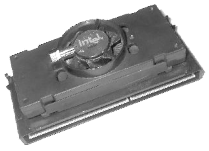
Tietokoneen rakenne

Luento 8

Suorittimen rakenne ja toiminta



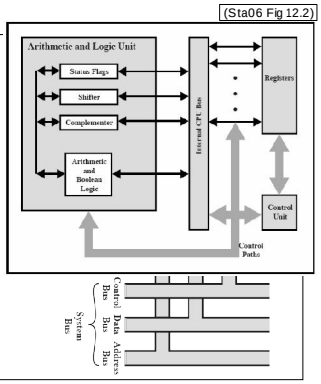
Ch 12.1-4 [Sta06]

- Rekisterit
- Käskysykli
- Liukuhihna
- Riippuvuusongelmat
- Hyppyjen käsittely

CPU:n yleisrakenne

(Sta06 Fig 12.2)

- **ALU**
  - Laskenta, vertailut
- **Rekisterit**
  - Nopeaa työtilaa
- **Prosessoriväylä**
  - Bittien siirto paikasta toiseen
- **Ohjausyksikkö (Ch 16-17)**
  - Kuka? Mitä? Milloin?
  - Kellopulssi
  - Generoi ohjaussignaalit
    - mitä seuraavalla kellopulssilla tapahtuu?
- **MMU?**
- **Välimuisti?**



Rekisterit

- **Muistihierarkian huipulla**
- **Käyttäjälle näkyvät rekisterit**
  - Ohjelmoija/kääntäjä päättää niiden käytöstä
  - Paljonko? Nimeäminen?

```
ADD   R1,R2,R3
```

- **Ohjaus- ja statusrekisterit**
  - Osa epäsuorasti ohjelman viitattavissa
    - PC, PSW, flags, ...

```
BNEQ  Loop
```

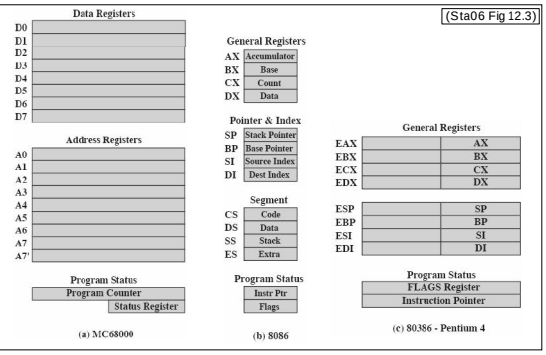
  - Osa vain CPU:n sisäiseen käyttöön
    - MAR, MBR, ...
- **Sisäisiä apurekistereitä käskyn välivaiheita varten**
  - Esim. - Käskyrekisteri (IR) käskyn tulkintaa varten
    - operandi ensin käskystä apurekisteriin, vasta sitten ALU:uun

Käyttäjälle näkyvät rekisterit

- **Eri prosessoriperhe ð**
  - **eri määrä erilaisia rekistereitä,**
  - **erilaiset nimeämistavat**
  - **erilaiset käyttötarkoitukset**
- **Yleisrekisterit** (general-purpose registers)
- **Datarekisterit** (data registers)
- **Osoiterekisterit** (address registers)
  - Segmenttirekisterit (segment registers)
  - Indeksirekisterit (index registers)
  - Pino-osoitin (stack pointer)
  - Ympäristöosoitin (frame pointer)
- **Tilarekisterit** (condition code registers)

Esimerkkejä

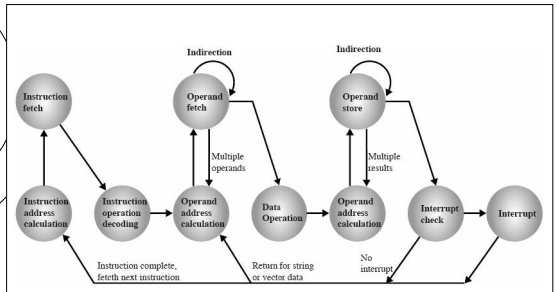
(Sta06 Fig 12.3)



PSW - Program Status Word

- **Nimi vaihtelee eri arkkitehtuureissa**
- **CPU:n tila**
  - Etuoikeutettu vs. käyttäjätila
- **Vertailun tulos**
  - Esim. Greater, Equal, Less, Zero, ...
- **Sattuiko käskyn suorituksessa poikkeuksia?**
  - Nollallajako, ylivuoto
  - Page fault, “memory violation”
- **Tarvitseeko ulkoinen laite ohjausta?**
  - Bitti keskeytyksen ilmaisemiseksi
- **Keskeytyksen esto / salliminen**
  - Kullekin luokalle omat bittinsä

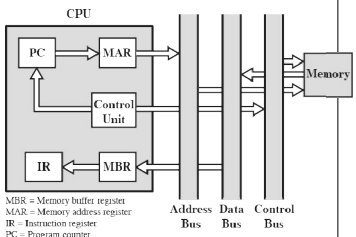
Käskysykli (Instruction cycle)



(Sta06 Fig 12.5)

Käskyn nouto (10)

- **MAR • PC**
- **MAR • MMU(MAR)**
- **Control Bus • Reserve**
- **Control Bus • Read**
- **PC • ALU(PC+1)**
- **MBR • MEM[MAR]**
- **Control Bus • Release**
- **IR • MBR**



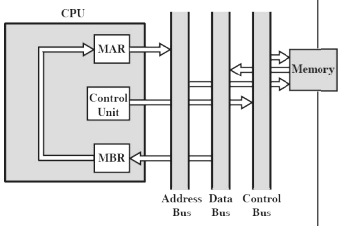
Välimuisti! Ennaltanouto!

(Sta06 Fig 12.6)

Operandin nouto, Epäsuora osoitus (13)

- **MAR • Address**
- **MAR • MMU(MAR)**
- **Control Bus • Reserve**
- **Control Bus • Read**
- **MBR • MEM[MAR]**

- **MAR • MBR**
- **MAR • MMU(MAR)**
- **Control Bus • Read**
- **MBR • MEM[MAR]**
- **Control Bus • Release**
- **ALU? Regs? • MBR**



Välimuisti!

(Sta06 Fig 12.7)

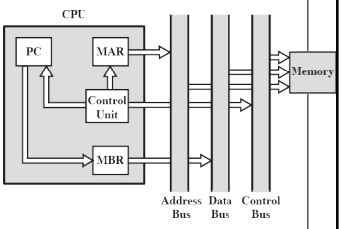
Keskeytyskäsittelyn alkutoimet (esim.) (16)

- **MAR • SP**
- **MAR • MMU(MAR)**
- **Control Bus • Reserve**
- **MBR • PC**
- **Control Bus • Write**

- **MAR • SP • ALU(SP+1)**
- **MAR • MMU(MAR)**
- **MBR • PSW**
- **Control Bus • Write**
- **SP • ALU(SP+1)**

- **PSW • privileged & disable**

- **MAR • Interrupt number**
- **Control Bus • Read**
- **PC • MBR • MEM[MAR]**
- **Control Bus • Release**



Ei osoitteenmuunnosta!

SP = Stack Pointer

(Sta06 Fig 12.8)

Tietokoneen rakenne

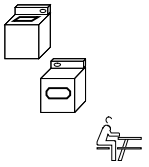
Liukuhihna

(Instruction pipelining)

Esim. Pesula (by David A. Patterson)

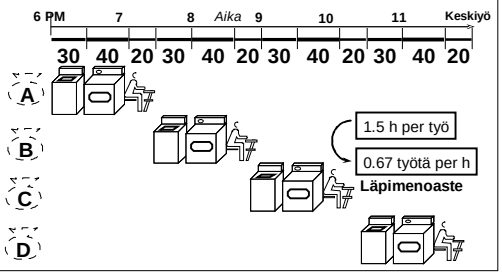
- Ann, Brian, Cathy, Dave: kullakin satsi pyykättävää

- Pesu vie 30 min
- Kuivaus vie 40 min
- Viimeistely vie 20 min



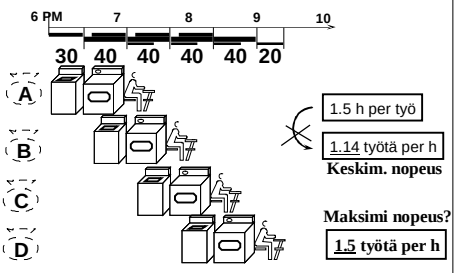
Peräkkäin: Pyykkitupa varattu vain yhdelle (8)

- Vie 6 tuntia, syntyy neljä satsia puhdasta
- Entäpä, jos toimisivat liukuhihnaperiatteella?



Liukuhihna: Varaus työvaiheittain (13)

- Vie 3,5 tuntia, syntyy 4 satsia puhdasta



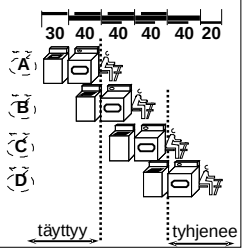
Töitä valmistuu parhaimmillaan 40 min välein! (0.67 h / valmistunut työ)

Huomioita

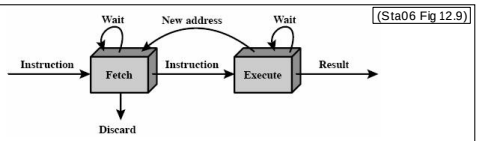
- **Liukuhihna ei nopeuta yhden työn aktiivisena oloaikaa järjestelmässä**
  - Mutta keskimääräinen läpimenoaika paranee
- **Liukuhihna voi aiheuttaa yhdelle työlle lisäviipeitä verrattuna siihen, jos se työ olisi yksin järjestelmässä**
  - Jos hihnan seuraava vaihe varattuna, ei voi edetä
- **Useita töitä etenee yhtä aikaa, mutta ne ovat eri vaiheissa**
- **Hitain vaihe määrää koko liukuhihnan nopeuden**
  - Liukuhihna nytkähtää, kun kaikki osat valmiita
  - Tehokkuus kärsii, jos kestot eripituisia
- **Yksi työ nopeutuu maksimissaan saman verran kuin liukuhihnassa vaiheita**

Huomioita

- **Toteutus monimutkaisempaa, lisäresurssien tarve**
  - Tuplapistorasia? ž pesukone ja kuivaaja voivat pörrätä yhtäaikaa
  - Kaksi tai kolme ihmistä yhtäaikaa pyykkituvassa
- **Hihna ei toimi alussa eikä lopussa täydellä teholla**
- **Hihna "yskii"**
  - Töitä ei tule tasaisella tahdilla

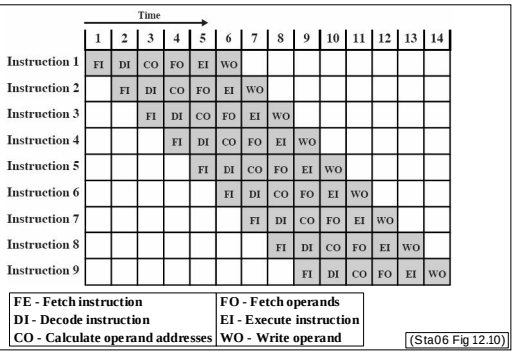


CPU ja 2-vaiheinen liukuhihna?



- **Seuravan käskyn ennaltanouto samaan aikaan kuin edellistä suoritetaan**
  - Paikallisuus: oleta, että suoritus "esiintymisjärjestyksessä"
- **Ongelmat**
  - Suoritusvaihe voi kestää kauemmin ž noutovaihe jouten
  - Suoritusvaihe muuttaa PC:n arvoa ž haettu väärä käsky
    - Seuraavan käskyn osoite "ennustettiin" väärin!
- **Rinnakkaisuus vielä vähäistä ž Lisää vaiheita?**

6-vaiheinen liukuhihna



Paljonko liukuhihna nopeuttaa?

- **6 vaiheinen liukuhihna ž 14 aikayksikköä**
- **Ei liukuhihnaa ž 9*6 = 54 aikayksikköä**
- **Nopeutus = 54/14 = 3.86 < 6 !**
- **Todellisuudessa nopeutus vieläkin pienempi**

- **Jokainen käsky ei tarvitse kaikkia vaiheita**
  - Ei-liukuhihnoitettu voi edetä heti seuraavaan vaiheeseen
  - Liukuhihnoitettu joutuu odottamaan seuraavan vaiheen vapautumista, ko. CPU:n yksikkö jouten
    - Suorituksessa on "kupla" (bubble)

Yhden vaiheen kesto liukuhinalla?

$$\tau = \max_{i=1..k}[\tau_i] + d = \tau_m + d \;>> d$$

Yhden vaiheen kesto — Vaiheen i kesto — Viive vaiheesta toiseen siirtymiselle ~ yksi kellopulssi — Hitaimman vaiheen (max) kesto

- **Hitain vaihe määrää etenemisvauhdin**
  - Kauimmin kestävä vaihe on pullonkaula
- **Kukin vaihe asetetaan kestämään yhtä kauan**
  - Montako kellopulssia?

Paljonko nopeuttaa?

n käskyä, k vaihetta, τ =vaiheen kesto

Ei liukuhihnaa: $T_1 = nk\tau$

Pessimistinen: olettaa, että kaikki vaiheet kestäisivät yhtä kauan

Liukuhihna: $T_k = [k + (n-1)]\tau$

Ks. Sta06 Fig 12.10 ja tarkista itse!

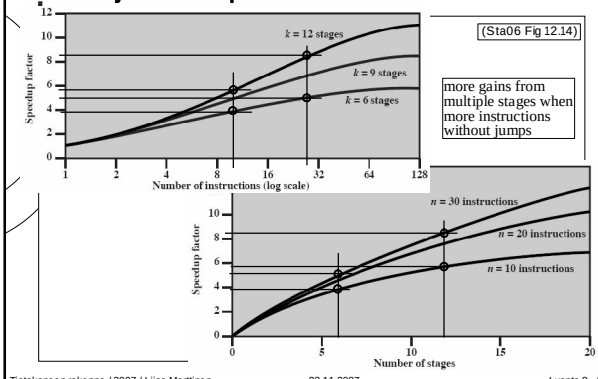
k vaihetta ennenkuin ensimmäinen työ valmistuu

seuraavat (n-1) valmistuvat yhden vaiheen välein

Nopeutus: $S_k = \frac{T_1}{T_k} = \frac{nk\tau}{[k+(n-1)]\tau} = \frac{nk}{[k+(n-1)]}$

Paljonko nopeuttaa?

Oletuksella: ei hyppykäskyjä



(Sta06 Fig 12.14)

more gains from multiple stages when more instructions without jumps

Muita huomioita

- **Lisävaiheita**
  - CPU:n laitettava välitulos jonnekin
  - Vaikka yksittäinen käsky etenisi yksin hihnalla, sillä kuluu enemmän aikaa kuin ei-liukuhihnoitetussa
- **Silti**
  - Ison käskyjoukon suorittaminen sujuu nopeammin
  - Parempi läpimenoaste (käskyä/sec)

- **Liukuhihnoituksen rinnakkaisuus nopeuttaa kokonaisuutta, mutta hidastaa yhden käskyn suoritusta**

Ongelmakohtia

- **Rakenteellinen riippuvuus** (structural dependency)
  - Usea vaihe voi tarvita samaa HW-yksikköä
  - Muisti: FI, FO, WO
  - ALU: CO, EI

```
STORE  R1,VarX
ADD    R2,R3,VarY
MUL    R3,R4,R5
```

- **Kontrolliriippuvuus** (control dependency)
  - Ehdollisen hyppykäskyn tulos selvillä vasta EI-vaiheen jälkeen
  - ž Ennaltanoudettu vääriä käskyjä

```
ADD    R1,R7, R9
Jump   There
ADD    R2,R3,R4
MUL    R1,R4,R5
```

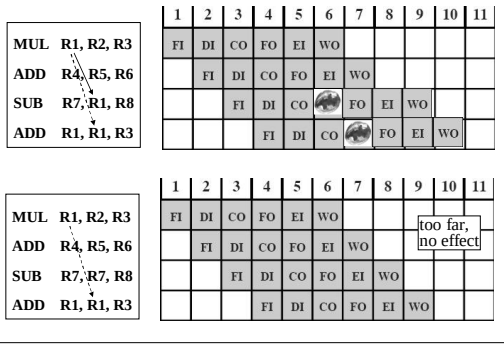
- **Datariippuvuus** (data dependency)
  - Tarvitaan edeltävän käskyn tulosta, eikä se ole vielä valmistunut

```
MUL   R1,R2,R3
LOAD R6, Arr(R1)
```

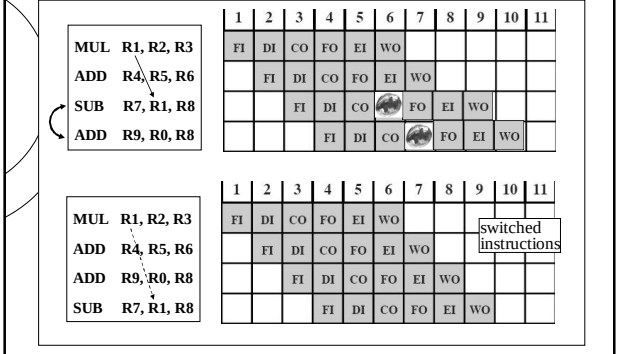
Ratkaisuja?

- **Huomattava laitteistolla, odotettava, että riippuvuus poistettu**
  - Hihnalle ylimääräisiä odotusjaksoja eli kuplia, “bubbles”
  - Kupla viivästää kaikkia sen takana tulevia vaiheita
  - Yleisesti käytetty tapa
- **Rakenteellinen riippuvuus**
  - Lisää laitteistoa, esim. CO- ja EI-vaiheelle omat ALUt
  - Paljon rekistereitä, vähemmän muistioperandeja
- **Kontrolliriippuvuus**
  - Tyhjennä hihna, ja hae uudet käskyt
  - Hyppyjen ennustuslogiikka: haenko ennalta tästä vai tuolta?
- **Datariippuvuus**
  - Vaihda käskyjen suoritusjärjestystä
  - Oikopolut laitteistossa (by-pass): tulokseen pääsee käsiksi ennen WO-vaihetta

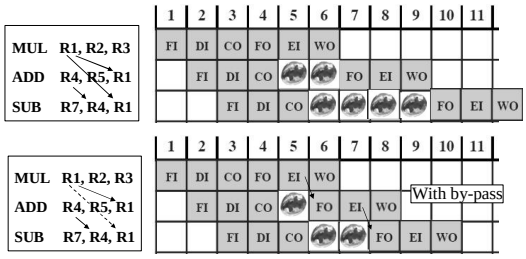
Datariippuvuudet ja niiden poisto



Käskyjen suoritusjärjestyksen muutos



Oikopolut



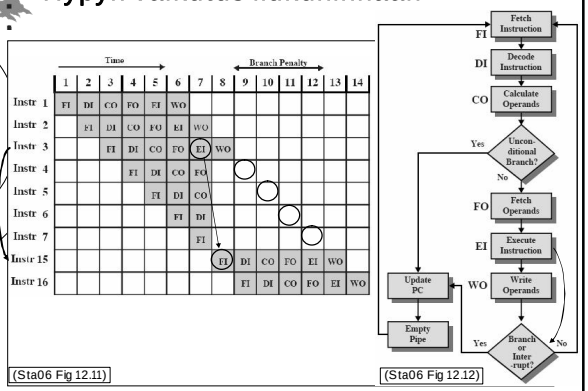
Tietokoneen rakenne

Hypyt ja liukuhihna

Jumps and pipelining

- Monta suorituspolkua (Multiple streams)
- Viivästetty hyppy (Delayed branch)
- Kohteen ennaltanouto (Prefetch branch target)
- Silmukkapuskuri (Loop buffer)
- Ennustuslogiikka (Branch prediction)

Hypyn vaikutus liukuhihnaan



(Sta06 Fig 12.11) (Sta06 Fig 12.12)

Viivästetty haarautuminen (delayed branch)

- **Kääntäjä laittaa hyppykäskyn perään muita käskyjä, jotka suoritetaan aina**
  - Hihnalle ei päästetä mitään, mikä pitäisi ehkä myöhemmin perua
    - tehdyn työ peruuttaminen on tosi vaikeata!
  - Jos ei hyödyllisiä käskyjä, sitten NOP-käskyjä
- **Jos hyppy toteutuu, nuo käskyt jo hyvässä vauhdissa ja annetaan niiden valmistua**
  - Hihnaa ei tarvitse erikseen tyhjentää
- **Jos hyppy ei toteudu, NOP-käskyt vain hukkaavat syklejä**
- **Helpompi toteuttaa näin kuin tyhjentää hihna**

```
sub  r5, r3, r7
add  r1, r2, r3
jump There
…
```

```
sub  r5, r3, r7
jump There
add  r1, r2, r3   (delay slot)
…
```


Monta suorituspolkua (multiple instr. streams)

- **Spekuloi**
  - Hae hihnalle hyppykäskyä seuraavia käskyjä
  - Hae toiselle hihnalle käskyjä hypyn kohdeosoitteesta
- **Anna polkujen edetä kunnes selviää mikä oikea**
  - Hylkää väärä polku (tai ainakin sen tulokset)
- **Ongelmia**
  - Hypyn kohde saattaa selvitä vasta osoitelaskennan jälkeen
  - Polku voi haarautua edelleen
    - Jatketaanko samoin? Yksi spekulointi kerrallaan?
  - Tarvitaan lisälaitteistoa
    - Useampia liukuhihnoja
    - Spekulatiivisia tuloksia ei saa tallettaa oikeisiin rekistereihin
  - Spekulointi käyttää resursseja ja voi hidastaa oikeaa työtä
    - CPU:n sisäiset työrekisterit, väylä, ALU
- **Liukuhihna osattava tyhjentää**

Kohteen ennaltanouto (prefetch branch target)

- **Nouda etukäteen käsky hypyn kohteesta, mutta älä päästä sitä muuten liukuhihnalle**
  - Tee siis vain FI-vaihe
  - Jos hyppy toteutuu, säästyy muistinoutoon muuten tarvittava aika
- **Liukuhihnaa osattava tyhjentää** **IBM 360/91 (1967)**

Silmukkapuskuri (loop buffer)

- **Pidä *n* viimeisintä käskyä CPU:n sisällä nopeassa puskurissa**
  - Hyödynnä myös ennaltanoutoa
    - Hyvällä tuurilla myös hypyn kohdekäsky tuli samalla
    - Esim. IF-THEN ja IF-THEN-ELSE rakenne
- **Toimii hyvin pienille silmukoille**
  - Nouto muistista vain kerran
- **Parempi alueellinen paikallisuus kuin pelkkää välimuistia käytettäessä**

CRAY-1
Motorola 68010

Hyppyjen ennustus (branch prediction)

- **Arvaa älykkäästi kumpi todennäköisempää: hyppy vai ei hyppyä ?**
- **Staattinen ennustus**
  - Kiinteästi: aina hypätään
  - Kiinteästi: ei koskaan hypätä → **Motorola 68020** **VAX 11/780**
    - ~ 50% oikein
  - Operaatiokoodin perusteella
    - Selvitetty etukäteen (ennen CPU:n valmistusta) operaatiokoodit, joilla hyppy yleisempää kuin ei hyppyä
    - Esim. BLE käskyä käytetään tyypillisesti "steppailevan" for-silmukan lopussa, joten arvaa että hyppää
    - ~ 75% ennusteista oikein

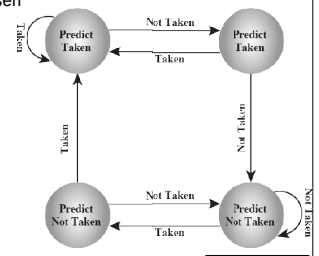
Hyppyjen ennustus

- **Dynaaminen ennustus**
  - Muistele miten tämän suorituskerran aikana kävi kyseisen hyppykäskyn kanssa aiemmin
    - Ennustus osuu nyt paremmin kohdalleen
  - Tarvitsee CPU:n sisälle apumuistia = branch history table
    - Käskyn osoite
    - Hypyn kohdeosoite (tai kohdekäsky)
    - Hypätäänkö vai ei: taken / not taken
- **"Karvalakkimalli"**
  - Ennusta sen mukaan kuinka kävi edellisellä kerralla
    - 1 bitti riittää
  - Silmukoissa tulee 1 tai 2 väärää ennustusta

Hyppyjen ennustus

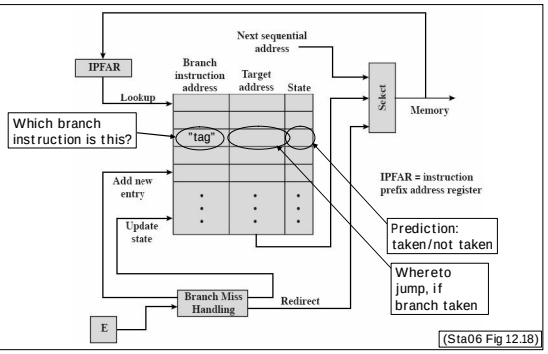
- **Parannettu malli**
  - Älä muuta ennustetta liian helposti
  - Ennusta kahden edellisen kerran mukaan
  - 2 bittiä riittää

PowerPC 620



(Sta06 Fig 12.17)

Branch history table strategy
(ennustaminen hyppyhistorian avulla)



(Sta06 Fig 12.18)

Kertauskysymyksiä

- Mitä tietoja on sisällytettävä PSW:hen?
- Miksi 2-vaiheisesta liukuhihnasta ei ole paljon hyötyä?
- Mitkä tekijät vaikeuttavat liukuhihnan toimintaa?
- Millaisia ratkaisuja on käytetty hyppykäskyjen vaikutuksen eliminoimiseen?
- Kuinka CPU siirtyy keskeytyskäsittelyyn?