

第 5 次编程作业：求解曼德博集合

揭秘“上帝的指纹”——求解曼德博集合

问题描述：

曼德博集合（或曼德博复数集合）是一种在复平面上组成分形的点的集合，以数学家本华·曼德博的名字命名。

曼德博集合可以使用复数多项式定义：

$$f_c(z) = z^2 + c, \text{ 其中 } c = a + bi \text{ 是一个复数。}$$

从 $z = 0$ 开始对 $f_c(z)$ 进行迭代：

$$z_{n+1} = z_n^2 + c, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$z_0 = 0$$

$$z_1 = z_0^2 + c = c$$

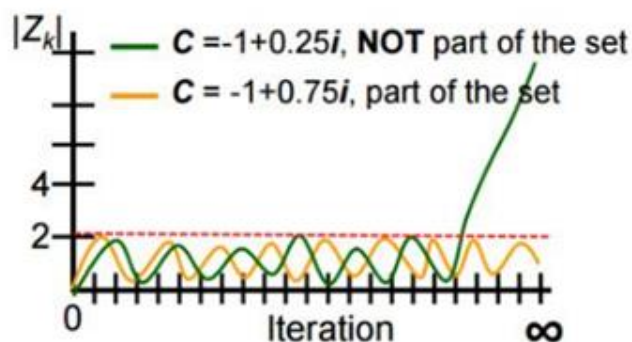
$$z_2 = z_1^2 + c = c^2 + c$$

每次迭代的值依序可以按照如下序列表示：

$$(0, f_c(0), f_c(f_c(0)), f_c(f_c(f_c(0))), \dots) = \{z_0, z_1, z_2, \dots\}$$

不同的复数 c 可以使序列的绝对值 $|z_n|$ 逐渐发散到无限大，也可能一直收敛在有限的区域内。曼德博集合 M 就是使序列不延伸至无限大（用高数的话说，收敛）的所有复数 c 的集合。

有个已证明的定理，当有个复数 c 使得 $|z_n| \leq 2, (n = 0, 1, 2, \dots, k)$ 时，这个 c 就属于曼德博集合。理论上这个 k 是趋近于无穷大，在此题我们设 k 为 10000。



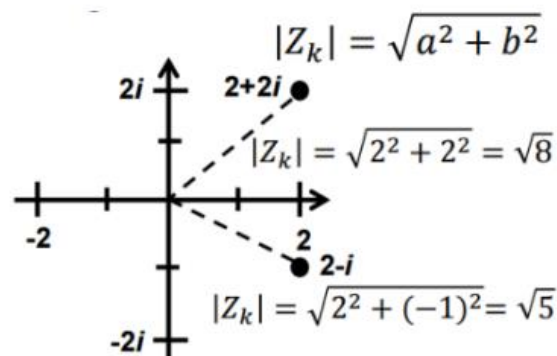
求解曼德博集合的伪代码如下：

```

For Each c in Complex
  repeats = 0
  z = 0
  Do
    z = z^2 + c
    repeats = repeats + 1
  Loop until abs(z) > EscapeRadius or repeats > MaxRepeats
  '根据定理，EscapeRadius 可设置为 2。

  If repeats > MaxRepeats Then
    Draw c,ColorYouWant    '如果迭代次数超过MaxRepeats=10000，就将c 认定为属于
    曼德博集合，并设置为其他颜色。
  Else
    Draw c,color(z,c,repeats)    'colo 函数用来决定色。
  End If
Next

```



作业说明：

已经为大家提供了串行 C 代码，大家可以参考：



sequential.c

编译前需安装 libpng 库：sudo apt install libpng-dev。

代码编译命令：gcc -g -Wall -o sequential sequential.c -lpng。

串行代码的执行指令如下：

```

./${ 串行程序二进制文件 } ${thread_per_proc} ${real_lower} ${real_upper}
${imag_lower} ${imag_upper} ${w} ${h} ${output_path}

```

thread_per_proc: 使用的线程数

real_lower: 实轴最小值

real_upper: 实轴最大值

imag_lower: 虚轴最小值

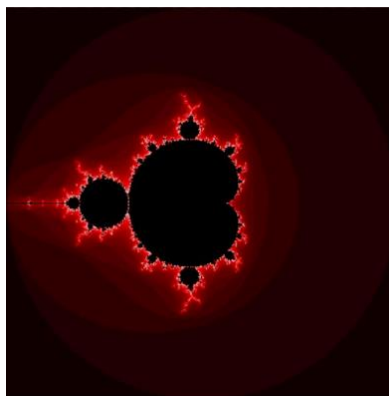
imag_upper: 虚轴最大值

w: 生成图像实轴的点数, 可以理解为长度

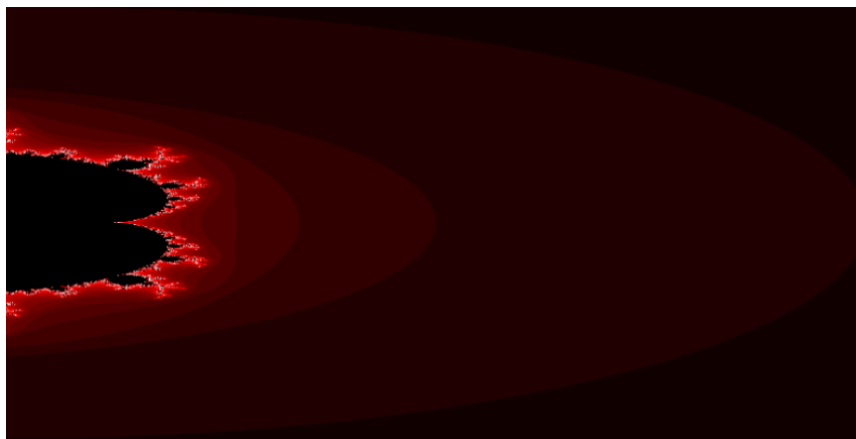
h: 生成图像虚轴的点数, 可以理解为长度

output_path: 生成图像的路径

例子 1: `./homework 1 -2 2 -2 2 800 400 ./homework.png`



例子 2: `./homework 1 0 2 -2 2 800 400 ./homework.png`



大家需要对求解曼德博集合的串行代码进行并行优化。本次大作业可以从以下几种选择中进行：

1. OpenMP
2. Pthreads
3. MPI
4. 混合（例如 OpenMP 加 MPI 等）

同时，还需要完成一份实验报告。实验报告需包含：

1. 学号、姓名

2. 实现

➤ 遇到的问题与解决措施

➤ 各种版本的优化是如何实现的

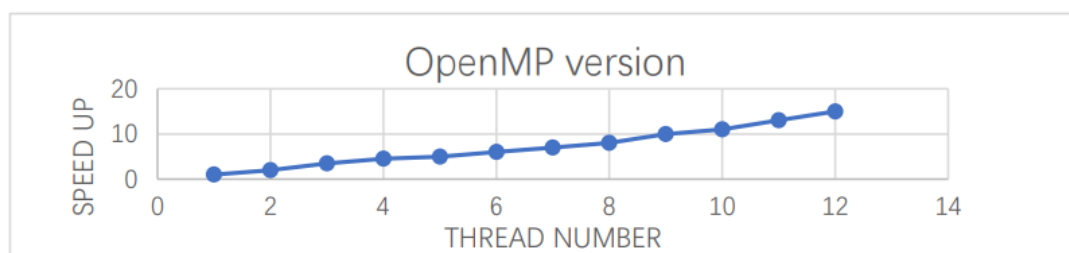
➤ 是如何将任务进行分块的

➤ 是如何提升运行速度与增强程序扩展性的

3. 分析与实验

➤ 是如何测量程序运行时间的

➤ 请用 Excel 或者其他类似工具作出比较图，比较不同的因素所带来的加速比变化：**进程的数量，线程的数量以及不同优化方法**。写清楚每张图的纵轴横轴是什么，是在什么版本运行下的。如下给了一张 OpenMP 版本的不同线程数的加速比(当然下图的数据是虚拟的，只做样例参考)，选择自己认为比较直观的图表形式即可。



4. 结论

➤ 通过上述比较，得出最佳的优化方案是什么，该方案的优势是什么？

作业要求：

并行优化后的源代码文件执行输入参数保持与串行程序一致！

源代码命名：(学号)_(并行的版本).(c/cpp/cu)

样例：2021124_omp.cpp

实验报告命名：(学号)_实验报告.pdf

将以上文件打包成 rar 或者 zip 上传问卷星即可。

问卷星链接：<https://www.wjx.cn/vm/rRu9SJg.aspx#>

Ps：作业成绩与提交的源代码的并行加速比有关，因此大家可以选择合适的加速手段来进行并行优化。