

競漕選手による漕周期の長期相関と $1/f$ 型揺らぎ

Long-range correlations and $1/f$ -type fluctuation of the rowing cycle by trained rowers

平川 武仁

Takehito HIRAKAWA

Abstract

This study examined the variability and fluctuation in the rowing cycle for trained rowers. The participants rowed at 90, 100, and 110% of their preferred rowing rate over 256 cycles on a rowing ergometer. Analogue force data of pulling of the handle by nine varsity rowers (two females, seven males) were recorded. The stroke-interval time-series during rowing was extracted from the data. To determine the indices of variability and fluctuation for their rowing, detrended fluctuation analysis (DFA), power spectrum density (PSD) analysis, and a variance-time plot (VTP) method were used for the time-series data. The results showed that 1) the average preferred stroke rate was significantly different and 2) the DFA, PSD analysis, and VTP method results exhibited long-range correlations for all rowing rates. However, the averaged exponents calculated from these analyses were not significantly different among the rowing rates, suggesting that rowers row with variability and fluctuation to organize the dynamical degrees of freedom for specific spatiotemporal rowing patterns. Furthermore, this study provides the possibility of how nonlinear dynamical systems tools can be used to examine rowing cycles.

Keywords: time-series data, motor control, nonlinear dynamics

1 序論

1.1 人間の動作の変動

スポーツに限らず、人間が運動する際に生成される動作は、同一の動作パターンに見えても、僅かながらでも変動性 (Variability) をもっている (Miyazaki, Kadota, Kudo, Masani, and Ohtsuki, 2001)。仮に、この変動性に構造が存在するならば、人間の運動も非線形の産物である (Latash, 2008)。これは人間の身体が、おおよそ 100 個の関節、その 10 倍の 1000 個の筋で構成され (平川, 2012; Turvey, Fitch, and Tuller, 1982)、身体の動作を制御 (すなわち運動制御) するためには、こ

の数の組み合わせ、つまりこの数の自由度を制御しなければならず (Bernstein, 1967), 試行毎の微少な組み合わせの違いが変動を生じる原因になっている (Tuller, Fitch, and Turvey, 1982) からである。実際に複雑性を有する系 (System) では, この数は要素と捉えられ, その組み合わせの不定数の中で組織化されなければならない (Demos, Chaffin, and Kant, 2014)。人間の運動制御研究では, この不定数は自由度問題 (Turvey, 1990) と言われ, 変動性の一因として考えられている。このような変動を含んだ複雑な人間の動作を解析するため, 運動心理学あるいはスポーツ心理学では, 人間の内的な機構を計算機に模した情報処理アプローチ (例えば, Schmidt and Lee, 2013), 知覚と行為の結合性を強調する生態学的アプローチ (例えば, Warren, 2006), そして非線形力学系理論に依拠した力学系アプローチ (例えば, Kelso, 1995) によって取り組まれてきた (詳細は, 平川, 2013 を参照)。

これら3つのアプローチのうち, 人間の動作の変動の取り扱いについては, 大きく分けて, 情報処理アプローチと力学系アプローチの2つの立場に分かれる。情報処理アプローチの考え方では, 変動はその平均値付近で変動する分布, 例えば正規分布またはガウス分布といった確率分布, あるいは一様分布となる白色ノイズを前提としている。つまり, 周期的な連続運動では, 動作を一定のパターン化したものとして捉えるため, 平均軌道を求めて, 変動はその平均軌道付近の確率分布などに収まる, ということが仮定されている。これは, 動作の変動が神経-筋系に内在するノイズによって生じると考えるからである。一方, 力学系アプローチでは, 変動はノイズとして捉えず, 変動の大きさよりも, 変動の構造に着目する (工藤, 2004)。本研究では力学系アプローチの立場をとり, 人間の動作の振る舞いを記述するために発展してきた構想と数学的解析方法をスポーツの解析に援用する。

1.2 漕艇競技

本研究では, スポーツにおける運動制御の変動性に着目するため, 周期的な連続運動として漕艇競技 (以下, 競漕とする) を取り上げる。そこでは, 漕手による運動, いわゆる漕動作から生成される変動性を解析する。漕動作の特徴は, キャッチからフィニッシュまでのドライブと呼ばれる局面と, フィニッシュからキャッチに至るリカバリと呼ばれる局面で構成される。キャッチは, 脚を屈曲させながら身体を艇の船尾方向に移動させ, オールのパドル部分を水面に入れて水を掻き始める瞬間である (キャッチの身体状態は図 1B)。フィニッシュは, キャッチ後に脚を伸展させながら船首方向にシートを移動させ, 上体を後傾させながら, 上肢でオールを引き終わる瞬間であり, パドルは水上に上げられている (フィニッシュの身体状態は図 1A)。これらの2つの瞬間で区切られる2つの局面 (ドライブとリカバリ) を, 総じてストロークと呼ぶ (Janshen, Mattes, and Tidow, 2009)。

先行研究では, 艇を進めるためには, オールを引くフォース (Force) が重要であるため, ローイング・エルゴメータ (以下, エルゴとする) の漕動作のハンドル速度とフォースの関係 (Sprague, Martin, Davidson, and Farrar, 2007), フォースの出力に関係するハンドル速度 (平川・山本, 2011a) やその定時的安定性 (平川, 2014b), ハンドル速度と体幹やシート速度の協応 (平川, 2014a) などが検討されてきた。しかしながら, 前述のように, 人間の動作に変動性が混在していることを勘案すると, 漕動作のようなスポーツの技能を解析する際にも, 変動性を分散や標準偏差などの指標で定量化するだけでなく, その構造を明らかにすることも必要であると考えられる。これまでにも, 変動性を解析した研究には, 揺らぎ (Fluctuation) 特性を踏まえた解析などが

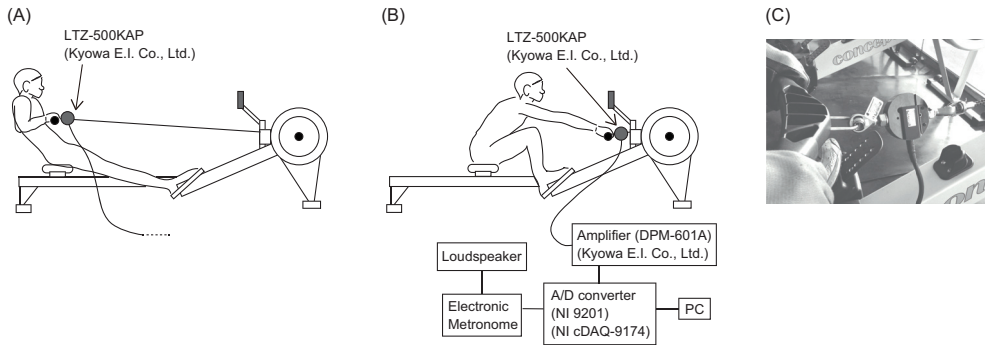


図1 フィニッシュ (A) とキャッチ (B) の瞬間と測定機器の構成 (B), および牽引型センサ (LTZ-500KA-P, 共和電業) の接続方法 (C)

ある。それらには、変動性と速度や運動頻度、あるいは周期時間に依存した変化として、人間の歩行 (Jordan, Challis, and Newell, 2007), ランニング (Jordan, Challis, and Newell, 2006), タッピング (Kadota, Kudo, and Ohtsuki, 2004) などがある (詳細は、次節で解説する)。また十分にトレーニングした長距離走者のランニング運動でも、揺らぎ特性が存在すること (Nakayama, Kudo, and Ohtsuki, 2010) が報告されている。歩行やランニングのペースを構成するステップ時間などは、競漕のペース再生あるいは艇速の維持のためのストローク間隔の時間変化に相当する。そのため、ストローク間隔の時間変化に変動性あるいは揺らぎ特性が存在すると推測される。そこで、本研究では、競漕選手が生成する連続的なストローク間隔の変動性に、どのような構造があるかを明らかにしていく。

1.3 変動性の解析

前述のように、不定数の組み合わせ (自由度問題) によって構成される人間の運動は複雑系 (Complex system) とみなされる。その振る舞いは、自由度問題を解決するための要素の相互作用やその相互作用の変化の経過であるその文脈によって構成される制約の産物 (Strogatz, 1994) である。過去には、複雑系の振る舞いを解くことは困難でもあったが、まず空間的な解析によって、その扉は開かれた。初期の代表的な研究には、英国の海岸線のランダムな構造に規則性があることを記述したものがある。その規則性を明らかにするために、Mandelbrot (1967, 1982) が、自己相似構造、いわゆるフラクタル解析を適用した。その研究では、海岸線の様々な縮尺に自己相似性があることを実証した。この自己相似性こそが規則性であり、複雑系の特徴的な構造でもある。自己相似性とは、幾何学的な図形あるいは模様、時間経過に伴う時間間隔などのデータにおいて、データの細部を拡大してみると大きな尺度でみた形状と一致していること、つまり部分と全体が相似する構造をもつこと、を意味する。また、データの一部の揺らぎがデータ全体の揺らぎと相似構造をもつことも一定の規則と言え、後述の $1/f$ 型揺らぎと呼ばれる現象でもある。本研究では、ストローク間隔を解析するために、この解析方法に依拠し、時間的な自己相似構造に注目する。

時系列データの自己相似性を明らかにするための解析方法は種々ある。例えば、系の振る舞いが、位相空間中にプロットされたとき、再帰定量化解析 (Recurrence quantification analysis: RQA) によって再帰状態から自己相似性を同定する (Abarbanel, 1995) ことが可能である (スポーツへの再帰定

量化解析の適用については、平川, 2014ab を参照)。また、トレンド除去揺らぎ解析 (Detrended fluctuation analysis: DFA) などは、時系列データの揺らぎの構造を定量化する (Peng, Buldyrev, Havlin, Simons, Stanley, and Goldberger, 1994) ことによって、時間間隔などの変化量の自己相似構造を解析する。本研究では、特に競漕の周期時間の変化量に混在する変動の構造に規則性、つまり自己相似性があるかどうかを検討するため、後者の解析方法を採用して検討をすすめる。

これまでも人間の様々な生理学的指標の時系列データに、自己相似性を明らかにするための 1/f 型揺らぎ解析が適用されてきた (例えば, Shelhamer, 2007)。1/f 型揺らぎは、心地よく聞くことのできる音楽が 1/f 型揺らぎの性質をもつこと (Voss and Clarke, 1975) や高速道路上の車の流量が 1/f 型揺らぎのような傾向を示すこと (Musha and Higuchi, 1976) など、物理現象の検証から研究の端を発したようである。その後、心拍 (Kobayashi and Musha, 1982; Yamamoto and Hughson, 1994)、下肢ヒラメ筋の H 反射 (Nozaki, Nakazawa, and Yamamoto, 1995)、サッカーボール運動 (Shelhamer and Joiner, 2003) などの生理学的指標、時間間隔の産出 (Madison, 2004)、外部信号とタッピングとの時間間隔の変動 (Chen, Ding, and Kelso, 1997, 2001; Ding, Chen, and Kelso, 2002; Kadota et al., 2004; Pressing and Jolley-Rogers, 1997)、上肢の到達運動の時空間的変動 (Miyazaki et al., 2001)、自己ペースタッピング (Yamada, 1995; Yoshinaga, Miyazima, and Mitake, 2000)、姿勢動揺 (Duarte and Zatsiorsky, 2001)、歩行 (Hausdorff, Peng, Ladin, Wei, and Goldberger, 1995)、ランニング (Nakayama et al., 2010) など、物理現象から人間の生理学的指標、そして人間の運動行動へ解析対象が拡張された。これらの研究は人間の運動行動における長期の時間依存揺らぎの根底にある機構に新たな洞察を提供してきた (Kadota et al., 2004)。

1.4 非線形時系列解析

本研究では、非線形時系列解析のうち、3つの解析方法を適用していく。その理由として、Delignières, Torre, and Lemoine (2009) や Kadota et al. (2004) のように、時系列データにおける長期相関の正確な評価を得るために、時間領域で DFA、周波数領域でパワースペクトル密度 (Power spectral density: PSD) 解析など、複数の解析手法によって検討することが妥当と考えられるからである。

まず1つ目に解説する DFA は、Peng et al. (1994) が提案した手法であり、生物学的な時系列データの解析に適用された手法である。その例として、図2に示したストローク間隔の時系列データを用いて、DFA の計算過程を概説する (詳細は、Peng et al., 1994; Peng, Havlin, Stanley, and Goldberger, 1995 などを参照)。最初に、ストローク間隔の全てのデータ数を N として、 $y(k)$ を求める (式1)。

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [B(i) - B_{ave}] \quad (1)$$

$B(i)$ は i 番目のストローク間隔であり、 B_{ave} は平均ストローク間隔である。次に、時系列データは等しい n 個のデータ長に分割され、最小二乗法によって各データ長毎の線形近似された直線を求める。この近似直線が、各データ長毎のトレンドとなる。 $y(k)$ から各データ長毎の局所トレンド $y_n(k)$ を引き、二乗平均平方根 $F(n)$ を計算する (式2)。この手続きを繰り返し、様々なデータ長 n と $F(n)$ を両対数として、その関係を求める。

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

この関係で線形近似された直線の傾きをスケーリング指数 α とする。この指数 α (Kadota et al., 2004) は、 $0 < \alpha < 0.5$ のとき、 $y(k)$ は短期相関であることを示し、 $\alpha = 0.5$ のとき、 $y(k)$ は自己相関はなく、不規則に上下に振動する白色雑音であり、 $0.5 < \alpha < 1.0$ のとき、 $y(k)$ は長期相関であることを示す。また、 $\alpha = 1.0$ のとき、 $y(k)$ は $1/f$ 揺らぎと呼ばれるピンクノイズであり、 $\alpha > 1.0$ のとき、 $y(k)$ は自己相関はあるが冪状則は消失する。長期相関とは、ある時点のストローク間隔が、遠く離れた時点のストローク間隔に関係していることを意味する。

次に、PSD 解析によるスケーリング指数の計算方法である。PSD 解析による推定では、横軸に周波数、縦軸にその PSD を両対数として配置することで、時系列の系列相関特性を記述する (Chen et al., 1997, 2001; Ding et al., 2002; Pressing and Jolley-Rogers, 1997)。DFA と同様に、この関係に線形近似された直線の傾きを求めるが、そのスケーリング指数は β とされている。仮に、時系列が系列相関をもつとき、PSD は両対数尺度上での周波数に対する比率で減少する (Kadota et al., 2004)。この指数 β と α の関係は、理論的に、無限長の時系列では、 $\alpha = (\beta + 1)/2$ である (Kadota et al., 2004)。 $\beta = 0$ のとき、時系列は白色ノイズ、 $\beta > 0$ のとき、時系列は長期相関である。 β が大きくなればなるほど、強い長期相関を示唆し、 $\beta < 0$ のとき、時系列は急激な局所揺らぎと判断される。

最後に、分散-時間配置 (Variance-time plot: VTP) 法である (詳細は、馬杉, 2013 を参照)。ストローク間隔の時系列データを $x(i)$ とする ($i = 1, 2, \dots, N$)。全データ N に対して、大きさ m 個のボックスを設定し、各ボックスの平均値を新たな時系列データとする (式 3)。

$$x(k)^{(m)} = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} x(i) \quad (3)$$

つまり、ここでは $N = km$ とする。 $x(i)$ が自己相似であるならば、

$$\text{var}(x(k)^{(m)}) \rightarrow \frac{\text{var}(x)}{m^\beta} \quad (m \rightarrow \infty) \quad (4)$$

$$\rho(k)^{(m)} \rightarrow \rho(k) \quad (m \rightarrow \infty) \quad (5)$$

x と $x^{(m)}$ の自己相関関数として ρ と $\rho^{(m)}$ を設計できる。 β は定数である。これは、自己相似性の定義に基づく。実際には、 m と $\text{var}(x(k)^{(m)})$ との関係として、両変数を両対数として配置する。DFA、PSD 解析と同様に、この関係に線形近似された直線の傾きを求め、その指数は式 (4) により $-\beta$ となる。そして、時系列データのばらつきが冪状則 $y = a^x$ となると、時系列データとの関係でハースト指数 H を仮定できる (式 6)。

$$|x(n+\tau) - x(n)| \sim \tau^H \quad (6)$$

この指数は $H = 1 - \beta/2$ で得られ、 $0.5 < H < 1$ の範囲内で指数の値が高いほど、時系列データが長期相関であることを示す。

1.5 目的

本研究では、スポーツにおける人間の運動制御の変動性、特に変動性の構造としての自己相似性の有無、つまり $1/f$ 型揺らぎあるいは長期相関の有無を解析するため、その解析方法である非線形

時系列解析を用いて検討する。本研究の目的は、非連続的な運動あるいは連続的な運動など様々な運動が存在するスポーツの中でも、周期的な連続運動として代表的な種目の1つである漕艇競技に着目し、周期時間の変化量の時間経過が自己相似性、つまりストローク間隔の変化量の時間経過が1/f型揺らぎのような規則性をもつかどうかを検証することであった。

2 方法

2.1 測定参加者および手続き

測定参加者（以下、参加者とする）は、競漕を専門とする9名の健康な大学生（以下、漕手とする。男7名、女2名。年齢： 20.1 ± 0.9 歳、身長： 167.9 ± 6.1 cm、体重： 60.3 ± 6.9 kg）であり、2014年に測定が実施された。彼らは測定に参加する前に、測定者から測定内容について十分な説明を受け、同意してから測定に参加した。本研究は、南山大学研究審査委員会において承認された手続きに基づいて実施された。

2.2 データ収集

測定では、世界で最も共通して用いられているエルゴ（Mikulić, Smoljanović, Bojanić, Hannafin, and Pedišić, 2009）である Concept II（Concept 2 Inc., Morrisville, VT）を用いた。まず、各参加者は、30～60分間で快適に漕ぐことのできるストロークレート（Stroke rate: 1分間のストローク頻度）を決めた。そのレートを至適レート（% Preferred Stroke Rate: %PSR）100%として、90%と110%の計3種のレートで、270ストローク漕ぐことを求められた。3種のストローク頻度の試技順は、参加者が任意で決定した。各試技においては、各参加者が事前に決めたストローク頻度になったと判断した後に、データ収集が開始された。いずれの参加者においても、おおよそ10～20ストローク漕いだ後に、270ストロークのデータ収集が開始された。収集するデータは、ハンドルの牽引力のアナログデータであり、ストレインゲージ式引張型センサ（LTZ-500KA-P、共和電業）によって採取された（図1BC）。その力は、ストレインアンプ（DPM-601A）とA/D変換器（NI9201, cDAQ-9174）を介してデジタル変換され、コンピュータに保存された（サンプリングレート250Hz）。漕運動中には、漕手が決められたレートで漕ぐように、電子メトロノームによる聴覚指示と、PM3モニタ（Concept 2 Inc., Morrisville, VT）によるレートの視覚フィードバックが与えられた。

2.3 統計解析

まず、採取されたアナログデータは、2次のバターワース・ローパス・フィルタによって、遮断周波数100Hzで平滑化された。次に、得られたアナログデータの11ストローク目から256ストロークが抽出された。そして、参加者毎に抽出されたデータにおける各ストロークの牽引力の最大値（256個のデータ）を平均し、その5%を超えた時点を各参加者の各ストロークの開始時点とした。各参加者の各試技における各ストロークの開始時点の時間間隔をストローク間隔の時系列データとした（図2A）。そのデータから、DFAによる α 、PSD解析による β 、VTP法を適用したハースト指数 H を算出した。これらのスケーリング指数として、最小二乗法による線形近似直線を求め、その傾きが採用された。統計的検定では、至適レート（100%）およびその $\pm 10\%$ の3つのレートを

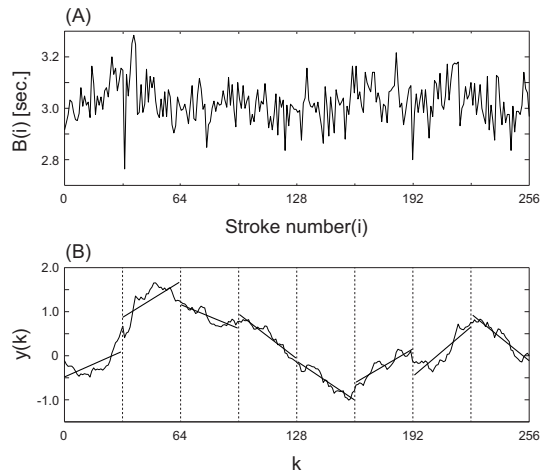


図2 データ例と局所トレンド例

(A) 256 ストロークの各ストローク間隔の時系列データ。(B) 破線の垂直線はボックスサイズ ($n=32$) を示し、実線はボックス毎に最小二乗法によって推定されたトレンド (線形近似直線) を表している。

独立変数として、レート数、 α 、 β 、 H について、1 要因 3 水準の分散分析で平均値比較された。有意差が認められた際には、Bonferroni 法で残差分析し、水準間の平均値を比較した。

3 結果

3.1 ストローク間隔

図 3 は、至適レート (100%) およびその $\pm 10\%$ の 3 つのレートを独立変数にしたときのストローク間隔の平均値およびその標準偏差を示している。分散分析の結果、条件の効果は有意であった ($F(2, 16) = 256.8, p < .01$)。Bonferroni 法を用いた多重比較によれば、90% ($3.239s \pm 0.126$) よりも 100% ($2.945s \pm 0.095$) と 110% ($2.702s \pm 0.074$) のストローク間隔が短く、100% よりも 110% のストローク間隔が短いことが認められた ($MSe = 0.003, p < .05, \alpha = 0.017, BONF = 0.063$)。この結果は、各条件のストローク間隔が有意に異なっていること、つまり別のレートで各試行が実施されていたことを示している。

3.2 トренд除去揺らぎ解析 (DFA) (指数 α)

図 4 は、各 % PSR における各参加者のストローク間隔について、DFA をした結果による全参加者の平均軌道とその線形近似直線を例示している。表 1 上段は、各 % PSR における DFA の指数 α の平均およびその標準偏差を示している。分散分析の結果、条件の効果は有意でなかった ($F(2, 16) = 1.13, p > .05$)。この結果は、各条件の変動性には差がなく、漕手がいずれのストロークレートであっても一定の変動性を持ちながら漕いでいること、指数 α は 0.632 から 0.733 であり、長期相関の判断指標 $0.5 < \alpha < 1$ の範囲内にあるため、時間経過に伴うストローク間隔の変化が長期相関をもつことを意味している。

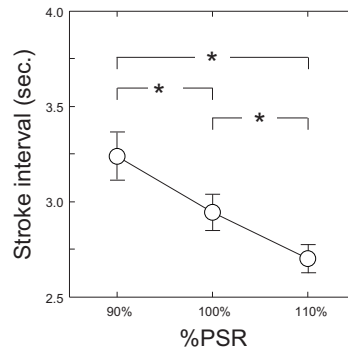


図3 至適レート (%PSR) とストローク間隔 (* : $p < .05$)

表1 至適レート毎の各指数の平均値とその標準偏差

		90%	100%	110%	$F(2, 16)$	p
<i>DFA</i> (α)	<i>M</i>	0.733	0.679	0.632	1.13	n. s.
	<i>SD</i>	0.213	0.139	0.222		
<i>PSD</i> (β)	<i>M</i>	0.567	0.276	0.316	0.93	n. s.
	<i>SD</i>	0.613	0.470	0.788		
<i>VTP</i> (H)	<i>M</i>	0.641	0.615	0.563	0.48	n. s.
	<i>SD</i>	0.214	0.132	0.246		

n. s.: $p > .05$

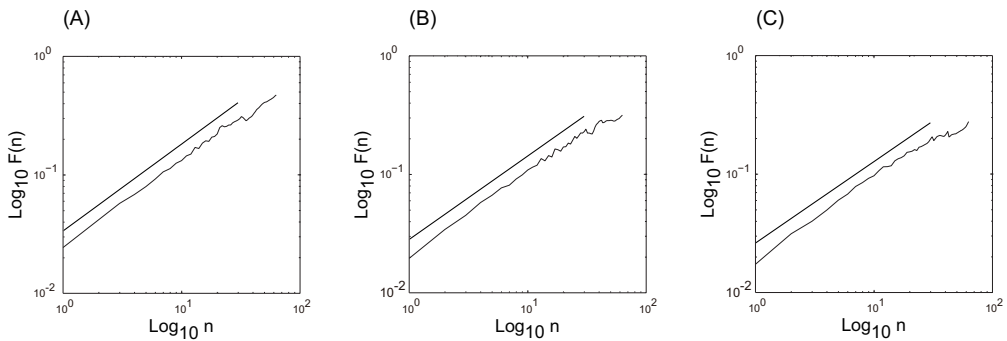


図4 *DFA* による解析結果の $F(n)$ の平均軌道と線形近似直線

至適レート (%PSR) を 100% として、その $\pm 10\%$ となるレートでの結果である。図中の直線が各条件の線形近似直線を示している。(A) が 90%、(B) が 100%、(C) が 110% の結果を示している。

3.3 パワースペクトル密度 (PSD) 解析 (指数 β)

図5は、各% PSRにおける各参加者のストローク間隔について、PSD解析をした結果による全参加者の平均軌道とその線形近似直線を例示している。表1中段は、各% PSRにおけるPSDの指数 β の平均およびその標準偏差を示している。分散分析の結果、条件の効果は有意でなかった($F(2, 16) = 0.93, p > .05$)。この結果は、各条件の変動性には差がなく、漕手がいずれのストロークレートであっても一定の変動性をもちながら漕いでいること、指数 β は0.567から0.276であり、長期相関の判断指標 $\beta > 0$ の範囲内にあるため、時間経過に伴うストローク間隔の変化が長期相関をもつことを意味している。

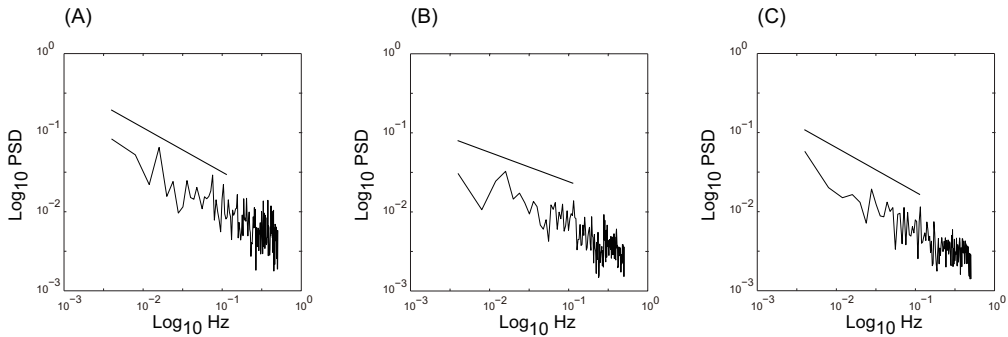


図5 PSD解析による解析結果の平均軌道と線形近似直線

至適レート (%PSR) を100%として、その $\pm 10\%$ となるレートでの結果である。図中の直線が各条件の線形近似直線を示している。(A)が90%、(B)が100%、(C)が110%の結果を示している。

3.4 分散-時間配置 (VTP) 法 (指数 H)

図6は、各% PSRにおける各参加者のストローク間隔について、VTP法をした結果による全参加者の平均軌道とその線形近似直線を例示している。表1下段は、各% PSRにおけるVTPの指数 H の平均およびその標準偏差を示している。分散分析の結果、条件の効果は有意でなかった($F(2, 16) = 0.48, p > .05$)。この結果は、各条件の変動性には差がなく、漕手がいずれのストロークレートであっても一定の変動性をもちながら漕いでいること、指数 H は0.563から0.641であり、長期相関の判断指標 $0.5 < H < 1$ の範囲内にあるため、時間経過に伴うストローク間隔の変化が長期相関をもつことを意味している。

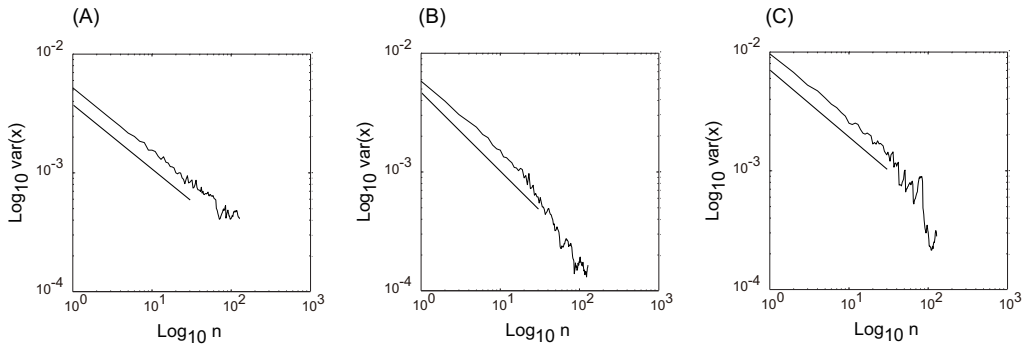


図6 VTP法による解析結果の平均軌道と線形近似直線

至適レート (%PSR) を 100% として、その $\pm 10\%$ となるレートでの結果である。図中の直線が各条件の線形近似直線を示している。(A) が 90%、(B) が 100%、(C) が 110% の結果を示している。

4 考察

本研究の目的は、周期的な連続運動である競漕を対象として、ストローク周期の時間変化量の時間経過が自己相似性、つまりストローク周期の変化量の時間経過における変動性の構造が $1/f$ 型揺らぎのような規則性をもつか否かを検証することであった。解析では、人間の運動の揺らぎ解析で有用な非線形時系列解析である DFA、PSD 解析、VTP 法を用いて検討した。

これまで、電気回路や固体物理学などの装置では、長期相関といえる $1/f^\alpha$ 型の構造が存在することが確認されてきた (Chen et al., 1997)。20 年ほど前から、生物学的データにおける多様性でも、時間経過に伴う時間変化量はランダムな分布というよりもむしろ、時間変化におけるフラクタルな特徴 (Goldberger, Rigney, and West, 1990; Nozaki et al., 1995; Yamamoto and Hughson, 1994; Yoshinaga et al., 2000) をもつことが明らかにされてきた。その後、上肢の目標志向性運動 (Miyazaki et al., 2001; Miyazaki, Nakajima, Kadota, Chitose, Ohtsuki, and Kudo, 2004)、タッピング (Delinières, Lemoine, and Torre, 2004; Delinières et al., 2009; Kadota et al., 2004; Yamada, 1995)、歩行 (Hausdorff et al., 1995; Hausdorff, Purdon, Peng, Ladin, Wei, and Goldberger, 1996; Hausdorff, Mitchell, Firtion, Peng, Cudkowicz, Wei, and Goldberger, 1997; Hausdorff, Ashkenazy, Peng, Ivanov, Stanley, and Goldberger, 2001)、ランニング (Nakayama et al., 2010) など、上肢などの身体領域の運動から全身を使った運動まで拡張され、人間の運動には物理装置などと同様の特徴があることが確認されてきた。これらの成果は、物理学的システムと神経生物学的システムにおける複雑系の実証を理論的に正当化するだけでなく、様々な自然現象において、自己相似構造によるスケールフリーの現象として存在すること (Gisiger, 2001; Rubin, Fekete, and Mujica-Parodi, 2013; Terrier, Turner, and Schutz, 2005) を意味する。これは、 $1/f^\beta$ 型揺らぎとしてもよく知られている現象でもある (Terrier and Deriaz, 2011; Torre and Wagenmakers, 2009)。このように、非線形力学系理論は、複雑系の振る舞いの中の規則性を同定し、時間発展する系である複雑系に対する解析方法も提供 (Strogatz, 1994) してきた。特に、本研究では、DFA、PSD 解析、VTP 法を用いて、漕手による漕運動のストロークの時間間隔への運動頻度 (ストロークレート) の影響を検証した。

まず本研究では、各漕手に至適ストロークレートを決定してもらい、そのレートを 100% として、

±10%を含めた3種のストロークレート(%PSR)で漕運動を実施した。いずれの%PSRにおいても、漕手が発揮した牽引力のアナログデータからストロークの時間間隔を導出し、DFA、PSD解析、VTP法の3種の非線形時系列解析を施し、得られた各スケーリング指数を用いて、%PSRを独立変数にして、統計的検定をした。その結果、いずれの%PSRにおいても長期相関が認められたが、%PSR間での差異は認められなかった。歩行のストライド間隔に関して、DFAを用いた先行研究(例えば、Hausdorff et al., 1995, 1996など)でも、統計的意味合いとして、ある時点でのストライド間隔が比較的離れた時間におけるストライド間隔と関係するという現象、いわゆる長期相関の現象が観察されてきた。また、至適ランニング速度でのストライド間隔の時系列データは、 $1/f$ 型揺らぎをもち、永続的な長期相関となっていることが確認されてきた(例えば、Jordan et al., 2006; Nakayama et al., 2010など)。そして、 $1/f^\beta$ 型揺らぎの統計的特性は、安定性と変動性とを折衷したものであり、複雑系の総体的な振る舞いを示す時系列データで一般的にみられる現象(Torre, Deligières, and Lemoine, 2007)でもある。それゆえ、 $1/f^\beta$ 型揺らぎは、人間の行動あるいは行動の振る舞いの中で実証されたとき、ランダムな揺らぎとして見なされない。つまり、その系の維持と適応における機能的な役割を果たすように現れていることを意味すると考えられる。本研究の結果はストロークの時間間隔の時系列データによるものであるが、これらのストライド間隔に関する先行研究で指摘されてきた変動性の構造を、ストロークの時間間隔も有していると考えられる。

また本研究では、いずれのスケーリング指数においても、%PSR間での差異は認められなかった。ランニングでの揺らぎへの走速度の影響に関して、至適速度でDFAの指数 α が最も低く、この α を中心としてU字となること(Jordan et al., 2006)が報告されている。一方、Nakayama et al. (2010)は、至適なランニング速度を中心として±20%の速度を含めた3種の速度で検討しているが、U字の結果は得られなかった。また、タッピング課題では、低頻度(1と1.5Hz)で短期相関になり、高頻度(2から4Hz)では $1/f^\beta$ 型の長期相関となること(Kadota et al., 2004)が報告されている。この報告は、人間のタイミング制御(本研究ではレートの維持)における動作パターンに運動頻度が影響していることを示唆している。これらの先行研究は、速度や頻度によって時系列データが長期相関・短期相関のいずれかの相関に変化すること、そしてその関数関係も異なってくることを示している。本研究は、歩行、ランニング、タッピングなどの課題と異なったストローク間隔の時系列データとはいえ、測定条件が±10%であったことを踏まえると、Nakayama et al. (2010)と同様にU字の結果にならなかった可能性がある。それゆえ、±10%よりも大きな差のあるストロークレートで測定した場合、Jordan et al. (2006)と同様にU字を示す結果となった可能性も残されている。

次に、長期相関と判断されたスケーリング指数の値に言及する。人間の連続運動における長期相関は、聴覚教示信号(Hausdorff et al., 1996)や視覚教示信号(Rhea, Kiefer, D'Andrea, Warren, and Aaron, 2014)によって低下することが報告されている。そして、Terrier et al. (2005)は、律動的な聴覚信号(メトロノーム)を与えた歩行では、運動学的な変動性は変更されないが、ストライド間隔のフラクタル特性が変化されることを報告している。これらは、聴覚教示や視覚教示が、運動制御における自己相似性やフラクタル特性を変化させることを示している。本研究では、%PSRでのレートを維持するための方法として、メトロノームによる聴覚教示、エルゴ上のモニターによる視覚フィードバックを付加的な情報として提供せざるをえなかった。これは%PSRのレートを維持するための測定における限界であるが、一方で実際に漕手がつまづ長期相関の程度を弱めている、つまり本来、漕手という系(System)が示すはずだったスケーリング指数を低下させている可能

性もある。しかしながら、このような測定の限界があっても、漕運動が長期相関をもつという結果は、総じて、漕運動が $1/f$ 型揺らぎという規則性をもつ可能性を秘めている。

最後に、漕運動の非線形性について考察する。本研究の結果は、各 %PSR で異なるストロークレートであったが、いずれの %PSR でも構造をもつ変動性、いわゆる長期相関をもって漕運動が実施されていたことを示していた。安定性と変動性を折衷した $1/f^{\beta}$ 型揺らぎの統計的特性は、筋肉、肢、脊柱、脳との相互作用だけでなく、身体の内側と外側の双方の相互作用によって達成される。本研究では、上肢と下肢、そして体幹との関係といった漕手の身体内の相互作用だけでなく、空気抵抗によって牽引力の変化を発生するエルゴと漕手との相互作用（平川, 2014a）が必要となっていた。この相互作用は、Haken (1996) によると、協働（あるいはシナジー: Synergy）と呼ばれる時間的機能的な集積を意味し、それら自体を組織化することでもある。さらに、様々な摂動への効力と合目的な振る舞いを可能にする（Bernstein, 1967; Latash, Scholz, and Schönner, 2007）ことでもある。本研究では、摂動が空気抵抗、効力がハンドル牽引、合目的な振る舞いが漕運動に該当する。つまり協働とは、これらの階層を超えた部分間あるいは同じ階層内の部分間の活動を単純に線形的に総和したものではなく、それらの相互作用の非総和的産物と考えられる。それゆえ、漕運動の運動制御も非線形であることを示唆していると考えられる。

これまで、力学系理論に依拠した非線形時系列解析は、個人内（例えば、平川, 2014ab; 平川・山本, 2011b; 平川・吉田, 2005ab）での身体的、個人間（Kijima, Kadota, Yokoyama, Okumura, Suzuki, and Yamamoto, 2012; Okumura, Kijima, Kadota, Yokoyama, Suzuki, and Yamamoto, 2012; Yamamoto, Yokoyama, Okumura, Kijima, Kadota, and Gohara, 2013）や集団内（Yamamoto and Yokoyama, 2011; Yokoyama and Yamamoto, 2011）での社会的文脈など、連続的に時間発展する過程を取り扱いながら、運動制御研究において拡張的に適用されてきた。また、本研究で援用しなかった他の非線形時系列解析（例えば、平川, 2014ab での再帰定量化解析など）によっても、人間の運動制御の時間的特性における協働現象を明らかにできる可能性も残されている。今後、H 反射におけるフラクタル相関の実証（Nozaki et al., 1995）のように、運動制御における生理学的機構を明らかにすることが、スポーツにおける運動制御の根底に存在する長期相関や $1/f$ 型揺らぎの機構を明らかにすることに繋がっていく可能性があると考えられる。

5 結論

本研究の目的は、周期的な連続運動である競漕の漕運動におけるそのストローク周期の時間変化量の時間経過が自己相似性、いわゆる $1/f$ 型揺らぎといった規則性をもつか否かを検証することであった。競漕を専門とする漕手 9 名を対象に、至適レート (%PSR) を 100% として $\pm 10\%$ の 3 種のストロークレート毎に、256 個のストローク間隔の時系列データを抽出した。得られたデータに対して、人間の運動の揺らぎ解析で有用な解析方法である非線形時系列解析、具体的にはトレンド除去揺らぎ解析 (DFA) によって指数 α 、パワースペクトラム密度 (PSD) 解析によって指数 β 、分散-時間配置 (VTP) 法によって指数 H として、各スケーリング指数を計算した。その結果、いずれの %PSR およびスケーリング指数でも長期相関が観察されたが、%PSR 間での有意な差は認められなかった。これらの結果は、漕手による漕運動においても、時間変化量の時間経過が長期相関をもつ一方で、自己相似性、いわゆる $1/f$ 型揺らぎの構造をもつ可能性も示しており、ある時

点のストローク間隔が遠く離れた時点でのストローク間隔にも関係していることを意味していると考えられる。

謝辞

本研究は、2012年度に堀科学芸術振興財団から助成を受け、実施された成果の一部である。謝辞に記して、本財団への感謝の意を表したい。

文献

- Abarbanel, H. D. I. (1995) *Analysis of Observed Chaotic Data*. NY: Springer-Verlag.
- Bernstein, N. A. (1967) *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Chen, Y., Ding, M., and Kelso, J. A. S. (1997) Long memory processes ($1/f^\alpha$ type) in human coordination. *Physical Review Letters*, 79: 4501-4504.
- Chen, Y., Ding, M., and Kelso, J. A. S. (2001) Origins of timing errors in human sensorimotor coordination. *Journal of Motor Behavior*, 33: 3-8.
- Delignières, D., Lemoine, L., and Torre, K. (2004) Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23: 87-103.
- Delignières, D., Torre, K., and Lemoine, L. (2009) Long-range correlation in synchronization and syncopation tapping: a linear phase correction model. *PLoS ONE*, 4: e7822.
- Demos, A. P., Chaffin, R., and Kant, V. (2014) Toward a dynamical theory of body movement in musical performance. *Frontiers in Psychology*, 5: 477.
- Ding, M., Chen, Y., and Kelso, J. A. S. (2002) Statistical analysis of timing errors. *Brain and Cognition*, 48: 98-106.
- Duarte, M. and Zatsiorsky, V. M. (2001) Long-range correlations in human standing. *Physics Letters A*, 283: 124-128.
- Gisiger, T. (2001) Scale invariance in biology: coincidence or footprint of a universal mechanism? *Biological Reviews*, 76: 161-209.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., and West, B. J. (1990) Chaos and fractals in human physiology. *Scientific American*, 262: 42-49.
- Haken, H. (1996) *Principles of Brain Functioning: A Synergetic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognition*. Berlin: Springer.
- Hausdorff, J. M., Ashkenazy, Y., Peng, C. K., Ivanov, P. C., Stanley, H. E., and Goldberger, A. L. (2001) When human walking becomes random walking: fractal analysis and modeling of gait rhythm fluctuations. *Physica A*, 302: 138-147.
- Hausdorff, J. M., Mitchell, S. L., Firtion, R., Peng, C. K., Cudkowicz, M. E., Wei, J. Y., and Goldberger, A. L. (1997) Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *Journal of Applied Physiology*, 82: 262-269.
- Hausdorff, J. M., Peng, C. K., Ladin, Z., Wei, J. Y., and Goldberger, A. L. (1995) Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *Journal of Applied Physiology*, 78: 349-358.
- Hausdorff, J. M., Purdon, P. L., Peng, C. K., Ladin, Z., Wei, J. Y., and Goldberger, A. L. (1996) Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations. *Journal of Applied Physiology*, 80: 1448-1457.
- 平川武仁 (2012) 自由度からみた学習段階. 中込四郎・伊藤豊彦・山本裕二(編), よくわかるスポーツ心理学. 京都: ミネルヴァ書房. pp. 58-59.

- 平川武仁 (2013) 体育・スポーツにおける運動学習の理解：力学系理論に依拠した学習ダイナミクスによるアプローチ. *アカデミア人文・自然科学編*, 5: 161-173.
- 平川武仁 (2014a) 浮動ローイング・マシンにおける 1000m タイムトライアル中のレース経過に伴う協応パターンの変化. *アカデミア人文・自然科学編*, 8: 89-112.
- 平川武仁 (2014b) ローイング・マシンにおける 1000m タイムトライアル中のハンドル速度パターンと定時的安定性の関係. *アカデミア人文・自然科学編*, 7: 69-85.
- 平川武仁・山本裕二 (2011a) ローイング・エルゴメータ 2000m タイムトライアル中の序盤と終盤における技能水準による漕パターンの異同. *アカデミア人文・自然科学編*, 2: 83-96.
- 平川武仁・山本裕二 (2011b) トレッドミルの漸増速度に伴う競歩選手の上腕と大腿, 大腿と下腿の相対位相の段階的变化. *陸上競技研究*, 85: 12-22.
- 平川武仁・吉田 茂 (2005a) 競歩における円滑な腰動作のための肩動作制約法. *陸上競技研究*, 62: 18-27.
- 平川武仁・吉田 茂 (2005b) 競歩選手における肩腰動作の位相遅延と円滑性. *スポーツ心理学研究*, 33: 1-13.
- Janshen, L., Mattes, K., and Tidow, G. (2009) Muscular coordination of the lower extremities of oarsman during ergometer rowing. *Journal of Applied Biomechanics*, 25: 156-164.
- Jordan, K., Challis, J. H., and Newell, K. M. (2006) Long-range correlations in the stride interval of running. *Gait and Posture*, 24: 120-125.
- Jordan, K., Challis, J. H., and Newell, K. M. (2007) Walking speed influences on gait cycle variability. *Gait and Posture*, 26: 128-134.
- Kadota, H., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2004) Time-series pattern changes related to movement rate in synchronized human tapping. *Neuroscience Letters*, 370: 97-101.
- Kelso, J. A. S. (1995) *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge: The MIT Press.
- Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Okumura, M., Suzuki, H., and Yamamoto, Y. (2012) Switching dynamics in an interpersonal competition brings about “deadlock” synchronization of players. *PLoS ONE*, 7: e47911.
- Kobayashi, M. and Musha, T. (1982) 1/f fluctuation of heartbeat period. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 29: 456-457.
- 工藤和俊 (2004) 運動スキル研究におけるダイナミカルシステムアプローチ. 日本スポーツ心理学会 (編) 最新スポーツ心理学—その軌跡と展望. 東京：大修館書店. pp. 175-184.
- Latash, M. L. (2008) *Synergy*. NY: Oxford University Press.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., and Schöner, G. (2007) Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, 11: 276-308.
- Mandelbrot, B. B. (1967) How long is the coast of Britain. *Science*, 156: 636-638.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. NY: Times Books.
- 馬杉正男 (2013) 信号解析-信号処理とデータ分析の基礎. 東京：森北出版株式会社. pp. 112-119.
- Mikulic, P., Smoljanović, T., Bojanić, I., Hannafin, J., and Pedišić, Ž. (2009) Does 2000-m rowing ergometer performance time correlate with final rankings at the World Junior Rowing Championship? A case study of 398 elite junior rowers. *Journal of Sports Sciences*, 27, 361-366.
- Miyazaki, M., Kadota, H., Kudo, K., Masani, K., and Ohtsuki, T. (2001) Fractal correlation of initial trajectory dynamics vanishes at the movement end point in human rapid goal-directed movements. *Neuroscience Letters*, 304: 173-176.
- Miyazaki, M., Nakajima, Y., Kadota, H., Chitose, K., Ohtsuki, T., and Kudo, K. (2004) 1/f -type fluctuation in human visuomotor transformation. *NeuroReport*, 15: 1133-1136.
- Musha, T. and Higuchi, H. (1976) The 1/f fluctuation of a traffic current on an expressway. *Japanese Journal of Applied Physics*, 15: 1271-1275.
- Nakayama, Y., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2010) Variability and fluctuation in running gait cycle of trained runners and non-runners. *Gait and Posture*, 31: 331-335.
- Nozaki, D., Nakazawa, K., and Yamamoto, Y. (1995) Fractal correlation in human H-reflex. *Experimental Brain Research*,

- 105: 402–410.
- Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Suzuki, H., and Yamamoto, Y. (2012) A critical interpersonal distance switches between two coordination modes in kendo matches. *PLoS ONE*, 7: e51877
- Peng, C. K., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H. E., and Goldberger, A. L. (1994) Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 49: 1685–1689.
- 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: 82–87.
- Pressing, J. and Jolley-Rogers, G. (1997) Spectral properties of human cognition and skill. *Biological Cybernetics*, 76: 339–347.
- Rhea, C. K., Kiefer, A. W., D’Andrea, S. E., Warren, W. H., and Aaron, R. K. (2014) Entrainment to a real time fractal visual stimulus modulates fractal gait dynamics. *Human Movement Science*, 36: 20–34.
- Rubin, D., Fekete, T., and Mujica-Parodi, L. R. (2013) Optimizing complexity measures for fMRI data: algorithm, artifact, and sensitivity. *PLoS ONE*, 8: e63448.
- Schmidt, R. A. and Lee, T. D. (2013) *Motor Learning and Performance: From Principles to Application (5th Ed.)*. Champaign: Human Kinetics.
- Shelhamer, M. (2007) *Nonlinear Dynamics in Physiology*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Shelhamer, M. and Joiner, W. M. (2003) Saccades exhibit abrupt transition between reactive and predictive: predictive saccade sequences have long-term correlations. *Journal of Neurophysiology*, 90: 2763–2769.
- Sprague, R. C., Martin, J. C., Davidson, C. J., and Farrar, R. P. (2007) Force-velocity and power-velocity relationships during maximal short-term rowing ergometry. *Medical Science and Sports Exercise*, 39: 358–64.
- Strogatz, S. (1994) *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Cambridge: Perseus Books.
- Terrier, P. and Dériaz, O. (2011) Kinematic variability, fractal dynamics and local dynamic stability of treadmill walking. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 8: 12.
- Terrier, P., Turner, V., and Schutz, Y. (2005) GPS analysis of human locomotion: further evidence for long-range correlations in stride-to-stride fluctuations of gait parameters. *Human Movement Science*, 24: 97–115.
- Torre, K., Delignières, D., and Lemoine, L. (2007) $1/f^\beta$ fluctuations in bimanual coordination: an additional challenge for modeling. *Experimental Brain Research*, 183: 225–234.
- Torre, K. and Wagenmakers, E. J. (2009) Theories and models for $1/f^\beta$ noise in human movement science. *Human Movement Science*, 28: 297–318.
- Tuller, B., Fitch, H. L., and Turvey, M. T. (1982) The Bernstein perspective: II. the concept of muscle linkage or coordinative structure. In J. A. S. Kelso (Ed.) *Human Motor Behavior: An Introduction*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publishers. pp. 253–270.
- Turvey, M. T. (1990) Coordination. *American Psychologist*, 45: 938–953.
- Turvey, M. T., Fitch, H. L., and Tuller, B. (1982) The Bernstein perspective: I. the problems of degree of freedom and context-conditioned variability. In J. A. S. Kelso (Ed.) *Human Motor Behavior: An Introduction*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publishers. pp. 239–252.
- Voss, R. F. and Clarke, J. (1975) $1/f$ noise in music and speech. *Nature*, 258: 317–318.
- Warren, W. H. (2006) The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, 113: 358–389.
- Yamada, N. (1995) Nature of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, 14: 371–384.
- Yamamoto, Y. and Hughson, R. L. (1994) On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and beta-adrenergic blockade. *American Journal of Physiology*, 266: R40–R49.
- Yamamoto, Y. and Yokoyama, K. (2011) Common and unique network dynamics in football games. *PLoS ONE*, 6: e29638.
- Yamamoto, Y., Yokoyama, K., Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., and Gohara, K. (2013) Joint action syntax in Japanese

martial arts. *PLoS ONE*, 8: e72436.

Yokoyama, K. and Yamamoto, Y. (2011) Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, 7: e1002181.

Yoshinaga, H., Miyazima, S., and Mitake, S. (2000) Fluctuation of biological rhythm in finger tapping. *Physica A*, 280: 582-586.