JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	力学系の不変量による身体運動の分節化・認識・生成理論の構築
Author(s)	日高，昇平
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書：1-12
Issue Date	2020-06-05
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/16731
Rights	
Description	若手研究(A)，研究期間：2016～2018，課題番号：16H05860，研究者番号：50582912，研究分野：認知科学

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　 ６ 月　 ５ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｈ０５８６０

研究課題名（和文）力学系の不変量による身体運動の分節化・認識・生成理論の構築

研究課題名（英文）Building a Theoretical Framework of Bodily Action: Segmentation, Recognition, and Generation of Actions Based on Dimensional Invariants.

研究代表者

日高　昇平（Hidaka, Shohei）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：５０５８２９１２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　16,500,000円

研究成果の概要（和文）：人の認知的活動の多くは、他者との身体的な相互作用を通じてなされる。こうした社会的な相互作用の基盤を支えていると考えられるのが、人が固有に有する身体的模倣である。身体模倣の実現には、複数の感覚器・効果器の間で、さらに自己と他者の間で表現を変換する必要があり、高度な計算過程を要する。本研究は、特定の種類の身体運動が固有にもつ力学系の次元を基礎として、身体運動の教師なしの分節化および動作種類の同定が可能である事を実証した。また、特定の運動を生成するための基礎理論の構築を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
身体模倣に内在する基本的な性質を解明することで、我々が他者の動きからどのような情報を得ているか、相手がどんな意図を持つか、などの基礎的なメカニズムの理解へとつながると期待される。将来的には、具体的に、自閉症などの社会的な認知機能の障害とみられる傾向をもつ方の支援や周囲の人たちがとるべきコミュニケーションの方法についての示唆を与えることにつながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Many of our cognitive activities are performed through physical interaction with others. It has been considered that bodily imitation plays one of the central roles in such a social interaction. It is necessary to convert visual representation of other’s bodily action to one’s own motor command, if one performs a bodily imitation, and this requires cross-modal mapping among multiple sensors and effectors. In this study, we built a theoretical foundation of recognition and segmentation of action, and demonstrated it with a time series of bodily movement a in an unsupervised manner based on invariant feature of an underlying dynamical system.

研究分野：認知科学

キーワード：模倣　運動　身体　力学系　意図推定

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

大人を子供が「猿まね」して遊ぶ光景はよく見られる。人は模倣を難なく、また楽しんで行う。一方で、他の動物は特定の限定的な状況や明示的な訓練を除いて、人のように即応的・柔軟な模倣を行わないと考えられている(Hayes, 2001)。また、近年のミラーニューロンの発見により、他者理解をはじめとする社会的認知の基礎メカニズムとして他者運動のシミュレーションの重要性が明らかになりつつある(Iacoboni et al, 2001)。本研究において、模倣とは、他者の動作を知覚し、それを自らの身体で類似の動作を再現する事(mimicry)を指す。その実現には、「見た」他者の体と、「動かす」自らの体の間で、また、複数の感覚・効果器の間で、異なる表現形式(脳の活動部位/計算過程として)の変換を要するため、(模倣の得意な我々にとっては)直感に反して、高度な計算過程である(Meltzoff & Printz, 2002)。実際、制御理論に基づく従来のロボット工学的手法では、自律的な模倣行動の学習は困難である(Breazeal & Scassellati, 2001)。

２．研究の目的

人の認知的活動の多くは、他者との身体的な相互作用を通じてなされる。こうした社会的な相互作用の基盤を支えていると考えられるのが、人が固有に有すると考えられている(身体的)模倣である。身体模倣の実現には、複数の感覚器・効果器の間で、さらに自己と他者の間で表現を変換する必要があり、高度な計算過程を要する。しかし、人が行っているであろうこうした高度な身体の認識や協調動作の生成の理論的な側面に関して、未だ解明されるべき点が多い。本研究は、特定の種類の身体運動が固有にもつ力学系の次元を基礎として、身体運動の教師なしの分節化および動作種類の同定が可能である事を実証する。また、こうした身体運動の認識の原理が、運動の生成系の特定と同一である事を利用し、特定の運動を生成するための基礎理論の構築を目指す。

学術的背景で述べたように、模倣メカニズムの確立は、単に運動学習の理論的な視点や技術的な視点にとどまらず、どのように我々が他者の行為からその意図を推定するのか、という社会認知的な問題の基礎に位置する。これは他の言語学習・知識獲得(デモ・教示による学習)や、教育にも発展性を持ち、模倣が認知科学・社会・発達心理学での大きな関心を集めている理由の一つである。一方、ロボット工学や機械学習の分野では、従来の手動での膨大なロボット制御に代えて、模倣学習ロボットの導入により、そのソフトウェア開発コストの大幅な縮小が可能となる。以上のように、模倣を基礎とする社会的学習の理論構築により、認知科学、発達心理学、ロボット工学、機械学習、非線形力学などの各学術領域にまたがる貢献が期待できる。

３．研究の方法

本研究では上記のプロジェクトを発展させ、手がかりなし(自律的に)で身体運動の時系列データのみから、連続的な運動の分節化、運動種類の同定、および特定の性質を持った運動の生成を行う方法論の構築を目指す。この運動の分節化、同定、および生成は、身体模倣を可能にするために必要最小な情報処理過程である。この３つの目標の達成によって、自律的に運動を認識し、その運動の性質に沿って自らの身体を利用して運動を生成する、という身体模倣の主要な過程を網羅することができる。

人は多様な運動の性質を、点群の運動だけからでも推定・認識できることが知られている(Troje, 2008)。また、理論的な研究からは、機械学習や多変量解析などにより、様々な運動認識のモデルが提案されている(Giese & Poggio, 2003; Troje, 2002)。しかし、各モデルは特定の運動の認識に特化しており、一般的な身体運動の認識過程には未知なる点が多い。特に、歩行など周期性をもつ特殊な運動を超えて、多様な運動種を認識するのに有効な方法が必要である。

これに対し、本研究では、多様な身体運動に対して、動作単位の分節化および認識の理論構築を行う。運動の分節化とは、連続的な身体運動データから、意味の異なる運動の区間を同定することである。周期性を前提としない一般的な運動で、特定の教師信号に基づく学習を使わず、運動を分節化するには各種の困難性がある。これは、同時に動き、互いに時空間的な相関を持つ身体動作のデータから、その多次元状態空間上の運動を簡潔に表現する、より本質的な低次元の特徴空間を発見する問題として捉えられる。

４．研究成果

平成２８－２９年度には、複数の運動の種類、多様な計測条件で、運動分節化の成績の向上を目標として研究を行った。その結果、こうした技術的な課題を解消し、次元推定法の計算の効率化、および、多様な条件で取得された運動データに対する汎化性能の担保・分節化精度の向上を得ることができた。

こうしたデータ分析手法の技術的な改善に加えて、本研究プロジェクトでは、当初の計画に従って研究員を１名雇用して、共同して研究を進めた。具体的には、モーションキャプチャ装置な

どを用いた人の運動を計測する実験系から各種身体運動データを取得する手法の確立、すなわち、運動データの欠落や誤認識などを補正する方法論などを構築した。手動で補正したデータの解析を進めるとともに、より効率的にデータ解析を進めるべくデータ前処理用のインターフェイスおよびデータ補正アルゴリズムの構築を行った。この過程で、データ補正問題の一部は、対応問題と呼ばれる困難な問題の一種であることが判明した。

また、上記のデータ計測・分析と並列的に力学モデルのシミュレーション研究も進めた。この研究から、類似の動作であっても、運動制御系が異なる場合、次元推定法を用いることでその違いを識別できること、さらに異なる運動制御系に相当する類似の運動を生成可能であることなどの知見を得た。

こうした一連の研究成果を総合して、端的に本研究で得られた成果をまとめれば、**「他者の行為の観察から、その行為に潜在する意図や目標を推定し、補完する技術・方法論の基礎」**を構築したと言えるだろう。具体的な研究成果の一つとして以下の、他者の未達成で“失敗した行為”(例えば、手を肩より高く挙げようとしたが、肩が痛く上がらない場合など)を分析し、その運動により行為主が本来達成したかった運動を補完する(肩より高い位置にあるところに手を伸ばして物をつかむ)ために有効な運動特徴を同定できた(図１および以下の研究成果①)。

このように、身体模倣に内在する基本的な性質を解明することで、我々が他者の動きからどのような情報を得ているか、相手がどんな意図を持つか、などの基礎的なメカニズムの理解へとつながると期待される。将来的には、具体的に、自閉症などの社会的な認知機能の障害とみられる傾向をもつ方の支援や周囲の人たちがとるべきコミュニケーションの方法についての示唆を与えることにつながると考えられる。

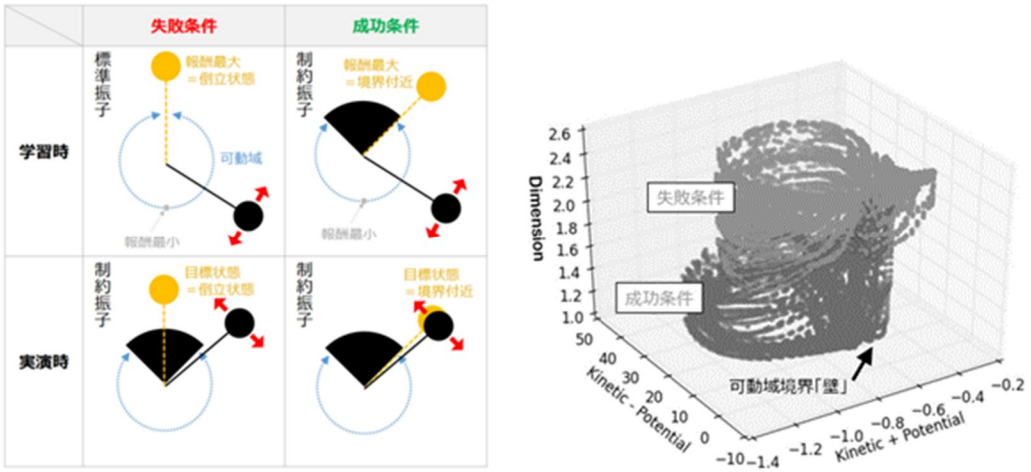

図１：単振り子振り上げ課題（左）における成功(意図と運動の一致)と失敗(同不一致)の場合は、(右)運動の力学的不変量(フラクタル次元; 縦軸)によって識別可能.

以上の研究成果は、研究期間中および研究期間終了後に、以下に列挙する学術論文(査読あり)として発表をした。

① 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：倒立振子課題の分析. 知能と情報 31(5), 826-833.
② Fujinami, T. & Hidaka, H. (2019). A representation of rhythmic motions, New Generation Computing. 37, 185-201. (link)
③ Hidaka S & Oizumi M (2018). Fast and exact search for the partition with minimal information loss. PLoS ONE 13(9): e0201126. (link)
④ 布山 美慕 & 日高 昇平 (2018). 読者の熱中に伴う仮想の変化：仮想の特徴づけとして. 認知科学, 25(2), 188--199.
⑤ 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. 認知科学. 25(1), 122-125.(日本認知科学会第 34 回大会発表賞論文)
⑥ 古川 康一, 諏訪 正樹, & 日高 昇平. (2017) 身体知研究を支える理論・方法論. 人工知能学会論文誌., 32 (2), 222-228. (特集「身体知の発展」).
⑦ 日高 昇平 (2017). 最適化を超えた認知科学の新たなパラダイムに向けて：Marr の情報処理の三水準の再考. 認知科学., 24(1), 67-78. (pdf)
⑧ Buated, W., Lolekha, P., Hidaka, S., & Fujinami, T. (2016). Impact of Cognitive

Loading on Postural Control in Parkinson's Disease with Freezing of Gait., Gerontology and Geriatric Medicine. 2, 1-8. (link)
⑨ 日髙 昇平. (2016) 情報の伝達から理解へ. 人工知能学会論文誌. 31(6). AI30-H_1-10.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計15件（うち査読付論文　12件／うち国際共著　1件／うちオープンアクセス　6件）

１．著者名 TORII Takuma、HIDAKA Shohei	４．巻 31
２．論文標題 Modeling Intention Inference as a Basis of Imitation Learning: Analysis of Pendulum Swing-Up Task	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics	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） https://doi.org/10.3156/jsoft.31.5_826	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Fujinami Tsutomu、Hidaka Shohei	４．巻 37
２．論文標題 A Representation of Rhythmic Motions	５．発行年 2019年
３．雑誌名 New Generation Computing	６．最初と最後の頁 185～201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/s00354-019-00051-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Hidaka Shohei、Oizumi Masafumi	４．巻 13
２．論文標題 Fast and exact search for the partition with minimal information loss	５．発行年 2018年
３．雑誌名 PLOS ONE	６．最初と最後の頁 e0201126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 布山 美慕、日髙 昇平	４．巻 25
２．論文標題 読者の熱中に伴う仮想の変化：仮想の特徴づけとして	５．発行年 2018年
３．雑誌名 認知科学	６．最初と最後の頁 188～199
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11225/jcss.25.188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

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	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） https://doi.org/10.11225/jcss.25.122	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 古川　康一，諏訪 正樹，& 日高 昇平	4．巻 32
2．論文標題 身体知研究を支える理論・方法論	5．発行年 2017年
3．雑誌名 人工知能学会論文誌	6．最初と最後の頁 222-228
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 日高　昇平	4．巻 24
2．論文標題 最適化を超えた認知科学の新たなパラダイムに向けて：Marrの情報処理の三水準の再考	5．発行年 2017年
3．雑誌名 認知科学	6．最初と最後の頁 67-78
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Torii Takuma、Hidaka Shohei	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. JSAI-isAI 2016.	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） https://doi.org/10.1007/978-3-319-61572-1_22	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 －

1．著者名 古川　康一, 諏訪 正樹, & 日高 昇平.	4．巻 32
2．論文標題 身体知研究を支える理論・方法論	5．発行年 2017年
3．雑誌名 人工知能学会論文誌	6．最初と最後の頁 222-228
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 日高　昇平	4．巻 24
2．論文標題 最適化を超えた認知科学の新たなパラダイムに向けて：Marrの情報処理の三水準の再考	5．発行年 2017年
3．雑誌名 認知科学	6．最初と最後の頁 67-78
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 －

1．著者名 日高 昇平	4．巻 31
2．論文標題 情報の伝達から理解へ.	5．発行年 2016年
3．雑誌名 人工知能学会論文誌.	6．最初と最後の頁 AI30-H_1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://doi.org/10.1527/tjsai.AI30-H	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 －

1．著者名 布山 美慕 & 日高 昇平	4．巻 23
2．論文標題 読書時の身体情報による熱中度変化の記述	5．発行年 2016年
3．雑誌名 認知科学	6．最初と最後の頁 135-152
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 －

１．著者名 Hidaka, S	４．巻 43
２．論文標題 Estimating the latent number of types in growing corpora with reduced cost-accuracy trade-off	５．発行年 2016年
３．雑誌名 Journal of Child Language	６．最初と最後の頁 107-134
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 －

１．著者名 Buated, W., Lolekha, P., Hidaka, S., & Fujinami, T.	４．巻 2
２．論文標題 Impact of Cognitive Loading on Postural Control in Parkinson's Disease with Freezing of Gait	５．発行年 2016年
３．雑誌名 Gerontology and Geriatric Medicine	６．最初と最後の頁 1-8
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 Torii, T. & Hidaka, S.	４．巻 未定
２．論文標題 Toward a mechanistic account for imitation learning: an analysis of pendulum swing-up.	５．発行年 2018年
３．雑誌名 New Frontiers in Artificial Intelligence (JSAI-isAI 2016 Workshops)	６．最初と最後の頁 未定
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14件（うち招待講演　2件／うち国際学会　9件）

１．発表者名 Saito, K. & Hidaka, S.
２．発表標題 Analysis of review quality by using gaze data during document review.
３．学会等名 The 41st Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2019)（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名
Torii, T. & Hidaka, S.

２．発表標題
How can we help others?: a computational account for action completion

３．学会等名
The 40th Annual Meeting of the Cognitive Science Society（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Imai, M., Hidaka, S., Saji, N., & Ohba, M.

２．発表標題
Symbol grounding and system construction in the color lexicon

３．学会等名
The 40th Annual Meeting of the Cognitive Science Society（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hidaka, S., Torii, T., & Kachergis, G.

２．発表標題
Quantifying the impact of active choice in word learning

３．学会等名
The 39th Annual Meeting of the Cognitive Science Society（国際学会）

４．発表年
2017年

１．発表者名
Hidaka, S., Torii, T., & Kachergis, G.

２．発表標題
Leveraging mutual exclusivity for faster cross-situational word learning: A theoretical analysis

３．学会等名
The 39th Annual Meeting of the Cognitive Science Society（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
身体運動の模倣メカニズム解明に向けた力学系同定の試み

３．学会等名
第23回身体知研究会．

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
日本認知科学会第34回大会

４．発表年
2017年

１．発表者名
日高　昇平

２．発表標題
特徴の統合によるオブジェクト構成の計算論に向けて

３．学会等名
日本認知科学会第34回大会

４．発表年
2017年

１．発表者名
Torii, T. & Hidaka, S.

２．発表標題
Toward a mechanistic account for imitation learning: an analysis of pendulum swing-up

３．学会等名
The Third International Workshop on Skill Science.（国際学会）

４．発表年
2016年

１．発表者名
Fuyama, M., & Hidaka, S.

２．発表標題
Context-dependent Processes and Engagement in Reading Literature

３．学会等名
The Thirty Fourth Annual Meeting of Cognitive Science Society（国際学会）

４．発表年
2016年

１．発表者名
鳥居 拓馬，日高 昇平

２．発表標題
身体運動の模倣メカニズム解明に向けた力学系同定の試み

３．学会等名
第23回身体知研究会．（国際学会）

４．発表年
2017年

１．発表者名
日高　昇平

２．発表標題
身体運動から意図推定へ：振子振り上げ運動の分析

３．学会等名
日本認知科学会2016年度冬のシンポジウム（招待講演）

４．発表年
2016年

１．発表者名
日高　昇平

２．発表標題
情報の「理解」の定式化に向けて

３．学会等名
日本認知科学会第33回大会

４．発表年
2016年

１．発表者名
Shohei Hidaka

２．発表標題
Machine Consciousness: a Dream to Build a Strong AI.

３．学会等名
The 13th Japanese-German Frontiers of Science Symposium（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2016年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕
Cognitive Computation Lab
http://www.jaist.ac.jp/ks/labs/shhidaka/cogcomp/
認知計算論 Cognitive Computation
http://www.jaist.ac.jp/~shhidaka/

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