OpenMP

13

Sistemas Operativos y Distribuidos

Mg. Javier Echaiz
D.C.I.C. – U.N.S.
http://cs.uns.edu.ar/~jechaiz
je@cs.uns.edu.ar

Programación de aplicaciones paralelas

- Como sabemos, los sistemas paralelos MIMD presentan dos arquitecturas diferenciadas: **memoria compartida** y **memoria distribuida**.

- **El modelo de memoria utilizado hace que la programación de aplicaciones paralelas para cada caso sea esencialmente diferente.**

Programación de aplicaciones paralelas

- Para los sistemas de memoria distribuida (MPP), el "estándar" de programación, mediante pasaje de mensajes, es MPI.
- **Para los sistemas de memoria compartida, básicamente SMP, la opción a considerar es OpenMP.**
- **Otras opciones:**
  - **UPC (*Unified Parallel C*).**
  - **shrmem (Cray).**

Modelos de programación paralela

EARTH SIMULATOR

Development Environment for Application

Level	Hardware	Unit	Max	Memory	Choice of Programming
1	AP	Vector Register Length	256		Automatic Vectorization
2	Intra-Node	AP	8	Shared	OpenMP Microtasking MPI2 HPF2/JA
3	Inter-Nodes	Node	640	distributed	MPI2 HPF2/JA

OS : SUPER-UX

OpenMP
Una pequeña introducción

OpenMP (introd.)

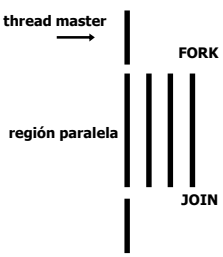
- OpenMP trata de ofrecer un estándar para programar aplicaciones paralelas en sistemas de memoria compartida, que sea portable, que permita paralelismo incremental , y que sea independiente del hardware que lo soporte.
- Participan en su desarrollo los fabricantes más importantes: HP-Compaq, IBM, SUN, SG, ...

OpenMP (introd.)

- No se trata de un nuevo lenguaje de programación, sino de un API (*application programming interface*) formado por:
  - **directivas al compilador**
    (C) #pragma omp <directiva>
  - **unas pocas funciones de librería**
  - **algunas variables de entorno**

OpenMP (introd.)

- El modelo de programación paralela que aplica OpenMP es Fork - Join.
- En un determinado momento, el thread "master" genera p threads que se ejecutan en paralelo.



OpenMP (introd.)

- Los threads creados por el thread master van a ejecutar todos la misma copia de código. Cada thread lleva un identificador.

▶ **La diferenciación de las tareas a ejecutar será:**
  - **mediante un modelo SPMD (if id == ...).**
  - **mediante constructores específicos de reparto de tareas (Work Sharing).**

OpenMP (introd.)

En resumen, partiendo de un programa serie se obtiene un programa paralelo OpenMP:

➲ **añadiendo directivas que especifican una región paralela (código replicado), reparto de tareas (específicas para cada thread), o sincronización entre threads.**

➲ **utilizando unas pocas funciones de librería (include <omp.h>) para gestionar los threads o para sincronizarlos.**

un ejemplo

```
main () {
#pragma omp parallel private(tid)
  {   tid = omp_get_thread_num();
      printf ("thread %d en marcha \n", tid);
    #pragma omp for schedule(static) reduction(+:B)
      for (i=0; i<1000; i++)
      {  A[i] = A[i] + 1;
         B = B + A[i];
      }
      if (tid==0)  printf(" B = %d \n", B);
  }
}
```


ideas básicas

0 **Procesos paralelos (*threads*).**

1 **REGIONES PARALELAS. Ámbito de las variables.**

2 **REPARTO DE TAREAS.**

Bucles for. Planificación de iteraciones. Sections / Single / ...

3 **SINCRONIZACIÓN: secciones críticas, *locks* (cerrojos), barreras.**

ideas básicas

- 0 Número de procesos
  - **estático, una variable de entorno:**
    > export OMP_NUM_THREADS = 10
  - **dinámico, mediante una función:**
    omp_set_num_threads (10);

región paralela

- 1 REGIÓN PARALELA (parallel regions)

  # pragma omp parallel (cláusulas)

- Una región paralela es un trozo de código que se va a repetir en todos los threads.
- Las variables de una región paralela pueden ser compartidas (de todos los threads, shared) o privadas (diferentes para cada thread).
- El ámbito de las variables se define mediante cláusulas específicas.

región paralela

Un ejemplo sencillo:

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
#define N    12
int     i, tid, A[N];
main () {
  omp_set_num_threads (4);
  #pragma omp parallel     private(tid) shared(A)
{ tid = omp_get_thread_num ();
   printf ("Thread %d en marcha \n", tid);
   A[tid] = 10 + tid;
   printf ("El thread %d ha terminado \n", tid);
  }
  for (i=0; i<N; i++) printf ("A(%d) = %d \n", i, A[i]);
}
```

barrera

reparto de tareas: bucles for

- 2 REPARTO DE TAREAS: bucles
- Los bucles son uno de los puntos de los que extraer paralelismo de manera "sencilla" (paralelismo de grano fino).
- Obviamente, la simple replicación de código no es suficiente. Por ejemplo,

```
#pragma omp parallel shared(A) private(i)
{  for (i=0; i<100; i++)
        A[i] = A[i] + 1;
}
```

?

bucles for

- Tendríamos que hacer algo así:

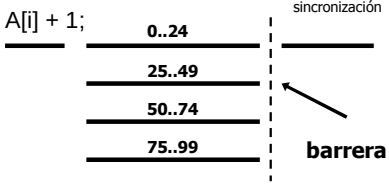
```
#pragma omp parallel shared(A)
    private(tid, ini, nth, fin, i)
{   tid = omp_get_thread_num();
    nth = omp_get_num_threads();
    ini = tid * 100 / nth;
    fin = (tid+1) * 100 / nth;
    for (i=ini; i<fin; i++) A[i] = A[i] + 1;
}
```

!

bucles for

```
#pragma omp parallel
{
  #pragma omp for (cláusulas)
  for (i=0; i<100; i++)
    A[i] = A[i] + 1;
}
```

ámbito variables planificación sincronización



bucles for

```
for (i=0; i<N; i++)
  for (j=0; j<M; j++)
  {
    X = B[i][j] * B[i][j];
    A[i][j] = A[i][j] + X;
    C[i][j] = X * 2 + 1;
  }
```

⇨

```
#pragma omp parallel for
   private (j, X)
for (i=0; i<N; i++)
  for (j=0; j<M; j++)
  {
    X = B[i][j] * B[i][j];
    A[i][j] = A[i][j] + X;
    C[i][j] = X * 2 + 1;
  }
```

Estamos paralelizando el **bucle externo**: los threads ejecutan el bucle interno. Paralelismo de grano "medio".
X y **j** deben declararse como **privadas**!

bucles for

```
for (i=0; i<N; i++)
  for (j=0; j<M; j++)
  {
    X = B[i][j] * B[i][j];
    A[i][j] = A[i][j] + X;
    C[i][j] = X * 2 + 1;
  }
```

⇨

```
for (i=0; i<N; i++)
  #pragma omp parallel for
   private (X)
   for (j=0; j<M; j++)
   {
     X = B[i][j] * B[i][j];
     A[i][j] = A[i][j] + X;
     C[i][j] = X * 2 + 1;
   }
```

Estamos paralelizando el **bucle interno**: el paralelismo es de grano fino.
X debe declararse como **privada.**

planificación de las iteraciones

- ¿Cómo se reparten las iteraciones de un bucle entre los threads?
- Puesto que el **for** termina con una **barrera**, si la carga de los threads está mal equilibrada tendremos una pérdida (notable) de eficiencia.

▶ **La cláusula schedule permite definir diferentes estrategias de reparto, tanto estáticas como dinámicas.**

planificación de las iteraciones

- Ejemplo

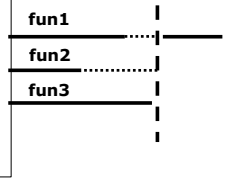
```
#pragma omp parallel for shared(A) schedule(static, 4)
{  for (i=0; i<100; i++)
        A[i] = A[i] + 1;
}
```

Recordar
estático: menos costo / mejor localidad datos
dinámico: más costo / carga más equilibrada

reparto de tareas

- Sections: tareas diferentes

```
#pragma omp parallel sections
 [clausulas]
{
#pragma omp section
    fun1();
#pragma omp section
    fun2();
#pragma omp section
    fun3();
}
```



▶ **Single: una tarea específica para un único thread dentro de una región paralela**

sincronización de los threads

- 3 SINCRONIZACIÓN
- Cuando no pueden eliminarse las dependencias de datos entre los threads, entonces es necesario sincronizar su ejecución.

OpenMP proporciona los mecanismos de sincronización más habituales: exclusión mutua y sincronización por eventos.

sincronización de los threads

a. Secciones Críticas

```
MAX = -infinito;
MIN = infinito;

for (i=0; i<N; i++)
{
  if (A[i] > MAX) MAX = A[i]
  if (A[i] < MIN) MIN = A[i]
}
```

```
MAX = -infinito;
MIN = infinito;
#pragma omp parallel for
for (i=0; i<N; i++)
{
 #pragma omp critical (M1)
  { if (A[i] > MAX) MAX = A[i] }
 #pragma omp critical (M2)
  { if (A[i] < MIN) MIN = A[i] }
}
```


sincronización de los threads

- atomic

Una sección crítica especial, para una operación simple de tipo RMW.

Por ejemplo:

```
...
#pragma omp atomic
        X = X + 1;
...
```


sincronización de los threads

b. Funciones con **locks** (cerrojos)

-- omp_set_lock (&C)

toma el lock o espera a que esté libre.

-- omp_unset_lock (&C)

libera el lock.

-- omp_test_lock (&C)

testea el valor del lock; devuelve T/F.

sincronización de los threads

- ejemplo

```
#pragma omp parallel private(mi_it)
{
 omp_set_lock(&C1);
 mi_it = i;
 i = i + 1;
 omp_unset_lock(&C1);
 while (mi_it<N)
 {
  A[mi_it] = A[mi_it] +1;
 omp_set_lock(&C1);
  mi_it = i;
  i = i + 1;
  omp_unset_lock(&C1);
 }
}
```


sincronización de los threads

c. Sincronización global: barreras

```
#pragma omp parallel private(tid)
{
 tid = omp_get_thread_num();
 A[tid] = func1(tid);
 #pragma omp barrier
 #pragma omp for
 for (i=0; i<N; i++) B[i] = func2(A, i);
 #pragma omp for  nowait
 for (i=0; i<N; i++) C[i] = func3(A, B, i);
 A[tid] = func4(tid);
}
```


Un ejemplo: cálculo de pi

```
static long   num_iter = 100000;
double        paso;
void main ()
{   int       i;
    double    x, pi, sum = 0.0;
    paso = 1.0 / (double) num_iter;

    for (i = 1; i <= num_iter; i++)
    {
       x = (i - 0.5) * paso;
       sum = sum + 4.0 / (1.0 + x*x);
    }
    pi = sum * paso;
}
```

Solución mediante threads: Win32 API

```
#include <windows.h>
#define NUM_THREADS 8
HANDLE thread_handles[NUM_THREADS];
CRITICAL_SECTION hUpdateMutex;
static long num_iter = 100000;
double paso;
double global_sum = 0.0;

void Pi (void *arg)
{
  int i, start;
  double x, sum = 0.0;
  start = *(int *) arg;
  paso = 1.0 / (double) num_iter;

  for (i = start; i <= num_iter; i = i + NUM_THREADS)
  {  x = (i - 0.5) * paso;
     sum = sum + 4.0 / (1.0 + x*x);
  }

  EnterCriticalSection(&hUpdateMutex);
  global_sum += sum;
  LeaveCriticalSection(&hUpdateMutex);
}
```

```
void main ()
{
  double pi; int i;
  DWORD threadID;
  int threadArg[NUM_THREADS];

  for (i = 0; i < NUM_THREADS; i++)
      threadArg[i] = i + 1;

  InitializeCriticalSection(&hUpdateMutex);

  for (i = 0; i < NUM_THREADS; i++)
  {   thread_handles[i] = CreateThread(0, 0,
      (LPTHREAD_START_ROUTINE) Pi,
      &threadArg[i], 0, &threadID);
  }

  WaitForMultipleObjects(NUM_THREADS,
      thread_handles, TRUE, INFINITE);

  pi = global_sum * paso;
  printf (" pi = %f \n", pi);
}
```

El código crece!

31

Solución: simplicidad

- Librerías de threads:
  - El programador tiene control sobre todo el proceso.
  - Cuidado: el programador debe(!) controlarlo todo.

En general, a mayor control, mayor complejidad para el programador. En muchas ocasiones es más útil un enfoque más sencillo.

32

Alternativa 1

Ejemplo de una región paralela (programa SPMD)

```
#include <omp.h>
static long num_iter = 100000;  double paso;
#define NUM_THREADS 8
void main ()
{  int i;       double x, pi, sum[NUM_THREADS];
   paso = 1.0 / (double) num_iter;
   omp_set_num_threads(NUM_THREADS);
   #pragma omp parallel
   {   double x;    int id;
       id = omp_get_thread_num();
       for (i = id, sum[id] = 0.0;  i <  num_iter;  i = i + NUM_THREADS)
       {     x = (i - 0.5) * paso;
             sum[id] += 4.0 / (1.0 + x*x);
       }
   }
   for (i = 0, pi = 0.0;  i < NUM_THREADS;  i++)   pi += sum[i] * paso;
}
```

SPMD:

Los threads ejecutan el mismo código; el identificador del thread permite elegir tareas específicas.

33

Alternativa 2:

Variables privadas y sección crítica

```
#include <omp.h>
static long num_iter = 100000;    double paso;
#define NUM_THREADS 8
void main ()
{  int i;       double  x, sum, pi=0.0;
   paso = 1.0 / (double) num_iter;
   omp_set_num_threads(NUM_THREADS)
   #pragma omp parallel private (x, sum)
   {   id = omp_get_thread_num();
       for (i=id,sum=0.0; i< num_iter; i=i+NUM_THREADS) {
            x = (i - 0.5) * paso;
            sum += 4.0 / (1.0 + x*x);
       }
       #pragma omp critical
       pi += sum * paso
   }
}
```

No es necesario crear un array para almacenar sumas locales.

34

Solución OpenMP

Parallel for con reduction

```
#include <omp.h>
static long num_iter = 100000;    double paso;
#define NUM_THREADS 8
void main ()
{   int i;       double x, pi, sum = 0.0;
    paso = 1.0 / (double) num_iter;
    omp_set_num_threads(NUM_THREADS)
    #pragma omp parallel for reduction(+:sum) private(x)
     for (i = 1; i <= num_iter; i++)
     {  x = (i - 0.5) * paso;
        sum = sum + 4.0 / (1.0 + x*x);
     }
    pi = sum * paso;
}
```

El código OpenMP es sencillo y "corto"

35

MPI vs. OpenMP

- No existe la mejor aproximación para escribir códigos paralelos. Cada una tiene sus ventajas y desventajas:
  - **MPI** - poderoso, general, y universal, compuesto de rutinas de paso de mensaje las cuales proveen un control muy fino sobre las comunicaciones, pero obliga al programador a operar en un relativo bajo nivel de abstracción.
  - **OpenMP** – conceptualmente es una sencilla aproximación para desarrollar códigos paralelos sobre máquinas de memoria compartida, pero no es aplicable a plataformas de memoria distribuida.

36

MPI vs. OpenMP

- MPI es más general y portable (plataformas, aunque no es eficiente en sistemas SMPs).
- La arquitectura y el problema a resolver frecuentemente hacen que la decisión sea suya!!!

Referencias

TEXTOS

- R. Chandra et al.
  Parallel Programming in OpenMP
  Morgan Kaufmann, 2001.

WEB

- www.openmp.org (especificación 2.0, software, …).
- En mi página hay links a muchos otros recursos.

COMPILADORES

- pagos (++).
- libres: p. e., el compilador de C/C++ de Intel (hay +).

Bola de Cristal SD

- Clustering?
  - Si, seguirá siendo importante! (incluso bajará clustering a nivel de micros)
- Grid computing?
  - Algo de cuerda todavía, especialmente temas de Seguridad, Interoperabilidad y Aplicaciones.
- P2P
  - "De moda" gracias a emule, torrents, etc… queda bastante por hacer aquí.
- Confluencia P2P y Grid.
- Sensor Networks / Wireless.
- Etc. (haciendo que la bola de cristal sea 100% efectiva ☺).

Dado que esta es la Ultima Clase…

Nos Vemos!!!

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
void main (int argc, char *argv[]) {
       int rank;
       MPI_Init(&argc, &argv);
       MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
       printf("Bye world from %d\n", rank);
       MPI_Finalize();
}
```


Gracias…