

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700232

研究課題名（和文）

大規模データに適用可能なマルコフ確率場の学習アルゴリズムに関する研究

研究課題名（英文）

Study about the learning algorithm applicable to large-scale Markov Random Fields

研究代表者

前田 新一（SHIN-ICHI MAEDA）

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：20379530

研究成果の概要（和文）：

画像処理や音声処理など高次元変数のマルコフ確率場の学習・推論アルゴリズムの開発を行った。これらの応用では、空間的あるいは時間的に局所的な相関をもつマルコフ確率場が用いられる。この局所性を利用した Group-coordinate descent 法を用いた最適化を提案した。高次元問題に対して収束速度を劣化させることなく最適化できるため、超解像、X線CTなどの実用的な問題に対しても推論が実行できることを示せた。

研究成果の概要（英文）：

Learning and inference algorithms of the high-dimensional Markov Random Fields were developed for image processing and speech processing. In these application fields, Markov property is formed locally in spatial or temporal aspects. Group-coordinate descent was proposed for the optimization to exploit this locality. Since it enables to optimize the optimization problem without losing the convergence rate regardless of the dimensionality, it is applied to the real world problems such as image super-resolution and X-ray computed tomography.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|------|-----------|---------|-----------|
| 22年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 23年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 24年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 総計 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：マルコフ確率場，詳細釣り合い，group-coordinate descent，因子化仮定

1. 研究開始当初の背景

画像、音声、言語、DNA 鎖、運動などの系列データは、高次元データであり、その自由度の高さのために統計モデルによる学習、フィッティングを難しくしている。そのような高次元データを扱うためには、統計モデルに適切な構造を与えることが必要となる。

近年、Markov Random Fields (MRF) や Conditional Random Fields (CRF) において、その問題に応じた適切な特徴に対するエネ

ルギー関数を与えることによってより良く対象の統計的性質を表現でき、結果として推定精度があがるのが種々の応用分野で示されている。しかしながら、階層的な表現を用いないために多数のポテンシャル関数が必要になったり、ポテンシャル関数のパラメータを適切に設定、あるいは学習したり、推論を行うことが難しくなっている。

一方、変分ベイズ法の枠組みでは、隠れ変数を導入したモデルが用いられてきており、そ

のようなモデルに対して事後分布を近似的に推定することで推論が可能になっている。また、pretraining と呼ばれる Contrastive Divergence Learning を用いた学習によって階層的なボルツマンマシンの学習 (Deep Learning) が提案され、大量の高次元データ (大規模データ) を学習することで優れた汎化性能を引き出せることが示されている。

2. 研究の目的

本研究では、局所的な相関を表現するマルコフ確率場のモデルの特徴を活かす一方で大規模なデータ (高次元、多数のデータ) に対して学習・推論が行えるようなアルゴリズムを提案し、その有用性を実問題で確かめることを目的としている。

そのアルゴリズムの候補として Contrastive Divergence Learning を検討する。Contrastive Divergence Learning はすでにボルツマンマシンの学習などでその有用性が確認されているが、導出にヒューリスティックな近似が用いられていたため収束の保証などが無い。この導出を見直し、近似法を是正することで、収束の保証があったり、学習速度を改善したりできないかを検討する。

3. 研究の方法

音声・画像処理研究においては、近傍画素間の局所的な空間相関あるいは時系列相関を表現するモデルとしてマルコフ確率場が古くから使われており、学習・推論アルゴリズムの開発の良いテストベッドとなるため、音声処理研究や画像処理研究に適用可能なアルゴリズムについて検討した。

その際、(1) 隠れ変数を導入し、階層的な表現を用いることで潜在的に多様なポテンシャル関数を表現したモデル

(2) 特徴抽出を行なってコンパクトなポテンシャル関数を表現したモデルの二通りに関して検討を行った。

(1) 隠れ変数を導入し、階層的な表現を用いることで潜在的に多様なポテンシャル関数を表現したモデルに対するアルゴリズム
画像処理のモデルの場合、推論は画素全体におよぶため一般に高次元の推論問題となるが、このような高次元の推論にマルコフ性を利用した Group-coordinate descent が適していることに気がついた。

これは一体問題であれば高次元の推論問題となることも容易に解けるといいう性質を利用するものである。

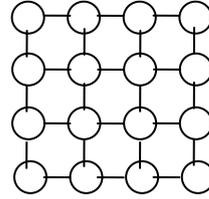
$$\{\hat{x}_i\} = \arg \max_{\{x_i\}} \sum_i \phi_i(x_i)$$

$$\Leftrightarrow \hat{x}_i = \arg \max_{x_i} \phi_i(x_i) \quad (i=1, \dots, N)$$

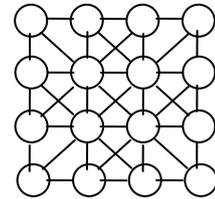
上記のように一体問題であれば、N が大きく

なっても個別の最適化問題として考えることができるため容易に解ける。画像のモデルでは、局所的な相関の含まれたモデルを考える。

これに対して相関が局所的にしか存在しないというマルコフ性を利用する Group-coordinate descent を用いることで効率的な推論が行える。



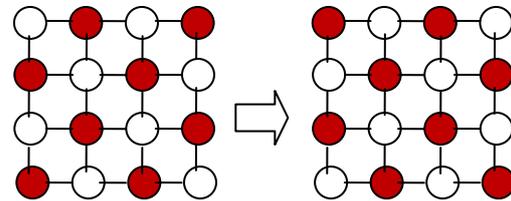
4 近傍マルコフ確率場



8 近傍マルコフ確率場

各画素を表す確率変数を○で表したノードで、画素間の相関をノード間をつなぐ棒で表すと上記のような 4 近傍間の相関や 8 近傍間の相関が表現される。

このような相関構造を考慮して、被最適化変数を複数のグループに分割し、グループごとに交互に最適化する変数を変更する Group-coordinate descent を利用する。たとえば、4 近傍マルコフ確率場の場合、以下のように 2 つのグループに分割することで各最適化を 1 体問題に落とすことができる (8 近傍マルコフ確率場では 4 つのグループとすれば同様の最適化が可能)。



変数群を $\{\hat{x}_i^{(A)}\}$ と $\{\hat{x}_j^{(B)}\}$ に分割して最適化

被最適化変数群：赤丸、固定変数群：白丸

$$\begin{cases} \{\hat{x}_i^A\} = \arg \max_{\{x_i^A\}} \sum_{i-j} \phi_{ij}(x_i, x_j) \\ \{\hat{x}_j^B\} = \arg \max_{\{x_j^B\}} \sum_{i-j} \phi_{ij}(x_i, x_j) \end{cases}$$

この Group-coordinate descent アルゴリズムは、収束が保証されており、その収束速度はグループの分割数に依存するため 4 近傍相関を考えた場合、画素数が増えても収束速度は変わらないことがわかる。

(2) 特徴抽出を行なってコンパクトなポテンシャル関数を表現したモデルに対する推論アルゴリズム

高次元変数の相互相関をもつ問題であっても低次元の特徴抽出を行ってしまうと、従来の推論手法を用いることができる。音声研究

では様々な特徴抽出法が提案されてきたが、タスクに特化した特徴抽出を検討し、その性能を確かめた。

(3) 運動系列学習に対する学習アルゴリズムの提案

運動系列の学習問題にも、マルコフ性が利用される。系列(典型的には時系列)はその長さが長くなると指数的にとりうるパターンが増えてしまう。このパターンをマルコフ性を利用してコンパクトに表現することがなされてきた。たとえば、強化学習においては TD 学習は状態遷移確率のマルコフ性を利用して、状態遷移の前後の状態で成り立つべきベルマン条件と呼ばれる自己無撞着方程式を成り立たせるような学習を行うことがされてきた。それでも学習すべき状態遷移が非常に多く、学習に時間がかかっていた。これに対して方策を状態非依存なものとして定義して、高次元状態に依存せずに学習するフレームワークを提案した。

4. 研究成果

(1) 隠れ変数を導入し、階層的な表現を用いることで潜在的に多様なポテンシャル関数を表現したマルコフ確率場の学習・推論

マルコフ性をもつ相関を階層的に表現することでモデルの表現能力を拡張することに関しては、超解像や X 線 CT を題材にして、Group-coordinate descent を利用した推論による性能を調べた。超解像においては、エッジ変数を隠れ変数として表現することでエッジがある場合とない場合でスムージングの仕方が異なる適応的なフィルターが構成できる[2][3][17]。さらに顕微鏡画像においては、画像に映る対象が大きく分けて細胞と背景の二種類となることからそれらのクラス変数を表す隠れ変数を導入してそれぞれのクラスに適した輝度値、ボケ量を表現することでエッジ以外の性質に関しても表現することができる[10][11]。医用 X 線 CT においても同様に対象が人体の組織であることを念頭にクラス変数を導入することで、物質間のエッジだけでなく、取りやすい吸収係数などにも制約を入れることで不良設定な条件でも精度良く推定ができることが示された[4][5][9]。

(2) 特徴抽出を行なってコンパクトなポテンシャル関数を表現したマルコフ確率場の学習・推論

音声・音楽では伝統的にその時系列間の相関を AR モデルで表現し、その AR 係数による特徴抽出がなされ、Linear Predictive

Coding (LPC) や Line Spectral Frequency (LSF) といった形で利用されてきた。これに対して、楽器分類に特化した特徴抽出ができるように局所判別分析を利用した手法を提案し、その有用性を確認し、雑誌論文[1]で発表した。

(3) 運動系列学習に対する学習アルゴリズムの提案

方策を状態非依存なものとして定義して、初期状態依存の時刻依存の関数として方策を学習することで系列全体を学習する枠組みを新たに提案した。これによって状態依存の方策を用いた場合に比べて高速な学習ができることが確認され、その成果を学会で発表している[6][7]。

(4) Contrastive Divergence Learning の改良

ボルツマンマシンの学習アルゴリズムとして注目を浴びている Contrastive Divergence Learning であるが、その導出がヒューリスティックで収束性がないことが問題となっているが、これを包含する枠組みとしてマルコフ過程の詳細釣り合いを利用した学習アルゴリズムと解釈することで、ある一定の条件のもとで収束性を保証できることがわかり、その成果を学会で発表した[14][16]。しかし、同様のアイデアの論文が Physical Review Letter (2011) で発表されていることがわかり、雑誌論文にまとめることができなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

[1] M. Ihara, S. Maeda, K. Ikeda, and S. Ishii. "Low-dimensional Feature Representation for Instrument Identification", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 5(4), 249-258, (2012).

[2] 前田新一, 兼村厚範, 石井信, "確率システムの立場からの画像情報処理技術", システム制御情報学会誌, 査読無, 55(12), 532-538, (2011).

[3] M. Nishiyama, K. Togashi, M. J. von Schimmelmann, C.-J. Lim, S. Maeda, N. Yamashita, Y. Goshima, S. Ishii, K. Hong, "Semaphorin 3A induces Ca_v2.3 channel-dependent conversion of axons to dendrites", Nature Cell Biology, 査読有, 13(6), 676-685, (2011).

[4] S. Maeda, W. Fukuda, A. Kanemura and S. Ishii, "Maximum a Posteriori X-ray Computed tomography using graph cuts", Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 233, 012023, (2010).

[学会発表] (計 13 件)

[5] 吉川大悟, 前田新一, 石井信, "吸収係数のエネルギー依存性を考慮したX線CTアルゴリズムの提案", ISCIE システム制御情報学会, 2013年5月17日, 神戸

[6] 中野太智, 前田新一, 石井信, "状態非依存の方策を用いた強化学習手法の提案", ISCIE システム制御情報学会, 2013年5月17日, 神戸

[7] 中野太智, 前田新一, 石井信, "経路積分強化学習による猫ひねり運動の制御", 電子情報通信学会技術研究報告 NC, 112(389), 19-24, NC2012-97, 2013年1月24日, 札幌.

[8] 井本康宏, 前田新一, 石井信, "ベイズ推定による顕微鏡画像の深さ推定", 電子情報通信学会技術研究報告 NC, 112(389), pp. 31-36, NC2012-99, 2013年1月24日, 札幌.

[9] 前田新一, "逐次近似による格子上のグラフの推論, 情報論的学習理論ワークショップ, 2012年11月8日, 東京.

[10] 井本康宏, 前田新一, 石井信, "ベイズ推定による顕微鏡画像の三次元再構成", 情報論的学習理論ワークショップ, 2012年11月8日, 東京.

[11] 前田新一, "ベイズ推論に基づく新しい X線CT, 電子顕微鏡機能イメージングの医学・生物学への応用「高次機能イメージングの最先端」", 自然科学研究機構 生理研研究会, 2012年10月24日, 岡崎.

[12] 前田新一, 石井信, "神経画像に対するベイズ超解像", 日本バイオイメーjing学会学術集会, 2012年8月28日, 京都.

[13] 前田新一, "マルコフ連鎖における定常分布の学習法としての Contrastive Divergence アルゴリズム", 京都大学基礎物理学研究所研究会, 2012年3月21日, 京都.

[14] 前田新一, "コントラストティブダイバージェンス学習の数理", 東北大学情報科学研究科情報数物研究会, 2011年10月24日, 仙台.

[15] 前田新一, 石井信, "隠れ木を用いたル

ープをもつグラフィカルモデルの近似周辺分布の導出", 情報論的学習理論ワークショップ, 2010年11月4日, 東京.

[16] 前田新一, 石井信, "Contrastive Divergence Learning に対する新しい解釈とその理論解析", 情報論的学習理論ワークショップ, 2010年11月4日, 東京.

[17] S. Maeda, K. Togashi, M. Nishiyama, K. Hong, S. Ishii, "Image processing algorithms to visualize precise neurite trajectories of *Xenopus* neurons in spinal cords imaged by conventional epifluorescence microscopy", Neuroscience 2010, Program# 640.19, 2010年10月14日, サンディエゴ, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 動き追従X線CT画像処理方法, 動き追従X線CTプログラムおよび該プログラムが搭載されたX線CT装置
発明者: 前田新一, 吉川大悟, 田中匠, 石井信
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: 2013-102646 (特願)
出願年月日: 2013年5月15日
国内外の別: 国内

名称: 動き追従X線CT画像処理方法, 動き追従X線CTプログラムおよび該プログラムが搭載されたX線CT装置
発明者: 前田新一, 福田航, 兼村厚範, 石井信
権利者: 京都大学
種類: 特許
番号: 2011-156302 (特開)
出願年月日: 2011年12月18日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 新一 (SHIN-ICHI MAEDA)
京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号：20379530

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：