

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：34517

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00501

研究課題名(和文) 数式入力のインテリジェント化と数学eラーニングへの発展的応用に関する研究

研究課題名(英文) Research on intelligent mathematical formula input and advanced application to mathematics e-learning

研究代表者

福井 哲夫 (Fukui, Tetsuo)

武庫川女子大学・生活環境学部・教授

研究者番号：70218890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：数学eラーニングにおいて必要とされるインテリジェントな数式入力UIに人工知能技術を導入して、高速化・高精度化を図り、評価の結果、約85%の正答率を得た。また、予測候補に無くても絞込み変換によって確実に数式構築できるような、より柔軟なインタフェースを確立した。さらに、そのUIの発展的応用として、数学eラーニング時に、思考過程などの数学文書をデジタルに記録しやすくする数学文書エディタを開発し、グラフ作成も含め学習過程を支援するシステムを構築し、被験者実験によって、従来よりも効果・効率・満足度が高いことを検証した。なお、それらの成果は内外に発表するとともに、開発システムをサーバにて公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の数式入力UIはシステムに合わせて利用者が指示しなければならないため負担が大きい。提案のインテリジェントUIは、利用者の曖昧入力を補って予測してくれる。しかし、候補算出速度・精度に問題があった。本研究の学術的意義は、それらのアルゴリズムを改善し、実用レベルに引き上げた点にある。本研究の社会的意義は、より柔軟で数式入力の負担が大きく改善されることが期待された数学文書エディタやそれと連携するグラフ作成ツールの提供により、紙と鉛筆でしかできなかった数学ノートや途中計算過程をデジタルデバイスにより記録できる環境を学習者に提供できるようになることである。

研究成果の概要(英文)：In this research, the speed and accuracy of our proposed intelligent mathematical formula input UI for mathematics e-learning has improved by using artificial intelligence technology. As a result of our evaluation, the 85% accuracy has been obtained. In addition, we have established a more flexible interface that enables reliable construction of mathematical formulas by narrowing down transformation even if it is not included in the prediction candidates. Furthermore, as advanced applications of the UI, we developed a mathematical document editor that makes it easy to digitally record mathematical documents such as thinking processes during mathematics e-learning, and built a system to support the learning process including graph creation. Through our experiments, it has been verified that the effect, efficiency, and satisfaction were higher than before. The results were presented by several articles, and the development system was released on our server.

研究分野：情報学

キーワード：数式入力インタフェース 知的学習支援システム 数学eラーニング 知的UI 機械学習 ICT活用教育 STEM教育支援

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

文部科学省が2011年に「教育の情報化ビジョン」の中で、2020年度までにデジタル教科書への全面導入が提言された。数学・科学分野においては、デジタル端末を使った問題学習や協働学習などの場面で生徒が数式を扱う機会が増加するものと予想され、数式のデジタル入力が面倒で、その負担軽減が必要とされるようになった。

一方、数学の効果的なオンラインテストを実施するため数式を直接解答できる数学eラーニングシステムが広がりを見せている。しかし、現状の数学eラーニングは基本的に解答後に正誤判定されるドリル学習のみで、考え方を導いたり、途中計算に対するフィードバックはない。それゆえ、間違えた場合、誤り箇所が分からず、思い込みから抜け出せないため、苦手な学生に対して苦手意識から脱却させることができない。

この問題に対して最も先行している研究として、カーネギーメロン大学のチューターシステムが挙げられる。このシステムでは、数学の問題を解く際の途中計算を手書き認識技術を使って入力させ、支援しようと試みている。しかし、手書き認識精度の問題から、キーボード入力と併用しており、不十分な点も残されている。

我々は、H26～H28年度の科研費基盤(c)研究課題「数式入力のインテリジェント化と数学eラーニングに関する研究」(16330413)において、パーセプトロンの機械学習による予測アルゴリズムを使ったインテリジェント数式入力UI(Math TOUCH)の開発に成功し、数学eラーニングシステム(STACK)に実装して、その有効性を検証した。インテリジェント数式入力とは、人が数式を読み書きするような文字列から所望の数式を機械学習によって予測するものである。例えば、 x^2 を入力するのに"x^2"ではなく、"x2"と数式を読む行動と同じ文字だけを打鍵し、変換によって正しい候補を出力する。ただし、 x_2 も候補として存在するが、数式辞書の機械学習が進めばユーザがよく使う候補が優先され、入力効率が向上するものである。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、インテリジェント数式入力UIに人工知能技術を導入して、高速化・高精度化を図り、より柔軟なインタフェースを確立すること。数学eラーニング時に、数学の思考過程などの数学文書をデジタルに記録しやすくする数学文書エディタを開発し、グラフ作成も含め学習過程を支援するシステムを構築することにある。

これによって数学の思考過程においても、細かなフィードバックを行うことができ、考えさせる数学eラーニングの可能性を広げることができる。

3. 研究の方法

本研究で提案する数式文字列変換方式(特許取得)のインテリジェント化の第一歩(パーセプトロンの機械学習アルゴリズム)は確立している。しかし、途中計算のような長い数式では候補を算出する計算時間がかかり過ぎ、予測精度を低下させるため、数式入力UIの候補算出処理の高速化・高精度化を行うためには、数式予測のための機械学習アルゴリズムにおける精度を下げ、

時間がかかる原因を明らかにし、改善アルゴリズムを確立していく。

また、途中計算のような長い数式においては、部分的に短く分けて数式を構築した方がよい場合も多く、より柔軟な処理のために、確定部分を含む条件付数式予測アルゴリズムを確立する必要がある。方法としては、日本語の仮名漢字変換技術や日本語予測入力において、確定部分を含む予測アルゴリズムがヒントとなる。

次に、その成果を検証するため、被験者協力を得て数式入力 UI の効率評価テストを実施した。様々なアプローチから、最適と思われるアルゴリズムを絞り込んで2～3タイプの実装システムを試作し、それらと以前のシステムとを使い、数式入力タスクテストの状況をデータ記録して操作効率の向上を測ると共に最適なシステムを明らかにする。この評価実験を繰り返し、この一連の被験者実験の中で見つかった不備はその都度改善を図る。

以上のこと踏まえ、研究方法は次の(1)数式入力 UI のより柔軟な予測アルゴリズムの研究、(2)数学 e ラーニングのための数学文書エディタの開発、(3)数学 e ラーニング環境との連携への発展的応用研究、(4)研究成果の公開の順に焦点を絞って研究を実施した。

4. 研究成果

(1) 数式入力 UI のより柔軟な予測アルゴリズムの研究

背景で述べたように、これまで提案してきた数式文字列変換方式のインテリジェント化の第一歩(パーセプトロンの機械学習アルゴリズム)は確立している。しかし、途中計算のような長い数式では候補を算出する計算時間がかかりすぎ、予測精度を低下させる。そこで本研究課題では、数式入力 UI の候補算出処理の高速化・高精度化に取り組んだ。

2017年度はまず、代数学分野のみでは高い予測精度を示すが、一般の数学分野への適用では精度が下がる問題を解決するため、精度を下げる原因となる数式内部表現の曖昧性を一意に正規化するアルゴリズムを開発した。精度評価の結果、候補がベスト 10 に入る正答率が 85%と、実用レベルに達することを示した。本成果は、国際会議 HCI にて発表した。

また、途中計算のような長い数式においては、部分的に短く分けて数式を構築した方がよい場合も多く、より柔軟な処理のために、確定部分を含む条件付き数式予測アルゴリズムを確立することに取り組んだ。しかし、研究の結果、確定部分を考慮してもしなくても、残りの文字列部分の予測精度に大きな差は見られず、それより予測された候補群に所望の数式が含まれなかった場合に、いかに数式を構築していくかが大きな問題であることが明らかとなった。そこで採用したアルゴリズムが、入力文字列の左端絞り込み機能である。つまり、入力された文字列からの予測がヒットしなかった場合は、左端の数式最小単位に絞り込み、確実に左端から数式確定部分を広げて、確実に所望の数式を構築できるようにした。

もう一つの課題である、数式予測の高速化については、一つには候補の可能性爆発(候補となる組み合わせが多くなり過ぎることを防ぐため数式辞書の見直しを行った。さらに、膨大な候補に対して毎回全ての候補を算出するまで、入力手順が進行しないため速度を低下させていたが、本予測アルゴリズムでは、最初の 3 秒以内で算出した候補の約 8 割が、正解を含むことを

突き止め、約 3 秒を基準に打ち切るようにアルゴリズム改良したところ、予測の高速化に成功した。実際、約 4000 個の数式で検証したところ、以前は平均予測時間が約 10 秒かかっていたところ、平均予測時間が約 1 秒以内と大幅に改善した。また、予測精度も約 85%と低下しないことを検証した。当初は、予測のための機械学習アルゴリズムに最新の技術を取り入れる予定であったが、この方法で十分実用に耐えるレベルに達したため、本研究の成果とした。これら成果については論文に投稿予定である。

(2) 数学 e ラーニングのための数学文書エディタの開発

本研究課題では、数学学習や途中計算過程などの思考を外化するための日本語及び数式混じりの数学文書が編集できるリッチテキストエディタの開発を目指した。その数式部分の入力に、(1)で開発した柔軟な予測手順による高速な数式入力インターフェースを実装した。また、本研究では、成果を公開して使ってもらいやすくするために、JavaScript のエディタブル要素機能を採用した。完成したエディタの実行画面を図 1 に示す。オープンソースの LMS である Moodle で利用できる数式予測変換方式によるシームレスなインターフェースを備えるリッチテキストエディタとなっている。有効性調査として 6 名被験者によるユーザビリティ評価実験を行った結果、提案エディタの方が、LATEX 形式のテキスト入力インターフェースをベースとしたリッチテキストエディタより約 1.8 倍有意に早く数学文書を入力できることが確認できた。一方で、変換候補の表示が分かりにくい問題も明らかとなったため、新たな課題が残った。その成果は 2022 年 3 月に情報処理学会の第 36 回教育学習支援情報システム(CLE)研究会で発表した。



図 1 開発した数学文書エディタの実行画面

(3) 数学 e ラーニング環境との連携への発展的応用研究

数学 e ラーニング環境との連携課題に関しては、大きく 3 つのテーマに取り組んだ。

- ①一つはエディタで作成した数式や数学文書の外部アプリケーションとの連携を可能とするため、さまざまな形式 (画像の JPEG, PNG や LATEX 形式など) への出力機能を充実させた。特に、市販のワープロソフトである Microsoft Word 形式の出力機能の実現し、学会・国際会議にて発表した。
- ②二つ目は、スマートデバイス向け UI の試作と評価について研究を行った。それまでの研究では、PC のキーボードを想定した数式入力インターフェースを開発してきたが、近年の GIGA スク

ール構想やオンライン授業など、スマートデバイスが家庭や教室に導入され利用されるケースが増えたため、本研究成果をより多くの人に活用してもらうため、インテリジェント化された数式予測変換を備えたソフトキーボード（図1参照）を開発した。被験者実験によりその有効性を評価した結果、我々の提案 UI は従来の標準的インタフェースに比べ、平均入力時間が約 1.3 倍早いことが示された。これらの成果は、教育システム情報学会や国際会議 IUI にて発表した。

③三つ目の取り組みは、当初の計画にはなかったが、数学 e ラーニング環境と連携した数学学習の場面で関数のグラフ活用が欠かせないことがニーズ調査などから明らかとなったため、本研究の発展的応用としてグラフ作成ツールの開発・評価を行った。特に、既存のグラフ作成ツールは、数学初学者にとって不自然なコマンドや文法を使うことが多い。そこで、本研究課題のインテリジェント化された UI を備えた数学文書エディタの特徴を活かし、自然な数学記述によるグラフ作成ツールの提案をした。ここでいう自然な数学記述とは、教科書通りの表現のままにグラフが作成できるもので、教育支援には重要と考える。開発したグラフ作成ツールの実行画面を図2に示す。実際、武庫川女子大学附属高校の生徒に対して実験授業を実施し、評価した結果、主観満足度調査において約 87%の生徒が高評価を示した。また、大学生に対して、既存グラフ作成ツールとの比較実験を行ったところ、約 2 倍早くグラフが作成でき、満足度も高いことを検証した。これらの成果は「数学ソフトウェアと教育利用に関する研究会」にて発表した。

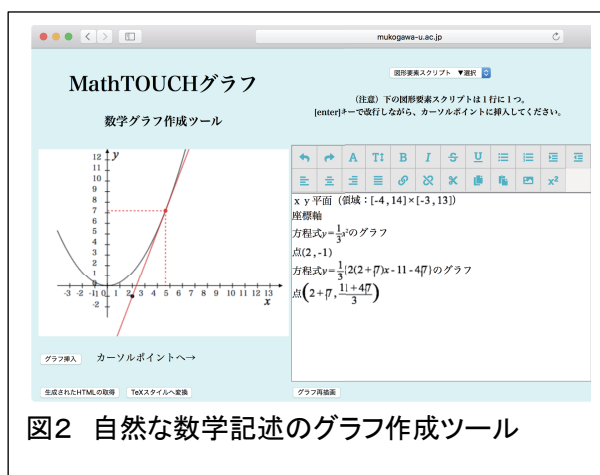


図2 自然な数学記述のグラフ作成ツール

(4) 研究成果の公開

令和3年度（最終年度）は、まず、業者委託により成果システムを公開するためのサーバを設置した。次に、前年度までに開発したインテリジェントな数式入力 UI を公開できるように整備し、中盤以降に公開サーバに構築し、公開を開始した。これにより、成果物であるインテリジェント数式入力 UI を数学文書エディタおよびグラフ作成ツールを、サーバを通じて試用できるようになった。これによって、学習者にとってはグラフを使った学習支援の利便性を高めることができ、STEM 教育者にとっては、教材作成支援に貢献できるものと期待する。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tetsuo Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Educational graph creation tool based on the natural mathematical description	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACA 2019: Booklet of the 25th Conference on Applications of Computer Algebra	6. 最初と最後の頁 190-190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 岩永和好, 西田ななみ, 藤井志帆, 吉澤知里, 福井哲夫	4. 巻 2142
2. 論文標題 自然な数学記述によるグラフ作成ツールの評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 数理解析研究所講義録 「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」	6. 最初と最後の頁 100-107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 白井詩沙香, 福井哲夫, 中原敬広, 中村泰之, 吉富賢太郎, 宮崎佳典, 古川雅子, Sohee Kang, Marco Pollanen	4. 巻 -
2. 論文標題 Mathematics Classroom Collaborator (MC2)の数式入力機能の拡張	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会第82回全国大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1H-05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tetsuo Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Educational Graph Creation Tool based on Natural Mathematical Description	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IUI '20: Proceedings of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces Companion	6. 最初と最後の頁 55-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3379336.3381483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shizuka Shirai, Tetsuo Fukui, Kentaro Yoshitomi, Mitsuru Kawazoe, Takahiro Nakahara, Yasuyuki Nakamura, Katsuya Kato, Tetsuya Taniguchi	4. 巻 10931
2. 論文標題 Intelligent Editor for Authoring Educational Materials in Mathematics e-Learning Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Congress on Mathematical Software 2018, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 431-437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-96418-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白井詩沙香, 福井哲夫	4. 巻 -
2. 論文標題 数式曖昧入力変換方式による 数式入力インタフェースのスマートデバイス向けUIの試作	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第43回教育システム情報学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 277-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 富永侑里, 遠藤菜津美, 福井哲夫	4. 巻 2105
2. 論文標題 自然な数学記述によるグラフ作成ツールの提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録 「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」	6. 最初と最後の頁 69-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤菜津美, 富永侑里, 福井哲夫	4. 巻 4
2. 論文標題 数学記述によるグラフ作成ツールを使った数学教育モデル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会第81回全国大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 591-592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shizuka Shirai, Tetsuo Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Intelligent Input Interface for Entering Equations on Smartphone	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IUI '19: Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces	6. 最初と最後の頁 9-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3308557.3308687	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuo Fukui	4. 巻 Vol.198
2. 論文標題 Algorithm for Predicting Mathematical Formulae from Linear Strings for Mathematical Inputs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applications of Computer Algebra, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics	6. 最初と最後の頁 137-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-56932-1_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuo Fukui, Shizuka Shirai	4. 巻 -
2. 論文標題 Predictive Algorithm for Converting Linear Strings to General Mathematical Formulae	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 S. Yamamoto (Ed.): HIMI 2017, Part II, LNCS 10274	6. 最初と最後の頁 15-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-58524-6_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuo Fukui and Shizuka Shirai	4. 巻 -
2. 論文標題 Extension of Output Function in MathTOUCH for the Production of Mathematical Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Workshop on Mathematical Education for Non-Mathematics Students Developing Advanced Mathematical Literacy	6. 最初と最後の頁 115-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白井詩沙香, 中原敬広, 福井哲夫	4. 巻 Vol. 2022-CLE-36, No.2
2. 論文標題 数学eラーニングのための数式予測変換方式によるリッチテキストエディタの試作と評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第36回教育学習支援情報システム(CLE)研究会 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Tetsuo Fukui
2. 発表標題 Educational graph creation tool based on the natural mathematical description
3. 学会等名 Applications of Computer Algebra (ACA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩永和好, 西田ななみ, 藤井志帆, 吉澤知里, 福井哲夫
2. 発表標題 自然な数学記述によるグラフ作成ツールの評価
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shizuka Shirai, Tetsuo Fukui, Kentaro Yoshitomi, Mitsuru Kawazoe, Takahiro Nakahara, Yasuyuki Nakamura, Katsuya Kato, Tetsuya Taniguchi
2. 発表標題 Intelligent Editor for Authoring Educational Materials in Mathematics e-Learning Systems
3. 学会等名 International Congress on Mathematical Software 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永侑里、遠藤菜津美、昇千尋、福井哲夫
2. 発表標題 自然な数学記述によるグラフ作成ツールの提案
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井詩沙香, 福井哲夫
2. 発表標題 数式曖昧入力変換方式による 数式入力インタフェースのスマートデバイス向けUIの試作
3. 学会等名 第43回教育システム情報学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤菜津美, 富永侑里, 福井哲夫
2. 発表標題 数学記述によるグラフ作成ツールを使った数学教育モデル
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shizuka Shirai, Tetsuo Fukui
2. 発表標題 Evaluation of Intelligent Input Interface for Entering Equations on Smartphone
3. 学会等名 The 24th annual meeting of the intelligent interfaces community and serves on intelligent user interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuo Fukui, Shizuka Shirai
2. 発表標題 Predictive Algorithm for Converting Linear Strings to General Mathematical Formulae
3. 学会等名 HCI International 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsuo Fukui and Shizuka Shirai
2. 発表標題 Extension of Output Function in MathTOUCH for the Production of Mathematical Materials
3. 学会等名 International Workshop on Mathematical Education for Non-Mathematics Students Developing Advanced Mathematical Literacy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井詩沙香, 中原敬広, 福井哲夫
2. 発表標題 数学eラーニングのための数式予測変換方式によるリッチテキストエディタの試作と評価
3. 学会等名 第36回教育学習支援情報システム(CLE)研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>タイトル: MathTOUCHで数式をもっと自由に。 URL: https://mathtouch.org 備考: 成果物である数式入力インタフェースをMathTOUCHと呼ぶ。そのUIを使用できる公開用サーバのURLである。</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------