

sv6 for RV64 SMP - 课程设计期末报告

计53 谭闻德 尹宇峰

选题概述

近年来，人工智能及大数据的众多应用为计算能力提出了新的需求，而处理器核心频率的提高已经遇到困难，现如今，多核心处理器、并行化已成为提高计算系统性能的主要手段。事实上，在2013年，Austin T. Clements等人[1, 2]就提出过一种新的手段，用于优化并行系统软件的性能。此项工作提出了一个名为Commuter的工具，借助符号化执行技术[10, 11]以及SMT求解器[12]，用于挖掘系统规范中潜在的并行化优化点；同时，他们用此工具辅助设计实现了一个并行度很好的精简的操作系统，名为sv6。sv6在x86-64指令集架构上实现，考虑到目前新兴的RISC-V指令集架构[3, 4]更开放、灵活性更好、硬件设计更简洁，为此，本课程设计基于上述工作，将上述工作提出的sv6移植到RISC-V 64位多核平台，以期能够推动RISC-V并行架构的发展。此外，我们深入理解了Commuter的设计与实现并对其进行总结。最后，本课程设计还基于Commuter对unix socket API进行了建模，未来还可以用此模型对实际操作系统的网络子模块进行并行性测试与优化。

由此，本课程设计的主体工作分成以下三个部分：

1. **移植** 将sv6操作系统从x86-64移植到RISC-V 64位（以下简称RV64）对称多处理器（以下简称SMP）环境。
2. **分析** 详细阅读[2]的文献和代码，分析和理解Commuter工具的设计与实现并对其进行总结，方便后人阅读理解。
3. **建模** 基于Commuter工具对unix socket API（从传输层到应用层）进行建模。

相关工作

这一小节简要介绍本课程设计会用到的前人的一些已有工作。

RISC-V

RISC-V [3, 4]是一个新的指令集架构，它更开放、灵活性更好、硬件设计更简洁。sv6操作系统[1]则是一款基于xv6，并行度很好的精简的类POSIX的研究性质的操作系统。

符号化执行与z3求解器

通过符号化执行的方法[10, 11]，可以将一个函数的输入参数指定为符号值，函数的每一个路径可以产生一个先决条件逻辑表达式，通过Z3等SMT求解器[12]进行求解，就可以知道这个路径是否可达，是否会产生特定的情况（大多数情况是断言失败）。

Commuter

Austin T. Clements等人在2013年提出的Commuter [2]能够利用上面提到的符号化执行技术以及Z3求解器，完成对系统调用接口规范模型的分析，为设计良好并行化的接口给出建设性意见，此外Commuter还将生成测试代码来检测实际操作系统的系统调用并行性，详细的论述分析请见下一小节。

我们的工作

设计方案

本课程设计分为以下9个步骤分阶段进行：

1. 准备开发环境 — 于第6周完成

把RV64 SMP的工具链，包括编译器GCC、模拟器CPU等环境准备好。

这是基础性的工作，为进行RV64的开发，必不可少。

2. 学习RV64 — 于第6周完成

学习RV64用户态指令集架构和特权指令集架构。

这也是基础性的工作，为进行RV64的开发，必不可少。当然，若之后遇到问题，可以进一步查阅文档。

3. 动手实践RV64 SMP — 于第6周完成

基于bbl编写几个RV64 SMP的小例子，注重SMP的启动以及管理。这个环节旨在熟悉RV64 SMP的一些关键性问题，例如谁负责启动AP（除了启动处理器之外的处理器核心称为AP），启动AP后的状态如何设置等。

4. 开始移植 — 于第6周开始,第11周完成

开始将sv6移植到RV64单核环境。

这个阶段的重点以及难点都在于将原有的x86-64相关的部分在RV64架构下重新实现，包括虚拟内存管理、中断和异常（包括系统调用）、原子操作指令、寄存器上下文、内核栈设置、外设中断配置、设备驱动程序等。

5. 多核移植 — 于第11周完成

进一步将sv6移植到RV64多核系统。

注：根据实际情况，单核和多核的移植可以分开或者同时进行。

6. 真实硬件测试 — 于第12周完成

从辉总那里借来了RV开发板一套，含12V 2A DC5.5电源一个、装板子的瓦楞纸质包装盒一个、保护用粉色塑料海绵纸一张、RV板一个。在RV开发板上成功运行sv6移植。

注：感谢辉总大力支持！

7. 学习并实践符号化执行方法、Z3求解器 — 于第10周完成

学习符号化执行方法以及Z3求解器的使用。

Commuter工具使用到了符号化执行方法以及SMT求解器，为了更好地完成sv6的优化，更好地写出接口规范，需要学习这两项内容。

8. 深入分析和理解Commuter的设计与实现 — 于第10周开始，第13周完成

详细阅读[2]的文献和代码，分析和理解Commuter工具的运行原理和代码实现并对其进行总结，方便后人阅读理解。

9. 基于Commuter对socket建模 — 于第13周完成

利用Commuter工具对unix socket API（从传输层到应用层）进行建模。

主要工作是接口规范的编写。

小组分工

1. sv6移植RV64 SMP

谭闻德主导，尹宇峰辅助。

2. 深入分析和理解Commuter的设计与实现

尹宇峰主导，谭闻德辅助。

3. 基于Commuter对socket建模

尹宇峰主导，谭闻德辅助。

具体细节

sv6移植

Commuter分析和理解

注：本小节将基于[2]中的文献和代码进行论述，考虑到时间限制和难度较大等原因，我们略去了其中关于sim条件证明的部分，但是这不会影响我们对于Commuter工具的整体理解和分析。

Commuter简述

本小节根据[2]中的文献Abstract、1. Introduction以及5. Analyzing interfaces using COMMUTER章节整理得到。

在论文中，作者指出当今的操作系统判断并行性的方式较为简单：在实际操作系统不同的核上运行测试代码来检测并行性的瓶颈。这样的方法有着明显的弊端：1. 我们不清楚最重要的并行性的瓶颈在哪里；2. 在操作系统开发阶段的后期，设计层面的修改（例如修改系统调用的接口）显得不切实际。为此作者提出了一个问题：我们是否可以仅仅通过系统调用的行为描述（specification）来判断系统调用与系统调用之间的并行性？

接着，作者提出了一条规则：如果对于一组系统调用，他们之间的任意调用顺序不会影响最后的系统状态和返回结果（即SIM条件），那么这些系统调用便可以并行执行。这一规则的提出使得上述问题得到了解决（作者使用了名为Analyzer的工具来判断并行性）。

Commuter的提出可以帮助我们分析和设计系统调用的行为描述，并设计相应的实现到达并行效果。例如说，在同一个文件目录下，多个进程调用open系统调用，在类POSIX文件系统中这是无法并行的，这是因为open系统调用需要返回最小的文件描述符，但是当我们把行为描述修改成任意一个合法的文件描述符，他们就可以实现并行了。

更进一步地，针对在行为描述层面证明可以被并行的系统调用序列，作者利用TestGen工具生成了相应的测试代码，并在实际操作系统（sv6和Linux）中利用MTrace工具运行测试代码，以此来检测系统调是否因为不必要的存储共享降低了os的并行性，同时帮助定位了OS并行性的瓶颈。最后，针对测试代码的结果，作者给出了几个可以帮助提升os并行性的例子。

总的来说，Commuter的核心设计分成了三个部分Analyzer、TestGen、MTrace，其中Analyzer负责分析系统调用序列是否满足SIM条件，针对系统调用序列中满足条件的path condition，传递给TestGen；TestGen针对这些path condition实例化测试代码 `TestGen.c`；MTrace运行在CPU的修改版本，额外记录了操作系统访问物理内存的信息，MTrace通过分析是否有缓冲行的访问冲突来判断实际os的系统调用之间的并行性。原文中也提到充分理解Commuter是一件极其困难的事情，因为它涉及了许多的知识，例如符号化执行，z3求解。此外，更加令人头疼的是，限于篇幅，许多概念和细节，作者并没有真正阐释清楚，例如5.2 TESTGEN章节关于assignments同构这一概念和对于conflict coverage代码的实现。以下，我们将从Commuter的这三个部分分别展开详细论述他们的设计与实现，方便后人继续深入研究Commuter工具。

Analyzer

本小节根据[2]中的文献5. Analyzing interfaces using COMMUTER和5.1 ANALYZER章节整理得到。

总体来说, Analyzer的功能是输入对符号化的接口进行建模(代码实现在spec.py中), 然后针对该模型计算出准确的运行条件, 使得系统调用之间可以并行。

注: 为了简化问题, 作者在考虑系统调用序列并行化问题时候, 将序列中调用的个数规定为2个。

接下来, 我们逐步讲解:

首先是对符号化的接口进行建模, 这是Analyzer的输入。我们需要定义每个系统调用的python model (即行为描述或specification)。例如论文中的rename model, 有两个参数, 一个是原先的名字, 一个是希望重新命名的名字。通过输入参数的不同, rename会有相应不同的操作, 当两个参数相同时, 不需要任何操作, 若不然, 则需要进行若干操作。

接着, 我们会通过符号化执行的方法来分析系统调用序列是否满足SIM条件, 即序列以任意先后顺序调用, 最后的系统状态和返回结果都是一致的, 而且满足单调特性(系统调用的子序列同样满足SIM条件)。判断是否满足条件的方式也比较暴力, 即枚举全部调用序列, 然后观察系统状态和返回结果是否一致。

符号化执行的方法, 会让我们可以遍历系统调用内部的所有if分支路径(我们称之为path), 其中有一些路径可以做到并行, 而有一些路径则不行, 于是通过Analyzer的分析后, 我们会得到一组可以并行化的路径, 而在此基础上, 便可以得到运行路径需要path condition, 我们将这组满足SIM条件的path condition称之为Commutativity conditions。

再次以rename系统调用为例, 当我们输入给Analyzer rename的行为描述后, Analyzer会说renane(a, b)和rename(c, d)可以并行化, 如果参数满足以下任意一个条件:

1. 文件a和c存在, 而且a, b, c, d两两不相同。
2. 文件a存在, $b \neq c$, 文件c不存在; 或者文件c存在, $d \neq a$, 文件a不存在。
3. 文件a和c都不存在。
4. $a=b$, $c=d$ 。
5. 文件a存在, $a=b$, $a \neq c$; 或者文件c存在, $c=d$, $a \neq c$ 。
6. a, c是两个相同的索引节点, 而且 $a \neq c$, $b=d$ 。

接下来, 我们讨论一下Analyzer的核心代码实现:

simtest.py的test函数, 这个函数就是用来检测SIM条件的。它采用了对系统调用序列深度优先搜索方法(Depth-first search)来检测, 对于第一次抵达树根时, 记录下系统状态和返回值, 此后每次抵达树根就会进行比较, 如果不一样就会直接退出函数。值得注意的是, 在simtest.py中调用test的方式是符号化执行的, 所以说不会出现说特定参数恰好返回值和系统状态一致的情况, 符号化变量的结果一致, 我们就可以安心地认为他们满足系统调用。

simtest.py的test_callset函数, 这个函数利用符号化执行的方式调用了test函数, 对于每个path都验证了sim条件, 并会将所有满足sim条件的path condition取或打印出来(即Commutativity conditions), 所有不满足sim条件的path condition也会取或打印出来。

TestGen

本小节根据[2]中的文献5. Analyzing interfaces using COMMUTER和5.2 TESTGEN章节整理得到。

作为Commuter的第二阶段, TestGen是其中概念最难理解, 代码阅读最为困难的部分。主要难点在于:

1. 限于篇幅, 许多概念和细节, 作者并没有真正阐释清楚, 例如关于assignments同构这一概念。为此, 我们还阅读了作者的博士毕业论文, 其关于assignment同构的描述和[2]中的论文是比较一致的, 同样含糊不清。
2. 鉴于对论文的不理解, 我们希望通过阅读代码的方式, 解答困惑。但是结果令人失望, 杂乱的代码注释, 复杂的函数调用关系, 以及python本身欠缺的类型声明的语法特性给我们的分析工作带来了空前的挑

战。

3. 没有其他相关的文献参考，仅有的文献便是[2]和作者的博士毕业论文。

4. 我们是唯一一组对Commuter工具进行分析和理解的小组，没有其他小组可以给予帮助，而询问了杨兴果学长，同样问题没有得到解答。

不过，在长期的不懈努力下，我们还是成功克服了上述困难，并且对这一部分的工作有了十分彻底的理解和分析，这样的结果让人十分振奋！

我们还是从头说起，TestGen的任务是记录下来Analyzer输出的Commutativity conditions，并将其中的符号化变量实例化，然后生成实际的测试代码，理论上这些测试代码都是可以被并行执行的。（因为这些代码都是由Analyzer分析认为满足SIM条件的）

也正因为如此，TestGen生成测试代码的目的就是寻找的潜在的系统调用实现的并行化问题。但是，我们仍然不会知道究竟什么样的输入参数会触发访问冲突。因此，我们需要构造一种合适的覆盖模式，使得我们的测试代码可以尽可能地找出可能的并行化问题。

论文中提到的覆盖模式有两种：

1. path coverage: 针对每个path condition，通过z3求解器求得满足条件的输入参数，使得测试路径可以遍历每一条路径。
2. conflict coverage: 上述的path coverage是一个path condition对应一组参数赋值，而conflict coverage是一个path condition对应多组参数赋值。为了解释这样做的目的，我们举一个例子：对于两个pwrite系统调用，他们对内存进行写操作的offset相同或者不相同，code path是一致的，但是他们的访问模式却是不同的，offset相同时，会造成访问冲突；offset不同时，则可以并行化。换一句话来说，相同的系统调用序列，相同的path路径，有可能出现一个没有访问冲突，一个出现访问冲突。因此，简单的路径覆盖并不能察觉上述例子的问题。

注：起初，我们将conflict coverage直接翻译为了冲突覆盖，但是此处的冲突和我们普遍意义上认为的存储访问冲突概念是不一样的，所以为了避免混淆，我们直接引用了英语原文，我个人的理解是这个名字取得不太妥当，更改为访问模式覆盖会更好。

关于assignment同构的概念，我们通过一个例子来阐述：

| 表达式 | (1, 1) | (2, 2) | (1, 3) |
|----------|--------|--------|--------|
| $x - y$ | 0 | 0 | -2 |
| $x + y$ | 2 | 4 | 4 |
| $2x - y$ | 1 | 2 | -1 |
| $2y - x$ | 1 | 2 | 5 |

我们可以看出来，四个表达式根据三组赋值分别得到的结果进行值划分，前两组的划分结果是一致的，而第三组与前两组的划分结果不一样。**那么我们就说：前两组assignment是同构的。**

MTrace

本小节根据[2]中的文献5. Analyzing interfaces using COMMUTER和5.3 MTRACE章节整理得到。

这一部分的工作较为简单，MTrace的功能是运行TestGen的测试代码，MTrace会查看每个测试代码是否会有访问冲突。通过MTrace，开发者可以利用这些测试代码来寻找并修正代码中的并行性问题，亦或是作为测试，保证并行性的bug不会出现在系统调用的实现中。

测试代码分为两部分：

1. setup函数，负责初始化系统初始状态和系统调用的参数。
2. 若干个系统调用函数，将在不同的核上运行，这此处由于只观察系统调用两两组合的并行情况，所以有两个系统调用函数，MTrace会记录这两个函数所有对内存的读和写操作，然后根据这些记录分析并检测是否出现访问冲突，如果没有就说明这些系统调用可以并行，不然，则会记录下访问冲突的变量和对应调用他们的代码。

接下来，我们讨论一下MTrace的核心代码实现：

Mtrace的代码仓库在[15]中，核心代码是 `mtrace.c` 中的 `mtrace_ld`、`mtrace_st`、`mtrace_cline_update_ld` 和 `mtrace_cline_update_st` 四个函数。

其中 `mtrace_cline_update_ld` 和 `mtrace_cline_update_st` 两个函数会共同维护一组名为 `block->cline_track` 的位串，其中每一个缓冲行对应一个位串。如果 `block->cline_track` 对应的CPU位置的值为1，则说明该CPU目前拥有了对应缓冲行最新的数据。所以说，当我们进行读操作，发现对应CPU位置的位串值不为1的时候，则说明别的CPU对这个缓冲行可能进行了写操作（也可能是该缓冲行第一次被读入寄存器），可能出现访问冲突，需要记录这一次的访存信息；类似地，当我们进行写操作，我们会比较位串和 `1 << CPU` 的值，如果不相等，则说明别的CPU对这个缓冲行可能进行了读操作或是写操作（也可能是该缓冲行第一次被写入数据），可能出现访问冲突，需要记录这一次的访存信息。然后我们将位串更新为 `1 << CPU`，以确认只有该CPU拥有缓冲行最新的数据。

通过上述分析，我们不难看出，MTrace追踪的访存冲突的粒度不是地址级别的，而是缓冲行级别的。所以说，可能出现虽然两个函数访问的内存地址不一样，但是因为他们在同一个缓冲行，而导致了访存冲突。

这里，我们发现了作者写论文的一个trick，在文中作者比较了sv6和Linux两个操作系统分别跑TestGen生成的测试代码结果，发现sv6明显好于Linux。但是，事实上，sv6中有的数据结构按照了缓存行大小进行了对齐，所以这样在多数情况下就会避免缓存行级别的缓存冲突了，所以说sv6潜在地就有利于这些测试。

Commuter小结

本小节根据[2]中的文献8. Conclusion章节和我们自己的理解体会整理得到。

在本篇论文中，作者首先提出并通过数学推导严格证明了一条规则：如果对于一组系统调用，他们之间的任意调用顺序不会影响最后的系统状态和返回结果（即SIM条件），那么这些系统调用便可以并行执行。然后基于这一规则，使得我们仅仅通过系统调用的行为描述（specification）来判断系统调用与系统调用之间的并行性得到了可能。更进一步地，作者开发了一个名为Commuter的工具用于测试和分析实际os中的并行性问题。Commuter分为三个部分：Analyzer，TestGen以及MTrace，Analyzer通过符号化执行分析行为描述级别系统调用的并行性，并给出可并行的Commutativity conditions；TestGen则通过Commutativity conditions生成实际的c测试代码；MTrace则在运行测试代码的时候记录访存冲突信息，检查测试代码是否可以并行。

我们使用Commuter工具有两个好处：

1. 利用Analyzer和系统调用的行为描述（specification）来判断系统调用与系统调用之间的并行性，在开发os的前期阶段及时发现并修改系统调用潜在的并行性问题。
2. 利用TestGen生成测试代码，并利用MTrace记录测试代码的访存冲突信息，以此来检测实际操作系统中实现的系统调用是否出现了不必要的共享存储，而导致了并行性变差，并以此定位并行性的瓶颈，方便后续os的优化。

基于Commuter对socket建模

结束语

实验成果

实验收获

在本次课程设计中，我们：

- 熟悉了RV64指令集
- 熟悉了一个操作系统的移植过程
- 学习了符号化执行方法
- 学习了Z3 SMT求解器的使用方法
- 了解了sv6
- 深入了解了Commuter
- 了解了socket

心得体会

谭闻德：

尹宇峰：

未来的工作

我们希望能将基于Commuter对unix socket API所建得的模型，结合Commuter中的testgen模块生成相应的测试代码，以便可以对实际操作系统的网络子模块进行并行性测试与优化。

致谢

感谢陈渝老师，向勇老师对于我们课程设计的耐心指导；

感谢辉总给予我们硬件的大力支持；

感谢路橙，于志竟成组与我们小组合作与讨论。

参考文献

1. sv6 <https://github.com/aclements/sv6>
2. Commuter <https://pdos.csail.mit.edu/archive/Commuter/> <https://github.com/aclements/Commuter>
3. The RISC-V Instruction Set Manual Volume I: User-Level ISA
<https://riscv.org/specifications/>
4. The RISC-V Instruction Set Manual Volume II: Privileged Architecture
<https://riscv.org/specifications/privileged-isa/>
5. bbl-ucore <https://ring00.github.io/bbl-ucore/>
6. ucore labs RISC-V 64移植 https://gitee.com/shzhxh/ucore_os_lab/tree/riscv64-priv-1.10
7. Booting a RISC-V Linux Kernel <https://www.sifive.com/blog/2017/10/09/all-aboard-part-6-booting-a-risc-v-linux-kernel/>
8. Entering and Exiting the Linux Kernel on RISC-V <https://www.sifive.com/blog/2017/10/23/all-aboard-part-7-entering-and-exiting-the-linux-kernel-on-risc-v/>
9. Paging and the MMU in the RISC-V Linux Kernel <https://www.sifive.com/blog/2017/12/11/all-aboard-part-9-paging-and-mmu-in-risc-v-linux-kernel/>

10. 符号执行入门 <https://zhuanlan.zhihu.com/p/26927127>
11. mini-mc <https://github.com/xiw/mini-mc>
12. Z3 <https://github.com/Z3Prover/z3>
13. HiFive Unleashed <https://www.sifive.com/products/hifive-unleashed/>
14. Freedom U540-C000 Manual <https://www.sifive.com/documentation/chips/freedom-u540-c000-manual/>
15. MTrace <https://github.com/aclements/mtrace>