基础设施与调试

王慧妍

why@nju.edu.cn

南京大学 软件学院 计算机软件研究所

本讲概述

感受到 PA 的恶意了吗?

- 不就是写几行代码么，怎么……怎么写不对啊……
- 这就是为什么 PA 要搞那么麻烦：又是 Makefile，又是各种项目/工具
- 没有适当的基础设施，PA 的完成率会大幅降低

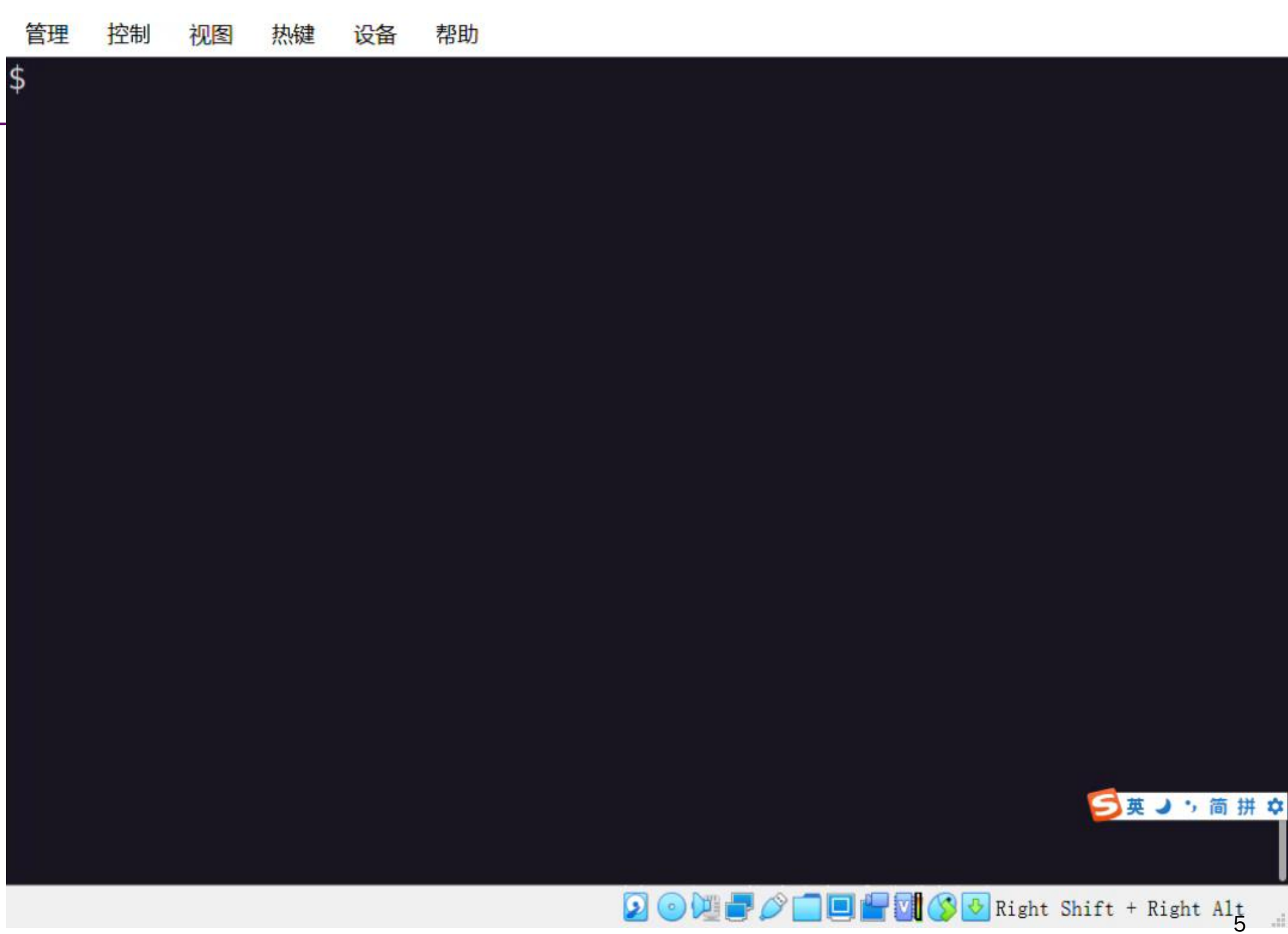
- 开发/调试的基础设施
- 系统编程：基础设施
- Differential testing 代码导读

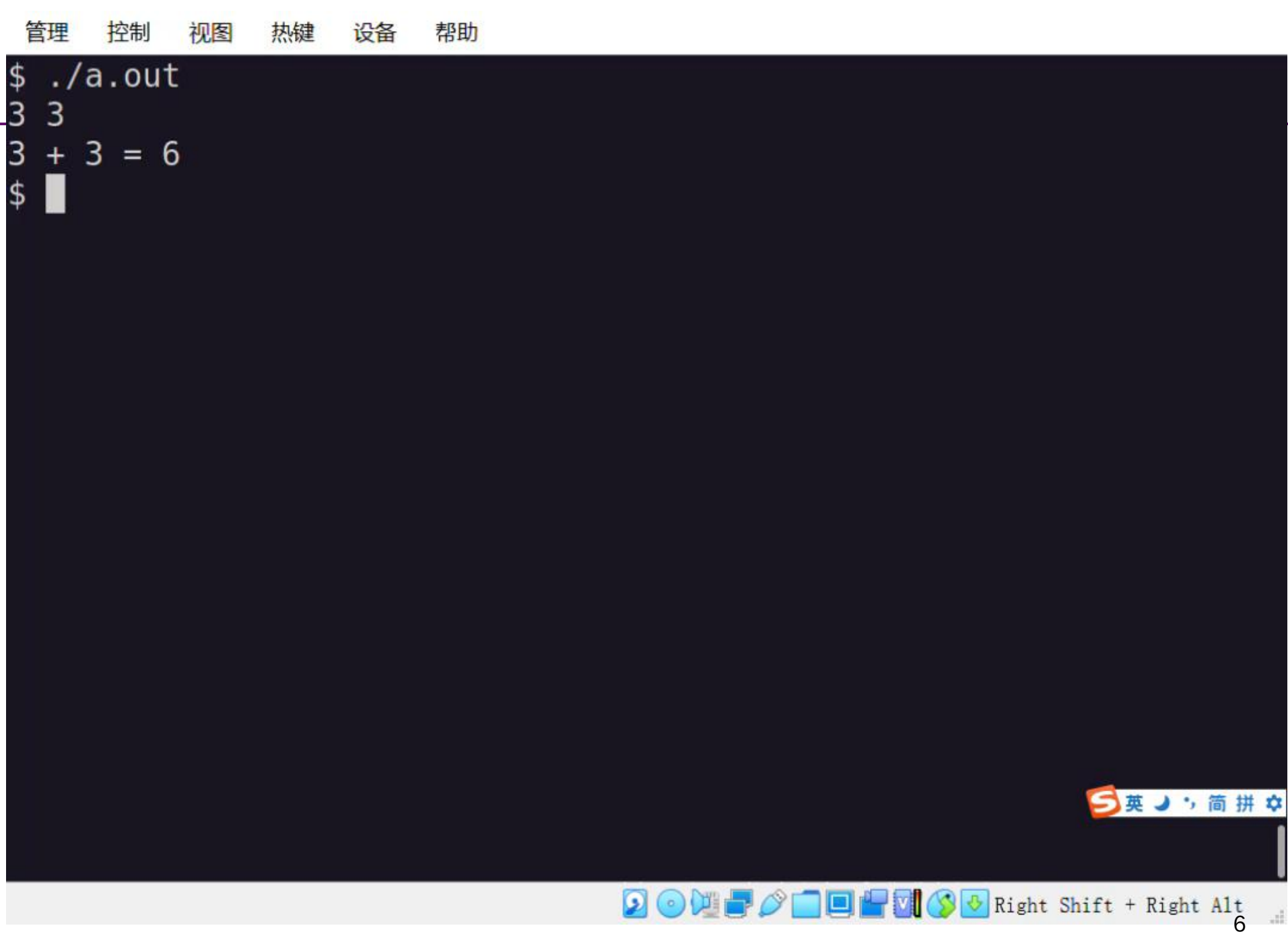
开发的基础设施

你们是怎么写程序的？

- 虽然很多同学已经配置好了良好的编程环境，但依然有很多同学在 “面向浪费时间编程”
  - yzh 推荐 vim/tmux 的原因是大家用 IDE 容易迷失自我 (关注表象，而不知道内在是如何工作的)
  - 在你搞清楚的前提下，也可以解放自我

```
$ gcc a.c
a.c: In function ‘main’: a.c:5:1:
error: ‘a’ undeclared (first use in this function)
$ vi a.c
$ gcc a.c
$ ./a.out 1 2 // 你输入的
zsh: segmentation fault (core dumped) ./a.out
...
```


管理
控制
视图
热键
设备
帮助
$
英
简
拼
Right Shift + Right Alt


管理 控制 视图 热键 设备 帮助
$ ./a.out
3 3
3 + 3 = 6
$
英 简 拼
Right Shift + Right Alt

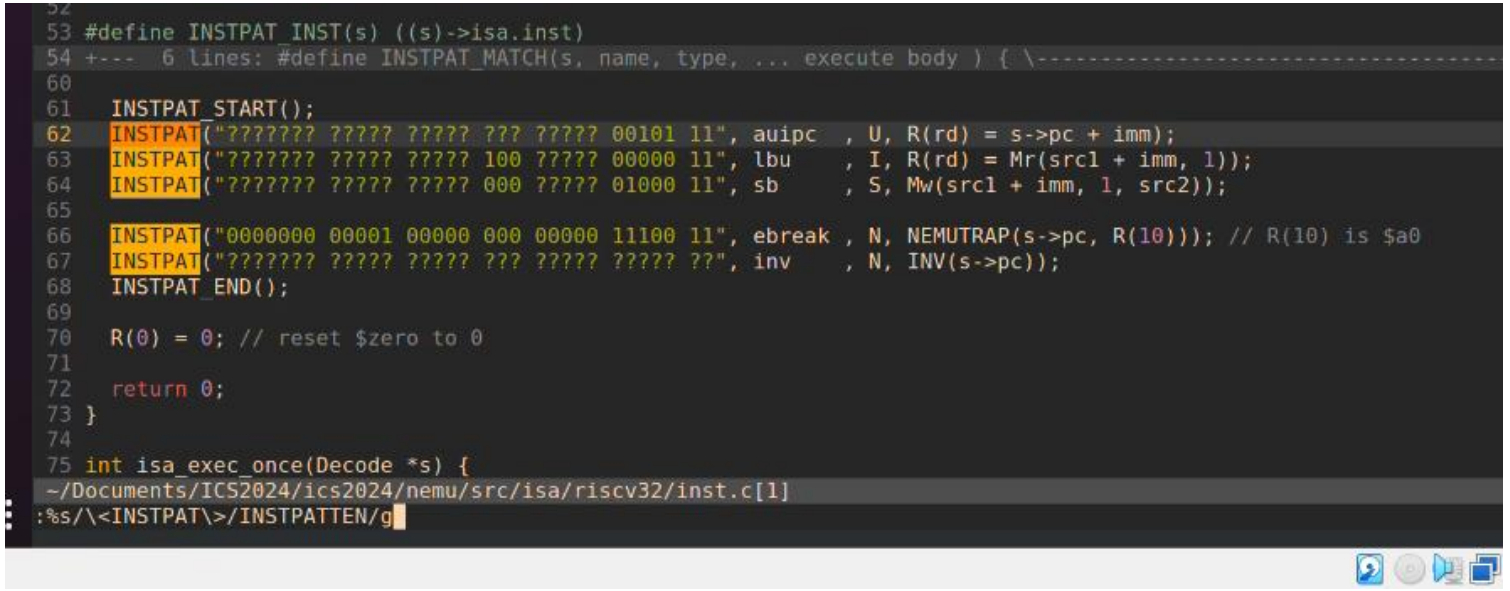
你们是怎么写程序的？

- 虽然很多同学已经配置好了良好的编程环境，但依然有很多同学在 “面向浪费时间编程”
  - yzh 推荐 vim/tmux 的原因是大家用 IDE 容易迷失自我 (关注表象，而不知道内在是如何工作的)
  - 在你搞清楚的前提下，也可以解放自我

```
$ gcc a.c
a.c: In function ‘main’: a.c:5:1:
error: ‘a’ undeclared (first use in this function)
$ vi a.c
$ gcc a.c
$ ./a.out 1 2 // 你输入的
zsh: segmentation fault (core dumped) ./a.out
...
```

批量写或修改相似代码的效率

- 正则表达式
  - 用INSTPAT实现了50条指令
  - INSPAT宏做了简单修改怎么办？



批量写或修改相似代码的效率

- 正则表达式
  - 用INSTPAT实现了50条指令
  - INSPAT宏做了简单修改怎么办？
- 批量相似代码

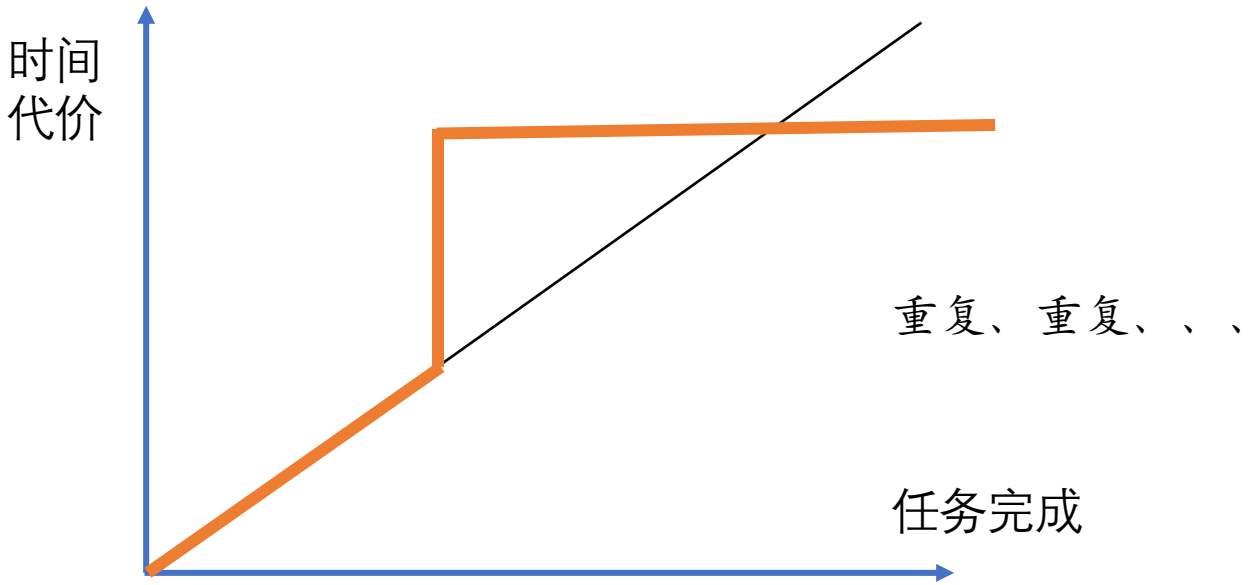
```
:%! seq 1 50 | shuf | cat -n | awk '{print "\#define X" $1 " " $2}'
```

- 记录回放
  - qa -@recordinga
  - 99@a

```
 1 #define X1 19
 2 #define X2 13
 3 #define X3 16
 4 #define X4 11
 5 #define X5 6
 6 #define X6 15
 7 #define X7 1
 8 #define X8 2
 9 #define X9 17
10 #define X10 4
11 #define X11 14
12 #define X12 3
13 #define X13 12
```

时间分析

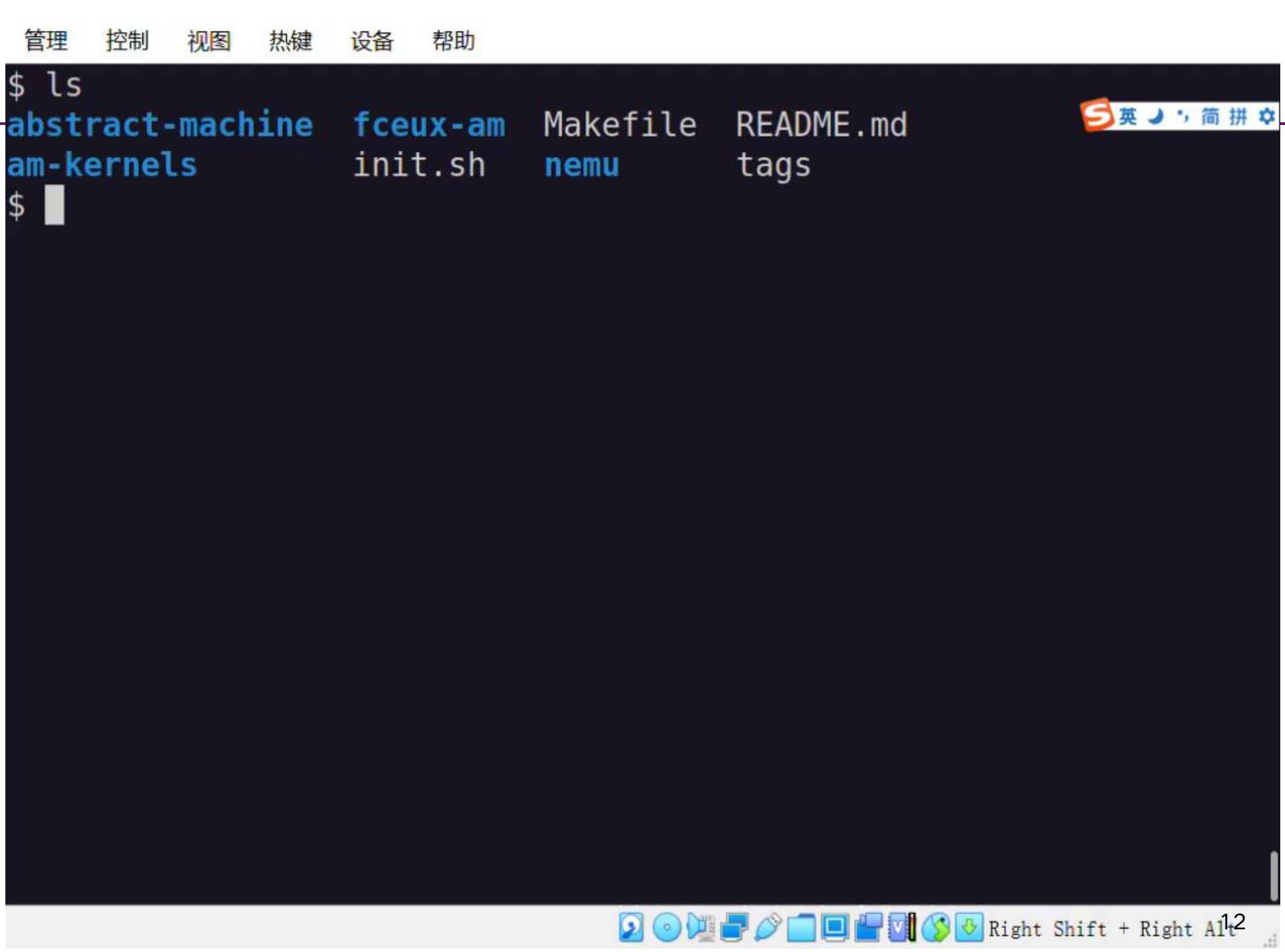
本质：用编程取代重复劳动，优化基础设施



基础设施的本质

- 通过适当的配置、脚本减少思维中断的时间，提高连贯性，保持短时记忆活跃
  - make (fresh build) → 4s，已被打断
  - make (parallel) → 0.5s

- 基本原则：
  - 如果你认为有提高效率的可能性，一定有人已经做了


管理 控制 视图 热键 设备 帮助
$ ls
abstract-machine fceux-am Makefile README.md
am-kernels init.sh nemu tags
$
英 简 拼
Right Shift + Right Alt

基础设施的本质

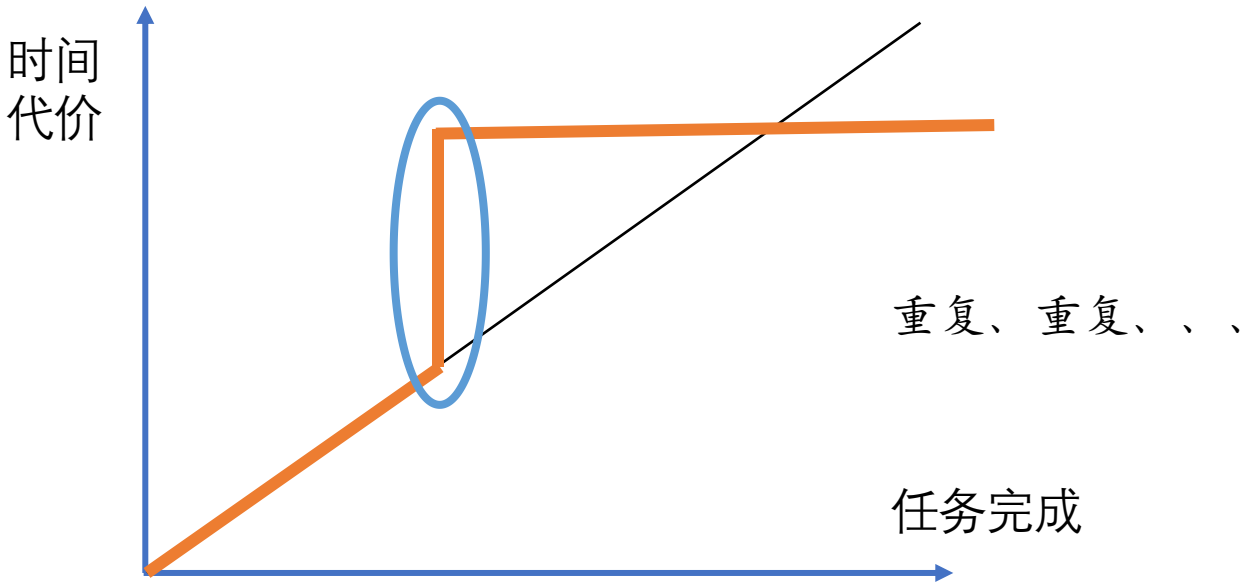
- 通过适当的配置、脚本减少思维中断的时间，提高连贯性，保持短时记忆活跃
  - make (fresh build) → 4s，已被打断
  - make (parallel) → 0.5s

- 基本原则：
  - 如果你认为有提高效率的可能性，一定有人已经做了
  - 每次都 make –j8?
    - 或者 alias make='make –j8'
    - 在 Makefile 里加一行 MAKEFLAGS += –j 8 (better)
      - 配置一键编译运行 → 1s 内完成

```
# Building fceux-image [x86-nemu]
# Building am-archive [x86-nemu]
# Building klib-archive [x86-nemu]
+ CC src/platform/nemu/trm.c
+ AR -> build/am-x86-nemu.a
+ LD -> build/fceux-x86-nemu.elf
# Creating image [x86-nemu]
+ OBJCOPY -> build/fceux-x86-nemu.bin
$ export ARCH=x86-nemu
$ make
# Building fceux-image [x86-nemu]
+ CXX src/emufile.cpp
# Building am-archive [x86-nemu]
+ CC src/platform/nemu/trm.c
+ AR -> build/am-x86-nemu.a
# Building klib-archive [x86-nemu]
+ LD -> build/fceux-x86-nemu.elf
# Creating image [x86-nemu]
+ OBJCOPY -> build/fceux-x86-nemu.bin
$ export ARCH=native
$ make
```

心态分析

- 本质上，这都不是难事，STFW 随手即来，但大家通常做不好
  - 尚未 GET STFW 的技能
    - 在 hosts 中屏蔽百度 (或修改默认搜索引擎)
  - 惰性
    - 键入 make –j8: 增加 1s 时间
    - STFW: 至少需要几分钟，而且有不少失败尝试 (短期收益是负的，尤其是上课 workloads 已经很重的前提下)



管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
$ vim Makefile
```

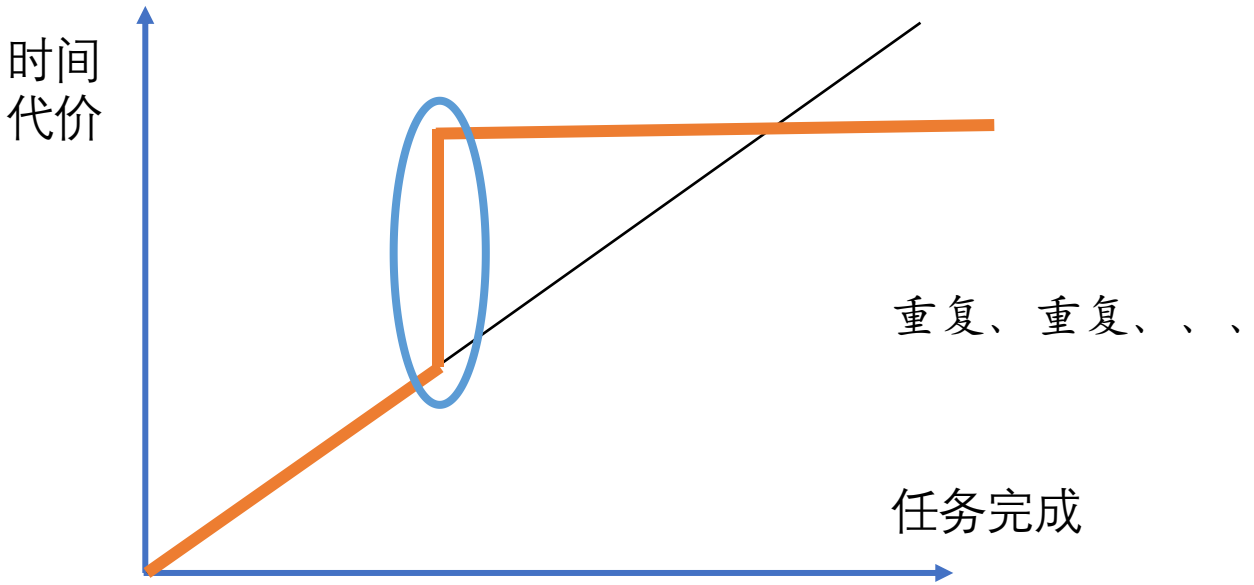
英 简 拼

Right Shift + Right Alt

心态分析 (cont'd)

克服惰性可以使你快速成长。DDL is coming.

- 在很多小事上，可能并不带来显著的收益
  - 每次键入 make –j8 可能并不显著缩短 PA 完成的时间
  - 但久而久之成为习惯，你就总是想着改进基础设施



调试的基础设施

例子：使用GDB

```
$ ./a.out
Segmentation fault (core dumped)
```

- GDB: 最常用的命令在 gdb cheat sheet（unavailable？）
- Segmentation fault 是一个非常好的 failure
  - 某条指令访问了非法内存
  - 无非就是空指针、野指针、栈溢出、堆溢出……
- 怎样定位 segmentation fault 发生时的语句/指令？
  - (core dumped)
  - gdb - 自带 backtrace，95% 都能帮你定位到问题

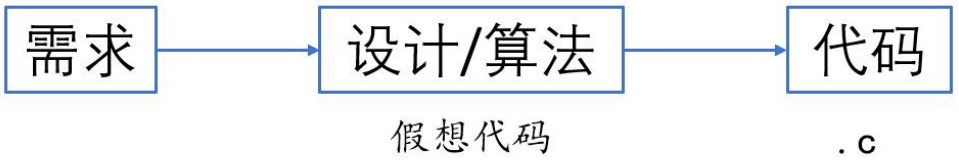
为什么debug那么困难

- 因为 bug 的触发经历了漫长的过程
  - 需求 → 设计 → 代码 → Fault (bug) → Error (程序状态错) → Failure
    - 我们只能观测到 failure (可观测的结果错)
    - 我们可以检查状态的正确性 (但非常费时)
    - 无法预知 bug 在哪里 (每一行 “看起来” 都挺对的)

```c
#include <stdio.h>

#define n 3

int main(){
    int sum = 0;
    for(int i = 0; i<n; i++)
        for(int j = 0; j<n; i++){
            sum += i * j;
        }
    printf("sum = %d\n", sum);
}
```

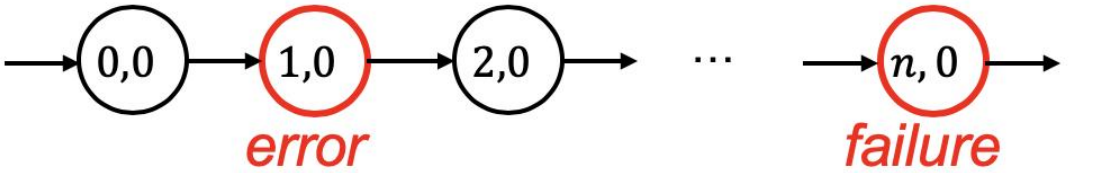


为什么debug那么困难

- 因为 bug 的触发经历了漫长的过程
  - 需求 → 设计 → 代码 → Fault (bug) → Error (程序状态错) → Failure
    - 我们只能观测到 failure (可观测的结果错)
    - 我们可以检查状态的正确性 (但非常费时)
    - 无法预知 bug 在哪里 (每一行 “看起来” 都挺对的)

```
for (int i = 0; i < n; i++)
  for (int j = 0; j < n; i++)
    ...
```

fault 程序bug



状态违反spec

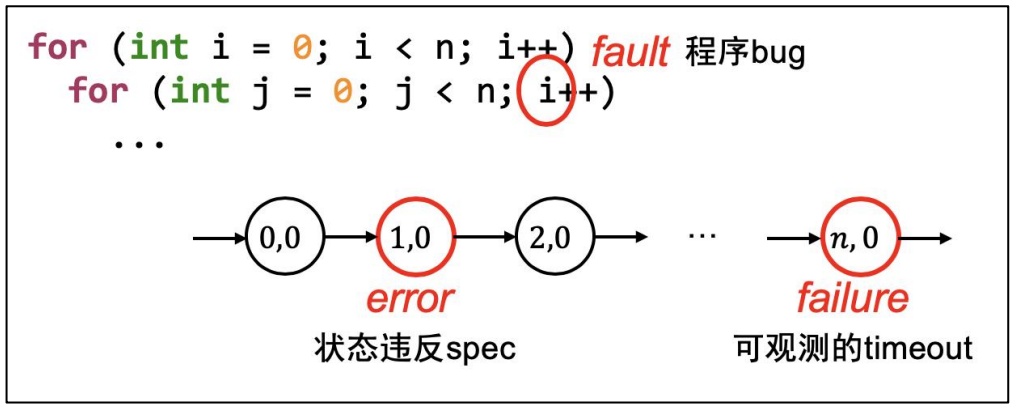
可观测的timeout

测试/调试的理论

Fault → Error → Failure

- 对于 PA 来说，failure 是显而易见的：
  - Segmentation Fault 了，fail
  - HIT BAD TRAP 了，fail
  - 马里奥/仙剑不能跑嘛，fail

- 我已经调了很久了，但就是找不到那个导致 error 的指令啊
  - 怎样找到 error 发生的位置？



防御性编程-assert

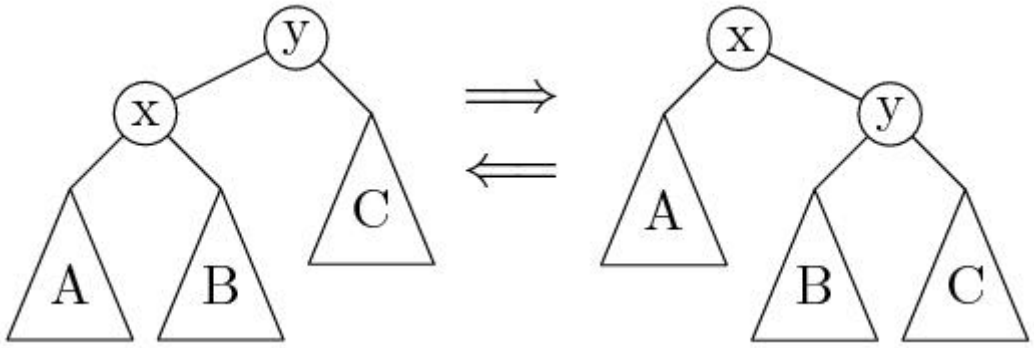
- 断言的意义
  - 把代码中隐藏的 specification 写出来（回到需求的另一种理解）
    - Fault → Error (靠测试)
    - Error → Failure (靠断言)
      - Error 暴露的越晚，越难调试
      - 追溯导致 assert failure 的变量值 (slice) 通常可以快速定位到 bug

写好读、易验证的代码
在代码中添加更多的断言 (assertions)

例子：维护父亲节

测试　检查assert

需求 → 设计 → 代码 → Fault → Error → Failure




```
// 结构约束
assert(u->parent == u ||
       u->parent->left == u ||
       u->parent->right == u);
assert(!u->left || u->left->parent == u);
assert(!u->right || u->right->parent == u);

// 数值约束
assert(!u->left || u->left->val < u->val);
assert(!u->right || u->right->val > u->val);
```

例子：NEMU 中的断言

- 看起来很没必要，但可以提前拦截一些未知的 bug
  - 例如 memory error

```
static inline int check_reg_index(int index) {
    IFDEF(CONFIG_RT_CHECK, assert(idx >= 0 && idx < 32));
    return index;
}

#define gpr(idx) (cpu.gpr[check_reg_idx(idx)]._64)
```

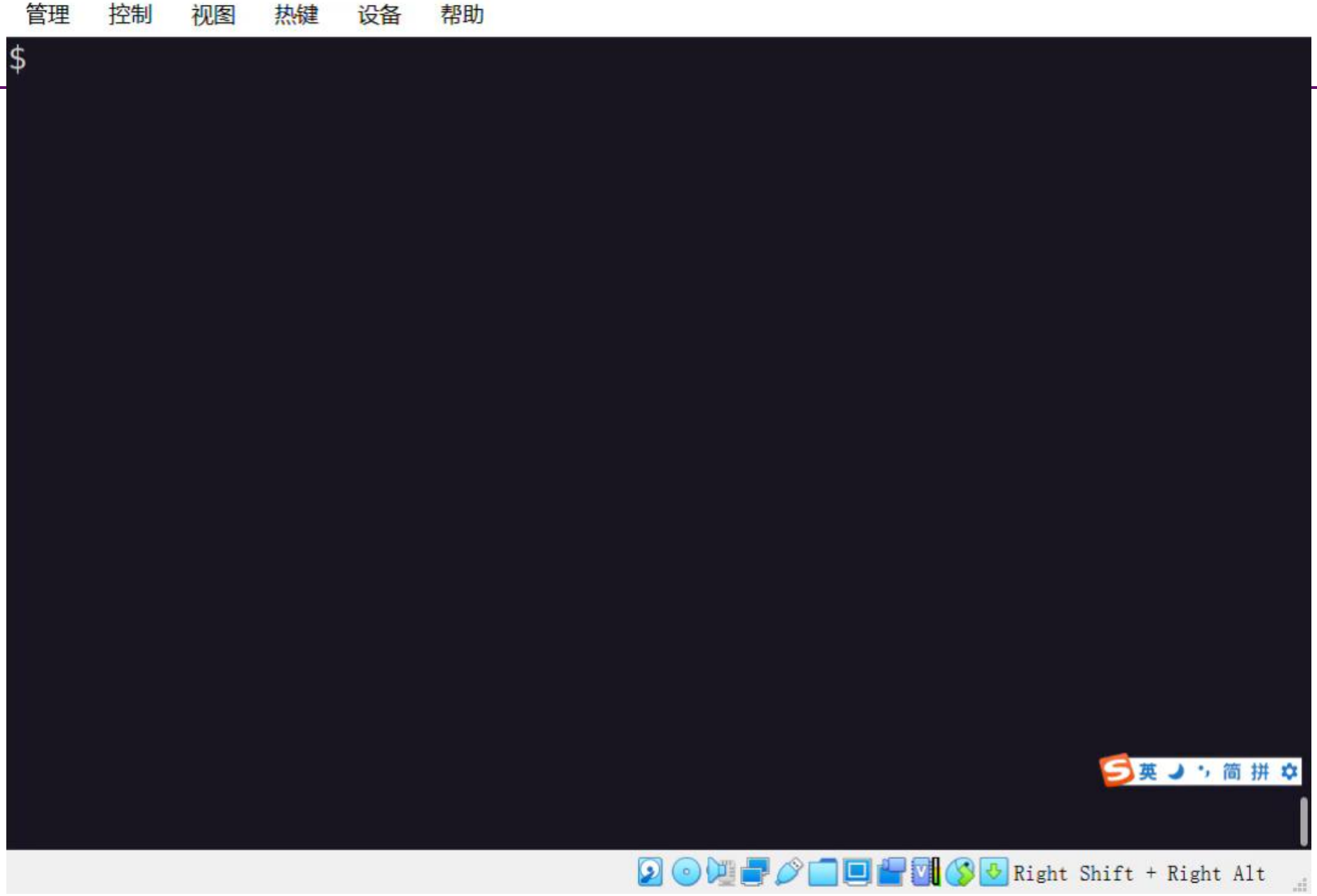
```
Assert(map != NULL && addr <= map->high && addr >= map->low,
    "address (0x%08x) is out of bound {%s} [0x%08x, 0x%08x] at pc = "
FMT_WORD, addr, (map ? map->name : "???"), (map ? map->low : 0), (map ?
map->high : 0), cpu.pc);
```

福利：更多的断言

- 你是否希望在每一次指针访问时，都增加一个断言
  - assert(obj->low <= ptr && ptr < obj->high);

```
int *ref(int *a, int i) {
    return &a[i];
}
void foo() {
    int arr[64];
    *ref(arr, 64) = 1; // bug
}
```

- 一个神奇的编译选项
  - -fsanitize=address
  - **Address Sanitizer; asan** “动态程序分析”


管理 控制 视图 热键 设备 帮助
$
英 简 拼
Right Shift + Right Alt

PA出错了怎么办？

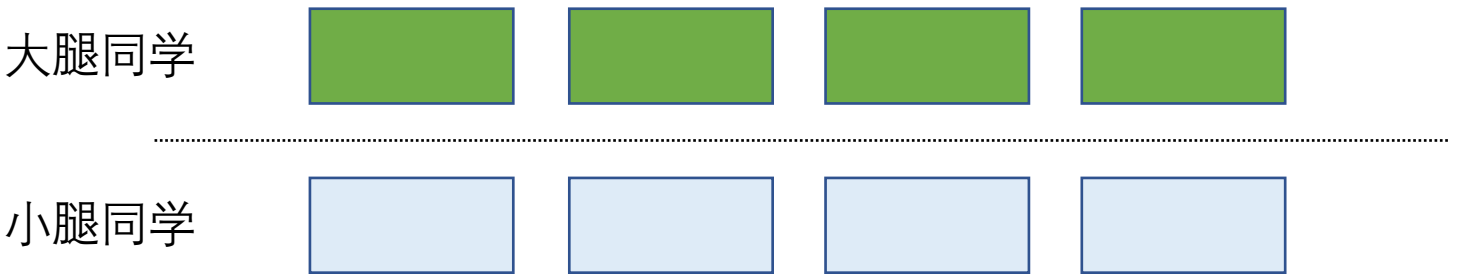
- 道理都懂，但出 bug 了，还是不知道怎么办
  - 一句难听的话
    - 你对代码的关键部分还不熟悉
    - 不知道如何判定程序状态是否正确
      - 对项目缺乏了解
      - 缺乏基础知识
      - 抱有 “我不理解这个也行” 的侥幸信息

系统编程：建立基础设施

抱大腿：一种想法

- 如果学长/同学已经有一份正确的代码，能不能借助这个代码快速诊断出自己代码的问题？
  - 同学们是非常智慧的，在 ICS-PA 创立的初期发明了替换调试法
    - PA 是分模块实现的 (若干个 .c)
    - 从自己的代码开始，逐个替换进大腿同学的 .c
    - 第一个替换后通过测试的文件里有 bug

- **Cool!**
  - 可能的改进：以函数级进行替换



Delta Debugging

- 假设程序 P 会fail，$P_{大腿}$ 会pass
  - 并且假设两份程序所有函数行为都相同
    - 将 $P_{大腿}$ 中的函数 f 替换成 P 中的f
    - 依然通过 → f 实现正确
    - 否则 → f 实现有bug

- 把类似的想法用在输入上
  - 不断把输入的一部分去掉，直到不能触发 bug 为止
    - Anders Zeller and Ralf Hildebrandt. Simplifying and isolating failure-inducing input. IEEE Transactions on Software Engineering, 28(2), 2002.
  - 不断把输入的一部分去掉，直到行为不再保持
    - Md Rafiqul Islam Rabin et al. Understanding Neural Code Intelligence through Program Simplification. ICSE'21

大腿同学代码的另一种用法

- 大腿同学的代码还可以帮助我们直接定位到错误的指令！
  - 只需要大腿的 compiled binary，就能指令级定位出错的位置

```
for i in range(int(sys.argv[1])):
    print('\n'.join(['si'] + [f'p ${r}' for r in ['eax', ...]]))
```

大腿同学代码的另一种用法

- 大腿同学的代码还可以帮助我们直接定位到错误的指令！
  - 只需要大腿的 compiled binary
  - 就能指令级定位出错的位置

```
for i in range(int(sys.argv[1])):
    print('\n'.join(['si'] + [f'p ${r}' for r in ['eax', ...]]))
```

- 然后找到 log 第一个不一致的地方！

```
N=10000
diff <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu-datui img) \
    <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu img)
```

基础设施：其实没那么困难

每做的一点自动化都是在给大项目节约维护成本。

- 程序员们就是喜欢造轮子
  - (日常管理) 效率低
    - → 熟练使用命令行工具/Python
  - (项目管理) 你已经会 gcc a.c 了，但没法管理几十个文件
    - → make, 一键编译/运行/测试
  - (代码编辑) 在代码里跳来跳去很麻烦
    - → IDE/配置 Vim/装插件
  - (错误检查) 很容易犯低级错误
    - → –Wall, –Werror, fsanitize=address
  - (代码调试) Segmentation Fault了
    - → gdb

Differential Testing

```
N=10000
diff <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu-datui img) \
    <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu img)
```

Differential Testing

> “同一套接口 (API) 的两个实现应当行为完全一致”

- 大腿同学 & 小腿同学：指令集的两套实现
  - 还有什么现实中软件系统的例子？

- 你能找到两份独立实现的东西，都可以测试
  - 浏览器 Mesbah and Prasad, ICSE'11
  - GCC (vs clang), Yang et al., PLDI'11
  - 文件系统, Min et al., SOSP'15
  - 数据库 Rigger and Su, OSDI'20
  - Gcov (vs llvm-cov)真的能在 gcc/llvm 里发现很多 bugs
  - DL library Pham et al., ICSE’19

NEMU: 实现 Differential Testing

- 刚才我们已经给大腿的代码实现了一个简单版本的 diff-testing
- 真正的大腿：QEMU
- ICS PA = 缩水版 QEMU
  - 实际上 PA 就是简化 (教学) 版的 QEMU

- diff-testing 实验
  - 以前我们一直都只是自己写自己的程序，调用库函数
  - diff-testing 是和其他程序 (QEMU, gdb) 协作/交互的例子

NEMU Differential Testing: 原理

```
# gen-cmds: 不断生成 si; p $eax; p $ebx; ...
diff-stream <(gen-cmds | nemu) <(gen-cmds | qemu-system-i386)
```

- 改进版的 “抱大腿” 代码，不需二分查找
  - 同时启动两个 NEMU (QEMU)
  - 在第一个输出不同时停止

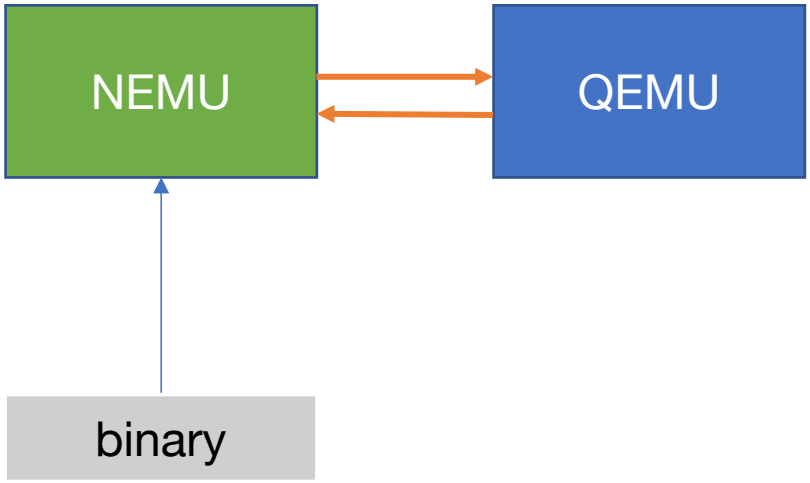
- (QEMU Monitor 展示)
  - -serial mon:stdio 启动 monitor!

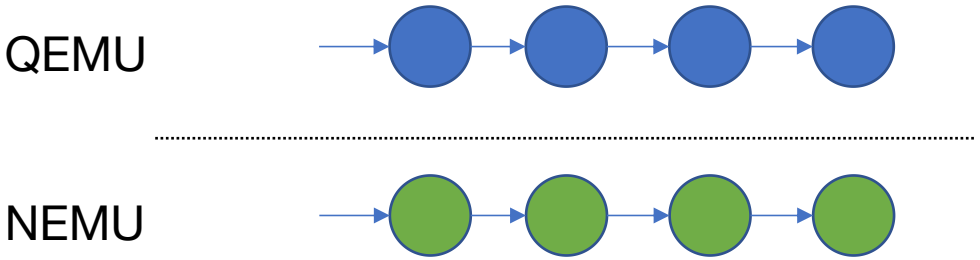
NEMU Differential Testing: 原理 (cont'd)

- 问题分析：我们需要使 QEMU 像 NEMU 一样执行指令！
  - QEMU 实现了 gdb 的协议
  - 协议格式同 monitor

- qemu-diff 实现：
  1. 启用 gdb 连接 QEMU
  2. 用 gdb_si() 在 QEMU 中执行一条指令
  3. 比较指令执行后寄存器是否有区别
  4. 动 QEMU 并配置它进入与 PA 类似的模式

NEMU和QEMU协作



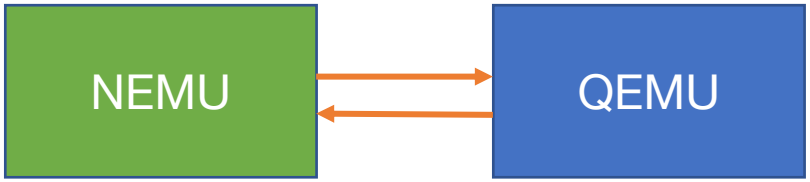


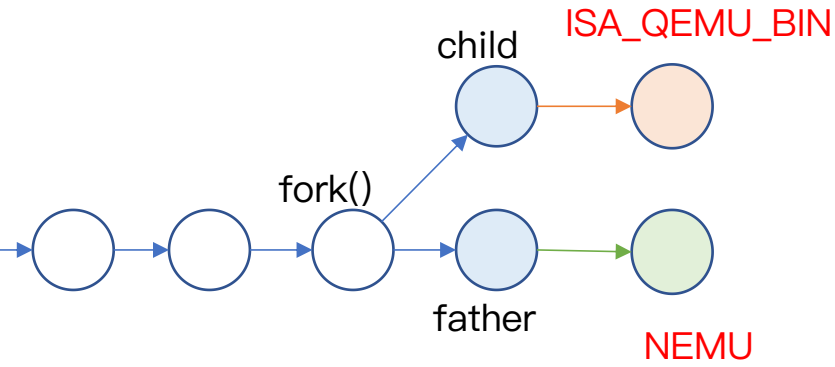
管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
$ vim nemu/
$
```


Right Shift + Right Alt

NEMU和QEMU协作

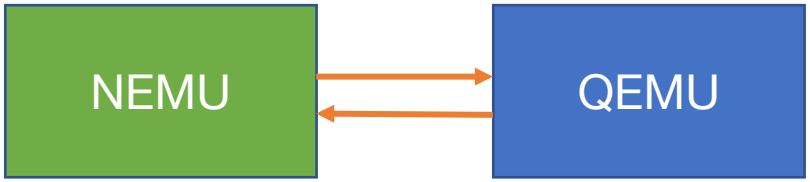


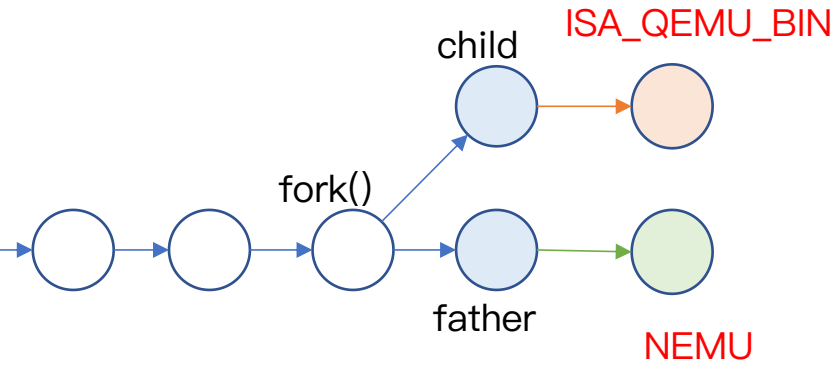



```
 9 #define ISA_QEMU_BIN "qemu-system-riscv32"
10 #define ISA_QEMU_ARGS "-bios", "none",
11 #elif defined(CONFIG_ISA_riscv64)
12 #define ISA_QEMU_BIN "qemu-system-riscv64"
```

```
38 void difftest_init(int port) {
39   char buf[32];
40   sprintf(buf, "tcp::%d", port);
41
42   int ppid_before_fork = getpid();
43   int pid = fork();
44   if (pid == -1) {
45     perror("fork");
46     assert(0);
47   }
48   else if (pid == 0) {
49     // child
50
51     // install a parent death signal in the chlid
52     int r = prctl(PR_SET_PDEATHSIG, SIGTERM);
53     if (r == -1) {
54       perror("prctl error");
55       assert(0);
56     }
57
58     if (getppid() != ppid_before_fork) {
59       printf("parent has died!\n");
60       assert(0);
61     }
62
63     close(STDIN_FILENO);
64     execlp(ISA_QEMU_BIN, ISA_QEMU_BIN, ISA_QEMU_ARGS "-S", "-gdb", buf,
65         "-serial", "none", "-monitor", "none", NULL);
66     perror("exec");
67     assert(0);
68   }
69   else {
70     // father
71
72     gdb_connect_qemu(port);
73     printf("Connect to QEMU with %s successfully\n", buf);
74
75     atexit(gdb_exit);
76
77     init_isa();
78   }
79 }
```

NEMU和QEMU协作






```c
bool gdb_connect_qemu(int port) {
  // connect to gdbserver on localhost port 1234
  while ((conn = gdb_begin_inet("127.0.0.1", port)) == NULL) {
    usleep(1);
  }
  return true;
}
```

```c
void difftest_init(int port) {
  char buf[32];
  sprintf(buf, "tcp::%d", port);

  int ppid_before_fork = getpid();
  int pid = fork();
  if (pid == -1) {
    perror("fork");
    assert(0);
  }
  else if (pid == 0) {
    // child

    // install a parent death signal in the chlid
    int r = prctl(PR_SET_PDEATHSIG, SIGTERM);
    if (r == -1) {
      perror("prctl error");
      assert(0);
    }

    if (getppid() != ppid_before_fork) {
      printf("parent has died!\n");
      assert(0);
    }

    close(STDIN_FILENO);
    execlp(ISA_QEMU_BIN, ISA_QEMU_BIN, ISA_QEMU_ARGS "-S", "-gdb", buf,
        "-serial", "none", "-monitor", "none", NULL);
    perror("exec");
    assert(0);
  }
  else {
    // father

    gdb_connect_qemu(port);
    printf("Connect to QEMU with %s successfully\n", buf);

    atexit(gdb_exit);

    init_isa();
  }
}
```

NEMU

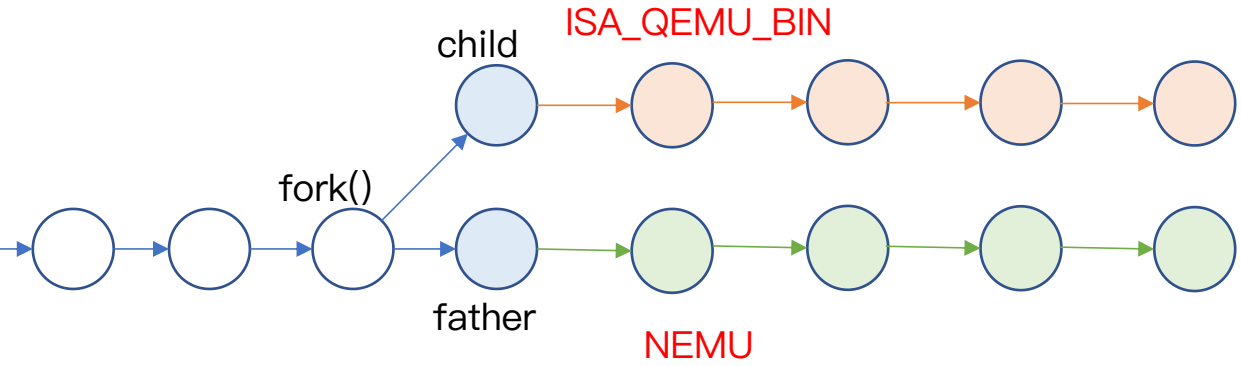
NEMU

- 大腿同学的代码还可以帮助我们直接定位到错误的指令!
  - 只需要大腿的 compiled binary
  - 就能指令级定位出错的位置

```
for i in range(int(sys.argv[1])):
    print('\n'.join(['si'] + [f'p ${r}' for r in ['eax', ...]]))
```

- 然后找到 log 第一个不一致的地方!

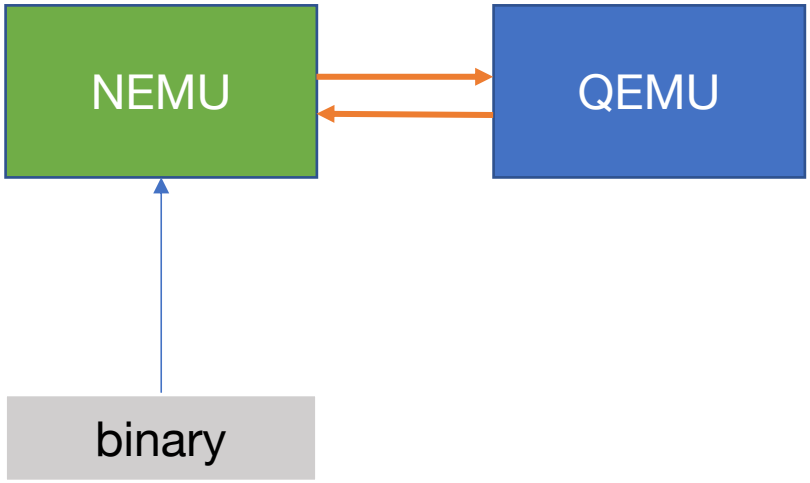
```
N=10000
diff <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu-datui img) \
    <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu img)
```

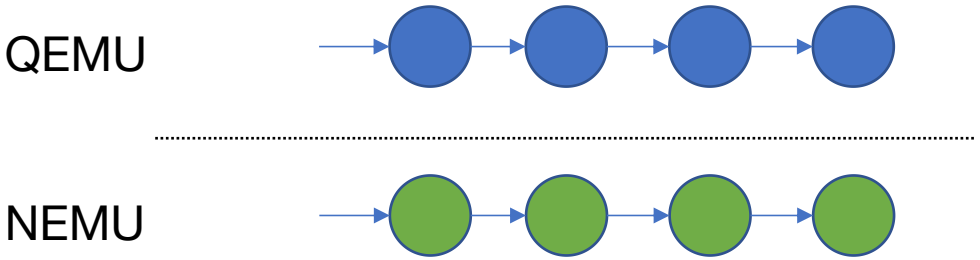



```
47 bool gdb_getregs(union isa_gdb_regs *r) {
48   gdb_send(conn, (const uint8_t *)"g", 1);
49   size_t size;
50   uint8_t *reply = gdb_recv(conn, &size);
51
52   int i;
53   uint8_t *p = reply;
54   uint8_t c;
55 +---  7 lines: for (i = 0; i < sizeof(union isa_gdb_
```

```
bool gdb_si() {
  char buf[] = "vCont;s:1";
  gdb_send(conn, (const uint8_t *)buf, strlen(buf));
  size_t size;
  uint8_t *reply = gdb_recv(conn, &size);
  free(reply);
  return true;
}
```

NEMU和QEMU协作





管理 控制 视图 热键 设备 帮助

why@why-VirtualBox: ~/Documents/ICS2021/teach/Course14 × | why@why-VirtualBox: ~/Documents/jyy-wiki-git/wiki ×

$

英 简 拼

Right Shift + Right Alt

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

why@why-VirtualBox: ~/Documents/ICS2021/teach/Course14 × why@why-VirtualBox: ~/Documents/jyy-wiki-git/wiki ×

$

英 简 拼

Right Shift + Right Alt

代码导读

- Differential testing 的初始化
  - 我们可以用 QEMU + gdb 调试这段代码!
  - –s –S 启动 QEMU; gdb target remote localhost:1234

```
uint8_t mbr[] = {
    0xfa,                                   // cli
    0x31, 0xc0,                             // xorw %ax,%ax
    0x8e, 0xd8,                             // movw %ax,%ds
    0x8e, 0xc0,                             // movw %ax,%es
    0x8e, 0xd0,                             // movw %ax,%ss
    0x0f, 0x01, 0x16, 0x44, 0x7c,           // lgdt gdtdesc
    0x0f, 0x20, 0xc0,                   // movl %cr0,%eax
    0x66, 0x83, 0xc8, 0x01,                 // orl $CR0_PE,%eax
    0x0f, 0x22, 0xc0,                   // movl %eax,%cr0
    0xea, 0x1d, 0x7c, 0x08, 0x00,           // ljmp $GDT_ENTRY(1),$start32
    ...
};
```

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
$ ls
a.cpp  a.out  in.txt  mbr
$
```

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
00000090: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000a0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000b0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000c0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000d0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000e0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000000f0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000100: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000110: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000120: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000130: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000140: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000150: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000160: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000170: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000180: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000190: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001a0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001b0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001c0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001d0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001e0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
000001f0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa  ..............U.
$ qemu-system-i386
^Cqemu-system-i386: terminating on signal 2
$ qemu-system-i386 mbr
WARNING: Image format was not specified for 'mbr' and probing guessed raw.
         Automatically detecting the format is dangerous for raw images, write operations on
block 0 will be restricted.
         Specify the 'raw' format explicitly to remove the restrictions.
$
```

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

why@why-VirtualBox: ~/Documents/ICS2021/teach/Course12 × why@why-VirtualBox: ~/Documents/ICS2021/teach ×

```
00000120: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
```

QEMU [Paused] - Press Ctrl+Alt+G to release grab

Machine View

Guest has not initialized the display (yet).

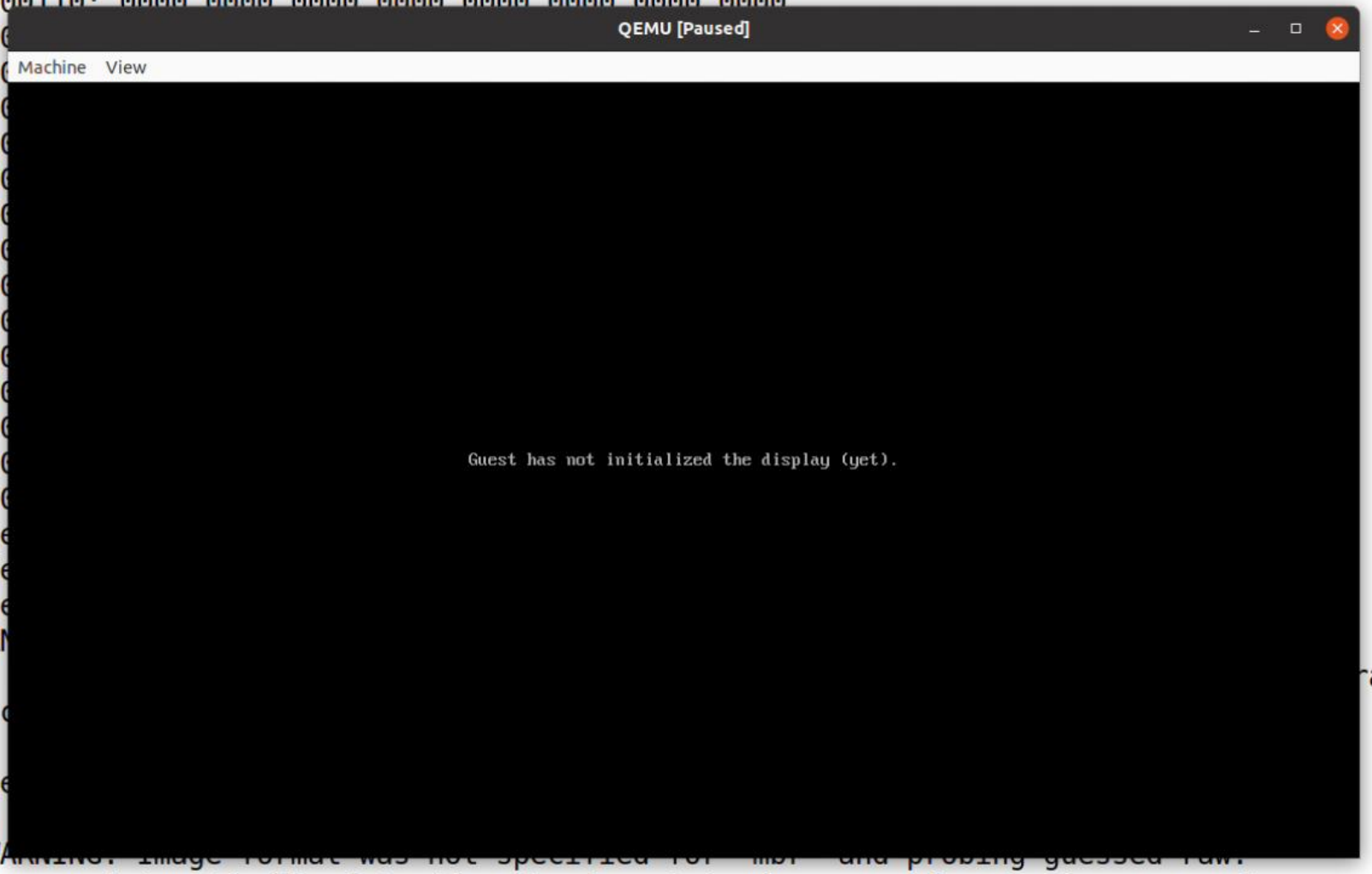
```
[2]-
$ qe
^Cqe
$ qe
WARN
                                                              ons on
bloc

^Cqe
$ qe
WARN
                                                              ons on
bloc
       Specify the 'raw' format explicitly to remove the restrictions.
```

Right Shift + Right Alt

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
000000f0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000100: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000  ................
00000110: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
```




```
$ qe
^Cqe
$ qe
WARN
                                                    rations on
bloc

$ qe
[1]
$ WARNING: Image format was not specified for 'mbr' and probing guessed raw.
        Automatically detecting the format is dangerous for raw images, write operations on
block 0 will be restricted.
        Specify the 'raw' format explicitly to remove the restrictions.
```


Right Shift + Right Alt

管理 控制 视图 热键 设备 帮助

```
B+>0x7c00      cli
   0x7c01      xor    %eax,%eax
   0x7c03      mov    %eax,%ds
   0x7c05      mov    %eax,%es
   0x7c07      mov    %eax,%ss
   0x7c09      lgdtl  (%esi)
   0x7c0c      inc    %esp
   0x7c0d      jl     0x7c1e
   0x7c0f      and    %al,%al
   0x7c11      or     $0x1,%ax
   0x7c15      mov    %eax,%cr0
   0x7c18      ljmp   $0xb866,$0x87c1d
   0x7c1f      adc    %al,(%eax)
   0x7c21      mov    %eax,%ds
   0x7c23      mov    %eax,%es
   0x7c25      mov    %eax,%ss
   0x7c27      jmp    0x7c27
   0x7c29      lea    0x0(%esi),%esi
```

```
remote Thread 1.1 In:                                          L??   PC: 0x7c00
Breakpoint 1 at 0x7c00
(gdb) c
Continuing.

Breakpoint 1, 0x00007c00 in ?? ()
(gdb) x/10x 0x7c00
0x7c00: 0x8ec031fa      0x8ec08ed8      0x16010fd0      0x200f7c44
0x7c10: 0xc88366c0      0xc0220f01      0x087c1dea      0x10b86600
0x7c20: 0x8ed88e00      0xebd08ec0
(gdb)
```

NEMU

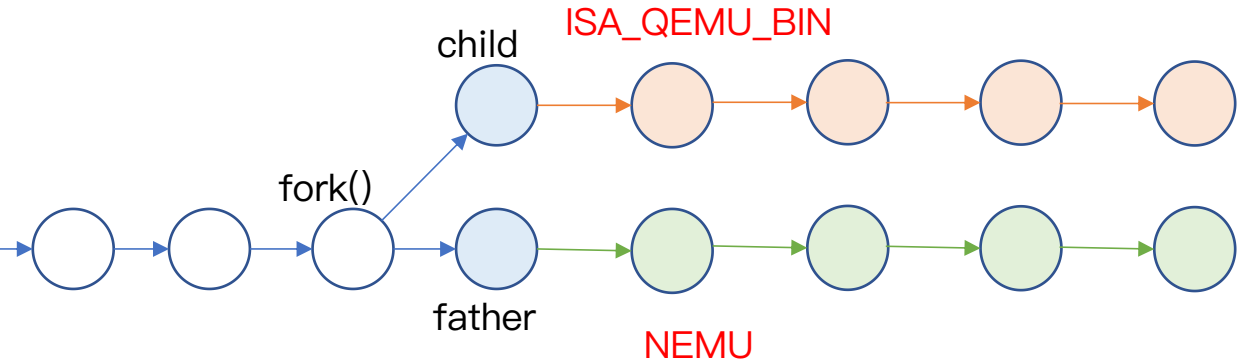
NEMU

- 大腿同学的代码还可以帮助我们直接定位到错误的指令!
  - 只需要大腿的 compiled binary
  - 就能指令级定位出错的位置

```
for i in range(int(sys.argv[1])):
    print('\n'.join(['si'] + [f'p ${r}' for r in ['eax', ...]]))
```

- 然后找到 log 第一个不一致的地方!

```
N=10000
diff <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu-datui img) \
    <(python3 cmdgen.py $N | ./x86-nemu img)
```




```
47 bool gdb_getregs(union isa_gdb_regs *r) {
48   gdb_send(conn, (const uint8_t *)"g", 1);
49   size_t size;
50   uint8_t *reply = gdb_recv(conn, &size);
51
52   int i;
53   uint8_t *p = reply;
54   uint8_t c;
55 +---  7 lines: for (i = 0; i < sizeof(union isa_gdb_
```

```
bool gdb_si() {
  char buf[] = "vCont;s:1";
  gdb_send(conn, (const uint8_t *)buf, strlen(buf));
  size_t size;
  uint8_t *reply = gdb_recv(conn, &size);
  free(reply);
  return true;
}
```

代码导读（cont'd）

- 经过 RTFM/RTFSC：
  - nemu/tools/qemu-diff 是 differential testing 实际实现的目录
- 然后 RTFSC，看到了若干有用的函数：
  - gdb_connect_qemu，看起来就是用来连接到 QEMU 的，创建一个到 127.0.0.1、端口是 1234 的 gdb 连接
  - gdb_si，和 monitor 一样，单步执行指令
  - gdb_setregs, gdb_getregs，好像复杂一点，不过就是用 gdb_send() 和 gdb_recv() 发送/接收消息

代码导读

- 首先 PA 代码 (dut.c) 里没有 diff-test 的实际代码，只有一堆函数指针：

```
void (*ref_difftest_memcpy)(paddr_t addr, void *buf, size_t n, bool direction) = NULL;
void (*ref_difftest_regcpy)(void *dut, bool direction) = NULL;
void (*ref_difftest_exec)(uint64_t n) = NULL;
void (*ref_difftest_raise_intr)(uint64_t NO) = NULL;
```

- 这些函数封装了参考实现的功能
  - 既可以和 QEMU diff-test，也可以和 NEMU diff-test
  - exec_wrapper() 中执行一条指令之后直接对比结果就行

```
#if defined(DIFF_TEST)
    difftest_step(ori_pc, cpu.pc);
#endif
```

DiffTest的意义

- 思路：
  - 通过符合RISC-V规范的两种实现，输入正确的程序，两者状态变化应该一致。（用Spike/QEMU来测NEMU）
- 在线指令集程序行为验证方法
  - 边跑边执行，每条都查一下
  - 无需oracle
- 感谢2017年引入DiffTest！

系统编程的困难

- 在程序规模到达一定程度的时候，代码既难管理，也难写对
  - 即便在项目文件之间浏览就已经非常耗时
    - 面对不熟悉的模块/API
    - 需要好的 IDE、代码折叠、第二块屏幕……
  - 编程经验可以减少 bug，但很难完全消灭它们
    - 各类肉眼难以发现的低级错误 (i vs. j, 0x vs 0b, int with unsigned, ...)
    - 读错了手册 (忘记更新某个 flags, 记错 0/符号扩展, ...)
    - 逻辑上的错误 (使用一块已经释放的内存, 虚拟/物理内存地址访问错, ...)

- 做过 PA 的人就知道，“机器永远是对的”不是开玩笑的
  - 你折腾一天，两天，可能就是多打了一个空格

总结

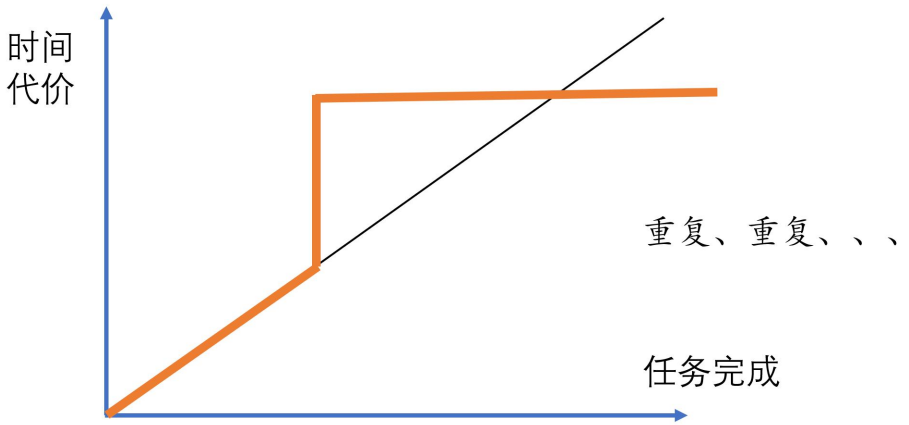
基础设施：帮助你更快更好地生产代码

- 终极梦想：让计算机自动帮我们写程序
  - 告诉计算机需求 → 计算机输出正确的代码
  - 计算机科学的 holy grail 之一

- 现在我们还在软件自动化的初级阶段
  - 计算机只能提供有限的自动化 (基础设施)
    - 集成开发环境 (IDE)
    - 静态分析
    - 动态分析
  - 但这些基础设施已经从本质上改变了我们的开发效率
    - 你绝对不会愿意用记事本写程序的

基础设施：小结

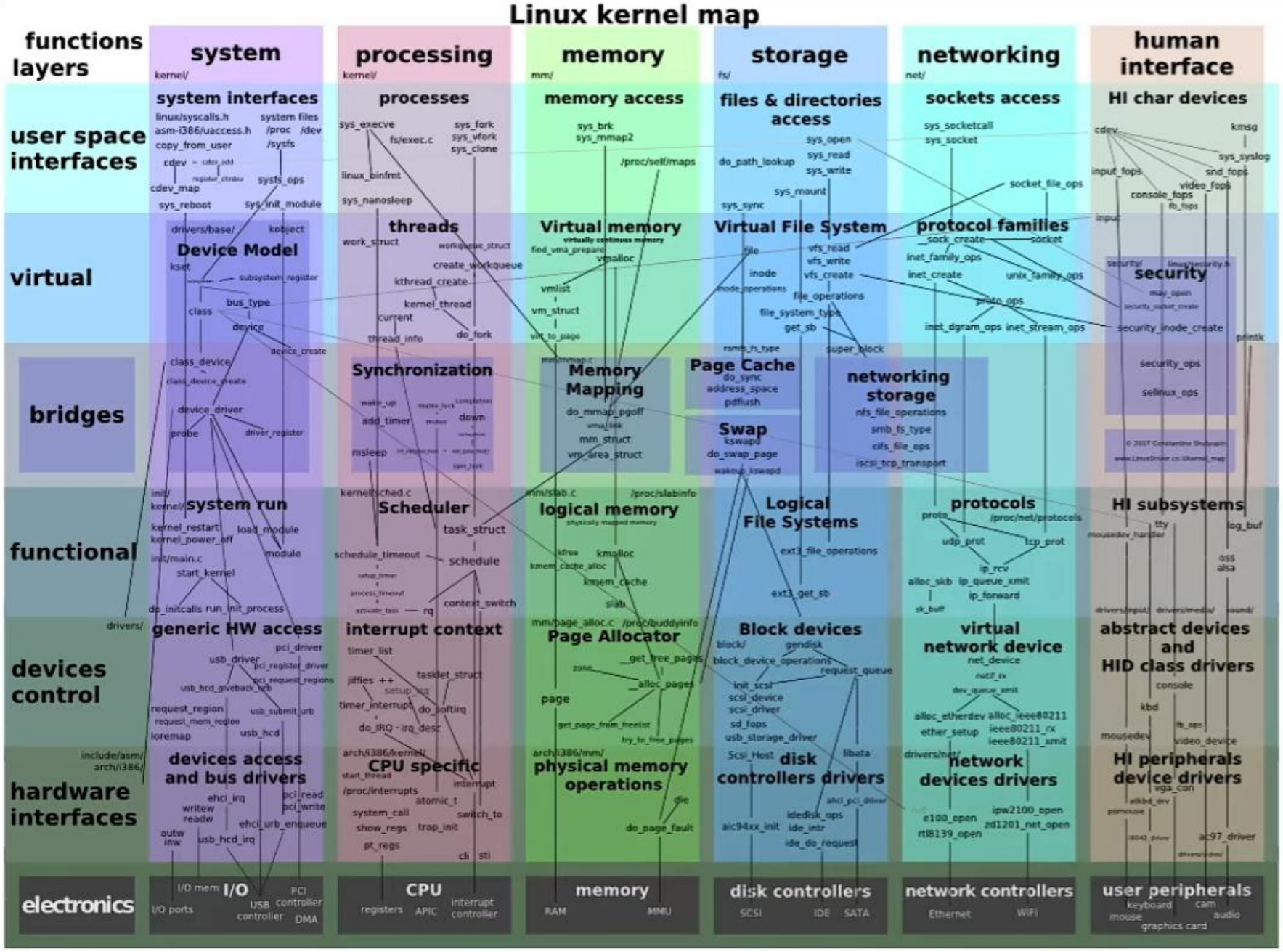
- 当轮子都不够用的时候，我们就去造轮子
  - 调试困难，有参考实现 → diff-test
  - 难以贯通多门实验课 → Abstract Machine



- 轮子还不够用呢？
  - diff-test 每秒只能检查 ~5000 条指令
  - 中断和 I/O 具有不确定性
  - 没有参考实现呢 → 一个新的研究问题在等着你

End.

新的基础设施：AI


Linux kernel map
functions
layers
system
kernel/
processing
kernel/
memory
mm/
storage
fs/
networking
net/
human
interface
user space
interfaces
system interfaces
processes
memory access
files & directories
access
sockets access
HI char devices
virtual
Device Model
threads
Virtual memory
Virtual File System
protocol families
security
bridges
Synchronization
Memory
Mapping
Page Cache
networking
storage
Swap
functional
system run
Scheduler
logical memory
Logical
File Systems
protocols
HI subsystems
devices
control
generic HW access
interrupt context
Page Allocator
Block devices
virtual
network device
abstract devices
and
HID class drivers
hardware
interfaces
devices access
and bus drivers
CPU specific
physical memory
operations
disk
controllers drivers
network
devices drivers
HI peripherals
device drivers
electronics
I/O
CPU
memory
disk controllers
network controllers
user peripherals

回顾PA是什么？

计算机系统软件栈

- Navy-apps
- Nanos-lite
- Abstract-machine
- NEMU

AM

- 硬件机制的多样

- 抽象
  - 引入抽象层，将机制功能抽象成API
  - 本质上抽象了计算机的基础功能
- 模块化
  - TRM(Turing Machine)
  - IOE(I/O Extension)
  - CTE(ConText Extension)
  - VME(Virtual Memory Extension)
  - MPE(Multi-Processor Extension)