SISTEMI OPERATIVI

(MODULO DI INFORMATICA II)

I thread

Prof. Luca Gherardi

Prof.ssa Patrizia Scandurra (anni precedenti)

Università degli Studi di Bergamo

a.a. 2012-13

Sommario

- Generalità: il concetto di thread ed il multi-threading
- Modelli multithread
- Problematiche relative ai thread
- Esempi di librerie di thread
- Thread safeness & condizioni di Bernstein

Concetto di Thread

- Anche chiamati **lightweight process** perché possiedono un contesto più snello rispetto ai processi

- È un **flusso di esecuzione indipendente** all'interno ad un processo
  - Condivide lo spazio di indirizzamento con gli altri thread del processo
  - Rappresentato da un *thread control block* (TCB) che punta al PCB del processo contenitore

- Esempio di applicazione multi-thread: programma di elaborazione dei testi:
  - Thread per l'input da tastiera
  - Thread per la rappresentazione del testo
  - Thread per la correzione ortografica

Motivazioni (1)

- Un processo con un solo thread (**heavyweight process**) può eseguire un'attività alla volta

- **Problema**: supponiamo di implementare un web-server come un processo a singolo thread
  - Potremmo soddisfare uno solo dei numerosi client alla volta
  - Lasciando tutti gli altri bloccati
- **Soluzione A**: implementare il server come un processo che attende le richieste e avvia nuovi processi per processarle
  - Tuttavia creare un nuovo processo è oneroso (tempi e costi in termini di risorse)

Motivazioni (2)

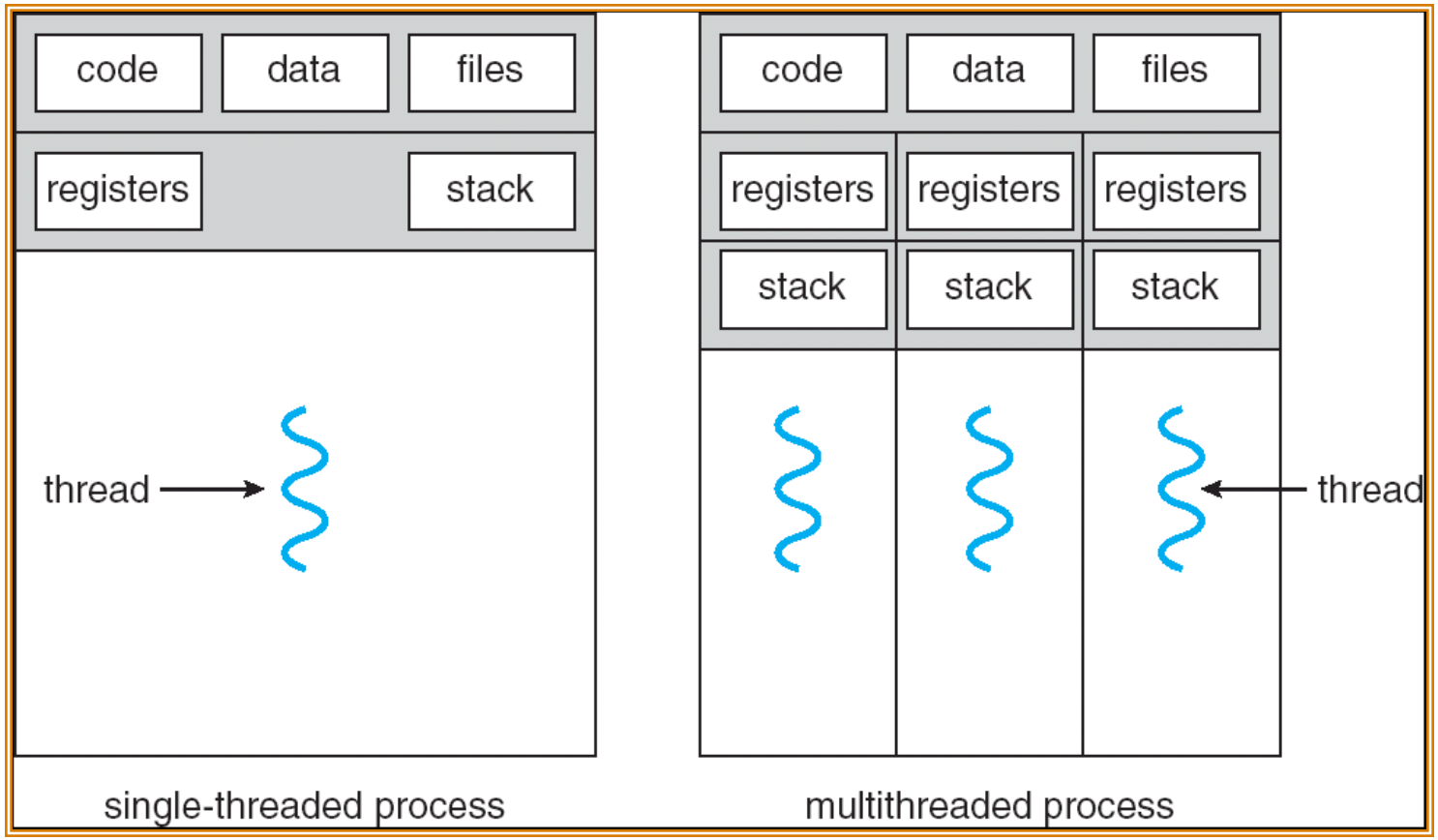
- Se un processo deve eseguire incarichi simili a quelli del primo è più conveniente creare un nuovo thread

- **Soluzione B**: implementare il server come un processo con un thread che attende le richieste e crea nuovi thread che le processano

- Un implementazione simile è utilizzata per il server RPC

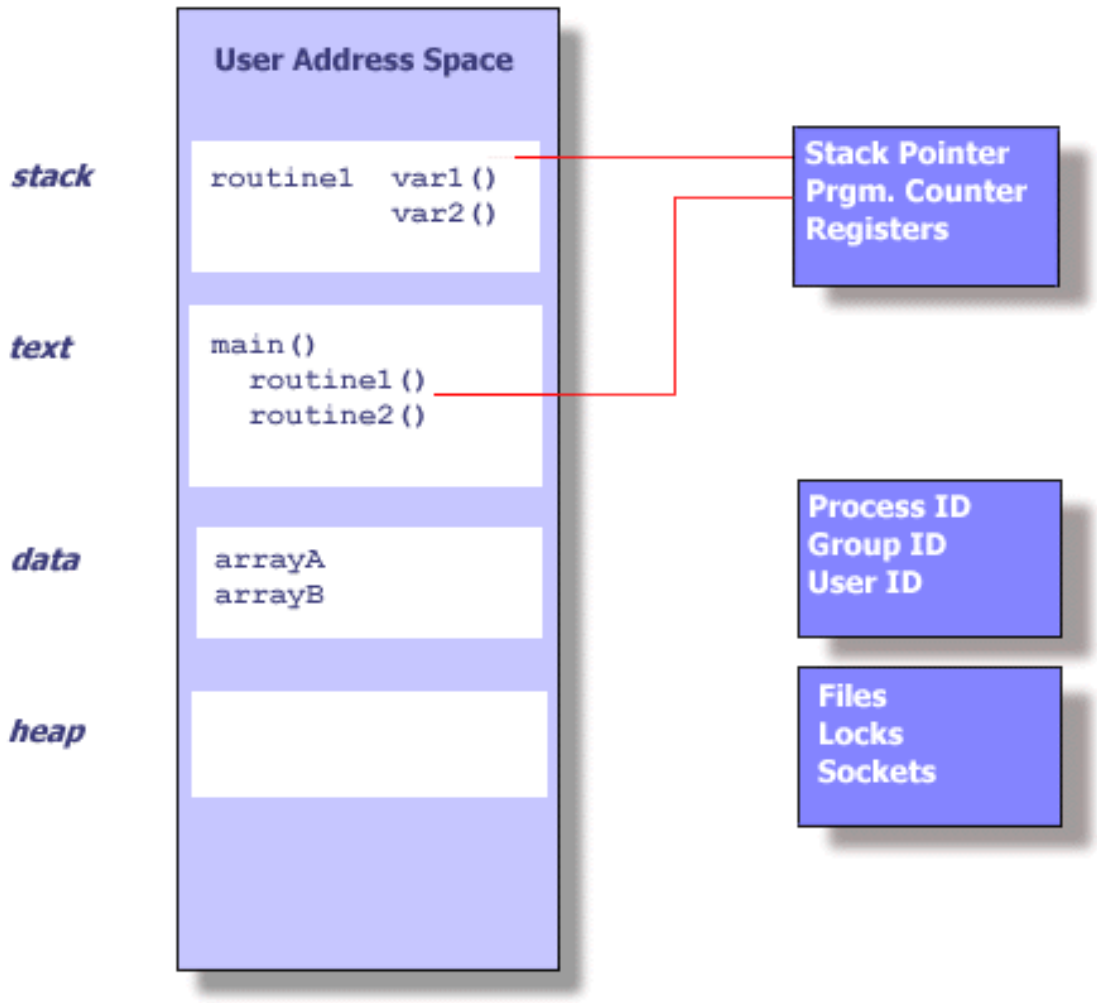
- In Solaris si stima che
  - Creare un nuovo processo costa 30 volte di più che creare un nuovo thread
  - Un context switch di un processo costa 5 volte di più che quello di un thread

Processi a singolo thread e multithread



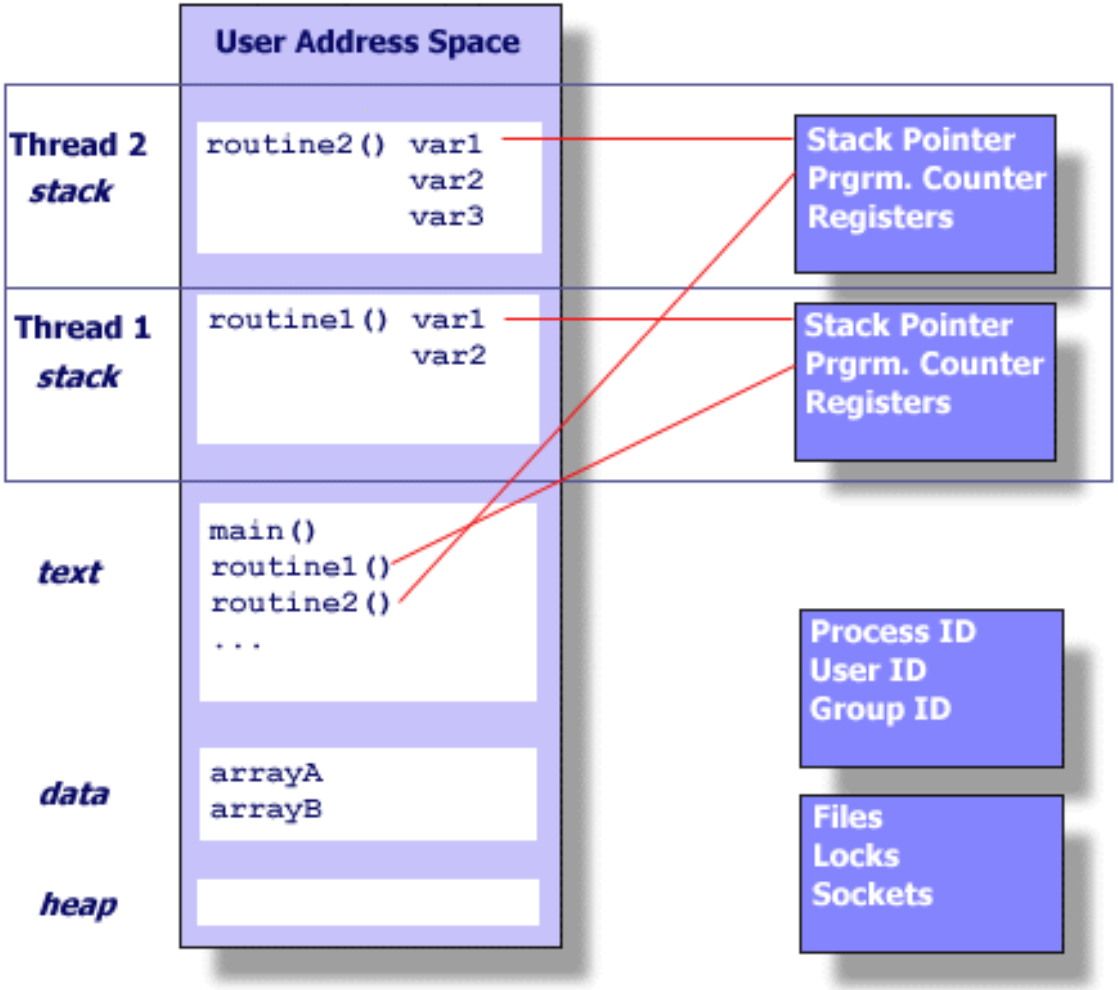
In Unix: Thread e Processi (1)

Un Processo



In Unix: Thread e Processi (2)

Un thread all'interno di un processo



Contesto: Thread vs Processi

- **Contesto di un Thread**
  - stato della computazione (registri, stack, PC…)
  - attributi (schedulazione, priorità)
  - descrittore di thread (tid, priorità, segnali pendenti, …)
  - memoria privata (TSD)

- **Contesto di un processo**; tutto quello che è nel contesto di un thread, ed inoltre:
  - spazio di memoria
  - risorse private (con le corrispondenti tabelle dei descrittori)

Complementarietà Thread / Processi

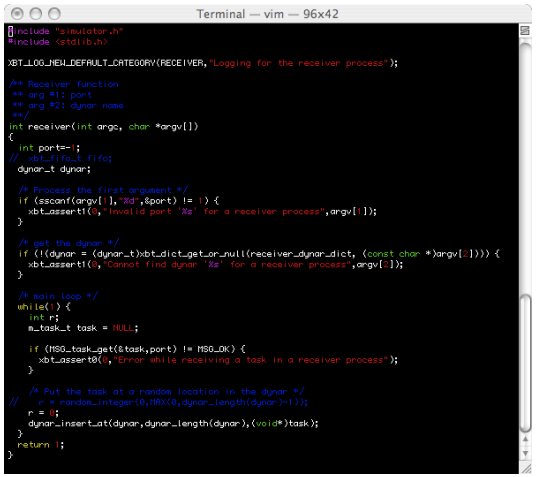
- Processo
  - **Unità di allocazione delle risorse**
- Thread
  - **Flusso di esecuzione indipendente ma esistente nel contesto di un processo**
- Quali utilizzare?
  - Dipende, una scelta da valutare di caso in caso

Concorrenza (multithreading)

- Def.: **Esecuzione di "task" multipli nello "stesso" tempo**
- In un programma **non-concorrente**, o **sequenziale**
  - In ogni momento è possibile interrompere il programma e dire esattamente quale task si stava eseguendo, quale era la sequenza di chiamate, ecc.
  - **Esecuzione deterministica**
- In un programma **concorrente**, si individuano un certo numero di task da eseguire come "flussi indipendenti"
  - Ogni task ha un compito specifico da portare avanti
  - I task possono comunicare tra loro: "flussi cooperanti"
  - **Regioni differenti del codice** eseguite allo stesso tempo
  - Lo stato di un programma ha più di una dimensione
  - **Esecuzione non deterministica**

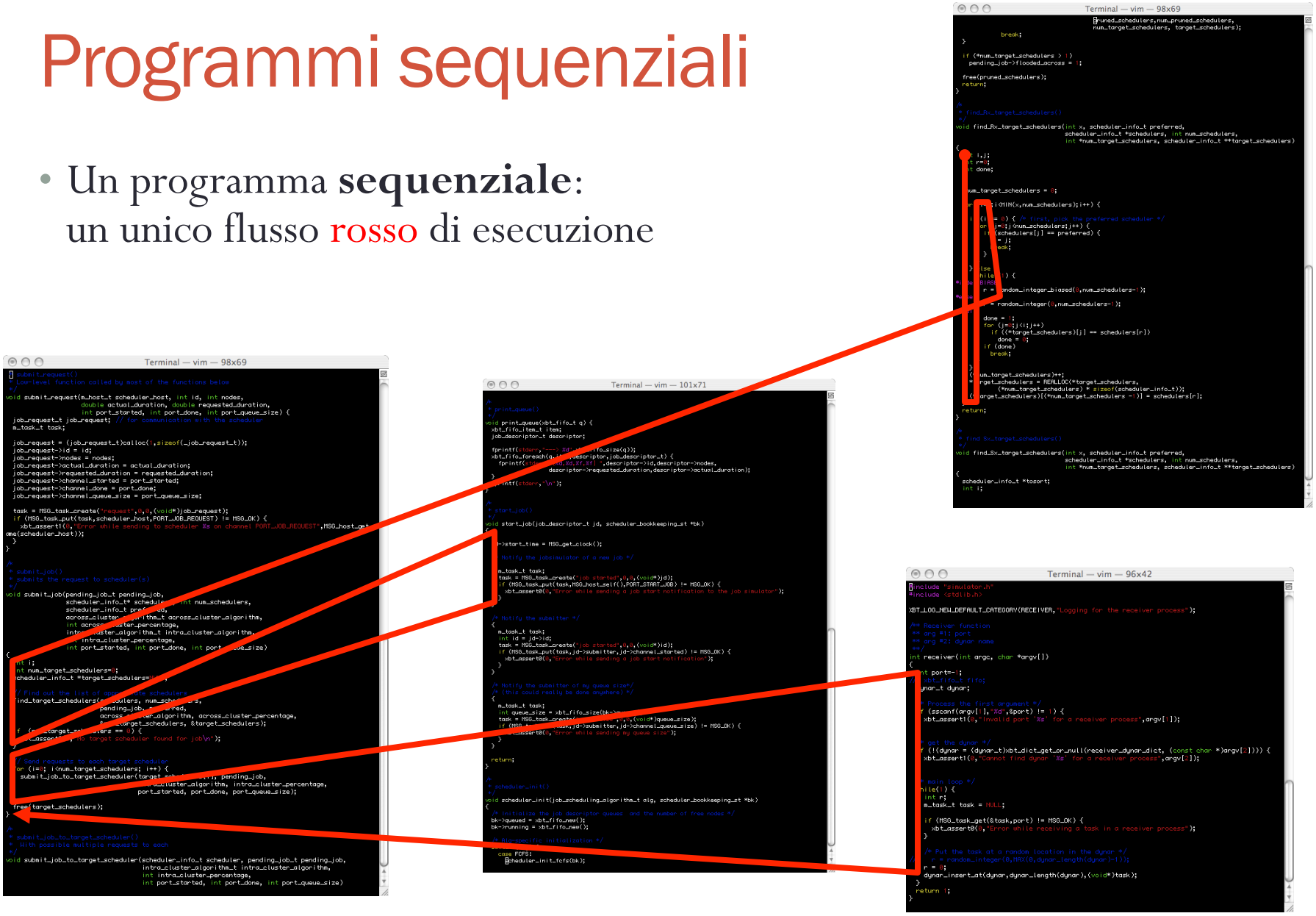
Programmi

- Un programma è costituito da file/moduli/classi/funzioni



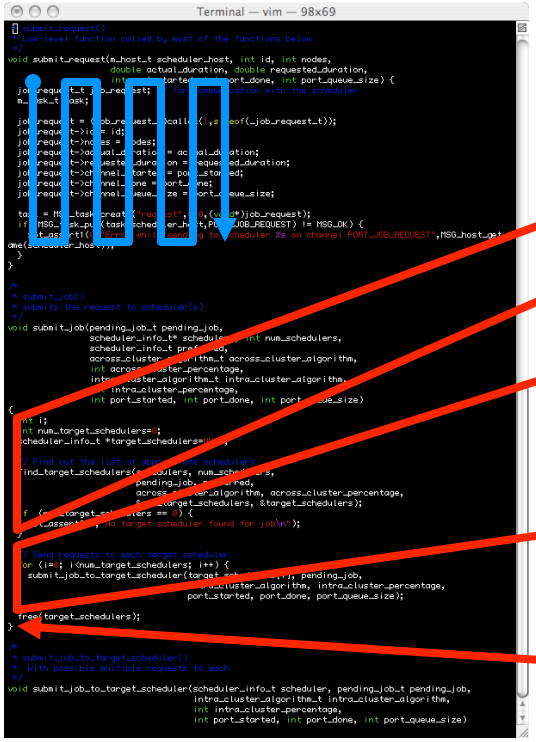
Programmi sequenziali

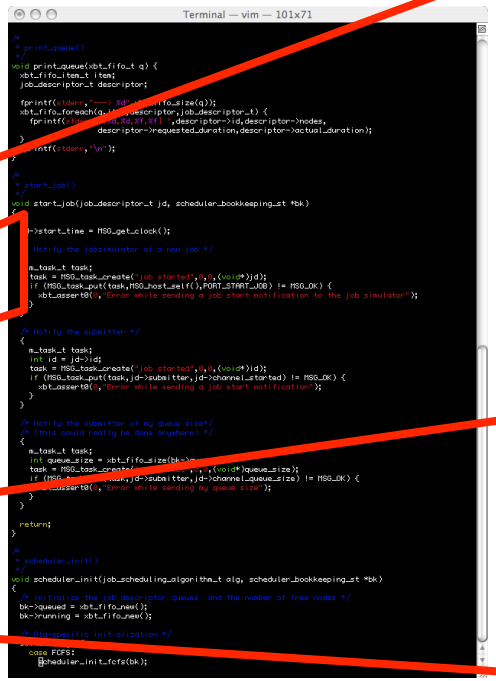
- Un programma **sequenziale**:
  un unico flusso rosso di esecuzione

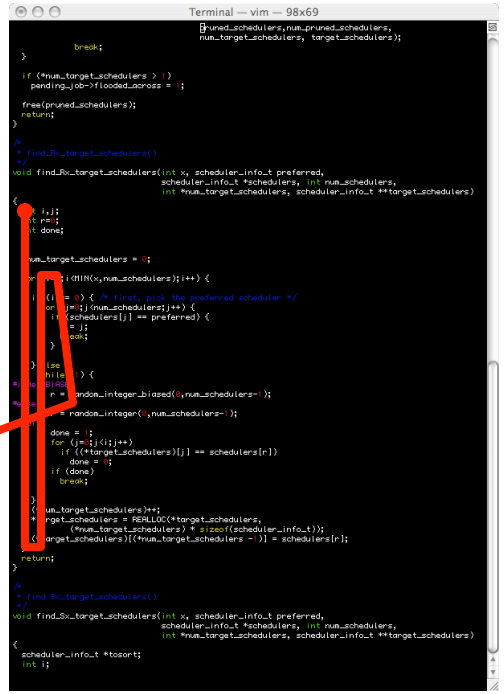


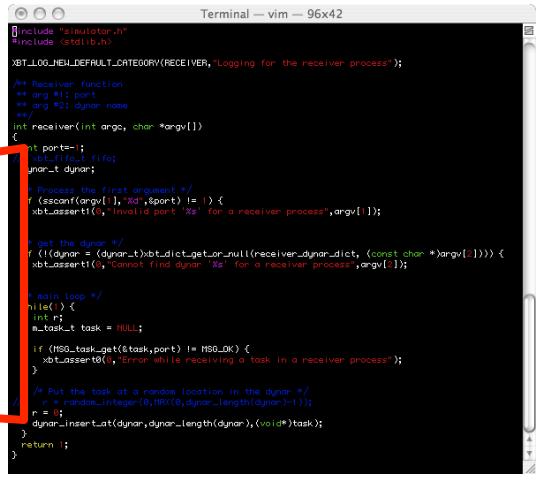
Programmi concorrenti

- Un programma **concorrente**
  - un task blu
  - un task rosso





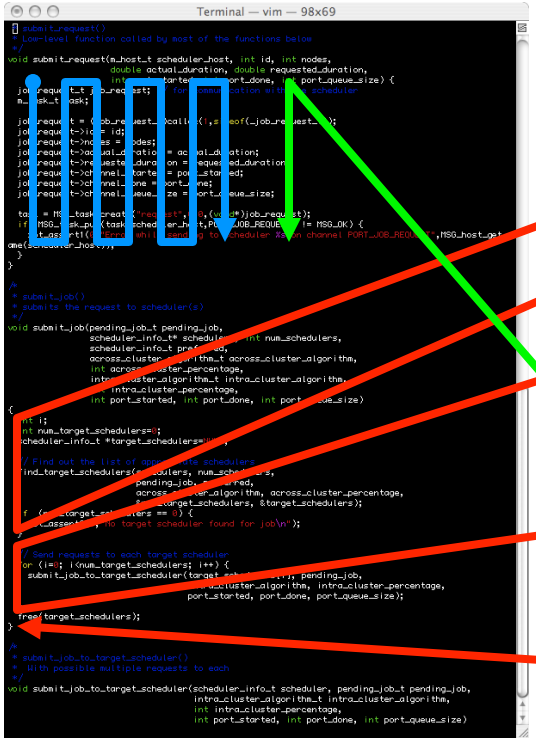


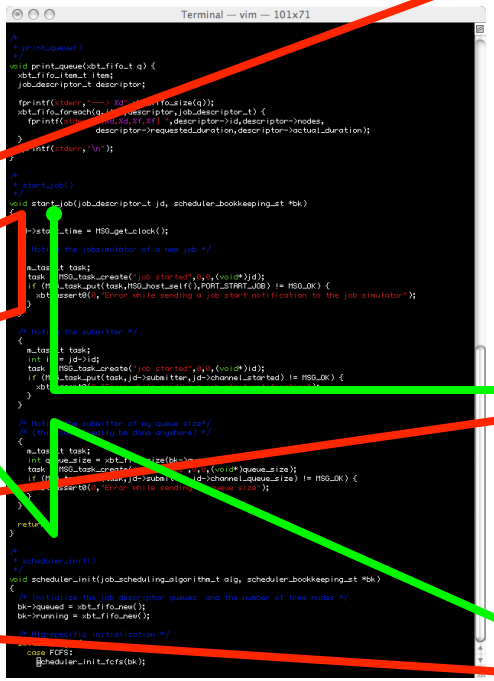


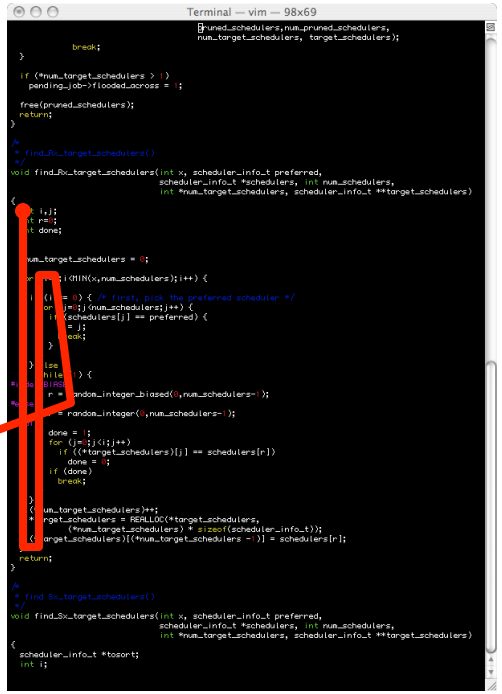
Programmi concorrenti

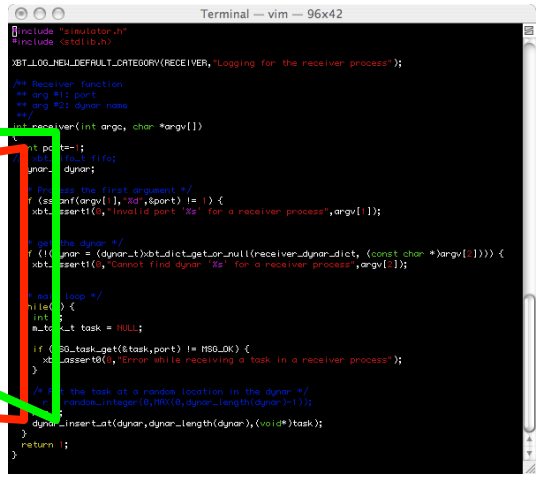
- oppure
  - un task blu
  - un task rosso
  - e un task verde

e così via …









Vantaggi dei Thread

- **Tempo di risposta**
  - Un programma può continuare la computazione anche se un suo thread è bloccato (e.g. attesa I/O)
- **Condivisione delle risorse**
  - I processi condividono informazioni tramite IPC (memoria condivisa o messaggi)
  - I thread condividono per definizione la memoria e le risorse del processo che li genera (i.e. molti thread nello stesso spazio di indirizzi)
- **Economia**
  - Come visto la creazione e il context siwtch di processi sono più onerosi di quelli dei thread
- **Scalabilità**
  - Su architetture multiprocessore i thread possono essere eseguiti in parallelo

Programmazione multicore (1)

- In un sistema con un'unica unità di calcolo l'esecuzione concorrente consiste nell'**interfogliazione** dei thread
- In un sistema multicore invece l'esecuzione concorrente consente ai thread di essere eseguiti in **parallelo**

- La programmazione multicore richiede che i SO e le applicazioni siano progettate con attenzione:
  - I SO devono fornire schedulatori che utilizzano diverse unità di calcolo
  - Le applicazioni devono essere progettate tenendo in considerazione diversi fattori:

Programmazione multicore (2)

Le applicazioni devono essere progettate tenendo in considerazione diversi fattori:

- **Separazione dei task**: individuazione dei task che possono essere eseguiti in parallelo
- **Bilanciamento**: i task devono eseguire compiti che richiedono all'incirca tempo e risorse paragonabili
- **Suddivisione dei dati**: devono essere definiti dei dati specifici per i vari task
- **Dipendenza dei dati**: l'accesso ai dati condivisi deve essere fatto in modo sincronizzato (thread safeness)
- **Test e debugging**: a causa dei diversi flussi di esecuzione test e debugging sono più difficili

Svantaggi dei Thread

- **Difficoltà di ottenere risorse private**
  - per ottenere memoria privata all'interno di un thread esistono appositi meccanismi
- **Pericolo di interferenza**
  - la condivisione delle risorse accentua il pericolo di interferenza
  - gli accessi concorrenti devono essere sincronizzati di modo da evitare interferenze (thread safeness)

Modello di Thread: User vs Kernel

- **User-Level:** thread all'interno del processo utente gestiti da una libreria specifica (da un supporto run-time)
  - sono gestiti senza l'aiuto del kernel
  - lo switch non richiede chiamate al kernel

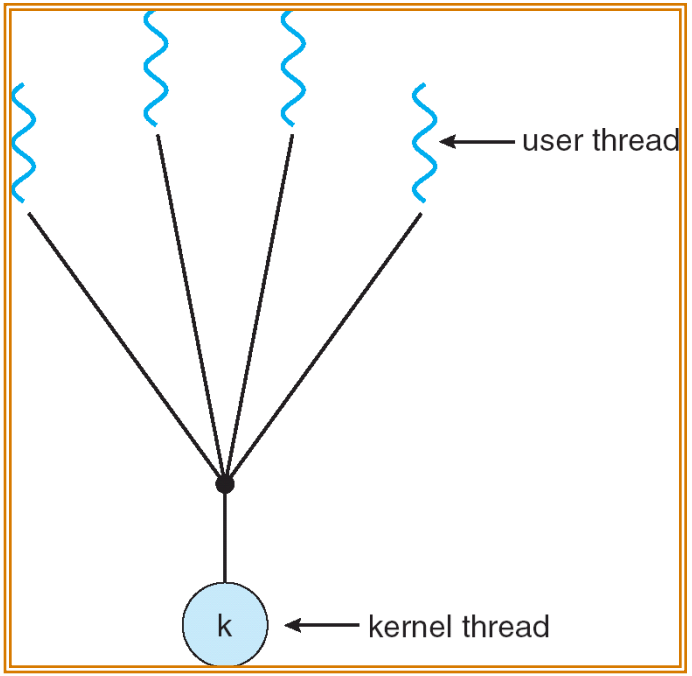
- **Kernel-Level**: gestione dei thread affidata al kernel tramite chiamate di sistema
  - gestione integrata processi e thread dal kernel
  - lo switch è provocato da chiamate al kernel

Modelli multi-thread

- I thread a livello utente vengono messi in relazione con i thread a livello kernel per permettere l'accesso alle risorse
- Esistono diversi tipi di relazione tra thread a livello utente e thread a livello kernel:
  - Uno-a-uno
  - Molti-a-uno
  - Molti-a-molti
  - A due livelli

Il modello molti-a-uno

- Il modello molti-a-uno riunisce molti thread di livello utente in un unico kernel thread



- Gestione dei thread efficiente
- Intero processo bloccato se un thread invoca una chiamata di sistema bloccante
- Un solo thread può accedere al Kernel
  - Impossibile eseguire thread in parallelo

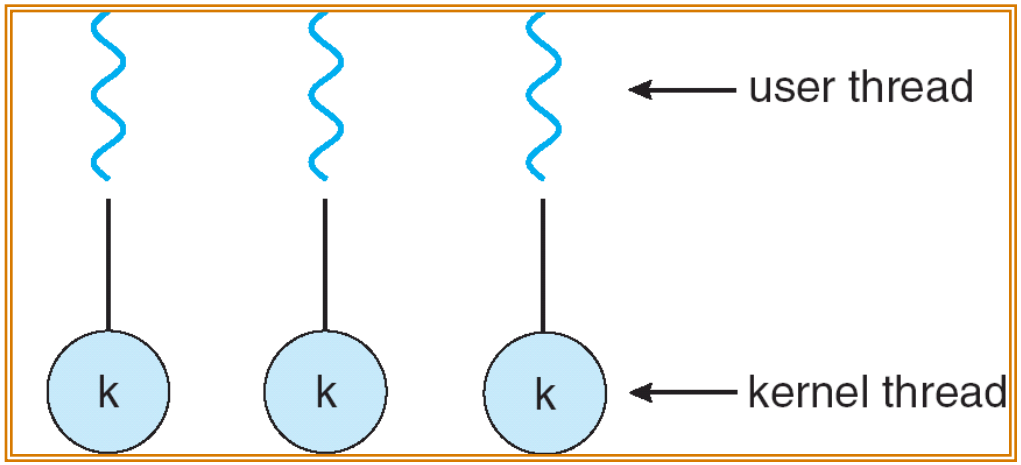
- Esempi:
  - Solaris Green Threads
  - GNU Portable Threads

Il modello uno-a-uno

- Il modello uno-a-uno mappa ciascun thread utente in un kernel thread

- Maggiore concorrenza (possibili thread in parallelo e le chiamate bloccanti non bloccano tutti i thread)
- La creazione di molti thread a livello kernel compromette le prestazioni dell'applicazione
  - Tipicamente le realizzazioni di questo modello limitano il numero di thread a livello kernel

- Esempi:
  - Windows NT/XP/2000, MSDos
  - Linux
  - Solaris 9

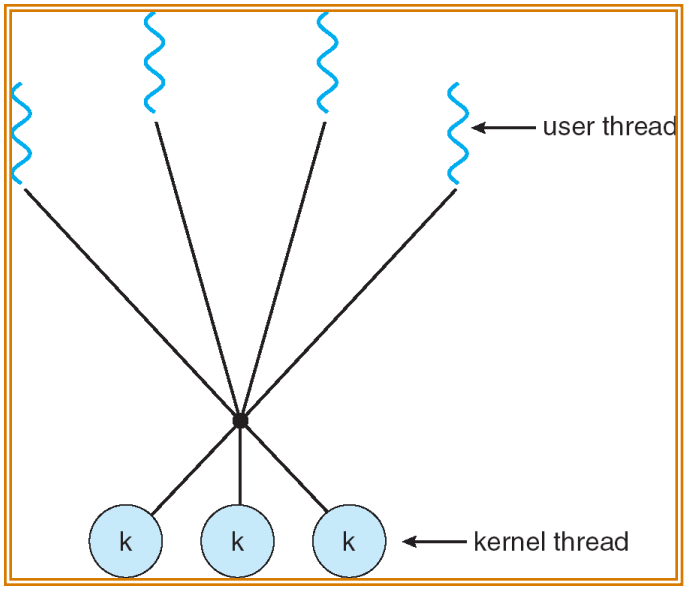


Il modello molti-a-molti

- Permette di aggregare molti thread a livello utente verso un numero più piccolo o equivalente di kernel thread

- Risolve le limitazioni dei modelli precedenti
  - Il numero max di processi a livello Kernel può essere personalizzato in base all'architettura
    - E.g.: n_max maggiore per architettura multicore

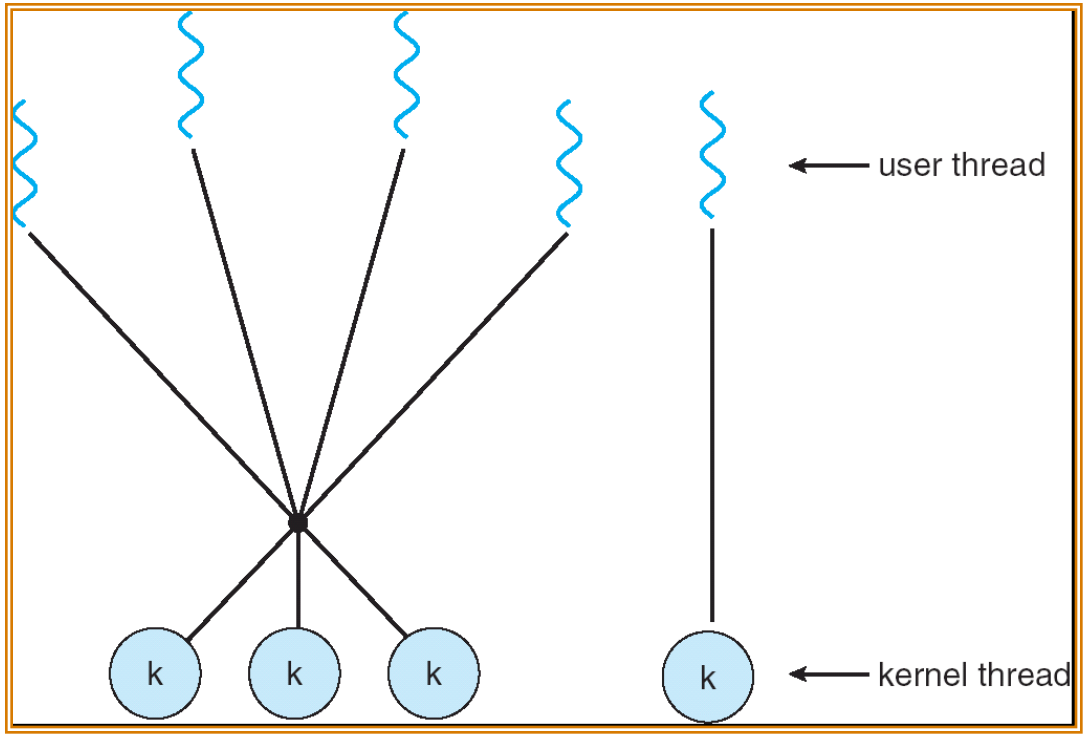
- Esempi:
  - Solaris, versioni precedenti alla 9
  - Windows NT/2000
    con il pacchetto ThreadFiber



Il modello a due livelli

- Simile al modello molti-a-molti, eccetto che permette anche di associare un thread di livello utente ad un kernel thread

- Esempi:
  - IRIX
  - HP-UX
  - Tru64 UNIX
  - Solaris 8 e precedenti



Vantaggi/Svantaggi: User Level

- Lo switch non coinvolge il kernel, e quindi non ci sono cambiamenti della modalità di esecuzione
- Maggiore libertà nella scelta dell'algoritmo di scheduling che può anche essere personalizzato
- Poiché le chiamate possono essere raccolte in una libreria, c'è maggiore portabilità tra SO

- Una chiamata al kernel può **bloccare tutti i thread** di un processo, indipendentemente dal fatto che in realtà solo uno dei suoi thread ha causato la chiamata bloccante
- In sistemi a multiprocessore simmetrico (SMP) **due processori non possono essere associati a due thread del medesimo processo**

Vantaggi/Svantaggi: Kernel Level

- Il kernel può **eseguire più thread** dello stesso processo anche su più processori
- **Il kernel stesso può essere scritto multithread**

- Lo switch coinvolge chiamate al kernel e questo comporta un costo
- L'algoritmo di scheduling è meno facilmente personalizzabile
- Meno portabile

Librerie per i thread

- La gestione dei thread è effettuata attraverso specifiche librerie

- Libreria collocata a livello utente
  - Codice e strutture dati per la libreria risiedono nello spazio utente
  - Invocare una funzione della libreria non significa invocare una chiamata di sistema
- Libreria collocata a livello kernel
  - Codice e strutture dati per la libreria risiedono nello spazio del kernel
  - Invocare una funzione della libreria significa invocare una chiamata di sistema

- Tre principali librerie di thread:
  - POSIX Pthreads (sia a livello utente che a livello kernel)
  - Win32 thread (a livello kernel)
  - Java thread (dipende dal sistema operativo ospitante)

Pthread

- Uno **standard POSIX (IEEE 1003.1c) API** per la creazione e la sincronizzazione dei thread
- **Fornisce una specifica** per il comportamento della libreria dei thread
  - i progettisti di sistemi operativi possono implementare la specifica nel modo che desiderano
- Frequente nei sistemi operativi di UNIX (Solaris, Linux, Mac OS X)

Esempio pthread – Calcolo sommatoria

```
1.  #include <pthread.h>
2.  #include <stdio.h>

3.  int sum; /* this data is shared by the thread(s) */

4.  void *runner(void *param); /* the thread function */

5.  int main(int argc, char *argv[])
6.  {
7.  pthread_t tid; /* the thread identifier */
8.  pthread_attr_t attr; /* set of attributes for the thread */

9.  if (argc != 2) {
10.         fprintf(stderr,"usage: a.out <integer value>\n");
11.         /*exit(1);*/
12.         return -1;
13. }

14. if (atoi(argv[1]) < 0) {
15.         fprintf(stderr,"Argument %d must be non-negative\n",atoi(argv[1]));
16.         /*exit(1);*/
17.         return -1;
18. }

19. /* get the default attributes */
20. pthread_attr_init(&attr);
```

`pthread_t` specifica l'identificatore di un thread

`pthread_attr` specifica gli attributi di un thread (e.g. proprietà per lo scheduling

`pthread_attr_init` inizializza gli attributi di un thread ai valori di default

Esempio pthread – Calcolo sommatoria

```
1.  /* create the thread */
2.  pthread_create(&tid,&attr,runner,argv[1]);

3.  /* now wait for the thread to exit */
4.  pthread_join(tid,NULL);

5.  printf("sum = %d\n",sum);
6.  }

7.  /**
8.   * The thread will begin control in this function
9.   */
10. void *runner(void *param)
11. {
12. int i, upper = atoi(param);
13. sum = 0;

14.         if (upper > 0) {
15.                     for (i = 1; i <= upper; i++)
16.                                 sum += i;
17.         }

18.         pthread_exit(0);
19. }
```

`pthread_create` crea un user thread al qualle associa gli attributi inizializzati e la funzione runner. Alla funzione viene passato l'argomento argv[1]

`pthread_join` metta in pausa il thread principale fino alla terminazione del thread con identificatore `tid`. Se il secondo parametro non è nullo viene usato per restituire il valore di ritorno del thread

`pthread_exit` termina il thread

Problematiche relative ai thread

- Creazione e cancellazione dei thread
- La gestione dei segnali
- Gruppi di thread
- Dati specifici dei thread
- Attivazione dello schedulatore

Creazione di thread: le chiamate di sistema fork() ed exec()

- La chiamata di sistema **fork() duplica solo il thread che la invoca oppure tutti** i thread del processo ospitante?
  - Alcuni sistemi Unix hanno due versioni di fork() per entrambe le semantiche
    - Si sceglie la versione in base all'applicazione
- La chiamata **exec()** da parte di un thread funziona allo stesso modo
  - il programma specificato come parametro **rimpiazzerà l'intero processo**, **inclusi tutti i thread**
- Se la exec() viene chiamata immediatamente dopo la fork() la duplicazione dei processi non è necessaria, in quanto saranno sostituiti
- In caso opposto potrebbe essere conveniente duplicare i processi

Cancellazione dei thread

- È l'atto di terminare un thread prima che abbia completato l'esecuzione
- La cancellazione del thread può avvenire in due differenti scenari:
  - **Cancellazione asincrona**: un thread termina immediatamente il thread target
  - **Cancellazione differita**: il thread target può periodicamente controllare se deve terminare, cosi da terminare in modo opportuno

- La cancellazione asincrona di un thread che sta operando su un file potrebbe portare ad una situazione in cui la risorsa non è libera nonostante il processo sia terminato
- Questo problema può essere evitato con la cancellazione differita

La gestione dei segnali (1)

- Nei sistemi UNIX-like per notificare ad un processo che si è verificato un particolare evento si usa un **segnale**

- Sincroni: sono inviati allo stesso processo che ha causato la generazione del segnale
  - Esempi: divisione per 0, accesso illegale alla memoria

- Asincroni: sono inviati ad un processo differente da quella cha ha causato la generazione del segnale
  - Esempi: intercettazione di una combinazione di tasti (ctrl + c), scadenza di un timer

La gestione dei segnali (2)

- I segnali vengono elaborati secondo questo **schema**:
  1. il verificarsi di un particolare evento genera un segnale
  2. il segnale generato viene consegnato ad un processo
  3. il segnale viene gestito

- I segnali possono essere gestiti attraverso
  - Il gestore predefinito dello specifico segnale (esiste per ogni segnale)
  - Un funzione di gestione definita dall'utente (override del gestore predefinito)

La gestione dei segnali (3)

- Per i processi a singolo thread la gestione dei segnali è semplice

- Per i processi multithread è necessario decidere a quale thread inviare il processo
- Diverse opzioni:
  - Consegnare il segnale al thread a cui il segnale viene applicato
  - Consegnare il segnale ad ogni thread del processo
  - Consegnare il segnale al alcuni thread del processo
  - Designare un thread specifico che riceva tutti i segnali per il processo

- Per i segnali asincroni si usa sempre la prima opzione
- Per la seconda e terza opzione invece è possibile istruire i processi su quali segnali accettare e quali ignorare

Gruppi di thread

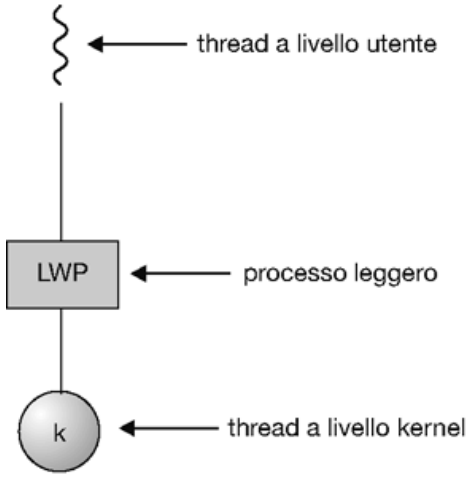
- Analizziamo l'esempio del web-server che crea un thread per ogni richiesta. Presenta diversi **problemi**:
  - Esso non pone un limite massimo al numero di thread creabili
  - Creare un nuovo thread ogni volta è meno costoso che creare un processo ma ha comunque un costo
- **Soluzione**: creare un gruppo di thread (pool) all'avvio del processo e assegnarli un lavoro quando richiesto
  - Al completamento del lavoro il thread torna nel gruppo d'attesa
- Vantaggi:
  - Servire la richiesta all'interno di un thread esistente è tipicamente più veloce che attendere la creazione di un thread
  - Un pool di thread limita il numero di thread esistenti in contemporanea
  - Il numero massimo può essere adattato a runtime in architetture raffinate

Dati specifici dei thread

- Permette ad ogni thread di avere la **propria copia di dati**
- Utile quando non si ha il controllo sul processo di creazione dei thread
  - ad esempio quando si utilizza un gruppo di thread

Attivazione dello schedulatore

- Le applicazioni multi-thread con modello molti-a-molti o a due livelli richiedono una **comunicazione con il kernel**
  - per mantenere l'appropriato numero di kernel thread allocati (prestazioni)
  - per far sì che il kernel informi l'applicazione di certi eventi (segnali), come il blocco di un thread dell'applicazione (ad es. per un evento di I/O)
- In molti di questi sistemi esiste una struttura dati posta tra i thread kernel e i thread utente: **lightweight process (LWP)**
- Il LWP è visto dalla libreria dei thread utente come un processore virtuale su cui schedulare i thread utente
- Il blocco di un thread kernel (e.g. I/O) causa il blocco del LWP
  - Di conseguenza si bloccano i thread utente schedulati sul LWP
- È quindi necessario un LWP per ogni chiamata di sistema concorrente bloccante (e.g. se un'applicazione ha bisogno di fare 5 letture da file servono 5 LWP)



Attivazione dello schedulatore

- I thread kernel possono comunicare eventi alla libreria dei thread tramite le **upcall** (**chiamate al thread**)

- Le upcall sono gestite a livello utente con **un gestore di upcall** in esecuzione "just in time" (cioè quando avviene una comunicazione dal kernel all'applicazione) su di un LWP

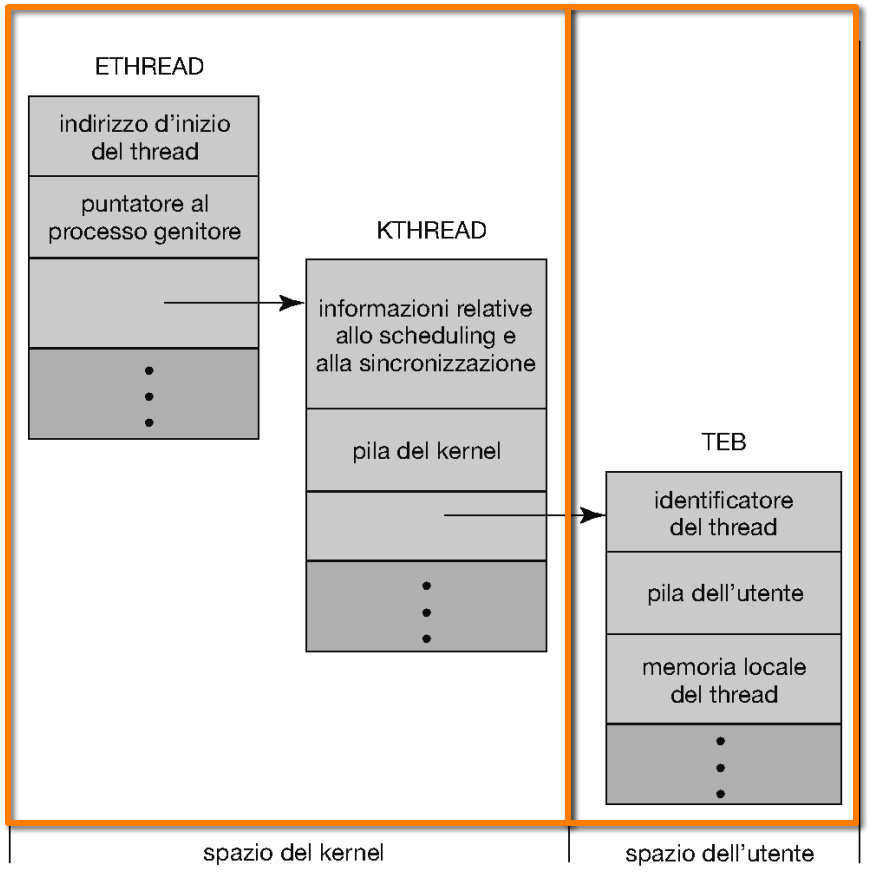
I thread di Windows XP (1)

- Implementa la **mappatura uno-a-uno**
- Ogni thread contiene:
  - Un idetificatore del thread
  - Un set di registri che rappresentano lo stato del processore
  - User stack e kernel stack separati
  - Un'area di memoria privata
- Il set di registri, gli stack e l'area di deposito sono noti come il **contesto del thread**

I thread di Windows XP (2)

Strutture dati primarie di un thread:

- ETHREAD – blocco di esecuzione del thread
  - Puntatore al processo padre e indirizzo della funzione eseguita dal thread
- KTHREAD – blocco di kernel del thread
  - Informazioni relative allo scheduling e sincronizzazione
  - Pila del kernel
- TEB – blocco di ambiente del thread
  - Pila dell'utente
  - ID del thread
  - Vettore per dati specifici del thread non condivisi (memoria locale)

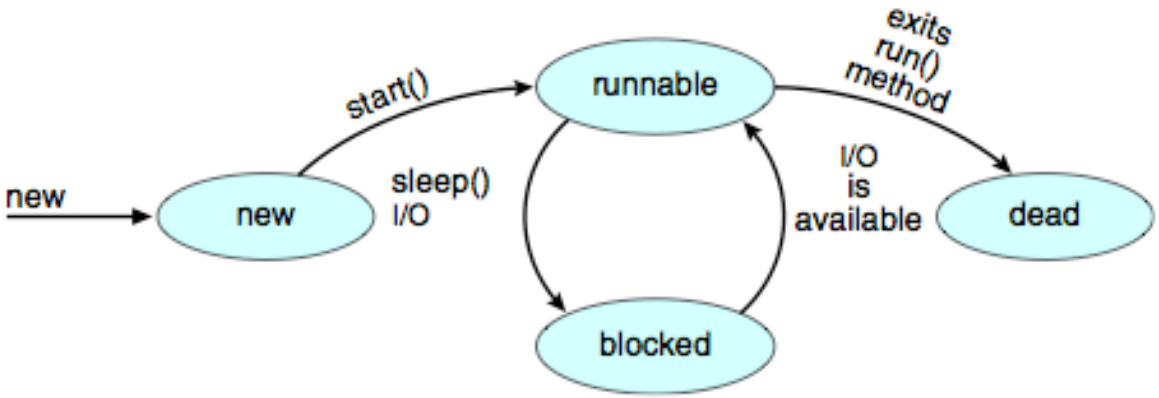


Accessibili solo dal kernel

Accessibile in modalità utente

I thread di Java

- I thread di Java sono **gestiti dalla JVM**
- I thread di Java possono essere creati tramite:
  - L'estensione della classe Thread
  - L'interfaccia Runnable
- Una volta creati:



Li tratteremo nei dettagli durante le ore di esercitazione in laboratorio!

I thread di Linux

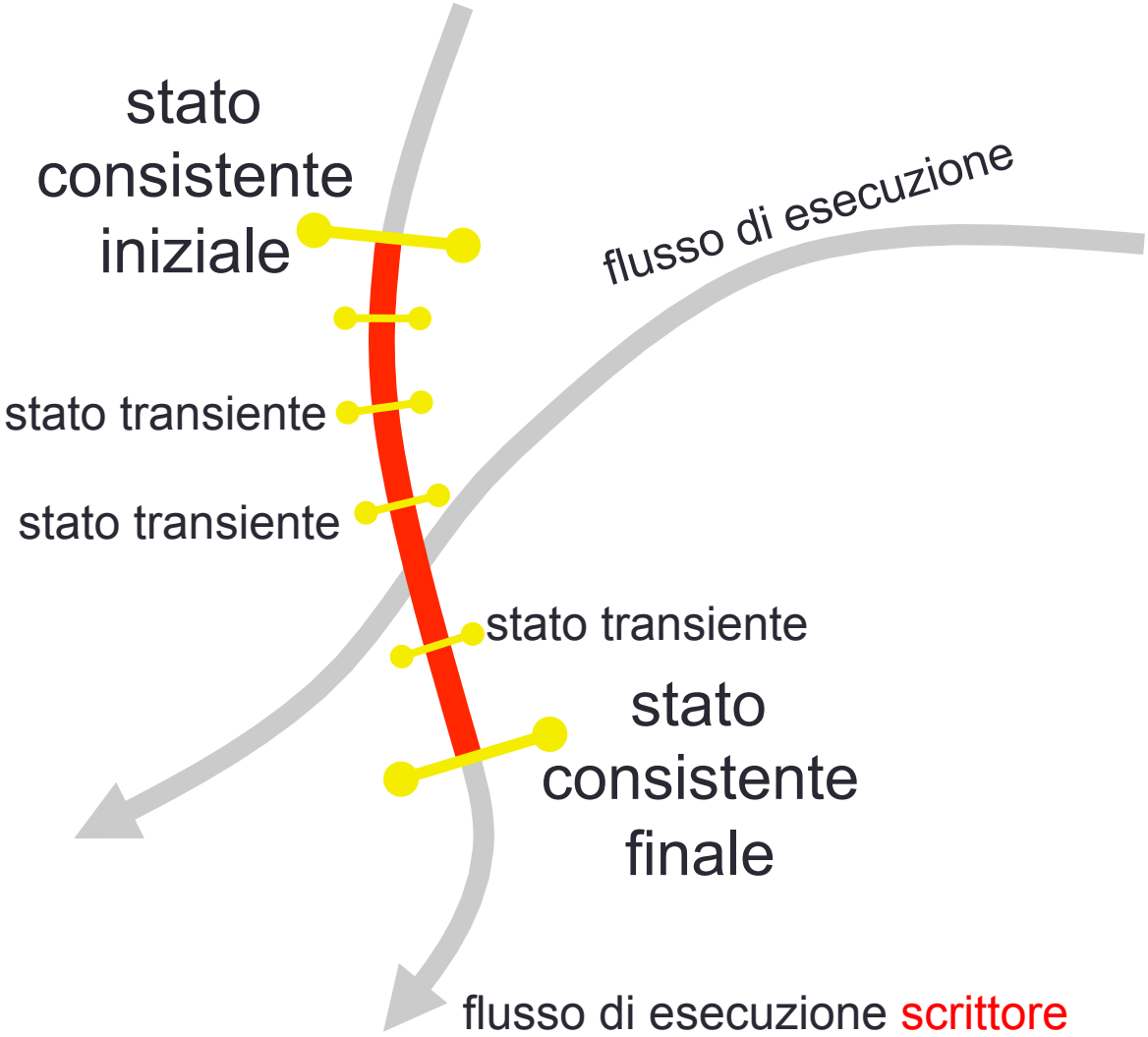
- Linux li definisce come *task piuttosto che thread*
- La creazione di un thread avviene attraverso la chiamata di sistema **clone()**
  - che **permette di stabilire il "grado di condivisione"** tramite flag parametri
  - se nessun flag è impostato, non c'è alcuna condivisione e **l'effetto di clone() è simile a quello della fork()**

Flag	Significato
CLONE_FS	Condivisione delle informazioni sul file system
CLONE_VM	Condivisione dello stesso spazio di memoria
CLONE_SIGHAND	Condivisione dei gestori dei segnali
CLONE_FILES	Condivisione dei file aperti

Stati transienti ed interferenze

- Le strutture dati accedute da un programma multithread sono oggetto di aggiornamenti
- Gli **aggiornamenti non avvengono atomicamente**, ma sono decomponibili in varie operazioni di modifica intermedie e di una certa durata
- Durante il transitorio la struttura dati "perde significato" (inconsistente) e passa per una serie di ***stati transienti***
- Un tale stato **non dovrebbe essere visibile** a thread diversi da quello che esegue l'aggiornamento, altrimenti si generano **interferenze**

Origine dei fenomeni di interferenza



Esempio di Interferenza (1)

- La disponibilità di un volo di una compagnia aerea è memorizzata in una variabile **POSTI**. Due signori nel medesimo istante ma da due postazioni distinte, chiedono rispettivamente di prenotare l'ultimo posto e di disdire la prenotazione già effettuata
- Le due richieste vengono tradotte in queste sequenze di istruzioni elementari indivisibili:

procedure Prenota
begin
  $R_a \leftarrow$ POSTI - 1;
  POSTI $\leftarrow R_a$;
end

procedure Disdici
begin
  $R_b \leftarrow$ POSTI + 1;
  POSTI $\leftarrow R_b$;
end

Esempio di Interferenza (2)

- Inizialmente POSTI=1
- L'esecuzione concorrente da luogo ad una qualsiasi delle possibili sequenze di interleaving
- Consideriamo un campione di tre sequenze:

$R_a \leftarrow$ POSTI - 1;	$R_a \leftarrow$ POSTI - 1;	$R_b \leftarrow$ POSTI + 1;
$R_b \leftarrow$ POSTI + 1;	POSTI $\leftarrow R_a$;	$R_a \leftarrow$ POSTI - 1;
POSTI $\leftarrow R_b$;	$R_b \leftarrow$ POSTI + 1;	POSTI $\leftarrow R_a$;
POSTI $\leftarrow R_a$;	POSTI $\leftarrow R_b$;	POSTI $\leftarrow R_b$;
(POSTI=0)	(POSTI=1)	(POSTI=2)
ERRORE	OK	ERRORE

Thread Safeness

- Def. **Programma thread-safe**: Un programma si dice **thread safe** se garantisce che **nessun thread possa accedere a dati in uno stato inconsistente**

- Un **programma thread safe** protegge l'accesso alle strutture in stato inconsistente da parte di altri thread per evitare **interferenze**
  - Costringendoli in attesa (passiva) del suo ritorno in uno stato consistente

- Il termine *thread safeness* si applica anche a librerie ed a strutture dati ad indicare la loro predisposizione ad essere inseriti in programmi multithread

Dominio e Rango

- Indichiamo con A, B, … X, Y, … un'area di memoria
- **Una istruzione *i***
  - dipende da una o più aree di memoria che denotiamo domain(*i*), ovvero dominio di *i*
  - altera il contenuto di una o più aree di memoria che denotiamo range(*i*) di *i*, ovvero rango di *i*

- Ad es. per la procedura **P**

procedure P
begin
$X \leftarrow A + X;$
$Y \leftarrow A * B;$
end

domain(**P**) = {A, B, X}

range(**P**) = {X, Y}

Condizioni di Bernstein

- Quando è lecito eseguire **concorrentemente** due istruzioni i_a e i_b ?

- Se valgono le seguenti condizioni, dette **Condizioni di Bernstein**:

1. $\text{range}(i_a) \cap \text{range}(i_b) = \emptyset$
2. $\text{range}(i_a) \cap \text{domain}(i_b) = \emptyset$
3. $\text{domain}(i_a) \cap \text{range}(i_b) = \emptyset$

Condizioni di Bernstein (2)

- Si osservi che non si impone alcuna condizione su

$$\text{domain}(i_a) \cap \text{domain}(i_b)$$

- Sono banalmente estendibili al caso di tre o più istruzioni

- Esempi di violazione per le due istruzioni:
  - *X ←Y + 1;* *X ←Y – 1;* *(violano la 1.)*
  - *X ←Y + 1;* *Y ← X - 1 ;* *(violano la 2. e la 3.)*
  - *scrivi X;* *X ← X +Y;* *(violano la 1. e la 3.)*

Effetti delle violazioni

- Quando un insieme di istruzioni soddisfa le condizioni di Bernstein, il loro esito complessivo sarà sempre lo stesso
  - **indipendentemente dall'ordine** e dalle velocità relative con cui vengono eseguite
  - ovvero, sarà sempre equivalente ad una loro esecuzione seriale

- Al contrario, **in caso di violazione, gli errori dipendono dall'ordine e dalle velocità relative** generando il fenomeno dell'**interferenze**

Il Programmatore e gli errori dipendenti dal tempo

- Un programma che implicitamente od esplicitamente basa la propria correttezza su ipotesi circa la velocità relativa dei vari processori, è **scorretto**
- Esiste una sola assunzione che possono fare i programmatori sulla velocità dei processori virtuali…

Assunzione di Progresso Finito

Tutti i processori virtuali hanno una velocità finita non nulla

- Questa assunzione è **l'unica** che si può fare sui processori virtuali e sulle loro velocità relative

Thread Safeness e Condizioni di Bernstein

- Dato un programma multithread,
- quali strutture dati **bisogna proteggere** per garantire la **thread safeness?**
- Tutte le strutture dati oggetto di accessi concorrenti che violano le **condizioni di Bernstein**
- In altre parole,

le strutture dati oggetto di scritture concorrenti da parte di due o più thread