

揮発性/不揮発性メモリのアクセス速度差を考慮した OFF2F の性能予測

額田 哲彰†

山内 利宏‡

谷口 秀夫‡

† 岡山大学大学院自然科学研究科

‡ 岡山大学学術研究院自然科学学域

1 はじめに

揮発性メモリと不揮発性メモリ（以降、NVメモリ）を混載した環境において、要求時ページング（以降、ODP）処理を高速化する新たな実行ファイル形式（OFF2F: Object File Format consisting of 2 Files）が提案されている [1]。一方、揮発性メモリに比べ、NVメモリはアクセス速度が低速である。そこで本稿では、プログラムの実行時間を定式化し、NVメモリの低速なアクセス速度による実行時間の増加量と ODP 処理の高速化による実行時間の減少量を考慮することで、OFF2F の性能を予測する。

2 OFF2F と揮発性/不揮発性メモリのアクセス速度差

2.1 OFF2F

実行ファイルは、4つの内容（テキスト部、データ部、関係情報部、ヘッダ部）から構成される。OFF2F は、実行ファイルを2つのファイルに分割格納する形式であり、読み込みのみ発生するテキスト部を NV メモリ上に格納する。これにより、OFF2F プログラム実行時におけるテキスト部の外部記憶装置からの入出力時間を不要にしている。

2.2 揮発性/不揮発性メモリのアクセス速度差

揮発性メモリは、アクセス速度が高速であり、これまでの技術革新により大容量かつ低価格である。これに対し、ハードウェア構造やエネルギー効率の性質上、相対的に見ると、NVメモリは、アクセス速度が低速である。Intel社の Optane DC Persistent Memory の場合、読み込み速度は2~3倍遅い [2]。OFF2F ではテキスト部を NV メモリから読み込むため、プログラムの実行時間が増加する。

3 プログラムの実行時間の定式化

プログラムの実行時間を定式化する。まず、表1のように各処理の時間、回数、および割合を定義する。次に、ELF (Executable and Linkable Format) プログラムの実行時間 (t_{ELF}) と OFF2F プログラムの実行時間 (t_{OFF}) を定式化する。プログラムの実行時間はプロセッサ処理の時間と外部記憶装置からの入出力時間からなる。このため、それぞれ以下の式 (1), (2) となる。

$$t_{ELF} = t_{Epu} + t_{Eio} \quad (1)$$

$$t_{OFF} = t_{Opu} + t_{Oio} \quad (2)$$

表1 変数の定義

変数	説明
t_{Epu}	ELF プログラム実行時のプロセッサ処理の時間
t_{Opu}	OFF2F プログラム実行時のプロセッサ処理の時間
t_{Eio}	ELF プログラム実行時の外部記憶装置からの入出力時間
t_{Oio}	OFF2F プログラム実行時の外部記憶装置からの入出力時間
t_{mem}	揮発性メモリの読み込み速度
t_{nvm}	NVメモリの読み込み速度
t_{io}	テキスト部以外の入出力時間
t_{tio}	テキスト部の入出力時間
t_r	外部記憶装置からの4KBランダム読み込み時間
N_{page}	テキスト部以外の読み込みページ数
N_{tpage}	テキスト部の読み込みページ数
I	プログラムの実行命令数
α	キャッシュヒット率

プロセッサ処理の時間について、ELFプログラムは、外部記憶装置から揮発性メモリ上に格納したテキスト部を読み込む一方、OFF2FプログラムはNVメモリからテキスト部を読み込むため、OFF2Fプログラムのプロセッサ処理時間の方が長い。その時間は、1回のメモリ読み込みあたり ($t_{nvm} - t_{mem}$) だけ長い。ただし、メモリ読み込みはキャッシュヒット時は発生せず、キャッシュミス時に発生する。このため、以下の式 (3) が成り立つ。

$$t_{Opu} - t_{Epu} = I(1 - \alpha)(t_{nvm} - t_{mem}) \quad (3)$$

なお、ELFプログラムとOFF2Fプログラムでメモリ読み込みの回数は等しいとする。

外部記憶装置からの入出力時間について、OFF2Fプログラムは、ELFプログラムに比べ、テキスト部の入出力時間だけ短い。このため、ELFプログラム実行時の外部記憶装置からの入出力時間 (t_{Eio}) と OFF2F プログラム実行時の外部記憶装置からの入出力時間 (t_{Oio}) は、それぞれ以下の式 (4), (5) となる。

$$t_{Eio} = t_{io} + t_{tio} \quad (4)$$

$$t_{Oio} = t_{io} \quad (5)$$

テキスト部以外の入出力時間 (t_{io}) は ELF プログラムと OFF2F プログラムで共通であり、外部記憶装置からの入出力をランダム読み込みとすると、以下の式 (6) となる。

$$t_{io} = N_{page} t_r \quad (6)$$

一方、テキスト部の入出力は ELF プログラムの場合でのみ発生し、その時間 (t_{tio}) は以下の式 (7) となる。

Estimation of OFF2F Performance Focusing on Differences of Memory Access Latency Between Volatile and Non-Volatile Memory

Tetsuaki Nukata†, Toshihiro Yamauchi‡, Hideo Taniguchi‡
†Okayama University ‡Okayama University

表2 各処理の時間と回数の値

変数	値	備考
t_{Epu}	0.025 s	time コマンドを使用し測定
t_r	28.1 μ s	1 GB データについて 4 KB 単位のランダム読み込み時間を測定
t_{mem}	101 ns	文献 [2] より引用
t_{nvm}	305 ns	
N_{page}	26	読み込みページ数を測定し、仮想アドレスによって分類
N_{ipage}	6776	
I	49,274,719	ユーザモードでの実行命令数を測定

$$t_{tio} = N_{ipage}t_r \quad (7)$$

以上より、ELF プログラムの実行時間と OFF2F プログラムの実行時間は、それぞれ以下の式 (8), (9) で表すことができる。

$$t_{ELF} = t_{Epu} + (N_{page} + N_{ipage})t_r \quad (8)$$

$$t_{OFF} = t_{Epu} + I(1 - \alpha)(t_{nvm} - t_{mem}) + N_{page}t_r \quad (9)$$

4 評価

4.1 評価の観点

式 (8), (9) を用い、揮発性メモリと NV メモリのアクセス速度差を考慮した OFF2F の性能予測を述べる。

評価プログラムとして cc を使用し、C 言語で書かれた簡単なプログラム (printf) で 13 文字を標準出力するものをコンパイルするように起動した。そのテキスト部のサイズは約 42 MB である。この場合、ld (テキスト部のサイズは約 1.5 MB) も起動される。

4.2 評価の環境

評価は Intel Core i3-8100T (3.1 GHz) と 8 GB のメモリを搭載した計算機を用いた。OS は FreeBSD 11.0-RELEASE を使用し、外部記憶装置として、SanDisk Ultra 3D SSD を使用した。

4.3 OFF2F の性能予測

4.2 節の環境での測定と文献 [2] からの引用により、表 1 の各処理の時間と回数の値を取得した。結果を表 2 に示す。

式 (8), (9), および表 2 より算出した ELF プログラムの実行時間と OFF2F プログラムの実行時間を図 1 に示す。図 1 より以下のことが分かる。

- (1) キャッシュヒット率が 99 % の場合、OFF2F プログラムの実行時間は、ELF プログラムの実行時間に比べ約 41.7 % ((0.216 - 0.126)/0.216) 短い。
- (2) キャッシュヒット率の低下に比例してプログラム実行時間が増加するため、キャッシュヒット率が 98.1 % 以下の場合、OFF2F プログラムの実行時間は、ELF プログラムの実行時間に比べ長い。

一方、OFF2F の効果は、外部記憶装置の入出力性能の影響を受ける。例えば、本評価で使用した SATA 接続の SSD ではなく、NVMe 接続の SSD を使用する場合は入出力性能がより高い。そこで、外部記憶装置の

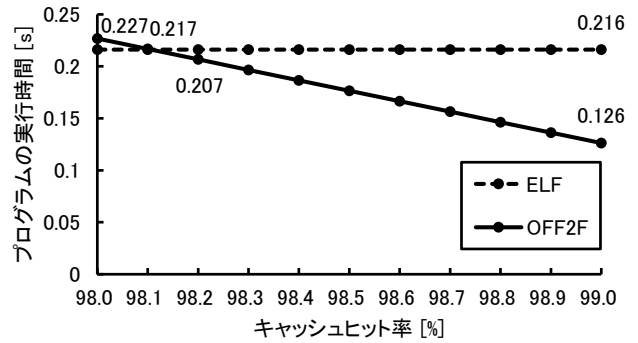


図 1 ELF プログラムと OFF2F プログラムの実行時間

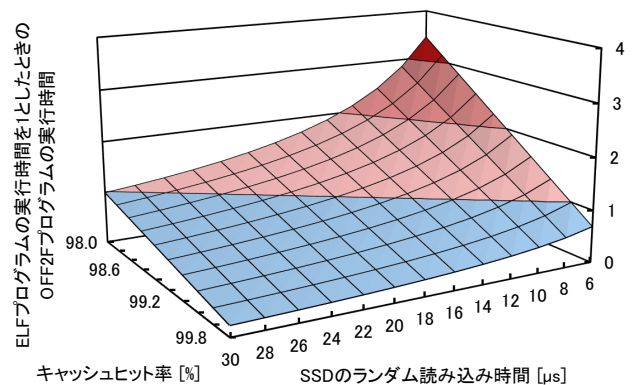


図 2 ELF プログラムの実行時間を 1 としたときの OFF2F プログラムの実行時間 (低いほど良い)

性能としてランダム読み込み時間 (t_r) に着目し、実行時間を算出した。ELF プログラムの実行時間を 1 としたときの OFF2F プログラムの実行時間 (t_{OFF}/t_{ELF}) を図 2 に示す。図 2 より、以下のことが分かる。

- (1) 外部記憶装置のランダム読み込み時間が短くなるのに比例し、OFF2F プログラムの実行時間が ELF プログラムの実行時間に比べて短くなるために必要なキャッシュヒット率は高くなる。

5 おわりに

プログラムの実行時間を定式化し、OFF2F の性能を予測した。キャッシュヒット率が 99 % の場合、OFF2F プログラムの実行時間は、ELF プログラムの実行時間に比べ約 41.7 % 短縮できることを示した。一方で、外部記憶装置の性能向上に比例し、OFF2F の効果を得るために必要なキャッシュヒット率は高くなることを示した。

謝辞 本研究の一部は、JSPS KAKENHI 21K11830 による。参考文献

[1] Sato, M. and Taniguchi, H.: OFF2F: A New Object File Format for Virtual Memory Systems to Support Volatile/Non-Volatile Memory-Mixed Environment, *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 387–392 (2019).

[2] Yang, J., Kim, J., Hoseinzadeh, M., Izraelevitz, J. and Swanson, S.: An Empirical Guide to the Behavior and Use of Scalable Persistent Memory, *18th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 20)*, pp. 169–182 (2020).