Indice

Appunti ACSO

I principi fondamentali

I processori eseguono le istruzioni in maniera sequenziale (non vedremo la Out of Order Execution). Il processore contiene una sezione di controllo che controlla l'esecuzione leggendo le istruzioni dalla memoria. I vari programmi da eseguire sono salvati in una memoria.

L'architettura di riferimento è l'architettura di Von Neumann. Esso contiene:

- Processore
  - Sezione di controllo
  - ALU
  - Registri
- Memoria
- Interfacce I/O

- Bus che collega i vari componenti sopra elencati

I registri sono delle piccole celle di memoria che il processore usa per salvare dati utili. Ogni registro ha una dimensione massima specificata in bit. I registri che studieremo saranno quelli a 32 bit.

Viene detta parola del processore la lunghezza dei suoi registri, ossia la lunghezza massima della sequenza di bit che può gestire.

Esistono dei registri particolare:

- PC (Program Counter): contiene l'indirizzo della prossima istruzione in memoria
- IR (Instruction Register): contiene l'intera istruzione da eseguire

Il ciclo di esecuzione di un'istruzione è divisa nelle seguenti fasi:

- fetch: viene presa dalla memoria attraverso il bus l'istruzione puntata dal program counter e incrementalo nel frattempo (memoria più lenta del processore)
- decode: decodifica l'istruzione e prepara l'esecuzione prelevando gli operandi
- execute: esegui e memorizza i risultati

I vari processori si differenziano in base alla lunghezza delle istruzioni che usano (può essere una singola parola (RISC) oppure più (CISC)).

Data path

Il data path è formato da registri e da ALU. I registri sono divisi in:

- utilizzabili dall'assembler
- di supporto per altri componenti (es.: 3 registri di supporto dell'ALU (sorgente, sorgente, destinazione))

Abbiamo due classi di istruzioni:

- Prendono registri e memorizzano in altri registri (registro-registro)
- Gestiscono lo spostamento da registri a memoria (registro-memoria)

L'esecuzione di una istruzione registro-registro viene detta ciclo di data path. Il ciclo di data path è collegato al ciclo di clock.

Codifica delle istruzioni

Ogni istruzione è divisa in codice operativo e campi (field). Il codice operativo indica il tipo di operazione. I campi vengono usati per gli operandi dell'istruzione.

Le modalità di indirizzamento descrivono le diverse modalità attraverso le cui far riferimento agli operandi nelle istruzioni.

Architettura LOAD/STORE

Il numero di registri ad uso generale non è abbastanza grande per mantenere tutte le variabili di un programma. Ad ogni variabile viene quindi assegnata una locazione in memoria nella quale salvare il contenuto del registro che la rappresenta quando deve essere usato per altro.

Poiché gli operandi delle istruzioni possono provenire solamente dai registri ad uso generale, servono delle istruzioni di caricamento e salvataggio a memoria. Da qui il nome dell'architettura.

Interruzioni (interrupt)

Il normale flusso dei programmi può essere interrotto attraverso le interruzioni. Quando un dispositivo esterno vuole richiedere l'attenzione del processore, esso attiva un segnale hardware (segnale di interrupt) per notificarlo.

Il check degli interrupt viene fatto alla fine dell'esecuzione di un'istruzione ma prima del fetch della successiva. Se viene trovato un segnale di interrupt, il processore interrompe la normale esecuzione del programma ed esegue la richiesta. Una volta gestita il processore torna ad eseguire normalmente il suo programma.

La gerarchia di memoria

E' divisa in una gerarchia (dalla più veloce alla più lenta):

- Registri
- Cache (L1, L2, L3)
- Memoria fisica: RAM (es. DDR-SDRAM)

- Memoria a stato solido (SSD)
- Memoria virtuale: basata su file (HDD)

Indirizzi di memoria principale

La memoria principale è suddivisa in celle. La dimensione di una cella è chiamata parola, come anche il numero massimo di bit che il processore può gestire. La parola di memoria non per forza avrà la stessa dimensione della parola del processore.

Nel MIPS useremo una parola di memoria di 8 bit (memoria indirizzabile al byte). Di conseguenza una parola MIPS è lunga 4 parole di memoria.

Il tempo di indirizzamento di ogni singola parola è uguale.

L'insieme di tutte le celle di memoria indirizzabili con 1 parola di processore è detto spazio di memoria: per una parola di 32 bit si ha uno spazio di memoria di 4 GB.

Bus di sistema

Un bus è un insieme di fili. Ogni filo trasferisce un bit. I vari fili sono suddivisi in categorie:

- Bus dati: comprende le linee usate per trasferire dati da/verso memoria. La dimensione del bus dati deve essere abbastanza da garantire il trasferimento contemporaneo di una o più parole di memoria
- Bus indirizzi: comprende le linee sulle quali la CPU procede a trasmettere gli indirizzi di memoria delle risorse
- Bus di controllo: comprende le linee su cui transitano le informazioni ausiliarie per la corretta definizione delle operazioni e per sincronizzare CPU e memoria

Il bus può essere utilizzato per un solo trasferimento alla volta: in ogni istante solo due entità possono comunicare (master - slave). Il master è il processore, gli slave sono le periferiche. Il processore regola l'accesso delle varie periferiche. L'unico filo che può essere usato senza permesso del processore è quello di interrupt request.

L'architettura a bus singolo è molto flessibile e semplice. I dispositivi, però, hanno velocità diverse. Serve, quindi, un meccanismo di sincronizzazione tra le varie periferiche.

Esempio: operazione di lettura da memoria

1. CPU fornisce l'indirizzo della parola desiderata sul bus indirizzi e richiede la lettura sul bus di controllo
2. Quando la memoria ha completato la lettura della parola richiesta, il dato viene trasmesso sul bus dati

MIPS assembler

Il linguaggio assembler è simbolico. E' il primo livello di astrazione prima del linguaggio macchina.

Un programma è composto da più file (oggetti). Il compito di "collegare" i vari oggetti è delegato al linker.

L'assembler non istruzioni che effettuano un controllo di flusso come inteso in C. L'unico strumento che ha è il jump/branch che permette di saltare da un'istruzione all'altra.

Sintassi

Nel MIPS i registri sono numerati da 0 a 31 e hanno dei nomi simbolici. Vengono identificati dal simbolo `$`. Mettere un registro tra parentesi tonde effettua un'operazione di indirezione. Il primo registro nei field è quasi sempre la destinazione del risultato dell'istruzione.

Direttive I comandi che iniziano con `.` sono direttive del preprocessore. Esse sono:

- `.text` o `.data`: indica che le linee successive sono istruzioni o dati
- `.align n`: specifica l'allineamento a 2^n bit
- `.globl main`: indica che l'etichetta `main` è visibile anche in altri file (visibilità globale)
- `.aciiz`: specifica un'area di memoria che contiene una stringa ASCII terminata da `\0`
- `.space n`: riserva uno spazio di n byte
- `.word n`: equivalente a `.space 4` e settare a `n`
- `.half n`: equivalente a `.space 2` e settare a `n`
- `.byte n`: equivalente a `.space 1` e settare a `n`
- `.eqv A, n`: equivalente alla `#define` del C

Registri Essi sono 32, numerati da 0 a 31 (occupa 5 bit). Ogni istruzione, quindi, può usare 3 registri alla volta. Gli operandi delle istruzioni devono essere prima salvati nei registri.

Registri referenziabili:

- `$0`: contiene sempre 0
- `$1`/`$at`: riservato
- `$v0` e `$v1`: usati per risultati di funzioni e calcolo espressioni
- `$a0` - `$a3`: usati per il passaggio di argomenti
- `$t0` - `$t7`: variabili temporanee
- `$s0` - `$s7`: variabili da preservare
- `$k0` e `$k1`: riservati al kernel
- `$gp`: global pointer (punta ad area di dati globale/statica)
- `$sp`: stack pointer
- `$fp`: frame pointer (puntatore ai frame funzione; in aiuto a `$sp`)
- `$ra`: return address utilizzato nelle chiamate di funzione

Registri non referenziabili:

- `$pc`: program counter
- `$hi`: registro per moltiplicazione/divisione
- `$lo`: registro per moltiplicazione/divisione

Istruzioni Le istruzioni si dividono in 4 categorie:

1. istruzioni aritmetico logiche
2. istruzioni di trasferimento da/verso memoria (ad es. `lw` e `sw`)
3. istruzioni di salto condizionato/incondizionato
4. istruzioni di ingresso/uscita (non fornite da tutti gli assembler)

Le istruzioni sono tutte lunghe massimo 32 bit. I 6 bit più significativi si chiamano "codice operativo" (OPCODE) e indica il tipo di istruzione.

In MIPS ci sono 3 tipi di istruzioni:

- tipo R: istruzioni aritmetico-logiche; strutturate in:

```
    6        5        5        5         6       5
+--------+--------+--------+--------+--------+--------+
| OPCODE |   rs   |   rt   |   rd   |   sa   | funct  |
+--------+--------+--------+--------+--------+--------+
```

- tipo I: istruzioni di accesso alla memoria o contenenti costanti

```
    6        5        5                16
+--------+--------+--------+--------------------------+
| OPCODE |   rs   |   rt   |           const          |
+--------+--------+--------+--------------------------+
```

- tipo J: salto

```
    6                       26
+--------+-----------------------------------------+
| OPCODE |                jump target              |
+--------+-----------------------------------------+
```

Sintassi:

```
istruzione field1, field2, field3 # comment
```

La lista completa di tutte le istruzioni non è riportata qui. Può essere trovata nella cartella con il materiale del corso.

Istruzioni aritmetico-logiche

istruzione	campo	campo	campo
`add`	`rd`	`rs`	`rt`
`addu`	`rd`	`rs`	`rt`

istruzione	campo	campo	campo
addi	rd	rs	const
addui	rd	rs	const
sub	rd	rs	rt
subu	rd	rs	rt
subi	rd	rs	const
subui	rd	rs	const
mult	rs	rt	-
multu	rs	rt	-
div	rs	rt	-
divu	rs	rt	-

Le istruzioni immediate (`*i`) hanno la peculiarità di prendere una costante al posto di un secondo registro. Per come è strutturato il formato delle istruzioni immediate, la costante sarà di massimo 2^16.

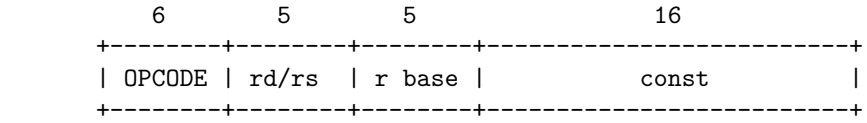
Il registro di destinazione della `mult` è implicito: il risultato viene salvato in `$hi` (32 cifre più significative) e `$lo` (32 cifre meno significative). Per spostare il risultato da questi due registri viene usato `mfhi rd` e `mflo rd`. Stessa cosa vale per la divisione solo che il quoziente è posto nel registro `$lo`, mentre il resto in `$hi`.

Trasferimenti in memoria

istruzione	campo	campo
lw	rd	const(registro base)
sw	rs	const(registro base)
la	rd	const

La parte `const(registro base)` serve a calcolare l'indirizzo di memoria a cui si fa riferimento. L'indirizzo di memoria è pari a `const + indirizzo contenuto nel registro base`. Per come è strutturata il tipo di istruzione I, posso caricare/salvare nell'intervallo `[-2^15 ; +2^15 -1]` rispetto al registro base.

In memoria una `lw` o una `sw` avranno questo formato:



L'istruzione `la` è una pseudo istruzione: poiché gli indirizzi sono di 32 bit, non è possibile specificare un intero indirizzo in un'istruzione. L'assemblatore, allora, espande la `la` in 2 istruzioni:

- si utilizza `lui $rt const` per caricare i 16 bit più significativi in `$at` (mettendo a 0 gli altri 16 bit meno significativi)
- si utilizza un'altra istruzione (`ori` un esempio) per caricare gli altri bit meno significativi e spostare tutto nel registro di destinazione

Un'altra pseudo istruzione simile è `li $rd, const`.

L'ordinamento dei byte di una parola non è da dare per scontato:

- big-endian: ordinamento da sinistra a destra
- little-endian: ordinamento da destra a sinistra

Il MIPS può operare con entrambe le modalità.

Load e store con indirizzi simbolici

Nelle chiamate a `lw` e `sw` si può omettere il registro base. In quel caso verrà usato `$gp` e l'offset verrà calcolato dal linker.

```
.data
...
A: .word
...

.text
```

```
...
    lw $t0, A
    # viene assemblato in
    #   lw $t0, %gp_rel(A)($gp)
    # dove %gp_rel(A) è una direttiva del linker che calcola l'offset di A da
    # $gp
```

Anche `la` possiede una forma simile: i bit più significativi e meno significativi non sono calcolati dal compilatore, ma il compito viene delegato al linker:

```
.data
...
A: .word
...

.text
...
    la $t0, A
    # viene assemblato in:
    #   lui $t0, %hi(A)
    #   addiu $t0, %lo(A) # oppure ori $t0, %lo(A)
    # dove come prima %hi(A) e %lo(A) sono direttive del linker
```

Queste forme vanno usate solo con valori dichiarati con `.word`, `.half` e `.byte`.

Per più dettagli vedi la sezione sulla compilazione e assemblaggio.

Istruzioni logiche

istruzione	campo	campo	campo
`and`	`rd`	`rs`	`rt`
`or`	`rd`	`rs`	`rt`
`nor`	`rd`	`rs`	`rt`
`sll`	`rd`	`rs`	`sa`
`srl`	`rd`	`rs`	`sa`

`sll` di 1 bit equivale a moltiplicare per 2. `srl` di 1 bit equivale dividere per 2.

L'istruzione `not` viene eseguita con usando `nor $rd $rs $0`.

Esistono anche le varianti immediate per `and`, `or` e `nor`.

Istruzioni di modifica del flusso Le istruzioni di modifica del flusso servono a forzare la modifica del `$pc`, rompendo il flusso sequenziale standard. Il salto condizionato viene chiamato branch, quello incondizionato jump.

Branch

Le istruzioni di branch hanno tutte la forma:

`branch_condizione rs, rt, offset`

Le istruzioni di branch sono di tipo I. Avrò quindi a disposizione un salto di `[-2^15 ; +2^15 -1]` (salvato a complemento a 2) parole. Il salto però viene effettuato relativo al program counter. Il principio di località degli indirizzi, però, ci viene in aiuto: i programmi lavorano solo su segmenti vicini di indirizzi. La probabilità di saltare verso indirizzi più distanti di 2^15-1 è molto bassa.

istruzione	campo	campo	campo	condizione
`beq`	`rs`	`rt`	offset	`rs == rt`
`bne`	`rs`	`rt`	offset	`rs != rt`

L'assemblatore, a un'etichetta messa nel campo offset, sostituisce `(L-(PC+4))/4`.

Per verificare diseguaglianze usiamo le seguenti istruzioni ausiliarie. Esse caricano 1 nel registro destinazione se la condizione è avverata e 0 altrimenti.

istruzione	campo	campo	campo	condizione
`slt`	`rd`	`rs`	`rt`	`rs < rt`
`sltu`	`rd`	`rs`	`rt`	`rs < rt`

Queste istruzioni sono di tipo R. Esistono anche le varianti immediate di queste istruzioni.

Jump

Sono possibili 3 salti assoluti:

istruzione	campo
`j`	offset
`jal`	offset
`jr`	`rs`

Nel campo offset rizzo posso salvare fino a 26 bit. Poiché le istruzioni hanno allineamento 4, i due bit meno significativi saranno sempre `00`. Posso, quindi, ignorare questi due bit salvando escludendo i due bit meno significativi ottenendo un salto totale di 2^28 indirizzi (ossia 2^26 parole). A runtime il processore farà uno shift di due a sinistra il campo indirizzo e lo concatenerà ai 4 bit più significativi del program counter, ottenendo l'indirizzo di salto.

Per saltare a indirizzi superiori a 2^28 Byte devo usare la `jr`.

La `jal` salva `$pc + 4` nel registro `$ra` prima di saltare. Essa viene usata per implementare la chiamata a funzione. La `jr` invece viene usata per implementare il ritorno al chiamante (`jr $ra`).

Nota bene: anche i salti hanno delle restrizioni sull'indirizzo (26 bit dedicati)

Gestione delle costanti Se usiamo costanti di 32 bit, l'assemblatore deve fare 2 passi per caricarla: deve separare la costanti in due parti di 16 bit e trattarle con due istruzioni separate. Proprio come `la`, esiste la pseudo istruzione `li $rs, const` che esegue gli stessi passaggi.

Modalità di indirizzamento In MIPS ci sono 5 modalità di indirizzamento:

- Immediato (quello usato dalle istruzioni di tipo I)
- A registro (quello usato dalle istruzioni di tipo R)
- Con base e offset (quello usato da `lw`/`sw`)
- Relativo al program counter (quello usato da `beq`)
- Pseudo diretto (quello usato da `jr`)

Etichette Le etichette vengono usate per dare nomi simbolici a delle celle di memoria. Sarà compito dell'assemblatore tradurre le etichette in indirizzi di memoria. Sintassi:

```
etichetta:
    add $1, $2, $3 # anche direttiva
```

Traduzione da C a MIPS

Per tradurre da un linguaggio sorgente a un linguaggio macchina, bisogna definire un modello di architettura runtime. Alcune delle convenzioni di questo modello sono:

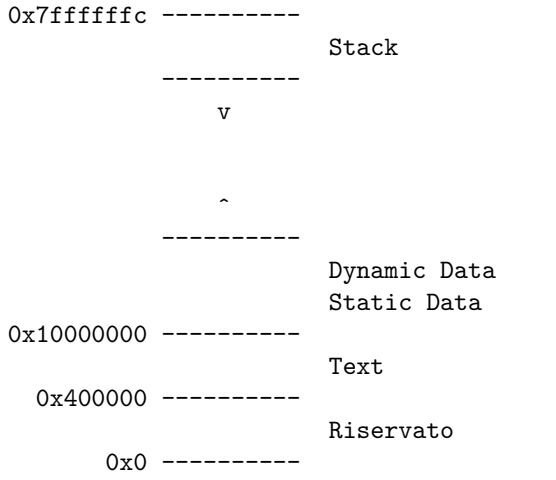
- collocazione e ingombro di tipi di variabili
- destinazione di uso dei registri

Modello di memoria

La memoria di un programma è divisa in vari segmenti:

- text (`.text`): codice del programma (dichiarato dal programma)

- data (`.data`): dati statici e dinamici (dichiarato del programma)
- stack: la stack del processo (allocato dal sistema operativo)



Gli indirizzi di impianto dei segmenti sono indirizzi virtuali, non fisici.

Programmi molto grandi e sofisticati possono avere due o più segmenti dati o testo, segmenti di dati condivisi, segmenti di libreria dinamica e altro.

Syscall

La `syscall` è un'istruzione che passa il controllo al kernel. Il kernel offre vari servizi, ognuno indentificato da un codice.

Il codice, prima, viene salvato dal chiamante nel registro `$v0`, seguito dagli argomenti in `$a*` o `$f12`. Viene poi chiamata l'istruzione `syscall`.

Se una `syscall` ritorna un valore, esso viene salvato nel registro `$v0`, anche `$f0` se è più grande di 32 bit.

Dimensioni delle variabili

tipo	dimensione (B)
`char`	1
`short`	2
`int`	4
`void*`	4

Per dichiarare un array allochiamo semplicemente `n*dimensione` byte. Per accederci, usiamo l'aritmetica dei puntatori (come si fa anche in C): `base + (dimensione * n)`.

Una sintassi alterativa di `.word` è: `.word n, m,...`. Essa equivale all'inizializzazione diretta di un array (come in C)

Per dichiarare una `struct`, basta semplicemente allocare una dimensione di pari alla dimensione totale della `struct`. Per accedere ai vari elementi, semplicemente ci accede come ad un array, tenendo conto dell'ordine degli elementi.

Classi di variabili

In C abbiamo diversi tipi di variabili: globali, locali, parametri e allocate dinamicamente.

Variabili globali Le variabili globali sono allocate in `.data` a partire da 0x10000000. Per indirizzarla usiamo un'etichetta che gli assegniamo.

Per puntare al segmento dati statici usiamo il registro `$gp`, inizializzato all'indirizzo 0x10008000

Variabili locali Per le variabili locali posso usare i registri `$s*`. Se, però, ho bisogno di usare l'indirizzo di una variabile locale, essa andrà salvata sulla stack.

Parametri I primi quattro parametri vengono passati tramite i registri `$a*`. Se la funzione ha più di 4 parametri essi vengono salvati sulla stack.

Nota bene: per array e struct viene passato l'indirizzo!

Il chiamante, prima della chiamata, salva in memoria i registri che vuole mantenere inalterati durante la chiamata.

Per i valori in uscita si usa il registro `$v0`. Se la return è più lunga di 32 bit si usa anche il registro `$v1`.

Variabili dinamiche Come anche in C, bisogna ricorrere a una funzione che ci allochi memoria sulla heap. Viene utilizzata la syscall `sbrk` (codice 9 su SPIM) passando in entrata il numero di byte da allocare. L'indirizzo dello spazio di memoria allocato è ritornato in `$v0`.

Funzioni

La chiamata a funzione, in linguaggi come il C, ha come effetto la creazione di un record di attivazione sulla stack. Il record di attivazione contiene:

- i parametri formali e i loro valori
- l'indirizzo di ritorno al chiamante
- le informazioni per gestire lo spazio allocato per il record
- le variabili locali
- il valore restituito

Il chiamante esegue le seguenti operazioni preliminari:

1. Predispone i parametri in ingresso negli opportuni registri
2. Salva sulla stack il valore di registri che vuole mantenere
3. Trasferisce il controllo alla procedura tramite `jal`

Il chiamato esegue le seguenti operazioni:

1. Alloca lo spazio di memoria necessario alla memorizzazione dei dati e alla sua esecuzione
2. Salva alcuni registri sulla stack
3. Eseguire le sue funzioni
4. Memorizzare il risultato nell'apposito registro
5. Ripristina i registri salvati sulla stack
6. Ritornare il controllo al chiamante tramite `jr`

Salvataggio dei registri Vengono salvati sullo stack solo un particolare gruppo di registri. I registri che vengono preservati dal chiamato sono: `$s*`, `$fp`, `$ra`.

I registri che il chiamante può salvare, invece, sono: `$t*`, `$a*` e `$v*`.

Entrambe le parti devono salvare i registri solo se verranno modificati.

Minimo salvataggio dei registri

- Il chiamato non deve salvare nulla se:
  - Non chiama nessun'altra funzione
  - scrive solo in registri temporanei, per parametri, per risultati o non indirizzabili
- La funzione chiamante non deve salvare nulla se:
  - non vuole salvare il contenuto dei suoi registri temporanei, parametro e risultato

Gestione dello stack Lo stack cresce dall'altro verso il basso. Lo stack pointer contiene l'indirizzo della cima della stack. Quindi ogni volta che dobbiamo spingere qualcosa sulla stack dobbiamo decrementare lo stack pointer e ogni volta che dobbiamo rimuovere qualcosa dobbiamo incrementarlo.

```
PUSH:
    addi $sp, $sp, -4
    sw $reg, 0($sp)

POP:
    lw $reg, 0($sp)
    addi $sp, $sp, 4
```

Nello stack sono salvati i record di attivazione (frame). Lo spazio sulla stack viene allocato dal programmatore in una sola volta all'inizio della procedura. Lo stesso vale per la deallocazione.

Stack frame Lo stack frame è allocato dal chiamato e ha la seguente forma:

```
------------------
Registri salvati
dal chiamante
------------------
Paramentri (5, 6...)
------------------ <- $fp

Registri salvati

------------------

Variabili locali

------------------ <- $sp
```

Il registro `$fp` punta alla prima parola del frame, mentre `$sp` punta all'ultima parola del frame. L'utilizzo del frame pointer è opzionale.

Il layout dei registri salvati è il seguente:

```
...
------------------
Vecchio $fp
------------------
Vecchio $ra
------------------

Vecchi $s0 - $s7

------------------
....
```

La generalizzazione dello stack frame è l'area di attivazione e comprende anche i registri salvati dal chiamante.

Funzioni foglia Si dice funzione foglia una funzione che non ha annidate al suo interno altre chiamate a procedure. La peculiarità di questo tipo di funzioni è che non deve salvare il valore di `$ra`.

Valutazioni espressioni algebriche

Adotteremo la regola più semplice senza ottimizzare. Basta seguire un semplice procedimento:

1. Completa l'espressione associando a sinistra
2. Finché non hai finito valuta il primo operatore valutabile da sinistra

Un operatore viene considerato valutabile se da entrambi i lati sono presenti solo costanti o risultati di sotto-espressioni già calcolate.

Flusso di compilazione e assemblaggio

Un programma C passa attraverso diverse fasi prima di essere eseguibile: prima viene compilato in linguaggio assembler, poi viene assemblato da un assemblatore in linguaggio macchina e poi i riferimenti ad altre funzioni o variabili vengono riempiti (collegato) per poi essere eseguibile.

Ciò che ci interesserà di più è il processo di assemblaggio.

L'assemblaggio

L'assembler legge, riga per riga, le istruzioni simboliche e poi le traduce in formato macchina:

- Le pseudo istruzioni vengono espanse

- Le istruzioni vengono tradotte nel loro corrispettivo binario
- I riferimenti ai registri vengono tradotti nei loro "numeri" di registro
- I riferimenti simbolici vengono risolti

Ogni segmento è assemblato in termini di memoria virtuale rilocabili.

Il risultato dell'assemblaggio è la generazione dei file oggetto.

Tabella dei simboli Il primo passo svolto dall'assemblatore è la costruzione della tabella dei simboli, ossia una corrispondenza tra le varie etichette e i rispettivi indirizzi di memoria. Le etichette definite come globali (`.globl`) vengono rese disponibili anche ad altri oggetti.

I valori degli indirizzi usati non sono assoluti, ma sono rilocabili ossia relativi alla posizione del segmento a cui appartengono.

Assemblaggio e tabella di rilocazione Usando la tabella dei simboli e la tabella di rilocazione, l'assemblatore assembla le varie istruzioni

Alcune istruzioni vengono assemblate in modo incompleto e vanno processate anche dal linker. Una istruzione viene tradotta parzialmente se:

- il riferimento simbolico al suo interno è relativo al segmento `.data`
- il riferimento è relativo a simboli non presenti nella tabella dei simboli (il simbolo è posto a 0 per convenzione)
- è un istruzione di salto di tipo J (usa indirizzi assoluti): il simbolo è posto a 0 per convenzione

In corrispondenza a ogni elemento tradotto incompletamente è creato un elemento nella tabella di rilocazione della forma:

```
<indirizzo rilocabile dell'istruzione, OPCODE, simbolo da risolvere>
```

L'indirizzo del simbolo in una branch, se locale, può essere risolto subito con questa formula: `(DEST_REL_ADDR - (SOURCE_REL_ADDR + 4))/4)`

Il formato oggetto Il formato di un oggetto è il seguente:

```
| object file | text    | data    | relocation  | symbol | debug |
| header      | segment | segment | information | table  | info  |
```

- L'intestazione: descrive le dimensioni di testo e dati
- Il segmento di testo: contiene le istruzioni eseguibili; esse potrebbero essere non complete a causa di riferimenti non risolti
- Il segmento dati: Contiene una rappresentazione binaria dei dati definiti nella sorgente; essi potrebbero non essere completi a causa di riferimenti non risolti
- Le informazioni di rilocazione: identificano le istruzioni che dipendono da indirizzi assoluti
- La tabella dei simboli: associa un indirizzo alle etichette globali
- Le informazioni di debug

Indirizzamento di dati statici

Poiché il segmento dati inizia all'indirizzo 0x10000000, le istruzioni di load non possono far rifermento direttamente ai dati. Per evitare ogni volta di espandere le load in due istruzioni, viene usato il `$gp` come riferimento per lo spiazzamento (con segno) di 16 bit delle istruzioni di load e store.

L'utilizzo del global pointer permette di accedere ai primi 64 kB del segmento di dati statici.

Simboli rilocabili, locali ed esterni

Gli indirizzi all'interno del modulo possono variare se i vari segmenti dell'oggetto sono rilocati. Di conseguenza tutte le etichette che corrispondono ad indirizzi assoluti possono puntare ad indirizzi diversi.

Un simbolo può essere locale (definito nel modulo) o esterno (definito in un altro modulo).

L'assemblatore non può tradurre completamente istruzioni se:

- fa riferimento ad un simbolo esterno (risolto dal linker)
- fa riferimento ad un simbolo rilocabile (risolto dal linker)
  - un'eccezione sono le istruzioni di branch in quanto compiono un salto relativo al PC e la distanza relativa delle istruzioni non viene modificata

Il linker

Il compito del linker è quello di mettere insieme i diversi moduli di un programma.

Il linker "collega" i vari oggetti risolvendo i simboli esterni e crea un vero e proprio eseguibile.

Il linker crea un unico programma binario eseguibile con un solo spazione di indirizzamento per tutto il programma.

Il linker prima:

- Determina la posizione in memoria delle sezioni di codice e dati dei diversi moduli
  - I moduli solo caricati in memoria sequenzialmente rispettando la struttura generale della memoria
- Crea la tabella dei simboli globale
  - Essa consiste nell'unione di tutte le tabelle dei simboli di tutti i moduli che devono essere collegati, modificate in base all'indirizzo di base del modulo di appartenenza di ciascun simbolo
- Corregge in tutti i moduli i riferimenti ad indirizzi simbolici

Regole di correzione dei riferimenti nei moduli Siano:

- `ISTR` un'istruzione riferita dalla tabella di rilocazione di un modulo `M`, con simbolo `S` e indirizzo `IND`
- `IADDR` l'indirizzo di una istruzione `ISTR` riferita dalla tabella di rilocazione di un modulo `M` con simbolo `S`
- `VS` il valore di `S` nella tabella globale dei simboli
- `GP` il valore del global pointer

Regole da applicare in base al tipo di istruzioni:

- `ISTR` è in formato J: inserire `VS/4` nell'istruzione
- `ISTR` è di salto in formato I: inserire `(VS - (IADDR + 4)) / 4`
- `ISTR` è aritmetico/logica in formato I: inserire i 16 bit meno significativi di `VS` (`VS_Low`)
- `ISTR` è di tipo load o store: inserire `VS-GP`
- `ISTR` è l'istruzione `lui`: inserire i 16 bit più significativi di `VS` (`VS_High`)

Caricamento ed esecuzione del programma

Nei sistemi UNIX, il kernel carica il programma in memoria e ne lancia l'esecuzione. Le operazioni eseguite sono:

1. Legge l'intestazione dell'eseguibile per determinare le dimensioni dei vari segmenti
2. Crea un nuovo spazio di indirizzamento per il programma abbastanza grande per contenere i vari segmenti del programma (inclusa la stack)
3. Copia le istruzioni e i dati del file eseguibile in memoria all'interno dello spazio appena allocato
4. Copia nello stack gli argomenti passati al programma
5. Inizializza i registri dell'architettura (in generale tutti azzerati tranne per lo stack pointer a cui viene assegnato il nuovo indirizzo della stack)
6. Salta a una procedura di avvio che copia i gli argomenti del programma dallo stack ai registri, per poi chiamare la procedura `main` del programma.
7. Quando la procedura `main` termina, la procedura di avvio conclude il programma attraverso la syscall `exit`

Librerie dinamiche

Alcune volte, per ridurre le dimensioni degli eseguibili, alcune librerie vengono collegate solo a runtime. Il linker dinamico esegue la procedura di caricamento in memoria alla prima chiamata di un determinato simbolo.