

多处理器编程入门

Three Easy Pieces: 并发

操作系统作为“状态机的管理者”，引入了共享的状态

- 带来了并发
- (操作系统是最早的并发程序)

```
def Tprint(name):  
    sys_write(f'{name}')
```



```
def main():  
    for name in 'AB':  
        sys_spawn(Tprint, name)
```

- 使用 model checker 绘制状态图

多线程共享内存并发

线程：共享内存的执行流

- 执行流拥有独立的堆栈/寄存器

简化的线程 API (thread.h)

- spawn(fn)
 - 创建一个入口函数是 fn 的线程，并立即开始执行
 - `void fn(int tid) { ... }`
 - 参数 tid 从 1 开始编号
 - 行为： `sys_spawn(fn, tid)`
- join()
 - 等待所有运行线程的返回 (也可以不调用)
 - 行为： `while (done != T) sys_sched()`

多线程共享内存并发：入门

多处理器编程：一个 API 搞定

```
#include "thread.h"

void Ta() { while (1) { printf("a"); } }
void Tb() { while (1) { printf("b"); } }

int main() {
    create(Ta);
    create(Tb);
}
```

- 这个程序可以利用系统中的多处理器
 - 操作系统会自动把线程放置在不同的处理器上
 - CPU 使用率超过了 100%

问出更多的问题

Ta 和 Tb 真的共享内存吗?

- 如何证明/否认这件事?

如何证明线程具有独立堆栈 (以及确定堆栈的范围)?

- 输出混乱, 应该如何处理?

更多的“好问题”和解决

- 创建线程使用的是哪个系统调用?
- 能不能用 gdb 调试?
 - 基本原则: 有需求, 就能做到 (RTFM)

```
C hello.c
1  #include "thread.h"
2
3  int x = 0;
4
5  void Thello(int id) {
6      x++;
7      printf("%d\n", x);
8  }
9
10 int main() {
11     for (int i = 0; i < 10; i++) {
12         spawn(Thello);
13     }
14 }
```

用不停的递归程序, 直到segment fault

thread.h 背后： POSIX Threads

想进一步配置线程？

- 设置更大的线程栈
- 设置 detach 运行 (不在进程结束后被杀死，也不能 join)
-

POSIX 为我们提供了线程库 (pthreads)

- man 7 pthreads
- 练习：改写 thread.h，使得线程拥有更大的栈
 - 可以用 stack probe 的程序验证

放弃(1): 原子性

状态机的隐含假设

“世界上只有一个状态机”

- 没有其他任何人能“干涉”程序的状态
- 推论：对变量的 load 一定返回本线程最后一次 store 的值
 - 这也是编译优化的基本假设

但共享内存推翻了这个假设

```
int Twoker() {  
    printf("%d\n", x); // Global x  
    printf("%d\n", x);  
}
```

- 其他线程随时可以修改 x
 - 导致两次可能读到不同的 x

潘多拉的魔盒已经打开.....

```
unsigned int balance = 100;

int Talipay_withdraw(int amt) {
    if (balance >= amt) {
        balance -= amt;
        return SUCCESS;
    } else {
        return FAIL;
    }
}
```

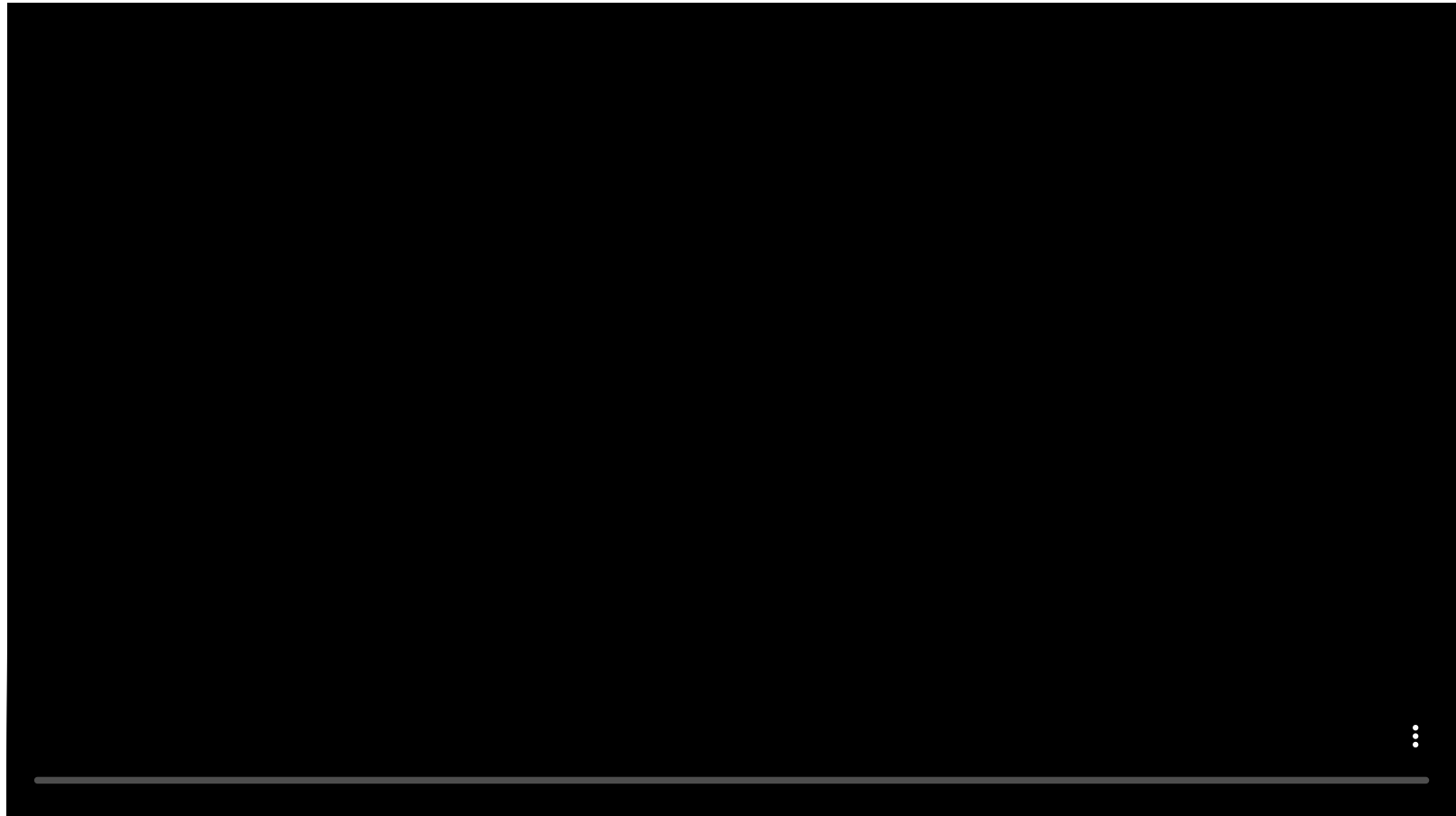
两个线程并发支付 ¥100 会发生什么 (代码演示)

- 账户里会多出用不完的钱!
- Bug/漏洞不跟你开玩笑: Mt. Gox Hack 损失 650,000 BTC
 - 时值 ~\$28,000,000,000

例子：Diablo I (1996)

在捡起要复制物品的瞬间拿起 1 块钱

- 1 块钱会被“覆盖”成捡起的物品



例子：求和

分两个线程，计算 $1 + 1 + 1 + \dots + 1$ (共计 $2n$ 个 1)

```
#define N 100000000
long sum = 0;

void Tsum() { for (int i = 0; i < N; i++) sum++; }

int main() {
    create(Tsum);
    create(Tsum);
    join();
    printf("sum = %ld\n", sum);
}
```

可能的结果

- 119790390, 99872322 (结果可以比 N 还要小), ...
- 直接使用汇编指令也不行

放弃(1): 指令/代码执行原子性假设

“处理器一次执行一条指令”的基本假设在今天的计算机系统上不再成立(我们的模型作出了简化的假设)。

单处理器多线程

- 线程在运行时可能被中断，切换到另一个线程执行

多处理器多线程

- 线程根本就是并行执行的

(历史) 1960s，大家争先在共享内存上实现原子性(互斥)

- 但几乎所有的实现都是**错的**，直到 **Dekker's Algorithm**，还只能保证两个线程的互斥

放弃原子性假设的后果

printf 还能在多线程程序里调用吗？

```
void thread1() { while (1) { printf("a"); } }  
void thread2() { while (1) { printf("b"); } }
```

我们都知道 printf 是有缓冲区的 (为什么？)

- 如果执行 buf[pos++] = ch (pos 共享) 不就 💣 了吗？

RTFM!

ATTRIBUTES

For an explanation of the terms used in this section, see `attributes(7)`.

| Interface | Attribute | Value |
|---|---------------|----------------|
| <code>printf()</code> , <code>fprintf()</code> , <code>sprintf()</code> , <code>snprintf()</code> , <code>vprintf()</code> , <code>vfprintf()</code> , <code>vsprintf()</code> , <code>vsprintf()</code> | Thread safety | MT-Safe locale |

放弃(2): 执行顺序

例子：求和 (再次出现)

分两个线程，计算 $1 + 1 + 1 + \dots + 1$ (共计 $2n$ 个 1)

```
#define N 100000000
long sum = 0;

void Tsum() { for (int i = 0; i < N; i++) sum++; }

int main() {
    create(Tsum);
    create(Tsum);
    join();
    printf("sum = %ld\n", sum);
}
```

如果添加编译优化？

- -O1: 1000000000 🤖🤖
- -O2: 2000000000 🤖🤖🤖

放弃 (2): 程序的顺序执行假设

编译器对内存访问“eventually consistent”的处理导致共享内存作为线程同步工具的失效。

刚才的例子

- -01: R[eax] = sum; R[eax] += N; sum = R[eax]
- -02: sum += N;
- (你的编译器也许是不同的结果)

另一个例子

编译器的前提是只对顺序执行的程序负责
或者他优化的是有前提假设的

```
while (!done);  
// would be optimized to  
if (!done) while (1);
```


保证执行顺序

回忆“编译正确性”

- C 状态和汇编状态机的“可观测行为等价”
- 方法 1：插入“不可优化”代码
 - `asm volatile ("" ::: "memory");`
 - “Clobbers memory”
- 方法 2：标记变量 load/store 为不可优化
 - 使用 `volatile` 变量

```
1 #include <stdio.h>
2
3 #define N 1000000000
4
5 long sum = 0;
6 int x;
7
8 void Tsum() {
9     int t = x;
10    asm volatile ("" ::: "memory");
11    t = x;
12 }
13
14 int main() {
15     create(Tsum);
16     create(Tsum);
17     join();
18     printf("sum = %ld\n", sum);
19 }
20
```

```
extern int volatile done;
```

```
while (!done) ;
```

放弃(3): 处理器间的可见性

例子

```
int x = 0, y = 0;
```

```
void T1() {  
    x = 1; int t = y; // Store(x); Load(y)  
    __sync_synchronize();  
    printf("%d", t);  
}
```

```
void T2() {  
    y = 1; int t = x; // Store(y); Load(x)  
    __sync_synchronize();  
    printf("%d", t);  
}
```

遍历模型告诉我们：01, 10, 11

- 机器永远是对的
- Model checker 的结果和实际的结果不同 → 假设错了

🌶️ 现代处理器也是 (动态) 编译器!

错误 (简化) 的假设

- 一个 CPU 执行一条指令到达下一状态

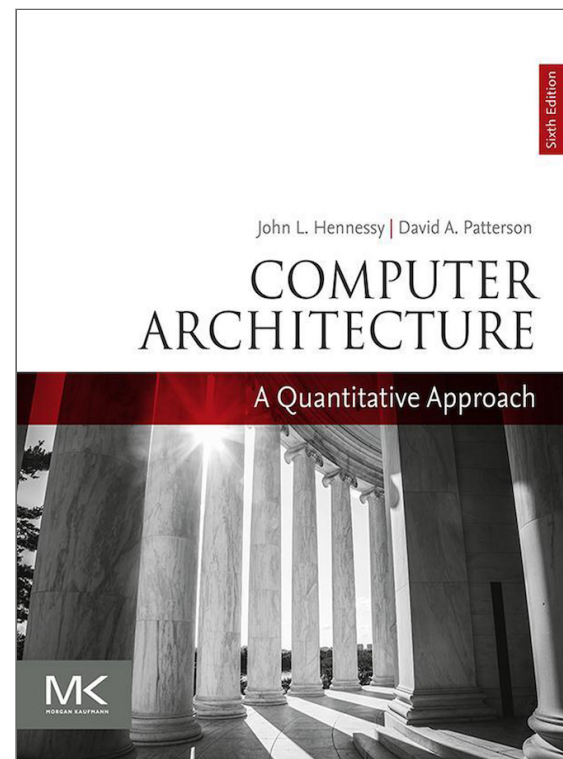
实际的实现

- 电路将连续的指令“编译”成更小的 μops
 - $\text{RF}[9] = \text{load}(\text{RF}[7] + 400)$
 - $\text{store}(\text{RF}[12], \text{RF}[13])$
 - $\text{RF}[3] = \text{RF}[4] + \text{RF}[5]$

在任何时刻，处理器都维护一个 μop 的“池子”

- 与编译器一样，做“顺序执行”假设：没有其他处理器“干扰”
- 每一周期执行尽可能多的 μop - 多路发射、乱序执行、按序提交

IPC instruction per cycle



放弃 (3): 多处理器间内存访问的即时可见性

满足单处理器 eventual memory consistency 的执行，在多处理器系统上可能无法序列化！

当 $x \neq y$ 时，对 x, y 的内存读写可以交换顺序

- 它们甚至可以在同一个周期里完成 (只要 load/store unit 支持)
- 如果写 x 发生 cache miss，可以让读 y 先执行
 - 满足“尽可能执行 μop ”的原则，最大化处理器性能

```
      # <-----+
movl $1, (x)    #   |
movl (y), %eax  #  --+
```

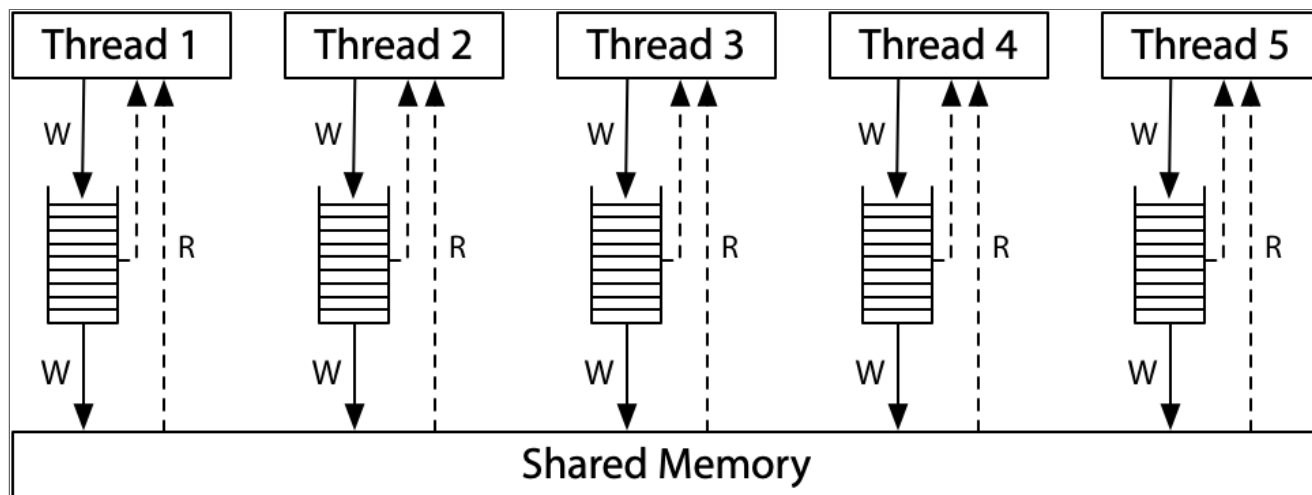
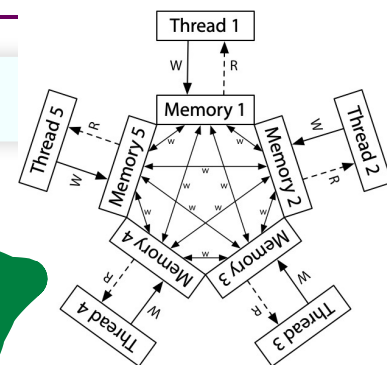
- 在多处理器上的表现
 - 两个处理器分别看到 $y = 0$ 和 $x = 0$

宽松内存模型 (Relaxed/Weak Memory Model)

宽松内存模型的目的是使单处理器的执行更高效。

x86 已经是市面上能买到的“最强”的内存模型了 😂

- 这也是 Intel 自己给自己加的包袱
- 看看 **ARM/RISC-V** 吧，根本就是分布式系统



(x86-TSO in Hardware memory models by Russ Cox)