

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500595

研究課題名（和文） 安静立位姿勢制御のフィードバック遅れ時間の推定方法に関する比較研究

研究課題名（英文） A comparative study on the methods for estimating the feedback delay time of spontaneous postural sway control during quite upright standing.

研究代表者

藤永 博 (FUJINAGA HIROSHI)

和歌山大学・経済学部・准教授

研究者番号：20238596

研究成果の概要（和文）：

本研究では、(1)安静立位時の足圧中心動揺（自発性動揺）の統計的な性質が非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズの境界近くにあること、(2)そのため、非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズのどちらにも適用可能な Detrended Fluctuation Analysis (DFA) が足圧中心動揺のフラクタル解析には適していることを確認した。また、DFA を用いた分析の結果等に基づき、次の可能性を示した。(1)安静立位姿勢制御では足圧中心の速度情報が位置情報より重要な意味をもつ。(2)両脚安静立位姿勢制御では左右の脚の働きに差（ラテラリティ）がある。

研究成果の概要（英文）：

The present study has confirmed that (1) the center of foot pressure (COP) fluctuations during quiet stance are near the border of fractional Brownian motions and noises (1/f fluctuations) and (2) therefore, detrended fluctuation analysis (DFA) is valid and reliable to analyze the COP position and velocity data. The COP data analyzed with DFA in this study showed that (1) the transition from persistent to anti-persistent correlations (crossover) occurs in the velocity of spontaneous postural sway, not in the position, which indicates that the control of spontaneous postural sway is mainly velocity-based; (2) the scaling exponents characterizing the correlation structure of COP velocity data provide information that may be useful to understand the functional state of the postural control system during quiet stance; and (3) laterality or the dominance of one side of the foot often exists in the control of spontaneous postural sway.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	1300,000	390,000	1,690,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：バイオメカニクス

## 1. 研究開始当初の背景

Collins and DeLuca<sup>1)</sup> は、Stabilogram Diffusion Analysis (SDA) と呼ばれる手法を用い、左右 (x) 方向あるいは前後 (y) 方向の足圧中心移動二乗平均  $\langle \Delta x^2 \rangle$  と測定時間間隔  $\Delta t$  の関係を調べた。図1はその関係を示したものである。彼らは、 $\langle \Delta x^2 \rangle$  と  $\Delta t$  の関係は傾きが異なる2本の直線で特徴づけられると主張した。個々の直線の傾きは拡散係数に相当する。2本の直線の交点は critical point (CP) と呼ばれている。

測定時間間隔は CP が発現する測定時間間隔  $\Delta t_{CP}$  によってふたつの領域に区別される (図1)。つまり、拡散係数 (直線の傾き) の大きさから、(1)  $\Delta t$  が  $\Delta t_{CP}$  より小さい領域では足圧中心の動きはランダムな傾向が強く、(2)  $\Delta t$  が  $\Delta t_{CP}$  より大きい領域では足圧中心の動きはより効果的な負のフィードバック制御を受けると考えられている。本研究ではこの  $\Delta t_{CP}$  をフィードバック遅れ時間と呼ぶ。

安静立位姿勢制御のフィードバック遅れ時間は様々な解釈が可能であるが、制御系の欠陥を意味するものではない。直立姿勢の制御に関与する系の抑制機能、すなわち微小なゆらぎに対する過剰な反応を抑制する機能、あるいは自発性姿勢動揺 (生理的なゆらぎ) を許容する「機能的遊び」を反映すると解釈するのが自然である。

フィードバックの遅れ時間は、標準的な重心動揺検査項目である足圧中心の移動速度や移動面積などでは説明できない立位姿勢制御系の機能特性の指標として注目を集めており、視覚情報<sup>3)</sup>、年齢<sup>4)</sup>、一時的な身体運動<sup>5)</sup>などがその値に及ぼす影響について報告されている。今後、様々な静的バランス課題を遂行しているときのフィードバックの遅れ時間や、継続的な身体トレーニングなどの影響を調べる研究が望まれる。

Collins and DeLuca<sup>1)</sup> の報告では、CP は平均約 1 秒の測定時間間隔  $\Delta t$  で現れる。この値は、一般に知られている姿勢反応の遅れ時間 (システム遅れ時間) 300ms~700ms<sup>2)</sup> と比較すると幾分か大きい傾向にある。2本の回帰直線の交点から CP を推定していることがその理由のひとつと考えられる。この方法では、プロットの変化が緩やかで直線の傾きが変わる点を特定するのが困難な場合は、 $\Delta t_{CP}$  の値が実際よりも大きく算出される可能性がある。

フィードバックの遅れ時間については標準的な計算方法と呼べるものはまだ確立さ

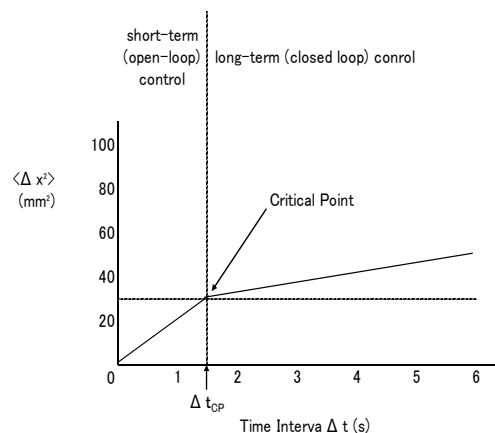


図1

れていない。計算方法の違いにより、妥当性や信頼性が問題となったり、実用性・有効性に差が生じたりする可能性があるため、一般的に利用されている時間・周波数分析や非線形解析の結果 (フラクタル次元や近似エントロピー) を考慮しながら、最も妥当な計算方法について検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は次のとおりである。

- (1) 安静立位姿勢制御のフィードバックの遅れ時間の適切な計算方法を確立し、その生理的・機能的な意味について運動制御理論、統計力学、非線形力学などの視点から考察する。
- (2) その考察を裏づけるための実験研究を実施し、さらに、それらを介入研究 (トレーニング研究) や中・長期間にわたる縦断的研究につなげ、姿勢発達と運動発達の間連について理解を深めていく。

## 3. 研究の方法

研究協力者によって提供された小学生 (学童野球選手)、大学生、高齢者 (太極拳実践者) を対象とする重心動揺検査の結果 (足圧中心動揺の時系列データ) を分析した。検査では標準的な重心動揺検査のプロトコル (日本めまい平衡学会) が用いられ、測定では足圧分布・動揺計測器 win-pod (Medicapture社) が利用された。足圧中心動揺時系列データのフラクタル解析には、モノ-マルチフラクタル解析 (株式会社 CCI) を利用した。

## 4. 研究成果

本研究でのデータ分析の結果および最新の研究報告のレビューをもとに、安静立位姿勢制御のフィードバックの遅れ時間の推定

方法として最も適切と考えられる標準的な手法を特定した。しかし、重心動揺検査（足圧中心動揺検査）の根本に関わる2つの問題が明らかになり、本研究は目的を一部修正して実施した。

足圧中心動揺検査の根本に関わる2つの問題とは、安静立位姿勢制御における足圧中心位置および足圧中心変位（速度）の相対的重要度と両脚立位姿勢制御における左右の脚の働きの差（ラテラルリティ）である。前者は本研究のデータ分析および他の研究者の最新の研究報告<sup>6)</sup>によって示唆された。後者は本研究のデータ分析の過程で明らかになった。

本報告書では、上記の3点について、すなわち、①安静立位姿勢制御のフィードバックの遅れ時間の推定方法として最も適切と考えられる標準的な手法、②安静立位姿勢制御では足圧中心の速度情報がより重要な意味をもつという仮説、③安静立位姿勢制御におけるラテラルリティについて報告する。

(1) フィードバックの遅れ時間の最も適切な標準的な手法

安静立位時の足圧中心動揺（自発性動揺）は統計的な性質が非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズの境界近くにある（図2）。

非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズは統計的的自己相似性を有し、同じハースト数をもつ。非整数ブラウン運動は非定常で拡散性を持ち、動揺量はいわゆる「べき則」に従う。一方、非整数ガウスノイズは定常で、拡散性はない。フラクタル時系列解析の方法

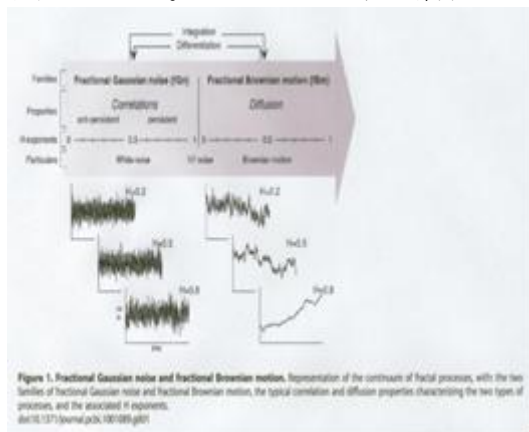


図2 非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズ  
Delignières, D., Torre, K., and Bernard, P. (2011), Transition from persistent and anti-persistent correlations in postural sway indicates velocity-based control. *PLoS Computational Biology*, 7(2): 1-10 (published online)から引用。

には非整数ガウスノイズにのみ適用可能な方法もあれば、非整数ブラウン運動にのみ適用可能な方法もある。分析の際は時系列の性

質に合った適切な方法を利用する必要がある。

実験で得られた足圧中心動揺の時系列データが非整数ガウスノイズであるか、非整数ブラウン運動であるかをパワースペクトル密度関数だけで正確に判定することは困難であり、フーリエ解析とフラクタル時系列解析の併用が推奨されている。Detrended Fluctuation Analysis (DFA) は非整数ブラウン運動と非整数ガウスノイズのどちらにも適用可能で、足圧中心動揺のフラクタル解析には適しているといえる。

DFA は、SDA 同様、足圧中心の動揺量と時間スケールの関係から足圧中心動揺のフラクタル性を調べるが、SDA は動揺量として足圧中心の平均二乗変位を、DFA は積分時系列の局所トレンドからの平均二乗偏差の平方根を用いる。DFA がトレンドを除いた総動揺量を分析するのに対して、SDA はある時間間隔で測定される足圧中心変位（移動距離）、すなわち動揺の速さを分析する。

DFA のスケーリング指数  $\alpha$  は次のように解釈される<sup>8)</sup>。

- ①  $0 < \alpha < 0.5$  のとき、 $y(t)$  は反持続性相関をもつ。負の自己相関をもつため、過去に起きた変動とは逆向きの変動が未来で起こる可能性が高くなる。
- ②  $\alpha = 0.5$  のとき、 $y(t)$  には自己相関はなく、ホワイトノイズである。
- ③  $0.5 < \alpha < 1.0$  のとき、 $y(t)$  は持続性相関をもつ。正の自己相関をもつため、過去に起きた変動と同じ向きの変動が未来で起こる可能性が高くなる。
- ④  $\alpha = 1.0$  のとき、 $y(t)$  は  $1/f$  のゆらぎ（ピンクノイズ）となる。
- ⑤  $\alpha > 1.0$  のとき、 $y(t)$  には自己相関性はあるが、 $\alpha$  値とともにフラクタル性は消失する。
- ⑥  $\alpha = 1.5$  のとき、 $y(t)$  はブラウン運動（ブラウンノイズ）である。

(2) 安静立位姿勢制御における足圧中心位置および足圧中心変位（速度）の相対的重要度

Delignières ら<sup>6)</sup> は 26 名の男性 ( $19.3 \pm 2.1$  歳) の安静立位時の足圧中心動揺を SDA と DFA を用いて分析した。彼らの報告によると、足圧中心位置の時系列データを SDA で分析するとクロスオーバーが現れたが、DFA を用いて分析すると全時間スケール領域で  $1 \leq \alpha \leq 1.5$  となり、クロスオーバーは現れなかった。また、足圧中心動揺の階差時系列データ（速度データ）を DFA で分析するとクロスオーバーが現れた。前後方向の速度データでは短時間スケールの  $\alpha$  値は 1.00 (SD=0.17)、長時間スケール領域の  $\alpha$  値は 0.43 (SD=0.12)、左右方向の速度データでは、短時間スケール領域

の  $\alpha$  値は 1.17 (SD=0.12)、長時間スケールの  $\alpha$  値は 0.23 (SD=0.12) であった。

これらの結果から次の点が指摘された。① 足圧中心動揺は長期相関（持続性相関）の弱い非整数ブラウン運動であるのに対して、足圧中心変位（動揺速度）は非整数ガウスノイズで、持続性相関から反持続性相関へクロスオーバーする時間スケールが存在する。② 安静時の立位姿勢は足圧中心の位置ではなく、速度の情報に基づいて制御されている。立位姿勢制御における速度情報の重要性は他の研究者からも報告されている<sup>7)</sup>。

同様の結果が本研究でも示された。本研究で分析したデータ（総被検者数 67 名）の代表的な例を図 3 から図 11 に示す。この例では、前後方向の COP 動揺の  $\alpha$  値は、全時間スケール領域で  $\alpha \approx 1.40$ 、短時間スケール領域で  $\alpha \approx 1.54$ 、長時間スケール領域で  $\alpha \approx 1.01$  で、クロスオーバーの存在は確認できない（図 8）。一方、前後方向の COP 速度の  $\alpha$  値は、全時間スケール領域で  $\alpha \approx 0.78$ 、短時間スケール領域で  $\alpha \approx 0.92$ 、長時間スケール領域で  $\alpha \approx 0.33$  で、反持続性相関へのクロスオーバーが顕著である（図 9）。

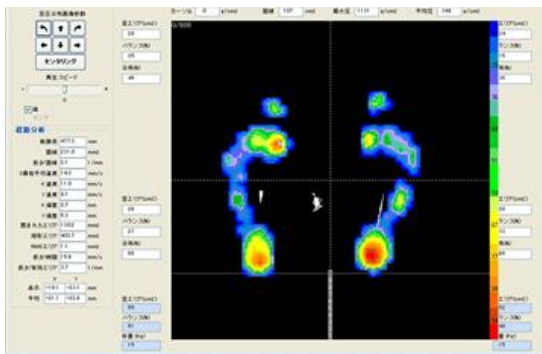


図 3 ラテラルリティを示唆する足圧中心画像

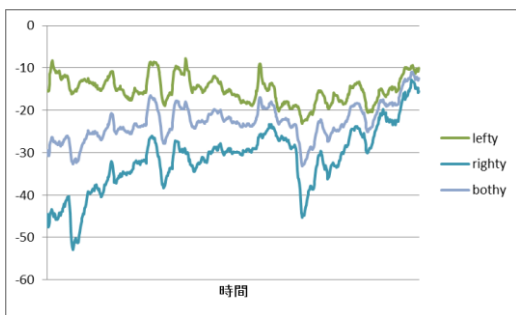


図 4 前後方向の動揺（上から順に左足、両足の平均、右足の前後方向を示す）。

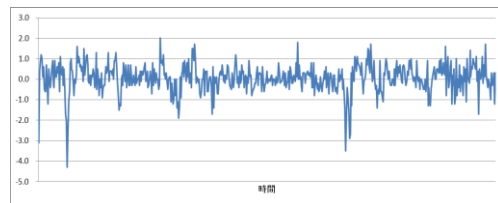
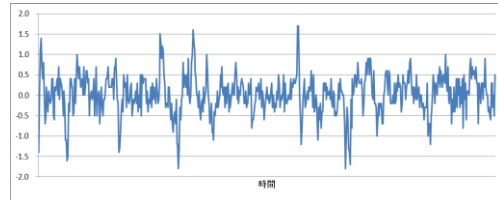
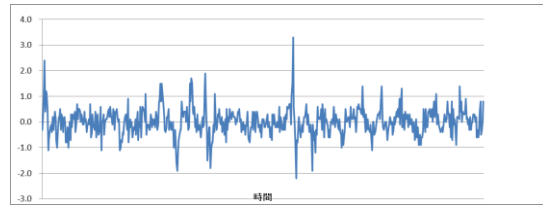


図 5 前後方向の動揺速度変化（30 秒間）（上から順に左足、両足の平均、右足を示す）。

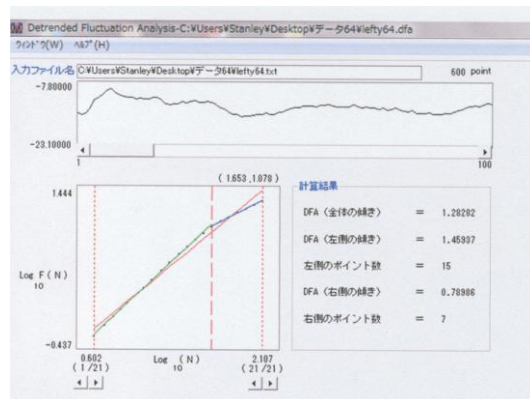


図 6 COP 前後方向動揺の Detrended Fluctuation Analysis (左足)

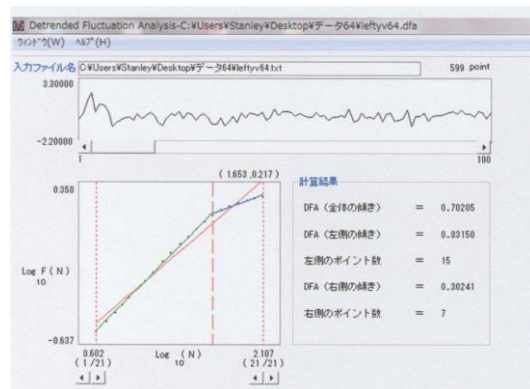


図 7 COP 前後方向速度の Detrended Fluctuation Analysis (左足)

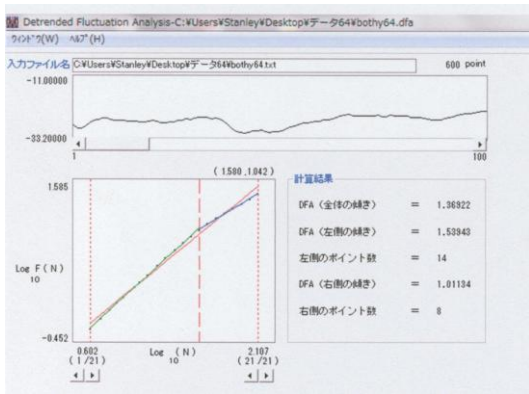


図8 COP 前後方向動揺の Detrended Fluctuation Analysis (両足の平均)

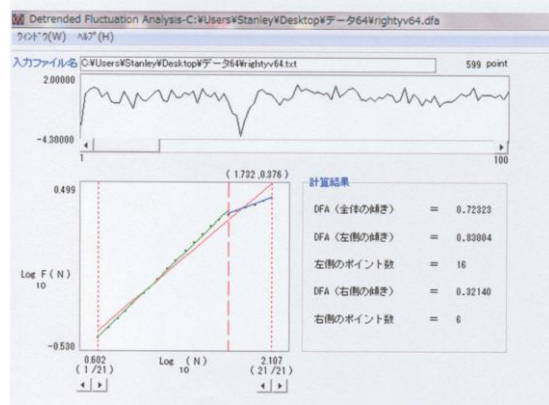


図11 COP 前後方向速度の Detrended Fluctuation Analysis (右足)

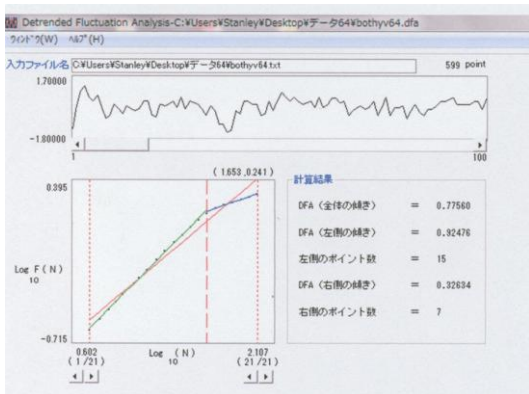


図9 COP 前後方向速度の Detrended Fluctuation Analysis (両足の平均)

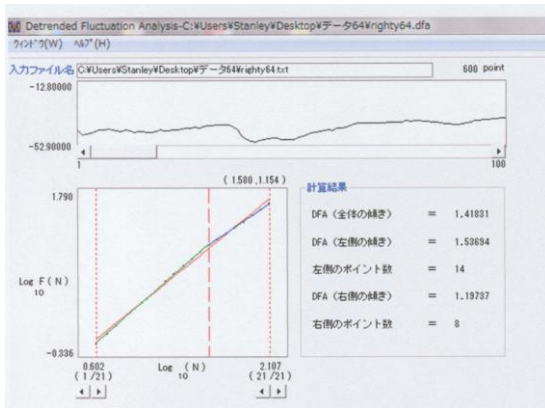


図10 COP 前後方向動揺の Detrended Fluctuation Analysis (右足)

### (3) 両脚安静立位姿勢制御におけるラテラルリティ

COP 動揺および速度の左右差 (ラテラルリティ) は、前節の例などから明らかになった (COP の軌跡 (図 3)、COP の軌跡の拡散性 (図 4)、COP の位置および速度変化のフラクタル性 (図 5-図 11))。

小学 5 年生男子 67 名を対象に実施された足圧中心動揺検査の結果から、足圧中心の前後方向動揺の変位 (速度) について、パワースペクトル密度関数と自己相関係数および交差相関係数を計算した。スペクトル分析の結果、左右どちらの足の圧中心動揺にも周期性は認められなかった。相関分析では、被験者を左右の圧中心動揺に比較的強い同調傾向があるグループと同調傾向がないグループに分類した。同調傾向がないグループでは自己相関係数に左右差が認められ、両脚立位姿勢において、前後方向の動揺に関与するフィードバック制御にラテラルリティが存在する可能性が示唆された。自己相関係数とラグの関係からもフィードバック遅れ時間の推定が可能になると考えられるが、ラテラルリティの存在を考慮する必要がある。

### (4) 今後の課題

安静立位時の足圧中心動揺は、適当な時間スケール領域では非整数ブラウン運動となる。健康な成人では  $1/f$  のゆらぎ ( $\alpha=1$ ) に近いが、立ち方、年齢、健康状態、トレーニング、身体の不活動化などの影響により拡散性や相関構造は変化する。こうした変化は、SDA の拡散係数や DFA のスケーリング指数  $\alpha$  (自己相似パラメータ  $H$ )、あるいは持続性相関から反持続性相関へ移行するクロスオーバー・ポイント (フィードバック遅れ時間) などに反映されると考えられる。

フィードバック遅れ時間は、適切に管理された条件下で測定されたデータの分析に基づくさらなる検証が必要である。安静立位時の自発性動揺に見られるゆらぎは、足圧中心

に作用するゆらぎ力、粘弾性抵抗力（動揺速度情報に基づくネガティブ・フィードバック効果）、身体重心の慣性の影響を受ける。これらの要素の一部を統制する実験研究や今回実施できなかった介入研究を行うことにより、フィードバック遅れ時間の生理学的解釈が可能となり、自発性動揺の制御原理の理解が深まると考えられる。

DFAを用いてクロスオーバー・ポイント（フィードバック遅れ時間）を推定する際、それをどう定義するべきか、足圧中心の位置データから推定するべきか、速度（階差時系列）データから推定するべきか、さらなる検討が必要である。これらが今後の課題である。

#### <参考文献>

- 1) Collins and De Luca (1993), Open-loop and closed-loop control of posture: A random-walk analysis of center-of-pressure trajectories, *Experimental Brain Research* 95: 308-318.
- 2) 大平 徹、ノイズと遅れの数理、共立出版、2006、p. 114. Ohira and Yamane (1995), Delayed random walks, *Physical Review E* 52: 3277-3280.
- 3) Collins and De Luca (1995), The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms, *Experimental Brain Research* 103: 151-163.
- 4) Collins et al. (1995). Age-related changes in open-loop and closed-loop postural control mechanisms, *Experimental Brain Research* 104: 480-492.
- 5) Moore, Korff, and Kinzey (2005). Acute effects of a single bout of resistance exercise on postural control in elderly persons. *Perceptual and Motor Skills* 100: 725-733.
- 6) Delignières, D., Torre, K., and Bernard, P. (2011), Transition from persistent and anti-persistent correlations in postural sway indicates velocity-based control, *PloS Computational Biology*, 7(2): 1-10 (published online).
- 7) Jeka, J., Kiemel, T., Creath, R., Horak, F., and Peterka, R. (2004), Controlling human upright posture: velocity information is more accurate than position or acceleration. *Journal of Neurophysiology*, 92(4): 2368-2379.
- 8) Peng, C. -K., Havlin, S., Stanley, H. E., and Goldberger, A. L. (1995), Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series.

Chaos, 5(1): 82-87.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 藤永 博、自発性立位姿勢動揺のフラクタル性に関する考察—自己相関のクロスオーバーと遅れフィードバック制御について—、彦根論叢、滋賀大学経済学会、査読無、No. 391、2012、pp. 54-64.
- ② 天野勝弘、高橋 進、加曾利正美、水野雅章、藤永 博、学童野球選手のメディカルチェックの進め方について、日本発育発達学会第9回大会記録集、査読無、2011、pp. 286-289.
- ③ 藤永 博、安静立位姿勢制御のフィードバック遅れ時間の推定—ラテラルティの考慮の必要性—、研究年報—和歌山大学経済学部60周年記念論文集、和歌山大学経済学会、査読無、第14号、2010、pp. 629-637.

[学会発表] (計8件)

- ① 藤永 博、自発性立位姿勢動揺と1/fゆらぎ、日本養生学会第13回大会（ようせいフォーラム2012）、2012年3月18日、東京理科大学.
- ② 三浦孝仁、藤原靖真、片山敬子、天野勝弘、藤永博、武田優香里、キネシオテープ貼付が単脚直立重心動揺に及ぼす影響、第4回キネシオテーピング療法学会（キネシオテーピング協会）、2011年11月5日、東京海洋大学.
- ③ 天野勝弘、藤永 博、太極拳の実践履歴が立位機能に及ぼす影響—中高年への運動介入のあり方についての考察—、日本体育学会第62回大会、2011年9月26日、鹿屋体育大学.
- ④ 天野勝弘、船渡和男、藤永 博、圧力中心動揺と運動能力との関係からとらえた幼稚園児の立位姿勢の評価、日本体育学会第61回大会、2010年9月10日、中京大学豊田キャンパス.
- ⑤ 笹田祐典、新宅幸憲、石井信子、土岡大介、和田匡史、小楠和典、藤永 博、臼井永男、立位姿勢における重心動揺、運動能力、足底面の関連性について—一般学生を対象として—、日本体育学会第61回大会、2010年9月10日、中京大学豊田キャンパス.
- ⑥ 藤永 博、天野勝弘、船渡和男、安静立位時の左右の足の圧中心動揺について—前後方向動揺の差分スペクトル解析および自己・交差相関分析の結果、日本発育発達学会第8回大会、2010年3月

28日、山梨大学甲府キャンパス。

- ⑦ 藤永 博、安静立位時の左右の足の圧中心動揺について、第24回身体動作学研究会、2009年12月25日、日本体育大学深沢キャンパス。
- ⑧ 藤永 博、天野勝弘、高橋 進、船渡和男、子どもの安静立位時足圧中心動揺パターンの分類について—左右の足の圧中心動揺の違いに着目して—、日本体育学会第60回大会、2009年8月26日、広島大学東広島キャンパス。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤永 博 (FUJINAGA HIROSHI)  
和歌山大学・経済学部・准教授  
研究者番号：20238596

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし