

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：34517

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12117

研究課題名（和文）マルチモーダルな数式入力UIの研究と数学学習支援環境

研究課題名（英文）Research on multimodal formula input UI and mathematics learning support environment

研究代表者

福井 哲夫（FUKUI, Tetsuo）

武庫川女子大学・社会情報学部・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）：前研究課題で取り組んできた数式曖昧文字列からのAI予測変換による数式入力UIに、音声認識技術を導入し、音声による数式入力を実現した。これにより利用者の多様な場面に対応したキーボード・タッチスクリーン・音声入力などマルチモーダルな数式入力UIが提供できた。そのUIを実装した数学eラーニング教材作成のための数学統合文書エディタを独自開発し、オープンソースとして公開した。また、このシステムを検証するため、関数グラフ作成による学習教材を含む数学学習支援環境を試作し、高校生約60名に授業実践したところ、高い満足度が得られた。これらの成果は学会で発表するとともに開発システムを公開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

本研究のAIによる数式曖昧文字列予測変換は、数式の音声の読み上げ文字と親和性が高く、低コストで中学数学レベルの数式の音声認識が実現できることを示した。しかし、数式は似たような発音が多く100%の認識率を目指すには限界がある。本研究では、音声のみではなく、キーボード・タッチスクリーン入力と組み合わせたマルチモーダルな数式入力UIを実現しており、誤認や入力ミスに対して修正のしやすさが向上したことにある。社会的意義として、マルチモーダルなUIを備えた数学文書エディタを公開したことによって、教師による教材作成支援だけでなく、多様な場面に対応した数学学習支援環境を提供できるようになった。

研究成果の概要（英文）：We have realized mathematical formula input by voice by introducing voice recognition technology to the previous math input UI that uses AI predictive conversion from mathematically ambiguous character strings. Adding this UI, we have developed a multimodal formula input UI such as keyboard, touch screen, and voice input that corresponds to a variety of user situations. Furthermore, we have developed a mathematics integrated document editor for creating mathematics e-learning materials that implements this UI, and released it as open source. Additionally, in order to verify this system, we created a prototype mathematics learning support environment that included learning materials based on the creation of function graphs, and conducted classes with approximately 60 high school students, which resulted in a high level of satisfaction. These results were presented at academic conferences and the developed system was made available on our public server.

研究分野：情報科学

キーワード：マルチモーダル学習 音声入出力 数式入力インタフェース 数学文書エディタ 知的学習支援システム 数学eラーニング

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

文部科学省は第3期教育振興基本計画[1]において超スマート社会(Society5.0)時代の到来に向けて生涯教育の充実や各教科の指導におけるICT活用の基盤整備・促進を掲げている。しかしながら、世界的に重視されているSTEM教育における数学では、数式の取り扱いが障壁となり、これらを十分に活用できない状況にある。特に、STACKなど、数式を直接解答できるオンラインテストを備えた数学eラーニングシステムが広がりを見せているが、同時に問題コンテンツ不足も指摘され、教師が問題を作成する上で必要な複雑な数式入力負担も改善すべき課題と言える[2]。

さらに、現在大学では学生のPCスキルの低下が著しく、中学・高等学校の教室においては、問題学習や共同学習、アクティブラーニングなど個人やグループで場面に応じてPCやタブレット端末を使用する一方、自宅でも商用ベースのオンライン学習コンテンツをスマートフォンなどで学習し、ICTの利用方法が多様化している。

もはや、1種類の端末や入力インタフェースだけを使い続けてスキルを向上させる時代は終わり、数式入力手段も場面や(教師作成者側か学習者側かの)目的レベルに応じて使い分ける必要がある。

我々は、2017~2019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ラーニングへの発展的応用に関する研究」において、人が数式を読み書きするような文字列(以後、数式線形文字列)から所望の数式を機械学習によって予測するインテリジェント数式入力UI(MathTOUCH)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。

しかし、主にPCで数学教材作成や論文作成の数式入力改善に有効なMathTOUCHも、上記のような時代の変化により、特に学習者のような若い世代への対応が十分とは言えない。それでも、人の読み書きの経験を活かした数式線形文字列からの数式予測アルゴリズムは有効なパフォーマンスを得ており[3]、スマートデバイスによる手書きや音声入力などマルチモーダルなUIに発展できる可能性を秘めている。これにより、数学学習環境改善に貢献できるものとする。

2. 研究の目的

本研究では、数学教材を作成(デジタル化)する教師のためだけでなく、ICTを活用して、数学的知識や思考を身につけようとする生徒・学生・一般人のために、多様な場面に対応し、キーボード、タッチスクリーン、音声入力などマルチモーダルな数式入力インタフェースを実現し、数学的統合文書エディタに実装して、デジタルメモや解答入力など数学eラーニングと連携できる学習支援環境を構築・公開することを目的とする。

具体的には、以下に示す4つの研究課題を申請当初計画した。

[旧課題1] 機械学習による手書き数式入力のためのマルチモーダル学習の研究

[旧課題2] 機械学習による音声数式入力のためのマルチモーダル学習の研究

[旧課題3] キーボード・タッチスクリーン・手書き入力・音声入力によるマルチモーダルなインタラクティブ操作を可能にする数式入力インタフェースの開発

[旧課題4] 上記研究課題で得られたマルチモーダルな数式入力インタフェースを実装した数学総合文書エディタの開発と数学eラーニングと連携できる学習支援環境の構築

3. 研究の方法

申請当初、上記課題を3年間で遂行する予定であったが、コロナ禍の影響でオンライン教育が普及し、教育・学習環境が劇的に変化する中、研究計画を次のように見直し、期間を延長して4年間で実施した。

申請時は、手書きによる数式入力にも着目していたが、紙による手書き入力の経験を生かすためには、デジタルペンなど特殊な装置が必要な上に、すでに多くの先行研究が成果を出しており、本研究の主力のアイデアである、曖昧入力による予測アルゴリズムが活かせないため、この分野は他の研究に譲り、[旧課題1]本研究目的からは外すことにした。

一方、オンライン教育やeラーニングが普及するにつれて、理数系教育における学習環境の新たな重要課題として、数式入力だけでなく、学習者自身が作成しやすい関数グラフツールを使った学習教材の重要性を提案する。

したがって、本研究では、以下に示す3つの研究課題を定めて実施した。

[課題1] 音声認識による数式入力インタフェース(UI)の研究

[課題2] キーボード・タッチスクリーン・音声入力によるマルチモーダル数式入力UIの研究

[課題3] マルチモーダルUIを備えた数学文書エディタの開発と数学eラーニングとの連携

まず、[課題1]の準備のために、令和2年度に、機械学習計算のためのGPUワークステーションおよびソフトウェア MATLAB (マスワークス) を購入・整備し、本格計算の前の動作検証や基本テストなどを実施した。また、音声数式入力のための数式読み上げルールの確立のために、外部アルバイトにより約4000個の数式サンプルを入力させ検証を行った。音声認識技術には Web Speech API を採用し、認識した数式音声を数式入力 UI (MathTOUCH) の線形文字列と連携させることによって実現できる。

[課題2]のキーボード・タッチスクリーン入力は先行研究によって既に実現しているため、[課題1]の成果を追加・拡張する形で容易に実現できる。

さらに、[課題3]は[課題2]の成果を実装する形で実現する。重要なのは、実現したマルチモーダルUIを備えた数学学習環境の有効性の検証であり、ターゲットである高校生を被験者に授業実践を計画し、アンケートによる反応を収集して評価する。

4. 研究成果

(1) 「音声認識による数式入力インターフェース(UI)の研究」

音声による数式入力のためには、認識の前段階として、数式読み上げルールの確立しておく必要がある。そのために、音声合成 API を用いた数式の音声読み上げシステムの開発に取り組んだ。その結果、数式の読み上げ方に関する文献調査に基づく知識から、高校数学 レベルまでの数式の音声読み上げに成功した。さらにその応用として、入力された数式を読み上げ、文字列に変換するツールを開発し、高校数学の教科書の数式が正しく読み上げできることを検証した。これにより本開発ツールは、理数系教育者がオンデマンド動画教材を作成するための数式音声読み上げデータ構築に貢献できる。本研究成果は令和3年8月のFIT(情報科学フォーラム)にて発表し、反響が得られた。

令和4年度は、前年度に確立した数式読み上げツールによる辞書を基礎として、数式の音声認識アルゴリズムの確立に取り組んだ。方策として、既に開発済みの数式予測変換モジュールと既存の音声認識APIを組み合わせて、中学校数学レベルの数式入力に有効であることを検証した。検証には数式読み上げの音声サンプルを学生アルバイトによって収集し、音声認識のための辞書テーブルを構築できた。この成果は令和5年3月の情報処理学会第85回全国大会にて発表した。

表1. 数式読み上げテキストの例

No.	数式例	LaTeX形式	読み上げテキスト
1	x	x	エックス
2	π	π	パイ
3	$ax^2+bx+c=0$	$ax^2+bx+c=0$	エー エックス 2じょうプラスビー エックスプラスシー アイコール 0
4	$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$	$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$	エックス アイコール 2 エー ぶんの マイナス ビープラスマイナスルート ビー 2じょうマイナス4 エー シー
5	$\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}$	$\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}$	サイン カッコ シータプラス4 ぶんの パイ アイコール 2 ぶんの 1
6	${}_5C_2 = 10$	$\binom{5}{2} = 10$	5 シー 2 アイコール 10
7	$\log_{10} \frac{n+1}{n}$	$\log_{10} \frac{n+1}{n}$	ログ10 エヌ ぶんの エヌプラス1
8	$\int_a^b f(x) dx$	$\int_a^b f(x) dx$	エーから ビーまでの エックスにおける エフ カッコ エックスの積分

(2) 「キーボード・タッチスクリーン・音声入力によるマルチモーダル数式入力UIの研究」

背景で述べた先行研究のインテリジェント数式入力UI (MathTOUCH) は数式線形文字列の入力に PC のキーボードをベースに採用しており、令和2年度からはタブレット端末の普及に伴い、タッチスクリーンでも入力できるように、ソフトキーボードを開発した。さらに、令和4年度には(1)の成果を基に、音声入力にも対応させ、マルチモーダルな数式入力UIが実現できた(図1)。

しかし、複数の英数字・特殊記号で構成されている数式は、音声だけで数式を確定するのは困難であることがうかがえる。例えば、a(エー)とe(イー)やc(シー)と4(し)などの似たような発音が多く、判別は非常に困難であった。その上に、外部のノイズ音や人の喋り方・アクセント・間などの癖の違いによっても認識結果が違いため、認識精度が下がる。したがって、100%の認識率を目指すには限界がある。

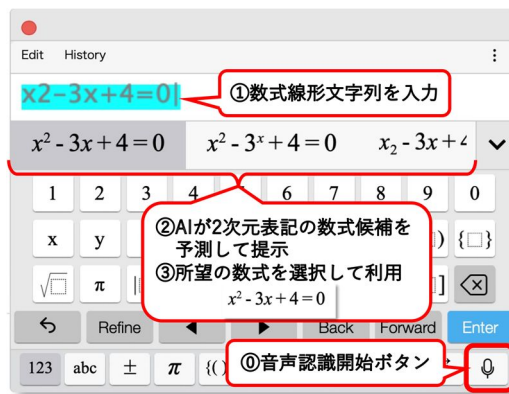


図1. 音声入力UIの操作手順

実際、図1において、音声誤認や音声入力ミスによって、読み上げた数式が正しい線形文字列に変換されるとは限らない。その場合は、誤認部分の文字列を削除して、再度音声入力を繰り返す。場合によっては、従来のハード/ソフト (GUI) キーボード操作も使用可能なため、キー入力に切り替えて入力を継続したり、キー操作により簡単に修正・編集が可能である。このことが本研究のもう一つの提案でもある。

結果として令和5年度に、音声認識に関して中学数学レベルまで成功していた認識範囲を高校数学 まで拡張し、評価実験によってマルチモーダルな数式入力インターフェースとして一定の成果を示すことができた。マルチモーダルUIの利点は、利用者の多様な場面やデバイスに対応

できること、誤認や入力ミスに対して別のモードによる修正のしやすさが向上したことにある。この成果は、令和5年8月に開催された数理解析研究所研究会「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」にて発表した。

(3) 「マルチモーダルUIを備えた数学文書エディタの開発と数学eラーニングとの連携」

数学eラーニングのためのリッチテキストエディタの開発は、数式入力UI改善とは独立して行えるため、令和2年度から着手した。

令和4年2月には、(2)のマルチモーダルUIの成果を基に、最終目標である数学学習支援環境の検証に必要な数学的統合文書エディタ(図2)の開発にも取り組み、プロトタイプを作成した。その成果は令和4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。

令和4年度前半は、学習支援環境を充実させるため、先行研究で開発した自然な記述のグラフツールを利用した学習教材サンプルを蓄積し、構築済み公開用サーバ上でシステムの試用とサンプルの提示機能を実現した。その成果を令和4年8月開催の「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」研究会にて口頭発表し、その論文が数理解析研究所講究録2236巻に掲載された。

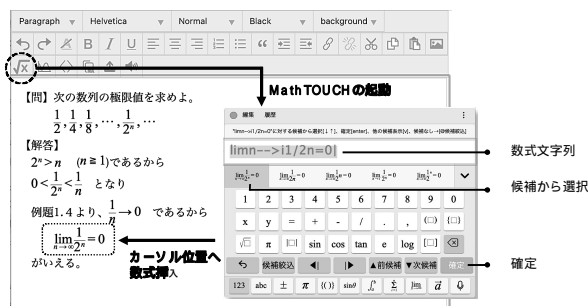


図2. 数学統合文書エディタとマルチモーダルUI

(4) 研究成果の公開

さらに、このUIを実装した数学文書エディタをオープンソースの数学eラーニングシステム STACK on Moodle 用のプラグインとして開発に成功し、本科研費にて構築した公開サーバ (mathtouch.org)を通じて公開するとともに、eラーニングシステムの全国大会「日本 Moodle ムート 2024」で発表したところ、発表内容がベストイノベーション部門で準優勝となり、大いに評価を受けた。

これによって、学習者にとっては多様な場面に応じたキーボード・タッチスクリーン・音声などを選択し、数学eラーニングや数学ノートや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。

最後に、学習支援環境において重要な役割を果たすことが分かった関数グラフ作成ツールは現時点の数学統合文書エディタとシームレスに連携できていない。今後は、これらの連携を改善したい。また、本研究で提供できた学習支援環境の学習への効果についても十分な検証ができていないため、今後の課題としたい。

<引用文献>

- [1] 文部科学省, 第3期教育振興基本計画, https://www.mext.go.jp/a_menu/keikaku/detail/1406127.htm, 2018.
- [2] 中村泰之, 数学eラーニング 数式解答評価システム STACK と Moodle による理工系教育, 東京電機大学出版局, 2010.
- [3] T. Fukui, S. Shirai, Predictive Algorithm for Converting Linear Strings to General Mathematical Formulae, Human Interface and the Management of Information: Supporting Learning, Decision-Making and Collaboration, Lecture Notes in Computer Science, 10274, Springer, pp.15-28, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 猪岡柚葉, 宇都宮若菜, 國仙紗也香, 福井哲夫	4. 巻 2236
2. 論文標題 グラフ作成ツールによる高校数学向け学習教材	5. 発行年 2022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 pp. 117-126
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 Tetsuo FUKUI, Shizuka SHIRAI	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Online Support Tools for Creating STEM Educational Materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)	6. 最初と最後の頁 pp.730-733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TALE54877.2022.00131	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 石丸琴海, 妹尾美侑, 白井詩沙香, 福井哲夫	4. 巻 1W-03
2. 論文標題 日本語音声認識とGUIによるマルチモーダル数式入力方式の試作	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会第85回全国大会研究報告	6. 最初と最後の頁 pp.1-2
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 4H-05
2. 論文標題 数式を含む講義動画に対応した字幕表示システムの構築	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会第85回全国大会研究報告	6. 最初と最後の頁 pp.1-2
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 長谷川陽和, 原知鈴, 福井哲夫	4. 巻 -
2. 論文標題 数学デジタル文書読み上げツールの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 FIT2021 第20回情報科学技術フォーラム予稿集	6. 最初と最後の頁 E-020, pp. 1-2
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 福井哲夫, 長谷川陽和, 原知鈴	4. 巻 2208
2. 論文標題 解説動画作成のための数学文書読み上げテキストへの変換	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録 RIMS 共同研究(公開型)「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 pp. 1-9
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 pp. 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 -

1. 著者名 白井詩沙香, 中原敬広, 福井哲夫	4. 巻 7F-02
2. 論文標題 数学eラーニングのための数式曖昧入力変換方式によるリッチテキストエディタの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会第83回全国大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
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 -

1. 著者名 福井哲夫, 白井詩沙香	4. 巻 2273
2. 論文標題 音声認識による数式入力UIの開発と課題	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 数理解析研究所講録「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 22-29
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, Takahiro NAKAHARA, Tetsuo FUKUI	4. 巻 31
2. 論文標題 MathTOUCH Editor: Rich-text Editor for Math E-learning Using an Intelligent Math Input Interface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 775-785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.31.775	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Tetsuo FUKUI, Shizuka SHIRAI
2. 発表標題 Development of Online Support Tools for Creating STEM Educational Materials
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 猪岡柚葉, 宇都宮若菜, 國仙紗也香, 福井哲夫
2. 発表標題 グラフ作成ツールによる高校数学向け学習教材
3. 学会等名 数理解析研究所RIMS 共同研究(公開型)「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 2022年

1. 発表者名 石丸琴海, 妹尾美侑, 白井詩沙香, 福井哲夫
2. 発表標題 日本語音声認識とGUIによるマルチモーダル数式入力方式の試作
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白井詩沙香, 中原敬広, 福井哲夫
2. 発表標題 数式を含む講義動画に対応した字幕表示システムの構築
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川陽和, 原知鈴, 福井哲夫
2. 発表標題 数学デジタル文書読み上げツールの開発
3. 学会等名 FIT2021 第20回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井哲夫, 長谷川陽和, 原知鈴
2. 発表標題 解説動画作成のための数学文書読み上げテキストへの変換
3. 学会等名 数理解析研究所RIMS 共同研究(公開型)「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 2021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

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曖昧入力変換方式によるリッチテキストエディタの開発
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井哲夫, 白井詩沙香
2. 発表標題 音声認識による数式入力UIの開発と課題
3. 学会等名 数理解析研究所RIMS 共同研究(公開型)「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 2023年

1. 発表者名 Shizuka SHIRAI, Takahiro NAKAHARA, Tetsuo FUKUI
2. 発表標題 数式を含む文書作成のためのリッチテキストエディタプラグインの開発
3. 学会等名 日本ムードルムート2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

MathTOUCHで数式をもっと自由に
<https://mathtouch.org>

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を応用した開発ツールを含む数学学習支援環境を試用できる公開用サーバのURLである。

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
---------	---------