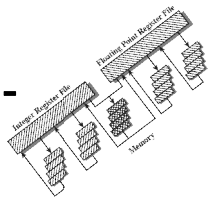
Luento 10

Tietokoneen rakenne

Superskalaari-prosessointi



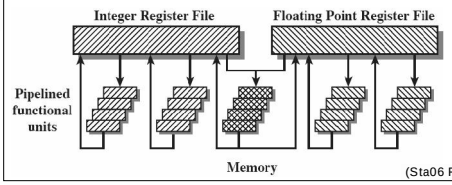
Stallings: Ch 14

- Käskyjen väliset riippuvuudet
- Rekistereiden uudelleennimeäminen
- Pentium / PowerPC

Superskalaariprosessointi

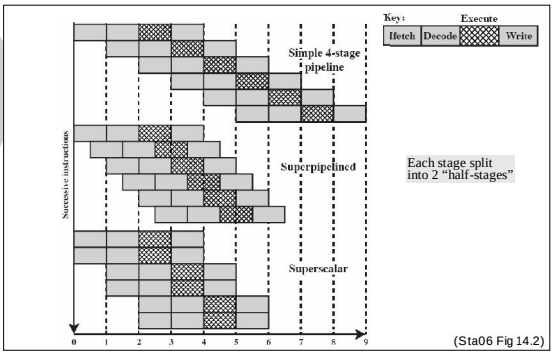
- **Tavoite**
  - Nopeuttaa skalaarikäskyjen prosessointia
- **Useita itsenäisiä liukuhihnoja**
  - Ei siis pelkästään enemmän vaiheita liukuhihnalla

Reference	Speedup
[TJAD70]	1.8
[KUCK72]	8
[WEIS84]	1.58
[ACOS86]	2.7
[SOHI90]	1.8
[SMIT89]	2.3
[JOUP89b]	2.2
[LEE91]	7



(Sta06 Fig 14.1, Tbl 14.1)

Superskalaariprosessointi



(Sta06 Fig 14.2)

Superskalaariprosessointi

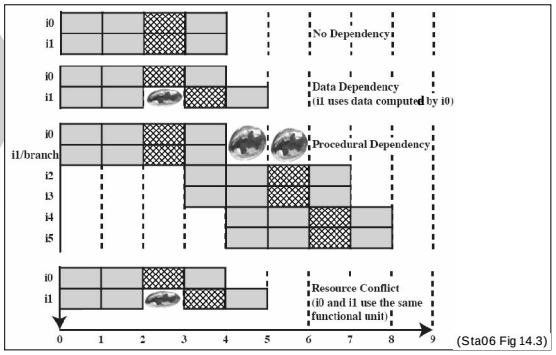
- **Muistin käytön oltava tehokas**
  - Nouda useita käskyjä yhtäaikaa, ennaltanouto
  - Datan nouto / talletus
  - Rinnakkaisuus
- **Saman prosessin useita käskyjä yhtäaikaa suorituksessa eri liukuhihnoilla**
  - Valitse noudetuista sopivassa järjestyksessä suoritukseen (in-order issue/out-of-order issue)
- **Enemmän kuin yksi käsky valmistuu per sykli**
  - Saattavat valmistua eri järjestyksessä kuin aloitettu (out-of-order completion)
- **Milloin käsky saa valmistua ennen edeltävää käskyä?**

Tutut riippuvuudet

```
add r1,r2
move r3,r1
```

- **Datariippuvuus** (True Data/Flow Dependency)
  - write-read (Read after Write, RaW) riippuvuus
  - Jäljempi käsky tarvitsee edeltävän tuottamaa dataa
- **Kontrolliriippuvuus** (Procedural/Control Dependency)
  - Hyppyä seuraavat käskyt suoritetaan vain, jos hyppy ei toteudu
  - Superskalaarihihnalla hukattavana enemmän käskyjä
  - Vaihtelevanpituisten käskyjen lisäosista tietoa vasta suoritettaessa
- **Resurssiriippuvuus** (Resource Conflict)
  - Yksi tai useampi liukuhihna osa tarvitsee samoja resursseja
  - Muistipuskuri, ALU, pääsy rekisterijoukkoon, ...

Tutut riippuvuudet



(Sta06 Fig 14.3)

Uudet riippuvuudet

Nimiriippuvuudet =

```
load r1,X
add r2,r1,r3
add r1,r4,r5
```

- **Kirjoitusriippuvuus** (Output Dependency)
  - write-after-write (WaW) riippuvuus
  - Kun kaksi käskyä muuttaa samaa rekisteriä tai muistipaikan sisältöä, niin alkuperäisessä koodissa jäljempänä oleva talletus jäätävä voimaan

```
move r2,r1
add  r1,r4,r5
```

- **Antiriippuvuus** (Antidependency, Read-write dependency)
  - Write-after-read (WaR) riippuvuus
  - Edeltävän käskyn ehdittävä noutaa rekisterin tai muistipaikan sisältö, ennenkuin jäljempi käsky tallettaa sinne uuden arvon
- **Aliakset?**
  - Esim. Kaksi rekisteriä osoittaa epäsuorasti samaan muistipaikkaan

40(R1) vs. 0(R2)

Kuinka käsitellä riippuvuudet?

- **Peruslähtökohta**
  - Kaikki riippuvuudet käsitellään jollain tavoin
- **Perusratkaisu (kuten ennenkin)**
  - laitteisto huomaa riippuvuuden, pysäyttää liukuhihnan odottamaan (bubble)
- **Ratkaisu 2**
  - Kääntäjä generoi käskyt sellaisessa järjestyksessä, että riippuvuuksia ei tule
  - Tällöin ei tarvita erityislaitteistoa
    - Yksinkertaisempi suoritin, jonka ei tarvitse havaita riippuvuuksia
  - Kääntäjän laatijan tunnettava kohdeprosessorin toiminta tarkoin

Rinnakkaisuus

- **Käskytason rinnakkaisuus** (Instruction-level parallelism)
  - Montako käskyä pystyttäisiin teoreettisesti suorittamaan rinnakkain
    - Riippuu suoritettavasta koodista

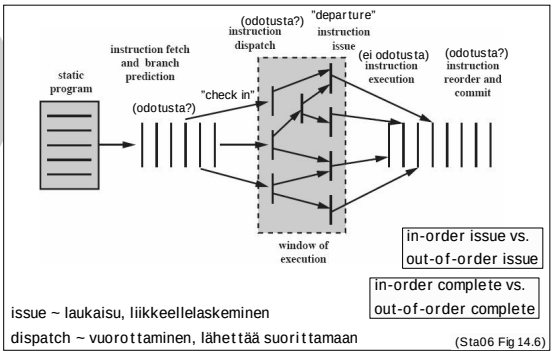
```
load r1 • r2
add r3 • r3+1
add r4 • r4, r2
```

- **Konetason rinnakkaisuus** (Machine parallelism)
  - Todellinen rinnakkaisuus
  - Mitä tietty kone tai arkkitehtuuri todella voi tehdä rinnakkain
    - Montako käskyä voi hakea yhtäaikaa?
    - Montako käskyä voi suorittaa yhtäaikaa?

```
add r3 • r3+1
add r4 • r3, r2
load r0 • r4
```

  - ~ Montako liukuhihnaa käytettävissä
  - Aina pienempi kuin käskytason rinnakkaisuus
    - Riippuvuudet?
    - Huonosti optimoitu toteutus?

Superskalaariprosessointi



in-order issue vs. out-of-order issue

in-order complete vs. out-of-order complete

issue ~ laukaisu, liikkeellelaskeminen

dispatch ~ vuorottaminen, lähettää suorittamaan

(Sta06 Fig 14.6)

Superskalaariprosessointi

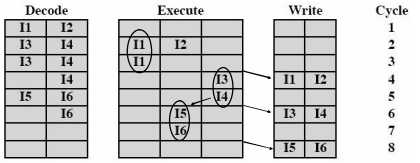
- **Käskyjen nouto muistista**
  - Hyppyjen ennustus ž ennaltanouto muistista CPU:hun
  - Valintaikkuna (window-of–execution)
    - ~ Muistista noudetut käskyt
- **Käskyn päästäminen liukuhihnalle** (dispatch/issue)
  - Selvitä data-, kontrolli- ja resurssiriippuvuudet
  - Uudelleenjärjestele, päästä sopivat liukuhihnoille
  - Valittujen päästävä etenemään ilman odotusjaksoja
  - Jos sopivaa ei löydy, odotuta tässä kohtaa
- **Kun suoritus valmistuu** (complete, retire)
  - Hyväksy tai hylkää (commit/abort)
  - Selvitä kirjoitus- ja antiriippuvuudet ž odota / järjestä uudelleen (reorder)

In-order issue, in-order complete

- **Se perinteinen peräkkäisjärjestys**
- **Ei käyttöä valintaikkunalle**
- **Käskyjä hihnoille vain alkuperäisessä järjestyksessä**
  - Kääntäjä huolehtinut pääosin riippuvuuksista
  - Tarkista silti riippuvuus edeltäjistä
  - Tsekkaa etenemisvauhti, jätä tarvittaessa kuplia
  - Voi päästää useita yhtäaikaakin baanalle
- **Valmistuminen vain alkuperäisessä järjestyksessä**
  - Viereisellä baanalla ei saa ohittaa
  - Useita voi valmistua yhtäaikaa
  - Commit/Abort

In-order issue, in-order complete

Nouto 2 käskyä kerralla
I1 tarvitsee suoritukseen 2 sykliä
I3 ja I4: resurssiriippuvuus
I5 (käyttää) ja I4 (tuottaa): datariippuvuus
I5 ja I6: resurssiriippuvuus

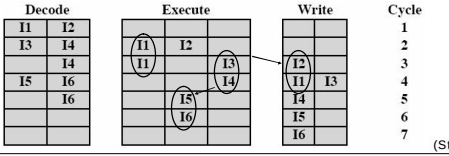


(Sta06 Fig 14.4a)

In-order issue, out-of-order complete

- **Kuten edellinen, mutta**
  - Salli valmistua eri järjestyksessä kuin käskyjä aloitettu
  - Huolehdi kirjoitus- ja antiriippuvuudesta ennen tulosten kirjoittamista

Nouto 2 käskyä kerralla
I1 tarvitsee suoritukseen 2 sykliä
I3 ja I4: resurssiriippuvuus
I5 (käyttää) ja I4 (tuottaa): datariippuvuus
I5 ja I6: resurssiriippuvuus



(Sta06 Fig 14.4b)

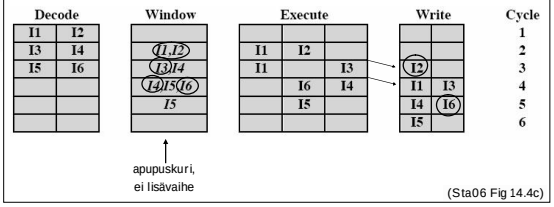
Out-of-order issue, out-of-order complete

- **Päästä käskyjä liikkeelle parhaaksi katsotussa järjestyksessä**
  - Tarvitaan valintaikkuna
- **Salli valmistuminen parhaaksi katsotussa järjestyksessä**
  - Huolehdi kirjoitus- ja antiriippuvuudesta

Se oikea, aito superskalaari-prosessori

Out-of-order issue, Out-of-order complete

Nouto 2 käskyä kerralla
I1 tarvitsee suoritukseen 2 sykliä
I3 ja I4: resurssiriippuvuus
I5 (käyttää) ja I4 (tuottaa): datariippuvuus
I5 ja I6: resurssiriippuvuus



(Sta06 Fig 14.4c)

Rekistereiden uudelleennimeäminen

- **Ongelman syynä usein se, että <u>toisistaan riippumattomille asioille</u> käytetty samaa rekisteriä**
  - Käskyjen välille syntyy riippuvuus, tarpeettomasti
  - Odoteltava, että edellinen valmistuu
- **Ratkaisu: Rekistereiden uudelleennimeäminen**
  - Laitteistossa enemmän rekistereitä kuin ohjelmoijalle näkyy
  - Laitteisto allokoi todelliset rekisterit <u>suoritusaikana</u>
  - Allokointi s.e. vältetään nimiriippuvuus
- **Tarvitaan**
  - Enemmän sisäisiä työrekistereitä (rekisterijoukot), esim. Pentium II:ssa 40 työrekisteriä
  - Laitteistoa, joka allokoi työrekistereitä ja pitää kirjaa ohjelmoijalle näkyvistä rekistereistä

Rekistereiden uudelleennimeäminen

<u>Kirjoitusriippuvuus (WaW):</u>
i3 ei saa valmistua ennen i1:stä

<u>Antiriippuvuus (RaW):</u>
i3 ei saa valmistua ennenkuin i2 lukenut arvon R3:sta

R3 • R3 + R5 **(i1)**
R4 • R3 + 1 **(i2)**
R3 • R5 + 1 **(i3)**
R7 • R3 + R4 **(i4)**

Uudelleennimeä R3 s.e. käytössä työrekisterit R3a, R3b, R3c
Muut rekisterit vastaavasti: R4b, R5a, R7b

R3b • R3a + R5a **(i1)**
R4b • R3b + 1 **(i2)**
R3c • R5a + 1 **(i3)**
R7b • R3c + R4b **(i4)**

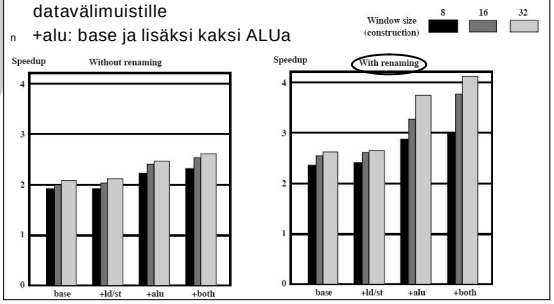
Ei enää nimiriippuvuuksia!

Miksi R3a ja R3b?

Lisälaitteiston vaikutus

- base: out-of-order issue
- +ld/st: base ja lisäksi kaksi load/store yksikköä datavälimuistille
- +alu: base ja lisäksi kaksi ALUa

(Sta06 Fig 14.5)



Yhteenveto

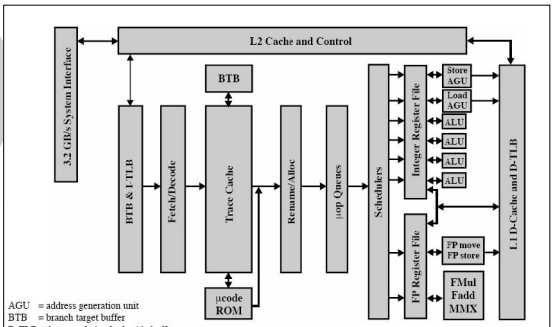
- **Useita toiminnallisesti itsenäisiä yksikköjä**
- **Muistihierarkian tehokas käyttö**
  - Sallii useita rinnakkaisia muistinoutoja/talletuksia
- **Käskyjen ennaltanouto**
  - Hyppyjen ennustuslogiikka
- **Laitetason logiikka riippuvuuksien huomaamiseksi**
  - Ohituspiirit, joilla tieto heti suoraan toiselle yksikölle samaan aikaan kuin tulos rekisteriin tai muistiin
- **Laitetason logiikka useiden riippumattomien käskyjen liikkeellesaattamiseksi (issue)**
  - Riippuvuudet ž järjestys
- **Laitetason logiikka huolehtii käskyjen oikeasta valmistumisjärjestyksestä (completion)**
  - Riippuvuudet ž commit

Sta06 Fig 14.6

Tietokoneen rakenne

Pentium 4

Pentium 4



(Sta06 Fig 14.7)

Liukuhihna

- **Ulospäin CISC -käskykanta (IA-32)**
- **Suoritus kuitenkin mikro-operaatioina kuten RISC**
  - Nouda CISC-käsky ja muodosta siitä mikro-operaatiot (μops) L1 tason välimuistiin (trace cache)
  - Hihnan loppuosa operoi vakiopituisilla μ-operaatioilla (118b)
- **Pitkä liukuhihna**
  - Lisävaiheet (5 ja 20) signaalien etenemisviipeen vuoksi

TC Next IP = trace cache next instruction pointer
TC Fetch = trace cache fetch
Alloc = allocate
Rename = register renaming
Que = micro-op queuing
Sch = micro-op scheduling
Disp = Dispatch
RF = register file
Ex = execute
Flgs = flags
Br Ck = branch check

(Sta06 Fig 14.8)

Mikro-operaatioiden generointi

Sta06 Fig 14.9a-f

a) Nouda IA-32 käsky L2 välimuistista ja generoi mikro-operaatiot L1 tason välimuistiin (trace cache)
- Käskyille oma TLB, hyppyjen kohteille oma BTB
- Staattinen hyppyjen ennustus
  - taaksepäin "taken", eteenpäin "not taken"
- 1-4 μops per käsky, monimutkaisemmat ROM-muistissa

b) Määritä Trace-Cache-IP:n arvo mikro-operaatiolle
- Dynaaminen hyppyjen ennustus (4-bit)
- 512 alkion joukkoassosiatiivinen kohdepuskuri BTB (branch target buffer), joukon koko 4

c) Nouda operaatio L1 tason välimuistista

d) Drive – odotusjakso

Resurssien allokointi

Sta06 Fig 14.9a-f

e) Allokoi resurssit, rekistereiden uudelleennimeäminen
- 3 operaatiota per sykli
- Varaa alkio uudelleenjärjestelypuskurista (126:sta) (reorder buffer, ROB)
- Varaa tulokselle yksi 128 sisäisestä työrekisteristä ja mahd. yksi load ja yksi store puskuri (48:sta ja 24:stä)
- Poista nimiriippuvuuksia rekistereiden uudelleennimeämisellä
- Allokoi alkio mikro-operaatioiden valintajonosta
- Jos ei vapaita resursseja, odota (ž out-of-order)

ROB-alkiossa kirjanpito operaation etenemisestä hihnalla
- Mikro-operaatio, ja alkuperäisen IA-32 käskyn osoite
- State: scheduled, dispatched, completed, ready
- Register Alias Table (RAT): mikä IA-32 rekisteri ž mikä työrekisteri

Window of Execution

Sta06 Fig 14.9a-f

f) 2 FIFO jonoa mikro-operaatioiden valitsemiseksi
- Tarvittavat resurssit saatavilla, ei riippuvuutta
- Muistiin viittaaville oma, muille oma

g) Mikro-operaatioiden nouto jonoista (scheduling)
h) Päästäminen liukuhihnalle (dispatching)

Sta06 Fig 14.9g-l
- Tutki FIFO-jonojen keulimmaisten ROB-alkioita
- Jos tarvittava suoritusyksikkö vapaa, operaation voi päästää suoritusliukuhihnalle
- Kaksi jonoa ž out-of-order issue
- max 6 mikro-op liikkeelle yhden syklin aikana
  - ALU:ille tai FPU:ille kummallekin max 2 per sykli
  - Load ja store -yksiköille kummallekin max 1 per sykli

Integer ja FP yksiköt

Sta06 Fig 14.9g-l

i) Nouda data rekistereistä tai välimuistista
j) Suorita käsky, aseta lipukkeet
- Hae operandit rekistereistä / L1 välimuistista
- Useita liukuhihnoitettuja suoritusyksiköitä
  - 2 * Alu, 2 * FPU, 2 * load/store
  - Esim. nopea ALU helpoille, kertolaskuille oma ALU
- Tulosten talletus: in-order complete
- Päivitä ROB, salli uusien operaatioiden tulo hihnalle

k) Tarkista miten hyppykäskyssä kävi
- Menikö niinkuin ennustettiin?
- Abortoi väärät käskyt hihnalta (estä tulosten talletus)

l) Kirjaa hypyn tulos ennustuslogiikkaa varten
- Anna aikaa signaalien etenemiseksi

Pentium 4 Hyperthreading

- **Yksi fyysinen IA-32 CPU, mutta 2 loogista CPU:ta**
- **Näkyy KJ:lle kahden CPU:n SMP-järjestelmänä**
  - Molemmat suorittavat eri prosesseja, tai saman prosessin eri säikeitä (kuten SMP)
  - Ei tarvitse huomioida kooditasolla
  - KJ:n osattava SMP-temput (mm. vuorottaminen)
- **Perustuu CPU:n odotussyklien hyötykäyttöön**
  - Muistiinviittaus (cache miss)
  - Riippuvuudet, väärä hyppyennustus
- **Jos toinen käyttää FP-yksikköä, toinen voi käyttää INT-yksikköä**
  - Hyödyt pitkälti sovellusriippuvia

Pentium 4 Hyperthreading

- **Kahdennettu**
  - IP, EFLAGS ja muut kontrollirekisterit
  - KäskyTLB
  - Rekistereiden uudelleennimeämislogiikka

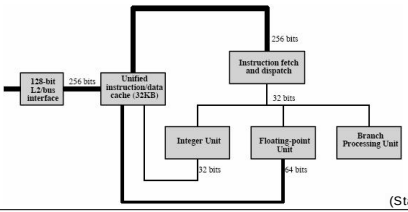
Sta06 Fig 14.7
Sta06 Fig 14.8
- **Puolitettu**
  - Kristillinen tasajako, ei monopolia
  - Uudelleenjärjestelypuskurit (ROB)
  - Mikro-operaatioiden valintajonot (2 keulaa?)
  - Load/store puskurit
- **Yhteiskäytössä**
  - Rekisterijoukot (128 GPRs, 128 FPRs)
  - Välimuistit: trace cache, L1, L2, L3
  - Mikro-operaatioiden suorituksessa tarvittavat rekisterit
  - Suoritusyksiköt: 2 ALUa, 2 FPUta, 2 ld/st-units

Tietokoneen rakenne

PowerPC

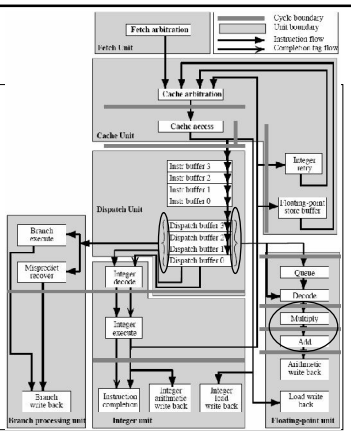
PowerPC 601

- **Käskyjen noutoyksikkö**
  - Voi noutaa 8 käskyä (a' 32b) kerralla välimuistista
- **Käskyjen valinta suoritukseen (dispatch)**
- **3 käskyjä suorittavaa yksikköä**
  - Kokonaisluvut, liukuluvut, hypyt



(Sta06 Fig 14.10)

PowerPC 601 Pipeline



(Sta06 Fig 14.11)

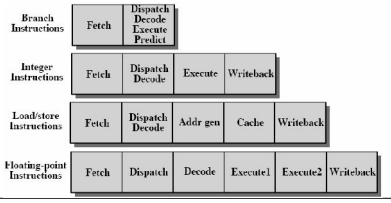
Dispatch unit

= **Käskyjen suoritukseen valinta**

- **4:n alkion apupuskuri + 4:n alkion valintaikkuna**
  - dispatch buffer = window of execution
- **Käsky ikkunasta suoritettavaksi, kun hihnalla tilaa**
  - Integer-yksikölle vain jonon alusta
  - Muille se, joka lähinnä jonon keulaa
  - Max 3 käskyä yhtäaikaa (out-of-order issue)
- **Kun käsky suoritukseen, muita jonoissa eteenpäin**
- **Jos riippuvuus, ei päästä hihnalle** (stall, bubble)
- **Laitetason logiikka hyppyosoitteiden laskemiseksi**
  - Nopeasti jo ennen varsinaista käskyn suoritusvaihetta

Suoritus

- **Muutokset rekistereihin / muistiin vasta suorituksen lopuksi "Write Back" vaiheessa**
- **ALU-operaatiot tallettavat tietoa CR-rekisteriin**
  - 8 kenttää a' 4 b, tallessa useita edellisiä vertailutuloksia
- **Liukuluvut tarvitsevat useampia syklejä**



(Sta06 Fig 14.12)

Hyppyjen käsittely

- **Zero cycle branches**
  - Hyppy ei vaikuta muiden yksikköjen toimintaan
    - Yleensä ei tarvetta tyhjentää, tai hylätä tuloksia
  - Hypyn kohdeosoite selvillä heti, kun hyppykäsky tulee käskyikkunaan (ennen suoritusta!)
- **Yhden hypyn spekulointi: Hyppääkö vai ei?**
  - Jos ehdoton ž taken
  - Jos ehdollinenja CR-rekisteri asetettu aiemmin
    tutki ž taken / not taken
    muuten jos taaksepäin ž taken
    jos eteenpäin ž not taken
- **Jos spekulointi meni pieleen**
  - abortoi spekuloidut käskyt ennen write-back -vaihetta

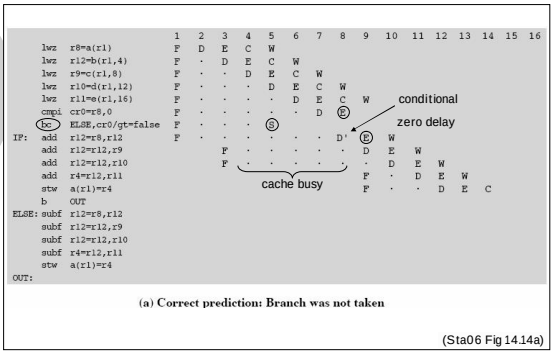
Hyppyjen käsittely

```
      if (a > 0)
            a = a + b + c + d + e;
      else
            a = a - b - c - d - e;
```

```
                                    #r1 points to a,
                                    #r1+4 points to b,
                                    #r1+8 points to c,
                                    #r1+12 points to d,
                                    #r1+16 points to e.
      lwz   r8=a(r1)                #load a
      lwz   r12=b(r1,4)             #load b
      lwz   r9=c(r1,8)              #load c
      lwz   r10=d(r1,12)            #load d
      lwz   r11=e(r1,16)            #load e
      cmpi  cr0=r8,0                #compare immediate
      bc    ELSE,cr0/gt=false       #branch if bit false
IF:
      add   r12=r8,r12              #add
      add   r12=r12,r9              #add
      add   r12=r12,r10             #add
      add   r4=r12,r11              #add
      stw   a(r1)=r4                #store
      b     OUT                     #unconditional branch
ELSE:
      subf  r12=r12,r8              #subtract
      subf  r12=r9,r12              #subtract
      subf  r12=r10,r12             #subtract
      subf  r4=r12,r11              #subtract
      stw   a(r1)=r4                #store
OUT:
```

(Sta06 Fig 14.13)

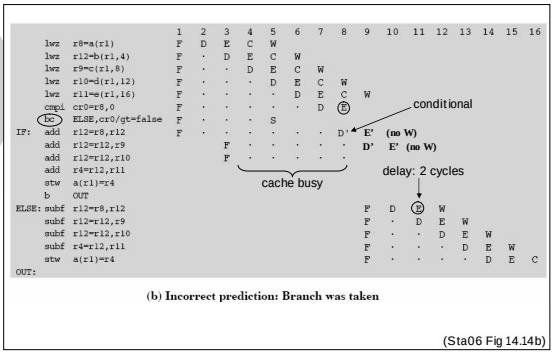
Hyppyjen käsittely



(a) Correct prediction: Branch was not taken

(Sta06 Fig 14.14a)

Hyppyjen käsittely



(b) Incorrect prediction: Branch was taken

(Sta06 Fig 14.14b)

PowerPC 620

HePa96 Fig. 4.49

64b:n arkkitehtuuri

- **6 suoritusyksikköä**
  - Instruction-yksikkö (dispatcher)
  - 3 integer-yksikköä
  - Load/Store yksikkö
  - FP-yksikkö
- **Max 4 käskyä suoritukseen yhtäaikaa**
- **Reservation stations**
  - Kullakin yksiköllä kaksi tai useampia
  - Jos käsky ei voi edetä (riippuvuudet) se odottaa tässä, eikä estä jäljempänä olevien etenemistä
- **Uudelleennimeäminen: 8 integer ja 12 FP lisärekisteriä**
  - Vähentää riippuvuuksia
  - Väliaikaistulosten tallettamiseksi
- **In-order-complete**
  - max 4 käskyä yhtäaikaa

PowerPC 620

- **Hyppyjen spekulointi**
  - 256:n alkion branch target buffer (BTB)
    - Joukkoassosiatiivinen, joukon koko 2
  - 2048:n alkion branch history table
    - Käyttää, jos kohde ei löydy BTB:stä
- **Spekuloitavana max 4 ratkaisematonta hyppyä**
- **Tulokset uudelleennimeämisrekistereissä**
  - Commit: kopioi spekuloidut tulokset todellisiin rekistereihin
  - Abort: vapauta rekisterit muuhun käyttöön

Kertauskysymyksiä

- Miten superskalaaritoteutus eroaa tavallisesta liukuhihnoitetusta toteutuksesta?
- Mitä uusia rakenteesta johtuvia ongelmia tulee ratkottavaksi?
- Miten niitä ongelmia ratkotaan?
- Mitä tarkoittaa rekistereiden uudelleennimeäminen ja mitä hyötyä siitä on?