


Le memorie Cache associative

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Informatica
alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento Patterson: 5.3, 5.4, 5.8


Sommario

Circuito di lettura / scrittura di una cache a mappatura diretta

Cache associative

Cache n-associative

Accesso alle cache

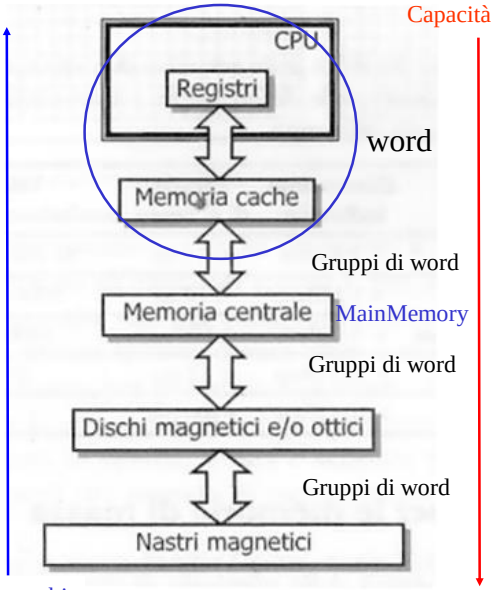
Gerarchia di memorie

Livelli multipli di memorie con diverse dimensioni e velocità.

Nel livello superiore troviamo un sottoinsieme dei dati del livello inferiore.

Ciascun livello vede il livello inferiore e viceversa.

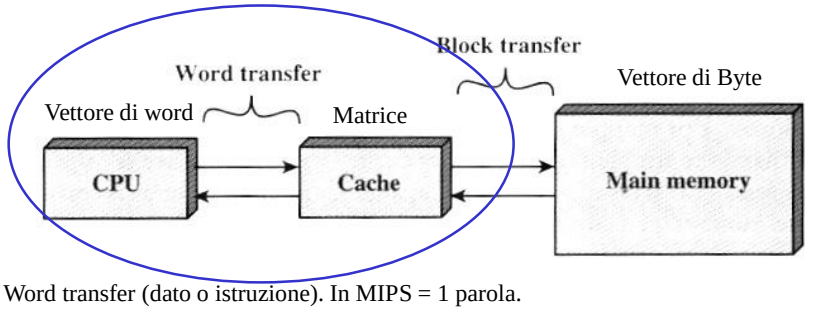
Cache (memoria nascosta)



Principio di funzionamento di una cache

Scopo: fornire alla CPU una velocità di trasferimento pari a quella della memoria più veloce con una capacità pari a quella della memoria più grande.

Una cache "disaccoppia" i dati utilizzati dal processore da quelli letti/scritti nella Memoria Principale.



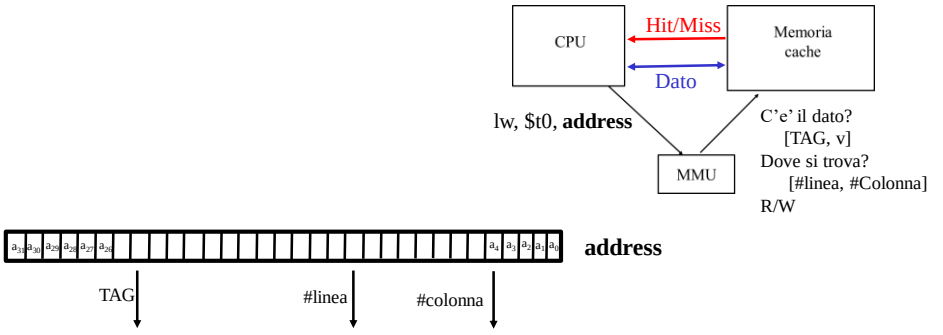
Word transfer (dato o istruzione). In MIPS = 1 parola.
Block transfer (più parole consecutive in MM)

La cache contiene una copia di parte del contenuto della memoria principale.

MMU, CPU e Cache

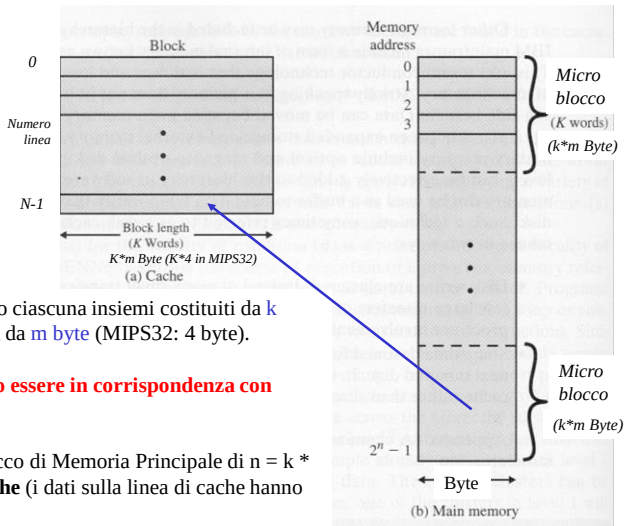
La MMU porta nella cache primaria i dati richiesti mentre il binomio processore-memoria sta lavorando.

1) Controlla se una parola è in cache (Hit).
2) Se si verifica una miss, porta una parola (e quelle vicine) in cache, prelevandole dal livello inferiore della gerachia.



Determinazione della legge di corrispondenza generale (linee di k parole)

4 misure di capacità:
- Cache.
- Linea di cache.
- Parola.
- Byte.



Le N linee di una cache contengono ciascuna insiemi costituiti da k parole. Ciascuna parola è costituita da m byte (MIPS32: 4 byte).

Linee diverse della cache possono essere in corrispondenza con macro-blocco di MM diversi.

Metto in corrisponza un micro-blocco di Memoria Principale di n = k * m byte con una **intera linea di cache** (i dati sulla linea di cache hanno indirizzi adiacenti in MM).

Come ottengo l'indirizzo all'interno della cache corrispondente ad un indirizzo di memoria principale?

Determinazione di TAG, #linea, #colonna

La cache con linee di **ampiezza pari a 4 parole** (**micro-blocco** = 4 parole) da 32 bit (**4 byte**),
e **altezza di 8 linee**:
Il micro-blocco di dati della memoria principale che può essere contenuto in ogni linea di cache, ha dimensioni dim_linea = 4 parole * **4 byte** = 16 byte.
La capacità della cache sarà C = **8 linee** * dim_linea = **8** * 16 = 128 byte (**macro-blocco** di MM).

lw $t0, 220($zero)
Indirizzo_cache = Indirizzo_Memoria principale *modulo* dimensione_macro-blocco_MM
220 / 128 Byte = 1 → mappiamo il 2º macro-blocco di MM sulla cache.
resto = 92 è l'indirizzo all'interno della cache (da trasformare in #linea, #colonna)

Numero linea = resto *modulo* dim_linea (capacità_micro-blocco)
92 / 16 = 5 → La word è contenuta nella linea #5, => 6ª linea della cache.
resto = 12 è l'indirizzo all'interno della linea della cache (numero di byte nella linea, da trasformare in #colonna)

12 / 4 = 3 → La word è la 4ª parola nella 6ª linea di cache. Resto = 0 è il numero di byte intra-word.

Il dato viene letto (trasferito nella CPU) assieme ai byte 221, 222, 223 della stessa 6ª linea della cache.

NB 220 / 16 = 13 → Riempio interamente 8 linee di una prima cache virtuale + 5 linee della cache reale.

Le diverse linee possono provenire da macro-blocchi diversi della MM.

Determinazione di TAG e indirizzo mediante shift

0000 0000 1101 11(00) lw $t0, 220($zero) 220=128+64+16+8+4

Cache di 8 linee x 4 parole di 4 Byte ciascuna => Capacità della cache = 8x4x4 Byte = 128 Byte
$\log_2$ 128 = 7 Numero di bit per indirizzare la cache.

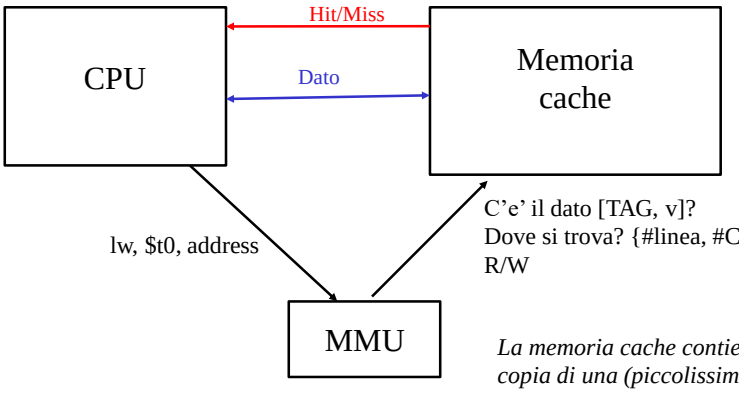
Indirizzo / capacità_cache (dimensione macro-blocco) 220 / 128 = 1 **TAG**

R = 92 (indirizzo intra-cache)
Resto / dim_linea (capacità micro-blocco) 92 / 16 = 5 **#Linea**
$\log_2$ 8 = 3 Numero di bit per indirizzare la linea (indice)
I 3 bit più significativi dell'indirizzo intra-cache indicano il numero di linea della cache indirizzata (per lettura / scrittura)

R = 12 (numero di byte nella linea)
Resto / dimensione della word (numero di Byte per word) 12 / 4 = 3 **#Numero word**
$\log_2$ 4 = 2 Numero di bit per indirizzare la parola nella linea
Questi bit indicano il numero di colonna (parola) all'interno della linea della cache.

I 25 bit in verde identificano il campo TAG. E' il numero di macro-blocco di MM associato all'indirizzo 220.

Le domande alla MMU sulla memoria cache



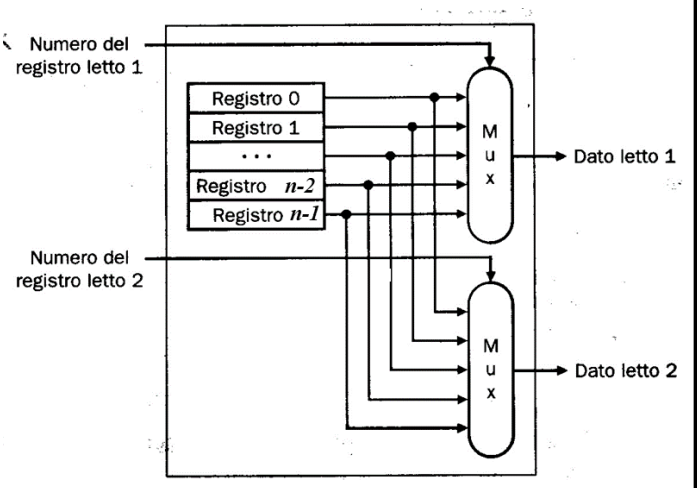
La memoria cache contiene una copia di una (piccolissima) parte dei dati della memoria principale.

Parte dati.
Selezione del dato gerarchica: {#Linea, #Word (colonna)}
Schema a 2 livelli (selezione della linea – cf. Register File + selezione della colonna)

Parte di controllo: {TAG, v} + Write

Porta di lettura di un dato (ampiezza 1 parola)

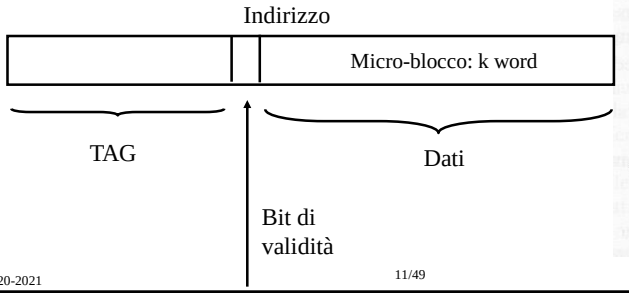
Register file
Pochi registri,
2 porte di lettura

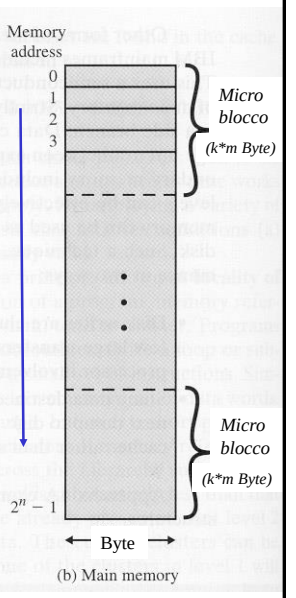


Cache: numero maggiore di celle di memoria. 1 sola porta di lettura. **Accesso a 2 livelli.**

Come leggere dalla cache

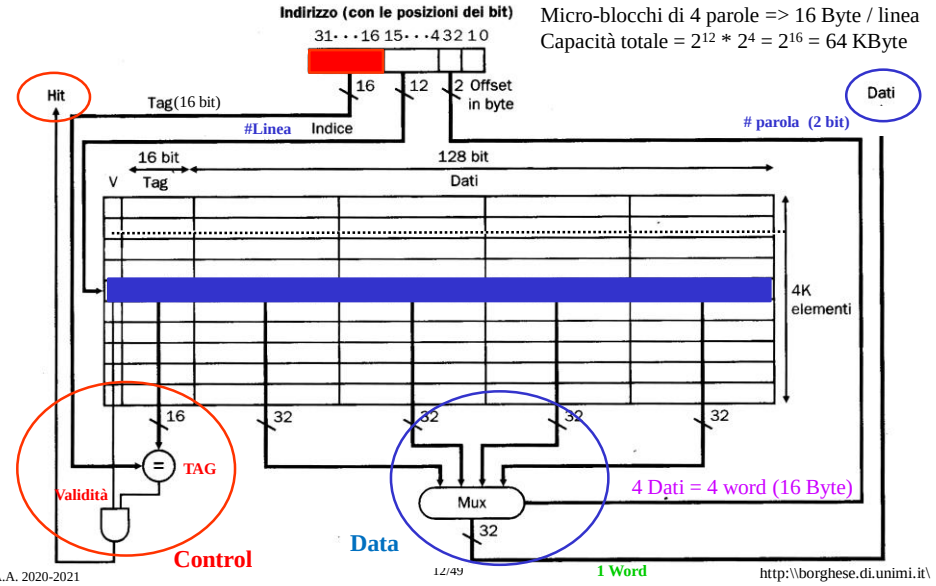
1) Individuare la linea della cache dalla quale leggere. Operazione analoga all'indirizzamento del register file.
2) Leggere la linea.
3) Confrontare il campo tag dell'indirizzo con il campo tag della linea di cache (tag è il numero di macro-blocco di MM)
4) Controllare il bit di validità della linea di cache.
5) Rispondere con hit/miss
6) *Selezionare la parola all'interno della linea.* Per blocchi più ampi di una parola, occorre individuare una delle parola tra le k presenti nella linea di cache.





Porta di lettura della cache, blocchi > 1 word

Parole di 32 bit (4 byte)
4 k linee – 2^{12} =4,096 linee
Micro-blocchi di 4 parole => 16 Byte / linea
Capacità totale = $2^{12} * 2^4 = 2^{16}$ = 64 KByte



Sommario

Circuito di lettura / scrittura di una cache a mappatura diretta

Cache associative

Cache n-associative

Accesso alle cache

Problemi con le cache a mappatura diretta

- Riempimento non ottimale (a macchia di leopardo): sostituzione del conenuto delle linee di cache per accesso alla stessa linea di cache con dati appartenenti a blocchi diversi di MM (anche nel caso di cache quasi vuota).
- Memoria associativa: il contenuto viene recuperato fornendo degli elementi dei dati, parte del contenuto, detti chiavi (e.g. ricerca nei data-base, ricerca attraverso ontologie WEB).
- Nelle memorie associative delle architetture si utilizza una parte dell'indirizzo come chiave, per recuperare il dato. Viene recuperato il dato che ha quella particolare chiave.

Occorre quindi sostituire il meccanismo di accesso diretto (parte dell'indirizzo -> numero di linea) con un meccanismo associativo che identifichi la linea associata alla chiave (parte dell'indirizzo = chiave di ricerca del numero di linea).

Occorre provare la chiave fornita dall'indirizzo su tutte le "serrature" della cache.

Meccanismo di accesso

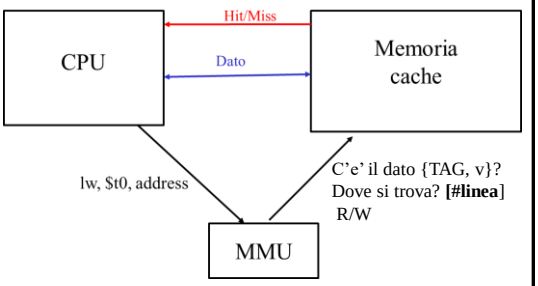
lw $t0, 220($zero)

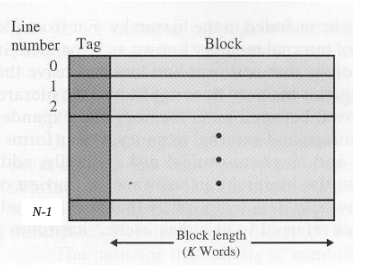
Come ricavo il #Linea?

*Identifico la linea, confrontando la **chiave** contenuta nell'indirizzo con la chiave di tutte le linee di cache.*

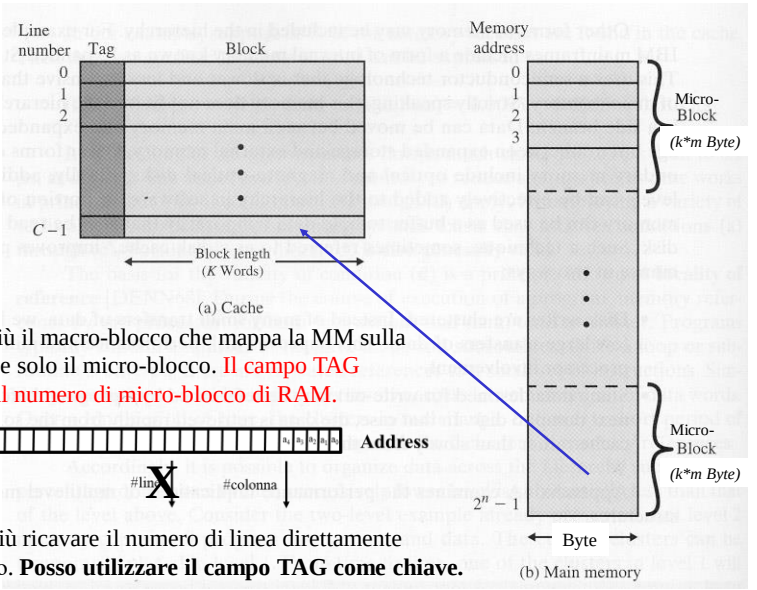
Come ricavo la chiave?

Come ricavo il numero di parola (word)?





Memoria associativa

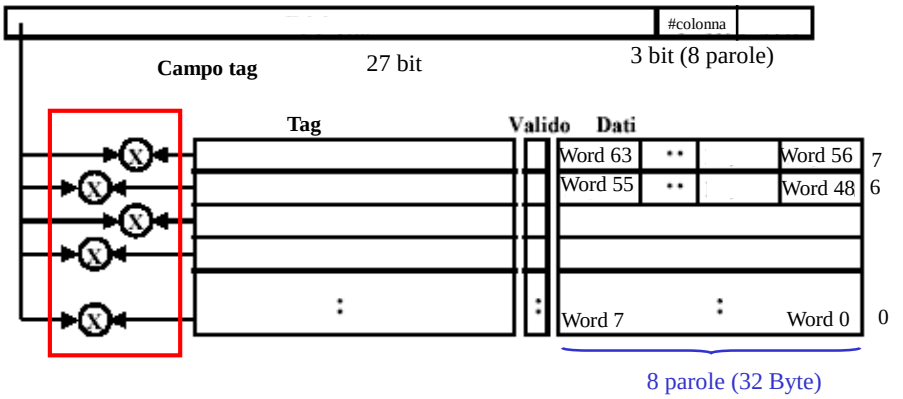


Non esiste più il macro-blocco che mappa la MM sulla cache, rimane solo il micro-blocco. Il campo TAG rappresenta il numero di micro-blocco di RAM.

Non posso più ricavare il numero di linea direttamente dall'indirizzo. **Posso utilizzare il campo TAG come chiave.**

Memorie associative

Memoria associativa con linee di 8 parole => Dimensione della linea: 8 x 4 Byte = 32 Byte



Numero di linee = 8

Capacità della cache: 32 x 8 = 256 Byte

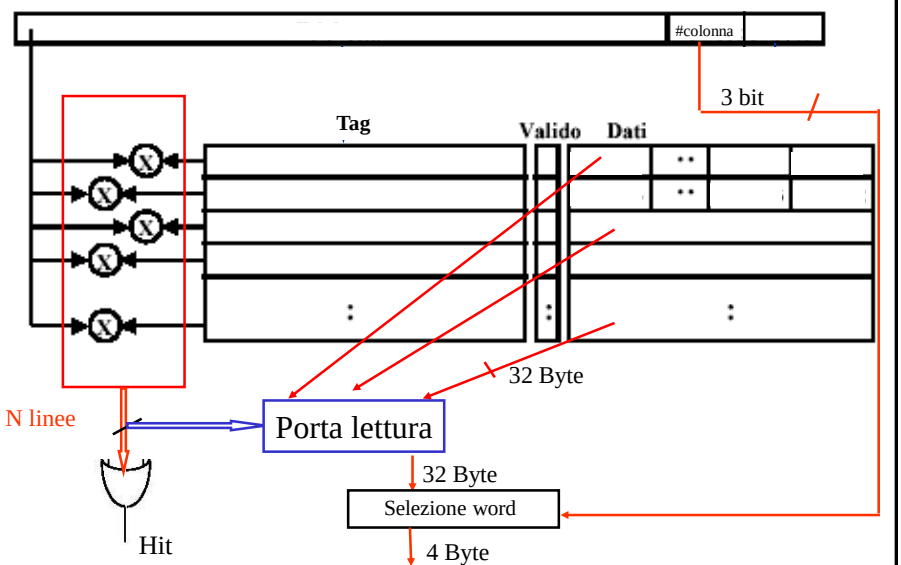
Il numero di linea non entra nell'indirizzamento

Consentono di caricare un blocco di Memoria Principale in una qualsiasi linea di cache.

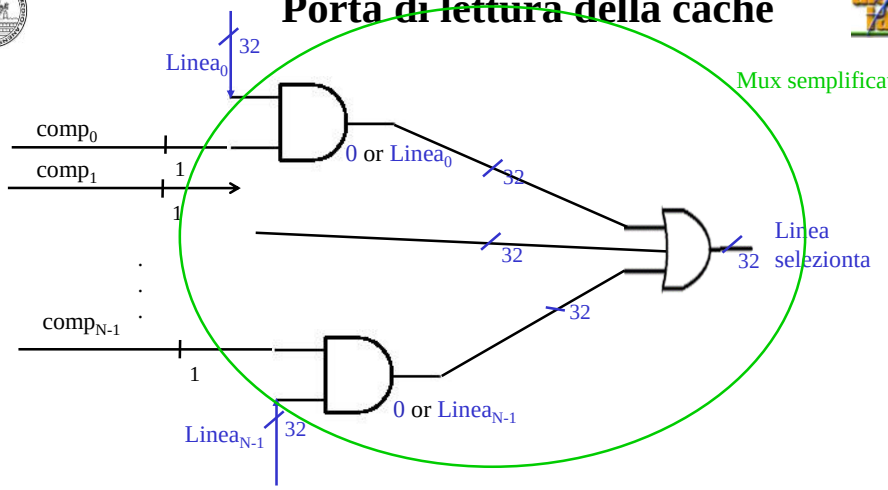
E' una memoria completamente associativa.

Tramite una schiera di comparatori individuo in quale linea si trova il mio dato.

Lettura di una memoria associativa

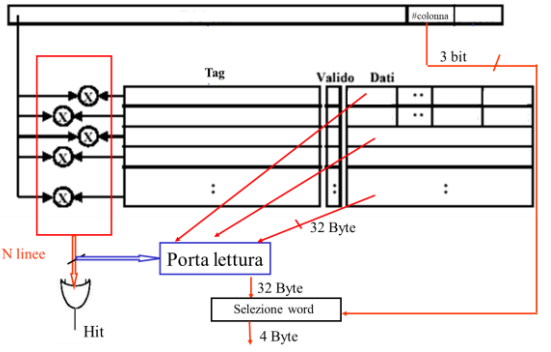


Porta di lettura della cache

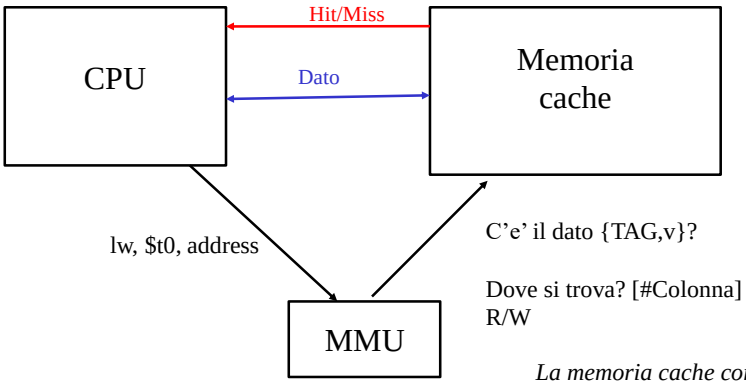


Alcuni dettagli

- L'uscita del comparatore di una linea va in AND con il bit di validità di quella linea. Il segnale diventa quindi = 1 quando il dato è presente sulla linea (ha lo stesso TAG) ed è valido.
- Le uscite dagli N comparatori, ciascuno associato ad una linea diversa, possono avere al massimo un "1" -> esiste un'unica copia del dato della MM



Le domande alla MMU sulla memoria cache



La memoria cache contiene una copia di una (piccolissima) parte dei dati della memoria principale.

Parte dati:
Schema a 2 livelli (selezione della linea mediante chiave + selezione della colonna mediante indice)
Parte di selezione del dato gerarchica: {#Linea, #Word}

Parte di controllo: {TAG,v}

Sommario

Circuito di lettura / scrittura di una cache a mappatura diretta

Cache associative

Cache n-associative

Accesso alle cache

Memorie n-associative

n-associative o set associative o a n vie.

La memoria è suddivisa in n insiemi, o banchi, ciascuno di k linee, posti in parallelo.

Cache: *è* l'insieme dei banchi più i circuiti che li gestiscono.

Insieme (banco): cache elementare.

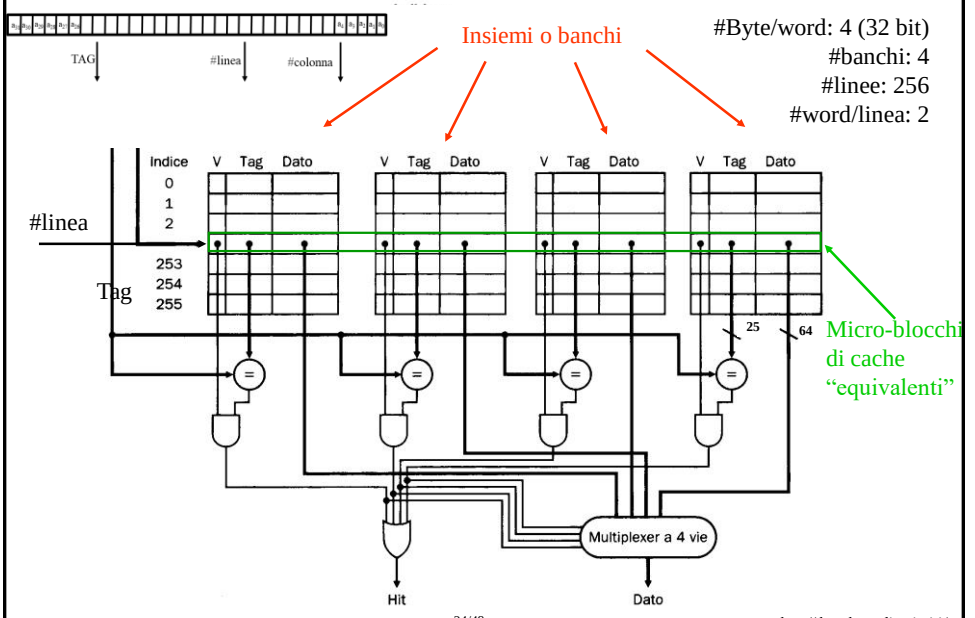
Capacità della cache: #parole = #banchi * (#linee / banco) * (#parole / linea).

Micro-blocco (linea di cache): #parole (byte) della MM adiacenti, contenute in una linea di uno dei banchi della cache.

La corrispondenza tra Memoria Principale e linea di un banco è a mappatura diretta.
La corrispondenza tra Memoria Principale e i diversi banchi è associativa.

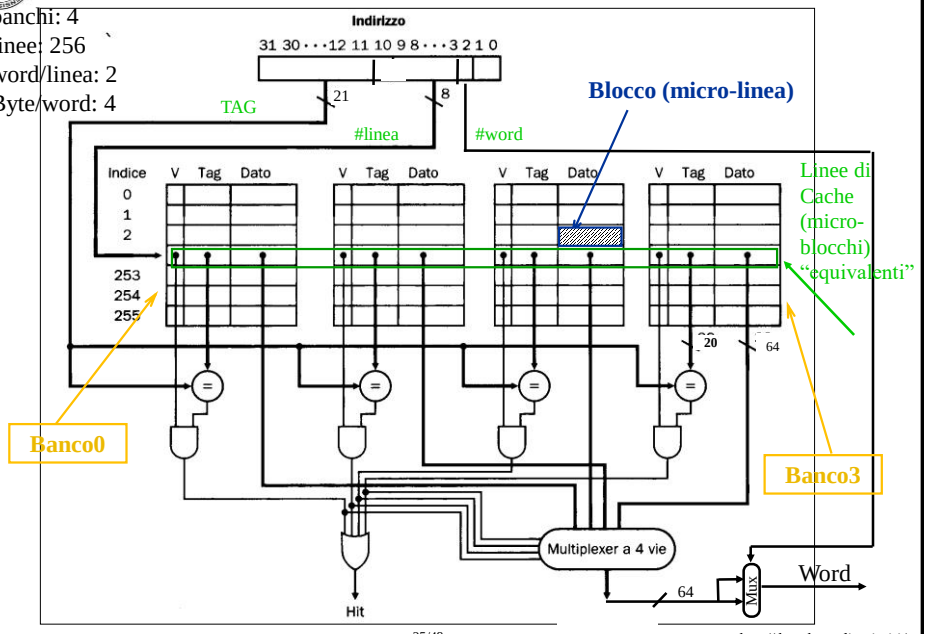
Associatività. Per cercare un dato non devo più analizzare tutte le linee di una cache, ma un'unica linea, ma devo analizzare quella linea sui diversi banchi.

Memorie n-associative: struttura



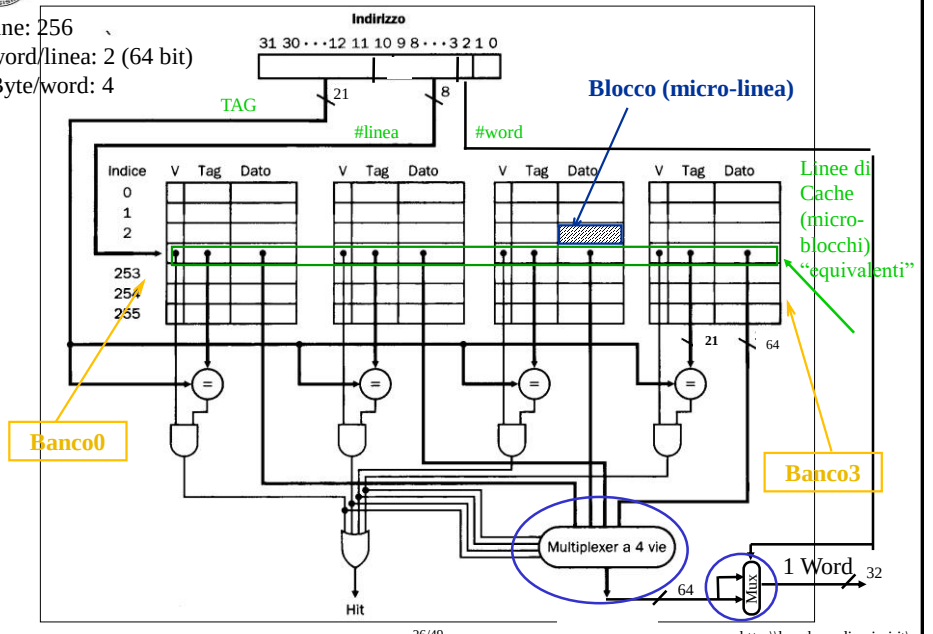
Memorie n-associative: struttura completa

#banchi: 4
#linee: 256
#word/linea: 2
#Byte/word: 4



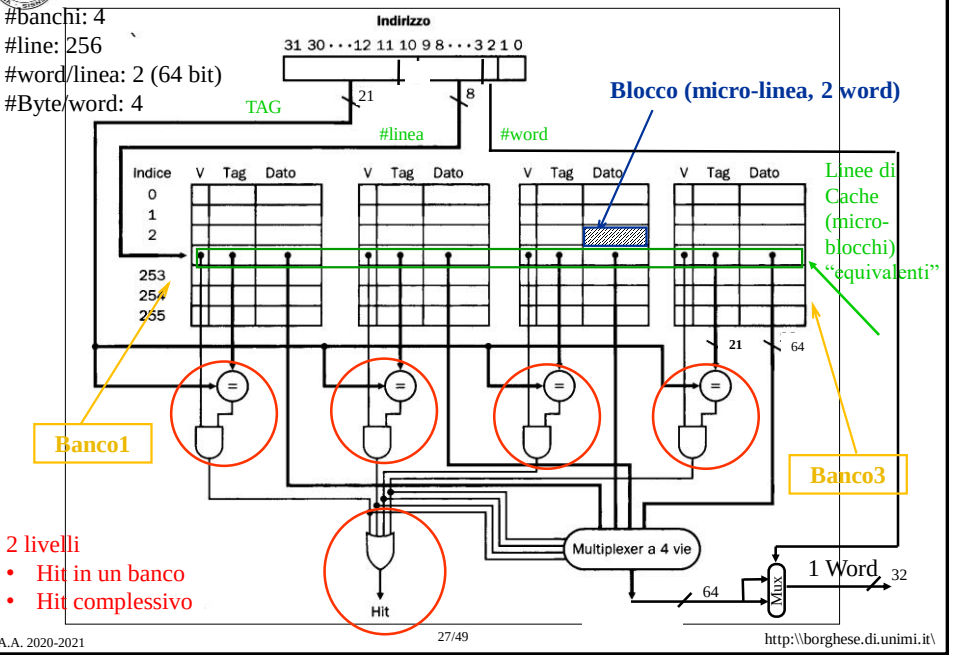
Memorie set-associative: data-path

#line: 256
#word/linea: 2 (64 bit)
#Byte/word: 4



Memorie set-associative: control path

#banchi: 4
#line: 256
#word/linea: 2 (64 bit)
#Byte/word: 4



2 livelli
- Hit in un banco
- Hit complessivo

Accesso a cache ad n-vie

1) **INDICE**. Se la parola richiesta è memorizzata in cache, si trova in una particolare linea di uno dei banchi. Questa linea è individuata dall'indice. L'indice è costituito da k bit, dove k = $\log_2$(#linee).

2) **NUMERO COLONNA.** Estrae la parola dalla linea.

3) **TAG** – contiene numero del macro-blocco della MM a cui appartiene il dato. Cerca il tag dell'indirizzo di MM all'interno dei **TAG dei diversi banchi**, associati alla stessa linea individuata sui diversi banchi.

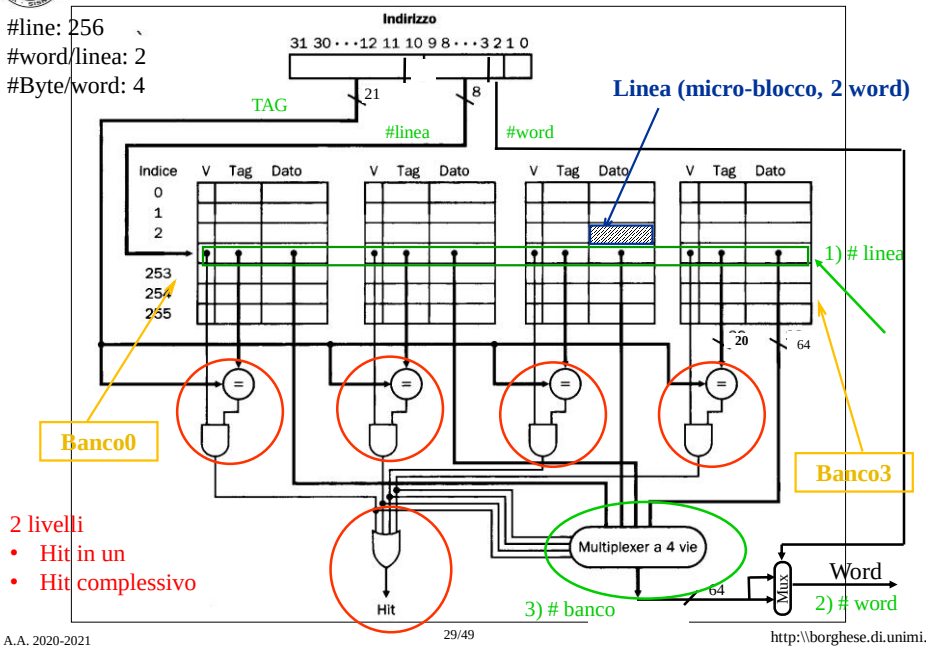
Indice (numero di linea) e colonna sono equivalenti alla mappatura diretta.

Qui si introduce un terzo livello di indirizzamento attraverso **l'associatività tra banchi** (accesso per chiave).

L'insieme dei segnali di HIT pilotano anche il «MUX» che trasferisce in uscita il contenuto del banco opportuno della cache.

Memorie set-associative

#line: 256
#word/linea: 2
#Byte/word: 4



Sommario

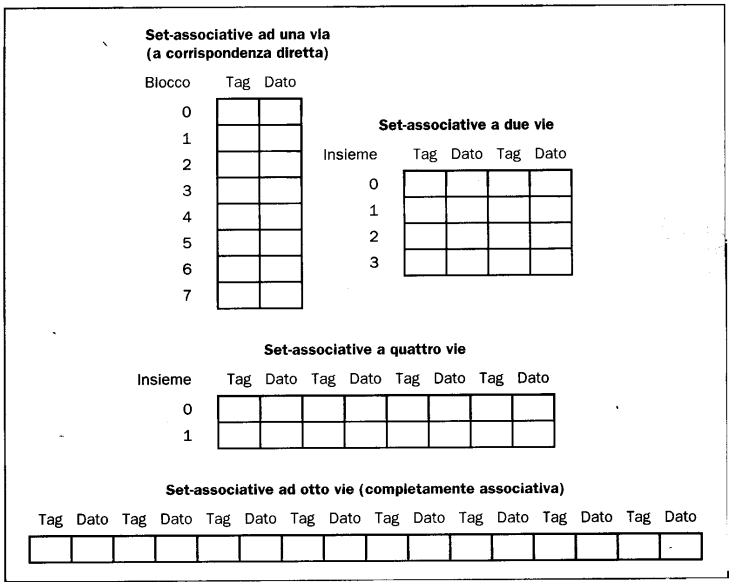
Circuito di lettura / scrittura di una cache a mappatura diretta

Cache associative

Cache n-associative

Accesso alle cache

Dalle cache a mappatura diretta alle cache associative



Criteri di progettazione

Parametri di definizione della struttura di una cache:
- Capacità
- Grado di associatività

Cache primaria: massimizzo Hit rate.

Cache secondaria: minimizzo Miss penalty (massimizzo transfer rate).

Tassonomia del funzionamento

HIT Successo nel tentativo di accesso ad un dato: è presente al livello superiore della gerarchia.

MISS Fallimento del tentativo di accesso al livello superiore della gerarchia => il dato o l'indirizzo devono essere cercati al livello inferiore.

HIT_RATE Percentuale dei tentativi di accesso ai livelli superiori della gerarchia che hanno avuto successo.
HIT_RATE = Numero_successi / Numero_accessi_memoria

MISS_RATE Percentuale dei tentativi di accesso ai livelli superiori della gerarchia che sono falliti
MISS_RATE = Numero_fall. / Numero_accessi_memoria

HIT_RATE + MISS_RATE = 1

HIT TIME Tempo richiesto per verificare se il micro-blocco contenente il dato è presente al livello attuale della memoria.

MISS_PENALTY Tempo richiesto per sostituire il micro-blocco di memoria mancante al livello superiore.

Gestione dei fallimenti di una cache

La gestione avviene tra CPU e MMU.

Hit – è quello che vorremmo ottenere, il funzionamento della CPU non viene alterato.

Miss – in lettura devo aspettare che il dato sia pronto in cache -> eccezione particolare della CPU che crea uno **stallo** della CPU. **Nelle CPU super-scalari si sfrutta l'esecuzione fuori ordine per nascondere questa latenza.**

Passi da eseguire in caso di Miss (miss penalty):

1) Bloccare tutte le istruzioni nella pipeline (blocco dei registri di pipeline per uno o più cicli di clock)
2) Richiedere che la MM legga e porti fuori il micro-blocco contenente il dato da leggere.
3) Trasferire il micro-blocco in cache, aggiornare i campi validita' e tag.
4) Riavviare l'esecuzione della pipeline.

NB Il programma non può continuare!!

Tipi di miss di una cache

3-C miss model: compulsory, capacity and conflict.

Miss obbligate. Quando vengono caricati dei dati **per la prima volta** in una linea. Sono chiamate anche miss da partenza a freddo (**cold-start**).

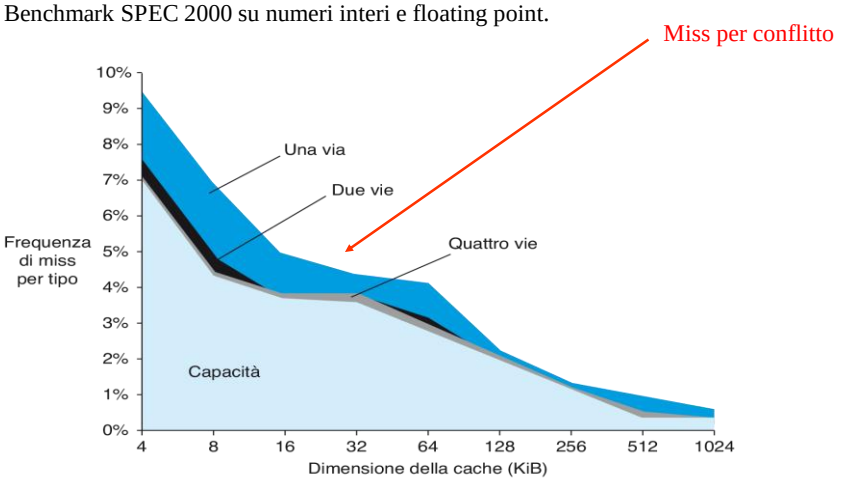
Miss per capacità. Inevitabili. La cache non può contenere tutti i micro-blocchi di dati e/o istruzioni che servono per l'esecuzione di un programma: il micro-blocco viene caricato in cache, poi scaricato e poi caricato ancora.

Miss per collisione. Più micro-blocchi devono essere trasferiti nella stessa linea. In questo caso i trasferimenti devono essere accodati e sui micro-blocchi successive si verificano miss.

Quale pesa di più?

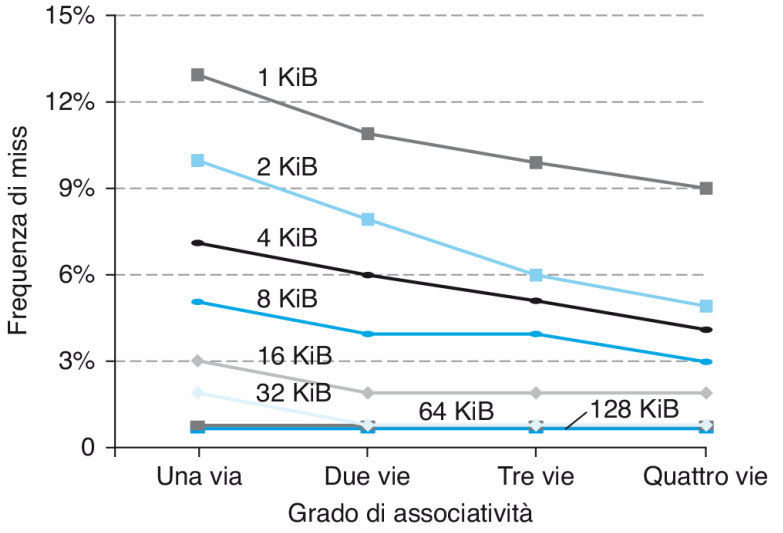
Valutazione su benchmark

Benchmark SPEC 2000 su numeri interi e floating point.



Cold-start miss: 0,006%. Incremento oltre le 4-vie non è apprezzabile.

Quanta associatività?



All'aumentare dell'associatività, aumenta la complessità e aumenta il tempo di accesso.

Dove si può posizionare un blocco di MM in cache?

Corrispondenza diretta: in un'unica posizione.
- Memoria a 1 via. Un unico banco.
- n linee (posizione individuata dall'indice).

Completamente associative: in n posizioni (n banchi).
- Ciascun banco è costituito da 1 linea.
- n insiemi o banchi (equivalenti a n memorie indipendenti, banco individuato mediante chiave)

m-associative: in m posizioni (m grado di associatività).
- Ho m insiemi (banchi)
- Ciascun insieme è costituito da n linee (posizione individuata dall'indice)

Mappatura diretta

4 linee di 1 word ➔ Capacità della cache = 16 Byte

lw $t0, 0($0)
lw $t1, 32($0)
lw $t2, 0($0)
lw $t3, 24($0)
lw $t4, 32($0)

0/16 = 0 R = 0
0/4 = 0 (linea)

32/16 = 2 R = 0
0/4 = 0 (linea)

24/16 = 1 R = 8
8/4 = 2 (linea)

Indirizzo MM	Hit o Miss	Contenuto delle linee di cache dopo ogni lw			
		0	1	2	3
0	Miss	Mem[0]			
32	Miss	Mem[32]			
0	Miss	Mem[0]			
24	Miss	Mem[0]		Mem[24]	
32	Miss	Mem[32]			

4 Linee di 1 parola

5 Miss (2 miss per cold-start, 3 miss per collisione)

A 2-vie – prima possibilità

2 Banchi da 2 linee di 1 word ciascuna ➔ Capacità della linea = 8 Byte; capacità della cache = 16 Byte.

lw $t0, 0($0)
lw $t0, 32($0)
lw $t2, 0($0)
lw $t3, 24($0)
lw $t4, 32($0)

0/8 = 0 R = 0
0/4 = 0 (linea 0)
➔ banco 0)

32/8 = 4 R = 0
0/4 = 0 (linea 0)
➔ banco 1 (la linea 0 del banco 0 è già occupata)

24/8 = 3 R = 0
0/4 = 0 (linea0)
➔ banco 0 o banco 1

32/8 = 4 R = 0
0/4 = 0 (linea 0)
➔ banco 0 (la linea 0 del banco 1 è già occupata e di recente)

Indirizzo MM	Hit o Miss	Contenuto delle linee di cache dopo ogni lw			
		Banco 0_{lin0}	Banco 0_{lin1}	Banco 1_{lin0}	Banco 1_{lin1}
0	Miss	Mem[0]			
32	Miss			Mem[32]	
0	Hit	Mem[0]			
24	Miss	Mem[0]		Mem[24]	
32	Miss	Mem[32]		Mem[24]	

4 Miss (2 miss di cold-start, 2 per collisione)

A 2-vie ottimizzata

2 Banchi da 2 linee di 1 word ciascuno ➔ Capacità del banco = 8 Byte; capacità della cache = 16 Byte.

lw $t0, 0($0)
lw $t1, 32($0)
lw $t2, 0($0)
lw $t3, 24($0)
lw $t4, 32($0)

0/8 = 0 R = 0
0/4 = 0 (linea 0, banco 0)

32/8 = 4 R = 0
0/4 = 0 (linea 0, banco 0)

24/8 = 3 R = 0
0/4 = 0 (linea0 , banco 0)

Indirizzo MM	Hit o Miss	Contenuto delle linee di cache dopo ogni lw			
		Banco 0_{lin0}	Banco 0_{lin1}	Banco 1_{lin0}	Banco 1_{lin1}
0	Miss	Mem[0]			
32	Miss			Mem[32]	
0	Hit	Mem[0]			
24	Miss	Mem[24]		Mem[32]	
32	Hit	Mem[24]		Mem[32]	

3 Miss (2 Miss da cold-start, 1 miss da collisione)

Ottimizzazione della scelta del banco

A 4-vie (completamente associative)

4 Banchi da 1 linea di 1 word ciascuno ➔ Capacità della linea = 4 Byte; capacità della cache = 16 Byte.

lw $t0, 0($0)
lw $t0, 32($0)
lw $t2, 0($0)
lw $t3, 24($0)
lw $t4, 32($0)

0/4 = 0 R = 0
0/4 = 0 (linea0, banco 0)

32/4 = 4 R = 0
0/4 = 0 (linea 0, banco 1)

24/4 = 3 R = 0
0/4 = 0 (linea 0, banco 2)

Indirizzo MM	Hit o Miss	Contenuto delle linee di cache dopo ogni lw			
		Banco 0	Banco 1	Banco 2	Banco 3
0	Miss	Mem[0]			
32	Miss		Mem[32]		
0	Hit	Mem[0]			
24	Miss	Mem[0]	Mem[32]	Mem[24]	
32	Hit	Mem[0]	Mem[32]	Mem[24]	

3 Miss per cold-start

Effetto della modifica della struttura

Cambiamento nel progetto	Effetto sulla frequenza di miss	Eventuale effetto negativo sulle prestazioni
Aumento della dimensione della cache	Diminuiscono le miss di capacità	Può aumentare il tempo di accesso
Aumento del grado di associatività	Diminuisce la frequenza delle miss causate da conflitti	Può aumentare il tempo di accesso
Aumento della dimensione del blocco	Diminuisce la frequenza delle miss per un'ampia gamma di dimensioni dei blocchi a causa della località spaziale	Aumenta la penalità di miss. Blocchi molto grandi potrebbero aumentare la frequenza di miss

La capacità della cache L2 e L3 e l'ampiezza della loro linea, aumenta con continuità. Aumenta di poco la latenza, ma diminuiscono le miss.

La capacità della cache L1 è rimasta pressochè costante sia in dimensioni che in struttura (32 Kbyte, 1, 2, 4 vie).

Come si trova un blocco di MM in cache?

Corrispondenza diretta:

Indicizzazione mediante [#riga, #colonna].
Controllo del tag + bit validità del blocco (1 comparazione).

Associativa: ricerca in tutte le n linee della cache.

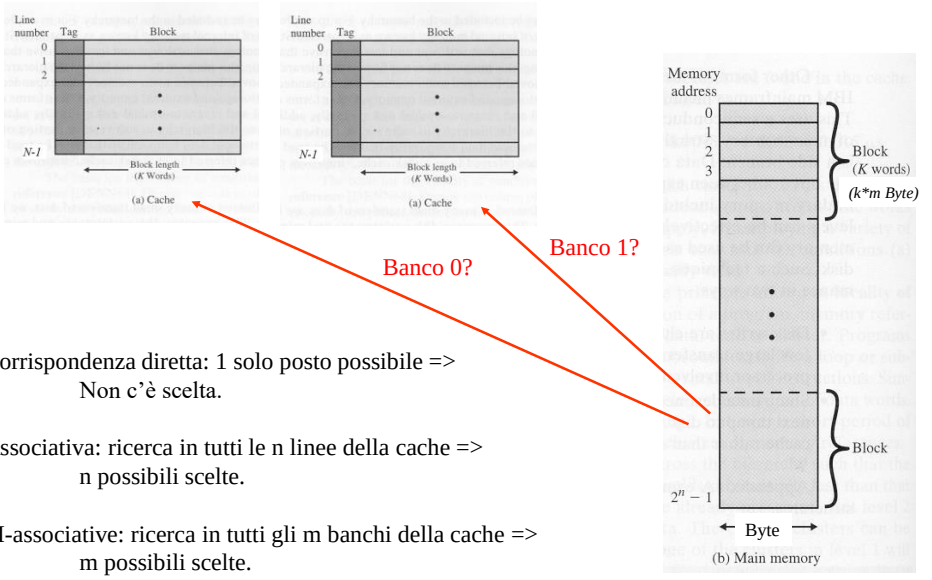
n comparazioni: controllo di tutti i tag + bit di validità + indicizzazione colonna.
La memoria virtuale è di questo tipo (tramite la *Page Table*).

m-associativa: ricerca negli m insiemi,

Indicizzazione mediante [#riga, #colonna].
Controllo del tag + bit validità della linea sugli m blocchi (m comparazioni).

Politiche di sostituzione di una linea di cache

In quale banco inserisco in cache il micro-blocco letto dalla MM?



Corrispondenza diretta: 1 solo posto possibile =>
Non c'è scelta.

Associativa: ricerca in tutti le n linee della cache =>
n possibili scelte.

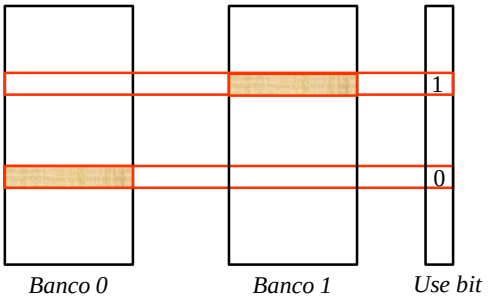
M-associative: ricerca in tutti gli m banchi della cache =>
m possibili scelte.

Politiche di sostituzione di una linea di cache

Quando posso scegliere il banco, quale banco sovra-scrivo?

LRU – Least recently Used (linea del banco utilizzato meno di recente).

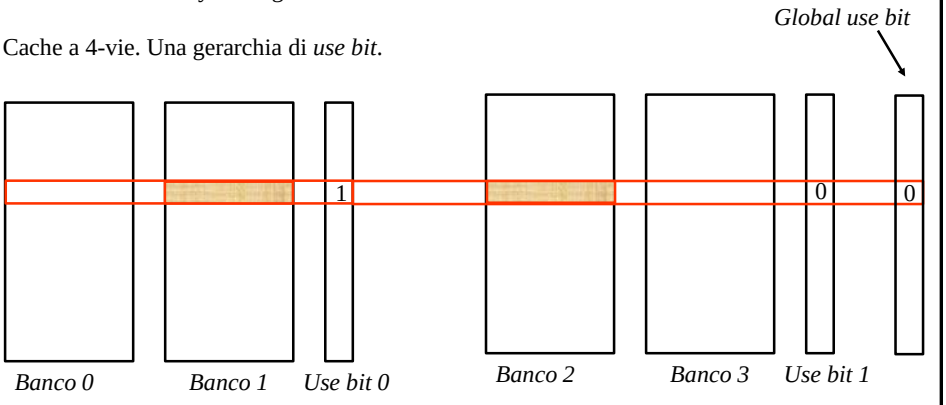
Cache a 2-vie. 1 unico bit (*use bit*) di utilizzo che viene impostato a 0 o a 1 ogni volta che viene letta/scritta la linea di uno dei due banchi.



Use bit in cache a 4-vie

LRU – Least recently Used gerarchico

Cache a 4-vie. Una gerarchia di *use bit*.



Il "Pair use bit" viene impostato a 0, quando leggo/scrivo nel banco 0/1 e a 1 quando leggo/scrivo nel banco 2/3.

Identifico il banco da cui scaricare la linea percorrendo la gerarchia degli use bit:
Global use bit = 1 (coppia di banchi più vecchi è la coppia #1: banco #2 – banco #3)
Use bit 1 = 0 (il banco più vecchio è il primo della coppia: banco #2).

Altre politiche di sostituzione

- LRU approssimato. Use bit che viene periodicamente impostato a 0 su tutte le linee (reference bit della memoria virtuale).
- LFU – Least frequently Used. Associa un contatore ad ogni linea di cache. Efficiente per memorie a 2 vie.
- FIFO – Implementazione tramite buffer circolare (cache a n-vie)
- Scelta random della linea da scaricare. Non così cattiva! Nelle cache a 2-vie, la miss rate è di circa 1.1 volte quella della politica LRU. Spesso la soluzione per cache con grado di associatività > 4.

Sommario

Gestione della memoria

I codici di errore

Gli altri dispositivi di memoria