

Unix: programowanie z użyciem wątków

Witold Paluszyński
witold.paluszynski@pwr.wroc.pl
<http://kcir.pwr.wroc.pl/~witold/>

Copyright © 1999–2006 Witold Paluszyński
All rights reserved.

Niniejszy dokument zawiera materiały do wykładu na temat programowania z użyciem wątków normy POSIX w systemie Unix. Jest on udostępniony pod warunkiem wykorzystania wyłącznie do własnych, prywatnych potrzeb i może być kopiowany wyłącznie w całości, razem z niniejszą stroną tytułową.

Wątki: wprowadzenie

- Wątek (ang. *thread*) jest sekwencją obliczeń realizowaną w ramach jednego procesu. Zestaw wątków należący do jednego procesu wykonuje się równolegle w ramach jego przestrzeni adresowej.
- Ponadto wątki współdzielą następujące cechy:
 - identyfikator użytkownika i grupy
 - bieżącą kartotekę dyskową
 - otwarte pliki
 - handlersy sygnałów i ich deklaracje
- Natomiast każdy wątek ma swój unikalny identyfikator, indywidualny zestaw atrybutów, maskę sygnałów, priorytet i tzw. kontekst obliczeniowy, tzn. stos wywołań procedur, zestaw rejestrów, itp.
- Wątek tworzy się funkcją `pthread_create()` jako wywołanie jakiejś funkcji użytkownika.

serwer wieloprocesowy:

```
void serve_client(int sock);

void main(void) {
    int sockS, sockC;
    struct sockaddr_un add;

    sockS=socket(PF_INET,
        SOCK_STREAM,0);
    add.sun_family=AF_INET;/*...*/
    bind(sockS,
        (struct sockaddr *)&add,
        sizeof(add));
    listen(sockS, 5);

    while (1) {
        sockC = accept(sockS,0,0);
        if (fork() == 0){/*potomek*/
            close(sockS);
            serve_client(sockC);
            exit(0);
        }
        close(sockC); /*rodzic*/
    }
}
```

serwer wielowątkowy:

```
void *serve_client(void *);

void main(void) {
    int sockS, sockC;
    struct sockaddr_un add;
    pthread_t t;

    sockS=socket(PF_INET,
        SOCK_STREAM,0);
    add.sun_family=AF_INET;/*...*/
    bind(sockS,
        (struct sockaddr *)&add,
        sizeof(add));
    listen(sockS, 5);

    while (1) {
        sockC = accept(sockS,0,0);
        pthread_create(&t, NULL,
            serve_client,
            (void *)&sockC);
        /*watki nie zamykaja gniazdek*/
        /*- sa to wspolne deskryptory*/
    }
}
```

Kończenie pracy wątków

- Wątek kończy się gdy:
 - zakończy się funkcja realizująca go
 - wątek wywoła funkcję `pthread_exit()`
 - wątek zostanie anulowany funkcją `pthread_cancel()`
 - jeden z wątków wykona funkcję `exec...`
 - zakończy się proces macierzysty wątku
- W chwili zakończenia wątku zwalniane są jego indywidualne struktury danych (np. stos), ale nie globalne struktury procesu.
- W chwili zakończenia wątki generują status, który może być odczytany przez wątek macierzysty, podobnie jak to jest z procesami.
- Jeśli zakończy się funkcja główna wątku to skutek jest taki jak gdyby wątek wywołał funkcję `pthread_exit()` ze zwróconą wartością jako argumentem. W ten sposób wszystkie jawnie tworzone wątki różnią się od głównego wątku procesu, którego zakończenie funkcji głównej (`main`) jest równoważne wywołaniu funkcji `exit()`.
- funkcje związane z wątkami nie sygnalizują błędów przez zmienną `errno` (która jest globalna w procesie), lecz przez niezerowe wartości funkcji.

- Jednak dla umożliwienia „zwykłym” funkcjom sygnalizacji przyczyn błędów, każdy z wątków MOŻE otrzymać prywatną kopię zmiennej globalnej `errno` (wymaga to kompilacji programu z definicją `-D_REENTRANT`).

Wątki: status, wcielenie, odłączanie

- Kończąc pracę, wątek normalnie pozostawia informacje o swoim stanie funkcją `pthread_exit()`. Jest to podobne do przekazania statusu wyjścia procesu.
- Jeden wątek może przejść w stan oczekiwania na zakończenie innego wątku tego samego procesu. Takie oczekiwanie, nazywane „wcielaniem” (ang. *join*), wywołuje się funkcją `pthread_join()`. Jest to podobne do oczekiwania na zakończenie podprocesu funkcją `waitpid()`.
- Jednak, w odróżnieniu od procesów, wątek może być wątkiem „odłączonym” (ang. *detached*), co oznacza, że nie może go wcielić inny wątek, a po zakończeniu tego wątku jest on ostatecznie usuwany, nie czekając na „wcielenie” i odebranie jego statusu przez inny wątek.
- Do dynamicznego odłączania wątków służy funkcja `pthread_detach()`.
- Można też od razu utworzyć wątek jako „odłączony”, jednak domyślnie tak się nie dzieje. Stan odłączenia wątku jest jednym z atrybutów wątku, o domyślnej wartości odpowiadającej wątkowi nieodłączonemu.

Wątki: kasowanie

- Skasowanie wątku bywa przydatne, gdy program uzna, że nie ma potrzeby wykonywać dalej wątku, pomimo iż nie zakończył on jeszcze swej pracy. Wątek kasuje funkcja `pthread_cancel()`.
- Skasowanie wątku może naruszyć spójność modyfikowanych przezeń globalnych danych, zatem powinno być dokonywane w przemyślany sposób. Istnieją mechanizmy wspomagające „oczyszczanie” struktur danych (ang. *cleanup handlers*) po skasowaniu wątku. W związku z tym skasowany wątek nie kończy się od razu, lecz w najbliższym punkcie kasowania (ang. *cancellation point*). Jest to tzw. kasowanie synchroniczne.
- Punktami kasowania są wywołania niektórych funkcji, a program może również stworzyć dodatkowe punkty kasowania wywołując funkcję `pthread_testcancel()`.
- W przypadkach gdy wątek narusza struktury danych przed jednym z punktów kasowania, może on zadeklarować procedurę czyszczącą, która będzie wykonana automatycznie w przypadku skasowania wątku. Tę procedurę należy oddeklarować natychmiast po przywróceniu spójności struktur danych.

Wątki: obsługa sygnałów

- Każdy wątek ma własną maskę sygnałów. Wątek dziedziczy ją od wątku, który go zainicjował, lecz nie dziedziczy sygnałów czekających na odebranie.
- Sygnał wysłany do procesu jest doręczany do jednego z jego wątków.
- Sygnały synchroniczne, tzn. takie, które powstają w wyniku akcji danego wątku, np. `SIGFPE`, `SIGSEGV`, są doręczane do wątku, który je wywołał.
- Sygnał do określonego wątku można również skierować funkcją `pthread_kill`.
- Sygnały asynchroniczne, które powstają bez związku z akcjami, np. `SIGHUP`, `SIGINT`, są doręczane do jednego z tych wątków procesu, które nie mają tego sygnału zamaskowanego.
- Jedną ze stosowanych konfiguracji obsługi sygnałów w programach wielowątkowych jest oddelegowanie jednego z wątków do obsługi sygnałów, i maskowanie ich we wszystkich innych wątkach.

Atrybuty wątków

- Wątki posiadają zestaw atrybutów, które posiadają wartości domyślne, automatycznie przyjmowane w chwili tworzenia wątku.
- Możliwe jest utworzenie wątku z atrybutami różnymi od domyślnych. Wymaga to utworzenia obiektu atrybutów typu `pthread_attr_t`.
- Wartości atrybutów wątek może również zmieniać w czasie pracy odpowiednimi funkcjami „set”.

Przełączanie wątków

- Gdy proces tworzy kilka wątków, to mogą one być równolegle wykonywane o ile system operacyjny ma wystarczające zasoby; w przeciwnym wypadku stosowane jest przełączanie wątków; możliwe jest wybranie strategii przełączania i priorytetów wątków.
- W systemie Solaris (Sun Microsystems) wątki realizowane są przez mechanizm niższego poziomu, tak zwane LWP (*Light Weight Processes*); każdy proces ma do dyspozycji kilka LWP i każdy LWP może realizować jeden wątek naraz. Same LWP podlegają przełączaniu przez system operacyjny.

Synchronizacja wątków (wstęp)

- Ponieważ wątki są z definicji wykonywane współbieżnie i asynchronicznie, a także operują na współdzielonych globalnych strukturach danych, konieczne są mechanizmy dla zapewnienia wyłączości dostępu.
- Mechanizmy wzajemnej synchronizacji i blokowania ograniczają współbieżność, zatem należy stosować jak najdrobniejsze blokady.
- Dostępne mechanizmy synchronizacji standardu POSIX
 - mutexy (ang. *mutual exclusion*)
 - zmienne warunkowe (ang. *conditional variables*)
 - blokady odczytu i zapisu (ang. *read-write locks*)
 - semafony

Mechanizmy synchronizacji

Mechanizmy synchronizacji zdefiniowane przez normę POSIX wykorzystują struktury pamięciowe tworzone jawnie w programach, np.:

```
static pthread_mutex_t mutex1;

pthread_mutex_t *mutex2;
mutex2 = (pthread_mutex_t *)
    calloc(1, sizeof(pthread_mutex_t));

pthread_mutex_t mutex3 = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

pthread_mutex_t mutex4;
pthread_mutexattr_t attr_ob;
pthread_mutexattr_init(&attr_ob)
pthread_mutex_init(&mutex4, &attr_ob)
```

Wyzerowany mutex jest otwarty.

Synchronizacja wątków (2)

```
#define _REENTRANT
#include <pthread.h>
#define NUM_THREADS 12

#define TRAND(limit,n) \
{struct timeval t;\
    gettimeofday(&t,(void *)NULL);\
    (n)=rand_r((unsigned *) &t.tv_usec) % (limit)+1;}
void *thread_main(void *);
int Global_data = 0;

main(int argc,char * argv[]) {
    int i;
    pthread_t thrds[NUM_THREADS];
    for (i=0; i< NUM_THREADS; i++)
        pthread_create(&thrds[i], NULL, thread_main, (void *) NULL);
    for (i=0; i< NUM_THREADS; i++)
        pthread_join(thrds[i], (void **) NULL);
}

void * thread_main(void *null) {
    static pthread_mutex_t Global_mutex; /* wyzerowany, tzn. otwarty */
    {int n; TRAND(NUM_THREADS,n); sleep(n);}
```

```
pthread_mutex_lock(&Global_mutex);
Global_data++;
printf("Watek %3d, proces %d, dane globalne %d\n",
    pthread_self(), getpid(), Global_data);
pthread_mutex_unlock(&Global_mutex);
return NULL;
}
```

Synchronizacja wątków (3)

```
#define _REENTRANT
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/shm.h>
#include <pthread.h>
#define NUM_THREADS 12

#define TRAND(limit,n) \
{struct timeval t;\
    gettimeofday(&t,(void *)NULL);\
    (n)=rand_r((unsigned *) &t.tv_usec) % (limit)+1;}
void *thread_main(void *);

pthread_mutex_t *Global_mutexp;
int g_shmid, *Global_datap;

main(int argc, char *argv[])
{
    pthread_mutexattr_t attr_obj;
    int i, s;
```

```
/* utw.obszaru pamieci wspolnej mutexu i danych */
g_shmid = shmget(IPC_PRIVATE,
    sizeof(int)+sizeof(pthread_mutex_t),
    IPC_CREAT|0666);
Global_datap = (int *) shmat(g_shmid, 0, 0);
Global_mutexp = (pthread_mutex_t *)
    (Global_datap + sizeof(int));

/* zainicj.mutexu w pam.wspolnej struk.atrybutowa */
pthread_mutexattr_init(&attr_obj);
pthread_mutexattr_setpshared(&attr_obj, PTHREAD_PROCESS_SHARED);
pthread_mutex_init(Global_mutexp, &attr_obj);

*Global_datap = 0;
for (i=0; i< NUM_THREADS; i++) /* odpal.podproces.*/
    if ( fork() == 0 ){
        thread_main((void *) NULL);
        exit(2);
    }
while((s = (int)wait(NULL)) && s != -1);

shmdt((char *) Global_datap);
shmctl(g_shmid, IPC_RMID, (struct shmids *) 0);
exit(0);
}
```

```
void * thread_main(void *null)  {
    {int n; TRAND(NUM_THREADS,n); sleep(n);}
    if (0!=pthread_mutex_trylock(Global_mutexp)) {
        printf("Watek %2d, proces %5d, czeka...\n",pthread_self(),getpid());
        pthread_mutex_lock(Global_mutexp);
    }
    (*Global_datap)++;
    printf("Watek %2d, proces %5d, dane globalne %d\n",
        pthread_self(), getpid(), *Global_datap);
    pthread_mutex_unlock(Global_mutexp);
    return NULL;
}
```

Przykład działa podobnie jak poprzedni, tylko nie tworzy wątków, a podprocesy, uzyskujące dostęp do wspólnego mutexu przez dostępny wszystkim obszar pamięci wspólnej, mieszczący dane globalne i mutex.

UWAGA: Linux nie obsługuje atrybutu PSHARED
pthread_mutexattr_setpshared()

```
if ((argc>1) && (0==strncasecmp(argv[1],"init",4))) {
    create_shared_file();
    exit(0);
}
else if (0!=access(GLOBAL_FILE, F_OK)) {
    printf("Pierwsze wywołanie musi podać argv[1]=init\n");
    exit(-1);
}
```

```
while((gfd = open(GLOBAL_FILE, O_RDWR)) == -1)
    sleep(1);
Global_datap = (int *) mmap(NULL, GLOBAL_SIZE,
    PROT_READ|PROT_WRITE,
    MAP_SHARED, gfd, 0);

Global_mutexp = (pthread_mutex_t *)
    (Global_datap + sizeof(int));
thread_main((void *)NULL);
close(gfd);
exit(0);
} /* main */
```

```
void create_shared_file() {
    static char zeroed[GLOBAL_SIZE];
    pthread_mutexattr_t attr_obj;
```

```

}
(*Global_datap)++;
printf("Watek %2d, proces %5d, dane globalne %d\n",
    pthread_self(), getpid(), *Global_datap);
pthread_mutex_unlock(Global_mutexp);
return NULL;
}
```

Ten przykład również udostępnia mutexy wielu procesom, jednak odwzorowuje obszar pamięci mutexu do pliku, dzięki czemu możliwy jest globalny dostęp do mutexu z dowolnego procesu.

Synchronizacja wątków (4)

```
#define _REENTRANT
#include <fcntl.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <sys/mman.h>
#include <pthread.h>
```

```
#define TRAND(limit,n) {struct timeval t;\
    gettimeofday(&t,(void *)NULL);\
    (n)=rand_r((unsigned *) &t.tv_usec) % (limit)+1;}
void create_shared_file();
void *thread_main(void *);
```

```
#define GLOBAL_FILE "SHARED_FILE"
#define GLOBAL_SIZE sizeof(int)+sizeof(pthread_mutex_t)
```

```
pthread_mutex_t *Global_mutexp;
int *Global_datap;
int gfd;
```

```
main(int argc, char * argv[])
{
```

```
gfd = creat(GLOBAL_FILE, O_CREAT|O_RDWR|0644);
write(gfd, zeroed, GLOBAL_SIZE);
close(gfd);
chmod(GLOBAL_FILE, S_IRWXU|S_IWGRP|S_IRGRP|S_IROTH);
```

```
gfd = open(GLOBAL_FILE, O_RDWR);
Global_datap = (int *) mmap(NULL, GLOBAL_SIZE,
    PROT_READ|PROT_WRITE,
    MAP_SHARED, gfd, 0);

*Global_datap = 0;
```

```
Global_mutexp = (pthread_mutex_t *)
    (Global_datap + sizeof(int));
pthread_mutexattr_init(&attr_obj);
pthread_mutexattr_setpshared(&attr_obj,PTHREAD_PROCESS_SHARED);
pthread_mutex_init(Global_mutexp, &attr_obj);
close(gfd);
}
```

```
void * thread_main(void *null)  {
    {int n; TRAND(12,n); sleep(n);}
    if (0!=pthread_mutex_trylock(Global_mutexp)) {
        printf("Watek %2d, proces %5d, czeka...\n",
            pthread_self(), getpid());
        pthread_mutex_lock(Global_mutexp);
```

Przykład: producenci i konsumenci

przykład producentów i konsumenta (jednego)

```
#define MAXNITEMS 1000000
#define MAXNTHREADS 100
```

```
int nitems; /* read-only by producer and consumer */
struct {
    pthread_mutex_t mutex;
    int buff[MAXNITEMS];
    int nput;
    int nval;
} shared = { PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER };
```

```
void *produce(void *), *consume(void *);
```

```
int
main(int argc, char **argv)
{
    int            i, nthreads, count[MAXNTHREADS];
    pthread_t      tid_produce[MAXNTHREADS], tid_consume;

    if (argc != 3)
        err_quit("usage: prodcons2 <#items> <#threads>");
    nitems = min(atoi(argv[1]), MAXNITEMS);
    nthreads = min(atoi(argv[2]), MAXNTHREADS);

    Set_concurrency(nthreads);
    /* start all the producer threads */
    for (i = 0; i < nthreads; i++) {
        count[i] = 0;
        Pthread_create(&tid_produce[i], NULL, produce,
                        &count[i]);
    }

    /* wait for all the producer threads */
    for (i = 0; i < nthreads; i++) {
        Pthread_join(tid_produce[i], NULL);
        printf("count[%d] = %d\n", i, count[i]);
    }
}
```

```
/* start, then wait for the consumer thread */
Pthread_create(&tid_consume, NULL, consume, NULL);
Pthread_join(tid_consume, NULL);

exit(0);
}
```

```
void *
produce(void *arg)
{
    for ( ; ; ) {
        Pthread_mutex_lock(&shared.mutex);
        if (shared.nput >= nitems) {
            Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
            return(NULL); /* array is full, we're done */
        }
        shared.buff[shared.nput] = shared.nval;
        shared.nput++;
        shared.nval++;
        Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
        *((int *) arg) += 1;
    }
}

void *
consume(void *arg)
{
    int            i;

    for (i = 0; i < nitems; i++) {
        if (shared.buff[i] != i)
            printf("buff[%d] = %d\n", i, shared.buff[i]);
    }
}
```

```
    }
    return(NULL);
}
```

Przykład: producenci i konsumenci (2)

wersja z konsumentem pracującym równolegle

```
int
main(int argc, char **argv)
{
    int            i, nthreads, count[MAXNTHREADS];
    pthread_t      tid_produce[MAXNTHREADS], tid_consume;

    if (argc != 3)
        err_quit("usage: prodcons <#items> <#threads>");
    nitems = min(atoi(argv[1]), MAXNITEMS);
    nthreads = min(atoi(argv[2]), MAXNTHREADS);

    Set_concurrency(nthreads + 1);
    /* create all producers and one consumer */
    for (i = 0; i < nthreads; i++) {
        count[i] = 0;
        Pthread_create(&tid_produce[i], NULL, produce,
                        &count[i]);
    }
    Pthread_create(&tid_consume, NULL, consume, NULL);
}
```

```
/* wait for all producers and the consumer */
for (i = 0; i < nthreads; i++) {
    Pthread_join(tid_produce[i], NULL);
    printf("count[%d] = %d\n", i, count[i]);
}
Pthread_join(tid_consume, NULL);

exit(0);
}
```

```
void * produce(void *arg) {
    for ( ; ; ) {
        Pthread_mutex_lock(&shared.mutex);
        if (shared.nput >= nitems) {
            Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
            return(NULL); /* array is full, we're done */
        }
        shared.buff[shared.nput] = shared.nval;
        shared.nput++;
        shared.nval++;
        Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
        *((int *) arg) += 1;
    }
}

void consume_wait(int i) {
    for ( ; ; ) {
        Pthread_mutex_lock(&shared.mutex);
        if (i < shared.nput) {
            Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
            return; /* an item is ready */
        }
        Pthread_mutex_unlock(&shared.mutex);
    }
}

void * consume(void *arg) {
```

Synchronizacja wątków: zmienne warunkowe

- do czekania na, i sygnalizowania, spełnienia jakichś warunków służą zmienne warunkowe

```
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond,
                      pthread_mutex_t *mutex);
int pthread_cond_timedwait(pthread_cond_t *cond,
                           pthread_mutex_t *mutex,
                           const struct timespec *abstime);
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);
```
- algorytm działania funkcji pthread_cond_wait:
 - odblokowanie mutexu podanego jako argument wywołania
 - uśpienie wątku do czasu aż jakiś inny wątek wywoła funkcję pthread_cond_signal na danej zmiennej warunkowej
 - ponowne zablokowanie mutexu
- możliwe jest zjawisko „spontanicznego obudzenia”, tzn. powrotu z funkcji pthread_cond_wait bez wywołania pthread_cond_signal; należy się z tym liczyć i sprawdzać poprawność stanu zmiennych po przebudzeniu

```
pthread_cond_wait(&globvar.cond, &globvar.mutex);
{ kod wykorzystujący oczekiwany warunek }
pthread_mutex_unlock(&globvar.mutex);
```

```
int i;

for (i = 0; i < nitems; i++) {
    consume_wait(i);
    if (shared.buff[i] != i)
        printf("buff[%d] = %d\n", i, shared.buff[i]);
}
return(NULL);
}
```

Synchronizacja wątków: zmienne warunkowe (cd.)

ogólnie schemat użycia zmiennej warunkowej ze stowarzyszonym mutexem jest następujący:

```
struct {
    pthread_mutex_t mutex;
    pthread_cond_t cond;
    { ... inne zmienne przechowujące warunek }
} globvar = { PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER,
              PTHREAD_COND_INITIALIZER, {...} };
```

schemat sygnalizacji zmiennej warunkowej:

```
pthread_mutex_lock(&globvar.mutex);
{ kod ustawiający warunek oczekiwany przez CV }
pthread_cond_signal(&globvar.cond);
pthread_mutex_unlock(&globvar.mutex);
```

schemat sprawdzania warunku i oczekiwania:

```
pthread_mutex_lock(&globvar.mutex);
while ( { warunek niespełniony } )
```

Przykład: producenci i konsumenci (3)

```
int buff[MAXNITEMS];
struct {
    pthread_mutex_t mutex;
    pthread_cond_t cond;
    int nput;
    int nval;
    int nready;
} nready = { PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER,
             PTHREAD_COND_INITIALIZER };
```

```
void *
produce(void *arg) {
    for ( ; ; ) {
        Pthread_mutex_lock(&nready.mutex);
        if (nready.nput >= nitems) {
            Pthread_mutex_unlock(&nready.mutex);
            return(NULL);          /* array is full, we're done */
        }
        buff[nready.nput] = nready.nval;
        nready.nput++;
        nready.nval++;
        nready.nready++;
        Pthread_cond_signal(&nready.cond);
        Pthread_mutex_unlock(&nready.mutex);
        *((int *) arg) += 1;
    }
}

void *
consume(void *arg) {
    int      i;

    for (i = 0; i < nitems; i++) {
        Pthread_mutex_lock(&nready.mutex);
        while (nready.nready == 0)
```

Przykład: producenci i konsumenci (4)

```
int      buff[MAXNITEMS];
struct {
    pthread_mutex_t  mutex;
    int              nput; /* next index to store */
    int              nval; /* next value to store */
} put = { PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER };

struct {
    pthread_mutex_t  mutex;
    pthread_cond_t   cond;
    int              nready; /* number ready for consumer */
} nready = { PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER,
             PTHREAD_COND_INITIALIZER };

while (nready.nready == 0)
    Pthread_cond_wait(&nready.cond, &nready.mutex);
nready.nready--;
Pthread_mutex_unlock(&nready.mutex);
if (buff[i] != i)
    printf("buff[%d] = %d\n", i, buff[i]);
}
return(NULL);
}
```

```
        Pthread_cond_wait(&nready.cond, &nready.mutex);
nready.nready--;
Pthread_mutex_unlock(&nready.mutex);

    if (buff[i] != i)
        printf("buff[%d] = %d\n", i, buff[i]);
}
return(NULL);
}
```

```
void * produce(void *arg) {
    for ( ; ; ) {
        Pthread_mutex_lock(&put.mutex);
        if (put.nput >= nitems) {
            Pthread_mutex_unlock(&put.mutex);
            return(NULL);          /* array is full, we're done */
        }
        buff[put.nput] = put.nval;
        put.nput++;
        put.nval++;
        Pthread_mutex_unlock(&put.mutex);

        Pthread_mutex_lock(&nready.mutex);
        if (nready.nready == 0)
            Pthread_cond_signal(&nready.cond);
        nready.nready++;
        Pthread_mutex_unlock(&nready.mutex);
        *((int *) arg) += 1;
    }
}

void * consume(void *arg) {
    int      i;

    for (i = 0; i < nitems; i++) {
        Pthread_mutex_lock(&nready.mutex);
```