

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 飯塚 大介

本論文は、「値予測の軽量効率化方式の提案と評価」と題し、7章と付録からなる。プロセッサ処理性能の向上に対する要求は、応用の拡大につれてますます大きくなり、とどまるところを知らない。今後ともその傾向は続くであろう。プロセッサの性能向上は、半導体デバイス技術とアーキテクチャ技術とにより支えられてきた。しかし、クロック速度の向上による性能向上は特に、消費電力によって抑えられる傾向が現れている他、アーキテクチャ技術に関しては命令間の処理依存性のために性能改善が難しい状況にある。本論文は、処理の結果を値予測という形で推定し、その処理依存性を解決しながら高クロックでの処理性能を向上させる方式について論じたものである。

第1章「序論」は、研究の背景、目的を述べるとともに、本論文の構成についてまとめたものである。

第2章「投機実行」は、プロセッサの性能向上を抑えているアーキテクチャ上の問題点である処理の依存性を論じ、それを解決するための投機実行方式の現状について述べたもので、制御投機とデータ投機とに分けて論じ、本論文ではデータ投機方式の一つである値予測を扱っているが、他の投機実行方式がロードやストア命令のように限られた命令に対してのみ可能であるのに比して、値予測は値を生成する全命令を対象とすることができることを述べている。

第3章「値予測機構」は、従来提案されている様々な値予測機構について論じ、それらを実際にプロセッサに実装する場合を考察して速度向上が得られるための条件を分析し、従来の提案の問題点を明らかにしている。

第4章「低レイテンシで動作可能な値予測機構の検討」は、3章で述べた分析結果と今後のプロセッサ動向に鑑み、高速プロセッサに用いても値予測が有効に機能するための実現性の高いハードウェア構成について考察したものである。その結果、クロック 4GHz、4way スーパースカラ方式を想定した場合は、値予測に用いるテーブル VHT は、エン트리サイズ 256 以下、ダイレクトマップ方式、レイテンシ 2クロック以下である必要があり、予測機構は Last Value 方式で、パイプライン構成を値予測に適した形にして、予測ミス発生時はそれ以降の実行をフラッシュし次の命令から再実行する方式を用いるのが現実的であることを示している。

第5章「静的な予測命令選択法の提案」は、4章で考察したハードウェア構造ではエントリ数が小さいことによる容量性ミスが発生しやすく、またタグが無いことから別名問題によって予測ミスが発生しやすくなることを指摘し、その解決手法を提案している。すなわち、静的に命令の種類やデータフローを解析し、予測対象命令を限定することで VHT に登録されるエントリを精選してミスの可能性を抑え、タグを除いて VHT を単純化したことに

よる性能低下を抑える方式であり、実行バイナリの各命令には、予測を行うかどうかを判断するために 1 ビットの付加情報をコンパイラが付けるものである。具体的には、バイナリ命令を逆アセンブルして、値を生成する全命令を 6 種類に分類し、それらの内、どの種類の命令を予測対象からはずすかを定性的に考察し、新たに有望な 3 つの方式を提案している。また、これらを用いると、平均 45% の命令は予測対象外となることを示している。

第 6 章「評価」は、5 章で提案した方式を評価したもので、まず、想定するプロセッサの現実的なモデルを与え、次に評価環境としてトレースベースのシミュレータを用いたこと、ベンチマークには SPECint95 の 8 プログラムと、MediaBench の 11 プログラム、合わせて 19 のプログラムを用いたことを述べている。また、5 章で与えた値予測限定方式に加え、VHT の各エントリに飽和カウンタを設けて、その対応命令の生成値が前回の実行時の値と等しいときにカウンタを増やし、カウンタ値が飽和しているときにのみ当該命令の値予測を行うという確信度方式を導入して、このカウンタとしては 4 ビットが最適であることを示している。次いで総合的な性能評価をおこない、VHT エントリ数が大きい場合は、予測命令を限定することによって予測ヒット率が向上するが、総合性能については限定しない方が高い。しかしながら、エントリ数がそのように大きな構成でレイテンシが 2 という構成を高クロックプロセッサで実現することは困難であり、現実的な VHT エントリ数が 256 以下の場合は、値予測をする命令を精選する方が総合性能が向上することを示している。

第 7 章は「結論」である。

以上、これを要するに本論文は、プロセッサの性能向上を阻害する主要なアーキテクチャ要因である処理依存性を解決する方式として値予測に着目し、それを今後の高速プロセッサに導入する現実的な手法を考察して、コンパイラとの協調により性能を向上させる手法を与えたもので、情報工学上貢献するところ少なくない。

よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。