中山大学计算机学院本科生实验报告

课程名称：超级计算机原理与操作　　任课教师：吴迪&黄聃

年级	2019 级	专业（方向）	计算机科学与技术
学号	18329015	姓名	郝裕玮
开始日期	2021.5.6	完成日期	2021.5.11

一、实验题目

nbody 问题

二、实验内容

实验题目内容为：根据 7-Development.pdf 课件在 nbody 问题或者 tsp 问题中二选一进行实现，要求实现一个串行版本和 MPI，OpenMP，pthread 中的任意两种版本。

在经过学习和对比之后，我决定实现 nbody 问题的串行，OpenMP 和 pthread 的三种版本。

（1）串行版本

具体分析已全部放在代码注释中，代码如下所示：

```
#include<iostream>
#include<cmath>    //公式里需要用到 sqrt 开根函数
#include<fstream> //该头文件用于读写文件
#include<iomanip> //该头文件用于控制数据精度
#include<sys/time.h> //标准日期时间头文件，用于计算运行时间
using namespace std;

#define timestep 20      //迭代次数
#define dT 0.005         //时间间隔
#define G 1              //引力常数
#define MAX 1024         //各信息的数组大小均设置为 1024，与粒子个数相同
#define particles 1024    //数据集中共有 1024 个粒子

#define GET_TIME(now) { \
   struct timeval t; \
   gettimeofday(&t, NULL); \
   now = t.tv_sec + t.tv_usec/1000000.0; \
}
//最后一行将 us 转换为 s，统一单位
```

```
//该结构体用于计算程序串行部分运行时间

struct information
{
   double x;
   double y;
   double z;
}pos[MAX],v[MAX];//初始化两个数组，分别为每个粒子的位置和速度
                 //数组内部每个元素存储了对应粒子在 x 轴，y 轴，z 轴上的对应分量

int main()
{
   int i,j,k,s;//循环变量
   double x_diff,y_diff,z_diff;//两粒子之间在三条坐标轴上的相对距离
   double dist,dist_cubed;//两粒子之间的绝对距离和绝对距离的立方
   double x_f,y_f,z_f;//两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量
   double m[MAX];//每个粒子的质量
   double start,end;//用于计算串行部分的开始时间和结束时间

   ifstream myfile("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\nbody_init.txt");
//打开数据集文件
   for(i=0;i<=particles-1;i++){
      myfile>>m[i]>>pos[i].x>>pos[i].y>>pos[i].z>>v[i].x>>v[i].y>>v[i].z;//根据题目
要求将每一行的数据写入到各数组对应的结构体成员中
   }

   GET_TIME(start);//串行开始
   for(k=1;k<=timestep;k++){//迭代次数为 timestep 次（20）
      for(i=0;i<=particles-1;i++){//遍历每个粒子
         x_f=0;
         y_f=0;
         z_f=0;
         //每次遍历该粒子以外的粒子之前需要先将作用力清空，防止与上一个粒子在三个方向上所
受的作用力相叠加
         for(j=0;j<=particles-1;j++){//遍历该粒子以外的所有粒子
         //因为该粒子以外的所有粒子都对它有作用力
            if(i==j){//该粒子本身可以跳过
               continue;
            }
            x_diff=pos[i].x-pos[j].x;
            y_diff=pos[i].y-pos[j].y;
            z_diff=pos[i].z-pos[j].z;
            //计算两粒子在三条坐标轴上的相对距离

            dist=sqrt(x_diff*x_diff+y_diff*y_diff+z_diff*z_diff);//计算两粒子之间的
绝对距离
```

```
            dist_cubed=dist*dist*dist;//计算距离的立方

            x_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*x_diff;
            y_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*y_diff;
            z_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*z_diff;
            //计算两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量
         }
         v[i].x+=dT*x_f/m[i];
         v[i].y+=dT*y_f/m[i];
         v[i].z+=dT*z_f/m[i];
         //利用 dv=f*dT/m(动量定理)来更新粒子在三条坐标轴上的速度分量
      }
      for(s=0;s<=particles-1;s++){//遍历每个粒子
         pos[s].x+=dT*v[s].x;
         pos[s].y+=dT*v[s].y;
         pos[s].z+=dT*v[s].z;
         //利用 d=d0+v*dT 来更新粒子在三条坐标轴上的坐标
      }
   }
   GET_TIME(end);//获取串行部分结束时间
   cout<<end-start<<endl;//输出运行时间

   ofstream outfile;
   outfile.open("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\serial_result.txt",i
os::out);
   //准备将结果写入 serial_result 文件中
   for(i=0;i<=particles-1;i++){
      outfile<<setprecision(15)<<m[i]<<' '<<pos[i].x<<' '<<pos[i].y<<' '<<pos[i].z
<<' '<<v[i].x<<' '<<v[i].y<<' '<<v[i].z<<endl;
      //将数据保留 15 位小数并按照要求把每个粒子的数据按顺序写入每行，一行数据代表一个粒子
   }

   myfile.close();
   outfile.close();
   //关闭文件
   system("pause");
}
```

（2）OpenMP 版本

OpenMP 版本大体内容与串行版本保持一致，唯一的不同是在三个循环前均增加了#pragma omp 指令。同时需要注意修改编译参数（eg.在 VSCode 上编译时，需要在 tasks.json 中的 args 里添加一行”-fopenmp”）。

```
    "args": [
        "-g",
        "${file}",
        "-fopenmp",//需要添加的
        "-o",
        "${fileBasenameNoExtension}.exe"
    ], // 编译命令参数
```

绝大部分分析已全部放在代码注释中，代码如下所示：

```
#include<iostream>
#include<cmath>    //公式里需要用到 sqrt 开根函数
#include<fstream> //该头文件用于读写文件
#include<iomanip> //该头文件用于控制数据精度
#include<sys/time.h> //标准日期时间头文件，用于计算运行时间
using namespace std;

#define timestep 20      //迭代次数
#define dT 0.005         //时间间隔
#define G 1              //引力常数
#define MAX 1024         //各信息的数组大小均设置为 1024，与粒子个数相同
#define particles 1024    //数据集中共有 1024 个粒子

#define GET_TIME(now) { \
   struct timeval t; \
   gettimeofday(&t, NULL); \
   now = t.tv_sec + t.tv_usec/1000000.0; \
}
//最后一行将 us 转换为 s，统一单位
//该结构体用于计算程序串行部分运行时间

struct information
{
   double x;
   double y;
   double z;
}pos[MAX],v[MAX];//初始化两个数组，分别为每个粒子的位置和速度
                 //数组内部每个元素存储了对应粒子在 x 轴，y 轴，z 轴上的对应分量

int main()
{
```

```
   int i,j,k,s;//循环变量
   double x_diff,y_diff,z_diff;//两粒子之间在三条坐标轴上的相对距离
   double dist,dist_cubed;//两粒子之间的绝对距离和绝对距离的立方
   double x_f,y_f,z_f;//两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量
   double m[MAX];//每个粒子的质量
   double start,end;//用于计算串行部分的开始时间和结束时间
   int thread_count;//线程数

   ifstream myfile("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\nbody_init.txt");
//打开数据集文件
   for(int i=0;i<=particles-1;i++){
      myfile>>m[i]>>pos[i].x>>pos[i].y>>pos[i].z>>v[i].x>>v[i].y>>v[i].z;//根据题目
要求将每一行的数据写入到各数组对应的结构体成员中
   }

   thread_count=8;//可在这里选择或修改并行线程数

   GET_TIME(start);//获取 omp 并行部分开始时间
# pragma omp parallel num_threads(thread_count) \
private(x_f,y_f,z_f,i,j,k,s,x_diff,y_diff,z_diff,dist,dist_cubed) \
shared(m,pos,v)
//用 parallel 指令在最外层循环前创建 thread_count 个线程的集合。
//同时将作用力（x_f,y_f,z_f），循环计数变量（i,j,k,s），距离相关变量
（x_diff,y_diff,z_diff,dist,dist_cubed）均设置为 private（这些变量是每个线程独有的，不
可被其他线程访问）
//而 m,pos,v 这三个数组则设置为 shared，因为粒子的这三个信息会被每个线程访问（并且 pos 和 v
的信息在不断更新，所以更加需要被共享）
   for(k=1;k<=timestep;k++){
#        pragma omp for schedule(static)
//使用 for 指令，告诉 OpenMP 用已有的线程组来并行化 for 循环。
//schedule(static)含义为：对 for 循环并行化进行任务调度
//对于 static:这种调度方式非常简单。假设有 n 次循环迭代，t 个线程，那么给每个线程静态分配大
约 n/t 次连续的迭代。
         for(i=0;i<=particles-1;i++){//遍历每个粒子
            x_f=0;
            y_f=0;
            z_f=0;
            //每次遍历该粒子以外的粒子之前需要先将作用力清空，防止与上一个粒子在三个方向
上所受的作用力相叠加
            for(j=0;j<=particles-1;j++){//遍历该粒子以外的所有粒子
               if(i==j){//该粒子本身可以跳过
                  continue;
               }
               x_diff=pos[i].x-pos[j].x;
               y_diff=pos[i].y-pos[j].y;
               z_diff=pos[i].z-pos[j].z;
```

```
                //计算两粒子在三条坐标轴上的相对距离

                dist=sqrt(x_diff*x_diff+y_diff*y_diff+z_diff*z_diff);//计算两粒子之
间的绝对距离
                dist_cubed=dist*dist*dist;//计算距离的立方

                x_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*x_diff;
                y_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*y_diff;
                z_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*z_diff;
                //计算两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量
            }
            v[i].x+=dT*x_f/m[i];
            v[i].y+=dT*y_f/m[i];
            v[i].z+=dT*z_f/m[i];
            //利用 dv=f*dT/m(动量定理)来更新粒子在三条坐标轴上的速度分量
        }
#     pragma omp for schedule(static) //解释与上方的 omp for 相同
      for(s=0;s<=particles-1;s++){//遍历每个粒子
         pos[s].x+=dT*v[s].x;
         pos[s].y+=dT*v[s].y;
         pos[s].z+=dT*v[s].z;
         //利用 d=d0+v*dT 来更新粒子在三条坐标轴上的坐标
      }
   }
   GET_TIME(end);//获取 omp 并行部分结束时间
   cout<<end-start<<endl;//输出运行时间

   ofstream outfile;
   outfile.open("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\omp_result1.txt",ios
::out);
   //准备将结果写入 omp_result 文件中
   for(i=0;i<=particles-1;i++){
      outfile<<setprecision(15)<<m[i]<<' '<<pos[i].x<<' '<<pos[i].y<<' '<<pos[i].z
<<' '<<v[i].x<<' '<<v[i].y<<' '<<v[i].z<<endl;
      //将数据保留 15 位小数并按照要求把每个粒子的数据按顺序写入每行，一行数据代表一个粒子
   }

   myfile.close();
   outfile.close();
   //关闭文件
   system("pause");
}
```

对于# pragma omp parallel 和# pragma omp for 结合使用的补充解释：

与 parallel for 指令不同的是，for 指令并不创建任何线程。它使用已经在 parallel 块中创建的线程。且在循环的末尾有一个隐式的路障，所以代码的结果将与在内部使用两个# pragma omp parallel for 的结果保持一致。

（3）pthread 版本

Pthreads 版本需要在 VSCode 上进行额外配置（参考网址：https://blog.csdn.net/CSDN_WHB/article/details/81475233）。同时需要注意修改编译参数（eg. 在 VSCode 上编译时，需要在 tasks.json 中的 args 里添加一行"-lpthread"）：

```
    "args": [
        "-g",
        "${file}",
        "-fopenmp",
        "-o",
        "${fileBasenameNoExtension}.exe",
        "-lpthread"//需要添加的
    ], // 编译命令参数
```

绝大部分分析已全部放在代码注释中，代码如下所示：

```
#include<iostream>
#include<cmath>   //公式里需要用到 sqrt 开根函数
#include<fstream> //该头文件用于读写文件
#include<iomanip> //该头文件用于控制数据精度
#include<sys/time.h> //标准日期时间头文件，用于计算运行时间
#include<pthread.h>
using namespace std;

#define timestep 20      //迭代次数
#define dT 0.005         //时间间隔
#define G 1              //引力常数
#define MAX 1024         //各信息的数组大小均设置为 1024，与粒子个数相同
#define particles 1024    //数据集中共有 1024 个粒子

#define GET_TIME(now) { \
   struct timeval t; \
   gettimeofday(&t, NULL); \
   now = t.tv_sec + t.tv_usec/1000000.0; \
}
//最后一行将 us 转换为 s，统一单位
//该结构体用于计算程序串行部分运行时间

struct information
```

```
{
    double x;
    double y;
    double z;
}pos[MAX],v[MAX];//初始化两个数组，分别为每个粒子的位置和速度
                 //数组内部每个元素存储了对应粒子在 x 轴，y 轴，z 轴上的对应分量

long thread_count;          // 并行线程数
int b_thread_count;        // 线程互斥锁计数器
pthread_mutex_t mutex;         // 线程互斥量，也即互斥锁
pthread_cond_t cond_var;       // 线程条件变量

double m[MAX];//每个粒子的质量

void Barrier_init(void){//通过条件变量等待法来同步所有线程
    b_thread_count=0;//计数器初始化为 0
    pthread_mutex_init(&mutex,NULL);//初始化互斥锁 mutex
    pthread_cond_init(&cond_var,NULL);//初始化条件变量 conda_var
 }

void Barrier(void){//设置路障
    pthread_mutex_lock(&mutex);//线程调用该函数来获得临界区的访问权
    //互斥量可以用来限制每次只有 1 个线程能进入临界区。互斥量保证了一个线程独享临界区
    //其他线程在有线程已经进入该临界区的情况下，不能同时进入。
    b_thread_count++;//计数器+1
    if(b_thread_count==thread_count){//说明所有线程均已获得互斥锁
        b_thread_count=0;//计数器清零
        pthread_cond_broadcast(&cond_var);//唤醒所有等待条件变量 cond_var 的线程
        //也即被阻塞在当前锁 mutex 上的线程会被唤醒。
    }
    else{
        while(pthread_cond_wait(&cond_var, &mutex)!=0); //详见下方补充
    }
    pthread_mutex_unlock(&mutex);//线程退出临界区
}

void* loop_schedule(void* rank){
    long long my_rank=(long long)rank;//如果指针类型的大小和表示进程编号的整数类型不
同，在编译时就会受到警告
    //所以我们需要进行强制类型转换
    long long my_n=MAX/thread_count;//计算每个线程中需要分配的循环次数
    long long my_first_i=my_n*my_rank;//计算每个线程中开始计算的第一项
    long long my_last_i=my_first_i+my_n;//计算每个线程中需要计算的最后一项、

    int i,j,k,s;//循环变量
    double x_diff,y_diff,z_diff;//两粒子之间在三条坐标轴上的相对距离
```

```
    double dist,dist_cubed;//两粒子之间的绝对距离和绝对距离的立方
    double x_f,y_f,z_f;//两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量

    for(k=1;k<=timestep;k++){//迭代次数为 timestep 次（20）
        for(i=my_first_i;i<=my_last_i-1;i++){//遍历该线程所分配到的粒子
            x_f=0;
            y_f=0;
            z_f=0;
            //每次遍历该粒子以外的粒子之前需要先将作用力清空，防止与上一个粒子在三个方向上所受的作用力相叠加
            for(j=0;j<=particles-1;j++){//遍历该粒子以外的所有粒子
            //因为该粒子以外的所有粒子都对它有作用力
                if(i==j){//该粒子本身可以跳过
                continue;
                }
                x_diff=pos[i].x-pos[j].x;
                y_diff=pos[i].y-pos[j].y;
                z_diff=pos[i].z-pos[j].z;
                //计算两粒子在三条坐标轴上的相对距离

                dist=sqrt(x_diff*x_diff+y_diff*y_diff+z_diff*z_diff);//计算两粒子之间的绝对距离
                dist_cubed=dist*dist*dist;//计算距离的立方

                x_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*x_diff;
                y_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*y_diff;
                z_f-=G*m[i]*m[j]/dist_cubed*z_diff;
                //计算两粒子之间作用力在三条坐标轴上的分量
            }
            v[i].x+=dT*x_f/m[i];
            v[i].y+=dT*y_f/m[i];
            v[i].z+=dT*z_f/m[i];
            //利用 dv=f*dT/m(动量定理)来更新粒子在三条坐标轴上的速度分量
        }
        Barrier();//设置路障
        for(s=my_first_i;s<=my_last_i-1;s++){//遍历该线程所分配到的粒子
            pos[s].x+=dT*v[s].x;
            pos[s].y+=dT*v[s].y;
            pos[s].z+=dT*v[s].z;
            //利用 d=d0+v*dT 来更新粒子在三条坐标轴上的坐标
        }
        Barrier();//设置路障
    }
    return NULL;
}
```

```
int main()
{
    int i,j,k,s;//循环变量

    ifstream myfile("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\nbody_init.txt")
;//打开数据集文件
    for(i=0;i<=particles-1;i++){
      myfile>>m[i]>>pos[i].x>>pos[i].y>>pos[i].z>>v[i].x>>v[i].y>>v[i].z;//根据题目
要求将每一行的数据写入到各数组对应的结构体成员中
    }

    pthread_t* thread_handles;//pthread_t 用于声明线程 ID
    double start,end;//用于计算 pthread 并行部分的开始时间和结束时间
    long long thread;

    thread_count=8;//可在这里选择或修改并行线程数

    Barrier_init();//路障初始化，注意要放在创建线程数组之前！
    thread_handles = (pthread_t*) malloc (thread_count*sizeof(pthread_t));//创建线
程数组

    GET_TIME(start); //获取 pthread 并行部分开始时间
    for(thread=0;thread<thread_count;thread++){
        pthread_create(&thread_handles[thread],NULL,loop_schedule,(void*)thread);
        //创建线程
        //第一个参数为指向线程标识符的指针。
        //第二个参数用来设置线程属性。
        //第三个参数是线程运行函数的起始地址。
        //最后一个参数是运行函数的参数。
    }
    for(thread=0;thread<thread_count;thread++){
        pthread_join(thread_handles[thread], NULL);
        //函数 pthread_join 用来等待一个线程的结束。
        //第一个参数为被等待的线程标识符，第二个参数为一个用户定义的指针，它可以用来存储
被等待线程的返回值。
        //这个函数是一个线程阻塞的函数，调用它的线程将一直等待到被等待的线程结束为止
        //当函数返回时，被等待线程的资源被收回。
        //也就是说主线程中要是加了这段代码，就会在该代码所处的位置卡住，直到这个线程执行
完毕才会继续往下运行。
    }
    GET_TIME(end);//获取 pthread 并行部分结束时间
    cout<<end-start<<endl;//输出运行时间

    ofstream outfile;
    outfile.open("C:\\Users\\93508\\Desktop\\.vscode\\.vscode\\pthread_result.txt"
,ios::out);
```

```
    //准备将结果写入 pthread_result 文件中
    for(i=0;i<=particles-1;i++){
      outfile<<setprecision(15)<<m[i]<<' '<<pos[i].x<<' '<<pos[i].y<<' '<<pos[i].z
<<' '<<v[i].x<<' '<<v[i].y<<' '<<v[i].z<<endl;
      //将数据保留 15 位小数并按照要求把每个粒子的数据按顺序写入每行，一行数据代表一个粒子
    }

    myfile.close();
    outfile.close();
    //关闭文件
    system("pause");
}
```

对上述代码的补充：

①关于互斥量：因为处于忙等待的线程仍然在持续使用 CPU，所以忙等待不是限制临界区访问的最理想方法。这里，有两个更好的方法:互斥量和信号量。而互斥量是互斥锁的简称，它是一个特殊类型的变量，通过某些特殊类型的函数，互斥量可以用来限制每次只有一个线程能进入临界区。互斥量保证了一个线程独享临界区，其他线程在有线程已经进入该临界区的情况下，不能同时进入。

②关于

```
        while(pthread_cond_wait(&cond_var, &mutex)!=0);
```

pthread_cond_wait 的作用是通过互斥量 mutex_p 来阻塞线程，直到其他线程调用 pthread_cond_signa1 或者 pthread_cond _broadcast 来解锁它。当线程解锁后，它重新获得互斥量。

那为什么在被唤醒之后还要再次进行条件判断（即为什么要使用 while 循环来判断条件）？是因为可能有“惊群效应”。我们假设有多个线程都在等待这个条件，而同时只能有一个线程进行处理，那么此时就必须要再次条件判断，以确保只有一个线程进入临界区处理。所以用 while 来保证临界区内只有一个线程在处理。

三、实验结果

①线程不变，迭代次数增加：

迭代 20 次（8 线程）：

串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
0.457774	0.130446	0.130771	3.509	3.501

迭代 200 次（8 线程）：

串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
4.37327	1.20676	1.23047	3.624	3.554

迭代 2000 次（8 线程）：

串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
43.5725	22.6479	22.2641	1.924	1.957

由上可知，随着迭代次数的增加，OpenMP 和 Pthread 的加速效率会先提高再下降。但 OpenMP 和 Pthread 相对于串行的加速比始终几乎一致，两者并无显著差异。

先升高后下降的原因是：因为线程不变，而随着迭代次数的增加，每个线程的负载就会加重。所以当处于线程负载能力范围内时，加速比会随迭代次数的增加而增加；而在超出线程负载能力范围之后，加速比就会随着迭代次数的增加而降低。

②迭代次数不变，线程增加：

迭代 200 次（4 线程）：

串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
4.35834	1.45708	1.47844	2.991	2.948

迭代 200 次（8 线程）：

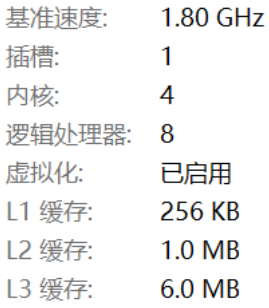
串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
4.50996	1.18379	1.21345	3.810	3.717

迭代 200 次（32 线程）：

串行时间	OpenMP 运行时间	Pthread 运行时间	OpenMP 加速比	Pthread 加速比
4.35734	1.40324	1.44886	3.105	3.007

由上可知，随着线程数的适当增加，OpenMP 和 Pthread 的加速效率也会提高。且 OpenMP 和 Pthread 相对于串行的加速比几乎一致，两者并无显著差异。

但若线程过多，也会导致加速效率降低。这很显然也是由运行程序的电脑配置决定的，由于我的电脑是 4 核 8 线程，所以显然 8 线程的表现会最好，若继续分配额外的线程，则必然会导致加速比下降。



因为每一时刻，都只会有 8 个线程在进行计算，而并行的结束是以所有的线程运行结束为标志，因此，最后那个线程（或者说最慢的那个线程）将决定并行结束的时间，所以线程越多，那么排队就越长，并行结束的时间相应就会增长。