
ANNO ACCADEMICO 2024/2025

Architettura degli Elaboratori II

Teoria

Altair's Notes



UNIVERSITÀ
DI TORINO



DIPARTIMENTO DI INFORMATICA

| | | |
|-------------------|---|------------------|
| CAPITOLO 1 | CONCETTI DI BASE | PAGINA 5 |
| 1.1 | Introduzione | 5 |
| | Tassonomia delle architetture — 6 • Alcuni concetti fondamentali — 6 | |
| 1.2 | Una semplice macchina RISC | 7 |
| | MIPS - Versione monociclo — 8 • Banco dei registri — 10 • Una semplice Control Unit — 11 • L'esecuzione di un'istruzione — 12 | |
| 1.3 | Dal monociclo al multiciclo | 12 |
| | MIPS - Versione multiciclo — 12 • Control Unit multiciclo — 14 • Macchine a stati finiti e Microprogrammi — 15 • Complex Instruction Set Computer (CISC) — 15 • Restricted Instruction Set Architetture (RISC) — 16 | |
| 1.4 | Pipeline | 16 |
| CAPITOLO 2 | INSTRUCTION LEVEL PARALLELISM (ILP) | PAGINA 18 |
| CAPITOLO 3 | CACHING | PAGINA 20 |
| CAPITOLO 4 | ARCHITETTURE PARALLELE | PAGINA 22 |
| CAPITOLO 5 | QUANTUM COMPUTING | PAGINA 24 |
| CAPITOLO 6 | GPU | PAGINA 26 |

Premessa

Licenza

Questi appunti sono rilasciati sotto licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (per maggiori informazioni consultare il link: <https://creativecommons.org/version4/>).



Formato utilizzato

Box di "Concetto sbagliato":

Concetto sbagliato 0.1: Testo del concetto sbagliato

Testo contenente il concetto giusto.

Box di "Corollario":

Corollario 0.0.1 Nome del corollario

Testo del corollario. Per corollario si intende una definizione minore, legata a un'altra definizione.

Box di "Definizione":

Definizione 0.0.1: Nome delle definizioni

Testo della definizione.

Box di "Domanda":

Domanda 0.1

Testo della domanda. Le domande sono spesso utilizzate per far riflettere sulle definizioni o sui concetti.

Box di "Esempio":

Esempio 0.0.1 (Nome dell'esempio)

Testo dell'esempio. Gli esempi sono tratti dalle slides del corso.

Box di "Note":

Note:-

Testo della nota. Le note sono spesso utilizzate per chiarire concetti o per dare informazioni aggiuntive.

Box di "Osservazioni":

Osservazioni 0.0.1

Testo delle osservazioni. Le osservazioni sono spesso utilizzate per chiarire concetti o per dare informazioni aggiuntive. A differenza delle note le osservazioni sono più specifiche.

Concetti di Base

1.1 Introduzione

In questo corso verrà studiata l'architettura interna e il funzionamento dei processori moderni (con riferimento a cache e RAM).

Note:-

Lo scopo del corso è quello di spiegare il passaggio al multi-core, subito dopo la "Rivoluzione RISC".

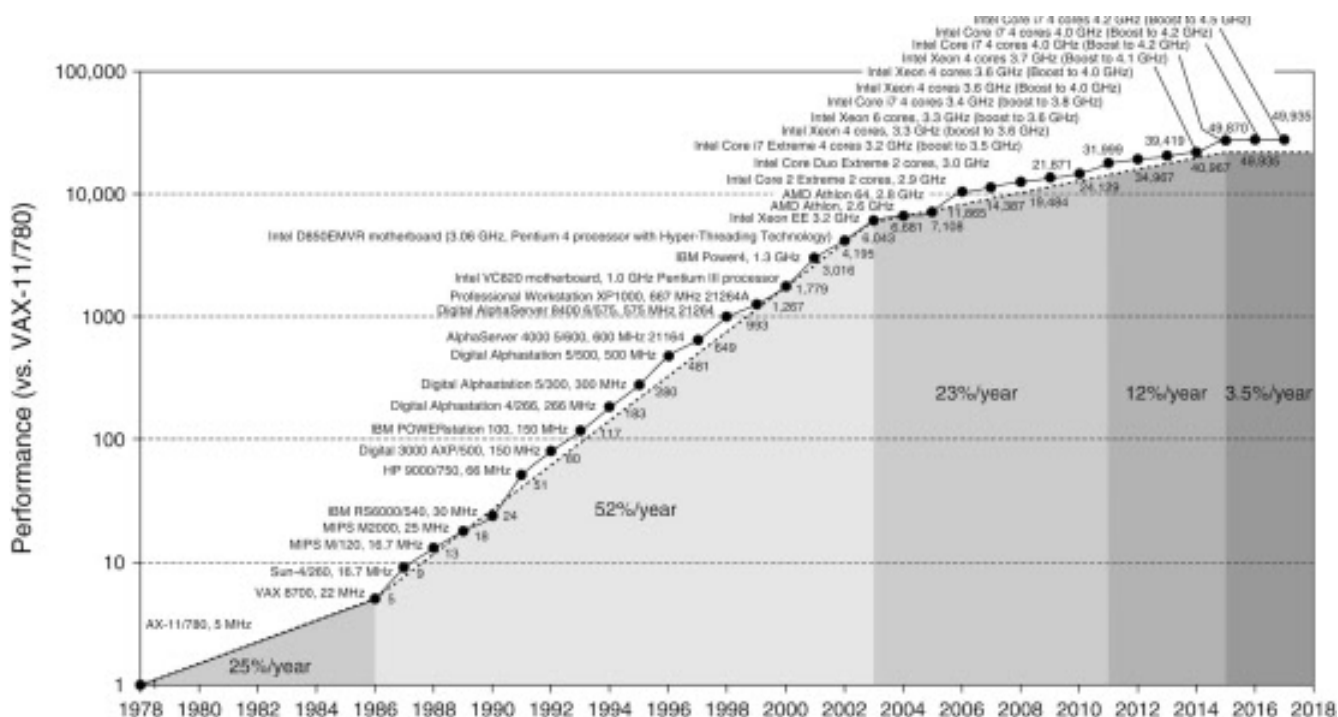


Figure 1.1: Nel 1986 ha inizio la "Rivoluzione RISC", mentre all'inizio degli anni 2000 si inizia a sfruttare l'idea di avere più "core".

1.1.1 Tassonomia delle architetture

Il contenuto del corso può essere descritto dalla "Tassonomia di Flynn".

Definizione 1.1.1: Tassonomia di Flynn

La Tassonomia di Flynn organizza i vari tipi di processori in base a determinate caratteristiche che verranno approfondite in questo corso.

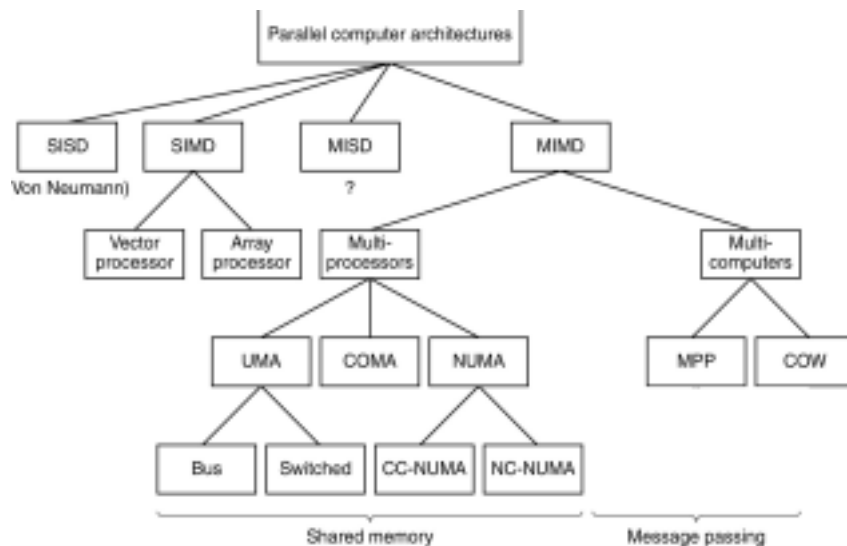


Figure 1.2: La Tassonomia di Flynn

1.1.2 Alcuni concetti fondamentali

Definizione 1.1.2: Microarchitettura

L'architettura interna di un processore: com'è fatto a partire dal suo datapath.

Corollario 1.1.1 Datapath

Il percorso che compiono le istruzioni all'interno del processore per venire eseguite.

Note:-

Diversi tipi di istruzioni percorrono diverse parti del datapath per venire eseguite.

Definizione 1.1.3: ISA

L'Instruction Set Architecture (ISA) è l'insieme di istruzioni macchina di un processore.

Note:-

Due processori possono avere lo stesso ISA, ma microarchitetture diverse (e.g. AMD e Intel).

1.2 Una semplice macchina RISC

Domanda 1.1

Qual è la differenza tra un processore a 32 bit e un processore a 64 bit?

Risposta: il processore a 64 bit manipola in maniera naturale informazione scritta con 64 bit e il processore a 32 bit manipola in maniera naturale informazione scritta con 32 bit.

Caratteristiche fondamentali dell'architettura RISC:

- ⇒ le istruzioni hanno tutte la stessa lunghezza (o a 32 bit o a 64 bit);
- ⇒ le istruzioni sono semplici;
- ⇒ la Control Unit è semplice (poche porte logiche, quindi frequenze di clock più elevate).

Note:-

Ciò che verrà descritto in questa sezione è una versione semplificata di MIPS, la prima macchina RISC. Si considerano 32 registri a 32 bit e si ignorano le operazioni floating point.

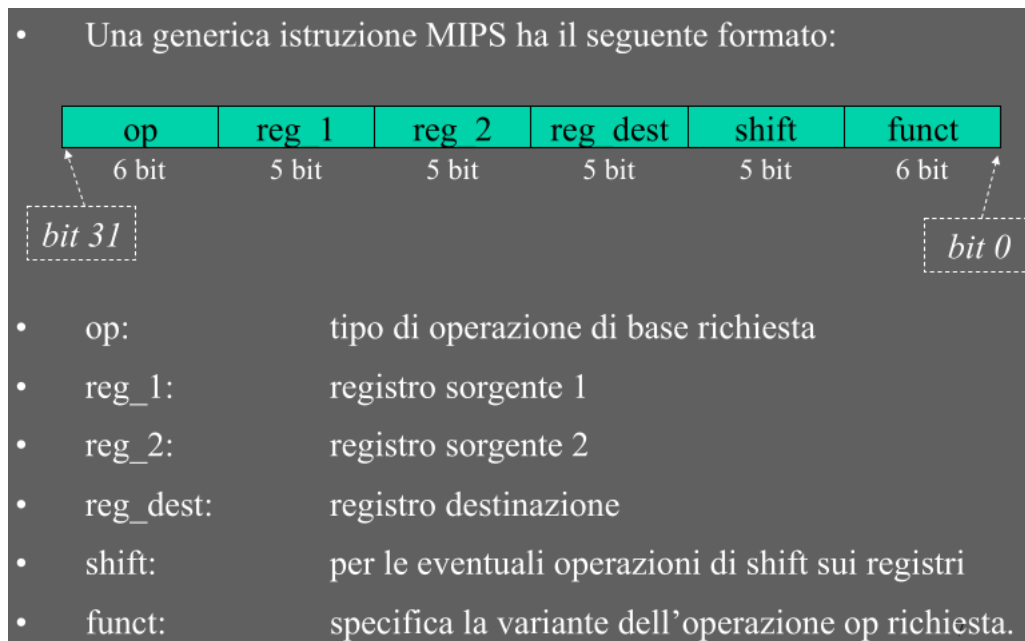


Figure 1.3: Istruzione MIPS

Definizione 1.2.1: Istruzioni di tipo-R

Le istruzioni di tipo-R usano due registri e restituiscono il risultato a un terzo registro. La convenzione prevede che il campo OP sia 0. L'operazione specifica si trova nel campo funct.

Note:-

Solitamente si usa la lettera D quando si parla di dati interi (DADD, DSUB, etc.), F per i floating point.

Definizione 1.2.2: Istruzioni di tipo-I

Le istruzioni di tipo-I usano un valore immediato. La convenzione prevede che il campo op sia 8.

Definizione 1.2.3: LOAD e STORE

La LOAD carica in un registro un valore che si trova in memoria (op = 35). La STORE salva in memoria il valore di un registro (op = 43).

Definizione 1.2.4: Salti condizionati (BRANCH)

Salta solo se si verifica una determinata condizione (op = 5).

Definizione 1.2.5: Salti incondizionati (JUMP)

Salta sempre (op = 4).

1.2.1 MIPS - Versione monociclo

Generalmente i primi due passi di ogni istruzione sono:

1. usa il Program Counter (PC) per prelevare dalla "memoria di istruzioni"¹ la prossima istruzione da eseguire;
2. Decodifica l'istruzione e contemporaneamente legge i registri.

Note:-

I passi successivi dipendono dal tipo di istruzione (tutte usano la ALU).

⇒ LOAD e STORE accedono alla memoria dati e nel caso di LOAD viene aggiornato un registro;

⇒ le istruzioni logico-aritmetiche aggiornano un registro;

⇒ le istruzioni di salto possono alterare il valore di PC.

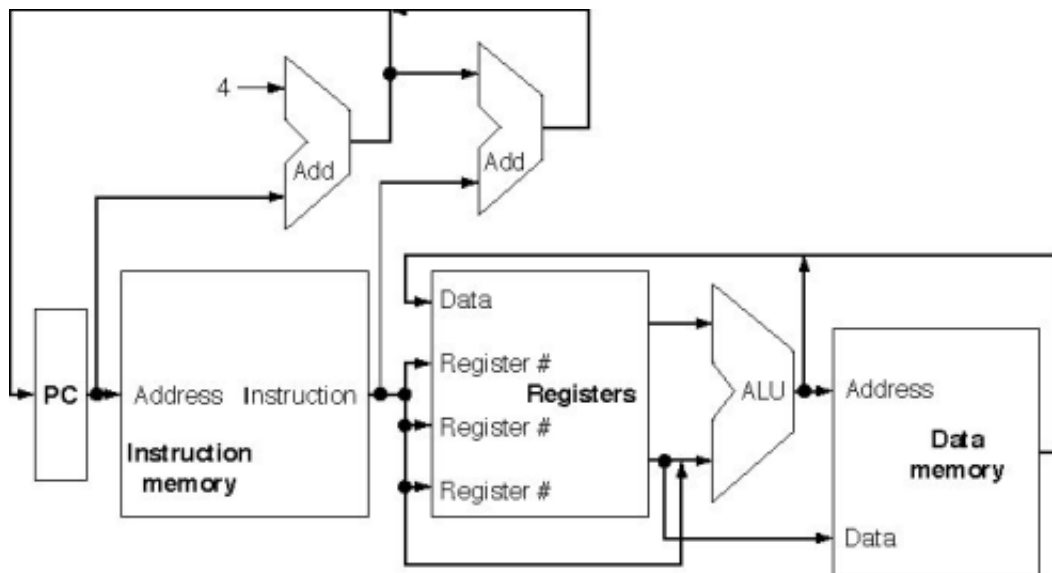


Figure 1.4: Schema ad alto livello del datapath MIPS

Note:-

Il fluire delle informazioni nel datapath deve essere controllato da una "Control Unit".

¹Cache di primo livello.

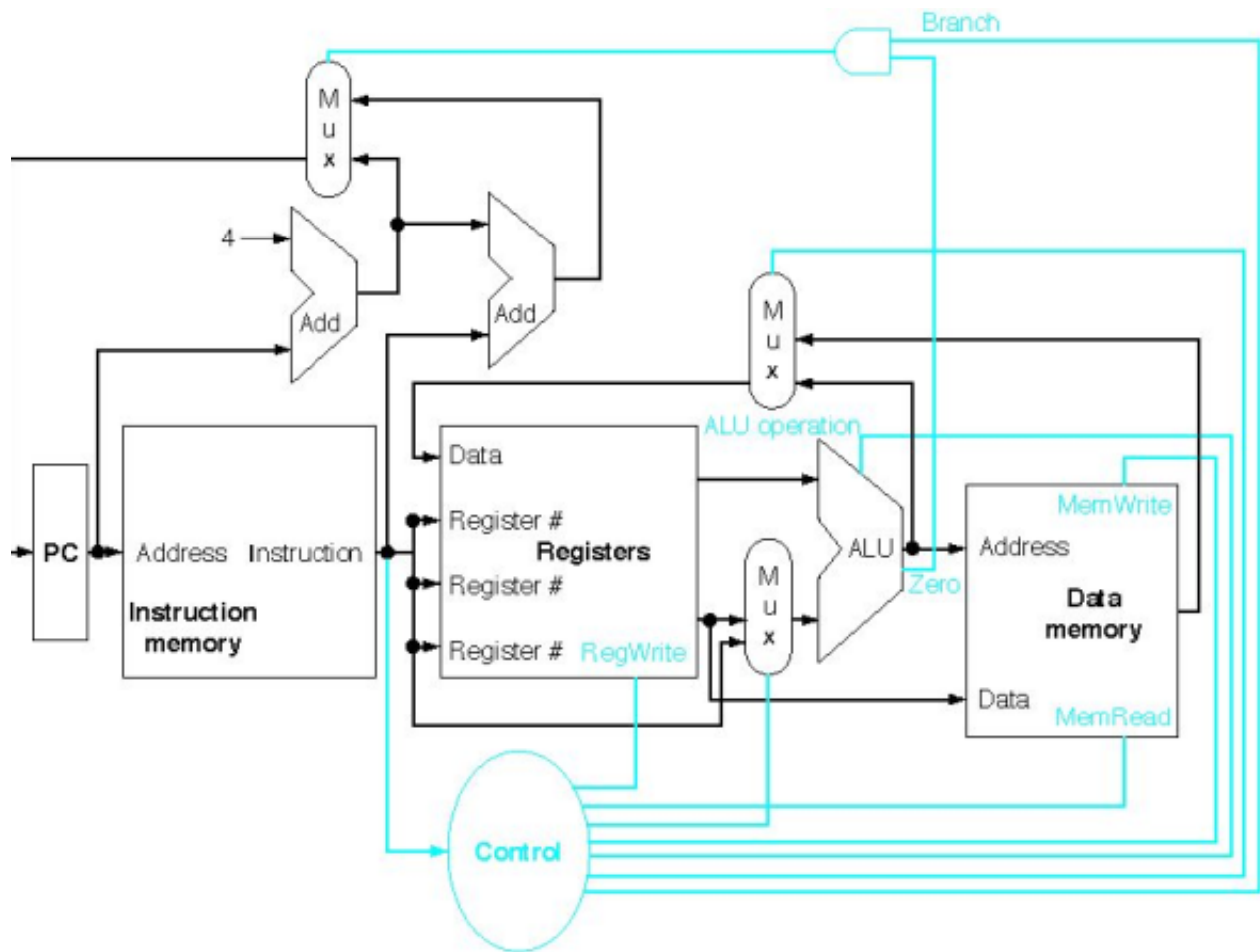


Figure 1.5: Versione modificata del MIPS con una Control Unit

Note:-

L'esecuzione di ciascuna istruzione può avvenire in un unico ciclo di clock, purché sia stato adeguatamente dimensionato.

Per capire come funziona il datapath di una macchina monociclo si osserva che esso è composto da due tipi di elementi logici:

- ⇒ gli elementi di *stato*;
- ⇒ gli elementi di tipo *combinatorio*.

Definizione 1.2.6: Elementi di stato

Gli elementi di stato sono quelli in grado di memorizzare uno *stato* (e.g. flip flop, registri e memorie). Un elemento di stato possiede almeno 2 ingressi e un'uscita. Gli ingressi richiedono:

- ⇒ il valore da scrivere nell'elemento;
- ⇒ il clock per determinare quando scriverlo.

Il dato presente in uscita è sempre quello scritto in un ciclo di clock precedente.

Note:-

Solitamente esiste un terzo ingresso "di controllo" che stabilisce se l'elemento di stato può effettivamente memorizzare l'input.

Definizione 1.2.7: Elementi combinatori

Gli elementi combinatori sono quelli in cui le uscite dipendono solamente dai valori d'ingresso in un dato istante (e.g. ALU e Multiplexer).

1.2.2 Banco dei registri

Definizione 1.2.8: Banco dei registri

Nelle immagini precedenti i registri della CPU sono rappresentati da un'unità funzionale detta *register file* (o banco dei registri). Essa è un'unità di memoria molto piccola e veloce.

Note:-

Si può accedere a ognuno dei 32 registri (da 0 a 31) specificando il suo indirizzo. Ogni registro può essere letto o scritto.

Operazione di scrittura: quando il segnale di controllo (RegWrite) è a 1, il valore proveniente dalla ALU o dalla Data Memory e presente in input in *DST data* viene memorizzato nel registro di destinazione specificato da *DST addr*.

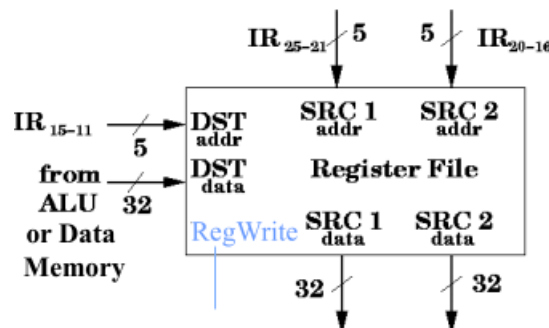


Figure 1.6: Operazione di scrittura

Operazione di lettura: le letture sono immediate. In qualunque momento alle uscite *SRC1 data* e *SRC2 data* è presente il contenuto dei registri i cui numeri sono specificati da *SRC1 addr* e *SRC2 addr*.

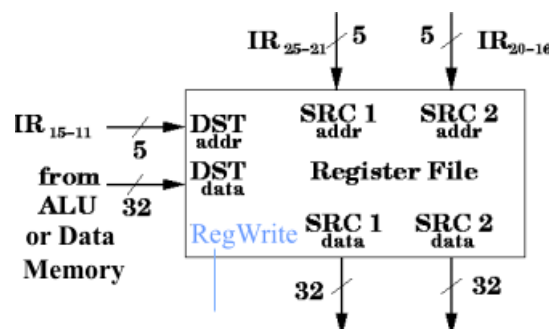


Figure 1.7: Operazione di lettura

1.2.3 Una semplice Control Unit

Definizione 1.2.9: Control Unit

La Control Unit riceve in input i 6 bit del campo op dell'istruzione e deve generare in output i segnali per comandare:

- ⇒ la scrittura dei registri;
- ⇒ la lettura/scrittura della memoria dati (MemRead/MemWrite);
- ⇒ i Multiplexer che selezionano gli input da usare;
- ⇒ la ALU (ALUOp) che deve eseguire ciascuna operazione aritmetico-logica appropriata per la specifica istruzione in esecuzione.

Corollario 1.2.1 Segnale ALUOp

Il segnale ALUOp dipende:

- ⇒ dal tipo di istruzione in esecuzione, specificato nel campo op;
- ⇒ dalla specifica operazione da eseguire, determinata dal campo funct.

Esempio 1.2.1 (Istruzioni di tipo-R)

- ⇒ Se $op == load$ || $op == store$ allora la ALU deve eseguire una *somma*;
- ⇒ se $op == beq$ allora la ALU deve eseguire una *sottrazione* (per controllare se il risultato è 0);
- ⇒ Se $op ==$ tipo-R allora è il campo *func* a stabilire l'operazione che deve eseguire la ALU.

Definizione 1.2.10: ALU Control

Parte della Control Unit che indica le operazioni da eseguire.

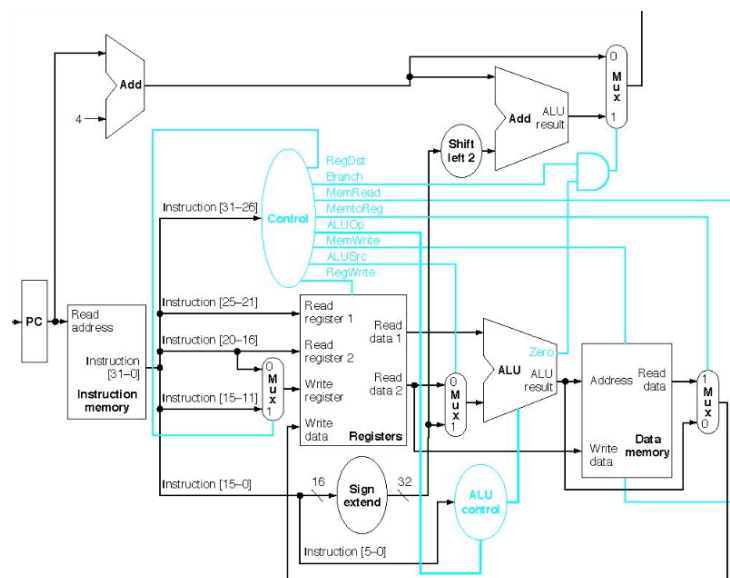


Figure 1.8: Versione modificata del MIPS la ALU Control

1.2.4 L'esecuzione di un'istruzione

1. Il contenuto del PC viene utilizzato per indirizzare la instruction memory e produrre in output l'istruzione da eseguire;
2. Il campo *op* dell'istruzione viene mandato in input alla Control Unit, mentre i campi *reg_1* e *reg_2* vengono usati per indirizzare il register file;
3. La CU produce in output i nove segnali di controllo relativi ad una operazione di tipo-R, ed in particolare $ALUOp=10$, che, dati in input alla ALU control insieme al campo *funct* dell'istruzione stabiliscono l'effettiva operazione di tipo-R che deve eseguire la ALU;
4. Nel frattempo, il register file produce in output i valori dei due registri *reg_1* e *reg_2*, mentre il segnale $ALUSrc=0$ stabilisce che il secondo input della ALU deve provenire dal secondo output del register file;
5. La ALU produce in output il risultato della computazione, che attraverso il segnale *MemtoReg* viene presentato in input al register file (Write data).

Note:-

Tutti questi passi devono essere eseguiti nello stesso ciclo di clock.

1.3 Dal monociclo al multiciclo

Le macchine monociclo sono estremamente inefficienti perché portano a sprecare cicli di clock nel caso di operazioni semplici. Per trasformare una macchina da monociclo in multiciclo si scompone l'esecuzione di ciascuna istruzione in un insieme di passi ognuno dei quali eseguibile in un singolo ciclo di clock (per cui ogni passo deve richiedere più o meno lo stesso tempo di esecuzione, perché la durata del clock va commisurata alla durata del passo più lungo).

Note:-

Le parole "passo", "fase", "stadio" e "stage" sono intercambiabili.

1.3.1 MIPS - Versione multiciclo

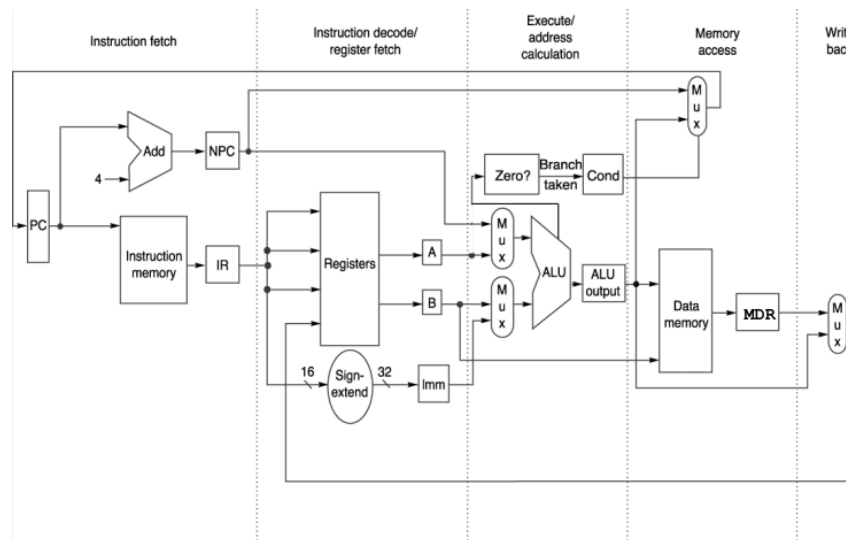


Figure 1.9: Il Datapath suddiviso nelle 5 fasi standard

Note:-

Instruction Memory e Data Memory corrispondono alla cache di primo livello (L1).

1. *Instruction Fetch*: il PC indirizza le istruzioni (IR) e contemporaneamente incrementa il PC di 4 (salvato in NPC che verrà instradato alla ALU per eventuali istruzioni di salto). Da notare che la ALU non viene utilizzata quindi si potrebbe pensare di usarla al posto dell'adder, ma quando si introdurrà il concetto di *pipeline* si vedrà che la ALU sarà occupata dalla fase di esecuzione di un'altra istruzione;
2. *Instruction Decode / Register Fetch*: vengono sempre prelevati i valori dei 2 registri di destinazione (anche se l'istruzione non è di tipo-R) e messi in 2 *registri nascosti* A e B. Inoltre il registro Imm viene memorizzato nell'eventualità che sia un'istruzione di tipo-I. Oltre a ciò si memorizza un'eventuale salto (usando un adder apposta);
3. *Execute / Address Calculation*: la ALU fa i suoi calcoli in base al tipo di istruzione;
4. *Memory Access*: nei casi di load e store si accede alla memoria. Per la load si preleva il risultato della fase di esecuzione e viene salvato nel registro MDR. Se si sta eseguendo un'istruzione di tipo-R o di tipo-I questa fase viene saltata;
5. *Write Back*: il risultato viene scritto sul registro di destinazione. Non è necessaria per le store.

Note:-

Non necessariamente l'esecuzione di un'istruzione racchiude tutte le fasi. Ogni fase avviene in un ciclo di clock.

Definizione 1.3.1: Registro "nascosto"

I risultati di ciascuna fase sono memorizzati da registri "nascosti" in cui viene salvato il risultato dell'output di una fase in modo che diventi l'output della fase successiva. Non sono indirizzabili e servono solo a velocizzare l'esecuzione delle istruzioni.

Domanda 1.2

Quali fasi sono coinvolte nell'esecuzione di una "load"?

Risposta: tutte.

Domanda 1.3

Quali fasi sono coinvolte nell'esecuzione di un'istruzione di tipo-R?

Risposta: 4, perché non si deve accedere alla memoria.

Domanda 1.4

Quali fasi sono coinvolte nell'esecuzione di una "store"?

Risposta: 4, perché non esiste la fase di Write Back.

Domanda 1.5

Quali fasi sono coinvolte nell'esecuzione di un'istruzione di salto?

Risposta: 3, Instruction Fetch, Instruction Decode e Address Calculation.

Note:-

Tutto questo è più efficiente della versione monociclo perché ogni fase usa circa $\frac{1}{5}$ del ciclo di clock e non sempre si devono attraversare tutte le fasi.

1.3.2 Control Unit multiciclo

Definizione 1.3.2: Control Unit - multiciclo

Ogni fase sarà descritta da una tabella di verità i cui input sono:

- ⇒ il tipo di istruzione in esecuzione;
- ⇒ la fase corrente nella sequenza di esecuzione dell'istruzione.

L'output invece sarà:

- ⇒ l'insieme di segnali da asserire in quella fase;
- ⇒ la fase successiva nella sequenza di esecuzione dell'esecuzione.

Note:-

Gli output della Control Unit sono una descrizione informale di una macchina di Moore.

Corollario 1.3.1 Macchina di Moore

La macchina di Moore è un automa a stati finiti in cui:

- ⇒ a ogni stato è associato un output che dipende solo da quello stato (i segnali da asserire);
- ⇒ la transizione nello stato successivo dipende solo dallo stato corrente e dall'input.

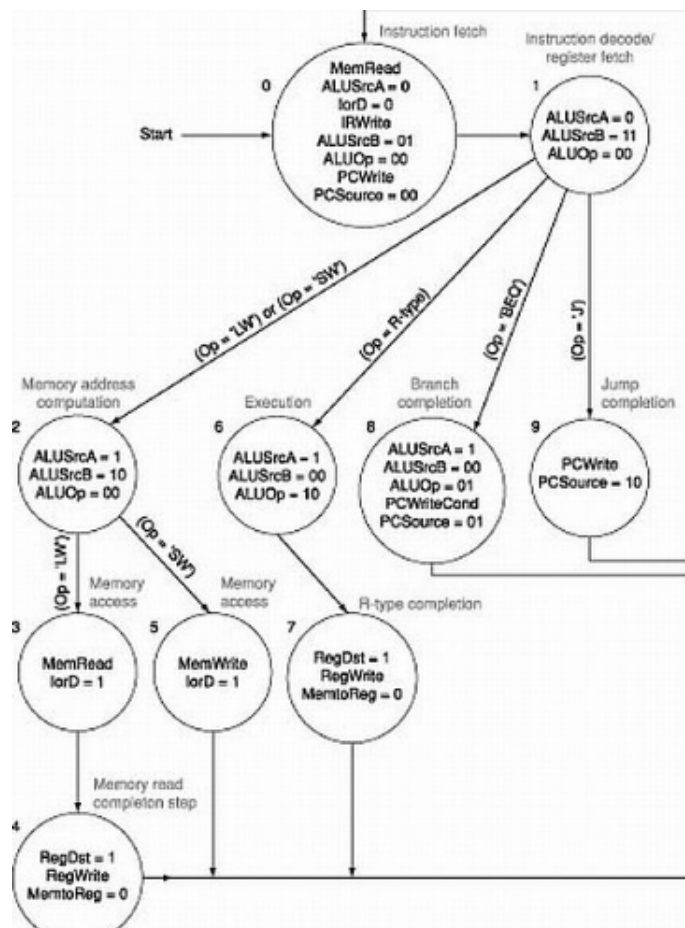


Figure 1.10: Unità di Controllo multiciclo

1.3.3 Macchine a stati finiti e Microprogrammi

Domanda 1.6

Che differenza c'è tra un datapath controllato da un DFA e uno controllato da un Microprogramma?

Risposta: nessuna, è solo un modo di descrivere l'informazione.

Definizione 1.3.3: Microprogrammazione

Tecnica per descrivere il funzionamento della Control Unit mediante una rappresentazione simbolica del controllo in forma di microistruzioni indirizzate da un micro Program Counter.

Note:-

Un microprogramma è solamente una rappresentazione testuale di una macchina di Moore, ogni microistruzione corrisponde a uno stato e il micro PC rappresenta il registro degli stati.

Domanda 1.7

Perché usare una rappresentazione o un'altra?

Risposta: è una questione di convenienza in base alla complessità della funzione (dipende sia dalle istruzioni ISA che dalla loro scomposizione)..

Note:-

Per motivi storici le prime Control Unit furono descritte tramite microprogrammazione.

1.3.4 Complex Instruction Set Computer (CISC)

Negli anni '60 e '70 l'Instruction Set diventa molto grande e, a posteriori, sarà chiamato CISC. In alcuni casi si raggiungevano centinaia di istruzioni.

Definizione 1.3.4: Completa ortogonalità

Ogni argomento di ogni istruzione poteva indirizzare la memoria usando una qualsiasi modalità di indirizzamento possibile^a.

^aVisto in "Storia dell'informatica".

Note:-

Questa caratteristica permetteva molta flessibilità, ma al tempo stesso rendeva la Control Unit complicata e molto lenta.

Domanda 1.8

Perché si utilizzava un ISA così complesso?

1. All'epoca l'accesso alla RAM erano molto più elevati di quelli dell'accesso alla ROM che conteneva i microprogrammi per le istruzioni;
2. Non esistevano CPU dotate di cache (introdotte solo nel 1968 e divennero di uso comune solo dopo molti anni);
3. Per semplificare il lavoro del programmatore;
4. La RAM era poca e costosa, istruzioni più espressive generano eseguibili più corti;
5. I microprogrammi permettevano di aggiungere istruzioni all'Instruction Set.

1.3.5 Restricted Instruction Set Architetture (RISC)

Tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni 80' la concezione delle architetture inizia a mutare. Nel 1980, D. Patterson e C. Sequin progettano una CPU la cui Control Unit non è descritta da un microprogramma e coniano i termini CISC e RISC. Il loro progetto si evolgerà nelle architetture SPARC (Scalable Processor ARChitecture), usate dalla SUN Microsystem.

Contemporaneamente, J. Hennessy lavora a un'architettura simile per ottimizzare il *pipeline*: MIPS (Microprocessor *without* Interlocked Pipelines Stages), visto precedentemente.

Domanda 1.9

Qual è l'idea alla base delle architetture RISC?

1. La CPU esegue un numero limitato di istruzioni macchina semplici (che richiedono datapath più corti e una Control Unit semplice) e quindi avere un ciclo di clock più corto;
2. L'accesso alla RAM va limitato il più possibile;
3. Le istruzioni devono principalmente usare registri come argomenti.

In dettaglio:

- ⇒ Rinunciare a un sofisticato livello di microcodice;
- ⇒ Definire istruzioni di lunghezza fissa e facili da decodificare;
- ⇒ La memoria RAM deve essere indirizzata solo da operazioni di LOAD e STORE;
- ⇒ Avere molti registri;
- ⇒ Sfruttare la pipeline.

Note:-

Questo contribuì al successo dei processori RISC che portò alla scomparsa dei CISC.

1.4 Pipeline

2

Instruction Level Parallelism (ILP)

3

Caching

4

Architetture Parallele

5

Quantum Computing

6

GPU

