调试：理论与实践

蒋炎岩

南京大学　　计算机科学与技术系　　计算机软件研究所

本讲概述

代码出 bug 了？又浪费了一天？太真实了？

本讲内容

- 调试理论
- 调试理论的应用
  - 调试“不是代码”
  - 调试 PA/Lab/任何代码

为什么 PA2 都截止那么久了现在才讲？

- ~~因为你们不吃苦头是理解不了方法学的~~

调试理论

开始调试之前

摆正心态 (编程哲 ⇳ 学)

机器永远是对的

不管是 crash 了，图形显示不正常了，还是 HIT BAD TRAP 了，最后都是你自己背锅

未测代码永远是错的

你以为最不可能出 bug 的地方，往往 bug 就在那躺着

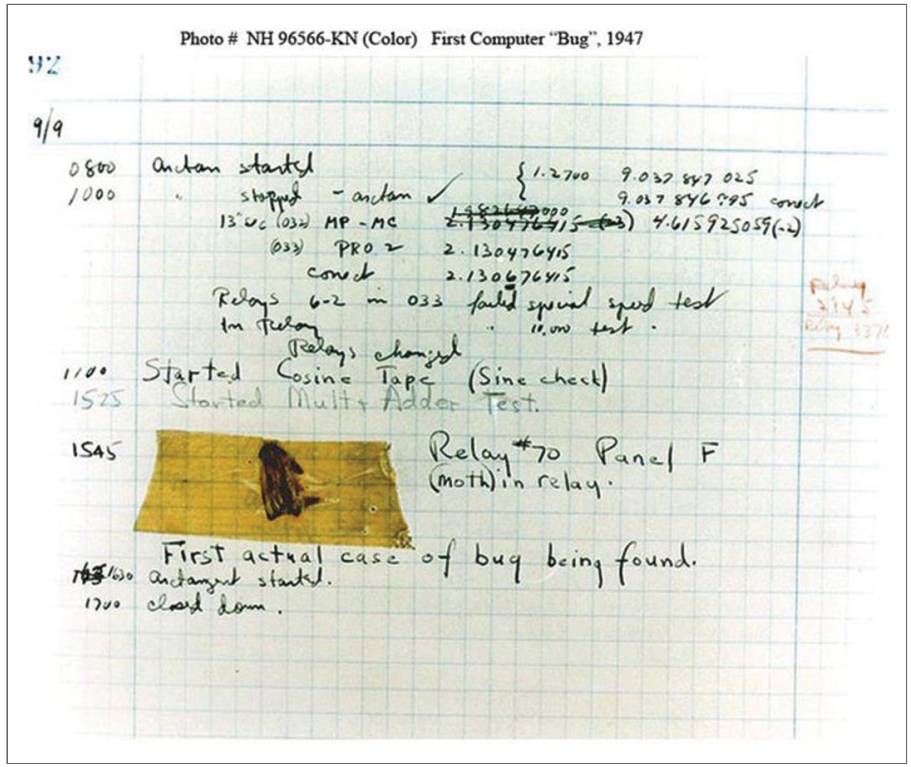
调试理论

程序的两个功能

- 人类世界需求的载体
  - 理解错需求 → bug
- 计算过程的精确描述
  - 实现错误 → bug

调试 (debugging)

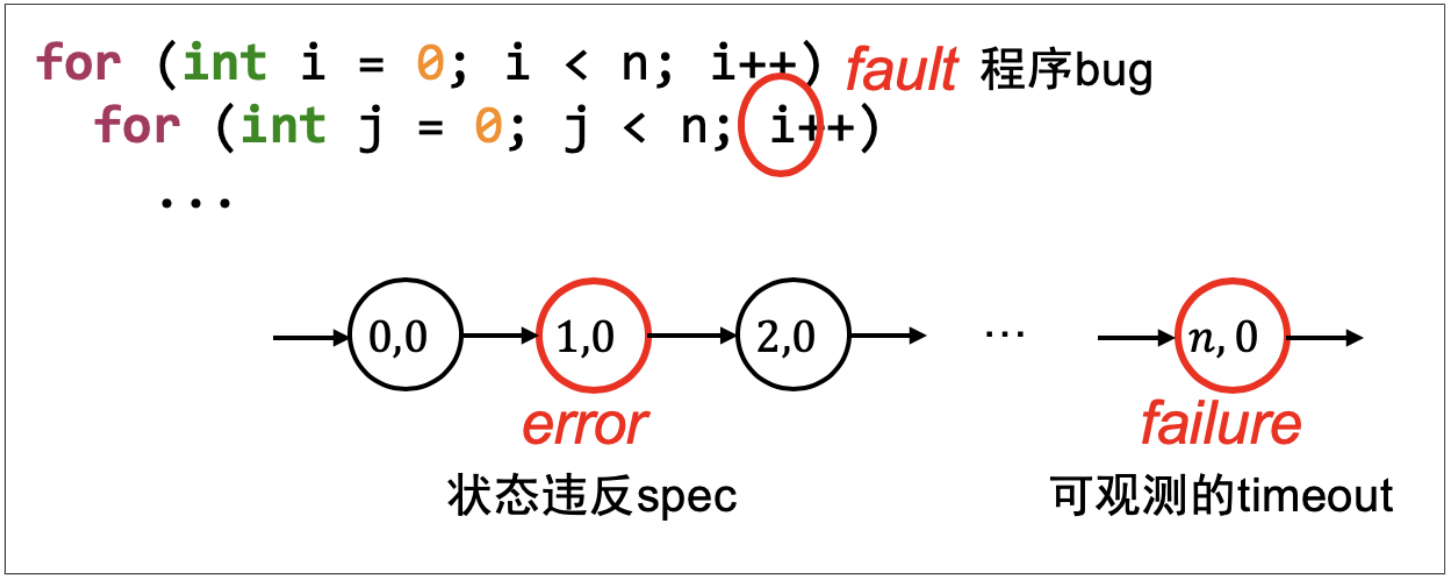
- 已知程序有 bug，如何找到？



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)



调试理论

调试理论：如果我们能判定任意程序状态的正确性，那么给定一个 failure，我们可以通过二分查找定位到第一个 error 的状态，此时的代码就是 fault (bug)。

调试理论：推论

- 为什么我们喜欢“单步调试”？
  - 从一个假定正确的状态出发
  - 每个语句的行为有限，容易判定是否是 error
- 为什么调试理论看起来没用？
  - 因为判定程序状态的正确性非常困难
    - (是否在调试 DP 题/图论算法时陷入时间黑洞？)

调试理论 (cont'd)

实际中的调试：通过观察程序执行的轨迹 (trace)

- 缩小错误状态 (error) 可能产生的位置
- 作出适当的假设
- 再进行细粒度的定位和诊断

最重要的两个工具

- printf → 自定义 log 的 trace
  - + 灵活可控、能快速定位问题大概位置、适用于大型软件
  - - 无法精确定位、大量的 logs 管理起来比较麻烦
- gdb → 指令/语句级 trace
  - + 精确、指令级定位、任意查看程序内部状态
  - - 耗费大量时间

调试理论：应用 (1)

调试 (不是一般意义上 “程序” 的) bug

PA 体验极差

做实验会遇到大量与编程无关的问题

- 也许没有想过：问题诊断其实也是调试
- 我们应该利用调试理论去解决问题！

```
bash: curl: command not found
```

```
fatal error: 'sys/cdefs.h': No such file or directory
#include <sys/cdefs.h>
```

```
make[2]: *** run: No such file or directory.  Stop.
Makefile:31: recipe for target 'run' failed
make[1]: *** [run] Error 2
...
```

调试 (不是程序的) Bug

UNIX 世界里你做任何事情都是在编程

- 因此配置错、make 错等，都是程序或输入/配置有 bug
  - (输入/配置可以看成是程序的一部分)

正确的态度：把所有问题当程序来调试

- 你写了一个程序，现在这个程序出 bug 了 (例如 Segmentation Fault)，你是怎样排查这个问题的？
  - curl: command not found
  - `'sys/cdefs.h'`: No such file or directory
  - make: run: No such file or directory

使用调试理论

Debug (fault localization) 的基本理论回顾：

- Fault (程序/输入/配置错) → Error → Failure (可观测)
  - 绝大部分工具的 Failure 都有“原因报告”
    - 因此能帮助你快速定位 fault
  - `man perror`：标准库有打印 error message 的函数

为什么会抓瞎？

- 出错原因报告不准确或不够详细
- 程序执行的过程不详
  - 既然我们有需求，那别人肯定也会有这个需求
    - 一定有信息能帮助我们！

使用调试理论 (cont'd)

正确的方法：理解程序的执行过程，弄清楚到底为何导致了bug

- `ssh`：使用 `-v` 选项检查日志
- `gcc`：使用 `-v` 选项打印各种过程
- `make`：使用 `-n` 选项查看完整命令
  - `make -nB | grep -ve '^\(echo\|mkdir\)'` 可以查看完整编译 nemu 的编译过程

各个工具普遍提供调试功能，帮助用户/开发者了解程序的行为

例子：找不到 sys/cdefs.h

'sys/cdefs.h': No such file or directory，找不到文件 (这看起来是用 perror() 打印出来的哦！)

- #include = 复制粘贴，自然会经过路径解析
- (折腾20分钟) 明明 /usr/include/x86_64-linux-gnu/sys/cdefs.h 是存在的 (man 1 locate) → 极度挫败，体验极差

推理：#include <> 一定有一些搜索路径

- 为什么两个编译选项，一个通过，一个不通过？
  - gcc -m32 -v v.s. gcc -v

这是标准的解决问题办法：自己动手排查

- 在面对复杂/小众问题时比 STFW 有效

调试理论：应用 (2)

调试 PA/Lab/任何代码

调试 NEMU 的难处

(1) NEMU 没有这些 debug 信息

- 指令执行着执行着，悄悄就错了，直到在某个地方死循环
- 到底哪里错了呢？
  - 对于 cpu-test，还能一条一条看指令日志
  - 打字游戏的时候 bug 了，那么多指令……
  - LiteNES bug 了，这上哪玩啊……

(2) NEMU 有两个层次的状态机

- NEMU binary 本身是个状态机
  - 它模拟了另一个状态机 (指令序列)
    - 这就是 monitor 的用处！

调试理论：应用

Fault → Error → Failure

Fault → Error

- 充分的测试
  - 例子：Lab1 测试

Error → Failure

- 充足的日志
- 及时的检查

用好工具

- monitor, gdb, ...

例子：使用 GDB

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

GDB: 最常用的命令在 **gdb cheat sheet**

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

想要更好的体验？RTFM！

每次 gdb 都要输入一堆命令，都烦了

- 当你感到不爽的时候，一定有办法解决

gdb 可以支持命令 (`-x`, `-ex`, ...)

```
set pagination off
set confirm off
layout asm
file a.out
b main
r
```

调试理论：应用 (Again)

需求 → 设计 → 代码 → Fault → Error → Failure

“Technical Debt”

> 每当你写出不好维护的代码，你都在给你未来的调试挖坑。

中枪了？

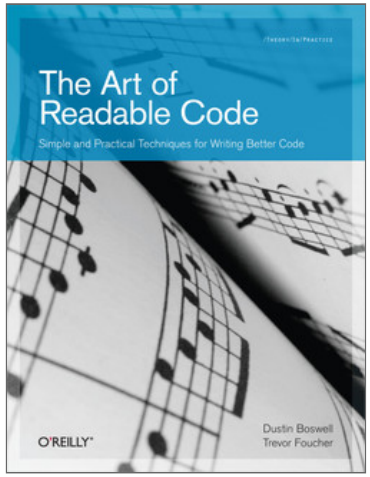
- 为了快点跑程序，随便写的 klib
- 为了赶紧实现指令，随手写的代码
- ……

编程基本准则：回顾

> Programs are meant to be read by humans and only incidentally for computers to execute. — *D. E. Knuth*
> (程序首先是拿给人读的，其次才是被机器执行。)

好的程序

- 不言自明：能知道是做什么的 (*specification*)
  - 因此代码风格很重要
- 不言自证：能确认代码和 specification 一致
  - 因此代码中的逻辑流很重要



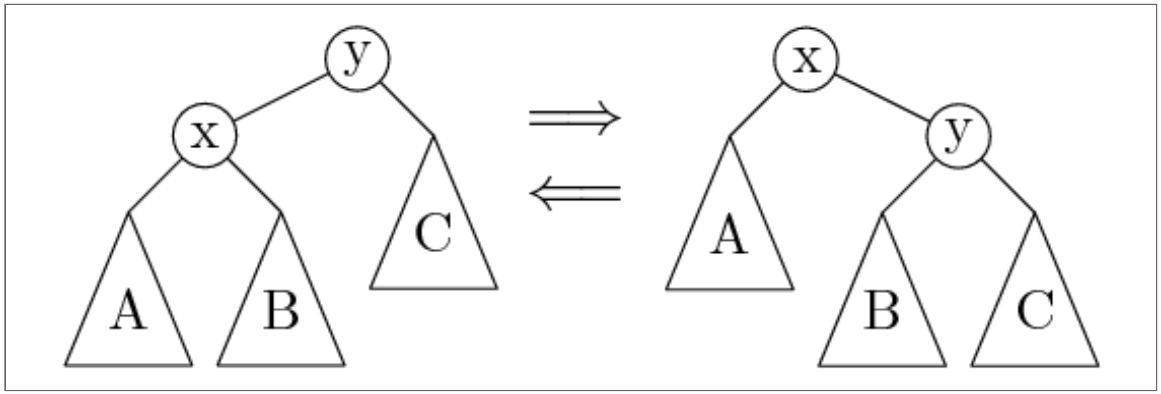
调试理论的最重要应用

写好读、易验证的代码
在代码中添加更多的断言 (assertions)

断言的意义

- 把代码中隐藏的 specification 写出来
  - 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

例子：维护父亲节点的平衡树




```
// 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) {
  assert(index >= 0 && index < 8);
  return index;
}
#define reg_l(index) (cpu.gpr[check_reg_index(index)]._32)
#define reg_w(index) (cpu.gpr[check_reg_index(index)]._16)
#define reg_b(index) (cpu.gpr[check_reg_index(index) & 0x3]._8[inde
```

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

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);`

```c
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”

总结

残酷的现实和难听的本质

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

《计算机系统基础》PA 给大家最重要的训练

- 消除畏惧，但有些同学还没能理解
- 努力做到知晓所有细节
- 为你自己的代码负责

用好调试理论

调试理论

- Fault → (测试) → Error → (断言) → Failure
  - 二分查找、观察 trace、……

调试实践

- 理解程序如何完成对现实世界任务的抽象
  - 我们很容易用一小句话来概括一大段程序执行过程
  - 并且排除/确认其中的问题

End.