

複数の PHT を持つ分岐予測機構の性能比較

齋藤史子^{1,2} 蛭田智則¹ 山名早人^{1,2}

¹ 早稲田大学理工学部 ² アドバンスト並列化コンパイラ研究体

近年,分岐方向予測機構における予測正解率を向上させるための一手法として,複数の予測表(PHT:Pattern History Table)を保持した予測機構が提案されている.複数のPHTを保持する分岐方向予測機構は,採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構と,採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構とに大別できる.本稿では,前者の予測機構をハイブリッド予測機構,後者の予測機構を複数PHT予測機構と呼ぶ.ハイブリッド予測機構と複数PHT予測機構の構成は類似しているが,今まで,その性能はほとんど比較されてこなかった.そこで,本稿では,比較対象となる予測機構におけるPHTの構成を統一し,制限容量内におけるPHTの構成比を調整することによって,公正にハイブリッド予測機構と複数PHT予測機構の性能比較を行う.その結果,SPECint95では,採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構が,採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構よりも,容量を等しくした場合,高い予測正解率に達することを確認した.このことから,PHTのエントリ毎に信頼性を割り当てる手法は,依然として有効であると判断できる.

Necessity for Confidence in Multiple PHT Branch Predictors

Fumiko Saito^{1,2} Tomonori Hiruta¹ Hayato Yamana^{1,2}

¹ School of Science and Engineering, Waseda Univ. ² Advanced Parallelizing Compiler Project

In recent years, branch predictors with multiple PHTs(Pattern History Table) has been proposed. In this paper, branch predictors with multiple PHTs are classified into two categories. One is "Hybrid Predictor", the other is "Multiple PHT Predictor"(which is called in this paper). The difference between "Hybrid Predictor" and "Multiple PHT Predictor" is PHT selection confidence. In this paper, we compare "Hybrid Predictor" with "Multiple PHT Predictor". As the result, if "Hybrid Predictor" is the same size as "Multiple PHT Predictor", "Hybrid Predictor" predicts branch directions better than "Multiple PHT Predictor".

1 はじめに

近年,分岐方向予測機構における予測正解率を向上させるための一手法として,複数のパターン・ヒストリー・テーブル(PHT:Pattern History Table)を保持した予測機構 [1, 2, 3, 4] が提案されている.

複数のPHTを保持する分岐方向予測機構は,複数のPHTを保持する分岐方向予測機構は,採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構と,採用するPHTの

決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構とに大別できる.採用するPHTの決定が各々のPHTにおける予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構として,1993年にMcFarlingが提案したハイブリッド予測機構 [1] が挙げられる.ハイブリッド予測機構は,通常の予測機構では予測の成立・不成立で遷移する飽和カウンタの状態によって分岐方向を予測するのに対して,予測の成功・失敗で遷移する飽和カウンタを保持するPHTである選択器の状態によって,採用するPHT

を決定する。つまり、ハイブリッド予測機構は、選択器によって、予測の信頼性を計測していると見做せる。採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構として、1997 年に Michaud らが提案した Skewed 予測機構 [2]、Lee らが提案した Bi-Mode 予測機構 [3]、1998 年に Eden らが提案した YAGS (Yet Another Global Scheme) 予測機構 [4] が挙げられる。これらの予測機構は、予測の成功・失敗を計測する機構を保持せず、通常の予測機構が保持する予測の成立・不成立で遷移する飽和カウンタの状態によって、採用する PHT を決定する。つまり、複数 PHT 予測機構では、通常の予測機構を予測を行う PHT の選択に採用することによって、分岐の偏向情報を利用しようとしている。本稿では、このような採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構を便宜的に複数 PHT 予測機構と呼ぶ。

ハイブリッド予測機構と複数 PHT 予測機構は、複数の PHT を保持している点で類似している。しかし、複数 PHT 予測機構を提案する文献 [2, 3, 4] では、それらの予測機構の構成要素である単体の PHT で構成された予測機構とは比較されているが、類似した構成のハイブリッド予測機構とは比較されていない。2001 年に Eden は、ハイブリッド予測機構と複数 PHT 予測機構を比較した [5]。Eden らは、ハイブリッド予測機構として、SAG 予測機構¹と Gshare 予測機構を組み合わせた機構 (SAG/Gshare)、複数 PHT 予測機構として、Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構で構成された Bi-Mode 予測機構を選択した。2 レベル適応型予測機構は、容量制限による影響を受けやすい [1]。そのため、Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構を組み合わせたハイブリッド予測機構と比較した方が適当と判断できる。本稿では、比較対象となる予測機構における PHT の構成を統一することによって、より公正にハイブリッド予測機構と複数 PHT 予測機構の性能を比較する。

以下、2 で、複数の PHT を保持する予測機構の関連研究を交えながら、比較対象として採用した複数の PHT を持つ分岐予測機構の構成を説明する。3 では、実験環境と実験結果について述べ、4 で全体をまとめる。

¹McFarling 自身は、Per-Address と定義しているが、1993 年の Yeh らの論文 [6] では、分岐命令アドレスの下位ビットによるインデクスは、Per-Set と定義されている。

2 予測機構の構成

本節では、比較対象とした予測機構の構成について説明する。まず、2.1 では、複数の PHT を持つ予測機構の構成要素となる単体の予測機構について説明する。次に、2.2 では、複数の PHT を持つ予測機構について説明する。

2.1 単体予測機構

分岐予測機構は、予測のために、分岐の成立・不成立で遷移する 2-bit 飽和カウンタの表を保持し、2-bit 飽和カウンタの状態によって、予測を決定する。この予測のための 2-bit 飽和カウンタの表は、予測表 (PHT:Pattern History Table) と呼ばれている。

単体の分岐予測機構は、PHT のインデクス法に基づいて、1 階層機構と 2 階層機構に分類される。1 階層予測機構は、図 1(a) に示すように、分岐命令アドレスの下位ビットでインデクス付けられた PHT で構成される。この 1 階層の予測機構は、Bimodal 予測機構と呼ばれている。2 階層の予測機構は、1 階層目の表に分岐の最近の実行結果である分岐履歴を保持し、2 階層目は、2-bit 飽和カウンタの表で構成される。1 階層目の表は、分岐履歴表 (BHT:Branch History Table)、2 階層目の表は、予測表 (PHT:Pattern History Table) と呼ばれている。2 階層の予測機構では、PHT のエントリは、1 階層目の分岐履歴でインデクス付けられている。この 2 階層の予測機構は、2 レベル適応型予測機構 [6] と呼ばれている。

ここでは、特に、2 レベル適応型予測機構の改良形である Gshare 予測機構 [1] について説明する。Gshare 予測機構では、図 1(b) に示すように 1 階層目は、グローバル、すなわち、単一の分岐履歴で構成され、2 階層目は、単一の PHT で構成される。PHT のエントリは、分岐命令アドレスと分岐履歴の XOR でインデクス付けられている。

2.2 複数の PHT を持つ予測機構

複数の PHT を保持する分岐方向予測機構は、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構と、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構とに大別できる。ここでは、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構として、ハイブリッド予測機構 [1]、採用する PHT

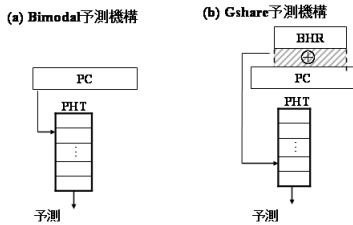


図 1: 単体予測機構

の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構として、Bi-Mode 予測機構 [3]、YAGS 予測機構 [4] について説明する。本稿では、このような採用する PHT の決定が各々の PHT における予測の信頼性に独立な予測機構を便宜的に複数 PHT 予測機構と呼ぶ。近年、高周波数化に伴い、このような複数の PHT を持つ予測機構を利用した予測遅延に関する研究 [7] も行われている。

2.2.1 ハイブリッド予測機構

ハイブリッド予測機構は、複数の単体予測機構 (PHT) を組み合わせた予測機構である。採用する予測機構 (PHT) は、予測の成功・失敗で遷移する 2-bit 飽和カウンタで構成された PHT である選択器によって、採用する予測機構 (PHT) を決定する。つまり、ハイブリッド予測機構は、選択器によって、予測の信頼性を計測していると見做せる。ハイブリッド予測機構は、予測可能な範囲の異なる予測機構 (PHT) を組み合わせることで、予測正解率が向上すると報告されている [8, 9]。そのため、ハイブリッド予測機構は、Global な予測機構と Local な予測機構の組み合わせが多い。本稿では、図 2(a) に示すように、Global な予測機構として、Gshare 予測機構²、Local な予測機構として、Bimodal 予測機構を採用した。選択器は、通常、Bimodal 予測機構と同様に、分岐命令アドレスの下位ビットでインデックス付けられている。本稿では、エントリ毎の信頼性を計るために、Bimodal 予測機構と等しい容量の選択器を保持するハイブリッド予測機構を比較対象として選択した。さらに、Gshare 予測機構が飽和カウンタで動的に信頼性を割り当て

²ハイブリッド予測機構では、組み合わせられた予測機構と予測可能範囲が異なることが重要となる。Gshare 予測機構は、分岐履歴長を調整することが可能であるが、短い分岐履歴長では、Bimoda 予測機構との差異が小さくなってしまったため、最長の分岐履歴長をインデックスに利用した。

易いという報告 [10] から、Gshare 予測機構と等しい容量で、かつ、同様のインデクス法を採用した選択器についても実験を行った。

次に、構成要素となる予測機構の更新法について述べる。McFarling のハイブリッド予測機構 [1] では、予測結果を採用しなかった予測機構 (PHT) も含めて、すべての予測機構 (PHT) を更新する。本稿では、予測機構全体のエントリの冗長性を排除し、競合に対する耐性を向上させるために、予測として採用された予測機構 (PHT) のみを更新する方法についても実験を行った。

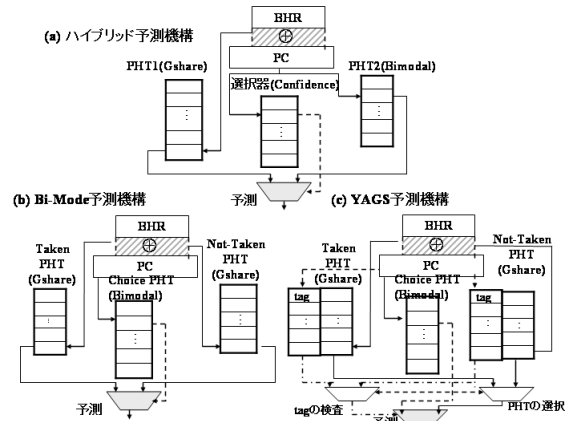


図 2: 複数の PHT を保持する予測機構

2.2.2 複数 PHT 予測機構

複数 PHT 予測機構は、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構である。複数 PHT 予測機構として、Skewed 予測機構 [2]、Bi-Mode 予測機構 [3]、YAGS 予測機構 [4] が挙げられる。Skewed 予測機構は、PHT 毎に異なるインデクス法を採用し、すべての PHT における予測結果の多数決で、予測を決定する機構である。本稿では、同一容量の予測機構では、Skewed 予測機構よりも YAGS 予測機構が予測正解率が高いという報告 [11] から、Skewed 予測機構を比較対象として採用しなかった。ここでは、Bi-Mode 予測機構と YAGS 予測機構の構成について説明する。

Bi-Mode 予測機構 Bi-Mode 予測機構 [3] は、図 2(b) に示すように、3 つの PHT からなる予測機構である。3 つの PHT のうちの 1 つは、Bimodal 予測機構と同様の構成で、Choice PHT と呼ばれる。Choice

PHTは、飽和カウンタの状態によって、残りの2つのPHTを選択する。残りの2つのPHTは、Gshare予測機構と同様の構成であり、Direction PHTと呼ばれる。Direction PHTは、最終的な予測を行い、Taken PHTとNot-Taken PHTと呼ばれるPHTで構成される。具体的には、Choice PHTがTakenと予測される時、Taken PHTにおける予測が採用され、Direction PHTがNot-Takenと予測される時、Not-Taken PHTにおける予測が採用される。Choice PHTは、必ず更新されるが、Direction PHTは、予測結果が採用されたPHTのみ更新される。

YAGS 予測機構 YAGS 予測機構 [4] は、Bi-Mode 予測機構における Direction PHT の冗長性を排除するために考案された。ここで言う冗長性とは、Bi-Mode 予測機構において、同一分岐が、Taken PHT と Not-Taken PHT のそれぞれにエントリを保持する可能性のことを意味する。

YAGS 予測機構は、図 2(c) に示すように、3 つの PHT を保持し、Bi-Mode 予測機構と類似した構成である。ただ、YAGS 予測機構は、Direction PHT に分岐命令アドレスの下位ビットをタグとして保持する点が、Bi-Mode 予測機構と異なる。さらに、Bi-Mode 予測機構と YAGS 予測機構では、予測アルゴリズムも異なる。

次に、YAGS 予測機構における予測アルゴリズムについて説明する。YAGS 予測機構は、Choice PHT の予測結果と反対の方向を名に冠した Direction PHT にエントリが存在しない限り、基本的に Choice PHT の予測結果を採用する。Choice PHT の予測結果と反対の方向を名に冠した Direction PHT にエントリが存在する場合には、Direction PHT の予測結果を採用する。具体的には、Choice PHT で Taken と予測された場合、Not-Taken PHT にタグを利用してエントリの有無を確認する。Direction PHT にエントリが存在しない場合には、Choice PHT の予測結果、つまり、Taken を最終的な予測として採用する。Direction PHT にエントリが存在する場合には、Direction PHT の予測結果を最終的な予測となる。Choice PHT で Not-Taken と予測された場合には、Taken PHT に対して、同様の操作を行う。

3 実験

本節では、実験環境と実験結果について述べる。比較対象として選択した予測機構の構成と予測アルゴリズムの詳細については、前節で紹介した。

3.1 実験環境

本稿では、SimpleScalar tool set Version 3.0c [12] に含まれる sim-bpred シミュレータに、条件分岐のみを対象に分岐予測正解率を算出するように、改良を加えた。sim-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。実験に用いたベンチマークは、SPECint95(入力セット:ref) で、1 億命令までを対象に実験を行った。表 1 に、SPECint95 のそれぞれのプログラム毎に 1 億命令までの実行に含まれる動的条件分岐命令数を示す。

表 1: SPECint95 の 1 億命令までの動的条件分岐

プログラム名	動的条件分岐数
099.go	12,999,996
124.m88ksim	13,141,541
126.gcc	15,160,502
129.compress	14,195,855
130.li	13,291,502
132.jpeg	8,318,238
134.perl	12,496,926
147.vortex	11,648,375

次に、比較対象として選択した分岐方向予測機構を挙げる。本稿では、予測機構の容量が 0.5KB–8KB である場合において、網羅的にシミュレーションを行った。YAGS 予測機構に関しては、タグも予測機構の容量に含めた。また、本稿では、全体の予測機構容量を 0.5KB–8KB に収まる範囲で、 2^5 エントリ– 2^{15} エントリで構成される PHT のすべての組み合わせの試行を、網羅的と表現した。なお、単体予測機構とハイブリッド予測機構の構成には、実験に採用した複数 PHT 予測機構である Bi-Mode 予測機構と YAGS 予測機構の構成要素である Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構を選択した。

- 単体予測機構

Bimodal Bimodal 予測機構。

Gshare Gshare 予測機構。インデクスに利用される分岐履歴長が最長になるように設定。

- ハイブリッド予測機構

Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構の組み合

わせ．Gshare 予測機構では，インデックスに利用される分岐履歴長が最長になるように設定．予測結果が採用された予測機構のみ更新．

Hybrid_B Bimodal 予測機構と等しいサイズで，同様に分岐命令アドレスの下位ビットでインデックス付けられた構成．予測結果が採用された予測機構のみ更新．

Hybrid_G Gshare 予測機構と等しいサイズで，同様に分岐命令アドレスと Global な分岐履歴の XOR でインデックス付けられた構成．予測結果が採用された予測機構のみ更新．

● 複数 PHT 予測機構

Bi-Mode Bi-Mode 予測機構．

YAGS YAGS 予測機構．Direction PHT のタグを 6bit とする³．

3.2 実験結果

以前の分岐が解決するまでは次の分岐は実行されないと仮定して，1 億命令までの SPECint95(入力セット:ref)において，全体で 0.5KB-8KB 容量の複数の PHT を保持する予測機構の予測正解率を算出した．表 2 に，SPECint95 に含まれる主なプログラム (099.go, 126.gcc, 129.compress, 130.li) の実行結果を示す．SPECint95 の主なプログラムとして，124.m88ksim, 132.jpeg, 134.perl, 147.vortex は，単体の Bimodal 予測機構，Gshare 予測機構とともに高い予測正解率に達していたので，残りのプログラムを選択した．本稿では，複数の PHT を保持する予測機構 (Bi-Mode, YAGS, Hybrid_B, Hybrid_G) の性能の上限を示すために，予測機構容量が 0.5KB 以上 nKB 未満の範囲で到達する最高の予測正解率を nKB の予測正解率として示した．複数の PHT を保持する予測機構が 0.5KB 容量である場合の予測正解率は， 2^5 エントリ- 2^{15} エントリで構成される PHT の組み合わせのうちで，0.50KB-0.51KB の予測機構を適用した場合に達する最高の予測正解率である．なお，このような判断基準で，最適構成と判断された複数の PHT を保持する予測機構は，Hybrid_B, Hybrid_G, Bi-Mode では，Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構の構成比が同程度の機構が多く見られたが，YAGS 予測

³文献 [4] で，Direction PHT のタグが 6bit を保持する場合を最適としていたことによる．

機構では，Choice PHT が大きく，Direction PHT が小さめの構成比の機構が多く見られた．このことから，ハイブリッド予測機構 (Hybrid_B, Hybrid_G) や Bi-Mode 予測機構 (Bi-Mode) では，どの PHT(予測機構) も同程度の頻度で利用されていると考えられる．また，YAGS 予測機構では，タグを保持する Direction PHT のエントリ数を増やすと，全体の容量が大きくても，十分に Choice PHT の容量を確保することができなくなるためと考えられる．

表 2: SPECint95 における予測正解率 (抜粋)

099.go	予測機構容量 (KB)				
	0.5	1	2	4	8
Bimodal	80.06	80.06	80.96	81.08	81.16
Gshare	75.39	76.86	78.45	80.25	82.23
Hybrid_B	78.82	79.52	80.86	82.25	83.78
Hybrid_G	80.19	80.99	82.32	83.56	84.69
Bi-Mode	79.23	80.07	81.68	83.07	84.37
YAGS	78.84	79.73	80.32	80.61	80.72
126.gcc	予測機構容量 (KB)				
	0.5	1	2	4	8
Bimodal	85.65	86.60	87.30	87.74	87.83
Gshare	81.39	84.32	86.55	88.20	89.48
Hybrid_B	84.18	86.17	88.51	90.08	91.10
Hybrid_G	85.98	87.34	89.53	91.01	92.04
Bi-Mode	85.46	86.99	89.26	91.20	91.91
YAGS	83.49	85.09	86.01	86.69	87.12
129.compress	予測機構容量 (KB)				
	0.5	1	2	4	8
Bimodal	76.87	76.87	76.87	76.87	76.87
Gshare	83.08	84.65	86.56	87.34	87.82
Hybrid_B	81.23	81.74	83.43	85.65	86.62
Hybrid_G	82.50	82.50	83.42	84.83	86.55
Bi-Mode	81.75	82.29	83.21	84.76	86.69
YAGS	76.87	76.87	76.87	76.87	76.87
130.li	予測機構容量 (KB)				
	0.5	1	2	4	8
Bimodal	87.53	87.53	87.53	87.53	87.53
Gshare	93.11	93.86	94.30	94.60	94.86
Hybrid_B	92.63	93.47	94.01	94.22	94.45
Hybrid_G	93.01	93.53	93.98	94.36	94.61
Bi-Mode	92.97	93.55	94.04	94.48	94.69
YAGS	84.23	84.74	86.01	87.22	87.49

表 2 によると，全体を通して，最も Hybrid_G が高い予測正解率に達している．Hybrid_G が Hybrid_B より高い予測正解率に達することは，Bimodal 予測機構に信頼性を割り当てた場合よりも，Gshare 予測機構に信頼性を割り当てた方が効果的であることを示し，文献 [10] を裏付ける結果となった．特に，126.gcc において，予測機構が小容量である場合，Gshare よりも Bimodal の方が，予測正解率が高い．この場合においても，ハイブリッド予測機構は，Gshare や Bimodal よりも高い予測正解率に達成している．つまり，ハイブリッド予測機構は，構成要素となる予測機構⁴の利点を生かしている⁵．と

⁴本稿の実験では，Bimodal 予測機構と Gshare 予測機構
⁵文献 [5] では，ハイブリッド予測機構を分岐の履歴上の性質によって，PHT を使い分ける機構として，定義されていた．

ここで、複数 PHT 予測機構 (Bi-Mode, YAGS) の中で最も優れていると報告されていた YAGS 予測機構 [4] は、Bi-Mode 予測機構よりも低い予測正解率にしか到達していない。さらに、YAGS は、予測機構が小容量の場合は、Gshare よりも優れていることもあるが、予測機構が大容量の場合は、単体の予測機構 (Bimodal, Gshare) よりも予測正解率が高いことがない。文献 [13] で、データは公開されていないが、Heil らも、YAGS 予測機構が、Gshare 予測機構や、Bi-Mode 予測機構よりも低い予測正解率にしか到達しなかったことを報告している。YAGS が高い予測正解率に到達しなかった理由は、Direction PHT を構成しているタグが大きな容量を占めているためと考えられる。最後に、ハイブリッド予測機構が複数 PHT 予測機構よりも高い予測正解率に到達していることから、PHT のエントリ毎に信頼性を割り当てる手法は、信頼性を割り当てずに複数の PHT を組み合わせた既存手法よりも優れていると判断できる。

4 おわりに

近年、複数の PHT を保持するさまざまな予測機構が提案された。本稿では、複数の PHT を保持する予測機構を、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構と、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構とに大別した。前者に分類される主な機構として、ハイブリッド予測機構が挙げられ、後者に分類される主な機構として、Skewed 予測機構、Bi-Mode 予測機構、YAGS 予測機構が挙げられる。本稿では、これらの予測機構の構成の類似点に着目して、0.5KB–8KB の容量の予測機構を対象に比較評価を行った。その結果、SPECint95 では、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に基づく機構が、採用する PHT の決定が各々の PHT における予測候補となるエントリの信頼性に関係のない機構よりも、容量を等しくした場合、高い予測正解率に達することを確認した。このことから、PHT のエントリ毎に信頼性を割り当てて予測機構を選択する旧来の手法は、依然として有効であると判断できる。

参考文献

- [1] McFarling, S.: Combining branch predictors, Technical Report TN-36, Digital Western Research Laboratory (1993).
- [2] Michaud, P., Seznec, A. and Uhlig, R.: Trading Conflict and Capacity Aliasing in Conditional Branch Predictors, *Proc. of 24th ISCA*, pp. 292–303 (1997).
- [3] Lee, C. C., Chen, I. K. and Mudge, T. N.: The Bi-Mode Branch Predictor, *Proc. of MICRO-30*, pp. 4–13 (1997).
- [4] Eden, A. N. and Mudge, T. N.: The YAGS Branch Prediction Scheme, *Proc. of MICRO-31*, pp. 69–77 (1998).
- [5] Eden, A. N., Ringenberg, J. et al.: Hybrid Myths in Branch Prediction, *Proc. of 5th SCI and Proc. of 7th ISAS* (2001).
- [6] Yeh, T. Y. and Patt, Y. N.: A Comparison of Dynamic Branch Predictors that use Two Levels of Branch History, *Proc. of 20th ISCA*, pp. 257–266 (1993).
- [7] Jimenez, D. A., Keckeler, S. W. and Lin, C.: The Impact of Delay on the Design of Branch Predictors, *Proc. of MICRO-33*, pp. 67–76 (2000).
- [8] 森, 小林ほか: 直行性を考慮したハイブリッド分岐予測機構, 情処研報 ARC-125-20, pp. 115–120 (1997).
- [9] Evers, M., Patel, S. J. et al.: An Analysis of Correlation and Predictability: What Makes Two-Level Branch Predictors Work, *Proc. of 25th ISCA*, pp. 52–61 (1998).
- [10] Jacobsen, E., Rotenberg, E. and Smith, J. E.: Assigning Confidence to Conditional Branch Predictions, *Proc. of MICRO-29*, pp. 142–152 (1996).
- [11] Seznec, A. and Michaud, P.: De-aliased Hybrid Branch Predictors, Technical Report N-3618, INRIA (1999).
- [12] Burger, D. and Austin, T. M.: The SimpleScalar Tool Set, Version 2.0, Technical report (1997).
- [13] Heil, T. H., Smith, Z. and Smith, J. E.: Improving Branch Predictors by Correlating on Data Values, *Proc. of MICRO-32*, pp. 28–37 (1999).