

Arhitectura Calculatoarelor

Oprîtoiu Flavius
flavius.opritoiu@cs.upt.ro


23 Septembrie, 2020

Motivație

Înțelegerea principiilor proiectării sistemelor de calcul:

- ▶ creșterea susținută a performanței sistemelor de calcul
- ▶ oportunități de proiectarea sistemelor de calcul

Bibliografie:

1. J. Hennessy, D. Patterson, " *Computer Architecture: A Quantitative Approach*", 6th ed., Morgan Kaufmann, 2017, [Hepa17]
2.  M. Vlăduțiu, " *Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Implementations*", Springer, 2012, [Vlad12]
3. D. Patterson, J. Hennessy, " *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*", 5th ed., Morgan Kaufmann, 2013, [Pahe13]
4. R. Bryant, D. O'Hallaron, " *Computer Systems: A Programmer's Perspective*, 3rd" ed., Pearson, 2015, [Brha15]

Introducere

Cele 5 componente clasice ale unui sistem de calcul:

- ▶ input
- ▶ output
- ▶ memory
- ▶ datapath
- ▶ control

Datapath: efectuează operații aritmetice

Control: coordonează celelalte 4 componente indicând operațiile de efectuat, în concordanță cu instrucțiunile programului executat de microprocesor

ISA

Instruction Set Architecture (ISA) al unui calculator:

- ▶ cunoscut ca **Arhitectura unui calculator**
- ▶ reprezintă interfața între componentele hardware și software ale calculatorului
- ▶ include tot ceea ce un programator trebuie să cunoască pentru a putea construi un program în limbaj mașină care să fie executat corect de calculator
 - ▶ instrucțiuni, dispozitive Input/Output (I/O), ierarhii de memorie, ...

ISA: permite descrierea funcționalității unui Central Processing Unit (CPU) într-o manieră independentă de hardware-ul din interiorul CPU-ului

Exemplu: ceas digital

ISA (contin.)

ISA: ascunde detaliile complexe de construcție ale calculatorului care implementează respectivul ISA

- ▶ faciliteaza inovația la nivelul componentei hardware fără modificarea arhitecturii

Exemplu:

- ▶ atât 8086 cât și Pentium IV implementează aceeași arhitectură x86
 - ▶ 8086 conține ≈ 29 mii de tranzistori, având o performanță de 0.33 Millions of Instructions Per Second (MIPS)
 - ▶ Pentium IV conține ≈ 44 milioane de tranzistori, având o performanță de aprox. 5000 MIPS

Evoluția ISA

La începutul anilor 1960, International Business Machines (IBM) Corporation avea 4 ISA diferite:

- ▶ 701 → 7094: destinat calculului științific
- ▶ 702 → 7080: destinat marilor corporații
- ▶ 650 → 7074: sisteme de calcul în timp real
- ▶ 1401 → 7010: destinat micilor afaceri



Fiecare linie de produse avea propriile: seturi de programe, dispozitive I/O și piață de desfacere ⇒ efort mare de dezvoltare SW

Soluția: unificarea celor 4 ISA ⇒ *IBM System/360 ISA*

- ▶ datapath: poate acomoda ușor cuvinte de date înguste sau late
- ▶ hardware de control: dificil de proiectat, atât atunci cât și acum

¹J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Proiectarea hardware-ului de control



Control microprogramat (Maurice Wilkes)

- ▶ inspirat de programarea SW
- ▶ controlul este specificat printr-un *control store*
 - ▶ tabel bidimensional
 - ▶ mai multe elemente de controlat \Rightarrow mai multe coloane
 - ▶ instrucțiunile CPU-ului: formate din secvențe de μ instrucțiuni
 - ▶ fiecare μ instrucțiune ocupa o linie în control store
 - ▶ instrucțiuni complexe \Rightarrow mai multe linii în control store

Control store:

- ▶ implementat utilizând memorii
 - ▶ soluție mai ieftină comparativ cu utilizarea porților logice

IBM a dominat piața prin familia System/360

- ▶ System/360 a fost lansat în 1964
- ▶ descendenții acestei familii încă aduc profit de miliarde de dolari

²J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Evoluția ISA (contin.)

Primul calculator personal: *Alto*, creat în 1973

- ▶ este un Complex Instruction Set Computer (CISC)
- ▶ construit de Xerox Palo Alto Research Center
- ▶ primul calculator cu display bit-mapped
- ▶ primul calculator care utilizează Ethernet
- ▶ controller-ele pentru display și rețea sunt programe în control store-ul de 4K x 32b



3

"The next big ISA":

- ▶ în anii 1970 microprocesoarele sunt pe 8 biți (Intel 8080)
- ▶ Gordon Moore: următorul ISA al Intel va dăinui *a la longue*
 - ▶ assemblează o echipă în Portland pentru construcția lui
 - ▶ noul ISA, numit inițial 8800, ulterior redenumit "iAPX-432"
 - ▶ este un proiect ambițios: demarat în 1975, fără a fi însă materializat până în 1981, doar pentru a fi retras în 1986

³J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Evoluția ISA (contin.)

Urmarea insuccesului lui iAPX-432, Intel demarează un plan de avarie:

- ▶ să aibă un microprocesor pe 16 biți până în 1979
- ▶ o echipă în Santa Clara: în 52 de săptămâni va dezvolta ISA-ul "8086", va proiecta chip-ul și îl va construi
- ▶ ISA-ul 8086 a fost dezvoltat în 3 săptămâni extinzând arhitectura 8080 la 16 biți
- ▶ CPU-ul a fost terminat la termen, fără prea mult fast

Oportunitatea lui Intel:

- ▶ IBM dezvoltă un calculator personal pentru a concura cu Apple II și are nevoie de un CPU pe 16 biți
- ▶ IBM era interesat de Motorola 68000
 - ▶ 68000 avea un ISA similar cu cel al System/360
 - ▶ dar, 68000 nu ține pasul cu planul rapid de dezvoltare al lui IBM
- ▶ ca urmare, IBM alege CPU-ul 8086 de la Intel

Evoluția ISA (contin.)

Calculatorul Personal:

- ▶ IBM îl anunță în 12 August 1981
 - ▶ IBM speră să vândă 250 mii de unități până în 1986
 - ▶ în schimb vinde 100 milioane de unități
- ▶ acest deznodământ asigură un viitor luminos arhitecturii de avarie a lui Intel: 8086



4

În 1985 Intel extinde microprocesorul 8086 pe 16 biți construind microprocesorul 80386 pe 32 de biți.

Prezicerea lui Gordon Moore că următorul ISA va dăinui se implinește!

- ▶ viitorul a aparținut lui 8086, cunoscut și ca arhitectura x86
- ▶ succesul nu a fost de partea ambițiosului iAPX-432 sau arhitecturii Motorola 68000
 - ▶ ambele CPU-uri au "învățat" o lecție dură: *piața nu are răbdare*

⁴J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Evoluția ISA (contin.)

De la CISC la Reduced Instruction Set Computer (RISC):

- ▶ la începutul anilor 1980 apar unele schimbări de perspectivă:
 - ▶ sunt folosite limbaje de nivel înalt pentru dezvoltarea Operating System (OS)
 - ▶ întrebarea "ce limbaj de asamblare să folosesc" devine "ce instrucțiuni să utilizeze compilatorul"

Grupul lui John Coke de la IBM analizează arhitectura System/360:

- ▶ compilatorul folosește doar instrucțiuni simple (cele complexe sunt evitate)
- ▶ rezultatul: programele pot fi făcute să ruleze de *3 ori* mai repede folosind instrucțiuni simple
- ▶ această cercetare stă la baza tranziției de la CISC la RISC

Evoluția ISA (contin.)

RISC:

- ▶ instrucțiunile unui RISC: la fel de simple ca μ instrucțiunilor unui CISC
 - ▶ \Rightarrow hardware-ul de control devine mai puțin complex
- ▶ pentru că nu utilizează control store, această memorie rapidă preia rolul de cache al instrucțiunilor microprocesorului

Cache: mediu de stocare de dimensiuni mici, rapid care păstrează instrucțiunile executate recent, acestea fiind cel mai probabil necesare în viitorul apropiat

Întrebare De ce sunt necesare instrucțiunile tocmai executate în viitorul apropiat?

Evoluția ISA (contin.)

RISC:

- ▶ instrucțiunile unui RISC: la fel de simple ca μ instrucțiunilor unui CISC
 - ▶ \Rightarrow hardware-ul de control devine mai puțin complex
- ▶ pentru că nu utilizează control store, această memorie rapidă preia rolul de cache al instrucțiunilor microprocesorului

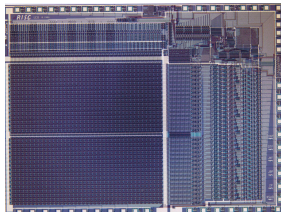
Cache: mediu de stocare de dimensiuni mici, rapid care păstrează instrucțiunile executate recent, acestea fiind cel mai probabil necesare în viitorul apropiat

Întrebare De ce sunt necesare instrucțiunile tocmai executate în viitorul apropiat?

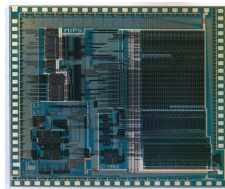
Răspuns Considerați fragmentul de cod următor:

```
1  int a = 1;  
2  int b = N;  
3  do {  
4      a = a * b;  
5      b = b - 1;  
6  } while (b != 0);
```

Evoluția ISA (contin.)



⁵



⁶

Microprocesoare RISC:

- ▶ RISC-I dezvoltat la Berkely în 1982 de o echipa ce îl include pe D. Patterson
- ▶ MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages) dezvoltat la Stanford în 1983 de o echipă condusă de J. Hennessy

Arhitecturile RISC au dominat performanța CPU-urilor mai bine de 15 ani

⁵J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

⁶J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Evoluția ISA (contin.)

Very Long Instruction Word (VLIW) și arhitectura Explicitly Parallel Instruction Computer (EPIC):

- ▶ previzionate a depăși în performanță RISC și CISC
- ▶ EPIC - un efort comun al Hewlett-Packard și Intel
- ▶ o instrucțiune de tip wide unește mai multe operații independente
 - ▶ 2 operații de acces la memorie
 - ▶ 2 operații cu întregi
 - ▶ 2 operații cu numere de virgulă mobilă
- ▶ s-a sperat că tehnologia de compilare va optimiza selecția operațiilor pentru instrucțiunile de tip wide
 - ▶ ca și CPU-urile RISC, efortul este transferat din HW către compilator



7

⁷J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Evoluția ISA (contin.)

EPIC promitea să înlocuiască arhitectura x86 pe 32 de biți:

- ▶ primul CPU EPIC a fost Itanium, pe 64-biți
 - ▶ performanțe ridicate pentru programe în virgulă mobilă structurate
 - ▶ performanțe slabe pentru cache miss-uri/branch-uri puțin predictibile
 - ▶ Knuth nota: compilatoarele "așteptate" erau imposibil de construit
 - ▶ rebotezat de unii în "Itanic"

Încă odată, piața nu are răbdare și alege versiunea pe 64-biți a arhitecturii x86 ca noul ISA

VLIW este relevant pentru aplicații de tip Digital Signal Processing, caracterizate de:

- ▶ programe scurte
- ▶ instrucțiuni condiționale simple
- ▶ lipsă cache



Evoluția ISA (contin.)



RISC vs CISC în era PC

- ▶ CPU-urile CISC reduc diferența de performanță față de RISC
 - ▶ echipe de dezvoltare mari (Intel și AMD)
 - ▶ beneficiază de viteza crescută a RISC
 - ▶ transformă intern, on-the-fly, instrucțiunile în μ instrucțiuni RISC
 - ▶ \Rightarrow tehnicile de creștere a performanței specifice RISC sunt acum aplicabile și microprocesoarelor CISC

Vârful erei PC atins în 2011:

- ▶ 350 milioane de microprocesoare x86 vândute anual
 - ▶ volum mare + profit redus \Rightarrow preț mai mic pentru x86 decât RISC
- ▶ produsele SW pentru PC crează o piață imensă
 - ▶ piața SW pentru Unix este mult mai diversă, oferind produse pentru diverse arhitecturi RISC (Alpha, HP-PA, MIPS, Power, SPARK)
 - ▶ programele pentru PC, comparativ, ofera aplicații "împachetate" compatibile doar cu arhitectura x86
 - ▶ \Rightarrow PC a dominat piața calculatoarelor de birou și serverelor de mici dimensiuni ai anilor 2000

Evoluția ISA (contin.)

Era post-PC:

- ▶ deschisă de Apple prin lansarea iPhone-ului în 2007
 - ▶ în loc să cumpere un microprocesor, Apple dezvoltă propriul System on Chip (SoC) folosind arhitecturi ale altor companii
- ▶ proiectanții de dispozitive mobile încep să valorifice reducerea dimensiunii și a puterii consumate
- ▶ ⇒ CPU-urile CISC sunt dezavantajate

Astăzi:

- ▶ vânzările x86 au scăzut anual cu 10% începând cu 2011
- ▶ vânzările CPU-urilor RISC au explodat la 20 miliarde de unități
 - ▶ 99% din CPU-urile pe 32 și 64 de biți sunt RISC

Evoluția ISA (contin.)



Concluzii privind evoluția arhitecturii calculatoarelor:

- ▶ piața a "rezolvat" rivalitatea CISC-RISC
 - ▶ CISC a dominat ultimii ani ai erei PC
 - ▶ RISC câștigă era post-PC
 - ▶ nicio arhitectură CISC în ultimii 30 ani
 - ▶ nicio arhitectură VLIW în ultimii 15 ani

Consensul, azi, în privința arhitecturii unui calculator favorizează soluțiile RISC, la 35 de ani de la introducerea acestora.

Provocări actuale pentru Arhitectura Calculatoarelor

De regulă, producătorul implementează un ISA nu construiește unul nou:

- ▶ Metal-Oxide Semiconductor (MOS): tehnologia prevalentă de implementare a microprocesoarelor începând cu a doua jumătate a anilor 1970
 - ▶ inițial în tehnologie nMOS
 - ▶ ulterior în tehnologie Complementary metal-oxide semiconductor (CMOS)
- ▶ evoluția tehnologiei CMOS a cunoscut salturi spectaculoase: legea lui Moore
 - ▶ v1: 1965: dublarea anuală a numărului de tranzistori \Rightarrow rata de creștere anuală de 100%
 - ▶ v2: 1975: dublarea la 2 ani a numărului de tranzistori \Rightarrow rata de creștere anuală de 41%

Întrebare Cum este evaluată o rată de creștere de 40% ?

Provocări actuale pentru Arhitectura Calculatoarelor

De regulă, producătorul implementează un ISA nu construiește unul nou:

- ▶ MOS: tehnologia prevalentă de implementare a microprocesoarelor începând cu a doua jumătate a anilor 1970
 - ▶ inițial în tehnologie nMOS
 - ▶ ulterior în tehnologie CMOS
- ▶ evoluția tehnologiei CMOS a cunoscut salturi spectaculoase: legea lui Moore
 - ▶ v1: 1965: dublarea anuală a numărului de tranzistori \Rightarrow rata de creștere anuală de 100%
 - ▶ v2: 1975: dublarea la 2 ani a numărului de tranzistori \Rightarrow rata de creștere anuală de 41%

Întrebare Cum este evaluată o rată de creștere de 40% ?

Răspuns O rată de creștere de 41% este foarte mare!

Exemple de rate anuale de creștere: culturi de porumb - 2%, eficiența generatoarelor electrice - 1.5%, eficiența sistemelor de iluminat - 2.6%, viteza călătoriilor intercontinentale - 5.6%, eficiența consumului de combustibil pentru autoturismelor - 2.5%

Provocări actuale (contin.)

Legea lui Moore încetinește în jurul anilor 2000

- ▶ în anul 2018 decalaj între nr. de tranzistori previzionat și cel actual a crescut de 15 ori
- ▶ decalajul acesta se va adânci mai mult în viitor

Legea lui Robert Dennard (1974)

- ▶ efectele miniaturizării tranzistorului
 - ▶ tranzistorul devine mai eficient energetic (scade puterea consumată)
 - ▶ tranzistorul devine mai rapid (tehnologie CMOS mai performantă)
- ▶ trendul de miniaturizare a tranzistorului a încetinit în jurul anului 2007
 - ▶ până în 2012 acest trend aproape a dispărut

Creșterea performanței CPU-urilor între 1986 și 2002

- ▶ facilitată de următorii factori:
 - ▶ tehnologia de integrare mai performantă
 - ▶ Instruction Level Parallelism (ILP)
- ▶ ⇒ creșterea performanței microprocesoarelor cu aproape 50%

Provocări actuale (contin.)

Diminuarea efectului legii lui Dennard:

- ▶ sunt necesare alte mijloace de creștere a performanței microprocesoarelor

Se declanșază era multi-core!

- ▶ problema exploataării paralelismului (la nivel de instrucțiuni sau date) este transferată către programator și limbaje de programare
- ▶ nu rezolva problema consumului de putere
 - ▶ fiecare nucleu activ consumă energie

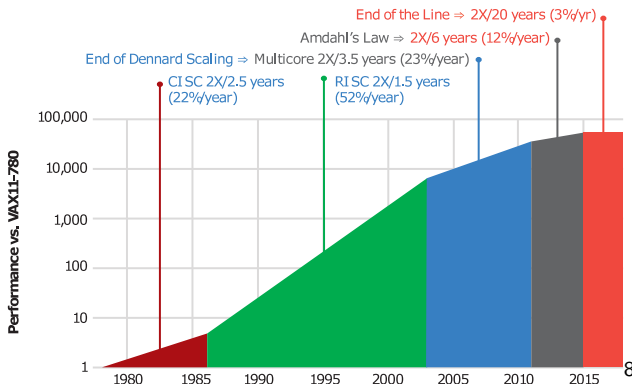
Creșterea numărului de nuclee \Rightarrow creșterea puterii consumate

- ▶ numărul de nuclee este limitat de Thermal Dissipation Power (TDP)
- ▶ "dark silicon" era: nucleele inactive nu sunt alimentate

Provocări actuale (contin.)

Creșterea performanței CPU-urilor măsurate de SPECint

- Standard Performance Evaluation Company (SPEC)



Revenirea la creșterea de performanță a anilor 1980 și 1990:

- abordări arhitecturale noi

⁸J. Hennessy, D. Patterson 2018: Turing Award Lecture [Hepa18]

Siguranța - tratată superficial

În anii 1970 proiectanții de CPU-uri adaugă măsuri arhitecturale de creștere a securității:

- ▶ majoritatea defectelor, considerate a origina în SW
- ▶ oferă suport HW pentru detecția lor

Facilitățile de securitate sunt nefolosite de OS:

- ▶ implicau costuri de performanță \Rightarrow sunt eliminate
- ▶ dintre măsurile actuale, dar modeste, de asigurare a securității:
 - ▶ suport HW pentru mașini virtuale
 - ▶ facilități HW pentru primitive criptografice

Siguranța - tratată superficial (contin.)

Execuția speculativă introduce în multe CPU-uri defecte de securitate neprevăzute dar importante:

- ▶ Meltdown și Spectre: exploatarea unor vulnerabilități în HW-ul microprocesoarelor
 - ▶ permite obținerea informațiilor confidențiale cu o viteză de peste 10 Kbit/sec
 - ▶ sunt utilizate atacuri de tip "side-channel":
 - ▶ informația este "scursă" (leaked) observând durata de execuție a unei sarcini de calcul și convertirea ei în informație
- ▶ atacul NetSpectre din 2018:
 - ▶ permite obținerea informațiilor la distanță, de la calculatoare conectate într-o rețea locală sau în același cluster (în cloud)

Atacurile "side-channel" nu sunt noi:

- ▶ anterior, succesul unui atacator era facilitat de vulnerabilități SW
- ▶ Meltdown și Spectre: vulnerabilitatea rezida în implementarea HW
 - ▶ ISA nu oferă informații privind efectele laterale ale execuției unei secvențe de instrucțiuni
 - ▶ ⇒ regândirea arhitecturii unui calculator

Referințe

- [Hepa17] J. L. Hennessy and D. A. Patterson, *Computer Architecture, Sixth Edition: A Quantitative Approach*, 6th ed. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2017.
- [Vlad12] M. Vlăduțiu, *Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Implementations*. Springer, 2012.
- [Pahe13] D. A. Patterson and J. L. Hennessy, *Computer Organization and Design, Fifth Edition: The Hardware/Software Interface*, 5th ed. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2013.
- [Brha15] R. E. Bryant and D. R. O'Hallaron, *Computer Systems: A Programmer's Perspective*, 3rd ed. Pearson, 2015.
- [Hepa18] J. L. Hennessy and D. A. Patterson, "Turing award lecture," <https://iscaconf.org/isca2018/docs/HennessyPattersonTuringLectureISCA4June2018.pdf>, 2018, accessed: 2020-09-14.