

## NUAL キャッシュの改良と可変レベルキャッシュへの適用

渡 部 功<sup>†</sup> 佐々木 敬泰<sup>†</sup>  
大 野 和 彦<sup>†</sup> 近 藤 利 夫<sup>†</sup>

### 1. はじめに

現在、プロセッサには高性能と低消費エネルギーの両立が求められている。特に、回路の微細化にともないキャッシュメモリのリークエネルギーが年々増加しているため、リークエネルギーを削減することが重要である。そこで、本論文ではキャッシュの消費エネルギー削減手法の一つである NUAL キャッシュ(Non-Uniform Access Latency Cache)<sup>1)</sup> を改良した上で、著者らの提案している可変レベルキャッシュ<sup>2)</sup> へ適用することで更なる低電力化を図った。シミュレーション評価の結果、オリジナルの NUAL キャッシュと比較して、実行時間を平均約 26%低減させ、かつ消費エネルギーを平均約 44%削減できることがわかった。

### 2. 関連研究

#### 2.1 NUAL キャッシュ

NUAL キャッシュはウェイ予測キャッシュを基に作られた低リークキャッシュ手法であり、参照データが存在するウェイを LRU を利用して予測し、選択的に活性化することで低消費エネルギー化を行う手法である。活性化するウェイは常に 1 ウェイのみで、別のウェイへアクセスする場合は現在活性化されているウェイをデータが破壊されない低電圧状態(スリープモード)に落としてから別のウェイを活性化させる。NUAL キャッシュでは、1 ウェイ以外の全てをウェイをスリープモードに落とすため、消費エネルギー削減率は非常に高いが、予測が外れた場合にアクセスに時間がかかり実行時間が増大するという問題点がある。予備実験として行った評価では、通常キャッシュと比較して平均約 39%の実行時間の増加が見られた。

#### 2.2 可変レベルキャッシュ

可変レベルキャッシュは「通常モード」と「低消費エネルギーモード」の 2 つのモードをキャッシュの必要容量に応じて動的に切替えることでリークエネルギー

を削減する手法である。「通常モード」時は通常の L2 キャッシュとして動作し、「低消費エネルギーモード」に切替わる際にはキャッシュの半分をスリープモードに落とすことでリークエネルギーを削減する。さらに、スリープモードの領域を擬似的な L3 キャッシュとし、L2 キャッシュの排他的キャッシュとして扱うことで、キャッシュ容量を減らした際のキャッシュヒット率の低下を抑えている。可変レベルキャッシュは性能低下を通常キャッシュの 1%未満に抑えているが、スリープモードに移行できるのはキャッシュメモリの半分のみなので、消費エネルギー削減率は NUAL キャッシュと比較して高くない。

### 3. NUAL キャッシュの改良

NUAL キャッシュは活性化しているウェイが常に 1 ウェイのみであり、データがヒットするまでウェイの活性化とアクセスを繰返す必要がある。そのため、参照が古いウェイにデータが存在する、またはキャッシュミスの場合にキャッシュアクセス・レイテンシが増加し、結果として性能が低下する可能性がある。本論文ではエネルギー削減率の高い NUAL キャッシュに注目し、性能低下を抑えるための改良を施した。その概念図を図 1 に示す。図中の「NUAL」はオリジナルの NUAL キャッシュ、「NUAL<sub>c</sub>」は改良した NUAL キャッシュを表す。改良した NUAL キャッシュは待機状態では 1 ウェイのみ活性化させておき、キャッシュアクセスが起きたときは、活性状態のウェイを参照するが、参照したウェイに目的のデータがなかった場合は次の 1 ウェイのみではなく、残り全てのウェイを同時に活性化させる。改良した NUAL キャッシュの評価を行ったところ、詳細結果は後述するが、オリジナルの NUAL キャッシュと比較して実行時間の増加は大幅に抑えることができるが、スリープ領域の割合が減ったため、消費エネルギーが増加する結果となった。

<sup>†</sup> 三重大学大学院工学研究科情報工学専攻

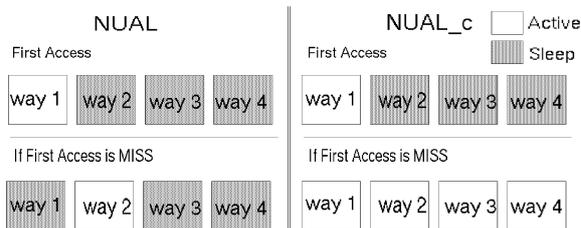


図 1 改良した NUAL キャッシュの概念図

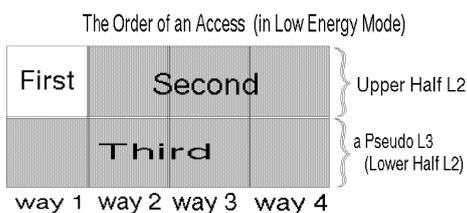


図 2 低消費モード時の VLAL キャッシュの概念図

#### 4. 可変レベルキャッシュへの適用

第 2.2 節で述べた通り、可変レベルキャッシュの性能低下は通常キャッシュの 1%未満であり、性能維持の観点において非常に有効である。そこで、改良した NUAL キャッシュを可変レベルキャッシュへ適用させることで性能を維持しつつ、更なる低電力化を図った。「低消費エネルギーモード」時の可変レベルキャッシュは L2 キャッシュの半分をスリープモードの疑似 L3 キャッシュ、もう半分を通常の L2 キャッシュとして動作させる。そのため、スリープモードに落ちていない半分の L2 キャッシュではリークエネルギーの削減が行われていない。本論文では L2 キャッシュ部分を改良した NUAL キャッシュとして動作させることで、消費エネルギー削減率の向上を図った。改良した NUAL キャッシュを適用した可変レベルキャッシュ(VLAL キャッシュ: Variable Level and Access Latency Cache)の概念図を図 2 に示す。

#### 5. 評価結果

オリジナルの NUAL キャッシュ、第 3 章で改良した NUAL キャッシュ、VLAL キャッシュそれぞれの実行時間と消費エネルギーを評価し、通常のキャッシュの結果で正規化した結果をそれぞれ図 3、図 4 に示す。図中の「NUAL」はオリジナルの NUAL キャッシュ、「NUAL\_c」は改良した NUAL キャッシュ、「VLAL」は本論文で提案している VLAL キャッシュの結果である。本論文で行った評価結果から、VLAL キャッシュはオリジナルの NUAL キャッシュと比較して実行時

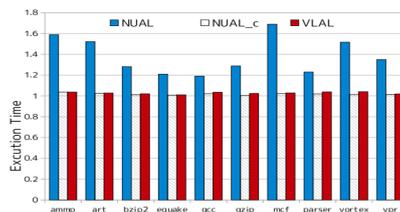


図 3 実行時間

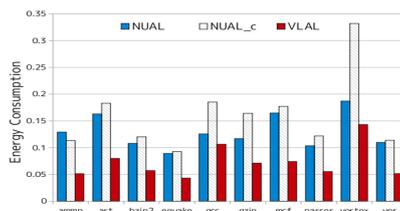


図 4 消費エネルギー

間を平均約 26%低減させ、かつ消費エネルギーを平均約 44%削減できることがわかった。VLAL キャッシュはオリジナルの NUAL キャッシュよりも実行時間の増加が少ないため、消費エネルギーが小さくなる結果となった。また、改良した NUAL キャッシュとの比較においては、実行時間は平均約 1%の増加で、消費エネルギーを平均約 54%削減できることがわかった。これは、VLAL キャッシュが改良した NUAL キャッシュよりもスリープ領域の割合が大きく、その分リークエネルギーが多く削減されるためと考えられる。

#### 6. おわりに

本論文では高性能かつ低消費電力なキャッシュを目指し、NUAL キャッシュを改良した上で可変レベルキャッシュへ適用することで、更なるエネルギー削減を図った。本論文で行ったシミュレーション評価の結果、オリジナルの NUAL キャッシュとの比較において性能、消費エネルギーの両点において提案手法に優位性がみられた。

今後の展望としては、キャッシュパーティショニングなど、より多くの既存手法との比較評価を行うことが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) Akihito Sakanaka, et.al, “Reducing Static Energy of Cache Memories via Prediction-Table-less Way Prediction” 13th International Workshop on PATMOS, 2003.
- 2) 松原伸幸, 他, “高性能かつ低消費エネルギーを実現する可変レベルキャッシュのモード切替アルゴリズムの改良と評価” 信学技報, 2009.