

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01117

研究課題名（和文）多次元構造解析の確立による手書き数式認識の高次化

研究課題名（英文）Enhancement of handwritten mathematical expression recognition through establishment of multi-dimensional structural analysis

研究代表者

中川 正樹（Nakagawa, Masaki）

東京農工大学・学内共同利用施設等・特任教授

研究者番号：10126295

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 29,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自然言語と違って文脈処理が効きにくく、シンボルの分割と識別、位置関係の識別のすべてに曖昧性が起こる手書き数式認識のために、深層ニューラルネットワークで非明示的に幾何文脈を学習し、それを補うために言語モデルで明示的に言語文脈を評価する方法が優れていることを明らかにした。具体的には、複数の部分構造に「注意」を払うエンコーダ・デコーダモデルの構成、ラベル付き学習パターンの不足を補う半教師付き学習、言語文脈を評価関数に重み付きで加えることで、認識性能が大幅に向上した。さらに、学習パターン数を人工的に拡大するために、手書き数式パターンの自動生成手法も考案し、国際コンテストに提供した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手書き数式認識は、構造解析のパターン認識の典型的問題であり、本研究は、その進展を阻んできたノイズを含む多次元構造解析の曖昧性解消に資する。また、本研究により、手書きによる数式解答の答合せや、数式解答の自動採点・採点支援の土台ができた。自動採点は、受験者が自分の答案に対する採点を確認し、誤採点があれば照会できる仕組みを前提に、機械が手書き認識と採点を行って受験者に返す。採点結果を即時に受験者に返して復習を促すことができ、採点の労力を軽減できる。採点支援には、解答を事前に機械採点やクラスタリングし、また、採点の注意点を明確にすることで、採点者による誤った採点やばらつきを防止できる。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to recognize handwritten mathematical expressions, where ambiguities occur in symbol segmentation, symbol identification, and positional relationship identification. Context processing is difficult unlike natural languages due to the lack of redundancy. This research clarified that it is superior to learn geometric context implicitly by Deep Neural Networks and evaluate language context explicitly by a language model. Specifically, an encoder/decoder model that pays attention to multiple substructures, semi-supervised learning that compensates for the lack of labeled learning patterns, and weighting the evaluation function with language context improved recognition performance. Furthermore, a method was proposed to artificially generate learning patterns, which were available for an international recognition contest.

研究分野：人間情報学

キーワード：手書き数式認識 構造解析 文脈処理 深層ニューラルネットワーク アテンション

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

手書き数式認識は、1960年代から研究が始められたにも関わらず、完成度の高い確率的構文解析に基づく手法や最新の Deep Neural Network (DNN) をもってしても、手書きの英語や日本語に比較して非常に低い認識率に留まっていた。手書き数式認識は、処理を一体化して行うことも可能であるが、シンボル分割、シンボル識別、位置関係識別、構造解析の機能からなる。正解を候補に残すために、それぞれの段階では複数の候補を残し、最終の構造解析の段階で、最適な解釈を選択する。この際、分割の確からしさ、シンボル認識の確からしさ、位置関係の確からしさ、構造の確からしさに加えて、数式としての文法、そして、数式としての確からしさを考慮しなければならない。自然言語と違って文脈処理が効きにくく、数式が長くなればなるほど誤認識を波及させる課題が解決されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、シンボル分割、シンボル識別、位置関係識別のすべてに曖昧性を起こる2次元構造の手書き数式を対象に、その構造解析、特にその中核の文脈処理のレベルを飛躍的に高めることを目標にしてきた。手書き変動が字形だけでなく位置変動にも生じるために、上記のすべてに影響を与える課題である。ただし、手書き数式認識に特化した手法ではなく、手書き数式認識を包含して、より包括的な構造解析的パターン認識の進展を阻んできたノイズを含む多次元構造あるいはグラフ構造の曖昧性解消に資することを目指してきた。

## 3. 研究の方法

手書き数式パターンデータを集積し、複数の問題解決手法を提案し、それらの機械学習と評価・改善を繰り返して、上記の成果を得た。内外の学会発表においては有益なアドバイスを得ることができ、また、他の発表や論文からも問題解決のアイデアを得ることができた。

研究は年度ごとに次の段階を踏んで展開した。

### 3.1 2019年度

- (1) オンライン手書き数式パターン収集ツールを作成した。タブレットに問題を表示し、受験者が解答を筆記し、そのオンライン手書きパターンをサーバに集積する。
- (2) 正答と誤答を含む手書き数式解答の疑似作成・公開した。数学10問の問題に対する正答と誤答を含む手書き数式解答200人分(Dset\_Mix)を一部疑似的に作成して公開した(正答と誤答を用意し、本物の手書きと人工的に合成したものを合わせて各問200解答用意した)。これはオンライン入力形式であり、時系列情報を落とすことで、オフライン方式の手書き数式の認識手法やクラスタリング手法に評価できる。
- (3) 手書き数式認識とクラスタリングのテストベッドを作成した。オンライン入力の手書き数式パターンに対して、BLSTMとCTCを利用した方式を作成した。そして、半教師付き学習によるend-to-end手書き数式認識のテストベッドを作成した。これは、今後の手法研究の土台になる。また、オンライン入力方式あるいはオフライン入力方式の手書き数式に対して深層ニューラルネットワークにより学習した特徴などを用いたクラスタリング手法を提案した。そして、研究申請で提案した方式を用いて、手書き数式認識

率の向上に取り組んだ。

### 3.2 2020 年度

- (1) 国立教育政策研究所の安野史子教授との連携で、高校生から数学解答を収集した。
- (2) 計画にはなかったが大学新入試の試行として行われた模擬試験の解答 5 万人 × 2 年分を入手した。
- (3) 数式を表現する Context Free Grammar の最適化を試みた。
- (4) CTC-BLSTM を利用した Bidirectional Context による数式認識システムを作成した。
- (5) 半教師付き学習による end-to-end 手書き数式認識のテストベッドを作成した。
- (6) オンライン入力方式あるいはオフライン入力方式の手書き数式に対して、深層ニューラルネットワークにより学習した特徴などを用いたクラスタリング手法を提案した。
- (7) 高次元特徴を効果的に表現するための距離依存表現を提案した。
- (8) オンライン入力方式の手書き数式に対して BLSTM によるシンボル分割と認識手法を改善した。
- (9) 半教師付き学習と CTC に補助学習を導入し、オフラインの手書き数式認識率を向上させた。
- (10) 教師データとして一次元の LaTeX ではなく 2 次元の木構造を用いる手書き数式認識学習方式の利点を明確化した

### 3.3 2021 年度

- (1) ラベル付き学習パターンの不足を補う半教師付き学習、言語文脈を評価関数に重み付きで加えることで、認識性能を大幅に向上させることができた。
- (2) 学習パターン数を人工的に拡大するために、手書き数式パターンの自動生成手法も考案した。
- (3) BLSTM と木構造表現によりシンボルの関係認識と言語モデルを改善した。
- (4) 複数の箇所に Attention を払う Multi-attention の方式として TransformerXL 言語モデルを実現し、BLSTM や n-gram に対する TransformerXL 言語モデルの効果を評価した。
- (5) 数式の 2 次元空間構造を学習するためのグラフモデルと MRF モデルを比較検討した。
- (6) オンライン方式とオフライン方式の手書き数式認識のための Transformer デコーダを実装し評価した。
- (7) オンライン学習管理システム (LMS) として代表的な Moodle に手書き入力を可能にする Plug-in を設計・開発した。

### 3.4 2022 年度

- (1) 研究は想定以上に進捗したことから、次の段階である自動採点・採点支援システムの研究に移行するために、オンライン入力方式の認識エンジンとオフライン認識方式の認識エンジンをそれぞれ独立したモジュールにまとめた。
- (2) これを組み込んだ手書き数式解答の自動採点・採点支援システムのプロトタイプを作成した。
- (3) 学習パターンの不足に認識方式として対応するために、Mixed Augmentations と Scheduled Pseudo-Label Loss を組み合わせた方式を考案し、手書き文字列で効果を実証した。

- ( 4 ) 2023年8月の文書解析と認識の国際会議( ICDAR 2023 )で開催される手書き数式認識コンテストCROHME 2023の主催側に参加し, 自動生成した数式パターンを学習パターンとして提供した . 成果は 本学に著作物に登録した: オンライン手書き数式パタンCROHME 2023 サブセット+ プライベートセット ( CROHME 2023 subset + private set by Nakagawa Lab. TUAT )

#### 4 . 研究成果

本研究において, 深層ニューラルネットワークで非明示的に幾何文脈などを学習し, それを補うために明示的に言語文脈を評価する方法が優れていることを明らかにした . 具体的には, 複数の部分構造に「注意」を払うエンコーダ・デコーダモデルの構成, ラベル付き学習パターンの不足を補う半教師付き学習, 言語文脈を評価関数に重み付きで加えることで, 認識性能が大幅に向上した . さらに, 学習パターン数を人工的に拡大するために, 手書き数式パターンの自動生成手法も考案した . 2023年8月の文書解析と認識の国際会議( ICDAR 2023 )で開催される手書き数式認識コンテストCROHME 2023の主催側に参加し, 自動生成した数式パターンを学習パターンとして提供した .

本研究期間に, Scopusに登録された国際学術論文誌に6件(うちQ1が5件)の論文と, この分野のトップカンフェレンスに6件, その他の国際ワークショップに8件の発表をすることができた . すべて査読付きである .

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>[1]Huy Quang Ung, Cuong Tuan Nguyen, Khanh Minh Phan, Vu Tran Minh Khuong and Masaki Nakagawa | 4. 巻<br>Vol. 146,     |
| 2. 論文標題<br>Clustering online handwritten mathematical expressions                                       | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Pattern Recognition Letters,  | 6. 最初と最後の頁<br>267-275 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.patrec.2021.03.027   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>[2]Thanh-Nghia Truong, Cuong Tuan Nguyen, and Masaki Nakagawa                                 | 4. 巻<br>Vol. 153      |
| 2. 論文標題<br>Syntactic data generation for handwritten mathematical expression recognition                | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>Pattern Recognition Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>83-91   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.patrec.2021.12.002   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>Vu tran minh KHUONG,Khanh Minh PHAN, Huy Quang UNG, Cuong Tuan NGUYEN, Masaki NAKAGAWA        | 4. 巻<br>E104-D NO.2   |
| 2. 論文標題<br>Clustering of Handwritten Mathematical Expressions for Computer-Assisted Marking             | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>IEICE TRANS. INF.& SYST.  | 6. 最初と最後の頁<br>275-284 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1587/TRANSINF.2020EDP7087   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>Huy Quang Ung, Cuong Tuan Nguyen, Khanh Minh Phan, Vu Tran Minh Khuong, Masaki Nakagawa       | 4. 巻<br>164           |
| 2. 論文標題<br>Clustering online handwritten mathematical expressions                                       | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Pattern Recognition Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>267-275 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.patrec.2021.03.027   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Anh Duc Le, Bipin Indurkha, Masaki Nakagawa  | 4. 巻<br>Vol. 128,     |
| 2. 論文標題<br>Pattern Generation Strategies for Improving Recognition of Handwritten Mathematical Expressions | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Pattern Recognition Letters,   | 6. 最初と最後の頁<br>255-262 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.patrec.2019.09.002   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Cuong Tuan Nguyen, Vu Tran Minh Khuong, Hung Tuan Nguyen, Masaki Nakagawa  | 4. 巻<br>Vol. 131      |
| 2. 論文標題<br>A CNN based Localization and Classification Features for Clustering Offline Handwritten Mathematical Expression | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Pattern Recognition Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>113-120 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.patrec.2019.12.015   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Huy Quang Ung, Cuong Tuan Nguyen, Hung Tuan Nguyen and Masaki Nakagawa  |
| 2. 発表標題<br>GSSF: A Generative Sequence Similarity Function based on a Seq2Seq model for clustering online handwritten mathematical answers |
| 3. 学会等名<br>16th International Conference on Document Analysis and Recognition, Lausanne, Switzerland (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nam Tuan Ly, Hung Tuan Nguyen and Masaki Nakagawa  |
| 2. 発表標題<br>2D Self-Attention Convolutional Recurrent Network for Offline Handwritten Text Recognition       |
| 3. 学会等名<br>16th International Conference on Document Analysis and Recognition, Lausanne, Switzerland (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Cuong Tuan Nguyen, Thanh-Nghia Truong, Hung Tuan Nguyen and Masaki Nakagawa                      |
| 2. 発表標題<br>Global Context for Improving Recognition of Online Handwritten Mathematical Expressions          |
| 3. 学会等名<br>16th International Conference on Document Analysis and Recognition, Lausanne, Switzerland (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Huy Quang Ung, Cuong Tuan Nguyen, Hung Tuan Nguyen, Thanh-Nghia Truong and Masaki Nakagawa |
| 2. 発表標題<br>A Transformer-based Math Language Model for Handwritten Math Expression Recognition        |
| 3. 学会等名<br>1st Workshop on Document Images and Language (DIL 2021), Lausanne, Switzerland (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Thanh-Nghia Truong, Huy Quang Ung, Hung Tuan Nguyen, Cuong Tuan Nguyen and Masaki Nakagawa |
| 2. 発表標題<br>Relation-based Representation for Handwritten Mathematical Expression Recognition          |
| 3. 学会等名<br>14th Workshop on Graphics Recognition (GREC 2021), Lausanne, Switzerland (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Cuong Tuan Nguyen, Hung Tuan Nguyen, Kei Morizumi and Masaki Nakagawa                            |
| 2. 発表標題<br>Temporal Classification Constraint for Improving Handwritten Mathematical Expression Recognition |
| 3. 学会等名<br>3rd Workshop on Machine Learning (WML 2021), Lausanne, Switzerland (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nam Tuan Ly, Trung Tan Ngo and Masaki Nakagawa   |
| 2. 発表標題<br>A Self-Attention based Model for Offline Handwritten Text Recognition                        |
| 3. 学会等名<br>6th Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR 2021), Jeju, South Korea, (2021.11) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Thanh-Nghia Truong, Cuong Tuan Nguyen, Hung Tuan Nguyen, and Masaki Nakagawa                 |
| 2. 発表標題<br>Learning Symbol Relation Tree for Online Handwritten Mathematical Expression Recognition     |
| 3. 学会等名<br>6th Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR 2021), Jeju, South Korea, (2021.11) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>矢嶋遼, 安野史子, 中川正樹, 清水郁子   |
| 2. 発表標題<br>オンラインLMSのための手書き入力CBTの設計と実装                                    |
| 3. 学会等名<br>EICE technical report, ET2021-45(2022-01), pp.13-18 (2022.1). |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Huy Quang Ung, Hung Tuan Nguyen, Cuong Tuan Nguyen, Tsunenori Ishioka and Masaki Nakagawa   |
| 2. 発表標題<br>Visual Constraints for Generating Multi-Domain Offline Handwritten Mathematical Expressions |
| 3. 学会等名<br>IEICE Technical Report, PRMU2021-69 (2022-03), pp.54-59 (2022.3).                           |
| 4. 発表年<br>2022年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>北嶋完基, ゲン トゥアン クーン, 清水郁子, 中川正樹                                       |
| 2. 発表標題<br>オンライン手書き数式認識のための文脈自由文法における木構造解析                                     |
| 3. 学会等名<br>IEICE Technical Report, PRMU2021-76 (2022-03), pp.103-108 (2022.3). |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Cuong Tuan Nguyen, Thanh-Nghia Truong, Huy Quang Ung and Masaki Nakagawa                       |
| 2. 発表標題<br>Online Handwritten Mathematical Symbol Segmentation and Recognition with Bidirectional Context |
| 3. 学会等名<br>ICFHR (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kokoro Kobayashi, Tsuyoshi Oguni, and Masaki Nakagawa  |
| 2. 発表標題<br>Evaluation of Secure Pad Resilient to Shoulder Hacking |
| 3. 学会等名<br>HCII 2020 (国際学会)                                       |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Thanh-Nghia Truong, Cuong Tuan Nguyen, Khanh Minh Phan, and Masaki Nakagawa                                     |
| 2. 発表標題<br>Improvement of End-to-End Offline Handwritten Mathematical Expression Recognition by Weakly Supervised Learning |
| 3. 学会等名<br>ICFHR (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Minh Khanh Phan, Tran Minh Khuong Vu, Quang Huy Ung, Masaki Nakagawa                               |
| 2. 発表標題<br>Generating Synthetic Handwritten Mathematical Expressions from a LaTeX Sequence or a MathML Script |
| 3. 学会等名<br>Proc. of ICDAR (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Vu Tran Minh Khuong, Minh Khanh Phan and Masaki Nakagawa  |
| 2. 発表標題<br>Interactive Interfaces for Recognizing Online Handwritten Mathematical Expressions and Correcting Misrecognitions |
| 3. 学会等名<br>Proc. 2nd International Workshop on Open Services and Tools for Document Analysis (ICDAR-OST) (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Quang Huy Ung, Minh Khanh Phan and Masaki Nakagawa   |
| 2. 発表標題<br>Strategy and Tools for Collecting and Annotating Handwritten Descriptive Answers for Developing Automatic and Semi-Automatic Marking - an Initial Effort to Math |
| 3. 学会等名<br>Proc. 2nd International Workshop on Open Services and Tools for Document Analysis (ICDAR-OST) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                            | 備考 |
|-----------|---|--|----|
| 研究<br>分担者 | NGUYENTUAN CUONG<br><br>(NGUYEN TUAN CUONG)<br><br>(10814246) | 東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教<br><br><br><br>(12605) |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|