

氏名（本籍）	山脇 章（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第549号
学位授与日付	平成31年3月25日
専攻	電子情報システム工学専攻
学位論文題目	Codes for improving lifetime, speed, and reliability of flash memories (フラッシュメモリの寿命と速度および信頼性を向上させるための符号に関する研究)
学位論文審査委員	(主査) 教授 草刈 圭一朗 (副査) 教授 三嶋 美和子 教授 鎌部 浩 外部審査委員 内川 浩典

論文内容の要旨

NAND型フラッシュメモリは、デジタルストレージ装置、IoTデバイスなど様々なところで利用されているが、フラッシュメモリの構造上の制約から、最小の記憶単位であるセルの書き換え回数は有限である。このため、現在は実用上十分に長い期間使用できるようにウェアレーベリングと呼ばれる方法が使われている。これに対して本論文では、符号化技術によってフラッシュメモリの様々な性能を向上させることを目的として、フラッシュメモリのためのいくつかの符号に関する理論的な基礎を与えている。具体的には、反転セルを用いた Index-less Indexed Flash code(ILIF 符号)、並列ランダム I/O 符号およびランク変調符号を対象としている。

ILIF 符号は、最悪ケースの性能が最適であることが理論的にわかっており、それを改良した反転ビットを用いた ILIF 符号は、平均性能が優れていることが計算機実験でわかっていた。申請者は、反転ビットを用いた ILIF 符号は、ある条件のもとで最悪時性能の点でも優れていることを理論的に示している。

記録密度を向上させるために、四つ以上の電荷レベルを区別できるマルチレベルフラッシュメモリが実用化されているが、シングルレベルフラッシュメモリと比較するとデータの読み出しに時間がかかるという短所がある。このため、ランダム I/O 符号及び並列ランダム I/O 符号などの、マルチレベルフラッシュメモリの読み出し速度を高速化するための符号が提案されている。しかしながら、並列ランダム I/O 符号の構成方法は、計算機探索による方法しか知られていなかった。これに対して申請者は、(7,4)ハミング符号及び(15,11)ハミング符号のパリティ検査行列から組織的に並列ランダム I/O 符号を構成する方法を与えた。これらの符号は、同じ符号長のランダム I/O 符号の符号化率を上回っており、フラッシュメモリのさらなる高密度化に貢献することが期待できる。

フラッシュメモリのセルに蓄えられた電荷は、時間とともに失われることがある。こうした変化に対してロバストな符号として、データを数字の列の置換に符号化する、ランク変調符号が提案されており、また、ランク変調で符号化されたデータの誤りを測るための最も一般的な尺度として、一般化ケーリー距離が提案されている。申請者は、一般化ケーリー距離の新しい性質を見出し、それを用いて最適なランク変調符号の符号化率の上界を導出した。この値は、符号長が短い場合には、従来の結果を改善している。

論文審査結果の要旨

NAND型フラッシュメモリを用いたコンピュータやデータ記録装置の反応速度は、ハードディスク装置を用いた場合よりも高速である。また、IoTデバイスなど電池で駆動されるデバイスのメモリとしてもフラッシュメモリは不可欠な構成要素となっている。一方で、現在のフラッシュメモリはその構造上の制約から、ウェアレーベリングなどの長寿命化のための技術を使用せざるを得ず、また高密度化と速度との間にはトレードオフの関係がある。近年、これらの制約を符号化技術によって克服しようという新しいアプローチで研究が進められている。本論文は、このアプローチに沿って、寿命、信頼性及び速度の三つの性能指標の改善に寄与する符号について、基礎的な知見を与えている。

申請者が考察の対象とした反転ビットを持つ ILIF 符号は、符号化率は高くないが最悪時性能が良好であり、符号化規則も比較的簡単であるため、高速な動作を必要とする IoT デバイスなどのメインメモリなどへの応用も期待される。申請者が構成した、ハミング符号を用いた並列ランダム I/O 符号は、現在のフラッシュメモリの読み出し方法との互換性が高く、かつ高速な動作が期待できるため、実用性の高い符号であると考えられる。フラッシュメモリ特有の誤りに対応するため、ランク変調符号によって符号化する方式が検討されているが、この符号を用いるときには、そのための誤り訂正符号も必要となる。申請者は、ランク変調のための誤り訂正符号の符号化率の理論的限界を与えている。この結果は、今後開発されるランク変調のための誤り訂正符号の性能の指標になると思われる。以上のことから、本論文は博士(工学)の論文として十分な内容を含んでいると認められる。

最終試験結果の要旨

2019年1月25日に開催された公聴会では、申請者は研究内容を明確にかつ簡潔に説明し、審査委員からの質問にも的確に回答しており合格である。

発表論文（論文名，著者，掲載誌名，巻号，ページ）

1. Worst-case performance of ILIFC with inversion cells, Akira Yamawaki, Hiroshi Kamabe, and Shan Lu, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100-A, No. 12, pp. 2662-2670
2. Construction of parallel random I/O codes using coset coding with Hamming codes, Akira Yamawaki, Hiroshi Kamabe, and Shan Lu, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E101-A, No. 12, pp. 2125-2134.
3. An upper bound on the generalized Cayley distance, Akira Yamawaki, Hiroshi Kamabe, and Shan Lu, Proceedings of 2018 International Symposium on Information Theory and Its Applications, pp. 632-636.