

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13302

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06713

研究課題名（和文）手抜きな運動制御メカニズムとしての身体技能の解明

研究課題名（英文）Toward understanding a mechanism of flexible motor skills

研究代表者

鳥居 拓馬 (Torii, Takuma)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：90806449

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,270,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究ではおもに制御理論および力学系理論の知見を踏まえ、優れた運動制御に関する研究代表者の仮説を提案して理論的・経験的に検討した。具体的には、投球動作に関する実験研究を行い、数人の被験者の投球動作をモーションキャプチャで記録し、複数回の投球動作の軌道のフラクタル次元を分析した結果、ボールのリリース時点（要所）での低次元化を示唆する仮説と整合的な結果をえた。これらの実験結果を理論的に裏づけるため、数値シミュレーションを用いた検討も並列して進め、仮説を支持する結果をえている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の動作は複数の筋や腱や骨や神経細胞など無数の組織の協調で成り立つ。工芸職人や運動選手は優れた能力を発揮できるが、どのような運動制御で実現されるかは未解明の点が多くある。本研究では運動に関する理論に基づき、一流の技能を生み出す優れた運動が力学系のフラクタル次元で特徴づけできると考え、投球動作で検討した。投球動作ではボールをリリースする時点が最も正確さを要する「要所」と考えられるが、実験では予想通りその時点でフラクタル次元が低くなった。課題の要所は一般に言語化しにくい知識すなわち暗黙知だが、今回の結果は運動の暗黙知を動作データから解き明かす基礎的な知見だと考えている。

研究成果の概要（英文）：Based on optimal control theory and dynamical systems theory, this study proposed our hypothesis on a characteristic of flexible motor skills and conducted to test it both theoretically and empirically. By analyzing ball-throwing movements to a target, our results showed reduced fractal dimension near ball release, to be a critical point of the task, that is consistent with our hypothesis. We also augmented our empirical findings with numerical simulations, whose results seem to be matched with it.

研究分野：認知科学

キーワード：運動制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日常生活や制作活動の基盤を担うのが身体である。人は身体を使う課題を“うまく”こなす動作を追求する。ある課題で高い評価をえるには、その課題の評価尺度において、必要な時に必要な量の出す運動制御が要求される。一般的に、高い評価の結果を伴うこうした運動制御は「身体技能」と呼ばれ、専門領域の身体技能をもつ人は熟達者と呼ばれる。

人の認知的活動の多くは、自らの身体を動かし、環境と関わることで成される。そこで人は身体要因の生理的な力に加えて、環境要因の物理学な力を活用できる。熟達した職人の工具使用のような反復動作ではとくに重労働の場合疲労の累積とともに動作の正確さは失われる。そこで熟達した職人は自らの身体の制約を加味したより効率的な運動制御を習得するとされる。

認知科学やスポーツ科学の一部では、古武術的体操術の身体技能「手抜き」(あるいは「抜き」)に着目した研究がある。古武術流の歩行法[脇田 2012](物理的な地球の重力で倒れ進む歩き方)や和太鼓のバチ操作[藤波ら 2004; 中塚・松田 2016](熟達者は意図的な筋肉の弛緩を報告)などで、初心者と熟達者の違いが運動計測データや筋電位の分析で動学的に特徴づけられている。一方で、身体技能の記述自体は熟達者の内観報告(身体技能を熟達者自ら自然言語化したもの)に依拠しており、その記述の妥当性には検討の余地が残されている。

運動制御の数理的記述を与える理論研究を牽引してきたのが最適制御理論や力学系理論である[川人 1996; Todorov 2004; Kelso 1995]。これらの研究には、動作全体での身体的な力(制御入力)の総量最小化[Donelan et al 2008]など、ある意味では入出力に関する身体的制約とも解釈できる側面はあるが、理想的なモデルを中心とするため身体の筋骨格に関する身体的制約はあまり考慮されておらず、現実的な職人の動作を考察するには不十分な点がある。

### 2. 研究の目的

本研究では効率性を高め正確さの持続を可能にする技能を「手抜き」と呼び、身体的制約の下で手抜きを実現する身体環境系の運動制御メカニズムの特徴づけを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では制御理論および力学系理論の観点からこの課題に取り組んだ。具体的には、効率的な運動制御の形成・変化がその制御の生み出す動作すなわち高次元軌道のどのような性質に表れるかを検討した。Bernstein [1949]は人間の身体動作の巧みさ(dexterity)を考察し、身体の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り、同時に自由度の冗長性が運動制御の中心問題だと論じた。動作の巧みさに関しては、無制御多様体仮説や課題制約分散[Todorov & Jordan 2002]などの既存仮説および定量化法が提唱されている。本研究では、力学系理論と最適制御理論に基づき、効率的な制御は正確さを要する要所で低次元化するアトラクタを成すという仮説を立てた。そして、優れた運動制御に関するこうした特徴が高次元軌道のフラクタル次元として捉えられると考えた。課題に即した身体の自由度(次元)の時間的調整は「必要な時に必要な量の出す」という点で手抜きな運動制御の特徴と考えられる。本研究ではこの考えを軸に据え、数値シミュレーションを用いた理論的研究とモーションキャプチャを用いた経験的研究を進めた。

### 4. 研究成果

本研究では、この仮説を検討するため、投球動作に関する実験研究を行った。投球課題では、被験者は数メートル先の的に向かってボールを投げる。ボールの到達位置が的に近いほど高成績となる。投球動作では、ボールをリリースする時点の身体配置が課題の成績にもっとも影響すると予想でき、その点で課題の要所を特定しやすいと考えた。数人の被験者の投球動作をモーションキャプチャで記録し、複数回の投球動作の軌道のフラクタル次元を分析した結果、ボールのリリース時点(要所)での低次元化を示唆する結果をえた(図1)。この結果は査読付国内会議[1]、国際会議[2]、招待有論文誌[3]で報告した。この結果を発展させ、研究代

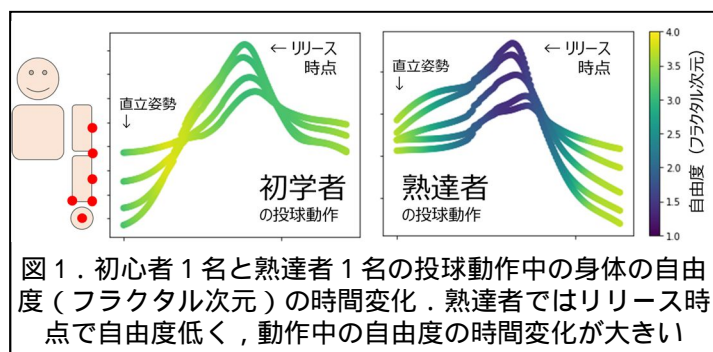


図1. 初心者1名と熟達者1名の投球動作中の身体の自由度(フラクタル次元)の時間変化。熟達者ではリリース時点で自由度低く、動作中の自由度の時間変化が大きい

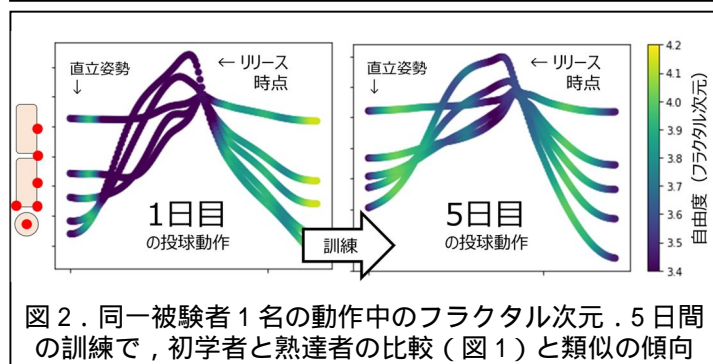


図2. 同一被験者1名の動作中のフラクタル次元。5日間の訓練で、初心者と熟達者の比較(図1)と類似の傾向

表者は、課題の要所付近での運動制御の低次元化が、運動課題への熟達化に伴って生じるという「自由度の時間的分化仮説」を提唱した。この仮説を検証するための予備実験を行い、数人の被験者を5日に渡り追跡調査したところ、一部仮説を支持する結果をえている(図2)。この仮説と結果は査読付国内会議[4]で報告した。優れた運動制御の課題に即した構造に関して、定量的な仮説の形成および肯定的な結果をえられたことは今後の研究を推進する上で重要な成果と思われる。研究代表者は期間中に、被験者15名に対して同様の投球動作データをモーションキャプチャで収集した。以下に述べる理論的分析を踏まえて、今後改めて経験データを分析する予定である。

- [1] 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. 第34回日本認知科学学会大会, 01-3, pp.13-14 【査読有・口頭】
- [2] Torii, T., Hidaka, S. (2017) Characterizing task-specific motor variability in human skilled movements as dynamical invariants: a case study. JSAI International Symposia on AI (JSAI-isaI2017), pp.34-39 【査読無・ポスター】
- [3] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2018) 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(大会発表賞受賞論文). 認知科学, 25(1), pp.122-125 【増補版・招待有】
- [4] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2018) 自由度の時間的分化としての熟達化: 投球動作の分析. 第35回日本認知科学学会大会, s02-4, pp.50-53 【査読有・口頭】

これらの実験結果を理論的に裏づけるため、数値シミュレーションを用いた検討も並列して進めた。最適制御理論で標準的な倒立振り子課題を改変して新たな身体的制約を導入した課題を構築し、その改変した課題を解く運動制御を数値実験で分析したところ、フラクタル次元を用いた動作の特徴づけによって表面的に類似した動作の背後にある異なる制御器を識別できることや、動作のみからその未知なる制御器の直面した課題の性質を推定できることがわかった。これらの結果は、課題に即した運動制御のある側面をフラクタル次元が捉えている可能性を示唆しており、本研究の仮説をある意味で支持する結果といえる。この結果は国内論文誌[3]や国際論文誌[4]、国際会議[5]などで報告した。現在、これらのシミュレーションを発展させ、古典的な多関節ロボットアームでの投球シミュレーションを行い、精度と疲労の観点から最適な制御の生み出す軌道を調べたところ、実験結果と整合的な結果をえている。現実でも野球選手は反復的に投球するために効率的な投げ方を習得していると考えられる。シミュレーションの結果はさらに詳細な分析を進めており、成果発表に向けた準備を進めている。

- [3] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2019) 模倣学習の機序解明に向けた意図推定のモデル化: 倒立振り子課題の分析. 知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌), 31(5), pp.826-833 【査読有】
- [4] Torii, T., Hidaka, S. (2017) Toward a mechanistic account for imitation learning: an analysis of pendulum swing-up. New Frontiers in Artificial Intelligence, pp.327-343 【査読有】
- [5] Torii, T., Hidaka, S. (2018) How can we help others?: a computational account for action completion. The Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2018), pp.2569-2574 【査読有・ポスター】

加えて、本研究では歩行に代表される反復動作に関しても調べた。二足歩行や振り運動などの重力を活かす動作の数値シミュレーションを行い、疲労と速度のトレードオフがより効率的な制御への転換を誘導することを示唆する結果をえた。これに関して、本研究では歩行やダンスなどの人間の動作を計測しており、その熟達度と高次元動作動作の次元が相関する可能性を示唆する結果をえている。経験的結果の一部は国内会議[6][7]などで発表済みである。数値シミュレーションの結果と経験的な結果を組み合わせ、成果発表に向けて研究を進めている。

- [6] 鳥居拓馬, 田村香織, 日高昇平 (2019) 仰臥位での蹴り動作からみる乳幼児の運動発達: 協調パタンの分析. 第19回日本赤ちゃん学会, P-29, p.76 【査読無・ポスター】
- [7] 鳥居拓馬, 日高昇平 (2019) フラダンスの基本動作における下半身部位の同期分析. 第29回身体知研究会, SKL-29-01, p.1-2 【査読無・口頭】

本研究ではおもに制御理論および力学系理論の観点から、数値計算と行動実験を両輪としてこの課題に取り組んだ。これらの分野の知見を踏まえ、優れた運動制御に関する研究代表者の仮説を提案して理論的・経験的に検討し、異なる課題において肯定的な結果をえた。一方で、運動生理学的な知見や計測技術との関連づけを進めることが叶わず、今後の課題とする。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Torii, T., Hidaka, S.	4. 巻 10247
2. 論文標題 Toward a mechanistic account for imitation learning: an analysis of pendulum swing-up	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 New Frontiers in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 327-343
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 鳥居拓馬, 日高昇平	4. 巻 25
2. 論文標題 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（大会発表賞受賞論文）	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 認知科学	6. 最初と最後の頁 122-125
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Le, D.-K., Torii, T., Fujinami, T., Buated, W., Lolekha, P.	4. 巻 1
2. 論文標題 Detecting freezing-of-gait symptom in Parkinson's disease by analyzing vertical motion from force plate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Frontiers in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 468-477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 鳥居拓馬, 日高昇平	4. 巻 31
2. 論文標題 模倣学習の機序解明に向けた意図推定のモデル化：倒立振り子課題の分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌）	6. 最初と最後の頁 826-833
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 剛体の集合としての身体：等長変換下の疎な点の対応づけ
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Torii, T., Hidaka, S.
2. 発表標題 Characterizing task-specific motor variability in human skilled movements as dynamical invariants: a case study
3. 学会等名 JSAI International Symposia on AI (JSAI-isAI2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第34回日本認知科学学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 自由度の時間的分化としての熟達化：投球動作の分析
3. 学会等名 第35回日本認知科学学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Torii, T., Hidaka, S., Fujinami, T.
2. 発表標題 Exploring precursors of Parkinson's disease by characterizing dynamic postural balance in center-of-pressure time series
3. 学会等名 Annual Conference on the Japanese Neural Network Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 櫻井豊, 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 アンダースロー投手の新たな優位点の発見に向けて: 打者からの投球の見えの実験的検討
3. 学会等名 第27回身体知研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥居拓馬, 田村香織, 日高昇平
2. 発表標題 仰臥位での蹴り動作からみる乳幼児の運動発達: 協調パタンの分析
3. 学会等名 第19回日本赤ちゃん学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 フラダンスの基本動作における下半身部位の同期分析
3. 学会等名 第29回身体知研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井豊, 鳥居拓馬, 日高昇平
2. 発表標題 アンダースローの投球は打ちにくいのか? ~VRを用いた実験的検討~
3. 学会等名 第30回身体知研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----