信号量

复习：生产者-消费者、互斥、条件变量

打印“合法”的括号序列 (())()

- 左括号对应 push
- 右括号对应 pop

```
#define CAN_PRODUCE (count < n)
#define CAN_CONSUME (count > 0)

wait_until(CAN_PRODUCE) with (mutex) {
  count++;
  printf("(");
}

wait_until(CAN_CONSUME) with (mutex) {
  count--;
  printf(")");
}
```

信号量：一种条件变量的特例

```
void P(sem_t *sem) { // wait
  wait_until(sem->count > 0) {
    sem->count--;
  }
}

void V(sem_t *sem) { // post (signal)
  atomic {
    sem->count++;
  }
}
```

正是因为条件的特殊性，信号量不需要 broadcast

- P 失败时立即睡眠等待
- 执行 V 时，唤醒任意等待的线程

理解信号量 (1)

初始时 count = 1 的特殊情况

- 互斥锁是信号量的特例

```
#define YES 1
#define NO 0

void lock() {
  wait_until(count == YES) {
    count = NO;
  }
}

void unlock() {
  count = YES;
}
```

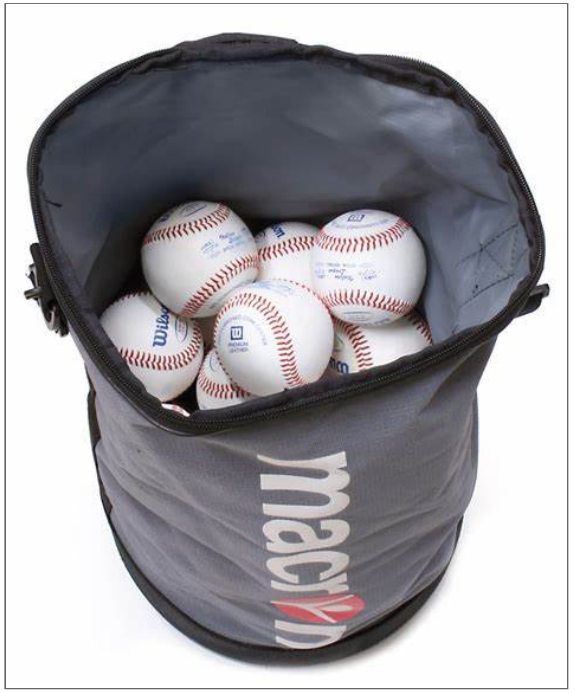
理解信号量 (2)

P - prolaag (try + decrease/down/wait/acquire)

- 试着从袋子里取一个球
  - 如果拿到了，离开
  - 如果袋子空了，排队等待

V - verhoog (increase/up/post/signal/release)

- 往袋子里放一个球
  - 如果有人在等球，他就可以拿走刚放进去的球了
  - 放球-拿球的过程实现了同步



理解信号量 (3)

扩展的互斥锁：一个手环 → n 个手环

- 让更多同学可以进入更衣室
  - 管理员可以持有任意数量的手环 (count, 更衣室容量上限)
  - 先进入更衣室的同学先进入游泳池
  - 手环用完后需要等同学出来
- 信号量对应了“资源数量”

V.S.

信号量：实现优雅的生产者-消费者

信号量设计的重点

- 考虑“球”/“手环”(每一单位的“资源”) 是什么
- 生产者/消费者 = 把球从一个袋子里放到另一个袋子里

```
void Tproduce() {
  P(&empty);
  printf("("); // 注意共享数据结构访问需互斥
  V(&fill);
}
void Tconsume() {
  P(&fill);
  printf(")");
  V(&empty);
}
```

信号量：应用

信号量的两种典型应用

1. 实现一次临时的 happens-before
    - 初始：s = 0
    - A; V(s)
    - P(s); B
        - 假设 s 只被使用一次，保证 A happens-before B
2. 实现计数型的同步
    - 初始：done = 0
    - Tworker: V(done)
    - Tmain: P(done) $\times T$

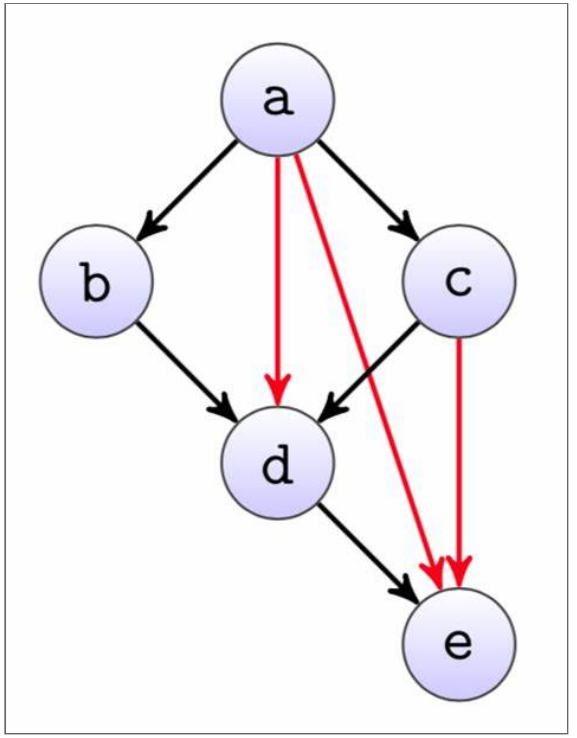
对应了两种线程 join 的方法

- $T_1 \to T_2 \to \ldots$ v.s. 完成就行，不管顺序

例子：实现计算图

对于任何计算图

- 为每个节点分配一个线程
  - 对每条入边执行 P (wait) 操作
  - 完成计算任务
  - 对每条出边执行 V (post/signal) 操作
    - 每条边恰好 P 一次、V 一次
    - PLCS 直接就解决了啊?




```
void Tworker_d() {
  P(bd); P(ad); P(cd);
  // 完成节点 d 上的计算任务
  V(de);
}
```

实现计算图 (cont'd)

乍一看很厉害

- 完美解决了并行问题

实际上……

- 创建那么多线程和那么多信号量 = Time Limit Exceeded
- 解决线程太多的问题
  - 一个线程负责多个节点的计算
    - 静态划分 → 覆盖问题
    - 动态调度 → 又变回了生产者-消费者
- 解决信号量太多的问题
  - 计算节点共享信号量
    - 可能出现“假唤醒” → 又变回了条件变量

例子：毫无意义的练习题

有三种线程

- Ta 若干: 死循环打印 <
- Tb 若干: 死循环打印 >
- Tc 若干: 死循环打印 _
- 如何同步这些线程，保证打印出 <><_ 和 ><>_ 的序列?

信号量的困难

- 上一条鱼打印后，< 和 > 都是可行的
- 我应该 P 哪个信号量?
  - 可以 P 我自己的
  - 由打印 _ 的线程随机选一个

例子：使用信号量实现条件变量

当然是问 AI 了

- ChatGPT (GPT-3.5) 直接一本正经胡说八道
  - 这个对 LLM 还是太困难了
- New Bing 给出了一种“思路”
  - 第一个 wait 的线程会在持有 mutex 的情况下 P(cond)
  - 从此再也没有人能获得互斥锁……
    - ~~像极了我改期末试卷的体验~~

```
semaphore mutex = 1;
semaphore cond = 0;
int count = 0;

void wait() {
    P(&mutex);
    count++;
    if (count == 1) {
        P(&cond);
    }
    V(&mutex);
    P(&cond);
    P(&mutex);
    count--;
    if (count == 0) {
        V(&cond);
    }
    V(&mutex);
}

void signal() {
    P(&mutex);
    if (count == 0) {
        V(&cond);
    }
    count++;
    V(&mutex);
}

void broadcast() {
    P(&mutex);
    while (count > 0) {
        V(&cond);
        count--;
    }
    V(&mutex);
}
```

使用信号量实现条件变量：本质困难

操作系统用自旋锁保证 wait 的原子性

```
wait(cv, mutex) {
  release(mutex);
  sleep();
}
```

信号量实现的矛盾

- 不能带着锁睡眠 (NewBing 犯的错误)
- 也不能先释放锁
  - `P(mutex); nwait++; V(mutex);`
  - 此时 signal/broadcast 发生，唤醒了后 wait 的线程
  - `P(sleep);`
- (我们稍后介绍解决这种矛盾的方法)

信号量的使用：小结

信号量是对“袋子和球/手环”的抽象

- 实现一次 happens-before，或是计数型的同步
  - 能够写出优雅的代码
  - `P(empty); printf("("); V(fill)`
- 但并不是所有的同步条件都容易用这个抽象来表达

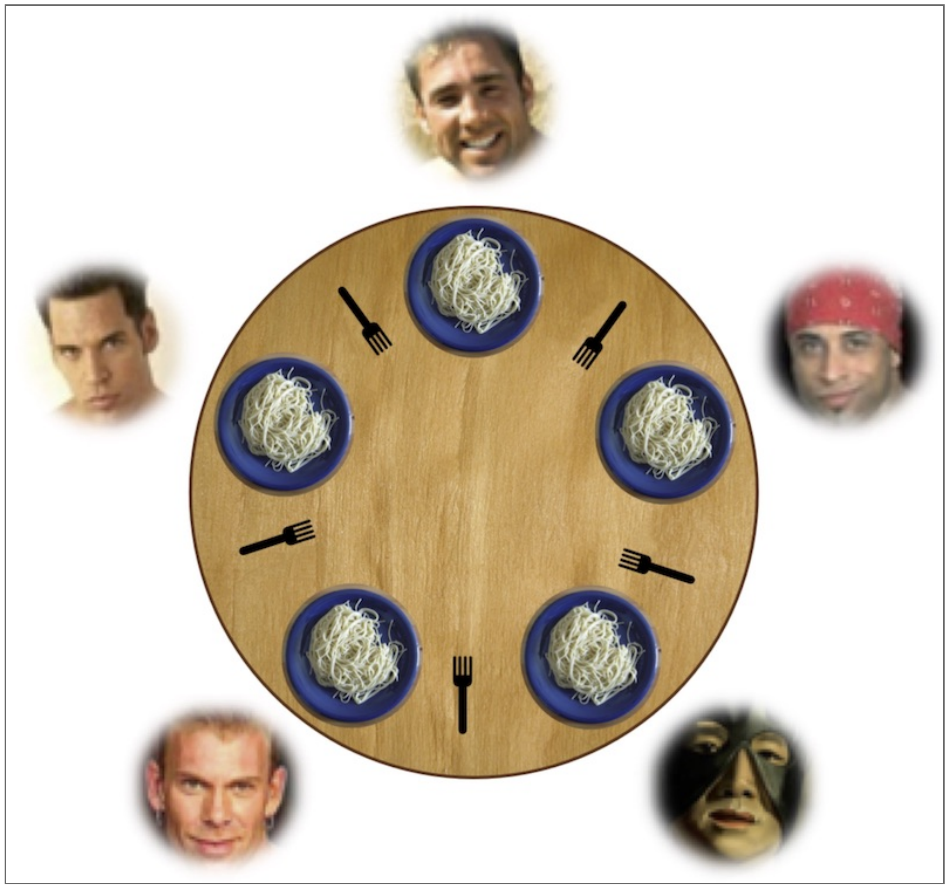
> TIP: BE CAREFUL WITH GENERALIZATION
>
> The abstract technique of generalization can thus be quite useful in systems design, where one good idea can be made slightly broader and thus solve a larger class of problems. However, be careful when generalizing; as Lampson warns us “Don’t generalize; generalizations are generally wrong” [L83].
>
> One could view semaphores as a generalization of locks and condition variables; however, is such a generalization needed? And, given the difficulty of realizing a condition variable on top of a semaphore, perhaps this generalization is not as general as you might think.

哲♂学家吃饭问题

哲学家吃饭问题 (E. W. Dijkstra, 1960)

经典同步问题：哲学家 (线程) 有时思考，有时吃饭

- 吃饭需要同时得到左手和右手的叉子
- 当叉子被其他人占有时，必须等待，如何完成同步?



失败与成功的尝试

失败的尝试

- 把信号量当互斥锁：先拿一把叉子，再拿另一把叉子

成功的尝试(万能的方法)

```
#define CAN_EAT (avail[lhs] && avail[rhs])
mutex_lock(&mutex);
while (!CAN_EAT)
  cond_wait(&cv, &mutex);
avail[lhs] = avail[rhs] = false;
mutex_unlock(&mutex);

mutex_lock(&mutex);
avail[lhs] = avail[rhs] = true;
cond_broadcast(&cv);
mutex_unlock(&mutex);
```

成功的尝试：信号量

Trick: 死锁会在 5 个哲学家 “同时吃饭” 时发生

- 破坏这个条件即可
  - 保证任何时候至多只有 4 个人可以吃饭
  - 直观理解：大家先从桌上退出
    - 袋子里有 4 张卡
    - 拿到卡的可以上桌吃饭 (拿叉子)
    - 吃完以后把卡归还到袋子
- 任意 4 个人想吃饭，总有一个可以拿起左右手的叉子
  - 教科书上有另一种解决方法 (lock ordering；之后会讲)

但这真的对吗?

- **philosopher-check.py**
- 在必要的时候使用 model checker

反思：分布与集中

“Leader/follower” - 有一个集中的“总控”，而非“各自协调”

- 在可靠的消息机制上实现任务分派
  - Leader 串行处理所有请求 (例如：条件变量服务)

```
void Tphilosopher(int id) {
  send(Twaiter, id, EAT);
  receive(Twatier); // 等待 waiter 把两把叉子递给哲学家
  eat();
  send(Twaiter, id, DONE); // 归还叉子
}

void Twaiter() {
  while (1) {
    (id, status) = receive(Any);
    switch (status) { ... }
  }
}
```

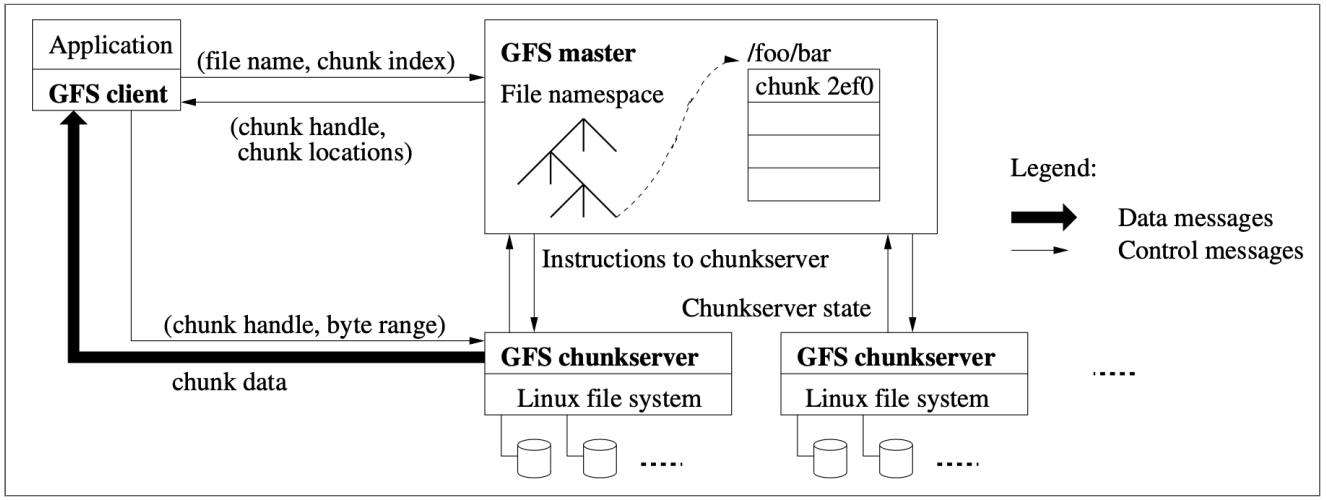
反思：分布与集中 (cont'd)

你可能会觉得，管叉子的人是性能瓶颈

- 一大桌人吃饭，每个人都叫服务员的感觉
- Premature optimization is the root of all evil (D. E. Knuth)

抛开 workload 谈优化就是耍流氓

- 吃饭的时间通常远远大于请求服务员的时间
- 如果一个 manager 搞不定，可以分多个 (fast/slow path)



- 把系统设计好，集中管理可以不是瓶颈：**The Google File System** (SOSP'03) 开启大数据时代