

令和 3 年 4 月 27 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11244

研究課題名(和文) 不揮発性メモリの特徴を生かした高速プログラム実行制御法の研究開発

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

研究代表者

谷口 秀夫 (TANIGUCHI, Hideo)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：70253507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)： 計算機システム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」であり、メモリ間のデータ複写、およびメモリと外部記憶装置間のデータ入出力がある。

本研究では、不揮発性メモリの「電源OFFでも保存データが消失しない」という本質的特徴に加え、揮発性メモリと同様に「読み込み速度は高速」「アクセス単位はバイト」である特徴を生かし、実行プログラムの「テキスト部は読み込みのみ、データ部は読み書きされる」という性質を考慮し、実行プログラムの新ファイル形式を考案してデータ複写を削減する新機構の実現により、高速なプログラム実行制御法を確立した。

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の実行により提供されているため、このプログラムの実行を高速化することは、利用者から見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、不揮発性メモリを利用し、実行プログラムの新ファイル形式を考案してデータ複写を削減する新機構の実現により、高速なプログラム実行制御法を確立した。この技術により、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が可能になり、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 an operating system is "copy", which includes data copying between memories and data input / output between memory and an external storage device. In addition to the essential feature that "stored data is not lost even when the power is turned off", the non-volatile memory has "high reading speed" and "access unit is bytes" like the volatile memory. On the other hand, the load-module program has the property that "the text part is read only and the data part is read and written". Therefore, in this research, taking advantage of these features and properties, a new file format for load-module programs was devised and a new mechanism to reduce data copying was realized, and a high-speed program execution control method was established.

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 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、メモリ間のデータ複写(欠点1)および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、あるいはスーパー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、計算機は、高速な処理実行(プログラム実行)を実現するために、メモリアクセス速度の向上を図ることが求められる。メモリアクセス機構が進歩しているものの、メモリアクセス速度が性能に与える影響は非常に大きい。過去に、磁性体メモリに代わり半導体メモリが登場し、メモリアクセス速度を向上させた。しかし、半導体メモリは、電源OFFとともに保存データが消失する揮発性メモリである。このため、電源OFF前にメモリ上のデータを外部記憶装置(磁気ディスク装置など)に格納する必要がある。当然のことながら、プログラム実行時には、外部記憶装置に格納したデータをメモリに読み込む必要がある。

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、まもなく登場が期待できる。揮発性メモリは、アクセス速度(読み書き速度)が高速であり、これまでの技術革新により大容量かつ低価格である。一方、不揮発性メモリは、ハードウェア構造やエネルギー効率の性質上、揮発性メモリに比べ、アクセス速度が低速である。特に、不揮発性メモリの読み込み速度は揮発性メモリと同等に向上する(特徴1)かもしれないが、書き出し速度の向上は難しく低速である。また、少容量かつ高価格である。したがって、メモリがすべて不揮発性メモリ搭載になる構成ではなく、揮発性メモリと不揮発性メモリが共存(環境)するメモリ構成のプロセッサ環境が、今後の主流になる。一方、不揮発性という共通の特徴を持つ外部記憶装置と比較すると、アクセス単位の面で大きな違いがある。外部記憶装置のアクセス単位はブロック単位であるのに対し、不揮発性メモリのアクセス単位は揮発性メモリと同様にバイト単位(特徴2)である。また、磁気ディスク装置(DK)やソリッドステートドライブ(SSD)といった外部記憶装置は、大容量、低価格および高耐久性である。したがって、今後の計算機システム構成のイメージとして、不揮発性メモリは、揮発性メモリと同様にメモリを構成する。外部記憶装置は、バス接続され、入出力装置の位置づけである。

一方、外部記憶装置に格納された実行プログラムの既存ファイル形式は、ひとつのファイルであり、主にヘッダ部、テキスト部、データ部、および関係情報部からなる。プロセッサのプログラム実行は、バイト単位アクセスでありアクセス速度が速いメモリ上にテキスト部とデータ部を用意し(外部記憶装置からメモリ上へ複写し)行われる。このとき、プログラムの実行は、テキスト部の読み込み、データ部の読み書きにより行われる(性質)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「揮発性メモリと不揮発性メモリが共存するメモリ構成、およびメモリとはアクセス単位が異なる外部記憶装置からなるシステム構成において、不揮発性メモリの特徴を生かし、実行プログラムの性質を考慮した高速なプログラム実行制御法を確立する」ことである。

不揮発性メモリの登場に向け、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開始されている。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」(メモリ間のデータ複写(欠点1)およびメモリと外部記憶装置間のデータ入出力(欠点2))を削減できず、プログラム実行を高速化できない(問題)。

これに対し、本研究は、不揮発性メモリの「電源OFFでも保存データが消失しない(本質的特徴)」という特徴に加え、揮発性メモリと同様に「読み込み速度は高速(特徴1)」「アクセス単位はバイト(特徴2)」である特徴を生かし、実行プログラムの「テキスト部は読み込みのみ、データ部は読み書きされる(性質)」という性質を考慮し、実行プログラムの新ファイル形式の考案、およびデータ複写を削減する新機構の実現により、既存の研究では解決できない問題(プログラム実行を高速化できない)を解決する。

3. 研究の方法

本研究では、実行プログラムの新ファイル形式の考案し実現評価、および新ファイル形式を用いてデータ複写を削減する新機構の実現評価を行った。

(1) 実行プログラムの新ファイル形式の考案：実行プログラムの性質(テキスト部は読み込みのみ、データ部は読み書き)を考慮したファイル形式は、格納する不揮発性メモリと外部記憶装置(DKおよびSSD)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。さらに、不揮発性メモリの搭載量を抑制できるものとした。

(2) 新ファイル形式を用いてデータ複写を削減する機構の実現：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。機能

の設計と実現および評価により、既存のシステムへの効果を定量化した。

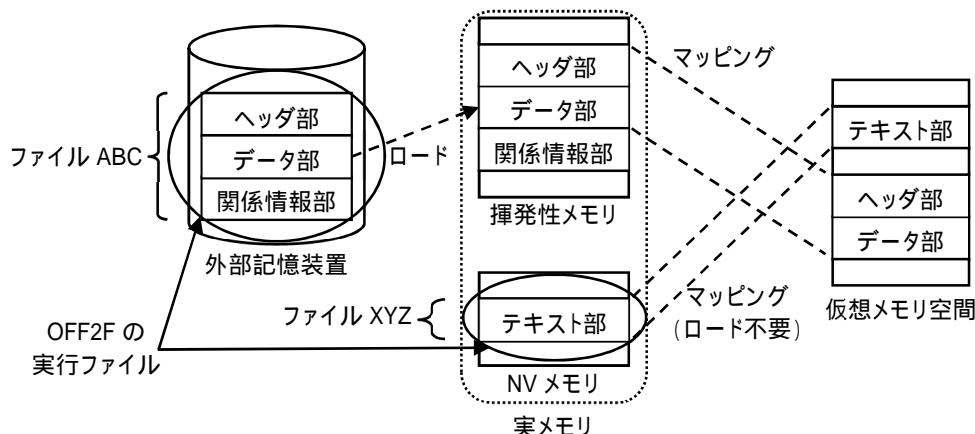
(3) 実現評価環境の構築：不揮発性メモリの研究が進んでいるものの、まだ実用計算機としては登場していない。このため、先ず既存計算機を用いて不揮発性メモリを搭載した計算機環境のシミュレート環境を構築し、実装評価した。

4. 研究成果

本研究の主な成果を以下に述べる。

(1) 実行プログラムの新ファイル形式の考案

新たな実行プログラム形式として、下図に示すような OFF2F(Object File Format consisting of 2 Files)を提案した。実行プログラムの性質(テキスト部は読み込みのみ、データ部は読み書き)を考慮したファイル形式であり、格納する不揮発性メモリと外部記憶装置(DKおよびSSD)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)でもあり、さらに不揮発性メモリの搭載量に依存しないことも考慮した形式である。



(2) 新ファイル形式を用いてデータ複写を削減する機構の実現

新たな実行プログラム形式 OFF2F について、データ複写を削減する機構を考案した。

(3) 新ファイル形式 (OFF2F) の有効性評価

ページ例外処理の処理時間の定式化と分析を行った。また、FreeBSD オペレーティングシステムの主要なコマンドプログラムや OS 初期化処理およびプログラム圧縮処理について、実行するプログラムを明らかにし、ページ例外処理の処理時間を明確に(数値化)することで、新ファイル形式の有効性を明らかにした。

(4) 実現評価環境の構築 (疑似不揮発性メモリ環境の構築)

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。また、その性能は不十分であり、かつ高価格である。このため、既存計算機を用いて不揮発性メモリを搭載した計算機のシミュレート環境を構築した。具体的には、揮発性メモリの一部を OS が使用しないメモリ(OS 管理外のメモリ)とし、電源を OFF しないで OS 再移動により、OS 管理外のメモリを不揮発性メモリとして疑似するものである。

(5) 疑似不揮発性メモリ環境を用いた新ファイル形式 (OFF2F) の有効性評価

疑似不揮発性メモリ環境を用いて、FreeBSD オペレーティングシステムのいくつかのコマンドプログラム作成処理や OS 作成処理について、測定環境を構築し、実測し、実行プログラムが ELF のプログラムに比べ OFF2F のプログラムは高速なプログラム実行が可能であることを明らかにした。

上記の述べたように、本研究期間では、新ファイル形式を用いてデータ複写を削減する新機構を実現し、不揮発性メモリを搭載した実用計算機における実装と評価を行い、技術確立することができた。また、本研究の成果として、論文誌(査読あり)2件、国際会議(査読あり)1件、査読無しの国際会議や国内発表会19件、合計22件の公表を行った。

今後は、不揮発性メモリのさらなる技術進歩および関連ハードウェア技術の進歩が期待できる。このため、本研究が想定した計算機の実メモリが揮発性メモリと不揮発性メモリが混載した環境だけではなく、計算機の実メモリは不揮発性メモリのみでありかつ磁気ディスク装置や SSD といった外部記憶装置を有しない計算機の実現が可能になる。そこで、このような計算機の基盤ソフトウェアの研究開発が必要である。この点については、研究課題「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」(基盤研究(C)、令和3年度~令和5年度)で研究を遂行する。

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 Masaya Sato, Hideo Taniguchi	4. 巻 vol.9, no.4
2. 論文標題 OFF2F: A New Object File Format for Virtual Memory Systems to Support Volatile/Non-Volatile Memory-Mixed Environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Learning and Computing	6. 最初と最後の頁 pp.387-392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18178/ijmlc.2019.9.4.815	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, 佐藤将也, 河辺誠弥, 横山和俊	4. 巻 vol.61, no.3
2. 論文標題 COW機能を考慮したOFF2Fプログラムのページ例外処理の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 pp.707-717
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20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 谷口 秀夫
2. 発表標題 外部記憶装置を有しない不揮発性メモリ搭載計算機とオペレーティングシステム
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾 尚, 田辺 雅則, 横山 和俊, 谷口 秀夫
2. 発表標題 入出力性能調整法の調整制度向上法
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高杉 頌, 額田 哲彰, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 擬似不揮発性メモリを用いた実行時のプログラム読み込みに着目したOFF2Fの評価
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠 恒輝, 山内 利宏, 谷口 秀夫
2. 発表標題 Tenderにおける資源「実メモリ」の機能拡張の実現
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 額田 哲彰, 高杉 頌, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 FreeBSDのコマンド実行時におけるOFF2Fプログラムのページ例外処理時間の予測評価
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 額田 哲彰, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 OFF2Fにおけるページ例外回数に着目したページ例外処理時間の評価—OSカーネル作成処理—
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口 秀夫
2. 発表標題 不揮発性メモリ品型計算機用オペレーティングシステムの提案
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島谷 隼生, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 クラウドコンピューティングを支える仮想計算機技術の性能分析
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高杉 頌, 額田 哲彰, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 揮発性/不揮発性メモリ混載計算機において実行プログラムを分散配置する0FF2Fプログラムの性能評価
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 優也, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 マルチコアAnTを用いた処理分散効果の比較
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高杉 頌, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 擬似不揮発性メモリを用いたOFF2Fプログラムの実行方式
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 雅大, 山内 利宏, 谷口 秀夫
2. 発表標題 不揮発性メモリを利用したTender における動作継続制御の実現
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高杉 頌, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 擬似不揮発性メモリを用いたOFF2Fプログラムの実行性能の評価
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Takasugi, Masaya Sato, Hideo Taniguchi
2. 発表標題 OFF2F Program Execution Using Pseudo Non-Volatile Memory
3. 学会等名 Bulletin of Networking, Computing, Systems, and Software (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 額田哲彰, 佐藤将也, 谷口秀夫
2. 発表標題 OSカーネル作成処理におけるページ例外に着目したOFF2Fの効果予測
3. 学会等名 情報処理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口秀夫
2. 発表標題 OFF2Fプログラムのページ例外処理におけるCoW機能を考慮した評価
3. 学会等名 第17回情報科学技術フォーラム (FIT2018) 講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口 秀夫, 佐藤 将也
2. 発表標題 CoW機能を考慮したOFF2Fプログラムのページ例外処理の評価
3. 学会等名 平成30年度 (第69回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河辺 誠弥, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 FreeBSDの初期化処理におけるページ例外に着目したOFF2Fの効果予測
3. 学会等名 コンピュータシステム・シンポジウム (ComSys2018) 論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Sato and Hideo Taniguchi
2. 発表標題 OFF2F: A New Object File Format for Virtual Memory Systems to Support Volatile/Non-Volatile Memory-Mixed Environment
3. 学会等名 2018 IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高杉 頌, 佐藤 将也, 谷口 秀夫
2. 発表標題 OFF2F実行のための擬似不揮発性メモリの提案
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019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
---------	---------