

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06565

研究課題名(和文)自己と他者の動作データからの内部モデルの構築と行動則の獲得

研究課題名(英文) Internal model construction by observing others and policy acquisition through self learning

研究代表者

森本 淳(Morimoto, Jun)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：10505986

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 53,500,000円

研究成果の概要(和文)：脳に学んだ計算原理に基づいて自己や他者の動作データから身体や外界の内部モデルを構築するロボット学習アルゴリズムの開発をおこなった。脳の階層的な制御システムを参考に、上位階層において予測に基づく最適化をおこなうことにより多様な動作目的にあわせた制御器を導出することを可能としながら、中間の階層において観測した人の動作データからパターン生成器を構成、動作生成の探索範囲を誘導、下位階層においては短い制御周期での計算が可能な反射的な行動則を導入することを提案、ヒト型ロボットモデルにおいてその実装を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能を用いた画像や音声の認識に関しては飛躍的にその性能が向上している一方で、すばやい身のこなしや、器用な物体の操りなど、ロボットが備える動作生成のための人工知能についてはいまだ人間の方がはるかに高い能力を持つ。特にロボットなど実世界で大量データを取得することが現実的でない応用においては、人間のように限られたサンプル(経験)から学習し目的とする動作を生成する方法が求められている。本研究では、脳の階層的な学習制御システムを参考に、上記を実現する方法論の開発を目指した。ロボットが実環境で学習し多様な運動を実時間で生成可能となれば、日常生活においてもロボットが人を支える存在となり得る。

研究成果の概要(英文)：We introduced a brain-inspired motor learning framework for humanoid robot control. Specifically, we developed a computationally efficient Hierarchical Model Predictive Control (HMPC) method for real-time control of humanoid robots. Although MPC is a highly useful approach to deriving a policy for the control of nonlinear dynamical systems, its application to a robot having many degrees of freedom is still a challenging problem because MPC is quite computationally intensive. To cope with this issue, we developed the HMPC method that implements a three-layer hierarchical optimization procedure where a middle layer modulates pre-acquired movement patterns from captured human motions to guide the top-layer exploration and a lower layer generates reactive movements to quickly cope with external disturbances. We evaluated the proposed method on a simulated model and a real humanoid robot.

研究分野：ロボティクス・機械学習

キーワード：強化学習 モデル予測制御 ヒューマノイドロボット 非線形最適制御

1 . 研究開始当初の背景

人工知能分野において中心的に進められていたディープラーニング研究では、画像認識などセンサデータを理解のために用いることが主な応用であった。ところが研究開始当初、強化学習の代表的な実装方法である Q 学習とディープラーニングにおける画像からの特徴抽出の能力を組み合わせ 1980 年頃に流行した Atari2600 ゲームにおいてエキスパートクラスのスコアを 50 程度のゲームにおいて示す、あるいは碁の欧州チャンピオンを打ち負かす Alpha Go のアルゴリズムなどが大きく取り上げられた。しかし、これらゲームや碁などは、意思決定の部分を除いて状況の時間発展が完全に予測可能である。そのため、高い計算機の能力を活用したシミュレーションにより生成される大量データを用いることで、非常に多くのパラメータを有するディープニューラルネットワークを用いてもそのパラメータを決定するために必要なサイズのデータを集めることが可能であった。しかし一方で、ヒト型ロボットなどの実世界での制御問題を考えた場合には、データを集めるコストが時間的・労力的にあまりに大きいため、同様のアプローチを用いて実世界において人間のように動作するロボットのための人工知能を開発することは困難と考えられていた。事実、米国でおこなわれた DARPA Robotics Challenge においては、多くのヒト型ロボットは与えられたタスクの達成が困難であり、完走したチームにおいてもそのロボットの動きは人間に比べると緩慢なものであった。

2 . 研究の目的

ロボットの実環境における運動学習に関する研究開発を進めてきた実績を背景に、動的な運動を生み出すための、脳に学んだヒト型ロボットの学習アルゴリズムの開発を目指した。それまでの実績としては、数百程度のデータ取得のための試行から、実ロボットの動作学習が可能であることを Sim-to-real 型の強化学習アルゴリズムを用いて示してきた。また、実ロボットから得られた少数のサンプルデータを有効に活用するための、過去の経験を再利用した制御則の改善やそのサンプルデータからの内部モデル推定を通じたシミュレーションによる仮想的な試行を行う強化学習アルゴリズムの提案などにより、少ない経験からでも実ロボットの運動学習が可能であることを示してきた。ある動作目的に対してその動作のデモンストレーションデータが得られる場合、そこから得られる情報を運動学習に用いる見まね学習のアプローチが有用である。限られた数のデモンストレーション動作データから新たな動作目的に対しても汎化的な運動生成を可能とする学習アルゴリズムを開発してきた。そこで、上記の運動学習アルゴリズムの開発の知見を基礎としながらも、脳の階層的な情報処理メカニズムを参考に、他者動作の観察をもとに運動パターンの生成を可能とした上で、同時に内部モデルの獲得を可能とするアルゴリズムの開発を目指した。またその結果構築される内部シミュレーションモデルと運動生成のためのモデルベースの強化学習システムの階層的結合により効率的な運動学習の枠組みの導出を目的とした。

3 . 研究の方法

人間の脳のように巧みに自己と他者の経験を活かし、ヒト型ロボットの運動能力を向上するための方法論の研究を進めた。具体的には、自己の身体動作を通じて外界からサンプルしたデータを用いるだけでなく、人の動きを見て学ぶなど、他者の動作データも自己の運動改善に役立てることを考えた。少ないサンプルデータをできる限り有効に用いながら、内部モデルを構築、そこから生成されるデータに基づく効率的な運動学習を実現する脳に学んだ階層的学習アルゴリズムの開発を段階的に行なった。

制御対象のモデルが既知（つまり計算機内に表現可能）であり、時間の制約がなくオフラインでの制御器の導出が許される場合は、モデルベースの最適化を用いた手法が多自由度ロボットの制御に有用となり得る。しかし、実環境でのロボットのリアルタイム制御をおこなう場合には、特に衝突や接触などの実環境を反映したモデルを計算機内に表現することがむずかしく、また制御周期内に制御器導出のための最適化計算が収まらないなどの問題があり、一般には上記手法のそのままの活用は容易ではない。

そこで、次の二つのアプローチについて主に研究を進めた。一つ目としては、複数の時間スケールを導入した階層的なモデルベースの強化学習手法を開発した。具体的には、まずヒト型ロボットの動力学的特性の理論的解析を通じた階層構造の抽出を行った。時間スケールの短い四肢の動作生成を行なうシステムと、時間スケールの長い重心動作が支配的となる全身動作の最適化を行なうシステムを持つ階層的なヒト型ロボットの運動学習の方法論を開発した。

二つめのアプローチとして、脳の階層的な制御システムを参考に、上位階層においてモデルベ

一歩の強化学習により多様な動作目的にあわせた制御器を導出することを可能としながら、中間の階層において（モーションキャプチャした）他者の動作データからパターン生成器を構成、動作生成の探索範囲を誘導、下位階層においては短い制御周期での計算が可能な目標軌道追従制御を導入することを提案した。

4. 研究成果

一つ目のアプローチについて、ヒト型ロボットモデルにおいて、歩行、走行などの周期運動に加えて、座る、立つ、ジャンプなどの離散運動を実時間で生成可能であることを、シミュレーション実験を通じて示した。階層的な運動学習システムにおいて階層ごとに異なるモデル予測の時間的な長さおよび、異なる制御周期を導入することにより、多自由度のヒト型ロボットモデルにおいても実時間での運動制御出力の導出が可能となった。実環境においても、開発した階層的な運動学習システムはリアルタイムで作動することが確認できた。一方で、ヒト型ロボットモデルの動力学シミュレータを用いたリアルタイム制御の検証においては、目的関数を動的に切り替えることによって、適応的に多様な動作を生み出すことができるかどうかについて検討を進め、それが可能であることをシミュレーション実験的に示した。特に、階層構造を用いない場合との比較を行い、従来法では、リアルタイムで多自由度の動作を生成できないような課題において、提案する階層的なアプローチを用いた場合には、限られた計算コストで目的とするタスクに対して十分な動作性能をリアルタイムで発揮できることが分かった。具体例として、開発した階層的なモデルベースの強化学習を、ヒト型ロボットのスケートタスクに適用した。この運動課題では、足部にローラーを装着したロボットが様々な斜面の上を滑る。このようなタスクでは、全身のダイナミクスを考慮することが重要となる。実環境における実験では、油圧駆動ヒト型ロボットを用いた。

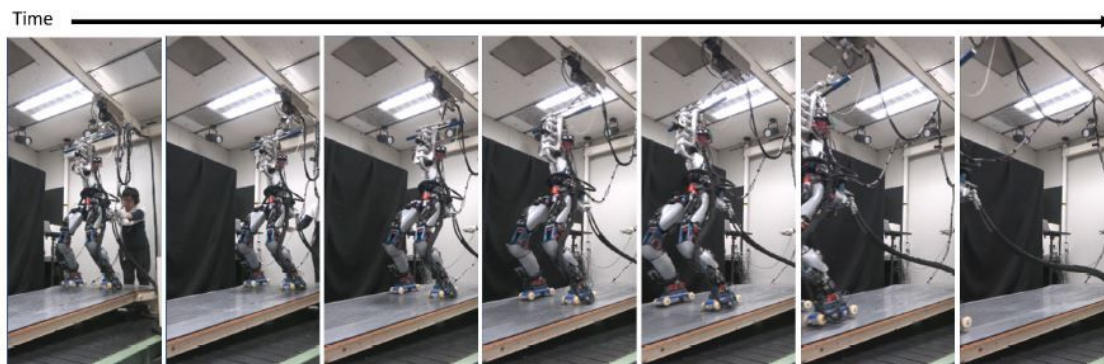


図 1：ヒト型ロボットの実環境における動作生成

提案した階層的なモデルベースの強化学習と階層構造を持たない従来の方法の計算時間の比較を行った。二つのシミュレーション環境において比較を行い、計算時間を大きく削減できることを明らかにした。計算時間を短縮したことで、短い制御周期での実時間制御が可能になり、ロボットは多様な運動を生成できるようになった。例えば、前方、後方宙返りのようなダイナミックな運動を生成することができた。また、実ヒト型ロボットが、スロープを滑降する運動を生成することも可能となった（図 1）。

二つ目のアプローチにおいては、他者の動作データからパターン生成器を構成、動作生成の探索範囲を誘導、下位階層においては短い制御周期での計算が可能な目標軌道追従制御を導入することで、一つ目のアプローチのみを用いる場合にくらべて上位階層での制御周期を長く取れるようになり、ヒト型ロボットモデルにおいてリアルタイムでより多様な動作生成が可能となった（図 2）。下位階層での柔軟な関節制御の実現は実システムへの実装過程における接触・衝突の扱いの難しさを緩和する。学習試行を通じてその柔軟さを適応させながら、モデルベースの強化学習に用いる内部モデルを更新する当初目標とした方法論の創出を達成した。

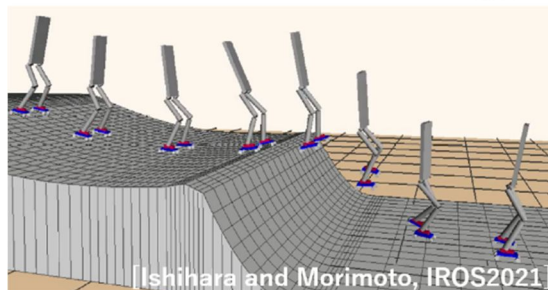
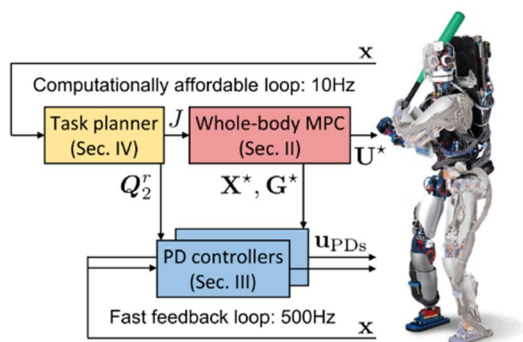


図 2：他者の動作データを活用するモデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Matija Mavsar, Barry Ridge, Rok Pahic, Jun Morimoto, Ales Ude	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Simulation-Aided Handover Prediction From Video Using Recurrent Image-to-Motion Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	6. 最初と最後の頁 1 - 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNNLS.2022.3175720	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 該当する
1. 著者名 Yutaka Matsuo, Yann LeCun, Maneesh Sahani, Doina Precup, David Silver, Masashi Sugiyama, Eiji Uchibe, Jun Morimoto	4. 巻 152
2. 論文標題 Deep learning, reinforcement learning, and world models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 267-275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.03.037	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 該当する
1. 著者名 Takeshi D. Itoh, Koji Ishihara, Jun Morimoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Implicit Contact Dynamics Modeling With Explicit Inertia Matrix Representation for Real-Time, Model-Based Control in Physical Environment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 360-377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01465	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 Tom Macpherson, Masayuki Matsumoto, Hiroaki Gomi, Jun Morimoto, Eiji Uchibe, Takatoshi Hikida	4. 巻 144
2. 論文標題 Parallel and hierarchical neural mechanisms for adaptive and predictive behavioral control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 507-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2021.09.009	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 石原 弘二, 森本 淳	4. 巻 39
2. 論文標題 全身のダイナミクスを考慮した最適制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 597-600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.597	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 Rok Pathic, Barry Ridge, Andrej Gams, Jun Morimoto, Ales Ude	4. 巻 127
2. 論文標題 Training of deep neural networks for the generation of dynamic movement primitives	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 121-131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2020.04.010	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 該当する

1. 著者名 Guilherme Maeda, Okan Koc, Jun Morimoto	4. 巻 129
2. 論文標題 Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot controls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 109-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2020.04.007	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 Koji ISHIHARA, Takeshi D. ITOH, Jun MORIMOTO	4. 巻 15
2. 論文標題 Full-body optimal control toward versatile and agile behaviors in a humanoid robot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 119-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2947001	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 T.Gaspar, B.Nemec, J.Morimoto, A.Ude	4. 巻 100
2. 論文標題 Skill learning and action recognition by arc-length dynamic movement primitives	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 225-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2017.11.012	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 K.Ishihara, J. Morimoto	4. 巻 99
2. 論文標題 An optimal control strategy for hybrid actuator systems: application to an artificial muscle with electric motor assist	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 92-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2017.12.010	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 Jun Morimoto	4. 巻 2
2. 論文標題 Soft humanoid motor learning	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Robotics	6. 最初と最後の頁 eaaq0989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/scirobotics.aaq0989	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 森本淳	4. 巻 69
2. 論文標題 ヒト動作の模倣によるヒト型ロボット動作学習	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生体の科学	6. 最初と最後の頁 51-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11477/mf.2425200754	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 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 Koji Ishihara, Jun Morimoto
2. 発表標題 Computationally Affordable Hierarchical Framework for Humanoid Robot Control
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本 淳
2. 発表標題 ロボットの階層的な運動制御
3. 学会等名 生理研研究会「人工知能技術と科学の協調と展開」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本 淳
2. 発表標題 ロボット学習における身体・環境モデルの活用
3. 学会等名 第15回Motor Control研究会 シンポジウム 「柔軟な行動・運動を支える並列・階層的な情報処理」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Ishihara, Jun Morimoto
2. 発表標題 MPC for humanoid control
3. 学会等名 Robotics Science and Systems (RSS) Workshop, Robotics Retrospectives (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun MORIMOTO
2. 発表標題 Motor learning algorithms
3. 学会等名 Skolkovo Robotics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Barry RIDGE,Rok PAHIC,Ales UDE,Jun MORIMOTO
2. 発表標題 Learning to write anywhere with spatial transformer image-to-motion encoder-decoder networks
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Barry RIDGE,Rok PAHIC,Ales UDE,Jun MORIMOTO
2. 発表標題 Convolutional encoder-decoder networks for robust image-to-motion prediction
3. 学会等名 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region(RAAD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本淳
2. 発表標題 状態予測に基づくロボットの階層的な運動制御
3. 学会等名 第13回Motor Control研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Rok PAHIC,Andrej GAMS,Ales UDE,Jun MORIMOTO
2 . 発表標題 Deep encoder-decoder networks for mapping raw images to dynamic movement primitives
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Jun MORIMOTO
2 . 発表標題 Humanoid motor learning from observed human behaviors
3 . 学会等名 Joint Workshop of UCL-ICN,NTT,UCL-Gatsby,and AIBS (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Guilherme MAEDA,Okan KOC,Jun MORIMOTO
2 . 発表標題 Reinforcement learning of phase oscillators for fast adaptation to moving targets
3 . 学会等名 Conference on Robot Learning(CoRL2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Jun MORIMOTO
2 . 発表標題 Model-based approaches to humanoid motor learning
3 . 学会等名 5th CiNet Conference, Computation and Representation in Brains and Machines (招待講演)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishihara, J. Furukawa, J. Morimoto
2. 発表標題 A forward and inverse optimal control framework to generate humanoid robot movements with hierarchical MPC
3. 学会等名 3rd Multidisciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making(RLDM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ude, R. Vuga, B. Nemeč, J. Morimoto
2. 発表標題 Trajectory representation by nonlinear scaling of dynamic movement primitives
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森本淳
2. 発表標題 ヒューマノイドロボットの運動学習
3. 学会等名 第16回Kフォーラムざっくばらんフォーラム「情報学からの価値創造」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ishihara, J. Morimoto
2. 発表標題 A hierarchical model predictive control approach to generate biped robot movements in real-time
3. 学会等名 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots(SIMPAR2016) Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 森本淳、杉本徳和	4. 発行年 2016年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 これからの強化学習 「高次元・実環境における強化学習」	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 制御システム	発明者 伊藤健史、石原弘二、森本淳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-215401	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ロボット制御装置、ロボット制御方法、および、プログラム	発明者 石原 弘二、森本 淳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-96353	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スロベニア	Jozef Stefan Institute		