

自由度の時間的分化としての熟達化：投球動作の分析

Motor expertise as temporal differentiation of degrees-of-freedom: a study of ball throwing

鳥居 拓馬, 日高 昇平
Takuma Torii, Shohei Hidaka

北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology
{tak.torii, shhidaka}@jaist.ac.jp

Abstract

In working on a task repeatedly, our ability for the task can be improved. This process is often called “expertization”. In bodily tasks, the ability for the task can be in part of their motor control. A hypothesis in motor control studies claims that trained motor control reduces the body’s degrees-of-freedom to meet the task’s accuracy requirements. By extending this, we hypothesized that improvement in a subject’s motor control ability can be captured as a temporal differentiation of the degrees-of-freedom of the subject’s body in the task motion. To examine this hypothesis, we tracked two subjects who trained to throw a ball by their non-dominant hand, over five days. The obtained 3D motion capture data was analyzed. The results of analysis agree with our hypothesis, but it is needed more data to be collected.

Keywords — Motor control, Skill acquisition, Expertization, Degrees-of-freedom, Fractal dimension

1. 運動制御の熟達化

私たち人はある課題に何度も繰り返し取り組むうちに、その課題をより短時間でより正確に処理できるようになる。人がある課題をよりよい成績で達成できるようになることは熟達化と呼ばれる。ある個人がある課題に関して熟達したかはその課題の定める成績（評価）に照らして結果的に知ることができる。そのとき、その成績向上の原因はその個人の何らかの能力の変化にあると考えて、その能力の変化を明らかにすることは、ある課題に熟達するとはどういうことかに迫る一歩といえる。その先に、どうやれば他者を効率よく熟達させられるかは教育学上重要なテーマである。

身体動作をはじめとする身体を使う課題では、その課題の定める成績を高めるように自らの身体をうまく操れる・制御できるようになることは熟達化の一側面である。Nikolai Bernstein [1]は 1940 年代に人間の身体動作の巧みさ（dexterity）に着目し、まったく同じ身体・環境の状況は 2 度と生じないにもかかわらず、さまざまな異なる状況で同じ目標を高い成績で達成できる仕組みを論じた。生物の身体は高自由度系である。

人体は約 200 本の骨と約 600 本の筋肉から構成される。筋肉だけを考えても約 600 個の変数をうまく調整することで 1 つの動作が生成される。Bernstein は自由度こそが人間を含む生物の身体動作の巧みさを実現する条件であるとし、しかしこのような冗長な自由度をもつ身体を操作できるのはいかにしてなのかという問い、運動制御の中心的問題を提示した。Bernstein は冗長な自由度を除く仕組みとして運動の協調を論じた。

最適制御理論では、運動の協調（自由度の調整）を多様体上の分散で表すとき、ある課題の熟達者の動作では、その課題の成績に影響する要所では課題の正確さを要求する方向に動作のばらつき（分散）が小さくなる（反面、正確さを要求しない方向に分散が大きくなる）という無制御多様体仮説（uncontrolled manifold）[4][6][7]がある。

この無制御多様体仮説を踏まえると、正確さを要する課題の熟達者においてはその課題の要所と呼べるような動作の箇所自由度を小さくするように動作全体の自由度を調整していると考えられる。著者らの研究 [9]では、球技経験者の動作ではボールをリリースする時点付近（課題の要所）で身体自由度を低くしている傾向を、また球技経験の少ない被験者の動作では自由度の抑揚が小さい傾向を報告している。この研究結果 [9]から、日々の練習をこなし熟達化していく過程では、課題の要所の区別なく動作全体的に自由度の抑揚があまりない運動制御から、課題の要所で自由度を小さくするように動作全体の自由度を組織化していくという運動制御の変容が生じるという仮説が立つ。この運動制御の熟達化に関する著者らの仮説では、その運動制御の変容はそれを反映した身体動作のばらつき

（分散）の変化として観察できるはずである。本研究ではある課題の達成に関わる身体環境系のある種の力学系とみなす [8]。身体環境系を力学系とみなすとき、観察された身体動作の各時点の自由度はその力学系

(身体環境系) から生成された軌道 (動作の軌跡) の各時点のフラクタル次元として捉えられる[2]. 熟達化を調べるにあたっては, 正確さを要する課題であること, 課題の成績を評価しやすいこと, および, 課題の要所を予想しやすいことが求められる. そこで本研究では著者らの先行研究[9]も踏まえて投球課題を用いる. 本発表では投球課題の被験者実験で熟達化に関する著者らの仮説を検討すべく取り組んでいる予備実験の結果を報告する.

2. 身体技能の熟達化の実験

本研究では, 投球課題を例として熟達化に伴う運動制御の組織化を捉えるため, 球技経験の少ない2人の被験者が利き手でない腕でボールを投げる様子を連続する5日間に渡って計測した. 各被験者は, 実験室の決められた位置に立ち, 正面約2メートル先に対面で配置されたボードに向かってボールを投げる. ボードの中央には標的を表す十字のマークが書かれており, 被験者は十字マークの交点めがけてボールを投げるよう教示を受ける. この課題の各試行の評価は, ボード上でボールが当たった位置から十字マークの交点までの距離 (誤差・ミリ単位) とした (ゼロに近いほどよい). 被験者には各試行の結果は数値的にフィードバックしない. 各被験者は, 毎日5分間だけ利き手でない腕でボールを投げるトレーニングをしたあと, 少し休憩し, テストとして10回十字マークの交点めがけてボールを投げた. テストに含まれる10試行の評価 (距離) の平均と分散をその日の成績とした (ゼロに近いほどよい). 本発表ではそのうち課題の成績向上が見られた1名 (被験者Iと呼ぶ) の分析結果を報告する. 身体動作の計測には3次元光学式モーションキャプチャを用い, 利き手でない腕につけた6個マーカをその腕の肩のマーカを原点とした相対座標系で表し分析した.

上記の無制御多様体仮説は低自由度の場合にいくつか実証的な報告があるものの[4][6][7], 高自由度の場合にはデータからその自由度を推定するのは一般に難しい[5]. 身体環境系を力学系とみなすとき, データから各データ点のフラクタル次元 (自由度を特徴づける) を推定する手法が開発されている[3]. 本稿では[3]の分析手法を用いて被験者の身体動作を分析した.

3. 分析結果

図1は, 被験者Iの5日間の成績 (ボールの当たっ

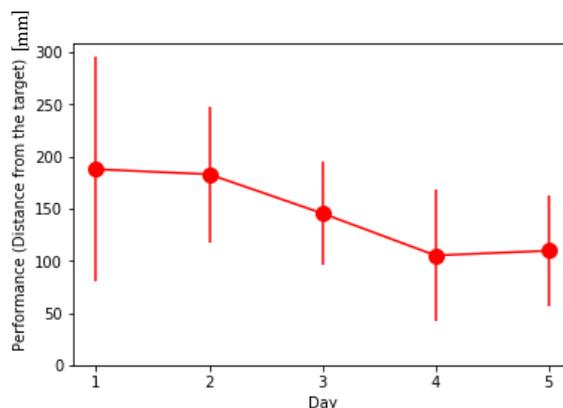


図 1. 投球課題の成績の5日間の変化 (被験者I)

た位置から十字マークの交点までの平均距離とその標準偏差)を示す. 図から, 被験者Iは毎日練習を重ねるごとにその日のテストにおいて平均距離がおおむね減少傾向にある, つまり成績が向上傾向にある. この成績の向上をもって, 本稿では被験者Iは利き手でない腕を用いた投球課題に熟達したとみなす.

投球課題では, 室内で行われ実験環境の違いはほとんどなく, また被験者は基本的に自分の身体とボールだけを用いるので, その成績向上の原因は基本的にはその個人の運動制御の変容にあると考えられる. そこで, この被験者Iの運動制御の変容とくに動作中の自由度の構造変化を調べるため, モーションキャプチャで記録した被験者Iの運動データ (利き手でない腕のマーカのみ) に対して力学系とみなしてその自由度を推定した.

図2 (本稿の末尾頁に掲載) は被験者Iの5日間の運動データから推定した自由度の変化を示す. 図2の各図 (1日目~5日目) では, 横軸は手先に付けたマーカの高さのピーク時点からの相対時間, 縦軸は肩のマーカからの相対的高さである. 各図にはおおむね, 初期のきをつけの姿勢から, ボールを投げる動作に移り, 最後のきをつけの姿勢に戻るまでの一連の動きが含まれている. 点の色は各点の次元 (自由度を特徴づける)を示す. 次元が低いほど自由度は低い. 見やすさのため, 各図には5個のマーカの軌道および次元を各マーカ毎に全10試行分の平均をとって図示した. 熟達化の観点から図2の1日目~5日目を比較すると, 日を経るごとに (練習を重ねるごとに) 手先の高さがピークを迎えるあたりで次元が低くなり, かつ, きをつけからリリースに移行する中間の動作で次元が高くなる傾向がみえる.

4. 議論・考察

ボールを投げる動作のうち、手先の高さがピークあたりで次元が低くなる傾向は、ボール投げ動作ではこの付近はちょうどボールをリリースする時点に相当し、この投球課題で最も正確さを要求される要所だと考えられる。すなわち、課題の要所で身体の自由度を低くし正確さを高めるように、練習を通じて運動制御を変容させているのだと考えられる。また、きをつけからリリースに移行する中間の動作で次元が高くなる傾向は、同じ被験者が同じ課題をやる場合でも厳密に同じ初期状態はありえないが、その上で安定して高い成績を達成するべくその初期条件の違いを吸収できるように高い自由度を保存しているのだと考えられる。

現時点では過度な一般化はできないが、本稿の結果から、利き手でない腕を用いた投球課題の熟達化においては、課題の要所で身体の自由度を下げて正確さを高め、それと同時に、その少し前の動作時点で自由度を上げて初期条件の違いを吸収するというような、ひとつの動作の最中でも取り組んでいる課題の状況や成績に合わせた自由度の組織化（役割の分化）が観察できたと著者らは考えている。

この結果は運動制御の熟達化とは何かを解明するうえで重要な足がかりと与えるだろう。今後は被験者数を増やし、本発表の結果が頑健なものかを確認していきたい。

謝辞

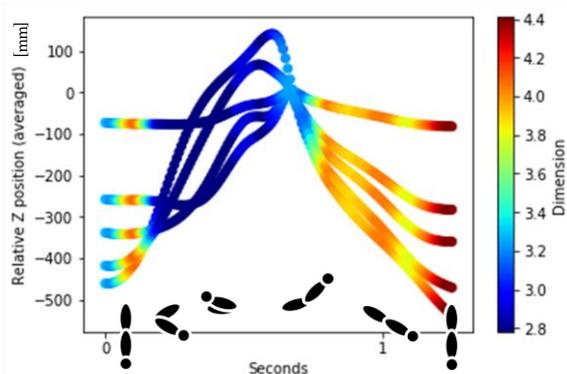
本研究は科学研究費補助金 JP16H05860, JP17H06713 の助成を受けて行われた。

参考文献

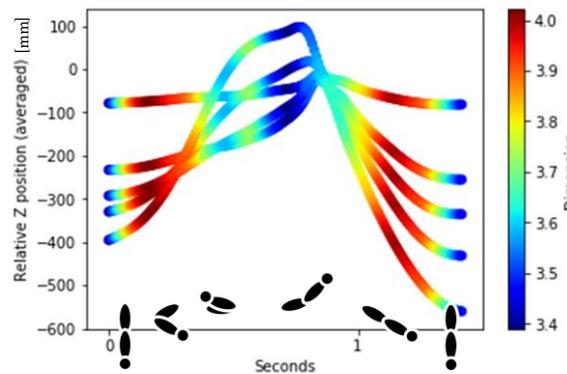
- [1] Bernstein, N.A. (1996) *Dexterity and Its Development*. Psychology Press.
- [2] Cutler, C.D. (1993) A review of the theory and estimation of fractal dimension. In: *Non-linear Time Series and Chaos: Dimension Estimation and Models*, vol. 1, pp. 1-107. World Scientific
- [3] Hidaka, S., Kashyap, N. (2013) On the estimation of pointwise dimension. ArXiv:1312.2298
- [4] Latash, M.L., Scholz, J.P., Schoner, G. (2002) Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, vol. 30, no.1, pp.26-31
- [5] Latash, M.L., Scholz, J.P., Schoner, G. (2007) Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, vol.11,

- pp.276-308
- [6] Scholz, J.P., Schoner, G. (1999) The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, vol.126, pp.289-306
 - [7] Todorov, E., Jordan, M.I. (2002) Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, vol. 5, pp.1226-1235
 - [8] 日高昇平 (2013). 力学的不変量仮説: 運動制御の最適化理論の上位原理として. 第 15 回身体知研究会予稿集, pp.9-15
 - [9] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2017) 利き手と逆の手の比較に基づく熟達技能への実験的アプローチ (大会発表賞寄稿). *認知科学*, vol.25, no.1, pp.122-125

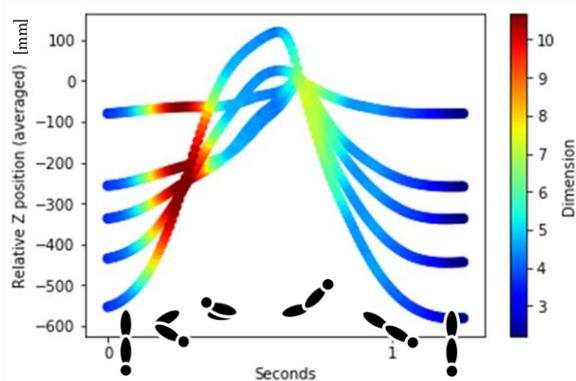
(1日目)



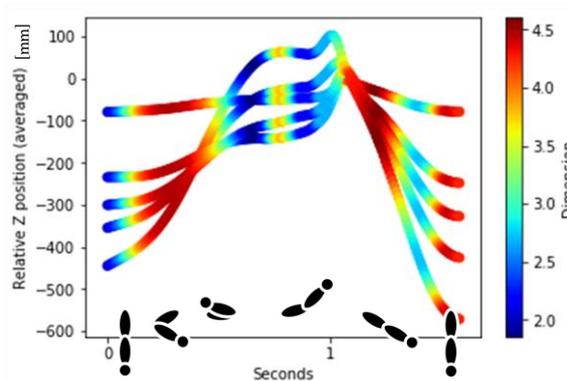
(4日目)



(2日目)



(5日目)



(3日目)

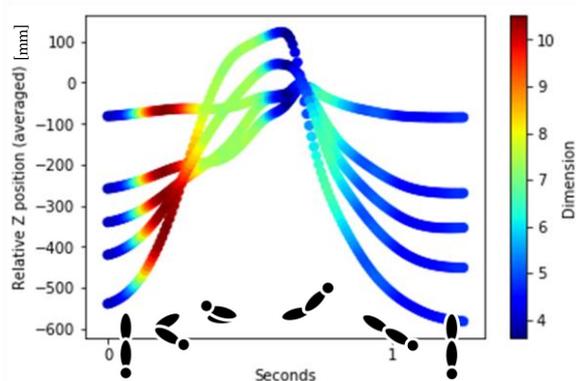


図 2. 運動データから推定した投球動作中の自由度の 5 日間の変化 (被験者 I).
きをつけ → 投げ → きをつけを 10 試行繰り返したときの各マーカーの平均的高さ (Y 軸) と自由度 (色).
各図の下部にはおおまかに投球動作の各時点の腕の姿勢を模式図で示した.