

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560456

研究課題名(和文)フラッシュメモリに対する情報符号化方式

研究課題名(英文)Coding Scheme for Flash Memory

研究代表者

梶 勇一(KAJI, Yuichi)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70263431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：フラッシュメモリにおける情報記録のための符号化方式について研究を行った。フラッシュメモリを構成する素子は、その使用に伴って特性が劣化するため、安直な方式で情報記録を行うと、製品寿命を短縮する可能性がある。フラッシュ符号は、情報理論で長く研究されてきたWOM符号の一種であり、フラッシュメモリの素子の消耗を極力回避するような情報表現形式を与える符号化方式である。本研究では、代表的なフラッシュ符号であるILIFCの性能について解析的に評価するとともに、ILIFCよりも優れた特性を持つフラッシュ符号の構成法を何通りか開発した。

研究成果の概要(英文)：This is a study to investigate a coding scheme for flash memory. Flash memory consists of many cells but the cells are "worn out" as they experience many electric operations. This means that naive use of flash cells can shorten the life-time of a flash memory product. A flash code, which is a variant of WOM codes, gives a clever means for data recording in flash memory and contributes to extend the life-time of flash memory. This study has analyzed the performance of ILIFC, which is a widely recognized benchmark flash code, and developed several flash codes that have superior performances and characteristics than ILIFC.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：フラッシュ符号 フラッシュメモリ 記録素子用符号化 ランダムウォーク理論 WOM符号

1. 研究開始当初の背景

フロッピーディスクや固定ディスク装置の代替として、動作速度や耐衝撃性に優れたフラッシュメモリを用いた記憶装置が広く普及しつつある。フラッシュメモリは、従来の磁気記録装置とは全く異なる特性を持つ装置であり、その性能を最大限に利用するためには、装置の特性に適應した方式によって情報を記録することが望ましい。

フラッシュメモリにおけるデータ記録において最も特徴的なのは、セルと呼ばれる記録素子に対する操作の一方性である。フラッシュメモリでは、セルと呼ばれる記録素子に電荷を蓄えることで情報を記録する(図1)。適当なモデル化のもとで、1個のセルは0から $q-1$ のいずれかの整数値(q は2, 4, 8といった小さな値)を取ると考えることができる。ここで特筆すべきは、セルの値を増やすことは自由に行える反面、セル値を減らすことには非常に大きな制限があるということである。実際、セル値を任意に下げることができず、消去ブロックと呼ばれる範囲に含まれる $2^{18} \sim 2^{20}$ 個のセル値を同時に0にリセットする形でしか、セル値を下げるできない。ブロック消去と呼ばれるこの操作は回路にとって強い電気的ストレスとなり、セル性能の劣化を引き起こすため、一定回数以上ブロック消去に晒されたセルは、情報記録に適さない不良セルとなる。すなわち、セルの寿命は有限であり、限られた回数の操作しか受容することができない。このため、フラッシュメモリの利用においては、データをそのままセル値として記録するのではなく、セルの消耗を極力回避できるようなデータの表現方法を考えることが必要となる。この種の符号化方式はフラッシュ符号と呼ばれ、既にいくつかの先行研究も見られるものの、まだ十分な検討がなされていない研究分野である。

2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、フラッシュ符号の性能を決定する要因について検討を行うとともに、実際に性能の良いフラッシュ符号を構成する方式を確立することである。

(1) 研究着手時点における代表的なフラッシュ符号として、Index-Less Indexed Flash Code (ILIFC) が Mahdavifar らにより提案

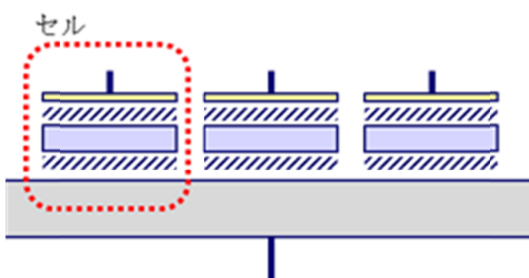


図1 フラッシュメモリのセル構造

されていた。ILIFCでは、それまでのフラッシュ符号で必要であったインデックス記録の仕組みを省略することが可能となっており、Jiang らにより提案された符号よりも優れた性能を発揮することができる。ILIFCの最悪時性能については、Mahdavifar らの論文で明らかにされているが、その平均性能については実験的にしか評価することができず、また、その実験結果も、きわめて複雑な現象を示すものとなっていた。優れたフラッシュ符号を開発するにあたっては、どのような要因が符号性能に影響するのかを明確にする必要がある。そこで本研究では、ILIFCの動作を数理的に解析することを第一の目標に設定する。

(2) ILIFCの動作に関する理解が進むにつれて、より良い符号の設計指針が得られるものと期待される。予備的な実験により、ILIFCにおける「スライス」と呼ばれる構造を小さくすることにより、符号性能の改善が見込まれることが明らかになっている。ただし、安直にスライスを小さくしてしまうと、一意復号可能性等、符号に求められる基本的な要件が損なわれてしまう可能性がある。小さなスライスに適した符号化方式を新たに開発し、その性能を評価することが本研究第二の目的である。

(3) 一方、ILIFCのように、複数のスライスを用いてフラッシュ符号を構成することは、あまたある符号構成の一つの選択肢にしか過ぎないとも考えることもできる。スライスを全く用いない仕組みや、スライスと他の構造を組み合わせる仕組み等についても検討を行う必要があると認識している。多様なアプローチからフラッシュ符号の構成を検討することで、スライスを利用することの得失を明らかにし、さらには、スライス型フラッシュ符号よりも優れた符号化パラダイムを確立することも、本研究の目的の一つである。

3. 研究の方法

前節で述べた3つの研究目的を達成するため、以下の方法で研究を進めることとした。

(1) 研究着手年度である平成23年度には、ILIFCの性能解析に注力する。ILIFCは、フラッシュ符号に関する研究においてベンチマーク的に利用されることも多く、ILIFCの特性を明らかにすることは、他の研究者にとっても有用で有益であると判断したためである。性能の解析にあたっては、実験的なアプローチだけに頼るのではなく、ILIFCの持つ数理的な構造を適切に確率モデルにより表現することを考える。予備的検討において、ランダムウォークモデルを用いれば、ILIFCにおけるセル利用の様子を適切にモデル化できる可能性があることを確認しているが、その検討を詳細化、具体化し、得られたラン

ダムウォークモデルについての解析を試みる。

(2) 性能の良いフラッシュ符号の開発については、2 年目、3 年目にあたる平成 24,25 年度に実施する。ただし、スライススペースの符号構成については、研究計画を検討する段階で予備的な実験等も行っているため、平成 23 年度中であっても、出来る範囲で検討を進めておく。具体的な符号の構成に関連し、スライスサイズを半減させるための符号化技術については、ある程度の見込みが立っているが、さらなる性能改善のためには、スライスサイズをさらに小さくするための方策を検討しなければならない。スライス内の符号化方式については工夫の余地が少ないため、消去ブロック内の位置情報を活用する等、従来の視点からは十分検討できていなかったアイデアに基づいて符号の開発作業を進めることとする。一方、スライスだけに頼らない符号の構成法としては、一般的な WAM 符号 (Write Asymmetric Memory 符号) の各種構成等も参考とし、検討を進めていくことを予定している。ただし、本研究で対象とするのは、実用的なパラメータを持つ優れたフラッシュ符号の構成であるため、過度に漸近的な議論とならないよう、十分配慮して研究を進める必要がある。

4. 研究成果

(1) 主として雑誌論文[4]に関する内容

ILIFC は、異なった符号化技術を利用する 2 つの符号化ステージにより実現されるフラッシュ符号である。第 1 ステージにおいて利用される符号化技術は、多数のセルが利用できるような環境で有効に作用する反面、記録ビット数に比べてセル数が少ない場合は、そもそも動作しないと言う欠点を有する。一方、第 2 ステージで利用される符号化技術は、セル数に比例するだけのオーバーヘッドを必要とする特徴があるため、多数のセルがある場合は性能が劣る反面、セル数が少ない場合は、それなりに効率的に動作する。ILIFC では、まず第 1 ステージの符号化を行って大多数のセルを消費し、第 1 ステージの符号化が機能しなくなった時点で第 2 ステージに移行することを行う。ただし、第 2 ステージに移行するためには、あらかじめ決められた個数のセルを事前に取り分け、データ記録に用いないよう保護しておく必要がある。すなわち、第 2 ステージを利用すること自体にオーバーヘッドが発生するため、本当に第 2 ステージを利用することが効果的なのかどうか、明確ではなかった。本研究では、最初に第 1 ステージ、第 2 ステージの最悪時計算量を詳細に評価し、第 2 ステージを採用することが、場合によっては性能劣化につながることを確認した。これより、ILIFC を利用する際には、第 1 ステージだけに限定して符号化を行うことが十分実用的であることが明らかとなった。

さらに本研究では、第 1 ステージにおける符号化技術の平均時性能を解明した。ILIFC における第 1 ステージの符号化では、スライスと呼ばれるセル単位を操作することで符号化が実現され、スライスがすべて尽きた時にブロック消去 (または第 2 ステージへの移行) が発生することとなる。したがって、スライスの使用状況をモデル化し、解明することができれば、ブロック消去が発生するまでの操作数を見積もることができ、符号の性能を評価することが可能となる。この問題にアプローチするため、本研究では、多トークンの環状ランダムウォークモデル (図 2) を導入し、同モデルの振る舞いについて、数学的な解析を行った。単純なランダムウォークモデルでは、1 個のトークンが線上に連結されたスペース間を移動するようなケースを考へることも多いが、消去ブロックに多ビットを記録する ILIFC をモデル化するにあたっては、トークンの個数を複数に拡張する必要がある。さらに、セル値が飽和したスライスが放棄され、新しいスライスを利用して符号化が継続される様子を表現するためには、スペースを環状に結合し、トークンが元の場所に帰還する構造を表現する必要がある。多トークン・環状ランダムウォークモデルの振る舞いについて、統計数学の諸結果を活用して解析を行った。2 つのシナリオ (漸近的なシナリオと非漸近的なシナリオ)、2 つのデータ操作モデル (一様データ更新と非一様データ更新) を考へ、 $2 \times 2 = 4$ つの異なる状況での ILIFC の性能解析に成功した。

(2) 主として学会発表[6]に関する内容

ILIFC (の第 1 ステージの符号化) においては、更新回数の多いデータビットに対して、より多くのスライスが割り当てられるよう符号が構成されている。ただし、特別なインデックス管理の仕組みを導入せずに各スライスでデータ表現を行うため、スライスに含まれるセルの個数 (これをスライスの大きさと呼ぶ) は、データビット長と等しくする必要がある。たとえばデータビットが k ビットの大きさである場合、1 個のスライスは k 個のセルを含んでいる必要がある。データの各ビットに 1 個以上のスライスを割り当てる必要があるため、結局 $k \times k = k^2$ 個のセルが消去ブロック内に存在することが前提条件とし

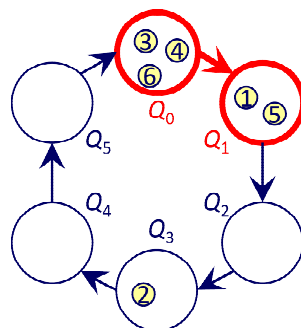


図 2 ランダムウォークモデル

て必要になる．逆にいうと，たとえセルが n 個あったとしても \sqrt{n} ビットのデータしか記録することができず，非常に低レートの符号化しかできないという問題が発生する．また，一度データビットに割り当てられたスライスは，他のデータビットに割り当て直すことはできないため，あるスライス中に多数の未使用セルが残っていたとしても，ブロック消去の実行を余儀なくされる事態も多発してしまう．

これらの問題を解決する一つの方法は，スライスのサイズを小さく設定することである．しかし，単純にスライスを小さくしてしまうと，スライス自身にインデックス情報を記録すると言う ILIFC の最も本質的な特性が損なわれてしまい，うまく機能しないことになる．そこで本研究では，スライス内の符号化方式を2種類用意し，2種類のスライスを消去ブロック内で使い分けることで，スライスサイズを削減する手法について検討を行った．最初に検討した方式は，消去ブロックの左右端からスライスの利用を行い，左部分のスライスはデータの前半 $k/2$ ビットを，右部分のスライスはデータの後半 $k/2$ ビットを表現する方式である．1個のスライスが表現しなければならぬビット幅が半分になるため，スライスの大きさを ILIFC の半分に設定することができる．ブロックの左側と右側とを分離するため，新たに導入したスライス内符号化方式を利用する．これにより，ほとんどオーバーヘッドを伴うことなく，符号の適用可能範囲が拡大し，また，セルの有効利用が可能となった．

さらに，ブロックを左右に2分するのではなく，より一般的に， m 個の部分ブロック(パーティション)に分割して符号化を行う方式を検討した．この方式では，最初のパーティション分割は等分に行うが，あるパーティションでスライス数が足りなくなった場合は，隣接する他のパーティションを利用する対応を取る．これによって消去ブロックの延命が可能となり，フラッシュ符号の性能を格段に向上させることができる

(3) 主として雑誌論文[1]に関する内容

前項(2)では，スライスのサイズを縮小することで，フラッシュ符号の性能を改善することを試みた．その結果，符号化率の改善お

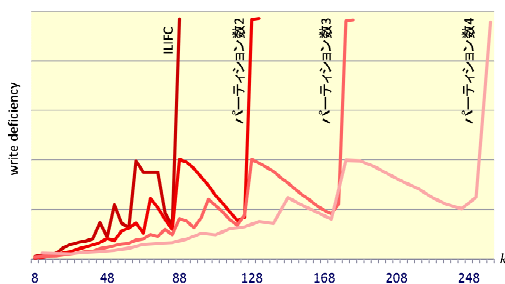


図 3 提案符号の性能評価

よびパフォーマンスの向上を実現することができたが，パーティションの数を増やしていくと，最悪時の性能が劣化していくという副作用が生じることが明らかとなった．最悪時のシナリオが発生する確率は非常に小さいため，最悪時性能の劣化が平均性能に及ぼす影響は比較的小さいが，スライスサイズを縮小するという単一の方策に頼るだけでは，遠からず性能が頭打ちになると予測される．スライスだけに頼らない符号の設計方式や，そもそもスライスを全く使わない符号の設計方式等，より広い範囲に目を向けてフラッシュ符号の開発を行う必要がある．そのような試みの一つとして，本研究では，スライスを個別に利用するのではなく，いくつかのスライスをとりまとめてデータ記録に資する方式を検討した．

本研究で提案した可変クラスタフラッシュ符号では，1個以上の連続するスライスでもって1個のクラスタを構成し，各クラスタがデータの1ビットの値を表現する．クラスタの先頭スライスは，そのクラスタのインデックス値を表現するのに利用されるが，ILIFC のような1進数的表現でインデックス値を表現するのではなく，2進数的表現によりインデックス値を表現するところが，提案手法の特徴である(図4)．これによりスライスサイズを $\log k$ まで削減することができるため，前述のパーティションを用いる方式よりもさらなる性能改善が可能となる．

(4) 上記以外の研究成果について

以上で紹介した以外にも複数の重要な結果が得られおり，そのうちいくつかについては，現在発表準備を進めているところである．

たとえば，学会発表[4]では，スライスをを用いた符号化の仕組みと，まったくスライスをを用いない符号化の仕組みが相補的に働くような符号化方式を検討している．性能指標だけを比較すると，可変クラスタ方式のほうが優れている場合もあるが，このハイブリッド方式の最大の特徴は，非常に高い符号化率を実現できるという点にある．技術的な詳細については省略するが，平均性能に関する解析についてもある程度見通しがたっており，今後，論文雑誌等への投稿を行う予定である．

さらに，まだ採録が決定していないため，次節等の記述には記載していないが，可変クラスタ方式に近いアイデアに基づく符号の

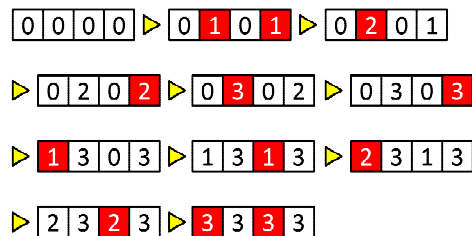


図 4 binary indexed スライス符号

設計方式について、継続して検討を行っている。まだ予備的な結果しか得られていないが、記録データのビット長を大きくしたときの性能劣化がきわめて限定的である現象が確認されている。これまで提案してきた各符号を超える優れたフラッシュ符号となる可能性を秘めた方式であり、今後、具体化と詳細化を進めていく予定である。

(5) 研究成果の普及活動について

フラッシュ符号に関する研究は、理論的に興味深いというだけでなく、現在進行形で発展しつつあるフラッシュメモリ装置の性能改善にも直結する実用的な研究である。本分野の研究を継続的に進展させていくためには、より多くの研究者の参入が待たれるところである。そこで本研究の期間中は、専門的な学会で研究成果を披露するだけでなく、近接する研究分野の研究者や学生に対し、できるだけ多く研究を紹介するよう心がけた（たとえば学会発表[5,7]など）。

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 4 件)

- [1]. M.J. Tan, Y. Kaji, Flash Code Utilizing Binary-Indexed Slice Encoding and Resizable-Clusters, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E96-A, pp.2360-2367, 2013. 査読有
- [2]. 鈴木孝明, 野田潤, 久保祐樹, 八百健嗣, 榎勇一, 省電力センサネットワークの開発・導入と社会への展開, 情報処理学会デジタルプラクティス, 4, pp.352-360, 2013. 査読有
- [3]. R.F. Mejia, Y. Kaji, H. Seki, Error Control for High-Density Monochrome Two Dimensional Barcodes, IPSJ Transactions on Databases, 5, 2, pp.17-25, 2012. 査読有
- [4]. Y. Kaji, The Expected Write Deficiency of Index-Less Indexed Flash Codes, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E95-A, pp.2130-2138, 2012. 査読有

[学会発表](計 22 件)

- [1]. G. N. Corneby, L.K. Sanchez, P. Fernandez, M.J. Tan, Y. Kaji, Combining the Phoenix Flash Code with the Binary Index Flash Code for Low Write Deficiency, 2014 Non-Volatile Memories Workshop, poster session, 2014.3.10, San Diego, California. 査読有

- [2]. G.N. Corneby, L.K. Sanchez, M.J. Tan, Y. Kaji, P.Fernandez, Phoenix Flash Code: Introducing the Absorption and Revival Operations for Reducing Flash Memory Write Deficiency, 11th National Conf. on Inf. Tech. Education, 2013.10.24, Camiguin, Philippines. 査読有
- [3]. M.J. Tan, P. Fernandez, N.A. Salazar, J. Ty, Y. Kaji, Flash Code with Dual Modes of Encoding, 2013 Workshop on Computation: Theory and Practice, 2013.9.30, Manila, Philippines. 査読有
- [4]. M.J. Tan, Y. Kaji, Flash Code Utilizing Resizable-Clusters, 2013 IEEE Intl. Conf. on Electro/Information Technology, 2013.5.10, Rapid City, SD. 査読有
- [5]. 榎勇一, フラッシュメモリにおける情報記録のための符号化方式, モダン符号理論からポストモダン符号理論への展望ワークショップ(招待講演), 2013.3.4, 福岡市, 査読無
- [6]. H. Nagahara, Y. Kaji, Index-Less Flash Codes with Arbitrary Small Slices, 2012 Intl. Symp. on Inf. Theory and Its Applications, 2012.10.29, Honolulu, HI. 査読有
- [7]. Y. Kaji, Performance Evaluation of Index-Less Flash Codes for Non-Uniform Write Operations, Workshop on Coding for Flash Memories (Invited talk), 2012.3.15, Tokyo, Japan. 査読無
- [8]. Y. Kaji, The Expected Write Deficiency of Index-Less Flash Codes and Their Improvement, 2011 IEEE Inf. Theory Workshop, 2011.10.17, Paraty, Brazil. 査読有

他 14 件

[図書](計 1 件)

- [1]. 榎勇一, 岩田賢一, 葛岡成晃, 井坂元彦, オーム社, 情報・符号理論, 206 ページ, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎 勇一 (KAJI YUICHI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 70263431

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし