

FORTRANプログラムから見たアレイプロセッサの性能評価

唐木幸比古、木村友則 (東京大学大型計算機センター)

FORTRANプログラムによるアレイプロセッサの性能評価システムを試作し、東大センターのHITAC M-200H IAPシステムについて実験した結果について紹介する。四則算、数値格納、内積等のFORTRAN基本素子については、ベクトル/スカラー処理速度の逆転する交差ループ長は、単独素子の場合6~9、複合素子の場合9~18程度であった。又、演算速度比は、単独素子の場合1~8倍、複合素子の場合1~6倍となっており、多項演算の場合は、項数が増すと共に速度比は減少し、限界比率は1~2.5(ループ長100で約1.5倍)であった。線型計算プログラムでは、300元の連立一次方程式で1~4.8倍、200元の固有値計算で1~2.9倍の高速化を得た例が知られているが、我々が測定したQ法による実非対称行列の固有値計算では、1~1.9倍(30元~200元)の高速化が観測された。

ループ長25万の場合の演算速度は、ベクトル乗算65 nsec、ベクトル内積算85 nsec、定数の代入43 nsecである。

1. はじめに

東京大学大型計算機センターでは、学術研究上の多様化する諸計算の需要増に備え、この1月よりHITAC M-200H 8台(2台1組)の疎結合システムを導入した。また、昨今の科学技術計算の巨大化・精密化の需要に応じ、その基礎となる線型方程式や固有値計算など、CPU占有率の大きな線型計算、統計計算、シミュレーション等の処理能率の向上を計るために、IAP(Integrated Array Processor; 内蔵アレイプロセッサ)付6台、主メモリ合計64 MB、二次メモリ合計37 GB(及びMSS 35 GB)を用意した。

アレイプロセッサに対する科学技術計算ユーザの関心は日毎に高まっている。米国NASAやリバモア研究所、欧州の原子力研究所等をはじめ、わが国の大学・諸研究機関でも、その動向には多大の注意が払われはじめている。

CRAY-1, CDC Cyberシリーズらと並んで、HITAC M-200H IAPも、ベクトル処理による演算能力の向上で、従来のスカラー処理アルゴリズムの最適化の限界を飛躍的に突破する兆しを見せている。

ここでは、東大センターに設置されたHITAC M-200H IAPについて、その概要と、FORTRANプログラムによる性能評価結果を紹介し、アレイプロセッサの諸特徴や問題点を採ることにする。

2. は、M-200H IAPの機構と特徴、 3. は性能評価法の概要、 4. は実験結果の詳細、 5. はまとめと問題点の整理を行なっている。

参考文献は終りにまとめて掲げてある。

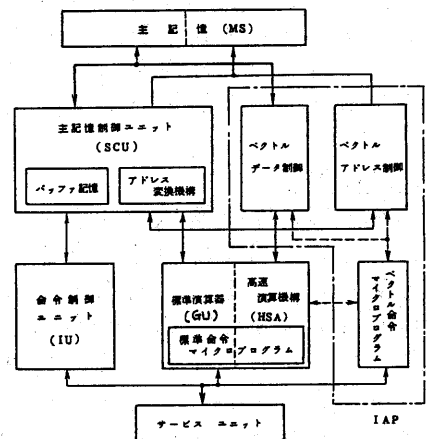
2. HITAC M-200H のIAP機構

2.1 特徴

HITAC M-200H IAPは、次のようなアレイプロセッサの特徴を有する。

- パイプライン制御によるベクトル処理システムである。
- 演算装置に内蔵された構造をもち、主記憶を16ウェイにインタリーブする。
- 28種の専用ベクトル命令を有する。
- 専用FORTRANコンパイラ(ANS 77及びANS 66レベル)が、IAPオブジェクトコードを生成する。従って、ユーザはプログラム上でIAPを意識しなくとも、オプション選択だけでベクトル演算化させることができる。

図2.1に、IAPを内蔵した演算処理装置(BPU)の構成図を掲げる。一長破線内がIAP付加機構である。ベクトルアドレス制御は、配列要素のアドレスを計算して主記憶から要素を先行読出しし、要素数をカウントし、演算回数を制御する。ベクトルデータ制御は、読出しや書き込みバッファレジスタを制御する。ベクトル命令用マイクロプログラムはGUとHSAとを並列に動作させてベクトル演算を行う。



2.2 ベクトル命令の概要

IAPベクトル命令は28種あり、加減乗除、総和、積和、内積、反復、符号反転、数値格納の各単/倍精度(32/64ビット)の浮動小数演算及び精度変換の各命令に分類される。表2.1にその一覧を掲げる。

スカラー命令(通常命令)の場合は、性質の等しい複数の配列データに同一の演算を施すのに、数命令で1データづつ必要な回数だけ処理を繰返す。それに対し、ベクトル命令では、同じ処理を単一の命令で行うので、標準の演算器と高速演算機構を同時に(並列)に動作させて、加算と乗算が並行処理できる。また、繰返し処理は、マイクロプログラムで演算と並行して行われるので、

図2.1 IAPを内蔵したBPUの構成

表2.1 ベクトル命令一覧

項番	命令名称	短精度		長精度		ベクトル/スカラー			動作概要
		二重精度	単精度	二重精度	単精度	1	2	3	
1	First Order Iteration	VITRE	C8	VITRD	D8	V	V/S	V/S	$Z_i \leftarrow X_i + Y_i \cdot Z_i$
2	Scalar Multiply and Add	VSMAR	CA	VSMAD	DA	V	S	V/S	$Z_i \leftarrow Z_i + X \cdot Y_i$
3	Scalar Multiply and Subtract	VSMSE	CB	VMSMD	DB	V	S	V/S	$Z_i \leftarrow Z_i - X \cdot Y_i$
4	Vector Element Sum	VSMSE	02	VSMCD	12	S	V/S	-	$FPR \leftarrow FPR + \sum X_i$
5	Vector Element Sum with Complement	VSMCE	03	VSMCD	13	S	V/S	-	$FPR \leftarrow FPR - \sum X_i$
6	Vector Elementwise Add	VEAE	C0	VEAD	D0	V	V/S	V/S	$Z_i \leftarrow X_i + Y_i$
7	Vector Elementwise Complement	VECE	81	VECD	91	V	V/S	-	$Z_i \leftarrow -X_i$
8	Vector Elementwise Divide	VEDE	C3	VEDD	D3	V	V/S	V/S	$Z_i \leftarrow X_i / Y_i$
9	Vector Elementwise Multiply	VEME	C2	VEMD	D2	V	V/S	V/S	$Z_i \leftarrow X_i \cdot Y_i$
10	Vector Elementwise Subtract	VESE	C1	VESD	D1	V	V/S	V/S	$Z_i \leftarrow X_i - Y_i$
11	Vector Inner Product	VIPE	40	VIPD	50	S	V/S	V/S	$FPR \leftarrow FPR + \sum X_i \cdot Y_i$
12	Vector Inner Product with Complement	VIPCE	41	VIPCD	51	S	V/S	V/S	$FPR \leftarrow FPR - \sum X_i \cdot Y_i$
13	Vector Move	VME	80	VMD	90	V	V/S	-	$Z_i \leftarrow X_i$
14	Convert Floating Double to Single	VCVDE	88	-	-	V	V/S	-	$Z_i (\text{短}) \leftarrow X_i (\text{長})$
15	Convert Floating Single to Double	-	-	VCVED	98	V	V/S	-	$Z_i (\text{長}) \leftarrow X_i (\text{短})$

スカラー命令の場合の分岐処理の時間が省略できる。

図2.2に、内積計算の場合のスカラー命令及びベクトル命令の処理の比較を紹介する。

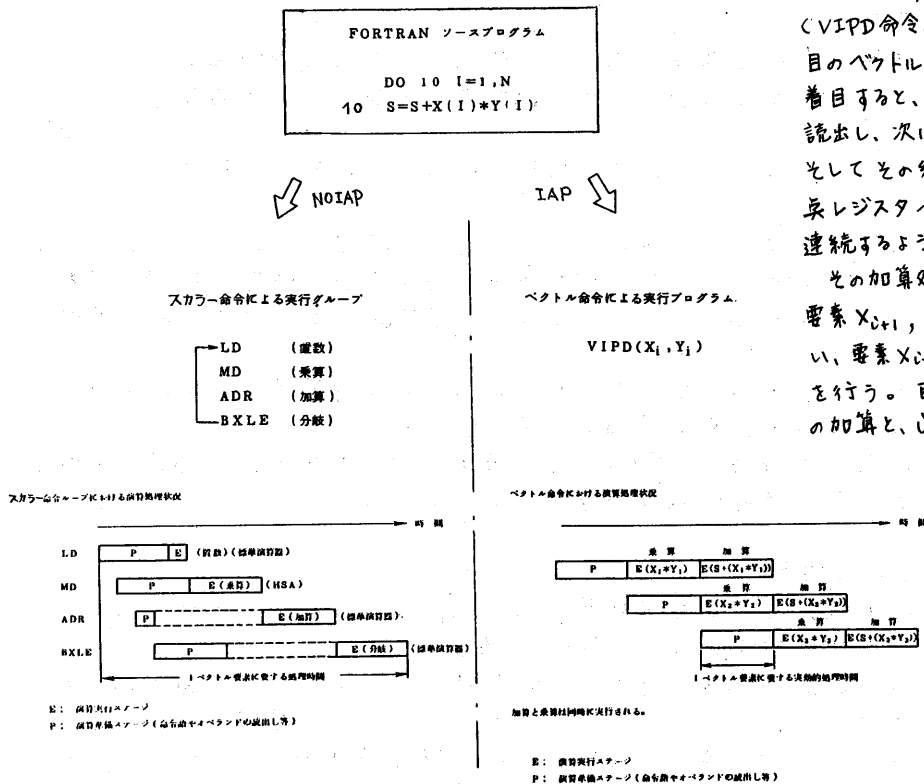


図2.2 内積計算におけるスカラー処理とベクトル処理の比較

内積計算のベクトル処理 (VIPD命令の実行) は、i番目のベクトル要素 X_i, Y_iに着目すると、まずオペランドの読出し、次に X_i と Y_i の乗算、そしてその結果の浮動小数点レジスタへの加算処理が連続するような流れとなる。

その加算処理と並行して、要素 X_{i+1}, Y_{i+1} の乗算を行い、要素 X_{i+2}, Y_{i+2} の読出しを行う。即ち、i番目の要素の加算と、i+1番目の要素の乗算と、i+2番目の要素の読出しを同時に並列に行う。

このように、IAPでは、演算処理動作を分解し、オペランド読出し、乗(除)算、加(減)算、オペランド書込み

などを並列処理することにより、通常のスカラー処理に比べ高速の演算が可能となる。

2.3 IAP適用条件

FORTRANプログラムの中には、IAP適用可能部分と適用不可能部分があり、以下のIAP適用条件(要旨)によって分類される。³⁻⁴⁾

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> ① 最内側のDOループであること。 ② DOループ内には、算術代入文、CONTINUE文など、制御フローをしるめ文だけを含むこと。 ③ 実数型(4又は8バイト)の演算。(添字式は整数型でかまわない) ④ 入出力文、ユーザ定義関数を含めぬこと。 | <ol style="list-style-type: none"> ⑤ SIN, COS, ALOG, ALOG10, EXP, SQRTの単又は倍精度関数及びSINGL, DBLE以外の組み込み関数を含めぬこと。 ⑥ データの定義と参照の関係が、IAP適用化によって矛盾しないこと。 ⑦ 添字式は単純(平行移動程度)であること。 |
|--|---|

3. FORTRANプログラムによる性能評価法

3.1 概要

FORTRANプログラムによるアレイプロセッサの性能評価法には、主に次の3つの方法がある。

- 1) 基本演算の性能を個々に調査し、分析すること（分析法）。
- 2) 典型的なプログラム群により、総合的なベンチマーク検査すること（総合法）。
- 3) アルゴリズム比較法により、分析・調査すること（比較法）。

我々は、主に1)の方法による検定を試みた。この方法によれば、アレイプロセッサの限界性能に接近することが比較的容易であるため、機能の特徴の全般を認識し、その利点と欠点を把握し、プログラミング技術に対して合理的な為照データを提供することができた。

2)については、米国エネルギー省のリバモアループなどがその一例であり、異なる機種間の性能比較の目安を得るのに通している。

3)の方法は、発見的な様相を帯びるので、現実のプログラミング課題と密着して、アレイプロセッサの特殊性能を探るのに向いている。

3.2 分析法による実験

我々は、FORTRANの基本演算素子の各性能及びその組合せによる各素子間の相関効果と多重相関効果について分析・調査した⁵⁾。

実験はいずれもVOS3最適化FORTRAN77コンパイラの最上位の最適化レベル(OPT(3))において行い、コンパイラオプション選択で、スカラー(NOIAP)及びベクトル処理(IAP)の各CPU時間を測定比較することにより、IAP効果を調べている。また、自動倍精度化オプションを用いて単精度及び倍精度演算の比較測定も行い、そのほかパイプライン促進オプションの効果も調べている。

実験は予備と本番の2段階に分けて行った。予備実験では、四則演算、総和、内積、積和、IF文、組込み関数ほか多くのFORTRAN素子についてIAP/NOIAPの粗い速度比較を行い、現IAP機能の適合不適合性を分類した。本実験では、IAP効果があり、かつ、FORTRANプログラムを構築する基本素子と思われるものを厳選し、各素子についてIAP効果を詳細に調査した。

対象となったFORTRAN素子は8種類であり、表3.1に掲げてある。実験では、これらの素子及び複合素子をDOループ中に置き、ループ長さ5～25万の部分列について、(主に多重処理系に起因する)測定の揺らぎを取除くために、同一計算を100回反復して行い、各CPU時間の最小観測値及び平均値を求めている。

多重相関効果については、1～8項の多項式等について、ループ長さ5～5000の範囲で調べた。

なお、②R法固有値計算も分析的に調べている。

表3.1 実験FORTRAN素子

略号	FORTRAN素子
dummy	CONTINUEのみ(実は注釈行)
c	$C(I) = 1.52E\ 0$
a_i	$C(I) = A(I)$
$a_i + b_i$	$C(I) = A(I) + B(I)$
$a_i * b_i$	$C(I) = A(I) * B(I)$
a_i / b_i	$C(I) = A(I) / B(I)$
$\sum a_i$	$S = S + A(I)$
$\sum a_i * b_i$	$S = S + A(I) * B(I)$

4. 測定結果の詳細

4.1 単独素子のIAP効果

4.1及び4.2で述べる実験は、1月10～12日(及び21日)に全て行ったものであり、東大センターの4T&MP(1T&MP=2CPU)によるL&MP(疎結合系)での測定結果である。

我々はまず、単独のFORTRAN素子を、図4.0のようなDOループの中に置き、ループ長(N)を変えて、IAP/NOIAPでの各CPU時間を測定し、処理速度が逆転する交叉ループ長さ、IAPによる高速化の比率などを調べている。

```
CALL CLOCK
DO 10 I = 1, N
  FORTRAN素子
10 CONTINUE
CALL CLOCK(TIME)
```

図4.0 実験ループ(1)

なお、ループ長が5～1000 程の場合は、演算時間が時間測定ループ長の分解能(2×10^{-4} sec)以下になることがあるので、ループ長に応じた繰返し演算を行って増幅し、時間測定後にオーバーヘッドや増幅分を回復させて、分解能以下の測定も可能にした。

図4.1は加算($a_i + b_i$)におけるベクトル処理とスカラー処理の演算時間の違いを、ループ長を変えて観測したものである。交叉ループ長は6～7である。

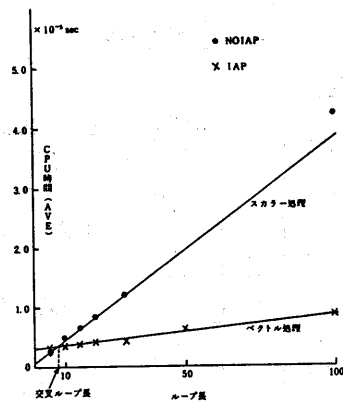


図4.1 加算の速度変化

図4.2は同じ加算における速度比対ループ長の図である。IAPによる高速化率は、ループ長100で約5倍に達している。

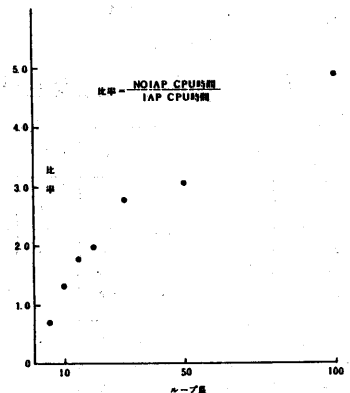


図4.2 加算の速度比変化

他の素子でも傾向は類似している。

表4.1 通常のループ長での演算速度の比較

ケース	N = 20			N = 50			N = 100		
	NOIAP	IAP	比率	NOIAP	IAP	比率	NOIAP	IAP	比率
dummy	254.2	42.1	6.04	210.4	0.0		215.0	0.0	
c	297.5	174.2	1.71	284.6	90.8	3.13	255.4	85.4	2.99
a_i	383.3	180.8	2.12	378.3	87.1	4.34	375.4	82.1	4.57
$a_i + b_i$	421.7	213.8	1.97	391.7	128.3	3.05	425.0	86.7	4.90
$a_i * b_i$	469.6	212.9	2.21	425.0	90.8	3.33	430.4	89.6	4.80
a_i / b_i	1020.4	864.2	1.18	985.4	709.2	1.39	960.8	667.9	1.44
$\sum a_i$	337.1	215.0	1.57	297.1	132.9	2.24	302.1	125.8	2.40
$\sum a_i * b_i$	517.9	230.0	2.25	469.6	132.1	3.56	470.8	127.1	3.70

備考: Nはループ長。NOIAP及びIAPの値は素子1演算当りのCPU時間。比率はCPU時間比(NOIAP値/IAP値)。

表4.1は、通常のループ長(20～100)でのNOIAP/IAP別の演算速度と速度比を観測したものである。

除算を除けば、既にループ長20で約2倍のIAP高速化を得ていることがわかる。

除算は、比率も絶対速度も遅い。

4.2 各素子間のIAP相関効果

IAP効果は、DOLープ内の演算子個数の違いでかなり変化する。ここではまず、2素子間の相関効果について、図4.3のような実験ループで測定した結果を報告する。

測定方法は、4.1の場合と同様である。

図4.4は加算代入
($a_i + b_i$)
 a_i
処理とスカラー処理の演算速度
の違いを、対ループ長に観測
したものである。交叉ループ長は、
単独素子の値より大きい方へ
ずれている。この傾向は
1素子 → 2素子の全てにお
いて類似しているが、2
素子の一方が乗算の場合、
交叉ループ長のずれが小さい
ようである。(表4.2参照)

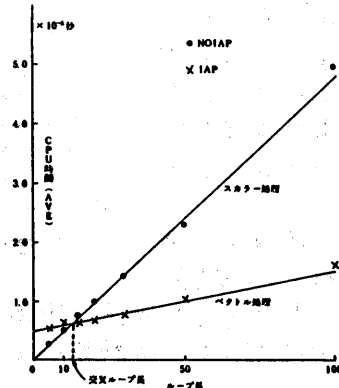


図4.4 加算代入の速度変化

```
CALL CLOCK
DO 10 I=1, N
  第一素子
  第二素子
10 CONTINUE
CALL CLOCK(TIME)
```

図4.3 実験ループ(2)

表4.3はループ長9万での、ベクトル処理
とスカラー処理の速度比の観測値を
2素子の間での相関表にしたものである。
1素子 → 2素子で、速度比は少し落ちる
ことがわかる。

表4.2 交叉ループ長の相関表

AVE		(単精度)						
第二素子 第一素子	dummy	c	a_i	$a_i + b_i$	$a_i * b_i$	a_i / b_i	$\sum a_i$	$\sum a_i * b_i$
dummy	1	9	9	7	7	9	9	6
c	6	18	18	9	9	9	18	8
a_i	6	18	18	13	11	18	14	11
$a_i + b_i$	6	14	13	11	9	14	13	9
$a_i * b_i$	6	9	9	9	9	11	9	13
a_i / b_i	9	14	14	14	11	14	18	11
$\sum a_i$	9	18	14	13	13	14	25	11
$\sum a_i * b_i$	7	14	13	9	11	14	11	9

表4.3 NOIAP/IAPの速度比の相関表(ループ長9万)

AVE		(単精度)						
第二素子 第一素子	dummy	c	a_i	$a_i + b_i$	$a_i * b_i$	a_i / b_i	$\sum a_i$	$\sum a_i * b_i$
dummy	94.00	5.55	5.13	6.40	6.09	1.62	3.81	6.13
c		3.37	3.37	5.51	5.58	1.81	2.83	5.69
a_i			3.93	3.87	4.70	1.01	3.48	4.10
$a_i + b_i$				4.42	4.84	1.68	3.87	4.28
$a_i * b_i$					5.20	1.83	4.26	3.94
a_i / b_i			1.59			1.38	1.60	1.77
$\sum a_i$							2.62	3.49
$\sum a_i * b_i$								4.73

備考 数値は、CPU時間比 (NOIAP 値 / IAP 値)。

4.3 IAP多重相関効果

多重相関を調べるために、我々は、次のような多項演算についてIAP効果を測定した。

① 多項式

```
DO 10 I=1, N
  10 V(I) = A(I) + X*(B(I) + X*(C(I) + ...))
```

② 多重積

```
DO 10 I=1, N
  10 V(I) = A(I) * B(I) * C(I) * ...
```

③ 多項和

```
DO 10 I=1, N
  10 V(I) = A(I) + B(I) + C(I) + ...
```

ループ長は 5 ~ 5000 程度とし、項数 = 1項 ~ 8項について、各ループの演算速度を NOIAP/IAP 別に調査した。

ループ長100の場合の①と②の結果を、図4.5 ~ 4.6 に示す。

また、ベクトル/スカラー処理速度比の、項数による変化を、ループ長100の場合について、図4.7~4.9に示す。

項数を増すと、速度比はある極限值に接近する。それを**限界比率**と呼び、ここでは、8項演算の速度比を、近似的に限界比率とみなして、限界比率のループ長依存性について調べた結果を図示し、図4.10~4.12に掲げる。多項式の限界比率は、ループ長30で1になり、それ以下ではスカラー処理の方が速い。ループ長3000以上では、限界比率が2.5位でほぼ一定になる。

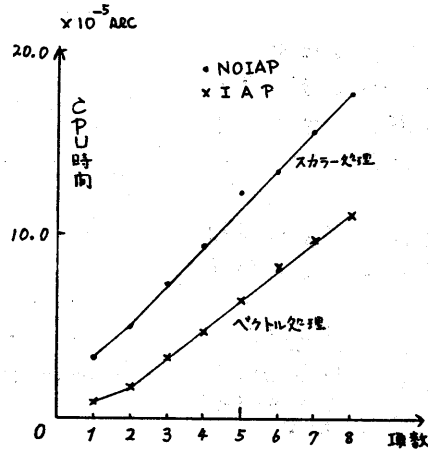


図4.5 多項式の演算速度 (ループ長100)

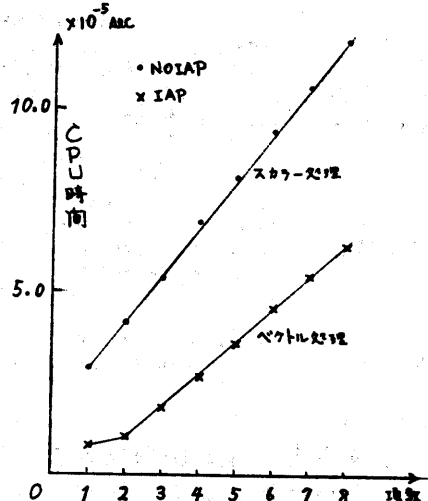


図4.6 多項式の演算速度 (ループ長100)

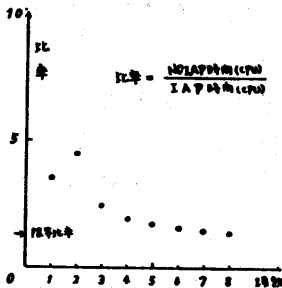


図4.9 多項式の速度比 (ループ長100)

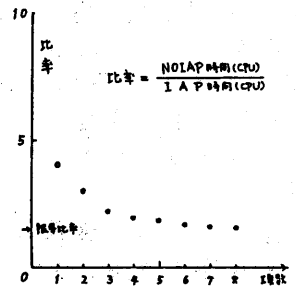


図4.7 多項式の速度比 (ループ長100)

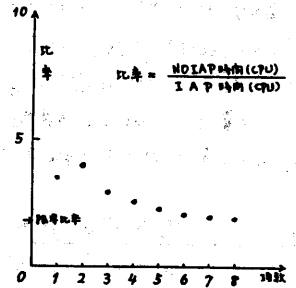


図4.8 多項式の速度比 (ループ長100)

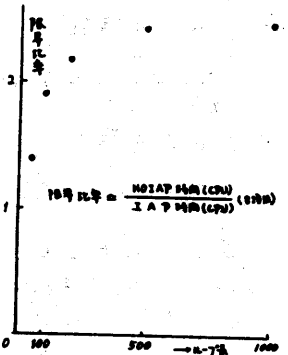


図4.11 多項式の限界比率

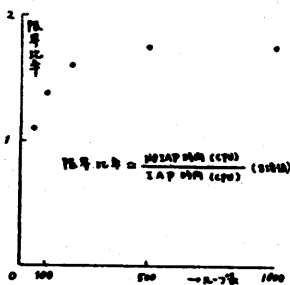


図4.12 多項式の限界比率

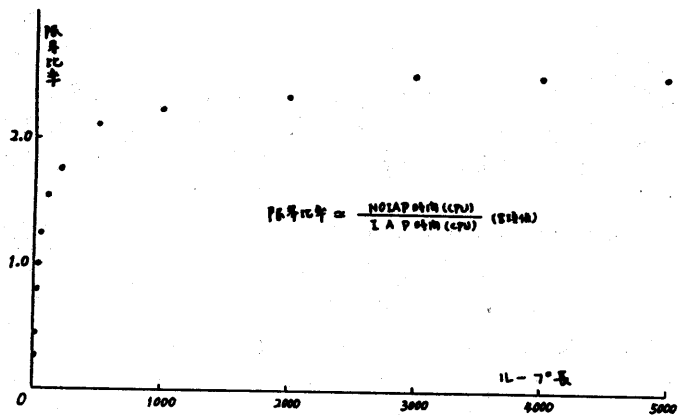


図4.10 多項式の限界比率

4.4 総合IAP効果

我々は、総合IAP効果を見るために、10～200元の実非対称行列の固有値計算のIAP効果を測定した。使用したプログラムはQR法のライブラリ γ DEFIMである。

図4.13に、速度比率対ループ長(次元数)の変化図を示す。30元を超えるとIAP効果が見られるようになる。

200元で約1.91倍である。

M-200H IAPに関する他の報告で、固有値計算2.91倍(べき乗法、200元)、線型方程式4.81倍(ガウス・ジョルダン法、300元)等の総合IAP効果が観測された例も知られている。

図4.13

固有値計算
でのIAP総合
効果

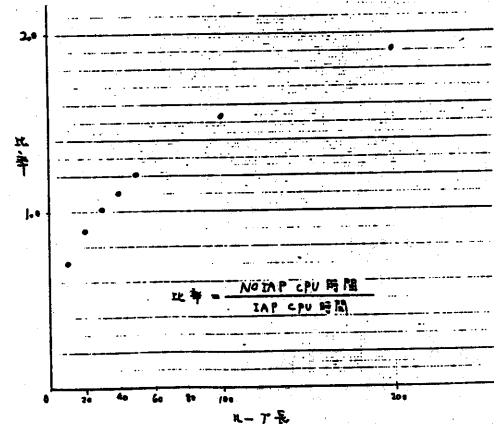


表4.4 FORTRAN素子の最高速度(ループ長250000)

4.5 IAPの極限速度

ループ長25万における、スカラー及びベクトル処理速度の測定値を表4.4に紹介する。

ベクトル内積算で

$$\frac{2 \times 10^{-6}}{85 \times 10^{-9}} = 23.53 \text{ MFLOPS,}$$

ベクトル乗算で

$$\frac{5 \times 10^{-6}}{65 \times 10^{-9}} = 76.92 \text{ MIPS}$$

が実験での極限速度となっている。

倍精度演算(64ビット)は単精度演算と同傾向のIAP効果及び演算速度を有するが、東大センターでは、窓結合系のメモリ制約で少し性能低下している。

パイプライン促進オプションの効果は、東大センターでは1～3%向上程度である。

單精度		測定CPU時間 / 250000 (單位 10^{-9} 秒 = nsec)				NOIAP / IAP
FORTRAN 素子	命令 數	NOIAP		I A P		比 率
		最 小 值	平 均 值	最 小 值	平 均 值	
dummy	1(0)	211 (0)	211.0	1 (0)	1.0	211.0 (0)
c	3(2)	257 (46)	258.0	43 (42)	44.6	6.0 (1.1)
a _i	4(3)	345 (134)	346.6	64 (63)	65.4	5.4 (2.1)
a _i + b _i	5(4)	456 (245)	458.1	66 (65)	66.2	6.9 (3.8)
a _i * b _i	5(4)	519 (308)	521.0	65 (64)	65.6	8.0 (4.8)
a _i / b _i	5(4)	984 (773)	987.8	601 (600)	601.6	1.6 (1.3)
Σ a _i	3(2)	327 (116)	327.8	85 (84)	85.1	3.8 (1.4)
Σ a _i * b _i	5(4)	527 (316)	529.5	85 (84)	85.1	6.2 (3.8)

備考 最小値及び平均値は、測定100回における値(素子当りの演算時間)。命令数は、コンパイラのCOUNTオプションにより求めたステップ数の値。括弧内はDOループ分岐引きの値。

5. まとめ

IAP効果には、主に次の2つがある。

- ① 演算のベクトル化効果
- ② DO分岐の形態変化の効果

IAP効果の特徴と問題点

- ① 交叉ループ長6～9(単独)、9～18(複合)。
- ② 高速化率1～8(単独)、1～6(複合)。
- ③ 限界比率1～2.5(多項演算の下限值)。
- ④ 総合効果1～4.8(300元)。
- ⑤ 除算が、乗加減算に比べ遅いのが目立つ。
- ⑥ IF文、整数、組込み関数、複雑な添字式不可。

6. 終りに

この実験を行うに際し、石田(東大)、梅谷、高質(日直)、有沢(東大)の各氏より貴重なご助言を戴いたことを感謝致します。

参考文献

- 1) HITAC M-200H 機能説明書(1978.8, 日直)
- 2) HITAC M-180/200H 内蔵アレイプロセッサ(1978.10, 日直)
- 3) 梅谷・高質: ベクトル演算用コンパイラにおける複合命令の運用方式, 情報処理学会第21回全国大会予稿集(1980) p. 221.
- 4) VOS3最適化FORTRAN 77使用の手引(1980.3, 日直)
- 5) 唐木・木村: ベクトル演算高速化率のFORTRANにおける測定, 情報処理学会第22回全国大会予稿集(1981) p. 169.
- 6) 田中・梅谷: 線型計算におけるベクトル演算の適用性検討, 情報処理学会第22回全国大会予稿集(1981) p. 319.