

ハイブリッド予測機構における選択器と予測器の協調による 予測ミス率の低減

齋藤史子 仲沢由香里 山名早人

早稲田大学理工学部

近年、パイプライン段数の深化に伴い、高精度な分岐方向予測機構が求められている。多くの予測機構は、競合を緩和するために、予測表の数量を増加させ、ハードウェア容量を増大させる傾向にあった。本研究では、Hybrid 予測機構を対象とし、予測表の数量を増加させずに、予測ミス率を低減する方法を提案する。この方式に基づいた予測機構を予測カウンタ状態参照予測機構 (Hybrid Predictor Referenced Prediction Counter State: Hybrid-RPCS) と呼ぶ。予測ミス率の高い難予測分岐は、分岐成立・不成立が遷移し、偏向方向が定まらないと言われている。そこで、偏向方向の定まらない分岐に対応するために、選択器カウンタの状態と予測器カウンタの状態に応じて、予測結果を反転する。例えば、Bi-Mode 予測機構では、予測表の採用を決定する選択器カウンタが strongly 状態で、かつ、最終的な予測を決定する予測器カウンタが weakly 状態であり、選択器の予測に逆らった場合の予測ミス率が高いことを利用する。SPECint95 ref 入力セットを対象にシミュレーションした結果、1.5KB Bi-Mode 予測機構に適用した場合、最大 1.43%(099.go)、12KB Combining 予測機構に適用した場合、最大 0.16%(099.go) 予測ミス率が低減した。

Branch Direction Miss Prediction Rate Diminution in Cooperation with a Selector and Predictors on Hybrid Branch Predictor

Fumiko Saito Yukari Nakazawa Hayato Yamana

School of Science and Engineering, Waseda Univ.

In recent years, as pipelines length deeper, more accurate branch direction predictors are needed. Most of the branch predictor tend to increase hardware budget for aliasing alleviation. This research proposes the means for miss prediction rate reduction in same hardware budget Hybrid Predictor. This predictor is called Hybrid Predictor Referenced Prediction Counter State(Hybrid-RPCS). Generally, low-predictability branches have high transition rate and no direction deviation. For low-predictability branches, prediction is turned the other way, based on a selector counter state and predictor counter states. For example, Bi-Mode Predictor has a strongly-state selector counter choosing prediction tables and a weakly-state predictor counter deciding final prediction, and predicts the opposite selector counter direction, miss prediction rate shows high. In SPECint95(ref) simulation, miss prediction rate reduces max 1.43% on 1.5KB Bi-Mode Predictor and max 0.16% on 12KB Combining Predictor.

1 はじめに

近年、パイプライン段数の深化に伴い、高精度な分岐方向予測機構が求められている。多くの予測機構は、競合を緩和するために、予測表の数量を増加させ [1, 2]、ハードウェア容量を増大させる傾向にあった。本研究では、競合緩和ではなく、難予測分岐の予測に着目し、Hybrid 予測機構において、予測表数量を増加させることなく、予測ミス率を低減する。

難予測分岐は、Haungs ら [3] によって、分岐成立・不成立が遷移し、偏向方向が定まらないことが示されている。そこで、偏向方向の定まらない難予測分岐に対応するために、複数の予測表で構成される Hybrid 予測機構の選択器と予測器のカウンタ状態を利用する。選択器や予測器のカウンタには、2-bit 飽和カウンタが採用され、strongly taken, weakly taken, weakly

not-taken, strongly not-taken の 4 状態を遷移する。Hybrid 予測機構の選択器は、従来は予測表選択のために利用されるが、strongly 状態である場合は、選択が連続成功しているため、高信頼度、weakly 状態は、選択が過去数回の間に選択ミスしているため、低信頼度と判断できる。同様のことが予測器のカウンタ状態にも言える。

実験の結果、Bi-Mode 予測機構では、選択器が strongly 状態で、かつ、予測器が weakly 状態である場合に、予測ミスする可能性が比較的高いことが判った。そこで、Bi-Mode 予測機構と Combining 予測機構に対して、各々の予測機構の性質に応じた条件を設定することで、選択器と予測器の状態に応じて予測結果を反転する。本稿では、この予測器を予測カウンタ状態参照予測機構 (Hybrid Predictor Refer-

enced Prediction Counter State: Hybrid-RPCS) と呼ぶ。SPECint95 ref 入力セットを対象にシミュレーションした結果、1.5KB Bi-Mode 予測機構に適用した場合、最大 1.43%(099.go)、12KB Combining 予測機構に適用した場合、最大 0.16%(099.go) 予測ミス率が低減した。

本稿は、2 に既存の分岐方向予測機構、3 に実験環境、4 に Hybrid 予測機構におけるカウンタ状態と予測ミス率の関係の解析、5 に提案手法について述べる。6 は、まとめである。

2 既存の分岐方向予測機構

分岐方向予測機構は、文献 [4] でも述べたように、単一の予測表で構成される単体予測器と、複数の予測表で構成される Hybrid 予測機構に分類できる。主な単体予測器には、PC でインデクス付けられた Bimodal 予測器、分岐履歴と PC の XOR でインデクス付けられた Gshare 予測器がある。これらの単体予測器は、Hybrid 予測機構の構成要素にもなる。以降、本稿で実験対象とした Bi-Mode 予測機構と Combining 予測機構¹の構成を説明する。これらの Hybrid 予測機構は、現存する最も優れた予測器として知られている。

Bi-Mode 予測機構 [2] Bi-Mode 予測機構は、PC によってインデクス付けられた Choice PHT、(PC XOR Global 分岐履歴) によってインデクス付けられた、2 つの Direction PHT で構成される (図 1)。Choice PHT によって、Direction PHT を選択し、Direction PHT が予測を行う²。Choice PHT は、常に更新されるが、Direction PHT は、予測結果を採用された PHT のみ更新される。

Combining 予測機構 [1] Combining 予測機構は、複数の単体予測器を予測表として組み合わせた予測機構である (図 2³)。予測の成功・失敗で遷移する 2-bit 飽和カウンタ⁴の表である選択器によって、採用する予測表を決定する。予測表の採用・不採用に関わらず、常に予測表を更新する。

¹Hybrid 予測器は、狭義では、Combining 予測器を指すことがある。

²Choice PHT において Taken と予測される時、Taken PHT における予測が採用され、Choice PHT において Not-Taken と予測される時、Not-Taken PHT における予測が採用される。

³本稿で実験対象とした Combining 予測器である Gshare 予測器と Bimodal 予測器を組み合わせた構成を示す。

⁴構成要素となる予測機構の予測が互いに異なる時、予測が正解した方に遷移する。

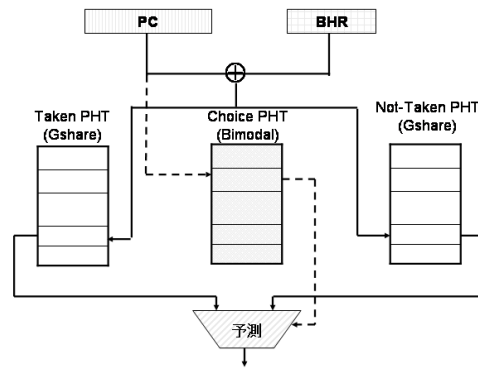


図 1: Bi-Mode 予測機構 [2]

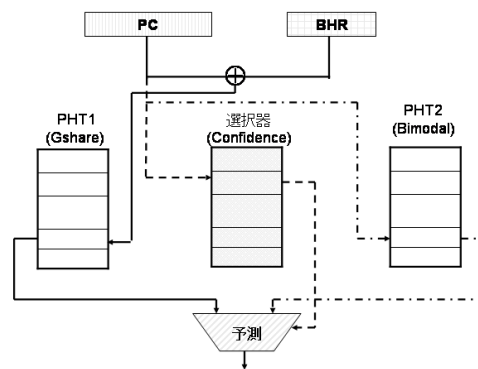


図 2: Combining 予測機構 [1]

表 1: SPECint95 の命令数 (100 万命令)

プログラム名	入力	全命令	全条件分岐命令
099.go	null.in	36,137	4,188
124.m88ksim	ctl.in	64,578	9,147
126.gcc	cp-decl.i	1,439	217,921
129.compress	bigtest.in	42,390	5,567
130.li	*.lsp	55,691	8,494
132.jpeg	vigo.ppm	29,799	1,679
134.perl	scrabbl.pl	24,384	3,156
147.vortex	vortex.in	76,284	9,542

3 実験環境

シミュレータは、条件分岐のみを対象に分岐予測ミス率を算出するように改良を加えた SimpleScalar tool set Version 3.0c/PISA [5] の sim-bpred⁵を採用し、ベンチマークは、SPECint95 の表 1 に示した入力⁶を対象にした。各々のプログラムは、gcc 2.7.2.3 -O2 -funroll-loops でコンパイルされている。

4 Hybrid 予測機構の解析

Hybrid 予測機構が複数の予測表で構成されることに着目した。構成要素となる各々の予測表は、予測カウンタと呼ばれる 2-bit 飽和カウンタの集まりである。予測カウンタは、分岐の成立・不成立に応じて、strongly taken, weakly taken, weakly not-taken, strongly not-taken の 4 状態を遷移する。つまり、新たな信頼度判定機構を用意しなくても、カウンタが strongly 状態であり、かつ、複数の予測表が同じ方向を指し示している場合は、分岐の偏向が強くなり、信頼度が高いと判断できる。以降、Bi-Mode 予測機構、Combining 予測機構の予測ミス状況、カウンタ状態と予測ミス率の関係について示す。本節では、12KB(16384 エントリ × 3) 予測機構の解析結果を示すが、1.5KB(2048 エントリ × 3) 予測機構も類似した解析結果になった。

4.1 Bi-Mode 予測機構

Bi-Mode 予測機構は、分岐命令毎の偏向を示す Choice PHT によって、分岐成立・不成立の偏向毎に、Direction PHT に分岐命令を割り振る。Bi-Mode 予測機構は、図 1 に示すように、Choice PHT に Bimodal 予測器、Direction PHT に Gshare 予測器を採用している。つまり、Bimodal 予測器の予測を Direction PHT に割り振るための偏向判断だけでなく、実際に適用することで、履歴を参照しない予測と、Global な履歴を参照した予測ができる可能性がある。そこで、Bimodal 予測器の予測の信頼性を確かめるために、Choice PHT の偏向と Direction PHT の予測方向が一致する場合と、一致しない場合について、予測ミス率を調査した。その上で、予測カウンタ状態と予測ミス率の関係を分析した。

⁵sim-bpred シミュレータでは、命令は逐次実行されると想定され、前の分岐が解決するまでは次の分岐は実行されない。

⁶複数の入力がある場合には、最も含まれる動的条件分岐が多いものを ref 入力セットから選択した。

(1) Direction 一致・不一致と予測ミス率の関係

Direction PHT で Direction と一致しない予測、つまり、Taken PHT で NotTaken、もしくは、Not-Taken PHT で Taken と予測する場合、Choice PHT が偏向判定ミスしたと判断できる。図 3 に示すように、8 割以上の殆どの分岐が、割り振られた Direction PHT と同じ方向を予測する。つまり、8 割以上の分岐が、Taken PHT に割り振られた場合、Taken、Not-Taken PHT に割り振られた場合、NotTaken と予測する。また、Direction 一致時の予測ミス率は、最大でも 099.go で 11.41% であり、このときの予測成功率は、70.62% で、Direction が一致する分岐全体に占める割合は小さい。しかし、Direction PHT で Direction と一致しない予測をする場合に予測ミスする条件付確率は、4 割と低い。このことから、Direction PHT が Direction とは逆に予測する場合の予測ミス率に注目して解析を進めた。

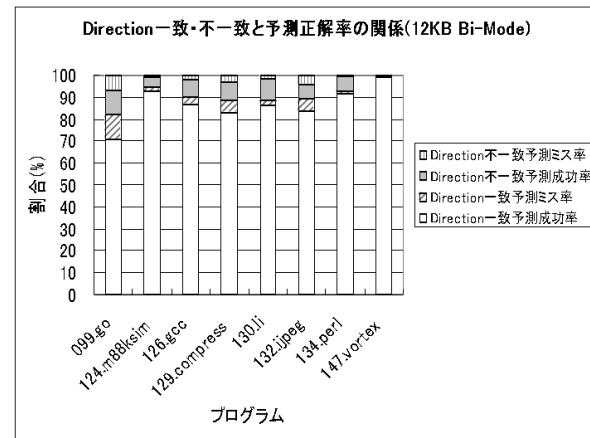


図 3: Direction 一致・不一致と予測ミス率の関係

(2) カウンタ状態と予測ミス率の関係

Choice PHT, Direction PHT の予測カウンタ状態毎の予測ミス率を調査した。図 4 に、ほぼすべてのプログラムを通じて予測ミス率の方が予測成功率より高かった、

- Choice PHT が strongly nottaken 状態であり、かつ、NotTaken PHT が weakly taken
- Choice PHT が strongly taken 状態であり、かつ、Taken PHT が weakly nottaken

の場合の予測成功率と予測ミス率を示す．このときの予測表カウンタの状態は，Choice PHT が strongly 状態で強い偏向を示している（自信がある）にも関わらず，Direction PHT が Direction とは逆方向の weakly 状態である（自信がない）ことから，予測の信頼度が低いと判断できる．解析結果から，予測表のカウンタ状態が，予測の信頼度の指標になりうる事が判った．

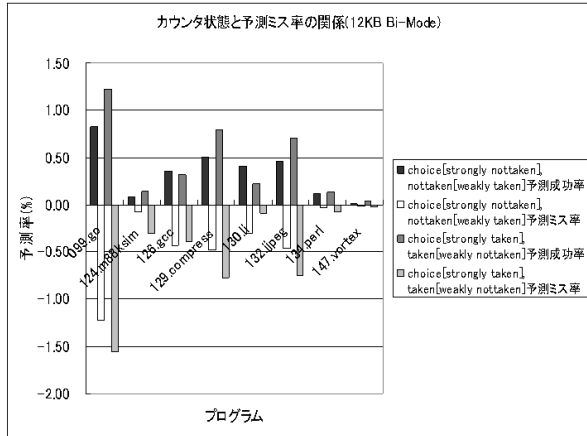


図 4: カウンタ状態と予測ミス率の関係

測ミス率の 2~6 割程度を占める．つまり，2~6 割の予測ミスは，不採用予測表の予測を採用することで，予測ミス率が低減可能であることを示している．また，採用予測表でも不採用予測表でも予測ミスする確率を完全予測ミス率と呼ぶ．ここでは，予測表カウンタを参照することで，選択予測ミス率を削減することで，全体の予測ミス率の低減を図る．次に，信頼度が低いと判断できる予測表カウンタ状態毎の予測ミス率を調べる．

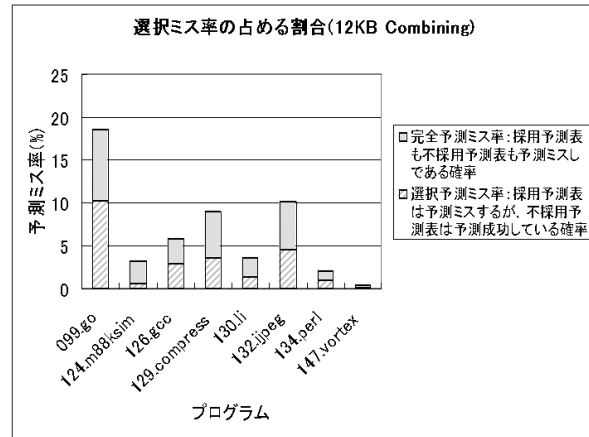


図 5: Combining 予測機構の選択ミス率の割合

4.2 Combining 予測機構

Combining 予測機構は，予測表の信頼度を判定する選択器によって，Bimodal 予測器，Gshare 予測器のどちらの予測を採用するか決定する．Combining 予測機構では，Bi-Mode 予測機構のように，選択器が分岐の偏向を示さないため，選択器と予測表の予測の一致・不一致で信頼度を判定できない．しかし，Combining 予測機構は，Bi-Mode 予測機構とは違って，予測の採用・不採用に関わらず，常に予測表を更新するため，選択器の判定する予測表の信頼度と，予測表同士の予測の一致・不一致と予測カウンタの状態によって，より詳細に信頼度を判定可能と考える．そこで，予測ミスしたときの採用予測表と不採用予測表の予測結果が一致する，つまり，予測ミスしたときに不採用予測表でも予測ミスする，選択予測ミス率の全予測ミス率に占める割合を調査することから，解析を始める．

(1) 選択予測ミス率と予測ミス率の関係

採用予測表で予測ミスでも不採用予測表で予測成功する選択予測ミス率は，図 5 に示すように，全予

(2) カウンタ状態と予測ミス率の関係

選択器カウンタが weakly 状態で，かつ，採用予測表カウンタも weakly 状態で信頼度が低いと判断され，不採用予測表カウンタが strongly 状態である場合の不採用予測表の予測成功率，ミス率を図 6 に示した．つまり，

- 選択器が weakly Gshare 状態，かつ，Gshare が weakly 状態，かつ，Bimodal が strongly 状態 (Gshare→Bimodal)
- 選択器が weakly Bimodal 状態，かつ，Gshare が strongly 状態，かつ，Bimodal が weakly 状態 (Bimodal→Gshare)

の場合である．但し，予測成功に，採用予測表の予測が成功した場合を加えていない．実験結果から，上記の基準に従って，不採用予測表を適用すると，1%未満の範囲で，予測ミス率が増減することが判った．

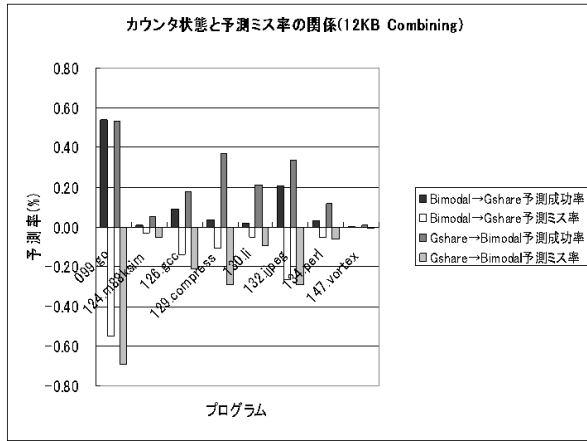


図 6: カウンタ状態と予測ミス率の関係

5 Hybrid-RPCS 予測機構の提案

前節で得た結果から、選択器と予測器のカウンタ状態を参照することで予測ミス率を低減する手法を提案する。この機構を、予測カウンタ状態参照予測機構 (Hybrid Predictor Referenced Prediction Counter State: Hybrid-RPCS) と呼ぶ。

5.1 提案方式

前節で得た結果から、予測表カウンタの参照条件を表 2 に示す。以降、提案予測方式の特長について示す。

Bi-Mode-RPCS 予測機構 Bi-Mode 予測機構では、信頼度の高いと判断される場合のみ、Choice PHT の予測結果を採用しようとする事で、予測ミス率の低減を試みた。Bi-Mode 予測機構では、Direction PHT は予測が採用された場合のみ更新されるので、予測を採用しない Direction PHT のカウンタは参照せずに予測する。最終的な予測を Global 履歴を利用した Gshare 予測機構でのみ決定する Bi-Mode 予測機構に、履歴を利用しない予測機構で予測し易い分岐もカバーすることを目的とする。

Combining-RPCS 予測機構 Combining 予測機構では、予測ミス率は、信頼度判定精度に依存する。そこで、信頼度判定精度を低減させることによって、予測ミス率の低減も試みる。つまり、選択器の判定が信頼できない (weakly 状態) 場合、信頼できる (strongly 状態)、構成要素となる予測器を採用する。採用予測表で予測ミスでも、不採用予測表で予測成功してい

るような選択予測ミス率の低減を目的とする。

表 2: カウンタ状態参照条件

Bi-Mode-RPCS : 予測方向の反転		
Choice PHT	Taken	Not Taken
strongly taken	weakly nottaken	—
strongly nottaken	—	weakly taken
Combining-RPCS : 採用予測機構の変更		
選択器	Gshare	Bimodal
weakly Gshare	weakly	strongly
weakly Bimodal	strongly	weakly

5.2 評価結果

ハードウェア容量の小さい 1.5KB(2048 エントリ ×3) 予測機構と比較的ハードウェア容量の大きい 12KB(16384 エントリ ×3) 予測機構について、それぞれ評価した。図 7, 8 に予測ミス率低減状況、表 3 に予測ミス率を示す。

シミュレーションの結果、1.5KB Bi-Mode 予測機構に適用した場合、最大 1.43%(099.go), 12KB Combining 予測機構に適用した場合、最大 0.16%(099.go) 予測ミス率が低減した。また、1.5KB 予測機構では、予測成功率向上、予測ミス率低下とも、12KB 予測機構に比べて、大きい。これは、容量増大による予測ミス率向上により、予測反転、採用予測機構反転等の条件に当てはまる状況が少なくなったためと考えられる。

また、Hybrid-RPCS 予測方式の適用によって、予測ミス率が増加したプログラム、compress, li, perl は、すべて、履歴を参照しない Bimodal 予測機構の容量を大きくしても、予測ミス率が低減せず、履歴を参照する Gshare 予測機構の容量増大によって、予測ミス率が低減するプログラムである [4]。これら予測ミス率の増加は、Choice PHT や、選択器といった履歴を参照しない Bimodal 予測機構と同じインデクス法の予測表を利用したため、履歴を参照することによって正しく予測できていた部分が障害されたためと考えられる。予測ミス率が増加してしまったプログラムはあるが、Bi-Mode-RPCS 予測機構では、go での予測ミス率の低減効果が大きいため、平均予測ミス率は、1.5KB 予測機構で、0.15%、12KB 予測機構で、0.09%である。

6 まとめ

Hybrid 予測機構を対象とし、予測表の数量を増加させずに、予測ミス率を低減する方法を提案した。こ

表 3: 容量毎の予測ミス率 (%)

プログラム名	1.5KB			
	Bi-Mode	Bi-Mode-RPCS	Comb	Comb-RPCS
099.go	23.44	22.01	21.61	21.58
124.m88ksim	4.00	3.99	3.85	3.90
126.gcc	9.02	8.70	9.25	9.15
129.compress	8.82	8.89	9.26	9.26
130.li	4.59	5.01	4.61	5.05
132.jpeg	10.46	10.30	10.57	10.53
134.perl	3.51	3.72	4.76	4.73
147.vortex	0.81	0.80	1.01	1.00

プログラム名	12KB			
	Bi-Mode	Bi-Mode-RPCS	Comb	Comb-RPCS
099.go	18.38	17.63	18.57	18.40
124.m88ksim	3.31	3.15	3.20	3.18
126.gcc	5.58	5.43	5.78	5.69
129.compress	8.53	8.58	8.97	8.98
130.li	3.56	3.79	3.68	3.76
132.jpeg	9.86	9.81	10.08	10.06
134.perl	1.62	1.75	2.09	2.12
147.vortex	1.01	1.00	0.40	0.40

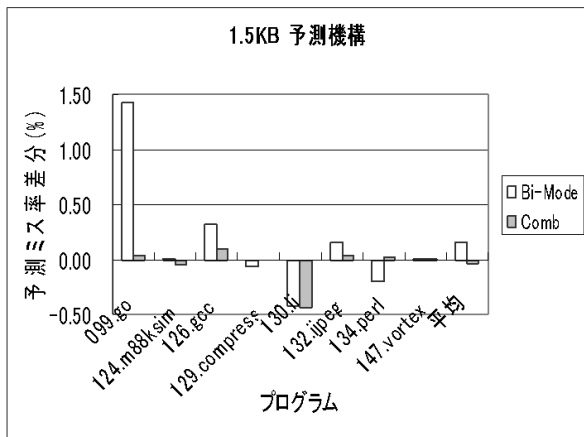


図 7: 1.5KB 予測機構の予測ミス率低減状況

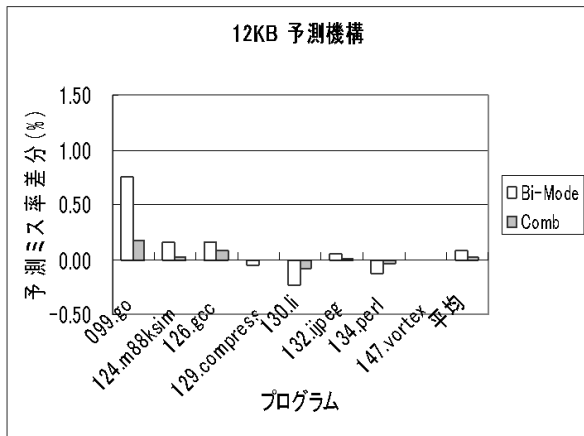


図 8: 12KB 予測機構の予測ミス率低減状況

の方式に基づいた予測機構を予測カウンタ状態参照予測機構 (Hybrid Predictor Referenced Prediction Counter State: Hybrid-RPCS) と呼んでいる。予測ミス率の高い難予測分岐は、分岐成立・不成立が遷移し、偏向方向が定まらないと言われている。そこで、偏向方向の定まらない分岐に対応するために、選択器カウンタの状態と予測器カウンタの状態に応じて、予測結果を反転する。SPECint95 ref入力セットを対象にシミュレーションした結果、1.5KB Bi-Mode 予測機構に適用した場合、最大 1.43%(099.go)、12KB Combining 予測機構に適用した場合、最大 0.16%(099.go) 予測ミス率が低減した。

今後は、予測ミス率低減を示したプログラムへの対策も考えていきたい。

参考文献

- [1] McFarling, S.: Combining branch predictors, Technical Report TN-36, Digital Western Research Laboratory (1993).
- [2] Lee, C. C., Chen, I. K. and Mudge, T. N.: The Bi-Mode Branch Predictor, *Proc. of MICRO-30*, pp. 4-13 (1997).
- [3] Haungs, M., Sallee, P. and Farrens, M.: Branch Transition Rate: A New Metric for Improved Branch Classification Analysis, *Proc. of 6th HPCA*, pp. 241-250 (2000).
- [4] 斎藤, 北村, 山名: 分岐方向予測機構の性能比較, 情処研報 (2002-ARC-150), pp. 89-94 (2002).
- [5] Burger, D. and Austin, T. M.: The SimpleScalar Tool Set, Version 2.0, Technical report (1997).