

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11830

研究課題名（和文）不揮発性メモリの特徴を生かした高速なプログラム実行とファイル操作の制御法の研究

研究課題名（英文）Research of high-speed program execution control method and file operation method utilizing the characteristics of non-volatile memory

研究代表者

谷口 秀夫（TANIGUCHI, Hideo）

岡山大学・環境生命自然科学研究科・特命教授

研究者番号：70253507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）： 計算機におけるオペレーティングシステムの本質的なオーバーヘッドは「データの複写」といわれている。一方、近年、電源OFFでも保存データが消失しない不揮発性メモリの研究が進んでいる。まだ実用計算機としては登場していないものの、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機の実現が可能になっている。

本研究では、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機のオペレーティングシステム機能を研究し、データ複写を削減する新制御法の実現により、高速なプログラム実行制御法とファイル操作法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算機のサービスはプログラム処理により提供されているため、プログラム実行とファイル操作を高速化することは、利用者からみた計算機の性能を向上させることに直結する。

本研究では、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機のオペレーティングシステム機能を研究し、データ複写を削減する新制御法の実現により、高速なプログラム実行制御法とファイル操作法を確立した。この技術により、従来になかった新しい計算機の登場を可能にし、計算機の起動速度向上、サービス開始速度向上、およびWebサービス応答速度向上などにより利用者の利便性を大きく向上できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The essential overhead of operating systems in computers is called "data copying." On the other hand, in recent years, research has been progressing on nonvolatile memory that retains stored data even when the power is turned off. Although it has not yet appeared as a practical computer, it has become possible to realize a computer that uses nonvolatile memory as real memory and does not have an external storage device. In this research, we will study the operating system functions of computers that use real memory as non-volatile memory and do not have external storage devices, and will establish a high-speed program execution control method and file operation method by realizing a new control method that reduces data copying.

研究分野：基盤ソフトウェア

キーワード：基盤ソフトウェア オペレーティングシステム プログラム実行制御 ファイル操作 不揮発性メモリ

1. 研究開始当初の背景

古くから、計算機システムにおけるオペレーティングシステム(OS)の本質的なオーバーヘッドは「データの複写」といわれている。この「データの複写」には、実メモリ間のデータ複写(欠点1)、および実メモリと外部記憶装置間のデータ入出力(欠点2)がある。このオーバーヘッドを削減できれば、高速なプログラム実行とファイル操作が可能になる。しかし、データの保護(例えば、ユーザモードで走行するプロセス領域の保護、あるいはスーパバイザモードで走行するOS領域の保護)、あるいはデータの保全(例えば、電源OFF時のデータ保存)などのために、「データの複写」が行われている。

一方、計算機を構成する実メモリやプロセッサおよびキャッシュには、以下のような変化が生じている。

(A) 実メモリとしての不揮発性メモリの利用: 不揮発性メモリは、最近のハードウェア技術の向上により、アクセス速度は向上しており、大容量化とともに低価格化も進んでいる。また、例えば、Intel が2019年4月に発表した不揮発性メモリ(Optane DC Persistent Memory)は、アクセスインタフェースとしてDDR4のデータ信号で利用でき、実メモリとしての利用が可能である。

(B) 64ビットプロセッサによる実メモリ空間の拡大: 64ビットプロセッサの登場により、プロセッサが扱えるメモリ空間は広がっている。これに伴い、仮想メモリ空間の64ビット化だけではなく、実メモリ空間の64ビット化も可能である。

(C) キャッシュの重要性向上: プロセッサの動作速度は非常に速くなっている。これに対し、実メモリがDRAMのような揮発性メモリであっても十分なアクセス性能ではない。このため、メモリキャッシュの役割が非常に重要になっている。メモリキャッシュは、高速化や大容量化とともに高機能化により、高いキャッシュヒット率を生み出している。また、多くのOSが有する仮想記憶機構では、アドレス変換情報をキャッシュするTLB(Translation Lookaside Buffer)のヒット率がプログラム実行速度に大きく影響する。つまり、メモリキャッシュやTLBといったキャッシュのヒット率が計算機の性能を左右しているといっても過言ではない。逆に言えば、実メモリのアクセス速度の重要度は低下している。

また、現在の計算機において、不揮発性の記憶媒体である外部記憶装置が必要である理由は、電源OFF時の情報(プログラムとプログラムが扱うデータ)の保存(理由1)、実メモリの大きさを超える多くの情報の保持(理由2)、および多くの計算機で利用できるための情報の可搬(理由3)である。これらに対し、不揮発性メモリは、不揮発性(理由1を満足)であり、かつ大容量化(理由2を満足)が進んでいる。また、次に述べる不揮発性メモリ品により理由3を満足できる。

したがって、64プロセッサを搭載し、高ヒット率のメモリキャッシュやTLBで構成することにより、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機(以降、不揮発性メモリ品型計算機と呼ぶ)を構築できる。不揮発性メモリ品型計算機のイメージを図1に示す。不揮発性メモリ品は、固定サイズ(例えば1TB)の不揮発性メモリであり、計算機の実メモリとして装着と脱着ができる。

この不揮発性メモリ品計算機では、OSの新制御方式により、次のように「データの複写」を大きく削減できる。プログラムを実行する際、テキスト部は実メモリ上に存在するためデータ複写は発生せず、書き換えが発生するデータ部のみのデータ複写でよい。したがって、実メモリ間のデータ複写(欠点1)を大きく削減できる。また、プログラムやファイルを全て実メモリ上に存在させることで、実メモリと外部記憶装置間のデータ入出力(欠点2)を行う必要がない。

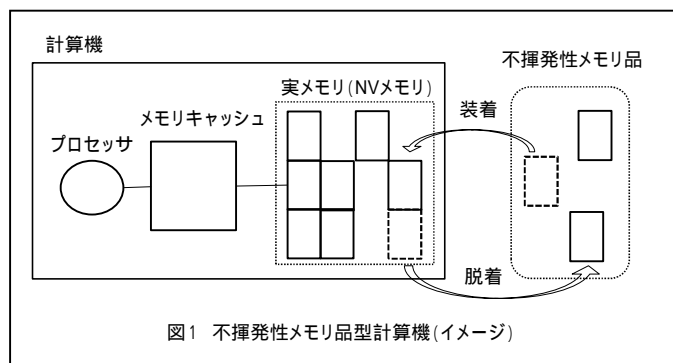


図1 不揮発性メモリ品型計算機(イメージ)

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究課題は、「不揮発性メモリの特徴を生かし、高速なプログラム実行とファイル操作を制御する方法を確立する」ものである。具体的には、今後の計算機の環境(実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機)を想定し、OS機能として、(1)不揮発性メモリ品のデータ格納形式と挿抜機能を考案し、さらに従来のデータ保護や保全などの機能を確保したままで(2)データの複写(実メモリ間のデータ複写(欠点1)、および実メモリと外部記憶装置間のデータ入出力(欠点2))を削減するプログラム実行やファイル操作の新機構を実現し、高速なプログラム実行制御技術とファイル操作技術を確立する。

不揮発性メモリの登場により、不揮発性メモリを有効利用するソフトウェア技術も研究が進んでいる。しかし、既存の研究はファイルシステムやメモリ階層および言語記述に関するものである。したがって、既存の研究では、OSの本質的なオーバーヘッドである「データの複写」を削減

できず、プログラム実行やファイル操作を高速化できない(問題)。

これに対し、本研究は、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機が構築できることを利用し、OS 機能として、不揮発性メモリ品のデータ格納形式と挿抜機能、およびプログラム実行法やファイル操作法を研究し、既存の研究では解決できない問題(プログラム実行やファイル操作を高速化できない)を解決する。

3. 研究の方法

不揮発性メモリ品のデータ格納形式と挿抜機能を考案し、およびデータ複写を削減して高速なプログラム実行とファイル操作を行える新制御機構を示した。

(A) 不揮発性メモリ品のデータ格納形式と挿抜機能の考案：データ格納形式は、不揮発性メモリのアクセス単位とアクセス性能の特徴を生かす形式であるだけでなく、上位互換性がある形式(新形式と既存形式両方とも記述できる)とした。また、挿抜機能は、不揮発性メモリ品の実メモリ空間への組み込みと取り外しであり、様々な計算機での挿抜を考慮し、組み込みアドレス位置を利用形態に合わせて設定できる。

(B) 高速なプログラム実行とファイル操作を行える新制御機構の実現：現在の多くの計算機では、プログラム実行は、OS の仮想記憶機構の要求時ページング(ODP)機能を利用している。そこで、ODP 機能の中心処理であるページ例外処理におけるデータ複写を削減する機構を確立した。また、仮想記憶機構により実メモリ空間と仮想メモリ空間の対応付けを工夫し、ファイルはデータ入出力なしでプログラムが読み書きできる操作機構を確立した。

(C) 実現評価環境の構築：不揮発性メモリの研究が進んでいるものの、まだ実用計算機としては登場していない。このため、先ず既存計算機を用いて不揮発性メモリを搭載した計算機環境のシミュレート環境を構築した。

4. 研究成果

不揮発性メモリ品のデータ格納形式と挿抜機能の考案、不揮発性メモリの活性挿抜に伴う OS 処理方式の確立、およびページ例外処理におけるデータ複写を削減する機構の実現と共にプログラム実行時の効果の定式化と分析を行い、有効性を明らかにした。また、不揮発性メモリと揮発性メモリではメモリアクセス性能が異なる影響として、入出力処理を含めたプロセスの処理性能が異なることについて、入出力性能を調整する手法に着目してその調整精度を向上させる方式を確立した。通信処理の性能については、通信処理におけるパケットトレーシングを取り上げ、その性能を評価し、不揮発性メモリ環境下での通信処理を含めたプロセスの処理性能の試算精度を向上させることができることを示した。なお、揮発性メモリと不揮発性メモリ(以降、NVメモリ)を混載した環境において、要求時ページング(以降、ODP)処理を高速化する新たな実行ファイル形式(OFF2F: Object File Format consisting of 2 Files)を用いて、揮発性メモリに比べ、NVメモリはアクセス速度が低速であることを考慮した検討を進め、プログラムの実行時間を定式化し、NVメモリの低速なアクセス速度による実行時間の増加量とODP処理の高速化による実行時間の減少量を考慮することで、OFF2Fの性能を予測し、プログラム実行時間を短縮できることを示した。

計算機のサービスはプログラム処理により提供されているため、プログラム実行とファイル操作を高速化することは、利用者からみた計算機の性能を向上させることに直結する。

本研究では、実メモリを不揮発性メモリとし外部記憶装置を有しない計算機のオペレーティングシステム機能を研究し、データ複写を削減する新制御法の実現により、高速なプログラム実行制御法とファイル操作法を確立した。この技術により、従来にない新しい計算機の登場を可能にし、計算機の起動速度向上、サービス開始速度向上、およびWebサービス応答速度向上などにより利用者の利便性を大きく向上できると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Koki Kusunoki, Toshihiro Yamauchi, Hideo Taniguchi	4. 巻 LNNS 313
2. 論文標題 Physical Memory Management with Two Page Sizes in Tender OS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Networked-Based Information Systems, NBIS 2021, Lecture Notes in Networks and Systems	6. 最初と最後の頁 238-248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-84913-9_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 谷口 秀夫, 高杉 頌, 額田 哲彰, 佐藤 将也	4. 巻 vol.63, no.2
2. 論文標題 揮発性/不揮発性メモリ混載計算機での高速なプログラム実行を可能にする0FF2Fプログラムの性能	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 515-525
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田井 佑樹, 乃村 能成
2. 発表標題 eBPF を用いたパケットトレース機構の実現手法
3. 学会等名 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷口秀夫
2. 発表標題 NVMB型計算機における不揮発性メモリを活性挿抜するOS処理
3. 学会等名 電気・情報関連学会九州支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野謙介、山内利宏、谷口秀夫
2. 発表標題 Tenderにおける複数プロセスの性能調整入出力の調整精度の評価
3. 学会等名 第21回情報科学技術フォーラム (FIT2022) 講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田井佑樹、乃村能成
2. 発表標題 eBPFを用いたパケットトレーシングにおけるオーバーヘッドの評価
3. 学会等名 第21回情報科学技術フォーラム (FIT2022) 講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島谷 隼生,山内 利宏,谷口 秀夫,佐藤 将也
2. 発表標題 NUMA構成の計算機におけるメモリ操作速度に着目した評価
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム (FIT2021) 講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 額田 哲彰,佐藤 将也,山内 利宏,谷口 秀夫
2. 発表標題 擬似不揮発性メモリを用いたOFF2Fプログラムの評価
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム (FIT2021) 講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 里咲, 山内 利宏, 谷口 秀夫
2. 発表標題 Tenderにおける資源プール機能の選択利用方式
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム (FIT2021) 講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 額田 哲彰, 山内 利宏, 谷口 秀夫
2. 発表標題 揮発性/不揮発性メモリのアクセス速度差を考慮したOFF2Fの性能予測
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会講演論文集
4. 発表年 2022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
研究 分 担 者	乃村 能成 (NOMURA Yoshinari) (70274496)	岡山大学・自然科学学域・准教授 (15301)	

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