

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04141

研究課題名（和文）文字列の辞書式順序の組合せ論とその応用

研究課題名（英文）Combinatorics of string lexicographic orders and their applications

研究代表者

坂内 英夫（Bannai, Hideo）

東京医科歯科大学・M&amp;Dデータ科学センター・教授

研究者番号：20323644

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：文字列の辞書式順序に関連する様々な課題について幅広く取組み、Lyndon 語、Lyndon 木、全単射 Burrows-Wheeler 変換、Thue-Morse 語に対する辞書式圧縮の圧縮性指標などに関する諸性質を解析し、それらの諸性質を応用した効率的なアルゴリズムや索引構造・圧縮表現などのデータ構造の提案や困難性の証明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として得られた辞書式順序に関連する諸性質は文字列の組み合わせ論に関する基礎的なものである。これらの諸性質は本研究で提案したアルゴリズムだけではなく、今後出現する様々な種類の文字列データ・問題に対する効率的な処理アルゴリズムの開発に広く寄与する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We worked on various problems related to lexicographic orderings of strings, such as Lyndon words, Lyndon trees, bijective Burrows-Wheeler Transform, repetitiveness measures of Thue-Morse words based on dictionary compression. Furthermore, we proposed efficient algorithms and data structures that exploit these characteristics and also showed hardness of some problems.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：辞書式順序 Lyndon 語 BBWT

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、インターネット、計算機器、様々なセンサや計測機器の発達により、多岐にわたる分野で膨大な量の文字列データが生み出されており、利用可能となっている。このような大規模な文字列データを効率的に処理・解析する技術は多様な応用があるため広く求められており、極めて重要である。多様な文字列データに対して有効かつ効率的な処理・解析アルゴリズムを開発するには、文字列の様々な特徴に関する理論的・組合せ的性質の深い理解が必要不可欠である。辞書式順序は文字列処理アルゴリズム分野の研究で重要な役割を担って来たが、益々増えるデータとその解析に必要となる多様な処理に対応するためにはまだ解決すべき課題が多く、十分とは言えない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、特に文字列の辞書式順序に着目し、その組合せ的性質に関する知見を拡大・深化させると共に、それを利用して様々な文字列処理の問題について効率的なアルゴリズム・データ構造を開発することである。

### 3. 研究の方法

本研究では文字列の辞書式順序に関連する様々な問題について検討し、その組合せ的性質の理解とそれらを利用した効率的なアルゴリズムの設計に取り組んだ。

### 4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 辞書式順序によって定義される Lyndon 語と Lyndon 木に基づいた Lyndon SLP という文法圧縮表現および圧縮索引構造を提案した。この索引は長さ  $N$  のテキスト文字列に対して  $O(N \log N)$  期待時間で構築でき、長さ  $m$  のパターン文字列のテキスト文字列中の全ての出現を  $O(m + \log m \log N + \text{occ} \log g)$  時間で出力することができる。ここで、 $\text{occ}$  はパターンの出現数、 $g$  は Lyndon SLP のサイズである。
- 2) 長さ  $N$  の文字列に含まれる原始平方の出現の最大数について、Lyndon 語と Lyndon 木に基づいた議論により  $N \log N$  以下であることを示し、20 年以上前に [Fraenkel & Simpson, 1999] によって示された上界  $1.441 N \log N$  を初めてかつ大幅に改善することに成功した。また、三つの平方が同一位置で始まる場合に、それらの長さに関する制約を捉えた「三平方の補題」について、Lyndon 語に基づく別の証明を与え、同一位置で始まらない場合にも拡張できることを示した。
- 3) Thue-Morse 語という文字列のクラスに対し、辞書式圧縮に関連する幾つかの圧縮指標の値を詳細に解析した。具体的には、 $n$  番目 Thue-Morse 語  $t(n)$  の LZ77 分解のサイズは  $2n$ 、部分文字列複雑性に基づく指標は  $10/(3+2^{4-n})$ 、最小文字列アトラクタのサイズは  $4$  であることを示した。これにより、 $t(n)$  の最小文字列アトラクタサイズは  $n$  であるという [Mantaci et al. 2019] の予想を否定的に解決した。この成果は国際会議 SPIRE 2020 にて発表し、ベストペーパー賞を受賞した。また、辞書式圧縮において最も表現力の高い双方向マクロスキームのサイズについて精密な解析を行い、 $n$  番目の Thue-Morse 語  $t(n)$  の最小双方向マクロスキームのサイズ  $b$  は、 $n \geq 2$  に対して  $n+2$  であることを示した。この  $b$  との結果から、最小アトラクタサイズと最小双方向マクロスキームサイズが分離されること、すなわち、最小アトラクタサイズは辞書式圧縮の下界であるが、下限ではなく、辞書式圧縮の表現力では最小アトラクタサイズまでは圧縮できない場合があることを初めて示した。
- 4) 任意の文字列に対して全単射 Burrows-Wheeler 変換 (Bijective BWT) を計算する初の線形時間アルゴリズムを提案した。
- 5) 文法圧縮アルゴリズム GCIS に基づく、線形時間で構築可能な圧縮索引構造を提案した。GCIS が局所性を持つこと、すなわち文字列の任意の出現において文法上の構造が同じである「コア」が存在することを示し、本索引を用いて長さ  $m$  のパターン文字列の  $\text{occ}$  個のすべての出現を  $O(m \log S + k \log S \log n + \text{occ})$  時間で求めることができる。ここで、 $n$  は

テキスト文字列の長さ、 $S$  は文法のサイズ、 $k$  は文法の生成規則中のパターンのコアの出現回数を表す。

- 6) 文字列に部分列として含まれる最長の Lyndon 語を求める  $O(n^3)$  時間・ $O(n)$  領域のアルゴリズムを提案した。また、文字列の各接頭辞に対して順にこれを計算するオンラインな設定において、 $O(n^3)$  時間・領域のアルゴリズムを提案した。ここで、 $\sigma$  はアルファベットサイズである。また、更に問題を拡張し、二つの文字列に共通して部分列として含まれる最長の Lyndon 語を計算する  $O(n^4)$  時間・ $O(n^3)$  領域のアルゴリズムを示した。これらの成果は国際会議 33rd International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWCCA 2022) にて発表し、ベストペーパー賞を受賞した。その後更にオンライン設定のアルゴリズムを  $O(n^3)$  時間・領域、最長共通 Lyndon 部分列問題のアルゴリズムを  $O(n^2)$  領域に改善した。
- 7) 辞書式圧縮に関連する文字列の圧縮性指標のうち、計算が NP-困難であることが知られている最小文字列アトラクタのサイズ  $a$ 、最小双方向マクロスキームのサイズ  $b$ 、及び最小の直線的プログラム (Straight Line Program) のサイズ  $g$  それぞれについて、MAX-SAT 問題に帰着し、MAX-SAT ソルバを利用することで、ある程度大きな文字列についても現実的な時間で厳密な値が計算できることを示し、これらの値を計算する初めての非自明な実装を提案した。また、この実装を利用することで  $a$  の圧縮感度の下界を 2 から 2.5 に改善する文字列のクラスを発見した。
- 8) 入力文字列長  $n$ 、アルファベットサイズ  $\sigma$  とする時、入力の表現長  $n \log \sigma$  ビットに対して計算機のワード長  $\log n$  ビットを定数時間で処理できることを利用し、文字列の各位置から始まる最長 Lyndon 語の長さ、すなわち文字列の Lyndon 木・配列の表現を  $O(n \log \sigma / \log n)$  の劣線形時間で計算できるアルゴリズムを示した。
- 9) 最小 LZ-End 圧縮問題、最小連長圧縮 SLP (RLSP) 問題および最小コラージュシステム問題の 3 つの辞書式圧縮の問題が NP 完全であることを示した。また、LZ-End と RLSP については MAX-SAT による定式化を示し、高速な MAX-SAT ソルバを利用することである程度の長さの文字列について現実的な時間で計算できることを示した。
- 10) Prefix-free parsing を FM-index に組み入れる手法を提案した。Prefix-free parsing で文字列をフレーズに分割し、その性質を利用することでフレーズ単位の検索を行うことが可能となり、従来法と比べてデータ構造のサイズをさほど大きくすることなく、特に長い検索クエリを高速化できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計39件（うち査読付論文 39件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Aaron Hong, Marco Oliva, Dominik Koppl, Hideo Bannai, Christina Boucher, Travis Gagie	4. 巻 -
2. 論文標題 Acceleration of FM-Index Queries Through Prefix-Free Parsing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Workshop on Algorithms in Bioinformatics (WABI 2023)	6. 最初と最後の頁 13:1-13:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.WABI.2023.13	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 該当する
1. 著者名 Okabe Kouta, Mieno Takuya, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo	4. 巻 -
2. 論文標題 Linear-Time Computation of Generalized Minimal Absent Words for Multiple Strings	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 30th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2023)	6. 最初と最後の頁 331 ~ 344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43980-3_27	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 Hideo Bannai, Jonas Ellert	4. 巻 -
2. 論文標題 Lyndon Arrays in Sublinear Time	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2023)	6. 最初と最後の頁 14:1-14:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ESA.2023.14	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 該当する
1. 著者名 Hideo Bannai, Mitsuru Funakoshi, Kazuhiro Kurita, Yuto Nakashima, Kazuhisa Seto, Takeaki Uno	4. 巻 -
2. 論文標題 Optimal LZ-End Parsing Is Hard	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 34th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2023)	6. 最初と最後の頁 3:1-3:11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.CPM.2023.3	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 Fujishige Yuta, Tsujimaru Yuki, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 973
2. 論文標題 Linear-time computation of DAWGs, symmetric indexing structures, and MAWs for integer alphabets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 114093 ~ 114093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2023.114093	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 Bannai Hideo, I Tomohiro, Koppl Dominik	4. 巻 182
2. 論文標題 Longest bordered and periodic subsequences	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Information Processing Letters	6. 最初と最後の頁 106398 ~ 106398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ipl.2023.106398	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 Bannai Hideo, I. Tomohiro, Kociumaka Tomasz, Koppl Dominik, Puglisi Simon J.	4. 巻 86
2. 論文標題 Computing Longest Lyndon Subsequences and Longest Common Lyndon Subsequences	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Algorithmica	6. 最初と最後の頁 735 ~ 756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00453-023-01125-z	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 該当する

1. 著者名 Hong Aaron, Oliva Marco, Koppl Dominik, Bannai Hideo, Boucher Christina, Gagie Travis	4. 巻 19
2. 論文標題 Pfp-fm: an accelerated FM-index	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Algorithms for Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13015-024-00260-8	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 該当する

1. 著者名 Kawamoto Akiyoshi, I Tomohiro, Koepl Dominik, Bannai Hideo	4. 巻 -
2. 論文標題 On the Hardness of Smallest RLSPs and Collage Systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the Data Compression Conference 2024 (DCC 2024)	6. 最初と最後の頁 243-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DCC58796.2024.00032	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 Leonard Laurentius, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Mieno Takuya	4. 巻 LNCS 13617
2. 論文標題 Online Algorithms for Finding Distinct Substrings with Length and Multiple Prefix and Suffix Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2022)	6. 最初と最後の頁 24 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-20643-6_3	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 Bannai Hideo, I Tomohiro, Kociumaka Tomasz, Koepl Dominik, Puglisi Simon J.	4. 巻 LNCS 13270
2. 論文標題 Computing Longest (Common) Lyndon Subsequences	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWCCA 2022)	6. 最初と最後の頁 128 ~ 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-06678-8_10	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 Bannai, Hideo, Goto, Keisuke, Ishihata, Masakazu, Kanda, Shunsuke, Koepl, Dominik, Nishimoto, Takaaki	4. 巻 LIPIcs 244
2. 論文標題 Computing NP-Hard Repetitiveness Measures via MAX-SAT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 30th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2022)	6. 最初と最後の頁 12:1 ~ 12:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ESA.2022.12	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 Nakashima Katsuhito, Fujisato Noriki, Hendrian Diptarama, Nakashima Yuto, Yoshinaka Ryo, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Shinohara Ayumi, Takeda Masayuki	4. 巻 933
2. 論文標題 Parameterized DAWGs: Efficient constructions and bidirectional pattern searches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 21 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2022.09.008	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 Akagi Tooru, Kuhara Yuki, Mieno Takuya, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 927
2. 論文標題 Combinatorics of minimal absent words for a sliding window	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 109 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2022.06.002	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 Inoue Hiroe, Matsuoka Yoshiaki, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 66
2. 論文標題 Factorizing Strings into Repetitions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theory of Computing Systems	6. 最初と最後の頁 484 ~ 501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00224-022-10070-3	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 Russo Luis M.S., Costa Diogo, Henriques Rui, Bannai Hideo, Francisco Alexandre P.	4. 巻 289
2. 論文標題 Order-preserving pattern matching indeterminate strings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 104924 ~ 104924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2022.104924	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 Yonemoto Yuuki, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo	4. 巻 LNCS 13878
2. 論文標題 Space-Efficient STR-IC-LCS Computation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 48th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computere Science (SOFSEM 2023)	6. 最初と最後の頁 372 ~ 384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-23101-8_25	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 Tsuruta Kazuya, Koepl Dominik, Kanda Shunsuke, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 -
2. 論文標題 c-trie++: A dynamic trie tailored for fast prefix searches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 104794 ~ 104794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2021.104794	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 Fujisato Noriki, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 LNCS 12701
2. 論文標題 The Parameterized Suffix Tray	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Conference on Algorithms and Complexity	6. 最初と最後の頁 258 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-75242-2_18	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 Hideo Bannai, Juha Karkkainen, Dominik Koepl, Marcin Piatkowski	4. 巻 LIPIcs 191
2. 論文標題 Constructing the Bijective and the Extended Burrows-Wheeler Transform in Linear Time	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 32nd Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2021)	6. 最初と最後の頁 7:1-7:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.CPM.2021.7	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 該当する

1. 著者名 Bannai Hideo, Funakoshi Mitsuru, I Tomohiro, Koepl Dominik, Mieno Takuya, Nishimoto Takaaki	4. 巻 LNCS 12944
2. 論文標題 A Separation of $\gamma$ and b via Thue-Morse Words	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021)	6. 最初と最後の頁 167 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-86692-1_14	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 Fujita Kosuke, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 LNCS 12944
2. 論文標題 Longest Common Rollercoasters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021)	6. 最初と最後の頁 21 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-86692-1_3	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 Akagi Tooru, Koepl Dominik, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 LNCS 12944
2. 論文標題 Grammar Index by Induced Suffix Sorting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021)	6. 最初と最後の頁 85 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-86692-1_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 Sugahara Ryo, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 887
2. 論文標題 Efficiently computing runs on a trie	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 143 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2021.07.011	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 Mieno Takuya, Watanabe Kiichi, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 173
2. 論文標題 Palindromic trees for a sliding window and its applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information Processing Letters	6. 最初と最後の頁 106174 ~ 106174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ipl.2021.106174	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 Mieno Takuya, Fujishige Yuta, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo, Takeda Masayuki	4. 巻 84
2. 論文標題 Computing Minimal Unique Substrings for a Sliding Window	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Algorithmica	6. 最初と最後の頁 670 ~ 693
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00453-021-00864-1	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 Isamu Furuya, Takuya Takagi, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Takuya Kida	4. 巻 13(4)
2. 論文標題 Practical Grammar Compression Based on Maximal Repeats	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Algorithms	6. 最初と最後の頁 103:1-103:18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/a13040103	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 Kiichi Watanabe, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 64
2. 論文標題 Fast Algorithms for the Shortest Unique Palindromic Substring Problem on Run-Length Encoded Strings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theory of Computing Systems	6. 最初と最後の頁 1273-1291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00224-020-09980-x	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 Katsuhito Nakashima, Moriki Fujisato, Diptarama Hendrian, Yuto Nakashima, Ryo Yoshinaka, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda	4. 巻 LIPIcs 161
2. 論文標題 DAWGs for Parameterized Matching: Online Construction and Related Indexing Structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2020)	6. 最初と最後の頁 26:1-26:14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.CPM.2020.26	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 Mitsuru Funakoshi, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda, Ayumi Shinohara	4. 巻 LIPIcs 161
2. 論文標題 Detecting k-(Sub-)Cadences and Equidistant Subsequence Occurrences	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2020)	6. 最初と最後の頁 12:1-12:11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.CPM.2020.12	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 Kazuya Tsuruta, Dominik Koepl, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 13(2)
2. 論文標題 Grammar-compressed Self-index with Lyndon Words	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM)	6. 最初と最後の頁 84-92
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 Hideo Bannai, Travis Gagie, Gary Hoppenworth, Simon J. Puglisi, Luis M. S. Russo	4. 巻 13(9)
2. 論文標題 More Time-Space Tradeoffs for Finding a Shortest Unique Substring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Algorithms	6. 最初と最後の頁 234:1-234:9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/a13090234	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 該当する

1. 著者名 Hideo Bannai, Takuya Mieno, Yuto Nakashima	4. 巻 LNCS 12303
2. 論文標題 Lyndon Words, the Three Squares Lemma, and Primitive Squares	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020)	6. 最初と最後の頁 265-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59212-7_19	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 Kanaru Kutsukake, Takuya Matsumoto, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 LNCS 12303
2. 論文標題 On Repetitiveness Measures of Thue-Morse Words	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020)	6. 最初と最後の頁 213-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59212-7_15	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 Takafumi Inoue, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai	4. 巻 LNCS 12303
2. 論文標題 Longest Square Subsequence Problem Revisited	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020)	6. 最初と最後の頁 147-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59212-7_11	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 Akihiro Nishi, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 LNCS 12303
2. 論文標題 Towards Efficient Interactive Computation of Dynamic Time Warping Distance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020)	6. 最初と最後の頁 27-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59212-7_3	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 Takuya Mieno, Dominik Koepl, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 845
2. 論文標題 Space-efficient algorithms for computing minimal/shortest unique substrings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 230-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.09.017	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 Hideo Bannai, Momoko Hirayama, Danny Hucce, Shunsuke Inenaga, Artur Jez, Markus Lohrey, Carl Philipp Reh	4. 巻 67(1)
2. 論文標題 The Smallest Grammar Problem Revisited	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 317-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/tit.2020.3038147	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 Mitsuru Funakoshi, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda	4. 巻 859
2. 論文標題 Computing longest palindromic substring after single-character or block-wise edits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 116-133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2021.01.014	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21件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Aaron Hong, Marco Oliva, Dominik Koepl, Hideo Bannai, Christina Boucher, Travis Gagie
2. 発表標題 Acceleration of FM-Index Queries Through Prefix-Free Parsing
3. 学会等名 23rd International Workshop on Algorithms in Bioinformatics (WABI 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okabe Kouta, Mieno Takuya, Nakashima Yuto, Inenaga Shunsuke, Bannai Hideo
2. 発表標題 Linear-Time Computation of Generalized Minimal Absent Words for Multiple Strings
3. 学会等名 30th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideo Bannai, Jonas Ellert
2. 発表標題 Lyndon Arrays in Sublinear Time
3. 学会等名 31st Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideo Bannai, Mitsuru Funakoshi, Kazuhiro Kurita, Yuto Nakashima, Kazuhisa Seto, Takeaki Uno
2. 発表標題 Optimal LZ-End Parsing Is Hard
3. 学会等名 34th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kawamoto Akiyoshi, I Tomohiro, Koppl Dominik, Bannai Hideo
2. 発表標題 On the Hardness of Smallest RLSPs and Collage Systems
3. 学会等名 Data Compression Conference 2024 (DCC 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Leonard Laurentius、Inenaga Shunsuke、Bannai Hideo、Mieno Takuya
2. 発表標題 Online Algorithms for Finding Distinct Substrings with Length and Multiple Prefix and Suffix Conditions
3. 学会等名 29th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Bannai Hideo、I Tomohiro、Kociumaka Tomasz、Koepl Dominik、Puglisi Simon J.
2. 発表標題 Computing Longest (Common) Lyndon Subsequences
3. 学会等名 33rd International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWCCA 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Bannai, Hideo、Goto, Keisuke、Ishihata, Masakazu、Kanda, Shunsuke、Koepl, Dominik、Nishimoto, Takaaki
2. 発表標題 Computing NP-Hard Repetitiveness Measures via MAX-SAT
3. 学会等名 30th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yonemoto Yuuki、Nakashima Yuto、Inenaga Shunsuke、Bannai Hideo
2. 発表標題 Space-Efficient STR-IC-LCS Computation
3. 学会等名 48th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computere Science (SOFSEM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Fujisato Noriki、Nakashima Yuto、Inenaga Shunsuke、Bannai Hideo、Takeda Masayuki
2 . 発表標題 The Parameterized Suffix Tray
3 . 学会等名 12th International Conference on Algorithms and Complexity (CIAC 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hideo Bannai , Juha Karkkainen, Dominik Koepl, Marcin Piatkowski
2 . 発表標題 Constructing the Bijective and the Extended Burrows-Wheeler Transform in Linear Time
3 . 学会等名 32nd Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hideo Bannai
2 . 発表標題 Repetitions in Strings: A "Constant" Problem
3 . 学会等名 32nd Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Bannai Hideo、Funakoshi Mitsuru、I Tomohiro、Koepl Dominik、Mieno Takuya、Nishimoto Takaaki
2 . 発表標題 A Separation of $\gamma$ and b via Thue-Morse Words
3 . 学会等名 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Fujita Kosuke、Nakashima Yuto、Inenaga Shunsuke、Bannai Hideo、Takeda Masayuki
2 . 発表標題 Longest Common Rollercoasters
3 . 学会等名 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Akagi Tooru、Koepl Dominik、Nakashima Yuto、Inenaga Shunsuke、Bannai Hideo、Takeda Masayuki
2 . 発表標題 Grammar Index by Induced Suffix Sorting
3 . 学会等名 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Katsuhito Nakashima、Moriki Fujisato、Diptarama Hendrian、Yuto Nakashima、Ryo Yoshinaka、Shunsuke Inenaga、Hideo Bannai、Ayumi Shinohara、Masayuki Takeda
2 . 発表標題 DAWGs for Parameterized Matching: Online Construction and Related Indexing Structures
3 . 学会等名 31st Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Mitsuru Funakoshi、Yuto Nakashima、Shunsuke Inenaga、Hideo Bannai、Masayuki Takeda、Ayumi Shinohara
2 . 発表標題 Detecting k-(Sub-)Cadences and Equidistant Subsequence Occurrences
3 . 学会等名 31st Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Hideo Bannai, Takuya Mieno, Yuto Nakashima
2 . 発表標題 Lyndon Words, the Three Squares Lemma, and Primitive Squares
3 . 学会等名 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kanaru Kutsukake, Takuya Matsumoto, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda
2 . 発表標題 On Repetitiveness Measures of Thue-Morse Words
3 . 学会等名 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takafumi Inoue, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai
2 . 発表標題 Longest Square Subsequence Problem Revisited
3 . 学会等名 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Akihiro Nishi, Yuto Nakashima, Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Masayuki Takeda
2 . 発表標題 Towards Efficient Interactive Computation of Dynamic Time Warping Distance
3 . 学会等名 27th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

MAX-SATソルバを利用してNP困難な圧縮性指標を計算するソフトウェア  
<https://github.com/kg86/satcomp>

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
研究分担者	井 智弘 (I Tomohiro) (20773360)	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授  (17104)	
研究分担者	関 新之助 (Sekai Shinnosuke) (30624944)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授  (12612)	
研究分担者	稲永 俊介 (Inenaga Shunsuke) (60448404)	九州大学・システム情報科学研究所・准教授  (17102)	

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