

**学位論文題目** Researches on Enhancing Power/Performance Efficiency in Pipeline Stage Unification Processors (邦訳:パイプライン・ステージ統合を行うプロセッサにおける電力性能比の向上の研究)

**取得年月** 2009年3月 **学位種別** 博士(情報学) **大学** 京都大学

**氏名** 姚 駿 (Jun YAO) (奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 助教)

**推薦研究会** 計算機アーキテクチャ

**推薦文** 近年のプロセッサの消費電力削減要求に対して、パイプラインステージ統合 (PSU) という手法に着目し、その制御方法や改良について包括的に行った研究をまとめた博士論文である。PSU 利用の技術的な面白さを伝えるのみではなく、近年多用されている DVFS の得失も見直すことができる興味深い博士論文のため、ここに推薦する。

近年、微細化による集積化技術の向上に伴い、消費電力がプロセッサ設計の支配的制約となっている。そこで、プロセッサの評価にあたり、性能だけではなく、性能電力比と呼ばれる総合的な尺度がより重視されるようになってきている。現在広く利用されている DVS (Dynamic Voltage Scaling) 方式と近年提案されたパイプライン・ステージ統合 (PSU) は、低消費電力化と高性能化の要求に応える手法である。PSU は DVS とは異なり、電源電圧の変更に依存しないアーキテクチャ・レベルの低電力の手法であり、電源電圧の低下が難しい将来のプロセス技術においても有望と考えている。

PSU は、プロセッサの負荷が軽い場合にパイプライン・レジスタの一部を適切に無効化し、バイパスすることで、短いパイプラインとして使用する方式である。このパイプライン・レジスタの無効化による電力削減と、短いパイプラインによる IPC (Instructions Per Cycle) の向上により、電力性能比が向上できる。さらに、個々のアプリケーションの実行中に、動的にパイプラインの深さを変更することにより、幅広いアプリケーションにおいて低消費電力と高性能を実現できる。

本論文は、PSU を用いるプロセッサにおいて、動的にパイプライン・ステージ統合を行う戦略の提案と評価について述べたものである。本論文の主な内容と成果は以下の4点である。

- (1) これまでの深さ固定のパイプラインでは、さまざまなアプリケーションに対して最適なパイプラインとはなっていないことをベンチマークを通して示し、PSU 適用の妥当性検証を行った。この情報をもとに、PSU のベースプロセッサのパイプライン段数を 24 段に設定し、PSU 適用時にさまざまなアプリケーションにおいて最適構成が設定できる構成方式を提示した。
- (2) 個々のアプリケーションでは、プログラム内の局面 (フェーズ) によってプロセッサの実行状態が変化する。そのため、フェーズに応じて動的に PSU を適用することにより電力性能比を向上させることができる。シグニチャと呼

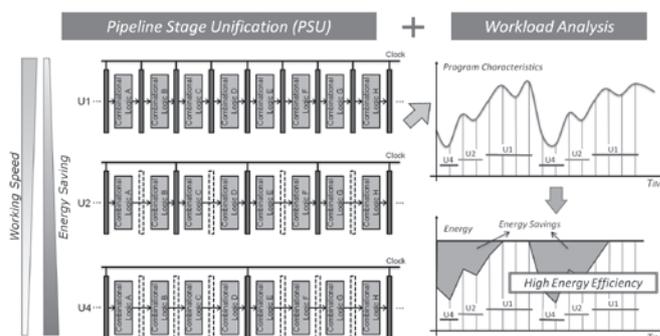


図-1 ワークロード特性に応じた PSU の適用

ばれるワークロードの特性を定量的に表現する先行研究を利用し、履歴表に基づく新しいフェーズ検出方法を提案した (図-1)。この方法を組み込むことにより、PSU の理想的な電力性能比に近い値を達成できた。

- (3) PSU を用いたプロセッサでは、電源電圧を変更しないため、現在の DVS 方式よりも非常に短い時間で動的に構成を変更することができる。この特長を利用した、ハードウェアコストの小さい、新しい PSU 動的適用手法を提案した。これは、実行時に得られる IPC の情報に基づき、より細かい間隔で PSU の適用方法を変化させるものである。この方法は実装コストを大幅に下げることができることを示し、また、細かな PSU の適用により、電力性能比をさらに向上できることを確認した。
- (4) プロセッサの IPC を向上させるため、ALU カスケディング (ALU Cascading) と呼ばれる手法がある。これは ALU の出力を別の ALU の入力に直接つなぎ、1 クロック・サイクル中にデータ依存関係にある命令の組を同時に実行する方式である。この方式を PSU に適用することにより、さらに電力性能比が向上する。このため、ALU カスケディングを行えるスーパースカラ・プロセッサ向け命令スケジューラについて提案を行った。この命令スケジューラによる性能向上率は先行研究の結果よりも高く、PSU の電力性能比をさらに向上させることができた。

(平成 22 年 3 月 30 日受付)