

## 直交性を考慮したハイブリッド分岐予測機構

森 敦司<sup>†</sup> 小林 良太郎<sup>†</sup> 野口 良太<sup>†</sup>  
安藤 秀樹<sup>†</sup> 島田 俊夫<sup>†</sup>

深いパイプラインを備えた現在のマイクロプロセッサは分岐予測ミスペナルティによって性能が大きく制限されている。この問題を緩和するために分岐予測の高精度化が重要となっている。最近、単体予測機構に対してより高い予測精度を実現するためにハイブリッド予測機構が提案された。本研究ではハイブリッド予測機構の設計において直交性という概念を導入し、これに適したLC予測機構を提案する。LC予測機構を用いたハイブリッド予測機構を構成し評価を行った結果、従来に比べSPECint95において0.5%、SPECfp95において1.1%の精度向上を実現した。

### Hybrid Branch Predictor Design Based on Orthogonality

ATSUSHI MORI,<sup>†</sup> RYOTAROU KOBAYASHI,<sup>†</sup> RYOTA NOGUCHI,<sup>†</sup>  
HIDEKI ANDO<sup>†</sup> and TOSHIO SHIMADA<sup>†</sup>

Branch misprediction penalty severely limits performance in modern microprocessors with deep pipelines. To reduce performance degradation, accurate branch prediction is significantly important. Recently, hybrid branch predictors are proposed to achieve more accuracy over single-scheme branch predictors. We introduce concept of orthogonality in the design of hybrid predictors, and propose a new prediction mechanism, called LC branch predictor, which is effective in a hybrid predictor. Evaluation results show the hybrid predictor with the LC predictor improves accuracy by 0.5% in SPECint95 and by 1.0% in SPECfp95 over conventional hybrid predictors.

#### 1. はじめに

現在のマイクロプロセッサは動作速度向上のために深いパイプラインを用いることが多い。この傾向は今後も続くことが予測される。深いパイプラインを備えたプロセッサにとって、分岐予測ミスによるペナルティは性能を大きく制限する要素となる。高い予測精度を実現する予測機構は今後の高性能マイクロプロセッサに必要不可欠である。Changらの研究<sup>1)</sup>によれば、4命令発行のスーパースカラ・プロセッサで、分岐予測ミスペナルティ10サイクルの場合においては、5%の予測ミスが38%の性能低下につながる。

分岐予測とは、分岐方向が過去の分岐結果と何らかの相関があることを利用して、分岐方向を予測するものである。これまでに様々な方法で予測精度を高める研究が行われてきた。その結果、過去の分岐履歴を利用する方法として次の2つに大別できる。一方はローカル履歴であり他方はグローバル履歴である。それぞれの履歴利用方法で高い予測成功率を実現してきたが、同時に限界も見え始めた。なぜなら、分岐によって相関する履歴情報が異なることがあるためである。この問題点を解決するためにハイブリッド予測機構が提案された。これは、複数の予測機構を組合せ、その中から分岐毎に最適なものを選択することで高い予測精度を実現するものである。

これまでのハイブリッド予測機構の研究では、予測精度の高いもの同士を組み合わせることで更に高い精度を達成するという方針で設計されてきた。しかし、ハイブリッド予測機構において単体の予測機構の性能が高いことは必ずしも必要ではない。必要なことは、割り当てられた分岐に対して高い精度を実現する予測機構を複数備えることである。コストを考慮した場合、組

み合わせる各予測機構で正しく予測可能な分岐の集合の共通集合を小さくし、それらの和集合を大きくするほうが効率が良い。

本論文では、既存のローカル履歴を利用した予測機構よりも履歴を有効に利用するループ・カウンタ分岐予測機構(LC)を提案し、これを用いてハイブリッド予測機構を構成し評価した結果を述べる。以下、まず、2章で分岐予測機構についてまとめる。3章で予測機構の直交性について考察を行う。4章でLC予測方式を提案する。5章でLC単体での予測精度を評価する。6章でLCを組み込んだハイブリッド機構を評価する。最後に7章で本論文をまとめる。

#### 2. 分岐予測機構

##### 2.1 単体予測機構

分岐予測は分岐の過去の履歴を参照することにより行なう。そのため、分岐予測機構には履歴を要約するための表を設ける。この表のことを分岐履歴テーブル(BHT: Branch History Table)と呼ぶ。BHTの各エントリは、0-3の値を取る飽和型2ビット・アップ・ダウン・カウンタで構成することが一般的である。各エントリと分岐には何らかの対応を持たせる。分岐命令が実行され、その結果が分岐成立であるならば対応するエントリのカウンタの値を1増加させる。分岐が不成立の場合は1減少させる。予測は、カウンタの値が2以上であれば成立、1以下であれば不成立として行なう。

初期の分岐予測機構では、各分岐のアドレスをBHTのインデックスとすることで分岐とエントリを対応させていた。この方式を2ビット・カウンタ方式(2bc)<sup>2)</sup>と呼ぶ。この方式は、分岐方向は過去の分岐の頻度と相関があるという事実を利用している。

このような過去の分岐の頻度だけではなく、分岐の履歴パターンに相関があることが最近の研究で明らかになってきた。

<sup>†</sup>名古屋大学工学部  
School of Engineering, Nagoya University

この相関を利用した予測機構が2レベル予測機構<sup>7),8)</sup>である。この機構では、BHTのみでなく、最近の分岐の履歴を記録するためのシフト・レジスタを用いる。このシフト・レジスタのことを分岐履歴シフト・レジスタ(BHSR: Branch History Shift Register)と呼ぶ。最新の分岐結果はシフト・レジスタの後ろから入れ、前にシフトを行なうことで記録をする。この履歴パターンと分岐アドレスを用いてBHTを参照する。2レベル予測機構は、分岐方向の頻度のみでなく、履歴パターンとの相関も利用するために、2bcより高い予測精度が得られる。

2レベル予測機構は、履歴パターンの利用方法によりローカル履歴方式とグローバル履歴方式に分類される。ローカル履歴方式は予測を行なう分岐自身の過去の履歴パターンを用いる。この方式の代表例としてPAs<sup>7)</sup>が挙げられる。PAsでは、分岐毎の履歴パターンを記録するため多くのBHSRを配列として用意しておく。このBHSRの配列を、分岐アドレスをインデックスとして参照し、得られるパターンおよび分岐アドレスをインデックスとしてBHTのエントリを指定する。このBHTのエントリを参照することで予測を行なう。PAsは分岐方向が特定のパターンにしたがって変化する場合において、その変化を捉えることが可能である。このため定数回繰り返すループを制御する分岐(以下、ループ分岐と呼ぶ)の予測に適している。グローバル履歴方式は、予測を行なう分岐より以前に実行された分岐の履歴パターンを用いる。この方式ではBHSRを一つ用意する。そして、分岐の方向を実行順に記録する。この方式の代表例としてはGAs<sup>7)</sup>およびgshare<sup>6)</sup>が挙げられる。前者は履歴パターンと分岐アドレスを用いてBHTへのインデックスとしている。後者は履歴パターンと分岐アドレスの排他的論理和をBHTへのインデックスとしている。グローバル履歴方式では、複数のif文の条件の間に何らかの論理的関係がある場合を捉えることが可能である。このためif文に対応する分岐(以下、if分岐と呼ぶ)の予測に適している。

### 2.2 ハイブリッド予測機構

前節で述べたように、ローカル履歴方式とグローバル履歴方式は、異なる相関を用いて予測を行なっている。そのため、どちらか1つの機構のみで全ての分岐の予測を行なうよりは、それらを組み合わせる方が予測可能な分岐の数が増加する。このような考えに基づいて複数の予測機構を組み合わせた予測機構をハイブリッド予測機構<sup>1),2),6)</sup>と呼ぶ。ハイブリッド予測機構は、複数の予測機構による予測の結果のいずれかを選択することで予測を行なう。したがって、その予測結果を選択する機構が新たに必要になる。この機構を以下、予測選択機構と呼ぶ。

ハイブリッド予測機構を構成する上で考えなければならないことは次の3点である。

- (1) 構成要素として用いる単体の予測機構
- (2) 一定のコストの下で最高の予測精度を達成するための、各予測機構へのコスト配分
- (3) 予測選択機構

ここで、コストとはハードウェア量のことである。PAs, GAs, gshareではBHTが支配的である。

これらの問題に関して、これまでの研究では、既存の単体予測機構を組み合わせることを前提に最適化が行われてきた。この結果、一定の解を得ることができた。しかし、ハイブリッド予測機構により適した単体の予測機構に関する考察は行なわれてこなかった。このことは、ハイブリッド予測機構による予測精度の向上の可能性を制限している。

我々は、予測機構同士の直交性というものを定義し、既存の機構ではない、ハイブリッド予測機構により適した予測機構を提案する。なお、(3)に関しては本論文の範囲としない。

## 3. 予測機構間の直交性

### 3.1 直交性の定義

単体の予測機構に比べてハイブリッド予測機構が高い予測精度を実現するには、組み合わせる個々の予測機構が予測可能な分岐の数が十分であることに加え、これらの予測機構間で予測

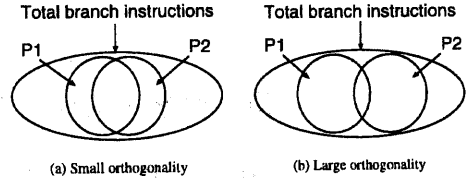


図1 予測機構の直交性

可能な分岐ができるだけ重ならないことが重要である。重なり具合が大きい場合、単体の予測機構に対するハイブリッド予測機構のメリットは小さい。なぜなら、ハイブリッド予測機構では個々の予測機構にコストを配分しなければならないから、一定のコストの下では、個々の予測精度は低下する。さらに、予測選択機構が必要であるから、その分予測機構に与えることのできる全コストは減少し、個々の予測精度はさらに低下する。逆に重なり具合が小さい場合、すなわち重なっていない分岐が多い場合、重なっていない分岐の数だけ単体の予測機構に比べて性能向上が望める。

このことは、次のように表現できる。予測機構Pで予測可能な分岐の集合を $B(P)$ 、Pのコストを $C(P)$ とする。2つの予測機構 $P1, P2$ があり、選択機構のコストを $C(S)$ とする。これを用いてハイブリッド機構Hを構成するとHで予測可能な分岐の集合 $B(H)$ およびコスト $C(H)$ は、

$$B(H) = B(P1) \cup B(P2)$$

$$C(H) = C(P1) + C(P2) + C(S)$$

である。 $B(H)$ を大きくするためには $B(P1)$ と $B(P2)$ を単に大きくするだけでは不十分で、その和集合 $B(P1) \cup B(P2)$ を大きくし、全体集合に近付ける必要がある。もし個々の $B$ が大きくても重なり $B(P1) \cap B(P2)$ が大きければ $B(H)$ はそれほど増加しない。コストは単純に算術和なので、重なりが大きければコスト増加に対する精度向上が小さい。

2つの予測機構において、互いに予測可能な分岐が異なるとき、我々はこれらの予測機構は直交していると呼ぶ。2つのいずれかで予測可能な分岐に対し、一方のみで予測可能な分岐の割合を直交性と呼ぶ。即ち、 $P1$ (または $P2$ )では予測できるが $P2$ (または $P1$ )では予測できない部分が多いとき $P1$ と $P2$ は直交性が高いという(図1(b)参照)。逆ならば直交性が低いという(図1(a)参照)。

### 3.2 PAsとgshareの直交性

過去の研究によると、ローカル履歴方式(PAs, 2bc等)とグローバル履歴方式(GAs, gshare等)を組み合わせることでローカル履歴方式同士、あるいはグローバル履歴方式同士を組み合わせるよりも良い結果が得られている。特に、PAsとgshareの組合せが最も優れている<sup>1)</sup>。これは、ローカル履歴方式がループ分岐、グローバル履歴方式がif分岐の振る舞いを捉えることができるからである。

以下、PAsとgshareの直交性について考えてみる。PAsのBHTのコストは $2^{j+k}$ である。ここで、 $j, k$ はBHTのインデックスであり、それぞれ分岐アドレスの長さ、履歴長である。したがって、一定のコストの下では、分岐アドレス長と履歴長の間にトレードオフが存在する。分岐アドレスを長くすれば、履歴長を短くしなければならないので、ローカル履歴との相関を利用することができなくなる。反対に、履歴長を長くすれば、分岐アドレス長を短くしなければならないので、BHTエントリでの衝突が生じる。これまでの研究では、履歴長を3~4とすることが最善であることがわかってきている<sup>1),3),4)</sup>。このことは、PAsで予測可能なループ分岐は、コスト上、繰り返し回数の少ないループに対してだけであることがわかる。

一方、gshareのBHTのコストは $2^{max(j,k)}$ である。つまり、分岐アドレス長より履歴長が短ければ、BHTのコストは増大しない。したがって、gshareではPAsと異なり履歴長を非常に長くすることができる。このことは、gshareはグローバル履歴を利用する予測方式であるが、同時にローカル履歴も

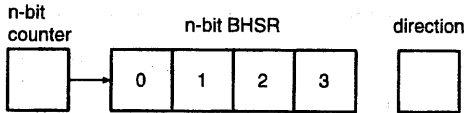


図2 LCのエントリ

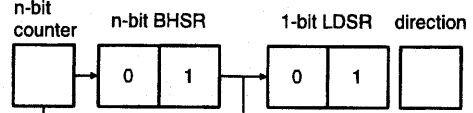


図3 LCのエントリの実現方法

利用可能であることを示している。例えば、ループ・ボディに1つの if-then-else 文を持つループを考えてみる。このループでは1回のイテレーションに2つの分岐(1つの if 分岐と1つのループ分岐)が実行される。この場合、例えば履歴長8の gshare では、過去4回のローカル履歴との相関を利用できる。今、ループ・ボディの if 分岐を  $I$ 、ループ分岐を  $L$  とすると、5回目のイテレーションのループ分岐を予測する際の履歴は、 $I_1, I_2, I_3, I_4, L_1, L_2, L_3, L_4$  となる。添字はイテレーションを示す。履歴は  $L_1, L_2, L_3, L_4$  を含んでいるので、gshare は履歴長4の PAs と同じく過去4回のローカル履歴を利用することができる。

PAs はコスト上、短い履歴しか利用できない。一方 gshare は、長い履歴を利用できることにより短いローカル履歴をある程度利用できる。このことは、PAs と gshare との直交性を減少させる。つまり、PAs と gshare の組合せが、対コスト性能上最善ではない。

#### 4. LC 予測機構

前章より、gshare と直交性の高いローカル履歴方式とは、長い履歴を利用可能なものであることがわかった。即ち、繰り返し回数の多いループのループ分岐を予測できる予測機構が必要である。本章では、この要求を満たすループ・カウンタ予測機構(LC: Loop Counter)を提案する。

##### 4.1 予測アルゴリズム

ループ分岐は、ループの繰り返しのために連続して何回か taken し、ループ終了のために1度 not-taken する。LC はこれを捉えるために、分岐アドレス毎に、同一方向に連続して分岐した回数の過去の履歴を記録する表を持つ。表の各エントリは、具体的には、1つの飽和型カウンタと、このカウンタと同一ビット数で深さが4の BHSR と、1つのフラグ(分岐方向ビット:direction)を持つ(図2)。

エントリの更新は次のように行う。

- $n$  ビットのカウンタは、そのエントリに関連する分岐の分岐方向が変化しない間、その分岐命令の実行回数を数える。最大  $2^n - 1$  まで数え、それ以上では飽和する。分岐方向ビットはこの間の分岐方向を記憶する。
- 分岐方向が変わったら、BHSR の左よりカウンタの内容を入れ、右にシフトする。そして分岐方向ビットを反転する。カウンタは分岐方向が変化しない間、再び分岐の実行回数を数える。

予測は次のように行う。

- (1) 先に記した通り、ループは何回か連続して taken し、ループ終了時に1回 not-taken する。この振舞いを捉えるため、BHSR の第1エントリと第3エントリの内容( $N$ とする)が等しく、かつその値が飽和していない場合、当該分岐はループ分岐であると判定する。以下これをループ判定と呼ぶ。ループと判定された場合の予測は、次のようになる。
  - (a) 分岐方向ビットが taken の値を持つ場合、 $N$  回繰り返す規則ループのループ分岐であると判定する。この場合、再び  $N$  回 taken を繰り返すと予測する。従って  $N$  回に達しない間 taken を予測し続ける。 $N$  回に達した場合は not-taken を予測する。
  - (b) 分岐方向ビットが not-taken の値を持つ場合、当該分岐はループを終了するループ分岐であると判定する。この場合も先と同様、 $N$  回 not-taken を繰り返すと予測する。

- (2) シフト・レジスタの第1エントリと第3エントリの内容が等しくない、または等しいが飽和している場合、ループと判定しない。この場合、前回の分岐方向と同一の方向に分岐すると予測する。

(1) の (b) において、ループを正しく検出するためには、 $N$  が1であることをチェックする必要があるが、LC ではチェックしない。これは、アルゴリズムの簡単化のためである。また、規則ループ検出には (1) の (a) が直前に成立している必要があるが、LC ではチェックしない。これは不規則ループの終了を検出するためである。

誤って不規則ループ分岐を規則ループ分岐と判定した場合、判定の取り消しは次のように行なわれる。

- カウンタ値が  $N$  に達する前に分岐方向が反転した場合、通常のエントリ更新が行われる。即ち、カウンタを含めて BHSR は右にシフトされる。これにより現在のループ判定は自動的に破棄される。
- カウンタ値が  $N$  に達しても分岐方向が変化しなかった場合、単に現在の分岐方向を予測とし続ける。これにより (1) の (a) の条件を満たさなくなり、規則ループの判定は破棄される。

以上のアルゴリズムは、次のように簡単化できる。

- カウンタと BHSR の第1エントリと第3エントリの内容が全て等しく、かつ値が飽和していない場合、分岐方向フラグが保持している前回の分岐方向とは逆の方向に分岐すると予測とする。
- そうでなければ、前回の分岐方向と同一の方向に分岐すると予測する。

##### 4.2 LC 予測機構の構成

本節では、前節で述べたアルゴリズムを少ないコストで実現する方法を示す。

前節で述べたアルゴリズムを単純に実現しようとすると、カウンタと同一ビット数で深さ4のシフト・レジスタが必要である。しかし、シフト・レジスタはループ判定のためだけのものであるから、過去の全ての内容を保持する必要はない。判定のために必要な最小限の深さがあれば良い。

コストを最小にした LC のエントリの実現方法を図3に示す。エントリには、図2における深さ4のシフト・レジスタの代わりに、深さ2のシフト・レジスタと1ビットで深さ2のシフト・レジスタ(ループ判定シフト・レジスタ LDSH: Loop Detection Shift Register)を設ける。カウンタと分岐方向ビットは図2のものと同変わらない。

LDSH の動作を示す。

- LDSH は、BHSR と同じく、当該分岐が前回の分岐方向と異なる方向に分岐したとき、右にシフトする。
- シフトの際、カウンタと BHSR の第1エントリの内容が等しければ、左から1を入れる。即ち、当該分岐はループ分岐と解釈する。そうでなければ、0を入れる。

#### 5. LC 単体評価

本章では、LC 予測機構単体の予測精度と、ハイブリッド予測機構において組み合わせる gshare との直交性の評価を行う。

##### 5.1 評価の方法

NEC EWS4800(CPU は R4400) でコンパイルしたプログラムを実行し得た命令トレースを用いてシミュレーションを行った。ベンチマーク・プログラムとして、表1に示す SPEC95 を

表1 使用したSPEC95 ベンチマーク

分類	ベンチマーク
int	compress95
	go
	li
	ijpeg
	m88ksim
	vortex
fp	applu
	fpppp
	hydro2d
	mgrid
	su2cor
	swim
	tomcatv
	turb3d
	wave5

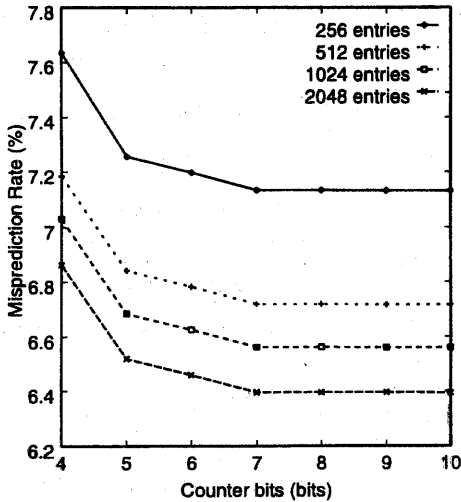


図4 LCのカウンタのビット数に対する予測ミス率

用いた。整数演算系アプリケーション（以下、intと呼ぶ）6種類、浮動小数点演算系アプリケーション（以下、fpと呼ぶ）9種類の計15種類よりなる。

### 5.2 LCの予測精度

まず、LCのカウンタのビット数の検討を行なう。図4にLCのカウンタのビット数と予測ミス率の関係を示す。この図からわかるように、7ビット以上長いカウンタを設けても予測ミス率低減には貢献しない。これは、7ビット・カウンタでは、カウンタが飽和することにより128以上の繰り返し回数を正しくカウントできないが、これによるその分岐に関するミス率は1%未満なので、全予測ミス率にはほとんど影響を与えない。以降、LC予測機構に用いるカウンタは7ビットとする。

次に、他の予測機構との比較を行なう。2bc, PAs, gshareと比較した。図5にintに対する評価結果を、図6にfpに対する評価結果を示す。各予測機構のパラメータは最善のものとしている。

図5よりわかるように、intではgshareが最も高い予測率を達成している。これは、intには制御バスに依存するif分岐が数多く含まれているためである。intにはまた、規則ループをあまり多く含んでいないので、ローカル履歴方式では高い予測精度を達成することは難しい。そのため、PAsはgshareより

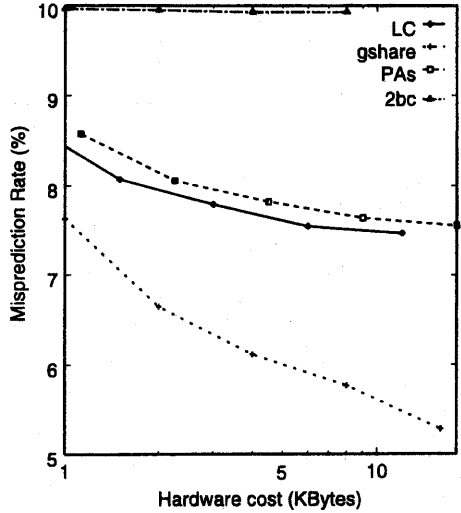


図5 他の予測機構との比較 (int)

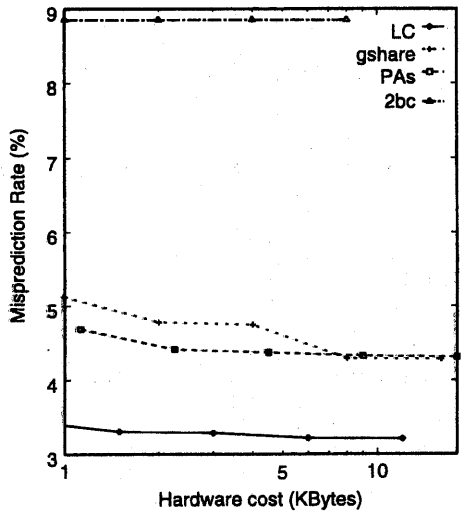


図6 他の予測機構との比較 (fp)

予測精度は1.0%から2.2%劣る。LCはPAsの予測精度をわずかに(約0.1%)上回る結果を得た。

図6よりわかるように、fpでは逆にローカル履歴方式の方がグローバル履歴方式より優れている。fpは規則ループを多く含むので、特にLCは他の予測機構に比べかなり優秀である。PAsに比較して1.0%高い精度を実現している。

以上の結果より、LC予測機構は単体でも既存のローカル履歴方式と同等あるいはそれ以上の予測精度を達成していることがわかる。

### 5.3 直交性の評価

LCとgshareの直交性をPAsとgshareの直交性と比較する。直交性の測定には次の方法を用いた。

- 各分岐命令における各予測機構の予測ミス率を求め、その差を計算する。

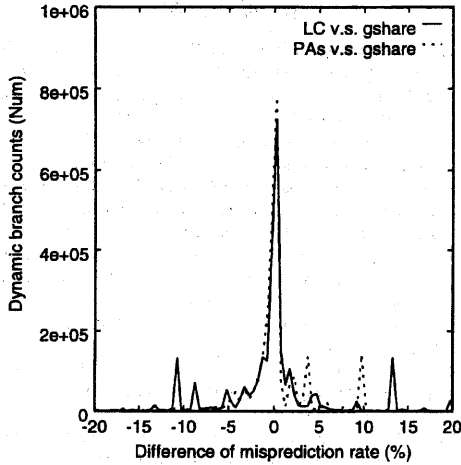


図7 直交性の比較 (int)

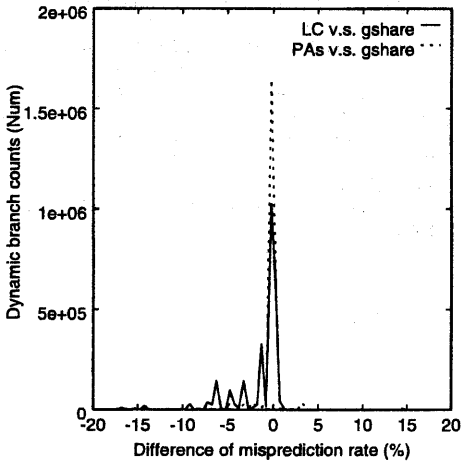


図8 直交性の比較 (fp)

- 次に、分岐命令を予測ミス率の差で分類し、その動的実行回数をカウントする。

図7、図8に、コスト4KBで各予測機構を構成した場合での測定結果を示す。図7はintに対する測定結果であり、図8はfpに対する測定結果である。実線はLC対gshareに対する測定結果であり、破線はPAs対gshareに対する測定結果である。横軸は、LCの予測ミス率からgshareの予測ミス率を引いた値、または、PAsの予測ミス率からgshareの予測ミス率を引いた値である。グラフは予測ミス率の差が-20%~+20%の範囲のみ示している。この範囲に全命令数の98%が入っており、これを越える範囲は非常に少ないので表示していない。予測率の差が0に近い部分に命令数が集中している場合に直交性が低く、左右に分散していれば直交性が高いといえる。また、左に分布する命令が多いほど、gshareでは予測できない分岐をPAsまたはLCが予測していることになり、組み合わせた場合予測精度向上が期待できる。このグラフを、予測ミス率の差の範囲で分類し、各範囲に含まれる動的分岐命令数の割合を表2に示す。

測定結果は、int、fpのどちらのベンチマークに対しても、PAs対gshareに比べてLC対gshareの方が直交性が高いこ

表2 予測ミス率の差と動的分岐命令の割合

ベンチマークと予測機構		動的分岐命令数の割合 (%)		
		-100 ~ -5	-5 ~ 5	5 ~ 100
int	LC+gshare	13.7	75.4	10.9
	PAs+gshare	7.8	83.2	9.0
fp	LC+gshare	11.5	88.3	0.2
	PAs+gshare	2.9	96.5	0.6

とを示している。例えば、図7より、予測ミス率の差が0での命令数は、LC対gshareの方がPAs対gshareに比べて10%小さい。また、予測ミス率の差が-5%から5%の動的命令数は、PAs対gshareが83.2%であるのに対して、LC対gshareは75.4%と7.8%少ない。即ち、LC対gshareの方が左右への拡散の度合いが強い。さらに、予測ミス率の差が-5%以下、即ち、gshareよりPAsまたはLCの方が予測精度が5%以上高い分岐の割合は、PAs対gshareでは7.8%であるのに対して、LC対gshareは13.7%と5.9%多い。従ってLCの方がハイブリッドによる予測精度向上がより期待できる。

同様に図8より、予測ミス率の差が0での命令数は、LC対gshareの方がPAs対gshareに比べて30%小さい。また、予測ミス率の差が-5%から5%内の動的命令数は、PAs対gshareが96.5%であるのに対し、LC対gshareは88.3%と8.2%の差になる。よってLC対gshareの方が左右への拡散の度合いが強い。さらに、予測ミス率の差が-5%以下の分岐の割合は、PAs対gshareでは2.9%であるのに対して、LC対gshareは11.5%と8.6%多い。これはLCの方がPAsよりもfpでは高い予測精度を達成していることだけでなく、gshareとの直交性が高いことも示している。

具体的な評価結果は示さないが、個々の予測機構のパラメータを変更した場合であっても、結果の傾向は同じである。

## 6. LCとgshareによるハイブリッド予測機構の評価

### 6.1 基本構成

前章で示した直交性を実際のハイブリッド予測機構で検証する。

グローバル履歴方式にgshareを用い、ローカル履歴方式にLCとPAsを用い、比較する。

予測選択機構には2ビット・カウンタ機構<sup>9)</sup>を用いた。この機構は分岐アドレスでインデックスされる各エントリが2ビット飽和型アップ・ダウン・カウンタを持つ。各予測機構の予測の正解・不正解によってカウンタ値を上げ下げする。カウンタの値が11または10であればgshareの予測結果を採用し、01または00であればもう一方(LC、PAs)の予測結果を採用する。

### 6.2 評価結果

PAsとgshareを組み合わせたハイブリッド予測機構と、LCとgshareを組み合わせたハイブリッド予測機構の予測精度の評価結果を示す。図9はintに対する評価結果であり、図10はfpに対する評価結果である。グラフは、各コストにおいて最も優れた組合せにおける結果である。

5章における単体での評価では、intではLCの予測精度はPAsに対してコスト4KBの場合で0.1%良いだけであったが、図9よりわかるように、LC+gshareの予測精度はPAs+gshareより全てのコストにおいて0.5%以上高い。これは、LC+gshareの方がPAs+gshareより直交性が高いためである。

またfpでは、図10よりわかるように、LC+gshareの予測精度はPAs+gshareに対して1.0%の大きな向上を実現している。これは、5章で示したようにfpではLC自体がPAsに対して高い予測精度を達成できることに加え、直交性が高いことによるものである。

## 7. 結論

単体の予測機構では高精度化が困難になりつつあるためにハ

## 参考文献

- 1) P.-Y. Chang, E. Hao, and Y. Patt, "Alternative Implementations of Hybrid Branch Predictors," In *Proc. 28th Annual International Symposium on Microarchitecture*, pp.252-257, November 1995.
- 2) M. Evers, P.-Y. Chang, and Y. Patt, "Using Hybrid Branch Predictors to Improve Branch Prediction Accuracy in the Presence of Context Switches," In *Proc. 23rd Annual International Symposium on Computer Architecture*, pp.3-11, May 1996.
- 3) N. Gloy, C. Young, J. B. Chen, and M. D. Smith, "An Analysis of Dynamic Branch Prediction Schemes on System Workloads," In *Proc. 23rd Annual International Symposium on Computer Architecture*, pp.12-21, May 1996.
- 4) I. Gwennap, "New Algorithm Improves Branch Prediction," *Microprocessor Report*, Vol. 9, No. 4, pp.17-21, January 1995.
- 5) J. K. F. Lee and A. J. Smith, "Branch Prediction Strategies and Branch Target Buffer Design," *Computer*, 17(1), January 1984.
- 6) S. McFarling, "Combining Branch Predictors," *WRL Technical Note TN-36*, Digital Equipment Corporation, June 1993.
- 7) T.-Y. Yeh and Y. Patt, "Two-Level Adaptive Branch Prediction," In *Proc. 24th Annual International Symposium and Workshop on Microarchitecture*, pp.55-61, November 1991.
- 8) T.-Y. Yeh and Y. Patt, "A Comparison of Dynamic Branch Predictors that use Two Levels of Branch History," In *Proc. 20th Annual International Symposium on Computer Architecture*, pp.257-266, May 1993.

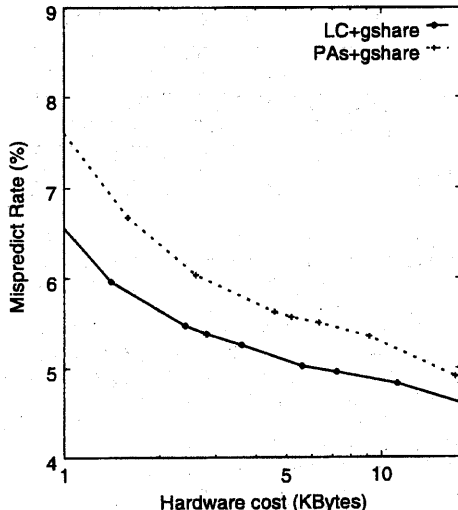


図9 ハイブリッド機構の比較 (int)

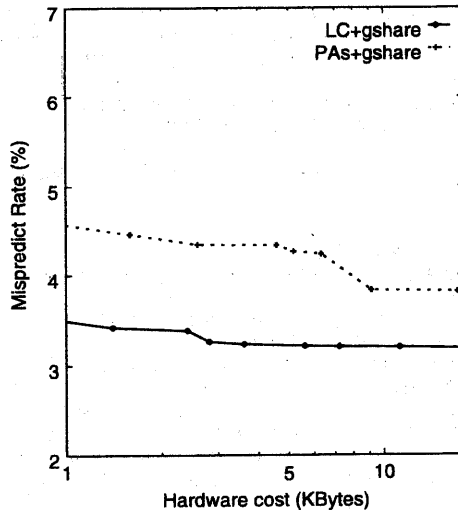


図10 ハイブリッド機構の比較 (fp)

イブリッド予測機構がこれまでに提案されてきた。その組合せは多く存在するが、中でもローカル履歴方式とグローバル履歴方式を組み合わせることが良いとされてきた。PAsとgshareのハイブリッドはその良い例であり、高い精度を実現していた。

本論文では、ハイブリッド予測機構において高い精度を達成するための組合せに関して直交性という新たな指標を定義した。gshareとPAsは直交性が極めて高いというわけではなく、ハイブリッド予測機構として最適ではないことを示した。その上で、gshareと組み合わせるローカル履歴方式としてLC予測機構を提案した。LCはこれまでのローカル履歴方式に比べ、同一のコストで非常に長い履歴を利用することができるため、より高い直交性を得ることができる。

この結果、gshareとPAsを組み合わせた場合に比べ、intで約0.5%、fpで1.1%予測精度を改善できることがわかった。