

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2013

課題番号：20240020

研究課題名(和文) 情報科学・計算機科学における描像の可視化に関する研究

研究課題名(英文) Visualization of a picture for information science and computer science

研究代表者

岡田 真人 (Okada, Masato)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90233345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,400,000円、(間接経費) 10,920,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、経験や学習から形成されるヒトの心の中の描像を、数値計算や計測のデータから客観的手法で可視化する手法を研究することである。具体的には、情報科学と計算機科学での描像を、物理学のスピンス系で発展した手法を用いて可視化する。脳の記憶のモデルである連想記憶モデルをテストケースとして、シナプス抑圧の影響、K-SAT問題、量子揺らぎの性質解明など、様々な事例において、描像の可視化を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to study the method for visualizing a picture in the mind of a human formed from experience and learning by using machine learning. More specifically, we visualize a picture for information science and computer science by using the statistical mechanical method. As a result, we visualize a picture for various systems such as associative memory model with synaptic depression, combinatorial optimization problem such as K satisfiability problem, and the information processing with quantum fluctuation.

研究分野：情報統計力学

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：情報統計力学 可視化 次元圧縮 クラスタリング ビッグデータ イメージング 潜在構造 ベイズ推論

1. 研究開始当初の背景

ヒトは学問的な概念であっても、式や言葉で説明するよりも、グラフや概略図での説明を好む。また優れた理論物理学者や数学者は、理論体系が構築されたときに、理論が見えるような内観を憶えることが多い。このように、論理的な過程を経て獲得されると思われる概念であっても、脳の中では視覚的・画像的に表現されているように感じることが多い。それは、非常に高度な数学的構造を持つ量子力学においてさえ、Heisenberg picture や Schrödinger picture という言葉が用いられることから伺い知れる。このような視覚的な表現形態をとる概念は描像 (picture) と呼ばれる。

描像は個々の研究者の経験に基づくため、主観的なものである。しかしながら、士官的な描像であるにも関わらず、ある程度のトレーニングを受けた者には、客観的な存在となる。研究者同士が議論する際に、研究者は心の仲の描像を概念図として書き、この概念図を交えながら、議論することで新たな研究テーマを提案し、研究を続けることで、新たな描像を獲得する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、通常はヒトが描くことしかできない描像の概念図を、高次元データ解析手法を用いて客観的に描く手法を研究することである。経験と学習に基づく豊かな知識体系を基盤に置く描像を描くことは難しいが、情報科学と計算機科学での描像は、物理のスピン系で発展した手法を用いて可視化できる。本研究は、描像の可視化に基づき、情報科学・計算機科学の理解に新たな切り口を与えるものである。

3. 研究の方法

対象となる個別の問題に対して、以下の3つの過程により研究を進める。

(1) 情報科学や計算機科学の個々の問題に対応するスピン系が、レプリカ法により調べられる。モデルのパラメータに依存して、自由エネルギーの性質が変化し、系の質的な性質が変化する相転移がいつ起こるかを調べ、相のパラメータ依存性を示す相図をもとめる。

(2) 個々の問題に対して、スピン系の性質を数値的に求める手法であるマルコフチェーンモンテカルロ法を援用し、得られたシミュレーションデータを図1の右下図のようなデータ解析手法で可視化する。

(3) (1)と(2)を比較するこ

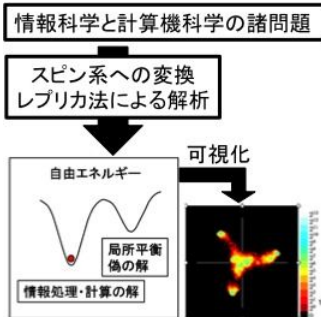


図1：自由エネルギーの可視化による描像の可視化

とにより、描像がどの程度可視化できたかを評価し、新たなデータ解析手法や視覚脳科学の知見に基づく、描像の新たな可視化手法を提案する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

(1) 連想記憶モデルにおける可視化

連想記憶モデルは脳の記憶のモデルであり、誤り訂正符号や無線通信のCDMAと数理的に関連が深く、本研究課題のテストベッドとなるモデルである。

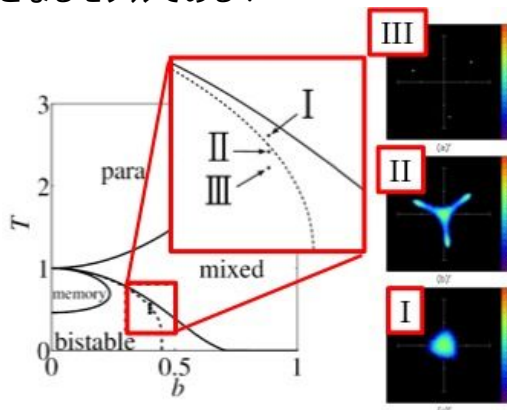


図2：連想記憶モデルにおける相図と主成分分析による可視化

図2の左図は、記憶パターンを3つ埋め込んだ場合において、レプリカ法により統計力学的解析を行った相図である。拡大図のI, II, IIIは、それぞれ自由エネルギーの性質が異なる条件を表す。この3つの条件について、マルコフチェーンモンテカルロ法を援用し、得られたシミュレーションデータに主成分分析を行った結果が図2の右図の3つである。この結果を見てもわかるように、埋め込んだ記憶がどのように想起されるかという違いを説明できる結果が得られた。

また、マルコフチェーンモンテカルロ法により得られたサンプルに、混合ベルヌーイ分布によるクラスタリングを適用することで、推定した最適なクスタ数や予測分布から求められたオーバーラップなどの情報から、帯域的な定常解や転移点が精度よく数値的に求めることができた。

さらに、近年 Kemp と Tenenbaum が提案したデータの潜在構造推定手法を適用した。通常のデータ解析の場合、先に示したクラスタリングのように、データの潜在構造をクラスタと仮定して解析を行う。この仮定を緩めて、構造の種類も推定可能となれば、その手法はより高度な描像の可視化に関するキーテクノロジーになる。そこで本研究では、連想記憶モデルにおいて、マルコフチェーンモンテカルロ法で生成したサンプルについて、潜在構造推定手法を適用し、その解析手法の有効性を検証した。その結果を図3に示す。図3左は、いくつかの構造についての評価関数を示したものであり、それぞれの条件下で選

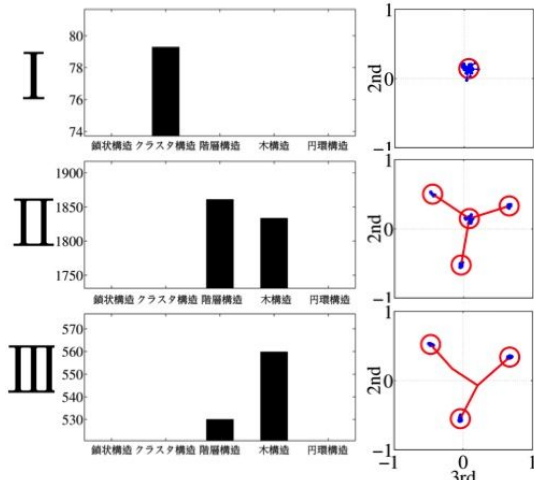


図 3：連想記憶モデルにおける潜在構造推定手法の適用結果

れた構造が異なることが伺える。また、右図は主成分分析の結果に、それぞれ得られた構造を記したものである。このように、レプリカ法に代表される、統計力学的解析により得られた描像を、高次元データの生成および解析から抽出することができ、本研究の目的である、理論体系の描像を客観的に描く手法を開発できた。

(2)シナプス抑圧を取り込んだ連想記憶モデルの可視化

(1)の解析で行った連想記憶モデルにおいて、ニューロン間の信号伝達効率は時間変化しないモデルである。一方で、近年の生理学実験から、シナプス結合部での信号伝達効率は、短い時間スケールで動的に変化することが解明されてきた。その一つがシナプス抑圧と呼ばれ、シナプス前ニューロンの活動に応じてシナプス後ニューロンへの信号伝達効率が減衰する現象である。

本研究課題では、シナプス抑圧が連想記憶モデルに与える影響を明らかにするために、統計力学的解析によるアプローチと、高次元データの解析によるアプローチの両面から研究を遂行した。

図 4 の左図は、図 2 で示した連想記憶モデルの設定にシナプス抑圧を導入した場合の相図である。灰色に示した領域では、ネットワークが不安定化することがわかり、シナプス抑圧の与える影響が伺える。また、図 4 右図は不安定化したネットワークを 2 次元空間に可視化したものである。緑に示した正三角形の頂点が記憶パターンに相当し、重心部分

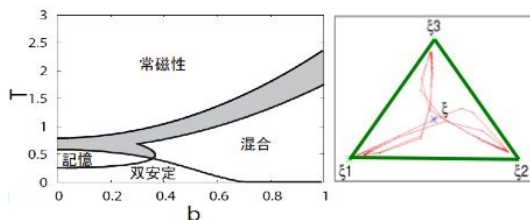


図 4：シナプス抑圧を導入した場合の相図およびネットワークの不安定化の描像

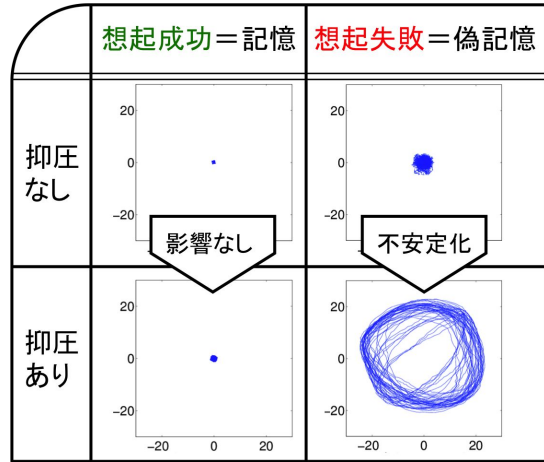


図 5：多数の記憶パターンを埋め込んだ場合における、シナプス抑圧を持つ連想記憶モデルの可視化

は混合状態と呼ばれる。赤い線がネットワークの遍歴であり、この結果は、混合状態を経由して各記憶パターンを経巡る様子を明らかにした結果であり、シナプス抑圧がネットワークに与える影響を、理論解析的に明らかにした第一の研究成果であるといえる。

次に、ネットワークに多数の記憶パターンを埋め込んだ場合に、どこまで想起可能かを示す記憶容量を解析的に明らかにした。その結果、シナプス抑圧は、記憶容量を低減させる効果があることがわかった。しかしながら、実際にネットワークがどのような挙動を示すかは、統計力学的に解析することは困難であった。そこで、モンテカルロシミュレーションを実行し、得られた高次元データに主成分分析を行うことで、ネットワークの様子を可視化した。その結果を図 5 に示す。シナプス抑圧がない場合は、想起の成功・失敗に関わらず、ネットワークは安定している。そのため、得られた結果が埋め込んだ記憶パターンかどうかを判別することは難しい。一方で、シナプス抑圧を導入すると、想起失敗するときのみ、ネットワークが振動し、様々な状態を経巡るようになる。これは、シナプス抑圧が記憶の想起の判別を可能にする重要な性質であることを示唆する。

この結果は、本研究課題で開発した高次元データ解析手法により、シナプス抑圧を持つ連想記憶モデルの描像を解明できたことを表し、本研究の独創的な成果である。

(3)K-SAT における可視化

充足可能性問題(satisfiability problem, SAT)は組み合わせ最適化問題の一つであり、NP 完全問題に属する問題である。この問題に対して、系の性質を調べる為に、(1)の連想記憶モデルの可視化で確立したマルコフチェーンモンテカルロ法にサンプリングを K-SAT 問題に適用した。得られたサンプリング結果に主成分分析を行ったところ、K-SAT における充足数の増加に伴い、解が容易に見つかる Easy-SAT 状態、解が存在するが解を

見つけることが難しい Hard-SAT 状態, 解が存在しない Un-SAT 状態の三つの状態を特徴づける可視化に成功した.

(4)量子揺らぎを用いた情報処理技術の描像の可視化

近年, 量子揺らぎを用いた最適解探索アルゴリズムが, 多項式時間で解く可能性があるアルゴリズムとして注目を集めている. このアルゴリズムは量子アニーリングと呼ばれ, トンネル効果によって系のエネルギー空間を探索することが可能であり, 熱揺らぎを用いて探索を行うシミュレーテッドアニーリングとの性能評価比較が多く行われてきた. さらに, 量子アニーリングを実装する 512 量子ビットを持つ量子コンピュータも開発され, デバイスも含めて注目を集めている.

本研究では, 情報処理技術の中で, 情報源復号の問題を取り扱う. 具体的には, 「ノイズが重畳された情報から, 原情報を復元する」問題である. 具体的情報処理課題としては, 白黒二値画像修復問題, 誤り訂正符号の一種であるソーラス符号, CDMA マルチユーザー復調の 3 つについて研究を遂行した. 復元の枠組みとして, ベイズ推定を用いて, 量子揺らぎをコントロールした周辺事後確率最大推定がもつ性質を解明する. この問題に対し, 統計力学的解析を行い, 量子事後確率最大推定が適切に機能することを明らかにし, 熱揺らぎによる情報源復号と同等の性能を有することを明らかにした.

これらの結果は, 量子揺らぎを用いた情報処理技術の描像を統計力学的に求めたことに対応し, マルコフチェーンモンテカル口法と主成分分析を組み合わせた可視化法による解析を検証する基盤が形成できたことを意味する.

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 3 2 件)

- (1) Yosuke Otsubo, Jun-ichi Inoue, Kenji Nagata and Masato Okada, "Code-division multiple-access multiuser demodulator by using quantum fluctuations," to be published in Physical Review E, 査読あり, 2014.
- (2) Yoshinori Nakanishi-Ohno, Kenji Nagata, Hayaru Shouno and Masato Okada, "Distribution estimation of hyperparameters in Markov random field models," Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, Vol. 47, pp.045001-1-045001-14, 査読あり, 2014.
- (3) Shimpei Yotsukura, Toshiaki Omori, Kenji Nagata and Masato Okada, "Sparse Estimation of Spike-Triggered Average," IPSJ Transactions on Mathematical Modeling and Its Application, Vol. 7, pp. 15-21, 査読あり, 2014.
- (4) Tatsu Kuwatani, Kenji Nagata, Masato Okada and Mitsuhiro Toriumi, "Markov random field modeling for mapping geofluid distributions from seismic velocity structures," Earth, Planets and Space, Vol. 66, pp.5-1-5-9, 査読あり, 2014.
- (5) Satoru Tokuda, Kenji Nagata and Masato Okada, "A numerical analysis of learning coefficient in radial basis function network," IPSJ Transactions on Mathematical Modeling and Its Application, Vol. 6, pp.117-123, 査読あり, 2013.
- (6) Yuichi Katori, Yosuke Otsubo, Masato Okada and Kazuyuki Aihara, "Stability analysis of associative memory network composed of stochastic neurons and dynamic synapses," Frontiers in Computational Neuroscience, Vol.7, pp.00006-1-00006-12, 査読あり, 2013.
- (7) Yosuke Otsubo, Jun-ichi Inoue, Kenji Nagata and Masato Okada, "Effect of quantum fluctuation in error-correcting codes," Physical Review E, Vol.86, pp.051138-1-051138-10, 査読あり, 2012.
- (8) Yuichi Katori, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada and Kazuyuki Aihara, "Stability analysis of stochastic neural network with depression and facilitation synapses," Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, pp.114007-1-114007-7, 査読あり, 2012.
- (9) Jun Kitazono, Toshiaki Omori, Toru Aonishi and Masato Okada, "Estimating membrane resistance over dendrite using Markov random field," IPSJ Transactions on Mathematical Modeling and Its Applications, Vol.5, pp.89-94, 査読あり, 2012.
- (10) Yoshinori Ohno, Kenji Nagata, Tatsu Kuwatani, Hayaru Shouno and Masato Okada, "Deterministic algorithm for nonlinear Markov random field model," Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, pp.064006-1-064006-10, 査読あり, 2012.
- (11) Kenji Nagata, Seiji Sugita and Masato

- Okada, "Bayesian spectral deconvolution with the exchange Monte Carlo method," *Neural Networks*, Vol.28, pp.82-89, 査読あり, 2012.
- (12) Tatsu Kuwatani, Kenji Nagata, Masato Okada and Mitsuhiro Toriumi, "Precise estimation of pressure-temperature paths from zoned minerals using markov random field modeling: theory and synthetic inversion," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol.163, pp.547-562, 査読あり, 2012.
- (13) Yasuhiko Igarashi, Masafumi Oizumi and Masato Okada, "Theory of correlation in a network with synaptic depression," *Physical Review E*, Vol.85, pp.016108-1-016108-12, 査読あり, 2012.
- (14) Ryota Hasegawa, Masato Okada and Seiji Miyoshi, "Image segmentation using region-based latent variables and belief propagation," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.80, pp.093802-1-093802-4, 査読あり, 2011.
- (15) Hayaru Shouno, Madomi Yamasaki and Masato Okada, "A Bayesian hyper-parameter inference for Radon transformed image reconstruction," *International Journal of Biomedical Imaging*, Vol.2011, pp.870252-1-870252-10, 査読あり, 2011.
- (16) Yosuke Otsubo, Kenji Nagata, Masafumi Oizumi and Masato Okada, "Influence of synaptic depression on memory storage capacity," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.28, pp.084004-1-084004-11, 査読あり, 2011.
- (17) Ken Takiyama and Masato Okada, "Detection of hidden structures in nonstationary spike trains," *Neural Computation*, Vol.23, pp.1205-1233, 査読あり, 2011.
- (18) Seiji Miyoshi and Masato Okada, "Image restoration and segmentation using region-based latent variables: Bayesian inference based on variational method," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.80, pp.014802-1-014802-11, 査読あり, 2011.
- (19) Kentaro Katahira, Narihisa Matsumoto, Yasuko Sugase-Miyamoto, Kazuo Okanoya and Masato Okada, "Doubly sparse factor models for unifying feature transformation and feature selection," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.233, pp.012021-1-021021-10, 査読あり, 2010.
- (20) Yosuke Otsubo, Kenji Nagata, Masafumi Oizumi and Masato Okada, "Instabilities in associative memory model with synaptic depression and switching phenomena among attractors," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.79, pp.084002-1-084002-9, 査読あり, 2010.
- (21) Hayaru Shouno and Masato Okada, "Bayesian image restoration for medical images using Radon transform," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.79, pp.074004-1-074004-6, 査読あり, 2010.
- (22) Kentaro Katahira, Jun Nishikawa, Kazuo Okanoya and Masato Okada, "Extracting state transition dynamics from multiple spike trains using hidden Markov models with correlated Poisson distribution," *Neural Computation*, Vol.22, pp.2369-2389, 査読あり, 2010.
- (23) Narihisa Matsumoto, Shotaro Akaho, Yasuko Sugase-Miyamoto and Masato Okada, "Visualization of multi-neuron activity by simultaneous optimization of clustering and dimension reduction," *Neural Networks*, Vol.23, pp.743-751, 査読あり, 2010.
- (24) Yasuhiko Igarashi, Masafumi Oizumi, Yosuke Otsubo, Kenji Nagata and Masato Okada, "Statistical mechanics of attractor neural network models with synaptic depression," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.197, pp.012-18-1-012018-10, 査読あり, 2009.
- (25) Shigeo Takahashi, Issei Fujishiro and Masato Okada, "Applying manifold learning to plotting approximate contour trees," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.15, pp.1185-1192, 査読あり, 2009.
- (26) Jun Kitazono, Toshiaki Omori and Masato Okada, "Neural network model with discrete and continuous information representation," *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.78, pp.114801-1-114801-7, 査読あり, 2009.
- (27) Kazuho Watanabe, Shotaro Akaho, Shinichiro Omachi and Masato Okada, "Variational Bayesian mixture model

on a subspace of exponential family distributions,” IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.20, pp.1783-1796, 査読あり, 2009.

- (28) Kazuho Watanabe, Hiroyuki Tanaka, Keiji Miura and Masato Okada, “Transfer matrix method for instantaneous spike rate estimation,” IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E92.D, pp.1362-1368, 査読あり, 2009.
- (29) Yohei Saika, Jun-ichi Inoue, Hiroyuki Tanaka and Masato Okada, “Bayes-optimal solution to inverse half-toning based on statistical mechanics of the Q-Ising model,” Central European Journal of Physics, Vol.7, pp.444-456, 査読あり, 2009.
- (30) Jun-ichi Inoue, Yohei Saika and Masato Okada, “Quantum mean-field decoding algorithm for error-correcting codes,” Journal of Physics: Conference Series, Vol.143, pp.012019-1-012019-10, 査読あり, 2009.
- (31) Ken Takiyama, Kentaro Katahira and Masato Okada, “Exact inference in discontinuous firing rate estimation using Belief propagation,” Journal of the Physical Society of Japan, Vol.78, pp.064003-1-064003-5, 査読あり, 2009.
- (32) Florent Cousseau, Kazushi Mimura, Toshiaki Omori and Masato Okada, “Statistical mechanics of lossy compression for nonmonotonic multilayer perceptrons,” Physical Review E, Vol.78, pp.021124-1-021124-11, 査読あり, 2008.

[学会発表](計8件)

- (1) 若杉健介, 桑谷谷, 永田賢二, 麻生英樹, 岡田真人. 連想記憶モデルを用いた確率的潜在構造抽出アルゴリズムの有効性の検証, 電子情報通信学会技術報告, NC2013-49, 2013年11月22日, 東北大学.
- (2) 村田伸, 大坪洋介, 永田賢二, 岡田真人. シナプス抑圧による偽記憶の不安定化, 電子情報通信学会技術報告, NC2012-79, 2012年12月12日, 豊橋技術科学大学.
- (3) K. Katahira, K. Okanoya and M. Okada, “Effects of Synaptic Weight Diffusion on Learning in Decision Making Networks”, Neural Information Processing Systems (NIPS 2010), 2010年12月8日, Vancouver, Canada.
- (4) K. Takiyama and M. Okada, “Switching state space model for simultaneously

estimating state transitions and nonstationary firing rates”, Neural Information Processing Systems (NIPS2010), 2010年12月6日, Vancouver, Canada.

- (5) 塩塚丁二郎, 永田賢二, 福島孝治, 岡田真人, 井上真郷. 階層的な記憶パターンを持つ自己相関型連想記憶モデルのPCAによる解析, 電子情報通信学会技術報告, NC2009-158. 2010年3月11日, 玉川大学.
- (6) 永田賢二, 福島孝治, 塩塚丁二郎, 井上真郷, 岡田真人. 混合ベルヌーイ分布を用いたクラスタリングによる連想記憶モデルの解析, 電子情報通信学会技術報告, NC2009-159. 2010年3月11日, 玉川大学.
- (7) M. Oizumi, T. Ishii, K. Ishibashi, T. Hosoya and M. Okada, “A general framework for investigating how far the decoding process in the brain can be simplified”, Neural Information Processing Systems (NIPS2008), 2008年12月10日, Vancouver, Canada.
- (8) K. Katahira, J. Nishikawa, K. Okanoya and M. Okada, “A Bayesian Approach for Extracting State Transition Dynamics from Multiple Spike Trains”, Neural Information Processing Systems (NIPS2008), 2008年12月9日, Vancouver, Canada.

[その他]
ホームページ等
<http://mns.k.u-tokyo.ac.jp/~okada/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 真人 (OKADA, Masato)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 90233345

(2) 研究分担者

大森 敏明 (OMORI, Toshiaki)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10391898

(3) 連携研究者

高橋 成雄 (TAKAHASHI, Shigeo)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号: 40292619

井上 真郷 (INOUE, Masato)
早稲田大学・先進理工学部・教授
研究者番号: 70376953