

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 14 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00025

研究課題名(和文) 省メモリ下における計算の効率化と基本的諸特性の理論的解明

研究課題名(英文) Theoretical clarification of efficiency and fundamental properties of computation under low memory space

研究代表者

義永 常宏 (YOSHINAGA, Tsunehiro)

徳山工業高等専門学校・情報電子工学科・教授

研究者番号：50158482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究目的は、スマートフォンのような小さなメモリー容量のコンピュータで大量データを処理することを想定し、入力データサイズに比べてディスクメモリー容量が極めて低いコンピュータの数理モデルを用いて、処理の効率化と諸特性について理論的に解明することである。
通常のコンピュータは直列計算であるが、入力データにタグを付けた上で並列計算することにより処理の効率化が図れるが、複雑な処理には対応できないこと、また、複数ある次の処理の中から一つをランダムに選ぶ乱択計算もマシンモデルによっては効率化につながることを理論的に示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は領域計算に関する基礎理論であり、入力データ n に対し、使用できるメモリー空間量を関数 $s(n)$ に制限した場合の計算の可能性と限界等について考察・解明することが主題である。
これまでに、 $s(n)$ が対数 $\log n$ (logarithm) より大きな関数の場合には多くの著名な先行結果があるが、本研究で対象とする $s(n)$ が $\log n$ 未満(sublogarithm)の場合に関する成果は多くない。よって、本研究成果の学術的意義としては、 $\log n$ 未満の領域計算量の研究分野の進展への貢献が考えられる。

研究成果の概要(英文)： The purpose of this research is to theoretically clarify the efficiency of processing and various properties of such efficiency using mathematical models of computers with extremely small disk memory compared to the size of input data, assuming that large amounts of data are processed on a computer with a small memory, such as a smart phone.

We have shown theoretically that, although ordinary computers are used for serial computation, parallel computation with tagged input data can improve processing efficiency, but it cannot handle complex processing, and that randomized computation, in which one process is randomly chosen from among multiple next processes, can also improve efficiency depending on the machine model.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：領域限定計算 交代性計算 インクドットチューリングマシン 閉包性 ペブルチューリングマシン ラスベガス計算

1. 研究開始当初の背景

“ビッグデータ”に代表されるように、巷にはコンピュータで処理される膨大なデータが溢れている。一方、スマートフォンに代表される組込みシステムでは、その大きさからデータ処理に使用される作業用ディスク容量は限られている。技術の進展に伴い、ディスクの大容量化・省スペース化はあるものの、物理的限界もあり、かつデータがデータを生む時代にあっては、この状況は変わらないと考えられる。

本研究では、このような背景とも照らし合わせ、入力データサイズに比べて作業ディスク容量が極めて少ないコンピュータの数理モデルを用いて、超大な入力データをごく限られた作業容量で処理する際の効率化と諸特性について理論的に解明することを狙う。

2. 研究の目的

上記背景をもとに、研究の対象とする数理マシンモデルは、理論的に現代のコンピュータと計算能力が等価であるチューリングマシンを主として用いる。ただし、計画通りに進捗しない場合は、より制約・条件の強い他のマシンモデルも使用し、一定の成果が得られたならば、制約・条件を緩和する方向で進める。

チューリングマシンは、入力データを読み進め、有限状態制御部による制御（アルゴリズム・プログラムに相当）を基に、作業領域（ディスクに相当）を補助記憶装置として使用し、目的の計算を行う。

通常、アルゴリズムの効率を測る尺度として、与えられた長さ n の入力データに対し、処理に必要な作業領域の大きさを関数 $s(n)$ で表現する。逆に、作業領域量のある関数に制限し、処理や計算の可能性と限界について解明することが、領域計算量の研究主題でもある。これまでに、線形、多項式、対数等の代表的な関数については、歴史的にも主要な結果が残されている。

本研究では、入力長 n に比べ、作業領域量 $s(n)$ が極めて小さい関数、すなわち、対数よりも低いオーダー $s(n) = o(\log n)$ に制限された場合を対象とする。この場合、全入力データは勿論、データ中の特定の位置さえも作業領域中に保持できない。なお、領域量がさらに低いオーダー $o(\log \log n)$ の場合、チューリングマシンの作業領域は無に等しいことが知られている。したがって、本研究で扱う $o(\log n)$ は作業領域として意味を持つ最小限の大きさということになる。

申請者は、これまでに $o(\log n)$ 領域限定チューリングマシンに関するいくつかの結果を示しており、本研究では、これらをさらに深化させると共に、新たな視点からの考察結果も導出することで、未知の部分も多い $o(\log n)$ 領域計算量の研究分野を進展させることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的である極小作業領域による大容量データ処理に対し、通常の直列計算に比べて計算の高速化が期待される 並列計算および 乱択計算について、ならびに処理効率の観点から 入力データ流のオンライン（単方向）とオフライン（双方向）について、理論的に解明する。

上記 についてであるが、並列計算モデルには、主として交代性計算を用いる。申請者自身のこれまでの交代性計算に関するいくつかの成果をもとに、更なる特性について考察する。また、乱択計算については、複数あるマシンの次の動作の中から1つを確率的に選択することができるが、 $o(\log n)$ 領域における同計算に関する研究成果はこれまでにあまり知られていない。

では、入力データ流がオフラインの場合、同一データを何度も読み返すことができるが、オンラインでは、一度読んだデータを後戻りして読むことができない。すなわち、次々と入力されるデータをリアルタイムに処理していくイメージである。領域量が $\log n$ 以上の場合、交代性計算においては、オンラインとオフラインは等価になることが知られているため、 $o(\log n)$ 領域での両者の差異を解明することは興味深い課題と考えられる。

なお、予想の検証および結果の確認のために、コンピュータ・シミュレーションの援用も視野に入れる。

4. 研究成果

読み込み専用の入力データ列に対し、マークで印を付けることができる付加的機能として、インクドット（インクによる点）やペブル（石ころ）がある。前者は一度付けたマークの消去や移動ができないのに対し、後者ではそれらが可能である。本研究の成果として、存在状態のみに限定された $o(\log n)$ 領域をもつオフライン交代性インクドット・チューリングマシンの閉包性に関する結果を学会論文誌に掲載することができた（IEICE Trans, FUNDAMENTALS, Vol. E103-A, pp. 1234-1236, 2020）。

また、この結果と双対・相補的な全称状態のみに限定された場合の閉包性については考察中である。また、 $o(\log n)$ 領域限定のオフライン交代性ペブル・チューリングマシンは存在状態のみに限定された同マシンよりも計算能力が真に高いことが先行結果として知られているが、双対的に全称状態のみに限定された同マシンよりもやはり計算能力が高くなると予想し、その証明を構成中である。

交代性計算はその定義から並列実行中のマシン相互の同期は取れないが、これを可能にした拡張モデルが同期型交代性計算である。本研究課題の直接的な結果ではないが、チューリングマシンよりも計算能力の低いマルチカウンタマシンの場合、例えば、線形時間動作のオンライン同期型交代性マルチカウンタマシンは全称状態のみの同マシンよりも真に計算能力が高いことな

どを示し、学会で発表している(2017年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, R17-18-05).

また、 $o(\log n)$ 領域限定交代性チューリングマシンに関する先行結果をもとに、 $\log n$ 領域限定交代性マルチカウンタマシンについてはオフライン計算の方がオンライン計算よりも強力であることを示し、本校の研究紀要に記載した(Research Reports of National Institute of Technology, Tokuyama College, No.42 pp.1-4, 2018).

さらに、チューリングマシンより低い計算能力であるコオペレーティング有限オートマトンシステムの場合、交代性オンライン・コオペレーティング有限オートマトンシステムは、全称状態または存在状態のみに制限された交代性同システムよりも真に能力が高いことを示し、さらに、乱択計算の1つであるラスベガス計算に着目し、ラスベガス・オンライン・コオペレーティング有限オートマトンシステムは決定性の同システムよりも真に計算能力が高くなることも示し、これらの結果を学会で報告した(2021年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, R21-18-02).

上記のチューリングマシン以外のマシンモデルでの成果については、本来の目的であるチューリングマシンにおいても同様の結果が得られるかについては今後の課題である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YOSHINAGA Tsunehiro, SAKAMOTO Makoto	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Non-Closure Properties of Multi-Inkdot Nondeterministic Turing Machines with Sublogarithmic Space	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1234 ~ 1236
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2019DML0001	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 Tsunehiro YOSHINAGA and Makoto SAKAMOTO	4. 巻 第42号
2. 論文標題 1-Way versus 2-Way Alternating Multi-CounterAutomata with Sublinear Space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RESEARCH REPORTS OF THE TOKUYAMA COLLEGE OF TECHNOLOGY	6. 最初と最後の頁 pp.1-4
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 此原 成哉 颯, 義永 常宏, 坂本 真人
2. 発表標題 交代性1方向コオペレーティング 有限オートマトンシステムのある性質
3. 学会等名 2021 年度(第 72 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣中 颯, 義永 常宏, 坂本 真人
2. 発表標題 同期型交代性有限オートマトンとマルチカウンタマシンの関係について
3. 学会等名 平成29 年度(第68 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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