3P−7

パイプライン計算機における分岐仮実行方式

丸島　敏一　西　直樹　大沢　謙二†　中崎　良成
日本電気(株) C&Cシステム研究所　†日本電気技術情報システム開発(株)

1 はじめに

高速演算を指向したパイプライン計算機において、分岐命令の存在はプログラム実行速度向上の大きな弊害となっている。特に、今後の高速クロックによるパイプライン段数の増加 (superpipeline) や複数命令発行による内部並列度の増加 (superscalar) 、等によってより深刻な問題となってくる。そこで、本稿ではパイプライン計算機における一般的な解である分岐予測をさらに拡張して、分岐命令の結果を待たずに先行して後続命令の実行を行なうための方式を提案し、その性能について評価したので報告する。

2 分岐命令への対処法

2.1 分岐予測

分岐命令による性能低下を緩和するために通常用いられる方法に分岐予測がある。分岐予測では、過去の履歴や何らかの決まりに従い分岐命令の分岐先を予測し、条件付きモードにてフェッチ・デコード等の処理を継続する。この条件付きモードとなった予測先命令は、該当する分岐命令の実行の結果、予測先と異なる方向に分岐した場合、それまでの処理を無効化する必要がある。通常の分岐予測においては、条件付きモードの命令は、該当する分岐命令の実行結果が予測先と一致したことが確定するまで、演算器等の実行部に命令発行をしないのが普通である。このため、分岐予測による方法においても、分岐命令による弊害は依然として存在する。

2.2 分岐仮実行方式

分岐予測の考え方をさらに進めたものが、分岐仮実行方式である。つまり、予測した分岐先命令を、条件付きモードのままで実行部に対して発行してしまい、結果書込みの直前まで進めてしまう方法である。同様のアプローチをとるものに、コンパイラで展開するもの [1] や、条件付きモードの命令による結果をオペランドとして参照させないもの [2] 等がある。本稿では条件付きモードの命令による結果をオペランドとして参照して実行を継続した場合の、ハードウェアによる性能向上の可能性を評価することを目的とする。そのために、レジスタ前段にオペランド読出し可能なバッファを配置 [3] して、条件付きモードの命令による結果を保持することにより分岐仮実行を実現する。但し、メモリへのストアについては、復元処理が複雑となるためこの仮実行を抑止するものとした。

Conditional Execution for Pipelined Computers
Toshikazu MARUSHIMA, Naoki NISHI,
Kenji OHSAWA†, Ryosei NAKAZAKI
NEC Corporation　†NSIS Corporation

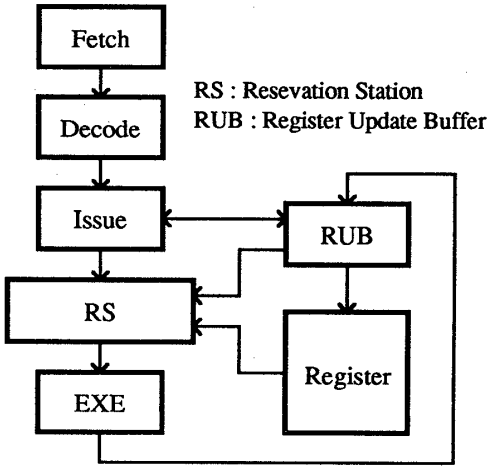

図 1: パイプライン構成

2.3 out-of-order 実行

分岐仮実行を行う際には、分岐命令による制御依存関係は疑似的に解消したとみなすことができるが、データ依存関係は保証する必要がある。データ依存関係を保証しながらプログラム上の順序によらずに命令を実行 (out-of-order 実行) させるものとしては Tomasulo の Reservation Station [4] が代表的である。この方式自身も、分岐命令を先送りすることにより分岐命令による影響を緩和させる機能を備えるが、本稿ではこれを分岐仮実行と組み合わせて使用する。

3 モデルアーキテクチャ

3.1 パイプライン構成

図1 に全体のパイプライン構成を示す。発行 (issue) 部までは命令の順番に従って進行するが、発火待ちバッファ (RS : Reservation Station) 以降は前述の out-of-order 実行を行なう。実行 (EXE) 部からは1サイクル当り1命令までの結果が out-of-order に出力される。また、分岐命令の仮実行結果を保存するために、実行部とレジスタとの間に書込みバッファ (RUB : Register Update Buffer) を設けている。この RUB の各エントリは、タグ表 (LTT : Latest Tag Table) が示すタグ値により指示される (図2参照) 。RUB 内の結果データは、オペランドとしても参照可能である。

3.2 Register Update Buffer (RUB)

書込みバッファ RUB のフォーマットを図2 に示す。FRE (Free), DRN (Destination Register Number), LST (Latest) は Register Renaming 用のタグ管理のために使用される。FRE が Yes なら、そのタグ番号は新

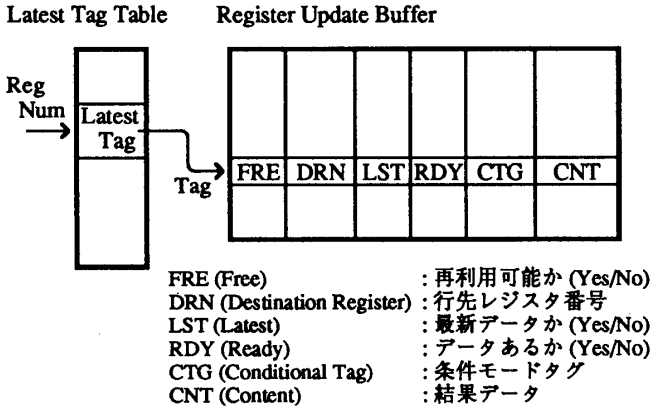

図 2: Register Update Buffer のフォーマット

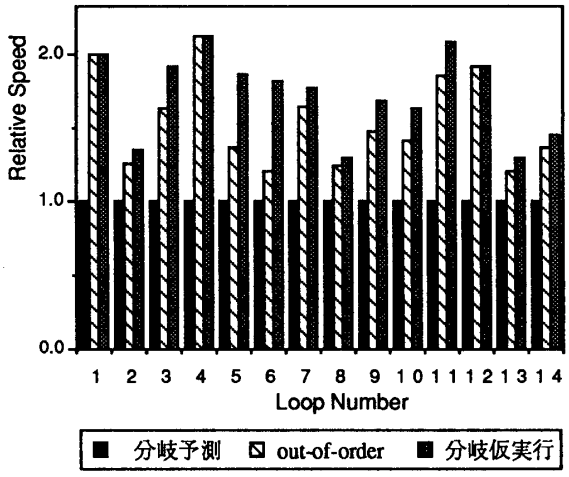

図 3: リバモア 14 ループにおける相対速度

たなタグとして使用可能である。新たに確保されたタグの LST は必ず Yes であり、該当レジスタ番号 DRN の最新の値を持つエントリであることを示している（この際、それまで最新であった DRN のタグの LST は No に更新される）。RDY (Ready), CTG (Conditional Tag) はタグの回収、及びレジスタへの書込み時に使用される。RDY が Yes でかつ、CTG が後述する「確定」条件を満たしていれば、該当タグは使用済みとみなして、FRE を Yes とする。この時、さらに LST が Yes であれば、CNT の内容をレジスタに書き込む。

3.3 Conditional Tag (CTG)

RUB の CTG に付加される条件モードタグ番号 (0 〜 N) は、分岐命令が順番に終了することを前提として、以下のように管理される。NTG (Newest Tag) と FTG (Finish Tag) をそれぞれ、現在実行中の最新 CTG、最古 CTG とすると、NTG は分岐命令発行時に increment (modulo N) され、FTG は分岐命令終了時に increment (modulo N) される。RUB 中の CTG にはタグ確保時の NTG を保存している。これにより、NTG と FTG とに挟まれた部分の条件モードタグ CTG を持つ命令は実行がまだ「確定」しておらず、レジスタへの結果書込みができないことが判定できる。NTG と FTG が一致している時は、分岐命令が発行されていない状態で、分岐仮実行は行なわれていないことを示している。

4 評価

4.1 方法

分岐予測, out-of-order 実行, 分岐仮実行のそれぞれについて、性能の比較を行った。実行部はパイプライン動作する演算器群とメモリアクセスユニットから構成されるものとし、実行部への命令発行と実行部からの結果の出力はそれぞれ 1 サイクル当り最大 1 命令とした。評価用ベンチマークとしては、リバモア 14 ループを用いた。

4.2 結果

評価結果を図 3 に示す。ここでは、分岐予測による性能を 1 とし、out-of-order 実行と分岐仮実行に対する相対性能を表している。本結果から、分岐予測に対する分岐仮実行の性能向上が、1.3 〜 2.1 倍程度であることが観測できる。また、out-of-order 実行においても比較的良い結果を得ている。特に、No.1, No.4, No.12 では分岐仮実行とほぼ同等の性能値を示している。これは、実行部への命令発行と実行部からの結果の出力を 1 サイクル当り最大 1 命令としたことにより、分岐仮実行において実行部への命令発行ボトルネックが生じているためと考えられる。これについては、今後、複数命令発行を可能とすることにより、性能向上を見込むことができる。

5 おわりに

分岐命令による性能低下を解消するために、分岐命令を疑似的に実行する一方式を提案し、そのモデルに基づき評価を行った。複数命令発行による性能向上については今後検討すべき課題である。

謝辞 日頃御指導頂く日本電気 C&C システム研究所 小池部長に感謝致します。

参考文献

[1] H.Yamana, et. al. : "A Preceding Activation Scheme with Graph Unfolding for the Parallel Processing System -Harray-", Proc. Supercomputing '89, pp.675-684 (1989)

[2] K.Murakami, et. al. : "SIMP: A Novel High-Speed Single-Processor Architecture", Proc. 16th ISCA, pp.78-85 (1989)

[3] G.Sohi : "Instruction Issue Logic for High-Performance, Interruptible, Multiple Functional Unit, Pipelined Computers", IEEE Trans. on Computers, Vol.39, No.3, pp.349-359 (1990)

[4] R.Tomasulo : "An Efficient Algorithm for Exploiting Multiple Arithmetic Units", IBM J. of R&D, Vol.11, pp.25-33 (1967)