Pannon Egyetem
Villamosmérnöki és Információs Tanszék

Számítógép Architektúrák II.
(MIVIB344ZV)

9. előadás: Beágyazott rendszerek alapjai. Mikrovezérlők (MCU-k).

Előadó: Dr. Vörösházi Zsolt
voroshazi.zsolt@mik.uni-pannon.hu

Jegyzetek, segédanyagok:

- Könyvfejezetek:
  - http://www.virt.uni-pannon.hu → Oktatás → Tantárgyak → Számítógép Architektúrák II.
- Fóliák, óravázlatok .ppt (.pdf)
- Feltöltésük folyamatosan

Ajánlott és felhasznált irodalom

- Fodor Attila, Dr. Vörösházi Zsolt: Beágyazott rendszerek és programozható logikai alkatrészek (TÁMOP 4.1.2) Egyetemi jegyzet (2011)

📖 http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0008_fodorvoroshazi/Fodor_Voroshazi_Beagy_0903.pdf
(1. Beágyazott rendszerek fejezetrész)

- MCU = Micro Controller Unit:
  - 📖 https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller
  - 📖 https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications/
  - 📖 https://www.elprocus.com/difference-between-avr-arm-8051-and-pic-microcontroller/
  - 📖 https://www.elprocus.com/difference-between-arduino-and-raspberry-pi/

Beágyazott rendszerek

Bevezetés

Beágyazott Rendszerek

- A beágyazott rendszer (**Embedded System**) a (számítógépes) **hardver-** és **szoftver**elemeknek kombinációja, amely kifejezetten egy adott funkciót, *specifikus* (vezérlési) feladatot képes ellátni, szemben az általános célú számítógép rendszerekkel.

HW + (FW) + SW + (OS) = Beágyazott rendszer

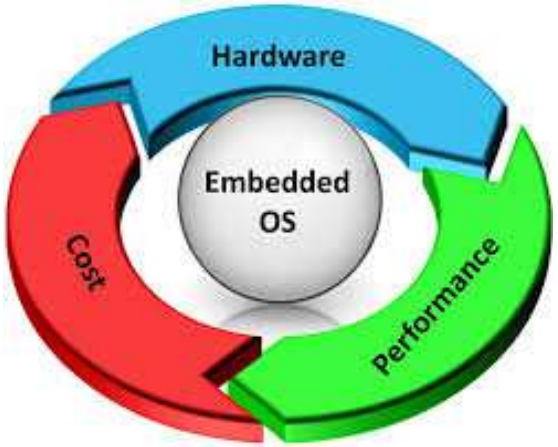
- A beágyazott rendszerek olyan számítógépes eszközöket tartalmazhatnak, amelyek alkalmazás-orientált célberendezésekkel (**ASIC/ASSP, GPU, FPGA, MCU, CPU/MPU, DSP**, stb.), vagy komplex alkalmazói rendszerekkel (akár OS) szervesen egybeépülve akár azok **autonóm** működését is képesek biztosítani.
- A ***programozható*** beágyazott rendszerek olyan programozói interfésszel vannak ellátva, amelyek általában sajátos szoftver (firmware) fejlesztési stratégiákat és technikákat követelnek meg.

Néhány fontos alkalmazási terület

- Autóipari alkalmazások: beágyazott elektronikus vezérlők
  - Biztonságkritikus: központi elektronikai vezérlő (ECU), motorvezérlés, fékrásegítő, sebességváltó, blokkolásgátló vezérlés (ABS), kipörgés-gátló (ESP) légzsák
  - Utas központú (komfort) rendszerek: szórakoztatás, ülés/tükör ellenőrzés stb.
- Repülőgép-ipari és védelmi alkalmazások
  - Repülésirányító rendszerek (fedélzeti navigáció, GPS vevő), hajtómű vezérlés, robotpilóta
  - Védelmi rendszerek, radar rendszerek, rádió rendszerek, rakétavezérlő rendszerek
- Gyógyászati berendezések:
  - Orvosi képfeldolgozás
  - Jelmonitorozás (PET, MRI, CT)
- Hálózati/ telekommunikációs rendszerek (modem, router stb.)
- WSN: Vezeték nélküli szenzorhálózatok (motes)
- IoT: Intelligens, vagy smart rendszerek
- Háztartási gépek, ill. fogyasztói elektronika
  - mobiltelefon, PDA, PNA, digitális kamera, nyomtató stb.

Általános követelmények

- „Dedikált” funkció
  - Jól körülhatárolt (alkalmazás specifikus) funkció(k) támogatása
- Szigorú követelmények
  - Alacsony költség (**C**ost)
  - Gazdaságosság (**E**conomy) - lehetőleg minimális alkatrészből épüljön fel
  - Gyors működés (**S**peed)
  - Alacsony disszipáció (**P**ower)



- Valós idejű (real-time) működés és válasz
  - a környezetet folyamatos monitorozása, és beavatkozás
- Hardver-, és szoftver részek elkülönült, de együttes tervezése (co-design), tesztelése (co-simulation), ellenőrzése (co-verification)

Alapkövetelmények:

- **Idő**: Egy bekövetkező esemény kezelését a beágyazott rendszer egy *meghatározott* időn belül kezdje el.
- **Biztonság**: olyan rendszer vezérlése, amely hibás működés esetén egészségkárosodás, és komoly anyagi kár nélkül kezeli a bekövetkező eseményt.

E filozófia mentén a beágyazott rendszerek két *alcsoportját* lehet definiálni:

- **Valós idejű rendszer (v. idő kritikus)**: melynél az időkövetelmények betartása a legfontosabb szempont,
- **Biztonságkritikus rendszer**: melynél a biztonsági funkciók sokkal fontosabbak, mint az időkövetelmények betartása.

Megjegyzés: A valóságban nem lehet ilyen könnyedén a beágyazott rendszereket csoportosítani, mert lehetnek olyan valós idejű rendszerek is, melyek rendelkeznek a biztonságkritikus rendszerek bizonyos tulajdonságaival. Szabványok és a törvények szabályozzák azt, hogy milyen alkalmazásoknál kell kötelezően biztonságkritikus rendszert alkalmazni (pl. ADAS ISO 26262).

Valós-idejű rendszerek

A követelmények szigorúsága alapján kétféle valós-idejű (real-time) rendszert különböztethetünk meg:

- **hard real-time rendszer**: *szigorú* követelmények vannak előírva, és a *kritikus* folyamatok meghatározott *időn* belül kell, hogy feldolgozásra kerüljenek,

- **soft real-time rendszer**: a követelmények kevésbé szigorúak, és a *kritikus* folyamatokat a rendszer mindössze nagyobb *prioritással* dolgozza fel.

Ütemezés (scheduling)

A (valós-idejű) operációs rendszerek (**OS**/**RTOS**) számára is kritikus feladat az ütemezés és az *erőforrásokkal való optimális gazdálkodás*. Mivel minden rendszer, valamilyen periféria segítségével kommunikál a környezetével, ezért fontos a perifériák valós-idejű rendszer követelményeinek megfelelő módon történő kezelése: a válaszidő betartásához az eseményt lekezelő *utasítás sorozatot* végre kell hajtani. Az utasítássorozat lefutása *erőforrásokat* igényel, melyeket az operációs rendszernek kell biztosítani, hogy hozzá tudja rendelni az időkritikus *folyamatokhoz*.

A processzorok **ütemezésének** következő szintjeit lehet megkülönböztetni:

- Hosszú-távú (long term) ütemezés vagy munka ütemezés,
- Közép-távú (medium term) ütemezés,
- Rövid-távú (short term) ütemezés.

Ütemezés szintjei

Az operációs rendszerek magja (kernel) tartalmazza az ütemezőt.

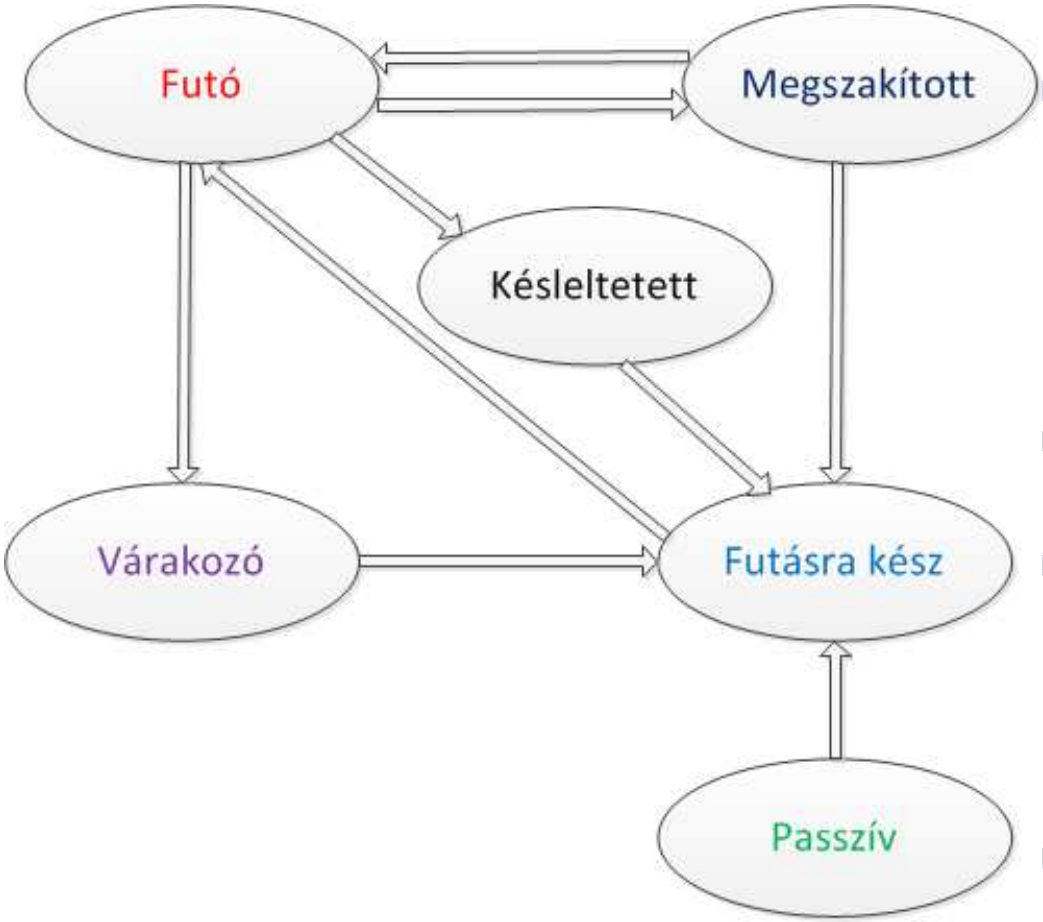
- **A hosszú-távú ütemezés** feladata, hogy a *háttértáron* várakozó, még el nem kezdett munkák közül meghatározza, melyek kezdjenek el futni, a munka befejeződésekor ki kell választania egy új elindítandó munkát. A hosszú-távú ütemezést végző algoritmusnak ezért *ritkán* kell futnia.
- **A közép-távú ütemezés** az időszakos *terhelésingadozásokat* hívatott megszüntetni, hogy a nagyobb terhelések esetében ne legyenek időtúllépések. A középtávú ütemező algoritmus ezt úgy oldja meg, hogy bizonyos (nem időkritikus) folyamatokat *felfüggeszt*, majd *újraaktivál* a rendszer terhelésének a függvényében. Folyamat felfüggesztése esetén a folyamat a *háttértáron* tárolódik, az operációs rendszer elveszi a folyamattól az erőforrásokat, melyeket csak a folyamat újraaktiválásakor ad vissza a felfüggesztett folyamatnak.
- **A rövid-távú ütemezés** feladata, hogy kiválassza, hogy melyik futásra kész folyamat *kapja meg a processzort*. A rövidtávú ütemezést végző algoritmus *gyakran* és *gyorsan* fut le, ezért az operációs rendszer mindig a *memóriában* tartja az ütemező kódját.

Ütemezés – további fogalmak

Az ütemezéssel és a programokkal kapcsolatban a következő alapfogalmak értelmezhetők:

- **Task**: Önálló részfeladat.
- **Job**: A task-ok kisebb, rendszeresen végzett részfeladatai.
- **Process**: A legkisebb futtatható programegység, egy önálló ütemezési entitás, amelyet az OS önálló programként kezel. Van saját (védett) memória területe, mely más folyamatok számára elérhetetlen. A task-okat folyamatokkal implementálhatjuk.
- **Thread**: Saját memóriaterület nélküli ütemezési entitás, az azonos szülőfolyamathoz tartozó *szálak* azonos memóriaterületen dolgoznak.
- **Kernel**: Az operációs rendszer alapvető eleme, amely a task-ok kezelését, ütemezést és a task-ok közti kommunikációt biztosítja. A kernel kódja hardver-függő (device driver), valamint hardverfüggetlen rétegekből együttesen épül fel.

Task állapotok



- **Passzív (Dormant)**: Passzív (nyugvó) állapot, amely jelentheti az inicializálás előtti vagy felfüggesztett állapotot.
- **Futásra kész (Ready)**: A futásra kész állapotot jelöli. Fontos a task prioritási szintje és az is, hogy az éppen aktuálisan futó task milyen prioritási szinttel rendelkezik, ezek alapján dönti el az ütemező, hogy elindítja e a taskot.
- **Futó (Running)**: A task éppen tevékenyen fut.
- **Késleltetett (Delayed)**: Ez az állapot akkor lép fel, mikor a task valamilyen *időintervallumig* várakozni kényszerül. Rendszerint szinkron időzítő (*timer*) szolgáltatás hívása után következik be.
- **Várakozó (Waiting)**: A task egy meghatározott eseményre várakozik. (Ez rendszerint valamilyen I/O periféria művelet szokott lenni.)
- **Megszakított (Interrupted)**: A task-ot megszakították, vagy a megszakítás kezelő rutin éppen megszakítja a folyamatot (IRQ, INT).

Ütemezési algoritmusok

Az ütemezési algoritmusoknak két fő típusa van:

- **Kooperatív** (=nem preemptív): A működési elve és alapötlete, hogy egy adott program vagy folyamat *lemond* a processzorról, ha már befejezte a futását vagy valamilyen I/O műveletre vár. Ez az algoritmus addig működik jól és hatékonyan, amíg a szoftverek megfelelően működnek (nem kerülnek végtelen ciklusba) és *lemondanak* a processzorról. Ha viszont valamelyik a program/folyamat nem mond le a processzorról vagy kifagy, akkor az egész rendszer stabilitását képes lecsökkenteni. A kooperatív algoritmus ezért soha nem fordulhat elő valós-idejű beágyazott operációs rendszerek esetében.
- **Preemptív**: az operációs rendszer részét képező *ütemező algoritmus vezérli* a programok/folyamatok futását. A preemptív multitask esetén az operációs rendszer *elveheti* a folyamatoktól a *futás jogát* és átadhatja más folyamatoknak. A valós idejű operációs rendszerek ütemezői minden esetben preemptív algoritmusok, így bármely program vagy folyamat leállása nem befolyásolja számottevően a rendszer stabilitását.

Task-ok közötti kommunikáció

Mivel a rendszer működése közben a task-ok egymással párhuzamosan futnak ezért gondoskodni kell arról, hogy egyazon I/O perifériát, erőforrást vagy memória területet két vagy több task ne használjon egyszerre, mert abból hibás rendszerműködés alakulna ki.

A következő ismert módszerek állnak rendelkezésre:

- **Mutex (kölcsönös kizárás):** ún. „locking” mechanizmus (csak a task amelyik zárolta, oldhatja fel)
- **Szemafor (semaphore)**: „signaling” mechanizmus (egyik task jelez a másiknak, hogy végzett, és átveheti az erőforrást) ~ 1 bit információ
- **Események (event flags)**: melyek több bit információ kicserélésére is alkalmasak.
- **Postaláda (mailbox):** amely akár komplexebb adatstruktúra átadására is szolgálhat.
- **Sor (queue):** amely több mailbox tömbjében lévő tartalom átadására szolgál.
- **Cső (pipe vagy FIFO):** amely direkt, folyamatos (akár streaming) kommunikációt tesz lehetővé két task között.

(Beágyazott) Operációs rendszerek

Többféle csoportosítás lehetséges:

- Általános célú, vagy **beágyazott OS**
- Valós-idejű (időkritikus), vagy nem-időkritikus
- Nyílt forráskódú, vagy licenszelhető, stb.

Általános célú processzorok operációs rendszerei (OS):

- MS-DOS, Linux, Windows, stb.

Beágyazott processzorok *valós-idejű* operációs rendszerei (RTOS):

- Linux
- Android
- Micrium uC/OS
- QNX
- RTLinux
- **Windriver VxWorks (RT)**
- Windows Embedded, IoT, stb...

Processzorok osztályozása

- Integráltság szerint:
  - uP/CPU: hagyományos mikro**processzorok** + fizikailag különálló memória + külső I/O periféria chipek (chipset)
  - **uC/MCU**: mikro**kontrollerek**: egyetlen chipen integrálva a processzor, a memória (ált. flash), és néhány I/O periféria
    - System-on-a-Chip (SoC) : egychipes rendszer
    - Kis méret és költség, alacsony disszipált teljesítmény
- Utasítás készlet szerint:
  - RISC vs. Nem-RISC (=CISC) ISA – utasításkészletű architektúrák
- Utasítás / Adat memória hozzáférés szerint:
  - Von Neumann (közös) vs. Harvard architektúrák (elkülönült)

Néhány architektúra típus: Intel 8051, ARM, AVR, PIC, MIPS, IBM PowerPC, x86 (32/64), Sun SPARC, stb.

Technológiák és stratégiák

Élenjáró *technológiák* a beágyazott rendszerek tervezéséhez és megvalósításához – processzáló egységek csoportosítása:

- ***(DSP):*** Digitális jelfeldolgozó processzor alapú rendszerek
- ***(MCU):*** Mikrovezérlő-alapú rendszerek
- ***(ASIC/ASSP):*** Alkalmazás specifikus (berendezés orientált) integrált áramköri technológián alapuló rendszerek
- ***(FPGA):*** Programozható logikai kapuáramkörök technológián alapuló rendszerek
- **(CPU/MPU/GPU):** Mikroprocesszor, vagy grafikus processzor

- **SoC**: System-on-a-chip: olyan egychipes rendszer, amely a fentieket akár integrálva is tartalmazhatja!

Fejlesztési *stratégiák*:

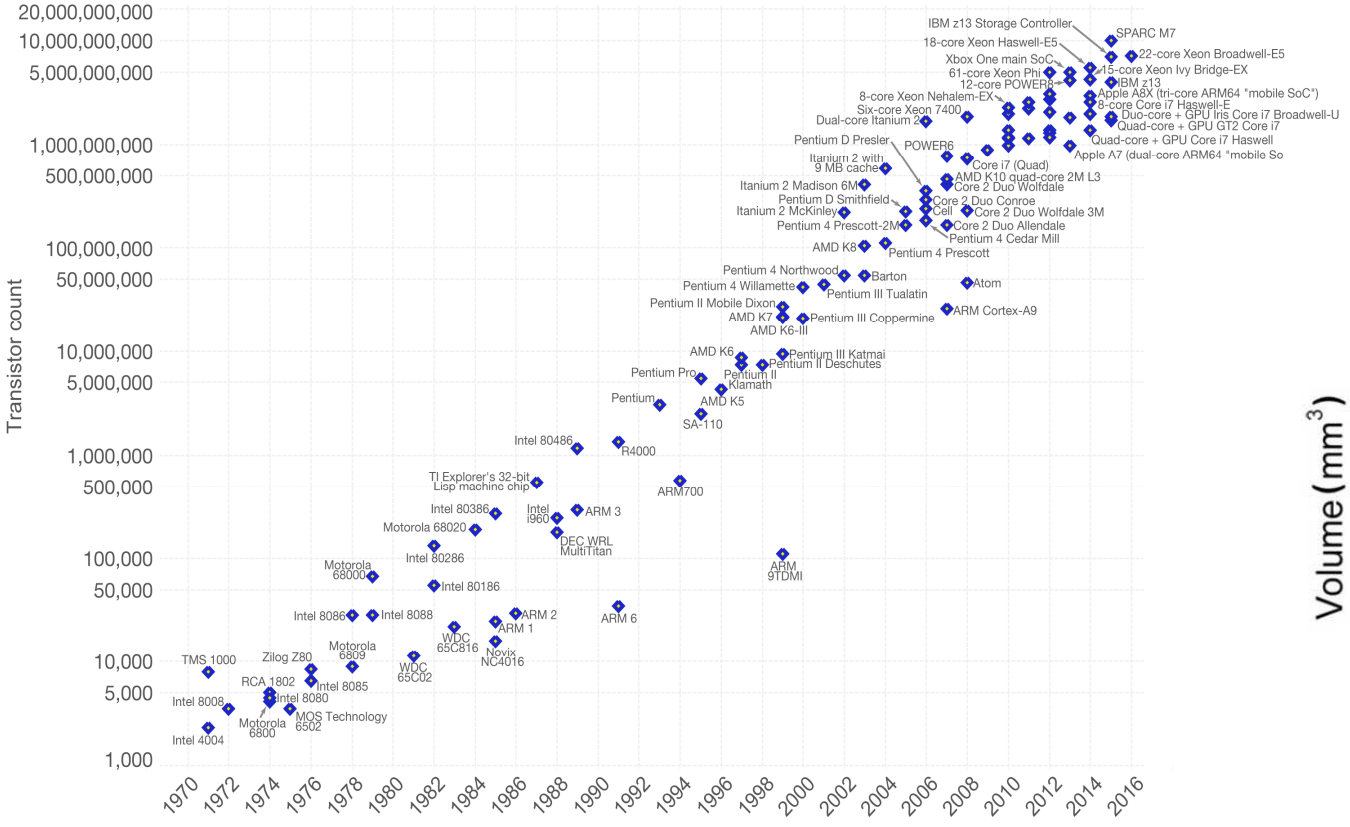
- HW/FW/SW co-design: HW/FW/SW részek együttes tervezése
- HW/FW/SW co-verification: HW/FW/SW részek együttes ellenőrzése és tesztelése

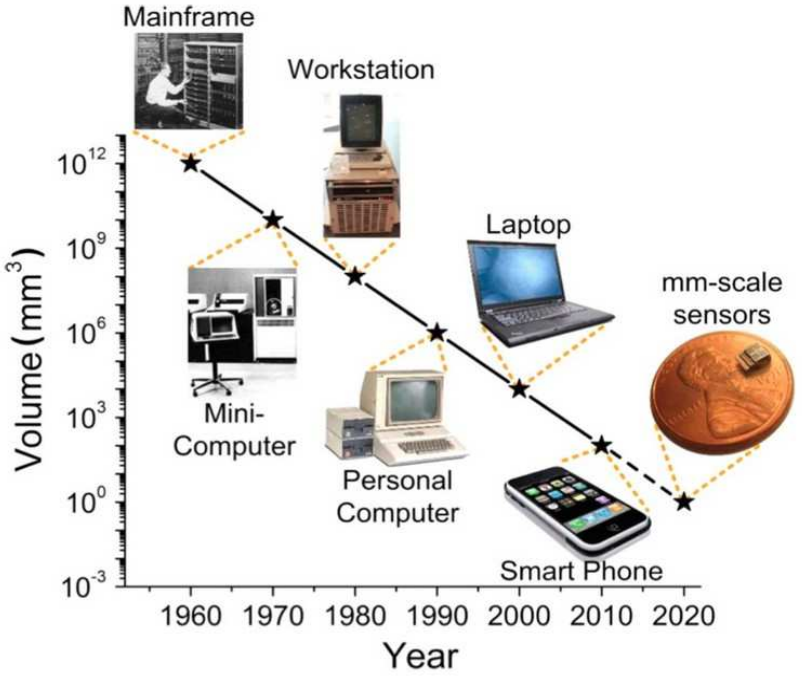
I/O Perifériák

- Aszinkron soros kommunikációs interfészek: **RS-232**, RS-422, RS-485, stb.
- Szinkron soros kommunikációs interfészek: **I²C, SPI** stb.
- Univerzális soros busz: **USB**
- Multimédia kártyák: (SD) Smart Cards, (CF) Compact Flash stb.
- Hálózat: Ethernet (1GbE / 10 GbE / 100 GbE)
- Ipari hálózati ún. „Field-bus” protokollok: **CAN, LIN, PROFIBUS, IO Link**, stb.
- Időzítő-ütemezők: PLL(s), Timers, Counters, Watchdog timers (WDT)
- Általános célú I/O-k (General Purpose I/O - **GPIO**): LED-ek, nyomógombok, kapcsolók, LCD kijelzők, stb.
- Analóg-Digitális/Digitális-Analóg (ADC/DAC) konverterek
- Debug portok: **JTAG**, **ISP**, ICSP, BDM, DP9, stb.

Technológiai fejlődés

- **Moore törvénye (1975):** 1 (ma 3) évente adott Si felületegységre eső tranzisztorszám duplázódása
- **Bell törvénye (1972):** számítógépek méretének fokozatos csökkenése (~10 évente új számítógép osztályok, platformok megjelenése)





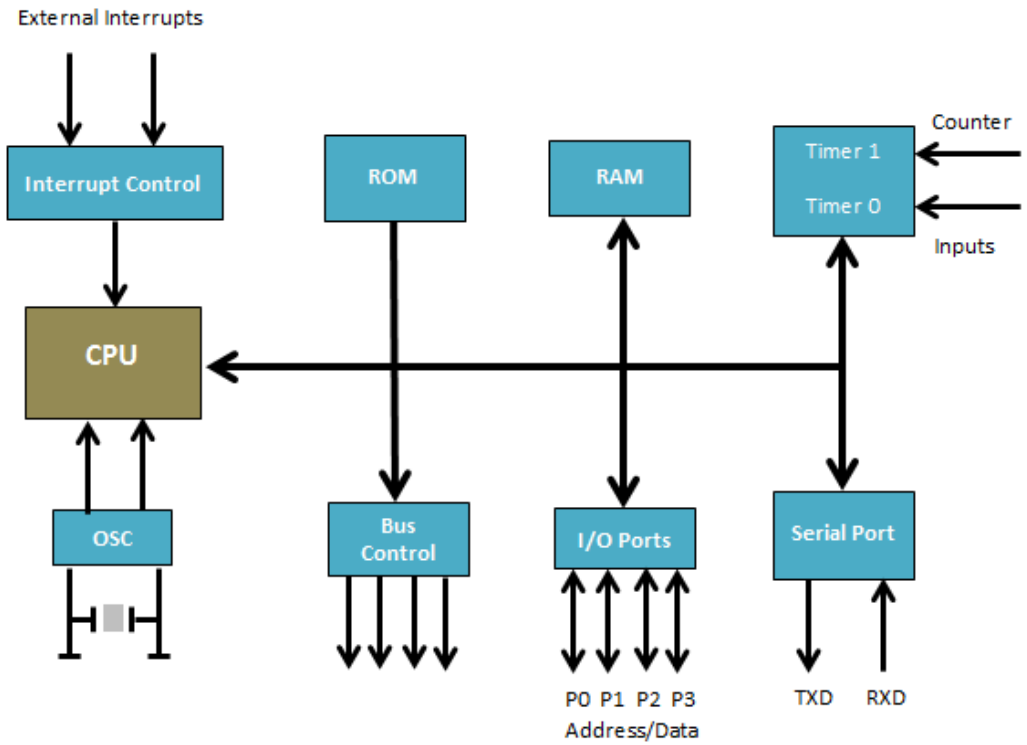
Mikrovezérlők

Mikrovezérlők

- Mikrovezérlő = mikrokontroller (MCU – Micro Controller Unit, vagy **UC, vagy *µ-controller***)
  - *Egy olcsó, kis méretű és fogyasztású „számítógép” egy integrált áramkörön*
  - ***Beágyazott rendszerek** alapvető építő eleme*
    - *SoC = System-on-a-Chip, egychipes számítógép, feldolgozó egysége lehet az MCU (DSP, FPGA is akár)*
    - *Alkalmazásuk: lásd Beágyazott rendszerek.*

Mikrovezérlők általános felépítése

- Processzor (CPU/MPU) mag(ok)
- Memória (Harvard architektúra):
  - ROM/Flash/(EE)PROM: program (utasítás) memória (KB)
  - RAM: adat memória (KB)
- Interrupt/(WD)Timer/Counter
- OSC: oszcillátor (órajel)
- I/O perifériák, portok
  - Analóg, Digitális, vagy Mixed-signal funkciók
    - Manapság: IoT funkciók (érzékelők, aktuátorok, kommunikációs IF-ek)
  - ADC/ DAC konverterek



Mikrovezérlők tulajdonságai

- Előnyök:
  - Olcsó!
  - Egyszerű felépítés
  - Kis disszipáció (mW, μW, nW – órajel/üzemmód függő)
  - Könnyű integrálhatóság, beépíthetőség, széleskörű interfész támogatottság
  - CPU: Speciálisan DSP műveleteket is támogathat (pl. Microchip dsPIC)
- Hátrányok:
  - Kis sebesség/ órajel (~10 - 100+ MHz)
  - Relatíve kis pontosság
    - (8-,16-,32-bites adat, cím, vezérlő, utasításbuszok)
  - Korlátozott mértékű funkcionalitást biztosít
    - Komplex feladatokhoz több, vagy nagyobb számítási-tárolási kapacitású eszköz kell

Fontosabb gyártók

- Atmel (ma Microchip): AVR8, AVR32, Intel 8051

- ARM: Cortex-M proc. magok

- Microchip: PIC, dsPIC,

- Texas Instruments: MSP, C2000

- Renesas: RL78-16, RX-32

- Freescale (ma NXP),

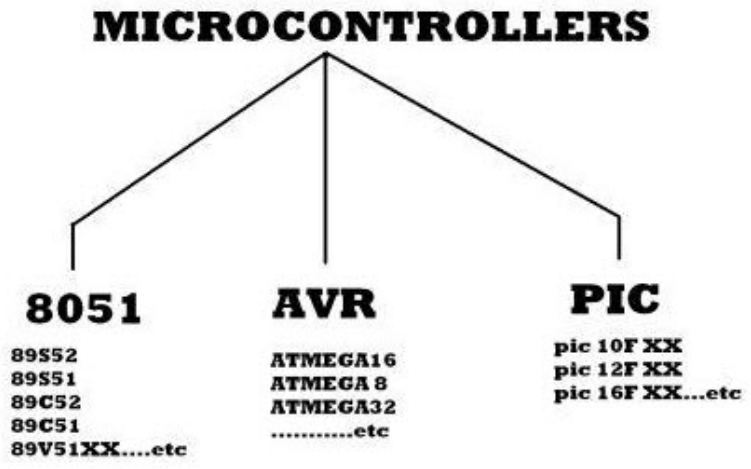
- NXP Semiconductors: LPC sorozat

- ST Microelectronics: STM8, STM16, STM32

- Cypress: PSoC családok

Mikrokontrollerek osztályozása

- Kategóriák (gyártónként keveredhetnek):
  - **Busz-szélesség?** 8-/16-/32-bites
  - **Utasítás készlet** (ISA)?: RISC vs. CISC
    - RISC: csökkentett utasítás készlet
    - CISC: kibővített/komplex utasítás készlet
  - **Memória elvek**?
    - Neumann vs. Harvard elv
    - Belső vs. külső memória



Kategória: Busz szélesség

- **8-bit**: belső busz 8-bites, ALU műveletek.
  - Pl: Intel 8031/8051, PIC1x, Motorola MC68HC11… családok
- **16-bit**: 2x-es pontosság, belső busz, ALU
  - Pl: Intel 8051XA, PIC2x, Intel 8096, Motorola MC68HC12… családok
- **32-bit**: 4x-es pontosság, belső busz, ALU
  - Pl: Intel/Atmel 251, PIC3x… családok

Kategória: Utasítás készlet (ISA)

ISA = Instruction Set Architecture

- CISC = Komplex/kibővített utasítás készlet:
  - nagyobb architektúra, sok utasítással.
  - 1 utasításban több elemi utasítás van, (1 utasítás / több órajel)
  - változó utasítás hossz → nehezebb dekódolni, majd végrehajtani.
  - komplex művelet kevesebb CISC utasítás sorral írható le!
- RISC = Csökkentett utasítás készlet:
  - csak a feladatra optimalizált, kevés számú utasítás van
  - azonos utasítás hossz → könnyebb dekódolás (1 utasítás / 1 órajel)
  - komplex művelet sok elemi RISC utasítás sorral írható csak le.

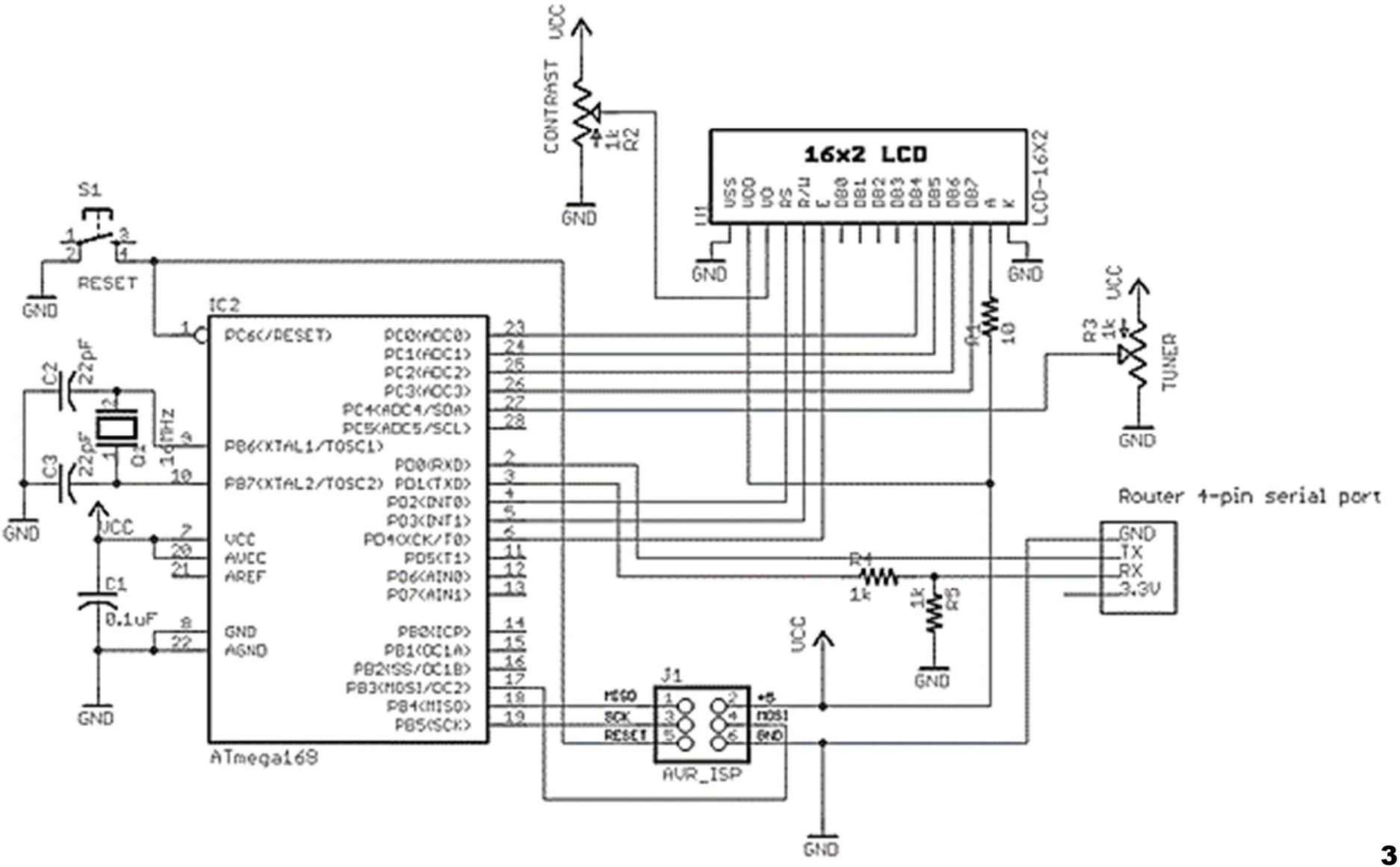
Kategória: Memória

- Szervezés elve:
  - Von Neumann (Princeton) elv: adat/utasítás fizikailag közös memóriában
  - Harvard elv: adat/utasítás fizikailag elkülönült memóriában
- Hol található ?
  - Belső (on-chip) – beágyazott memória vezérlő (pl. Intel 8051)
  - Külső (off-chip) memória vezérlő: nincs belső / on-chip memória (pl: Intel 8031 – nincs program memória)

MCU architektúrák (magok)

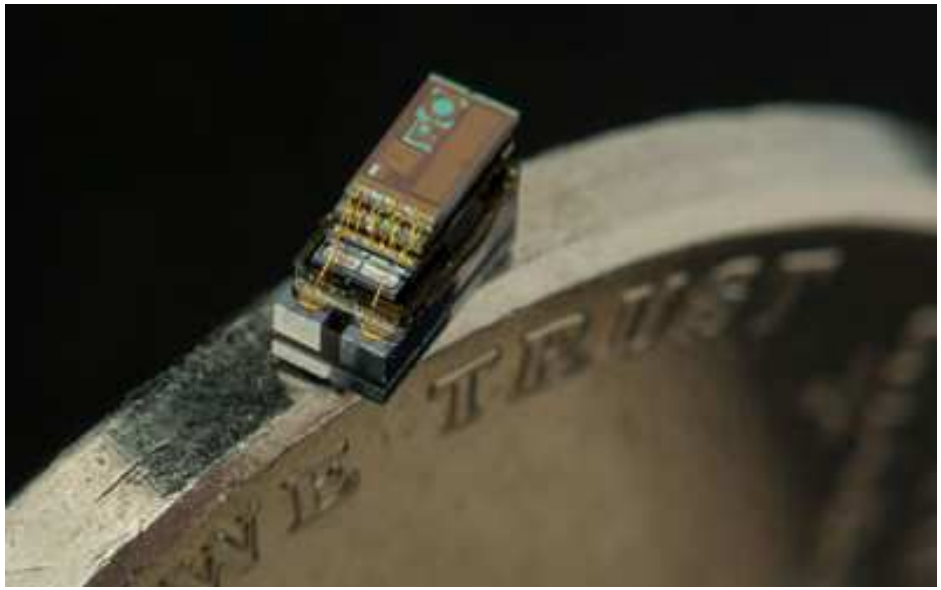
- ARM: harvard RISC
  - Manapság a legnépszerűbb, skálázható magokat gyártanak, több gyártó is integrálja a magokat (pl. STMicro)
- AVR (Atmel): Harvard RISC
  - Népszerű Atmega családok (pl. Arduino kártyák)
- Intel 8051: Harvard CISC
  - Népszerű, beágyazott MCU mag több gyártónál (pl Cypress)
- Renesas: RX-32 - Harvard CISC
- Microchip:
  - PIC16/18 … - Harvard RISC
  - Gyorsabb, könnyebb programozhatóság

Pl. Atmel – karakter LCD vezérlő



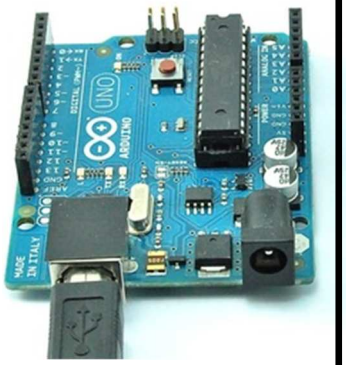
„Világ legkisebb számítógépe”

- 2018. jún (University of Michigan, USA)
- **M³ : Michigan Micro Mote: smart-sensor**
  - Hőmérséklet, nyomás,
  - Képalkotó szenzor (160x160 pixel)
  - 1 mm2 felületű!
  - 2 nA disszipáció (standby mód)
  - CPU + MEM + PWR RF, battery



📖 https://www.eecs.umich.edu/eecs/about/articles/2015/Worlds-Smallest-Computer-Michigan-Micro-Mote.html

Arduino vs. Raspberry Pi



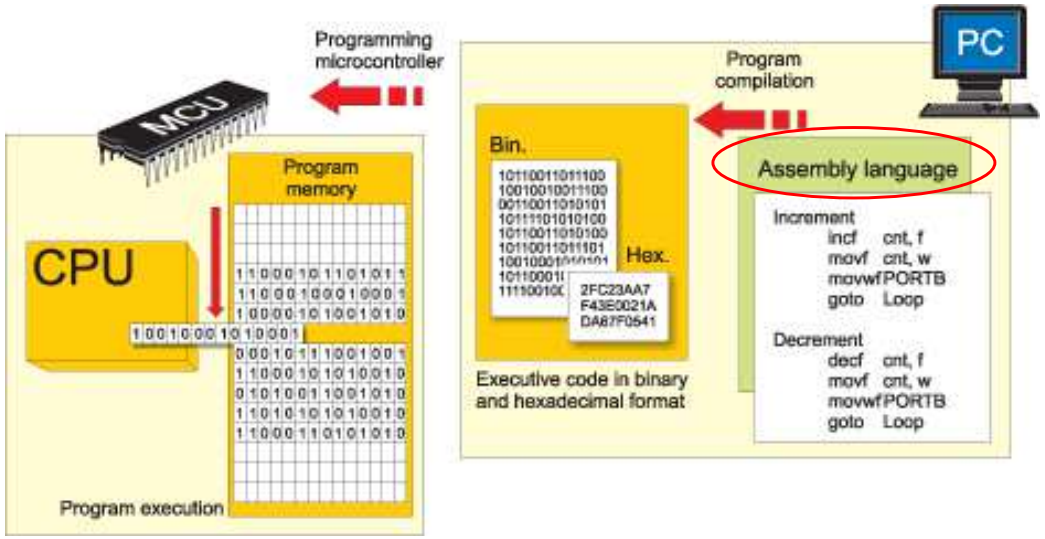
- **Arduino** – Atmel/Microchip MCU alapú fejlesztő kártya
  - Kisebb órajelű (~x10 MHz) MCU mag, kis belső memória, kis bitszélesség (8-, 16 bit)
  - Nincs külső memória, nincs OS kezelése, nem real-time eszköz.
  - Jó bővíthetőség: „shield”-ek
  - Főként egyszerű szabványokat, GPIO-kat kezel, van ADC.
  - Olcsó, népszerű, rengeteg szenzor illeszthető, de kisebb komplexitású fejlesztési célokra. Ára: $5-15 (platform függő)

- **Raspberry Pi** – ARM alapúáltalános célú sz.gép, fejlesztő kártya („single board computer)
  - Dedikált, nagy órajelű CPU magok (ARM 32/64 bit ~x100 MHz, memória (LDDR3/4), GPU mag, HDMI stb.
  - Bővíthetőség: SDCard (OS boot), WIFI, BLE, CamIF, de nincs ADC.
  - OS/RTOS (HW-es) kezelése Nagyobb komplexitás, több funkció, de drágább.
  - Ára: $ 30- 50 (platform függő)

Mikrovezérlők programozása

- **Programozási nyelvek (compiler függő):**
  - ASM – assembly (régen, hagyományos)
  - C (C++)
  - Python, …
  - Egyéb: Interpreter FW elérhetővé tehet más nyelveket is: BASIC…

ASM → MCU



- **Integrált fejlesztő környezetek (IDE), pl.:**
  - Texas Instruments - Code Composer Studio
  - Arduino IDE
  - Microchip/PIC – MPLAB
  - ARM – Keil MDK / ARM DS-5, stb.

C/C++ → MCU