Concurrent Programming

> D. Butenhof, “Programming with Posix Threads”, Addison-Wesley, 1997

一、理论

0. Motivation

并行的好处：

1. 处理异步事件。不知道什么时候回来，如handler
2. 支持多CPU的使用，利用更多的资源。
3. 解决异步设备（I/O设备）读写慢的情况
4. 和用户打交道。输入较慢，不干等
5. 网络如果串行，不能解决多人的情况。OS定时轮询不同的程序，进行分配（进程调度，不希望慢的操作把快的操作挡住了）

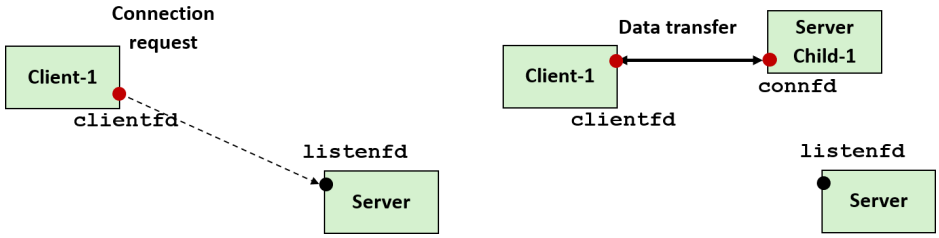
并发编程：OS提供一个调度接口，帮我们实现调度。

1. 应用层实现并发的方法

1.1 Process

创建多个进程，实现一个并行的server：有client连接时，就分配一个子进程，丢给子进程去处理。

多进程的方式，只受到操作系统进程数和资源的限制。



- fork后，父子的listenfd，connfd指向同一处
- 先关掉子进程的listenfd：子进程已连接，不再需要
- 关掉父进程connfd：connfd对父进程没有用，父进程不再管该client
- long-running进程的资源要及时回收：连接符fork后有两份，不要用的那份如果不及时回收，之后将永远不会释放已连接描述符的文件表条目entry。
- 用SIG_CHLD回收子进程

共享信息：

- 通过共享file table(显式)
- 不共享地址空间，进程有独立的地址空间

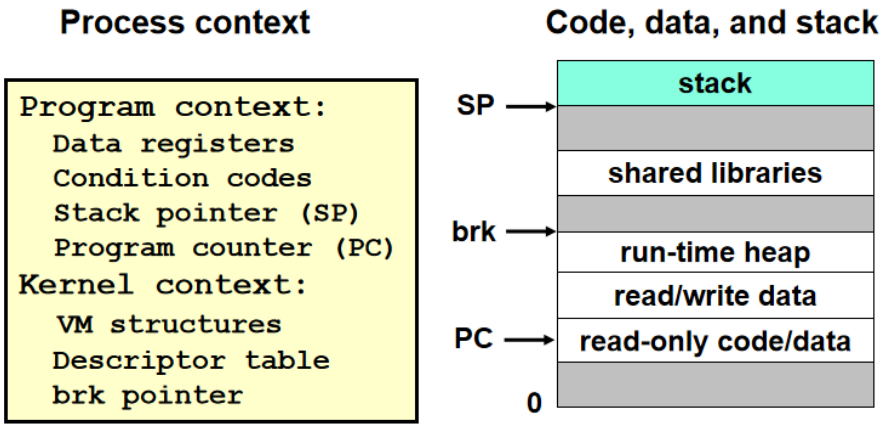
缺点:

- 不轻量（大多数都是短连接）
  - 每个client都要创建一个进程，额外代价大。
  - 进程越多，调度队列长，回收难
- 父子进程共享数据困难。需要IPC（interprocess communication），如FIFO队列，或两个进程映射到同一块共享内存。

1.2 Thread

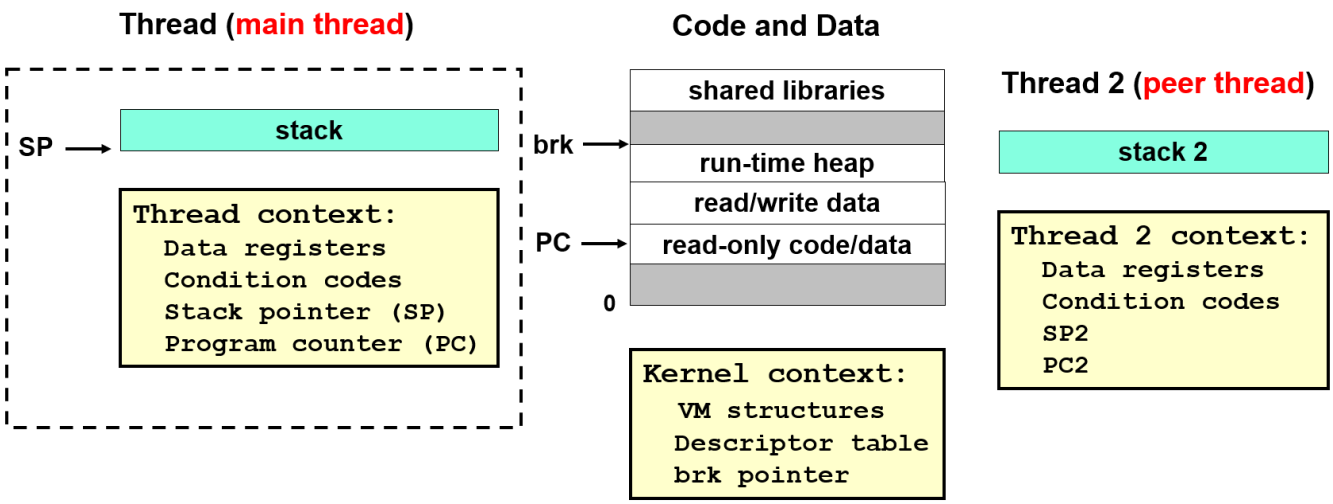
线程：一个进程里和执行流相关的部分。我们希望线程内独立的部分越小，这样overhead更小。

进程 = process context + code, data, stack



- 一个Context代表了运行的一个程序
- vm structure（OS配的，记录进程相关的内存信息
- brk pointer（堆指针）

Process= **thread** + code, data, and kernel context



- 栈是代表了线程执行的整个不同的过程，所以有自己的stack
- main thread：每个进程至少包括的一个线程（进程开始时）
- 每个线程有自己逻辑的执行流，维护自己的名字（thread id，TID）

线程vs进程：

- 线程也有context switch，但是上下文比进程小得多，切换更快
- 线程没有父子层次，只有对等线程池，读写相同共享数据（进程一般不共享）。可杀死任何对等线程。

Posix标准接口

```
#include <pthread.h>
typedef void *(func)(void *);

/*
* 成功返回0，出错非0
* 创建并设置tid为线程号，attr配置信息，func为执行的函数，arg为函数参数
*/
```

```c
int pthread_create(pthread_t *tid, pthread_attr_t *attr, func *f, void *arg);

/* 返回自己的线程号*/
pthread_t pthread_self(void);

/*
* 不返回
* 如果主线程调用：等待所有对等线程终止后终止，并终止整个进程
*/
void pthread_exit(void *thread_return);

/*
* 成功返回0，出错非0
* 阻塞，等待线程tid终止，回收其内存。必须指定tid
*/
int pthread_join(pthread_tid tid, void **thread_return);

/*
* 成功返回0，出错非0
* 分离线程，不能被其他线程回收、杀死，系统释放内存
*/
int pthread_detach(pthread_t tid);
```

- 线程退出，不要轻易使用exit函数：导致所有的线程全部结束
- 如果没有join，可能main thread先结束，peer thread后结束
- web服务器中，每个线程不需要等待别人终止，一般分离自身。防止main先结束。

```c
/* thread routine */
void *thread(void *vargp)
{
    int connfd = *((int *)vargp); //进行一个cast得到connfd

    Pthread_detach(pthread_self()); //自我分离
    Free(vargp); //所有线程共享一块资源，主进程malloc，可通过子进程free
    echo(connfd);
    Close(connfd); //共享的fd，谁close都一样
    return NULL;
}
int main(int argc, char **argv){
    int listenfd, *connfdp
    socklen_t clientlen;
    struct sockaddr_in clientaddr;
    pthread_t tid;

    if (argc != 2) {
        fprintf(stderr, "usage: %s <port>\n", argv[0]);
        exit(0);
    }
    listenfd = open_listenfd(argv[1]);
    while (1) {
        clientlen = sizeof(clientaddr);
```

```
        connfdp = Malloc(sizeof(int));
        *connfdp = Accept(listenfd,(SA *)&clientaddr, &clientlen);
        Pthread_create(&tid, NULL, thread, connfdp);
    }
}

```

缺点：

- 共享资源。如果直接传递connfd没有malloc，该对象可以被多个thread访问。创建出线程以后，main中再次Accept会覆盖掉局部变量connfd。其他线程会突然发现自己的fd变了。所以每次要malloc

1.3 I/O多路复用

I/O多路复用，是有限状态机的思路。在一个线程内部去调度。

select（syscall）：

- 监听多个fd（包括listenfd和connfd），当有fd有消息来了的时候，它会从select中退出
- 在一个bitmap中，每一个bit代表一个fd，置1代表要监听

```
#include <sys/select.h>

/*
* 返回已经准备好的fd的个数，出错-1
* Maxfd：监听最大数
* Readset：传过去时写好哪些fd被监听，返回哪些有消息
*/
int select (int maxfd, fd_set *readset, NULL, NULL, NULL);

/* clear all bits in fdset. */
void FD_ZERO(fd_set *fdset);
/* clear bit fd in fdset */
void FD_CLR(int fd, fd_set *fdset);
/* turn on bit fd in fdset */
void FD_SET(int fd, fd_set *fdset);
/* Is bit fd in fdset on? */
int FD_ISSET(int fd, *fdset);
```

例子：

```
    FD_ZERO(&read_set);
    FD_SET(STDIN_FILENO, &read_set);
    FD_SET(listenfd, &read_set);
    while(1) {
        ready_set = read_set;
        Select(listenfd+1, &ready_set, NULL, NULL, NULL); // 可以同时监听多个
        if (FD_ISSET(STDIN_FILENO, &ready_set)
            /*read command line from stdin */
            command();
```

```
        if (FD_ISSET(listenfd, &ready_set)){
            connfd = Accept(listenfd, (SA *)&clientaddr, &clientlen); // 因为有消息了，所以肯定立刻返回
            echo(connfd);
        }
    }
```

实现server：

- 监听所有的listenfd，connfd
- 如果listenfd有消息，拿到新的connfd，加入监听队列
- 如果connfd有消息，服务（并close connfd，remove）
- 需要一个结构体记录状态

缺点：

- 没有利用多核

1.4 总结

开了一家餐馆，想要扩大经营：

- 进程：再开一家店，都有一套完整的东西，开销大，流动麻烦
- 线程：多放几套桌子和服务员
- I/O：雇一个能力强的服务员，不会被阻塞，跑得快。事件驱动，有事就叫服务员，服务员监听事件（select）。（原来是线程切换，现在是服务员技能切换）

2. 共享变量

2.1 概念模型

Process= **thread** + code, data, and kernel context

- 共享的process context
  - code, data, heap, virtual address space
  - open files and installed handlers
- 独有的thread context
  - Thread ID, stack, stack pointer, PC, CC, registers

实际操作中：reg确实严格私有，但是可以访问别人的stack(比如传递了一个全局的指针)

2.2 变量

- 全局Global
  - 只有一个实例，所有线程共享
- 局部Local
  - 用变量名x加线程id：x.id表示实例
- 局部静态Local static
  - 同global，只有一个实例

2.3 共享变量

definition：是否被多个线程引用

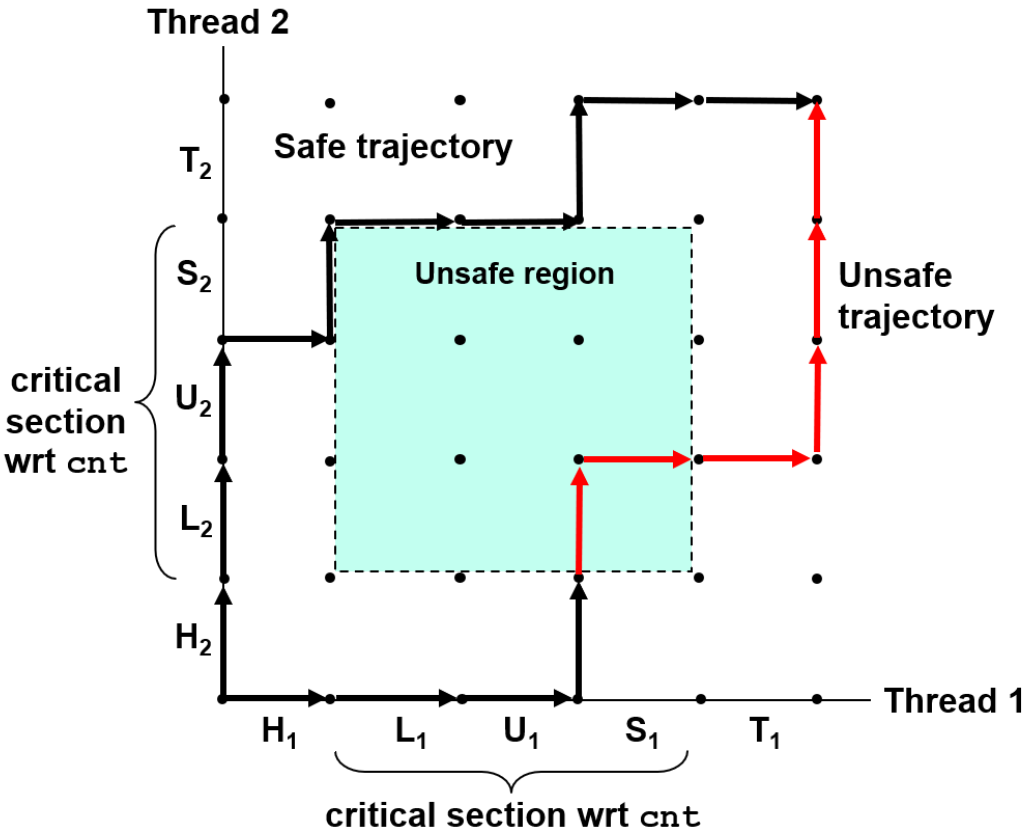
共享变量也可能是local (stack上)

3. 同步问题

同步错误：（例）count++在汇编中三条语句Load，update，write；一般问题都在update和write中switch了

3.1 进度图

progress graph：n个线程化为n*n点阵中的一条轨迹线

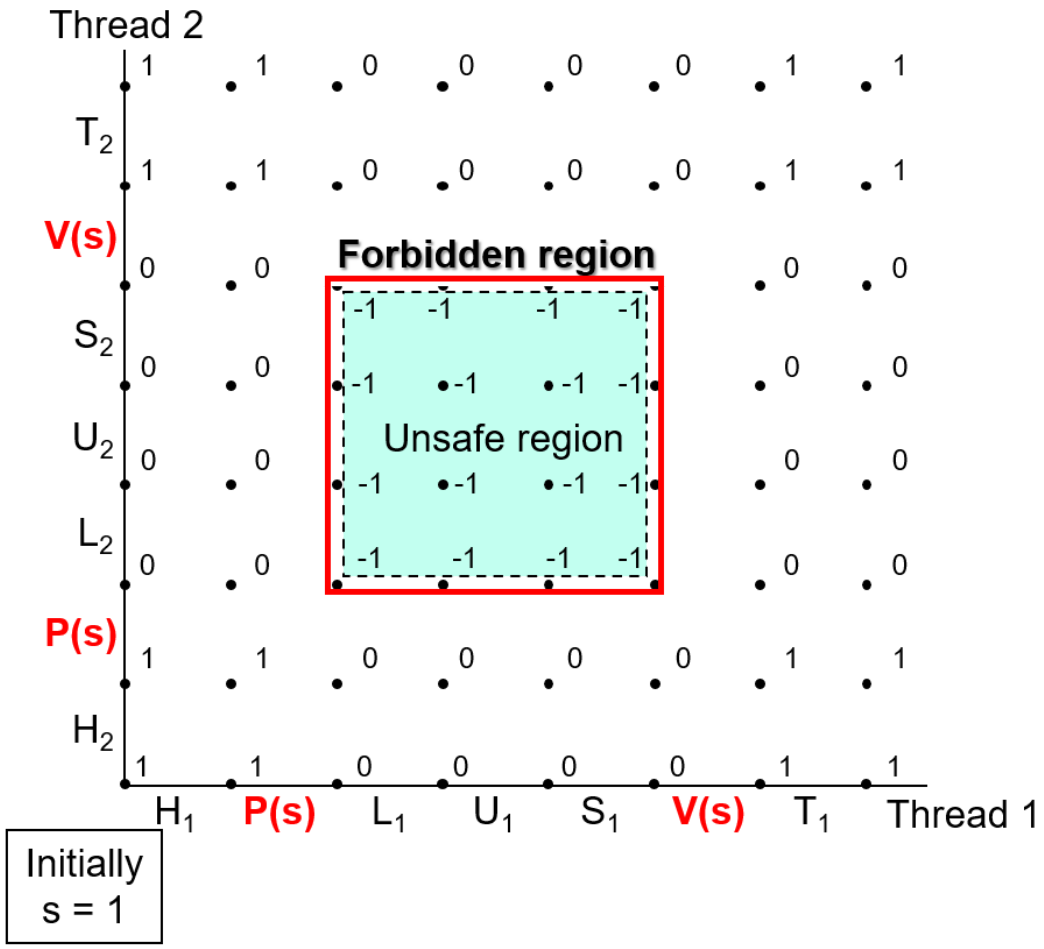


3.2 semaphore：互斥

semaphore信号量s：

- 非负整数
- global
- 两种原子性操作（不会中断）
  - $P(s)$：[**while (s == 0) wait(); s--;**]
  - $V(s)$：[**s++;**]

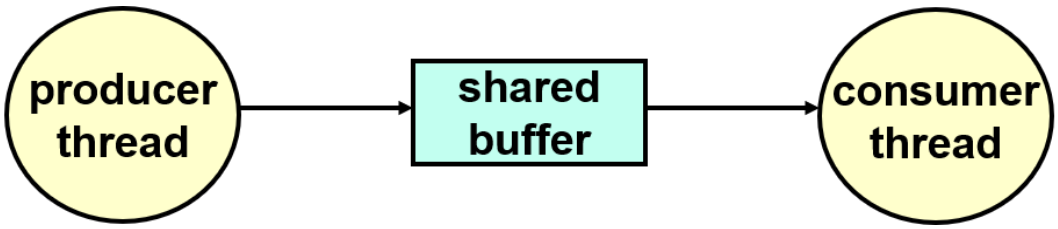
实现互斥：



3.3 semaphore：调度共享资源

- counting semaphores：记录共享资源状态
- binary semaphores：通知其他threads

(1) Producer-consumer



三个信号量

- mutex：binary，互斥缓冲区访问
- slots：count，空位数。非零时producer可以放入
- items：count，物品数。非零时consumer可以放入

(2) Reader-writer

1. 偏向reader的

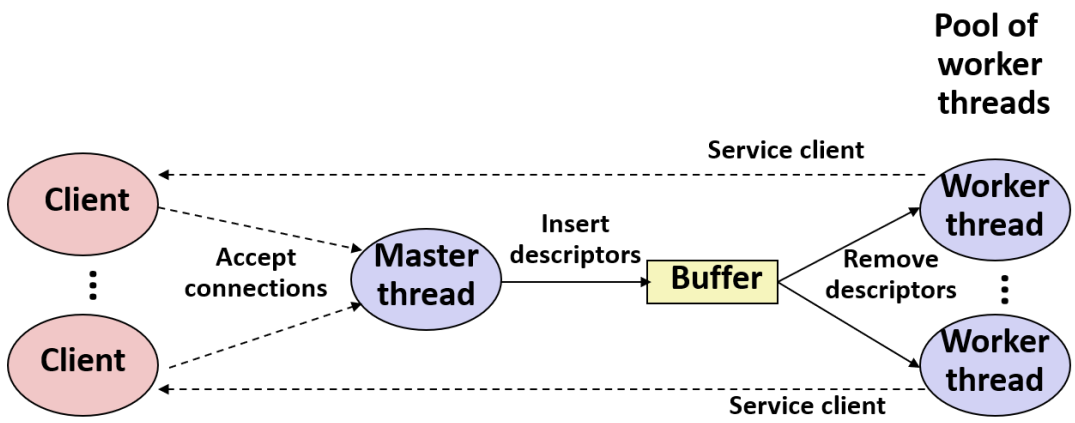
   有writer在等待的时候，新的reader也可以直接进入（read不冲突）

2. 偏好writer的

   一旦writer准备写了，就尽可能快地执行写。在writer到达之后的reader操作必须要等待。

```c
int readcnt;    /* Initially 0 */
sem_t mutex, w; /* Both initially 1 */

void reader(void) {
  while (1) {
    P(&mutex); // 保护对readcnt的操作
    readcnt++;
    if (readcnt == 1) // 第一个reader锁门
        P(&w);  // 只要有reader抢到w，后面的reader不用等
    V(&mutex);

    /* Reading here */

    P(&mutex);// 保护对readcnt的操作
    readcnt--;
    if (readcnt == 0) // 最后一个reader开门
        V(&w);
    V(&mutex);
  }
}
void writer(void) {
  while (1) {
    // writer没有排队
    P(&w); // 可能reader源源不断的，writer就starvation
    /* Writing here */
    V(&w);
  }
}

```

3.4 Prethreaded Concurrent Server



- Master thread主线程
  - 负责接受连接请求
  - 将连接符connfd放在buffer中
- Worker thread工作者
  - 从buffer中取出connfd，为客户端服务

放入取出connfd使用Producer-consumer模型

如此避免了为每个client创建一个线程的巨大开销

4. 性能问题

1. 串行部分少：PV保护的为串行。
2. 抢占mutex的额外开销大
3. 减少全局变量的访问：如，累加加在local中
4. context switch属于overhead，额外开销

性能评估

- **speedup**：$S_p = \frac{T_1}{T_p}$
  - 加速比，单核时间/p核时间
  - 绝对加速比：T_1 为单线程时间，没有PV操作
  - 相对加速比：T_1 为多线程，线程为1的时间
- **Efficiency**：$E_p = \frac{S_p}{p} = \frac{T_1}{pT_p}$

受硬件限制：开更多的thread往往只是增加overhead

5. 安全问题

四类问题：

1. 未保护共享变量

   P/V操作（会变串行）

2. 依赖于persisitent state（类似共享变量，但PV解决不了）：随机数的随机性依赖其他线程

   需要调用者提供一些per thread数据，分离thread之间的影响

3. 返回了指向static的pointer

   Lock-and-copy：包装原来的函数，保证每次只有一个调用这个函数，及时把结果copy出来

4. 调用thread-unsafe函数

   其中thread-safe函数中包括reentrant function（无状态的，没有共享变量，可以重复地调用）

5.1 TLS：线程局部存储

（Thread local storag）

C++11后：前缀声明`thread_local`，生命周期和thread一样，变量per thread

- 可以用TLS生成独立随机数。但使用TLS开销要比普通的变量大。
- Errno应该时每个线程独有的

5.2 Races

正确性依赖于两个线程竞争的结果。

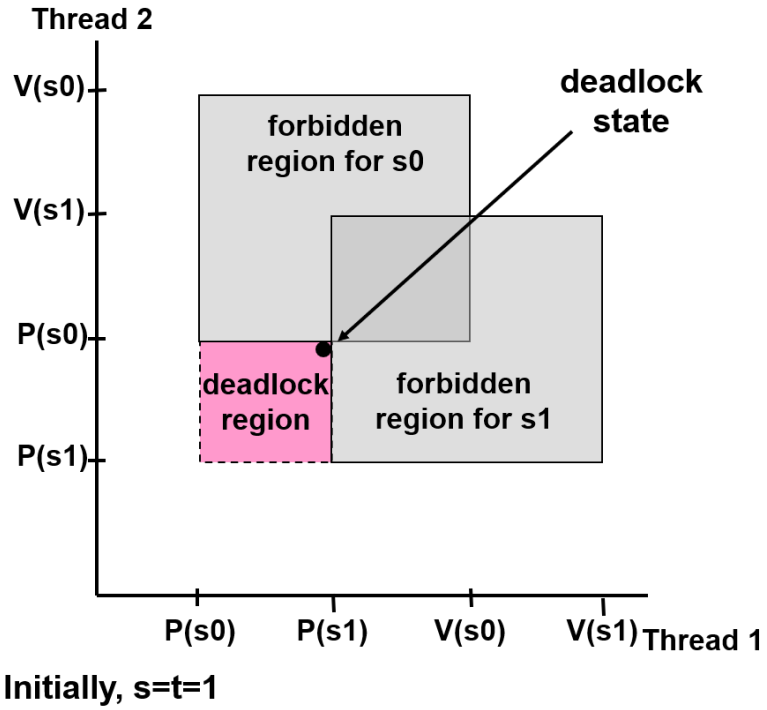
如全局指针的malloc，可能会出现先使用再分配的情况。

```c
/*thread routine */
void *thread(void *vargp)
{
    int myid = *((int *)vargp) ;
    printf("Hello from th. %d\n", myid);
    return NULL ;
}

int main()
{
    /* ... */
    int i ;
    for ( i=0 ; i<N ; i++ )
       pthread_create(&tid[i], NULL, thread, &i); //BUG:传递了i的引用，但main会修改i
   /* ... */
}

//fix:
for ( i=0 ; i<N ; i++ ) {
     ptr = malloc(sizeof)int)); // malloc一个空间，避免指向一个
     *ptr = i ;
     pthread_create(&tid[i], NULL, thread, ptr);
}

```

5.3 Deadlock

拿多个mutex的时候，相对顺序要一样

```c
void *count(void *vargp)
{
    int i;
    int id = (int) vargp;
    for (i = 0; i < NITERS; i++) {
      P(&mutex[id]); P(&mutex[1-id]); //BUG: 拿thread顺序会不同
      cnt++;
      V(&mutex[id]); V(&mutex[1-id]);
    }
    return NULL;
}

```



二、习题

1. 共享问题

Which level would the following data being shared?

File descriptor table	threads
File table	processes
Stack	not shared
Heap	threads
Program counter	not shared
Condition code	not shared
Installed handler	threads
V-node table	processes

2. Race

```
#include "csapp .h"
#define N 4
void *print_thread(void *vargp) {
    int myid = *((int)vargp);
    printf("in thread %d\n", myid);
    return NULL;
}
int main() {
```

```
    pthread_t tid[N];
    int *ptr;
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        ptr = malloc(sizeof(int));
        *ptr = i;
        // Creat a thread to run the "print_thread func with arg ptr
        // Your core here: _____________
        //Ans: Pthread_create(&tid[i], NULL, print_thread, ptr);
        free(ptr);
    }
    for (int i = 0; i < N; i++)
        pthread_join(tid[i], NULL);
}
```

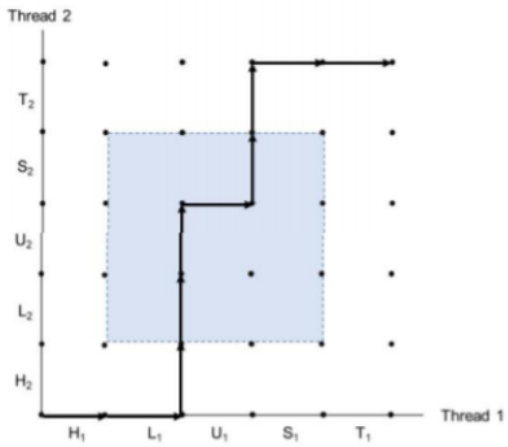
2. Is there any race condition in the previous code? Why or why not?

Yes. If the **free** call executed **before** the newly **created** thread, then there will be a segmentation fault caused by accessing a freed pointer.

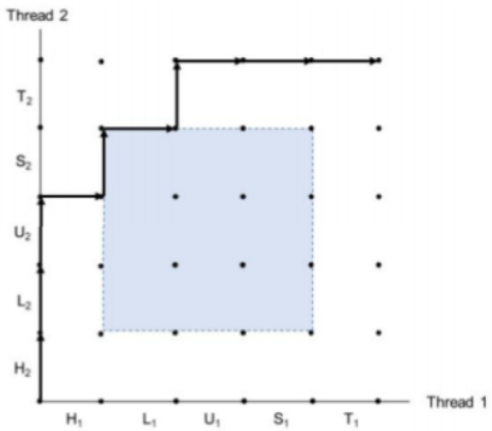
3. 进度图

Using the progress graph in Figure 12-21 of file ”badcnt.c”, draw the following trajectories out and point out the value of cnt after the execution (assume the value of cnt is 0 initially for each trajectory)

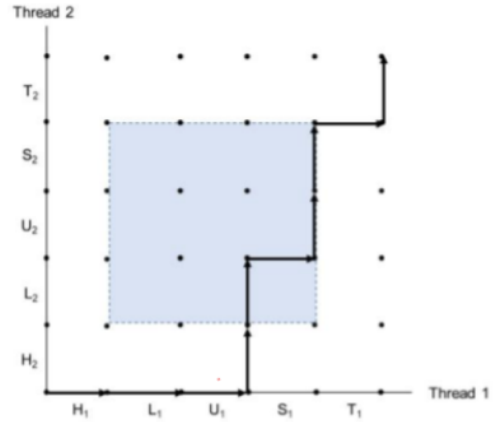
1. H1,L1,H2,L2,U2,U1,S2,T2,S1,T1 cnt = 1



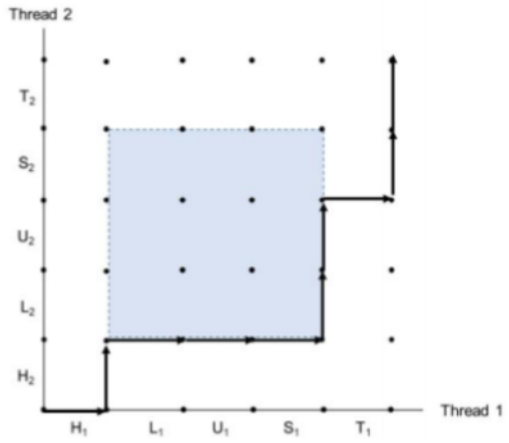
2. H2,L2,U2,H1,S2,L1,T2,U1,S1,T1 cnt = 2



3. H1,L1,U1,H2,L2,S1,U2,S2,T1,T2 cnt = 1



4. H1,H2,L1,U1,S1,L2,U2,T1,S2,T2 cnt = 2

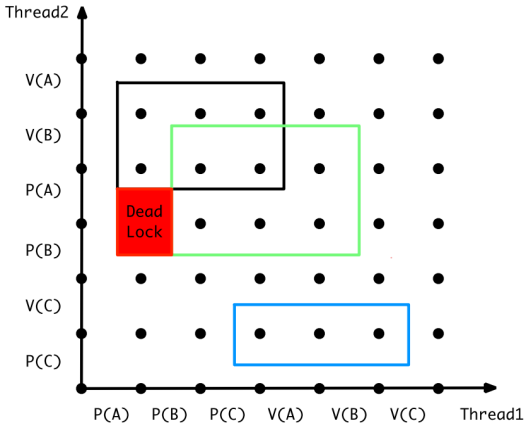


4. 进度图（deadlock）

1. Deadlock is an important problem in concurrent programs. Consider the below execution flow. Whether it will cause deadlock or not? (2') Please draw a progress graph and explain the reason base on the graph. (6')

Initially: A=1, B=1, C=1		
Thread	Thread 1	Thread 2
Step1	P(A)	P(C)
Step2	P(B)	V(C)
Step3	P(C)	P(B)
Step4	V(A)	P(A)
Step5	V(B)	V(B)
Step6	V(C)	V(A)

YES. The rectangles are unreachable regions for this program. If the program goes into the DEADLOCK region, it can never go out, since the program can only move up or move right in this graph.



2. Please fill in the blanks with initial values for the three semaphores and add **P()** and **V()** semaphore operations such that the process is guaranteed to terminate. (**NOTE**: You can only fill in one P(x) or V(x) operation in [4]~[9]) (9') HINT: Using **a** and **b** as iterators for each thread to control loop times while using **c** as lock to protect the modification on variable **x**.

```
/* Initialize x */
int x = 1;
/* Initialize semaphores */
sem_t a, b, c;
sem_init(&a, 0, _[1]_); // 1
sem_init(&b, 0, _[2]_); // 2
sem_init(&c, 0, _[3]_); // 1

void thread1()
{
    while (x != 18) {
        ___[4]___; // P(a)
        ___[5]___; // P(c)
        x = x * 2;
        ___[6]___; // V(c)
    }
    exit(0);
}
void thread2()
{
    while (x != 18) {
        ___[7]___; // P(b)
        ___[8]___; // P(c)
        x = x * 3;
        ___[9]___; // V(c)
    }
    exit(0);
}
```