

研究種目: 特定領域研究

研究期間: 2006～2009

課題番号: 18079002

研究課題名(和文) 大規模確率場により高度化された確率推論システムの設計

研究課題名(英文) Design of sophisticated Bayesian network systems based  
on large-scale random fields

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

研究成果の概要 (和文):

本計画研究では大規模確率場に対する予測・推論アルゴリズムをより高度化された理論体系へと深化させるという当初の目標を達成することができた。そのポイントは確率伝搬法のなかで研究開始当初にはまだ当該分野でそれほど認知されていなかったクラスター変分法の技術的側面を通して開発された手法などを新たに持ち込んだ点にある。特出した成果は大規模確率場に対する予測・推論理論を体系化し、単行本「ベイジアンネットワークの統計的推論の数理」として出版したことである。

研究成果の概要 (英文):

In the research project, we have achieved our goal that we construct the sophisticated methodologies for the design of statistical inference systems based on large scale random fields. The key points of our achievements are to employ some technologies in the cluster variation method in the statistical mechanics. They were not so major techniques of belief propagations in the research fields of probabilistic information processing and statistical learning theory when the present project started in 2006. Our outstanding result in our research project is to publish the book that the general methodology for modeling and designing the Bayesian networks with large scale random fields is systematized.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,300,000	0	13,300,000
2007年度	18,600,000	0	18,600,000
2008年度	18,600,000	0	18,600,000
2009年度	14,800,000	0	14,800,000
年度			
総計	65,300,000	0	65,300,000

研究分野: 数理工学

科研費の分科・細目:

キーワード: アルゴリズム, 情報統計力学, モデル化, 確率的情報処理, 統計科学

## 1. 研究開始当初の背景

本計画研究は国内外の学術・産業の両面における確率伝搬法・確率推論・画像処理を用いた情報通信技術の動向を統合する研究として位置づける形で開始された。像情報処理、情報通信という今後の情報通信技術のなかで中心的役割を担うべき最先端の基本技術のなかに統計科学・統計力学という伝統的学問体系に基づいて従来の柔軟な情報処理システムでは得られない系統的設計への道を切り開いて行くことが本計画研究の特色であった。一見、独創的という印象とはかけ離れたこの地道な活動が実は柔軟な情報処理システムを確固たる数理的裏付けのもとで系統的に設計できる理論を構築することができることを予想される意義としてあげていた。本計画研究の理論的基盤となる大規模確率場は確率的情報処理の強力なアプリケーションとして研究開始当初から国際的にも関心が高まりつつある状況にあった。そのなかで英国物理学会の学術雑誌 *Journal of Physics A* において、研究代表者が 2002 年 9 月に出版した大規模確率場を用いた確率的情報処理に関する解説論文 (*J. Phys. A*, vol. 35, no. 37, pp. R81-R150, 2002) が国際的に高い評価を得ていた。

## 2. 研究の目的

高次元の画像データから目的に応じた情報を抽出し、高度の推論を行う確率推論システムをベイジアンネットワークとして構築する理論体系を情報統計力学的知見にもとづいて確立する。これにより、確率的情報処理の次世代高速通信システムへの実装が可能であることまでを研究期間内に明らかにする。具体的には

- 大規模確率場による高次元データ解析システム設計と近似アルゴリズムの構成と性能評価。
- 確率推論モデルの混合による高度化された推論システムの設計理論の構築とその実現。
- 情報通信方式と大規模確率場の構造的類似性にもとづく次世代通信システムへの実装。

の 3 点を段階的に推進する。

## 3. 研究の方法

前項の目的を達成するために年度ごとに以下の方法に基づいて研究計画が遂行された。

平成 18 年度：特に大規模確率場モデルにお

けるデータからのハイパパラメータ推定システムの典型性能評価法(統計的性能評価法)の設計理論の構築をガウシアングラフィカルモデルに対して実施している。同時に、従来の大規模確率場を量子力学的に拡張した量子確率場などの形での確率推論モデルの混合の提案とそこでの確率伝搬法の定式化についての研究も平行して行っている。

平成 19 年度：本村陽一主任研究員(産業技術総合研究所)との連携により産業技術総合研究所の研究施設を利用して、人間の日常行動についてのデータを収集し、これを整理して教師用データおよびテスト用データを作成し、確率的因果関係を伴う画像認識のためのベイジアンネットワーク予測・推論システムを構築し、その有効性の検証を行っている。また、データマイニングにおけるクラス分けについて、そこに量子確率場を導入した新しい計算モデルの提案を中心に研究を行っている。

平成 20 年度：上記目的の 2 の実現にむけての確率伝搬法の新しい拡張について検討した。Web を介したデータマイニングなどへの応用が期待されている適応 TAP 法と呼ばれる方法からの拡張という立場においてその検討を進めた。また、従来から用いられている確率伝搬法による一般のグラフ構造をもつ確率推論システムの性能評価法の提案を行っている。

平成 21 年度：確率伝搬法による典型性能評価法を一般の大規模確率場に適用可能な形に拡張するアルゴリズム設計理論の構築を進めた。この典型性能評価アルゴリズム設計理論は確率伝搬法を基礎として構築されている。その信頼性は確率的情報処理において具体的に数値実験を通して確認している。さらに、ベイジアンネットワークを用いた統計的学習システムにおける確率伝搬法を用いた汎用アルゴリズムを設計し、数値実験による有効性の検討をおこなっている。

## 4. 研究成果

本計画研究では大規模確率場に対する予測・推論アルゴリズムをより高度化された理論体系へと深化させるという当初の目標を達成することができた。そのポイントは確率伝搬法のなかで、研究開始当初にはまだ当該分野でそれほど認知されていなかったクラスター変分法の技術的側面、具体的には量子統計力学的側面、理想気体の側面、ガウシアングラフィカルモデルを意識した側面、スピ

ングラス理論への応用の側面などを新たに持ち込んだ点にある。また、日常生活になかでの人間行動の予測について確率的情報処理システムの研究を本村陽一主任研究員(産業技術総合研究所)と連携して行うことで、現実世界のデータから得られる知見を本計画研究で体系化した理論体系の新たな展開のためにフィードバックすることができた。各年度の主な成果は以下のとおりである。

平成 18 年度：これまで整備が行われていなかった大規模確率場に対する確率伝搬法の統計的動作解析の典型評価アルゴリズムをガウシアングラフィカルモデルに対して設計することに成功した。この成果は大規模確率場によるモデル選択過程の動作の典型評価を可能とする先駆的な成果として関連分野から評価を受けている。また、同時に当該特定領域研究の量子情報班との連携および海外研究協力者との協力関係を通して、データの統計解析に対する量子確率場を用いた大規模推論システムの構築が可能であることを実証した。

平成 19 年度：画像認識を応用した日常生活のなかでの人間行動の予測について確率的情報処理システムにおいて確率的因果関係の効率的導入の指針を明らかにした。また、同時にデータマイニングにおける量子力学的重ね合わせを用いたクラス表現を提案し、混合ガウスモデルの量子力学的拡張の有効性を確認した。

平成 20 年度：適応 TAP 法を出発点として本計画研究において当該年度に提案した新しい確率伝搬法は可解確率モデルを自由に取込みながら取扱いの困難な確率モデルの高性能の近似アルゴリズムを構成することを可能とするものである。この理論的拡張は統計力学における理想気体の理論から出発して構築されたクラスター変分法概念を持ち込むことで初めて可能となったものである。この提案により守備範囲を従来法から飛躍的に広げることができた。

平成 21 年度：一般の大規模確率場に対する典型性能評価アルゴリズム設計理論の構築に成功した。この着想はスピングラス理論に対するクラスター変分法を用いたアプローチにおいて用いられていた計算技法を大規模確率場の典型性能評価法に適用可能な形に改良するというものである。本研究計画では離散の状態をもつ大規模確率場の応用のひとつとして、イジングモデルを事前確率とする確率的画像処理システムにおいて、その有効性を確認している。これは確率伝搬法による統計的推論の典型性能評価法の一般的

設計理論に道を開くものとして国内外の研究者から高い評価を受けている。また、大規模データからの統計的学習アルゴリズムについて安田宗樹助教(東北大学大学院情報科学研究科)と連携して、開発を行い、確率伝搬法およびマルコフ連鎖モンテカルロ法を効果的に用いた新しいアルゴリズムを提案している。得られた研究成果の一部を体系化し、2009 年 10 月に「ベイジアンネットワークの統計的推論の数理(コロナ社)」という単行本として出版した。

## 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 16 件)

1. Shun Kataoka, Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Statistical Performance Analysis in Probabilistic Image Processing, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 79, No. 2, Article No. 025001, pp. 1-2, February 2010 (査読有).
2. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Approximate Learning Algorithm in Boltzmann Machines, Neural Computation, Vol. 21, No. 11, pp. 3130-3178, November 2009 (査読有).
3. Kazuyuki Tanaka and Valery Van Kerrebroeck: Solvable Probabilistic Model for Cycles in Planar Graph, Interdisciplinary Information Sciences, Vol. 15, No. 2, pp. 301-318, September 2009 (査読有).
4. 安田宗樹, 田中和之: 確率的画像処理フィルタ, システム/制御/情報, Vol. 53, No. 8, pp. 56-57, August 2009 (査読無).
5. Kazuyuki Tanaka: Mathematical Structures of Loopy Belief Propagation and Cluster Variation Method, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 143, Article No. 012023, pp. 1-18, January 2009 (査読有).
6. Kazuyuki Tanaka and Koji Tsuda: A Quantum-Statistical-Mechanical Extension of Gaussian Mixture Model, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 95, Article No. 012023, pp. 1-9, January 2008 (査読有).
7. Kazuyuki Tanaka and D. M. Titterton: Statistical

- Trajectory of Approximate EM Algorithm for Probabilistic Image Processing, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, Vol. 40, No. 37, pp. 11285-11300, September 2007 (査読有).
8. 井上佳, 田中和之: 画像修復における確率伝搬法を用いたEMアルゴリズムの改良, 情報科学技術レターズ, vol. 6, pp. 187-188, September 2007 (査読有).
  9. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: The Mathematical Structure of the Approximate Linear Response Relation, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, Vol. 40, No. 33, pp. 9993-10007, August 2007 (査読有).
  10. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Boltzmann Machines with Bounded Continuous Random Variables, Interdisciplinary Information Sciences, Vol. 13, No. 1, pp. 25-31, March 2007 (査読有).
  11. Jun Ohkubo and Kazuyuki Tanaka: Nonadditive Volume and Community Detection Problem in Complex Networks, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 75 No. 11, Article No. 115001, pp. 1-2, November 2006 (査読有).
  12. 安田宗樹, 大久保潤, 田中和之: ガウシアングラフィカルモデルを用いた画像補修アルゴリズム, 情報科学技術レターズ, vol. 5, pp. 225-228, September 2006 (査読有).
  13. 大久保潤, 田中和之: 統計力学の基礎---複雑ネットワークとの関連にもとづいて---, 特集/ネットワーク科学の物理と数学, 数理科学, Vol. 44, No. 8, pp. 24-29, August 2006 (査読無).
  14. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Relationship between Plefka's Expansion and Cluster Variation Method, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 75, No. 8, Article No. 084006, pp. 1-8, August 2006 (査読有).
  15. Jun Ohkubo, Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Replica Analysis of a Preferential Urn Model, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 75, No. 7, Article No. 074802, pp. 1-6, July 2006 (査読有).
  16. 大久保潤, 田中和之: 大久保潤氏・田中和之氏 (東北大学大学院) の「スケールフリーネットワーク」, トレンドキーワード (第2回)「スケールフリーネットワーク」, 電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ誌, Vol. 11, No. 1, pp. 18-19, June 2006 (査読無). [学会発表] (計 31 件)
  1. 片岡駿, 安田宗樹, 田中和之: 確率伝搬法による確率的画像処理におけるEMアルゴリズムの統計解析, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学 (査読無).
  2. 安田宗樹, 田中和之: 適応TAP方程式の摂動近似としての再解釈, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学 (査読無).
  3. 片岡駿, 安田宗樹, 田中和之: 確率伝搬法による確率的画像処理における統計的性能評価, 第 12 回情報論の学習理論ワークショップ, 2009 年 10 月 20 日, 九州大学医学部百年講堂 (査読無).
  4. 桜井哲治, 安田宗樹, 田中和之: Kullback-Leibler Importance Estimation Procedureを用いた Restricted Boltzmann Machineの学習アルゴリズム, 第 12 回情報論の学習理論ワークショップ, 2009 年 10 月 20 日, 九州大学医学部百年講堂 (査読無).
  5. 安田宗樹, 樺島祥介, 田中和之: レプリカ拡張系適応的TAP方程式を用いた学習アルゴリズム, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学 (査読無).
  6. 片岡駿, 安田宗樹, 田中和之: 確率伝搬法による画像修復の統計的性能評価法, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学 (査読無).
  7. 田中和之: 大規模確率場と確率的画像処理, 日本神経回路学会第 19 回全国大会, 2009 年 9 月 24 日, 東北大学 (査読無, 招待講演).
  8. Kazuyuki Tanaka, Nicolas Morin, Muneki Yasuda and D. M. Titterton: Probabilistic image processing by extended Gauss-Markov random fields, Proceedings of IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing, September 3, 2009, University of Cardiff, Wales, UK (Proceedings of IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing, pp. 618-621, August 2009) (査読有).
  9. 田中和之: 大規模確率場と確率的画像処理の深化と展開, 2009 年 6 月コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2009 年 6 月 10 日, 京都大学 (査読無, 招待講演).
  10. 安田宗樹, 樺島祥介, 田中和之: レプリカ拡張系に対する適応的TAP方程式の統計的学習理論への応用, 日本物理学会第

- 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日, 立教大学(査読無).
11. 田中和之: クラスタ変分法を用いた一般化された確率伝搬法の拡張, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日, 立教大学(査読無).
  12. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Approximate Learning Algorithm for Restricted Boltzmann Machines, 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control & Automation Intelligent Agents, Web Technologies & Internet Commerce Innovation in Software Engineering (CIMCA-IAWTIC'08), December 10-12, 2008, Vienna, Austria (Proceedings of CIMCA-IAWTIC'08, pp.692-697, December 2008, IEEE Computer Society Press) (査読有).
  13. Kazuyuki Tanaka, Takafumi Usui and Muneki Yasuda: Statistical Inferences by Gaussian Markov Random Fields on Complex Networks, 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control & Automation Intelligent Agents, Web Technologies & Internet Commerce Innovation in Software Engineering (CIMCA-IAWTIC'08), December 10-12, 2008, Vienna, Austria, (Proceedings of CIMCA-IAWTIC'08, pp.214-219, December 2008, IEEE Computer Society Press) (査読有).
  14. 丹内隼也, 安田宗樹, 田中和之: データのノイズを考慮したボルツマンマシンの学習アルゴリズム, 第 11 回情報論的学習理論ワークショップ, 2008 年 10 月 29 日, 仙台国際センター(査読無).
  15. 田中和之, Valery Van Kerrebroeck: 平面グラフ上の閉路と確率モデル, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 岩手大学(査読無).
  16. 安田宗樹, 田中和之: 隠れ素子をもつボルツマンマシンに対する平均場理論, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 岩手大学(査読無).
  17. 河田諭志, 本村陽一, 西田佳史, 石川詔三, 田中和之: 室内における幼児の行動予測のための確率的因果構造モデルの学習と推論, 電子情報通信学会・日本神経回路学会共催ニューロコンピューティング研究会, 2008 年 3 月 12 日, 玉川大学 (電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.542 pp.279-282, March 2008) (査読無).
  18. 井上佳, 安田宗樹, 田中和之: 確率伝搬法を用いたEMアルゴリズムによる画像処理, 電子情報通信学会・日本神経回路学会共催ニューロコンピューティング研究会, 2008 年 3 月 12 日, 玉川大学(電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.542, pp.37-42, March 2008) (査読無).
  19. 白井崇文, 安田宗樹, 田中和之: スケールフリーネットワーク上のガウシアングラフィカルモデル, 電子情報通信学会・日本神経回路学会共催ニューロコンピューティング研究会, 2008 年 3 月 12 日, 玉川大学(電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.542, pp.1-6, March 2008(査読無)).
  20. 白井崇文, 田中和之: スケールフリーネットワーク上のガウシアングラフィカルモデル, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21 日, 北海道大学(査読無).
  21. 安田宗樹, 田中和之: 連続確率変数を持つボルツマンマシン, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21 日, 北海道大学(査読無).
  22. 本村陽一, 河田諭志, 西田佳史, 田中和之: 日常生活行動理解のための確率的因果知識の学習, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 14 日, 千葉工業大学(査読無).
  23. Kazuyuki Tanaka: Introduction to Probabilistic Image Processing and Bayesian Networks, Tutorial Session of The 18th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT2007) and The 10th International Conference on Discovery Science, 1 October, 2007, Sendai International Center, Sendai, Japan (査読無, 招待講演).
  24. Kazuyuki Tanaka: Advanced Mean Field Methods in Quantum Probabilistic Inference, 23st IUPAP International Conference on Statistical Physics, July 9-13, 2007, Genova, Italy(査読無).
  25. Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: The Approximate Linear Response Theory and Its Mathematical Structures, 23st IUPAP International Conference on Statistical Physics, July 9-13, 2007, Genova, Italy(査読無).
  26. 河田諭志, 本村陽一, 西田佳史, 田中和之: 確率的因果構造を考慮した日常生活行動の画像認識, 第 21 回人工知能学会全国大会, 2007 年 6 月 21 日, ワールドコンベンションセンターサミット(宮崎県) (査読無).

27. 田中和之：量子系における確率推論の平均場理論，日本物理学会 2007 年春季大会 領域 11 シンポジウム「量子系におけるコトの物理学，2007 年 3 月 21 日（鹿児島大学）（査読無，シンポジウム講演）.
28. 大久保潤，田中和之：ネットワーク構造をもつ壺モデルにおけるべき則，日本物理学会 2006 年秋季大会，2006 年 9 月 26 日，千葉大学（査読無）.
29. 井上純一，倉沢光，田中和之：マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく EM アルゴリズムの画像修復への適用とその統計的性能評価，日本物理学会 2006 年秋季大会，2006 年 9 月 26 日，千葉大学（査読無）.
30. 田中和之，皆川まりか：画像処理における確率伝搬法を用いた EM アルゴリズムの統計解析，日本物理学会 2006 年秋季大会，2006 年 9 月 26 日，千葉大学（査読無）.
31. 倉沢光，田中和之：確率的画像処理におけるハイバパラメータ推定の統計的解析，電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会 2006 年 7 月 14 日，早稲田大学理工学部（電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 106, No. 163, pp. 7-12, July 2006）（査読無）.

〔図書〕（計 3 件）

1. 田中和之：確率モデルによる画像処理技術入門，森北出版，2006, 192 ページ.
2. 田中和之，林正彦，海老澤丕道：電子情報系の応用数学，朝倉書店，2007, 236 ページ.
3. 田中和之：ベイジアンネットワークの統計的推論の数理，コロナ社，2009, 266 ページ.

〔その他〕

<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

該当者はいない。

### (3) 連携研究者

本村 陽一（MOTOMACHI YOICHI）独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター・主任研員

研究者番号：30358171

安田 宗樹（YASUDA MUNEKI）東北大学大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：20532774