

機関番号： 24506

研究種目： 基盤研究（C）

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20500211

研究課題名（和文）

創造知のためのノイズと非局所性時間機構を基盤としたニューラルネットワークの研究

研究課題名（英文）

Neural Networks Based on Noise-delayed Mechanism towards Hyper-creative Intelligence

研究代表者

松井 伸之 (MATSUI NOBUYUKI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 10173783

研究成果の概要（和文）：

創造知（創造的思考）の工学的創出をめざして、ノイズおよび時間遅れなど、非局所性時間機構や形態構造が従来のニューラルネットワーク情報処理にどのような情報処理機能を創発しうるのかを、システムの多元数化や量子描像記述がもたらす効能を検討するとともに、精査した。その結果、確率共鳴型複素数値化モデルや量子回路対応モデルなど、創造知として記述可能な計算知能モデルの提案および画像処理支援システム応用などの成果を得た。

研究成果の概要（英文）： In order to achieve the hyper-creative intelligence in technology, we have developed the neural networks based on noise-delayed mechanism, investigating their hyper-complex valued versions and quantum-like descriptions. By doing so, we have proposed the complex-valued stochastic resonance neural network models and qubit circuit ones, which are both appropriate for describing the hyper-creative. We have also found that these models are applicable to intelligent image processing systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

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：ニューラルネットワーク、複素数値ニューラルネットワーク、ノイズ、確率共鳴、群行動、創造知

1. 研究開始当初の背景

fMRI 等の最先端ニューロイメージング装置を用いた脳科学・認知科学の格段の進歩、ならびに、生物のもつ機能・ふるまいを定式化したニューロコンピューティングに代表される計算知能アルゴリズムの開発に促されながら、脳型コンピュータやロボティクス

など知能機械の創成に挑む研究が国内外を問わず、近年、盛んに試みられている。このような機運の中で、研究代表者は、創造知（天才のひらめきに代表されるような創造的思考）の計算論を希求してこれまで様々な角度から研究を行ってきた。天才脳といえども自然が作り出したニューラルネット情報処理システムによってもたらされたものに相違

なく、そのような創造知のメカニズムを明らかにすることは、チューリングマシン以上の計算能力をもつシステムの形成に資するはずである。ニューラルネットワークの情報処理能力に関しては、Siegelmann が、整数値のパラメータをもつニューラルネットワークは有限オートマトンと、また有理数値ニューラルネットワークはチューリングマシンと等価な処理能力をそれぞれ持つことを示し、カオスシステムを模倣できる点で実数値ニューラルネットワークのスーパーチューリング性を既に示唆していた。さらに、対象の位相情報などの記述にも適するように、複素数値や四元数値ニューラルネットワーク研究も盛んに行われ、実数値よりも高性能な計算例も報告されるなど、チューリングの限界への挑戦的研究も活発に行われていた。しかし、創造的思考どころか、初等的な整数の素因数分解、またシマリング現象といった社会性昆虫の群知能の一つでさえ実現も解明もされていないのが現状であり、創造知システムへの道のりは未だ遠いといわざるを得ない。創造知といえども脳神経系の活動が生み出したものであり、そのような自然知能システムの構成要素セルが結合しネットワークを構成して集団機能を創発していることは、誰もが認めることである。现阶段においては、創造知の創出への困難を打破するために、ニューラルネットワークに関してこれまで試みられなかった視点からのアプローチを様々な試みることも重要である。

そこで、ニューラルネットワークの多元数化や量子描像記述のみならず、これまであまり研究例のない”ノイズと非局所性時間機構を同時に含むシステム”の研究ならびに複雑ネットワーク科学研究の最近の進展に鑑み、確率共鳴なども融合したニューラルネットワークの研究課題を展開するに至った。

2. 研究の目的

複雑系を構成する要素セル間の相互作用の遅れや予測といった時間の非局所性（非局所性時間）とノイズを同時に含む多体系（Noise-delayed system）の研究が近年進展し、確率共鳴などとの関連が注目されている。実際の脳・神経系から社会システムに到る多くのシステムは、構造的に見ればノイズと非局所性時間を同時に含む要素セルが結合したセルネットワークシステムである。しかし、ノイズと非局所性時間要素を同時に含むシステム研究の観点から、このような情報処理機能を捉えた研究はあまり行われていない。

本研究では、ノイズと非局所性時間機構に基づくニューラルネットワークのダイナミクスとその形態構造が、どのような情報処理機能を創発するかを検討し、多元数化や量子

描像記述による情報処理性能向上の目論見と合わせて、記述可能な現象のモデル化およびそれらの応用システムを開発することが目的である。具体的には、ニューラルネットワークにおける確率共鳴の導出と解析を基礎に、多元数化や量子描像記述との融合による性能向上手法の確立をめざす。また、カクテルパーティ問題や群知能としての日本ミツバチ特有のシマリング現象など、未だ定説の域を出ていない現象の解明もめざす。さらに、知的情報処理支援システム応用、例えば、医療画像において判別困難な病変部がポップアウトしうる知的診断支援システム応用を開発する。

3. 研究の方法

これらの背景と目的に基づき、本研究で展開すべき主課題は以下の4点である。

(1) 複素数値確率共鳴型ニューラルネットワークの導出と性能解析

非局所性時間とノイズを共に含むニューラルネットワークモデルとそのシステムダイナミクスの検討、特に確率共鳴現象の生起とその情報処理特徴の精査にあつては、まず、非局所性時間とノイズを共に含むシステムから導出される確率共鳴メカニズムおよびその拡張モデルについて精査する。これらの知見をもとに、確率共鳴を取り入れた実数値の階層型ニューラルネットワークをプロトタイプとして構築し、この複素数値化の妥当性・有効性を調べる。ベンチマークにはパーティチェック問題および図形処理能力などを用いる。さらに四元数、量子ビットニューロンモデルへもこの手法の拡張を試み、カオス学習などをベンチマークとしてスーパーチューリング性を探る試みも議論する。

(2) ニューラルネットワーク性能のネットワーク形態構造依存性の探査

近年の複雑ネットワーク理論、ランダムネットワーク、スモールワールド、スケールフリーなどの方法論からこれを探り、形態特徴が生み出す機能特徴を見出すことを試みる。具体的には、連想記憶ニューラルネットワーク並びに群知能発現ネットワークにおける複雑ネットワーク性などを主に検討し、その効果を探る。さらに複素連想記憶ニューラルネットワークも試論する。

(3) ニューラルネットワーク性能向上手法としての多元数化および量子描像記述の確立

これまで主に階層型の四元数ニューラルネットワークの妥当性と有効性を精査してきたが、四元数値の相互結合型ニューラルネットワークへの拡張やセルオートマトンモ

デルの検討ならびに量子ビットニューラルネットワーク性能を精査してこれらの手法を確立し応用拡大を図る。

(4) 創造知としての計算手法のシステム応用
群機能発現の一種と考えられるシマリング現象の観測の精密化を図り、その解析手段としての画像解析手法の強化およびシマリングの数理モデル構築を試み、情報伝達の機構などを明らかにしていく。また、医療画像などにおいて判別困難な病変部を識別しうる知的診断支援システム応用などでその計算手法の効用を評価する。

4. 研究成果

上記の研究目的、研究の方法に基づいて研究を推進した結果、次に示す研究成果を得た。

(1)①確率共鳴型の誤差逆搬学習では、カオスおよび有色雑音の各種外部ノイズの中では $1/f$ ノイズを採用した場合が効果的であるが、確率共鳴効果の N ビットパリティチェック ($N=4\sim 7$) による精査結果では、白色ノイズを用いた場合が最も効果的であることを明らかにできた。

②複素数値確率共鳴型を構築し、実数値型より効果的であることを示すとともに、システムダイナミクスの表現能力を画像処理問題など実用的な問題にも焦点をあてて精査し、図形の処理能力における確率共鳴型複素数値ニューラルネットワークの効用を確立し得た。

(2)① 群行動の創発形態と複雑ネットワークパラメータの関係を精査し、それらのパラメータと群形成との関係を定量的に示した。

②複素数値化連想記憶ネットワークにおいてクラスタ係数の小さいネットワーク形態ほど連想想起の精度が高いことなどを見出した。

(3)四元数及び量子ビットを基盤としたニューラルネットワークの安定性などの基本性質を明らかにすることができた。また可換四元数による相互結合型モデルの新提案、さらに、複素数値および四元数値シナジェティックコンピュータの開発、量子回路対応ニューラルネットワークの厳密評価及び量子進化アルゴリズムの新提案と応用を通して、量子描像記述や多元数値化の効用をこれまで以上に確立し得た。

(4)①シマリング現象の実観測およびそのデータ解析からミツバチ群の情報伝達を定量的に明らかにでき、群知能・群形成に関する数理モデル構築の試金石を得た。

②判別困難な病変部を識別しうる医療画像知的診断支援システムを構築しその効用を評価し得たとともに、量子進化アルゴリズムの画像処理応用や複素シナジェティックコンピュータのパターン認識応用も提案し得た。

本課題で達成し得た研究成果は、ニューラルネットワークなどの計算知能アルゴリズムに新展開をもたらす独創的な成果であると考えている。これらの成果の一部は、関連分野の書籍の章 (5. [図書]リスト参照) や学会誌の解説 ([雑誌論文]リスト(23)) として発表され、学会誌の特集 ([雑誌論文]リスト⑧) や招待講演 ([学会発表]リスト⑫) などとしても取り上げられた。また、学会発表においては研究奨励賞を3件 ([学会発表]リスト②、⑪、⑬) 得た。これらのことから、専門分野での一定の高い評価が得られたこと、そして社会的にも研究成果を発信できたと考えられ、当該分野に顕著な貢献をなし得たと考えている。本研究テーマは多面的なアプローチを含むものであり、そのために将来的な課題も残るが、研究成果を国内外に多数発表し得て、当初の研究計画は達成できたものと考えている。

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 23 件)

- ① S.Umata, N.Kamiura, A.Saitoh, T.Isokawa and N.Matsui, "Video Object Segmentation Using Color-Component-Selectable Learning for Self-Organizing Maps," Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Life and Robotics, pp.850-853 (2011), 査読有
- ② T.Takata, T.Isokawa, A.Saitoh, N.Kamiura, and N.Matsui, "Performance Analysis of Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm," Proceedings of Joint 5th Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.1409-1412(2010), 査読有
- ③ M.Kimura, T.Isokawa, A.Saitoh, N.Kamiura, and N.Matsui, "An Analysis on Image Recognition in Complex-Valued Synergetic Computers," Proceedings of Joint 5th Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th Int. Symposium on Advanced Intelligent Systems,

- pp.1403-1408(2010), 査読有
- ④ K.Morihiro, N.Matsui, T.Isokawa, and H.Nishimura, "Reinforcement Learning Scheme for Grouping and Characterization of Multi-agent Network," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol.6278, pp.592-601 (2010), 査読有
- ⑤ N.Kaihatsu, T.Isokawa, H.Nishimura, and N.Matsui, "Performance Analysis of Complex-valued Neural Networks with Stochastic Resonance," Proceedings of SICE Annual Conference, pp. 233-237(2010), 査読有
- ⑥ T.Minemoto, S.Odama, A.Saitoh, T.Isokawa, N.Kamiura, H.Nishimura, S.Ono and N.Matsui, "Detection of Tumors on Stomach Wall in X-ray Images," Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.1159-1163(2010), 査読有
- ⑦ T.Isokawa, H.Nishimura, and N.Matsui, "Commutative Quaternion and Multistate Hopfield Neural Networks," Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.1281-1286(2010), 査読有
- ⑧ 松井伸之, "ゆらぎ・雑音研究展望," 計測自動制御学会誌 (特集: ゆらぎと雑音), Vol. 49, No. 4, pp. 208-211 (2010), 査読有
- ⑨ K.Ono, T.Isokawa, F.Peper, J.Lee, A.Saitoh, N.Kamiura, and N.Matsui, "On a Brownian Cellular Automaton Implementing Self-Reproducing Loop," Proceedings of the 15th International Conference on Artificial Life and Robotics (AROB 15th '10), pp.118-121 (2010), 査読有
- ⑩ T.Kunieda, T.Isokawa, F.Peper, A.Saitoh, N.Kamiura, and N.Matsui, "An Application of Self-Reproducing Loops to Defect-Tolerant Computation on Self-Timed Cellular Automaton," Proceedings of the 15th International Conference on Artificial Life and Robotics (AROB 15th '10), pp.122-125 (2010), 査読有
- ⑪ N.Kamiura, A.Saitoh, T.Isokawa, N.Matsui, "Accuracy Improvement of SOM-based Data Classification for Hematopoietic Tumor Patients," Proc. of 2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA09), pp.373-378 (2009), 査読有
- ⑫ T.Isokawa, H.Nishimura, and N.Matsui, "An Iterative Learning Scheme for Multistate Complex-Valued and Quaternionic Hopfield Neural Networks," Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, pp.1365-1371(2009), 査読有
- ⑬ 改發直人, 磯川悌次郎, 西村治彦, 松井伸之, "確率共鳴機構を有するニューラルネットワーク: ノイズ効果とその性能," 第53回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 343-344(2009), 査読無
- ⑭ 磯川悌次郎, 深田嘉昭, 池野英利, 齋藤歩, 上浦尚武, 松井伸之, "ミツバチシマリング行動のモデルとその特性解析," 第53回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 347-348(2009), 査読無
- ⑮ 幸田憲明, 松井伸之, "連続値RCEニューロンモデルの性能評価," 第53回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.345-346(2009), 査読無
- ⑯ 幸田憲明, 河合祐司, 松井伸之, "RBF出力関数を有するRCEニューロンモデルとその性能評価," 計測自動制御学会論文誌, vol.45, no.11, pp.620-627 (2009), 査読有
- ⑰ T.Isokawa, F.Peper, S.Kowada, N.Kamiura, and N.Matsui, "A Defect Localization Scheme for Cellular Nanocomputers," New Generation Computing, Vol.27, No.2, pp.85-105 (2009), 査読有
- ⑱ N.Kamiura, H.Urata, A.Saitoh, T.Isokawa, H.Ikeno, N.Matsui, Y.Seki, and R.Kanzaki, "On Map-Based Classification of Insect Neurons Using Three-Dimensional Quantification," Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.2138-2143 (2008), 査読有
- ⑲ T.Isokawa, F.Peper, M.Mitsui, J-Q.Liu, K.Morita, H.Umeo, N.Kamiura, and N.Matsui, "Computing by Swarm Networks," Lecture Notes in Computer Science, vol. 5191, pp.50-59(2008), 査読有
- ⑳ K.Morihiro, T.Isokawa, N.Matsui, H.Nishimura, "Effects of chaotic exploration on reinforcement learning in target capturing task," International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems, Vol.12, No.5-6, pp.369-378 (2008), 査読有
- (21) T.Isokawa, H.Nishimura, A.Saitoh, N.Kamiura, N.Matsui, "On the Scheme of Quaternionic Multistate Hopfield Neural Network," Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2008), pp.809-813 (2008), 査読有

(22) K.Morihiro, H.Nishimura, T.Isokawa, N.Matsui, "Learning Grouping and Anti-predator Behaviors for Multi-agent Systems," Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES2008), part II, LNAI5178, pp.426-433 (2008), 査読有

(23) 松井伸之, "量子ニューロコンピューティング," システム制御情報学会誌, 解説 Vol.52, No.5, pp.169-174 (2008), 査読無

[学会発表] (計 27 件)

- ① 畑昌宏, 磯川悌次郎, 池野英利, 上浦尚武, 齋藤歩, 松井伸之, "ニホンミツバチの集団行動における時空間特性の解析," 第23回自律分散システム・シンポジウム, 2011/01/30, 北海道大学
- ② 木村允謙, 磯川悌次郎, 齋藤歩, 上浦尚武, 松井伸之, "複素シナジェティックコンピュータによるパターン認識," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2010/11/25, キャンパスプラザ京都
- ③ 高田智久, 磯川悌次郎, 齋藤歩, 上浦尚武, 松井伸之, "量子進化的アルゴリズムの性能評価," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2010/11/25, キャンパスプラザ京都
- ④ 改発直人, 磯川悌次郎, 西村治彦, 松井伸之, "確率共鳴型複素ニューラルネットワークの図形処理能力評価," 第20回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2010/9/26, 首都大学東京南大沢キャンパス
- ⑤ 高田智久, 磯川悌次郎, 西村治彦, 松井伸之, "量子回路対応複素ニューラルネットワークの情報処理能力," 第20回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2010/9/26, 首都大学東京南大沢キャンパス
- ⑥ M.Hata, T.Isokawa, H.Ikeno, N.Kamiura, A.Saitoh, and N.Matsui, "Spatio-temporal characteristics of honeybee, apis cerana japonica, in shimmering behavior," Abstracts of International Union for the Study of Social Insects (IUSSI2010), 2010/8/8-14, Copenhagen, Denmark
- ⑦ 磯川悌次郎, 西村治彦, 松井伸之, "高次元ホップフィールドニューラルネットワークにおける逐次学習スキームの検討," 電子情報通信学会技術報告, NLP2009-114, 2009/11/14, 屋久島環境文化村センター
- ⑧ T.Minemoto, A.Saitoh, H.Ikeno, T.Isokawa, N.Kamiura, N.Matsui, and R.Kanzaki, "SIGEN: System for Reconstructing Three-Dimensional Structure of Insect Neurons," Proceedings of Asia

Simulation Conference 2009 (JSST2009), 2009/10/7, 立命館大学

- ⑨ 森広浩一郎, 松井伸之, 磯川悌次郎, 西村治彦, "強化学習による群行動モデルとそのネットワーク構造評価," 第19回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2009/9/18, 会津大学
- ⑩ 改発直人, 磯川悌次郎, 西村治彦, 松井伸之, "ニューラルネットワークにおけるノイズ効果と確率共鳴励起性能," 第19回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2009/9/17, 会津大学
- ⑪ 峯本俊文, 齋藤歩, 池野英利, 磯川悌次郎, 上浦尚武, 松井伸之, 神崎良平, "共焦点レーザー顕微鏡画像を基にした神経細胞形態再構成システムの開発," 第25回フエジシステムシンポジウム, 2009/7/14, 筑波大
- ⑫ 松井伸之, "量子ニューロコンピューティング," 日本物理学会公開講座「量子力学と技術の接点」, 2008/12/21, 大阪大学中之島センター (佐治敬三メモリアルホール)
- ⑬ 磯川悌次郎, 西村治彦, 齋藤歩, 上浦尚武, 松井伸之, "四元数に基づく多値連想記憶ニューラルネットワークの特性解析," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/27, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター
- ⑭ 森広浩一郎, 西村治彦, 磯川悌次郎, 松井伸之, "強化学習スキームによる群行動と捕食回避行動のモデル," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/27, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター
- ⑮ 高田智久, 松井伸之, 西村治彦, 磯川悌次郎, "量子回路対応ニューラルネットワークのナイトビジョン画像への適用," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/27, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター
- ⑯ 渡辺智文, 齋藤歩, 磯川悌次郎, 上浦尚武, 松井伸之, "スモールワールドネットワークにおけるカスケード故障の解析," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/26, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター
- ⑰ 深田嘉昭, 池野英利, 磯川悌次郎, 齋藤歩, 上浦尚武, 松井伸之, "シマリングにおけるミツバチ集団的行動の時空間特性," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/26, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター
- ⑱ 角田洋平, 磯川悌次郎, 松井伸之, "複雑ネットワーク構造を導入した複素連想記憶ネットワークの特性評価," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2008/11/26,

イーグレひめじ・姫路市国際交流センター

⑱ 池田憲史, 齋藤歩, 磯川悌次郎, 上浦尚武, 松井伸之, “階層型ニューラルネットワークを用いた動画像中の歩行者数推定システム,” 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会,” 2008/11/26, イーグレひめじ・姫路市国際交流センター

⑳ N.Kamiura, Y.Ohki, A.Saitoh, T.Isokawa, and N.Matsui, "On Video Object Segmentation Using Fast Block-Matching-Based Self-Organizing Maps," IEEE TENCN 2008, 2008/11/19, Hyderabad, India

(21) 高田智久, 松井伸之, 西村治彦, 磯川悌次郎, “複素表現による量子回路対応ニューラルネットワーク,” 第18回インテリジェント・システム・シンポジウム,” 2008/10/23, 広島県情報プラザ

(22) N.Ikeda, A.Saitoh, T.Isokawa, N.Kamiura, and N.Matsui, "A Neural Network Approach for Counting Pedestrians from Video Sequence Images," SICE Annual Conference, 2008/8/21, UEC, Tokyo, Japan

(23) 森広浩一郎, 西村治彦, 磯川悌次郎, 松井伸之, “学習ペースの異なるエージェントを含む群行動の強化学習スキームの検討,” 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008/5/17, 京都情報大学院大学京都駅前校

[図書] (計3件)

① K.Morihiro, H.Nishimura, T.Isokawa, N.Matsui, "Grouping and Anti-predator Behaviors for Multi-agent Systems Based on Reinforcement Learning Scheme," chapter 6 (pp.149-182), in Dipti Srinivasan et al. eds., Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-1, Springer, 2010

② F.Peper, H.Umeo, N.Matsui, and T.Isokawa, editors, "Natural Computing," (Proceedings in Information and Communications Technology (PICT)), Springer, 2010 (390 pages)

③ N.Matsui, H.Nishimura, and T.Isokawa, "Qubit Neural Network: Its Performance and Applications," chapter XIII (pp.325-351); T.Isokawa, N.Matsui, H.Nishimura, "Quaternionic Neural Networks: Fundamental Properties and Applications," chapter XVI (pp.411-439), in T.Nitta ed., Complex-Valued Neural Networks: Utilizing High-Dimensional Parameters, Information Science Reference (IGI Global), Hershey, New York, 2009

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/eecs12/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 伸之 (MATSUI NOBUYUKI)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10173783

(2) 研究分担者

磯川 悌次郎 (ISOKAWA TEIJIRO)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70336832

西村 治彦 (NISHIMURA HARUHIKO)
兵庫県立大学・大学院応用情報科学研究科・教授
研究者番号：40218201

(3) 連携研究者

上浦 尚武 (KAMIURA NAOTAKE)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80275312

森広 浩一郎 (MORIHIRO KOICHIRO)
兵庫教育大学・学校教育研究科・准教授
研究者番号：40263412

ペパー フェルディナンド (PEPER FERDINAND)
情報通信研究機構・基礎先端部門・主任研究員
研究者番号：40359097