

並列推論マシン PIM/i のバスの動特性の解析

武田浩一*、大原輝彦
沖電気工業株式会社

1 はじめに

我々は、第五世代コンピュータ・プロジェクトの一環として並列推論マシン PIM/i[1] の研究開発を行ってきた。PIM/i のクラスは密結合マルチプロセッサであり、8 台の要素プロセッサが単一の共有バスを介して共有メモリに接続された構成をしている。このようなタイプのマルチプロセッサは、システムの構築が容易な反面、共有メモリおよび共有バスがボトルネックとなり、複数のプロセッサからのアクセス競合によるオーバーヘッドが問題となる。これを解決するため、PIM/i においては、各要素プロセッサにプライベートなローカルメモリおよびキャッシュメモリをもたせ、共有メモリおよび共有バスへのアクセス頻度を低減する方法をとった [2]。しかし、キャッシュの一貫性制御が必要となるため、そのオーバーヘッドが追加される。さらに、キャッシュミス時の共有メモリアクセスおよびキャッシュの一貫性制御により共有バスが使用されるため、アクセス競合によるオーバーヘッドも依然として残る。このため、これらのオーバーヘッドを低減する工夫が望まれる。

本稿では、ハードウェアシステム、および、対象言語である KL1 言語の PIM/i 向き処理系の改良のために、PIM/i でのバスの振舞いや性能を、いくつかのベンチマークにより評価した結果を報告する。

2 PIM/i のキャッシュメモリおよび共有バスの概要

キャッシュメモリは命令キャッシュとデータキャッシュに分離されている。それぞれキャッシュサイズ 32K ワード、ダイレクトマッピング方式で、ブロックサイズは 4 ワードである。データキャッシュは、ライトバック方式、更新型スヌープ方式の一貫性制御を採用している。また、キャッシュミス時のブロック供給は、ブロック供給元となるキャッシュが存在した場合そのキャッシュから行なわれ、存在しない場合は共有メモリから行なわれる。

共有バスは、バスの使用目的を示すバスコマンド、

*Analysis of Dynamic Characteristics of the Shared Bus on the Parallel Inference Machine PIM/i
Koichi TAKEDA, Teruhiko OOHARA,
Oki Electric Industry Co., Ltd.

38 ビットのアドレス、40 ビットのデータ、バスリクエスト信号、バスグラント信号、その他の制御信号線から構成されている。バス調停は集中型で、バス権を得たバスマスタが次の調停では最低の優先度になるように各バスマスタの優先順を回転させるラウンドロビン方式によって公平性を保証している。バスコマンドは共有メモリへのアクセスを指示するものの他、PIM/i の更新型キャッシュプロトコル実現のための各種コマンドが用意されている。主なバスコマンドの実行にかかるサイクル数は一貫性制御動作が 4 サイクル、キャッシュリブレイスは 7～31 サイクルである。また、バス調停は 2 サイクルである。

3 測定の概要

3.1 バストレースメモリ

PIM/i には、共有バスの情報をサイクル単位で記録できるバストレースメモリが組み込まれている。バス情報の収集は、共有バスの各信号線を毎サイクル監視し、その値をトレース専用のメモリに書き込むことによって行われ、トレースの実行によって共有バスに何らの影響も及ぼさない。トレースの開始、終了はサービスプロセッサ (SVP) から制御することができ、収集されたバス情報は、共有バスを使用せずに SVP に転送することができる。トレースは連続して 2048 サイクル分が可能である。収集できる情報は、バスリクエスト、バスコマンド、アドレス、データ、共有メモリおよび他キャッシュの応答である。

これを利用することによって、プログラムの動作に何も影響を与えずに共有バスの情報を収集することができる。

3.2 バス情報の収集方法

連続してトレースできるサイクル数はプログラムの実行サイクルに比べて非常に少ないので、プログラムの実行中のいくつかの任意の時点でのバス情報をサンプリングすることによってバス情報の収集を行った。サンプリングは 2048 サイクルずつ数十回行い、合計 80K サイクル程度収集した。

測定は、8 プロセッサの PIM/i 上で行った。使用した被測定プログラムは並列論理型言語 KL1 で記述した qk12、uq12、pent58、bp を VPIM 処理系 [3] 上で動

表 1: バスアクセスのオーバーヘッドとプロセッサ利用率

プログラム	qk12	uq12	pent58	bp
プロセッサ利用率 (%)	92.2	81.0	70.5	61.5
バス調停時間率 (%)	0.9	0.6	4.0	2.9
バス獲得待ち時間率 (%)	2.7	12.1	16.3	26.7
共有バス使用時間率 (%)	4.2	6.3	9.2	10.0

作させたものである。qk12、uq12 はクイーン問題、pent58 は詰め込みパズル、bp は最適経路問題である。

4 測定結果と考察

4.1 バスアクセスのオーバーヘッド

表 1 は、バスのアクセスにともないプロセッサが停止していたサイクル数（オーバーヘッド）の割合の内訳と、プロセッサが命令を実行していたサイクル数の割合（プロセッサ利用率）を示したものである。

プロセッサ利用率は、qk12 が比較的良好である。一方、プロセッサ利用率の低いものはそのオーバーヘッドの多くがバス競合によるバス獲得待ちに費やされている。ここで、サイクル数に対するバスの空き率とバス競合率を調べてみると、qk12 ではバス空き率は 68%、バス競合率は 14% であるのに対して、bp ではバス空き率は 39%、バス競合率は 47% と高くなっている。以下では、バスの混雑どのようなアクセスにより起こっているかを検討する。

4.2 バス使用の内訳

表 2 は、バスを使用したサイクルに対する各バスコマンドのサイクル数の割合を示している。バスコマンドは共有メモリアccessと一貫性制御動作に大別した。表 3 は、バスを使用してアクセスしたアドレスを言語処理系で使用するメモリ領域ごとに分類し、回数の割合で示している。メモリ領域は、命令 (CODE)、プロセッサ間通信用 (COM)、スリットチェック (SLIT)、制御用 (SYS)、ヒープ (HEAP) の 5 種類に分類した。

アクセスする領域はいずれも HEAP が大部分を占めている。また、文献 [4] では、スリットチェックや負荷分散にともなうゴールの通信が頻繁に起きていると報告されているが、負荷分散の改良 [3] によって、これらは少なくなっている。クイーン問題では、共有メモリアccess、すなわちキャッシュのリプレースの割合が高い。特に、uq12 ではそれが顕著である。これは、uq12 ではヒープの消費速度が高く、短時間に多くのメモリを要求するからである。

一方、pent58 では、一貫性制御動作の割合が高く、bp では共有メモリアccessと一貫性制御動作の割合が同程度である。動作中のキャッシュブロックの状態を覗いてみると、全ブロック数に対する共有状態

表 2: バスコマンドの内訳 (サイクル数)

バスコマンド	qk12	uq12	pent58	bp
共有メモリアccess	67.8	94.9	16.3	53.2
一貫性制御	32.4	5.1	83.7	46.7

表 3: アクセス領域の内訳

アクセス領域	qk12	uq12	pent58	bp
CODE	0.0	0.0	2.8	1.7
COM	4.8	1.0	1.2	1.3
SLIT	5.4	2.5	1.3	11.1
SYS	12.3	7.1	1.6	8.7
HEAP	77.4	89.5	93.0	77.2

のブロックの割合が qk12 では 33% であるのに対し、pent58 では 62% であった。共有状態が多いのは、インクリメンタル GC (MRB 管理) によるメモリの再利用のためデータの局所性が高くなり、キャッシュの置換えが少なくなっているためだと考えられる。すなわち、ヒープ上でプロセッサ間通信を行うとキャッシュブロックが共有状態になるが、キャッシュの置換えが少ないためそのまま共有状態で残ってしまうことによる。

5 おわりに

PIM/i の共有バスについて評価、考察を行った。その結果、プロセッサ利用率の低下分の多くはバス獲得待ちに費やされ、バス使用の大部分は HEAP のアクセスに使われていることがわかった。また、uq12 では共有メモリアccessが、pentomino58 では一貫性制御動作が多く、bestpath では両方が多いことがわかった。

日頃、助言をいただく新世代コンピュータ技術開発機構第 1 研究室、および沖電気工業の PIM 担当諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] 大原他:「並列推論マシン PIM/i の概要」、情報処理学会第 40 回全国大会予稿集、pp.1185 ~ 1186、1990。
- [2] 武田他:「並列推論マシン PIM/i のメモリシステムの概要」、情報処理学会第 41 回全国大会予稿集、pp.6-161 ~ 6-162、1990。
- [3] 加藤他:「並列推論マシン PIM/i における KL1 言語処理系の改良」、情報処理学会 第 46 回全国大会予稿集、1993。
- [4] 吉田他:「並列推論マシン PIM/i におけるバスの振る舞い」、情報処理学会第 43 回全国大会予稿集、pp.6-11 ~ 6-12、1991。