

## 基本ブロック単位の命令実行パス予測方式

## A Dynamic Path Prediction of Basic Blocks to be Executed

安井 寛幸<sup>†</sup>      布目 淳<sup>†</sup>      平田 博章<sup>†</sup>      柴山 潔<sup>†</sup>  
 Hiroyuki Yasui    Atsushi Nunome    Hiroaki Hirata    Kiyoshi Shibayama

## 1. はじめに

コンピュータの高速化を目的として、これまでに様々な分岐予測方式が提案されている[1]。それらの従来方式では、命令フェッチの時点で、フェッチする命令が条件分岐命令かどうかを予測し、さらに条件分岐命令であればその分岐結果の予測を行う。命令パイプラインの後段に十分な数の命令を供給するためには、これらの分岐予測処理を 1 サイクルで行う必要がある。本稿では、予測精度の向上を図る上で、複数サイクルを要する高度な分岐予測を可能とする、命令実行パスの予測方式を提案する。

## 2. 命令実行パス予測方式

## 2.1 拡大基本ブロック

複数サイクルを要する分岐予測を可能とするためには、早い段階で分岐予測を開始する必要がある。例えば、基本ブロックの先頭アドレスの命令をフェッチする時点で、その基本ブロックの末尾の条件分岐命令に対して、分岐予測を開始することが考えられる。ただし、図 1 中の基本ブロック  $BB_1$  のように、基本ブロックの末尾が必ずしも条件分岐命令であるとは限らない。そこで、末尾が必ず分岐命令となるように基本ブロックを拡大し、分岐命令に達するまでアドレス順に実行する命令からなる命令ブロックを**拡大基本ブロック (Expanded Basic Block; EX-BB)**と定義する。図 1 においては、基本ブロック  $BB_2$  は単独で 1 個の拡大基本ブロックであり、また、 $BB_1$  と  $BB_2$  を合わせて 1 個の拡大基本ブロック  $EX-BB_1$  とする。

## 2.2 命令実行パス予測

本方式では、分岐命令をフェッチする時点で分岐予測を行うのではなく、分岐命令の実行の直後に、分岐先の  $EX-BB$  の先頭の命令をフェッチする時点で、次の 2 点について命令実行パスを予測する。

- 1)  $EX-BB$  の末尾の命令アドレスを予測する。
- 2)  $EX-BB$  の末尾の条件分岐命令の分岐方向と分岐先を予測する。

上記の 1)により、 $EX-BB$  の先頭アドレスから末尾の分岐命令までの命令フェッチを効率良く行うことができる。また、2)によって従来よりも早い段階で分岐予測を行うため、複数サイクルを要する高度な分岐予測やプリフェッチ制御を行うことが可能となる。

## 2.3 分岐予測精度

$EX-BB$  の定義により、1 個の分岐命令が複数の  $EX-BB$  に含まれる場合がある。このため、例えば、図 1 では、

<sup>†</sup> 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科情報工学部門

<sup>‡</sup> 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科情報工学専攻  
 Dept. of Information Science, Kyoto Institute of Technology

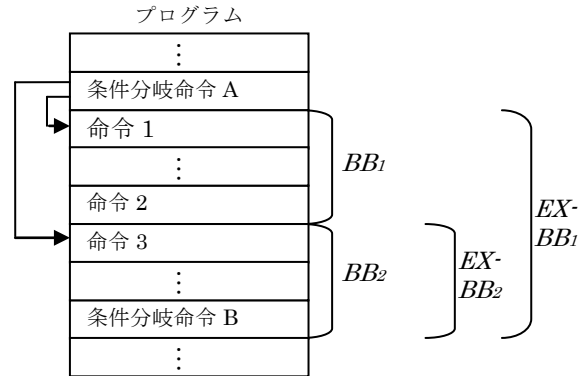


図 1 基本ブロックと拡大基本ブロック

条件分岐命令 B の分岐予測を開始するのは、 $EX-BB_1$  と  $EX-BB_2$  の先頭アドレスの命令をフェッチする時点のそれぞれ 2 通りの場合に分かれる。本方式では、条件分岐命令 A によって命令 1 に分岐した場合と命令 3 に分岐した場合とで、条件分岐命令 B に対してそれぞれ異なる分岐予測を行う。このように直前の分岐命令の結果に基づいた分岐予測を行うので、予測精度の向上が期待できる。

一方、条件分岐命令 B の分岐予測に用いる履歴情報も、 $EX-BB_1$  において予測する場合と  $EX-BB_2$  の場合とに分割されるため、それぞれの場合で充分な量の履歴情報を蓄積することができなければ、従来よりも予測精度が下がる可能性も考えられる。

## 2.4 分岐履歴

従来の分岐予測では、分岐予測対象の分岐命令に関する過去の履歴を蓄積して用いるだけでなく、他の分岐命令の結果も用いる。予測対象の分岐命令に至るまでの各条件分岐命令に対して、その実行結果が **Taken** であったか否かを 1 ビットで記憶 (グローバル履歴) し、これを用いることで、過去の命令実行パスとの相関を利用して分岐予測を行う。しかし、 $EX-BB$  の制御フローが図 2 のような場合、 $EX-BB_1 \rightarrow EX-BB_3$  の分岐命令について分岐予測する際に、 $EX-BB_1 \rightarrow EX-BB_a$  のパスも **Taken** であり、 $EX-BB_2 \rightarrow EX-BB_b$  のパスも **Taken** であるため、パス A とパス B のどちらの実行パスを通ってきたかを区別することができない。そこで、本方式では、グローバル履歴のように条件分岐の結果を記録するのではなく、分岐先アドレスの数ビットを記録した **BTA (Branch Target Address) 履歴** を用いる。これにより、より明確に命令実行パスを識別して、分岐予測を行うことが可能となる。

SCBP[2]でも、どの実行パスを通ってきたかを分岐予測に利用している。SCBP では、コードのコピーを行うのでバイナリコードが増大するが、本方式ではそのような問題は生じない。

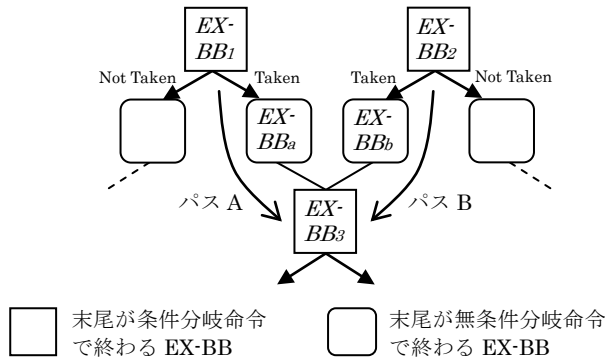


図2 拡大基本ブロックの実行パス木

### 3. 評価

#### 3.1 評価環境

分岐予測精度を測定するため、PowerPCの命令セットを対象とするシミュレータを作成し、以下の3通りの方式について命令レベルのシミュレーションを行った。

- GAs[3]方式：従来方式として採用した。分岐命令ごとにグローバル履歴を用いて分岐予測を行う。
- EX-BB方式：拡大基本ブロックの先頭アドレスで、従来のグローバル履歴を用いて分岐予測を行う。
- BTA+EX-BB方式：上記のEX-BB方式において、グローバル履歴の代わりにBTA履歴を用いる。

評価対象プログラムにはSPEC CPU 2006[4]ベンチマークプログラムの中の403.gcc, 456.hmmmer, 458.sjengを用いた。なお、各プログラムにおいて、入力にはデータセットtestを用いた。

本稿では、現実的な実装の前段階として、論理的な性能を評価することを目的とし、分岐予測テーブルのサイズを制限しない。従って、シノニムの問題は発生しない。BTA履歴については、各条件分岐命令ごとに分岐先アドレスの中の2ビットを記録した。また、上記の各分岐予測方式における予測子には、2ビットの飽和型アップダウンカウンタを用いる方式を採用する。

#### 3.2 測定結果

履歴の深さを1~16個の範囲で変化させて予測精度を測定した結果を図3~5に示す。ただし、評価プログラム中において初めて実行した条件分岐命令に対する予測ミスは回避不可能な予測ミスと考え、予測精度の計算から除外した。図3~5において、EX-BB方式がGAs方式をわずかに上回るものの、両者で差はほとんど見られない。ただし、EX-BB方式に複数サイクルを用いた高度な分岐予測を組み合わせることで、更なる予測精度の向上が期待できる。また、BTA履歴を用いることによって、プログラムごとに差はあるが、ほとんどのケースで予測精度が向上しており、BTA履歴を用いることの有用性が確認できた。

#### 4. むすび

本稿では、拡大基本ブロック(EX-BB)を単位として命令実行パスを予測する方式を提案した。評価の結果、(i) EX-BBごとに分岐予測を行うこと、(ii) BTA履歴を用いる

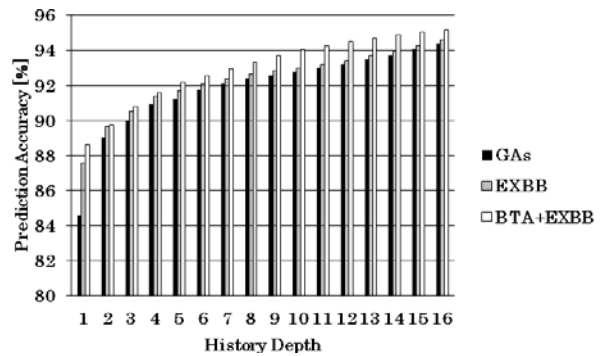


図3 予測精度 (403.gcc)

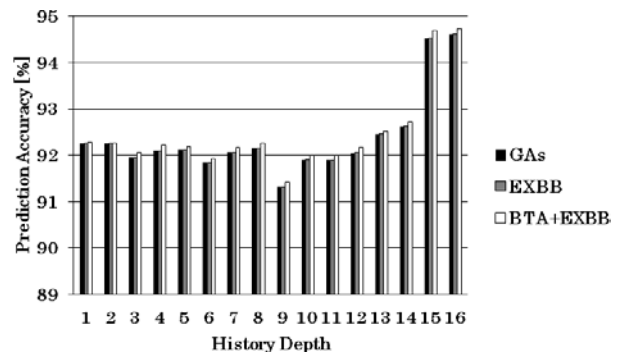


図4 予測精度 (456.hmmmer)

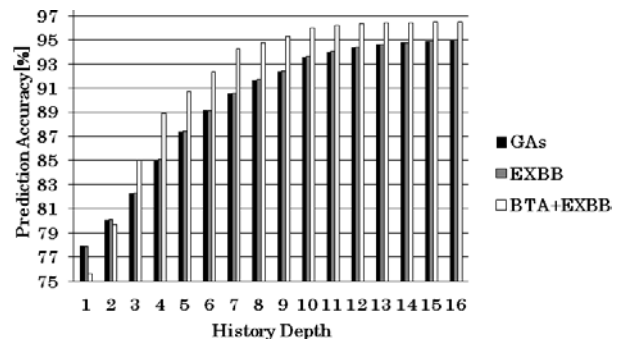


図5 予測精度 (458.sjeng)

こと、でそれぞれ予測精度が向上することを確認した。今後は、より高度な分岐予測子の提案も含めて、本方式の実現性について検討を行う。

#### 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)22500046)の補助による。

#### 参考文献

- [1] D.A. Jimenez, "Piecewise linear branch prediction," *ISCA '05*, pp.382-393, 2005.
- [2] C. Young, N. Gloy, and M. Smith, "A Comparative Analysis of Schemes for Correlated Branch Prediction," *ISCA '95*, pp.276-286, 1995.
- [3] Standard Performance Evaluation Corporation, "SPEC CPU2006," <http://www.spec.org/cpu2006/>.
- [4] S. Pan, K. So, and J.T. Rahmeh, "Improving the Accuracy of Dynamic Branch Prediction Using Branch Correlation," *ASPLOS-V*, pp.76-84, 1992.