausdorff, J. M., “Gait dynamics in Parkinson’s disease: Common and distinct behavior among stride length, gait variability, and fractal-like scaling”, *Chaos*, vol. 19, pp. 026113-1-026113-14, 2009.
- [9] 野村泰伸, “ヒト静止立位姿勢の神経制御モデル”, *日本神経回路学会誌*, vol. 18, no.2, pp.85-98, 2011.