Számítógép architektúrák

A processzor teljesítmény növelése

A mai témák

- **CISC és RISC**
- **Párhuzamosságok**
- **Utasítás szintű párhuzamosságok**
- **Futószalag feldolgozás**
- **Többszörözés (szuperskalaritás)**
- **A függőségek kezelése**
- **A soros konzisztencia fenntartás**

A teljesítmény fokozás

- **Nem strukturális módszerek**
  - **Órajel frekvencia növelés,**
  - **Instrukciók számának csökkentése (optimálás)**
- **Strukturális módszerek**
  - **Ciklusszám csökkentés: RISC architektúrákkal …**
  - **Ciklusszám csökkentés párhuzamosításokkal**

CISC és RISC

- **CISC: Complex Instruction Set Computer**
- **RISC: Reduced Instruction Set Computer**
  - **(Ezek CPU jellemzők)**
- **Történelmileg előbb a CISC-ek**
  - **minél többet bízz a hardverre,**
  - **bonyolult instrukciókat mikro-programokkal,**
  - **bonyolult instrukciókkal egyszerűbb a programozás (pl. PUSHALL),**
  - **bonyolult címzési módokat biztosítanak.**
  - **Az elgondolás nagyon jó, de …**

A RISC gondolat

- **Statisztikákból kiderült: gyakoribbak az egyszerű instrukciók.**
- **Akkor azokra "hegyezzük ki" a CPU-t! (Ez az új gondolat!)**
- **Az egyszerű instrukciók azonos logikájúak:**
  - **egyszerűbb áramkörök, ezek gyorsabbak,**
  - **egyszerűbb, egységes dekódolás, ez is gyorsabb,**
  - **több regiszter lehet, ez is gyorsít,**
  - **egyszerűek, egyformák a címzési módok is.**
- **A bonyolultabb feladatokat viszont több instrukcióval. Lehet, hosszabb lesz a program.**

További előnyök

- **Egyforma a ciklusidő (többnyire 1 utasítás/1 ciklus). Ez segíti a szupercsatornázást (lásd később).**
- **Az egyszerű áramkörök (nagyobb frekvenciát engednek) engedik a belső egységek többszörözését. Lehetséges a szuperskalaritás.**
- **Könnyebb a "spekulatív végrehajtás" is.**
- **Befér a tokba a gyorsítótár is, egyre nagyobb.**
- **Illesztés operációs rendszerhez, fordítóprogramhoz.**

Párhuzamosítások

- **CPU-n belül:**
  - **Futószalag (pipe-line, csatorna) alkalmazása,**
  - **Többszörözésekkel: több instrukciót párhuzamosan dolgoznak fel (2-3 way: 2-3 utas)**
- **CPU-n kívül:**
  - **Fix feladat szétosztással (társrocesszorok)**
    - **lebegőpontos aritmetikára,**
    - **grafikára, képfeldolgozásra stb.**
  - **Változó feladat szétosztású multiprocesszoros rendszerek (dual/quad systems).**

A rendelkezésre álló és a hasznosított párhuzamosság

- **A párhuzamosság egyik legjobb teljesítménynövelő technika**
- **A rendelkezésre álló párhuzamosság: ami a feladatból, a megoldásukból adódik, a probléma megoldásban benne van**
- **A hasznosított párhuzamosság : amit a végrehajtás során érvényesíteni tudunk.**

A rendelkezésre álló párhuzamosság

- **Kétféle lehet: funkcionális párhuzamosság és adat párhuzamosság.**
- **A funkcionális ~ a feladatmegoldás logikájából jön. Belátható, hogy akár egy imperatív programban egyes szálak futhatnának párhuzamosan.**
  A funkcionális ~ rendszerint szabálytalan (kivéve a ciklusszintű ~-ot).
  A párhuzamosság mértéke nem nagy (gyenge párhuzamosság).
- **Az adat párhuzamosság olyan adatszerkezetek használatából származik, melyek elemein párhuzamosan lehet operációkat végezni.**
  Többnyire szabályos ~.
- **A párhuzamosság erős lehet (mértéke nagy, több-számjegyű).**

Az adatpárhuzamosság

- **Adatpárhuzamos architektúra kell.**
- **Vektorprocesszorok.**

A rendelkezésre álló funkcionális párhuzamosság szintjei

- **A „szemcsézettség” (granuláció) különböző lehet**
  - **Utasítás szintű párhuzamosság (finom szemcsézettség);**
    - **Instrukciókat párhuzamosan hajtunk végre**
  - **Ciklus szintű párhuzamosság (közepes szemcsézettség);**
    - **Egymást különben követő iterációkat párhuzamosan …**
  - **Eljárás szintű párhuzamosság (közepes szemcsézettség);**
    - **Eljárásokat, függvényhívásokat párhuzamosan … Szálak …**
  - **Program szintű párhuzamosság (durva szemcsézettség).**
    - **Felhasználói szint. Processzek (taszkok) párhuzamosan.**
    - **Hasznosításukhoz az operációs rendszer segítsége kell. Több processzoros HW is.**

Az eljárás szintű párhuzamosság hasznosulása

- **Eljárások párhuzamosan.**
  - **A szálak (threads) kezelése kell**
  - **Lehet fejlesztő rendszer segítségével,**
  - **lehet az operációs rendszer segítségével hasznosítani**

A ciklusszintű párhuzamosság hasznosulása

- **Iterációk párhuzamosan.**
  - **A fordítóprogram segíti felfedezni ezt**

Utasítás szintű párhuzamosság hasznosulása

- **Instrukciókat párhuzamosan hajtunk végre utasításszinten párhuzamos architektúrákkal (Instuction-Level Paralell, ILP processzorokkal)**
  - **Hagyományos „soros” programoknál ez rejtett (transzparens) marad: a processzor fedezi fel a programban rejlő párhuzamosítási lehetőséget.**
- **Futószalag feldolgozással és**
- **processzoron belüli funkcionális elemek többszörözéseivel.**

A futószalag (pipe-line, csővezeték, csatorna) feldolgozás

- **Egyetlen instrukció feldolgozása is több fokozaton (stage) megy keresztül. Legalább:**
  - **instrukció felhozatal (fetch),**
  - **dekódolás (decode) (és utasítás “kibocsátás“),**
  - **a tényleges végrehajtás,**
  - **Az eredmény beírás.**
- **Az egyes fokozatokat más-más egységek végzik, párhuzamosan dolgozhatnak:**
  - **az i. instrukció végrehajtása során**
  - **dekódolható az i+1. instrukció,**
  - **felhozható az i+2. sít.**

A RISC előnyök itt érvényesülnek

- **Egyforma instrukciók - egyforma fokozat idők.**
- **Egy ciklusra valóban kijöhet egy instrukció!**

Vannak gondok is

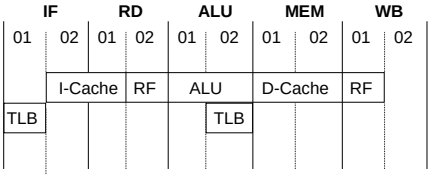
- **Időzítési kockázat: egy instrukcióhoz kell az előző eredménye. Várakozni kell rá. Függőség.**

Az R3000 szupercsöve

- **Az instrukciók végrehajtását 5 fokozatra (stage) osztja. Minden fokozatot még 2 fázisra.**
- **1 fokozat/1 ciklus**
- **A fokozatok:**
  - **Instrukció felhozatal IF**
  - **Olvasások, ellenőrzés RD**
  - **ALU operációk ALU**
  - **Adatmemória elérés MEM**
  - **Regiszter visszaírás WB**

Az instrukció végrehajtása során használja

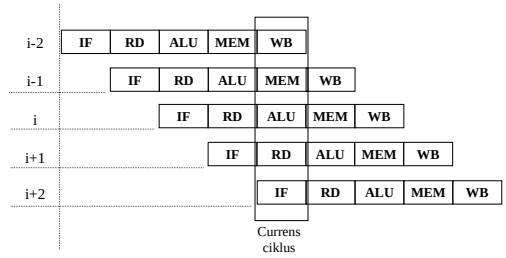
- **a címleképzést segítő asszociatív tárat (TLB, Translation Lookaside Buffer),**
- **az instrukció gyorsítótárat (I-Cache),**
- **az adat gyorsítótárat (D-Cache),**
- **a regiszterfájlt (RF).**



A fokozatok, fázisok tevékenysége

IF	**01**	**TLB-t használva virtuális címet fizikaira képez**			
	02	**Leképzett címet küldi az I-Cache-nek**			
RD	**01**	**Felhoz az I-Cache-ből, dekódol, ellenőriz**			
	02	**Regiszterfájl olvasás**			**Címszámítás**
ALU	**01**	**Aritmetikai számítás**	**Adat címszámítás**		**Döntés**
	02		**Adat cím leképzés**		
MEM	**01**		**Cím küldés D-Cache-nek**		
	02		**Adat mozgatása**		
WB	**01**	**Regiszterfájl írás**		**Regiszterfájl írás**	
		Aritmetikai instrukció	**Tároló (Store) instrukció**	**Betöltő (Load) instrukció**	**Ugró instrukció**

Az 5 mélységű futószalag



A PowerPC 601 futószalagjai

- **Elágazások**
  - **Felhozatal + Dekódolás-kibocsátás-végrehajtás-becslés (2 fokozat)**
- **Fixpontos aritmetika**
  - **Felhozatal + Dekódolás-kibocsátás + Végrehajtás + Beírás (4 fokozat)**
- **Load/Store instrukciók**
  - **Felhozatal + Dekódolás-kibocsátás + Címképzés + Gyorsítótár + Beírás (5 fokozat)**
- **Lebegőpontos aritmetika**
  - **Felhozatal + Kibocsátás + Dekódolás + Végrehajtás1 + Végrahajtás2 + Beírás (6 fokozat)**

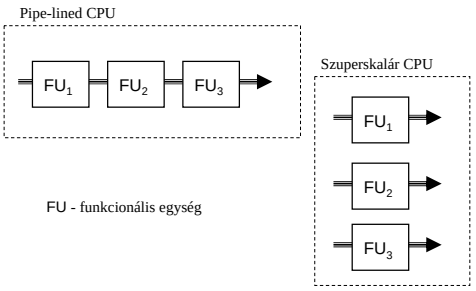
Megjegyzés

- **A szupercsatornás CPU: nagyon sok fokozat**
- **A futószalag technika nemcsak processzoron belül (mikroszinten) alkalmazható**
- **Makroszinten (több processzor képezi csövet) is alkalmazzák**
- **Logikai szinten is (figyelj a burok csővezetékére)**
- **Az adatfolyam gépek is – ha úgy tetszik – futószalagot használnak**

A funkcionális egységek többszörözése

- **A funkcionális egységek többszörözése általános párhuzamosítási technika**
- **Az utasításszintű párhuzamosításban is lehet többszörözés:**
  - **Több dekódoló**
  - **Több végrehajtó egység (ALU/VE) stb.**
- **A többszörözés – természetes – makroszinten is**
  - **vö. MIMD párhuzamosság**

Pipe-line versus többszörözés



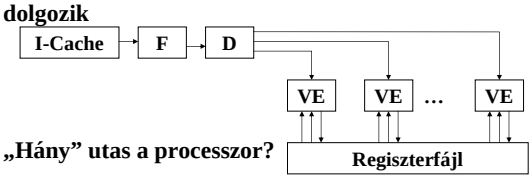
FU - funkcionális egység

Többszörözés processzoron belül

- **Egyik típus: VLIW (Very Long Instruction Word) architektúrák**
  - **Pl. Trace, Intel IA64, IA164**
  - **Speciális fordító állítja elő a hosszú utasítást (pl. egy hosszú utasításban egy lebegőpontos és egy fixpontos ADD vagy MUL, esetleg még „szélesebb")**
  - **Több ALU, ezeknek párhuzamosan a hosszú utasítást „szétbontva" bocsátja ki a dekódoló**
  - **Statikus a függőség feloldás (függőséget lásd később)**
- **Másik: szuperskalár processzorok**

Többszörözés processzoron belül, szuperskalár processzorok

- **Egy ütemben (időablakban) több hagyományos instrukciót visznek be (hoznak be)**
- **A több hagyományos instrukciót a (esetleg több) dekódoló elemzi, és többszörös az utasítás kibocsátás**
- **Párhuzamosan több ALU (végrehajtó egység, VE) dolgozik**



- **„Hány" utas a processzor?**

A szuperskalár processzorok

- **Jellemző a dinamikus függőség-feloldás**
- **Természetes a futószalag technika is**
- **A jellegzetes feladatok a szuperskalár feldolgozásban**
  - **Párhuzamos dekódolás**
  - **Szuperskalár (többutas) utasítás kibocsátás**
  - **Párhuzamos végrehajtás**
  - **A végrehajtás soros konzisztenciájának megőrzése**
  - **A kivételkezelés soros konzisztenciájának megőrzése**

Az utasítások közötti függőségek

- **A függőségek a párhuzamos végrehajtás alapvető korlátját jelentik**
- **Adatfüggőség: egy instrukció az előző eredményét használja**
- **Vezérlésfüggőség: feltételes ugró utasítástól függenek a vezérlési ágak**
- **Erőforrás függőség: instrukciók ugyanazt az erőforrást igénylik (pl. valamilyen végrehajtó egységet, ALU-t)**

Az adatfüggőségek

- **Valódi függőség a RAW függőség**

```
i1: load   r1, a          // r1 ← (a)
i2: add    r2, r1,  r1    // r2 ← (r1) + (r1)
```

- **Hamis függőség a WAR és a WAW függőség,**

```
i1: mul   r1, r2, r3      // r1 ← (r2) * (r3)
i2: add   r2, r4, r5      // r2 ← (r4) + (r5)
```

ui. regiszter-átnevezéssel fel lehet oldani

```
i1: mul   r1, r2, r3      // r1 ← (r2) * (r3)
i2: add   r36, r4, r5     // r36 ← (r4) + (r5)
```


További adatfüggőség, függőségi gráf

- **A ciklusfüggőség (ismétlési függőség)**
  - **k-ad rendű ismétlési függőség esetén a szóban forgó utasítás a megelőző k. ciklusban kiszámított értékre hivatkozik**
- **Az adat- és vezérlésfüggőségek felfedezhetők és**
- **ún. függőségi gráfban rögzíthetők.**
  - **Irányított gráf: csomópontok az instrukciók, élek a függőségek**
- **A függőségi gráf segítheti az utasításütemezést a**
- **valódi függőségek feloldására.**

A függőségek észlelése és feloldása

- **A függőségek észlelése és feloldása lehet statikus, vagy dinamikus**
- **Statikus: a fordítóprogram észleli és oldja fel: átrendezett instrukciósorozatot generál**
  - **A VLIW processzorok függőségmentes instrukciósorozatot várnak**
  - **Szuperskalár és futószalag processzorokra is lehet**
- **Dinamikus: a függőségek észlelése és kezelése a processzor feladata**
  - **A legtöbb szuperskalár processzor ilyen**

A dinamikus függőség-kezelés

- A processzor két csúszó ablakot alkalmaz
  - Kibocsátási ablakot, melyben
    - azok az instrukciók vannak, melyeket a következő ciklusban kibocsátana;
  - Végrehajtási ablakot, melyben
    - Az instrukciók még végrehajtás alatt vannak (eredményük még nincs meg).
- Minden ütemben vizsgálja, a kibocsátási ablakban van-e
  - a másik ablakbeli instrukciótól függő instrukció,
  - Ill. a kibocsátási ablak instrukciói között van-e függőség.
  - Ezektől és a kibocsátási politikától is függ a kibocsátás

Kibocsátási politikák

- Blokkolós kibocsátás
  - Addig blokkol instrukciót, míg a függősége megszűnik
- Sorrenden kívüli kibocsátás
  - blokkolt utáni függetleneket sorrenden kívül
- Spekulatív kibocsátás
  - Vezérlési függőség kezelésére mindkét ágat

A spekulatív végrehajtás

- Egy-egy instrukciót (operációt, elemi instrukciót) a lehető leghamarabb végrehajtanak, és függetlenül attól, hogy eredményére szükség lesz-e vagy sem… (amint lehet + függetlenül a szükségességétől. Szükségtelensége esetén gondoskodnak arról, hogy ne okozzon hibát!).
- A „betöltő” (load) instrukciókat (elég gyakoriak és elég költségesek) pl. célszerű spekulatívan végrehajtani (minél előbb és mindenképpen).

A soros konzisztencia fenntartása

- **Konzisztencia itt: ellentmondás mentesség**
  - **Ha „felborul” a sorrend a statikus v. dinamikus függőségkezelés, kódoptimalizálás miatt? A programozó szándéka? A logikai integritás?**
- **Párhuzamos végrehajtással is fenn kell tartani a soros végrehajtás logikáját!**
- **A soros konzisztencia lehet**
  - **Utasítás feldolgozás soros konzisztenciája,**
    - **Processzor konzisztencia (instrukciók sorrendje)**
    - **Memória konzisztencia (memória hozzáférések sorrendje)**
  - **Kivétel feldolgozás soros konzisztenciája**

A processzor konzisztencia

- **Az instrukciók befejezésének a sorrendje a kérdés**
- **Gyenge konzisztencia estén a befejezési sorrend eltérhet a programozottól, de ez integritási hibát nem okozhat.**
- **Erős konzisztencia esetén a befejezési sorrend szigorúan a programozói sorrend**
  - **Legtöbbször ezt egy átrendező puffer (ROB, ReOrder Buffer) alkalmazásával történik**

A ROB

- **A ROB egy kezdet- és végmutatókkal rendelkező körpuffer. Kezdetmutató jelzi a következő szabad bejegyzés helyét. Az egyes bejegyzésekben nyilvántartják a bejegyzéshez tartozó instrukció állapotát (kibocsátott, végrehajtás alatti, befejeződött). Egy instrukció csak akkor írható ki, ha befejeződött, és minden előtte lévő már ki van írva.**
- **A ROB segíti a spekulatív végrehajtásból adódó instrukciók érvényesítését, nem érvényesítését is (további állapotjelzővel)**

A megszakításkezelési sorrend

- **Ezt a konzisztenciát is segíti a ROB**
- **A megszakítások, kivételek kérését akkor fogadja el a processzor, mikor a ROB-ból kiírják (érvényesítik) az instrukciót**

A memória konzisztencia

- **Gyenge memória konzisztencia esetén eltérés lehet a programozott sorrendtől**
  - **ahol a programozói szándék nem sérül,**
  - **A be-ki mozgató (load-store) instrukcióknál is lehetséges a spekulatív végrehajtás: általában a load-ok előzhetnek store-okat**