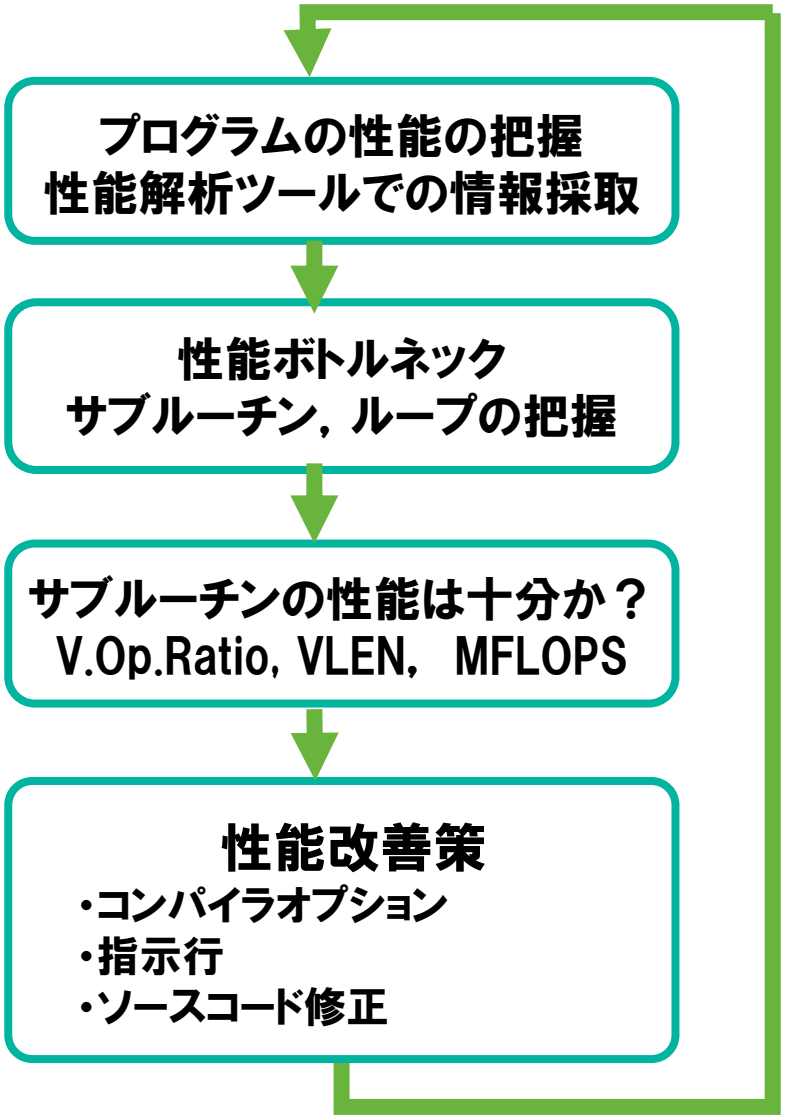
ベクトルプロセッサ 高速化技法の基礎
（演習用資料）

大阪大学サイバーメディアセンター
日本電気株式会社

本資料は，東北大学サイバーサイエンスセンターとNECの共同により作成され，大阪大学サイバーメディアセンターの環境で実行確認を行い，修正を加えたものです．

プログラム最適化の流れ



指示行とは．．．

コンパイラは，最適化を行う上でソースコード上からは判断できない条件があった場合，最適化を抑止します．ユーザーが明示的に指示行で条件を与えてあげることにより，最適化を促進させることが可能になります

行列積のプログラムを使った課題

1. オリジナルコードのコンパイルと実行
2. 性能解析（Ftraceの利用）
3. アンローリング（コンパイラ指示行による最適化）
4. 行列積ライブラリ（コンパイラによる最適化）
5. 自動インライン展開（コンパイラオプションによる最適化）

演習問題の構成

ディレクトリ構成

```
vector/
|-- practice_1    オリジナルコード実行環境
|-- practice_2    性能解析(Ftrace)演習問題
|-- practice_3    コンパイラ指示行演習問題
|-- practice_4    行列積ライブラリ置換演習問題
`-- practice_5    自動インライン展開演習問題
```

1．演習問題：オリジナルコードのコンパイルと実行

目的

- 現状のプログラムの性能を把握する．

手順

- コンパイル（リストの確認）
- 実行（結果，性能の確認）

ディレクトリ

- practice_1

1. オリジナルコード:コンパイル(１)

コンパイラオプション

```
nfort -report-all mat_tune0.f
```

- -report-all
  コード生成リスト、診断メッセージリスト、編集リスト、インラインリスト、オプションリスト、ベクトルリストを出力する

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

1．オリジナルコード：コンパイル（２）

リストの確認

- 編集リスト（mat_tune0.L）

```
      25: +------>          do j=1,n
      26: |+----->            do k=1,n
      27: ||V---->              do i=1,n
      28: |||      F              a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
      29: ||V----               end do
      30: |+-----             end do
      31: +------           end do
```

V：ベクトル化対象ループ

1. オリジナルコード：実行

ジョブファイル (run.sx.sh)

```
#!/bin/bash

#PBS -q LECTUREV
#PBS --group=kosyuXXX
#PBS --venode=1
#PBS -l cpunum_job=2,elapstim_req=0:05:00
#PBS -j o -N p1-sx-sample

cd $PBS_O_WORKDIR

time ./a.out
```

NQSVオプション

-q	ジョブクラス名を指定
--group	課金グループを指定
--venode	使用するVE数を指定
-l	使用CPU数，経過時間
-j o	標準エラー出力を標準出力と同じファイルへ出力する
-N	ジョブ名を指定

実行

run.sx.sh をジョブ投入 (qsub) してください．

投入したジョブのステータスは、qstatコマンドで確認して下さい．

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.          *****はジョブ番号
$ qstat
RequestID      ReqName  UserName Queue    Pri STT S   Memory     CPU   Elapse R H M Jobs
-------------- -------- -------- -------- ---- --- - -------- --------
******.sqd     p1-sx-sa kosyuXXX LECTUREV    0 QUE -    0.00B    0.00       0 Y Y Y    1
```

1. オリジナルコード：実行結果

結果ファイル(p1-sx-sample.o*****) → 約33GFLOPS

PROGINFの出力

```
********  Program  Information  ********
 Real Time (sec)                        :            0.511899
 User Time (sec)                        :            0.510496
 Vector Time (sec)                      :            0.509786
 Inst. Count                            :           583677718
 V. Inst. Count                         :           134402095
 V. Element Count                       :         34406933536
 V. Load Element Count                  :         17179869585
 FLOP Count                             :         17179869376
 MOPS                                   :        85160.400972
 MOPS (Real)                            :        84872.547647
 MFLOPS                                 :        33674.900426
 MFLOPS (Real)                          :        33561.074846
 A. V. Length                           :          255.999979
 V. Op. Ratio (%)                       :           98.965902
 L1 Cache Miss (sec)                    :            0.000235
 CPU Port Conf. (sec)                   :            0.000000
 V. Arith. Exec. (sec)                  :            0.222687
 V. Load Exec. (sec)                    :            0.287098
 VLD LLC Hit Element Ratio (%)          :           49.975928
 FMA Element Count                      :          8589934592
 Power Throttling (sec)                 :            0.000000
 Thermal Throttling (sec)               :            0.000000
 Memory Size Used (MB)                  :          560.000000
 Non Swappable Memory Size Used (MB)    :           90.000000
```

2. 演習問題：性能解析（Ftraceの利用）

目的

- 性能解析ツールFtraceを使い，性能情報を採取する．

手順

- ソースコードの修正（Ftrace_Regionの挿入）
- コンパイラオプションの追加（-ftrace）
- 実行（結果，性能の確認）

ディレクトリ

- practice_2

2. 性能解析(Ftraceの利用):ソースコードの修正

mat_tune0.f へユーザ指定リージョン(Ftrace_Region)を挿入.

- **プログラムの局所的な部分の性能を知りたい場合に使用する.**
  - 通常の Ftrace はサブルーチン単位での情報を表示.
    ⇒ Ftrace_Region はループ単位で細かく情報採取が可能.
- CALL FTRACE_REGION_BEGIN/END で測定したい区間をはさむ.


```
23          t1=etime(cp1)
24  !       CALL FTRACE_REGION_BEGIN('Main-loop')
25          do j=1,n
26            do k=1,n
27              do i=1,n
28                a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
29              enddo
30            enddo
31          enddo
32  !       CALL FTRACE_REGION_END('Main-loop')
```

2. 性能解析(Ftraceの利用):コンパイラオプションの追加

comp.sx.shに-ftraceを追記する.

```
nfort -report-all mat_tune0.f -ftrace
```

- -ftrace

  簡易性能解析機能を利用することを指定する.

※注意
-ftraceオプションは測定オーバーヘッドが生じるため,実行回数の多いサブルーチンがある場合には実行時間が延びます.そのため,常に使用することはお勧めしません.

2. 性能解析(Ftraceの利用):コンパイルと実行

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

実行

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.
```

*****はジョブ番号

2. 性能解析(Ftraceの利用):実行結果

結果ファイル(ftrace.out) → 約33GFLOPS

```
% ftrace
もしくは
% ftrace -f ftrace.out
```

```
*----------------------*
  FTRACE ANALYSIS LIST
*----------------------*

Execution Date : Tue Sep 28 22:41:00 2021 JST
Total CPU Time : 0:00'00"510 (0.510 sec.)
```

FREQUENCY	EXCLUSIVE TIME[sec] (%)	AVER.TIME [msec]	MOPS	MFLOPS	V.OP RATIO	AVER. V.LEN	VECTOR TIME	L1CACHE MISS	CPU PORT CONF	VLD LLC HIT E.%	PROC.NAME
1	0.510(100.0)	510.035	85182.4	33683.7	98.97	256.0	0.510	0.000	0.000	49.98	MAIN_
1	0.510(100.0)	510.035	85182.4	33683.7	98.97	256.0	0.510	0.000	0.000	49.98	total
1	0.509(99.9)	509.427	85190.7	33723.9	98.97	256.0	0.509	0.000	0.000	49.98	Main-loop

Ftrace_Regionの情報

3. 演習問題:コンパイラ指示行

目的

- アウターアンローリング指示行の使い方を理解する.
- 4段アウターアンロールを行う.

手順

- ソースコードの修正
- コンパイル(リストの確認)
- 実行(結果, 性能の確認)

ディレクトリ

- practice_3

3. コンパイラ指示行：ソースコードの修正

mat_tune0.f に4段outerloop_unroll指示行を挿入.

```
% vi  mat_tune0.f
```

- outerloop_unroll指示行の挿入例

段数は2のべき乗の値のみ有効

```
25        do j=1,n
26 !nec$ outerloop_unroll(4)
27          do k=1,n
28            do i=1,n
29              a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
30            end do
31          end do
32        end do
```

3. コンパイラ指示行:コンパイルと実行

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

編集リスト(mat_tune0.L)の確認

```
25: +------>          do j=1,n
26: |           !nec$ outerloop_unroll(4)
27: |U----->            do k=1,n
28: ||V---->              do i=1,n
29: |||     F               a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
30: ||V-----              end do
31: |U------            end do
32: +-------          end do
```

U:外側ループアンロール

4段アウターアンロールが行われる
⇒配列aのメモリアクセスの回数が
1/4になるため高速化される

実行

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.
```

*****はジョブ番号

3. コンパイラ指示行：実行結果

結果ファイル（p3-sx-sample.o*****） ⇒ 約60GFLOPS

⇒オリジナル（演習1）の1.8倍の性能向上

PROGINFの出力

```
********  Program  Information  ********
 Real Time (sec)                        :            0.287512
 User Time (sec)                        :            0.285835
 Vector Time (sec)                      :            0.285028
 Inst. Count                            :           268070678
 V. Inst. Count                         :            92459055
 V. Element Count                       :         23669515296
 V. Load Element Count                  :         10737418641
 FLOP Count                             :         17179869376
 MOPS                                   :      106119.741308
 MOPS (Real)                            :      105344.342626
 MFLOPS                                 :       60193.763335
 MFLOPS (Real)                          :       59753.937868
 A. V. Length                           :         255.999970
 V. Op. Ratio (%)                       :          99.420186
 L1 Cache Miss (sec)                    :            0.000233
 CPU Port Conf. (sec)                   :            0.000000
 V. Arith. Exec. (sec)                  :            0.146272
 V. Load Exec. (sec)                    :            0.138753
 VLD LLC Hit Element Ratio (%)          :          20.185404
 FMA Element Count                      :         6442450944
 Power Throttling (sec)                 :            0.000000
 Thermal Throttling (sec)               :            0.000000
 Memory Size Used (MB)                  :          560.000000
 Non Swappable Memory Size Used (MB)    :           90.000000
```

4. 演習問題：行列積ライブラリの利用

目的

- 行列積ライブラリの性能を確認する.

手順

- ソースコードの修正
- コンパイルスクリプトの修正
- コンパイル（リストの確認）
- 実行（結果，性能の確認）

ディレクトリ

- practice_4

4. 行列積ライブラリの利用：プログラム修正

mat_tune0.f の配列の型宣言を修正する.

```
% vi  mat_tune0.f
```

- 配列Cの型を real(4) から real(8) に変更する.

```
4         implicit real(8) (a-h, o-z)
5         parameter ( n=2048 , moda=0 )
6         real(8) a(n+moda, n), b(n+moda, n)
7         real(4) c(n+moda, n)
```

```
4         implicit real(8) (a-h, o-z)
5         parameter ( n=2048 , moda=0 )
6         real(8) a(n+moda, n), b(n+moda, n)
7         real(8) c(n+moda, n)
```

4. 行列積ライブラリの利用：コンパイラオプションの追加

comp.sx.shに-O3を追記する.

```
nfort -O3 -report-all mat_tune0.f
```

- -O3

  副作用を伴う最適化・自動ベクトル化、および、多重ループの最適化を適用する.

4. 行列積ライブラリの利用：コンパイルと実行

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

編集リスト（mat_tune0.L）の確認

```
    LINE                DIAGNOSTIC MESSAGE

       27: opt(1800): Idiom detected (matrix multiply).

       24: +------>          do j=1,n
       25: |+----->            do k=1,n
       26: ||+---->              do i=1,n
       27: |||      M              a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
       28: ||+----               end do
       29: |+-----             end do
       30: +------           end do
```

コンパイラが認識できる演算パターンでは，ライブラリへの置換が行われる．

M：ベクトル行列積ライブラリ呼び出しの置換

実行

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.
```

*****はジョブ番号

4. 行列積ライブラリの利用：実行結果

結果ファイル（p4-sx-sample.o*****） ⇒ 約299GFLOPS

⇒オリジナル（演習１）の9.1倍の性能向上

PROGINFの出力

```
********  Program  Information  ********
 Real Time (sec)                        :            0.059252
 User Time (sec)                        :            0.057691
 Vector Time (sec)                      :            0.056920
 Inst. Count                            :            86153154
 V. Inst. Count                         :            35187247
 V. Element Count                       :          8976475168
 V. Load Element Count                  :           180355473
 FLOP Count                             :         17179869413
 MOPS                                   :      307393.339273
 MOPS (Real)                            :      297338.725232
 MFLOPS                                 :      299759.596830
 MFLOPS (Real)                          :      289954.676988
 A. V. Length                           :         255.105924
 V. Op. Ratio (%)                       :          99.710707
 L1 Cache Miss (sec)                    :            0.000241
 CPU Port Conf. (sec)                   :            0.000000
 V. Arith. Exec. (sec)                  :            0.056410
 V. Load Exec. (sec)                    :            0.000510
 VLD LLC Hit Element Ratio (%)          :          88.598002
 FMA Element Count                      :         8589934592
 Power Throttling (sec)                 :            0.000000
 Thermal Throttling (sec)               :            0.000000
 Memory Size Used (MB)                  :          560.000000
 Non Swappable Memory Size Used (MB)    :           90.000000
```

5. 演習問題：自動インライン展開

目的

- 自動インライン展開のオプションの使い方を理解する.

手順

- インライン展開前の性能の確認
  - コンパイル（リストの確認）
  - 実行（結果，性能の確認）
- インライン展開後の性能の確認
  - コンパイルスクリプトへオプション追加，再コンパイル（リストの確認）
  - 再実行（結果，性能の確認）

ディレクトリ

- practice_5

5. 自動インライン展開：インライン展開前のコンパイル

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

編集リスト（mat_tune1.L）の確認

- サブルーチン呼び出しがあり，ベクトル化ができていない．

```
   LINE             DIAGNOSTIC MESSAGE

      26: vec( 103): Unvectorized loop.
      26: vec( 110): Vectorization obstructive procedure reference.: MUL

      24: +------>         do j=1,n
      25: |+----->           do k=1,n
      26: ||+---->             do i=1,n
      27: |||                    call mul(n, moda, i, j, k, a, b, c)
      28: ||+----              end do
      29: |+-----            end do
      30: +------          end do
```

5. 自動インライン展開：インライン展開前の実行結果

実行

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.
```

*****はジョブ番号

結果ファイル(p4-sx-sample.o*****) ⇒ 約0.091GFLOPS

PROGINFの出力

```
********  Program  Information  ********
 Real Time (sec)                        :           23.373303
 User Time (sec)                        :           23.372079
 Vector Time (sec)                      :            0.000098
 Inst. Count                            :        71948356346
 V. Inst. Count                         :              47151
 V. Element Count                       :           12067872
 V. Load Element Count                  :                401
 FLOP Count                             :         2147483837
 MOPS                                   :         3078.963993
 MOPS (Real)                            :         3078.742341
 MFLOPS                                 :           91.884252
 MFLOPS (Real)                          :           91.877637
 A. V. Length                           :          255.940956
 V. Op. Ratio (%)                       :            0.016770
・・・
```

5. 自動インライン展開:コンパイラオプションの追加

comp.sx.sh に-finline-functions -finline-file=mul.f を追記する.

```
nfort -report-all mat_tune1.f mul.f -finline-functions -finline-file=mul.f
```

- -finline-functions

  自動インライン展開を適用する.

- -finline-file=*filename.f*

  インライン展開する手続をサーチするとき、指定されたソースファイル(*filename.f*)をサーチする. 複数指定するときにコロン(:)で区切って指定する. allが指定されたとき, コマンドラインで指定されたコンパイル対象のすべてのソースファイルもサーチする.

5. 自動インライン展開：コンパイラオプションの追加

コンパイル

```
% ./comp.sx.sh
```

⇒ インライン展開され，ベクトル化できた

```
LINE              DIAGNOSTIC MESSAGE

    25: vec( 103): Unvectorized loop.
    25: vec( 113): Overhead of loop division is too large.
    25: vec( 128): Fused multiply-add operation applied.
    26: vec( 101): Vectorized loop.
    27: inl(1222): Inlined: MUL

    24: +------>         do j=1,n
    25: |+---->F           do k=1,n
    26: ||V---->             do i=1,n
    27: |||      I             call mul(n, moda, i, j, k, a, b, c)
    28: ||V----              end do
    29: |+-----            end do
    30: +------           end do
```

I：関数呼び出しをインライン展開

5. 自動インライン展開：インライン展開後の実行結果

実行

```
$ qsub run.sx.sh
Request ******.sqd submitted to queue: LECTUREV.
```

*****はジョブ番号

結果ファイル(p4-sx-sample.o*****) ⇒ 約18GFLOPS

インライン展開により，0.091GFLOPS から 18GFLOPS に性能向上した．

PROGINFの出力

```
********  Program  Information  ********
 Real Time (sec)                        :            0.118415
 User Time (sec)                        :            0.117112
 Vector Time (sec)                      :            0.116351
 Inst. Count                            :            78947086
 V. Inst. Count                         :            16824367
 V. Element Count                       :          4307035168
 V. Load Element Count                  :          2147484049
 FLOP Count                             :          2147483840
 MOPS                                   :         46626.694677
 MOPS (Real)                            :         45965.166671
 MFLOPS                                 :         18396.457522
 MFLOPS (Real)                          :         18135.453135
 A. V. Length                           :           255.999835
 V. Op. Ratio (%)                       :            98.858647
・・・
```

ライブラリ

コンパイラが自動的に置き換えるもの

- 行列積パターン

ソースコード修正により使用できるもの

- NLC（NEC Numeric Library Collection）
  - ASL（ASL/SX，フーリエ変換，乱数生成，ソート，FFTW3）
  - BLASライブラリ
  - LAPACKライブラリ　など

おすすめコンパイラオプション

プログラムを初めてスーパーコンピュータ(SX-ACE)で実行する場合

```
nfort -O2 -report-all “プログラムファイル名”
```

- -O2
  副作用を伴う最適化・自動ベクトル化を適用する.（既定値）
- -report-all
  コード生成リスト、診断メッセージリスト、編集リスト、インラインリスト、オプションリスト、ベクトルリストを出力する.

正常終了した場合，-O3および-O4を使用して-O2の結果と比較

- -O3
  副作用を伴う最適化・自動ベクトル化、および、多重ループの最適化を適用する.
- -O4
  C/C++/FORTRANの言語仕様を逸脱した副作用を伴う最大限の最適化・自動ベクトル化を適用する.

デバッグ用コンパイラオプション

正常終了したが，結果がおかしい場合

- -O1

  副作用を伴わない最適化・自動ベクトル化を適用する.

異常終了(Segmentation fault)した場合，デバッグ用オプションで分析

- -fcheck=bounds

  配列の上下限のチェックを有効にする.

- -traceback [=verbose]

  実行時に環境変数VE_TRACEBACKがセットされているとき、トレースバック情報を出力するオブジェクトファイル、実行ファイルを生成する.

  verboseを指定した場合、トレースバック情報を出力する際に、ファイル名や行番号情報を出力するための情報を追加したオブジェクトファイル、実行ファイルを生成する.

初期化漏れのチェック

- -minit-stack=SNAN

  実行時にスタックに割り付ける領域を倍精度浮動小数点型のSignaling NaN(0x7ff4000000000000)で初期化する.