

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740263

研究課題名(和文)非平衡関係式を駆使した最適化と制御の情報統計力学

研究課題名(英文)Statistical mechanics and Information processing for optimization and control by nonequilibrium relation

研究代表者

大関 真之(Ohzeki, Masayuki)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：80447549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：最適化問題に関連するスピングラス模型の解析を通じて、Jarzynski等式や揺らぎの定理からなる非平衡関係式による最適化問題の解法を検討・提案した。

【平成24年度成果】Masayuki Ohzeki, Phys. Rev. E 86, 061110 (2012), 【平成25年度成果】Akihisa Ichiki and Masayuki Ohzeki, Phys. Rev. E 88, 020101(R) (2013), 【平成26年度成果】Masayuki Ohzeki and Akihisa Ichiki, Phys. Rev. E 92, 012105 (2015)

研究成果の概要(英文)：The research project aims at investigation and proposal for solving optimization problem by use of the various nonequilibrium relation such as fluctuation theorem and Jarzynski equality through analyses of various spin glass models.

【The first year representative result】Masayuki Ohzeki, Phys. Rev. E 86, 061110 (2012), 【the second year representative result】Akihisa Ichiki and Masayuki Ohzeki, Phys. Rev. E 88, 020101(R) (2013), 【The third year representative result】Masayuki Ohzeki and Akihisa Ichiki, Phys. Rev. E 92, 012105 (2015)

研究分野：統計力学

キーワード：最適化問題 機械学習 非平衡統計力学 スピングラス 誤り訂正

1. 研究開始当初の背景

身の回りの社会システムの設計において、コストの低減と同時に効率を求める事でより利便性の高いものが求められる。これを数理的に定式化したものを最適化問題と呼び、物理の問題に置きなおす事で長年に渡り、自然現象に関連した汎用的解法が提案され盛んにその性質も調べられてきた。特に確率の要素を含む物理学の体系として、熱揺らぎを扱う統計力学、重ね合わせによる揺らぎを扱う量子力学がある。前者を用いた最適化問題の解法として熱アニーリング (Simulated annealing)、及び後者による量子アニーリング (Quantum annealing) が提案されていた。前者は古典コンピュータ上での実装が現代においても可能であるが、後者についてはその利用についてようやく可能になりつつあり、その安定的な利用においては誤り訂正技術の開発が必要不可欠であった。そしてどのように最適化問題を用いて、社会の諸問題に対して適用していくのかといったところについても模索が続いていた。

2. 研究の目的

本研究計画では統計力学及び量子力学の2分野を両輪とした、社会システムの設計において重要な最適化問題の解法を深化させる研究を行った。具体的には以下の課題について検討した。

- [1] 詳細釣り合いの破れによるダイナミクスの加速効果
- [2] 繰り込み群の計算量の縮減・本質抽出
- [3] ボルツマン機械学習

3. 研究の方法

非平衡定常状態を特徴付ける詳細釣り合いの破れに注目して、その破れに伴うダイナミクスの加速を利用して、最適化問題や確率過程によるサンプリング手法の高速化・制御を目指す。また統計力学と類似した問題構造を有するボルツマン機械学習に注目して、最適化手法の検討・実問題への利用に即した手法の検討を行う。最適化手法の高度化に伴い、必要な計算量が増加することから、物理学特有の視点である「繰り込み群」の適用により、計算量の縮減・本質部分の抽出に挑む。

4. 研究成果

特筆すべきは、あるクラスのスピングラスモデルの最適化問題を通して、情報復号を行う量子誤り訂正符号に対して、繰り込み群を利用した情報統計力学における高精度の計算技術の開発を移行したことである。本手法は、誤り訂正符号の理論的性能評価、更には量子力学的な重ね合わせを駆使した情報処理における量子誤り訂正符号の性能限界を予測する手法へと発展を遂げている。研究代表者の手法は「繰り込み群」と呼ばれるシステムの普遍的な構造を取り出す計算手法にもとづき、長年の間、定量的評価が困難であった情報統計力学の基本問題に対して、解決を与

える大きなブレークスルーとして IOP select に選出され高く評価されている。

次にスパース性を利用した最適化問題を解くことによるカンニング検出技術の開発である。統計的機械学習理論の基本となるボルツマン機械学習を利用して、被験者間の相関としてカンニング検出を行うという斬新な発想である。さらに零成分を多くもつスパースなパラメータの推定問題として定式化を行うことによりカンニングの誤認を防いでいる。本研究成果は、スパース性を利用した機械学習の本質を分かりやすく国民に発信する内容であり、朝日新聞を始めとするマスメディアに取り上げられて、導入を決定した企業もあるなど、社会的反響が大きい。

次にあげるのは深層学習(いわゆるディープラーニング)の学習過程における相転移現象の発見である。統計的機械学習理論と統計力学の融合という新規の方向性を指し示すものであり、深層学習の性能評価について理論的アプローチが乏しい現状において、顕著な成果である。

さらに今後の発展を期待させる成果として、詳細釣り合いの破れを駆使した確率過程の高速化アルゴリズムの開発である。教科書通りの確率過程を利用する場合、ほとんどの場合に目にする詳細釣り合いの条件を破った非平衡定常系に移すことで高速なサンプリングを可能とした。他のサンプリング手法との親和性にも優れ、統計的機械学習における新規アルゴリズムの創出の一助となっている。このように当初の予定を大きく飛び越えて、制御・最適化にとどまらず機械学習というより広範な範囲に及ぶ研究活動を展開した。

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8件)

[1] Yuki Sughiyama and Masayuki Ohzeki "Nonequilibrium work relation in a macroscopic system", Journal of Statistical Mechanics, Vol.2013 (April 2013), Article ID.P04012, pp.1-15.

[DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2013/04/P04012>, IF = 2.056]

[2] Yuki Sughiyama and Masayuki Ohzeki: Variational principle in Langevin processes, Interdisciplinary Information Science, Vol. 19, No.1 (August 2013), pp.93-99 (The 4th Young Scientist Meeting on Statistical Physics and Information Processing, 16 December, 2012, Sendai, Japan).

[DOI:<http://doi.org/10.4036/iis.2013.93>]

[3] Akihisa Ichiki and Masayuki Ohzeki:
“Violation of detailed balance accelerates relaxation”,
Physical Review E, Vol. 88, No.2 (August 2013), Article ID.020101(R), pp.1-4.
[DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.020101>, IF = 1.475]

[4] Masayuki Ohzeki
“Belief propagation with multipoint correlations and its application to inverse problem”,
Journal of Physics: Conference Series Vol. 473 (December 2013), Article ID.012005, pp.1-14 (ELC International Meeting on Inference, Computation, and Spin Glasses, 28-30 July, 2013, Sapporo, Japan).
[DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/473/1/012005>]

[5] Shogo Yamanaka, Masayuki Ohzeki and Aurelien Decelle
“Detection of cheating by decimation algorithm”,
Journal of Physical Society of Japan, Vol.84, No.2 (January 2015), Article ID.024801, pp.1-7.
[DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.024801>]

[6] Masayuki Ohzeki and Jesper Lykke Jacobsen
“High-precision phase diagram of spin glasses from duality analysis with real-space renormalization and graph polynomials”,
Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. Vol.48, No.9 (February 2015), Article ID.095001, pp.1-30.
[DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1751-8113/48/9/095001>]

[7] Masayuki Ohzeki
“Statistical-mechanical analysis of pre-training and fine tuning in deep learning”,
Journal of Physical Society of Japan, Vol.84, No.3 (February 2015), Article ID.034003, pp.1-6.
[DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.034003>]

[8] Kazuyuki Tanaka, Shun Kataoka, Muneki Yasuda and Masayuki Ohzeki
“Inverse renormalization group transformation in Bayesian image segmentations”,
Journal of Physical Society of Japan, Vol.84, No.4 (March 2015), Article ID.045001, pp.1-2.

[DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.045001>]

【学会発表】(計 10 件)

【国際会議招待講演】

[1] Masayuki Ohzeki
“Belief propagation with multipoint correlations and its application to Inverse problem”,
International Meeting on “Inference, Computation, and Spin Glasses”, Sapporo, Japan, 29 July, 2013.

[2] Masayuki Ohzeki
“Detection of cheating by decimation algorithm”,
Kyoto University and National Taiwan University Symposium 2014 Electrical Engineering and Computer Science, Kyoto, Japan, 1 September, 2014.

[3] Masayuki Ohzeki
“Mathematical understanding of violation of detailed balance condition and its application to Langevin dynamics”,
Statphys-KolkataVIII, Kolkata, India, 1 December, 2014.

[4] Masayuki Ohzeki
“Langevin dynamics violating detailed balance condition”,
2015 Workshop on Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications (SPDSA2015), Kyoto, Japan, 19 February, 2015.

【国内会議招待講演】

[5] 大関 真之
“データサイエンスにおけるスパースモデリング”
ビッグデータ時代に向けた革新的アルゴリズム基盤セミナー、群馬大学伊香保研修所、2015年3月

[6] 大関 真之
“詳細釣り合いを破るランジュバン系の数理”

Break and Beyond Detailed Balance Condition (BBDBC)、京都大学、2015年3月

[7] 大関 真之
“ボルツマン機械学習によるカンニング検出”
第20回情報論的学習理論と機械学習 (IBISML) 研究会、京都大学、2015年3月

[8] 大関 真之
“スピングラス理論とグラフ多項式”
Two or Three Things We Know About Statistical Mechanics、東北大学、2014年12月

[9] 大関 真之
“データと数理をつなぐ圧縮センシング”
スパースモデリングチュートリアル講演会、東京工業大学、2014年11月

[10] 大関 真之
“匂いを嗅ぎ分ける？圧縮センシング技術”
匂い・脳科学・機械学習の接点、京都大学、

2014年9月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-adsys.sys.i.kyoto-u.ac.jp/mohzeki/index.html>

受賞等

Physics(Vol.5, 50(2012))誌で研究成果特集
Physical Review Letters誌で

Editor's Suggestionに選定される.

第57回物性若手夏の学校 ポスター最優秀賞

"スピングラス模型と量子誤り訂正符号" 京都大学第8回 ICT イノベーション優秀研究賞

"カンニング検出の情報統計力学～

学部生の閃きと挑戦～"

山中 祥五、中西 和音、大関 真之

Journal of Physics A誌で

IOP select に選出される.

新聞等報道状況

2013年3月15日付マイナビニュースにて
"阪大など、極限まで冷やさなくても量子計算が可能となる新理論を発表"

2015年1月16日付朝日新聞34面社会2にて
"人工知能でカンニングを発見 京大などがプログラム開発"

2015年1月19日 TBSテレビ【あさチャン!】

<あさチャン!朝刊チェック> "人工知能使いカンニングを発見"

京都大学広報 "機械学習によるカンニングの検出技術の開発"

2015年1月21日付人民日報

"日本の専門家、カンニングを発見するプログラムを開発"

私塾界 "人工知能でカンニングを発見 京大などのグループ"

2015年1月25日付財経新聞 "京大、機械学習によってカンニングを自動的に検出する技術を開発"

リセマム "機械学習の手法でカンニングを自動的に検出...京都大の研究成果"

Journal of Physical Society of Japan 誌上

2015年1月 Top 20 most downloaded papers で3番.

2015年2月26日発売ニュートンプレス Newton4月号 Focus にて研究成果報道.

2015/3/27 NHK【おはよう日本】

<7時台ニュース>

"衝撃のカンニングー背景は"

6. 研究組織

(1)研究代表者

大関 真之 (Masayuki Ohzeki)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 80447549