

第22回中山賞奨励賞

柔軟な行為における身体運動の変動構造の抽出

野中 哲士

神戸大学大学院人間発達環境学研究科

リハビリはひたすら歩く距離を延ばそうとしているだけだった。…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、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⁾

人の行為が生起する場は多様であり、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だろうか。状況に適応しながらも、同一の目的を多様な身体部位の運動や、異なる運動協調のパターンによって遂行する生物行動の特性は「柔軟性」と呼ばれる。固定的な運動パターンに還元できない非機械的な特性である柔軟性の理解は、今日のリハビリテーション科学、福祉工学、ロボット工学、人工知能等の研究領域において、学際的にブレークスルーを要するきわめて重要な研究課題となっている。

人のふるまいにおいて、「柔軟性」が特徴的に現れるのは日常場面における習慣的技能である。しかし、複雑な日常場面における習慣的技能とその獲得プロセスの検討は、長時間スケールゆえの観測困難性、人間をとりまく環境との相互作用、変化自体の複雑性などにより、その定量的な記述・理解は必ずしも容易ではなかった。一方で近年、非線形力学の発展から複雑な時系列に潜む情報を抽出するさまざまな手法がもたらされつつあり、複雑な時間変化や多要素群の組織を数学的に記述する新たな可能性が生まれつつある。

このような状況を背景として、生物行動の「柔軟性」の理解を目指して、人間の複雑な習慣的技能を検討した筆者の試みを下記に報告する。

1. 熟練技能における多自由度システムの合目的的な共変構造

ロシアの数学者 Gelfand らは、多要素群が共通の目的に向けて自己組織化する、最小相互作用の原理と呼ばれる生物システムの制御モデルを提案した²⁾。この原理には次の前提がある。(1) 生物システムが多数の自律的な下位システムからなる。(2) それぞれの下位システムは自身が要素となる全体のふるまいが目的達成にどのくらい近いかを知ることができる。(3) (制御できない外的要因がありつつも)目的達成までの近さに影響するようなパラメータを各下位システムがそれぞれの仕方で自律的に調整する。このような前提を満たすとき、各下位システムは常に自身が要素となる全体の挙動と環境との関係において「何をなすべきか」に対してそれぞれの仕方で調整することになり、一方で他の下位システム群の挙動は全体のふるまいに反映するため、それぞれの要素のふるまいが他の要素の挙動を必然的に反映させるような、非中枢制御型の自律的組織が生まれる。

Gelfand のモデルをヒントに、人の習慣的技能における階層的な調整システム群の組織の性質について、筆者は四肢に重篤な麻痺をもつ頸髄損傷者(書家の牧野文幸氏、図 1A)が習慣的に行っている筆を口にくわえて行う運筆運動を対象に検討を行った³⁾。

牧野氏が好む「静」という字を草書で何度も書いてもらい、運筆時の筆および身体の運動を光学的の動作解析装置によって計測した。身体の運動は、頭部と頸部（C1-C7、剛体として近似）がなす3つの角度、および頸部と胸郭がなす3つの角度を算出し、これら6つの関節角度の組み合わせとして表現した。さらに書字という行為において、制御されている可能性のある変数として（1）筆圧、（2）紙と筆官のなす角度、（3）環境の重力軸に対する頭部の前額面の正立、という3つの環境一身体間の関係に注目し、それぞれを筆および身体運動の計測データから近似的に算出した。

さらに「静」を草書で書く筆が紙面でとる軌道を23のポイントに区切り、各筆の経過点における関節角度の試行間変動を、3つの環境一身体間の関係の変動と結びつける解析を行った⁴⁾。牧野氏の運動を6つの関節角度を状態変数とする状態空間上の軌道として記述するとき、仮に牧野氏の書字が、（1）ある一定の運動パターンを安定化させることによって制御されているとすると、ある筆の経過点における運動変数群の試行間変動は「理想の点」の周囲に分布するノイズのような様相を呈することが予想される。一方で、牧野氏の書字が、（2）書字の各ポイントにおける筆圧や筆の角度、頭部の正立といった書字機能にかかわる環境一身体間の関係を安定化させることによって制御されているとすると、運動変数群の試行間変動は無方向なノイズのようなかたちではなく、これらの環境一身体間の関係に影響を与えないような変動成分が、これらの変数に影響を与える変動成分よりも大きくなることが予想される。

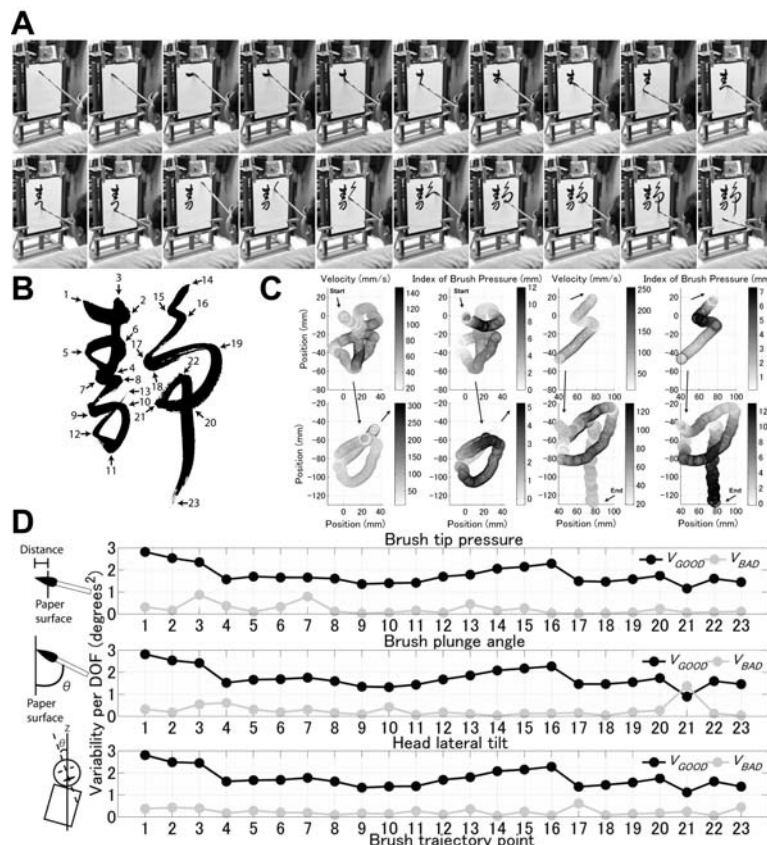


図1 A)「静」と書く牧野氏, B)検討した23ポイント, C)筆尖の合成速度(左)と筆圧(右)の変遷(色が濃いほど高値) D)23ポイントにおける筆圧(上段), 筆管と紙面の角度(中段), 頭部の正立(下段)に影響を与えない関節角度空間内での試行間のばらつき(V_{GOOD} , 黒)と影響を与えるばらつき(V_{BAD} , 灰色)。

本研究では複数試行における 6 つの関節角度群の変化量とそれに伴う 3 つの環境—身体間の関係を表す変数の変化量から重回帰分析によって重相関係数(ヤコビアン行列)を求め, 3 つの環境—身体間の関係に影響しない 6 つの関節角度群の組み合わせからなる領域(Uncontrolled manifold, UCM)をヤコビアンベクトルの零空間として線形近似した. 続いて, 「静」を書く筆の経過点 23 点(図 1B)について, 関節角度群の平均値からの逸脱の量を, UCM に平行な成分と直交する成分にそれぞれ投影することによって, 運動変数群の試行間の分散を, それぞれの環境—身体間の関係に影響を与えない成分(V_{UCM})と環境—身体間の関係を変化させる成分(V_{ORT})へと分離し, 両者を比較した.

図 1D が示すように(1)筆圧, (2)紙面と筆管の角度, (3)頭部の正立という 3 つの環境—身体間の関係について, これらの環境—身体間の関係に影響を与えない試行間分散の成分(V_{UCM})の方が, ほぼ常にこれらの関係を変化させる変動(V_{ORT})よりも大きかった. このことは, 同一の文字を繰り返して書く場合であっても, 書字に見られる身体運動の試行間変動は, 「理想の軌道」まわりのノイズのようなものではなく, 紙面と筆, あるいは環境と身体との独特の関係を形成するかたちで構造化されていることを示している. 身体運動群の試行間の変動に補償的な結びつきがみられ, 運動パターンの変動が制御変数の安定化に結びついている以上, 牧野氏がスキルを獲得したときに獲得したものは, 身体運動パターンそのものではなく, また, それに対応する何らかの運動プログラムであるとは考えにくい. むしろ, 牧野氏が獲得したのは, 外部(紙, 筆)と身体との意味のある関係を柔軟に生成させるように身体運動を協調させ, その関係を安定化させるかたちで補償的に身体運動を組み合わせる能力であったと考えられる.

さらに, 筆圧, 筆の角度, 頭部の正立といった複数の環境—身体間の関係は同時に調整されており, 複数の環境—身体間の関係調整の間にトレードオフは見られなかった. このことは, 牧野氏の技能の発達が単にひとつの環境—身体間の関係を安定化させる運動協調の発達にとどまらず, ひとつの環境—身体間の関係調整が他の関係調整と矛盾しないようなかたちで, 複数の環境—身体間の関係を調整する活動群を入れ子にし, 組織化する能力の発達であったことを示唆している. 今後これらのそれぞれの環境—身体間の関係を知らせる情報として何があるのかを明らかにすることができれば, 「柔軟性」を見せる階層的な多要素システムの組織原理について新たな理解が得られる可能性がある.

2. 能動的なセンシングシステムとしての身体運動の多重時間構造

私達の身体においては, 引っ張ることしかできない骨格筋と, 引っ張る力にしか抵抗できない腱や筋膜の張力のネットワークに骨格が埋め込まれている. 「弾性をもつ線維で骨を引っ張る」という構造のために, ピアノの鍵盤を押して弦を叩くハンマーをコントロールするようには, 体は制御することができない. 硬い骨のような圧縮材同士が固着しておらず, 全体に分配された初期張力のネットワークがもたらす釣り合いによって自律的に安定するような構造体をテンセグリティ(tensional integrity の略)と呼ぶ⁵⁾.

細胞から筋骨格系にいたるまで、身体はさまざまなレベルで階層的なテンセグリティをなしている。Rieffelらはテンセグリティロボットの研究によって、(1)テンセグリティの張力のネットワークが非集中制御システムによる自律的下位システム間が互いを「知る」ための情報伝達媒体となること、さらに(2)テンセグリティの張力情報に依拠して自己組織化する自立分散制御システムは、非線形性を特徴とする独特の運動のダイナミクスを示すことを示唆している⁶⁾。また、手にした道具の長さや性質を動かして知るダイナミックタッチなど、細胞レベルから筋骨格系に至るまで幾重にも階層をなす張力のネットワークが、力覚によって環境や自己を知る「媒体」となる可能性が指摘されている⁷⁾。

筆者と共同研究者のBlandine Brillは、状況にきわめて柔軟に適応する人間国宝級の石ビーズ職人の周期的な振動をとまなう探索的なハンマー動作を対象とし、能動的な探索運動の組織にどのようなダイナミクスが見られるのかを検討した⁸⁾。この技能において職人は、地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を周期的に振動させて石を連打することで、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2A)。実験では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、ビーズ整形場面冒頭の探索的場面におけるハンマー動作を計測・分析した。

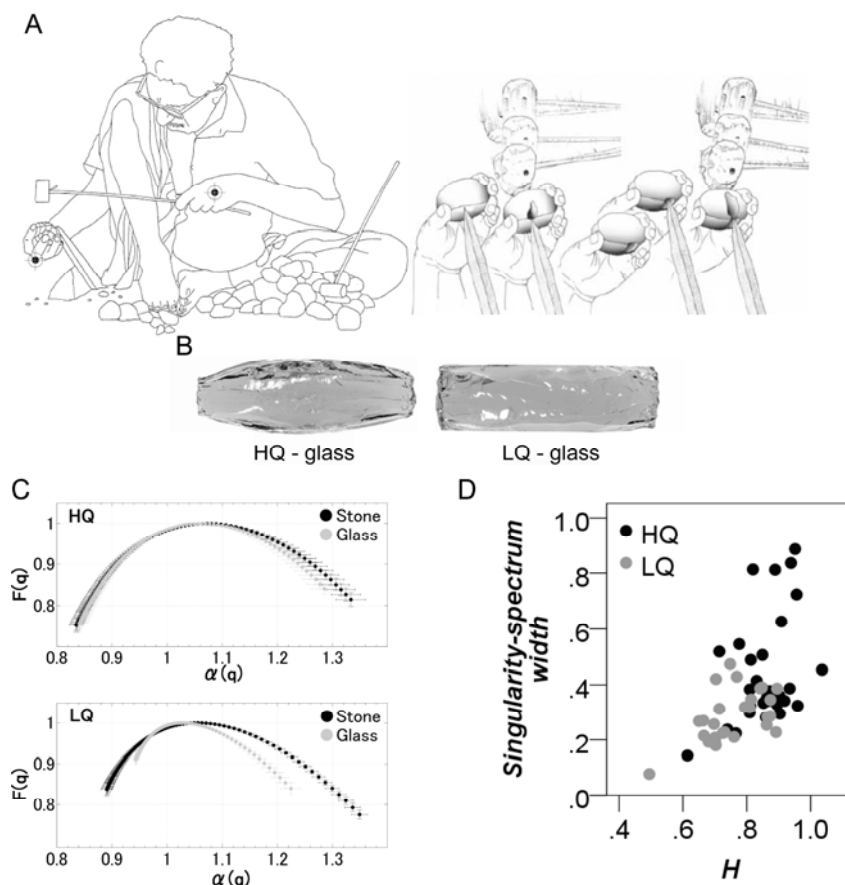


図2 A) ビーズ制作状況, B) 熟練職人(HQ)と一般職人(LQ)のガラスビーズの出来の違い, C) 熟練職人(HQ)と一般職人(LQ)が通常用いる紅玉随(黒)と不慣れなガラス(灰色)を整形した際のハンマー動作の位置変化信号の局所的なスケーリング指数の分布を示す特異性スペクトル, D) 不慣れなガラス条件におけるHQ(黒)とLQ(灰色)の同時系列信号の長期相関を示すハースト指数 H (横軸), 特異性スペクトルの幅(縦軸)。

まず、周期的なハンマー動作の3次元位置変化の時系列信号の長期相関（多重時間スケール間の変動量のベキ則的相関関係）について検討したところ、普段から慣れている紅玉随を用いるときに両グループの職人におけるハンマー動作に差は見られなかったものの、より慎重な探索が要求される未知の素材（ガラス）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変動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、複数の時間スケール間で変動量が強く影響しあう、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と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（図2B）。

さらに、大きな剥片を割り取るとき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⁹⁾。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間の乗算的な相互作用によって、ローカルな多重時間相関指数自体が変動し間欠性を示す、マルチフラクタル構造が見られることがさらに明らかになった（図2C）。

これらの結果は、複雑な状況に柔軟に適応する熟練技能に現れる身体運動の時間構造の特徴が、多重時間スケールにおける調整活動群間の入れ子化・組織化のプロセスに由来する可能性を示唆するものだった。また、熟練者の道具使用における探索運動が多重時間スケールにおける乗算的な相互作用を示したことは、ダイナミックタッチの媒体としてのテンセグリティ仮説の予測と一貫しており、探索運動のダイナミクスと身体構造との関係について、今後さらなる検討を通じて厳密に確かめていく必要がある。

文献

- ¹⁾ 多田富雄. (2007). 寡黙なる巨人, 53-54, 集英社.
- ²⁾ Gelfand, I. M., & Tsetlin, M. L. (1971). On mathematical modeling of the mechanisms of the central nervous system. In I. M. Gelfand, V. S. Gurfinkel, S. V. Fomin, & M. L. Tsetlin (Eds.), *Models of the structural-functional organization of certain biological systems* (pp. 9-26). Cambridge, MA: MIT Press.
- ³⁾ Nonaka, T. (2013). Motor variability but functional specificity: The case of a C4 tetraplegic mouth calligrapher. *Ecological Psychology*, 25(2), 131-154.
- ⁴⁾ Schöner, G. (1995). Recent developments and problems in human movement science and their conceptual implications. *Ecological Psychology*, 8, 291-314.
- ⁵⁾ Ingber, D. E. (1998). The architecture of life. *Scientific American*, 278(1), 48-57.
- ⁶⁾ Rieffel, J. A., Valero-Cuevas, F. J., & Lipson, H. (2010). Morphological communication: exploiting coupled dynamics in a complex mechanical structure to achieve locomotion. *Journal of the royal society interface*, 7(45), 613-621.
- ⁷⁾ Turvey, M. T., & Fonseca, S. T. (2014). The medium of haptic perception: A tensegrity hypothesis. *Journal of motor behavior*, 46(3), 143-187.
- ⁸⁾ Nonaka, T., & Bril, B. (2014). Fractal Dynamics in Dexterous Tool Use: The Case of Hammering Behavior of Bead Craftsmen. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(1), 218-231. doi: 10.1037/a0033277.
- ⁹⁾ Biryukova, E. V., & Bril, B. (2008). Organization of goal-directed action at a high level of motor skill: The case of stone knapping in India. *Motor Control*, 12, 181-209.