1 Lezione del 24-09-24

1.1 Introduzione

Il corso di reti logiche tratta di:

1. **Linguaggio assembler:** come scrivere programmi semplici, come avviene la compilazione in linguaggio macchina;
2. **Reti logiche:** reti combinatorie, reti combinatorie per l'aritmetica, reti sequenziali asincrone e sincronizzate;
3. **Microprogammazione:** reti sequenziali sincronizzate, come realizzare una rete logica da specifiche. "Micro" qui sta per *hardware*;
4. **Il calcolatore:** processore, interfacce comuni e convertitori.

1.1.1 Introduzione alle reti logiche

Si parla di reti *logiche* in quanto si guarda all'hardware da una prospettiva funzionale, indipendente dalla sua tecnologia. Ad esempio, una porta NOR sarà implementata con determinati circuiti, ma tutto ciò che interessa a questo corso è come si comporta logicamente: $y = 1 \Leftrightarrow A = B = 0$.

1.2 Programmazione assembly

Il nome corretto del linguaggio sarebbe Assembly, ma noi lo chiameremo Assembler per ragioni storiche. L'assembler è il linguaggio con cui si scrivono le istruzioni eseguite dal processore. Il processore implementa effettivamente un ciclo fetch-execute dove preleva la prossima istruzione macchina (in assembler) dalla memoria e la esegue.

1.2.1 Linguaggio macchina

Il linguaggio macchina (LM) è dato dal contenuto effettivo della memoria che contiene le istruzioni, ergo una sequenza di zero e uno. Il linguaggio assembler adotta una sintassi simbolica per il linguaggio macchina: ad esempio, `MOV %AX, %BX`.

Il processo di trasformazione dall'assembler all'LM si chiama **assemblaggio**, mentre il processo di traasformazione da un linguaggio ad alto livello all'assembler si chiama **compilazione**.

1.2.2 Generalità sull'assembler

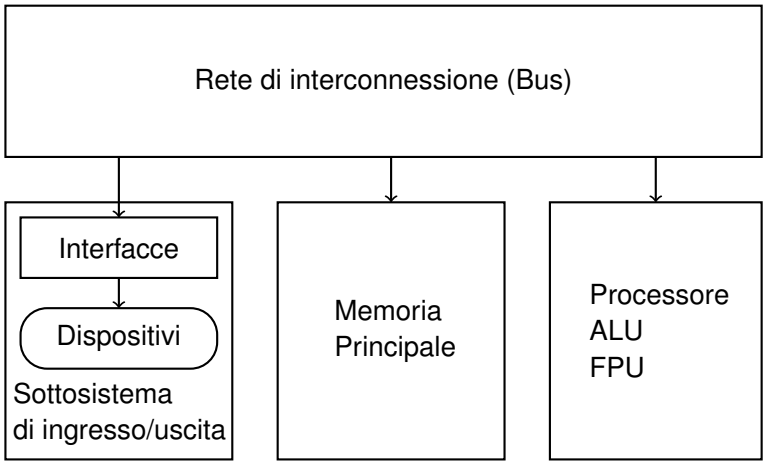
Si dice che assembler è un linguaggio a basso livello. Mancano i costrutti a cui siamo abituati da i linguaggi di alto livello:

1. Non esistono costrutti di flow control (for, if-else, ecc...), tutto si fa con istruzioni di salto.
2. Non esistono tipi variabile: gli operandi sono stringhe di bit che si riferiscono a locazioni in memoria.

Inoltre, l'assembler è strettamente legato all'hardware, ed è specifico per ogni processore. Noi vedremo l'assembler dei processori della famiglia Intel x86, che non è uguale all'assembler dei processori Arm Cortex, ecc... Questo rende il codice in assembler mai portatile. Fatta questa precisazione, possiamo dire che i principi generali restano comunque validi fra famiglie di processori diverse.

Esiste ancora oggi una nicchia di utilizzo del linguaggio assembler: quello dello sviluppo di sistemi embedded. Inoltre, il linguaggio ha un importante significato didattico e culturale.

1.3 Schema a blocchi del calcolatore



Un calcolatore è formato, in linea generale, da una rete di interconnessione (bus) che collega fra di loro:

- Interfacce che comunicano con dispositivi;
- La memoria principale che contiene dati e programmi;
- Il processore, che esegue il ciclo fetch-execute. Possiamo aggiungere che ogni processore, oggi, contiene almeno due blocchi:
  - L'**ALU**, Arithmetic Logic Unit, che si occupa di calcoli aritmetici su numeri interi (interpretando le stringhe di bit come numeri naturali o interi in complemento a 2) e operazioni logiche;
  - L'**FPU**, Floating Point Unit, che si occupa dei numeri a virgola mobile.

1.4 Riassunto di rappresentazione dell'informazione

Da qui in poi x è il numero rappresentato e X la sequenza di bit rappresentante.

1.4.1 Numeri naturali

Intervallo di rappresentabilità

n bit rappresentano 2^n naturali sull'intervallo $[0, 2^n - 1]$.

Trasformazione diretta

Per portare un'intero in rappresentazione binaria nel suo corrispondente in base 10, si

sa che presi n bit $b_{n-1}, b_{n-2}, ..., b_1, b_0$ della rappresentazione X, essi rappresentano il naturale x:

$$x = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + ... + b_1 \cdot 2 + b_0 = \sum_{i=0}^{n-1} b_n \cdot 2^i$$

Il bit più a sinistra è il Most Significant Bit (MSB), cioé b_{n-1}, quello più a destra il Least Significant Bit (LSD) cioè b_0.

Trasformazione inversa

Per portare un'intero in base 10 nella sua rappresentazione binaria, si usa l'algoritmo DIV-MOD:

Algoritmo 1 DIV-MOD

Input: x in base 10
Output: X rappresentazione in base 2
Inizializza $q \leftarrow x$, $r \leftarrow 0$, and $i \leftarrow 0$
Crea un'array vuota R per i resti
while $q \neq 0$ **do**
  $r \leftarrow q \mod 2$
  Metti r in $R[i]$
  $q \leftarrow q/2$
  $i \leftarrow i + 1$
end while
Gli $R[n-1], R[n-2], ..., R[0]$ rimasti (letti al contrario) sono le cifre di X.

1.4.2 Numeri interi in complemento a due

Intervallo di rappresentabilità

n bit rappresentano 2^n interi sull'intervallo $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$.

Trasformazione diretta

Per portare un intero x in base 10 nella sua rappresentazione in complemento a due X su n bit, si decide alternativamente rispetto al segno di x di rappresentare il naturale N in X:

$$N = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 2^n + x & x < 0 \end{cases}, \quad X = N_2$$

dove si nota che nella seconda espressione $2^n + x$ equivale a $2^n - |x|$, dalla negatività di x.

Alternativamente, sui soli numeri negativi:

- Si converte x in rappresentazione binaria.
- Si trova il complemento, ovvero la rappresentazione che inverte tutti i bit (che equivale alla rappresentazione in complemento a 2 dell'opposto -1).
- A questo punto si aggiunge 1, ignorando qualsiasi overflow.

La rappresentazione X trovata è il complemento a 2 di x. Simbolicamente:

$$X = \begin{cases} x_2 & x \geq 0 \\ (\bar{x} + 1)_2 & x < 0 \end{cases}$$

Trasformazione inversa

Per portare la rappresentazione in complemento a due X su n bit di un intero x all'intero stesso, ci si comporta come per le rappresentazioni di naturali, ma prendendo il bit più significativo dagli n bit $b_{n-1}, b_{n-2}, ..., b_1, b_0$ della rappresentazione X con valenza negativa:

$$x = -b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + ... + b_1 \cdot 2 + b_0 = -b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} b_n \cdot 2^i$$

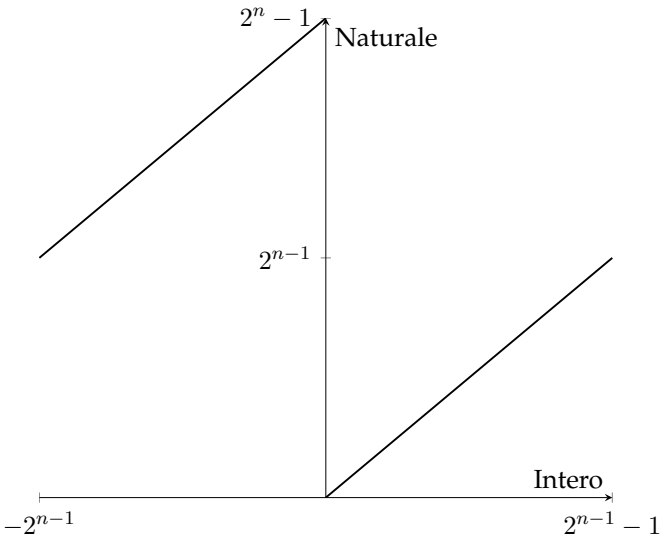
Alternativamente, si nota che il bit più significativo della rappresentazione sarà impostato a 0 per numeri positivi e 1 per numeri negativi. Ciò significa che avremo:

$$x = \begin{cases} X_{10} & X_{n-1} = 0 \\ -(\bar{X} + 1)_{10} & X_{n-1} = 1 \end{cases}$$

dove la barra rappresenta l'operazione complemento.

1.4.3 Rappresentazioni di interi e naturali, diagramma a farfalla

La rappresentazione in complemento 2 su n bit è effettivamente una funzione dal dominio $[-2^{n_1}, 2^{n-1} - 1]$ degli interi al codominio $[0, 2^n - 1]$ dei naturali. Tale funzione prende il nome di *diagramma a farfalla*:



da cui notiamo la relazione fra un'intero e il naturale che lo rappresenta in complemento a 2.

1.4.4 Valori notevoli del complemento a 2

Vale la pena notare alcuni valori notevoli del complemento a 2 su n bit.

- Innanzitutto, 0 rimane 0, ergo una fila di di n zeri.
- Uno zero seguito da $n-1$ uni è il numero più positivo positivo, ergo $2^{n-1}-1$.
- Aggiungendo uno, si arriva ad un uno seguito da $n-1$ zeri, che è il numero negativo possibile, ergo -2^{n-1}. Notare che questo combacia col prendere il numero più positivo $2^{n-1}-1$, e ricavare uno meno del suo opposto -2^{n-1}, che abbiamo appurato essere ciò che accade quando si complementa (e infatti i due numeri sono l'uno il complemento dell'altro).
- Infine, una sequenza di n uno rappresenta il più piccolo numero negativo, ergo -1.

Si nota che, al pari dei naturali, la rappresentazione dei numeri interi in complemento a 2 è effettivamente ciclica.

1.4.5 Notazione esadecimale

Scrivere lunghe stringhe binarie diventa velocemente complicato. Per questo si adotta una notazione esadecimale per stringhe di 4 bit ($[0, 15]$):

Decimale	Binario	Esadecimale
0	0000	`0x0`
1	0001	`0x1`
2	0010	`0x2`
3	0011	`0x3`
4	0100	`0x4`
5	0101	`0x5`
6	0110	`0x6`
7	0111	`0x7`
8	1000	`0x8`
9	1001	`0x9`
10	1010	`0xA`
11	1011	`0xB`
12	1100	`0xC`
13	1101	`0xD`
14	1110	`0xE`
15	1111	`0xF`

A questo punto, possiamo denotare qualsiasi stringa binaria come una lista di numeri esadecimali prefissi da `0x` (che serve ad indicare la rappresentazione esadecimale stessa), ad esempio `0xC1` (11000001).

1.4.6 Nota sulle potenze di 2

Conviene ricordare le prime potenze di 2:

Esponente	Valore
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	$1024 \approx 1000$
11	2048
12	4096
13	8192

e inoltre ricordare che, visto $2^10 = 1024 \approx 1000$, le unità di misura usuali diventano:

Unità	Potenza
2^{10}	1 KB
2^{20}	1 MB
2^{30}	1 GB

e cosi via.

1.5 Struttura del calcolatore

1.5.1 Spazio di memoria

La memoria del calcolatore, vista dal programmatore assembler, è uno spazio lineare di 2^{32} (su calcolatori a 32 bit) locazioni (celle) di memoria, dalla capacità di un byte ciascuna. Ogni cella è quindi identificata da un numero di 32 bit, detto **indirizzo**.

Lo spazio di memoria è in larga parte implementato attraverso Random Access Memory (RAM), ovvero memoria volatile. Solo una piccola parte dello spazio è implementata attraverso Read Only Memory (ROM), ovvero memoria permanente, che contiene le istruzioni da eseguire al reset.

Accesso allo spazio di memoria

Il processore può accedere (leggere/scrivere) a:

- Singole locazioni (byte) da 8 bit;
- Doppie locazioni (word) da 16 bit;
- Quadruple locazioni (double word) da 32 bit.

Per gli accessi 16/32 bit si usa l'indirizzo più piccolo delle 2/4 locazioni. Si ricorda che l'indirizzo più grande contiene i bit più significativi.

Gli indirizzi di memoria assembler sono solo simbolici, e vengono tradotti dall'assemblatore, e in parte runtime. Questo significa che non si può accedere a memoria appartenente al sistema operativo, o memoria fuori dai limiti fisici del sistema, ecc...

1.5.2 Spazio di Input/Output

Lo spazio di Input/Output è formato da 2^{16}, ovvero 64k, locazioni o **porte**. Ogni porta ha una capacità di un byte ed è indirizzata da un numero di 16 bit.

Il processore accede alle porte attraverso operazioni particolari di lettura o scrittura (in o out). Spesso le porte sono configurate per un solo tipo di operazione: sola lettura o sola scrittura.

Le locazioni di memoria sono solitamente identiche fra di loro, le porte di I/O no. Indirizzi diversi significano dispositivi diversi, e si rende quindi necessario conoscere fisicamente gli indirizzi.

1.5.3 Processore

Il processore è dotato di una memoria interna formata da locazioni di memoria da 32 bit (**registri**). Questi si dividono in registri **generali**, riservati alle elaborazioni, e **di stato**, riservati a compiti speciali.

Registri generali

I registri iniziano generalmente con la lettera **E**, che sta per *Extended*. Questo perché storicamente i registri erano da 16 bit, e successivamente sono stati estesi a 32 bit. Possiamo quindi riferirci a più sezioni dello stesso registro:

- **EAX:** tutti i 32 bit del registro esteso;
- **AL:** la parte *bassa* del registro **AX**, ergo quella meno significativa, da 8 bit;
- **AH:** la parte *alta* del registro **AX**, ergo quella più significativa, da 8 bit;
- **AX:** il registro AX legacy, che combina **AL** e **AH**, da 16 bit.

Alcuni registri vengono storicamente utilizzati per particolari funzioni:

- **EAX** è utilizzato da alcune istruzioni aritmetiche per contenere operandi e risultati. Viene detto **accumulatore**.
- **ESI**, **EDI**, **EBX**, **EBP** vengono detti registri puntatore, dove **B** sta per base e **I** per indice. In particolare:
  - **ESI**, **EDI** vengono utilizzati come registri indice per accessi in memoria.
  - **EBX** è utilizzato come indirizzo di base per l'accesso in memoria. Viene solitamente detto **base**.
  - **EBP** è utlizzato sempre come indirizzo di base per l'accesso in memoria.
- **ECX** è utilizzato come contatore nei cicli. Viene detto **contatore**.
- **EDX** è utilizzato come operando di operazioni aritmetiche. Viene detto **data**.
- **ESP** è utilizzato per indirizzare la **pila** o **stack**, ovvero una parte di memoria con disciplina LIFO che serve a gestire sottoprogrammi.

Registri di stato

Ricordiamo due registri di stato:

- L'**EIP** viene detto **instruction pointer**, o **program counter**. Viene usato per contenere l'indirizzo della locazione dalla quale sarà prelevata la prossima istruzione da eseguire. Il contenuto dell'EIP è fissato al reset iniziale, e impostato sulla prima istruzione da eseguire (in memoria ROM) all'indirizzo `0xFFFF0000`.

  Possiamo quindi dire che il ciclo fetch-loop si svolge come segue:

  - Il processore preleva dalla memoria, all'indirizzo EIP, una nuova istruzione;
  - Incrementa EIP del numero di byte dell'istruzione prelevata;
  - Esegue l'istruzione e ripete.

  Da questo si ha che le istruzioni in memoria vengono eseguite sequenzialmente nell'ordine in cui sono incontrate, a meno che non si definiscano salti attraverso altre determinate istruzioni.

- L'**EF** viene detto **extended flag**. Consiste di 32 elementi detti **flag**, fra cui ricordiamo:

  - **OF:** flag di overflow (traboccamento) delle operazioni aritmetiche;
  - **SF:** flag di segno, impostato quando l'ultima operazione restituisce un complemento a 2 con $MSB = 1$ (ergo negativo);
  - **ZF:** flag zero, che viene impostato quando l'ultima operazione restituisce qualcosa di nullo;
  - **CF:** flag di carry (riporto), che viene impostato quando l'ultima operazione richiede un riporto o un prestito.