

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650115

研究課題名(和文) マルコフ確率場によるベイジアンアドホックネットワークシステム設計理論の創出

研究課題名(英文) Generation of fundamental design theory of Bayesian ad-hoc network systems based on Markov random fields

研究代表者

田中 和之 (Tanaka, Kazuyuki)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80217017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：マルコフ確率場と確率伝搬法により構成された計算モデルが具体的にモバイルアドホックネットワーク設計において機能する数理構造の解明を進めた。アドホックネットワークにおける画像処理との違いは基本構成要素であるモバイル通信機器がランダムに配置される点にある。この点を考慮したグラフ構造をもつ確率モデルに対する確率伝搬法による一般化された計算モデルの定式化を行い、いくつかの統計量のモデルパラメータ依存性から複数の特異点が発現することを明らかにした。更に副産物として完全グラフ上およびランダムグラフ上のマルコフ確率場モデルの定式化を都市における交通流予測の問題に適用する研究成果が得られている。

研究成果の概要(英文)：We have investigated some mathematical structures of computational models by using Markov random fields and loopy belief propagations for designs of probabilistic ad-hoc network systems. Although Markov random fields are useful for probabilistic image processing systems, ad-hoc network systems are constructed in terms of random graphs which have large number of degree at each node. In the stand point of view, we have formulated advanced computational models on such random graphs by using loopy belief propagations and have found the existence of several singular points in some statistical quantities, which are regarded as functions of hyperparameters, in such computational models. Moreover, we have succeeded in applying our design strategies to some prediction systems of the traffic density at each road in the city traffic. This is also our results which could not be expected at the application of the present research project.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：確率的情報処理 統計的機械学習理論 マルコフ確率場 確率伝播法 アドホックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

ベイジアンネットを用いた確率的情報処理を情報通信システム設計に応用する研究は、画像処理、誤り訂正符号、確率推論、機械学習など、次の時代の情報通信技術としてこれまで多くの学術的研究が行われている。しかしながらインターネットの設計に応用するとなると、はたしてグローバルな視点で構築されたネットワークプロトコルに確率的情報処理はどこまで有効なアプローチとなり得るのか未知数の部分が多い。そのようななかで Linda Doyle 氏等の研究グループ (University of Dublin, Ireland) によりベイジアンネットシステムのひとつであるマルコフ確率場のアドホックネットワーク設計に対する有効性を示唆する論文 (IEEE Signal Processing Magazine, pp.63-73, September 2006) が発表され世界的に学術的研究の流れが誘発されつつある。そこで本計画研究代表者は、画像処理とインターネット設計という一見技術的にかなりの距離のあると考えられてきた2つの技術がマルコフ確率場をキーワードとして共有する点に着目し、確率的画像処理で構築したベイジアンネットシステム設計理論をモバイルアドホックネットワーク設計に転用するという着想に至った。

2. 研究の目的

本計画研究代表者は、これまでマルコフ確率場と確率伝搬法を基礎とするベイジアンネットシステムによる確率的画像処理アルゴリズム設計において、2002年に英国物理学会の学術雑誌 Journal of Physics A, Vol. 35, No. 37 で解説論文を出版するなど、世界的研究成果をあげてきている。そこで積み上げた実績を上述のモバイルアドホックネットワーク設計における着想のなかで深化・展開させることで本計画研究の目的を達成させてゆく。

3. 研究の方法

本計画研究ではマルコフ確率場によるモバイルアドホックネットワークの確率モデル化をまず行う。その上でより大規模なアドホックネットワークという視点において計算モデルの構築を進めてゆく。画像処理におけるマルコフ確率場では状態変数は光の強度を表しており、ノードは画素を表し、それが正方格子に配列されたグラフ上で定式化されていたが、アドホックネットワークの場合はノードの場所そのものの位置座標が状態変数となり、どのノード間でも互いの位置関係によって互いに接続される可能性があるため、完全グラフを考え、そのすべてのノード間に接続状態を表す状態変数が割り当てられることとなる。本研究ではこの接続状態を表す状態変数をとまなう完全グラフ

上でのマルコフ確率場のモデル化を行い、小数ノードに対する数値計算および解析計算を通して、パラメータによる接続状況の推定に対する妥当性を検討する。さらに確率伝搬法を用いた近似計算モデルの構築による多数ノードによる大規模システムの接続状況推定へと展開する。具体的なアルゴリズムは代表者がすでに学術論文 K. Tanaka and D. M. Titterton: Journal of Physics A, Vol. 40, No. 37 (September 2007), pp.11285-11300 のなかで提案している一般化された確率伝搬法を理論的基盤として適用することで実現してゆく。多数のノードからなる大規模システムに対する数値実験による性能評価はサンプリングを行うためにマルコフ連鎖モンテカルロ法を再構築した上で進める。同時にマルコフ確率場モデルが完全グラフ上で定義されているという点を利用し、ランダムスピ系におけるレプリカ法などをはじめとする情報統計力学的計算手法を用いた典型性能評価法の理論的基盤を整備してゆく。

4. 研究成果

平成 24 年度はマルコフ確率場と確率伝搬法により構成されたベイジアンネットシステムが具体的にモバイルアドホックネットワーク設計において機能する数理構造の解明を進めた。アドホックネットワークにおける画像処理との違いは基本構成要素であるモバイル通信機器がランダムに配置される点にある。そしてこのモバイル通信機器をノードとして各ノード間がすべて相互作用をもつ形を考える必要がある。そこでまず、完全グラフ上の確率モデルに対する確率伝搬法の収束性の確認した。完全グラフ上の確率伝搬法は疎グラフ上のそれに比べて各ノードの更新における計算量が大きいことを軽減する対策としてノード数が大きいということをもとにして確率伝搬法の更新式を展開し、主要項を抜き出した形に修正した上で、プログラムの実装を行っている。更に、与えられた完全データからの確率モデルのモデルパラメータの学習を確率伝搬法の範囲で実現する一般化された定式化に成功した。

平成 25 年度は平成 24 年度において得られた完全グラフ上の確率モデルに対する確率伝搬法の収束性に関する知見を完全グラフに近い形で構成されるグラフ構造を持つノードグループとそのノードグループ間のいくつかのノード対が疎に結合することで構成されるネットワーク構造を持つランダムグラフに対する確率伝搬法のアルゴリズム設計を行いその動作確認をまず行っている。特にいくつかの統計量のモデルパラメータ依存性を詳細に解析し、複数の特異点が出現することを明らかにすることができた。これは当初の計画では想定されなかった新たな知見であり、本研究計画の成果の一つとして位置づけられる。また、確率伝搬法によるモ

デル選択法と疑似尤度最大化法を融合させる形で複合尤度法を導入した新しい学習・計算モデルも提案し、これも各ノードの次数が大きなネットワーク構造をもつマルコフ確率場の計算量の大幅な軽減につながることを示した。この知見をもとに拡張されたマルコフ確率場モデルから少数のノードを通信機器と見立てた疑似ネットワーク上での数値実験を実行し、その妥当性を明らかにした。同時に統計的学習理論に従ってモデル選択および予測・推論を行う学習アルゴリズムの構成を上述の改良された確率伝搬法をもとに行い、その有効性を確認した。

研究代表者は6月と9月の外国出張において仏国 CEA Saclay の Lenka Zdeborova 研究員、伊国 Roma 大学 La Sapienza 校の Federico Richi-Tersenghi 准教授、Tomasso Rizzo 研究員、Jack Raymond 研究員に研究成果の一部を説明し、得られた助言をもとに研究成果の取りまとめた。

研究計画の実施を通して得られた成果のさらなる展開として副産物として完全グラフ上およびランダムグラフ上のマルコフ確率場モデルの定式化を画像の領域分割の計算モデルおよび都市における交通流予測の問題に適用する研究成果が得られている。また、ランダムグラフに基づくネットワーク構造をもつマルコフ確率場において、その予測・推論の過程でノード数のオーダーの巨大行列の逆行列の計算を必要とする場合がある。この問題を解決することを目的として感受率伝搬法を改良した方法を提案することに成功し、特に画像の領域分割問題のモデル選択に有効であるという成果が得られているが、さらにこの手法は本計画研究で取り扱ってきたネットワーク構造をもつマルコフ確率場における計算量の軽減に大きく貢献することを示唆する計算結果が得られたことは想定外の成果として位置づけられる。

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8件)

Shun Kataoka, Muneki Yasuda, Cyril Furtlehner and Kazuyuki Tanaka: Traffic Data Reconstruction based on Markov Random Field Modeling, Inverse Problems, 査読有, Vol.30, No.2, Article No.025003, pp.1-14, February 2014.

DOI:10.1088/0266-5611/30/2/025003

安田宗樹, 片岡駿, 田中和之: 確率的グラフィカルモデル ベイジアンネットワークとその周辺, 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌「オペレーションズ・リサーチ」2013年4月号特集「グラフと確率・統計モデル」, 査読無, Vol.58, No.4, pp.191-197, April 2013.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009594939>

Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Susceptibility Propagation by Using Diagonal Consistency, Physical Review E, 査読有, Vol.87, No.1, Article No.012134, pp.1-6, January 2013. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.87.012134>

Yuji Waizumi, Tsuyoshi Sato and Kazuyuki Tanaka: Network Application Identification Using Sequential Transition Patterns of Payload Length, Interdisciplinary Information Sciences, 査読有, Vol.18, No.2, pp.189-196, December 2012. DOI:10.4036/iis.2012.189

Muneki Yasuda, Junya Tannai and Kazuyuki Tanaka: Learning Algorithm for Boltzmann Machines Using Max-Product Algorithm and Pseudo-Likelihood, Interdisciplinary Information Sciences, 査読有, Vol.18, No.1, pp.55-63, December 2012. DOI:10.4036/iis.2012.55

Kazuyuki Tanaka, Muneki Yasuda and D. Michael Titterton: Bayesian Image Modeling by Means of Generalized Sparse Prior and Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.81, No.11, Article No.114802, pp.1-9, November 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.114802>

浅利岳, 安田宗樹, 和泉勇治, 田中和之: 2部グラフ型ボルツマンマシンに対する複合最尤法, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.112, No.298, pp.39-44, November 2012. <http://www.ieice.org/ken/paper/2012117N0yp/>

松尾翔希, 和泉勇治, 田中和之: 通信特性に基づいたウェブアプリケーション識別に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.112, No.210, pp.61-66, September 2012. <http://www.ieice.org/ken/paper/20120921k0w7/>

[学会発表](計5件)

Shun Kataoka, Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: "Statistical-Mechanical Approaches for Image Inpainting and Segmentation Filters", Epilogue Series I of Frontier of Statistical Physics and Information Processing 2013 Italia Giappone Attraverso Il Futuro Bridge

Across the Future (2 August, 2013, Kyoto University, Kyoto, Japan)
Shun Kataoka, Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: "EM Algorithm for Bayesian Image Inpainting", ELC International Meeting on "Inference, Computation, and Spin Glasses (28 July, 2013, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

片岡駿, 安田宗樹, 田中和之: マルコフ ネットを用いた交通量の統計的予測, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 18 日, 横浜国立大学).

田中和之, 安田宗樹: スパース相互作用をもつ事前分布と確率伝搬法によるベイジアンモデリング, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月 18 日, 横浜国立大学)

Kazuyuki Tanaka: Bayesian image modeling by generalized sparse Markov random fields and loopy belief propagation, Interdisciplinary Workshop on Inference --- Information processing in complex systems with applications to traffic forecasting--- (12 June, 2012, Inria Paris-Rocquencourt (Paris sub-office), Paris, France)

[その他]

ホームページ等

<http://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/~kazu/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 和之 (TANAKA, KAZUYUKI)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 80217017

(2) 研究分担者

和泉 勇治 (WAIZUMI, YUJI)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 90333872

(3) 連携研究者

安田 宗樹 (YASUDA, MUNEKI)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 20532774