

## ループ構造の解析に基づく実行パス予測方式の検討

金海 和宏<sup>†</sup> 十鳥 弘泰<sup>†</sup> 大津 金光<sup>†</sup> 横田 隆史<sup>†</sup> 大川 猛<sup>†</sup><sup>†</sup>宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻

## 1 はじめに

プログラムのループ中に条件分岐命令が含まれるとき、その組み合わせにより様々な実行処理経路（パス）が存在する。条件分岐命令が増えることでパスの本数が指数関数的に増加するが、実際は2本のパスが支配的な実行割合を占めることが多い[1]（実行頻度が高い順に#1パス、#2パス）。我々はこの2本のパスに着目し、次のイテレーションにおいてどちらのパスが実行されるかの予測を行い、予測されたパスに応じたプログラムコードを投機的にマルチスレッド実行することでプログラム実行の高速化を実現する2パス限定投機方式[1]を開発している。2パス限定投機方式では、次に実行されるパスを予測するパス予測器の性能がプログラムの実行速度に大きな影響を与えるが、一部のループでは著しくパス予測失敗率が増加することが分かっている[2]。しかし、一方でパス予測性能が低いループに関しても、期待可能なパス予測性能は高いことが分かった[3]。本稿では、パス予測性能の向上を目的として、予測困難となる原因を調査する。

## 2 2パス限定投機方式におけるパス予測

パス予測器では、過去に実行したパスの履歴に基づき、次のイテレーションで#1パスが実行されるか、または#2パスが実行されるかを予測する。先行研究において、高性能とされるいくつかの分岐予測方式をパス予測に応用した結果、Gshare分岐予測方式[4]を応用したパス予測方式がもっとも高い性能を達成することが分かっている[2]。この点を踏まえ、本稿でもGshareパス予測方式によるパス予測失敗率を前提とする。図1にGshareパス予測器の構成を示す。Gshareパス予測方式はパス履歴レジスタとカウンタテーブルから構成される。

パス履歴レジスタでは、それまでのパスの出現履歴を、#1パスが実行された / されないの1ビット情報として1/0に符号化して記録する。パス履歴レジスタの内容と、ループの先頭アドレスの一部との排他的論理和を基に、 $2^h$  ( $h$ はパス履歴レジスタのビット数) 個のカウンタを持つカウンタテーブル内の飽和カウンタを参照する。実行パスの確定後、パス履歴レジスタを左シフトし、#1パスが実行されればLSBに1を、それ以外のパスが実行されれば0を格納する。

カウンタテーブルは $2^h$  ( $h$ はパス履歴レジスタのビット数) 個の飽和カウンタを持ち、各飽和カウンタはそ

れぞれに対応するパス履歴における#1パスの実行頻度を2ビットで示している。飽和カウンタの初期値および閾値は $(10)_2$ とし、参照先の飽和カウンタが閾値以上であれば#1パスの実行、閾値未満であれば#2パスの実行を予測する。予測後、#1パスが実行された場合は参照先の飽和カウンタをインクリメント、それ以外の場合はデクリメントする。#1パス、#2パスのいずれのパスも実行されず、非投機対象のパス（非投機パス）が実行された場合、予測パスに関わらずその予測は失敗として扱う。

本研究におけるGshare分岐予測器およびGshareパス予測器は、分岐（パス）履歴レジスタのビット数を15ビット、カウンタテーブルの各エントリにおける飽和カウンタのビット数を2ビットに設定する。これは、先行研究で最も高いパス予測性能を達成した際のパラメータである[2]。

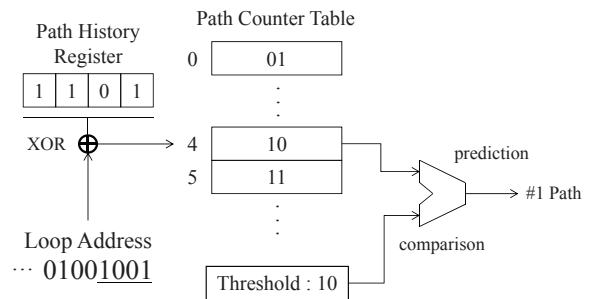


図 1: Gshare パス予測方式

## 3 実行パス履歴の解析によるパス予測困難原因の調査

パス履歴は、1ビットのシンボルの集合（シンボル列）として形成される。あるパス履歴のシンボル列に着目したとき、パス予測器の学習機構により、その次に実行されるパスが一方に偏ることで、そのパス履歴における次のパスの予測が容易となる。これは、あるシンボル列に対し、次の出現シンボルが一方に偏ることで次のシンボルの予測が容易になることと同義である。一方、実行パスに偏りが存在せず、不規則に次のシンボルが決定される場合、学習機構が十分に機能せず、そのパス履歴におけるパス予測は困難となると考えられる。本節では、15ビットのパス履歴で取り得る全てのシンボル列のパターンについて、次に出現するシンボルの出現確率をプロファイルすることで、評価対象ループにおける出現シンボルの偏りを調査する。また、シンボルの出現割合の最大値（出現シンボルの偏りの強さ）と各シンボル列の参照頻度の相関から、パス予測失敗率を見積もることができると考えた。

Consideration of Path Prediction Method based on Analysis of Loop Structure

<sup>†</sup>Kazuhiro Kinkai, Hiroyoshi Jutori, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota and Takeshi OhkawaDepartment of Information Systems Science, Graduate School of Engineering, Utsunomiya University (<sup>†</sup>)

パス履歴として取り得る各シンボル列に関して、次に示す要素についての散布図の作成を考える。

- シンボルの出現割合の最大値  
出現割合の最大値について、散布図中で降順にソート
- 参照回数の全体に対する割合  
シンボル列の参照回数の全体に対する割合、および当該シンボル列より出現シンボルの偏りが大きい全てのシンボル列についての参照回数の全体に対する割合の総和

シンボル列の多くのパターンにおいて次に出現するシンボルが強く偏る場合、散布図上では、多くの要素がシンボルの出現割合について高い値を示す。また、あるシンボル列の参照割合が大きいとき、散布図において隣り合う次の要素から、参照回数の割合について差が大きくなる (間が広がる)。この点に着目し、散布図中で隣り合う2点間を全て直線で結んだ上で区分求積法を適用して積分値を求めることで、評価対象ループに対するパス予測失敗率の理論値を評価した。

#### 4 パス予測失敗率の理論値の評価

先行研究における SPEC CINT2000 ベンチマークプログラム中の評価対象ループ [2] に関して、パス予測失敗率の理論値を評価した結果を示す。評価対象ループは、関数呼び出しを含まず、かつパスが2本以上存在するループについて、総イテレーション回数が上位5位までのループが対象となる。評価対象ループは8つのベンチマークプログラムから5つ、計40個を選出した。

図2に、パス予測失敗率の理論値と Gshare パス予測方式におけるパス予測失敗率の実測値に関する散布図を示す。回帰直線に対する相関係数は0.7を示した。

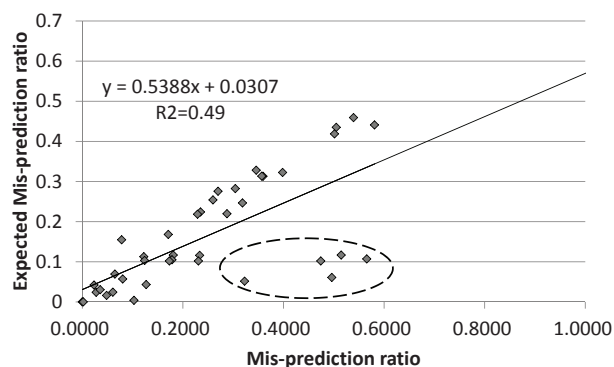


図2: パス予測失敗率の理論値と実測値に関する散布図

また、表1に示す5つのループは、理論値と実測値の差が特に大きく、図2に示した散布図において各要素が回帰直線から大きくかけ離れた。ループの順位は当該ベンチマークプログラムにおける総イテレーション数の順位を示す。

表1: 回帰直線から離れたループ

| プログラム      | 順位 | 理論値    | 実測値    |
|------------|----|--------|--------|
| 176.gcc    | 4  | 5.17%  | 32.28% |
| 181.mcf    | 4  | 11.68% | 51.48% |
|            | 5  | 10.70% | 56.56% |
| 255.vortex | 2  | 10.20% | 47.43% |
|            | 4  | 6.10%  | 49.62% |

176.gcc, 181.mcf の各ループに関しては、ループの総イテレーション回数に対する非投機パスの実行割合33%から45%と大きいことが分かった。非投機パスの頻出による予測ミスの増加がパス予測失敗率に影響を与えたため、理論値と実測値の差が開いた。一方、255.vortex の2つのループは非投機パスが実行されないが、理論値と実測値の差が大きい。これは、255.vortex の2つのループでは、15ビットのパス履歴として取り得る各シンボル列の参照回数が1回から6回と非常に少なく、学習が予測に活かされなかったことが原因である。

評価の結果、実測値は理論値にほぼ準じた数値となるため、Gshare パス予測器の性能はほぼ限界であると考えられる。

#### 5 おわりに

本稿では、パス予測器の予測性能向上を目的とし、パス予測失敗率の理論値の評価、ならびに予測困難原因の調査を行った。パス履歴として生成されるシンボル列に対し、次のシンボルの出現割合に基づいた理論値を評価することで、Gshare パス予測器の性能が限界であることが分かった。

今後は、少ない学習回数でも効率的な予測を可能とし、パス予測性能の向上を果たす機構を開発する必要がある。

#### 謝辞

本研究は、一部日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C)24500055, 同 (C)24500054, 同 (C)25330055, 若手研究 (B)25730026) の援助による。

#### 参考文献

- [1] 横田 隆史ほか: “2パス限定投機方式の提案”, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol.46, No.SIG 16 (ACS-12), pp.1-13, 2005.
- [2] Kazuhiro Kinkai, et al.: “Comparative Study of Path Prediction Method for Speculative Loop Execution”, Proceeding of the 3rd International Conference on Networking and Computing (ICNC), pp.283-287, 2012.
- [3] 桐生 恵利佳ほか: “2パス限定投機方式向け予測器のエントロピーによる妥当性評価”, 情報処理学会 第75回全国大会 講演論文集, pp.1-175-1-176, 2013.
- [4] S. McFarling: “Combining Branch Predictors,” Digital Equipment Corporation Western Research Laboratories, Technical Note TN-36, 1993.