

名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程
修士学位論文

容量効率を意識したソース・タグ値に
基づくセグメント化による
発行キューの電力削減

令和 3 年 3 月
情報・通信工学専攻

森 健一郎

概要

発行キューは電力密度の大きいホット・スポットとして知られている。ホット・スポットは、デバイスの摩耗故障を引き起こし、誤動作やタイミング・エラーを引き起こす。発行キューが大きな電力を消費する原因は、ウェイクアップ論理のタグ比較回路である。この回路は CAM で構成されており、全てのデスティネーション・タグと発行キュー内の全てのソース・タグとの多数の比較を一斉に行うため、非常に大きな電力を消費する。そこで本論文では、CAM の分野で提案されている手法を応用し、タグ比較による消費電力を削減する手法を提案する。本手法では、発行キューを複数のセグメントに分割する。命令は、ソース・タグの下位ビットがセグメント番号と一致するセグメントにディスパッチする。そして、ウェイクアップ時には、デスティネーション・タグの下位ビットが一致するセグメントにあるタグ比較器のみを動作させる。一致しないセグメントの比較器は動作しないため、タグ比較器の動作回数を削減できる。

本手法では、命令がディスパッチされるセグメントに空きがない場合、他のセグメントに空きがあってもディスパッチできないためストールする。この結果、発行キューの容量効率が低下するという問題が生じる。この問題は、発行キューの容量効率が重要なプログラムにおいて性能低下を引き起こす。そこで本論文では、容量効率を重視したディスパッチ・アルゴリズムと、タグ比較の積極的な削減を重視したディスパッチ・アルゴリズムを動的に切り替える手法を提案する。本手法は、発行キューの容量効率が重要な場合は容量効率の低下による性能低下を抑制し、そうでない場合は積極的にタグ比較器の動作回数を削減することを可能とする。提案手法を SPEC CPU 2017 を用いて評価を行った。結果、性能低下を最大で 5% 以下（平均 -1%）に抑えつつ、タグ比較器の動作回数を平均で 85% 削減できることを確認した。

目次

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | 発行キュー (IQ : Issue Queue) | 3 |
| 2.1 | 概要と動作 | 3 |
| 2.2 | 回路構成 | 4 |
| 2.2.1 | ウェイクアップ論理 | 5 |
| 2.3 | IQ の方式 | 7 |
| 2.3.1 | シフト・キュー | 7 |
| 2.3.2 | サーキュラー・キュー | 7 |
| 2.3.3 | ランダム・キュー | 8 |
| 2.3.4 | エイジ論理付きランダム・キュー | 8 |
| 2.4 | IQ の問題点 | 9 |
| 3 | 関連研究 | 10 |
| 3.1 | 発行キューの電力削減に関する関連研究 | 10 |
| 4 | 提案手法 : セグメント化した IQ | 11 |
| 4.1 | 発行キューのセグメント化 | 11 |
| 4.1.1 | 提案手法の概要 | 12 |
| 4.1.2 | 提案手法におけるディスパッチ | 12 |
| 4.1.3 | 提案手法におけるウェイクアップ | 14 |
| 4.2 | 第 2 ソース・タグ比較の削減 | 16 |
| 4.2.1 | スワップ | 16 |
| 4.2.2 | サブ・セグメント | 17 |
| 5 | SWITCH 方式 | 21 |
| 5.1 | 容量効率の低下 | 21 |
| 5.1.1 | 提案手法による容量効率低下の原因 | 21 |
| 5.1.2 | 容量効率の低下による性能低下 | 21 |
| 5.2 | 容量効率低下への対策 : SWITCH 方式 | 22 |
| 5.2.1 | 2 つのセグメント選択アルゴリズム | 23 |
| 5.2.2 | モードの切り替え | 27 |
| | 発表実績 | 29 |

第 1 章 はじめに

現在のプロセッサは、非常に微細な LSI 技術で製造される。このような LSI の微細化に伴い、デバイスの信頼性低下の問題が深刻になっている [1]。微細化は、経年劣化や摩耗故障を加速し、その結果、タイミング・エラーや誤動作を引き起こし、デバイスの寿命を縮める。経年劣化や摩耗故障は温度に関して指数関数的に加速し [2-4]、温度 10~15℃の上昇でデバイスの寿命は半分以下になる [5]。

プロセッサ・チップ上には、ホット・スポットと呼ばれる単位面積あたりの電力が大きい場所が存在する。ホット・スポットは、そうでない場所と比べて温度上昇が激しいため、上述した故障を引き起こす確率が高くなる。従って、ホット・スポットを生成する回路の消費電力を低下させる必要がある。

ホット・スポットを生成する回路の 1 つに、発行キューがある。発行キューのサイズはプロセッサの世代が進むごとに大きくなっており、より深刻なホット・スポットとなっている。従って、発行キューの電力削減に対する要求は非常に大きい。

発行キューの中で最も電力を消費する回路は、タグ比較の回路である。タグ比較は、発行幅分のディスティネーション・タグとすべてのソース・タグとの間で行われるため、非常に多くの電力を消費する。そこで本論文では、タグ比較器が動作する回数を削減する以下のような手法を提案する。

- 発行キューを複数のセグメントに分割する。命令を発行キューにディスパッチする際、第 1 ソース・タグの下位ビットが n である命令は、第 n 番目のセグメントに書き込む。タグ比較時には、ディスティネーション・タグの下位ビットがセグメント番号と一致するセグメントでのみ、第 1 ソース・タグの比較を行う。一致しないセグメントでは比較が行われない。これによりタグ比較回数が削減される。

- 上記の方法では、第 2 ソース・タグの比較回数は削減されない。そこで提案手法ではスワップとサブ・セグメントと呼ぶ 2 つの方法を導入し、第 2 ソース・タグの比較回数も削減する。スワップは、ディスパッチ時に第 1 ソース・オペランドがレディで、第 2 ソース・オペランドがレディでない命令において、第 1 ソース・タグと第 2 ソース・タグを格納するフィールドを交換し、第 2 ソース・タグの下位ビットを用いてディスパッチするセグメントを決定する手法である。サブ・セグメントは、各セグメントを第 2 ソース・タグにもとづきさらに分割する手法である。
- セグメント化によりディスパッチできるエントリが制限されるため、発行キューの容量効率が低下し、容量に敏感なプログラムにおいて性能が低下するという問題が存在する。この問題に対応するため、本論文では **SWITCH** という手法を提案する。SWITCH では、容量効率を重視したディスパッチ・アルゴリズムと、タグ比較回数の削減を重視したディスパッチ・アルゴリズムを、容量効率の重要性に応じて切り替えて使用することにより、性能低下を抑制する。

提案手法を SPEC CPU 2017 ベンチマークを用いて評価し、性能低下を 最大でも 5% 以下（平均 -1%）に抑えつつ、タグ比較の回数を平均で 85% 削減できることを確認した。

本論文の残りの構成は次の通りである。まず、??節で発行キューの基本的な事項を説明する。そして、4.1 節で提案手法の基本となるアイデアに関して説明した後、4.2 節で提案手法における第 2 ソース・タグのタグ比較回数削減方法に関して述べる。その後、5.1 節で提案手法の問題点である発行キューの容量効率の低下に関して説明した後、5.2 節で容量効率の低下に対する対策方法を説明する。??節で評価を行い、??節でまとめる。

第 2 章 発行キュー (IQ : Issue Queue)

本章では、本研究の研究対象である、IQ に関して説明する。まず、IQ の概要と動作を 2.1 節で説明したあと、IQ の回路構成を 2.2 節で述べる。その後、2.3 節で IQ の方式に関して説明する。

2.1 概要と動作

IQ はアウト・オブ・オーダー実行を行うプロセッサにおいて、リネームされた命令を保持し、実行順序をスケジューリングして、機能ユニットへ発行する回路である。IQ は、ディスパッチ、発行、ウェイクアップと呼ばれる 3 種類の動作を行う。以下でそれぞれの動作に関して説明する。

- ディスパッチ：リネームされた命令は、IQ にエントリが割り当てられ、命令の情報が格納される。この動作をディスパッチと呼ぶ。ディスパッチの動作は、IQ の方式により異なる。IQ の方式に関しては、2.3 節で詳しく説明する。
- 発行：IQ 内の命令のうち、ソース・オペランドが両方共レディとなった命令は、依存関係が解消し、実行が可能となる。このような命令を実行ユニットに送出する動作を発行と呼ぶ。なお、発行可能な命令が機能ユニットの数を超える場合 (このような場合を発行コンフリクトと呼ぶ) は、各命令の発行優先度に基づき命令を選択して発行する。発行された命令のエントリは IQ より削除される。
- ウェイクアップ：命令が発行されると、その命令のディスティネーション・オペランドのタグと発行キュー内にある全命令のソース・オペランドのタグの比較が行われる。比較が一致した場合には、対応するソース・オペランドのレディ・ビットをセットす

る。この動作をウェイクアップと呼ぶ。両方のオペランドがレディとなった命令は、依存が解消したため発行可能となる。

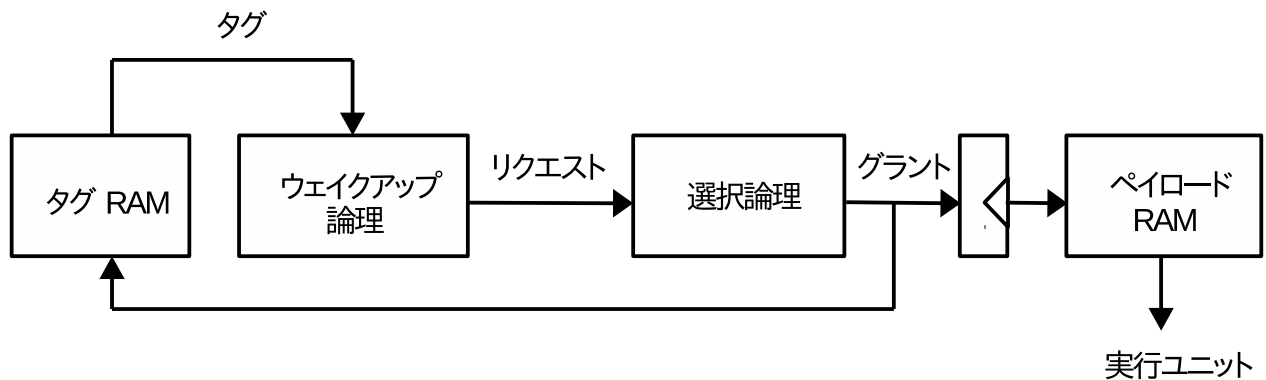


図 2.1: IQ の回路構成

2.2 回路構成

図 2.1 に IQ の回路構成を示す。IQ はウェイクアップ論理、選択論理、タグ RAM、ペイロード RAM と呼ばれる 4 つの回路より構成される。以下で各回路に関して説明する。また、IQ の回路のうちウェイクアップ論理は提案手法に関わる重要な回路であるため、2.2.1 節にて詳細に説明する。

- ウェイクアップ論理：命令感の依存関係を管理し、他の命令との依存関係が解消された命令に対して発行要求 (リクエスト信号) を出す。
- 選択論理：資源制約を考慮して、発行を要求された命令の中からそれを許可する命令を選択肢、発行許可信号 (グラント信号) を出力する。この選択においては、回路構成の単純化のために IQ の先頭のエントリの命令をより優先する。

- タグ RAM : 発行待機中の命令のディスティネーション・タグを保持する回路で，選択論理から発行許可信号が送られると，対応する命令のタグを読み出し，それをウェイクアップ論理へ送る．
- ペイロード RAM : 発行待機中の命令の命令のコードを保持する．選択論理から発行許可信号が送られると，対応する命令のコードを実行ユニットに送出する．

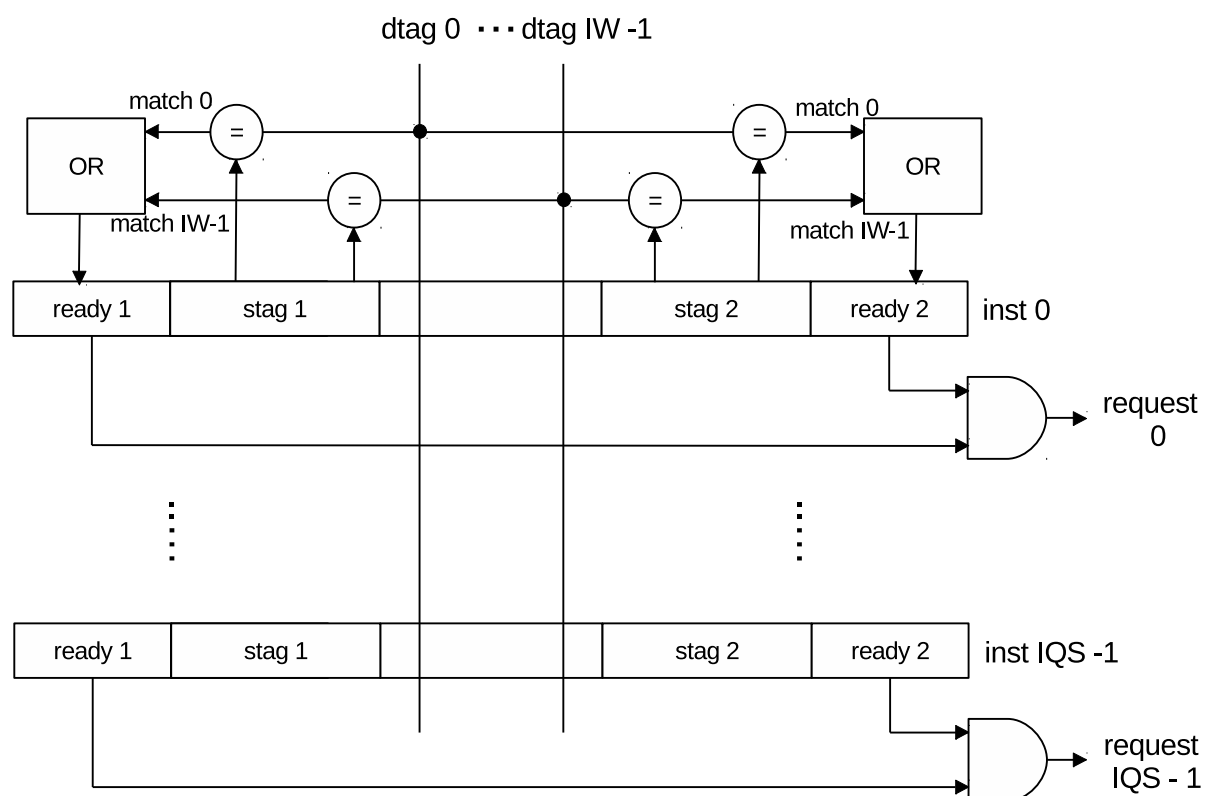


図 2.2: ウェイクアップ論理

2.2.1 ウェイクアップ論理

図 2.2 に，ウェイクアップの回路を示す．図中の IW は発行幅を， IQS は発行キューのエントリ数を表す．ウェイクアップでは， IW 個のディスティネーション・タグ ($dtag$) が発行キュー内の全命令に放送される．各命令は 2 つのソース・タグ ($stag$) を保持してお

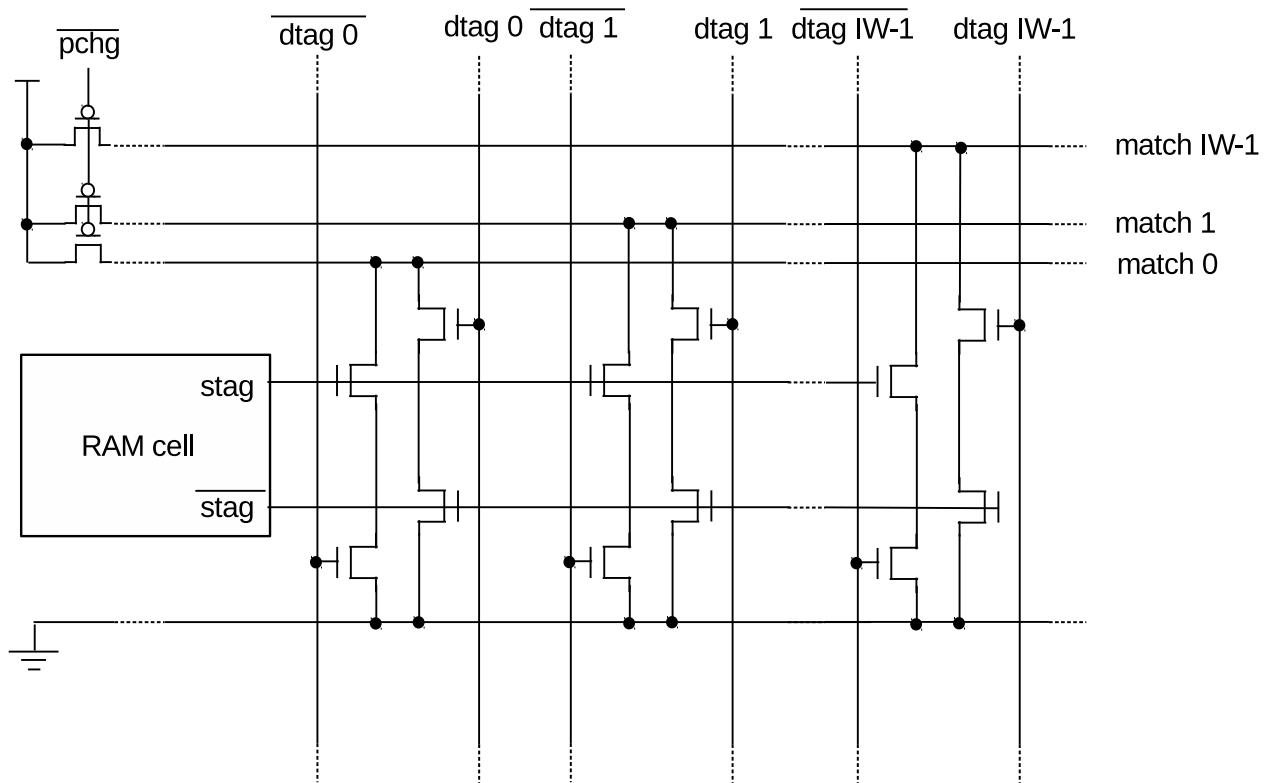


図 2.3: タグ比較器の CAM 回路

り、放送されたディスティネーション・タグと比較が行われる。いずれかのディスティネーション・タグとソース・タグが一致した場合、そのソース・オペランドのレディ・ビットがセットされる。2つのレディ・ビットがセットされた命令は発行が可能となるため発行要求が出力される。

図 2.3 に発行キューに使用されるタグ比較器の CAM 回路を示す。同図は、ソース・タグ 1 ビット分の比較回路を表す。同図に示すように、高速化のため通常ダイナミック論理によって構成される。比較の動作は、次のように行われる。まず、マッチ線がプリチャージされる。次にディスティネーション・タグが放送され、比較が行われる。タグが不一致であれば、直列に接続された 2 つのプルダウン・トランジスタが両方とも ON となり、マッチ線がディスチャージされる。タグが一致する場合、マッチ線は H の状態が維持される。

比較器はマッチ線のディスチャージ時に電力を消費する。

2.3 IQ の方式

これまで、IQ の方式としてシフト・キュー、サーキュラ・キュー、ランダム・キューの 3 つの方式が提案されている。各方式に関して説明したのち、現在主流な方式であるエイジ論理付きのランダム・キューに関して説明する。

2.3.1 シフト・キュー

シフト・キューは、最も古くに提案され、商用プロセッサに使用された IQ の方式である [6]。シフト・キューでは、IQ の先頭のエントリより順に命令をディスパッチする。これにより、古い命令に高い発行優先度を与えることができる。¹

また、シフト・キューでは命令を発行したエントリの空きを詰めるコンパクションを行うことにより、高い容量効率も達成することができる。正しい発行優先度と、高い容量効率を同時に達成するため、シフト・キューは IQ の方式の中で最も高い性能を得ることができる。

一方でシフト・キューには、コンパクションの回路が非常に複雑で、また消費電力が非常に大きいという欠点がある。そのため、シフト・キューはスケーリングが困難となっており、現在のプロセッサには使用されていない。

2.3.2 サーキュラー・キュー

サーキュラ・キューは、シフト・キューにおいて問題であったコンパクションを行わない方式である [7]。IQ は、ヘッド・ポインタとテール・ポインタを用いてサーキュラー・バッファとして管理される。

サーキュラー・キューでは、既に空いているが、命令をディスパッチできないエントリ

¹一般に、古い命令から優先的に発行すると、性能がより高くなることが知られている。

が発生し、IQ の容量効率がシフト・キューと比較して低下してしまう。また、ヘッド・ポインタとテール・ポインタの位置が逆転するラップ・アラウンドが生じた際には、新しい命令に高い優先度が与えられる優先度逆転が起き、選択論理が正しい優先度で命令を選択できない。これらの理由から、サーキュラー・キューはシフト・キューと比較して性能が低下する。

特に、容量効率が低下する影響は大きく、現在のプロセッサには使用されていない。

2.3.3 ランダム・キュー

近年は、回路の単純化や電力削減のため空いているエントリに単純にディスパッチするランダム・キューが使用されている。ランダム・キューでは IQ の容量を無駄にすることがなく、高い容量効率を達成する。その一方で、命令が年齢とは無関係にランダムに並ぶため、正しい優先度で命令を発行することが出来ない。

ランダム・キューでは、発行キューの空きエントリのインデックスを保持するフリー・リストを用意する。ディスパッチ時には、フリー・リストから読み出したインデックスが指す発行キューのエントリに命令を書き込む。発行キューから命令が発行されエントリが無効化されると、そのインデックスをフリー・リストへ返す。フリー・リストは FIFO バッファで管理される。

2.3.4 エイジ論理付きランダム・キュー

ランダム・キューにおける発行優先度の欠点を緩和するため、ランダム・キューは一般にエイジ論理と併用される。エイジ論理は選択論理と並列に動作する回路で、発行要求が出された命令の中で最も古い 1 命令を選ぶ。最も古い命令はクリティカル・パス上の命令である可能性が高いため、これを優先して発行することができ、結果としてエイジ論理付きランダム・キューは通常のランダム・キューと比較して性能が大きく向上する。

2.4 IQ の問題点

IQ は電力密度の大きいホットスポットとして知られている．この主な原因は，ウェイクアップ論理での消費電力である．論文によると，ウェイクアップ論理の消費電力は IQ 全体の 20% であり，削減の必要がある．

ウェイクアップ論理での消費電力が大きい理由として，タグ比較回路が挙げられる．タグ比較に使用する CAM は， $IQS \times IW \times 2$ 個必要である．ここで， IQS は IQ のエン트리数， IW は発行幅を表す．現在想定しているプロセッサ構成では， IQS は 128 エントリー， IW は 8 命令であるため，CAM の総数は 2048 個となる．

これだけ多くの CAM が毎サイクル動作するため，ウェイクアップ論理の電力密度は大きくなる．本研究では，ウェイクアップ時のタグ比較によって生じる消費電力を削減することを目的とする．

第 3 章 関連研究

3.1 発行キューの電力削減に関する関連研究

発行キューの電力削減に関する研究を紹介する．Ponomarev らは，リソース要求に応じて発行キューのサイズをリサイズすることにより，消費エネルギーを削減する手法を提案した [8]．

Sembrant らは，クリティカル・パス上にない命令を発行キューとは別のバッファに入れ，ディスパッチを遅延させることによって，性能を低下させずに発行キューのサイズを小さくする手法を提案した [9]．

Ernst らは，発行キューを，2 つのソース・オペランドを保持できるキュー，1 つのソース・オペランドのみ保持できるキュー，オペランドを保持しないキューの 3 つに分割し，レディでないソース・オペランドの数に応じていずれかにディスパッチする手法を提案した [10]．この手法では，タグ比較器の数そのものを削減できるため，ウェイクアップの消費電力を削減できる．

第 4 章 提案手法：セグメント化した IQ

4.1 発行キューのセグメント化

本論文では，発行キューのタグ比較器の動作回数を削減するための手法として，発行キューをセグメント化する手法を提案する．本節では，まず提案手法の概要を説明した後，提案手法におけるウェイクアップとディスパッチに関して詳しく説明する．

| Segmented IQ | | | |
|--------------|----------------|----------------|--------|
| | 1st stag field | 2nd stag field | others |
| segment 0 | | | |
| | | | |
| | | | |
| segment 1 | | | |
| | | | |
| | | | |
| segment 2 | | | |
| | | | |
| | | | |
| segment 3 | | | |
| | | | |
| | | | |

図 4.1: セグメント化した発行キュー

4.1.1 提案手法の概要

提案手法の基本アイデアは、大容量 CAM の電力削減に関する研究 [11, 12] から着想を得ている。この研究において提案されている手法では、CAM を複数のセグメント¹に分割する。各セグメントには下位ビットが同一のデータのみを記録する。そして、比較が行われる際には、比較対象のデータの下位ビットと、記録されているデータの下位ビットが一致するセグメントのみで比較を行う。これによって、比較器が動作する回数を「1/セグメント数」まで削減することができ、消費電力が削減できる。

本手法においても、図 4.1 に示すように発行キューを複数のセグメントに分割する。各セグメントには、第 1 ソース・タグの下位ビットがセグメントの番号と一致する命令をディスパッチする。ウェイクアップ時の第 1 ソース・タグのタグ比較では、ディスティネーション・タグの下位ビットとセグメントの番号が一致するセグメントのみでタグ比較を行う。これによって、第 1 ソース・タグのタグ比較回数を「1/セグメント数」に削減できる。

提案手法におけるディスパッチとウェイクアップに関して詳しく説明する。

4.1.2 提案手法におけるディスパッチ

ディスパッチする発行キューのエントリを決定する回路を図 4.2 に示す。本手法では、フリー・リストをセグメントと同じ数だけ用意する。各フリー・リストは、対応するセグメントの空きエントリのインデックスを FIFO バッファで管理する。各フリー・リストからは発行キューのインデックスが出力され、その中の 1 つを選択してディスパッチするエントリを決定する。どのフリー・リストからの出力を選択するかは、セグメント選択回路（図中の segment select logic）によって決定される。

セグメント選択回路の選択アルゴリズムについて説明する。セグメントの選択方法は、ディスパッチ時に第 1 ソース・オペランドがレディであるかによって異なるため、それぞれの場合に関して説明する。

¹文献 [11, 12] ではバンクと呼ばれている

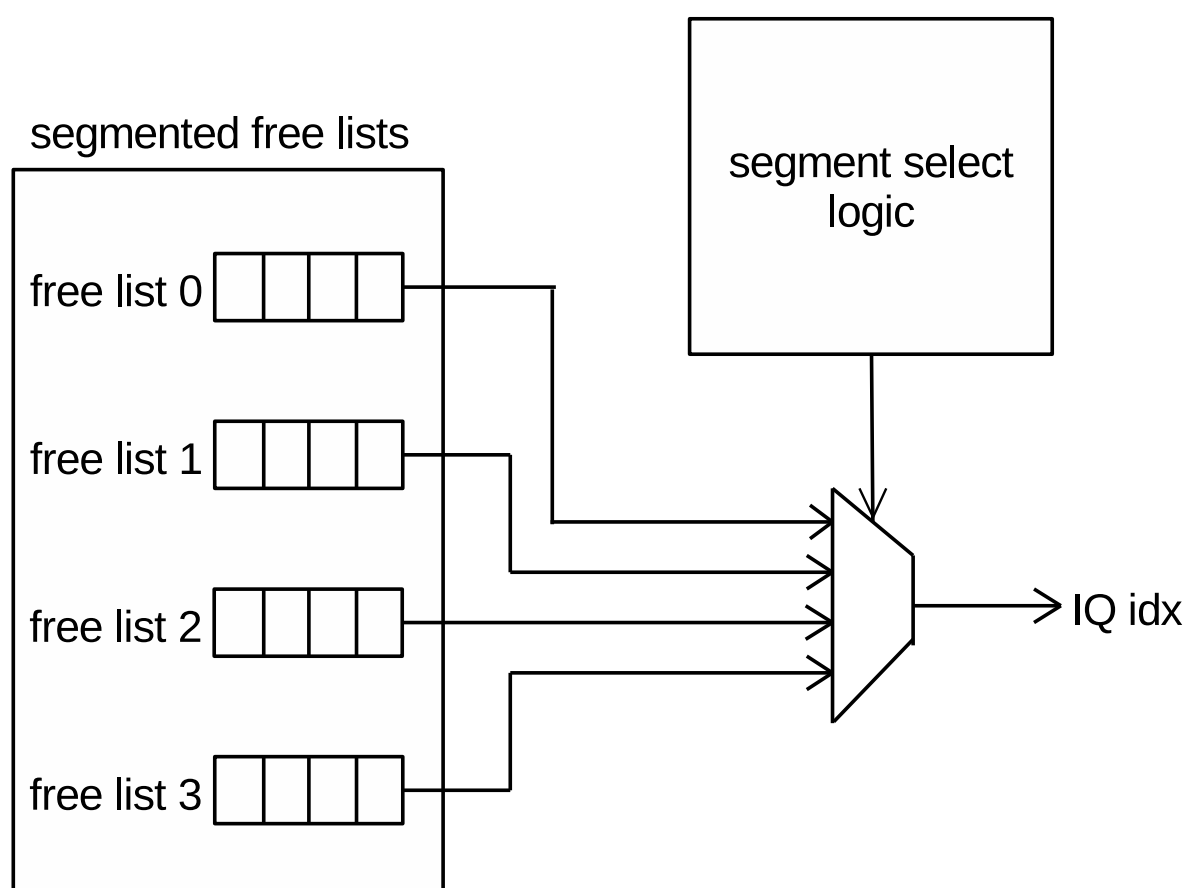


図 4.2: 提案手法におけるディスパッチエントリの決定回路

- 第 1 ソース・オペランドがレディでない場合：第 1 ソース・タグの下位ビットと番号が同じセグメントを選択する。選択されたセグメントに空きエントリがある場合、ディスパッチ可能であるため、対応するフリー・リストから読み出したエントリにディスパッチを行う。対応するセグメントに空きがない場合は、セグメントに空きが出るまでディスパッチをストールさせる。
- 第 1 ソース・オペランドがレディである場合：この場合、第 1 ソース・タグの比較は行われなため、どのセグメントにディスパッチしても問題ない。このような場合をセグメント・インディペンデントと呼ぶ。セグメント・インディペンデントの場合、空きエントリのあるセグメントから、ラウンドロビンでディスパッチするセグメントを選択しディスパッチする。

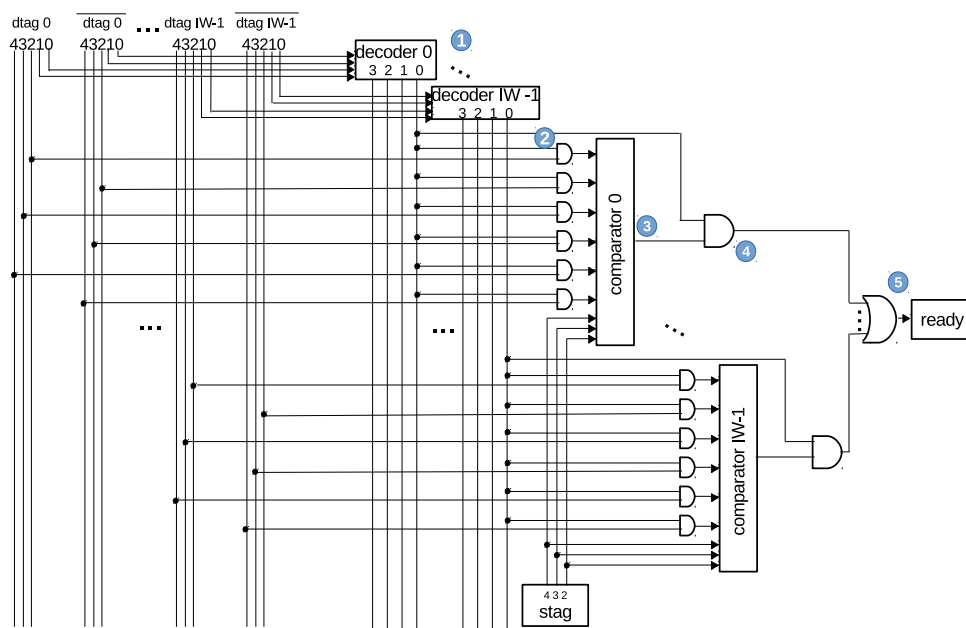


図 4.3: 提案手法におけるタグ比較回路（第 0 セグメント）

例として、第 1 ソース・オペランドがレディでなく、タグが 15 (1111_2) である命令を、図 4.1 に示す 4 つに分割された発行キューにディスパッチする場合を考える。第 1 ソース・タグの下位 2 ビットが 3 (11_2) であるので、この命令は第 3 セグメントにディスパッチされる。

なお、ソース・オペランドを使用しない命令も存在するが、そのような命令はディスパッチ時にソース・オペランドがレディであるものとして扱う。

4.1.3 提案手法におけるウェイクアップ

提案手法におけるウェイクアップでは、ディスティネーション・タグの下位ビットがセグメント番号と一致するセグメントでのみ、第 1 ソース・タグのタグ比較器を動作させ比較を行う。一致しないセグメントはタグ比較器を動作させない。これは、ディスティネーション・タグの下位ビットと番号が一致しないセグメントには、第 1 ソース・タグの下位ビットがディスティネーション・タグの下位ビットと異なる命令しか入っておらず、タグは必ず不一致となるためである。

例として、放送されたディスティネーション・タグが6 (110_2) で、発行キューが図 4.1 のように 4 つのセグメントに分割されている場合を考える。この場合、下位ビットは2 (10_2) であるため、第 2 セグメントでのみ、第 1 ソース・タグのタグ比較を行う。

なお、第 2 ソース・タグのタグ比較に関しては、セグメントの番号とタグの下位ビットに関係性はないため、すべてのセグメントでタグ比較を行う必要がある。

提案手法におけるタグ比較の回路を図 4.3 に示す。同図は 4 つのセグメントに分割された発行キューのうち、第 0 セグメントのエントリにおける、第 1 ソース・タグの比較回路を示している。タグ・ビット数は 5 とし、発行幅を IW とする。

タグ比較の動作を図中の番号を用いて説明する。①放送されるディスティネーション・タグの下位 2 ビットはデコーダへ送られる。デコーダはセグメント数だけ信号線を出力する。第 n 番目の信号線は、第 n セグメントでのタグ比較が有効であることを示す。つまり、ディスティネーション・タグの下位ビットが n の場合、 n 番目の出力線のみ H を出力し、残りはすべて L を出力する。

②AND ゲートによって、デコーダからの信号線が H の場合にのみ、ディスティネーション・タグの高位ビット及びその反転信号がタグ比較器へ入力される。図 4.3 に示す回路は第 0 セグメントのタグ比較回路であるため、デコーダの 0 番目の信号線が AND ゲートに入力されている。

デコーダからの信号線が H の場合、つまり、ディスティネーション・タグの下位ビットとセグメント番号が一致していた場合のみ、比較器に有効なディスティネーション・タグの高位ビットとその反転信号が送られ、ソース・タグの高位ビットと比較が行われる。デコーダからの信号線が L の場合、ディスティネーション・タグとその反転信号がどちらも L としてタグ比較器へ入力される。この場合、ディスティネーション・タグとその反転信号に接続されたプルダウン・トランジスタがすべて OFF となるため、マッチ線はディスチャージされず、電力を消費しない。

③タグ比較の結果、タグの高位ビットが一致した場合は、比較器から H が出力される。

④タグ比較器が H を出力し、かつデコーダからの信号が H である場合に、タグ比較は一致となる。

⑤いずれかのディスティネーション・タグがソース・タグと一致した場合に、ソース・オペランドのレディ・ビットがセットされる。

4.2 第 2 ソース・タグ比較の削減

4.1 節で述べた手法では、命令の第 2 ソース・タグのタグ比較回数は削減できない。そこで本節では、第 2 ソース・タグの比較回数の削減を可能とするスワップとサブ・セグメントという 2 つの手法を提案する。

4.2.1 スワップ

スワップは、第 1 ソース・タグと第 2 ソース・タグを格納するフィールドを交換し、第 2 ソース・タグの下位ビットをもとにディスパッチするセグメントを決定する手法である。以下で詳しく説明する。

第 1 ソース・オペランドがレディで、第 2 ソース・オペランドがレディでない場合について説明する。この場合、4.1 節で説明した方法では、命令はセグメント・インディペンデントとしてディスパッチされる。第 1 ソース・オペランドは既にレディであるため、比較は第 2 ソース・タグについてのみ行われるが、第 2 ソース・タグのタグ比較は全てのセグメントで行われるため、タグ比較の回数は削減されない。

そこでこのような場合に、第 1 ソース・タグと第 2 ソース・タグを交換し（スワップ）、第 2 ソース・タグの下位ビットを使用してディスパッチするセグメントを選択する。これにより、4.1 節で述べたセグメント化の効果でタグ比較回数が削減される。なお、スワップではタグを交換するが、ペイロード RAM に格納するソース・タグを交換するわけではないので、命令の意味は保持される。

スワップを行う場合のセグメント選択アルゴリズム

セグメント選択回路は、以下に示すアルゴリズムによってディスパッチするセグメントを決定する。

- 両ソース・オペランドともレディでない場合：第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。
- 第 1 ソース・オペランドのみレディである場合：スワップを行い，第 2 ソース・タグでセグメントを選択する。
- 第 2 ソース・オペランドのみレディである場合：第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。
- 両ソース・オペランドがレディである場合：セグメント・インディペンデントとしてラウンドロビンでセグメントを選択する。

なお，両ソース・オペランドがレディのとき以外で，選択されたセグメントに空きがない場合は，ディスパッチをストールして当該のセグメントに空きが出るまで待ち合わせる。

4.2.2 サブ・セグメント

サブ・セグメント方式は，第 1 ソース・タグの下位ビットに応じて分割されるセグメントを，第 2 ソース・タグの下位ビットに応じてさらに細かく分割する。第 2 ソース・タグの下位ビットによる分割をサブ・セグメント（S-seg）と呼び，従来の第 1 ソース・タグによる分割をサブ・セグメントに対応してメイン・セグメント（M-seg）と呼ぶこととする。

サブ・セグメントを導入した発行キューの分割を図 4.4 に示す。黒色の枠で示す各メイン・セグメントを，赤色と青色で示すようにさらにサブ・セグメントに分割する。同図は，メイン・セグメント数が 4，サブ・セグメント数が 2 の場合の例を表している。各セグメ



図 4.4: サブ・セグメントを実装した発行キュー

ントの左には、(M-seg, S-seg) という形式でメイン及びサブ・セグメントの番号を表している。

サブ・セグメント方式について、ディスパッチとウェイクアップの動作をそれぞれ説明する。

サブ・セグメントにおけるディスパッチ

サブ・セグメント方式におけるディスパッチにおいては、フリー・リストを $M\text{-seg} \times S\text{-seg}$ だけ用意する。図 4.4 に示した例の場合 8 個のフリー・リストが必要となる。

サブ・セグメント方式におけるセグメント選択のアルゴリズムに関して説明する。アルゴリズムはソース・オペランドのレディ状況によって異なるため、以下ですべての場合に関して説明する。説明を簡単にするため、命令 $p5 = p13 + p6$ を、図 4.4 に示す発行キュー

にディスパッチする場合について例示する．第 1 ソース・タグが 13 で，第 2 ソース・タグが 6 である．

- 両ソース・オペランドともレディでない場合：第 1 ソース・タグでメイン・セグメントを，第 2 ソース・タグでサブ・セグメントを選択する．例の場合，第 1 ソース・タグ 13 (1101_2) の下位ビット 1 (01_2) より，メイン・セグメントは 1 となる．また，第 2 ソース・タグ 6 (110_2) の下位ビット 0 (0_2) より，サブ・セグメントは 0 となる．従って (1, 0) のセグメントを選択する．
- 第 1 ソース・オペランドのみレディである場合：第 2 ソース・タグでサブ・セグメントを選択する．例の場合，第 2 ソース・タグ 6 (110_2) の下位ビット 0 (0_2) より，サブ・セグメントは 0 となる．第 1 ソース・オペランドは既にレディであるため，メイン・セグメントの制限はない．従って，(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0) のいずれかのセグメントをラウンドロビンで選択する．このように，メイン・セグメントの制限がない場合をメイン・セグメント・インディペンデント (M-seg インディペンデント) と呼ぶこととする．
- 第 2 ソース・オペランドのみレディである場合：第 1 ソース・タグでメイン・セグメントを選択する．例の場合，第 1 ソース・タグ 13 (1101_2) の下位ビット 1 (01_2) より，メイン・セグメントは 1 となる．第 2 ソース・オペランドは既にレディであるため，サブ・セグメントの制限はない．従って，(1, 0) または (1, 1) のいずれかのセグメントをラウンドロビンで選択する．このように，サブ・セグメントの制限がない場合をサブ・セグメント・インディペンデント (S-seg インディペンデント) と呼ぶこととする．
- 両ソース・オペランドがレディである場合：セグメント・インディペンデントとしてラウンドロビンでセグメントを選択する．

サブ・セグメントにおけるウェイクアップ

第 1 ソース・タグの比較は、ディスティネーション・タグの下位ビットがメイン・セグメント番号と一致するセグメントのみで行う。また、第 2 ソース・タグの比較は、ディスティネーション・タグの下位ビットがサブ・セグメント番号と一致するセグメントのみで行う。このような比較により、第 1 ソース・タグだけでなく、第 2 ソース・タグの比較に関しても、「1/サブ・セグメント数」まで削減が可能となる。

サブ・セグメントとスワップの併用

サブ・セグメント方式はスワップと併用することが可能である。併用する場合は、ディスパッチ時に第 1 ソース・オペランドのみレディである場合の選択アルゴリズムを、以下のように変更する。

- 第 1 ソース・オペランドのみレディである場合：スワップを行い、第 2 ソース・タグでメイン・セグメントを選択する。例の場合、第 2 ソース・タグ 6 (110_2) の下位ビット 2 (10_2) より、メイン・セグメントは 2 となる。第 1 ソース・オペランドは既にレディであるため、S-seg インディペンデントである。従って、(2, 0) または (2, 1) のいずれかのセグメントを選択する。

サブ・セグメント方式とスワップを併用することによって、ディスパッチ時に第 1 ソース・オペランドのみレディである命令におけるタグ比較回数の削減が「1/サブ・セグメント数」から「1/メイン・セグメント数」となる。従って、図 4.4 に示した分割のようにメイン・セグメント数がサブ・セグメント数よりも多い場合に、タグ比較回数をより多く削減できる。

第 5 章 SWITCH 方式

5.1 容量効率の低下

提案手法には発行キューの容量効率が低下するという問題点がある．この問題点は，発行キューの容量効率が重要なプログラムにおいて，性能低下を引き起こす．本節では，容量効率が低下する原因について説明した後，容量効率の低下により性能低下を引き起こすプログラムの特徴に関して説明する．

5.1.1 提案手法による容量効率低下の原因

発行キューの容量効率の低下に関して，図 ??を用いて説明する．図において，灰色のエントリは命令を保持していることを示している．

図の状態の発行キューに，新たに命令 $p2 = p5 + p6$ をディスパッチする場合を考える．この命令のソース・オペランドは両方レディでないとする．この場合，第 1 ソース・タグの下位ビットから第 1 セグメントにディスパッチされることが決定する．しかし，第 1 セグメントに空きエントリはないため，空きが出るまでディスパッチをストールさせ，待ち合わせを行う必要がある．

このように，命令がディスパッチされるセグメントに空きがない場合，他のセグメントに空きがあってもディスパッチをストールする必要がある．その結果，提案手法ではセグメント化されていない発行キューと比較して容量効率が低下する．

5.1.2 容量効率の低下による性能低下

プログラムには，性能が発行キューの容量に敏感なものとそうでないものがある [9, 13, 14]. 次の 2 つの特徴のうちいずれかに当てはまるプログラムでは，性能が発行キューの

容量に敏感なため、与えられた発行キューの容量においては、その利用効率が重要である。このため、提案手法による容量効率の低下によって性能が低下する。

- 命令レベル並列性 (ILP : Instruction Level Parallelism) が高いプログラム
- メモリ・レベル並列性 (MLP : Memory Level Parallelism) が高いプログラム

ILP が高いプログラムでは、できるだけ発行キューに命令を多く供給し、より多くの命令を並列に発行できるようにすることで高い性能が得られる。発行キューの容量効率が低下すると、並列に発行できる命令数が減少するため、性能が低下する。

MLP が高いプログラムでは、できるだけ多くのキャッシュ・ミスと並列に実行することにより、メモリ・アクセスのレイテンシが実行時間に与える影響を縮小できる。発行キューの容量効率が低下すると、並列に処理できるメモリ・アクセスが減少するため、性能が低下する。

これらのことから、ILP もしくは MLP が高い場合には、提案手法による容量効率の低下を最小限に抑える工夫が必要となる。

5.2 容量効率低下への対策 : SWITCH 方式

発行キューの容量効率低下による性能低下を抑制する方式として、**SWITCH** と呼ぶ方式を提案する。SWITCH 方式では、次のようにして性能低下を抑制する。

- セグメント選択回路の選択アルゴリズムとして、容量効率は低下するが、タグ比較回数を多く削減できるような選択を行う **AGGRESSIVE** モード と、タグ比較回数の削減率は低下するが、容量効率が大きく低下しないような選択を行う **CONSERVATIVE** モード の 2 つを用意する。
- 実行プログラムの ILP 及び MLP を一定のインターバルで監視し、ILP もしくは MLP が高いと判断されたなら次のインターバルでは **CONSERVATIVE** モード でディスパッ

表 5.1: 2 つのセグメント選択モードのトレード・オフ

| モード | タグ比較回数の削減 | 容量効率 |
|--------------|-----------|------|
| AGGRESSIVE | ○ | × |
| CONSERVATIVE | × | ○ |

しかし、そうでないなら AGGRESSIVE モードでディスパッチを行う。

本節では、まず 2 つのセグメント選択のアルゴリズムに関して説明を行う。その後、ILP 及び MLP の評価方法と、切り替えアルゴリズムに関して説明する。

5.2.1 2 つのセグメント選択アルゴリズム

SWITCH 方式では、タグ比較回数の削減重視の AGGRESSIVE モードと、容量効率重視の CONSERVATIVE モードの 2 つを適切に切り替えて使用する。各モードには、タグ比較回数の削減と容量効率に関して、表 5.1 に示すトレード・オフの関係がある。それぞれのセグメントの選択方法に関して説明する。

なお、SWITCH 方式はサブ・セグメント方式と併用が可能であるが、説明を簡単にするため、サブ・セグメントを使用しない場合に関して説明する。サブ・セグメントと SWITCH 方式を併用するような拡張は容易に行うことができる。

AGGRESSIVE モード

AGGRESSIVE モードは、4.2.1 節で示した選択アルゴリズムを使用してディスパッチするエントリを決定する。このモードでは、選択されたセグメントに空きがない場合、他のセグメントに空きがあってもディスパッチは行わないため、容量効率が低下する。しかし、セグメント化の利益を最大限利用し、タグ比較回数を大幅に削減できる。

CONSERVATIVE モード

AGGRESSIVE モードでは、命令のソース・オペランドが両方レディであり、セグメント・インディペンデントとしてディスパッチできる場合以外では、ソース・タグによって

選択されるセグメントに空きがない場合にディスパッチをストールさせる。これに対し、CONSERVATIVE モードでは、以下で説明する工夫を行うことによって、このディスパッチのストールを回避し、容量効率の低下を抑制する。

- 両ソース・オペランドともレディでない場合：

AGGRESSIVE モードでは第 1 ソース・タグの下位ビットによってセグメントを選択する。選択されたセグメントに空きがない場合、ディスパッチを行わない。これに対して CONSERVATIVE モードでは、第 1 ソース・タグによって選択されたセグメントに空きがない場合には、スワップ¹してディスパッチを試みる。スワップするため、第 2 ソース・タグにより選択されるセグメントに空きがあればディスパッチが可能となる。

- 第 1 ソース・オペランドのみレディである場合：

AGGRESSIVE モードでは、スワップを行い、第 2 ソース・タグでセグメントを選択する。選択されたセグメントに空きがない場合、ディスパッチを行わない。これに対して CONSERVATIVE モードでは、第 2 ソース・タグによって選択されたセグメントに空きがない場合には、スワップをやめてディスパッチする。スワップをやめるため、第 1 ソース・タグによってセグメントが選択されるが、第 1 ソース・オペランドは既にレディであるため、どのセグメントにディスパッチしても良い。従って、セグメント・インディペンデントとしてディスパッチが可能となる。

- 第 2 ソース・オペランドのみレディである場合：

AGGRESSIVE モードでは第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。選択されたセグメントに空きがない場合、ディスパッチを行わない。これに対して CONSERVATIVE モードでは、第 1 ソース・タグによって選択されたセグメントに空きがない場合に

¹4.2.1 節では、スワップの定義を「第 1 ソース・オペランドのみレディの場合に、第 1 ソース・タグと第 2 ソース・タグを書き込むフィールドを交換する」としていたが、本節以降ではこの定義を拡大し、単に「第 1 ソース・タグと第 2 ソース・タグを書き込むフィールドを交換する」という意味で用いる。

は、スワップしてディスパッチする。スワップするため、第 2 ソース・タグによってセグメントが選択されるが、第 2 ソース・オペランドは既にレディであるため、どのセグメントにディスパッチしても良い。従って、セグメント・インディペンデントとしてディスパッチが可能となる。

上述の工夫によって、CONSERVATIVE モードでは、どちらかのソース・オペランドがレディである場合は、必ずディスパッチが可能となる。また、両ソース・オペランドともレディでない場合でも、第 1 ソース・タグにより選択されるセグメントと第 2 ソース・タグにより選択されるセグメントのうち、いずれかのセグメントに空きがあればディスパッチが可能となる。従って、ストールする確率は大きく減少する。

以下に、CONSERVATIVE モードにおけるセグメントの選択アルゴリズムをまとめる。

- 両ソース・オペランドともレディでない場合：第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。選択したセグメントに空きがない場合、スワップして第 2 ソース・タグをもとにセグメントを決定する。なおも空きがない場合はストールする。
- 第 1 ソース・オペランドのみレディである場合：スワップを行い、第 2 ソース・タグでセグメントを選択する。選択したセグメントに空きがない場合は、スワップをやめて、セグメント・インディペンデントとしてラウンドロビンでセグメントを選択する。
- 第 2 ソース・オペランドのみレディである場合：第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。選択したセグメントに空きがない場合はスワップを行い、セグメント・インディペンデントとしてラウンドロビンでセグメントを選択する。
- 両ソース・オペランドがレディである場合：セグメント・インディペンデントとしてラウンドロビンでセグメントを選択する。

CONSERVATIVE モードにおけるタグ比較回数の削減

CONSERVATIVE モードでは、AGGRESSIVE モードと比較してタグ比較回数の削減率が低下する可能性がある。この理由について説明する。例として、第 2 ソース・オペランドのみレディである命令をディスパッチする場合について説明する。

CONSERVATIVE モードでは、まず第 1 ソース・タグでセグメントを選択する。選択されたセグメントに空きがあれば、そのセグメントにディスパッチする。この場合、レディでない第 1 ソース・タグが、セグメント化によってタグ比較回数が削減される第 1 ソース・タグのフィールドに書き込まれるため、AGGRESSIVE モードと同様にタグ比較回数が削減される。

第 1 ソース・タグによって選択されたセグメントに空きがなければ、CONSERVATIVE モードではスワップしてセグメント・インディペンデントとしてディスパッチする。この場合、タグ比較回数の削減は行うことができない。これは、既にレディである第 2 ソース・オペランドのタグが、セグメント化によってタグ比較回数を削減できる第 1 ソース・タグのフィールドに書き込まれ、一方で、まだレディでなくタグ比較が行われる第 2 ソース・オペランドのタグが、セグメント化によってタグ比較回数が削減されない第 2 ソース・タグのフィールドに書き込まれるためである。

AGGRESSIVE モードでは、第 1 ソース・タグによって選択されたセグメントに空きがなければ、ストールして空きが出るまで待ち合わせる。このストールにより、容量効率は低下するが、空きが出たあとにディスパッチするため、タグ比較回数は削減される。これに対して CONSERVATIVE モードでは、タグ比較回数の削減は行えなくなるが、スワップしてディスパッチすることによってストールを回避し、容量効率の低下を防ぐ。

従って、CONSERVATIVE モードは、タグ比較回数の削減をある程度犠牲にして、発行キューの容量効率の低下を抑制するアルゴリズムであるといえる。

5.2.2 モードの切り替え

SWITCH 方式では、AGGRESSIVE と CONSERVATIVE の 2 つのモードを、実行プログラムの ILP や MLP の量に応じて切り替えて使用する。ここで重要となるのは ILP や MLP の量の評価方法である。本研究では、ILP の評価方法として Issue Stall Rate (ISR) という評価値を使用する。また、MLP の評価方法としては、最終レベル・キャッシュ (LLC: last-level cache) の MPKI (misses per kilo instructions) を使用する。それぞれに関して詳しく説明した後、切り替えアルゴリズムを説明する。

Issue Stall Rate (ISR)

ISR は、「インターバルの全サイクルのうち 1 命令も発行されないサイクルの割合」を表す指標である。ILP が高い場合、多くのサイクルで命令が発行されるため、ISR は低い値を示す。一方、ILP が低い場合には、命令が発行されないサイクルが一定の割合で発生するため、ISR は高くなる。

あらかじめ ISR にしきい値を設け、インターバルでの ISR がしきい値を下回った場合に ILP が高いと判断し、そうでなければ低いと判断する。

LLC MPKI

LLC MPKI は LLC のキャッシュ・ミスの発生頻度を表す指標である。LLC MPKI があらかじめ定めたしきい値を上回った場合に MLP が高いと判断し、そうでなければ低いと判断する。

切り替えアルゴリズム

切り替えアルゴリズムは以下に示すとおりである。一定のインターバルにおいて、ISR と LLC MPKI を測定し、ILP および MLP の高低を判断する。ILP または MLP のいずれかが高いと判定された場合、次のインターバルを CONSERVATIVE モードで実行する。

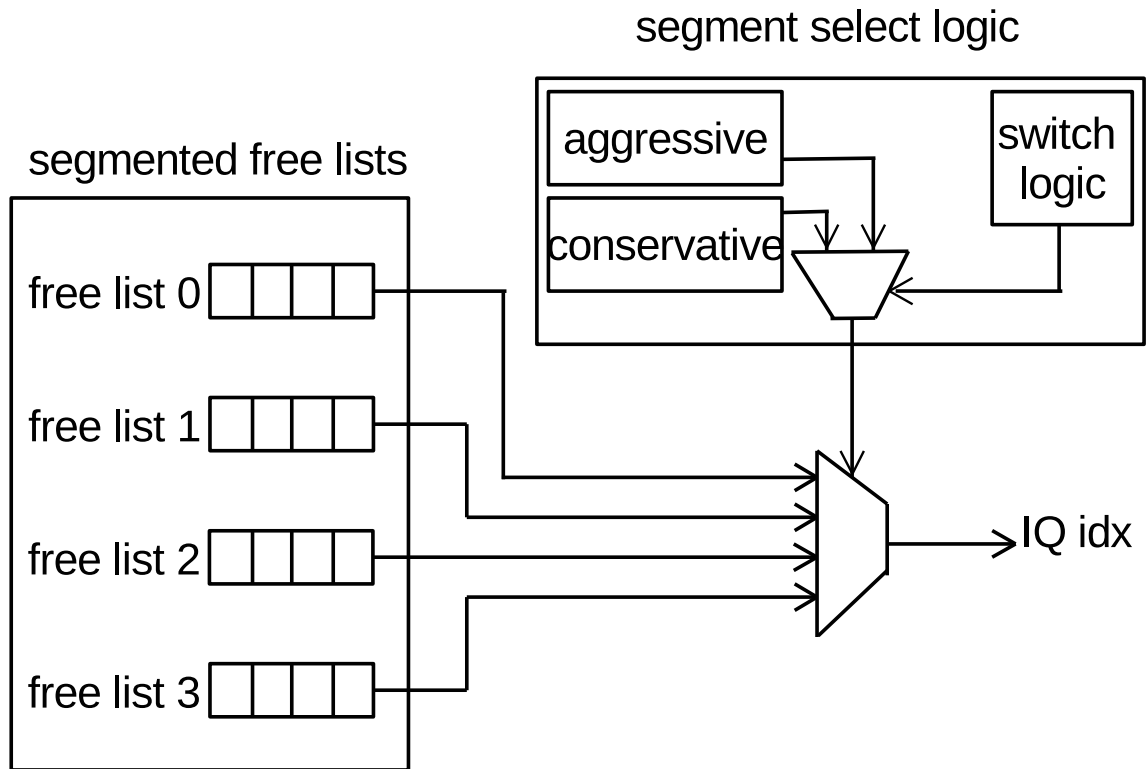


図 5.1: SWITCH 方式におけるディスパッチエントリの決定回路

ILP と MLP がどちらも低いと判定された場合、次のインターバルを AGGRESSIVE モードで実行する。

SWITCH 方式におけるディスパッチするエントリの決定回路を図 5.1 に示す。AGGRESSIVE と CONSERVATIVE の 2 つの選択アルゴリズムのうち、どちらを利用するかを SWITCH 回路が選択し、その結果に応じてセグメントが選択される。

発表実績

- 森健一郎, 安藤秀樹, “容量効率を意識したソース・タグ値に基づくセグメント化による発行キューのエネルギー削減”, 情報処理学会研究報告, Vol.2020-ARC-241, No.3, pp.1-12, 2020 年 7 月

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なる御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学大学院工学研究科 情報・通信工学専攻 安藤秀樹教授に心より感謝いたします．また，本研究の遂行を支えてくださいました，名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻安藤研究室の諸氏に深く感謝します．

参 考 文 献

- [1] N. H. E. Weste and D. M. Harris, *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective, 4th edition*. Addition Wesley, 2010.
- [2] F. Monsieur, E. Vincent, D. Roy, S. Bruyre, G. Pananakakis, and G. Ghibaudo, “Time to breakdown and voltage to breakdown modeling for ultra-thin oxides ($T_{ox} < 32\text{\AA}$),” in *Proceedings of the 2001 IEEE International Integrated Reliability Workshop*, October 2001, pp. 20–25.
- [3] S. Khan and S. Hamdioui, “Temperature dependence of NBTI induced delay,” in *Proceedings of the 2010 IEEE 16th International On-Line Testing Symposium*, July 2010, pp. 15–20.
- [4] J. Black, “Electromigration—a brief survey and some recent results,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-16, no. 4, pp. 338–347., April 1969.
- [5] R. Viswanath, V. Wakharkar, A. Watwe, and V. Lebonheur, “Thermal performance challenges from silicon to systems,” *Intel Technology Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 1–16, August 2000.
- [6] J. A. Farrell and T. C. Fischer, “Issue logic for a 600-mhz out-of-order execution microprocessor,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 5, pp. 707–712, 1998.
- [7] J. Abella, R. Canal, and A. Gonzalez, “Power- and complexity-aware issue queue designs,” *IEEE Micro*, vol. 23, Issue 5, no. 5, September-October 2003.

- [8] D. Ponomarev, G. Kucuk, and K. Ghose, “Reducing power requirements of instruction scheduling through dynamic allocation of multiple datapath resources,” in *Proceedings of the 34th Annual International Symposium on Microarchitecture*, December 2001, pp. 90–101.
- [9] A. Sembrant, T. Carlson, E. Hagersten, D. Black-Shaffer, A. Perais, A. Sez nec, and P. Michaud, “Long term parking (ltp): Criticality-aware resource allocation in ooo processors,” in *Proceedings of the 48th International Symposium on Microarchitecture*, December 2015, pp. 334–346.
- [10] D. Ernst and T. Austin, “Efficient dynamic scheduling through tag elimination,” in *Proceedings of the 29th Annual International Symposium on Computer Architecture*, May 2002, pp. 37–46.
- [11] M. Motomura, J. Toyoura, K. Hirata, H. Ooka, H. Yamada, and T. Enomoto, “A 1.2-million transistor, 33 mhz, 20-bit dictionary search processor with a 160 kb cam,” in *1990 37th IEEE International Conference on Solid-State Circuits*, 1990, pp. 90–91.
- [12] —, “A 1.2-million transistor, 33-mhz, 20-b dictionary search processor (disp) ulsi with a 160-kb cam,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 25, no. 5, pp. 1158–1165, 1990.
- [13] H. Ando, “SWQUE: A mode switching issue queue with priority-correcting circular queue,” in *Proceedings of the 52nd Annual International Symposium on Microarchitecture*, October 2019, pp. 506–518.
- [14] Y. Kora, K. Yamaguchi, and H. Ando, “MLP-aware dynamic instruction window resizing for adaptively exploiting both ILP and MLP,” in *Proceedings of the 46th Annual International Symposium on Microarchitecture*, December 2013, pp. 37–48.