Sistemi di I/O

Ivan Scagnetto

Università di Udine — Facoltà di Scienze MM.FF.NN.

A.A. 2012-2013

Copyright ©2000–04 Marino Miculan (miculan@dimi.uniud.it)

La copia letterale e la distribuzione di questa presentazione nella sua integrità sono permesse con qualsiasi mezzo, a condizione che questa nota sia riprodotta.

Sistemi di I/O

- Incredibile varietà di dispositivi di I/O.
- Grossolanamente, tre categorie:

  human readable: orientate all'interazione con l'utente. Es.: terminale, mouse;

  machine readable: adatte alla comunicazione con la macchina. Es.: disco, nastro;

  comunicazione: adatte alla comunicazione tra calcolatori. Es.: modem, schede di rete.

Livelli di astrazione

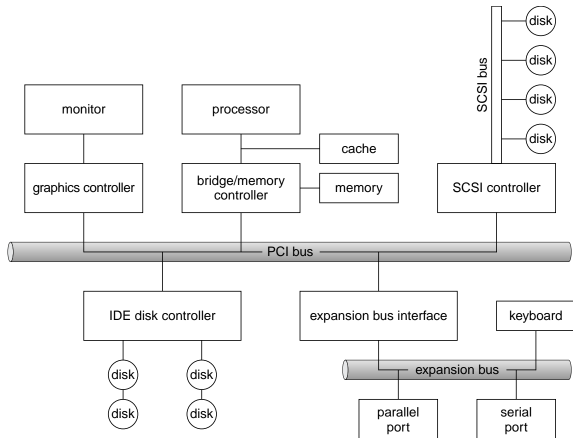
- Per un ingegnere, un dispositivo è un insieme di circuiteria elettronica, meccanica, temporizzazioni, controlli, campi magnetici, onde, ...
- Il programmatore ha una visione funzionale: vuole sapere cosa fa un dispositivo e come farglielo fare, ma non gli interessa sapere come lo fa.
- Vero in parte anche per il sistema operativo: spesso i dettagli di più basso livello vengono nascosti dal controller.
- (Anche se ultimamente si vedono sempre più dispositivi a controllo software...)
- Tuttavia nella progettazione del software di I/O è necessario tenere presente dei principi generali di I/O.

Dispositivi a blocchi e a carattere

Suddivisione logica nel modo di accesso:

- Dispositivi a blocchi: permettono l'accesso diretto ad un insieme finito di blocchi di dimensione costante. Il trasferimento è strutturato a blocchi. Esempio: dischi.
- Dispositivi a carattere: generano o accettano uno stream di dati, non strutturati. Non permettono indirizzamento. Esempio: tastiera.
- Ci sono dispositivi che esulano da queste categorie (es.: timer), o che sono difficili da classificare (es.: nastri).

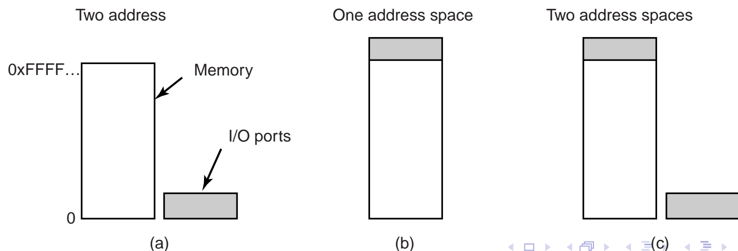
Concetti comuni: porta, bus (daisychain o accesso diretto condiviso), controller.



Comunicazione CPU-I/O (cont)

Due modi per comunicare con il (controller del) dispositivo

- insieme di istruzioni di I/O dedicate: facili da controllare, ma impossibili da usare a livello utente (si deve passare sempre per il kernel).
- I/O mappato in memoria: una parte dello spazio indirizzi è collegato ai registri del controller. Più efficiente e flessibile. Il controllo è delegato alle tecniche di gestione della memoria (se esiste), es.: paginazione.
- I/O separato in memoria: un segmento a parte distinto dallo spazio indirizzi è collegato ai registri del controller.



Modi di I/O

	Senza interrupt	**Con interrupt**
trasferimento attraverso il processore	Programmed I/O	Interrupt-driven I/O
trasferimento diretto I/O-memoria		DMA, DVMA

Programmed I/O (I/O a interrogazione ciclica): il processore manda un comando di I/O e poi attende che l'operazione sia terminata, testando lo stato del dispositivo con un loop busy-wait (polling).
Efficiente solo se la velocità del dispositivo è paragonabile con quella della CPU.

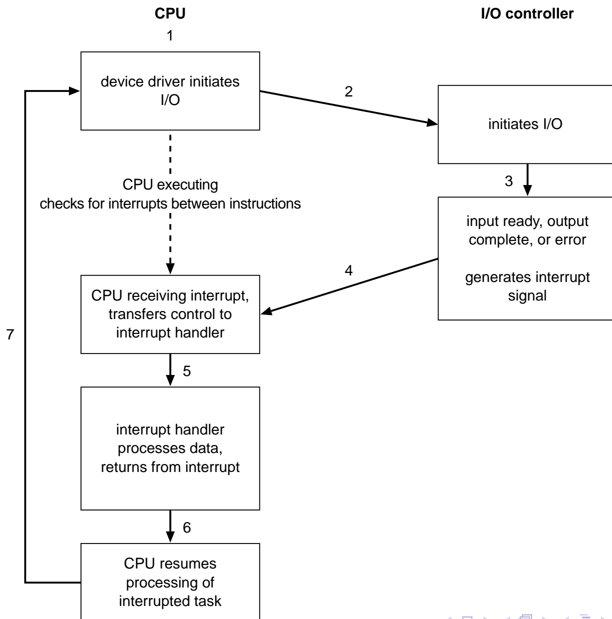
I/O a interrupt

Il processore manda un comando di I/O; il processo viene sospeso. Quando l'I/O è terminato, un interrupt segnala che i dati sono pronti e il processo può essere ripreso. Nel frattempo, la CPU può mandare in esecuzione altri processi o altri thread dello stesso processo.

Vettore di interrupt: tabella che associa ad ogni interrupt l'indirizzo di una corrispondente routine di gestione.

Gli interrupt vengono usati anche per indicare eccezioni (e.g., divisione per zero).

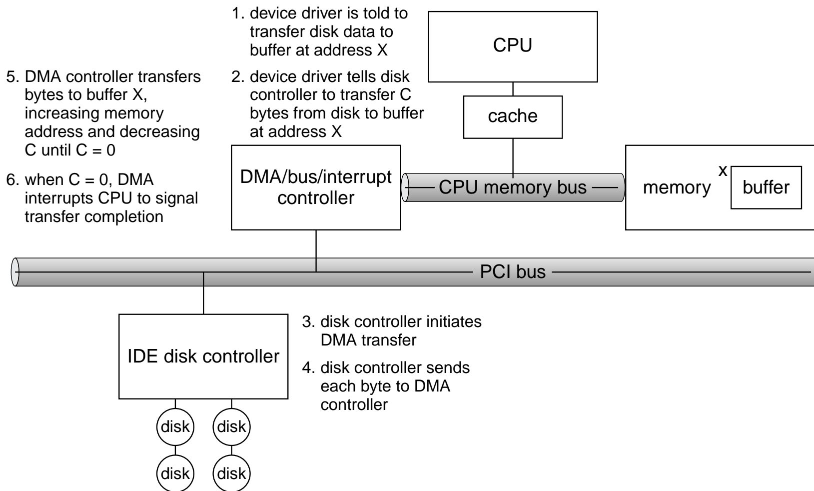
I/O a interrupt

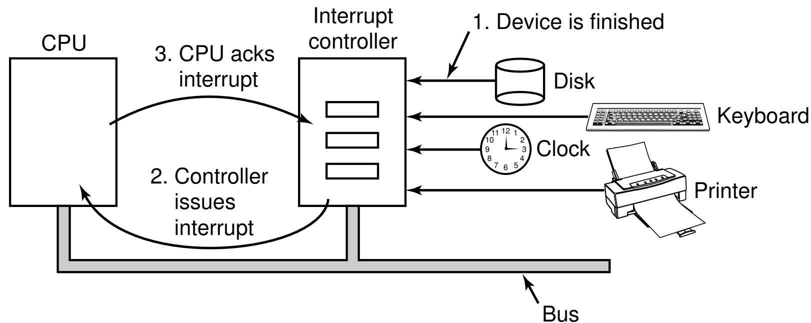


Direct Memory Access

- Richiede un controller DMA.
- Il trasferimento avviene direttamente tra il dispositivo di I/O e la memoria fisica, bypassando la CPU.
- Il canale di DMA contende alla CPU l'accesso al bus di memoria: sottrazione di cicli (cycle stealing).
- Variante: Direct Virtual Memory Access: l'accesso diretto avviene nello spazio indirizzi virtuale del processo e non in quello fisico. Esempio simile: AGP (mappatura attraverso la GART, Graphic Address Relocation Table).

Direct Memory Access



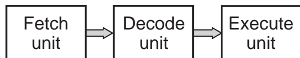

CPU
3. CPU acks interrupt
Interrupt controller
1. Device is finished
Disk
Keyboard
Clock
Printer
2. Controller issues interrupt
Bus

Gestione degli interrupt

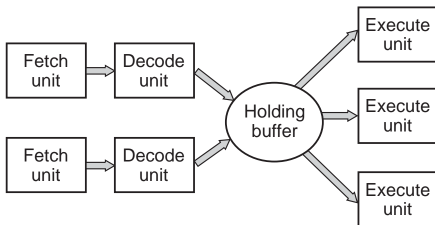
- Quando arriva un interrupt, bisogna salvare lo stato della CPU:
  - su una copia dei registri: in questo caso gli interrupt non possono essere annidati, neanche per quelli a priorità maggiore;
  - su uno stack:
    - quello in spazio utente porta problemi di sicurezza e page fault,
    - quello del kernel può portare overhead per la MMU e la cache.

Gestione degli interrupt e CPU avanzate

- Le CPU con pipeline hanno grossi problemi: il PC non identifica nettamente il punto in cui riprendere l'esecuzione — anzi, punta alla prossima istruzione da mettere nella pipeline.
- Ancora peggio per le CPU superscalari: le istruzioni possono essere già state eseguite, ma fuori ordine! cosa significa il PC allora?



(a)



(b)

Interruzioni precise

- Una interruzione è precisa se:
  - il PC è salvato in un posto noto,
  - TUTTE le istruzioni precedenti a quella puntata dal PC sono state eseguite COMPLETAMENTE,
  - NESSUNA istruzione successiva a quella puntata dal PC è stata eseguita,
  - lo stato dell'esecuzione dell'istruzione puntata dal PC è noto.
- Se una macchina ha interruzioni imprecise:
  - è difficile riprendere esattamente l'esecuzione in hardware,
  - la CPU riversa tutto lo stato interno sullo stack e lascia che sia il SO a capire cosa deve essere fatto ancora,
  - rallenta la ricezione dell'interrupt e il ripristino dell'esecuzione $\Rightarrow$ grandi latenze...

Interruzioni precise

- Avere interruzioni precise è complesso:
  - la CPU deve tenere traccia dello stato interno: hardware complesso, meno spazio per cache e registri,
  - "svuotare" le pipeline prima di servire l'interrupt: aumenta la latenza, entrano bolle (meglio avere pipeline corte).
- Pentium Pro e successivi, PowerPC, AMD K6-II, UltraSPARC, Alpha hanno interrupt precisi, mentre IBM 360 ha interrupt imprecisi.

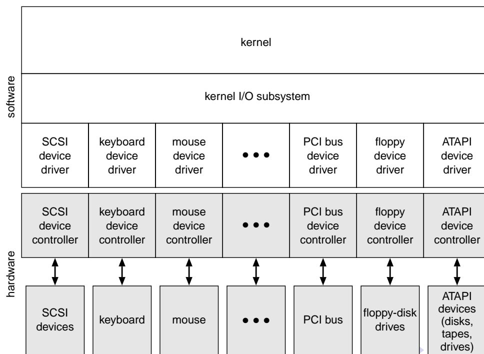
Evoluzione dell'I/O

1. Il processore controlla direttamente l'hardware del dispositivo.
2. Si aggiunge un controller, che viene guidato dal processore con PIO.
3. Il controller viene dotato di linee di interrupt; I/O interrupt driven.
4. Il controller viene dotato di DMA.
5. Il controller diventa un processore a sé stante, con un set dedicato di istruzioni. Il processore inizializza il PC del processore di I/O ad un indirizzo in memoria, e avvia la computazione. Il processore può così programmare le operazioni di I/O. Es: schede grafiche.
6. Il controller ha una CPU e una propria memoria — è un calcolatore completo. Es: terminal controller, scheda grafica accelerata, ...

Tipicamente in un sistema di calcolo sono presenti più tipi di I/O.

Interfaccia di I/O per le applicazioni

- È necessario avere un trattamento uniforme dei dispositivi di I/O.
- Le chiamate di sistema di I/O incapsulano il comportamento dei dispositivi in alcuni tipi generali.
- Le effettive differenze tra i dispositivi sono contenute nei driver, moduli del kernel dedicati a controllare ogni diverso dispositivo.



Interfaccia di I/O per le applicazioni

- Le chiamate di sistema raggruppano tutti i dispositivi in poche classi generali, uniformando i modi di accesso. Solitamente sono:
  - I/O a blocchi,
  - I/O a carattere,
  - accesso mappato in memoria,
  - socket di rete.
- Spesso è disponibile una syscall "scappatoia", dove si fa rientrare tutto ciò che non entra nei casi precedenti (es.: ioctl di UNIX).
- Esempio: i timer e orologi hardware esulano dalle categorie precedenti.
  - Fornire tempo corrente, tempo trascorso.
  - Un timer programmabile si usa per temporizzazioni, timeout, interrupt.
  - in UNIX, queste particolarità vengono gestite con la ioctl.

Dispositivi a blocchi e a carattere

- I dispositivi a blocchi comprendono i dischi.
  - Comandi tipo read, write, seek.
  - I/O attraverso il file system e cache, oppure direttamente al dispositivo (crudo) per applicazioni particolari.
  - I file possono essere mappati in memoria: si fa coincidere una parte dello spazio indirizzi virtuale di un processo con il contenuto di un file.
- I dispositivi a carattere comprendono la maggior parte dei dispositivi. Sono i dispositivi che generano o accettano uno stream di dati. Es: tastiera, mouse (per l'utente), porte seriali, schede audio. . .
  - Comandi tipo get, put di singoli caratteri o parole. Non è possibile la seek.
  - Spesso si stratificano delle librerie per filtrare l'accesso agli stream.

Dispositivi di rete

- Sono abbastanza diverse sia da device a carattere che a blocchi, per modo di accesso e velocità, da avere una interfaccia separata.
- Unix e Windows/NT le gestiscono con le socket.
  - Permettono la creazione di un collegamento tra due applicazioni separate da una rete.
  - Le socket permettono di astrarre le operazioni di rete dai protocolli.
  - Si aggiunge la syscall select per rimanere in attesa di traffico sulle socket.
- Solitamente sono supportati almeno i collegamenti connection-oriented e connectionless.
- Le implementazioni variano parecchio (pipe half-duplex, code FIFO full-duplex, code di messaggi, mailboxes di messaggi,...).

I/O bloccante, non bloccante, asincrono

- Bloccante: il processo si sospende finché l'I/O non è completato.
  - Semplice da usare e capire.
  - Insufficiente, per certi aspetti ed utilizzi.
- Non bloccante: la chiamata ritorna non appena possibile, anche se l'I/O non è ancora terminato.
  - Esempio: interfaccia utente (attendere il movimento del mouse).
  - Facile da implementare in sistemi multi-thread con chiamate bloccanti.
  - Ritorna rapidamente, con i dati che è riuscito a leggere/scrivere.
- Asincrono: il processo continua mentre l'I/O viene eseguito.
  - Difficile da usare (non si sa se l'I/O è avvenuto o no).
  - Il sistema di I/O segnala al processo quando l'I/O è terminato.

Sottosistema di I/O del kernel

Deve fornire molte funzionalità.

- Scheduling: in che ordine le system call devono essere esaudite.
  - Solitamente, il first-come, first-served non è molto efficiente.
  - È necessario adottare qualche politica per ogni dispositivo, per aumentare l'efficienza.
  - Qualche sistema operativo mira anche alla fairness.
- Buffering: mantenere i dati in memoria mentre sono in transito, per gestire
  - differenti velocità (es. modem$\rightarrow$disco),
  - differenti dimensioni dei blocchi di trasferimento (es. nastro$\rightarrow$disco).

Sottosistema di I/O del kernel

- Caching: mantenere una copia dei dati più usati in una memoria più veloce.
  - Una cache è sempre una copia di dati esistenti altrove.
  - È fondamentale per aumentare le performance.
- Spooling: buffer per dispositivi che non supportano I/O interleaved (es.: stampanti).
- Accesso esclusivo: alcuni dispositivi possono essere usati solo da un processo alla volta.
  - System call per l'allocazione/deallocazione del dispositivo.
  - Attenzione ai deadlock!

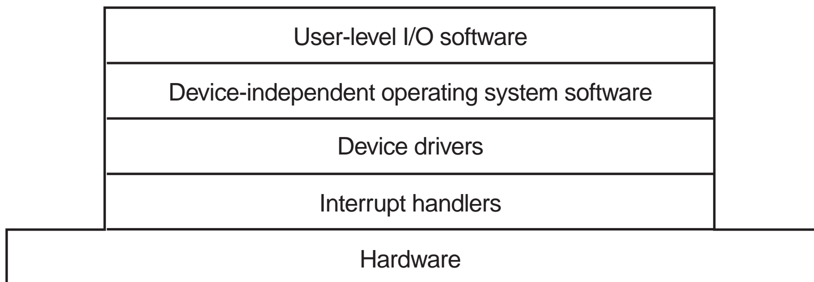
Sottosistema di I/O del kernel

Gestione degli errori

- Un S.O. deve proteggersi dal malfunzionamento dei dispositivi.
- Gli errori possono essere transitori (es: rete sovraccarica) o permanenti (disco rotto).
- Nel caso di situazioni transitorie, solitamente il S.O. può (tentare di) recuperare la situazione (es.: richiede di nuovo l'operazione di I/O).
- Le chiamate di sistema segnalano un errore, quando non vanno a buon fine neanche dopo ripetuti tentativi.
- Spesso i dispositivi di I/O sono in grado di fornire dettagliate spiegazioni di cosa è successo (es: controller SCSI).
- Il kernel può registrare queste diagnostiche in appositi log di sistema.

I livelli del software di I/O

Per raggiungere gli obiettivi precedenti, si stratifica il software di I/O, con interfacce ben chiare (maggiore modularità).



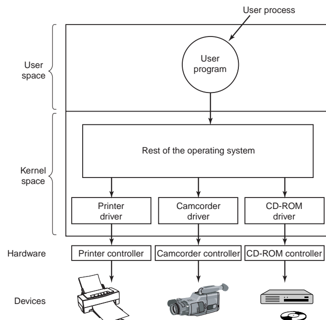
Driver delle interruzioni

- Fondamentale nei sistemi time-sharing e con I/O interrupt driven
- Passi principali da eseguire:
  1. salvare i registri della CPU,
  2. impostare un contesto per la procedura di servizio (TLB, MMU, stack. . .),
  3. ack al controllore degli interrupt (per avere interrupt annidati),
  4. copiare la copia dei registri nel PCB,
  5. eseguire la procedura di servizio (che accede al dispositivo; una per ogni tipo di dispositivo),
  6. eventualmente, cambiare lo stato a un processo in attesa (e chiamare lo scheduler di breve termine),
  7. organizzare un contesto (MMU e TLB) per il processo successivo,
  8. caricare i registri del nuovo processo dal suo PCB,
  9. continuare il processo selezionato.

Driver dei dispositivi

Software (spesso di terze parti) che accede al controller dei device.

- Hanno la vera conoscenza di come far funzionare il dispositivo.
- Implementano le funzionalità standardizzate, secondo poche classi (ad es.: carattere/blocchi).
- Vengono eseguiti in spazio kernel.
- Per includere un driver, può essere necessario ricompilare o rilinkare il kernel.
- Attualmente si usa un meccanismo di caricamento run-time



Passi eseguiti dai driver dei dispositivi

1. Controllare i parametri passati.
2. Accodare le richieste in una coda di operazioni (soggette a scheduling!).
3. Eseguire le operazioni, accedendo al controller.
4. Passare il processo in modo wait (I/O interrupt-driven), o attendere la fine dell'operazione in busy-wait.
5. Controllare lo stato dell'operazione nel controller.
6. Restituire il risultato.

I driver devono essere rientranti: a metà di una esecuzione, può essere lanciata una nuova esecuzione.
I driver non possono eseguire system call (sono in uno strato sottostante), ma possono accedere ad alcune funzionalità del kernel (es: allocazione memoria per buffer di I/O).
Nel caso di dispositivi "hot plug": gestire l'inserimento/disinserimento a caldo.

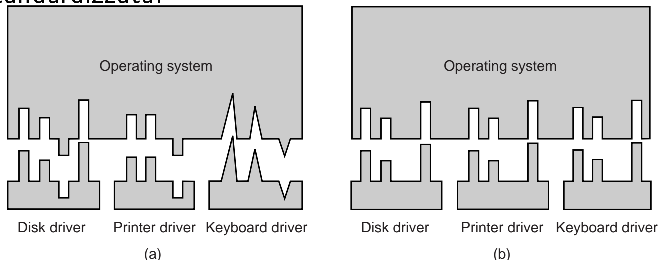
Software di I/O indipendente dai dispositivi

Implementa le funzionalità comuni a tutti i dispositivi (di una certa classe):

- fornire un'interfaccia uniforme per i driver ai livelli superiori (file system, software a livello utente)
- Bufferizzazione dell'I/O
- Segnalazione degli errori
- Allocazione e rilascio di dispositivi ad accesso dedicato
- Uniformizzazione della dimensione dei blocchi (blocco logico)

Interfacciamento uniforme

- Viene facilitato se anche l'interfaccia dei driver è standardizzata.



- Gli scrittori dei driver hanno una specifica di cosa devono implementare.
- Deve offrire anche un modo di denominazione uniforme, flessibile e generale.
- Implementare un meccanismo di protezione per gli strati utente (strettamente legato al meccanismo di denominazione).

In Linux un driver implementa (alcune delle) funzioni specificate dalla struttura `file_operations`

```
struct file_operations {
       struct module *owner;
       loff_t (*llseek) (struct file *, loff_t, int);
       ssize_t (*read) (struct file *, char *, size_t, loff_t *);
       ssize_t (*write) (struct file *, const char *, size_t, loff_t *);
       int (*readdir) (struct file *, void *, filldir_t);
       unsigned int (*poll) (struct file *, struct poll_table_struct *);
       int (*ioctl) (struct inode *, struct file *, unsigned int, unsigned long);
       int (*mmap) (struct file *, struct vm_area_struct *);
       int (*open) (struct inode *, struct file *);
       int (*flush) (struct file *);
       int (*release) (struct inode *, struct file *);
       int (*fsync) (struct file *, struct dentry *, int datasync);
       int (*fasync) (int, struct file *, int);
       int (*lock) (struct file *, int, struct file_lock *);
       ssize_t (*readv) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);
       ssize_t (*writev) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);
       ssize_t (*sendpage) (struct file *, struct page *, int, size_t, loff_t *, int);
       unsigned long (*get_unmapped_area)(struct file *, unsigned long, unsigned long,
                                          unsigned long, unsigned long);
};
```

Esempio di interfaccia per i driver

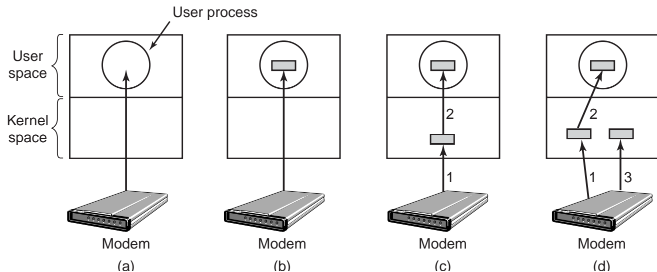
Esempio: le operazioni di un terminale (una seriale)

```
static struct file_operations tty_fops = {
        llseek:         no_llseek,
        read:           tty_read,
        write:          tty_write,
        poll:           tty_poll,
        ioctl:          tty_ioctl,
        open:           tty_open,
        release:        tty_release,
        fasync:         tty_fasync,
};

static ssize_t tty_read(struct file * file, char * buf,
                        size_t count, loff_t *ppos)
{
...
        return i;
}
```

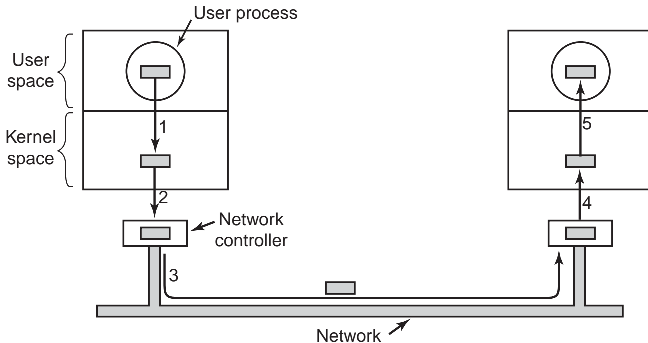
Bufferizzazione

- Non bufferizzato: inefficiente.
- Bufferizzazione in spazio utente: problemi con la memoria virtuale.
- Bufferizzazione in kernel: bisogna copiare i dati, con blocco dell'I/O nel frattempo.
- Doppia bufferizzazione.



Bufferizzazione

Permette di disaccoppiare la chiamata di sistema di scrittura con l'istante di effettiva uscita dei dati (output asincrono).



Eccessivo uso della bufferizzazione incide sulle prestazioni.

Gestione degli errori

- Errori di programmazione: il programmatore chiede qualcosa di impossibile/inconsistente (scrivere su un CD-ROM, eseguire un'operazione di seek su una seriale, accedere ad un dispositivo non installato, ecc.).
  Azione: abortire la chiamata, segnalando l'errore al chiamante.
- Errori del dispositivo. Dipende dal dispositivo.
  - Se transitori: cercare di ripetere le operazioni fino a che l'errore viene superato (rete congestionata).
  - Abortire la chiamata: adatto per situazioni non interattive, o per errori non recuperabili. Importante la diagnostica.
  - Far intervenire l'utente/operatore: adatto per situazioni riparabili da intervento esterno (es.: manca la carta).

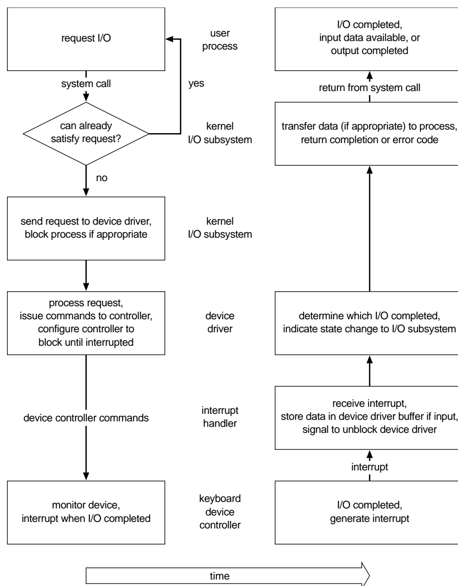
Software di I/O a livello utente

- Non gestisce direttamente l'I/O; si occupano soprattutto di formattazione, gestione degli errori, localizzazione...
- Dipendono spesso dal linguaggio di programmazione, e non dal sistema operativo.
- Esempio: la `printf`, la `System.out.println`, ecc.
- Realizzato anche da processi di sistema, come i demoni di spooling...

Traduzioni delle richieste di I/O in operazioni hardware

- Esempio: leggere dati da un file su disco.
  - Determinare quale dispositivo contiene il file.
  - Tradurre il nome del file nella rappresentazione del dispositivo.
  - Leggere fisicamente i dati dal disco in un buffer.
  - Rendere i dati disponibili al processo.
  - Ritornare il controllo al processo.
- Parte di questa traduzione avviene nel file system, il resto nel sistema di I/O. Es.: Unix rappresenta i dispositivi con dei file “speciali” (in /dev) e coppie di numeri (major,minor).
- Alcuni sistemi (eg. Unix moderni) permettono anche la creazione di linee di dati customizzate tra il processo e i dispositivi hardware (STREAMS).

Esecuzione di una richiesta di I/O

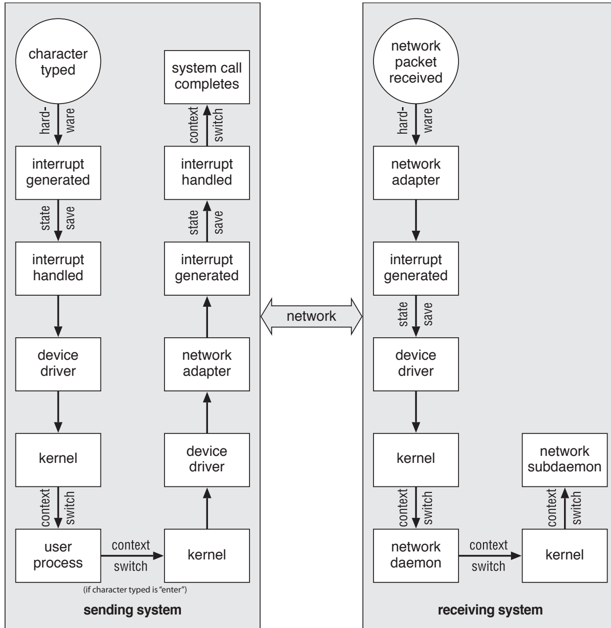


Performance

L'I/O è un fattore predominante nelle performance di un sistema.

- Consuma tempo di CPU per eseguire i driver e il codice kernel di I/O.
- Continui cambi di contesto all'avvio dell'I/O e alla gestione degli interrupt.
- Trasferimenti dati da/per i buffer consumano cicli di clock e spazio in memoria.
- Il traffico di rete è particolarmente pesante (es.: telnet).

Performance

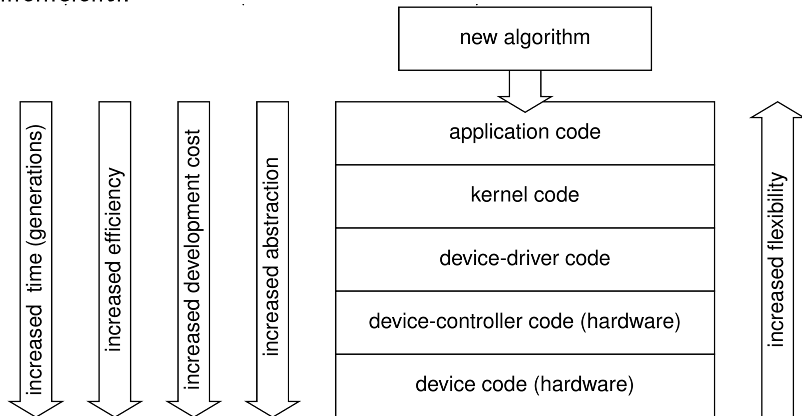


Migliorare le performance

- Ridurre il numero di context switch (es.: il telnet di Solaris è un thread di kernel).
- Ridurre spostamenti di dati tra dispositivi e memoria, e tra memoria e memoria.
- Ridurre gli interrupt preferendo grossi trasferimenti, controller intelligenti, interrogazione ciclica (se i busy wait possono essere minimizzati).
- Usare canali di DMA, o bus dedicati.
- Implementare le primitive in hardware, dove possibile, per aumentare il parallelismo.
- Bilanciare le performance della CPU, memoria, bus e dispositivi di I/O: il sovraccarico di un elemento comporta l'inutilizzo degli altri.

Livello di implementazione

A che livello devono essere implementate le funzionalità di I/O? In generale, i livelli più astratti sono più flessibili ma anche più inefficienti.



Livello di implementazione

- Inizialmente, gli algoritmi vengono implementati ad alto livello. Inefficiente ma sicuro.
- Quando l'algoritmo è testato e messo a punto, viene spostato al livello del kernel. Questo migliora le prestazioni, ma è molto più delicato: un driver "bacato" può piantare tutto il sistema.
- Per avere le massime performance, l'algoritmo può essere spostato nel firmware o microcodice del controller. Complesso, costoso.