

Chương 1: Giới thiệu chung

Nội dung

- › Giới thiệu các hệ thống máy tính
- › Lịch sử phát triển
- › Mô hình Von Neumann
- › Đánh giá hiệu năng

Giới thiệu chung

- › **Computer architecture:** Kiến trúc máy tính
- › **Computer organization:** Tổ chức máy tính

Giới thiệu chung

› **Computer architecture:** Kiến trúc máy tính

- Đề cập đến các thuộc tính của một hệ thống có thể thấy được đối với một lập trình viên, hay nói cách khác, những thuộc tính có ảnh hưởng trực tiếp đến việc thực hiện của một chương trình.
- Bao gồm tập lệnh, số bit được sử dụng để biểu diễn các loại dữ liệu khác nhau (ví dụ: số, ký tự), cơ chế vào ra I/O, kỹ thuật định địa chỉ nhớ...

Giới thiệu chung

› **Computer organization:** Tổ chức máy tính

- Đề cập đến các khối chức năng và các kết nối giữa chúng để thực hiện những đặc trưng của kiến trúc
- Bao gồm các thuộc tính liên quan đến phần cứng như tín hiệu điều khiển; giao diện giữa máy tính và thiết bị ngoại vi; công nghệ bộ nhớ được sử dụng....

Giới thiệu chung

- › Sự khác biệt giữa kiến trúc và tổ chức máy tính là một điều quan trọng:
 - Nhiều hãng sản xuất máy tính cung cấp một họ các mô hình máy tính, tất cả đều có cùng kiến trúc nhưng có sự khác biệt về tổ chức.
 - Các mô hình máy tính khác nhau trong một họ có đặc điểm giá cả và hiệu suất khác nhau.
 - Một kiến trúc cụ thể có thể kéo dài nhiều năm và bao gồm một số mô hình máy tính khác nhau, tổ chức của nó thay đổi với công nghệ thay đổi.

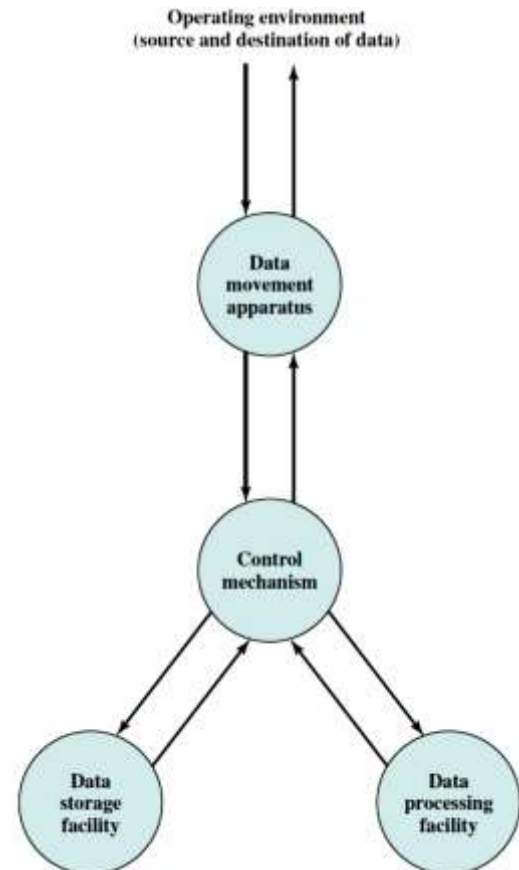
Giới thiệu chung

- › Một máy tính là một hệ thống phức tạp, chứa hàng triệu linh kiện điện tử cơ bản:
 - Máy tính có hệ thống phân cấp phức tạp: một tập hợp các hệ thống con có liên quan với nhau, lần lượt từng hệ thống phân cấp, theo cấu trúc phân cấp cho đến khi chúng ta đạt đến một mức thấp nhất của hệ thống con cơ bản.
 - Ở mỗi cấp độ, các nhà thiết kế quan tâm đến cấu trúc và chức năng:
 - › **Structure** (Cấu trúc): Cách thức mà các thành phần có liên quan với nhau.
 - › **Function** (Chức năng): Hoạt động của từng thành phần riêng lẻ như là một phần của cấu trúc.

Chức năng

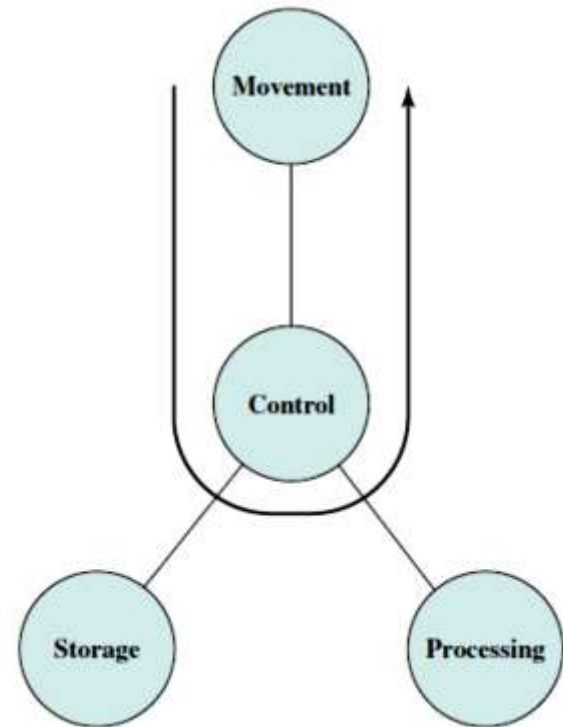
› Các chức năng cơ bản mà máy tính có thể thực hiện:

- Data processing: Xử lí dữ liệu
- Data storage: Lưu trữ dữ liệu
- Data movement: Dịch chuyển dữ liệu
- Control: Điều khiển



Chức năng

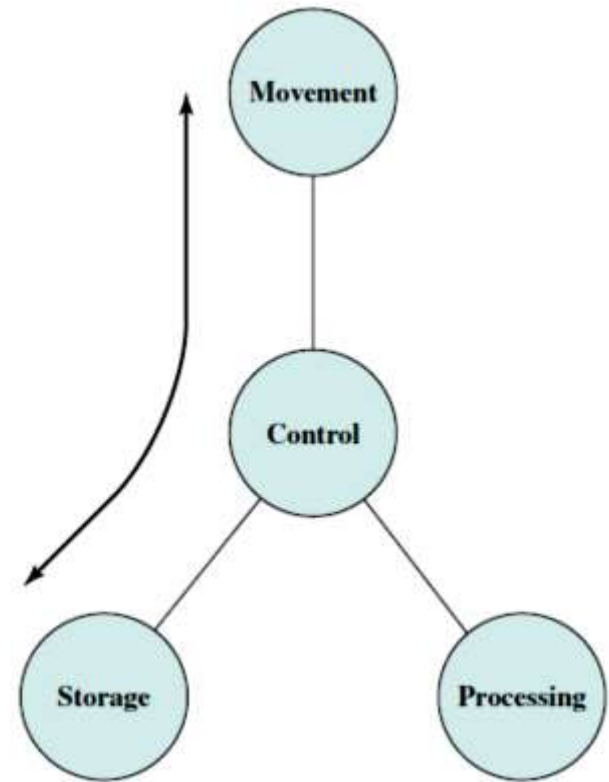
- › Dịch chuyển dữ liệu: giữa máy tính và thế giới bên ngoài:
 - Môi trường vận hành của máy tính bao gồm các thiết bị đóng vai trò là nguồn hoặc đích của dữ liệu.
 - Thực hiện khi dữ liệu được nhận hoặc được gửi đến một thiết bị được kết nối trực tiếp với máy tính, quá trình này được gọi là vào-ra (I/O) và thiết bị được gọi là thiết bị ngoại vi.
 - Thực hiện khi dữ liệu được di chuyển qua khoảng cách xa hơn, đến hoặc từ một thiết bị từ xa, quá trình này được gọi là truyền dữ liệu.



Chức năng

> Lưu trữ dữ liệu:

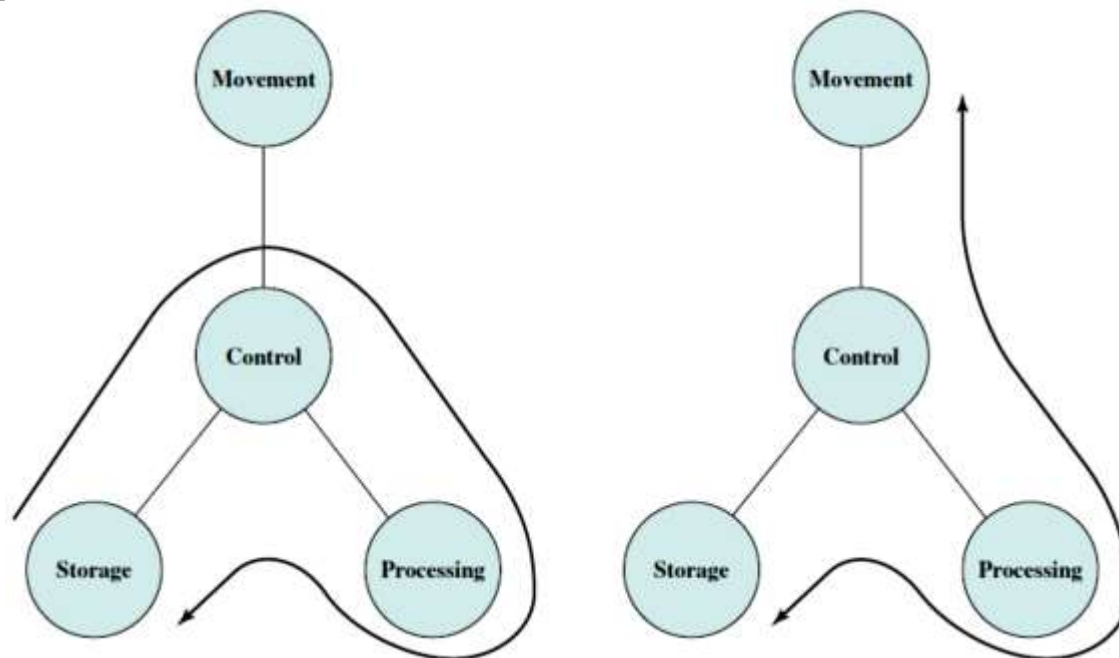
- khi máy tính đang xử lý dữ liệu một cách nhanh chóng (tức là dữ liệu đến, được xử lý và xuất kết quả ngay lập tức), máy tính phải tạm thời lưu trữ ít nhất những phần dữ liệu đang được xử lý tại bất kỳ thời điểm nào. Như vậy, cần một thời gian ngắn để thực hiện chức năng lưu trữ dữ liệu.
- Ngoài ra, máy tính thực hiện chức năng lưu trữ dữ liệu dài hạn. Các tệp dữ liệu được lưu trữ trên máy tính để phục hồi và cập nhật tiếp theo.



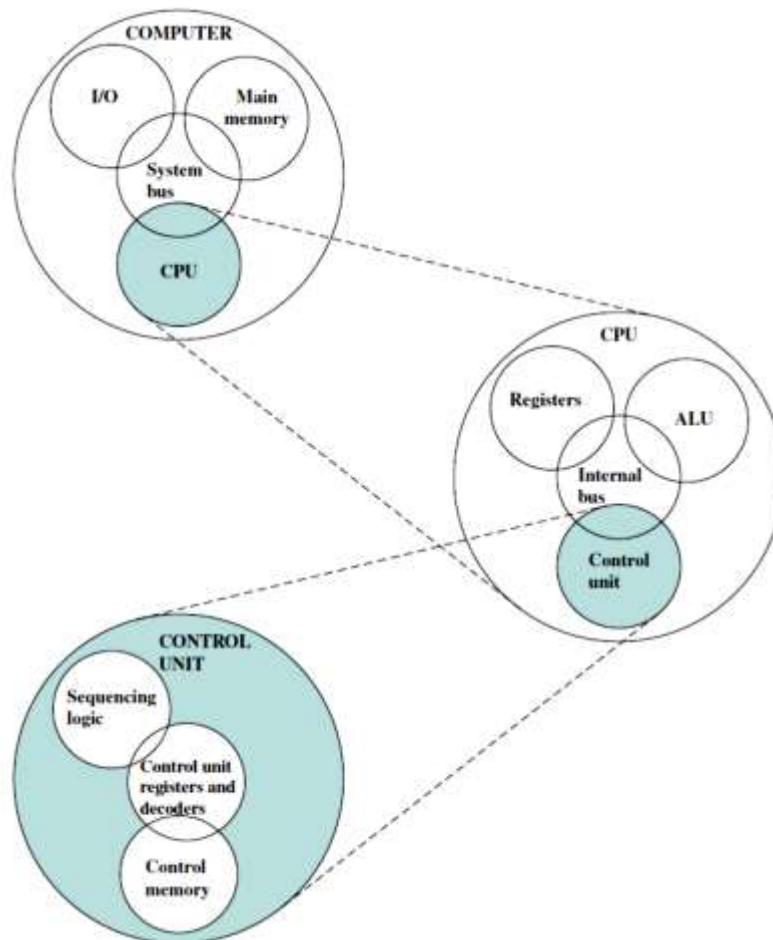
Chức năng

› Xử lí dữ liệu

- Dữ liệu có thể có nhiều dạng khác nhau và phạm vi yêu cầu xử lý khác nhau: xử lý dữ liệu và lưu trữ / xử lý dữ liệu, lưu trữ và di chuyển với bên ngoài



Cấu tạo máy tính



Cấu tạo máy tính

› Bốn thành phần chính:

- Bộ xử lý trung tâm (CPU): Điều khiển hoạt động của máy tính và thực hiện các chức năng xử lý dữ liệu của nó.
- Bộ nhớ chính (main memory): Lưu trữ dữ liệu.
- I/O: Dịch chuyển dữ liệu giữa máy tính và môi trường bên ngoài.
- Hệ thống kết nối (System interconnection): Một số cơ chế cung cấp khả năng giao tiếp giữa CPU, bộ nhớ chính và I/O hay còn gọi là các bus hệ thống, bao gồm một số dây dẫn mà tất cả các thành phần khác được gắn vào.

Cấu tạo máy tính

- › Thành phần chính của CPU:
 - Control unit: Điều khiển hoạt động của CPU và máy tính.
 - Arithmetic and logic unit (ALU): Thực hiện các chức năng xử lý dữ liệu của máy tính.
 - Registers: Cung cấp lưu trữ nội bộ cho CPU.
 - Thành phần kết nối bên trong CPU: cũng cấp cơ chế kết nối ba thành phần Control unit, ALU, and registers.

Phân loại máy tính (truyền thống)

- › Siêu máy tính (Supercomputer)
- › Máy tính lớn (Mainframe Computers)
- › Máy tính mini (Minicomputer)
- › Máy vi tính (MicroComputer)

Phân loại máy tính (hiện đại)

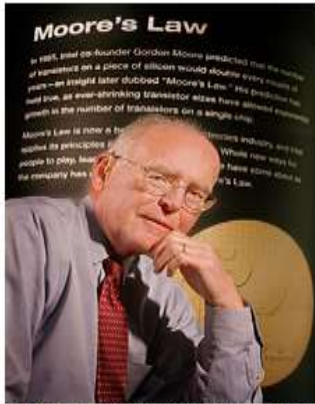
- › Thiết bị di động cá nhân (Personal Mobile Devices)
- › Máy tính cá nhân (Personal computers)
- › Máy chủ (Server computers)
- › Máy tính nhúng (Embedded computers)

Lịch sử phát triển

› Các thế hệ máy tính:

- Các máy tính cơ khí: bàn tính số học, máy tính PASCAL (thế kỷ XIX)
- Thế hệ thứ nhất (1st G), 1945-1955, sử dụng công nghệ đèn ống chân không (Vacuum Tube)
- Thế hệ thứ hai (2nd G): 1955 – 1973, sử dụng công nghệ bán dẫn (Transistor)
- Thế hệ thứ ba (3rd G): 1974 – 1979, sử dụng vi mạch tổ hợp IC (Integrated Circuit – IC)
- Thế hệ thứ tư (4th G): 1980 đến nay, sử dụng công nghệ tích hợp IC mật độ cực cao (Very Large Scale Intergrated – VLSI, Ultra Large Scale Integration – ULSI)

Định luật Moore



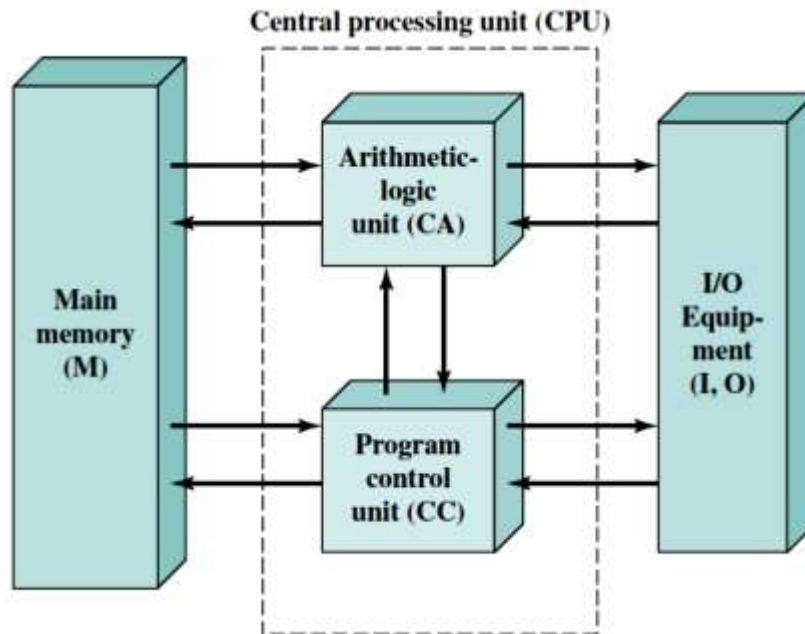
Gordon E. Moore, Co founder, Intel Corporation



- Gordon Moore –người đồng sáng lập Intel
- Định luật Moore : Số transistors trên chip sẽ gấp đôi sau 18 tháng

Mô hình Von Neumann

- › Mô hình Von Neumann: còn gọi là máy IAS, máy tính điện tử đầu tiên được chế tạo tại Viện nghiên cứu cao cấp (IAS) ở Princeton, New Jersey vào năm 1946.



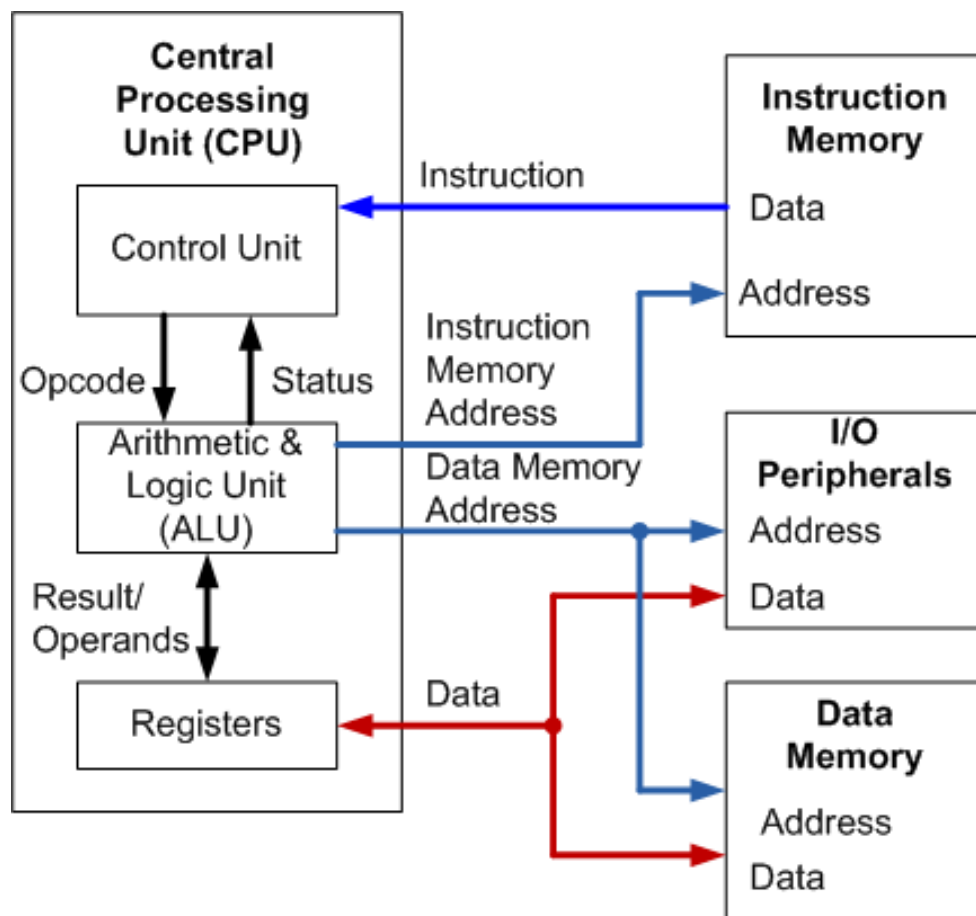
John von Neumann

Mô hình Von Neumann

› Nguyên lý hoạt động



Kiến trúc Harvard



Kiến trúc von-Neumann

› Kiến trúc von-Neumann:

- Lệnh và dữ liệu được lưu trữ trong bộ nhớ đọc ghi chia sẻ - một bộ nhớ duy nhất được sử dụng để lưu trữ cả lệnh và dữ liệu.
- Bộ nhớ được đánh địa chỉ theo vùng, không phụ thuộc vào nội dung nó lưu trữ
- Các lệnh của một chương trình được thực hiện tuần tự. Quá trình thực hiện lệnh được chia thành 3 giai đoạn chính:
 - › CPU đọc lệnh từ bộ nhớ
 - › CPU giải mã và thực hiện lệnh (nếu lệnh yêu cầu dữ liệu), CPU đọc dữ liệu từ bộ nhớ
 - › CPU ghi kết quả thực hiện lệnh vào bộ nhớ.

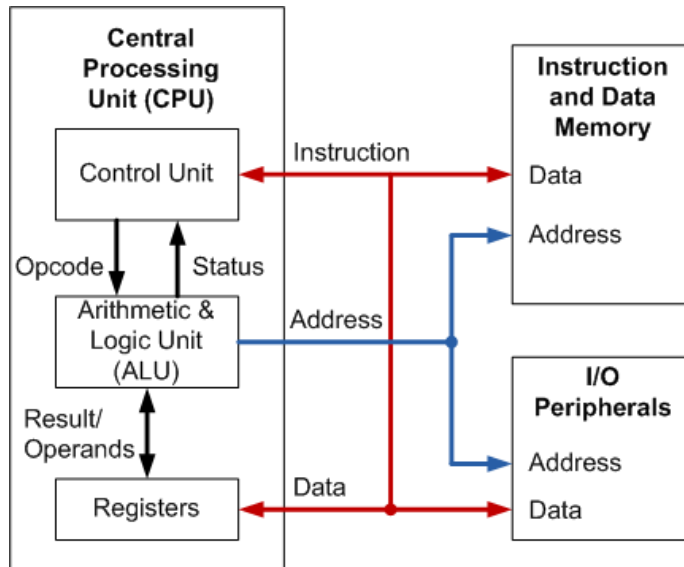
Kiến trúc Havard

- › Bộ nhớ lưu chương trình và bộ nhớ dữ liệu.
 - Hai hệ thống bus riêng được sử dụng để kết nối CPU với bộ nhớ lưu chương trình và bộ nhớ dữ liệu.
 - Mỗi hệ thống bus đều có đầy đủ ba thành phần để truyền dẫn các tín hiệu địa chỉ, dữ liệu và điều khiển.

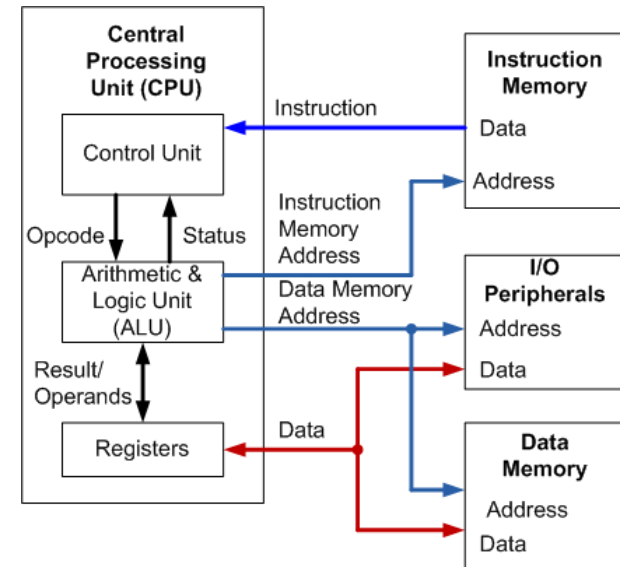
Kiến trúc Harvard

- › Máy tính dựa trên kiến trúc Harvard có khả năng đạt được tốc độ xử lý cao hơn máy tính dựa trên kiến trúc von-Neumann do kiến trúc Harvard hỗ trợ hai hệ thống bus độc lập với băng thông lớn hơn.
- › Nhờ có hai hệ thống bus độc lập, hệ thống nhớ trong kiến trúc Harvard hỗ trợ nhiều lệnh truy nhập bộ nhớ tại một thời điểm, giúp giảm xung đột truy nhập bộ nhớ.

Kiến trúc Von-Neuman và Havard



VON-NEUMANN



HARVARD

Kiến trúc Von-Neuman và Havard

› Điểm khác nhau:

- Kiến trúc Von-Neuman sử dụng một bộ nhớ duy nhất để lưu lệnh và dữ liệu và 1 hệ thống bus để kết nối;
- Kiến trúc Havard sử dụng 2 bộ nhớ, 1 lưu chương trình, 1 lưu dữ liệu và 2 hệ thống bus riêng để kết nối từng thành phần với CPU.
- Các lệnh trong hệ thống Von-Neumman được thực hiện tuần tự còn hệ thống Havard hỗ trợ nhiều lệnh truy cập bộ nhớ tại một thời điểm nên tốc độ xử lý của Havard cao hơn và tiên tiến hơn von-Neumman.

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel

	4004	8008	8080	8086	8088
Introduced	1971	1972	1974	1978	1979
Clock speeds	108 kHz	108 kHz	2 MHz	5 MHz, 8 MHz, 10 MHz	5 MHz, 8 MHz
Bus width	4 bits	8 bits	8 bits	16 bits	8 bits
Number of transistors	2,300	3,500	6,000	29,000	29,000
Feature size (μm)	10		6	3	6
Addressable memory	640 Bytes	16 KB	64 KB	1 MB	1 MB

	80286	386TM DX	386TM SX	486TM DX CPU
Introduced	1982	1985	1988	1989
Clock speeds	6 MHz - 12.5 MHz	16 MHz - 33 MHz	16 MHz - 33 MHz	25 MHz - 50 MHz
Bus width	16 bits	32 bits	16 bits	32 bits
Number of transistors	134,000	275,000	275,000	1.2 million
Feature size (μm)	1.5	1	1	0.8 - 1
Addressable memory	16 MB	4 GB	16 MB	4 GB
Virtual memory	1 GB	64 TB	64 TB	64 TB
Cache	—	—	—	8 kB

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel :

	486TM SX	Pentium	Pentium Pro	Pentium II
Introduced	1991	1993	1995	1997
Clock speeds	16 MHz - 33 MHz	60 MHz - 166 MHz,	150 MHz - 200 MHz	200 MHz - 300 MHz
Bus width	32 bits	32 bits	64 bits	64 bits
Number of transistors	1.185 million	3.1 million	5.5 million	7.5 million
Feature size (μm)	1	0.8	0.6	0.35
Addressable memory	4 GB	4 GB	64 GB	64 GB
Virtual memory	64 TB	64 TB	64 TB	64 TB
Cache	8 kB	8 kB	512 kB L1 and 1 MB L2	512 kB L2

	Pentium III	Pentium 4	Core 2 Duo	Core i7 EE 990
Introduced	1999	2000	2006	2011
Clock speeds	450 - 660 MHz	1.3 - 1.8 GHz	1.06 - 1.2 GHz	3.5 GHz
Bus width	64 bits	64 bits	64 bits	64 bits
Number of transistors	9.5 million	42 million	167 million	1170 million
Feature size (nm)	250	180	65	32
Addressable memory	64 GB	64 GB	64 GB	64 GB
Virtual memory	64 TB	64 TB	64 TB	64 TB
Cache	512 kB L2	256 kB L2	2 MB L2	1.5 MB L2/12 MB L3

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel

- › **8080**: Bộ vi xử lý đa năng đầu tiên trên thế giới đáp ứng đường dẫn dữ liệu 8 bit đến bộ nhớ; được sử dụng trong máy tính cá nhân đầu tiên, Altair.
- › **8086**: Máy tính có 16 bit mạnh hơn, đường dẫn dữ liệu rộng hơn và các thanh ghi lớn hơn, 8086 đã sử dụng bộ đệm lệnh, tìm nạp trước một vài lệnh trước khi chúng được thực thi;
- › **8088**: một biến thể của nó là 8086, đã được sử dụng trong máy tính cá nhân đầu tiên của IBM. 8086 là sự xuất hiện đầu tiên của kiến trúc x86.

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel

- › **80286**: mở rộng của 8086 cho phép cho phép định địa chỉ nhớ lên 16 MByte thay vì chỉ 1 MByte.
- › **80386**: máy 32 bit đầu tiên của Intel. Với kiến trúc 32 bit, đây là bộ xử lý Intel đầu tiên hỗ trợ đa nhiệm, có nghĩa là nó có thể chạy nhiều chương trình cùng một lúc.
- › **80486**: đã giới thiệu việc sử dụng công nghệ bộ nhớ cache và kỹ thuật ống dẫn tinh vi và mạnh mẽ; 80486 cũng cung cấp bộ đồng xử lý toán học tích hợp, giảm tải các hoạt động toán học phức tạp từ CPU chính.

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel

- › **Pentium:** Với Pentium, Intel đã giới thiệu việc sử dụng các kỹ thuật vô hướng, cho phép thực hiện nhiều lệnh song song.
- › **Pentium Pro:** tiếp tục tổ chức siêu vô hướng với việc sử dụng mạnh mẽ các kỹ thuật đổi tên thanh ghi (register renaming), dự đoán rẽ nhánh (branch prediction), phân tích luồng dữ liệu (data flow analysis)...
- › **Pentium II :** tích hợp công nghệ Intel MMX, được thiết kế đặc biệt để xử lý dữ liệu video, âm thanh và đồ họa một cách hiệu quả
- › **Pentium III :** tổ chức kết hợp các lệnh dấu phẩy động (floating-point instructions) bổ sung để hỗ trợ phần mềm đồ họa 3D.
- › **Pentium 4:** tăng cường thêm các lệnh dấu phẩy động và các cải tiến cho đa phương tiện.

Sự phát triển của bộ vi xử lý Intel

- › **Core:** Đây là bộ vi xử lý Intel x86 đầu tiên có lõi kép, đề cập đến việc thực hiện hai bộ xử lý trên một chip đơn.
- › **Core 2:**
 - Mở rộng kiến trúc lên 64 bit.
 - Core 2 Quad cung cấp bốn bộ xử lý trên một chip đơn.
 - Các loại Core gần đây có thể lên tới 10 bộ xử lý cho mỗi chip.

Embedded system – Hệ thống nhúng

- › Một sự kết hợp giữa phần cứng, phần mềm máy tính, và các thành phần cơ khí khác, được thiết kế để thực hiện một chức năng chuyên dụng.
- › Trong nhiều trường hợp, hệ thống nhúng là một phần của hệ thống hoặc sản phẩm lớn hơn.

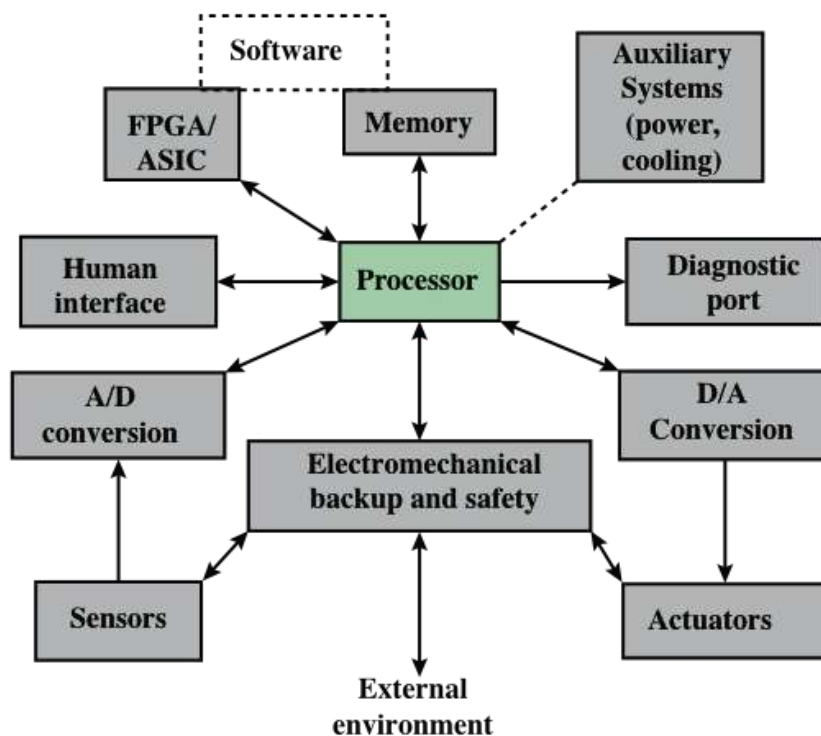
Embedded system – Hệ thống nhúng

Market	Embedded Device
Automotive	Ignition system Engine control Brake system
Consumer electronics	Digital and analog televisions Set-top boxes (DVDs, VCRs, Cable boxes) Personal digital assistants (PDAs) Kitchen appliances (refrigerators, toasters, microwave ovens) Automobiles Toys/games Telephones/cell phones/pagers Cameras Global positioning systems
Industrial control	Robotics and controls systems for manufacturing Sensors
Medical	Infusion pumps Dialysis machines Prosthetic devices Cardiac monitors
Office automation	Fax machine Photocopier Printers Monitors Scanners

Embedded system – Hệ thống nhúng

- › Các hệ thống nhúng bao gồm một loạt các ứng dụng khác nhau, có các yêu cầu và ràng buộc khác nhau:
 - Các hệ thống nhúng được gắn chặt với môi trường (hoạt động) của chúng. Điều này có thể làm phát sinh các ràng buộc thời gian thực bởi nhu cầu tương tác với môi trường.
 - Các ràng buộc điển hình như tốc độ chuyển động cần thiết, độ chính xác cần thiết của phép đo và thời lượng yêu cầu, yêu cầu thời gian của các hoạt động phần mềm....
 - Nếu nhiều hoạt động phải được quản lý đồng thời, điều này dẫn đến các ràng buộc thời gian thực phức tạp hơn...

Tổ chức hệ thống nhúng



Actuators: các bộ dẫn động

A/D: Analog-to-digital

D/A : Digital-to-analog

Acorn RISC Machine (ARM)

- › ARM là một nhóm các bộ vi xử lý và vi điều khiển dựa trên RISC, được thiết kế bởi ARM Inc., Cambridge, Anh.
 - Công ty không tạo ra bộ xử lý mà thay vào đó thiết kế các kiến trúc vi xử lý và đa lõi, và cấp phép cho các nhà sản xuất.
 - Chip ARM là bộ xử lý tốc độ cao được biết đến với kích thước khuôn nhỏ và yêu cầu năng lượng thấp.
 - Chúng được sử dụng rộng rãi trong các thiết bị PDA và các thiết bị cầm tay khác, như các thiết bị chơi game, điện thoại...
 - Chip ARM là bộ xử lý trong các thiết bị iPod và iPhone phổ biến của Apple. ARM có lẽ là kiến trúc bộ xử lý được sử dụng rộng rãi nhất trên thế giới.

Acorn RISC Machine (ARM)

- › Nguồn gốc của công nghệ ARM có thể được truy nguyên từ công ty Acorn Computer có trụ sở tại Anh.
 - Đầu những năm 1980, Acorn được Tập đoàn BBC trao hợp đồng phát triển kiến trúc máy vi tính mới cho Dự án *Computer Literacy Project* của BBC. Thành công của hợp đồng này đã cho phép Acorn tiếp tục phát triển bộ xử lý RISC thương mại đầu tiên, Acorn RISC.
 - Phiên bản đầu tiên, ARM1, bắt đầu hoạt động vào năm 1985 và được sử dụng cho nghiên cứu và phát triển nội bộ, cũng như được sử dụng làm bộ đồng xử lý trong các máy của BBC.
 - Cũng trong năm 1985, Acorn đã phát hành ARM2, có chức năng và tốc độ lớn hơn trong cùng một không gian vật lý. Những cải tiến hơn nữa đã đạt được với việc phát hành vào năm 1989 của ARM3.

ARM Evolution

Family	Notable Features	Cache	Typical MIPS @ MHz
ARM1	32-bit RISC	None	
ARM2	Multiply and swap instructions; Integrated memory management unit, graphics and I/O processor	None	7 MIPS @ 12 MHz
ARM3	First use of processor cache	4 kB unified	12 MIPS @ 25 MHz
ARM6	First to support 32-bit addresses; floating-point unit	4 kB unified	28 MIPS @ 33 MHz
ARM7	Integrated SoC	8 kB unified	60 MIPS @ 60 MHz
ARM8	5-stage pipeline; static branch prediction	8 kB unified	84 MIPS @ 72 MHz
ARM9		16 kB/16 kB	300 MIPS @ 300 MHz
ARM9E	Enhanced DSP instructions	16 kB/16 kB	220 MIPS @ 200 MHz
ARM10E	6-stage pipeline	32 kB/32 kB	
ARM11	9-stage pipeline	Variable	740 MIPS @ 665 MHz
Cortex	13-stage superscalar pipeline	Variable	2000 MIPS @ 1 GHz
XScale	Applications processor; 7-stage pipeline	32 kB/32 kB L1 512 kB L2	1000 MIPS @ 1.25 GHz

DSP = digital signal processor

SoC = system on a chip

ARM

- › Theo trang web của ARM arm.com, bộ xử lý ARM được thiết kế để đáp ứng nhu cầu của ba loại hệ thống:
 - **Embedded real-time systems** (Các hệ thống nhúng thời gian thực): Các hệ thống lưu trữ, thân xe và các ứng dụng điện, công nghiệp và mạng.
 - **Application platforms** (Nền tảng ứng dụng) : Các thiết bị chạy các hệ điều hành mở bao gồm Linux, Palm OS, Symbian OS và Windows CE trong các ứng dụng không dây, giải trí tiêu dùng và hình ảnh kỹ thuật số.
 - **Secure applications** (Ứng dụng bảo mật): Thẻ thông minh, thẻ SIM và thiết bị đầu cuối thanh toán.

Các thông số đo khả năng xử lý của máy tính

› Hiệu năng máy tính (Performance)

- Thời gian cần thiết để thực hiện một chương trình

$$Performance = \frac{1}{CPU\ Execution\ time}$$

$$CPU\ Execution\ time = IC \times CPI \times (Time\ per\ cycles)$$

$$= IC \times CPI \times \left(\frac{1}{Clock\ rate} \right)$$

IC - Số lệnh (Instruction Count) được thực hiện

Clock rate - Tần số đồng hồ xung nhịp hệ thống

CPI - Số chu kỳ cần thiết để thực hiện một lệnh (Clock Cycles per Instruction)

Các thông số đo khả năng xử lý của máy tính

› Hiệu năng máy tính (Performance)

- Nhiều loại lệnh khác nhau có số chu kỳ khác nhau, do vậy khi máy tính thực hiện nhiều lệnh khác nhau thì ta có tổng số chu kỳ:

$$N = \sum_{i=1}^K IC_i \times CPI_i$$

- Số CPI trung bình

$$\overline{CPI} = \frac{N}{IC} = \left(\sum_{i=1}^K CPI_i \times \frac{IC_i}{IC} \right)$$

Các thông số đo khả năng xử lý của máy tính

› Ví dụ: Cho bảng chỉ ra các dãy lệnh sử dụng các lệnh thuộc các loại A, B, C. Tính CPI trung bình?

Loại lệnh	A	B	C
CPI theo loại lệnh	1	2	3
IC trong dãy lệnh 1	2	1	2
IC trong dãy lệnh 2	4	1	1

- Dãy lệnh 1: $IC = 2+1+2=5 \Rightarrow N1 = 2 \times 1 + 1 \times 2 + 2 \times 3 = 10$
- Dãy lệnh 2: $IC = 4+1+1=6 \Rightarrow N2 = 4 \times 1 + 1 \times 2 + 1 \times 3 = 9$

$$\overline{CPI}_1 = \frac{10}{5} = 2$$

$$\overline{CPI}_2 = \frac{9}{6} = 1.5$$

Các thông số đo khả năng xử lý của máy tính

- › MIPS như là thước đo hiệu năng
 - MIPS: Millions of Instructions Per Second (Số triệu lệnh được thực hiện trong 1 giây)

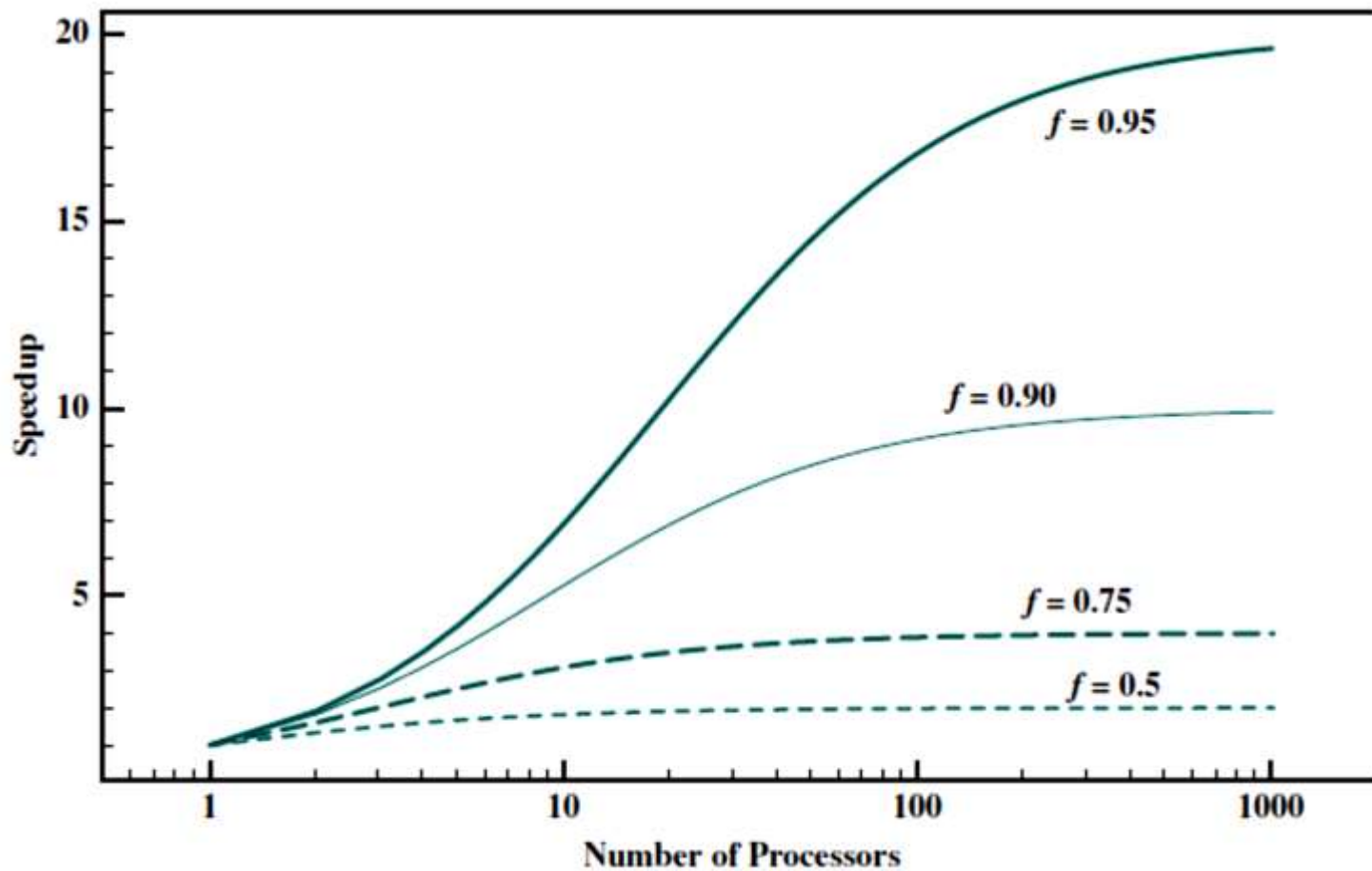
$$MIPS = \frac{IC}{CPU\ Execution\ time \times 10^6} = \frac{IC}{\frac{IC \times CPI}{Clock\ rate} \times 10^6}$$

$$MIPS = \frac{Clock\ rate}{CPI \times 10^6}$$

Các thông số đo khả năng xử lý của máy tính

- › Ví dụ: Tính MIPS của bộ xử lý với: Clock rate = 2GHz và CPI = 4
 - 1 chu kỳ = $1 / (2 \times 10^9) = 0,5\text{ns}$
 - CPI = 4
 - Thời gian thực hiện một lệnh lệnh: $4 \times 0,5\text{ns} = 2 \text{ ns}$
 - Vậy bộ xử lý thực hiện được 500 MIPS

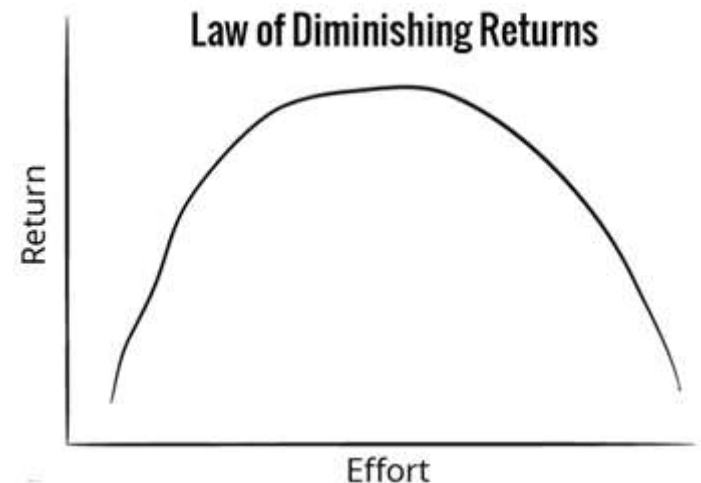
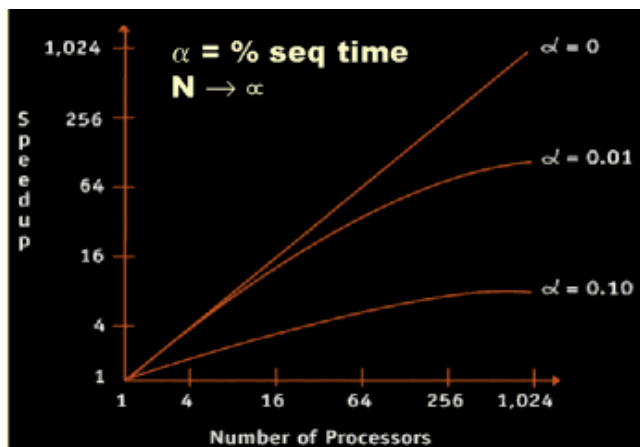
Amdahl's Law



Amdahl's law

- › Khi tỷ lệ f là nhỏ, thì việc sử dụng các vi xử lý song song có hiệu quả ít.
- › Khi N là vô cực (vô cùng lớn) thì sẽ có trở về **hiệu Suất Giảm Dần** (diminishing returns) với việc sử dụng các vi xử lý nhiều hơn

$$\begin{aligned} \text{Speedup} &= \frac{\text{time to execute program on a single processor}}{\text{time to execute program on } N \text{ parallel processors}} \\ &= \frac{T(1-f) + Tf}{T(1-f) + \frac{Tf}{N}} = \frac{1}{(1-f) + \frac{f}{N}} \end{aligned}$$



Hết chương 1