CALCOLATORI

Toolchain: Come generare applicazioni in linguaggio macchina

Giovanni Iacca
giovanni.iacca@unitn.it

Lezione basata su materiale preparato
con Luca Abeni, Luigi Palopoli e Marco Roveri

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO
Dipartimento di Ingegneria
e Scienza dell'Informazione

La lingua della CPU

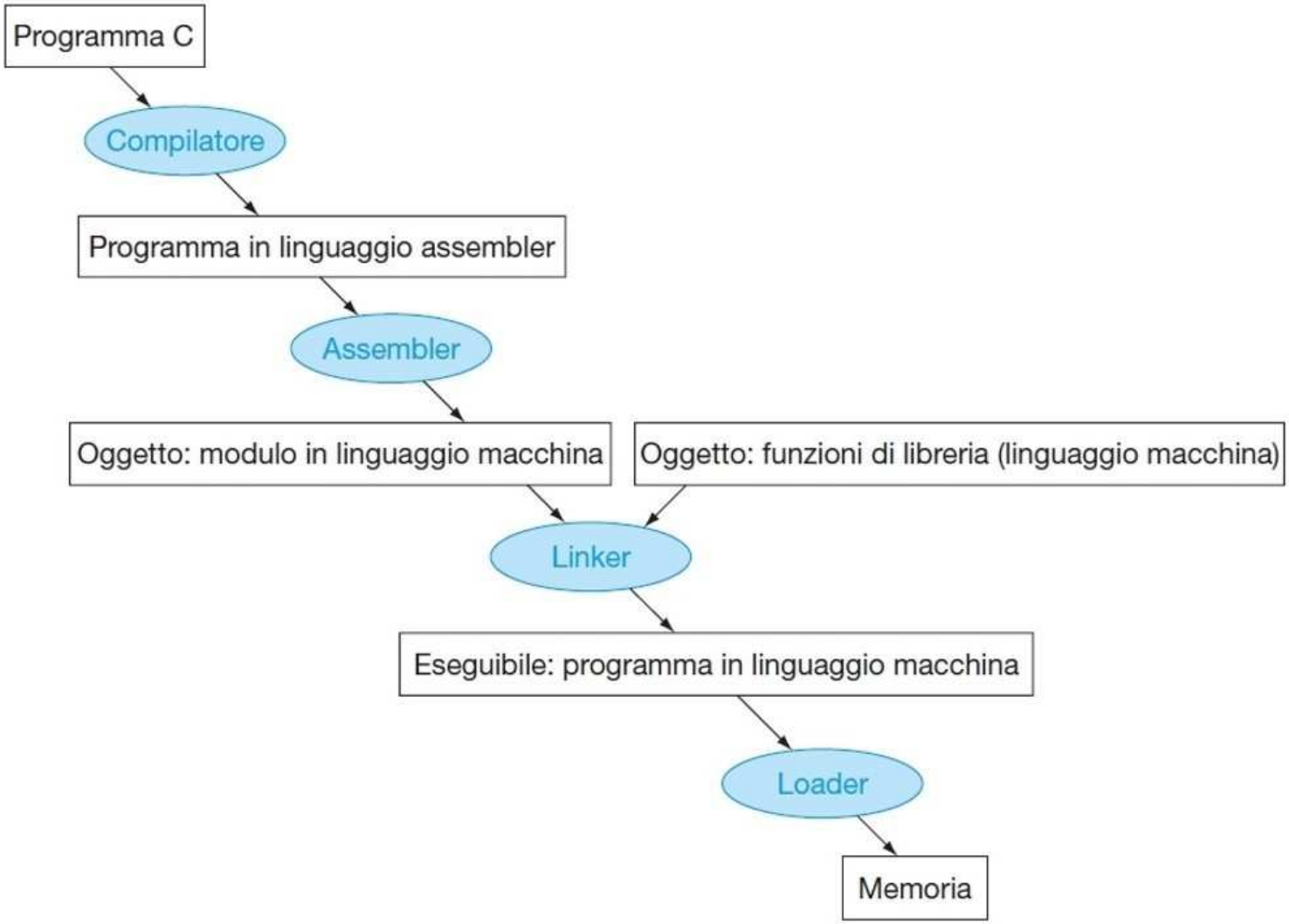
- Una CPU “capisce” e riesce ad eseguire solo il linguaggio macchina
  - Linguaggio di (estremamente!) basso livello
  - Sequenza di `0` e `1`
- Assembly: codici mnemonici (`add`, `addi`, etc.) invece di cifre binarie
  - Più “gestibile” del linguaggio macchina...
  - ... ma sempre troppo complesso per noi!
  - In realtà, anche più complesso di quanto visto finora
- In genere, non si programma direttamente in assembly!
  - Assembly generato a partire da linguaggio di alto livello...
  - Chi fa la conversione? Compilatore!

Compilazione: Esempio

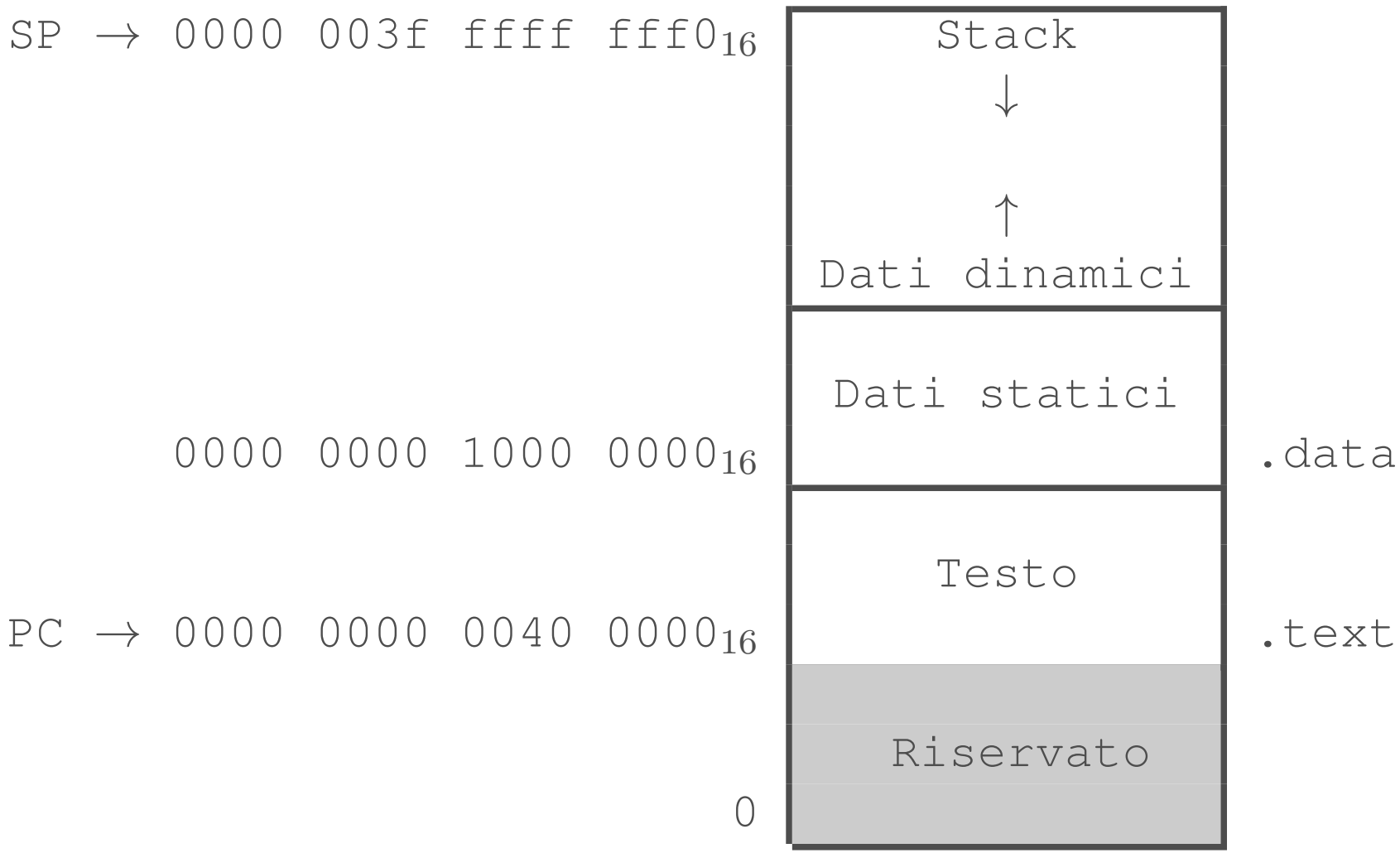
- Esempio di generazione di codice in linguaggio macchina da linguaggio di alto livello: linguaggio C
  1. Preprocessore: gestisce direttive `#....` Generalmente, sostituzione di codice
  2. Compilatore: da C ad assembly (file `.s`)
  3. Assembler: da assembly a linguaggio macchina (file `.o`)
  4. Linker: mette assieme codice in linguaggio macchina e librerie per generare un eseguibile
- Normalmente, un *driver* gestisce tutto questo in automatico
- Il file eseguibile può ora essere caricato in memoria con un'apposita system call (in unix, la famiglia `exec()`)

Un compilatore C

- Preprocessore: poco interessante per noi, ignoriamolo



Allocazione della memoria per programmi e dati nel RISC-V



Usando `gcc`...

- gcc: gnu compiler collection
  - Può compilare vari linguaggi di alto livello...
  - ... generando linguaggio macchina per varie CPU (RISC-V compreso!)
- Vari passaggi ad opera di diversi programmi: `cpp`, `cc`, `as`, `ld`
- `gcc` invoca i vari comandi usando i giusti parametri
  - Default: invoca tutti i programmi necessari
  - `gcc -S` si ferma dopo aver invocato `cc` (genera file assembly `.s`)
  - `gcc -c` si ferma dopo aver invocato `as` (genera file oggetto `.o`)

Da C ad assembly

- Dato un file `<file>.c`, comando `gcc -S` invoca `cc` per generare un file assembly `<file>.s`
  - Sintassi: `gcc -S <file>.c [-o <nomefile>]`
    - Senza opzione `-o` genera `<file>.s`
    - Con `-o` salva il risultato della compilazione in `<nomefile>`
  - `cc` è il Compilatore propriamente detto
- `cc` conosce l'architettura target (RISC-V, ARM, Intel X86, nel nostro caso) meglio di un programmatore umano
- Spesso il codice assembly generato da `cc` è migliore di quello generato "a mano"
  - Possibili diversi livelli di ottimizzazione (`-O...`)

    `-O0` No ottimizzazioni, `-O`N con $N \geq 1$ diversi e sofisticati livelli di ottimizzazione
  - `gcc -c -Q -ON --help=optimizers` mostra le ottimizzazioni abilitate con livello `N`

    Provare con `N=0,1, ...` e vedere le differenze
  - Assembly generato potrebbe essere di non facile lettura

    Ottimizzazioni potrebbero riordinare istruzioni per sfruttare al meglio il processore

Da assembly a linguaggio macchina

- Dato un file `<file>.c` o `<file>.s`, `gcc -c` invoca `cc` e `as` o solo `as` (risp.) per generare un file oggetto `<file>.o`
  - Sintassi: `gcc -c <file.{s|c}> [-o <nomefile>]`
    - Senza opzione `-o` genera `<file>.o`
    - Con `-o` salva il risultato della compilazione in `<nomefile>`
  - Assembler
- `as` fa spesso qualcosa in più rispetto alla semplice sostituzione di codici mnemonici con sequenze di bit
  - Pseudo-istruzioni
    - Convertite in istruzioni riconosciute dalla CPU
  - Converte numeri da decimale / esadecimale a binario
  - Gestisce label
  - Gestisce salti: se destinazione troppo lontana, `j DEST` va convertita in caricamento di registro + `jr`
  - Genera *metadati*

Pseudo-istruzioni

- Non corrispondono a vere e proprie istruzioni in Linguaggio Macchina
  - Esempio: RISC-V non ha istruzioni native tipo `mv` fra registri.
- Ma sono utili per il programmatore (o il compilatore)
- L'assembler sa come convertirle in una o più istruzioni macchina esistenti
- Esempi:
  - `mv x10, x11 // x10 assume valore di x11`

    ↓

    `addi x10, x11, 0 // x10 riceve il contenuto di x11 + 0`
  - `li x9, 123 // carica il valore 123 in x9`

    ↓

    `addi x9, x0, 123 // x9 assume il valore x0 + 123`
  - `j LABEL // Jump non condizionato a LABEL`

    ↓

    `jal x0, LABEL`
  - etc.

File oggetto

Composti da *segmenti* distinti:

- Header
  - Specifica dimensione e posizione degli altri segmenti del file oggetto
- Segmenti
  - Segmento di testo/Text segment: contiene il codice in linguaggio macchina
  - Segmento dati /Data segment: contiene tutti i dati (sia statici che dinamici) allocati per la durata del programma (codice)
- Tabella dei simboli/Symbol table
  - Associa simboli ad indirizzi (relativi)
  - Enumera simboli non definiti (sono in altri moduli)
- Tabella di rilocazione/Relocation table
  - Enumera istruzioni che fanno riferimento a istruzioni e dati che dipendono da indirizzi assoluti (da “patchare”) nel momento in cui il programma viene caricato in memoria
- Altre informazioni (debugging, etc.)

Da file oggetto ad eseguibili

- Dato un file `<file>.c` o `<file>.s` o `<file>.o`, `gcc` senza opzioni `-S` e `-c` invoca anche il linker (`ld`) per generare un eseguibile
  - Sintassi: `gcc <file.{s|c|o}> [-o <nomefile>]`
    - Senza opzione `-o` genera il file `a.out` (su Windows `a.exe`)
    - Con `-o` salva l'eseguibile in `<nomefile>`
- Linker `ld`: mette assieme uno o più file oggetto, eseguendo le necessarie rilocazioni
  - Decide come codice e dati sono disposti in memoria
  - Associa indirizzi assoluti a tutti i simboli
  - Risolve simboli che erano lasciati indefiniti in alcuni file `.o`
  - "Patcha" le istruzioni macchina citate nella tabella di rilocazione (in base agli indirizzi assegnati)
- Scopo di `ld` è quindi eliminare tabelle dei simboli e tabelle di rilocazione, generando codice macchina con i giusti riferimenti
  - Poiché un simbolo usato in un file può essere definito in un file diverso, `ld` mette quindi assieme più file `.o`

Linker e simboli

- Un linker gestisce vari tipi di simboli:
  - Simboli definiti (defined): associati ad un indirizzo (relativo) nella tabella dei simboli
  - Simboli non definiti (undefined): usati in un file (e quindi presenti nella tabella dei simboli) ma definiti in un file diverso
  - Simboli locali (o non esportati): definiti ed usati in un file (quindi simili a simboli definiti), ma non usabili in altri file
- In tutti i casi, associa un indirizzo assoluto ad ogni simbolo
- Per simboli non definiti, cerca in altri file
  - Se non trovato, errore di linking!

Linking in tre passi

1. Disporre in memoria i vari segmenti (`.text`, `.data`, etc.) dei file `.o`
   - Segmenti testo uno dopo l'altro, idem per i segmenti dati, etc.
2. In base al passo precedente, assegnare un indirizzo assoluto ad ogni simbolo contenuto nelle varie tabelle dei simboli
3. In base alle tabelle di rilocazione, correggere le varie istruzioni con gli indirizzi calcolati

- Il risultato viene poi "incapsulato" in un file eseguibile
  - Segmenti (testo, dati, etc.)
  - Informazioni per il caricamento in memoria (indirizzo di caricamento dei segmenti, indirizzo entry point, etc.)
  - Altre informazioni (es. per debugging)

Librerie

- Esistono funzioni “predefinite” fornite dal compilatore / sistema
- Definite in file `.o` inclusi in ogni eseguibile che viene prodotto
  - Buon numero di file oggetto linkati “di default” in ogni eseguibile
  - Poco pratico!
- Libreria: collezione di file `.o`
  - Invece di linkare un’enormità di file oggetto, si linka un’unica libreria!
- Librerie: statiche o dinamiche
  - Librerie statiche (`.a`):
    - semplici collezioni di file oggetto; `ld` fa tutto il lavoro!
  - Librerie dinamiche (`.so`):
    - `ld` non fa molto... il vero linking avviene a tempo di esecuzione (caricamento dinamico)!

Librerie statiche

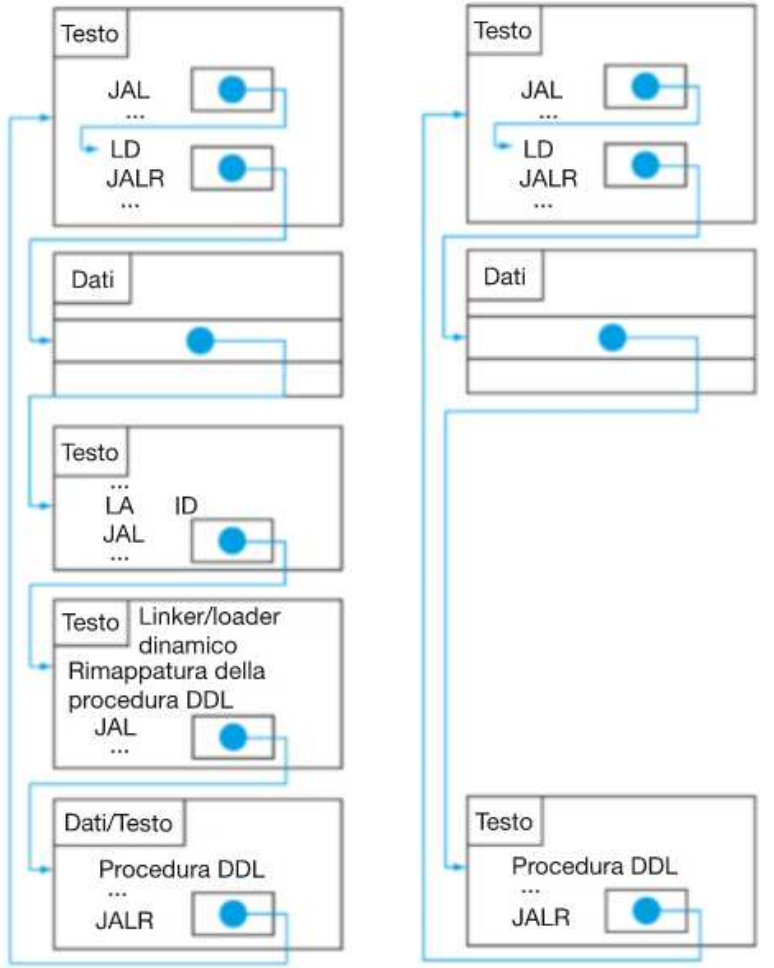
- `ld` inserisce nell'eseguibile tutto il codice della libreria utilizzato dal programma
  - La libreria serve solo durante il linking (codice autocontenuto)
  - Le dimensioni dell'eseguibile aumentano...
    - Esempio: ogni eseguibile contiene una copia del codice di `printf`...
- Caricamento del programma da parte del SO: semplice!

Librerie dinamiche

- `ld` inserisce nell'eseguibile riferimenti alle librerie usate ed alle funzioni invocate...
  - ... ma non le include nell'eseguibile!
- Ogni eseguibile contiene un riferimento ad un *linker dinamico* (`/lib/ld-linux.so`)
  - All'esecuzione del programma, viene caricato ed eseguito `/lib/ld-linux.so` passandogli il programma stesso come argomento!
  - `ld-linux.so` caricherà quindi l'eseguibile e le librerie (`.so`) da cui dipende, e si occuperà di fare il linking
    - La libreria serve anche per eseguire il programma (codice non autocontenuto)
- Caricamento del programma da parte del SO: complesso!
- Vantaggi/Svantaggi
  - + Le dimensioni dell'eseguibile sono piccole
  - + Possibile aggiornare librerie senza ricompilare
  - - Il programma non è autocontenuto

Possibile complicazione: “lazy linking”

- A noi informatici piace complicare le cose...
  - ... e siamo pigri!
- Invece di fare le operazioni di linking a tempo di caricamento, posporle il piú possibile
  - Se un eseguibile è linkato ad una libreria, ma non ne invoca mai i servizi a runtime, forse si può evitare di linkarla...
- Invece di chiamare la vera funzione, si chiama uno *stub* che esegue caricamento, rilocazione e linking quando serve
  - La seconda volta che si chiama la procedura, il processo sarà piú semplice perchè la procedura ora è già stata caricata



(a) Prima chiamata a una procedura di una DDL

(b) Chiamate successive alla procedura della DDL

Esempio: funzioni da compilare / linkare

- Programma composto da due file assembly (`.s`)

`file1.o`

```
        .comm   x,4,4
        ...
        .text
        .globl  func_1
func_1:
        ld  x10, 0(x3)
        jal  x1, 0
        ...
```

`file2.o`

```
        .comm   y,4,4
        ...
        .text
        .globl  func_2
func_2:
        sd  x11, 0(x3)
        jal  x1, 0
        ...
```

Esempio: file oggetto 1

header	campo	valore	
	nome	file1	
	text size	100_{16}	
	data size	20_{16}	
text	indirizzo (rel.)	istruzione	
	0	`ld x10, 0(x3)`	
	4	`jal x1, 0`	
	8	...	
data	indirizzo (rel.)	simbolo	
	0	`x`	
	...	...	
tabella simboli	simbolo	indirizzo	
	`x`	`*UND*`	
	`func_2`	`*UND*`	
	...	...	
tabella rilocazione	indirizzo	tipo istruzione	simbolo
	0	`ld`	`x`
	4	`jal`	`func_2`

Procedura `func_1` necessita indirizzo di `x` da mettere nella `ld` e indirizzo `func_2` da mettere nella `jal`.

Esempio: file oggetto 2

header	campo	valore	
	nome	file2	
	text size	200_{16}	
	data size	30_{16}	
text	indirizzo (rel.)	istruzione	
	0	`sd x11, 0(x3)`	
	4	`jal x1, 0`	
	8	...	
data	indirizzo (rel.)	simbolo	
	0	`y`	
	...	...	
tabella simboli	simbolo	indirizzo	
	`y`	`*UND*`	
	`func_1`	`*UND*`	
	...	...	
tabella rilocazione	indirizzo	tipo istruzione	simbolo
	0	`sd`	`y`
	4	`jal`	`func_1`

Procedura `func_2` necessita indirizzo di `y` per la `sd` e indirizzo di `func_1` per la sua `jal`.

Linker: mettendo tutto assieme...

Prima `file1` poi `file2`

header	campo	valore
	text size	AAA
	data size	BBB
	...	...

text	indirizzo	istruzione
	$\texttt{KKKKKKKKKKKKKKKK}_{16}$	`ld x10,`UUU`(x3)`
	$\texttt{LLLLLLLLLLLLLLLL}_{16}$	`jal x1,`YYY
	...	...
	$\texttt{MMMMMMMMMMMMMMMM}_{16}$	`sd x11,`VVV`(x3)`
	$\texttt{NNNNNNNNNNNNNNNN}_{16}$	`jal x1,`TTT
	...	...

data	indirizzo	simbolo
	$\texttt{PPPPPPPPPPPPPPPP}_{16}$	`x`
	...	...
	$\texttt{JJJJJJJJJJJJJJJJ}_{16}$	`y`
	...	...

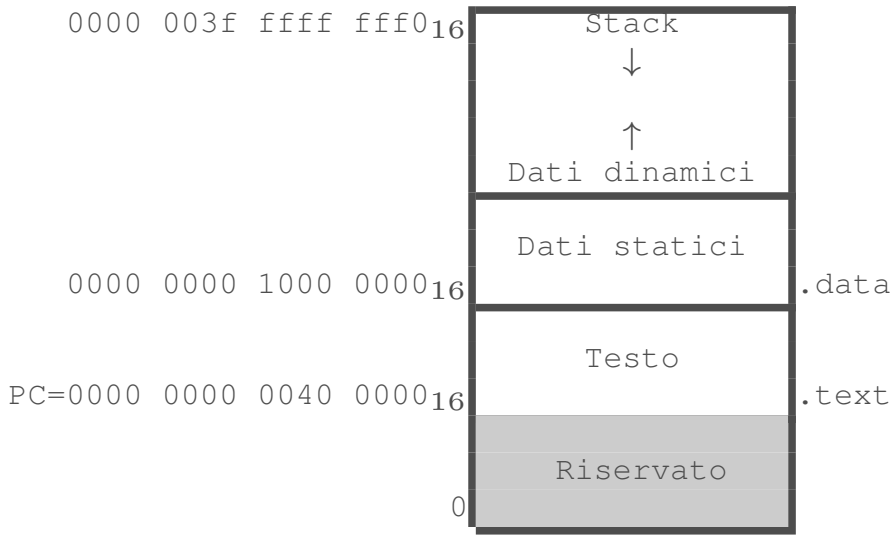
Procedura `func_1` necessita indirizzo di `x` da mettere nella `ld` e indirizzo `func_2` da mettere nella `jal`.
Procedura `func_2` necessita indirizzo di `y` per la `sd` e indirizzo di `func_1` per la sua `jal`.

Linker: mettendo tutto assieme... (cont.)

- Header
  - Text size:
    100_{16} (`file1`) + 200_{16} (`file2`) = 300_{16}
  - Data size:
    20_{16} (`file1`) + 30_{16} (`file2`) = 50_{16}
- Disposizione segmenti in memoria
  - text: inizia a 0000000000400000_{16}

    prima `file1` (dimensione 100_{16}),
    poi `file2` (indirizzo 0000000000400100_{16})
  - data: inizia a 0000000010000000_{16};

    prima `file1` (dimensione 20_{16}),
    poi `file2` (indirizzo 0000000010000020_{16})
- Assegnamento indirizzi a simboli:
  - `func_1`: 0000000000400000_{16}
    `func_2`: 0000000000400100_{16}
  - `x`: 0000000010000000_{16}
    `y`: 0000000010000020_{16}



Linker: mettendo tutto assieme... (cont.)

header	campo	valore
	text size	300_{16}
	data size	50_{16}
	...	...

text	indirizzo	istruzione
	0000000000400000_{16}	`ld x10,UUU(x3)`
	0000000000400004_{16}	`jal x1,YYY`
	...	...
	0000000000400100_{16}	`sd x11,VVV(x3)`
	0000000000400104_{16}	`jal x1,TTT`
	...	...

data	indirizzo	simbolo
	0000000010000000_{16}	`x`
	...	...
	0000000010000020_{16}	`y`
	...	...

Linker: mettendo tutto assieme... (cont.)

- Calcolo valore per `jal`:
  - le istruzioni utilizzano indirizzo relativo al `PC`, basta fare differenza tra indirizzo della `jal` e indirizzo della procedura:
    - il campo indirizzo di `jal` a 400004_{16} che salta a 400100_{16} (indirizzo procedura `func_2`), conterrà $400100_{16} - 400004_{16} = 252_{10}$
    - il campo indirizzo di `jal` a 400104_{16} che salta a 400000_{16} (indirizzo procedura `func_1`), conterrà $400000_{16} - 400104_{16} = -260_{10}$
- Calcolo offset per `ld`/`sd`
  - Sono più complessi da calcolare perchè dipendono da indirizzo base (`x3`, per semplicità assumiamo `x3` = 0000000010000000_{16}):
    - inseriamo 0_{16} nel campo indirizzo di `ld` a 400000_{16} per ottenere indirizzo di `x` (0000000010000000_{16})
    - inseriamo 20_{16} (ovvero 32_{10}) nel campo indirizzo di `sd` a 400100_{16} per ottenere indirizzo di `y` (0000000010000020_{16})
    - NOTA: gli indirizzi associati alle operazioni di store vengono gestiti come per le load, ad eccezione del fatto che il formato istruzioni tipo `S` rappresenta le costanti diversamente dal formato `I` delle load.

Quindi...

header	campo	valore
	text size	300_{16}
	data size	50_{16}
	...	...

text	indirizzo	istruzione
	0000000000400000_{16}	`ld x10,0(x3)`
	0000000000400004_{16}	`jal x1,`252_{10}
	...	...
	0000000000400100_{16}	`sd x11,32(x3)`
	0000000000400104_{16}	`jal x1,`-260_{10}
	...	...

data	indirizzo	simbolo
	0000000010000000_{16}	`x`
	...	...
	0000000010000020_{16}	`y`
	...	...