

令和 6 年 4 月 26 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04265

研究課題名（和文）ヒトとの物理的接触モデルを紐解く深層学習の開発と安全なロボット制御への応用

研究課題名（英文）Development of deep learning to reveal physical human-robot interaction and its application to safe robot control

研究代表者

小林 泰介（Kobayashi, Taisuke）

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教

研究者番号：10796452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、多自由度系のロボットとヒトとの物理的接触を安全にするための学習制御技術を開発するものである。この課題に関連して主に、i) ツァリス統計に基づく整った潜在空間の抽出技術、ii) 強化学習による行動の平滑化技術、iii) Sim-to-Realの多目的強化学習としての新理論、iv) ノイズ・外れ値に頑健な確率的勾配降下法、の4つの技術的成果と、i) ヒトとロボットの間接的な物理的接触を含む周期動作の解析、ii) 離散的に接触状況が変わる脚ロボットの歩行計画、の2つの応用に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の技術的成果はどれも、本研究の想定する物理的接触を含む問題を通じて開発された一方で、そのみで機能するような限定的に組み立てられた技術ではなく、より多くの問題での活躍が期待されるような理論的かつ汎用的なものとなっている。これは、実用性を志向することで機械学習分野に広がりをもたらし、高い学術的意義がある。また、これらの技術やその開発を通じて得られた知見により、物理的接触を含むような実ロボットの制御やインタラクションの解析などを達成しており、従来よりも複雑な社会的に需要のある作業へのロボット導入へと繋がるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop learning and control techniques for safe physical interaction between robots and humans. In relation to this scenario, four technical results have been obtained mainly: i) a well-formed latent space extraction technique based on Tsallis statistics; ii) a smoothing technique for reinforcement learning action; iii) a new theory of Sim-to-Real as multiobjective reinforcement learning; and iv) a stochastic gradient descent method robust to noise and outliers. In addition, two applications have been conducted mainly: i) analysis of periodic motion of indirect physical human-robot interaction; and ii) footstep planning of bipeds with discrete changes of contact states.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：深層学習 強化学習 潜在空間抽出 確率的勾配降下法 ヒューマンロボットインタラクション

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボットがヒトや環境との物理的接触を含むような複雑作業を効率良く達成するには、ロボットが試行錯誤的に行動規則を獲得する強化学習が有効と考えられるが、その際に接触は状態遷移を複雑化するため注意深く扱わなければならない。しかし、厳密な接触モデルを記述しようとすると、その接触箇所の多様性から組合せ爆発が生じてしまい非現実的な問題となってしまう。そのため、これまでの多くのロボットは、接触を扱う際に接触条件を限定することで単純な接触モデルを利用してきた。

しかし、我々ヒトはそのような複雑な接触を日常的に扱っていることから、計算コストが爆発する厳密な接触モデルはもちろんのこと、過度に単純化され用途が限定的である接触モデルでもない、より適切な塩梅の接触モデルを活用しているものと考えられる。このような数理的厳密性は近似・簡略化しつつも十分な表現力を持つような接触モデルの構築と、接触に関連する技術的課題の解決、それらのロボット制御への応用が望まれる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ロボットが物理的接触を含むような作業時に得られるマルチモーダルな高次元観測データを接触に関する情報を含む低次元の重要な情報のみで構築される潜在空間へと抽出・圧縮する深層学習技術の確立である。また、接触に関連する技術的課題を解決するような学習技術の改良を図る。そして、物理的接触を含むようなロボット制御へと開発した要素技術を活用して検証する。

3. 研究の方法

本研究では、まずは要素技術の開発を進める。得られた要素技術とその開発を通じて得られた知見を駆使してロボット応用を実施し、その実用性を検証する。具体的には、主に以下の4つの要素技術の開発と、2つのロボット応用に取り組んだ。

要素1. ツァリス統計に基づく整った潜在空間の抽出技術

深層学習技術の一つである変分オートエンコーダをツァリス統計に基づき再定式化することで、従来よりも潜在空間の各軸が独立となるように適切に解きほぐされた抽出を可能にする。また、その挙動の発現条件を解析する。

要素2. 強化学習による行動の平滑化技術

強化学習でしばしば起こる過度な行動の変動により誘発される意図せぬ接触や衝突を回避するために、作業性能を劣化させない範囲で行動を平滑化する新たな正則化を局所リブシツ連続性に従って開発する。

要素3. Sim-to-Realの多目的強化学習としての新理論

シミュレーションと実ロボットとの間で挙動差が生じやすい接触のような事象に効率良く対処すべく、ドメイン乱択化・適応の理論を多目的強化学習として解釈を改めることで新たな強化学習アルゴリズムを開発し、汎化性能を改善する。

要素4. ノイズ・外れ値に頑健な確率的勾配降下法

接触を含むような作業では観測ノイズ・外れ値がデータに混入しやすく深層学習を破綻させるため、学習の基礎となる確率的勾配降下法をノイズ・外れ値に頑健となるようスチューデントの t 分布に基づいて設計・改善する。

応用1. ヒトとロボットの間接的な物理的接触を含む周期動作の解析

適切な潜在空間を抽出することの有用性を確認するために、ヒトとロボットが協同してロープを操作するタスクにおける操作方法のクラスタリングを、動作の周期性に注目して複素型ネットワークにより周期性を内包した潜在空間を構築することで改善する。

応用2. 離散的に接触状況が変わる脚ロボットの歩行計画

接触状況が歩行のたびに変わる脚ロボットの歩行計画を通じて接触の明示的な考慮の有効性を確認するために、異なる接触状況におけるダイナミクスと接触時のダイナミクスを別々のモデルとして学習することで予測精度および歩行計画の成功率の向上を図る。

4. 研究成果

要素 1. ツァリス統計に基づく整った潜在空間の抽出技術

従来の変分オートエンコーダが観測データに関する対数尤度の最大化問題を出発点としていたところ、本提案ではツァリス統計に基づく q -対数尤度の最大化問題へと拡張した。適切に最適化問題を整理していくと、従来であれば、潜在空間は観測データの再構成と事前分布への正則化の2要素の単純な荷重和を持つ目的関数を解くことで構築される一方で、提案手法では、この2つの積を持つことが判明した。そのため、従来は2つの目的のバランスを調整するのが困難であったが、提案手法では2つの目的が両立し得ない限り目的関数が最大化できないため、自然と観測データを再構成する能力を得つつも可能な限り事前分布に従うような潜在空間の抽出が可能となった。また、この挙動が常に成立するための重み付け条件を解析的に明らかにした。

実際にシミュレーションおよびロボット実験で提案手法による潜在空間の抽出性能を検証したところ、従来よりも少ない潜在次元数で高い観測データの再構成精度を得られることが確認できた (図 1)。また、このような高効率の次元圧縮はロボット制御をする上でも動作の最適化を高速にでき、結果として制御性能の向上にも寄与することを確認した。本成果は国際学術論文誌に2編採録された。

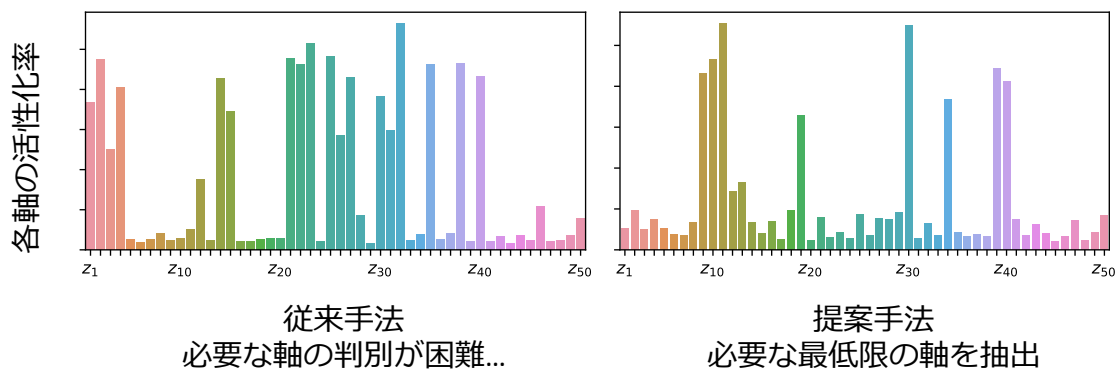


図 1 ツァリス統計に基づく新しい潜在空間の抽出技術

要素 2. 強化学習による行動の平滑化技術

一般的な強化学習では、ある時刻の行動はそのときの状態にのみ依存する上に、過学習の生じやすい問題設定であるため、最適化された行動は僅かな観測ノイズにも過敏に反応して急変してしまうことがある。この問題を抑制する従来研究ではリプシッツ連続性に関する正則化を導入していたが、これは行動方策の表現力を制限してしまうため、タスクによっては制御性能を劣化させてしまうことがわかった。そこで新たに、状態遷移より規定される局所空間内でのリプシッツ連続性に関する正則化へと範囲を限定することで、表現力を維持したまま行動の平滑化をもたらす手法を開発した。合わせて、強化学習における価値関数に対しても同様の正則化を施すことで、ブートストラップ型の学習を安定化させる作用をももたらした。

提案手法を部分観測問題となっている四脚ロボットによる物体運搬シミュレーションに適用したところ、従来よりも学習過程における過学習を抑制するとともに、学習後の行動のリミットサイクルが安定化し、着地時の外乱を抑制して安定して物体を運搬できることを示した (図 2)。本成果はフラッグシップ国際会議にて1件発表・受賞された。

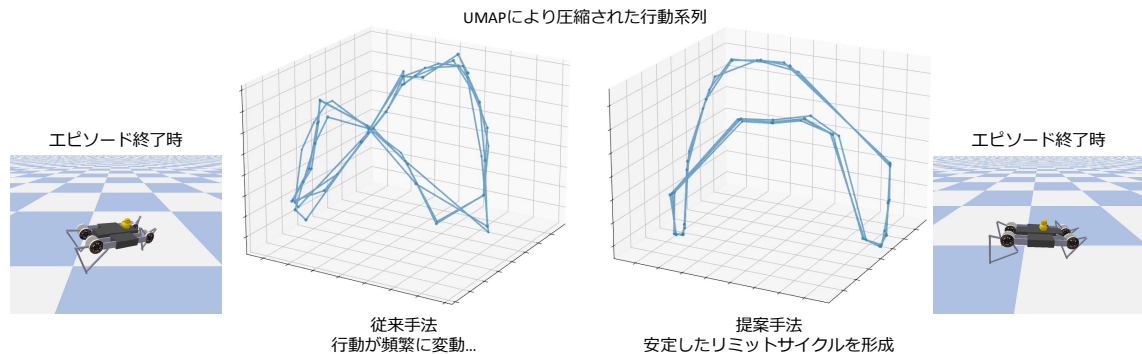


図 2 局所リプシッツ連続性に対する正則化技術

要素 3. Sim-to-Real の多目的強化学習としての新理論

強化学習を用いたロボット制御において、近年ではシミュレーションで多様な状況・設定を学習させておき、ゼロショットで実機へと方策を転移する Sim-to-Real が普及してきている。この際に多様な経験を積ませる手段がドメイン乱択化であり、実環境が過去に経験した状況の何れかに類似することを判断するのがドメイン適応である。しかし、これらはヒューリスティックに開発が進められてきた技術であり、理論的な背景が不足していたため、その改良もまたヒューリスティックに為されることが多かった。そこで、各状況を別々の目的として捉えることで多目的強化学習の枠組みに当てはめる新理論を提唱した (図 3)。これにより、多目的強化学習の文脈で開発されてきたアルゴリズムを Sim-to-Real の文脈へと援用することを可能にし、より理論的に効率的・汎用的な体系を確立した。

開発した複数アルゴリズムをシミュレーションおよび物理的接触を伴うロボットハンドによるバルブ回しタスクに適用したところ、従来手法よりも多くの状況において高い制御性能を獲得できた。また、理論的に学習性能が高いと予見されたアルゴリズムが期待通りに優れた汎化性能を発揮し、理論の妥当性を示した。本成果はフラッグシップ国際会議にて 1 件発表され、国内会議ながらも受賞を果たした。

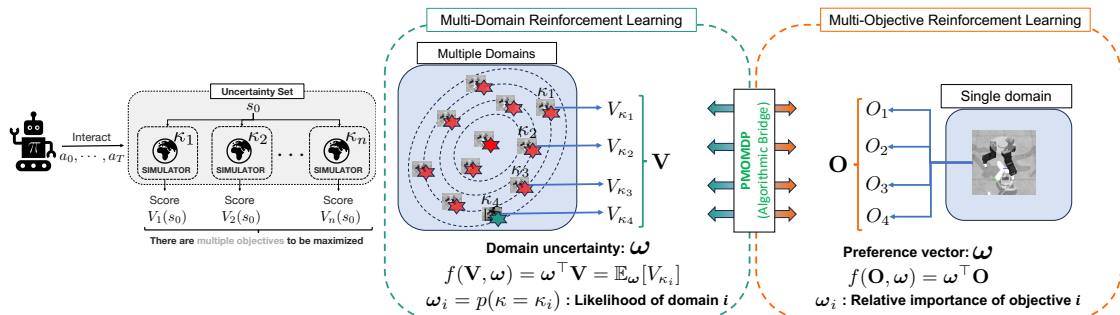


図 3 多目的強化学習と Sim-to-Real におけるドメイン乱択化・適応のアナロジー

要素 4. ノイズ・外れ値に頑健な確率的勾配降下法

実世界におけるセンサによる観測はノイズ・外れ値を完全に排除することはできず、物理的接触を含むような作業ではより顕著である。さらに、そのノイズ・外れ値の混入度合いは未知である。そこで、深層学習において最適化に用いられる確率的勾配降下法が勾配の一次・二次モーメントを近似する際にガウス分布に基づいている点に注目した。すなわち、この近似をノイズ・外れ値に頑健で、その頑健度合いをパラメータで指定可能な学生分布の t 分布に基づいて実現することで、ノイズ・外れ値に頑健な確率的勾配降下法を新たに導出した。また、先行研究において同様の着想を部分的に適用した手法が開発されていたものの、本提案では更新則全体をこの着想に基づき統一的に定式化したことで、その設計に必要なハイパーパラメータの削減を実現した。

提案手法を機械学習分野で代表的な複数のベンチマーク課題で検証したところ、従来ではノイズ・外れ値が混入されるごとに性能が顕著に劣化する一方で、提案手法はその抑制に成功した。また、ノイズ・外れ値への頑健度合いの自動調整をより精度良く実現可能な手法へと改善した (図 4)。本成果は国際学術論文誌に 1 編採録された。

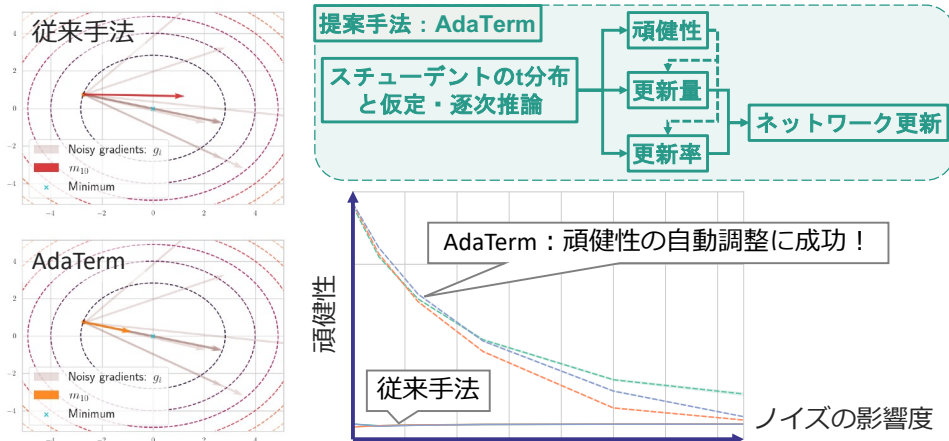


図 4 ノイズ・外れ値に頑健な確率的勾配降下法

応用 1. ヒトとロボットの間接的な物理的接触を含む周期動作の解析

より実践的なシナリオを通じて適切な潜在空間を抽出することの重要性を確認するために、ヒトとロボットがロープを通じて間接的に物理的接触を伴うロープ操作タスクを実施した(図5)。このとき、操作方法を8種類に分けてデータセットを収集し、それを基にヒトとロボットのインタラクションを表現するためのアーキテクチャを開発した。特に、全操作方法に共通する特徴である周期性を陽に考慮すべく、複素型のネットワークを設計することで、時系列データに潜む潜在的な周期性を捉えやすくした。

この結果、従来ではクラスタが混在してしまうような時系列データに対しても、適切にその周期性という特徴を捉えることでより正確なクラスタリングに成功した。また、アーキテクチャ内で合わせて学習したロボットの方策を駆使することで、ヒト主導のロープ操作に追従する形で協調動作を達成した。本成果は国際学術論文誌に1編採録された。

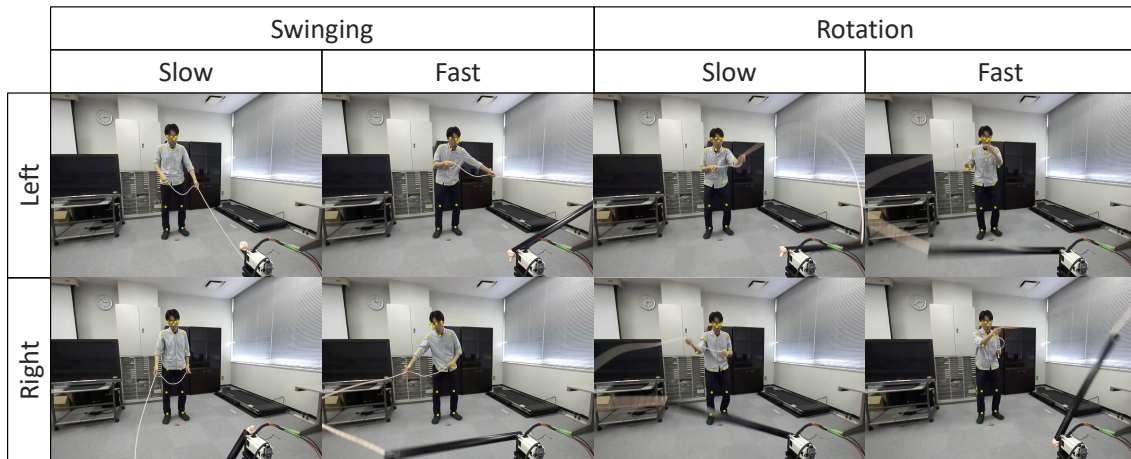


図 5 ロープを介したヒトとロボットの周期的インタラクション

応用 2. 離散的に接触状況が変わる脚ロボットの歩行計画

接触状況によってダイナミクスや制御器が切り替わる脚ロボットの歩行計画を通じて接触の明示的な取り扱いの重要性を検証した。ロボットはリミットサイクルに基づく安定化を想定した歩行制御器を用いているため、任意の着地位置に応じた安定な歩行軌道は得られず、常に着地位置に応じた将来の安定性を予測する必要がある。このとき、将来を予測するためのアーキテクチャとして、接触状況ごとのダイナミクス(単脚支持期と両脚支持期)と接触時のダイナミクスを別々のモデルとして学習する構造を設計した。

このアーキテクチャを活用することで、End-to-End で陰的に接触を含むダイナミクスを予測した場合よりも高い予測精度を獲得した。また、着地位置が制限された環境下でも着地位置をモデル予測制御により都度調整することで、着地位置制約と安定性を満たしながら複数の目標地点までの歩行シミュレーションに成功した(図6)。本成果は国際学術論文誌に1編採録された。

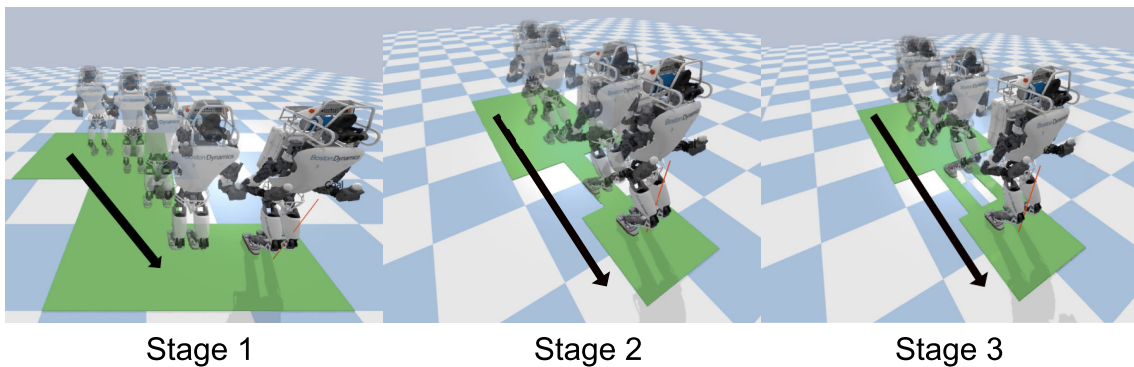


図 6 接触を陽に考慮した着地位置制約付き歩行計画

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ilboudo Wendyam Eric Lionel, Kobayashi Taisuke, Matsubara Takamitsu	4. 巻 557
2. 論文標題 AdaTerm: Adaptive T-distribution estimated robust moments for Noise-Robust stochastic gradient optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Neurocomputing	6. 最初と最後の頁 126692 ~ 126692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neucom.2023.126692	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 Jin Takanori, Kobayashi Taisuke, Matsubara Takamitsu	4. 巻 38
2. 論文標題 Constrained footstep planning using model-based reinforcement learning in virtual constraint-based walking	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 525 ~ 545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2024.2336253	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 Kobayashi Taisuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Reward bonuses with gain scheduling inspired by iterative deepening search	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Results in Control and Optimization	6. 最初と最後の頁 100244 ~ 100244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rico.2023.100244	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 Kobayashi Taisuke, Watanuki Ryoma	4. 巻 37
2. 論文標題 Sparse representation learning with modified q-VAE towards minimal realization of world model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 807 ~ 827
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2221715	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 Kobayashi Taisuke, Murata Shingo, Inamura Tetsunari	4. 巻 52
2. 論文標題 Latent Representation in Human-Robot Interaction With Explicit Consideration of Periodic Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Human-Machine Systems	6. 最初と最後の頁 928 ~ 940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THMS.2022.3182909	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 Kobayashi Taisuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Proximal policy optimization with adaptive threshold for symmetric relative density ratio	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Results in Control and Optimization	6. 最初と最後の頁 100192 ~ 100192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rico.2022.100192	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 Kobayashi Taisuke	4. 巻 151
2. 論文標題 Adaptive and multiple time-scale eligibility traces for online deep reinforcement learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 104019 ~ 104019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2021.104019	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 Watanuki Ryoma, Kobayashi Taisuke, Sugimoto Kenji	4. 巻 40
2. 論文標題 Sparse Latent Space Acquisition with Variational Autoencoders Based on Tsallis Statistics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 251 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.40.251	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 Kobayashi Taisuke	4. 巻 5
2. 論文標題 q-VAE for Disentangled Representation Learning and Latent Dynamical Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5669 ~ 5676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3010206	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 Kobayashi Taisuke, Ilboudo Wendyam Eric Lionel	4. 巻 136
2. 論文標題 t-soft update of target network for deep reinforcement learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 63 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2020.12.023	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 武田 敏季, 小林 泰介, 杉本 謙二	4. 巻 -
2. 論文標題 拡大Tchebyshev関数を用いた多目的最適化としての潜在ダイナミクスモデルの学習	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 -
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19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Ilboudo Wendyam Eric Lionel, Kobayashi Taisuke, Matsubara Takamitsu
2. 発表標題 Domains as Objectives: Multi-Domain Reinforcement Learning with Convex-Coverage Set Learning for Domain Uncertainty Awareness
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kobayashi Taisuke
2. 発表標題 Consolidated Adaptive T-soft Update for Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 IEEE World Congress on Computational Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kobayashi Taisuke, Jin Takanori
2. 発表標題 Mirror-Descent Inverse Kinematics with Box-constrained Joint Space
3. 学会等名 World Congress of the International Federation of Automatic Control (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kobayashi Taisuke
2. 発表標題 L2C2: Locally Lipschitz Continuous Constraint towards Stable and Smooth Reinforcement Learning
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ilboudo Wendyam Eric Lionel, Kobayashi Taisuke, Matsubara Takamitsu
2. 発表標題 Noise-Aware Stochastic Gradient Optimization with AdaTerm
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ilboudo Wendyam Eric Lionel, Kobayashi Taisuke, Matsubara Takamitsu
2. 発表標題 Reformulating Multi-Domain Reinforcement Learning under a Pseudo Multi-Objective Reinforcement Learning Framework
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 慶一郎, 小林 泰介, 松原 崇充
2. 発表標題 フェヒナーの法則に従う強化学習則の挙動解析
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神 孝典, 小林 泰介, 松原 崇充
2. 発表標題 リミットサイクル型歩行における長期予測精度の検証
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米澤 壮太郎, 小林 泰介, 松原 崇充
2. 発表標題 現方策による経験の到達可能性を考慮した強化学習
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 颯太, 小林 泰介, 松原 崇充
2. 発表標題 リカレント分散強化学習によるヒステリシスと個体差に頑健な空気圧人工筋の制御
3. 学会等名 自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐伯 雄飛, 小林 泰介, 杉本 謙二
2. 発表標題 強化学習における指数移動平均フィルタの統合
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 泰介
2. 発表標題 カルバック・ライブラ情報量に関する最適化問題としてのリスク回避型強化学習の提案
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 綿貫 零真, 小林 泰介, 杉本 謙二
2. 発表標題 ツァリス統計に基づく変分オートエンコーダによるスパースな潜在空間の獲得
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 泰介
2. 発表標題 強化学習における局所リブシツ連続に関する正則化
3. 学会等名 自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 敏季, 小林 泰介, 杉本 謙二
2. 発表標題 潜在空間におけるモデル予測制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 泰介
2. 発表標題 紐解かれた潜在空間抽出のためのツァリス統計型変分オートエンコーダ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田 俊季, 小林 泰介, 杉本 謙二
2. 発表標題 拡大Tchebyshev関数を用いた多目的最適化としての潜在動的モデルの学習
3. 学会等名 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kobayashi Taisuke
2. 発表標題 Towards Deep Robot Learning with Optimizer Applicable to Non-Stationary Problems
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kobayashi Taisuke
2. 発表標題 Proximal Policy Optimization with Relative Pearson Divergence
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------