

# Parellel Programming HW1

113065508 黃為翰

## Implementation

### Overview

這次作業，我的整體流程為

1. 先把input path & output path 同步到所有的rank
  2. 以近乎平均的數量把N個元素分配給P個rank
  3. 平行I/O -> 每個rank直接從共享檔案中讀取自己負責的區段
  4. Local sort : 對本地的各rank做std::sort
  5. Odd-Even Sort : 跟鄰居做Compare, 相鄰區段反覆交換與合併，直到沒有交換的事件發生為止
  6. 平行I/O -> 每個rank將排序後的區段寫回檔案中
- Input / Output format
    - Input: binary檔，內容為32-bit浮點數
    - Output: 同格式的binary檔

### 1. Parameter Distribution

#### 1.1 Broad cast input, output path :

- 只有rank 0 會解析命令參數 N, input path, output path
  - MPI\_Bcast 會廣播N到其他所有rank
  - 設計一個function bcast\_str -> 先廣播長度，在廣播內容(input path, output path)到所有rank
    1. 先用MPI\_Comm\_rank(comm, &rank) 來取得rank，用於後面判斷自己是不是root
    2. root把len設為s.size()其餘為預設0 -> 廣播len
    3. 每個rank都準備好接收資料的空間 buf (len)
    4. root把原始字串的內容複製到len裡面 -> 廣播input/output path
    5. 不是root的其他rank用 s.assign(buf.data(), buf.data() + len); 來重建出自己的string s

```
static void bcast_str(string& s, int root, MPI_Comm comm) {
    int rank;
    MPI_Comm_rank(comm, &rank);
    int len = (rank == root) ? s.size() : 0;
    MPI_Bcast(&len, 1, MPI_INT, root, comm);
    vector<char> buf(len);

    if (rank == root && len) {
        memcpy(buf.data(), s.data(), len);
    }
    if (len) MPI_Bcast(buf.data(), len, MPI_CHAR, root, comm);
    if (rank != root) {
        s.assign(buf.data(), buf.data() + len);
    }
}
```

```

    }
}
}
```

## 1.2 Data partitioning

- 將 N 個 data 平分為 P 份
  - 藉由計算餘數 rem 就可以使 N 就算不整除也可以正確平分元素給所有的 rank
- `vector<int> count`: Number of elements each rank need to read
- `vector<int> displacement`: 快速計算每個 rank 要從原始 input 的哪個 index 開始讀資料

```

static void separate_interval(ull N, int P, vector<int>& counts, vector<int>&
displs) {
    counts.resize(P);
    displs.resize(P);
    ull base = N / P;
    ull rem = N % P;
    long long offset = 0;

    for (int r = 0; r < P; r++) {
        // c : # of elements `r`th rank need to read
        ull c = base + (r < rem ? 1 : 0);
        counts[r] = c;
        // displacement from original array (where to start reading data)
        displs[r] = offset;
        offset += (long long)c;
    }
}
```

## 2. Parallel I/O (MPI-IO)

這段開始是被寫在 `int main()` 裡面

- 每一個 rank 直接對共享檔案操作自己的連續區段，不用集中到 root

### 2.1 Function call of previous section

- 在知道設定的 rank 數量以及 `N`, `input/output path` 之後
  1. 把 N 先告訴所有人
  2. call `bcast_str` 把 input/output path 讓所有 rank 知道
  3. call `separate_interval` 計算每一個 rank 所需要讀的數量以及要從哪一個 index 開始讀

```

MPI_Init(&argc, &argv);

int rank, size;
MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);

ull N = 0;
```

```

string input_path, output_path;
if (rank == 0) {
    N = strtoull(argv[1], nullptr, 10);
    input_path = argv[2];
    output_path = argv[3];
}

MPI_Bcast(&N, 1, MPI_UNSIGNED_LONG_LONG, 0, MPI_COMM_WORLD);
bcast_str(input_path, 0, MPI_COMM_WORLD);
bcast_str(output_path, 0, MPI_COMM_WORLD);

vector<int> counts, displs;
separate_interval(N, size, counts, displs);

```

## 2.2 Main I/O Process

- 使用 `MPI_File_open` 來打開檔案
- Use `MPI_File_read_at_all` 來讀取檔案內容
  - `MPI_File_read_at_all`裡面的參數為

<code>MPI_File_read_at_all(</code>		
<code>/*fh*/</code>	<code>fin,</code>	--> <code>MPI_File</code> 打開的檔案
<code>/*offset*/</code>	<code>byte_offset,</code>	--> 檔案位移
<code>/*buf*/</code>	<code>local_n ? local.data() : NULL,</code>	--> 要讀到哪裡
<code>/*count*/</code>	<code>local_n,</code>	--> 要讀幾個元素
<code>/*datatype*/</code>	<code>MPI_FLOAT,</code>	--> 每個元素的type
<code>/*status*/</code>	<code>&amp;st</code>	
<code>);</code>		

- 比起 `MPI_File_read` 更適合做這種"每個rank讀取自己要的段落"的操作
  - `MPI_File_read` : 會從 file pointer 開始讀檔，但可以用 `MPI_File_seek` 來改變 pointer 的位置
  - `MPI_File_read_at_all` : 多一個 at 可以讓我直接從 offset 的地方讀

```

int local_n = counts[rank];
long long local_off_elems = displs[rank];
MPI_File fin, fout;

vector<float> local(local_n);

// ===== File in =====

MPI_File_open(MPI_COMM_WORLD, input_path.c_str(), MPI_MODE_RDONLY,
MPI_INFO_NULL, &fin);

MPI_Status st;
MPI_Offset byte_offset = (MPI_Offset)local_off_elems * sizeof(float);
MPI_File_read_at_all(fin, byte_offset, local_n ? local.data() : nullptr,

```

```
local_n, MPI_FLOAT, &st);
MPI_File_close(&fin);
```

### 3. Sorting

#### 3.1 Local sort

- Use `sort()` in C++ std library
  - 採用的是introsort (quicksort + heapsort + insertion sort)
  - 使用的空間是O(1), 且時間複雜度平均以及最壞都為O(n log n)

#### 3.2 Odd-Even sort

- 在local排序好之後進入while迴圈 `while(true)`

1. 進入while迴圈之後每一輪都跑兩個階段

- state = 0 --> odd phase, state = 1 --> even phase
- 如果neighbor超出範圍 --> 直接continue

```
for (int state = 0; state < 2; state++) {
    int neighbor = ((rank % 2) == state) ? (rank + 1) : (rank - 1);
    if (neighbor < 0 || neighbor >= size) {
        continue;
    }
    ...
}
```

2. 接下來就是做"鄰居互換"這個動作

- `recvbuf` 用來存放鄰居傳過來的資料
- 使用`MPI_Sendrecv()`來交換資料
  - `MPI_Sendrecv`的參數如下

```
MPI_Sendrecv(
    /*sendbuf*/ local_n ? local.data() : nullptr,           -->要送出的資料
    /*sendcount*/ local_n,                                -->要送出的資料有多大
    /*sendtype*/ MPI_FLOAT,                            -->資料type
    /*dest*/ neighbor,                                -->送給哪個rank
    /*sendtag*/ 0,                                     -->標記

    /*recvbuf*/ neighbor_n ? recvbuf.data() : nullptr, -->把資料放進
    recvbuf
    /*recvcount*/ neighbor_n,                          -->鄰居資料有多大
    /*recvtype*/ MPI_FLOAT,                           -->資料type
    /*source*/ neighbor,                            -->從哪裡送來
    /*recvtag*/ 0,
```

```

/*comm*/      MPI_COMM_WORLD,
/*status*/    MPI_STATUS_IGNORE
);

```

- MPI\_Sendrecv是一個blocking式的點對點通訊 ->要兩邊都同時傳出之後才會return
- 實際傳輸的code如下

```

vector<float> recvbuf;

int neighbor_n = counts[neighbor];
recvbuf.resize(neighbor_n);
MPI_Sendrecv(local_n ? local.data() : nullptr, local_n, MPI_FLOAT, neighbor,
0,
neighbor_n ? recvbuf.data() : nullptr, neighbor_n,
MPI_FLOAT, neighbor, 0,
MPI_COMM_WORLD, MPI_STATUS_IGNORE);

```

3. 當每個rank都有自己跟neighbor的資料之後，就可以排序之後看看自己是該保留比較大的那一半還是比較小的那一半

- 會用到兩個helper function --> `low_half()`, `high_half()`
  - `low_half`: 合併 A, B, 取出最小的A.size個元素並存到 `vector<int> out`裡面
  - `high_half`: 合併 A, B, 取出最大的B.size個元素並存到 `vector<int> out`裡面
    - 上面兩者個做法是使用兩指標的merge (因為 A, B各自都已經排序好了)
    - 每次比較A[i]以及B[j], 把比較小/大的放進out[k], 並把pointer + 1
  - 回傳 `A != out` 表示這次compare-split是否有改變local的資料

```

static bool low_half(const vector<float>& A, const vector<float>& B,
vector<float>& out) {
int needed = A.size();
out.resize(needed);
int i = 0, j = 0, k = 0;
while (k < needed) {
    float v;
    if (j >= B.size() || (i < A.size() && A[i] <= B[j])) v = A[i++];
    else v = B[j++];
    out[k++] = v;
}

return A != out;
}

static bool high_half(const vector<float>& A, const vector<float>& B,
vector<float>& out) {
int needed = A.size();
out.resize(needed);
int i = A.size() - 1;

```

```

int j = B.size() - 1;
int k = needed - 1;

while (k >= 0) {
    float v;
    if (j < 0 || (i >= 0 && A[i] >= B[j])) v = A[i--];
    else v = B[j--];
    out[k--] = v;
}

return A != out;
}

```

4. 使用上面所寫的兩個helper function來把排序好的資料分給兩個rank，並記錄此次iteration是否有發生交換

- 如果有change的話就把global change 設為true，表示還需要進行下一個iteration

```

bool changed = false;
if (rank < neighbor) {
    changed = low_half(local, recvbuf, nextbuf);
}
else {
    changed = high_half(local, recvbuf, nextbuf);
}
if (changed) {
    local.swap(nextbuf);
    global_change = true;
}

```

5. 兩個phase都做完之後，要看看這一輪是否有人有變動

- 做一次全域的OR就可以知道這一輪是否有rank有所變動

```

int flag = global_change ? 1 : 0;
int allflag = 0;
MPI_Allreduce(&flag, &allflag, 1, MPI_INT, MPI_LOR, MPI_COMM_WORLD);
if (!allflag) break;

```

- MPI\_Allreduce裡面的參數如下

<code>MPI_Allreduce(</code>	
<code>/*sendbuf*/ &amp;flag,</code>	-->本地的0/1 (本輪是否有改變)
<code>/*recvbuf*/ &amp;allflag,</code>	-->全域OR之後的結果
<code>/*count*/ 1,</code>	-->元素個數
<code>/*datatype*/MPI_INT,</code>	
<code>/*op*/ MPI_LOR,</code>	
<code>/*comm*/ MPI_COMM_WORLD</code>	

```
 );
```

- 如果都沒有任何人有改變的話 --> break while loop

## 4. File output

```
// ===== File out =====
MPI_File_open(MPI_COMM_WORLD, output_path.c_str(), MPI_MODE_CREATE |
MPI_MODE_WRONLY, MPI_INFO_NULL, &fout);

MPI_File_write_at_all(fout, byte_offset, local_n ? local.data() : nullptr,
local_n, MPI_FLOAT, &st);

MPI_File_close(&fout);
```

- 這裡用到的MPI\_File\_write\_at\_all裡面的參數如下

```
MPI_File_write_at_all(
/*fh*/        fout,
/*offset*/    byte_offset,
/*buf*/       local_n ? local.data() : nullptr,
/*count*/     local_n,
/*datatype*/ MPI_FLOAT,
/*status*/    &st
);
```

## 5. Optimization

### 1. Perform early stop

- I performed early stop to reduce the time of merging 2 arrays
  - 捕捉 array A, B 的 edges edges[2] and nb\_edge[2]
  - Compare the edge of both array
    - if rank < neighbor --> if edges[1] > nb\_edges[0] --> need change
    - if rank > neighbor --> if edges[0] < nb\_edges[1] --> need change
    - Otherwise --> continue
  - 做這個可以避免明明這兩個rank本來已經有做好排序卻還需要再進行一次merge並得到相同的結果
    - early stop雖然也需要communication,但是只需要傳遞兩個數字就好
  - 有了early stop的機制之後大約會讓時間從150 -> 140

```
// Early stop check
float edges[2];
if (local_n > 0) {
```

```

        edges[0] = local.front();
        edges[1] = local.back();
    } else {
        edges[0] = std::numeric_limits<float>::infinity();
        edges[1] = -std::numeric_limits<float>::infinity();
    }
    float nb_edges[2];

    double tc = tic();
    MPI_Sendrecv(edges, 2, MPI_FLOAT, neighbor, 100,
                 nb_edges, 2, MPI_FLOAT, neighbor, 100,
                 MPI_COMM_WORLD, MPI_STATUS_IGNORE);
    t_comm += (tic() - tc);

    bool need_exchange = false;
    if (local_n > 0 && neighbor_n > 0) {
        if (rank < neighbor) {
            need_exchange = !(edges[1] <= nb_edges[0]);
        } else {
            need_exchange = !(edges[0] >= nb_edges[1]);
        }
    }
    if (!need_exchange) continue;

```

## 2. Improve local sort

- 一開始是使用 C++ 的 std::sort() 來做 local sort，但是後來發現有一個 library #include <boost/sort/spreadsort/spreadsort.hpp> 裡面有一些更厲害的做法，我就把它套用在我的程式裡面
  - 因為我發現他是針對比較大的資料集，所以我也對其做了簡單的分割

```

if(local_n >= 100000) bs::float_sort(local.begin(), local.end());
else sort(local.begin(), local.end());

```

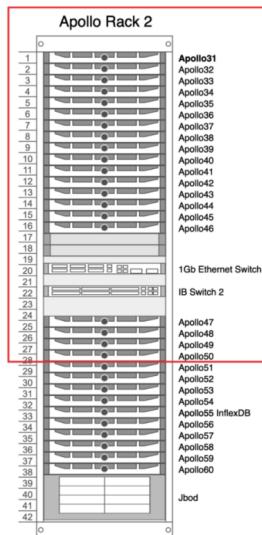
- Move from sort -> spread sort --> 139.6 -> 114.91

## Experiments and Analysis

### System

- 我是使用server預設的機器來執行 (圖片為Lab1時助教的介紹投影片)

## Platform Introduction - Apollo Origo



- 40 nodes for this course
  - 1 head node: apollo1
  - 35 compute nodes
  - 4 storage nodes: apollo[16-19]
- 2x Intel X5670 6 cores @ 2.93GHz
  - HyperThreading is enabled only on the head node
- 96GB RAM on each node
- 40Gb/s QDR InfiniBand
- Debian 12 (kernel 6.1.0)
- Storage
  - /home & /share: BeeGFS parallel file system
    - For performance benchmarking
  - /opt: NFS



- 計算performance：我使用 `MPI_Wtime()` 來計算時間，在I/O的前後，Sendrecv的前後，以及在計算sort / merge等地方的前後計算時間
  - i/o time
  - communication time
  - computation time
  - 以下列出幾個範例

```

ts = tic();

MPI_File_open(MPI_COMM_WORLD, input_path.c_str(), MPI_MODE_RDONLY,
MPI_INFO_NULL, &fin);
...
...

t_io += (tic() - ts);
// =====
ts = tic();
//sort(local.begin(), local.end());
if(local_n >= 100000) bs::float_sort(local.begin(), local.end());
else sort(local.begin(), local.end());
t_comp += (tic() - ts);

// =====

double tc = tic();
MPI_Sendrecv(edges, 2, MPI_FLOAT, neighbor, 100,
nb_edges, 2, MPI_FLOAT, neighbor, 100,
MPI_COMM_WORLD, MPI_STATUS_IGNORE);
t_comm += (tic() - tc);

```

## Plots

- 我使用的資料是testcase 30.txt, 詳細資訊如下
  - 選這個testcase是因為他有足夠大的資料量可以拿來作比較，在跑只有一個processor的時候也剛好不會太久

```
"n": 64123483,
"nodes": 2,
"procs": 24,
"time": 180
```

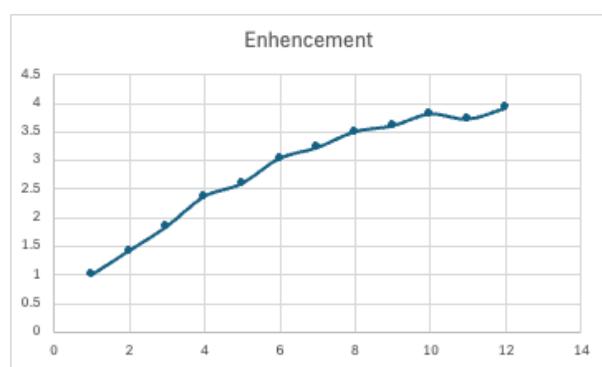
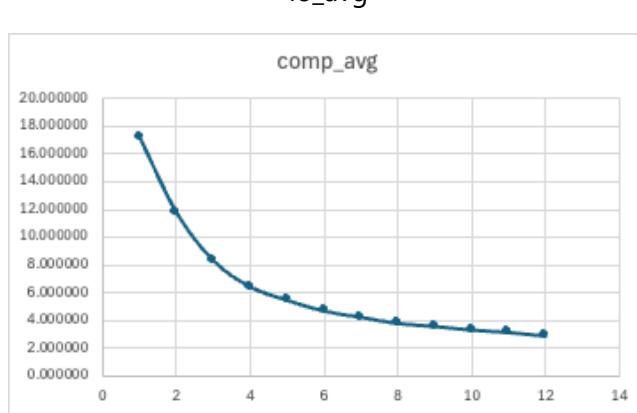
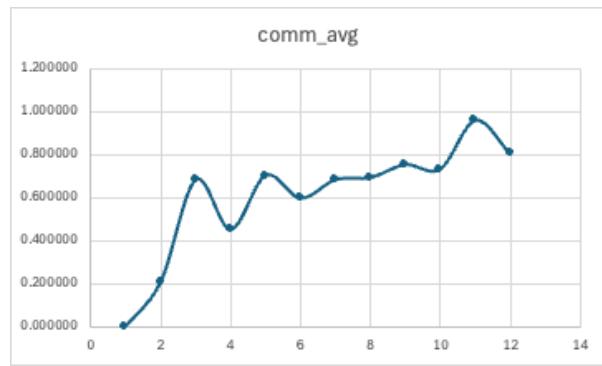
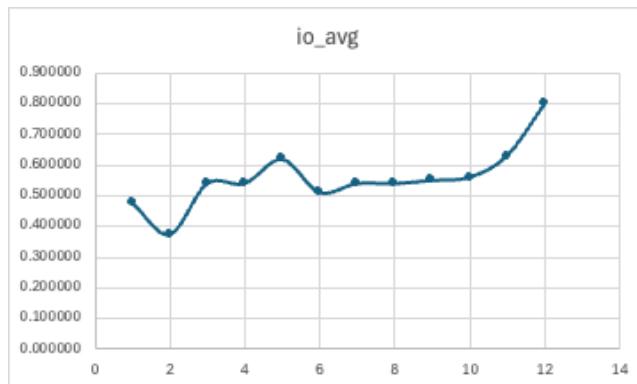
我總共做了兩相比較

- 固定使用一個node, 逐步提升processor的數量 (1-12)
- 固定都使用12個processor, 比較不同node的數量 (1-4)

- 我所做的統計方式是先使用MPI\_Wtime()把computation time, communication time, i/o tome都每個rank各自統計好之後取平均 而total\_wall則是取所花時間最久的那個rank
- Data :

P	nodes	io_avg	comm_avg	comp_avg	total_wall
1	1	0.475042	0.000037	17.262683	17.970155
2	1	0.372293	0.208584	11.824709	12.611812
3	1	0.538909	0.681425	8.353600	9.723063
4	1	0.538999	0.450070	6.469083	7.572309
5	1	0.618254	0.701607	5.500111	6.911565
6	1	0.509582	0.595049	4.721785	5.911501
7	1	0.538997	0.681598	4.276460	5.569597
8	1	0.538416	0.691028	3.829767	5.126488
9	1	0.549118	0.751068	3.620997	4.982676
10	1	0.559014	0.730399	3.362643	4.710898
11	1	0.629006	0.956769	3.185742	4.825485
12	1	0.798058	0.802129	2.930846	4.589616

- 以下表格是我單獨拿出三個指標，以及以一個processor的total\_wall為基準比較1-12個processor的效能提升
  - (enhancement 可以對應到speed up)
  - (computation time 可以對應到CPU time)

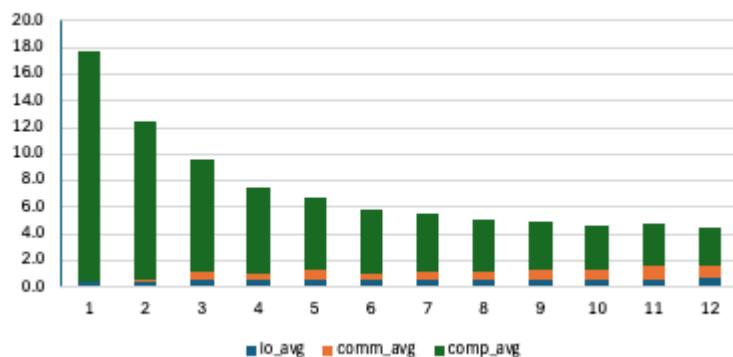


comp\_avg

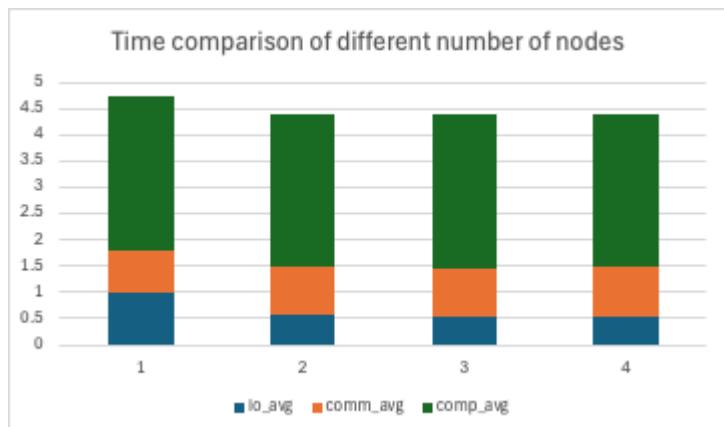
Enhancement

- 以下表格是一個total running time的比較以及可以直觀地看到每個time category的比例

Time Comparison of different numbers processors



- 以下是比較同樣node數量的狀況下，不同node數量的時間比例比較圖



## Discussion

---

首先看到 `comp_avg` 的地方，隨著 processor 的數量增加，計算時間有很明顯的下降趨勢，尤其是在 1-4 的階段效益最明顯，之後的效益會遞減。可以發現增加 processor 的數量確實可以有效提升計算效率，但是因為效益會遞減，可見不是毫無策略得增加 processor 就一定可以得到明顯的效能提升，而是可以根據這樣的結果來判斷最划算的選擇。

跟整體趨勢比較不同的是，在 processor 為 11, 12 的時候，其實整體的運作時間是有往上升的，可能是因為 MPI 溝通時間的增加量已經大於多 CPU 所節省的時間了，導致反而會讓總時間增加，因此這時比較重要的部分就不是 CPU time 而是 Communication time 了

---

接下來是 `comm_avg` 的地方，可以看到綜合的趨勢是往上升的，也代表越多的 processor 會花越多時間做 communication，這點很合理，也符合預期。因為多個 processor 也意味著會有比較多次的 iteration，資料交換的次數也會變多。

而 `io_avg` 可以發現整體大致持平但是在最 processor 比較多的時候會往上升。

在 `enhancement` 的地方也可以看到，最多 processor 的跟只有一個的比起來會有接近 4 倍的提升，但是在越後面的時候提升的趨勢也會趨緩，也可以依此作為根據決定這個資料量的計算要使用多少 processor

---

而在固定 12 個 processor 變不同 node 數量的比較中，可以發現總時間幾乎沒有下降，所以可以發現在相同 processor 的狀況下增加 node 的數量並不會對這個 project 的應用有效率上的提升。

## Conclusion

做完這次作業，我感覺對 MPI 如何平行處理程式的運作有了更多的了解，實作上課中所學到的知識會讓我對 MPI 的運作更加熟悉。藉由時間上的分析也可以看到在資料量非常大的狀況下，對資料做平行處理可以節省多少時間，改變 sorting 的方式又有多少效能提升，可見其重要性。

在寫程式的時候也會遇到一些問題，像是為了要修改一個地方導致其他地方出錯，而改著改著程式就會在奇怪的地方有 error 讓我必須要回溯到之前的版本慢慢找哪個地方出錯。

我覺得這次作業起到的是一個開頭的作用，讓我們在熟悉平行計算的方式之後在接上更深入的方法及應用，這個作業相信會起到很好的啟發效果。