

データフローグラフを利用した値予測命令選定法 Wide-Area Instruction Scheduling on a Data Flow Graph

藤原 亮人[†]
武蔵工業大学[†]

宮内 新[‡]
武蔵工業大学[‡]

荒井 秀一[§]
武蔵工業大学[§]

1. はじめに

スーパースカラプロセッサは、プログラム中に内在する命令の並列性を抽出し、同時実行することで実行速度の向上を図っている。しかし、プログラム中の並列性は制御依存関係とデータ依存関係により制限される。制御依存に関しては分岐予測を用いた投機処理により、解決することが可能である。一方のデータ依存は、出力依存や逆依存に関してはレジスタリネーミングにより解消可能である。真の依存に関してはこれまで解消不可能とされてきたが、近年この問題を解消する手法として値予測が注目され、その有効性が証明されている [1]。これは、実際に計算を行ってデータ値を得る前に、生成されるデータ値を予測することで処理を進める投機処理技術である。

値予測では、データを生成する命令全てが対象となるため、その数は膨大となり、予測に必要な値の履歴テーブル (VHT Value History Table) 上で衝突が頻繁に発生し、結果的に予測ミス、並列度低下につながる。

そのため、予測正解率や性能向上度などの情報を基に予測命令を選定し予測命令数を削減する研究が進められている [1]。従来の予測命令選定法では、各選定法に従い命令の予測の有無を決定し、VHT のエントリ数と無関係に予測命令が決定される。そのため、選定された命令数が VHT のエントリ数に対して過剰となる場合がある。過剰に予測命令数がある場合は VHT 上での衝突を解消することができず、結果的に予測正解率の低下、並列度低下につながるという問題点がある。

そこで本研究ではプログラムのデータフローグラフの情報を利用して各予測対象命令に評価値を設定し、その値を基に VHT のエントリ数に合わせて予測命令数を調整し、VHT のエントリ数に対応可能な値予測命令選定法を提案する。これにより、過剰な予測命令数による並列度低下の解消を図る。

2. 値予測命令の選定

2.1 値予測

値予測とは、演算の結果生成されるデータの値を予測することで処理を進めていく投機処理技術である。予測がミスした場合は、命令の実行をやり直さなければならない。これをミスペナルティと呼ぶ。

代表的なデータ値予測機構として、最終値予測、ストライド値予測、コンテキストベース予測がある [2]。

最終値予測は、予測する命令の前回の演算結果を今回の予測値として利用する。つまり、同じ演算結果が繰り返されると予測する技術である。ストライド値予測は、予測

する命令の過去 2 回の演算結果の差分と、最も近い過去に得られた値を足して、予測値を計算する技術である。コンテキスト・ベース予測は、過去の連続した有限個の値の履歴と、過去の実行履歴を比較し、高い確率で実行されるパターンに基づいて予測を行う技術である。

2.2 予測命令の選定

2.1 で述べたように、値予測では値の履歴を保持しておく必要がある。履歴は VHT (Value History Table) に格納され、PC をインデックスとして参照される。値予測では値を生成する命令全てが予測の対象となるので、その数は膨大な量となる。そのため、実現可能な VHT のエントリ数ではテーブル上での衝突が頻繁に発生し、並列度の向上が制限される。近年、予測対象命令を選定し、その数を削減することでこの問題を解消する手法が数多く提案されている [1]。予測命令数を削減することで衝突の頻度が減少し、同サイズでの VHT において、より高い並列度を得ることが可能となる。

2.3 従来の選定法の問題点

従来の選定法ではプロファイリングデータ等を用いて各アルゴリズムに従い、各命令の予測の有無を決定し、選定を行う。その際、VHT のエントリ数を考慮しないため、エントリ数に対して選定された命令数が依然として過剰となる場合がある。結果的にテーブル上での衝突の問題を解消できず並列度の向上は制限される [3]。

3. 提案手法

本研究ではプログラム中のデータフローグラフの情報を基に各命令に評価値を設定する。選定時にはプロファイリングデータや評価値を基に優先度を決め、優先度の高い命令から順に予測対象とし、VHT のエントリ数に応じてその数を調節する。これにより、過剰な数の予測命令の選定を防ぎ、従来の問題点の解消を図る。

以下に本研究の方針を示す。

1. データフローグラフを基にした評価値設定法の検討・決定
2. エントリ数に対応した選定命令数の検討・決定
3. VHT のエントリ数を変化させ、性能評価

今回は 1 について行った。

3.1 データフローグラフ

データフローグラフとは、基本ブロック内において各命令間を依存関係でつないだグラフであり、各命令はデータフローグラフ上の全ての先行命令の実行が完了し、実行に必要な値が得られて初めて実行可能となる。そのため、先行命令が多いほど、データフローグラフにおける深さの値が大きくなる。

Value Prediction Instructions Choosing Method for Using Data Flow Graph

[†]Akihito Fujiwara, Musashi Institute of Technology

[‡]Arata Miyauchi, Musashi Institute of Technology

[§]Shuichi Arai, Musashi Institute of Technology

データフローグラフは命令間の依存関係によって構成されているので、実行ユニット数や入力されるデータとは無関係に、静的にプログラムから導出可能な情報である。よって、予測対象命令の評価値の設定に有効であると考えられる。

3.2 予測対象命令の評価値

予測正解率、実行頻度がほぼ等しい場合、予測正解時の利得（並列度の向上度）、予測不正解時のペナルティ（ミスペナルティ）が、値予測機構の性能に大きな影響を及ぼす。よって、利得・ミスペナルティの大きさを求めることが可能な値が評価値として最適だと言える。

3.3 予測正解時のデータフローグラフの分割

ある命令を予測して正解した場合、真の依存関係が解消され、図1に示すように、データフローグラフが2分割されることになる。

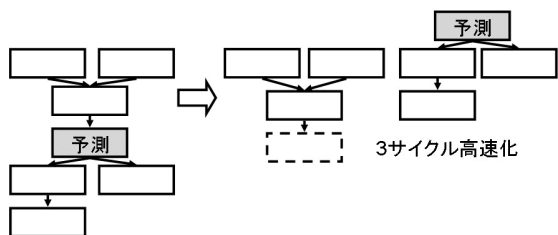


図 1: 予測正解時のデータフローグラフ

実行に必要なユニットが全て満たされていればグラフが2分割されたことにより並列度が向上し、高速化が可能となる（図1では3サイクル）。1つのグラフあたり2,3,4…と、多くの命令を予測するほどグラフは分割され、より並列度は向上するが、1つでも予測が外れると並列度が低下するという危険性がある。そこで本研究では、1データフローグラフにつき、予測を行う命令は1つとする。

3.4 グラフ上での相対的深さ

1つのデータフローグラフについてのみ着目すると、命令のグラフ上での相対的深さが予測正解時の利得、ミスペナルティに関連があると考えられる。ここで相対的深さとは、命令が所属するグラフの長さを1とした場合の自身の深さの相対的位置を表す。

3.3で述べたように、命令の予測正解時はグラフが2分割される。グラフに関してのみ着目すると、予測前のグラフの長さから分割後のより長い方のグラフの長さを減じたものが正解時の利得となる。命令のグラフ上における相対的深さはグラフの分割位置に相当するため、相対的深さが0.5に近いほど予測正解時の利得が高いと考えられる。これは分割後の2つグラフの長さの差が小さいほど、利得が高くなるためである。

ミスペナルティに関しても相対的深さによって大きさを求めることが可能であると考えられる。予測がミスした場合、その予測値を使用した命令全てを再実行しなければならない。従って、自身と依存関係のある後続命令が多いほど、ペナルティは大きくなる。相対的深さが0に近いほどグラフの浅い部分であり後続命令は多く、逆に1に

近いほど後続命令は少ない。つまり、相対的深さとペナルティの大小は関連性があると言える。

以上のことから、本研究では予測対象命令の評価値としてデータフローグラフ上での相対的深さを適用する。

4. 実験

命令のデータフローグラフ上での相対的深さとミスペナルティとの関連性を調べる目的で、実験を行った。使用したプログラムは、バブルソート、ユークリッド互除法、行列乗算、文字列照合、ルンゲクッタ法、そしてワードカウントの6種。仮定として、分岐予測ミスは発生せず、逆依存と出力依存は解消済とする。各命令の相対的深さとミスペナルティの関係を、所属グラフの長さ（2～7）ごとにまとめた結果を図2に示す。横軸が相対的深さの値であり、縦軸がミスペナルティ（実行サイクル数）である。

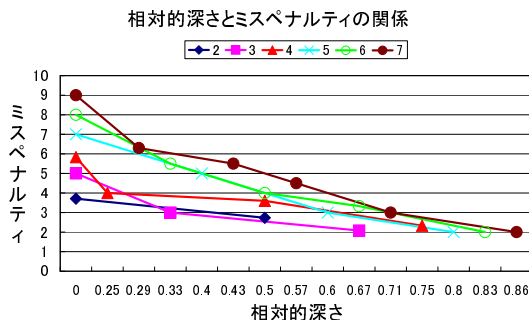


図 2: 実験結果

相対的深さの値が大きくなるほど、ミスペナルティが減少していることがわかる。また、相対的深さが0.6を越えたあたりから所属グラフの長さによる違いが無くなってきている。実験結果より、相対的深さの値によってペナルティの大きさを求めることが可能であると言える。

5. おわりに

データフローグラフ上での相対的深さとミスペナルティとの関係について実験を行い、その関連性を確認した。今後の方針としては、相対的深さと予測正解時の利得について検証を行い、その結果を基に評価値の設定法を決定する。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金課題番号 13680425 によって行われたものである。

参考文献

- [1] 斎藤史子, 山名早人: 「投機的実行に関する最新技術動向」, 情報処理学会研究報告 (ARC), Vol2001, No.116, pp67-72 (2001.11)
- [2] 飯塚大介 「効率的な値予測の研究」, 東京大学大学院修士論文, 1999 年度
- [3] 飯塚大介: 「値予測の計量効率化方式の提案と評価」, 東京大学大学院博士論文, 2002 年度