

并行计算 Lab1: OpenMP

1. 实验简介

OpenMP 是一个共享存储并行系统上的应用程序接口。它规范了一系列的编译制导、运行库例程和环境变量。

OpenMP 使用 `FORK-JOIN` 并行执行模型。所有的 OpenMP 程序开始于一个单独的主线程（Master Thread）。主线程会一直串行地执行，直到遇到第一个并行域（Parallel Region）才开始并行执行。

- ① `FORK`：主线程创建一队并行的线程，然后，并行域中的代码在不同的线程队中并行执行；
- ② `JOIN`：当诸线程在并行域中执行完之后，它们或被同步或被中断，最后只有主线程在执行。

2. 计算 Pi

2.1 代码分析

Pi (串行)

计算圆周率 π ，原理为： $\pi \approx \Delta x \sum_{i=1}^n \frac{4}{1+x_i^2}$ ，其中：

- n 是 `num_steps`，表示将区间分为多少部分
- Δx 是 `step`，表示每部分的宽度，计算为 $\frac{1}{n}$
- x_i 表示第 i 个矩形的中点，计算为 $(i - 0.5) \cdot \Delta x$

所以代码核心为一个 for 循环，且循环之间没有数据依赖。

Pi (使用并行域并行化的程序)

设置了两个线程，使用并行域，将原来的 for 循环拆分到两个线程中并行执行。

Pi (使用共享任务结构并行化的程序)

将计算任务分为两个线程，并使用 OpenMP 的 `#pragma omp for` 语句自动分配循环迭代给各个线程。

Pi (使用 private 子句和 critical 部分并行化的程序)

设置了两个线程，使用并行域，将原来的 for 循环拆分到两个线程中并行执行。`#pragma omp critical` 指定了需要保证互斥的代码段，求和操作互斥进行。

Pi (使用并行规约的并程序序)

设置了两个线程，使用并行域，将原来的 for 循环拆分到两个线程中并行执行。最后对线程中所以 sum 进行+规约，并更新 sum 的全局值

2.2 修改部分

- 为所有代码引入手动输入 `num_steps`，输出运行时间
- Pi (使用并行域并行化的程序) 代码中，删除并行域内的 `x` 的声明，将 `x` 和 `i` 加入 `private`
- Pi (使用共享任务结构并行化的程序) 中，删除并行域内的 `x` 的声明，将 `x` 和 `i` 加入 `private`
- Pi (使用private子句和critical部分并行化的程序)，将 `i` 加入 `private`

- Pi (使用private子句和critical部分并行化的程序), 将 i 加入 private

2.3 运行结果

```
Running Pi_0
Pi_0 output:
Time: 5.557228 seconds
3.1415926536
Running Pi_1
Pi_1 output:
Time: 4.571054 seconds
3.1415926536
Running Pi_2
Pi_2 output:
Time: 4.345672 seconds
3.1415926536
Running Pi_3
Pi_3 output:
Time: 3.469676 seconds
3.1415926536
Running Pi_4
Pi_4 output:
Time: 3.082846 seconds
3.1415926536
```

可以看到, 并行程序虽然将主要的 for 循环拆分到两个线程并行执行, 但是运行时间并没有减到串行程序的一半。

原因主要在于并行计算需要额外的线程创建、线程同步等操作, 引入了额外的开销。

此外可以看出, 四种并行方法中, 使用并行规约的并行程序效率最高。

3. PSRS 排序

3.1 思想

- (1) **均匀划分**: 将 n 个元素 $A[1..n]$ 均匀划分成 p 段, 每个 p_i 处理 $A[(i-1)n/p+1..in/p]$
- (2) **局部排序**: p_i 调用串行排序算法对 $A[(i-1)n/p+1..in/p]$ 排序
- (3) **选取样本**: p_i 从其有序子序列 $A[(i-1)n/p+1..in/p]$ 中选取 p 个样本元素
- (4) **样本排序**: 用一台处理器对 p^2 个样本元素进行串行排序
- (5) **选择主元**: 用一台处理器从排好序的样本序列中选取 $p-1$ 个主元, 并播送给其他 p_i
- (6) **主元划分**: p_i 按主元将有序段 $A[(i-1)n/p+1..in/p]$ 划分成 p 段
- (7) **全局交换**: 各处理器将其有序段按段号交换到对应的处理器中

(8) 归并排序：各处理器对接收到的元素进行归并排序

3.2 核心代码

八个步骤中，最后三步较为复杂。

step 6 & step 7

首先，设置了划分后存储的数组：

```
int parts[NUM_THREADS][NUM_THREADS][N]; // 第i个线程，发往来自各个线程的有序数组
int count[NUM_THREADS][NUM_THREADS]; // 第i个线程，发往各个线程的数据数目
// 以上两个数组，除去第一维，即为某个线程局部数据划分出的数组，一个存数据，一个存个数
```

然后根据选出的主元进行划分：

```
#pragma omp parallel
{
    int id = omp_get_thread_num();
    int pstart = id * N / NUM_THREADS;
    int pend = (id + 1) * N / NUM_THREADS;
    int index = 0; // 主元下标
    int j = pstart;
    while (j < pend && index < NUM_THREADS - 1) {
        if (A[j] < pivots[index]) {
            parts[id][index][count[id][index]] = A[j];
            count[id][index]++; // <= pivot[index] 的有 count[i][index] 个
            j++;
        }
        else {
            index++;
        }
    }
    // 大于最后一个主元的部分：此时 index = NUM_THREADS - 1
    while (j < pend) {
        parts[id][index][count[id][index]] = A[j];
        count[id][index]++;
        j++;
    }
}
// 至此，每个线程 pi 只需要处理 parts[][i][]
```

之后每个线程获得了 `NUM_THREADS` 个有序数组。

step 8

第八步则是对这些数组进行 Merge，因为是已经各自有序，所以不需要递归。

```
int result[NUM_THREADS][N];
int result_count[NUM_THREADS];
#pragma omp parallel
{
    int id = omp_get_thread_num();
    int total_count = 0;
```

```

int* tmp = (int*)malloc(N * sizeof(int));
int tmp_count = 0;
for (int index = 0; index < NUM_THREADS; index++) {
    // Merge: result[] 和 parts[index][id][]
    int i = 0, j = 0, k = 0;
    int A_count = total_count;
    int B_count = count[index][id];
    tmp_count = A_count + B_count;
    while (i < A_count && j < B_count) {
        if (result[id][i] <= parts[index][id][j]) tmp[k++] = result[id]
[i++];
        else tmp[k++] = parts[index][id][j++];
    }
    while (i < A_count) tmp[k++] = result[id][i++];
    while (j < B_count) tmp[k++] = parts[index][id][j++];
    total_count = tmp_count;
    for (int l = 0; l < tmp_count; l++) {
        result[id][l] = tmp[l];
    }
}
result_count[id] = total_count;
}

```

for 循环里面就是每次对两个数组进行 Merge。

3.3 结果

本程序需要手动输入待排序的元素个数以及线程数。

运行结果：

```

xxa@ubuntu:~/Desktop/Parallel-Computing-Labs/Lab1$ ./PSRS
please input the number of numbers:
27
please input the number of threads:
3
number of threads: 3
before sorting:
67 93 59 90 36 22 42 75 11 11 31 35 68 99 4 7 89 17 3 98 71 9 26 31 35 72 57
after sorting:
3 4 7 9 11 11 17 22 26 31 31 35 35 36 42 57 59 67 68 71 72 75 89 90 93 98 99

```

4. 附录

- PB20061343_徐奥_实验一.pdf：实验报告
- Pi_0.cpp：Pi (串行)
- Pi_1.cpp：Pi (使用并行域并行化的程序)
- Pi_2.cpp：Pi (使用共享任务结构并行化的程序)
- Pi_3.cpp：Pi (使用 private 子句和 critical 部分并行化的程序)
- Pi_4.cpp：Pi (使用并行规约的并行程序)
- PSRS.cpp：PSRS 排序