

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11820

研究課題名（和文）小型デバイス上でのデータ処理アルゴリズムの使用メモリ領域の効率化

研究課題名（英文）Efficient use of memory space by data processing algorithms on compact-size devices

研究代表者

山上 智幸（Yamakami, Tomoyuki）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：80230324

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）：物理的にメモリ領域の制限された小型携帯端末上で、大容量のデータ処理を実行するアプリケーションなどの開発には、これまでとは本質的に異なるアルゴリズム設計の技術が求められる。メモリ領域制限が様々な計算機モデル上のアルゴリズム設計にどのような影響を与えるのかを明らかにした。特に、非決定性計算量クラスNLの弱線形領域計算の限界を示す線形領域仮説を提唱し、この仮説からの自然な帰結を示すことで仮説の正当性を検証した。また、多項式状態計算量と対数メモリ領域量の等価性から、非一様オートマトン族を用いてメモリ領域制限付き計算の能力の限界を明らかにした。この他の研究したモデルに、量子アディアバティック計算がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メモリ領域の制限は、現実の小型携帯端末でのデータ処理ではしごく自然な要請であり、今後の小型携帯端末の発展を鑑みると、本研究で提唱された「線形領域仮説」は、理論計算機科学の研究に重要な役割を果たすことが期待される。この仮説は様々な計算モデルで特徴付けることが可能であることから、様々な分野への応用が期待される。線形領域仮説の真偽は未だ不明であるが、これは今後の研究の重要なテーマの一つとなる。また、迅速な大容量データ処理能力が必要とされ自律系AIや自動運転などの開発に示唆を与える事が期待される。

研究成果の概要（英文）：To develop various applications that perform large-scale data processing on small mobile devices with physically limited memory space requires fundamentally different algorithm design techniques. We discuss how memory space limitations affect algorithm design on various computing models. In particular, we propose the linear space hypothesis, which indicates that no sub-linear-space algorithms solve all problems in the nondeterministic complexity class NL, and we see the validity of this hypothesis by showing its natural but seemingly correct consequences. Furthermore, the equivalence between polynomial state complexity and logarithmic memory space helps us study the computational power of limited memory space using a non-uniform family of automata. We also study another computational model known as adiabatic quantum computers.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：線形領域仮説 対数メモリ領域 量子アディアバティック計算 非一様オートマトン族 アドバイス

1. 研究開始当初の背景

データの大规模な集積が世界中で進む中、これまでは大型高速計算機で行われていた大容量のデータ処理が、スマートフォンや iPad などの小型で携帯可能なデバイス（計算機器）に求められている。小型デバイスでは物理的な制約から使用可能なメモリ領域が制限されているが、単にメモリ領域を節約する為に莫大な計算時間を費やす方法は明らかに現実的な対策ではない。特に、自動運転を始め小型 AI ロボットなどの独立運用システムでは、使用メモリ領域の限られたデバイス上での計算を如何に現実的な実行時間で行うかが重要であり、その為の研究が必要とされていた。近年では、メモリ領域が制限された計算機器の一つに量子計算機があり、その数学的なモデルが幾つか提唱されている。今後、小型携帯端末は益々普及し実用的なアプリケーションが充実していくであろうと予想されている。そのようなアプリケーションはより多くのデータを瞬時に処理することが求められる。こうした喫緊の問題を解決して利便性の高い社会を構築するためには、メモリ領域の限られた実用的な小型端末での計算に特化した研究が必要である。計算量理論研究においてもこれまでは多項式時間計算が主テーマであり、様々な角度からの詳細な研究が行われてきたが、メモリ領域限定の計算への注目度は低く、対数領域計算を中心に多項式対数段の回路族などの研究に限られていた。一般に、使用メモリ領域が対数に限定された計算はメモリ使用効率の良い計算として考えられ、多項式時間計算とは大きく異なる性質を有していることが知られている。このことから、メモリ領域計算の詳細な研究が望まれていた。

2. 研究の目的

物理的に使用メモリ領域の制限された多種多様な計算モデルを用いて、メモリ領域制限の有る計算の特性と計算能力の限界を明らかにする為に、以下の項目を達成することを目標とし研究を遂行した。

(1) 対数メモリ領域で非決定計算可能な決定問題のクラス（集合）は特に NL と呼ばれ、決定性計算で定義される対数領域クラス L 或いは多項式時間クラス P と合致するのか、は長年に渡る未解決問題である。この問題に対し、これまでとは異なる新たな方法論でアプローチするのがこの研究の核心である。特に対数領域量と多項式領域量との間に位置する「線形領域量」に注目し、計算可能な問題群の性質を明らかにする為に、「線形領域仮説」の提唱とこの仮説の正当性の検証を目的とする。まず線形領域仮説を深く理解する為に、他の単純な計算モデル上でこの仮説と論理的に同等な命題に着目し、この仮説からの直接的な帰着で直観的に正しいと思われる命題が存在することを示す。

(2) 書き換えテープを持たない計算モデルでは、「メモリ領域量」は「状態計算量」と言う形で取り扱われることがある。こうした計算モデルでは、状態計算量を指数或多項式程度に制限したアルゴリズムを用いることで、与えられた問題の複雑さを定義できる。例えば、多項式状態計算量を有する有限オートマトンやプッシュダウンオートマトンの族などが、これら計算モデルに該当する。特に多項式状態計算量は対数メモリ領域量と等価と考えられ、この様な状態計算量を有するオートマトン族を構築することで、対数メモリ領域計算で解ける問題のクラスを明らかにする。

(3) 量子力学のシュレディンガー方程式を直接用いた量子計算の計算資源として、方程式の核心であるハミルトン行列を構築する量子オートマトンを用いるというアイデアを基に、この量子オートマトンの複雑さがメモリ領域量と同様な効果を齎すことから、シュレディンガー方程式を使った量子計算の能力の限界を明らかにする。

3. 研究の方法

大容量のデータ処理を実行する様々な計算モデルがこれまでに提案されているが、前述の研究目標を達成する為に、小型携帯端末の制限されたメモリ領域計算として、一般に広く認知された対数領域計算を中心に、弱線形領域や対数時間計算など幅広い計算のモデルを研究の基礎とし、これらの計算モデルに対し、入力長より極端に少ないメモリ領域量でアルゴリズムを実行する状況を考える。更に、同一種類の問題全体をクラスとして取り扱い、それらクラスに属する問題の計算量の上下限値を求める。また、異なる計算モデルの間の模倣可能性を示すことで、計算能力の同等性を明らかにする。これにより、別の計算モデルを用いて特徴付けを行うことが可能となり、研究成果の適応範囲を拡張することができる。また、計算モデルに依存しない理論的な枠組みを構築できる。この他に、領域量の限定された還元を構築することで、2つの問題の間にメモリ領域量に関する相対的な複雑さを示す。

4. 研究成果

2019 年から 2023 年までの 5 年間で、8 編の査読付きジャーナル論文と 21 編の査読付き国際会議論文を発表した。特にコロナ禍では、多くの国際会議が開催中止になるかオンライン発表のみに制限され、また海外研究者との対面での交流が出来ず、当初の研究計画の大幅な変更を余儀なくされた。しかし研究期間の 2 年延長により、新たな視点から研究が再構築され、当初予測された成果が得られた。以下、発表論文の中で特に重要な成果に関して簡単にまとめて記述する。

[1] (1) 非決定性対数領域計算可能な決定問題のクラスは NL と呼ばれ、全ての NL 問題が対数メ

メモリ領域に限定された計算で多項式時間内に解くことができるのか、は重要な未解決問題である。制約充足問題の一つである2和積標準形論理式充足問題2SATを、論理式の各変数がリテラルの形式で高々3回しか現れないものに限定した問題が2SAT₃である。この問題はNLの中で、最も難しい問題であることが知られている。n変数m節を有する2SAT論理式は、線形よりやや少ないメモリ領域を用いた多項式時間計算で解くことができる。しかし、弱線形メモリ領域に制限した場合に多項式時間計算で解くことが可能かは、未だ不明である。これが不可能であることを主張する「線形領域仮説」を提唱した。これは、多項式時間計算量理論で「指数時間仮説」として知られる仮説の線形メモリ領域版とみなす事ができる。線形領域仮説のもとら幾つかの非自明な帰結を示した。例えば、ある最適化問題は使用メモリ領域を弱線形に制限すると、解法アルゴリズムの近似率が1+1/k以下には出来ないことが証明される。

(2) 非決定性多項式時間計算量クラスNPの部分クラスとして、1990年代初頭にPapadimitriouとYannakakisがSNPを特殊な2階論理式で表現される決定問題の全体として導入した。それ以降、様々な視点からSNPに関する精力的な研究が進められてきた。同様にして、非決定性対数メモリ領域量クラスNLの部分クラスとして、関数型存在限定子を用いた2階論理式で表現される決定問題のクラスSNLを導入した。このSNLはNL完全問題の一つである有向グラフ経路問題(DSTCON)を含み、対数領域還元性の下ではNLと同等の計算量を有している。その上、任意のNL問題に対し、それと同等の計算特性を有するSNL問題が存在する。また、SNLを制限した計算量クラスSNL_wは、論理式充足問題2SAT₃を含むことから、SNL_wが弱線形領域で多項式時間に解けると線形領域仮説が真であることが等価となる。

[2] (1) 単一のアルゴリズムに従って計算を実行する計算モデルは、「一様性」という性質で表現される。例えば、有限オートマトンやチューリング機械は一様性を有する。この性質が欠けている計算モデルは「非一様(性)」と呼ばれる。このような非一様計算モデルの一つに、1970年代に導入された非一様オートマトンの族があり、SakodaとSipserによって導入された計算量クラス2Nは、多項式サイズのアドバイスを用いて定義された非一様NLと密接な関係があることが知られている。ここで、オートマトン族と論理回路族との大きな違いは、回路族の各回路は入力長が固定されているのに対し、オートマトン族の各オートマトンは任意の長さの入力を取ることができる点である。多項式サイズの非一様オートマトンの族として、数え上げ計算や曖昧の無い計算に焦点を絞り、オートマトン族が解くことのできる問題の範囲を明らかにした。特に、数え上げ計算をベースにした計算モデルを使って定義される1P、1C₌、1⊕などの計算量クラスが全て異なることを示した。

(2) 計算機能力を向上させる為に使用する外部情報源にアドバイスが有る。多項式サイズに限定したアドバイスを用いることで、線形領域仮説を非一様性することが可能である。こうして得られた仮説を「非一様線形領域仮説」と呼ぶ。多項式状態計算量において、非一様非決定性オートマトン族で認識可能な決定問題のクラス2qLinNが計算グラフの幅が限定された交代性オートマトン族で認識可能な問題のクラス2A_{narrow}に含まれることと、非一様線形領域仮説が偽であることが論理的に同値となる。この結果より、線形領域仮説の真偽に関して非一様オートマトン族を研究する意義が、より一層明白になった。

[3] (1) 量子力学に基づいた量子計算を実行可能な量子計算機の開発が進んでいる。量子オートマトンは量子力学が許容する計算過程を経て「観測」により確率的に結果を出力する機械の数学的モデルである。量子オートマトンの研究は1990年代に始まり、これまでに多くの特性が明らかになってきた。本研究では新たに非一様な量子オートマトン族を用いて、古典の場合と同様に、多項式サイズのアドバイスを利用することで、これらのオートマトン族と対数メモリ領域多項式時間量子計算と計算能力の点で同等であることを示した。このことから、多項式状態計算量の量子オートマトンの族を用いて、多項式サイズアドバイス有するメモリ領域に制限のある量子計算を分析することが可能になった。こうした非一様計算モデルにおいて、古典計算と量子計算では明確な能力差があることを示した。

(2) 量子力学の根幹となるシュレディンガー方程式を用いて量子計算を行うモデルの一つにアディバティック量子計算がある。アディバティック計算ではシュレディンガー方程式に現れるハミルトン行列が計算過程を制御している。このハミルトン行列を量子オートマトンを用いて構成することで、アディバティック計算を量子オートマトンを用いて実質的に制御することが可能となり、更に、この量子オートマトンの状態計算量により、アディバティック計算の複雑さを定義することができる。これは、書き換えテープのメモリ領域制限と同様な効果を齎すと考えられる。この複雑さの度合いによって、アディバティック計算で解くことが可能な問題の計算量を定義する。この考え方はこれまででないものであり、将来の研究の新たな方向性を示している。この計算量の具体的な例として、一般に良く知られた問題を取り上げ、それらの複雑さの上限を明らかにした。

[4] (1) 量子計算の計算モデルとして、量子回路族や量子チューリング機械などが多く用いられ

てきた。これら機械モデルとは大きく異なり、帰納的関数論の手法を用いたモデルを提案し、多項式時間量子計算を正確に記述可能であることを示した。このモデルは、6つの初期量子関数を基礎に3つの構成規則を適応して帰納的に構成して得られる量子関数を用いる。ここで構成規則として、関数の合成規則、条件分岐規則と、量子帰納規則を用いる。特に重要となるのが量子帰納規則であり、これは量子力学的に許容された操作を帰納的な手順で量子ビットに施していく規則である。このような帰納的な構成方式で多項式時間の量子計算を提示する方法は、後にフランスの研究者たちの手により量子計算機を実行する量子プログラミング言語の開発に用いられている。このモデルが、多項式時間計算可能な量子チューリング機械と同等な計算能力を有することを示した。

(2) 上に述べた成果を基に、本研究の主テーマである対数メモリ領域や多項式対数時間の計算を実行する量子関数のクラスを、帰納的関数論の手法を用いて構築した。この為に、新たな対数量子帰納規則を導入し、構成された量子関数の多項式対数時間計算可能性を証明した。また、量子関数の構成の手順は、関数の記述計算量として意味を持つことから、時間計算量や領域計算量と共に、新たな計算量として有効であり、今後の研究の一つの方向性を示唆している。

[5] 計算量の種類の一つにコルモゴロフ計算量がある。与えられた2進文字列 x のコルモゴロフ計算量は、 x を生成する為に必要な情報量 (アルゴリズムのサイズとも言える) の最小値である。この計算量は、例えばアルゴリズム的ランダム性の概念を定義する際に必要となる。形式言語理論にも応用され、正規言語や文脈自由言語のポンピング補題の言い換えとして、コルモゴロフ計算量を使った補題が証明されている。これらポンピング補題とは仕様が大きく異なるが、非一様なプッシュダウンオートマトンにより認識される言語のスイッチング補題を2008年に提案している。この補題の言い換えとして、コルモゴロフ計算量を用いた補題を証明した。この補題を用いて、非一様な文脈自由言語クラス (CFL/n) の性質を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 8
2. 論文標題 Between SC and LOGDCFL: families of languages accepted by logarithmic-space deterministic auxiliary depth-k storage automata	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Mathematics: Computer Systems Theory	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23799927.2023.2166872	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 286
2. 論文標題 Nonuniform families of polynomial-size quantum finite automata and quantum logarithmic-space computation with polynomial-size advice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 article 104783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2021.104783	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13595
2. 論文標題 Nondeterministic Auxiliary Depth-Bounded Storage Automata and Semi-Unbounded Fan-In Cascading Circuits (Extended Abstract)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Conference on Computing and Combinatorics, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 61-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-22105-7_6	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 559
2. 論文標題 Parameterized-NL Completeness of Combinatorial Problems by Short Logarithmic-Space Reductions and Immediate Consequences of the Linear Space Hypothesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the Future Technologies Conference, Lecture Notes in Networks and Systems	6. 最初と最後の頁 776-795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-18461-1_51	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13572
2. 論文標題 Formal Grammars for Turn-Bounded Deterministic Context-Free Languages	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 425-441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-17715-6_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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 1723
2. 論文標題 Fine Grained Space Complexity and the Linear Space Hypothesis (Preliminary Report)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 25th International Computer Symposium on New Trends in Computer Technologies and Applications, Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 180-191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-19-9582-8_16	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13608
2. 論文標題 Unambiguity and Fewness for Nonuniform Families of Polynomial-Size Nondeterministic Finite Automata	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th International Conference on Reachability Problems, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 77-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-19135-0_6	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13468
2. 論文標題 Expressing Power of Elementary Quantum Recursion Schemes for Quantum Logarithmic-Time Computability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Workshop on Logic, Language, Information, and Computation, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 88-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-15298-6_6	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13257
2. 論文標題 Kolmogorov complexity descriptions of the exquisite behaviors of advised deterministic pushdown automata	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Conference on Developments in Language Theory, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 312-324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-05578-2_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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13087
2. 論文標題 Fuzzy Kolmogorov complexity based on fuzzy decompression algorithms and its application to fuzzy data mining (preliminary report)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Data Mining and Applications, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 421-436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-95405-5_30	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 13025
2. 論文標題 Between SC and LOGDCL: families of languages accepted by polynomial-time logarithmic-space deterministic auxiliary depth-k storage automata	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Computing and Combinatorics Conference, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 164-175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-89543-3_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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 12984
2. 論文標題 Quantum logical depth and shallowness of streaming data by one-way quantum finite-state transducers (preliminary report)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 177-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-87993-8_12	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 3072
2. 論文標題 Nondeterministically selecting positive instances of context-free languages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd Italian Conference on Theoretical Computer Science, CEUR Workshop Proceedings	6. 最初と最後の頁 249-265
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 Tomoyuki Yamakami and Eitatsu Mikami	4. 巻 1412
2. 論文標題 Synchronizing words for real-time deterministic pushdown automata (extended abstract)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Seventh International Conference on Mathematics and Computing, Advances in Intelligent Systems and Computing	6. 最初と最後の頁 551-562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-6890-6_41	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 IT2020-117
2. 論文標題 Streaming Data Compression and Decompression by One-Way Quantum Finite-State Automata, Leading to Quantum Finite-State Deep and Shallow Information (Preliminary Report)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会, 情報理論研究会, 信学技報	6. 最初と最後の頁 31-36
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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 25
2. 論文標題 One-Way Topological Automata and the Tantalizing Effects of Their Topological Features	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Automata, Languages and Combinatorics	6. 最初と最後の頁 235-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25596/jalc-2020-235	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 85
2. 論文標題 A Schematic Definition of quantum Polynomial Time Computability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Symbolic Logic	6. 最初と最後の頁 1546-1587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jsl.2020.45	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 12038
2. 論文標題 Intersection and Union Hierarchies of Deterministic Context-Free Languages and Pumping Lemmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA 2020). Lecture Notes in Computer Science, Springer	6. 最初と最後の頁 341-353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-40608-0_24	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 Henning Fernau, Petra Wolf, Tomoyuki Yamakami	4. 巻 170
2. 論文標題 Synchronizing Deterministic Push-Down Automata Can Be Really Hard	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 45th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2020). LIPIcs, Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik 2020	6. 最初と最後の頁 33:1-33:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.MFCS.2020.33	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 798
2. 論文標題 State complexity characterizations of parameterized degree-bounded graph connectivity, sub-linear space computation, and the linear space hypothesis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 2-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.09.006	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 12038
2. 論文標題 Intersection and union hierarchies of deterministic context-free languages and pumping lemmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Conference on Language and Automata Theory and Applications, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 341-353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-40608-0_24	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 11612
2. 論文標題 How does adiabatic quantum computation fit into quantum automata theory?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st IFIP WG 1.02 International Conference on Descriptive Complexity of Formal Systems, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 285-297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-23247-4_22	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 11493
2. 論文標題 Relativizations of nonuniform quantum finite automata families	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 8th International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 257-271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-19311-9_20	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 11436
2. 論文標題 Supportive oracles for parameterized polynomial-time sub-linear-space computations in relation to L, NL, and P	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 659-673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-14812-6_41	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 Henning Fernau, Petra Wolf, Tomoyuki Yamakami	4. 巻 295
2. 論文標題 Synchronizing deterministic push-down automata can be really hard	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 article 105089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2023.105089	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 136
2. 論文標題 The 2CNF Boolean formula satisfiability problem and the linear space hypothesis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Computer System Sciences	6. 最初と最後の頁 88-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcss.2023.03.001	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 14292
2. 論文標題 Power of counting by nonuniform families of polynomial-size finite automata	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 24th International Symposium on FCT Fundamentals of Computation Theory, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 421-435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43587-4_30	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 3587
2. 論文標題 When input integers are given in the unary numeral representation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 24th Italian Conference on Theoretical Computer Science, CEUR Workshop Proceedings	6. 最初と最後の頁 268-282
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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 284
2. 論文標題 How does adiabatic quantum computation fit into quantum automata theory?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 article 104694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2021.104694	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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 11417
2. 論文標題 Nonuniform families of polynomial-size quantum finite automata and quantum logarithmic-space computation with polynomial-size advice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Language and Automata Theory and Applications, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 134-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-13435-8_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 Tomoyuki Yamakami	4. 巻 11376
2. 論文標題 Behavioral strengths and weaknesses of various models of limited automata	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 45th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 519-530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-10801-4_40	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13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 When Input Integers are Given in the Unary Numeral Representation (Preliminary Report)
3. 学会等名 電子情報通信学会 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Streaming Data Compression and Decompression by One-Way Quantum Finite-State Automata, Leading to Quantum Finite-State Deep and Shallow Information (Preliminary Report)
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Fuzzy Kolmogorov complexity based on fuzzy decompression algorithms and its application to fuzzy data mining
3. 学会等名 The 17th International Conference on Advanced Data Mining and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Between SC and LOGDCFL: families of languages accepted by polynomial-time logarithmic-space deterministic auxiliary depth-k storage automata
3. 学会等名 The 27th International Computing and Combinatorics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Nondeterministically selecting positive instances of context-free languages
3. 学会等名 The 22nd Italian Conference on Theoretical Computer Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Synchronizing words for real-time deterministic pushdown automata
3. 学会等名 The 7th International Conference on Mathematics and Computing
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Quantum logical depth and shallowness of streaming data by one-way quantum finite-state transducers
3. 学会等名 The 19th International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 What Restrictions Naturally Allow Well-Known NP-Complete Problems to Yield NL-Completeness and the Linear Space Hypothesis?
3. 学会等名 電子情報通信学会 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Streaming Data Compression and Decompression by One-Way Quantum Finite-State Automata, Leading to Quantum Finite-State Deep and Shallow Information (Preliminary Report)
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami, Eitatsu Mikami
2. 発表標題 Synchronizing Words for Real-Time Deterministic Pushdown Automata
3. 学会等名 The 7th International Conference on Mathematics and Computing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田光星・山上智幸
2. 発表標題 書き換え制限付き決定性オートマトンと繰り返し補題
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三神栄達・山上智幸
2. 発表標題 シンクロナイジングプッシュダウンオートマトンとリセットワード
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoyuki Yamakami
2. 発表標題 Type-2 Computability, Generic Oracles, and the Linear Space Hypothesis
3. 学会等名 Higher-order Complexity Theory and its Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Home Page of Dr. Tomoyuki Yamakami
<http://tomoyukiyamakami.info/>

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