

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：32663

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18117

研究課題名（和文）確率勾配変分ベイズ法を用いた時系列モデリング

研究課題名（英文）Stochastic gradient variational Bayes for time-series modeling

研究代表者

佐野 崇（Sano, Takashi）

東洋大学・情報連携学部・講師

研究者番号：00710295

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：主な研究成果は次の3つである。(1) Tree-reweighted 近似を用いた Ising 模型の学習公式の開発：Ising 模型の新しい近似学習方法を得ることができ、また類似法との比較ができた。(2) Neural Variational Inference and learning による Noisy-OR ベイジアンネットワークの学習法の開発：手書き文字認識の可能な大規模 noisy-OR ベイジアンネットワークの学習法を開発した。(3) フレーム間差分法に注目した動画セグメンテーション法の研究：ディープラーニングを用いた動画セグメンテーションモデルに、フレーム間の差分を入力し性能向上を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、主に変分近似法を用いた統計的機械学習法の進展について、いくつかの寄与ができた。Ising 模型の新しい学習公式は、その性能向上のみならず、変分近似法を学習に用いた場合に生じる一般的困難について洞察を深めることができた。また、noisy-OR ベイジアンネットワークの新たな学習法によって、このモデルが獲得する潜在表現が明らかになり、新しいモデル構築につなげることができた。さらに、新しい動画セグメンテーション法は、監視カメラの解析や自動運転技術といった応用にも道を開くものである。

研究成果の概要（英文）：The three main results are as follows (1) Development of a learning formula for the Ising model using tree-reweighted approximation: A new approximate learning method for the Ising model was obtained and compared with similar methods.

(2) Development of a learning method for noisy-OR Bayesian networks using Neural Variational Inference and learning: We developed a learning method for large-scale noisy-OR Bayesian networks that can recognize handwritten characters.

(3) Study on video segmentation methods focusing on the difference between frames: We improved the performance of a video segmentation model using deep learning by inputting the difference between frames.

研究分野：統計的機械学習

キーワード：確率的グラフィカルモデル 変分近似法 ディープラーニング Ising 模型 ベイジアンネットワーク

1. 研究開始当初の背景

ベイジアンネットワークに代表されるグラフィカルモデルは、データの生成過程や相関をグラフ構造として持つ確率モデルである。グラフィカルモデルはデータの識別だけでなく、尤度最大化の原理を用いて欠損データの生成も自然に可能である。そのような利点がある一方、学習や推論時に状態についての巨大な和を取らなければならない、特別な場合を除いて計算コストのかかるモデルでもある。この計算コストに対処するため、様々な近似推論・学習法が提案されている。特に近年提案された、確率勾配変分ベイズ法は大きな注目を集めている。この方法では、グラフィカルモデルのパラメータをニューラルネットワークの出力とする。さらに、隠れ変数を推定するための変分分布を仮定し、変分パラメータを別のニューラルネットワークの出力にする。目的関数には対数尤度の変分下限を用いるが、これは学習データの再構築誤差と、変分分布とモデル分布の Kullback-Leibler 情報量の和である。このように、グラフィカルモデルの学習がニューラルネットワークの最適化問題に帰着され、ディープラーニングの手法を用いてグラフィカルモデルの近似学習を行うことができる。この手法は画像データの生成が可能で大規模ベイジアンネットワークに適用され、変分オートエンコーダと呼ばれており、類似画像生成において大きな成果をあげている。

このように、確率勾配変分ベイズ法を始めとしたグラフィカルモデルの近似法には様々な応用が期待できる。本研究においては、時系列データを含む様々なデータに対する、様々なグラフィカルモデルの推論や学習に対して、近似学習法の研究を行うこととした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、確率的グラフィカルモデルを用いたデータモデリングとその応用である。特に、計算コスト増大の問題を克服したい。生成モデルである確率的グラフィカルモデルの特性を活かすことで、いわゆるディープラーニングとは異なる応用を行いたい。

本研究では近似法として主に変分近似法に着目する。変分近似法は、真の確率分布に対して扱いやすい変分分布を用意し、その変分分布のパラメータ、すなわち変分パラメータの最適化を行うことで、複雑な確率分布の推論問題を簡易化する近似法である。本研究ではこの変分近似法を活用し、確率的グラフィカルモデルの推論や学習にかかる計算コストを軽減する手法を探求する。

さらに、本研究では、取り扱いたいデータに対してどのような確率的グラフィカルモデルを用いるべきか、どのような変分近似法を用いるべきかの研究も行う。これにより、実践的な観点から確率的グラフィカルモデルと変分近似法の適用を容易にし、より多くの応用分野への展開が可能になると期待できる。

3. 研究の方法

(1) Tree-reweighted 近似を用いた Ising 模型の学習

Ising 模型は統計力学における磁性体のモデルであるが、スピン変数間の結合定数を学習可能なパラメータとすることで、一種の確率的グラフィカルモデル(マルコフ確率場)とみなすことができる。Ising 模型によって、ニューロンの発火パターンなどの現実データのモデル化も可能である。Ising 模型はシンプルな構造をしているにも関わらず、分配関数の計算には、変数の数に対して指数的な計算コストがかかる。このコストに対処するために、サンプリング法がしばしば採用されるが、この方法は一般に収束に時間がかかる。そのため、平均場近似や Bethe 近似といった変分近似法を用いた近似法が開発されている。この研究では、変分近似法の一つである Tree-reweighted (TRW) 近似を用いることにした。TRW 近似は Bethe 近似に類似するが、近似目的関数が真の目的関数の下限になっているなどの有利な点がある。そこで、TRW 近似を用いた Ising 模型の学習法を開発し、その評価を行うこととした。

(2) Neural Variational Inference and learning による Noisy-OR ベイジアンネットワークの学習法

ベイジアンネットワークは確率変数の因果関係を取り入れた確率的グラフィカルモデルである。ここでは、畳み込みニューラルネットワークと変分ベイズ型の学習法の組み合わせを用いて、新しい学習方法の開発を試みた。この手法では、特に離散確率変数を扱う noisy-OR ベイジアンネットワークに焦点を当て、Neural Variational Inference and Learning (NVIL) という手法を適用した。この研究では、画像を入力データとし、畳み込みニューラルネットワークを利用し

て推論ネットワークを構築した。

(3) フレーム間差分法に注目した動画セグメンテーション法

動画は典型的な時系列データである。動画の各フレームにおいて、対象となる物体の領域を特定するセグメンテーションは、例えば自動運転などにおいて重要となる技術である。ここでは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いたオートエンコーダ型モデルによる研究を行った。エンコーダ部分では、入力された動画データから画像特徴量を抽出し、デコーダ部分では抽出された特徴量をもとに、セグメンテーションされた画像を生成する。

さらに、本研究ではフレーム間画像の差分を取り、モデルの入力とする工夫を行った。この手法により、動画の各フレーム間での変化をより効果的に捉えることができると予測できる。

4. 研究成果

(1) Tree-reweighted 近似を用いた Ising 模型の学習

学習モデルとしての Ising 模型の学習法としては、先行研究に、確率伝搬法と等価な Bethe 近似を用いるものがあった。この方法では、Bethe 近似を用いて Ising 模型の期待値や相関を近似的に求め、それらがデータの統計量を再現するようにパラメータが調整される。このとき、最適なパラメータは、統計量の関数として陽に解くことができる。この解を用いることで、与えられたデータからパラメータを反復計算することなく求めることができる。

本研究では、Bethe 近似の代わりに、TRW 近似を用いた。TRW 近似は、損失関数の凸性などの優れた性質を持つ。研究の結果、TRW 近似を用いた場合にも、Bethe 近似と同様に、最適なパラメータを得るための解が求まることが分かった。これによって、TRW 近似を用いた学習が、反復計算することなく可能であることが分かった。

導出した公式は、Bethe 近似を始めとする他の手法と比較された。その結果、特に強い相関を持つ状況において、他の類似手法と比較して高い学習精度を達成することが明らかとなった。さらに、現実データである神経スパイクデータを用いて検証したところ、TRW 近似を用いた手法が最も性能が良いことが分かった。TRW 近似を用いた新たな学習公式は、今後の各種データ学習に活用することが可能と見込まれる。

(2) Neural Variational Inference and learning による Noisy-OR ベイジアンネットワークの学習法

Noisy-OR ベイジアンネットワークは潜在変数の確率的な論理和で可視変数を説明可能であり、医療診断などに応用される。しかし、大規模な Noisy-OR ベイジアンネットワークの学習方法やその際に学習される表現については十分に明らかではなかった。本研究では、変分近似法とディープラーニングの手法を組み合わせることで、大規模な Noisy-OR ベイジアンネットワークの学習が可能であることを実証した。

この研究では NVIL を用いた。NVIL は、確率勾配変分ベイズ法と同様に、潜在変数を推定する変分分布を設定し、真の対数尤度の下限である近似目的関数の最大化を行う。確率勾配変分ベイズ法とは異なり、離散的な潜在変数を扱うことができる。

変分分布の推定に畳み込みニューラルネットワークを用いて、NVIL によって、手書き数字が認識できる大規模な Noisy-OR ベイジアンネットワークが学習可能である事がわかった。さらに、文字を形成する典型的な曲線が表現として抽出された。そのような表現は他のベイジアンネットワークモデルでは発見されておらず、むしろ非負行列分解とよく似た結果である事がわかった。この発見は、Noisy-OR ベイジアンネットワークの新たな応用可能性を示唆している。

(3) フレーム間差分法に注目した動画セグメンテーション法

動画セグメンテーションモデルの構築に取り組んだ。本研究では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) によるオートエンコーダ型モデルを用いた。エンコーダ部では入力動画データから特徴量を抽出し、デコーダ部では抽出特徴量を基にセグメンテーションされた画像を生成する。

本研究では特に画像のフレーム間差分を取り入れ、モデルの入力とするという工夫を行った。この手法により動画の各フレーム間の変化を効果的に捉えられると期待できる。実験の結果、確かに差分情報がモデルの予測精度を向上させることが明らかになった。すなわち、フレーム間画像の差分を取ることで、動画の構造や動きを表現する特徴量が強調されたと考えられる。特に、差分からセグメンテーションの出力へ、スキップ接続を作成することが効果的であることが分かった。

この研究では、CNN によるオートエンコーダを用いたが、今後の研究では、この差分を取る手

法が他のデータやモデルに対しても有効であるかを検討したい。異なる種類の動画データや異なるアーキテクチャのニューラルネットワークに対して、同様の手法を適用し、その性能向上を評価する予定である。また、差分を取る手法の改良や拡張にも取り組みたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 河村聡太, 本多泰理, 中村周吾, 佐野 崇	4. 巻 -
2. 論文標題 フレーム間差分を用いた画像セグメンテーション改善法の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会 第85回全国大会	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 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 Takashi Sano	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 Takashi Sano, Yuuji Ichisugi	4. 巻 November 2021
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 ICAAI 2021: 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 佐野崇, 一杉裕志	4. 巻 2020 巻 AGI-016 号
2. 論文標題 Noisy-OR, Noisy-AND ゲートによる位置不変性の変分学習	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第16回 人工知能学会 汎用人工知能研究会 (SIG-AGI)	6. 最初と最後の頁 5-
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇	4. 巻 2020 巻 AGI-016 号
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第16回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)	6. 最初と最後の頁 2-
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 一杉裕志, 中田秀基, 高橋直人, 佐野崇	4. 巻 2020 巻 AGI-015 号
2. 論文標題 脳の自律的プログラム合成機構のモデルに向けて: 2層ベイジアンネットによる記号処理命令の獲得・実行機構	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第15回 人工知能学会 汎用人工知能研究会(SIG-AGI)	6. 最初と最後の頁 2-
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Sano	4. 巻 -
2. 論文標題 An Analytic Solution to the Inverse Ising Problem in the Tree-reweighted Approximation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)	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) 10.1109/IJCNN.2018.8489421	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Takashi Sano, Yuuji Ichisugi
2. 発表標題 Stochastic Neural Variational Learning of Noisy-OR Bayesian Networks for Images
3. 学会等名 ICAAI 2021: 2021 The 5th International Conference on Advances in Artificial Intelligence (ICAAI) (国際学会)
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 報酬最大化AGIのための意思疎通機構の設計とプロトタイプ実装
3. 学会等名 第21回 人工知能学会 汎用人工知能研究会
4. 発表年 2022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 人工知能学会 第20回汎用人工知能研究会
4. 発表年 2022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 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層ベ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 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 Y. Ichisugi, N. Takahashi, H. Nakada, T. Sano
2. 発表標題 Hierarchical Reinforcement Learning with Unlimited Recursive Subroutine Calls
3. 学会等名 28th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sano
2. 発表標題 An Analytic Solution to the Inverse Ising Problem in the Tree-reweighted Approximation
3. 学会等名 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (国際学会)
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
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 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
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
---------------------------	-----------------------	----

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