

并行计算大作业报告

郭宇祺 1700012785

说明

代码文件夹已经放在服务器ceca19的个人文件夹下，或者可以访问[我的Github仓库](#)获取。服务器的文件夹内包含数据文件，但是不包含报告和short survey，而GitHub仓库不包含数据文件，但是包含报告和short survey。

本次任务中我采用MPI框架实现对应功能。

1.问题描述

对于一棵具有N个节点的树T，根节点编号为0，自树根至树叶的编号呈现深度优先次序。每个节点具有以下六种属性(括号内为缩写)：index(id)，upper(l)，diagonal(d)，right-side-hand(rhs)，parent(p)，其中，parent代表的是父节点的id。

该问题包含两个阶段：第一阶段完成由树叶至树根的一次遍历，记作backward sweep；第二阶段完成由树根至树叶的依次遍历，记作forward sweep，两个阶段的次序不可交换。算法伪代码如下：

Algorithm 1: Abstract Hines Algorithm

```
void HinesAlgo(double *u, double *l, double *d,
               double* rhs, int* parent, int N)
{
    int i;
    double factor;
    //Backward Sweep
    for i = N - 1 → 1 do
    | factor = u[i] / d[i];
    | d[p[i]] -= factor × l[i];
    | rhs[p[i]] -= factor × rhs[i];
    rhs[0] /= d[0];
    //Forward Sweep
    for i = 1 → N - 1 do
    | rhs[i] -= l[i] × rhs[p[i]];
    | rhs[i] /= d[i];
}
```

在本次project中，我选择使用MPI进行编程，性能测试使用提供的服务器进行运行时间的测试。

2.问题分析

容易看出，这个算法的主要部分是backward sweep和forward sweep这两个循环。这两个循环相互独立，因此可以对它们做单独分析。下面分别分析这两个循环的内容，并提出对应部分并行代码的构建思路。

2.1 backward sweep

首先分析这一个循环的含义。这一段循环代码的含义是显而易见的：每一个节点根据自身的属性值，修改其父节点属性值。由于节点是按照深度优先访问的次序编号的，因此选择从后往前的遍历顺序总能够使得，在访问编号为 x 的节点时， x 节点的所有子节点已经完成了对 x 节点属性值的修改，因此此时 x 节点属性值已经是最终状态，可以安全地对 x 节点的父节点属性值进行更新。

在此理解的基础上，继续对这个循环包含的依赖关系进行分析。根据这段代码的含义，每一个节点必须在其所有的子节点完成对其属性的修改后，才能对父节点属性进行更新，否则就会导致计算结果出错。这一限制就是这个循环中唯一的数据依赖关系，即节点 x 的访问需要排在其所有子节点的访问之后。

在串行代码中，循环变量从 $N-1$ 到 1 的遍历自动满足了这一数据依赖关系，但是如果选择并行处理，这种数据依赖关系就会成为棘手的问题。在提供的数据结构中，父子节点的连接关系完全存储在子节点中，父节点没有任何关于子节点的信息。因此，如果父子节点被分配到不同的处理器上，父节点因为不知道自己有哪些子节点，因此没有办法知道这些子节点是否已经全部完成了访问，结果，决定何时进行父节点的访问就变成了非常困难的事情。

为了解决这个问题，子节点必须给父节点提供相应的信息，来让父节点明白何时可以安全地进行自身的访问。然而，只有子节点给父节点提供信息仍然不足以使父节点确定自己所有的子节点已经完成了访问。父节点每收到一个子节点的信息，只能证明自己的某一个子节点完成了访问，不能确定是否还有其他未访问的子节点。因此，必须给父节点预先提供子节点个数的信息。这样，结合子节点个数和子节点发来的消息，父节点就能够决定什么时候对自身访问是安全的。

2.2 forward sweep

forward sweep显然是与backward sweep顺序相反的一次遍历，在forward sweep中，每一个节点更新自己所有子节点属性。与backward sweep不同之处在于，每一个节点只有一个父节点，因此在forward sweep中，每一个节点的访问只需置于其父节点的访问之后。这一数据依赖关系比backward sweep的数据依赖关系放松不少。

然而，forward sweep面临新的困难，那就是父节点应该如何通知子节点继续。forward sweep的数据结构与backward sweep完全相同，因此存在相同的问题，那就是父节点不知道哪些节点是自己的子节点，因此没有办法直接通知自己的子节点。而如果采用子节点询问父节点的手段，则会造成大量的无用通讯。因为子节点不知道父节点什么时候会完成访问，只能采取不断轮询的手段，不断向父节点询问，直到父节点返回可以继续的答复，在这一过程中，除了最后一次信息交流是有意义的，之前的所有通讯全部都是无用通讯。树的结构越复杂，节点的数量越多，父节点就绪所需的时间就越长，产生的无用通讯就越多，最后整体效率就越低下。综上所述，直接的父子节点通讯显然是行不通的。

为了解决父子节点通讯的问题，我采取的手段是：父节点广播、子节点扫描。每当父节点就绪，就把自己的信息广播给所有的节点，然后所有节点检查广播信息，确认这条广播信息是否是自身需要的广播信息。如果是，则进行处理，对自身属性值更新，并在处理完成后，广播自身信息，而如果不是，则忽略这一条广播通讯。这一手段虽然不够高效，但也是这种限制下为数不多的选择。

3.具体实现

在我的代码中，我对树上的所有节点采用块状的形式进行划分。假设一共有 N 个节点， P 个处理器，则编号为 0 至 $\frac{N}{P}$ 的节点被分配给 0 号进程，编号为 $\frac{N}{P}$ 至 $\frac{2N}{P}$ 的节点被分配给 1 号进程，以此类推。之所以采用这种划分方式，一方面是由于这是原始论文中推荐的数据划分方式，另一方面，我也尝试使用过其他数据划分方式，但效果都比不上这种数据划分方式。关于其他数据划分方式的讨论，详见short survey，这里就不详细展开了。

下面依次介绍各个步骤。

首先是数据读入。在读入数据文件的阶段，每一个进程都会读取并扫描整个数据文件。在扫描过程中，除了读入当前进程管理的节点所需的数据，还会为每一个管理的节点统计子节点的个数。这一信息可为backward sweep阶段提供方便。

随后是backward sweep阶段。这一段基本按照第二部分所述的思绪进行处理。每个节点在最开始会进行一次初始化扫描，扫描自己管理的所有节点，找出所有叶子节点(子节点个数为0)，进行访问，然后将必要的信息发送给其父节点所在的进程，通讯采用alltoall函数。完成alltoall的通讯后，每个进程扫描自己收到的信息，更新对应父节点的状态，一个父节点每被更新一次，其子节点计数减一，如果完成这次更新后，子节点计数归零，则说明其所有子节点都已完成更新，那么这个父节点就会在下一次通讯时，把它的信息继续发送给它父节点。如此循环，直到所有节点都完成全部的更新。这样就完成了backward sweep。

之后是0号进程对0号节点做单独更新，这一步没有什么可介绍的。

再之后是forward sweep阶段。首先0号进程会对0号节点进行广播，通讯采用allgather函数。之后，每个进程会扫描广播信息，找出对应的子节点进行更新，并在下一次全体广播时把子节点的信息继续广播。如此循环，直到所有节点完成更新。

最后是输出结果。这一部分不是本次project的重点，在此略过不谈。

4.进一步优化

在根据第三部分的基本思路完成代码的编写之后，我对代码性能进行了简单测试。测试结果相当令人失望，在服务器上，使用32进程运行的并行版本程序居然比串行版本程序慢了2-3个数量级。这样的结果显然是不能接受的，因此，需要对第三部分提出的实现做进一步优化。

首先我注意到，在我的节点划分策略下，原始的一整棵树被并列地划分为p棵子树。这些子树内部有较为复杂的依赖关系，但是子树之间很少存在依赖关系。这在程序运行过程中的表现就是，在每一个进程发出的所有通讯中，大部分通讯的目标仍然是自己进程。因此程序花费了大量的时间，做“自己给自己发信息”这一毫无意义的事情，导致运行时间变慢。因此，优化的第一步就是消除“自己给自己发信息”这一愚蠢的行为。

在原先的设计中，backward sweep和forward sweep的每一次循环都会产生大量的通讯需求，这些通讯需求会在下一次循环中被发送。但是，很多通讯需求其实是发往自身的通讯需求，这些通讯需求完全没有必要被实际发送。因此，在第一步改进中，对于这两个循环，每当产生一个新的通讯需求时，进程会检测这个通讯需求是否是发往自身的。如果是，则直接将其加入todolist，在本次循环中将其完成，而无需令其参与进程间的信息通讯。这一优化使得通讯量大大降低，程序运行时间降低了约2个数量级。

第二步优化是针对forward sweep的优化。在原本的代码中，对于父节点发来的一条信息，进程通过扫描自己管理的所有节点，确定哪几个节点是这个父节点的子节点。这一做法显然相当低效，通常需要扫描几十万的节点才能够找到一个对应的子节点。因此，在改进的代码中，我使用了hashmap存储父节点对应的子节点位置。对于进程收到的每一条信息，进程只需花费 $O(1)$ 的时间在hashmap中进行查找，即可确定子节点存储的位置。相比原来动辄上万的查询量，这一改进大大提升了forward sweep的运行速度。从效果来看，程序运行时间又降低了1个数量级。

最后一步优化是一些小的trick。在原版的代码中，我使用了STL容器queue。经测试发现，queue的push和pop操作居然占用了程序运行大约一半的时间。因此，我手动实现了一个数组代替queue的功能，来降低运行时间。除此之外，我特别注意优化了代码，减少了相同数据的复制。最终的结果是，程序运行时间降低为原来的三分之一。

5.文件编译说明

本次project使用标准cmake流程完成编译、链接过程，即

```
mkdir build
cd build
cmake ..
make
```

在上述操作的make阶段，由于代码中使用了非c++标准库hashmap，因此可能会出现警告甚至编译出错。如出现编译出错，请升级编译器版本或更新库文件(添加GNU_CXX支持)。

完成make后，在build文件夹下会出现名为serial和parallel的可执行文件，使用mpiexec进行运行即可。运行时需要提供两个命令行参数，分别是输入文件名和输出文件名。

6.性能测试

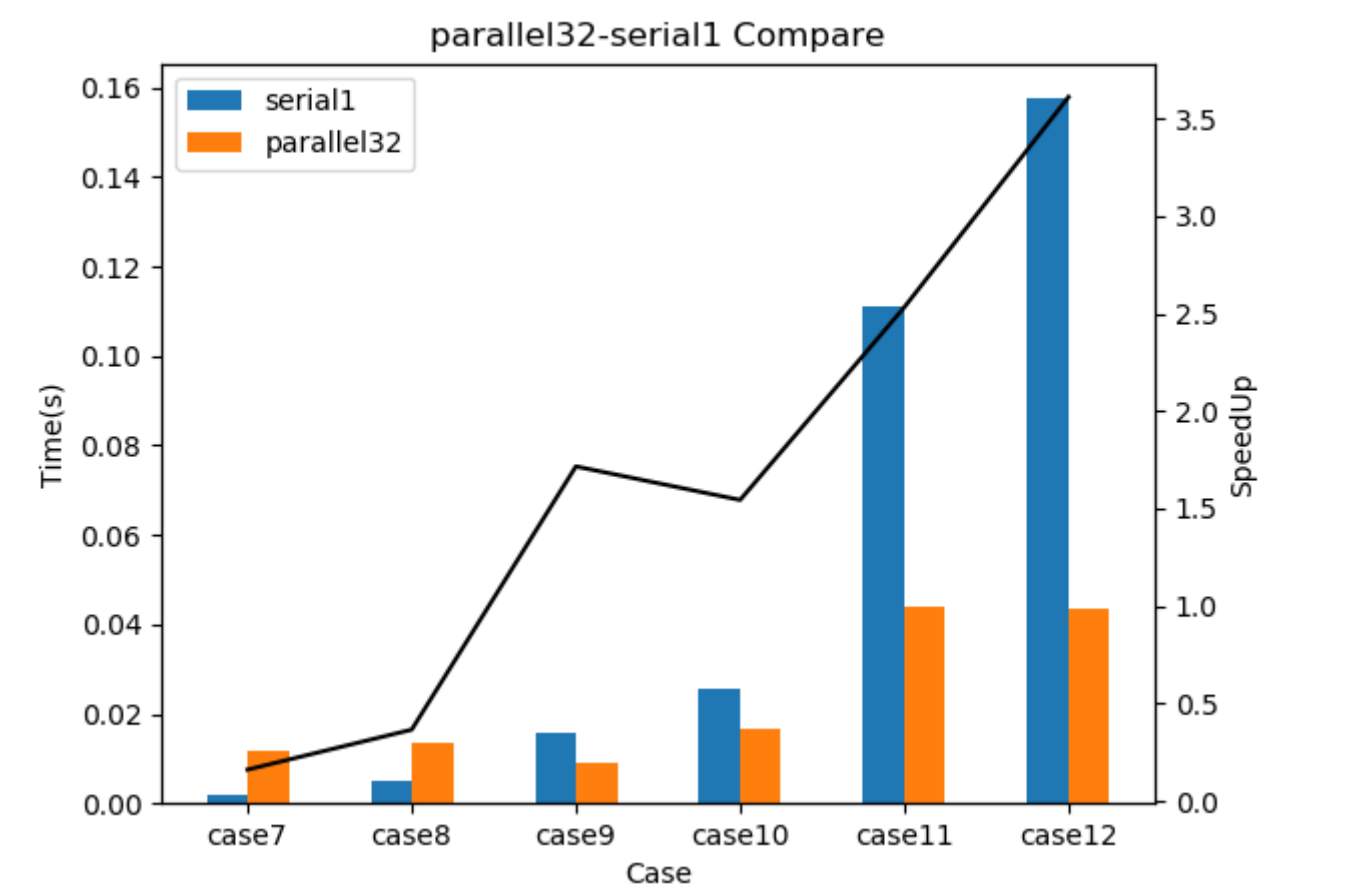
本次性能测试均使用ceca19这台机器进行测试，正确性测试只使用case1至case6，性能测试只使用case7至case12。为了公平，修改原始串行版本代码，加入MPI框架的初始化和中止函数，并与并行代码使用相同方式、相同API进行计时，使用-np 1的参数运行。

经比对，serial和parallel对case1至case6的输出完全相同，因此可以认为parallel程序可输出正确结果。

以下是case7至case12运行时间测试结果，单位为秒。以parallel1-II为例，此标签表示使用parallel运行，mpiexec参数为-np 1，执行第二次测试。

| 测试结果 | case7 | case8 | case9 | case10 | case11 | case12 |
|----------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| serial1-I | 0.00194231 | 0.00498796 | 0.0153005 | 0.0253832 | 0.11062 | 0.157294 |
| serial1-II | 0.00194311 | 0.0050416 | 0.0158453 | 0.0255809 | 0.110689 | 0.157376 |
| serial1-III | 0.00190568 | 0.0050292 | 0.0155492 | 0.0257535 | 0.111184 | 0.157824 |
| parallel1-I | 0.00893998 | 0.0247066 | 0.0710285 | 0.127279 | 0.364048 | 0.755596 |
| parallel1-II | 0.0089643 | 0.0235157 | 0.0709569 | 0.118718 | 0.361146 | 0.723665 |
| parallel1-III | 0.00933194 | 0.0236223 | 0.0708838 | 0.118971 | 0.347205 | 0.72394 |
| parallel32-I | 0.011764 | 0.0127614 | 0.00870252 | 0.0162674 | 0.0437474 | 0.0419853 |
| parallel32-II | 0.0116265 | 0.0156491 | 0.00911787 | 0.0167685 | 0.043339 | 0.0454156 |
| parallel32-III | 0.0124037 | 0.0126562 | 0.00939417 | 0.0166523 | 0.044234 | 0.0435059 |
| serial1-avg | 0.00193037 | 0.005019587 | 0.015565 | 0.0255725 | 0.110831 | 0.157498 |
| parallel1-avg | 0.009078 | 0.0239482 | 0.0709564 | 0.364968 | 0.357466 | 0.734400 |
| parallel32-avg | 0.0119314 | 0.0136889 | 0.00907152 | 0.0165627 | 0.0437735 | 0.0436356 |

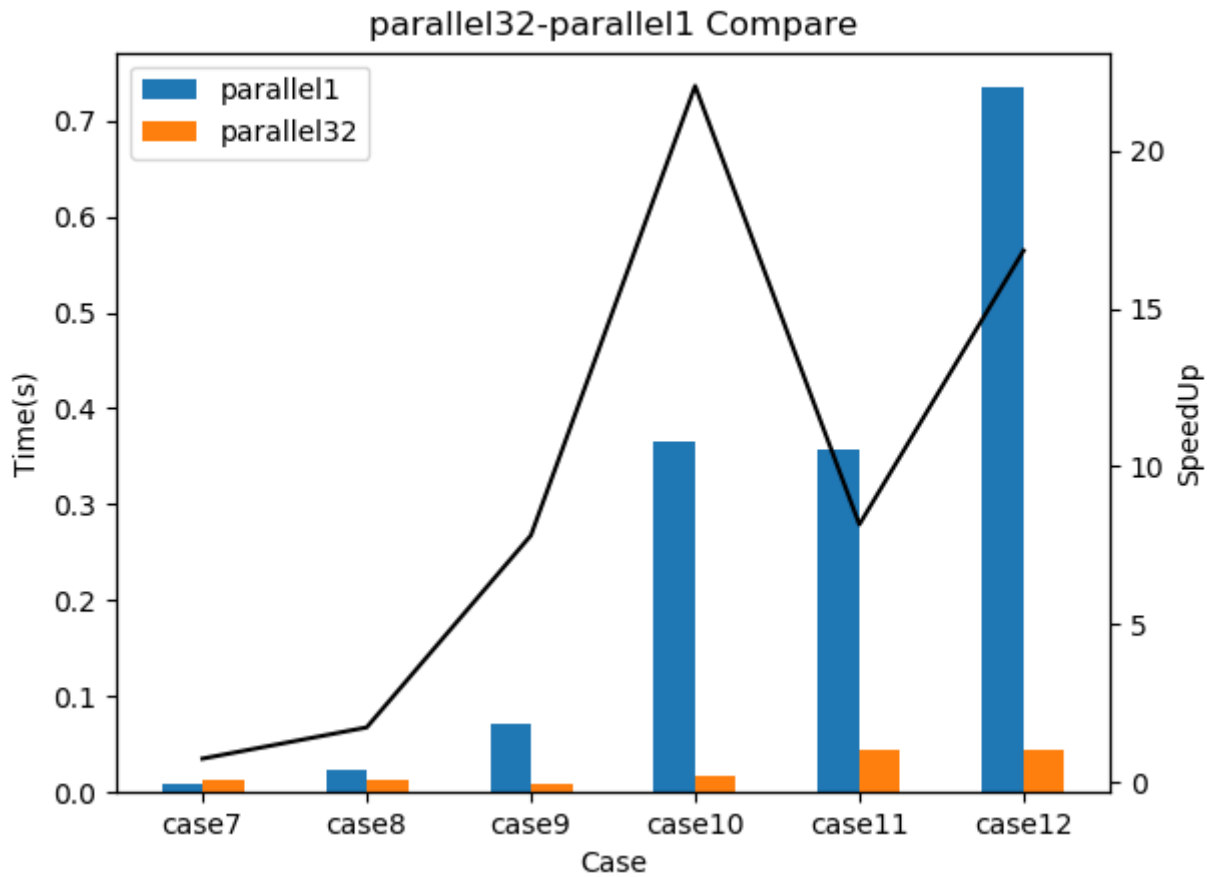
将parallel32和serial1的性能比较绘制成图，如下：



容易看出，parallel程序最低运行时间大约在0.01s左右，而serial程序在case7和case8上的总运行时间还远远不到0.01s，因此parallel在这两个case上效果较差。但是，随着case体积增大，节点数目增多，parallel程序越发显现出优势，在case9及之后的case中，parallel程序都拥有超过1的加速比。特别是在节点数量最多的case12上，parallel相比serial运行时间缩短了约4倍，达到了3.5的加速比。根据曲线变化的趋势来看，我有理由相信，随着case的进一步增大，parallel程序能够获得更高的加速效果。

从加速比容易算出，parallel32的并行效率在10%至15%之间，并行效率并不高。不过这主要是由于提供的case中节点数量过少，导致parallel没有办法完全发挥性能。如果有更大的测试样本，可能parallel能够获得更高的并行效率。

将parallel32和parallel1的性能比较绘制成图，如下：



这一比对主要研究的是parallel程序本身的并行效果。由于对原始算法进行了较大程度的改动，parallel程序实际执行的算法已与serial程序大不相同，因此直接比较parallel32和serial1的性能测试数据可能有些不太公平。这里选择比对parallel32和parallel1，来研究parallel执行算法本身的并行性能。

从图中可以看出，几乎在所有情况下，parallel32的运行时间都远远低于parallel1。除去节点数量过少的case7和case8，parallel32相对parallel1平均能够获得15左右的加速比，并行效率也达到了约50%。这一结果相当令人满意。

7.可能的改进空间

本次的代码已经经过精细调整，应该没有太大的改进空间，但是在一些细节上可能留有改进的余地。以下主要列出两处对性能可能有较大影响的部分。

第一处是hashmap。在前面的部分我已经提到，使用STL容器的queue曾严重拖慢了程序的运行速度，将queue替换为自己手动实现的数组后，程序运行时间大幅度缩短。因此我也有理由怀疑，同为STL容器的hashmap是否也存在拖慢程序运行速度的情况。经过测试发现，在case12的情况下，仅hashmap的查找步骤(通过对通信信息的监视，每个进程应该只进行了不超过100次的hashmap查找)，就累计花去了程序运行时间的30%。这一现象看起来似乎不太正常。如果能够自己实现hashmap，或许能够获得更好的性能效果。但是因为hashmap实现过于复杂，因此在本次project中我没有完成这一点的改进。

第二部分是数据通讯。本次我的通讯过程全部直接使用了MPI库提供的通讯函数，从结果上看，似乎通讯效率不高，通讯部份大致占用了程序整体运行时间的50%。如果能够进一步优化进程间通讯，或许也能够进一步提升整体性能。

以上就是本次报告的全部内容