

ハードウェア・トレーサを用いた 計算機アーキテクチャ評価システム

堀川 隆*、大鷹 正之**、大野 直哉*、加藤 哲***

*日本電気(株) C&Cシステム研究所

**日本電気(株) 交換第一ネットワークシステム事業部

***日本電気技術情報開発(株)

トレース・データを解析する方法により計算機のアーキテクチャや性能を評価するためのシステムを開発した。これは、計算機の動作状況をトレース・データとして記録するトレーサと、データを解析するための解析システムから構成される。本システムでは、トレーサとして新たにハードウェア・トレーサを開発した。これにより、リアルタイム制御システムに対してもトレース・データによる評価を行うことが可能になった。解析システムの特徴は、命令トレース・データを記録する形式を計算機に依存しない標準形式とすることにより、異なる計算機の解析において解析プログラムを共用し、共通な評価項目による評価を行うことができる点である。

Architecture Evaluation System with Hardware Tracer

Takashi Horikawa* , Masayuki Ohtaka** , Naoya Ohno* , Satoshi Katoh***

*C&C Systems Reserach Laboratories, NEC Corporation

**1st Switching Network Systems Division, NEC Corporation

***NEC Scientific Informantion System Development

****4-1-1, Myazaki, Miyamae, Kawasaki, Kanagawa, 213 Japan

**1131, Hinode, Abiko, Chiba, 270-11 Japan

To develop high cost performance machine, the careful survey of its dynamic status transition is quite important. For that purpose, we have developed the architecture evaluation system, which consists of two major subsystems; tracer and data analyzer. The tracer subsystem contains both software tracer and realtime hardware tracer. The newly developed hardware tracer can trace up to 1M word of 64 channel data in realtime without disturbing the target system operation. In data analyzer, we have introduced new instruction recording format. This format is designed to express various kinds of computer instruction sets. By using this format, architecture evaluation among various computers becomes available.

1. はじめに

コスト／性能比のよい計算機を作るためには、現在稼働している計算機の動作状況を調べてどの部分が処理のネックになっているのかを定量的に把握すること、ネックを解消するために行う工夫がどの程度の効果を発揮するのかを精度よく見積ることが重要である。また、計算機で動くプログラムがどのような性質を持っているのかを調べ、これに適合するようなハードウェア構成とすることも重要である。

筆者らは、実働している計算機の測定データをもとにして上記の項目を調べるための評価システムを開発して性能評価を行っている。このシステムの特徴は、測定対象計算機の動作を乱すことなく測定を行うためにハードウェア・トレーサを開発した点と、異なる計算機を共通な評価尺度で評価できるように命令トレース・データを記録するフォーマットとして標準形式を設定した点である。

本稿では、この性能評価システムの構成および本評価システムにより得られる評価結果について述べる。

2. 本評価システムの概要

2. 1 ねらい

本評価システムは、汎用大型計算機からマイクロ・プロセッサまで様々な計算機を対象に、計算機の性能に関係する統計データを求めたり計算機内部のキャッシュ・メモリやバイプラインの構成をシミュレーションするなど多岐にわたる評価を行うことを目標に開発した。

ここでの性能評価という意味は、実際に稼働している計算機の性能を測ることだけでなく、計算機のハードウェア構成や制御方法を新しくしたときに性能がどの程度になるのかを見積ることである。性能評価を比較的容易に行うことができれば、様々なハードウェア構成や制御方法を想定して評価を行い、予測性能を比較してみることで現在の計算機をどのような改良すればコスト／性能比のよい計算機を構成できるのかを見極めることができる。

2. 2 評価方法

現時点では実在しない計算機も対象に含めて性能評価を行うわけであるから、計算機の速度を実測するという方法だけでは不十分である。すなわち、何らかの方法で新しい計算機の動作を表現するモデルを作成して評価を行う必要があるといえる。本評価システムにおいては、次に示す2つの方法で計算機をモデル化し、実働している計算機

の動作状況をこれに与えるという方法で評価を行っている。

- 1) 計算機内部の論理的な動作をシミュレートするプログラムを作成し、実働している計算機の動作系列をこのシミュレータに入力してシミュレーションを行うことにより性能評価を行う。
- 2) 計算機の動作を単純化し、性能を決める要因となるパラメータを用いた評価式を作成する。この式に、実働している計算機の動作から求めたパラメータを代入することで性能評価を行う。

2. 3 トレース・データを用いた評価

2. 2で述べた方法で評価を行うためには、計算機の動作を測定すること、これをもとに性能要因となるパラメータを求めたりシミュレーションなどの解析を行う必要がある。本評価システムでは、測定を行って計算機の動作を記録したトレース・データを作成し、後でこれを汎用機上に作成した解析システムを用いて解析を行うという方法をとっている。この方法には次の利点がある。

- 1) 全く同じ状況について、計算機の動作条件を変化させて評価ができる。(再現性)
- 2) 解析システムは汎用機上に高級言語を用いて作成するので、容易に評価項目を設定できる。(汎用性)

これらの特徴は、様々なハードウェア構成や制御方式を比較することを目的とした評価には好都合である。さらに、計算機の測定を行う際、トレース・データとして採取すべき項目を標準形式として統一することで解析システムの共用ができることから、異なる計算機を同じ項目で評価して比較することも容易である。

3. 評価システム

3. 1 システムの全体像

トレース・データを使用して計算機の性能評価を行うためには、次の2つの作業を行う必要がある。

- 1) トレース・データを採取する(トレーサ)
- 2) 採取したデータを使用して、性能に関係する統計をとったり、シミュレーションを行う(解析システム)

本評価システムでは、トレーサとして計算機の実行した命令系列を記録するソフト・ファームウェア方式のトレーサと、計算機の行ったメモリ・アクセス系列を記録するハードウェア・トレーサがある。解析システムとしては、キャッシュ・メモリのヒット率のようにメモリ・アクセス系列をもとにした評価と、命令の出現頻度のように計算

機の実行した命令系列をもとにした評価を行う解析プログラムを用意している。これらの間の関係を図3. 1に示す。このように本システムは、命令系列からメモリ・アクセス系列を発生させるプログラムやメモリ・アクセス系列から計算機の実行した命令系列を取り出すプログラムを用意して相互のデータ交換を行うことにより、2種類のトレーサを使用して採取したトレース・データを区別することなく解析できるように考慮したトータル・システムである。また、命令トレース・データを記録する形式を測定対象計算機に依存しない標準形式とすることで、異なる計算機の命令トレース・データを同じ解析プログラムを使用して解析できるようにしている。

3. 2 トレーサ

評価対象計算機の動作状況に関する情報を集め（測定）、これを後の解析で使用できる形で記録するのがトレーサである。

トレーサとして重要なこと、測定のためのオーバーヘッドをできるだけ少なくして、測定対象である計算機が実働している状況に近いデータを採取することである。特に、リアルタイム制御システムなどのように計算機の動作が時間的な要素に大きく左右される分野では、測定のためのオーバ

ーヘッドなしにトレース・データを採取すること自体が大きな課題となる。そこで、筆者らは新たにハードウェア・トレーサを開発して測定に使用している。

ここでは、本評価システムで使用しているトレーサについて説明する。

3.2.1 ソフト・ファームウェアによるトレーサ

このトレーサは、計算機のソフトウェアやファームウェアに手をいれて、命令の実行に関する情報を出力するためのルーチンを埋め込んだものである。この方法では、測定対象の計算機が機械語命令を1つ実行する毎にプログラム実行を中断してデータを出力するためのルーチンを実行するため、実際に計算機が動作しているときに比べて数100~1000倍以上のオーバーヘッドが加わる点が問題となる。この反面、この方法では、3.2.2で示すハードウェア・トレーサによる方法に比べると、トレーサ作成が容易である。また、トレーサ内に簡単な評価プログラムを組み込む等の改造も容易である。

本評価システムでは、ACOS S450のファームウェアにトレーサを組み込んだマシンでプログラムを実行させて採取したトレース・データや、unixのシステム・コール(ptrace)

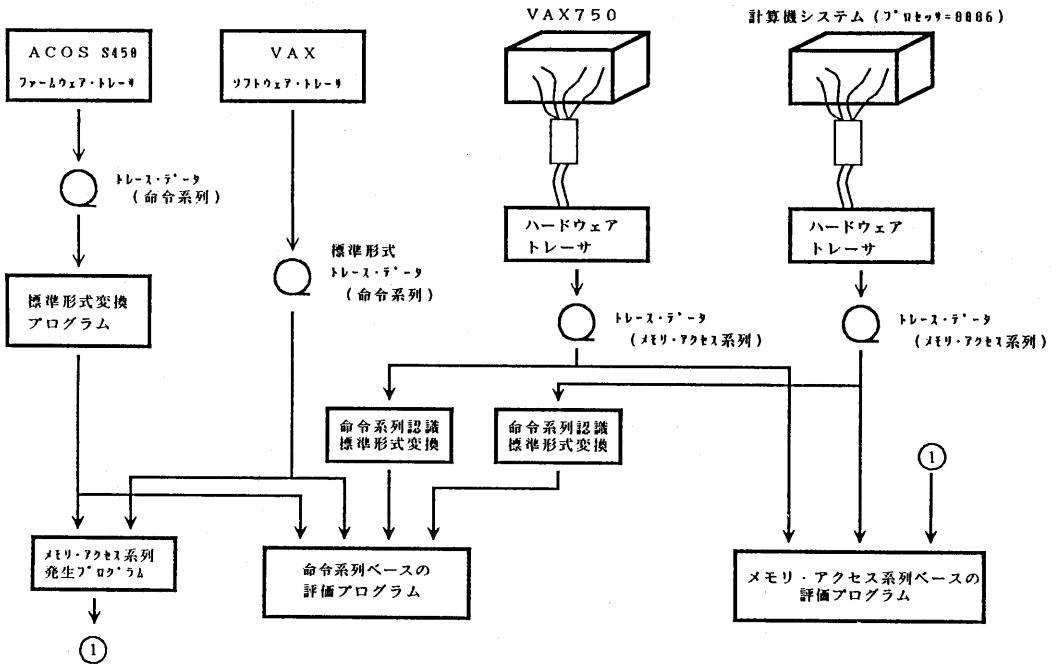


図3. 1 システム全体像

を用いたVAX用ソフトウェア・トレーサにより採取したトレース・データを使用して評価を行っている。

3.2.2 ハードウェア・トレーサ

ハードウェア・トレーサは、外部から計算機のバス状態を実時間で採取することを目的として開発したもので、データ取り込みクロックに従って一度に64ビット幅のデータを100万(1M)トレース分の採取できる。このデータ取り込みクロックは、通常、測定対象計算機内部のストロブ信号を使用する。

トレース量は評価精度を左右する重要な量であり評価する項目によって検討する必要があるが、本トレーサの1Mトレースという量は主に実装上の制限やトレース・データを処理する上での扱い易さから決定した。これだけのトレース量を採取できれば、かなりの項目についての評価が可能であると考えている。この装置の諸元を表3.1に示す。

項目	内容
チャンネル数	64 (32+32) ch
ロジック・レベル	TTL/ECL
メモリ	1M (2 ²⁰) ビット / ch
データ取り込みクロック	64ch同一クロックまたは32ch毎の2相クロック
分解能/サンプリング速度	56 ns / 18MHz
セットアップ/ホールド時間	29 ns / 0 ns
トレース終了条件	トリガ発生またはマニュアル

表3.1 ハードウェア・トレーサ諸元

また、本装置が測定対象としているのはバスに限らず、入出力装置の状態など測定用プローブが接続できる部分であればデータ採取可能であり、実際に本装置を利用してディスクのアクセス特性を解析することも行っている。

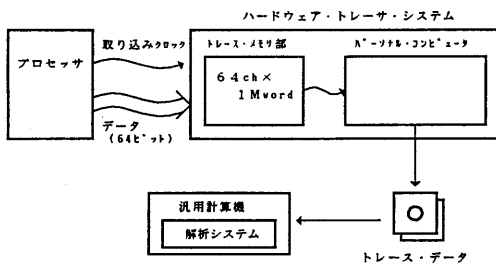


図3.2 ハードウェア・トレーサ・システム構成

ハードウェア・トレーサの構成を図3.2に示す。この装置は、トレース・メモリ部とパーソナル・コンピュータとから構成されている。トレース・メモリ部は既存のロジック・アナライザを改造して実現している。このため、プローブはロジック・アナライザの物をそのまま用いている。測定対象の計算機からのデータは一旦トレース・メモリ内に蓄積され、その後パーソナル・コンピュータによりフロッピー・ディスクに書き込まれる。

3.2.3 ハードウェア・トレーサによるトレース手法の特徴

既に述べたようにリアルタイム制御システム等計算機の動作が時間的な要因に大きく左右されるシステムを対象としてトレース・データによる評価を行う場合は、測定対象となる計算機に余分な負荷がかからないハードウェア・トレーサによる手法が必須となる。しかしながらどのようなシステム、評価項目に対してもハードウェア・トレーサによる手法を用いればよいかといえは必ずしもそうではなく、以下に示すハードウェア・トレーサの特徴を考慮して、ソフト・ファームウェア方式のトレーサと使い分ける必要があるといえる。

ハードウェア・トレーサの長所

- ①実時間でのトレースデータ採取が可能
- ②ソフトウェアからアクセスができない/難しいポイント(ハードウェア情報、物理アドレス)でのデータ獲得が容易。
- ③システム全体としてのトレースデータが容易に得られる。つまりマルチプロセス環境でのデータ採取ができる。
- ④測定端子が接続できればどのようなシステムのデータ採取も可能である。ソフトウェアトレースでは対象システム毎にトレースソフトウェアを開発する必要がある。
- ⑤測定対象計算機の動作を乱すことがないため、時間的な要因も測定することができる。すなわち、時間的な情報もトレース・データの中にも含めることができる。

ハードウェア・トレーサの短所

- ①一度に採取できるトレース量が制限される。
- ②測定端子が接続できないようなポイント(LSI内部、例えばレジスタ値、論理アドレスデータ)のデータ採取が困難である。
- ③タスク切り替えのようなソフトウェアイベントの検出が難しい。
- ④プロセッサバス上のデータから実行命令列に関する評価を行う場合プリフェッチにより生ずるバス上のデータの乱れを補正する必要がある。

これらの点を考慮すると、ハードウェア・トレース手法を用いた方が良いといえるのは、次の場合であるといえる。

- ①性能評価をシステム全体でとらえる必要がある
- ②プロセス間の関係が実時間でトレースしないとくずれてしまうもの(リアルタイムシステム)
- ③時間的な要素を考慮した評価を行う
- ④バストラフィック、I/Oアクセス頻度など直接にはソフトウェアから参照できない項目について評価を行う

3.3 解析システム

3.3.1 標準形式による命令トレース・データの記録

本解析システムの特徴は、異なる計算機を共通の評価項目で評価するため、命令トレース・データを記録する形式として標準形式を定めたことである。このことにより、解析プログラムの共用も可能になった。

種々の計算機を対象とする標準形式は、計算機に依存しない形式にする必要がある。また、様々な項目について評価を行なうためには、できるだけ多くの情報を記録しておく必要がある。これらの点を考慮し、1機械語命令あたり68バイトの標準記録形式を設定し、以下の情報を記録した。

標準形式でない形で記録された命令トレース・データも標準形式のデータに変換するプログラムを作成することにより、本解析システムを用いた評価を行うことができる。

命令コード、オペランド数、命令長、演算の種類、プログラム・カウンタの値、

第1～3オペランドについて

アクセスの種類(リード、ライト等)、

データの型、データ長、

アドレッシング・モード、

ベースレジスタやインデックスレジスタの番号、

ディスプレイメント・フィールド長、

ディスプレイメント値、

データの実効アドレス

(間接アドレッシング・モードの場合)

ポインタの実効アドレス

(ストリング・データの場合)

文字列長、これを指定するデータのアドレッシング・モード

(ビット・ストリング・データの場合)

ビット・オフセット値、これを指定するデータのアドレッシング・モード

3.2.2 命令系列認識プログラム

ハードウェア・トレーサにより採取したデータは、計算機を行うメモリ・アクセスの系列であるため、命令系列を基にした評価を行おうとすれば、メモリ・アクセス系列を命令系列に変換することが必要である。このような処理を行うためには、各々のメモリ・アクセスについて次に示す情報を付与してトレースを行えばよい。

- ・命令アクセスまたはオペランドアクセスの区別
- ・リードまたはライトの区別
- ・分岐命令により分岐した直後の命令アクセスであるかどうか

- ・機械語命令の機能によるアクセスかファームウェアによるアクセスなのかの区別

以上に示した情報が総て得られない場合は、ある程度の推測を行って足りない情報を補う処理も必要となる。このような操作を行うのが命令系列認識標準形式変換プログラムであり、トレーサで採取したメモリ・アクセス系列を入力とし標準形式の命令トレース・データを出力する。このプログラムでは、次に示す操作を行っている。

- ・プリフェッチを考慮し、フェッチされた命令が実行されたかどうかを判断する。
- ・オペランド・アクセスと機械語命令との対応をとる。
- ・割り込みを認識する。
- ・アドレス変換テーブル・ミスによるページ・テーブルのアクセスを認識する。(仮想記憶の場合) このプログラムは測定対象計算機毎に作成する必要がある。

3.3.3 メモリ・アクセス系列を基にした評価

表3.2に示す様なアドレス系列を基にした評価を行うことで、プログラムにおけるメモリ・アクセスの動特性や計算機の記憶管理機構の動作を調べることができる。この評価は、プロセッサの種類に関係なく行うことができる。

キャッシュの評価	キャッシュのブロック・サイズ、容量、マッピング方式や制御方式を変えたときにヒット率やメモリ・アクセスがどの様になるのかを調べる。
TLBのヒット率	TLBのエントリ数やリプレースメント方式を変えたときにヒット率がどの様になるのかを調べる。
メモリアクセス特性	メモリの各部分に対して行われたアクセス回数を調べる。
ワーキングセット特性	プログラムが、ある一定時間内に参照されるメモリ量(ワーキング・セット)を調べる。

表3.2 メモリ・アクセス系列を基にした評価

3.3.4 命令実行系列を基にした評価

表3.3に示す様な命令系列をもとにした評価を行うことにより、プログラムで使用しているデータの参照関係などプログラムの動特性を調べることができる。これらの評価プログラムは、前に述べたように、標準形式の命令トレース・データを入力として与えることになっている。

3.3.5 時間的な要素を考慮した評価

ハードウェア・トレーサを使用した測定では、時間に関する情報もトレース・データの一部として採取することができる。このデータを利用して表3.4に示す様な時間的な要素を考慮した評価を行うことができる。

4. 測定および解析結果の例

ここでは、リアルタイム制御システムのハードウェア・トレーサによる測定、および、得られたトレース・データの解析結果の一例を示し、本システムを用いた評価の概要を説明する。本システムを用いて得られた結果についての解析は、別の機会に報告することにする。

4.1 測定

測定は、図4.1に示すようにして行った。ハードウェア・トレーサは3.2で述べたように、データを取り込むタイミングを示すクロックも測定対象の計算機から得る。ここで行った8086の測定では、64チャンネルを32+32チャンネルのモードで使用し、データ取り込みクロックとして2つのストロブ信号を与えた。1つはアドレ

スをラッチするためのALE信号、もう1つはデータが確定したことを示すRDY信号である。

ここで特徴的なのは、時間的な要素も考慮した評価を行うために、メモリ・アクセスの間隔を調べるカウンタを測定対象計算機に接続して、アクセス間隔の値もトレース・データの一部として採取したことである。

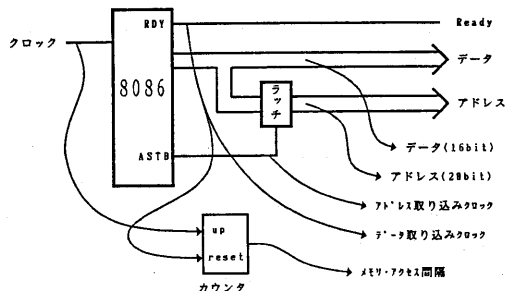


図4.1 8086の測定

図4.2に、この測定で採取したデータの一部を示す。前に述べたように、1回の測定で100万回のメモリ・アクセスを採取できる。この量は8086では、数秒間の動作に相当する。

4.2 命令系列の取り出し

図4.2に示したデータを、8086用命令系列認識プログラムにより、計算機が実行した命令系列を調べ、標準形式の命令トレース・データに変換する。このプログラムにより取り出された命令系列を図4.3に示す。図中、*の付与された

命令の出現頻度	命令コード毎にそれが何回使用されたのかを調べる。
ブランチ特性	ブランチ命令について、ディスプレースメントの分布、条件付きブランチ命令については条件の成立する頻度を調べる。
ディスプレースメント	オペランドのアドレスを計算する際に、ベース・レジスタの値に加えるディスプレースメント値の分布を調べる。
アドレッシングモード	オペランドの位置を示すためのアドレッシングモードについて、その使用頻度を調べる。
ランレングス	ブランチ、コール、リターン命令により、命令の実行位置を移す操作が行われる間隔の分布を調べる。
命令長	機械語命令について、長さの分布を調べる。
ハザード	パイプライン計算機の速度ネックとなるレジスタハザード、メモリハザードの発生頻度を調べる。
ルーチン走行順序 走行回数	アドレスの判明しているプロシージャ、サブルーチンについてプロセッサがこれらのルーチンを実行した順序、回数や各ルーチンの実行順序を調べる。

表3.3 命令系列を基にした評価

キャッシュの実効アクセス時間	ミス・ヒット発生後のメモリ・アクセスの影響を考慮してキャッシュ・メモリの実効アクセス時間を求める。
実効MIPS値	実行した命令数をメモリ・アクセス間隔の累計で割ることにより、実効MIPS値を計算する。
ルーチン走行時間	各プロシージャについて、1回当たりの実行時間を調べる。

表3.4 時間的な要素を考慮した評価

no.	access	segment	address	data	counter
	(F W)				
00000	0 1	2	0000c014	5352	06
00001	0 1	2	0000c016	8050	02
00002	0 1	2	0000c018	03e6	02
00003	1 0	1	000700f6	0108	05
00004	0 1	2	0000c01a	e6ea	04
00005	1 0	1	000700f4	0108	05
00006	1 0	1	000700f2	0000	0b
00007	0 1	2	0000c01c	0081	04
00008	0 1	2	0000c01e	9000	02
00009	0 1	2	0000c020	db03	02
0000a	0 1	2	000081e6	fe80	06
0000b	0 1	2	000081e8	7400	02

図 4. 2 採取したデータの一部

データは機械語命令でアクセスされたオペランドである。

no.	address	inst. code	*access data
00	(c014)	52	*108
01	(c015)	53	*108
02	(c016)	50	*0
03	(c017)	80 e6 3	
04	(c01a)	ea e6 81 0 0	
05	(81e6)	80 fe 0	
06	(81e9)	74 8	
07	(81eb)	8a c2	
08	(81ed)	24 f8	
09	(81ef)	3c c0	
0a	(81f1)	73 21	
0b	(81f3)	8a de	
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

execute instruction number = 504398
total clock = 6350569

図 4. 3 命令系列認識プログラムの実行結果

4. 3 評価結果の例

メモリ・アクセス系列や命令系列を解析システムに入力して、計算機の動作特性の解析やシミュレーションを行う。ここでは、4.1と4.2で示した方法により得られた8086のトレース・データを本解析システムにより評価した結果の例を示す。

4.3.1 メモリ・アクセス系列をもとにした評価

メモリ・アクセス系列をもとにした評価の例として、シミュレーションによりキャッシュ・メモリの評価を行った結果を図4. 4に示す。この図は、キャッシュの容量とミス・ヒット率の関係をブロック・サイズ (bs) をパラメータとして調べたものである。

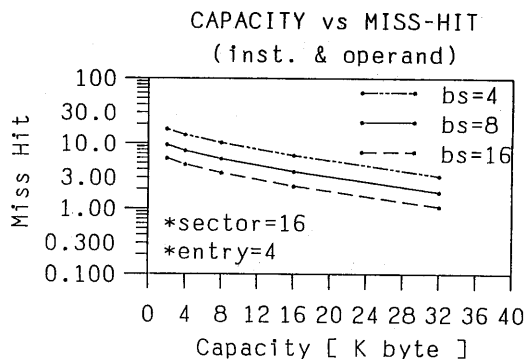


図 4. 4 キャッシュ・メモリのミス率

4.3.2 命令系列をもとにした評価

命令系列をもとにした評価の例として、命令頻度を求めた結果を図4. 5に示す。これは、図4. 3に示した8086の命令系列から命令コード別に出現頻度を調べ、モニターも付けて表示したものである。countは出現回数、pct.は全命令数に対する出現頻度、total pct.は、出現頻度の高い順に並べて、頻度を累計したものである。

no.	mnemonic	count	pct.	total pct.
1	JNE/JNZ (75)	41742	8.28 %	8.28 %
2	IN (EC)	23611	4.68 %	12.96 %
3	JE/JZ (74)	22236	4.41 %	17.37 %
4	MOV (8B)	20380	4.04 %	21.41 %
5	LOOP (E2)	18933	3.75 %	25.16 %
6	MOV (8A)	17642	3.50 %	28.66 %
7	TEST (A8)	17193	3.41 %	32.07 %
8	MOV (8E)	15840	3.14 %	35.21 %
9	SHL (D1)	10726	2.13 %	37.33 %
10	NOP (90)	9783	1.94 %	39.27 %
11	AND (24)	9336	1.85 %	41.12 %
12	AND (80)	8788	1.74 %	42.86 %
.
.
.
total		504398		100.00 %

図 4. 5 命令の出現頻度

4.3.3 時間の要素を考慮した評価

時間の要素を考慮した評価の例として、実効MIPS値の計算を以下に示す。命令認識プログラムの実行結果(図4. 3)から、以下のことがわかる。

- 1)ハードウェア・トレーサによりデータ採取を行っている間に8086は504398命令を実行している。
- 2)メモリ・アクセス間隔を積算していくことにより、トレース・データを採取した時間を求める

と6350569クロックである。

ここで測定した計算機の動作クロックは4MHzであることから、この計算機は0.32MIPSで動作していたことがわかる。

5. おわりに

ハードウェア・トレーサを開発したことで、リアルタイム制御システムに対してもトレース・データを用いた評価ができるようになった。今後、本評価システムで評価対象とする計算機の種類や解析項目を増やすとともに、ハードウェア・トレーサを活用して、入出力装置の動作やOSの動作特性の解析も行っていく予定である。

参考文献

- 1)堀川、大野：“命令トレーサの一方式”、
情報処理学会第31回全国大会、6C-4
昭和60年9月。
- 2)大鷹、大野：“実時間・大容量トレーサを可能とするハードウェア・モニタの開発”、
情報処理学会第32回全国大会、4Q-4
昭和61年3月。