

動作が見せる変動構造の分析

Structure of Variability as a Focus of Movement Analysis

野中 哲士

神戸大学大学院人間発達環境学研究所

【要 旨】

私たちの日常行為が生起する場はきわめて多様であり、行為をとりまく文脈はその時々によって変化する。いかにして変化する多様な環境に依存した行為パターンが形成され、安定して再帰するののかという問題は、リハビリテーション、ロボティクス、認知科学など、研究領域を横断する学際的に重要な研究課題のひとつとなっている。多様な状況に依存する人間の動作原理の理解に向けて、本稿では（１）時間変化の構造、および（２）合目的的な多変数群の共変動構造という、私たちの日常のふるまいが示す二種類の変動の構造に注目して動作を分析する方法について概説する。

Human daily skills exhibit bewildering repertoire of patterns to adapt to the exigencies in the environment. In this paper, the methods are described that focus on the variability of behavior, through which the issues concerning what underlies the exquisite context sensitivity of human behavior are probed.

Key Words : 自己組織化, 非線形性, 可塑性, 柔軟性, 複雑性

1. はじめに

免疫学者の多田富雄は自身のリハビリ体験について次のように記している。“入院している三ヶ月の間に約 150 メートル歩けるようになった。…しかし…、いくら訓練室で歩けるようになっても、私は一人で手洗いにも行けず毎日ベッドに張りついたままなのだから、今一つ成果に結びつかなかった¹⁾。”

私たちの日常動作が生起する場はきわめて多様であり、動作をとりまく文脈は刻々と変化する。いかにして変化する多様な環境に依存したふるまいのパターンが形成され、安定して再帰するののかという問題は、リハビリテーションやロボティクスなど、研究領域を横断する学際的に重要な研究課題のひとつとなっている。多様な状況に依存する人間の動作原

理の理解に向けて、本稿では（１）時間変化の構造、および（２）合目的的な多変数群の共変動構造といった、私たちの日常のふるまいが示す変動の構造に注目して動作を分析する方法について概説する。

2. 時間変化構造の解析

2.1. 「失われる複雑さ」仮説と長期相関

生理学的変化から行動に至るまで、生物のふるまいの多重の時間スケールにおける変化について、Lipsitz と Goldberger らは 1990 年代に“失われる複雑さ (loss of complexity)” と呼ばれる次の二つの仮説を提示した^{2,3)}。(1) 健康なシステムのふるまいは、長期相関と非線形な相互作用を特徴とする複雑な時間変化を示す。(2) この多重時間スケール

における非線形的な複雑さは加齢や疾病によって失われ、個人の適応力は低下する³⁾。

ここで、「非線形」という語は、生体などのシステムのふるまいが、要素のふるまいの足し算に還元できないことを指す。非線形システムでは一つの要素が小さな変動を受けたとき、その影響は拡大され、それがまた他の要素に伝わる。その結果、それぞれの要素は互いに関係しあって、全体のふるまいは各要素単体のふるまいからは予測不可能な複雑な変化を示しうる。

また、ここで言われている「長期相関」とは、ふるまいの変動が遠い過去とも強い相関をもつことを指している。一般に、ランダムなプロセスのように過去とは独立に変動する過程では変動の幅は時間の平方根に比例して増加する。しかし、長期相関を示す時間変化では、時間スケールの変化に応じて変動の幅がシステムティックに変化し、短い時間スケールでの変動量と長期的な時間スケールでの変動量が相関を見せるかたちで、過去の変動が未来の変動に影響を与える。

変動量が時間の長さとともにどのように広がるかを表現する指標として、変動量 (e.g., 標準偏差) を時間幅のべき乗則で結びつける指数 H (ハースト指数) がある。先にも述べたように、過去と独立してランダムに変化するプロセスの場合、変動の幅は時間の $1/2$ 乗 (平方根) で広がる。ハースト指数の値が 1 に近づくと、時間にもなう変動量の広がりにはランダムな過程よりも速くなり、小さな時間スケールにおける変動量が長期的な時間スケールにおける変動量と持続的に相関する長期相関を示す。

これまで、「失われる複雑さ」仮説を裏付けるかたちで、健康な人の心拍レート⁴⁾、呼吸のインターバルの時間変化⁵⁾など、健康な人のさまざまな生体信号の時間変化が特徴的なスケールをもたず、時間スケールと変動量との間にべき乗則に従う不変な関係を示す一方で、重篤な心疾患をもつ患者や高齢者においては、生体信号の時間変化におけるこうした長期相関の特徴が失われることが次々と明らかになっている^{4,6)}。

2.2. ストライドインターバルの時間変化

従来、健康な人が歩くときには、多少の雑音はあるにしても、ストライドインターバルは基本的に一定の規則的なリズムを刻むものと考えられてきた。しかし、本当に私たちの歩行は、規則的なパターンにランダムな雑音を添加した時間変化としてモデル化できるものなのだろうか。

この問いを確かめるべく、Hausdorff のグループは、Detrended Fluctuation Analysis (DFA) と呼ばれる解析手法を用いて、さまざまな人々が普通に歩くときのストライド時間の時間変化構造を検討した⁶⁾。

時間変化の長期相関構造を抽出する際に広く用いられている DFA は、簡単に述べると、さまざまな長さのモノサシを時系列信号にあてていき、モノサシからはみ出る変動量とモノサシの長さとの間のべき乗則関係を抽出する手法である。DFA は通常、次の3つの手順によって行われる。

(1) 計測された N サンプルからなる時系列信号 $x(i)$ から全体の平均値 $\overline{x(i)}$ を引いて積分した時系列信号 $y(n)$ を算出する

$$y(t) = \sum_{i=1}^N [x(i) - \overline{x(i)}] \cdot \dots \cdot (1)$$

(2) 時系列信号にさまざまな時間幅の窓 n (さまざまな長さのモノサシ) で等分割し、各時間幅のそれぞれの窓内で最小2乗法によって k 次の多項式で近似したトレンドを求め (信号の性質に応じて $1 \sim 3$ 次の多項式が用いられる)、トレンドを除去した信号の2乗平均平方根 (RMS) を各時間幅における変動量 $F(n)$ として算出する。

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

(3) 窓の時間幅 n の対数とその時間幅における変動量 $F(n)$ の対数をプロットし、両者の線形的関係の傾き α を算出する。このとき指数 α は時間スケールの変化に応じて変動量がどのように変化するかを表す。計測データが非整数ガウスノイズと呼ばれる定常的な信号の場合、DFA の指数 α はハースト指数と等価である⁷⁾。

$$F(n) \propto n^\alpha \cdots (3)$$

近年の報告では、DFA で歩行のストライド時間を検討する場合、 $N > 600$ 、窓のサイズ n は $16 < n < 9/N$ の範囲で検討することが望ましいとされている⁸⁾。

上記の DFA を用いて実際に若年健常者の歩行を検討した結果、ストライド時間の時間変化の構造は、規則的なパターンにランダムなノイズを添加した時間変化とは異なり、変動量が多重時間スケールで持続的に相関する強い長期相関の特徴を示す（平均してハースト指数が 0.8 から 0.9）という通念を覆す結果が得られた。

また、70 歳以上の高齢者においてはこのようなストライド時間の時間変化における長期相関が若年者に比べて弱まり（ハースト指数の値が 0.5 に近づき）、各ストライド時間が時系列の流れとは独立した時間変動の構造を呈すことがわかった⁶⁾。しかし、ストライド時間の全体的なばらつきそのものは、高齢者群と若年群にほとんど違いがなく、長期相関の喪失は歩行速度の低下やインターバルのばらつきの全体量とは独立していた。

さらに、歩行障害をしばしば呈するハンチントン病の患者においても、同様にストライド時間の時間変化における長期相関の顕著な弱まりが見られ、各ストライドに過去のストライド時間の系列との相関がほとんど見られない時間変化が見られることがわかった。さらに驚くべきことに、症状の重篤さと、ハースト指数の値には負の相関が見られ、疾患が重篤であるほど、歩行時のストライド時間における長期相関が低下するという事実が明らかになった⁶⁾。つまり、「失われる複雑さ」仮説にぴたりと符号する

結果が、歩行におけるストライドインターバルの時間変化に見られたことになる。

2.3. 探索運動が示す時間変化の構造

身体運動の時間変化が見せる長期相関については、もうひとつ興味深い研究結果が報告されている。

私たちは手にした物体の長さやおおまかな形などを、目で見なくてもかなり正確に知ることができる。このとき、知覚される長さや幅は、手首まわりの慣性モーメントときれいに比例する。このことから、わたしたちが手にした物体を動かすとき、力学的受容器が埋め込まれた骨格筋および筋膜の変形を通して、こうした時間変化に対して対称性をもつ不変な回転軸まわりの慣性モーメントが検知されると考えられている⁹⁾。同様の原理は四肢の固有知覚の基盤となっていることが一連の研究から明らかにされている⁹⁾。ゆえに、探索運動による慣性モーメントの検知は、固有知覚による四肢の位置調整が必要なさまざまな運動において根本的に重要な役割を果たす。

軸まわりの回転に対する抵抗は動くことなしに現れることはない。そのため、探索運動は動作の制御にきわめて重要な意味をもつ。Stephen らは、手にした棒の長さに対し視覚を介さずに判定した後に、実際の長さをフィードバックすることで、どのように知覚の精度が上がるかという問題について検討した¹⁰⁾。このとき、探索時の手の運動を計測し、その位置変化の時系列信号に関して DFA を用いて検討したところ、知覚の精度がより向上した参加者ほど、探索運動における時間変化が強い長期相関の構造を呈すことを発見した。先述の通り、時間の流れと独立したランダムな過程では時間の $1/2$ 乗で変動量が広がるのに対し、ハースト指数が $1/2$ より大きくなると、変動量の拡散スピードは速くなる。Stephen らは、こうした速い変動の拡散構造 (hyperdiffusivity) が探索運動の効率と関連すると主張する¹⁰⁾。この主張を裏付けるように、視覚的サーチ課題における視線行動の時間変化においても同様の長期相関構造が見られることが確認されている¹¹⁾。探索運動の効力と時間変化構造の関係は、実世

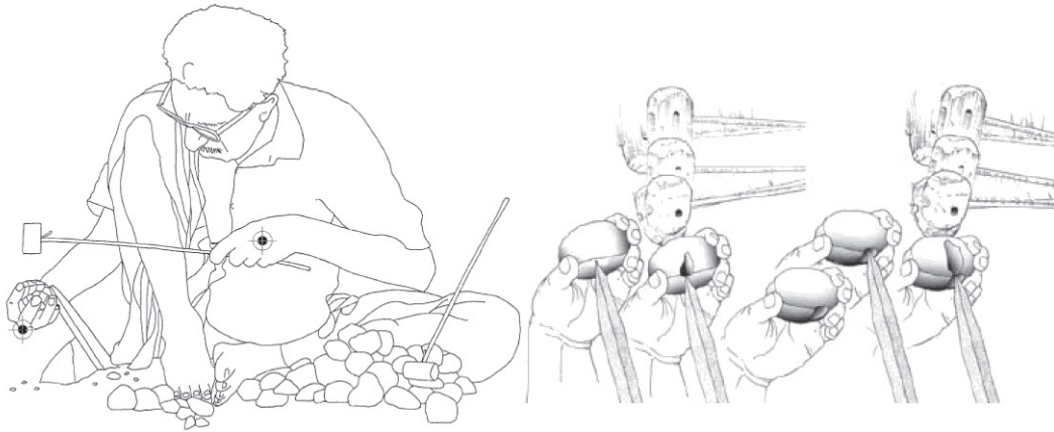


図1 ハンマーと鉄杭を用いた石ビーズ制作場面¹²⁾

界行動においても確かめられている。Nonaka と Brill は習得がきわめて難しい技能として知られる、ハンマーを用いた石ビーズ制作の職人たちのハンマー動作を計測した¹²⁾。この技能は、面に突き立てた尖った先をもつ鉄杭の上に紅玉随と呼ばれる石を支え、もう一方の手でもつハンマーで石を叩くことで、鉄杭と接触した部分の石が削られることで細長い楕円形のビーズを整形する(図1)。インドの人間国宝級の職人と一般の職人に、通常の紅玉随に加えて、はるかに割れやすいガラスを用いてビーズを制作してもらい、探索的場面におけるハンマーをもつ手の運動を DFA によって検討したところ、普段から慣れている紅玉随を用いるときに両者の運動の長期相関構造に差は見られなかったものの、より探索が必要とされる未知の素材を用いる条件において、一般の職人においてはハンマー運動の長期相関構造が著しく失われ、よりランダムに近い構造が見られた一方で、人間国宝級の職人においては逆に不慣れな状況ほど、より強い長期相関構造が見られた。できあがったビーズを見ると、一般の職人は新しい素材にまったく対応できず、ほとんど整形出来なかったのに対し、人間国宝級の職人は未知の素材に直面しながらも、紅玉随で作ったものほとんど変わらない楕円形のビーズを整形することができていた¹²⁾。

さらに、大きな剥片を割り取る時にハンマーで強打する際の腕の運動を見ると、熟練職人の方が関節運動群の組み合わせに柔軟な多様性が見られたの

に対し、一般の職人においては少数の関節運動がハンマー動作を支配しており、関節運動の協調に多様性が見られなかった¹¹⁾。このように異なる解像度やサイクルの多数の関節運動群が参加する熟練職人のハンマー動作における手の運動には、全体的な長期相関傾向に加えて、複数の時間スケールの間の乗算的な相互作用によって、各時点における多重時間の相関指数自体が時間変動するマルチフラクタルと呼ばれる構造が見られることが明らかになっている¹²⁾。

Goldberger らは、生体システムが示す時間変化における長期相関は、絶えず変化する複雑な状況に対する適応性を反映すると考えており、高齢化や疾病にともなう「失われる複雑さ」は適応性の低下の現れであると主張する¹³⁾。(1) 長期相関はきわめて幅広い時間スケールにまたがったゆらぎの群れを生成する複雑なプロセス群の自己組織化のメカニズムとして機能し、また(2) 特徴的なひとつの時間スケールが存在しないことは、状況への適応的な反応を妨げる過度に周期的なパターンに陥ることを防ぐ、というのが「失われる複雑さ」と適応性の低下との関連についての Goldberger らによる解釈である¹³⁾。探索運動の時間構造をめぐる Stephen らや Nonaka と Brill による近年の研究は、速い変動の拡散を伴う長期相関の性質が、適応的なふるまいの基盤となる周囲の状況の探索運動の背景にあることを示唆するものであり、「失われる複雑さ」仮説の新たな解釈の可能性を垣間見せている¹⁰⁻¹²⁾。

3. 合目的的な多変数群間の共変動構造

ロシアの運動生理学者、ニコライ・ベルンシュタインは私たちの日常動作に見られる変動について次のように述べた。“ハンマーで壁に釘を打ったり、靴紐を結んだり、鉛筆を削ったり、肉を刻んだり、何回か続けざまにやってみて、自分で観察してみるといい。一連の動作が毎回まったく同じということは決してないが、毎回同じ目的を達成している¹⁴⁾。”

いかに熟練したスキルであっても、あるいはむしろスキルが熟練するほど、動作は常に変動する。しかし同時に、多様な動作によって、私たちは目的を安定して遂行する。生体のようなきわめて冗長な多自由度システムにおいて、私たちの日常行為に見られる安定した目的の遂行はいかにして可能なのだろうか。

この問題について、近年、多自由度変数群の共変動構造に注目して検討する一連の研究が現れている。たとえば、二本の指で 20N の力で何かを押すことを何度くりかえしたとする¹⁵⁾。それぞれの指が押す力を x , y で表すと xy 平面上の $x+y=20$ という直線上にあるかぎり、いくら各指の力が変動しようとも、あわせた力は常に 20N になる。しかし、この線と直交する方向にばらつくと、2本指で出す力は 20N から逸脱する。このとき、目的遂行に影響を与えないような下位変数群の組み合わせの集合 ($x+y=20$ 上の点の集合) を Uncontrolled Manifold (UCM) と呼ぶ¹⁶⁾。

もし私たちの日常行為で、「運動のかたち」自体が処方されているのであれば、試行間の変動はある「理想の」運動軌道の周囲に無方向に分布する構造が見られるはずである。しかし、「運動のかたち」自体ではなく、環境における目的達成に対して運動が調整されているのであれば、目的変数に影響を与えないようなばらつき(この例では $x+y=20$ 上のばらつき)が、目的変数を不安定化させるばらつき ($x+y=20$ に直交する方向へのばらつき) よりも大きくなる可能性がある。日常動作のある局面において、多自由

度の運動変数 (e.g., 関節角度群) から構成される状態空間上で、目的変数に影響を与えないベクトルに沿った変動の量と、それと直交する目的変数に影響する変動の量を比較することによって、変動が「理想の」軌道まわりに無方向に分布するのか、あるいは合目的なかたちで構造化されているのかを厳密に解明する道が開かれることになる。

3.1. 合目的的な多関節共変動構造の研究事例

UCM を用いて歩行を検討した事例のひとつに、Krishnan らの研究がある¹⁷⁾。二足歩行のモデルは矢状面内では受動的安定化が可能だが、前額面での安定化は接地位置の能動的な制御を必要とする。接地は遊脚相の終点であり、接地位置は遊脚相の足部の軌道と密接に結びついているため、歩行を前額面において安定化させるような、遊脚相の足部の軌道を能動的に制御する多関節協調が存在する可能性が考えられる。このことから Krishnan らの研究では、前額面における遊脚相の足部の軌道を安定化させる下肢関節群の共変動構造の有無が UCM を用いて調べられている¹⁷⁾。

UCM を用いる解析は、通常次の手順を踏む。

(1) 何が目的変数なのか、仮説を立てる。Krishnan らの場合、遊脚相における足関節中心の前額面における位置が制御されると仮説を立てているが、通常は複数の目的変数仮説がテストされることが多い¹⁸⁾。

(2) 下位変数群 (e.g., 関節角度群) と目的変数 (e.g., 前額面における遊脚の足関節位置) を結びつける幾何学モデルを組む。Krishnan らは、支持脚の足関節中心を原点として、遊脚の足関節中心を次の 7 つの関節角度の関数として次のように記述した (図 2)。まず支持脚 (ひとつのセグメントとしてモデル化)、骨盤、遊脚の大腿、下腿のセグメント長をそれぞれ L_1, L_2, L_3, L_4 とし、それぞれが前額面において垂直軸となす角度を $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ とする。さらに、前額面に射影する際のセグメント長の変化を考慮し、 α, β, γ の三つの角度で表される前額面以外の運動を導入する。このとき、7つの関節変数群と遊脚の足関節中

心位置 AJC_{GM} との関係は次のように表せる (7 つの関節変数群の組は以下 Θ と記す) ¹⁷⁾.

$$AJC_{GM} = L_1 \cos\alpha \sin\theta_1 + L_2 \cos\beta \cos\theta_2 + L_3 \cos\gamma \sin\theta_3 + L_4 \cos\theta_4$$

$$\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \alpha \ \beta \ \gamma] \cdots (4)$$

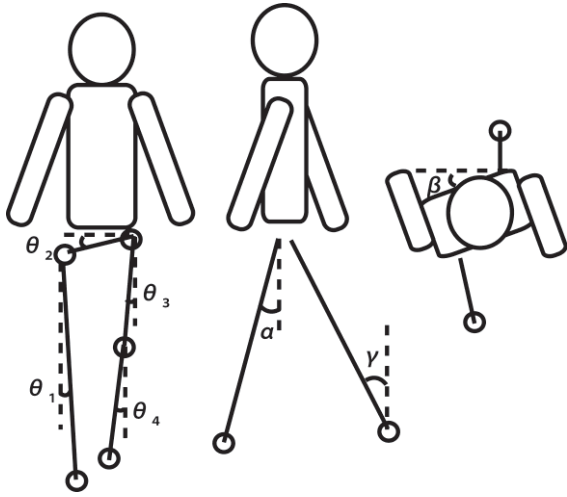


図2 遊脚の足関節中心位置を記述する幾何学モデルの7つの関節変数群

Adapted from “The effects of age on stabilization of the mediolateral trajectory of the swing foot,” by V. Krishnan, N. J. Rosenblatt, M. L. Latash, and M. D. Grabiner, 2013, Gait & Posture, 38, pp. 923-928. Copyright 2013 by Elsevier Ltd.

(3) 下位変数群の変化と目的変数の変化を結びつける。上の例では、7つの関節角度変数の変化と目的変数の変化を結びつけるヤコビアン J は次の式で定義される ¹⁷⁾.

$$J = \left[\frac{\partial AJC_{GM}}{\partial \Theta} \right]$$

$$= [L_1 \cos\alpha \sin\theta_1, L_2 \cos\beta \sin\theta_2, L_3 \cos\gamma \cos\theta_3, L_4 \cos\theta_4, -L_1 \sin\alpha \sin\theta_1, -L_2 \sin\beta \cos\theta_2, -L_3 \cos\gamma \sin\theta_3]$$

$$\cdots (5)$$

上の例では遊脚相は全体が 100 ポイントになるよ

うに時間正規化され、各参加者の遊脚相の 100 ポイント中の各ポイント i 毎に関節変数群の試行間平均値 $\overline{\Theta}_i$ を算出し、各時点におけるヤコビアン J の零空間の基底ベクトル ε_i が算出される。

$$0 = J(\overline{\Theta}_i) \cdot \varepsilon_i \cdots (6)$$

ε_i は関節角度群の平均値において線形近似した UCM である。試行間の関節角度の平均値 $\overline{\Theta}_i$ に対応する遊脚の足関節中心位置を $\overline{AJC_{GMi}}$ とすると、関節角度空間内で、各試行の関節角度が平均値 $\overline{\Theta}_i$ から ε_i 平行な方向に逸脱するとき、遊脚の足関節中心位置は $\overline{AJC_{GMi}}$ のままで変化しない。一方、 ε_i と垂直な方向への関節空間内の逸脱は目的変数を $\overline{AJC_{GMi}}$ から逸脱させる。

(4) 合目的的な変動量を全体の変動量から分離する。関節角度空間内における平均値からの各試行の逸脱を ε_i に射影したものを Θ_{UCM} 、 ε_i と直交するベクトルに射影したものを Θ_{ORT} とする ¹⁹⁾.

$$\Theta_{UCM} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot (\Theta - \overline{\Theta}) \cdots (7)$$

$$\Theta_{ORT} = (\Theta - \overline{\Theta}) - \Theta_{UCM} \cdots (8)$$

$$\Theta_{ORT} = (\Theta - \overline{\Theta}) - \Theta_{UCM} \cdots (8)$$

次に、各ポイントにおいて、各試行の Θ_{UCM} と Θ_{ORT} の総和を試行数 (N_{Trials}) で割り、それぞれ単位自由度毎の試行間平均値 V_{UCM} と V_{ORT} を算出する (n は関節角度空間の自由度、 d は目的変数の自由度を

$$\overline{V_{UCM}} = (n-d)^{-1} \cdot (N_{Trials})^{-1} \cdot \sum \Theta_{UCM}^2 \cdots (9)$$

$$V_{ORT} = d^{-1} \cdot (N_{Trials})^{-1} \cdot \sum \Theta_{ORT}^2 \cdots (10)$$

$$V_{ORT} = d^{-1} \cdot (N_{Trials})^{-1} \cdot \sum \Theta_{ORT}^2 \cdots (10)$$

Krishnan らの研究には若年健常者、高齢健常者が参加したが、どちらのグループにおいても、ほぼ

変化は、筆圧や筆の角度、紙面を見る頭部姿勢といった環境を組み込んだ環境-身体間システムの安定性には影響を与えないかたちで組織化されているこ

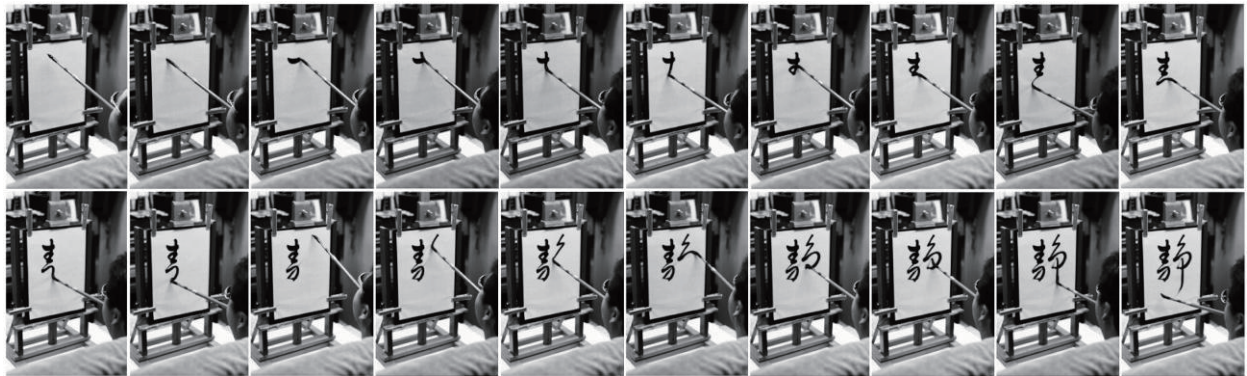


図3 口にくわえた筆で「静」と書く牧野文幸氏
(口と足で描く芸術家協会 <http://www.mfpa.co.jp>)

常に前額面における遊脚相の足部の軌道に影響しない変動量 (V_{UCM}) が、足部の軌道を不安定化させる変動量 (V_{ORT}) よりも一貫して多く、仮説通り、前額面での足部の軌道を安定化させる下肢関節群の共変動構造が見られることが明らかになった¹⁷⁾。各関節運動の試行間変動が無方向ではなく、そこに合目的な構造が見られたことは、歩行において安定化されているのが各関節の運動そのものではなく高次の目的変数であり、目的変数に影響しない関節運動群の変動は許容されつつも、目的変数を不安定化させる変動の幅が抑えられていることを示唆している。

他に UCM を用いて歩行を検討した研究では、歩行における踵接地時点において、接地した足と相対的な身体重心の位置が安定化するような全身の関節変数群の共変動構造が見られることなども報告されている²⁰⁾。

また、筆者は四肢に重篤な麻痺をもつ頸髄損傷者が習慣的に行っている筆を口にくわえて行う運筆運動について UCM を用いて検討した。第4頸髄損傷の後遺症で四肢麻痺を抱えながら、口で筆をくわえて、書画を25年以上に渡って制作しつづけている牧野文幸氏という画家/書家がいる。牧野氏が同じ字を何度も書くときの運動を計測させてもらったところ、牧野氏が繰り返して同一の文字を書くとき、頭部・首の運動自体は毎回変わるが、各運動要素の

とが、多変数群の共変動構造から定量的に示された¹⁸⁾ (図3)。この結果は、四肢麻痺者が学習した書字行為が、運動プログラムの発現というよりは、外部との何らかの関係を保つような複数の運動要素間の協調関係の形成によって制御されていることを示唆するものであり、運動学習の理解に新たな知見をもたらすものと言える¹⁸⁾。

4. まとめ

私たちの日常動作には変動がつきものである。変動を雑音として切り捨ててしまうのではなく、変動そのものを“データ”としてとらえ、その構造をさまざまな側面から検討することから、近年豊かな知見が得られつつある²¹⁾。このような手法は、臨床現場で問題となるような、多様な変動を見せる実験室外の複雑な日常動作を検討する上で、特に有効であると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25330178 の助成を受けたものです。

参考文献

1. 多田富雄：寡黙なる巨人，53-54，集英社，

- 2007.
2. Lipsitz LA, Goldberger AL: Loss of complexity and aging. *Jama*, 267(14), 1806-1809, 1992.
 3. Goldberger AL, Peng CK, Lipsitz LA: What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease? *Neurobiol Aging*, 23(1), 23-26, 2002.
 4. vanov PC, Amaral LAN, Goldberger AL, et al: Multifractality in human heartbeat dynamics, *Nature*, 399(6735), 461-465, 1999.
 5. Hoop B, MD Burton, H. Kazemi: Fractal noise in breathing. : Khoo, M. C. K. (Eds) : *Bioengineering Approaches to Pulmonary Physiology and Medicine*, 161–173, Plenum, New York, 1996.
 6. Hausdorff JM, Mitchell SL, Firtion R, et al: Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease, *J. Appl Physiol*, 82(1), 262-269, 1997.
 7. Eke A, Herman P, Kocsis L, et al: Fractal characterization of complexity in temporal physiological signals, *Physiol Meas*, 23(1), R1, 2002.
 8. Damouras S, Chang MD, Sejdić E, et al: An empirical examination of detrended fluctuation analysis for gait data, *Gait Posture*, 31(3), 336-340, 2010.
 9. Turvey MT, Carello C: Obtaining information by dynamic (effortful) touching. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 366(1581), 3123-3132, 2012.
 10. Stephen DG, Arzamarski R, Michaels CF: The role of fractality in perceptual learning: exploration in dynamic touch, *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 36(5), 1161-1173, 2010.
 11. Stephen DG, Anastas J: Fractal fluctuations in gaze speed visual search, *Attention Percept Psychophys*, 73(3), 666-677, 2011.
 12. Nonaka T, & Brill B Fractal Dynamics in Dexterous Tool Use: The Case of Hammering Behavior of Bead Craftsmen, *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, Advance online publication. doi: 10.1037/a0033277, 2013.
 13. Goldberger AL, Amaral LA, Hausdorff JM, et al: Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging, *P Natl Acad Sci USA*, 99(Suppl 1), 2466-2472, 2002.
 14. Bernstein NA: From reflex to the model of the future. *J Russ East Eur Psychol*, 44 (2), p.96, 2006.
 15. Latash ML: *Synergy*, Oxford University Press, New York, 2008.
 16. Schöner G: Recent developments and problems in human movement science and their conceptual implications, *Ecol Psychol*, 8, 291-314, 1995.
 17. Krishnan V, Rosenblatt NJ, Latash ML, et al: The effects of age on stabilization of the mediolateral trajectory of the swing foot, *Gait Posture*, in press, 2013.
 18. Nonaka T: Motor variability but functional specificity: The case of a C4 tetraplegic mouth calligrapher, *Ecol Psychol*, 25(2), 131-154, 2013.
 19. Scholz JP, Schöner G: The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task, *Exp Brain Res*, 126, 289-306, 1999.
 20. Verrel J, Lövdén M, Lindenberger U: Motor-equivalent covariation stabilizes step parameters and center of mass position during treadmill walking, *Exp Brain Res*, 207(13), 13-26, 2010.
 21. Thelen E, & Smith LB: A dynamic systems

< 著者連絡先 >

野中哲士

神戸大学大学院人間発達環境学研究科

〒657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲 3-11

phone/fax: 078-803-7801

E-mail: tetsushi@people.kobe-u.ac.jp