

令和元年6月22日現在

機関番号：32706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K15936

研究課題名（和文）フラッシュメモリのための制約符号，およびその性能評価

研究課題名（英文）Constrained coding for flash memories and its evaluation

研究代表者

眞田 亜紀子（MANADA, AKIKO）

湘南工科大学・工学部・講師

研究者番号：20631138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：フラッシュメモリは高密度不揮発性記録媒体として広く活用されている。フラッシュメモリはセルに電荷を注入することでデータの保存を行い，セルの電荷量を量子化することでデータの読み出しを行う。データの書き換えを行う際，電荷を増やすことは容易だが電荷を減らすことはコストがかかるだけでなくメモリの寿命にも影響を与える。また，隣接セルの電荷量差が大きい場合，データ読み出しの際に誤りを起こしやすいことも知られている。本研究では，それらの問題を同時に解決するための符号化を提案し，その性能について解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フラッシュメモリはUSBやSSD等，日常の様々な状況で使われており，データを正しく長期間保存できるようにすることが望ましい。今回の成果は主として離散数学の観点からの結果を与えており，高性能，高信頼性符号化に関する基礎的解析に貢献している。特に符号の容量（最大符号化率）やサムレート（1セルあたりにどれだけデータが書き込めるかを数値化したもの）等の重要数値に関して明確な値を与えたことは，今後改善案を思考する上での良い比較対象になると自負する。

研究成果の概要（英文）：A flash memory is a non-volatile high-density storage medium that has been widely used in USBs or SSDs. Data is stored in a flash memory by adding electric charges to cells (floating gates), and is read by quantizing the electric charges in the cells. Increasing the amount of electric charges is easy and can be done by cells. However, decreasing the amount of electric charges is costly and affects the lifespan of flash memories. It is also known that the difference of electric charges between the cell and its adjacency cells can cause error when reading data. In this research, we proposed coding schemes that consider those issues, and analyzed the effectiveness of these coding schemes.

研究分野：情報理論基礎，符号理論，離散数学

キーワード：フラッシュメモリ 制約符号 セル間干渉 禁止語 グラフ理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フラッシュメモリは、不揮発性高密度記録媒体として USB や SSD などに利用されている。フラッシュメモリはフローティングゲートと呼ばれるセルに電荷を注入することでデータを記録し、電荷量を量子化することでデータの読み出しを行なっている。

フラッシュメモリの典型的な誤りとして「セル間干渉」がある。これは、あるセルに蓄えられている電荷量が、隣接するセルの電荷に影響を受けることで、実際よりも大きく読み取られてしまう誤りである。特に、記録媒体の小型化を目的とする際には非常に大きな問題となるため、セル間干渉を防ぐための対応を取る必要がある。一方で、セルに電荷を注入することはセル単位でできるが、電荷を減らすには同じグループ(ブロック)に属するセルの電荷を一旦初期化する必要がある。この操作を「ブロック消去」というが、ブロック消去はコストがかかるだけでなくフラッシュメモリの寿命にも関わってくるため、ブロック消去回数をできるだけ減らす必要がある。

これまでどちらか一方を考慮した研究は多くなされてきたが、二つの条件を同時に考慮することは信頼性の高いフラッシュメモリ作成において重要な鍵となる。だが、その観点からの研究についてはまだ十分な結果が得られておらず、更なる追求をする必要があると考えた。

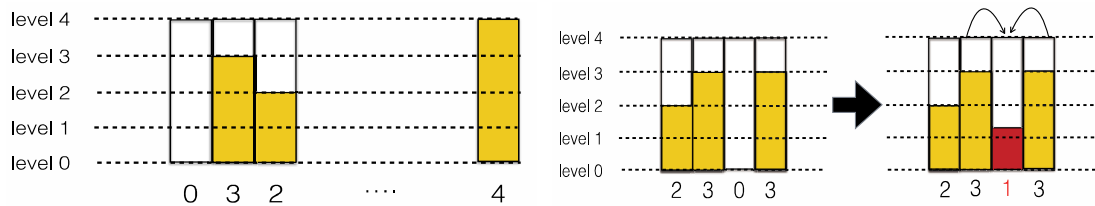


図1：フラッシュメモリとセル間干渉のイメージ

2. 研究の目的

本研究では、上記の研究背景を受けて、「セル間干渉」と「ブロック消去回数削減」

- (1) の二つの条件を満たしつつ符号化するためにはどの様に行えば良いか検討した。具体的には、セル間干渉を防ぎつつ、電荷量を増やすことのみ可能な状態で上書き保存をする符号化方式を提案する。
- (2) 提案手法の性能について理論的解析を与える。ことを主たる目的とした。また
- (3) セル間干渉のみに止まらず、ラン長制約(シンボルのラン長に関する制約)やバランス制約(系列におけるシンボルの出現確率を全て同じにする制約、例えば001101)など記録媒体に利用されている制約まで視野を広げる。

ことで、「系列における制約」と「ブロック消去回数削減」を満たす符号化への一般化も目指した。

3. 研究の方法

本研究で用いた主な研究方法は次の2つである。

(1) Write Once Memory との関連性

Write Once Memory (以下 WOM とする)は1982年に Rivest と Shamir (引用文献)によって紹介された「一方向のみの遷移が許可されている記録媒体」であり、パンチカード(穴は開けることができるが穴を塞ぐことはできない)などがその例である。WOMに関する研究は、電荷量を増やす方向のみ許可されているフラッシュメモリと深く関連しており、WOMを用いたフラッシュメモリの符号化等についてはこれまで様々な研究成果が得られている。本研究でも既存の研究結果を主として活用した。

(2) 1次元、および多次元制約符号の概念

制約符号とは、符号語中にある特定の系列(禁止語)が現れないように符号化する方法で、CDやDVDなどの記録媒体に広く活用されている。セル間干渉は隣接するセルとの電荷量に差があるほど起こりやすいと知られているため、この考えを元にセル間干渉を引き起こしやすい系列を排除することを考えた。また、その考えを一般化して、ラン長制約やバランス制約など記録媒体に利用されている制約にも着目して考察した。

また、セル間干渉とデータ上書きを同時に考えるには、(制約が2種類あるため)2次元で制約符号を考える必要がある。1次元制約符号は、符号を表現するラベル付き有向グラフを用いて符号化方法や符号化率に関する様々な解析が行われているが(例として引用文献参照)、一方で2次元(一般に多次元)の場合には、符号を表現するグラフが考えられておらず、未解決の問題が残っている。そこで、多次元のグラフ表現を考えることで未解決問題の突破口になるのではと考え、2次元の場合のグラフ表現を試みた。

研究を遂行するにあたり，離散数学，特にグラフ理論を用いた解析を行った．グラフ理論は応用数学の一つとして工学的にも利用されており，特に制約符号や2次元グラフ表現について考察する際には研究の核となる．実際，申請者はグラフ理論に関する研究を得意としており，これまでの知識を存分に生かして研究に取り組んだ．

< 引用文献 >

R. L. Rivest and A. Shamir, "How to reuse a write-once memory," Information and Control, vol. 55, pp. 1-19, 1982.

D. Lind and B. Marcus, "An Introduction to Symbolic Dynamics and Coding," Cambridge University Press, 1995.

4. 研究成果

(1) 2次元制約のグラフ表現の提案

まず，2次元制約条件を満たすグラフ表現を提案することを試みた．具体的には，2次元制約を与えた上でその制約をみたすパターンを頂点とし，「行方向の制約」と「列方向の制約」をそれぞれ1次元制約と見なしてグラフに表した．最終的にそれらを結合させることで，与えられた2次元制約を満たす2次元配列を導くグラフを生成した．

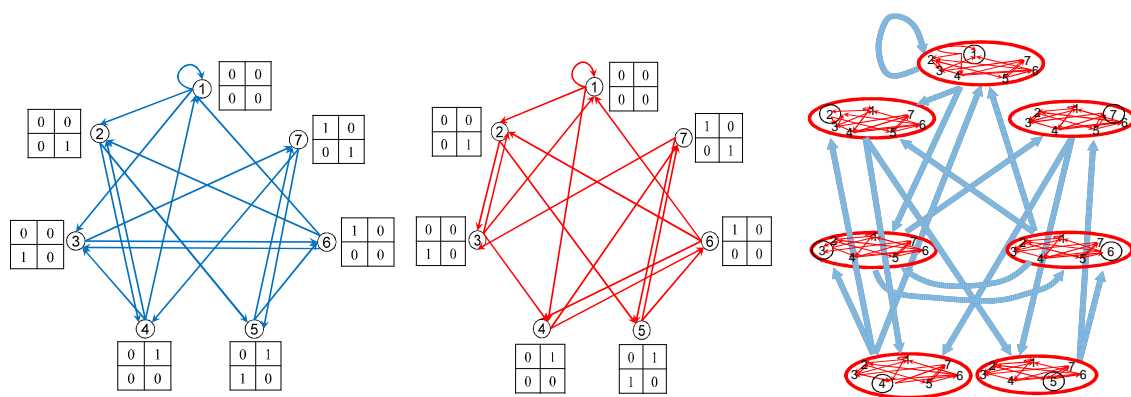
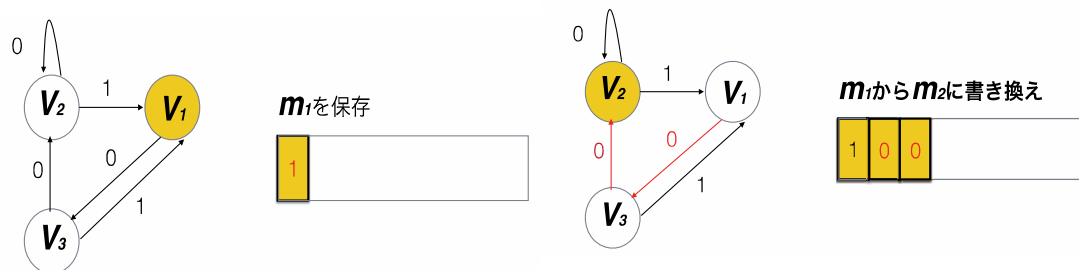


図2：行と列で11を禁止語とした際の行方向制約(左)列方向制約(中)と2次元配列を導くグラフ(右)(5. 主な発表論文等，雑誌論文 より引用)

(2) Extended Trajectory Code の提案

Trajectory Code (引用文献) では，保存したいデータをグラフの頂点と対応させ，データ D からデータ E に書き換え可能であることを D に対応する頂点 $V(D)$ から E に対応する頂点 $V(E)$ への有向辺で表している．この考えを拡張させて，与えられた系列制約を表現するグラフの頂点にデータに対応させ， D から E へデータを書き換えるには， $V(D)$ から $V(E)$ への最短経路を辿ることで生成された系列をセルに書き込んでいく Extended Trajectory Code (以下 ETC とする) を新たに提案した．ETC を用いると，常に与えられた制約を満たす系列がセルに書き込まれることになる．また，始点となる頂点を固定すると，セルに書き込まれた系列に対応した経路をグラフ上で辿った際の終点を見つけることで，メッセージの読み出しが可能となる．また，コストや上書き回数の観点から ETC 一回の書き込みに利用されるセル数はできるだけ少ない方が良い．よって，グラフの直径(2頂点間の最短経路長の最大値)をもとに書き込み回数の上界，下界について考察した．



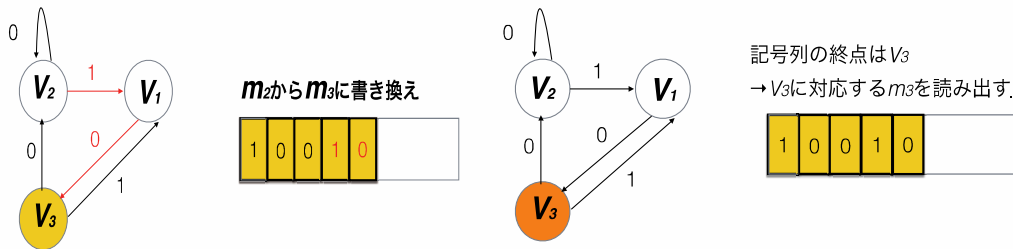


図 3 : 11 を禁止語とし , 3 種類のデータを書き込む場合の ETC . データ m_i と頂点 V_i が対応 .

(3) バランス制約とラン長制約を満たした符号の容量についての考察

バランス制約は、一方向のみの遷移が許可されている際に誤り検知をするなどに応用され、フラッシュメモリにも適用が期待できる。一般にグラフで表現できる制約については、グラフの隣接行列の固有値を用いて容量（最大符号化率）を明確に与えることができるが、バランス制約はグラフで表現できないためこの考えを直接適用することができない（ただし、バランス制約のみの場合は、制約を満たす系列を数え上げることで容量が 1 と容易にわかる）。そこで、バランス制約とラン長制約を同時に満たした場合の容量について数え上げや挟み撃ちの原理を用いて計算し、

00 や 11 を禁止語とする場合の容量は 0

0 と 1 のラン長を d 以上 k 以下に制限した場合は、バランス制約を満たす条件を考慮しても容量は変わらない（0 と 1 のラン長を d 以上 k 以下にする制約のみを考えた場合の容量と同じである）。

ことを求めた。

(4) Constrained System with Unconstrained Position を用いた符号化方式の提案とそのサムレート

Constrained System with Unconstrained Position（引用文献）とは、系列にある特定の系列が現れない制約を与えた上で、どんなシンボルを入れてもその制約を妨げない箇所（図 4 参照）をうまく利用した符号化方式である。その箇所は任意にシンボルを挿入できるため、誤り検出のパリティ検査等に応用できるが、今回はその箇所のみを利用した符号化方式を考えることで、上書きと制約の両方を満たす方法を考えた。また、影響を受けない箇所を最大限に使うことで得られるサムレート（1セルあたりにどれだけのデータが書き込めるかを数値化したもの）の考察を行った。具体的には、系列に制約がない場合の最大サムレート（以下 S とする）については Fu と Vinck（引用文献）によって示されているが、提案手法を用いると、挿入レート（制約を妨げない箇所の系列長に対する割合）の最大値 μ を用いて「 μS 」のサムレートをもつ符号を提案できることを示した。その結果を用いて、ラン長制約や 101 が現れない場合の符号の達成可能なサムレートを明確に与えた。

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0...

図 4 : 11 を禁止語とした系列の例 . は 0 , 1 どちらの場合でも 11 が現れない箇所を示す .

上記の結果は、上書きと系列制約を様々な観点から理論的に考察しており、性能と信頼性の高いフラッシュメモリ構築に貢献できたと考える。これらのアイデアはまだ改善の余地があり、今後さらに突き詰めていくことで、より高性能、高信頼性を兼ね備えたフラッシュメモリを提案することができると期待する。

< 引用文献 >

A. Jiang, M. Langberg, M. Schwartz and J. Bruck, "Trajectory Codes for Flash Memory," IEEE. Trans. Inform. Theory, vol. 59, no. 7, pp. 4530-4541, July 2013.

J. de Souza, B. Marcus, R. New, and B. Wilson, "Constrained systems with unconstrained positions," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 48, no. 4, pp. 866-879, April 2002.

F.-W. Fu and A. J. H. Vinck, "On the capacity of generalized write-once memory with state transitions described by an arbitrary directed acyclic graph," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no. 1, pp. 308-313, Jan. 1999.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Akiko Manada, Hiroyoshi Morita, “ On the Capacities of Balanced Codes with Run-Length Constraints ”, Proc. 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2017), pp. 1391-1395, 2017 年 6 月 (査読有り) DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006757

Takahiro Ota, Akiko Manada, Hiroyoshi Morita, “ A Finite Graph Representation for Two Dimensional Finite Type Constrained Systems ,” Proc. 2016 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA 2016), pp. 51-55, 2016 年 10 月 (査読有り) , URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7840384>

Takahiro Ota, Akiko Manada, Hiroyoshi Morita, “ A Two-Dimensional Antidictionary Automaton for a Toric Surface ,” Proc. 2016 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA 2016), pp. 71-75, 2016 年 10 月 (査読有り) , URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7840388>

〔学会発表〕(計 7 件)

Akiko Manada, Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, “ On constrained WOM codes and their sum-rates, ” 2019 Information Theory and Application Workshop (ITA 2019), 2019 年 2 月

Akiko Manada, Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, “ On the Sum-Rates of Certain Constrained WOM Codes, ” The 41st Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2018), 2018 年 12 月

Akiko Manada, Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, “ Constrained codes for reliable flash memories, ” 2018 Information Theory and Application Workshop (ITA 2018), 2018 年 2 月

Akiko Manada , “ Periodic-Finite-Type Systems for Flash Memories, ” 10th Asia-Europe Workshop on Concepts in Information Theory, 2017 年 6 月

Akiko Manada , “ Comparison of Various Trajectory Codes for Flash Memories, ” The 38th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2015), 2015 年 11 月

Akiko Manada , “ Constrained coding and its applications for data storage media, ” 第 4 回 誤り訂正符号のワークショップ, 2015 年 9 月 (入門講義)

Akiko Manada , “ Extended Trajectory Codes for Flash Memories with Constraints, ” 9th Asian-European Workshop on Concepts in Information Theory, 2015 年 5 月

〔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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：森田 啓義

ローマ字氏名：Hiroyoshi Morita

所属研究機関名：電気通信大学

部局名：大学院情報理工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：8 6 1 6 6 4 2 0

研究協力者氏名：太田 隆博

ローマ字氏名：Takahiro Ota

所属研究機関名：長野県工科短期大学校

部局名：情報技術科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：6 0 5 7 9 0 0 1

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。