

## CAMを用いた分岐予測の信頼性

永松 優児† 大下 尊晃‡ 西岡 拓生† 孟 林† 小柳 滋‡  
 †立命館大学大学院 ‡立命館大学

### 1 はじめに

分岐命令の信頼性を評価して、信頼性の低い分岐命令に安全策を講じる手法が研究されている。安全策には投機的マルチパス実行、パイプラインゲーティング、Control Independence、予測反転等が用いられ、省電力 [1] や計算速度の向上を実現する。これらの安全策を効果的に用いるために分岐予測の信頼性が重要となる。

信頼性の予測には分岐予測の成否を保持する Correct/Incorrect Register ( CIR ) History Table を用いて予測する既存手法があるが、CIR History Table への破壊的競合が信頼性における精度低下の要因となっている。そのため、本研究では CIR History Table への破壊的競合の問題を解消するため、特定の分岐命令は CIR History Table を介さず Content Addressable Memory ( CAM ) を用いて信頼性を予測する手法を提案する。

### 2 信頼性評価手法

信頼性評価手法として、Jacobsen らは JRS Confidence Estimator ( JRS ) を提案している [3]。JRS では予測成功時は増加、失敗時は 0 にリセットするカウンタを用いて、特定の閾値よりカウンタ値が低い場合にその分岐命令を低信頼性と判断する。

各分岐命令は分岐予測の成否を保持する CIR History Table の 1 エントリに命令アドレスと分岐履歴の排他的論理和を行った結果をインデックスとしてアクセスすることにより信頼性の評価を得る。JRS は CIR History Table への破壊的競合が分岐予測の信頼性における精度低下の要因となっている。

Grunwald らは CIR History Table への破壊的競合を解消するために JRS を改良した Enhanced JRS を提案している [3]。JRS の CIR History Table を 2 つに分けて、得られる 2 つの信頼性の評価を分岐予測値 ( Taken , Not-Taken ) により選択する手法である。

Enhanced JRS は信頼性評価ミスの原因である CIR History Table で発生するエントリの破壊的競合を緩和する。そのため JRS より高い信頼性評価を得ることが可能である。

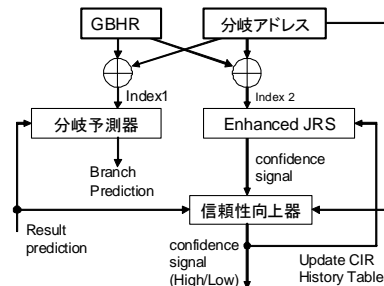


図 1: 提案手法

I	H		
C	L		
C	H		
C	L	H	
I	H	L	
C	H	H	
C	L	H	
I	H	L	

\*分岐の成否  
 C: Correct  
 I: Incorrect  
 \*信頼性評価結果  
 H: High  
 L: Low

図 2: 分岐命令の法則性

### 3 提案手法

本論文では CIR History Table への破壊的競合の問題を解消するため、特定の分岐命令は CIR History Table を介さず CAM を用いて信頼性の予測精度を向上する手法を提案する。CAM に格納されている分岐命令は、CIR History Table に分岐結果の更新を行わない。そのため、CAM を用いることにより CIR History Table で発生する破壊的競合を従来手法より抑えて信頼性の予測精度向上を実現する。CAM に格納されていない分岐命令は既存手法の Enhanced JRS により信頼性を評価する。提案手法の構成を図 1 に示す。

上記にある特定の分岐命令とは分岐の成否 ( Correct/Incorrect ) と信頼性評価結果 ( High/Low ) の 2 つに法則性を持つ分岐命令のことである。本手法は分岐の成否の法則性を用いて信頼性を向上させる。例を図 2 に示す。図 2 のように分岐の成否 ( I , C , C ) と、信頼性評価結果 ( H , L , H ) の組み合わせが発生した場合、この組み合わせ以降、分岐の成否は ( C , C , I ) を繰り返す。このような場合、分岐命令に法則性があるとすると、分岐命令に法則性がある場合は CAM を用いて図 2 のように Correct の場合は High , Incorrect の場合は Low と信頼性を予測する。このように分岐の成否に対して、適切な信頼性を与えることにより、信頼性の精度を向

†Yuji Nagamatsu ‡Takaaki Oshita †Takuo Nishioka †Lin Meng  
 ‡Shigeru Oyanagi  
 †Graduated School of Science and Engineering, Ritsumeikan University  
 ‡Ritsumeikan University

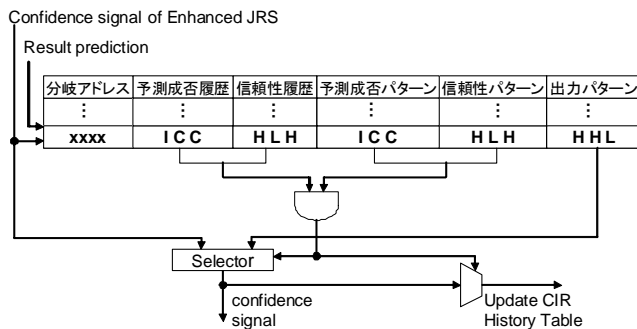


図 3: 信頼性向上器

上させる。

次に図 1 にある信頼性向上器について説明する。構成を図 3 に示す。

予測成否履歴と信頼性履歴は分岐命令の予測成否と信頼性の履歴を格納する。予測成否パターンと信頼性パターンは分岐命令の法則性を検知するためのパターンを格納する。さらに、適切な信頼性を出力するために出力パターンを保持する。この信頼性向上器は CAM で構成する。

図 3 のように、予測成否履歴、信頼性履歴と予測成否パターン、信頼性パターンの組み合わせを比較し、一致した場合は出力パターンに格納されている信頼性を評価に用いる。また、一致した場合は CIR History Table への更新を行わない。一致しない場合は Enhanced JRS の評価結果を用いて信頼性を評価し、CIR History Table への更新を行う。

## 4 実験

### 4.1 信頼性の評価

信頼性の評価精度は主に Specificity (SPEC) と Predictive Value of a Negative Test (PVN) で示す。予測に失敗した分岐命令の総数を  $I$ 、予測の信頼性が無いと判定された分岐命令の総数を  $L$ 、予測の信頼性が無いと判定かつ予測に失敗した分岐命令の総数を  $IL$  とすると、SPEC と PVN は以下の式で表される。

$$SPEC = IL/I \quad (1)$$

$$PVN = IL/L \quad (2)$$

SPEC と PVN は値が高いほど信頼性の精度が高い。

### 4.2 実験方法

既存の Enhanced JRS と提案手法を比較する。分岐予測器には ghare 予測器を用いた。評価項目は SPEC と PVN を用いる。実験環境は SimpleScalar と SPECint2000 を用いて、ベンチマークを 5 千命令実行して評価を行った。

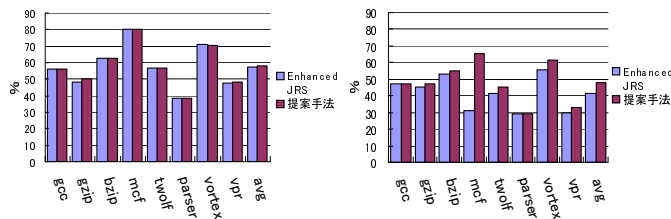


図 4: SPEC

図 5: PVN

本研究では信頼性の精度を大幅に低下する要因となる分岐命令の調査を行い、調査した分岐命令から分岐の成否と信頼性評価結果の 2 つに法則性が無い静的に調査を行った。法則性が存在する分岐命令は事前に信頼性向上器に登録しているものとする。信頼性向上器に登録する分岐命令はベンチマーク毎に最大 5 個とする。また、本実験で信頼性向上器に登録した出力パターンは PVN の精度を向上させるパターンに登録している。

### 4.3 実験結果

実験した結果を図 4、図 5 に示す。Enhanced JRS と比較した際、SPEC が 0.3 %、PVN が 5.1 % 増加する結果が得られた。mcf の PVN は 3 つの出力パターンを適用することで精度を約 2 倍向上することができた。

## 5 今後の課題

本研究は、分岐予測の信頼性を向上させる手法を提案した。実験結果は SPEC 0.3 %、PVN 5.1 % の増加となった。信頼性向上器に格納されている信頼性パターンが PVN を向上するパターンであることから今回の結果が得られた。本実験では信頼性向上器への格納を静的に行っているため、SPECint2000 以外のベンチマークでは精度が低下する恐れがある。今後は動的に信頼性向上器を生成することにより汎用性を高めることが課題である。

## 参考文献

- [1] 二ノ宮康之, 阿部公輝: パーセプトロン分岐予測器を用いた予測信頼性の動的判定に基づく電力削減, SACSIS2009 (2009)
- [2] S.Manne, A.Klauser, D.Grunwald: Branch Prediction using Selective Branch Inversion, In: Proc. of the Int. Conf. on PACT, pp.48-56, (1999)
- [3] Erik Jacobsen, Eric Rotenberg, J. E. Smith: Assigning confidence to conditional branch predictions, Proc. MICRO-29, pp.142-152, (1996)