

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11488

研究課題名（和文）確率伝搬法を用いた深層学習実現方式の開発

研究課題名（英文）Development of a deep learning implementation scheme using belief propagation

研究代表者

一杉 裕志 (Ichisugi, Yuuji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：30356464

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：我々は以前からヒトの大脳皮質の特徴を模倣した深層学習アルゴリズム BESOM を開発してきた。本研究では、BESOM の条件付確率表モデルを改良して表現力を向上させると同時に、効率的な推論・学習アルゴリズムの実現につながる研究を行った。また、BESOM のキラーアプリの候補の1つとして、再帰的なサブルーチン呼び出しを可能とする階層型強化学習アーキテクチャ RGoal を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

設計した BESOM の条件付確率表モデルおよび階層型強化学習 RGoal はヒトの大脳皮質および前頭前野の計算論的モデルの有望な候補であり、ヒトの認識・思考・言語理解などの高次機能のモデルを計算機上で大規模シミュレーションするための基盤技術となり得る。さらに将来は、ヒトの知能の理解や、ヒトに匹敵する高い汎用性を持つ人工知能の実現につながると考えている。

研究成果の概要（英文）：We have previously developed a deep learning algorithm, BESOM, which mimics features of the human cortex. In this study, we improved the conditional probability table model of BESOM to increase its expressive power, while at the same time leading to efficient inference and learning algorithms.

We also proposed RGoal, a hierarchical reinforcement learning architecture that enables recursive subroutine calls, as one of the candidates for BESOM's killer applications.

研究分野：機械学習、強化学習、計算論的神経科学

キーワード：ベイジアンネットワーク 深層学習 大脳皮質 確率伝搬アルゴリズム 階層型強化学習 認知アーキテクチャ

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脳にヒントを得た機械学習技術の改良が有効であることは、畳み込みニューラルネットワークをはじめとして、これまでに多くの実例で示されている。それに加え、近年国内外のコネクトーム関連プロジェクトにより大脳皮質の局所神経回路に関する知見が急速に得られてきており、それをもとに大脳皮質が実行する推論・学習アルゴリズムを解明する機運が高まってきている。そこで本研究では、最新の計算論的神経科学の知見を深層学習技術と融合させることによって、より大脳皮質の特性に近く、脳の高次機能の再現に適した機械学習技術の実現を目指す。

2. 研究の目的

我々は以前から大脳皮質の特徴を模倣した深層学習アルゴリズム BESOM を開発してきた。本研究では大脳皮質の計算論的モデルや局所神経回路に関する最新の知見を参考にして BESOM を大幅に改良する。この改良より、双方向性の頑健な推論や事前知識の作り込みやすさといった利点を持った、革新的な深層学習技術となることを目指す。本研究では、BESOM の条件付確率表モデルを改良して表現力を向上させると同時に、効率的な推論・学習アルゴリズムを新たに設計する。推論アルゴリズムに関しては、確率伝搬法を最適化により高速化すると同時に、精度と収束性を高めるヒューリスティクスを開発し、その有効性を明らかにする。学習アルゴリズムはオンライン EM アルゴリズムを実装し、これまでに我々が開発済みの正則化手法と組み合わせて汎化性能への影響を明らかにする。

3. 研究の方法

BESOM および RGoal の開発・実験には、Java 言語上で我々が以前に開発した Immediate mode GUI ライブラリ BESOM-lab を使用する。これにより実行過程の可視化やハイパラメータ調整をインタラクティブに行うことを可能にし、アルゴリズムのデバッグや調整作業が効率的に行える。

BESOM の条件付確率表モデルの実験には Julia 言語の機械学習ライブラリ Flux.jl を使用する。Python 上の標準的な機械学習ライブラリではモデルを定型的な行列演算に落とし込む必要があり制限が強いが、Flux.jl では任意のユーザ定義関数の勾配を自動計算することができるため、柔軟なモデル設計が可能となる。

4. 研究成果

BESOM の条件付確率表モデルを改良して表現力を向上(図1)させると同時に、確率的グラフィカルモデルの効率的な推論・学習アルゴリズムに関する研究を行った。BESOM の大規模化可能な推論・学習アルゴリズムの完成には至らなかったが、それにつながる有望な条件付確率表のモデルを見出すことができたと考えている。また、BESOM のキラーアプリの候補の1つとして、再帰的なサブルーチン呼び出しを可能とする階層型強化学習アーキテクチャ RGoal を提案(図2)し、さらに RGoal を用いて記号推論を行う認知アーキテクチャの設計を進めた。

設計した BESOM の条件付確率表モデルおよび階層型強化学習 RGoal はヒトの大脳皮質および前頭前野の計算論的モデルの有望な候補であり、ヒトの認識・思考・言語理解などの高次機能のモデルを計算機上で大規模シミュレーションするための基盤技術となり得る。さらに将来は、ヒトの知能の理解や、ヒトに匹敵する高い汎用性を持つ人工知能の実現につながると考えている。

各年度における主な成果は以下の通りである。

2018年度は、新たな条件付確率表モデルの候補として、noisy-OR ノード、ゲートノード、排他ノードを組み合わせたものを採用し、それが複雑な対象をコンパクトに表現する高い表現力を持っているかどうかを見極めるための研究を行った。また、再帰的なサブルーチン呼び出しを可能とする階層型強化学習アーキテクチャ RGoal を提案した。

2019年度は、RGoal を拡張してスタックを持たせた場合の学習則を導出した。さらにその機構を用いて記号推論を行う枠組みを構築した。また、確率モデルの変分ベイズを用いた学習手法も検討した。

2020年度は、条件付確率表モデルを改良した BESOM において勾配法を用いて重みを学習可能であることを確認した。また、Noisy-OR、Noisy-AND ゲートによる位置不変性の変分学習、複数の物体を操作するタスクに適したワーキングメモリを持った認知アーキテクチャの設計、ベイジアンネットを用いた自然言語のガーデンパス文の解析モデルの設計も行った。Julia 言語を用いた分散並列実行環境の構築も行った。

2021年度は、汎用人工知能のためのプログラム合成対象言語 Pro5Lang のエピソード記憶機構の設計を行った。また、大規模ベイジアンネットの推論の効率化に関する研究と、深層学習の並列処理に関する研究を行った。

- U, D はそれぞれ上の層・下の層のノードのインデックスの集合で $c, u \in U, d \in D$
- x_{ci}, x_{uj}, x_{dk} はそれぞれ変数 X_c, X_u, X_d の値の one hot vector 表現
- w_{ciud} は、 X_c のユニット i が X_u と X_d の間の結合を制御する重み
- w_{ujdk} は、 X_u のユニット j と、 X_d のユニット k の間の重み

$u \in U, d \in D, k \neq 0$ に対して g_{ud}, s_{dk}, x_{dk} を次のように定義:
 $g_{ud} = \prod_{c \in U} \prod_{i \neq 0} (1 - w_{ciud} x_{ci})$
 $s_{dk} = \sum_{u \in U} \sum_{j \neq 0} w_{ujdk} g_{ud} x_{uj}$
 $x_{dk} = s_{dk} / \max(1, \sum_{i \neq 0} s_{di})$
 x_{d0} を次のように定義:
 $x_{d0} = 1 - \sum_{k \neq 0} x_{dk}$

$$P(X_d = d_k | X_u = u_j, \dots) = x_{dk}$$

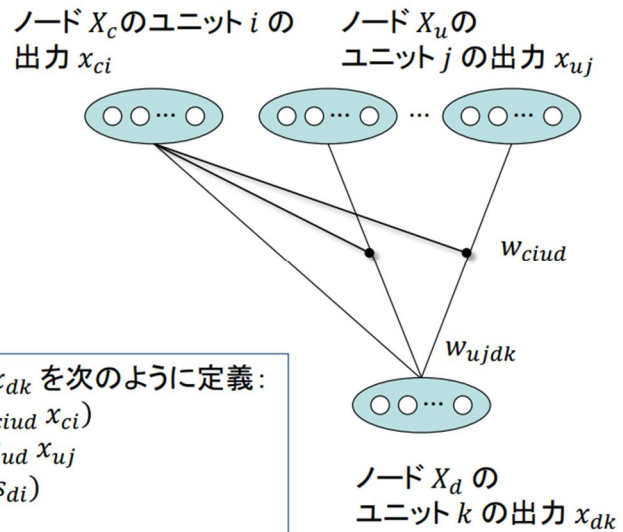


図1 設計した BESOM の条件付確率表モデル

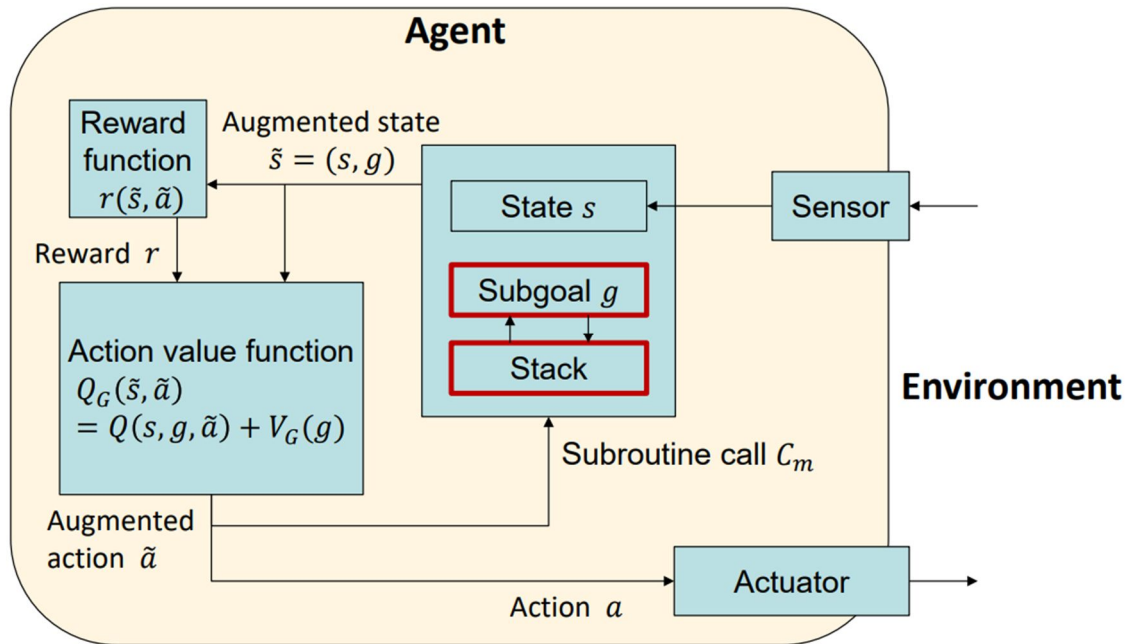


図2 再帰的なサブルーチン呼び出しが可能な階層型強化学習 RGoal のアーキテクチャ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Sano Takashi	4. 巻 2022
2. 論文標題 A noniterative solution to the inverse Ising problem using a convex upper bound on the partition function	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 023406 ~ 023406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ac50b1	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 Sano Takashi, Ichisugi Yuuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Stochastic Neural Variational Learning of Noisy-OR Bayesian Networks for Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 The 5th International Conference on Advances in Artificial Intelligence (ICAAI)	6. 最初と最後の頁 72-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3505711.3505721	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 Hana Isoi, Atsuko Takefusa, Hidemoto Nakada, Masato Oguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance of Domain Adaptation Schemes in Video Action Recognition using Synthetic Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of The 2022 4th Intern National Conference on Image, Video and Signal Processing (IVSP 2022)	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 -
1. 著者名 Ichisugi Yuuji, Takahashi Naoto, Nakada Hidemoto, Sano Takashi	4. 巻 11728
2. 論文標題 Hierarchical Reinforcement Learning with Unlimited Recursive Subroutine Calls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN 2019: Deep Learning, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 103 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-30484-3_9	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 Ichisugi Yuuji, Takahashi Naoto	4. 巻 848
2. 論文標題 A Formal Model of the Mechanism of Semantic Analysis in the Brain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Intelligent Systems and Computing	6. 最初と最後の頁 128 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-99316-4_17	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 Takahashi Naoto, Ichisugi Yuuji	4. 巻 848
2. 論文標題 Toward Human-Like Sentence Interpretation -a Syntactic Parser Implemented as a Restricted Quasi Bayesian Network-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Intelligent Systems and Computing	6. 最初と最後の頁 301 ~ 309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-99316-4_40	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 一杉裕志
2. 発表標題 報酬最大化原理にもとづく脳型 A G I アーキテクチャの構想
3. 学会等名 第18回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 竹内泉, 佐野崇
2. 発表標題 汎用人工知能のためのプログラム合成対象言語 Pro5Lang のエピソード記憶機構
3. 学会等名 第20回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯井 葉那, 竹房 あつ子, 中田 秀基, 小口 正人
2. 発表標題 動作認識のための合成データ活用に向けたドメイン適応手法の検討
3. 学会等名 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2021-5)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 磯井 葉那, 竹房 あつ子, 中田 秀基, 小口 正人
2. 発表標題 合成動画データを用いた学習でのドメイン適応による動作認識精度の比較
3. 学会等名 第24回画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 磯井 葉那, 竹房 あつ子, 中田 秀基, 小口 正人
2. 発表標題 合成データを用いた教師なしドメイン適応による室内動作認識手法の検討
3. 学会等名 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇
2. 発表標題 物体操作に適したワーキングメモリを持つ汎用人工知能アーキテクチャの検討
3. 学会等名 第16回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇
2. 発表標題 脳の自律的プログラム合成機構のモデルに向けて: 2層ペイジアンネットによる記号処理命令の獲得・実行機構
3. 学会等名 第15回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野崇, 一杉裕志
2. 発表標題 Noisy-OR, Noisy-AND ゲートによる位置不変性の変分学習
3. 学会等名 第16回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋直人, 竹内泉, 一杉裕志
2. 発表標題 ペイジアンネットを用いた袋小路文読解モデル
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会 (NLP2021)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田秀基
2. 発表標題 Julia言語を用いた分散並列実行環境の構築
3. 学会等名 コンピュータシステム研究会 (CPSY)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇
2. 発表標題 推論規則の価値を階層型強化学習 RGoal を用いて学習する手法の提案
3. 学会等名 第14回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇
2. 発表標題 階層型強化学習 RGoal を用いた記号推論の実現手法の検討
3. 学会等名 第12回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一杉裕志, 高橋直人, 中田秀基, 佐野崇
2. 発表標題 階層型強化学習 RGoal アーキテクチャへの再帰呼び出し用スタックの導入
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野崇, 一杉裕志
2. 発表標題 ニューラルネットワーク最適化によるNoisy-0Rベイジアンネットワークの変分ベイズ学習
3. 学会等名 第29回 日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一杉裕志, 高橋直人, 中田秀基, 佐野崇
2. 発表標題 RGoal Architecture: 再帰的にサブゴールを設定できる階層型強化学習アーキテクチャ
3. 学会等名 第9回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐野崇, 一杉裕志
2. 発表標題 Noisy-OR, ANDゲートを用いたベイジアンネットワークにおける特徴のプーリング
3. 学会等名 第9回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 一杉裕志, 高橋直人, 中田秀基, 佐野崇
2. 発表標題 単一化の機構を利用した階層型強化学習のテーブル圧縮手法の検討
3. 学会等名 第10回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)
4. 発表年 2018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	佐野 崇 (Sano Takashi) (00710295)	東洋大学・情報連携学部・講師 (32663)	

6. 研究組織（つづき）

	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	中田 秀基 (Nakada Hidemoto) (80357631)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	高橋 直人 (Takahashi Naoto) (40357380)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	

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