OpenMP

プログラミング環境特論　資料

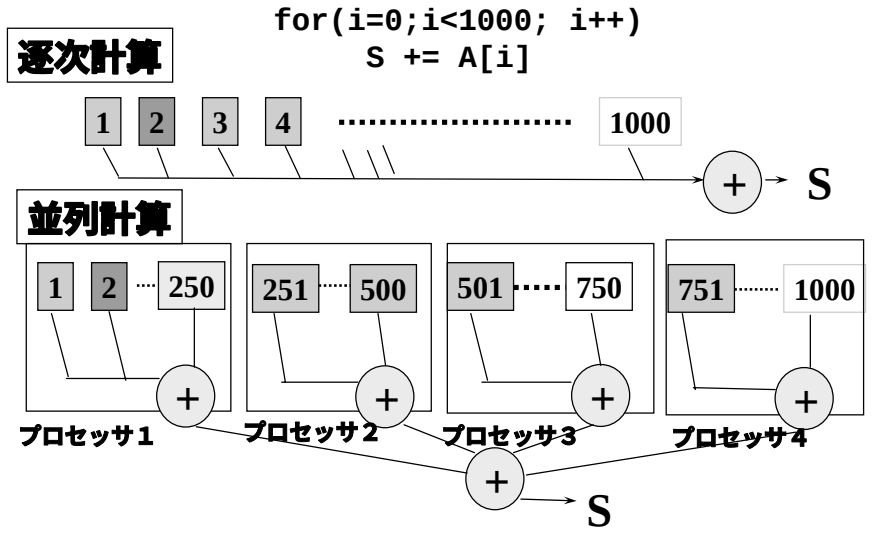
並列プログラミング

- メッセージ通信 (Message Passing)
  - 分散メモリシステム（共有メモリでも、可）
  - プログラミングが面倒、難しい
  - プログラマがデータの移動を制御
  - プロセッサ数に対してスケーラブル
- 共有メモリ (shared memory)
  - 共有メモリシステム（DSMシステムon分散メモリ）
  - プログラミングしやすい（逐次プログラムから）
  - システムがデータの移動を行ってくれる
  - プロセッサ数に対してスケーラブルではないことが多い。

並列プログラミング

- メッセージ通信プログラミング
  - MPI,PVM
- 共有メモリプログラミング
  - マルチスレッドプログラミング
    - pthread, solaris thread, NT thread
  - OpenMP
    - 指示文によるannotation
    - thread制御など共有メモリ向け
  - HPF
    - 指示文によるannotation,
    - distributionなど分散メモリ向け
- 自動並列化
  - 逐次プログラムをコンパイラで並列化
    - コンパイラによる解析には制限がある。指示文によるhint
- Fancy parallel programming languages

簡単な例



POSIXスレッドによるプログラミング

- スレッドの生成

Pthread, Solaris thread

```
for(t=1;t<n_thd;t++){
  r=pthread_create(thd_main,t)
}
thd_main(0);
for(t=1; t<n_thd;t++)
      pthread_join();
```

PARAMCS

```
For(t=1; t<n_thd;t++)
  CREATE(thd_main);
thd_main(0)
WAIT_FOR_END(n_thd-1);
```

POSIXスレッドによるプログラミング

- ループの担当部分の分割
- 足し合わせの同期

```
int s;  /* global */
int n_thd; /* number of threads */
int thd_main(int id)
{ int c,b,e,i,ss;
  c=1000/n_thd;
  b=c*id;
  e=s+c;
  ss=0;
  for(i=b; i<e; i++) ss += a[i];
  pthread_lock();
  s += ss;
  pthread_unlock();
  return s;
}
```

OpenMPによるプログラミング

これだけで、OK!

```
#pragma omp parallel for reduction(+:s)
   for(i=0; i<1000;i++) s+= a[i];
```

もくじ

- OpenMPとは
- OpenMPの実行モデルとＡＰＩ
- OpenMPの構文･指示文
  - Parallel Regionとwork sharing構文
    - 並列ループ(for)、タスク並列(sections)、single構文
  - 同期のための構文･指示文
  - data scope属性の指定
  - orphan 指示文
    - static extent とdynamic extent
  - 実行時ライブラリと環境変数
- OpenMPのケーススタディ･関連研究
- OpenMPのまとめ･動向

OpenMPとは

- 共有メモリマルチプロセッサの並列プログラミングのためのプログラミングモデル
  - ベース言語(Fortran/C/C++)をdirective（指示文）で並列プログラミングできるように拡張
- 米国コンパイラ関係のISVを中心に仕様を決定
  - Oct. 1997 Fortran ver.1.0 API
  - Oct. 1998 C/C++ ver.1.0 API
  - (1999 F90 API?)
- URL
  - `http://www.openmp.org/`

背景

- 共有メモリマルチプロセッサシステムの普及
  - SGI Cray Origin
    - ASCI Blue Mountain System
  - SUN Enterprise
  - PC-based SMPシステム
- 共有メモリマルチプロセッサシステムの並列化指示文の共通化の必要性
  - 各社で並列化指示文が異なり、移植性がない。
    - SGI Power Fortran/C
    - SUN Impact
    - KAI/KAP
- OpenMPの指示文は並列実行モデルへのＡＰＩを提供
  - 従来の指示文は並列化コンパイラのためのヒントを与えるもの

科学技術計算とOpenMP

- 科学技術計算が主なターゲット
  - 並列性が高い
  - コードの5%が95%の実行時間を占める(?)
    - 5%を簡単に並列化する
- 共有メモリマルチプロセッサシステムがターゲット
  - small-scale(～16プロセッサ）からmedium-scale (～64プロセッサ）を対象
  - 従来はマルチスレッドプログラミング
    - pthreadはOS-oriented, general-purpose
- 共有メモリモデルは逐次からの移行が簡単
  - 簡単に、少しずつ並列化ができる。
    - （でも、デバックはむずかしいかも）

OpenMPのAPI

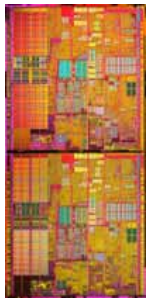
- 新しい言語ではない！
  - コンパイラ指示文（directives/pragma）、ライブラリ、環境変数によりベース言語を拡張
  - ベース言語：Fortran77, f90, C, C++
    - Fortran： !$OMPから始まる指示行
    - C: #pragma omp のpragma指示行
- 自動並列化ではない！
  - 並列実行･同期をプログラマが明示
- 指示文を無視することにより、逐次で実行可
  - incrementalに並列化
  - プログラム開発、デバックの面から実用的
  - 逐次版と並列版を同じソースで管理ができる

マルチコア

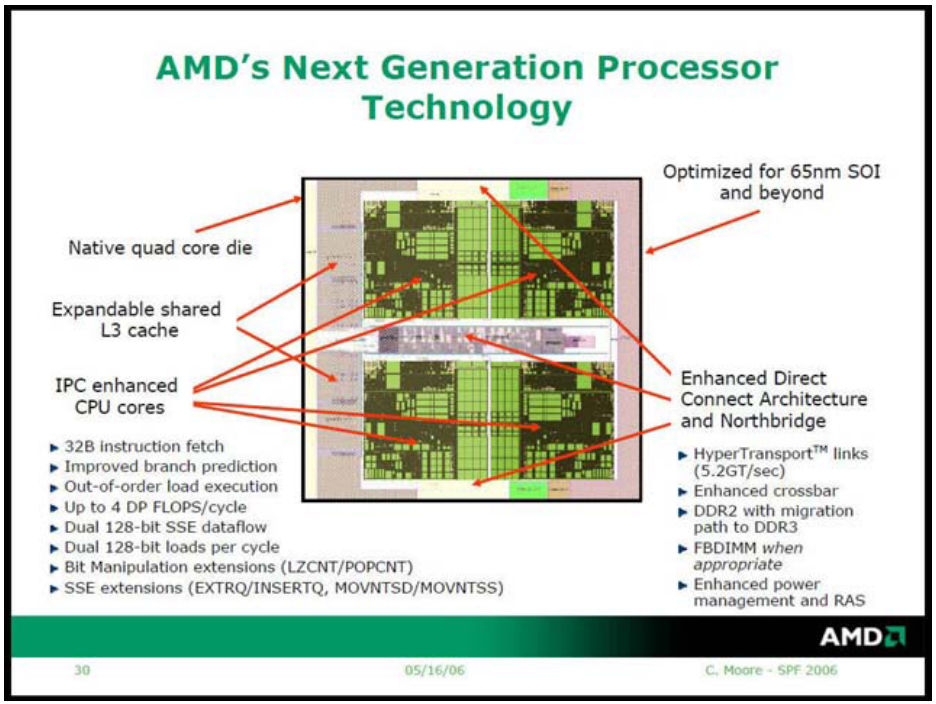
- マルチコア化が進んでいる
- マルチコアは基本的に共有メモリ

プロセッサ研究開発の動向

- さらなる高速化、高性能化へ
  - クロックの高速化、製造プロセスの微細化
    - いまでは3GHz, 数年のうちに10GHzか
      - インテルの戦略の転換　⇒　マルチコア
    - プロセスは90nm　⇒65nm , 将来的には45nm
    - 量子的な限界？
  - アーキテクチャの改良
    - スーパーパイプライン、スーパースカラ、VLIW…
    - キャッシュの多段化、マイクロプロセッサでもL3キャッシュ
    - マルチスレッド化、Intel Hyperthreading、複数のプログラムを同時に処理
    - マルチコア：１つのチップに複数のCPU



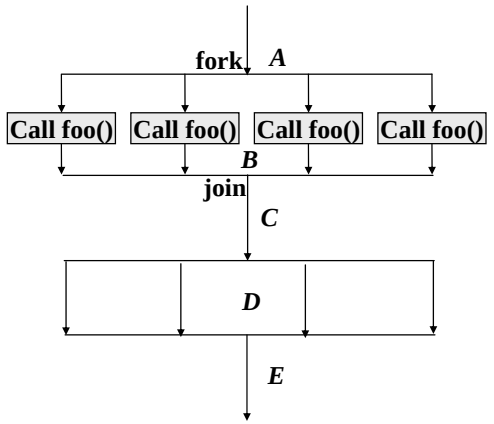
インテル® Pentium® プロセッサ エクストリーム・エディションのダイ



OpenMPの実行モデル

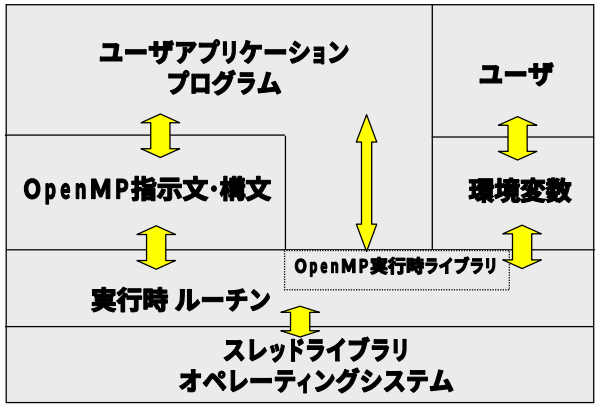
- 逐次実行から始まる
- Fork-joinモデル
- parallel region
  - 関数呼び出しも重複実行

```
… A …
#pragma omp parallel
{
    foo(); /* ..B... */
}
… C ….
#pragma omp parallel
{
… D …
}
… E …
```



OpenMPのアーキテクチャ

- OpenMPのAPI
  - 指示文･構文
  - 実行時ライブラリ
  - 環境変数



OpenMPの指示文フォーマット

- Fortran
  - OMP,COMP,*$OMPのsentinelから始まる行

```
!$OMP directive_name [clause, clause, …]
```

    - *directive_name*: 指示子名
    - *clause*: 指示節、データ属性や並列ループのスケジューリング，同期オプションなどを指定する。
- C/C++
  - `#pragma omp` から始まるpragma行

```
#pragma omp directive_name [clause, clause, …]
```

  - 構文要素として扱われるので注意
    - 例えば、`#pragma omp parallel` は後続のブロック文に作用する。

Parallel Region

- 複数のスレッド(team)によって、並列実行される部分
  - `Parallel`構文で指定
  - 同じParallel regionを実行するスレッドをteamと呼ぶ
  - region内をteam内のスレッドで重複実行
    - 関数呼び出しも重複実行

Fortran:

```
!$OMP PARALLEL
     …
     … parallel region
     …
!$OMP END PARALLEL
```

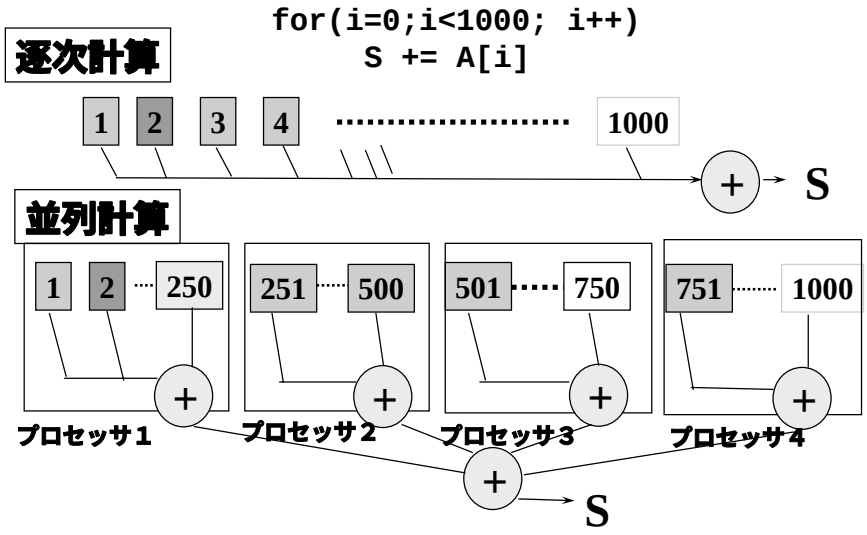
C:

```
#pragma omp parallel
{
     …
     … Parallel region…
     …
}
```

Parallel region (contd.)

- スレッド ID
  - 実行時ライブラリ関数 `omp_get_thread_num()`で得る。
  - IDは、Team内の０から始まる番号
  - マスタスレッド `ID=0`
  - `ID`を使って違うデータにアクセス。
- スレッド数
  - 実行時ライブラリ関数 `omp_set_num_threads(`*nthreads*`)`で設定
  - 環境変数 `OMP_NUM_THREADS`
- 同期
  - parallel regionの最後でjoin
  - 指示文による同期
    - `critical, atomic, barrier`
  - 実行時ライブラリを用いる
    - ロック関数

簡単な例



簡単な例

OpenMPによるマルチスレッドプログラミング

```
#pragma omp parallel
{ int c,b,e,i,ss;
  c=1000/omp_get_num_threads();
  b=c*omp_get_thread_num();e=s+c;ss=0;
  for(i=b; i<e; i++) ss += a[i];
#pragma omp atomic
  s += ss;
}
```

OpenMPによるデータ並列プログラミング

```
#pragma omp parallel for reduction(+:s)
   for(i=0; i<1000;i++) s+= a[i];
```

OpenMPの使い方

- 並列化指示として:
  - 並列ループを明示 (data-parallel)
  - タスク並列部分を明示 (task-parallel)
  - 自動並列化ではない → ユーザがtuning
- スレッドライブラリとして:
  - SPMDのプログラミングモデル
  - omp_get_thread_num()でスレッドIDを得る
  - SPLASH 2のPARMACS Macroの代わり
- 自動並列化コンパイラのbackendとして:
  - 自動並列化コンパイラがOpenMPのソースを出力
    - e.g. Polaris Compiler

マルチスレッドプログラミングとOpenMP

Pthread, Solaris thread

```
for(t=1;t<n_thd;t++){
  r=pthread_create(thd_main,t)
}
thd_main(0);
for(t=1; t<n_thd;t++)
      pthread_join();
```

PARAMCS

```
For(t=1; t<n_thd;t++)
  CREATE(thd_main);
thd_main(0)
WAIT_FOR_END(n_thd-1);
```

OpenMP

```
  omp_set_num_threads(n_thd);
#pragma omp parallel
{
  thd_main(omp_get_thread_num());
}
```

Work sharing構文

- Team内のスレッドで分担して実行する部分を指定
  - parallel region内で用いる
  - `for` 構文
    - イタレーションを分担して実行
    - データ並列
  - `sections`構文
    - 各セクションを分担して実行
    - タスク並列
  - `single`構文
    - 一つのスレッドのみが実行
  - parallel 構文と組み合わせた記法
    - `parallel for` 構文
    - `parallel sections`構文

For構文

- Forループ（DOループ）のイタレーションを並列実行
- 指示文の直後のforループは*canonical shape*でなくてはならない

```
#pragma omp for [clause…]
 for(var=lb; var logical-op ub; incr-expr)
   body
```

  - *var*は整数型のループ変数（強制的にprivate）
  - *incr-expr*
    - ++*var*, *var*++, --*var*, *var*--, *var*+=*incr*, *var*-=*incr*
  - *logical-op*
    - <、<=、>、>=
  - ループの外の飛び出しはなし、`break`もなし
  - *clause*で並列ループのスケジューリング、データ属性を指定

並列ループのスケジューリング

- For構文の指示節 `schedule(`*kind*[,*chunk_size*]`)` で指定
  - `schedule(static,`*chunk_size*`)`
    - *chunk_size*のイタレーションを静的に`round-roubin`でスレッドに割り当てる
    - 指定なし：プロセッサに等分割
    - *chunk_size*=1：cyclic分割
  - `schedule(dynamic,`*chunk_size*`)`
    - *chunk_size*のイタレーションを動的に割り当てる
    - 指定なし：*chunk_size*=1
  - `schedule(guided,`*chunk_size*`)`
    - 残りのイタレーションをプロセッサで動的に分割
    - *chunk_size*は最小の分割を指定
  - `schedule(runtime)`
    - 環境変数 `OMP_SCHEDULE`で指定
  - 指定なし：implementation依存

並列ループのスケジューリング

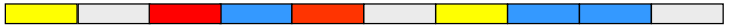
- プロセッサ数４の場合

逐次

`schedule(static,`*n*`)`

`Schedule(static)`

`Schedule(dynamic,`*n*`)`



`Schedule(guided,`*n*`)`

例

疎行列ベクトル積ルーチン

```
Matvec(double a[],int row_start,int col_idx[],
 double x[],double y[],int n)
{
   int i,j,start,end; double t;
#pragma omp parallel for private(j,t,start,end)
   for(i=0; i<n;i++){
      start=row_start[i];
      end=row_start[i+1];
      t = 0.0;
      for(j=start;j<end;j++)
         t += a[j]*x[col_idx[j]];
      y[i]=t;
  }
}
```

Sections構文とsingle構文

- Sectionを各スレッドで並列実行

```
#pragma omp sections
{
#pragma omp section
 { … section1…  }
#pragma omp section
 { … section2…  }
}
```

- 一つのスレッドのみで実行

```
#pragma omp single
{
   … statements …
}
```

スレッドの同期操作

- Work sharing構文は、nowait指示節を指定しない限り、最後でバリア同期が行われる
- バリア同期
  - barrier 指示文
- Critical section
  - critical 構文
- Atomic 更新
  - atomic 構文

Barrier 指示文

- バリア同期を行う
  - チーム内のスレッドが同期点に達するまで、待つ
  - それまでのメモリ書き込みもflushする
  - 並列リージョンの終わり、work sharing構文でnowait指示節が指定されない限り、暗黙的にバリア同期が行われる。

```
#pragma omp barrier
```

Atomic構文

- メモリの更新をAtomicに行う。

```
#pragma omp atomic
        statement
```

  - 直後の文が、以下の形の更新でなくてはならない。
    - `x` *binop*`=` *expr*
    - `x++, ++x, x--, --xx`
  - xのアドレス計算、*expr*の評価は並列に行われる。
  - Atomicなメモリ書き換えのハードウエアがあるときには高速化ができる。

Critical構文

- 排他的に実行されるCritical sectionを指定

```
#pragma omp critical[(name)]
{
        statements
}
```

  - 大域的な名前をつけることができる
    - 同じ名前のcritical sectionは排他的に実行される
    - 名前のない場合、他の名前のないcritical sectionと排他的に実行
  - conditional waitはなし
    - 逐次プログラムからの並列化を前提（？）

Master構文とordered構文

- `master` 構文

```
#pragma omp master
        block  statements
```

  - マスタスレッドだけで実行
  - 同期はなし
- `ordered`構文

```
#pragma omp ordered
        block  statements
```

  - for構文のdynamic extentにおいて、逐次と同様な順序で実行
  - for構文で、`ordered`指示節による指定が必要

Data scope属性指定

- `parallel`構文、work sharing構文で指示節で指定
- `shared` (*var_list*)
  - 構文内で指定された変数がスレッド間で共有される
- `private` (*var_list*)
  - 構文内で指定された変数が`private`
- `firstprivate` (*var_list*)
  - `private`と同様であるが、直前の値で初期化される
- `lastprivate` (*var_list*)
  - `private`と同様であるが、構文が終了時に逐次実行された場合の最後の値を反映する
- `reduction` (*op*`:`*var_list*)
  - `reduction`アクセスをすることを指定、スカラ変数のみ
  - 実行中は`private`、構文終了後に反映

Threadprivate 指示文

- スレッドごとに固有のfile-scopeの変数を指定

```
#pragma omp threadprivate(var_list)
```

  - 変数宣言部に記述する
  - スレッド数が変わらない限り、parallel region間で変数の値がpersistentであることが保証される
  - parallel構文のcopyin(*var_list*)指示節の指定により、マスタスレッドの値で初期化をすることができる。

Data scope属性指定とwork sharing構文

- Parallel 構文
  - private,firstprivate,shared,reduction,copyin
  - default(shared|none)
    - データ環境のdefaultを指定する。Noneを指定するとすべての変数に対して指定なくてはならない。
- for構文
  - private,firstprivate,lastprivate,reduction
- sections構文
  - private,firstprivate,lastprivate,reduction
- single構文
  - private,firstprivate

Orphan directiveとextent

- Static extent
  - lexicalに並列構文に含まれる部分
- dynamic extent
  - 実行時に並列に実行される部分
  - 並列構文内で呼び出される関数を含む
- orphan directive
  - Static extent以外のdynamic extentに現れる指示文
  - dynamic extentにない場合は無視される
- dynamic extentでのdata scope属性
  - auto変数は、private
  - 大域変数は、shared

例 (orphan directive)

```
main(){
 …
 for(it=0;it<NITER;I++){
  resid=cgsol(…)
  printf(…,resid);
 }
}
cgsol(…){
 …
#pragma omp parallel for
 for(i=0;i<cols;i+)
   p[i]=r[i]=x[i];
 for(it=0;it<NITCG;I++){
  matvec(…);
 …
#pragma omp parallel for
  for(I=0;I<cols;I++)
   z[I]+=alpha*p[I];
…
 }
}
```

```
main(){
 …
#pragma omp parallel
 for(it=0;it<NITER;I++){
  resid=cgsol(…)
#pragma omp master
  printf(…,resid);
 }
}
cgsol(…){
 …
#pragma omp for
 for(i=0;i<cols;i+)
   p[i]=r[i]=x[i];
 for(it=0;it<NITCG;I++){
  matvec(…);
 …
#pragma omp for
  for(I=0;I<cols;I++)
   z[I]+=alpha*p[I];
 …
 }
}
```

Directive binding

- `for`, `sections`, `single`,`master`, `barrier` directiveは、dynamic extentにbindされる
  - dynamic extent以外にあるのは、逐次実行
- work sharing構文は、nestできない。
  - master, criticalの中で使うことができない
- nested parallelism
  - parallel directiveはnestしてもよい
  - Nested parallelismがenableの時、parallelに実行
  - Disableの時には、一つのthreadのチームで実行（逐次）

Nested parallelism

- Nested parallelismについてのコメント
  - in FAQ ``What about nested parallelism?''
    - Nested parallelism is permitted by the OpenMP specification. Supporting nested parallelism effectively can be difficult, and we expect most vendors will start out by executing nested parallel constructs on a single thread.
  - In ``OpenMP Fortran Interpretations Version 1.0''
    - In Note that an OpenMP-compliant implementation is permitted to serialize a nested parallel region.
- 逐次実行での実行を保証する必要がある。
  - Nested parallelismのserialize
    - section構文のserialize
    - 並列ループのserialize
  - 逐次プログラムからの並列化を前提としている（?）

OpenMPのmemory consistencyモデル

- OpenMPの共有メモリモデルはweak consistency
  - 以下の場合に一貫性を保証すればよい。
    - Parallel regionの終了時
    - volatile変数の更新
    - バリア同期（nowaitのないwork sharing構文の終了時）
    - `flush` 指示文
- `flush` 指示文

```
#pragma omp flush[(var_list)]
```

  - 指定された変数のconsistencyを保証する。
  - 変数を指定されていない場合にはすべての共有変数

実行時ライブラリ

- `omp_get_num_threads, omp_set_num_threads`
  - teamのスレッド数を取得、変更
- `omp_get_thread_num`
  - スレッドidを取得
- `omp_get_max_threads`
  - 最大のスレッド数を返す
- `omp_get_num_procs`
  - プロセッサ数を返す
- `omp_set_dynamic, omp_get_dynamic`
  - スレッド数を動的に変更するかどうか
- `omp_set_nested, omp_get_nested`
  - parallel regionのnest実行が可能かどうかの指定
- lock関数
  - `omp_lock_t`
  - `omp_nest_lock_t`

環境変数

- OMP_NUM_THREADS
  - Parallel regionを実行するスレッド数を指定
- OMP_SCHEDULE
  - schedule(runtime)のスケジュール方法の指定
- OMP_DYNAMIC
  - スレッド数を動的に変えていいかどうかの指定
  - SGI origin では対応
- OMP_NESTED
  - nested parallelismが有効かの指定
  - nestされたparallel regionは逐次実行でも可

OpenMPの利点・欠点

- 利点
  - incrementalに並列化ができる。
  - 逐次実行版と並列実行版を同じソースで管理できる
  - ユーザ指示通りに並列化できる
  - スレッドプログラミングに比べて、並列性が構造的に記述されている。
    - Work sharing 構文、orphan directive
    - コンパイラで解析が可能
- 欠点
  - 並列化可能性はユーザがチェックする必要あり
  - data mappingが記述できない。
    - Iteration mappingとの整合性
    - localityが失われる可能性
  - 配列に対してreduction演算の指定ができない
  - コンパイラが必要
    - pragmaによる記述

まとめ

- OpenMP --- 共有メモリモデル向けの実行モデル＆ＡＰＩ
  - 逐次のベース言語(Fortran,C/C++)を拡張
  - fork-joinモデル
  - 並列性の構造的な記述
  - 逐次プログラムからのincrementalな並列化をサポート
- 動向
  - OpenMP2.0
    - 配列reductionなど。
  - OpenMP3.0が策定中
  - Gccもサポート
  - Omni OpenMP
  - 研究課題
    - 最適化（同期除去、localityの最適化）
    - ＳＭＰクラスタ（MPI,HPFとの統合）
    - 分散メモリへの対応
    - 自動並列化コンパイラとの統合