

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12022

研究課題名(和文)大規模実世界時空間データストリーム処理のための超高速な検索・発見技術の研究

研究課題名(英文)Efficient search and discovery technology for processing massive data stream in the real world

研究代表者

有村 博紀(Arimura, Hiroki)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20222763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多様で膨大な実世界時空間ストリームデータに対する高速大規模処理の基盤技術として、複雑なパターンの検索・計数・発見技術に関して、アルゴリズムの高速性と、低メモリ性、適応性、文脈性、多重性に焦点を当て研究した。具体的には、次の研究項目を研究した：A1. ビット並列技法を用いた超高速実世界ストリーム検索技術(有村)。A2. 確率的近似検査法に基づく超高速実世界ストリーム計数技術(ジョーダン, 有村)。A3. 構造列挙手法に基づく超高速実世界ストリーム発見技術(有村・ジョーダン)。A4. 超高速ストリーム知識発見の理論的基盤(ツオイグマン, 有村)。B1. プロトタイプ構築と予備評価実験。

研究成果の概要(英文)：In this research, we study the algorithms and data structures for search, discovery, and analysis of complex combinatorial patterns as the base technology for massive stream data processing in the real world. Especially, we focus on the following key aspects of such algorithms: low-memory footprint, adaptivity, context-sensitivity, multiplicity. The followings are the research topics that we study: A1. Fast search algorithms based on bit-parallel techniques; A2. Ultra-fast counting technology based on stochastic testing; A3. pattern discovery using substructure enumeration; A4. Theory of knowledge discovery from massive high-speed streams; B1. Prototype implementation and preliminary evaluation.

研究分野：知能情報学

キーワード：ストリームデータ処理 情報検索 データマイニング 大規模知識処理 QBFソルバー 多重性 文脈性

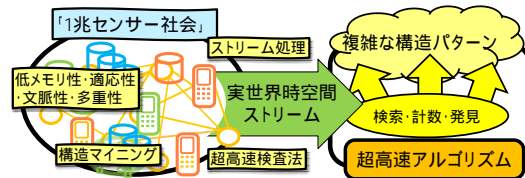
1. 研究開始当初の背景

21世紀初頭から現在にいたるネットワークとセンサー技術の急速な発展により、社会と、環境、人間集団におけるさまざまなセンサーやデバイスから、観測値・測定値や、テキスト、行動ログ、ゲノム情報などに関する多様で膨大なセンサーデータが生み出されている。例えば、近年登場したスマートホンや、スイカ(交通カード)、Twitterは膨大な量の時空間トラッキングを生み出す新しいタイプの「センサー」と言える。2020年には、毎年1兆個のセンサーが用いられる「1兆センサー社会」(trillion sensors universe)が到来すると予測されている。これらのセンサーデータは時間的に変化する、大量の非構造データであり、ビッグデータ(Big data)と呼ばれ、その利活用が緊急の課題となっている。

ビッグデータの中でも、とくにストリームデータ(stream data)は、従来の静的な大量データと異なり、膨大な量の非構造データが時間的に変化しながら到着する新しいタイプの大規模データであり、限られたメモリと計算量を用いて、有用な情報を取り出す効率よいストリームデータ処理技術の研究開発が重要な課題である。特に近年の大規模データ応用では、基本条件を組合せたパターンや正規表現の部分クラス等の複雑なパターンのストリーム検索・計数・発見への要求が高まっている。(例えば、2014年の欧州データマイニング国際会議(PKDD2014)では複雑パターンのマイニングに関する初の国際ワークショップが開催されている。)

先行研究として、2000年代前半にスタンフォード大学やIBM TW研等の米国の大学と民間企業の研究機関を中心にストリームデータ処理の研究が行われたが、これらの先行研究では、連続的データベース問合せやストリーム計数(データ値の異なり数や種類の頻度を数えること)や統計量計算等の単純なストリーム処理が中心で、現在のビッグデータ処理で必要な複雑な組合せパターンの検索や、計数、マイニングに関する研究は一部の例外を除き、ほとんど研究されていない。

とくに、上記の先行研究で、R. Motowani(スタンフォード大)らによりアイテム計数等の単純なタスクに対して計算量理論的に最適な超低メモリ型ストリーム処理などの画期的技法が開発されたが、近年のビッグデータ処理に必須である複雑なパターンへの活用は未解決の課題で、未だほとんど研究が進んでいないのが実情である。また文脈性や多重性の研究も必要である。その一方で 2000



年代半ば以降、申請者らを中心として、これらの複雑なパターンを扱うための「構造列挙法」や「ビット並列計算」等の新しい技法と成果が開発されており、その活用が期待されている。

2. 研究の目的

そこで、本研究課題では、これらの離散構造処理技術と大規模実世界ストリーム処理技術を融合し、最新のアルゴリズム理論に基づいて、実応用で求められている複雑な構造パターンのクラスに対する検索・計数・マイニング処理のタスクに対する超高速アルゴリズムの実現に挑戦し、その構成原理と可能性を明らかにする。また理論研究だけでなく、開発したアルゴリズムを実装して公開し、「1兆センサー社会」における高度情報処理の基盤技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究課題では、これら三つの関連分野において第一線で活躍する専門家が参集して複合的な研究チームを組織し、互いの緊密な連携を通じて、実世界時空間ストリームデータの超高速処理の基礎原理と実現方法を明らかにする。

研究組織と役割は次の通りである。

[研究チームの構成](メンバーと、役割、専門分野)

有村(申請代表): 知能情報学: 構造データマイニング技術と高速パターン検索技術

ツオイクマン(分担): 知能情報学・理論情報科学: オートマトン理論と計算学習理論

ジョーダン(連携): 理論情報科学: 計算量理論, 特に確率的検査法の設計と解析

[期間全体の研究項目](分担メンバーの連携)

A1. ビット並列技法を用いた超高速実世界ストリーム検索技術の研究開発(有村, ツオイクマン)

A2. 確率的検査法に基づく超高速実世界ストリーム計数技術の研究開発(ジョーダン, ツオイクマン)

A3. 構造列挙手法に基づく超高速実世界ストリーム発見技術の研究開発(有村, ジョーダン)

A4. 超高速ストリーム知識発見の理論的基盤の研究(ツオイクマン, 有村)

B1. プロトタイプシステム構築と予備

評価実験。(全員)

これらの研究メンバーは、各担当分野において十分な研究実績をもち、同時にシステム開発経験をもっており、準備状況は十分である。申請代表者の有村は、構造マイニング技術の第一人者であり、2002年に他研究グループと独立に発見した「最右拡張技法」(Asai, Arimura 他, SIAM DM 2002, 引用470件超, 2014年 Google Scholar 調べ)は、多くの構造マイニングアルゴリズムで用いられ、2000年代の同分野の進展に貢献した。また、情報検索アルゴリズムに関しても、大規模系列索引を用いたマイニング基盤技術(CPM2010, 引用350件超, 同上調べ)や、複雑なパターンのビット並列検索法などの研究を行っている。分担者のツオイクマンは、計算学習理論の第一人者であり、また高速確率計算の同分野への導入に関する先駆的な業績をもち、本研究では、多重ストリーム処理手法の開発と、ストリーム処理の長期的ふるまいの理論構築を担当する。連携研究者のジョーダンは計算量理論分野の気鋭の若手研究者であり、ツオイクマンと共に、超高速離散構造計算の基盤となる確率的検査法に関して、一階述語論理式で表現される離散構造の検査可能性のほぼ完全な分類を与えるなど[参考:ジョーダン 1]、本研究に重要な役割を果たす。

本研究の特色は、強力なメンバーを集集し、「1兆センサー社会」における実世界の問題解決に取り組み、理論的な性能保証をもつ実世界時空間ストリームの超高速処理技術の研究開発を目指す点である。また、理論研究だけでなく、研究成果の実装を公開する点も特徴である。

4. 研究成果

本研究では、3年間の研究期間において、多様で膨大な実世界時空間ストリームデータに対する高速大規模処理の基盤技術として、複雑なパターンに対する超高速な検索・計数・発見技術を中心に研究開発した。とくに、アルゴリズムの高速性と低メモリ性に加えて、実世界時空間ストリーム処理の特性に対応して、適応性・文脈性・多重性をもつアルゴリズムの開発に焦点を当てた。各テーマごとに、アルゴリズム開発と、理論解析、実装評価を並行して進め、最終年度にプロトタイプシステム構築と予備実験を行った。

研究期間全体では、先に挙げた5つの分担研究項目を設定し、研究を行った。具体的には次の研究成果を得た。

A1. ビット並列技法を用いた超高速実世界ストリーム検索技術の研究開発(有村, ツオイクマン)。

本研究項目では、現代的な計算ハードウェアの特性をいかして高速化を行うビッ

ト並列方式に基づく超高速実世界ストリーム検索技術について研究開発した。このビット並列技術は、1990年代初頭に Wu と Manber (CACM, 1992)らによって提案された高速検索手法であり、与えられたパターンをビット列表現の非決定性オートマトンに変換し、入力ストリーム上でオートマトンの受理計算を論理演算と数値演算を用いて高速に模倣して、ハードウェアの並列性を最大限に利用するものである [参考: 有村 1]。

本項目では、このビット並列手法に基づいて、実世界の移動体の軌跡ストリームを対象として、指定された近似的な時空間パターンの出現を検出する高速なオンラインパターン照合アルゴリズムを開発した(山本・笹川・有村, DEIM2016)。一方、多重性に関しては、K本の成長し続けるイベントストリームに対して、その部分系列の出現と計数を管理する系列索引の線形時間構築アルゴリズムを開発した(Takagi et al., CPM 2016)。さらなる高速化のために、ビット並列技法を用いた接尾辞木の高速検索のための亜線形時間(sublinear-time)のアルゴリズムを開発した(Takagi et al., IWoca 2016)。

A2. 確率的検査法に基づく超高速実世界ストリーム計数技術の研究開発(ジョーダン, ツオイクマン)

本研究項目では、近年計算量分野で発展している確率的検査可能性の理論に基づいた超高速なストリーム検索・計数技術の研究開発を行う。2000年代に入って、膨大なデータの極めて小さな一部分を確率的にサンプリングし、データの特性を近似的に極めて短い時間で検査可能な「確率的検査可能性」(testability)の理論が進化した。連携研究者のジョーダンは、クエリとしてデータ属性上の論理式で表される性質(パターン)に対する検査可能性と不可能性について詳細な分類を明らかにしている [参考:ジョーダン 1]。そこで本項目では、連携研究者 Jordan, 分担者ツオイクマン、と有村で、確率的情報処理スキームに基づき、構造ストリームデータに含まれる単純な規則性やパターンを検索・計数する超高速技術を研究開発した。その理論として、Jordan と Zeugmann は、確率的近似検査法の性能の理論的限界についての成果を学術誌に出版した (Jordan et al. BJMC 2016)。Zugmann は、ランダム性と密接な関係がある情報量的圧縮に基づくクラスタリング手法を画像解析に適用した (Zhu, Zeugmann, Inf. Sci. Syst. 2015)。また有村は、楽天研究所の金田との共同研究により、ランダム計数技法とビット並列手法を組み合わせ、ストリームからの近似頻出値発見のための双方向並列カウンタデータ構造を開発した(金田・有村・宇野, DEIM2016)。

A3. 構造列挙手法に基づく超高速実世界

ストリーム発見技術の研究開発(有村・ジョーダン)

本研究項目では,構造パターンを列挙する構造列挙法に基づき,構造ストリームからの高速なパターン発見技術を研究開発する.ジョーダンは,論理を用いた知識発見アプローチに基づく研究を行い,背景理論を用いた命題論理のソルバーである SMT (Satisfiable Modulo Theories)を用いた機械学習手法を提案した(CoRR, 2016).さらに,これらの知識に関する論理推論の基盤技術として,限量化子を許した論理ソルバーである QBF ソルバーに関する一連の研究を行った (Jordan et al., JSBMC 2016, AAAI Workshop 2016).機械学習や最適化に用いられる高次元空間の多面体の頂点と面列挙について, Jordan は,大規模並列化を用いた高速な列挙アルゴリズムを開発した (Avis, Jordan, *arXiv* 1510.02545 2015, *arXiv* 1511.06487 2015).有村は,構造列挙を 3次元実空間の点集合検索に適用し,理論的に健全な上限関数を用いた RMSD 距離のもとでの高速な検索アルゴリズムを開発した (Sasaki et al. SISAP 2015).

A4. 超高速ストリーム知識発見の理論的基盤の研究(ツオイクマン,有村)

本研究項目では,多重性をもつ実世界ストリームに対する検索と認識技術を研究開発する.特に,マイニングアルゴリズムの長期的ふるまいと環境への動的探索効果に関する理論的研究を行った (ALT 2018;).有村は,研究協力者の高木拓也と協力して,多重ストリームに対するオンライン索引構築問題に対して従来からある接尾辞木 (suffix tree) と非巡回有向語グラフ (DAWG) を融合することで,世界で初めて線形時間の非同期オンライン構築が可能であることを示した (Takagi, et al. IEICE Trans, 2017, SPIRE2017).さらに,ストリームデータの格納と操作を統一的に扱うことのできる系列 BDD の理論構築を行った (Denzumi et al. DAM 2016).分担者のツオイクマンは,理論的基盤の研究として,Zeugmann は,超測度 (ultrametric) に基づいた測度空間における超測度学習と呼ばれる学習アルゴリズムを研究し,その成果を計算論と数学基礎に関する国際ワークショップで招待講演を行った (Zeugmann, CTFM 2017).さらに,その学術的基盤として,数理解析と計算解析に関する教科書を Springer 社から出版した (Romisch and Zeugmann, 2016).

B1. プロトタイプシステム構築と予備評価実験(全員)

本研究項目では,A1 から A4 の各研究項目で開発したアルゴリズムの実装を行い,各項目で開発したアルゴリズムの理論性能解析を行い,ストリーム処理システム

のプロトタイプを構築し,実際のストリームデータを用いて評価実験を行った (Geng et al. Trans IPSJ 2015; Denzumi et al. DAM 2016; Takagi et al. IWOCOA 2016, IEICE Trans. 2017; 佐々木他 DEIM2016; 金田他 DEIM2016; 谷他 JSAI2018).

参考文献

- [参考:有村 1] H. Sasakawa, M. Yamamoto, K. Kurita, H. Arimura: Bit-parallel Approximate Trajectory Matching for 2-dimensional Trajectory Data, *The 17th Japan Conf. on Discrete and Comput. Geom. and Graphs*, 2014.
- [参考:有村 2] T. Asai, H. Arimura, K. Abe, S. Kawasoe, S. Arikawa: Online Algorithms for Mining Semi-structured Data Stream, *IEEE Int'l Conf. on Data Mining (ICDM 2002)*, 27-34, 2002.
- [参考:有村 3] T. Katoh, H. Arimura, K. Hirata: Mining Frequent Bipartite Episode from Event Sequences, *LNCS, Vol.5808, Proc. Discovery Science 2009*, 136-151, 2009.
- [参考:ツオイクマン 1] R. Freivalds, T. Zeugmann, Pogosyan: On the size complexity of deterministic frequency automata, *LNCS, Vol.7810, Proc. LATA2013*, 287-298, 2013.
- [参考:ツオイクマン 2] R. Freivalds, T. Zeugmann: Active Learning of Recursive Functions by Ultrametric Algorithms. *LNCS, Vol.8327, Proc. SOFSEM 2014*, 246-257, 2014.
- [参考:ジョーダン 1] C. Jordan, T. Zeugmann: Testable and untestable classes of first-order formulae. *J. Comput. Syst. Sci.*, Vol.78, No.5, 1557-1578, 2012.

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 15 件)

- [1] Ziyuan Gao, Sanjay Jain, Frank Stephan, Thomas Zeugmann, "On the Help of Bounded Shot Verifiers, Comparators and Standardisers for Learnability in Inductive Inference," *Proceedings of Algorithmic Learning Theory (ALT2018), Proceedings of Machine Learning Research*, 査読有, 83:413-437, 2018.
- [2] Takuya Takagi, Shunsuke Inenaga, Kunihiko Sadakane, Hiroki Arimura, "Packed Compact Tries: A Fast and Efficient Data Structure for Online String Processing," *Special Issue on Discrete Mathematics and Its Applications, IEICE Trans. Inf. and Syst.*, 査読有, 2017.
- [3] Takuya Takagi, Keisuke Goto, Yuta Fujishige, Shunsuke Inenaga, Hiroki Arimura, Linear-size CDAWG: new repetition-aware indexing and grammar compression, *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 24th International Symposium on String*

- Processing and Information Retrieval (SPIRE 2017)*, 査読有, Vol.10508, pp.304-316, September 2017.
DOI:10.1007/978-3-319-67428-5_26,
- [4] Shuhei Denzumi, Ryo Yoshinaka, Hiroki Arimura, and Shin-ichi Minato, "Sequence Binary Decision Diagram: Minimization, Relationship to Acyclic Automata, and Complexities of Boolean Set Operations," *Discrete Applied Mathematics*, 査読有, Vol.212, pp.61-80, 2016. doi: 10.1016/j.dam.2014.11.022
- [5] Charles Jordan and Thomas Zeugmann, "The Kahr-Moore-Wang Class Contains Untestable Properties," *Baltic Journal of Modern Computing*, 査読有, Vol. 4, Number 4, 2016, 736-752.
doi:10.22364/bjmc.2016.4.4.11
- [6] Mikolas Janota, Charles Jordan, Will Klieber, Florian Lonsing, Martina Seidl and Allen Van Gelder, "QBF Gallery 2014: The QBF Competition at the FLoC 2014 Olympic Games," *Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation*, 査読有, 9:187-206, 2016.
- [7] Takuya Takagi, Shunsuke Inenaga and Hiroki Arimura, "Fully-online construction of suffix trees for multiple texts," *Proc. the 27th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'16), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, 査読有, Vol.54, pp.22:1--22:13, 2016.
doi:10.4230/LIPIcs.CPM.2016.22
- [8] Takuya Takagi, Shunsuke Inenaga, Kunihiko Sadakane, Hiroki Arimura, "Packed Compact Tries: A Fast and Efficient Data Structure for Online String Processing," *Proc. 27th International Workshop on Combinatorial Algorithm (IWOC2016), Lecture Notes in Computer Science*, 査読有, Vol.9843, Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-44543-4_17
- [9] Yu Zhu and Thomas Zeugmann, "Image Analysis in a Parameter-Free Setting," *Information Sciences and Systems 2015*, 査読有, Springer International Publishing, 285-294, 2016.
- [10] Charles Jordan, Will Klieber and Martina Seidl, "Non-CNF QBF Solving with QCIR," *AAAI-16 Workshop on Beyond NP*, 査読有, 2016.
- [11] Charles Jordan, Lukasz Kaiser, "Machine Learning with Guarantees using Descriptive Complexity and SMT Solvers," *The Computing Research Repository (CoRR)*, 査読無, 1-30, abs/1609.02664 (2016).
- [12] Xiaoliang Geng, Takeaki Uno, Hiroki Arimura, "Practical Algorithms for Mining Flock Patterns from Trajectories," *Transactions of IPSJ*, Vol.56, No.4, pp.1292-1304, 2015. ISSN: 03875806.
- [13] Yoichi Sasaki, Tetsuo Shibuya, Kimihito Ito and Hiroki Arimura, "Efficient Approximate 3-Dimensional Point Set Matching Using Root-Mean-Square Deviation Score," *Proc. 8th International Conference on Similarity Search and Applications (SISAP 2015), Lecture Notes in Computer Science*, Vol.9371, Springer, pp.191-203, 2015.
- [14] David Avis and Charles Jordan, "Comparative computational results for some vertex and facet enumeration codes," *arXiv:1510.02545*, 査読無, 2015.
- [15] David Avis and Charles Jordan, "mplrs: A scalable parallel vertex/facet enumeration code," *arXiv:1511.06487*, 査読無, 2015.
- 〔学会発表〕(計 16 件)
- [1] 金森 憲太郎, 原 聡, 石畠 正和, 有村 博紀, モデル選択のためのサポートベクトル列挙, 第 29 回 IBISML 研究会, 情報論的学習理論と機械学習研究会, 電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ, 沖縄科学技術大学院大学(OIST), 2018 年 6 月 13-15 日。(発表予定)
- [2] 谷 陽太, 古谷 勇, 平田 耕一, 有村 博紀, イベント系列からの有意性を考慮した菱形エピソードマイニング, 人工知能学会 2018 大会(JSAI2018), インタラクティブセッション, 4Pin1-27, 鹿児島市城山観光ホテル, 2018 年 6 月 5-8 日 (発表予定)
- [3] 坂上 陽規, 瀧川 一学, 有村 博紀, グラフ断片決定木を用いたグラフ特徴抽出手法, 人工知能学会 2018 大会(JSAI2018), 人工知能学会, インタラクティブセッション, 3Pin1-10, 鹿児島市城山観光ホテル, 2018 年 6 月 5-8 日 (発表予定)
- [4] 坂上 陽規, 栗田 和宏, 瀧川 一学, 有村 博紀, 決定化されたグラフパターンライの学習アルゴリズム, 第 105 回人工知能基本問題研究会(SIG-FPAI), SIG-FPAI-B508, 人工知能学会, 沖縄県石垣市大濱信泉記念館, 2018 年 1 月 28 日-29 日.
- [5] Thomas Zeugmann, "Active Learning of Classes of Recursive Functions by Ultrametric Algorithms," *The Workshop on Computability Theory and the Foundations of Mathematics 2017 (CTFM 2017)*, September 8, 2017, National University of Singapore, 2017. (招待講演)
- [6] Skip Jordan (Charles Jordan), "Parallel vertex and facet enumeration with mplrs," *Talk in Algebra Seminar*, Osnabrück University, Germany, March 2017. (招待講演)
- [7] Hiroki Arimura, Kazuhito Osabe, Takeaki Uno, "Optimization and Enumeration of Decision Trees from Massive Data Sets," *Proc. 21st Conference of the International*

Federation of Operational Research Societies (IFORS 2017), Organized Session on Enumeration, ME-18, Quebec, Canada, July 16-21, 2017. (招待講演)

- [8] 佐々木 耀一, 渋谷 哲朗, 大森 亮介, 伊藤 公人, 有村 博紀, ラベル情報と構造情報の相関を用いた三次元点集合マッチングの高速化とそのインフルエンザウイルス解析への応用, 第9回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2017), 高山グリーンホテル, 2017年3月6日~8日.
- [9] 佐々木耀一, 渋谷哲朗, 大森亮介, 伊藤公人, 有村博紀, 正規化ハミング距離を用いた三次元点集合マッチングの高速化とインフルエンザウイルス解析への応用, 情報処理学会第79回全国大会, 名古屋大学, 2017.03.18 (学生奨励賞, 情報処理学会第79回全国大会, 2017.03.18 (第一著者の佐々木が受賞))
- [10] 高木拓也, DAGの簡潔表現について, 第9回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2017), ポスター発表, 飛騨, 2017年3月.
- [11] 山本 雅大, 笹川 裕人, 有村 博紀, 多次元点位置検索データ構造のGPUを用いた高速化とトラジェクトリパターン照合への応用, 第8回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (第14回日本データベース学会年次大会) (DEIM2016), 福岡市ヒルトン福岡シーホーク, 2016年3月.
- [12] 並列カウンタ配列による近似頻出値問題のための高速な要約データ構造, 金田 悠作, 有村 博紀, 宇野 毅明, 第8回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (第14回日本データベース学会年次大会) (DEIM2016), 福岡市ヒルトン福岡シーホーク, 2016年3月.
- [13] 高木拓也, 稲永俊介, 有村博紀, 非同期に文字が入力される複数ストリームに対する一般化接尾辞木の線形時間構築アルゴリズム, 第8回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (第14回日本データベース学会年次大会) (DEIM2016), 福岡市ヒルトン福岡シーホーク, 2016年3月.
- [14] 佐々木 耀一, 渋谷 哲朗, 伊藤 公人, 有村 博紀, 第8回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (第14回日本データベース学会年次大会) (DEIM2016), 福岡市ヒルトン福岡シーホーク, 2016年3月.
- [15] 佐々木耀一, 渋谷哲朗, 伊藤公人, 有村博紀, 三次元空間における効率良い近似点集合マッチングと分子パターン照合への応用, 第42回バイオ情報学(BIO)研究会, OIST, 沖縄県, 2015年6月23-25日. (2016年度 情報処理学会山下記念賞, 情報処理学会, 2017.03.16 授与, 第一著者の佐々木が受賞)
- [16] ディブタラム, 石黒 裕也, 成澤 和志, 篠原 歩, ジョーダン チャールズ, "QBF ソルバを用いた一般化三並べの拡張の勝敗判定," ゲームプログラミングワークショップ 2015 論文集, pp. 154-161, 2015.

〔図書〕(計9件)

- [1] 有村 博紀, 系列マイニング, 人工知能学大事典, 人工知能学会編, 6章-99節, pp. 469-472, 共立出版, Jul. 2017.
- [2] Thomas Zeugmann: "PAC Learning," *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*, Springer, 1335(949-959), 2017.
- [3] Thomas Zeugmann: "Stochastic Finite Learning," *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*, 1335(1187-1191), 2017.
- [4] Thomas Zeugmann: "VC Dimension," *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*, 1335(1323-1327), 2017.
- [5] Thomas Zeugmann, "Obituary Rūsiņš Mārtiņš Freivalds (1942-2016)," *Bulletin of the EATCS*, 118, 2016.
- [6] Sanjay Jain, Rémi Munos, Frank Stephan, Thomas Zeugmann, "Guest Editors' foreword," *Theor. Comput. Sci.* 620: 1-3, 2016.
- [7] Werner Römisch, Thomas Zeugmann, *Mathematical Analysis and the Mathematics of Computation*, Springer, 703 pages, ISBN 978-3-319-42753-9, 2016.
- [8] Peter Auer, Alexander Clark, Thomas Zeugmann, Special Issue on the 25th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT 2014), Guest editors' foreword, *Theor. Comput. Sci.*, Vol.650, 158(1-3), Elsevier, 2016.
- [9] Sanjay Jain, Rémi Munos, Frank Stephan, Thomas Zeugmann, Guest editors' foreword, Special Issue on the 24th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT 2013), *Theor. Comput. Sci.*, Vol.620: 134(1-3), Elsevier, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕ホームページ等

<http://www-ikn.ist.hokudai.ac.jp/~arim/publication.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有村 博紀 (ARIMURA, Hiroki)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 20222763

(2) 研究分担者

トーマス ツォイクマン (ZEUGMANN, Thomas)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 60374609

(3) 連携研究者

ジョーダン チャールズハロルド (JORDAN, Charles)

北海道大学・情報科学研究科・助教

研究者番号: 60647577