

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300285

研究課題名(和文) MIZAR 数学ライブラリの構築と大学数学向け高度遠隔教育用コンテンツ開発

研究課題名(英文) Content Development for Distance Education in Advanced University Mathematics Using Mizar

研究代表者

師玉 康成 (SHIDAMA, Yasunari)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：20226129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000 円、(間接経費) 4,110,000 円

研究成果の概要(和文)：Mizarシステムは形式化記述された定理証明の正しさを機械的に検証するブルーフェッカーと呼ばれるソフトウェアである。申請者らは、これを用いた数学定理の形式化研究とそのライブラリ編纂を行う国際プロジェクトを推進してきたが、その成果を教育に利用するためe-learning用のCMSにこのMizarシステムを組み込むモジュールを試作し、大学院教育でその試験運用も進めてきた。本研究ではその成果をもとに、e-learningによる論理思考、数理的思考訓練の実用システムとその教材開発を行った。これは「学生の論理思考能力の育成」という高等教育の深刻な課題の一つに有効な解決手段の提供するものになっている。

研究成果の概要(英文)：The Mizar system is a software program to mechanically verify the correctness of theorem proofs written in a formal mathematical language. The applicants have helped to drive an international project for pursuing research on the formalization of mathematical theorems using the Mizar system and creating an open archive of the compiled mathematical knowledge. In order to apply the results of this work to education, the members built a module for embedding the Mizar system into an e-learning CMS used in a graduate curriculum and developed contents for training students in logic and advanced university mathematics. The results of this research offer an effective solution to the serious and difficult task of "training logical thinking skills to students" in higher education.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：eラーニング プルーフチェッカ

1. 研究開始当初の背景

数学定理の証明を、計算機のプログラムのよう形式化して、その正しさを機械的に検証できるようになる意義は計り知れない。申請者らが参加・推進する Mizar プロジェクトは最近、証明検証系を専門にする人々以外にも注目を集めつつあるが、特に、英国数学会編纂の数学辞典には、このプロジェクトの動向とともに、申請者ら日本の研究者の貢献が言及されている。その創始者達自身が認めるように、これへの日本の研究者達の貢献は極めて甚大である。そこで蓄積されたライブラリは、現在で 8 千以上の定義と 4 万以上の定理を含み、質、量ともに他のシステムを圧倒している。ライブラリ構築については、現在日本が主導的立場にあり、申請者ら日本の研究者が記述した形式化ライブラリが、この分野の世界的標準的な雛形となりつつある。申請者らはこの実績をもとに論理思考、数理的思考訓練システムとその教材を開発する目論見をもった。

「学生の論理思考能力をどう育成するか」という問題は理工学系学部・大学院に限らず、高等教育の深刻な課題の一つであろう。例えば、大学の 1, 2 年次課程での基礎的な数学定理の証明ですら、学生に正確にこれを理解させるには、担当教員の相当な忍耐力を前提にして、学生の個別の進度に応じた、長時間にわたる徹底した指導が必要になる。何らかの証明問題のレポート課題を与え、論理的に誤りがなくなるまで添削指導を繰り返すといった手段以外に有効な方法が無いように思われている。しかし、計算問題などとは異なり、正しい証明(解答)は一通りとは限らない。論理的に正しいものであれば、学生の数だけ解答がある。現状の教育制度でそのように教員の長時間の忍耐を要求する個別教育は果たして可能であろうか。申請者らは論理的(数理的)思考訓練の手段として、計算機を援用することに着眼した。

2. 研究の目的

学生の論理思考能力の訓練に計算機を援用する手法の具体化には前述の Mizar システムはそのための強力な道具になる。このプルーフチェッカーは、計算機の処理能力が許す限り、同時に何人の学生でも利用でき疲労をすることなく、感情的になることもなく、機械的正確さをもって学生の証明が完成するまで、何万回でも添削し続ける。申請者らは、自らが運営するインターネット大学院で Mizar ライブラリを利用した、教育手法の導入を試みてきた。今後、数学、応用数学分野に限らず、工学分野のライブラリも充実されればさらに適用範囲が広がる。本研究ではこの手法の普及を目的として、現在広く用いられている遠隔教育用コースマネジメントシステムへの Mizar 組込みモジュールと教

材を開発し、高校生から理工系大学院生までを対象とした論理思考能力、数理的思考能力を教育(鍛錬)するための実用システムを構築することを試みた。

3. 研究の方法

学生の論理思考、数理的思考訓練用システムの開発については、申請者らが開発した e-learning 用の遠隔教育用コースマネジメントシステム上用の Mizar モジュールを利用し、どのような運用による学習が最も効果的であるか、モジュールやインターフェースの改良と実践的知見の蓄積により e-learning への本格的な導入の可能にした。問題のオーサリングツールの改良も必要となったが、必要なデータベースも整備した。また、これと並行する教材の開発に当たっては、まず大学 1, 2 年次の教材の基となる微積分、線形代数、抽象代数、解析などについて Mizar のライブラリの蓄積を行った。本申請の計画終了後には、広く成果を公開し、大学での基礎教育に従事する教員に引き続く教材の開発・ライブラリ構築への参加を期待するが、その形式化数学を専門としない研究者にも Mizar システムを容易に利用できる GUI や、ライブラリ作成の手引書や支援ツールもあわせて準備した。他の分野についても、その後のライブラリ構築が容易なように基礎的なライブラリを充実させた。

4. 研究成果

主要な成果は、教材用の形式化ライブラリ作生と、それをを用いた教材システムの開発・実証実験である。前者については、形式化数学ライブラリの構築とそのシステムの開発研究に関わる専門学会論文誌 Formalized Mathematics (以下 F.M. と略記) に公表した。後者については e-learning 関連の国際学会等で発表した。以下概略を述べる。22 年度には師玉、和崎らは多変数関数、複素関数の微積分学に関する教材を作成するため、先ずそれらを構成する基礎定理とその証明の形式化記述を行い、それと並行してその形式化記述を利用して、e-Learning 用コースマネジメントシステム Moodle に Mizar システムを組み込んだシステム(以下 Mizar-Moodle システムと略記)により教材作成を作成した。同様に岡崎、山崎、和崎、カワモトらは線形代数、離散数学、初等幾何に関する教材作成するため、同様に基礎定理とその証明の形式化記述を行ない、その成果を F.M. 公表、併せて上記 Mizar-Moodle システム上で教材を作成した。特に暗号論については、DES 暗号システムの数学的正当性についての詳細な形式化記述を行ない、これと整数論の初等的な内容に関する教材を Mizar-Moodle システムにより作成した。開発された上記の教材群は WEB ページ上に公

開している。集合論については、ポーランドの研究者らの協力を得て、集合演算や2項関係に関する教材を作成した。上記教材作成による論理思考訓練システムの構築と検証を行なうため、特に証明チェック時のエラーログから、学生の弱点等を抽出可能とする仕組みの検討、遠隔教育、ブレンディング教育上実用に供するかどうかの確認を行なうため、信州大学情報工学科・情報工学専攻で実際に教材として試用を開始した。特に和崎は、今後これらの教材システムを大規模人数の教育に用いる場合に備え、学習成果を自動収集するエージェントベースシステムの開発にまで考察を進めた。24年度には23年度までに作成した論理思考訓練システムを実際の授業で運用し、評価、改善を行った。特に、多数クライアント同時接続可能な論理思考訓練システムのスケラビリティ検証と実運用ならびに運用実績に基づくシステム改善を行った。また運用実績をもとに、教材のコンテンツ改良も行った。それらの実験成果はe-learning関連の学会で公表した。さらに、研究目的を達成するため、23年度に引き続き継続的なライブラリ開発、教材化を行った。その主なものは以下である。()内は担当者名である。

(1) 多変数関数等に関する命題群の形式化証明ライブラリ作成。それらを基にした教材の作成を作成した。さらに23年度までに作成した教材の改良した。(師玉)

(2) 線形代数学に関するライブラリ作成とそれをういた教材を行なった。特に、これの画像処理(数理形態学的手法)への応用についても、ライブラリ充実を図った。(山崎)

(3) 離散数学系、暗号、アルゴリズム、並列処理等の形式化ライブラリ作成。それらを基にした教材の作成。23年度までに作成した教材の改良を行なった。離散系数学については、拡張ユークリッド互教法や、中国人剰余定理に関する数論アルゴリズム、また暗号については、DES暗号システムの、暗号化、複合化アルゴリズム、さらに、ペトリネットや並列処理回路動作の形式化と検証等を行なった。(和崎,カワモト,岡崎)

最終年度にはそれまでに形式化・教材化したものを整理・体系化するとともに、それによるe-learning教材システムを申請者が所属する大学の学科の全学部学生、専攻の修士課程全学生を対象に運用、実証実験を行ないシステムの改善を行なった。これと並行して申請者が主催した定理証明支援系の研究会や国際学会等でその研究成果公表を行った。本システムや手法の紹介、専門研究者との意見交換などによりシステムの改善、さらには利用普及促進の方策を検討した。

申請者が開発した証明記述問題と計算機によるチェックを利用した論理思考訓練用の教材システムとその手法は、数学、情報工学に限らず、工学全般、さらには証明記述な

どを通じた論理思考訓練が必要な学術分野の教育に広く適用可能である。また教育機関所属の学生に限らず、企業技術者の訓練にも有効と考えられるためこれへの展開を目指してその準備を進めた。その教材の土台になる数学定理の形式化ライブラリ構築についてその充実化を進めた。解析系では多変数関数の微積分、微分方程式論、関数空間論に関する基本定理を、代数系ではZ-加群や有限アーベル群、工学系では広範囲に利用され重要な最適化理論、離散系数学では、木構造を含むグラフ理論、数論アルゴリズム、さらには暗号などの計算機処理プログラムの動作の形式手法による正当性検証法などの研究を展開した。

申請者らが所属する大学では、全学的な汎用のe-learningシステムが既に稼働しており、申請者らが開発した手法やシステムをこの全学システムにプラグインとして組み込むために必要な諸作業を行なった。

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54件)

1. Keiko Narita, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Differential Equations on Functions from \mathbb{R} into Real Banach Space, Formalized Mathematics, 査読有, 21(4), pp.261-272, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0028
2. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Submodule of free \mathbb{Z} -module, Formalized Mathematics, 査読有, 21(4), pp.273-282, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0029
3. Yuichi Futa, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Isometric Differentiable Functions on Real Normed Space, Formalized Mathematics, 査読有, 21(4), pp.249-260, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0027
4. Mitsuru Jitsukawa, Pauline N. Kawamoto, Yasunari Shidama, Formulation of Cell Petri Nets, Formalized Mathematics, 査読有, 21(4), pp.241-247, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0026
5. Keiko Narita, Noboru Endou, Yasunari Shidama, The Linearity of Riemann Integral on Functions from \mathbb{R} into Real Banach Space, Formalized Mathematics, 査読有, 21(3), pp.185-191, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0020
6. Kenichi Arai, Hiroyuki Okazaki, Formalization of the Advanced Encryption Standard. Part I,

- Formalized Mathematics, 査読有, 21(3), pp.171-184, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0019
7. Noboru Endou, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Double Sequences and Limits, Formalized Mathematics, 査読有, 21(3), pp.163-170, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0018
 8. Hiroshi Yamazaki, Hiroyuki Okazaki, Kazuhisa Nakasho, Yasunari Shidama, Isomorphisms of Direct Products of Cyclic Groups of Prime-power Order, Formalized Mathematics, 査読有, 21(3), pp.207-211, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0022
 9. Keiko Narita, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Riemann Integral of Functions from \mathbb{R} into Real Banach Space, Formalized Mathematics, 査読有, 21(2), pp.145-152, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0016
 10. Noboru Endou, Yasunari Shidama, Differentiation in Normed Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 21(2), pp.95-102, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0011
 11. Kenichi Arai, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, N-dimensional Binary Vector Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 21(2), pp.75-81, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0008
 12. Hiroyuki Okazaki, Yuichi Futa, Yasunari Shidama, Constructing Binary Huffman Tree, Formalized Mathematics, 査読有, 21(2), pp.133-143, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0015
 13. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Daich Mizushima, Yasunari Shidama, Gaussian Integers, Formalized Mathematics, 査読有, 21(2), pp.115-125, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0013
 14. Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Random Variables and Product of Probability Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 21(1), pp.33-39, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0003
 15. Hiroyuki Okazaki, Hiroshi Yamazaki, Yasunari Shidama, Isomorphisms of Direct Products of Finite Commutative Groups, Formalized Mathematics, 査読有, 21(1), pp.65-74, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0007
 16. Katuhiko Kanazashi, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, The C^k Space, Formalized Mathematics, 査読有, 21(1), pp.25-31, 2013. DOI: 10.2478/forma-2013-0002
 17. Hiroyuki Okazaki, Yuichi Futa, Yasunari Shidama, Formal Definition of Probability on Finite and Discrete Sample Space for Proving Security of Cryptographic Systems Using Mizar, Artificial Intelligence Research, 査読有, 2(4), pp.37-48, 2013. DOI: 10.5430/air.v2n4p37
 18. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Formalization of Definitions and Theorems Related to an Elliptic Curve Over a Finite Prime Field by Using Mizar, Journal of Automated Reasoning, 査読有, 50(2), pp.161-172, 2013. DOI: 10.1007/s10817-012-9265-2
 19. Yasushige Watase, Noboru Endou, Yasunari Shidama, On L_1 Space Formed by Complex-Valued Partial Functions, Formalized Mathematics, 査読有, 20(4), pp.349-357, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0039-4
 20. Kenichi Arai, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Isomorphisms of Direct Product of Finite Cyclic Groups, Formalized Mathematics, 査読有, 20(4), pp.343-347, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0038-5
 21. Keiichi Miyajima, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, Contracting Mapping on Normed Linear Space, Formalized Mathematics, 査読有, 20(4), pp.291-301, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0035-8
 22. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Free \mathbb{Z} -module, Formalized Mathematics, 査読有, 20(4), pp.257-280, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0033-x
 23. Hideki Sakurai, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Banach's Continuous Inverse Theorem and Closed Graph Theorem, Formalized Mathematics, 査読有, 20(4), pp.271-274, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0032-y
 24. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Quotient Module of \mathbb{Z} -module, Formalized Mathematics, 査読有, 20(3), pp.205-214, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0024-y
 25. Hiroyuki Okazaki, Yosiki Aoki, Yasunari Shidama, Extended Euclidean Algorithm and CRT Algorithm, Formalized Mathematics, 査読有, 20(2), pp.175-179, 2012. DOI: 10.2478/v10037-012-0020-2
 26. Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Formalization of the Data Encryption Standard, Formalized Mathematics,

- 査読有, 20(2), pp.125-146, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0016-y
27. Noboru Endou, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Higher Order Partial Differentiation, Formalized Mathematics, 査読有, 20(2), pp. 113-124, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0015-z
 28. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Daichi Mizushima, Yasunari Shidama, Operations of Points on Elliptic Curve in Projective Coordinates, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.87-95, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0012-2
 29. Keiichi Miyajima, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, Riemann Integral of Functions from \mathbb{R} into n -dimensional Real Normed Space, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.79-86, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0012-2
 30. Keiko Narita, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, The Differentiable Functions from \mathbb{R} into \mathbb{R}^n , Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp. 65-71, 2012.DOI: 10.2478/v10037-012-0009-x
 31. Hiroshi Yamazaki, Czeslaw Bylinski, Katsumi Wasaki, Morphology for Image Processing. Part I, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.61-63, 2012.DOI: 10.2478/v10037-012-0008-y
 32. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Z-modules, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.47-59, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0007-z
 33. Yasunari Shidama, Differentiable Functions on Normed Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.31-40, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0005-1
 34. Katuhiko Kanazashi, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Functional Space $C(\Omega)$, $C_0(\Omega)$, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.15-22, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0003-3
 35. Keiichi Miyajima, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, Riemann Integral of Functions from \mathbb{R} into n -dimensional Real Normed Space, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.79-86, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0011-3
 36. Keiko Narita, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, The Differentiable Functions from \mathbb{R} into \mathbb{R}^n , Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.65-71, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0009-x
 37. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Z-modules, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.47-59, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0007-z
 38. Yasunari Shidama, Differentiable Functions on Normed Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 20(1), pp.47-59, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-012-0005-1
 39. Keiko Narita, Artur Kornilowicz, Yasunari Shidama, More on the Continuity of Real Functions, Formalized Mathematics, 査読有, 19(4), pp.233-239, 2012.
DOI: 10.2478/v10037-011-0032-3
 40. Takao Inoue, Adam Naumowicz, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Partial Differentiation, Differentiation and Continuity on n -Dimensional Real Normed Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 19(2), pp.65-68, 2011.DOI: 10.2478/v10037-011-0011-8
 41. Katuhiko Kanazashi, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Banach Algebra of Bounded Complex-Valued Functionals, Formalized Mathematics, 査読有, 19(2), pp.121-126, 2011.
DOI: 10.2478/v10037-011-0019-0
 42. Hiroyuki Okazaki, Noboru Endou, Keiko Narita, Yasunari Shidama, Differentiable Functions into Real Normed Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 19(2), pp.69-72, 2011. DOI: 10.2478/v10037-011-0012-7
 43. Keiichi Miyajima, Takahiro Kato, Yasunari Shidama, Riemann Integral of Functions from \mathbb{R} into Real Normed Space, Formalized Mathematics, 査読有, 19(1), pp.17-22, 2011.
DOI: 10.2478/v10037-011-0003-8
 44. Hiroyuki Okazaki, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Cartesian Products of Family of Real Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 19(1), pp.51-59, 2011.
DOI: 10.2478/v10037-011-0009-2
 45. Yuichi Futa, Hiroyuki Okazaki, Yasunari Shidama, Formalization of Integral Linear Space, Formalized Mathematics, 査読有, 19(1), pp.61-64, 2011. DOI: 10.2478/v10037-011-0010-9
 46. Hiroyuki Okazaki, Noboru Endou, Yasunari Shidama, More on Continuous Functions on Normed Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 19(1), pp.45-49, 2011. DOI: 10.2478/v10037-011-0008-3
 47. Keiichi Miyajima, Takahiro Kato,

Yasunari Shidama, Riemann Integral of Functions R into C , Formalized Mathematics, 査読有, 18(4), pp. 201-206, 2010. DOI: 10.2478/v10037-010-0024-8

48. Takao Inoue, Noboru Endou, Yasunari Shidama, Differentiation of Vector-Valued Functions on n -Dimensional Real Normed Linear Spaces, Formalized Mathematics, 査読有, 18(4), pp.207-212, 2010. DOI: 10.2478/v10037-010-0025-7
49. 田中敬一, 和崎克己, 電子テキストを利用した情報リテラシー教育の実施結果収集を行う大規模工・ジェントベースシステムの開発と評価, 教育システム情報学会誌, 査読有, 27(3), pp.267-279, 2010.

〔学会発表〕(計34件)

1. Takaya IDO, Hiroyuki OKAZAKI, Hiroshi YAMAZAKI, Pauline Naomi KAWAMOTO, Katsumi WASAKI, Yasunari SHIDAMA, Content Development for Distance Education in Advanced University Mathematics Using Mizar, Proceedings of the 2013 International Conference on e-Learning, e-Business, Enterprise Information Systems, and e-Government (EEE'13), 321-326, July 22-25, 2013, Las Vegas, Nevada, USA.
2. Keiichi TANAKA, Katsumi WASAKI, Development and Evaluation of a Large-Scale Agent-Based System for Information Literacy Education-Improving the Automatic Collection of Learning Results through Template Matching, The 8th International Conference on Information Technology: New Generations(ITNG2011),1-6, April 11-13, 2011, Las Vegas, Nevada, USA. DOI: 10.1109/ITNG.2011.8

〔その他〕

ホームページ等

<http://shirodanuki.cs.shinshu-u.ac.jp/mizar/moodle/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

師玉 康成 (SHIDAMA, Yasunari)
信州大学・工学部・教授
研究者番号: 20226129

(2)研究分担者

和崎 克己 (WASAKI, Katsumi)
信州大学・工学部・教授

研究者番号: 70271492

K PAULINE Naomi (KAWAMOTO, Pauline Naomi)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号: 40283238

山崎 浩 (YAMAZAKI, Hiroshi)
信州大学・工学部・助教
研究者番号: 00293522

岡崎 裕之 (OKAZAKI, Hiroyuki)
信州大学・工学系研究科・助教
研究者番号: 50432167

(3)連携研究者

布田 裕一 (FUTA, Yuichi)
北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号: 50706223

荒井 研一 (ARAI, Kenichi)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号: 60645290