

平成30年6月11日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25120008

研究課題名(和文) 圧縮センシングにもとづくスパースモデリングへのアプローチ

研究課題名(英文) Approach to sparse modeling based on compressed sensing

研究代表者

田中 利幸(Tanaka, Toshiyuki)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：10254153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 52,400,000円

研究成果の概要(和文)：医学班や天文班などと協力して、圧縮センシングを活用して、MRIや超長基線電波干渉計において少数の観測データから画像を再構成する方法を開発した。MR分光画像法(MRSI)によってマウスに注入されたブドウ糖の代謝の時空間ダイナミクスを非侵襲的に可視化した研究成果の事例では、注入されたブドウ糖が体内に広がり、腫瘍組織で嫌氣的に代謝され乳酸が産生されていく様子を見ることができる。圧縮センシングを使わない撮像法では一枚の画像の観測にも数時間を要し、時空間ダイナミクスの計測は不可能であるが、提案手法では間引き観測により体内の生化学反応の時空間ダイナミクスを非侵襲的に可視化できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In collaboration with the Medical Science team, Planetary Science team and others, we have developed image reconstruction methods from fewer numbers of measurement data in magnetic resonance imaging (MRI) and very long baseline interferometry (VLBI), in which compressed sensing has been utilized. As an example, using one of the proposed methods, we visualized spatio-temporal dynamics of metabolism of glucose injected into a tumor-bearing mouse in vivo via magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI), where one can observe spreading of the injected glucose over the whole body and conversion into lactate within the tumor tissue (the Warburg effect). Without compressed sensing, it takes several hours to acquire data even for a single frame, making measurement of spatio-temporal dynamics impossible. We have thus proved feasibility of the concept that with compressed sensing one can visualize spatio-temporal dynamics of biochemical processes in body non-invasively.

研究分野：情報理論

キーワード：圧縮センシング スパースモデリング ベイズ統計 核磁気共鳴

1. 研究開始当初の背景

新学術領域研究「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」の活動を通じて、学術分野としての高次元データ駆動科学を実体あるものにしていくためには、単にスパースモデリングの各論的応用課題とデータ・情報解析の数理理論とを突き合わせるだけでは不十分であり、個々の具体的な応用課題と数理理論との間を取り持つ「モデリング」の考え方が重要である。

このような考えのもとで、本領域で実験・計測班と情報科学班との間に設置されたモデリング班は、実験・計測に関わるスパースモデリングの応用課題と数理理論との間を媒介し、個々の応用課題に数理理論を適切に適用する実践を行うことと、またそうした実践を多数積み上げることで複数の応用課題にわたって共通的に現れる数理的な研究課題を横断的に抽出し考察することとの間を往復することで、それぞれの応用課題と横断的な数理理論とをともに充実させていくことを狙ったものである。

2. 研究の目的

本計画研究 B01-1「圧縮センシングにもとづくスパースモデリングへのアプローチ」は、モデリング班を構成する計画研究のひとつとして、圧縮センシングにもとづいたスパースモデリングへのアプローチに関して個々の応用課題に携わる領域内外の研究者との連携研究を行うことを通じて、圧縮センシングが適用できる多様な応用課題に関して上記の狙いを達成することを目的とした。

3. 研究の方法

具体的な研究課題として、(1)個々の具体的な応用課題に取り組む「圧縮センシングのオーダーメイド型研究」、(2)個別の応用課題に現れるノイズの統計性を適切に扱うための「圧縮センシングへのベイズ推定の導入」、(3)個別課題への取り組みから横断的に抽出される数理的な研究課題に取り組む「圧縮センシングの数理的諸性質の横断的研究」、以上の3項目を設定し、研究を行った。

4. 研究成果

(1) MRI 画像再構成への応用

圧縮センシングの応用としてもっとも実用に近いとされているのは、磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging; MRI) における画像再構成の問題である。本計画研究では、本領域 A01-1 班 (研究代表者 富樫かおり) と共同で、圧縮センシングにより MRI 画像の再構成を行うプログラムを開発した。本プログラムはスパースさを促す正則化項を含む目的関数を、NESTA と呼ばれるアルゴリズムを使用して最適化する。正則化項としては、再構成画像の候補 x の L_1 ノルム $\|x\|_1$ 、 x のウェーブレット変換 $\|x\|_1$ 、および x の「全変動 (total variation; TV)」 $TV(x)$

の3種類を取り上げ、対応する3つの正則化パラメータを使用者が自由に設定できるようにした。本プログラムは、A01-1 班において圧縮センシングによる再構成画像の画質評価などの研究で活用されている。

本計画研究ではまた、圧縮センシングによってもたらされる MRI 撮像の高速化という利点を生かして、磁気共鳴分光画像化法 (magnetic resonance spectroscopic imaging; MRSI) により体内の物質の時空間動態を非侵襲的に可視化する手法について研究した。MRSI は一般に高次元の空間において計測を行う必要があるため、計測に非常に時間がかかる。このため、計測に必要な時間と比較して短い時間スケールで物質の空間分布が変化している場合には、その動態を適切に捉えることができない。我々は、圧縮センシングにもとづく間引き収集によって、MRSI によって体内の物質の時空間動態を非侵襲的に可視化する方法を提案した[1]。

あらかじめ腫瘍組織を移植したマウスの体内にブドウ糖水溶液を注入し、ブドウ糖(グルコース)、乳酸、脂肪の時空間動態を観察する実験を行った。結果の例を図1に示す。ブドウ糖水溶液の注入後、注入部位近傍でブドウ糖スペクトルの強度が減衰していく一方で、腫瘍組織で乳酸スペクトルの強度が増大する様子が可視化されている。

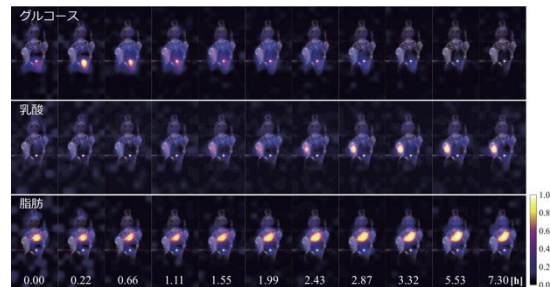


図1. 圧縮センシング MRSI による体内物質時空間動態の可視化結果。

(2) 電波干渉計における画像再構成

本研究は本領域 A02-3 班 (研究代表者 本間希樹) との共同研究である。超長基線電波干渉計 (very long baseline interferometry; VLBI) は、地理的に離れた複数の電波望遠鏡を開口合成に使うことによって高い角度分解能で天体のイメージングを可能にする技術である。電波干渉計における画像再構成の問題は圧縮センシングの文脈で捉えることができる。すでに先行研究があったものの[2,3]、我々も本領域の研究を通じて EHT (Event Horizon Telescope) のために圧縮センシングの方法が有効であることを示した[4]。EHT は、VLBI によって、未だに誰も成功していないブラックホールシャドウの

¹ 腫瘍組織では嫌気性代謝が進進することが知られており、ワールブルク効果と呼ばれる。図1の結果はこの知見と整合している。

撮像を目指す天文観測プロジェクトである．対象にスパース性を仮定して，LASSO と同様に L_1 ノルムによる正則化項を導入して解く方法は CLEAN と類似した方法となる．本研究では， L_1 ノルム正則化項だけでなく，全変動や 2 乗変動といった画像に対する複数の正則化項を含む定式化を行った．こうした方法は天文学のイメージング法としては成功している．また，これらの正則化の重みを交差検証法によって決定する手法を提案している [5] ．

現実の VLBI 観測ではフーリエ観測にあたるビジビリティに，位相のノイズも含まれてしまう．このノイズは無視できる大きさではないため，各ビジビリティの位相を正しく推定することが重要となる．我々はこの問題に対して，クロージャー位相からの位相復元法を独自に提案した (図 2， [6]) ．

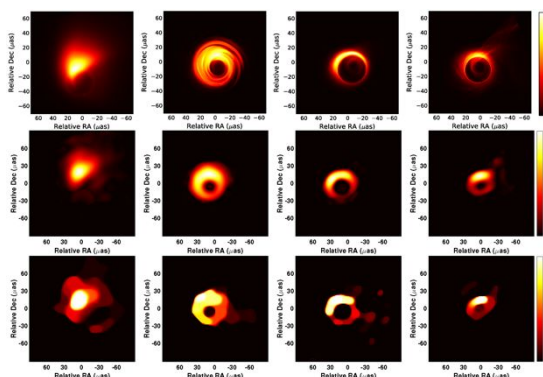


図 2．文献 [6] からの引用．上段：ブラックホールシャドウのモデル (それぞれのモデルの詳細については文献 [6] を参照)．中段：観測データに位相のノイズが含まれない場合に，スパースモデリングによって再構成されたイメージ．下段：位相のノイズがある場合に，文献 [6] に提案した方法で位相を復元し，スパースモデリングによって再構成したイメージ．

(3) 量子モンテカルロ法への応用

量子多体系の解析において，系を記述するシュレーディンガー方程式の時間軸を虚軸方向に取り直した虚時間シュレーディンガー方程式を考えると，古典系の拡散方程式となり数値シミュレーションが容易になる．これが虚時間にもとづく量子モンテカルロ法の基本的な発想である．例えば，虚時間シュレーディンガー方程式の数値シミュレーションにより得られる虚時間グリーン関数 g から元の量子系のスペクトル関数 K を求める問題は，適切な離散化のもとで連立一次方程式 $g=K$ の求解として定式化できる．

この定式化においては，虚時間グリーン関数に対応するベクトル g がモンテカルロ法により数値的に推定され，したがって推定誤差を含むことを考慮する必要がある．さらに，係数行列 K は通常は悪条件 (ill-conditioned) であるため， K の推定が不安定になりやすい

ことにも留意が必要である．

係数行列が悪条件であることによる不安定性を回避するために，本計画研究では L_1 ノルムを正則化項として使う LASSO 型の推定法の適用を提案した [7] ．特に不安定性を効率的に排除するために，係数行列の特異値分解を前処理的に利用した．特異値分解により得られた基底は，従来法と比較して，非ゼロの展開係数をより少数とするという点で効率的なデータ圧縮表現を与えることが確認された [8] ．

(4) 領域内外との連携研究

以上に述べたそれぞれの成果は，領域内の他の計画研究などとの共同研究や，領域外との研究連携として進めたものである．本計画研究では第一の研究課題としてスパースモデリングの方法の「オーダーメイド型研究」を目指しており，これらはそうした目的に即した共同研究である．以上で示した研究以外にも，池田は A01-2 班の池谷と NMR を用いたたんぱく分子の三次元構造推定法の開発に協力し [9]，A02-3 班の植村らと Ia 型超新星の最大光度推定のための変数選択 [10]，C01-3 班の小淵，樺島らと交差検証法の簡便な近似計算法の開発 [11]，C01-4 班の渡辺と共同でレート歪み関数に関する研究 [12, 13] なども行なった．

スパースモデリングの手法を醸成してきたことで，領域外の諸問題の解決にも貢献している．以上に示した研究以外にも，大関は京都大学ウィルス・再生医科学研究所の曾我部，瀬原らと筋幹細胞の二光子顕微鏡を用いた撮像の問題に圧縮センシングを適用した．その際，画像平面上でのスパース性に加えて，深さ方向への滑らかさを獲得するために，深さ方向の差分に基づくスパース性に注目した正則化を利用することで，深さ方向の観測を間引くことを可能にした．

(5) まとめ

本計画研究では，圧縮センシングが適用できる多様な応用課題への取り組みと，それらを通じて横断的に抽出された数理的課題への取り組みとを往復することで，圧縮センシングにもとづくスパースモデリングへのアプローチを展開した．主に取り組んだ応用課題としては，本稿で具体的に述べた MRI，MRSI などの医用画像の再構成，VLBI における画像再構成，量子モンテカルロ法を挙げることができる．圧縮センシングの適用事例として，それぞれの応用課題に対して具体的な成果を得ることができた．また，これらはいずれも L_1 ノルムあるいは全変動などのスパース解を促す項を正則化項として用いた LASSO 型の凸最適化の形で共通に定式化され，最適化のためのアルゴリズムや正則化パラメータの決定法などに関して，共通的な議論を行うことができた．応用課題への各論的取り組みと横断的な数理面での取り組みの往復によ

りそれぞれの研究を進展させることができ、全体として所期の目的を達成できたものと考えている。

<引用文献>

- [1] 山本詩子, 今井宏彦, 佐野圭, 大関真之, 松田哲也, 田中利幸, 2 次元¹ H-¹³ C 異核種多量子コヒーレンス MRSI における圧縮センシングを用いた時系列再構成, 第45回日本磁気共鳴医学会大会講演抄録集, 2017, LBP-33.
- [2] Y. Wiaux, L. Jacques, G. Puy, A. M. M. Scaife, and P. Vanderghyest, "Compressed sensing imaging techniques for radio interferometry," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 395, no. 3, pp. 1733-1742, May 2009.
- [3] F. Li, T. J. Cornwell, and F. de Hoog, "The application of compressive sampling to radio astronomy. I. Deconvolution," *Astronomy and Astrophysics*, vol. 528, pp. A31-1-10, 2011.
- [4] M. Honma, K. Akiyama, M. Uemura, and S. Ikeda, "Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 66, no. 5, pp. 95-1-14, Oct. 2014.
- [5] K. Akiyama, K. Kuramochi, S. Ikeda, V. L. Fish, F. Tazaki, M. Honma, S. S. Doeleman, A. E. Broderick, J. Dexter, M. Mościbrodzka, K. L. Bouman, A. A. Chael, and M. Zaijen, "Imaging the Schwarzschild-radius-scale structure of M87 with the event horizon telescope using sparse modeling," *Astrophysical Journal*, vol. 838, no. 1, pp. 1-1-13, Mar. 2017.
- [6] S. Ikeda, F. Tazaki, K. Akiyama, K. Hada, and M. Honma, "PRECL: A new method for interferometry imaging from closure phase," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 68, no. 3, p. 45, 2016.
- [7] J. Otsuki, M. Ohzeki, H. Shinaoka, and K. Yoshimi, "Sparse modeling approach to analytical continuation of imaginary-time quantum Monte Carlo data," *Physical Review E*, vol. 95, no. 6, 061302(R), Jun. 2017.
- [8] H. Shinaoka, J. Otsuki, M. Ohzeki, and K. Yoshimi, "Compressing Green's function using intermediate representation between imaginary-time and real-frequency domains," *Physical Review B*, vol. 96, 035147, Jul. 2017. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.96.035147>
- [9] T. Ikeya, T. Hanashima, S. Hosoya, M. Shimazaki, S. Ikeda, M. Mishima, P. Güntert, and Y. Ito, "Improved in-cell structure determination of proteins at near-physiological concentration," *Scientific*

Reports, vol. 6, 38312, 2016.

- [10] M. Uemura, K. S. Kawabata, S. Ikeda, and K. Maeda, "Variable selection for modeling the absolute magnitude at maximum of type Ia supernovae," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 67, no. 3, p. 55, 2015.
- [11] T. Obuchi, S. Ikeda, K. Akiyama, and Y. Kabashima, "Accelerating cross-validation with total variation and its application to super-resolution imaging," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 12, e0188012, 2017.
- [12] K. Watanabe and S. Ikeda, "Entropic risk minimization for nonparametric estimation of mixing distributions," *Machine Learning*, vol. 99, no. 1, pp. 119-136, 2015.
- [13] K. Watanabe and S. Ikeda, "Rate-distortion functions for gamma-type sources under absolute-log distortion measure," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 62, no. 10, pp. 5496-5502, 2016.

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 37 件)

- [1] Ryou Ohsawa, Shigeyuki Sako, Takashi Miyata, Takafumi, Kamizuka, Kazushi Okada, Kiyoshi Mori, Masahito S. Uchiyama, Junpei Yamaguchi, Takuya Fujiyoshi, Mikio Morii, Shiro Ikeda, "Slow-scanning" in ground-based mid-infrared observations," *The Astrophysical Journal*, volume 857, number 1, 37 (11 pages), 2018. (査読あり)
doi: 10.3847/1538-4357/aab6ae
- [2] Yasuhiko Igarashi, Hikaru Takenaka, Yoshinori Nakanishi-Ohno, Makoto Uemura, Shiro Ikeda, "Exhaustive search for sparse variable selection in linear regression," *Journal of the Physical Society of Japan*, volume 87, number 4, 044802 (8 pages), 2018. (査読あり)
doi: 10.7566/JPSJ.87.044802
- [3] Tomoyuki Obuchi, Shiro Ikeda, Kazunori Akiyama, Yoshiyuki Kabashima, "Accelerating cross-validation with total variation and its application to super-resolution," *PLOS One*, volume 12, number 12, e0188012 (14 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.1371/journal.pone.0188012
- [4] Junya Otsuki, Masayuki Ohzeki, Hiroshi Shinaoka, Kazuyoshi Yoshimi, "Sparse modeling approach to analytical continuation of imaginary-time quantum Monte-Carlo data," *Physical Review E*, volume 95, number 6, 061302(R) (6 pages), 2017. (査読あり)

- doi: 10.1103/PhysRevE.95.061302
- [5] Hiroshi Shinaoka, Junya Otsuki, Masayuki Ohzeki, Kazuyoshi Yoshimi, “Compressing Green’s function using intermediate representation between imaginary-time and real-frequency domains,” *Physical Review B*, volume 96, number 3, 035147, 2017. (査読あり)
doi: 10.1103/PhysRevB.96.035147
- [6] Mikio Morii, Shiro Ikeda, Shigeyuki Sako, Ryou Ohsawa, “Data compression for the Tomo-e Gozen using low-rank matrix approximation,” *The Astrophysical Journal*, volume 835, number 1, 1 (5 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.3847/1538-4357/835/1/1
- [7] Kazunori Akiyama, Shiro Ikeda, Mollie Pleau, Vincent L. Fish, Fumie Tazaki, Kazuki Kuramochi, Avery Broderick, Jason Dexter, Monika Moscibrodzka, Michael Gowanlock, Mareki Honma, Sheperd S. Doelman, “Superresolution full-polarimetric imaging for radio interferometry with sparse modeling,” *The Astronomical Journal*, volume 153, number 4, 159 (10 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.3847/1538-3881/aa6302
- [8] Kazunori Akiyama, Kazuki Kuramochi, Shiro Ikeda, Vincent L. Fish, Fumie Tazaki, Mareki Honma, Sheperd S. Doelman, Avery Broderick, Jason Dexter, Monika Moscibrodzka, Katherine L. Bouman, Andrew Chael, Masamichi Zaizen, “Imaging the Schwarzschild-radius-scale structure of M87 with the Event Horizon Telescope using sparse modeling,” *The Astrophysical Journal*, volume 838, number 1, 1 (13 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.3847/1538-4357/aa6305
- [9] Takahiro Ezaki, Takamitsu Watanabe, Masayuki Ohzeki, Naoki Masada, “Energy landscape analysis of neuroimaging data,” *Philosophical Transactions A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 375, 20160287 (14 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.1098/rsta.2016.0287
- [10] Masayuki Ohzeki, “Quantum Monte Carlo simulation of a particular class of non-stochastic Hamiltonians in quantum annealing,” *Scientific Reports*, volume 7, 41186 (8 pages), 2017. (査読あり)
doi: 10.1038/srep41186
- [11] Yasutaka Fushimi, Koji Fujimoto, Tomohisa Okada, Akira Yamamoto, Toshiyuki Tanaka, Takayuki Kikuchi, Susumu Miyamoto, Kaori Togashi, “Compressed sensing 3-dimensional time-of-flight magnetic resonance angiography for cerebral aneurysms: Optimization and evaluation,” *Investigative Radiology*, volume 51, number 4, pages 223-235, 2016. (査読あり)
doi: 10.1097/RLL.0000000000000226
- [12] Shiro Ikeda, Fumie Tazaki, Kazunori Akiyama, Kazuhiro Hada, Mareki Honma, “PRECL: A new method for interferometry imaging from closure phase,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, volume 68, number 3, 45 (9 pages), 2016. (査読あり)
doi: 10.1093/pasj/psw042
- [13] Kazuho Watanabe, Shiro Ikeda, “Rate-distortion functions for gamma-type sources under absolute-log distribution measure,” *IEEE Transactions on Information Theory*, volume 62, pages 5496-5502, 2016. (査読あり)
doi: 10.1109/TIT.2016.2602100
- [14] Teppei Ikeya, Tomomi Hanashima, Saori Hosoya, Manato Shimazaki, Shiro Ikeda, Masaki Mishima, Peter Güntert, Yutaka Ito, “Improved in-cell structure determination of proteins at near-physiological concentration,” *Scientific Reports*, volume 6, 38312 (11 pages), 2016. (査読あり)
doi: 10.1038/srep38312
- [15] Chihiro H. Nakajima, Masayuki Ohzeki, “Statistical mechanical models of the integer factorization problem,” *Journal of the Physical Society of Japan*, volume 86, number 1, 014001 (9 pages), 2016. (査読あり)
doi: 10.7566/JPSJ.86.014001
- [16] Thai Akasaka, Koji Fujimoto, Takayuki Yamamoto, Tomohisa Okada, Yasutaka Fushimi, Akira Yamamoto, Toshiyuki Tanaka, Kaori Togashi, “Optimization of regularization parameters in compressed sensing of magnetic resonance angiography: Can statistical image metric mimic radiologists’ perception?”, *PLOS One*, volume 11, number 1, e0146548 (14 pages), 2016. (査読あり)
doi: 10.1371/journal.pone.0146548
- [17] Kazuho Watanabe, Shiro Ikeda, “Entropic risk minimization for nonparametric estimation of mixing distributions,” *Machine Learning*, volume 99, number 1, pages 119-136, 2015. (査読あり)
doi: 10.1007/s10994-014-5467-7
- [18] Makoto Uemura, Koji S. Kawabata, Shiro Ikeda, Keiichi Maeda, “Variable selection for modeling the absolute magnitude at maximum of Type Ia supernovae,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, volume 67, number 3, 55 (9 pages), 2015. (査読あり)
doi: 10.1093/pasj/psv031
- [19] S. Ikeda, H. Odaka, M. Uemura, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Takeda, “Bin

mode estimation methods for Compton camera imaging,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, volume 760, pages 46-56, 2014. (査読あり)

doi: 10.1016/j.nima.2014.05.081

- [20] Mareki Honma, Kazunori Akiyama, Makoto Uemura, Shiro Ikeda, “Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling,” Publications of the Astronomical Society of Japan, volume 66, number 5, 95 (14 pages), 2014. (査読あり)
doi: 10.1093/pasj/psu070

〔学会発表〕(計 114 件)

- [1] Toshiyuki Tanaka, “Analysis of measurement data via sparse modeling,” Conference on Mass Spectrometry and Proteomics, 2018. (基調講演)
- [2] Toshiyuki Tanaka, “Measurement data analysis based on sparse modeling,” 第 55 会日本生物物理学会年会, 2017 年.(招待講演)
- [3] Masayuki Ohzeki, “Sparse modeling: how to solve the ill-posed problem,” Machine Learning and Many-Body Physics, 2017. (招待講演)
- [4] 大関真之, 30分で分かるスパースモデリングの基礎と応用:画像問題を中心として, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年.(招待講演)
- [5] Shiro Ikeda, “Event classification,” PhyStat-v Workshop on Statistical Issues in Experimental Neutrino Physics, 2016.(招待講演)
- [6] Shiro Ikeda, “Cosmological parameter estimation and Fisher information matrix,” Information Geometry and its Applications IV, 2016. (招待講演)
- [7] Masayuki Ohzeki, “Accelerated Langevin dynamics and its application to machine learning,” 4th Workshop on Tensor Network States: Algorithm and Applications, 2016. (招待講演)
- [8] Masayuki Ohzeki, “Statistical mechanics of pre-training and fine tuning in deep learning,” 23rd International Conference on Neural Information Processing, 2016.(招待講演)
- [9] 大関真之, 深層学習 vs スパースモデリング, GPU Technology Conference Japan, 2016. (招待講演)
- [10] Masayuki Ohzeki, “Contrastive divergence by accelerated Langevin dynamics,” New Frontiers in Non-equilibrium Physics and Glassy Materials, 2015. (招待講演)
- [11] 池田思朗, 疎表現に基づく情報処理, 研究集会「地球科学と疎性モデリング」, 2014. (招待講演)

- [12] Toshiyuki Tanaka, “A message-passing approach to low-rank matrix reconstruction and application to clustering,” Workshop on Spin Glasses: An Old Tool for New Problems, 2014. (招待講演)

〔図書〕(計 4 件)

- [1] 大関真之, オーム社, ベイズ推定入門 モデル選択からベイズ最適化まで, 2018 年, 224 ページ.
- [2] 大関真之, オーム社, 機械学習入門 ボルツマン機械学習から深層学習まで, 2016 年, 208 ページ.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 画像処理装置, コンピュータプログラム及び画像保管方法
発明者: 曾我部舞奈, 大関真之, 瀬原淳子
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2017-117213
出願年月日: 2017 年
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 利幸 (TANAKA, Toshiyuki)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 10254153

(2) 研究分担者

池田 思朗 (IKEDA, Shiro)
統計数理研究所・数理・推論研究系・教授
研究者番号: 30336101

大関 真之 (OHZEKI, Masayuki)
東北大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80447549