

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

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：16H06562

研究課題名（和文）ディープラーニングと記号処理の融合による予測性の向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on the improvement of the forecast due to the fusion of deep learning and symbol processing

研究代表者

松尾 豊（YUTAKA, MATSUO）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30358014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 58,600,000円

研究成果の概要（和文）：深層学習と記号処理の融合に関して、深層強化学習の手法を構築すると共に環境や相互作用のモデルを獲得する世界モデルの研究を行った。研究の前半では、アイデアが先に論文化されることが相次ぎ深層学習領域のスピードの速さに苦しんだが、中間審査の指摘を踏まえ、後半では研究テーマを修正し、ICLRやICMLなどのトップ国際会議での多くの論文成果につなげることができた。具体的には、マルチモーダルな深層生成モデル、あるいは世界モデルを活用するためのデプロイ効率的な強化学習の手法などである。また、最終年度には大脳皮質の自己教師あり学習の新しいモデルを提案する等、脳科学と人工知能の融合の面でも大きな進展があった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界モデルの研究は、現在の深層学習を記号処理と融合する際に基盤となるものである。そのための手法を多面的に研究し、例えば、マルチモーダルな深層生成モデルでは、複数のモーダルが与えられたときに、一部のモーダルで欠損があったときにどのように復元するかという問題を扱った。深層強化学習の分野では、モデルに基づく手法とモデルフリーな手法があるが、この両者の良いところ取りをするデプロイ効率的な手法を提案した。世界モデルの技術は、意味理解を可能とする人工知能につながり、また人工知能と脳科学の融合の土台となる可能性が高く、学術的な意義は大きい。また、今後ロボット等への活用につながれば社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：In order to realize the integration of deep learning and symbolic processing, we constructed methods for deep reinforcement learning and studied a world model to acquire the environment and interactions. In the first half of our research, we struggled with the fast pace of the deep learning domain, as our ideas were often published in papers before we could, but in the second half of our research, based on the points raised in the mid-term review, we revised our research theme and were able to lead to many paper results at top international conferences such as ICLR and ICML. Specifically, multimodal deep generative models, or deployment efficient reinforcement learning methods to utilize world models. In the final year of the project, we proposed new models for self-supervised learning of the cerebral cortex, and made significant progress in the integration of brain science and artificial intelligence.

研究分野：人工知能

キーワード：深層学習 深層生成モデル

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の2016年は、深層学習(ディープラーニング)の技術が急速に注目されていた時期であった。アルファ碁がイ・セドル九段に勝ったのが2016年3月であり、ちょうど本研究を開始した時期にあたる。アルファ碁は、世界各国で各種のメディアで取り上げられ、人工知能への研究開発は社会的なブームとなり、米国や中国をはじめさまざまな国で積極的に投資が行われることになった。

画像認識はもちろん、自然言語処理や強化学習などで、深層学習はすでに大きな成果を出していたが、当時はまだ深層学習に対して懐疑的な意見をもつ研究者も多くいた。その後、コンピュータビジョンの分野で、ついで自然言語処理の分野で、深層学習は大きな成果を挙げ続け、いつしかごく当たり前の手法として用いられるようになった。深層学習の意義をもはや否定する人はいなくなったが、研究開始当初は深層学習に対して、まだ評価が分かれているような状況であった。

そうしたなかで、本研究は、深層学習の進展のさらに先を見据え、深層学習と記号処理の融合に挑戦しようというものであった。今でこそ、こうした問題意識は深層学習の学術コミュニティでもよく理解されており、さまざまな議論が活発に行われている(例えば[1])。なかでも、2019年にニューラルネットワークの国際会議 NeurIPS において、Yoshua Bengio 氏が行った「システム1の深層学習からシステム2の深層学習へ」(From system 1 deep learning to system 2 deep learning)というタイトルの講演は象徴的である。システム1、2というのは心理学者ダニエル・カーネマンの用語であり、システム1は速くて直感的な思考(現在の深層学習に該当)、システム2は遅くて論理的・言語的な思考(記号処理に該当)を指す。つまり、深層学習と記号処理をいかにして融合するのかという問題意識を語った講演であり、本研究の問題意識と同一であった。本研究は、その問題意識を2016年という早い時期から捉えていたということになる。

2. 研究の目的

本研究では、深層学習と記号処理を融合するために、2つのテーマを設定した。1点目は、深層強化学習を発展させることである。当時、さまざまなコンピュータゲームを学習によって上達することのできる Deep Q Network (DQN)がよく用いられていた。これに記号処理を組み込むことによって進展させようということが当面の目的であった。

2点目は、文章からの画像の生成モデルを用いて、推論に該当するような処理を実現しようというものである。研究提案当時は、Generative Adversarial Network (GAN)などの深層生成モデルが注目され、さまざまな改良の手法が出始めた時期であった。これを文章の意味理解に活用しようというものである。

こうした研究を通じて、深層学習と記号処理(あるいは言語の処理)を融合させ、意味理解の可能な人工知能を作ることにつなげていくことを目指している。

同時に、脳科学で得られている知見との対応を考えることで、両者をつなぐことも目的である。深層学習による知見で脳科学として言えること、また脳科学の知見が深層学習に活かせることなどを見つけ、両者の領域の融合を図る。

3. 研究の方法

1点目のテーマに関しては、DQN等の深層強化学習の従来技術を拡張する形で、オートエンコーダを加えたものを実装する。従来手法と比較したときに ATARI のゲーム等でどのくらいの性能差が出るのかを検証する。

実際には、研究を進めるなかで、本研究とほぼ同じ手法が「世界モデル」というタイトルの論文として先に出てしまった[2]。その後、DeepMind から世界モデルに関する先駆的な研究が

出た[3]ことで、本研究の方法は結果的には良かったのだが、論文を出すという観点からは、目的を達成することができなかった。

そこで、深層学習自体の手法の拡張を進めると同時に、2点目のテーマと融合する形で、世界モデルの研究を中心に進めていくこととした。そのなかで、深層生成モデルを中心として、またセンサとアクチュエータ、あるいは画像と言語など、多種のモーダルの情報を扱えるような、マルチモーダルな深層生成モデルについての改良手法を提案することとした。

2点目のテーマに関しては、従来研究を参考に、文章と画像を変換するような技術を構築する。多言語への変換に関して、最もシンプルな実装を行い、その性能や問題点等を明らかにする。

実際には、こちらも研究を進め論文投稿、ワークショップでの発表までは行ったのだが、本研究とほぼ同じ手法が、EMNLPの国際会議論文として出てしまった[4]。また、我々の研究でも、当該研究でも、その精度の上昇幅は小さく、最初に想定したような言語から画像への変換が翻訳に直接効くわけではないということが明らかになった。言語で表している内容が、単純に画像上に表現されるものであればよいが、そうでないケースも多く、結局のところ、画像ではなく実世界の世界モデルをきちんと獲得しなければならないという結論に至った。そこで、上述の通り、1点目のテーマとあわせて、世界モデルの研究として進めることとなった。

まとめると、当初の計画から研究を進めるなかで、次の2つのテーマをより重要で本質的なテーマとして扱うこととなった。

i) 世界モデルの研究。深層生成モデルを用いて、環境や環境とのインタラクションをモデル化する。

ii) 深層強化学習の研究。世界モデルを用いて深層強化学習の性能の改善を行う。また、深層強化学習にはそれ以前にさまざまな問題・改良すべき点もあり、それをあわせて行う。

4. 研究成果

上記に記述した通り、研究期間の前半では、当初行っていた研究が先を越されて出版されるという状況が相次いだ。本領域の進展は急速で、多少の目のつけどころがよいくらいでは、時間的な余裕はほとんどない状況であった。当初のテーマに関して、深層学習のトップ国際会議 International Conference on Learning Representations, ICLR)のワークショップ等で発表したものの[5,6]、本会議への採択はされなかった。論文成果が出ていない点は、中間評価でも厳しく指摘され、大いに反省するところであった。

例えば[5]の内容としては以下である。文章(ソース文)から画像を生成し、それを別の言語での文章(ターゲット文)に変換するニューラル機械翻訳(NMT)を実現した。テキストと画像が持つ意味情報を、潜在変数として陽に含むニューラル翻訳モデルを提案した。Variational Autoencoder(VAE)を用いることで、テキストと画像から潜在変数 z をモデリングする。翻訳する際、まず画像とソースから潜在変数 z を推定し、次に z を NMT のデコーダに組み入れ、最後にターゲットを出力する。Multi30k という画像とそれに対応する英独の対訳コーパスを用いて比較を行ったところ、提案モデルは標準的な翻訳精度評価指標である METEOR スコアにおいて従来手法を上回った。研究成果としてはそれなりに良かったものの、同様の研究を先に発表されたため、この後の研究の継続が難しくなった。

その後、研究テーマの方向修正を行い、より本質的な問題設定に置き換えて研究を進めていくなかで、多くの成果を挙げることができた。例えば、[7]は、情報処理学会の論文賞を受賞した論文であり、マルチモーダルの深層生成モデルに関する手法である。従来、マルチモーダルなデータにおいて、一部のモーダルが欠損した場合に、うまく生成を行うことが難しかった問題を解決するものであり、手法としての汎用性が高い。

また、強化学習に関する研究は、徐々に実を結び、研究期間の最終年度である2020年度に投稿したものとして、ICLR2021においては2本の論文が本会議に採択され[8,9]、機械学習のトップ国際会議である International Conference on Machine Learning (ICML)でも1本の論文[10]が、また L4DC (Learning for Dynamics & Control Conference) という、制御と機械学習をあわせた新しい国際会議(評価が急速に高まっている)でも1本の論文[11]を通すことがで

きた。内容としては、実際のロボット等を使った強化学習においては、デプロイ（つまりモデルを実機に送り実機を動かしてデータを取る）ことのコストが高い。世界モデルを用いる手法などのモデルベースな手法は、デプロイの数を減らすことができるのだが、それでも実際のデータに基づいてモデルを更新したほうがよい。そこで、デプロイの数を減らしながら、同時に学習の精度を上げていく方法を提案した。

以上、まとめると、研究期間の前半は、深層学習の研究がグローバルに大変加速していたことに起因して、論文成果の点で苦しんだが、後半には多くのトップ国際会議で論文が採択され、本研究期間全体を通じて、論文採録の実績としては、良好な成果を挙げることができたと言える。

他にも、本研究に関連した国内での啓蒙活動も行った。世界モデルの研究は、大変重要であるが、国内ではまだ注目されていなかった。そのため、人工知能学会で、オーガナイズドセッションとして、JSAI-2020: OS-18「世界モデルと知能」を開催した。多数の投稿があり、合計14件の発表が行われた。その他、世界モデルに関しての論文サーベイや発信を積極的に行った。その後、東京大学で世界モデルをテーマにした寄付講座が2021年7月より立ち上がることもつながっている。

脳科学との関連に関しては、最終年度の2020年度に研究上の大きな進展があった。当初から、Bengio氏の提唱するシステム1、システム2と近いものとして、動物OS、言語アプリと呼ぶ2階建ての知能のモデルを2016年ごろから提唱していた[12]。2020年7月にOpenAIから出されたGPT-3が大きな注目を集める中、それが自己教師あり学習によってさまざまなアルゴリズムを学習していることにヒントを得て、大脳皮質の自己教師あり学習による新しいモデル（ニューラルエージェントモデルとよぶ）や、言語によるアルゴリズムの学習の仕組みを考案することができた。また、これに関連して、大脳皮質の処理と世界モデルとの関係、世界モデルを用いた深層強化学習と大脳皮質・大脳基底核の関係、「アルゴリズム蒸留」とよぶアルゴリズムの軽量化の仕組みと小脳の関係、自己disentanglementと呼ぶ世界モデルにおける自己概念の導出の仕組み、言語タスクと呼ぶ教育や文化によって社会に埋め込まれた適切なアルゴリズムを学習する仕組み、言語タスクに基づく強い自己disentanglementとしての意識の構造など、さまざまなアイデアを連鎖的に得ることができた。

これについては、研究期間の最後の1年で大きく進展したものであり、現在も議論を重ねながら論文・書籍への執筆に向けて準備をしている段階である。本研究領域の成果のひとつとしてまとめ、発信していきたいと考えている。

[1] Martin Ford (著), 松尾豊 (監訳): 人工知能のアーキテクトたち AIを築き上げた人々が語るその真実, オライリー・ジャパン, 2020

[2] David Ha, Jürgen Schmidhuber: Recurrent World Models Facilitate Policy Evolution, NIPS2018, 2018

[3] S. M. Ali Eslami et al.: Neural scene representation and rendering, Science, Vol.360, Issue 6394, pp. 1204-1210, 2018

[4] Desmond Elliott and Akos Kadar: Imagination Improves Multimodal Translation, IJCNLP 2017, 2017

[5] Joji Toyama, Yusuke Iwasawa, Kotaro Nakayama, Yutaka Matsuo: Expert-based reward function training: the novel method to train sequence generators, International Conference of Learning Representation (ICLR18) Workshop, 2018

[6] Hiroaki Shioya, Yusuke Iwasawa, Yutaka Matsuo: Extending Robust Adversarial Reinforcement Learning Considering Adaptation and Diversity, International Conference of Learning Representation (ICLR18) Workshop, 2018

[7] 鈴木雅大, 松尾豊: 異なるモダリティ間の双方向生成のための深層生成モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 3 (2018) (2018年度 情報処理学会論文賞)

[8] Tatsuya Matsushima*, Hiroki Furuta*, Yutaka Matsuo, Ofir Nachum, and Shixiang

Shane Gu. “Deployment-Efficient Reinforcement Learning via Model-Based Offline Optimization”, International Conference on Learning Representations 2021 (ICLR2021). May 2021. (*Equal contribution.)

[9] Makoto Kawano, Wataru Kumagai, Akiyoshi Sannai, Yusuke Iwasawa, and Yutaka Matsuo. “Group Equivariant Conditional Neural Processes”, International Conference on Learning Representations 2021 (ICLR2021). May 2021.

[10] Hiroki Furuta, Tatsuya Matsushima, Tadashi Kozuno, Yutaka Matsuo, Sergey Levine, Ofir Nachum, and Shixiang Shane Gu. “Policy Information Capacity: Information-Theoretic Measure for Task Complexity in Deep Reinforcement Learning”, International Conference on Machine Learning 2021 (ICML2021). July 2021.

[11] Kei Akuzawa, Yusuke Iwasawa, Yutaka Matsuo. Estimating Disentangled Belief about Hidden State and Hidden Task for Meta-Reinforcement Learning. Learning for Dynamics and Control (L4DC). June 2021.

[12] 松尾 豊 : 深層学習と人工知能, 認知科学, Vol.28, No.2, pp.1-9, 2021

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Tatsuya Matsushima, Naruya Kondo, Yusuke Iwasawa, Kaoru Nasuno, Yutaka Matsuo	4. 巻 7
2. 論文標題 Modeling Task Uncertainty for Safe Meta-imitation Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 189
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobt.2020.606361	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 岡本弘野, 鈴木雅大, 松尾豊	4. 巻 62(4)
2. 論文標題 深層ニューラルネットワークの中間層出力を利用した半教師あり分布外検知	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1142-1151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20729/00210565	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12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hiroki Furuta, Tatsuya Matsushima, Tadashi Kozuno, Yutaka Matsuo, Sergey Levine, Ofir Nachum, and Shixiang Shane Gu
2. 発表標題 Policy Information Capacity: Information-Theoretic Measure for Task Complexity in Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Akuzawa, Yusuke Iwasawa, Yutaka Matsuo
2. 発表標題 Estimating Disentangled Belief about Hidden State and Hidden Task for Meta-Reinforcement Learning
3. 学会等名 Learning for Dynamics and Control (L4DC)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Matsushima, Hiroki Furuta, Yutaka Matsuo, Ofir Nachum, and Shixiang Shane Gu
2. 発表標題 Deployment-Efficient Reinforcement Learning via Model-Based Offline Optimization
3. 学会等名 International Conference on Learning Representations 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Kawano, Wataru Kumagai, Akiyoshi Sannai, Yusuke Iwasawa, and Yutaka Matsuo
2. 発表標題 Group Equivariant Conditional Neural Processes
3. 学会等名 International Conference on Learning Representations 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口尚平, 岩澤有祐, 松尾豊
2. 発表標題 メタ学習としてのGenerative Query Network
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 富山 翔司
2. 発表標題 画像とテキストの潜在的な意味情報を用いたニューラル翻訳モデルの提案
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroaki Shioya
2. 発表標題 Extending Robust Adversarial Reinforcement Learning Considering Adaptation and Diversity
3. 学会等名 International Conference of Learning Representation
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Joji Toyama
2. 発表標題 Expert-based reward function training: the novel method to train sequence generators
3. 学会等名 International Conference of Learning Representation
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松嶋達也
2. 発表標題 内的報酬と敵対的学習によるタスク非依存な注意機構の学習
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 松尾 豊
2. 発表標題 ディープラーニングと進化
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富山 翔司, 味曾野 雅史, 鈴木 雅大, 中山 浩太郎, 松尾 豊
2. 発表標題 画像とテキストの潜在的な意味情報を用いたニューラル翻訳モデルの提案
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 那須野 薫, 松尾 豊
2. 発表標題 深層強化学習におけるオフライン事前学習法
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017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
研究 分担者	PRENDINGER HELMUT (PRENDINGER HELMUT) (40390596)	国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授 (62615)	
研究 分担者	中山 浩太郎 (Nakayama Kotaro) (00512097)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・学術支援専門職員 (12601)	2018年度まで

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