

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：62615

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540028

研究課題名(和文) 不揮発性メモリによるソフトウェアへの影響と対策に関する研究

研究課題名(英文) Study on System Software with Non-volatile Memory

研究代表者

佐藤 一郎 (Sato, Ichiro)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：80282896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：不揮発性メモリ技術が急速に進んでおり、不揮発性メモリを主記憶とするコンピュータの登場も想定されるようになってきている。主記憶の不揮発性化は、ハードウェアだけでなく、ソフトウェア、特にOSやミドルウェアにも抜本的な変化をもたらす。しかし、それを想定した研究は皆無といっていい。本研究は主記憶等に不揮発性メモリを利用したコンピュータにおける、ソフトウェアへの影響を調査・評価していく。OSやミドルウェアを中心に主記憶の不揮発化で不要となる技術、逆に有効になる技術を調べていく。そして不揮発性メモリを想定した新しいデータ管理記述及びトランザクション手法を明らかにする。

研究成果の概要(英文)：Non-volatile memory (NvMEM) technology has progressed rapidly. In near future, we should expect main memories in computers become non-volatile. Non-volatile main memory can result in about fundamental changes in software, in particular OS and middleware systems, e.g., database systems as well as hardware in computers. However, there have been a very few works to support software-level changes result from non-volatile main memory. This work investigates changes at computers when their main memories become non-volatile. For example, by non-volatile main memory in the database, to be secondary storage as well persist any data in the main memory, explicit persistence processing is not required. In addition, to find out changes in non-volatile main memory at servers, e.g., OS-level and database-level affections, including new data control entry and transactions.

研究分野：システムソフトウェア

キーワード：不揮発性メモ OS データベース ノーマリーオフコンピューティング トランザクション

1. 研究開始当初の背景

不揮発性メモリ、例えば MRAM(磁気抵抗変化メモリ)は商用生産が始まっており、それ以外の不揮発性メモリ方式に関しても、サンプル出荷が始まっている。一方でこれまでコンピュータの主記憶で使われてきた DRAM は半導体微細化の限界に加えて、メモリ情報を維持するためのリテンション電流などの消費電力が問題となり、将来的にはコンピュータの主記憶が DRAM から不揮発性メモリへの移行は視野に入れておくべき段階にきている。主記憶の不揮発性化メモリはコンピュータに抜本的な変化をもたらす、その影響はハードウェアはもちろん、ソフトウェアにも及ぶことが想定される。しかし、その主記憶の不揮発性化の影響に関する研究、さらに不揮発性主記憶を想定した新しいソフトウェア技術に関する研究は皆無となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、主記憶の不揮発性化によるソフトウェアへの影響を体系的に調査することを目的とする。具体的には主記憶の不揮発化の影響が大きいと想定される OS とデータベースについて、その機構及びコードがどのように変化していくかを調査する。

3. 研究の方法

多様かつ未知の変化に対応するには、従来の不揮発メモリを主記憶とするコンピュータにおけるソフトウェアへの影響に関する研究が皆無であることを鑑み、その影響を調査することとなるが、ここでは単にアクセス速度の遅い二次記憶を不揮発性メモリに置き換えるのではなく、不揮発性メモリの特長を使うことで、OS やデータベースの動作原理や基本アルゴリズムを見直し、その見直しを通じて性能や信頼の抜本的な向上ができるかを調べた。

例えばデータベースシステム(DBMS)の根幹であるトランザクションでは、ACID 性質、つまり原子性 (Atomicity)、一貫性 (Consistency)、独立性 (Isolation)、永続性 (Durability) が不可欠とされる。その一つ、永続性は、トランザクションがコミットした時点で、その結果は二次記憶に書き出されて永続的になることだが、主記憶が不揮発性になると、主記憶上のデータはそのまま永続化されたデータとなる。これは永続化のための操作が不要または大幅に簡素化されることとなる。また、本研究ではデータベースだけでなく、OS における影響も調べた。その方法は OS 及びデータベースの基本機能からトップダウンに調べていく方法と、オープンソースの OS 及びデータベースのソースプログラムからダウンアップに調べていく方法のふたつで行った。

4. 研究成果

ここでは OS とデータベースに分けて、本

研究から得られた知見をまとめておく。

【OS における変化】コンピュータの主記憶が DRAM から不揮発性メモリに変わると、主記憶中の編集中の文書や表は電源が切れても失われなくなる。その場合、ユーザやアプリケーションが、主記憶上の文書や表などのデータを補助記憶装置にセーブする必要はないといえる。それ以外にも OS レベルの変化が予想される。

例えば、主記憶が不揮発性メモリになった場合、主記憶、ハードディスク、SSD などの補助記憶装置には機能的な違いはなくなる。唯一の違いは、主記憶で利用される不揮発性メモリはハードディスクや SSD と比較して、高速アクセスであることと、容量が少ないことになる。このため、当面の処理に使わない大量データを保管する目的に補助記憶を引き続き利用することが想定されるが、それでも OS からみた主記憶や補助記憶装置の取り扱い、DRAM などの揮発性メモリによる主記憶の場合は異なってくる。容量やアクセス速度で差があるものの、機能が同じならば、いまの OS のように主記憶と補助記憶装置を区別する必然性はなくなり、むしろ機能が同じならば統一的に利用できる方がよい。現状、主記憶を不揮発性メモリとする計算システムはないことから、本研究では類似した前例を調査していった。その前例として重要なものが、単一レベル記憶 (Single-level store) であることがわかった。単一レベル記憶はミニコン (IBM AS400) 向けに 1980 年代に導入された技術であり、単一レベル記憶をサポートした OS はアプリケーションに対して、主記憶装置と補助記憶装置の区別をせず、一つのアドレス空間でアクセスできるようになる。こうした技術は主記憶の不揮発化により再び脚光を集める可能性が高い。

また、OS が提供する仮想記憶への影響も調査した。仮想記憶のスワップ方式は Write-through 方式と Write-back 方式に大別されるが、主記憶が不揮発になると Write-back でもデータは失わないようにすることができるために、Write-through 方式を利用する積極的なメリットはないことなどがわかった。

また、不揮発性メモリは、DRAM と比べてメモリ情報を保持するためのリフレッシュ電流が不要となるという特徴がある。これは必要時以外は電源を切る (ノーマリーオフコンピューティング) が実現できることを意味することから、ノーマリーオフコンピューティングを実現するための OS の技術要件を明らかにした。具体的には不揮発化されたメモリの内容を次の起動時に活かす手法と、不揮発化されない範囲、例えばプロセッサ内レジスタとキャッシュメモリの内容の待避手法があげられる。前者の手法に関しては、主記憶状の情報をメモリ番地だけで管理している場合、再起動時にプロセスなどが同じ番地に割り当てられるとは限らない。このため OS

内のメモリ管理テーブルをもとに、再起動後にはプロセスの配置を停止前にあわせる必要がある。ただし、プロセスへのメモリ割り当ては変動するため、単純に主記憶内の情報を利用すればいいとは限らない。また、後者の手法に関しては、キャッシュは Write-through 方式の場合は、停止時にそのまま破棄してもいいが、Write-back 方式の場合は、キャッシュ内のデータを対象となる主記憶や I/O に書き出すか、そのデータを主記憶状などに待避する必要がある。レジスタ内の情報についても停止時に待避する必要があることがわかっている。

なお、OS はノーマリーオフコンピューティングを考慮していない。このため様々な不整合が生じる。例えば、昨今の OS (Windows や Unix、Linux を含む) は、マルチタスクスケジューリングと呼ばれる機能を提供しているが、これは複数のプログラムを一つひとつ、例えば数十ミリ秒程度の時間だけ、少しずつ実行していくことで、同時に複数の処理が動いているように見せかける技術であり、OS の基本機能となっている。しかし、こうしたマルチタスクスケジューリングはコンピュータがノーマリーオンを前提にしている。ノーマリーオフをした場合、電源のオン/オフの切り替えによって、複数プログラムの実行はより断続的なものになる。さらにタスクに割り当てられる実行間隔よりも、電源のオン/オフの切り替えの方が早い可能性がある。そうすると電源オンの度にタスクを切り替える仕組みが望まれる可能性がある。

【データベースにおける変化】従来のデータベースはデータ操作を DRAM による主記憶上で行い、そのとき更新があったデータを永続化するために補助記憶装置に書き出す。一般に補助記憶装置への書き出しはコストが重いことから、既存のデータベースは、当然の電源オフに備えつつ、データの書き出しによるデータ処理の中断を最小化するための各種処理を導入している。その代表は更新データを補助記憶装置への書き出すのを処理が負担が少ないタイミングまで遅らせつつ、更新ログ (Write Ahead Log など) を補助記憶装置への書き出すことで、当然の電源オフに備えつつ、データの書き出しによるデータ処理の中断を最小化している。こうした補助記憶装置への書き出し処理は性能と永続性を両立するためにデータベースのコード量のなかで多くを占めていることが知られている。さて主記憶が不揮発性の場合、操作中のデータは仮に電源オフでもデータが消失しないことになり、補助記憶装置への書き込みは不要になる。前述の ASID 性質の Isolation に相当する機能を明示的に行う必要がなくなる。これ自体はデータベースの機能を増やすわけではないが、トランザクションをはじめとするデータベースの他の処理も簡素化の予知を生む。一般にソフトウェアはコードが簡素化されると処理が早くな

ることから、データベースの実装は単純化されて、それにともない実行も早くなることが予想される。本研究では MySQL と PostgreSQL のソースコードのうち、前者が 3 割、後者が 4 割程度が当該処理であることを考えると、必ずしもコード量と処理コストは比例しないが、データベースの高速化が期待できる。

ただし、既存のデータベースでは、再起動後にそのデータを利用する場合はログなどを前提にしているが、そのログを利用しなくなると、処理中データに関しては再起動後の利用が困難となることも予想される。このため、何らかの属性情報を導入する必要があり、本研究では、既存のログに加えて、ファイルシステムにおけるジャーナリング機構を主記憶上に導入する方法を検討した。これは各データベースが処理中のデータをどのように管理しているかが多様であり、定量的に分析することは不可能であるが、データにして付加情報が増える分だけ性能が劣化することが予想される。

ところで、主記憶の不揮発性による問題も調査した。そのひとつはセキュリティである。コンピュータの電源を切っても情報が消えないことは、メモリ内情報の漏洩可能性が高まる。このため二次記憶と同様にデータを暗号化して保持するなどの工夫も必要となるだろう。

また、主記憶の不揮発性はウイルス感染を避けることを可能にするかもしれない。いまのコンピュータは、ワープロソフトや表計算ソフトなどのプログラムコードは補助記憶装置に格納される。OS はアプリケーションのプログラムコードを補助記憶装置から主記憶に読み込み (ロード) アプリケーションを実行する。しかし、主記憶が DRAM の場合、電源オフになればアプリケーションは消えるために、電源オンとなり、再びアプリケーションを実行する場合には OS はまたアプリケーションのプログラムコードをロードすることは必須となる。しかし、主記憶が不揮発性メモリの場合は大きな変化が予想される。コンピュータの工場出荷時、何らかの方法で OS やアプリケーションを主記憶にロードしておけば、電源を切っても主記憶からは消えない。いささか極論であるが、OS からプログラムコードをロードする機能自体をなくしてもいい。この場合のメリットは、プログラムコードを主記憶にロードする機能がなければ、悪意をもつプログラムコードをロードすることもないので、そうしたコードを実行する必要もなくなる。コンピュータウイルスなどに感染する可能性を排除できることにある。なお、この場合、OS の再起動やアプリケーションの追加・削除はメーカーでの修理扱いが適切となるかもしれない。

さて現在、主記憶として利用される DRAM は半導体の微細化が原理的な限界を迎えるのは近く、主記憶は DRAM 以外、例えば不揮発性メモリを利用する状況は十分に想定さ

れる。本研究はそれを前提にその影響を調べた。なお、他のコンピュータ技術の多くがそうであったように、主記憶といきなり不揮発性化するのではなく、段階的に進む可能性もある。つまり、主記憶中の一部が DRAM となり、それ以外が不揮発メモリとなる、ハイブリッドな状況である。その場合は不揮発化のメリットの多くを享受できないが、一方でデータベースの高速化など性能面では大きな効果が期待できる。

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 1 件)

1. Ichiro Satoh: "Lessons Learned from Context Aware Service Experiences in the Real World," *Procedia Computer Science*, Vol.56, pp.441-446, 2015.(査読有り)

[学会発表](計 4 件)

1. Ichiro Satoh: "Edge Data Processing," 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINA 2016), pp.410-415, 2016 年 3 月 23 日, Crans-Montana (Switzerland)
2. Ichiro Satoh: "A Data Processing Framework for Distributed Embedded Systems," 9th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (IDC'2015), pp.199-209, *Studies in Computational Intelligence* 616, Springer 2016, 2015 年 10 月 8 日, Guimarães (Portugal).
3. Ichiro Satoh: "MapReduce Processing on IoT Clouds. CloudCom," IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom 2013), pp.323-330, 2013 年 12 月 4 日, Bristol (United Kingdom).
4. Ichiro Satoh: "Adaptive Distributed Systems with Cellular Differentiation Mechanisms," International Conference on Nature of Computation and Communication (ICTCC 2014), pp.171-180, 2014 年 11 月 24 日, Ho Chi Minh City (Vietnam).

[図書](計 0 件)

[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

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 一郎 (SATO, Ichiro)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学

研究系・教授

研究者番号:80282896

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし