

# Mérés, érzékelés

Automatikus Fedélzeti Irányító  
Rendszerek a Légiközlekedésben

Dr. Soumelidis Alexandros / 1. EA.  
c. egy. docens

# Mérés, érzékelés

- Fizikai paraméterek mérése: sebesség, magasság, hőmérséklet, nyomás, stb.
- Környezeti paraméterek mérése.
- A jármű állapotára jellemző paraméterek mérése.

Cél: információszerzés

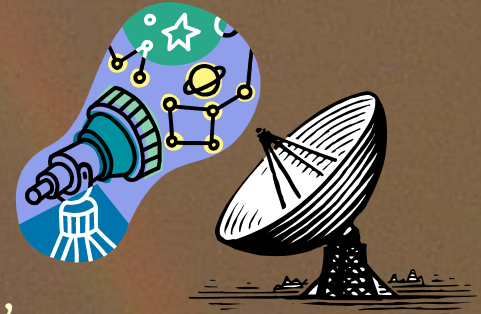


Mérés, érzékelés

# Mérés, érzékelés

Célok:

- Megismerés
- Absztrakció
- Döntéshozatal
- Irányítás



Tudományos megismerés,  
Elméletalkotás

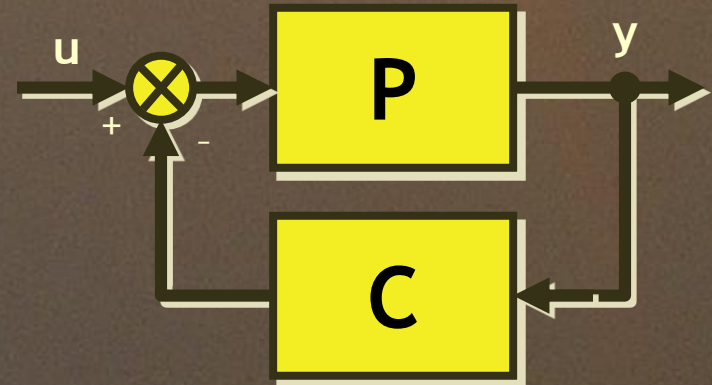
Matematikai modellalkotás,  
Rendszeridentifikáció,  
Modell paraméterbecslés



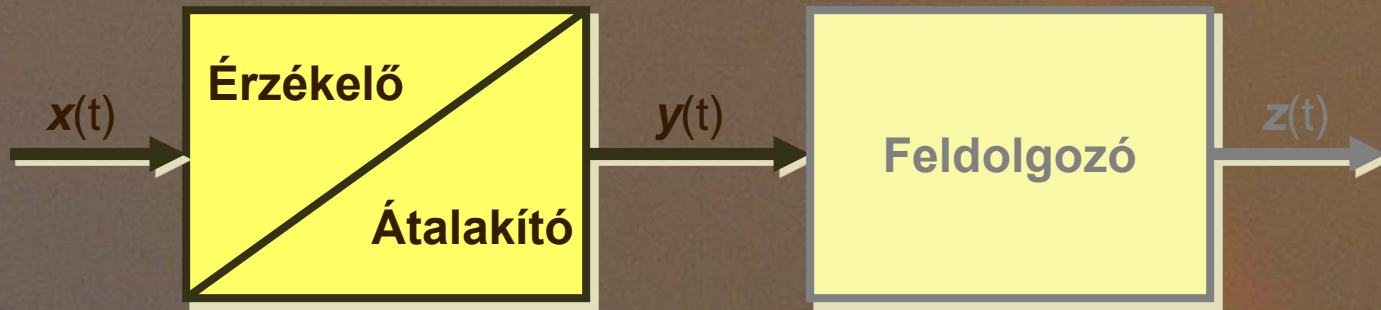
Eseménydetektálás,  
Változásdetektálás,  
Hibadetektálás,  
Hibadiagnosztika



Vezérlés,  
Szabályozás



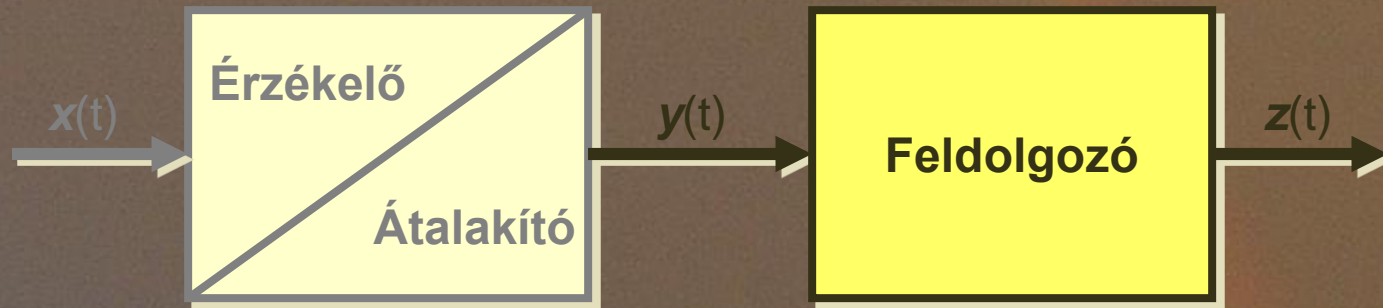
# Mérés



Érzékelő/átalakító (szenzor, távadó):  
feldolgozható formára hozza a mért jellemzőt

- Példák:
- Kinematikai érzékelők: sebességmérő, tachográf, GPS
  - Dinamikai érzékelők: gyorsulás-, giro érzékelő
  - Hőmérsékleti érzékelők: termoelem, ellenálláshőmérő
  - Nyomásérzékelő: barométer, nyomáskülönbség távadó
  - Villamos érzékelők: feszültségmérő, árammérő
  - Komplex érzékelők: video kamera, GPS

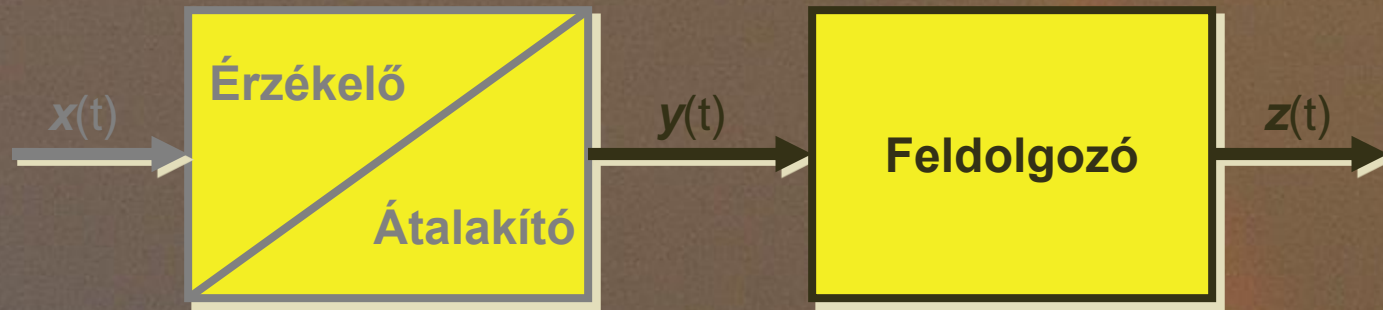
# Mérés



Feldolgozás: a mérés nem szolgáltatja közvetlenül a felhasználás által megkövetelt jellemzőket. Okok:

- Mérési hibák, pontatlanságok,
- Zaj,
- Nem kívánt belső és környezeti hatások,
- Összefüggés a mért paraméterek között.

# Mérés



Feldolgozás: a kívánt jellemzők kiemelése, a nem kívánt hatások csökkentése.

Eszközök: **jelfeldolgozás - signal processing.**

A jelfeldolgozás ma:

**digitális** jelfeldolgozás  
**számítógépek** alkalmazása

# Hely és helyzet detektálás

- A hely és helyzet egy inerciarendszerben relatív mennyiségek.

Abszolút mennyiségek:

- Gyorsulások -  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau$$

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau$$

- Szögsebességek -  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau$$



# Giroszkópok

A helyzetmeghatározás eszközei. Szög ill. szögsebesség mérésére szolgálnak.

Típusok az alkalmazott fizikai elv szerint:

- Pörgettyűs mechanikus giroszkóp
- Rezgőelemes mechanikus giroszkóp
- Lézer giroszkóp

# Pörgettyűs giroszkópok

Fizikai elv:

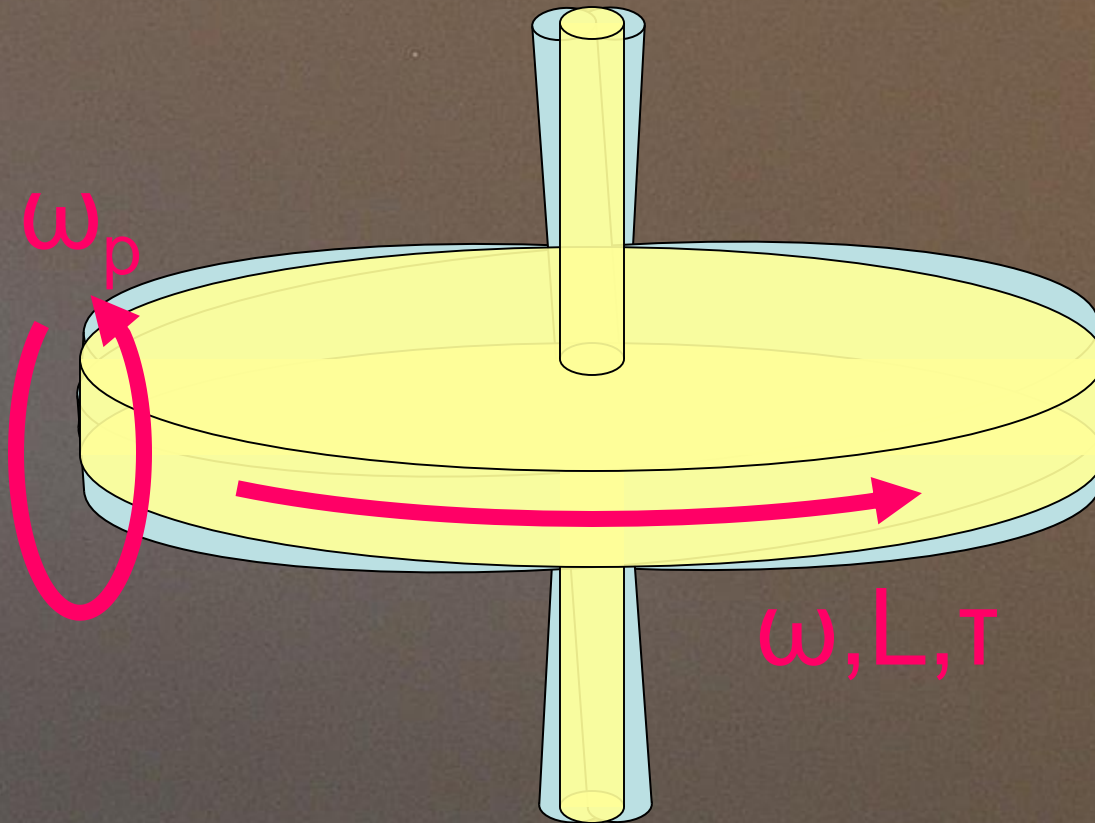
- Newton axiómák
- Impulzusmegmaradás törvénye

Egy forgásban levő merev test forgástengelye stabil egyensúlyi helyzetben van.

Mit jelent ez? Áll? – Nem feltétlenül:

Egy meghatározott irány körül egy kúp mentén forog – precesszál.

# Pörgettyűs giroszkópok



## Precesszió:

- Forgástengelyre merőleges nyomaték

$$\tau_p = \omega_p \times L$$

- A Föld forgásából eredő Coriolis erő
- Súrlódás, közegellenállás
- Véletlen hatások (kis eltérések a geometriában, a pörgettyűt érő fizikai hatásokban)

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(\Theta\omega)}{dt} = \Theta\beta$$

# Giroszkóp történelem



Johann Bohnenberger  
Tübingeni Egyetem  
(1817)

- Kísérleti eszköz a merev testek forgásának illusztrálására
- Már viseli a modern giroszkópok fő ismérveit

# Giroszkóp történelem

Léon Foucault  
École Polytechnique,  
Párizs, 1852

Pierre-Simon Laplace  
javaslatára oktatási  
segédeszközként  
a Föld forgásának  
szemléltetésére

A „gyroscope” elnevezés  
Foucault-tól származik.



# Gyakorlati alkalmazás: pörgettyűs iránytű (gyrocompass)

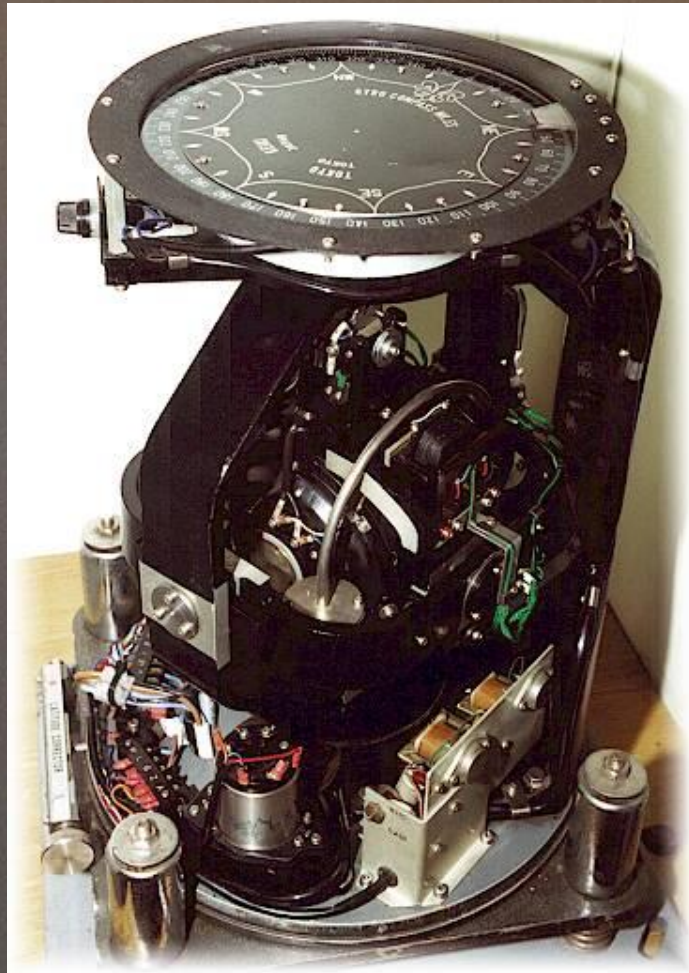


M.G. van den Bos,  
Hollandia, 1885

- Motoros meghajtás
- Nagy viszkozitású folyadék csillapítás gyanánt
- Automatikus beállítás az északi irányba.
- Több szabadalom és elsőbbségi viták
- Iparilag nagy tömegben előállított termék

Anschütz-Kaempfe gyrocompass (metszet)

# Gyakorlati alkalmazás: pörgettyűs iránytű (gyrocompass)



Sperry gyrocompass

- Megbízhatóbb, mint a mágneses iránytű
- A geográfiai É irányba mutat (→a mágneses É pólus eltér)
- Nagy jelentősége volt a *hajózás*ban
- Hibák: lassú beállítás, nem követi a gyors változásokat



Ma:

- Lézer gyrocompass
- GPS

# Giroszkópok a repülésben, űrrepülésben

## Célok:

- A jármű mozgásának stabilizálása
- Manőverek irányítása
- Navigáció

## Eszközök:

- Egytengelyű giroszkópok
- Kéttengelyű giroszkópok
- Háromtengelyű giroszkópok
- „Gimbal lock” probléma: 4. tengely
- Inerciális Navigációs Rendszerek



# Egytengelyű pörgettyűs giroszkóp

Rendeltetés:

- Egy iránytól való eltérés detektálása, mérése

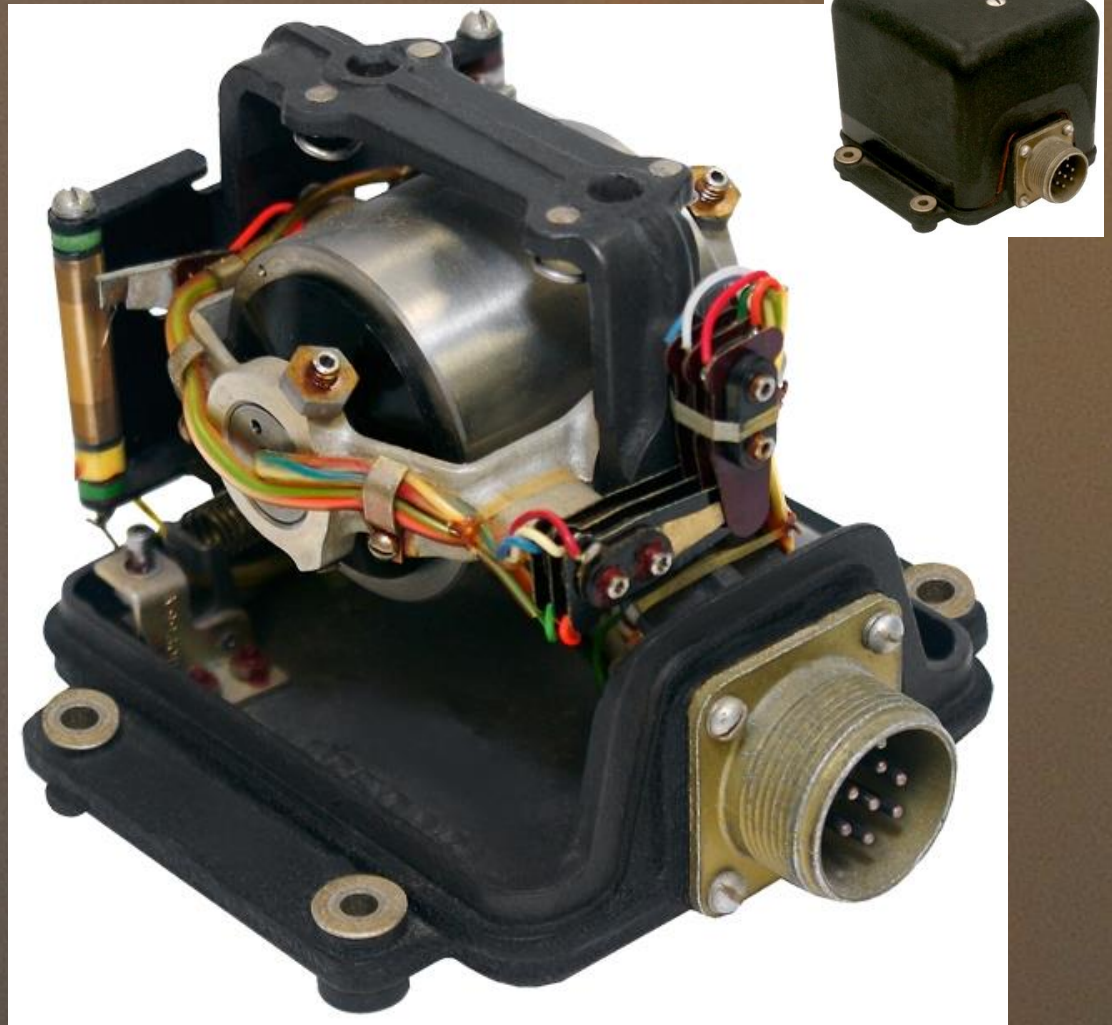
Alkalmazás:

- A jármű legyező mozgásának stabilizálása
- Elfordulás vezérlés

Példa:

Honeywell JG7005  
autopilot giroszkópja,  
1950-es évek

Íránytól való eltérés:  
kontaktusokat zár/nyit



# Kéttengelyű pörgettyűs giroszkóp

Rendeltetés:

Kétdimenziós  
helyzetmeghatározás

Alkalmazás:

- 2D helyzetkijelzés  
(műhorizont)
- 2D helyszabályozás

Példa:

Honeywell JG7044N,  
1950-es évek

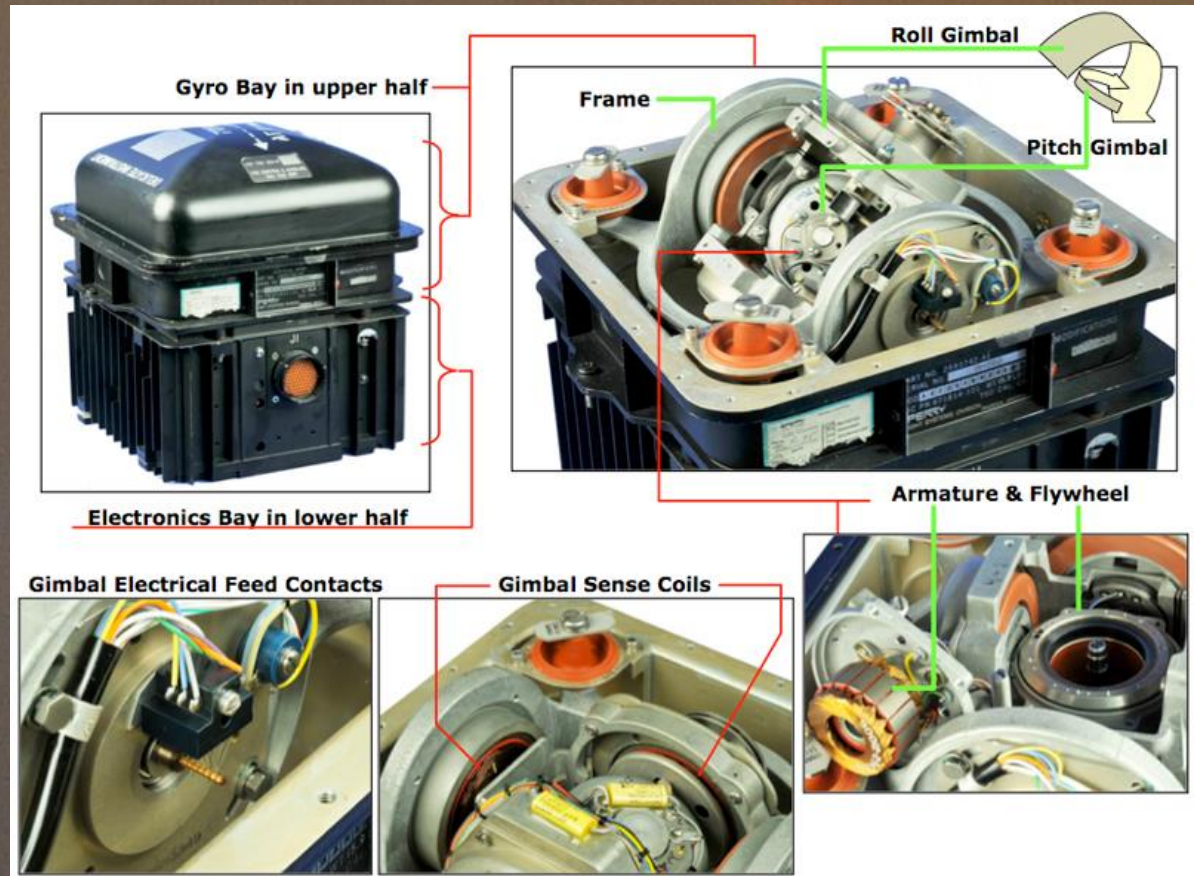


# Kéttengelyű pörgettyűs giroszkóp

Boeing 747

Sperry vertikális  
giroszkóp

1970-es évek



# Háromtengelyű pörgettyűs giroszkóp

Rendeltetés:

Háromdimenziós  
helyzetmeghatározás

Alkalmazás:

- 3D helyszabályozás

Példa:

S3 ballisztikus rakéta  
inerciális mérőmodulja,  
1966



# A „gimbal lock” probléma

Ha a giroszkóp nem detektálja a jármű mozgását valamelyik szabadságfok mentén, a záródás (lock) jelenségével találkozunk - giroszkóp elveszít egy szabadságfokot.

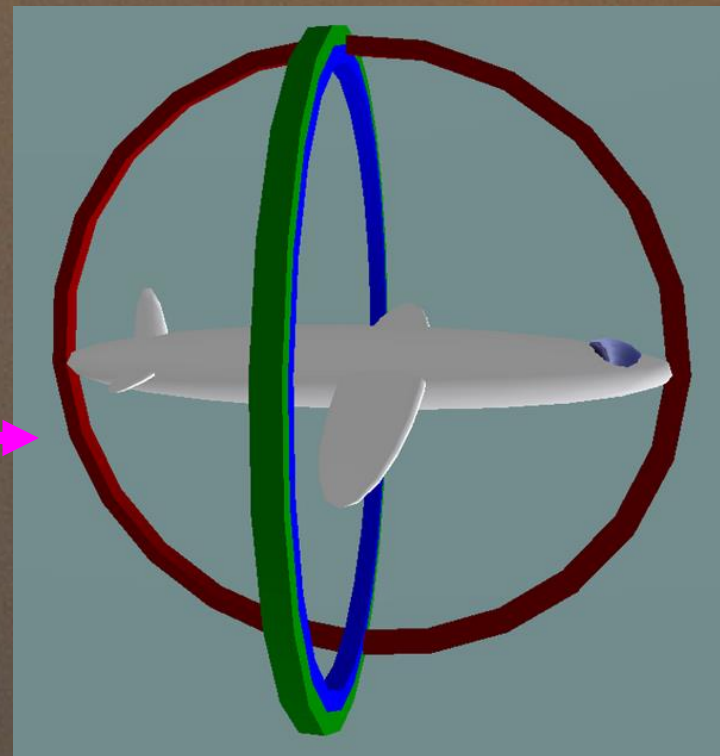
Mikor következik ez be?

Ha a giroszkóp valamely két tengelye egy síkba kerül:

Ebben az esetben a „roll” mozgás kontrollálhatatlan.

Miért „gimbal lock”?

Csak az ilyen rendszerű giroszkóppal esik meg.



# A „gimbal lock” probléma

Nevezetes eset: az Apollo 11 Hold-expedíciója során majdnem bekövetkezett -  $85^\circ$ -nál a fedélzeti számítógép hibásan beavatkozott, a legénység hátrította el a hibát az IMU egység újraindításával.

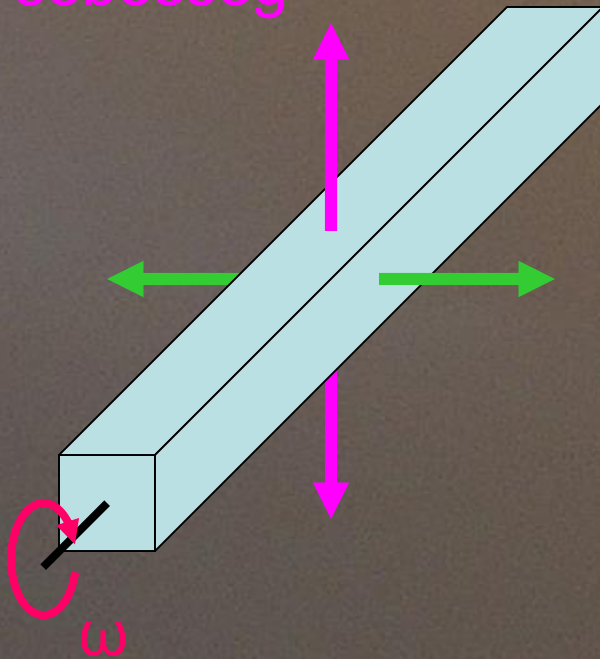
A jelenség kiküszöbölése:

- Használjunk redundáns 4. gyűrűt.
- Figyeljük a kritikus állapotot és indítsuk újra új pozícióból.
- Ne használjunk pörgettyűs giroszkópot.

# Rezgőelemes giroszkóp

Alapelv: rugalmas rúd

Rákényszerített rezgés  
 $v_r$  sebesség



$\omega$  szögsebességű forgás esetén

$F_c$  Coriolis erő  $F_c = -m(\omega \times v_r)$

a rákényszerített rezgésre  
merőleges deformációt okoz

→ mérhető

# Rezgőelemes giroszkóp

Megvalósítások:

Az alkalmazott technológia szerint:

- Piezokeramikus kristály
- MEMS - Micro ElectroMechanical System

A mérés elve szerint:

- Piezoelektromos hatás
- Kapacitív elvű elmozdulás-mérés

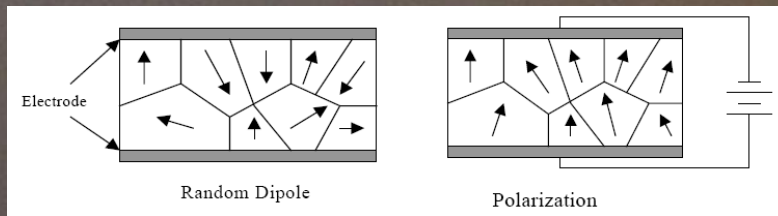


# Rezgőelemes giroszkóp

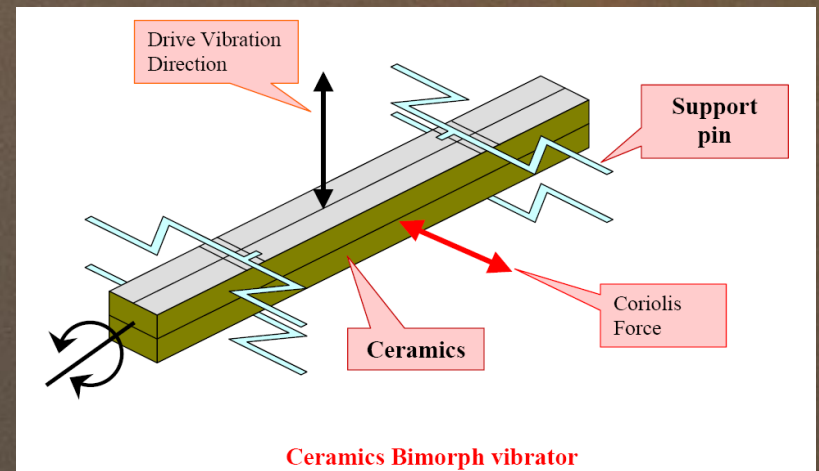
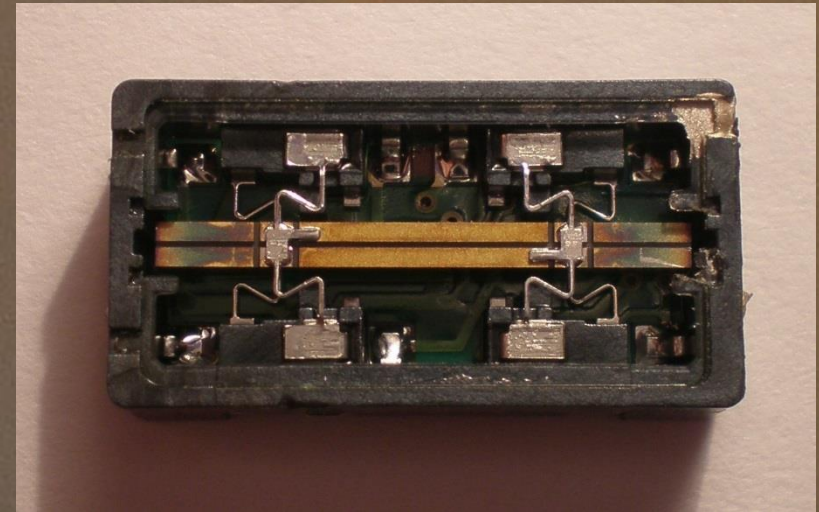
- Piezokeramikus kristály

Piezoelektromos hatás:

Deformáció hatására a kristály két ellentétes felületén elektromos feszültség lép fel



Polarizáció: szétválnak az ellentétes töltések.



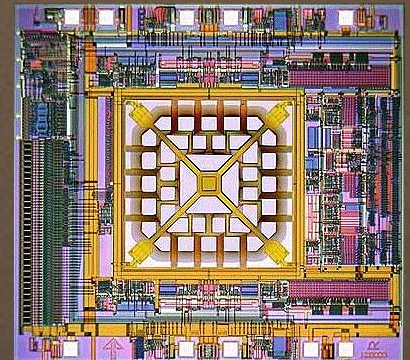
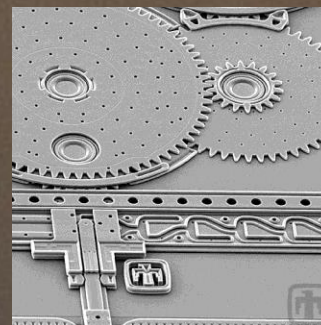
# MEMS giroszkóp

MEMS - Micro ElectroMechanical System

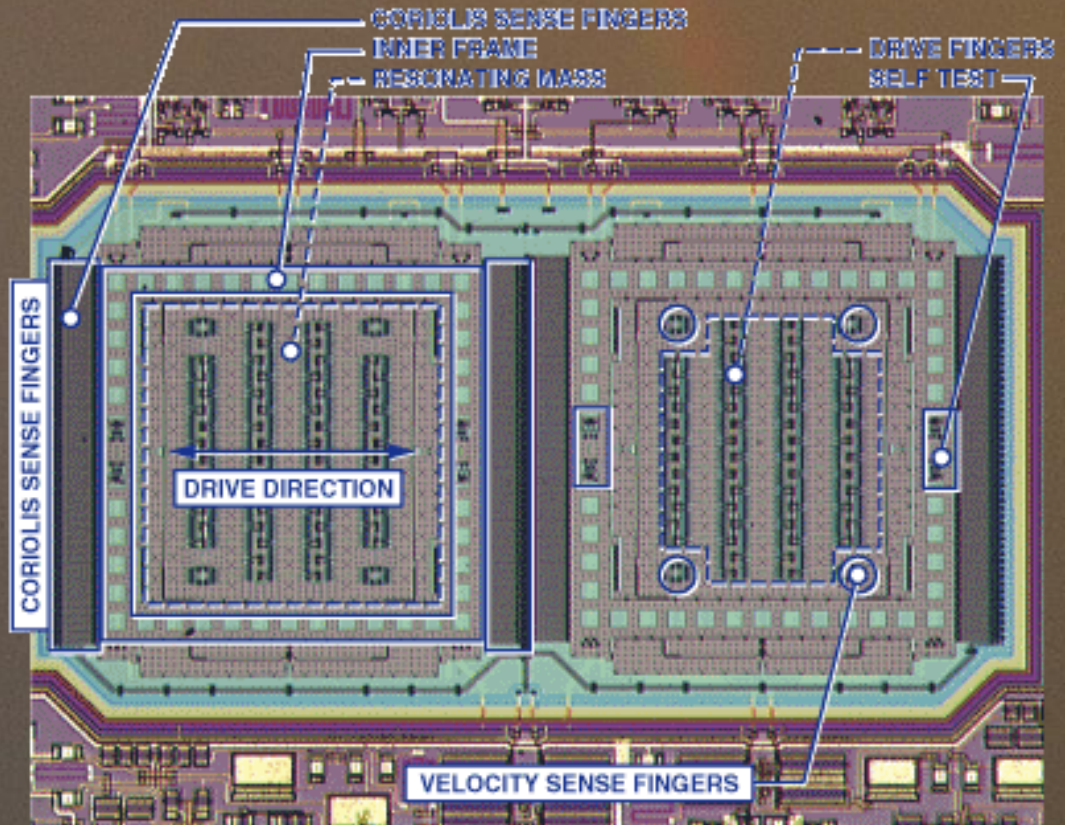
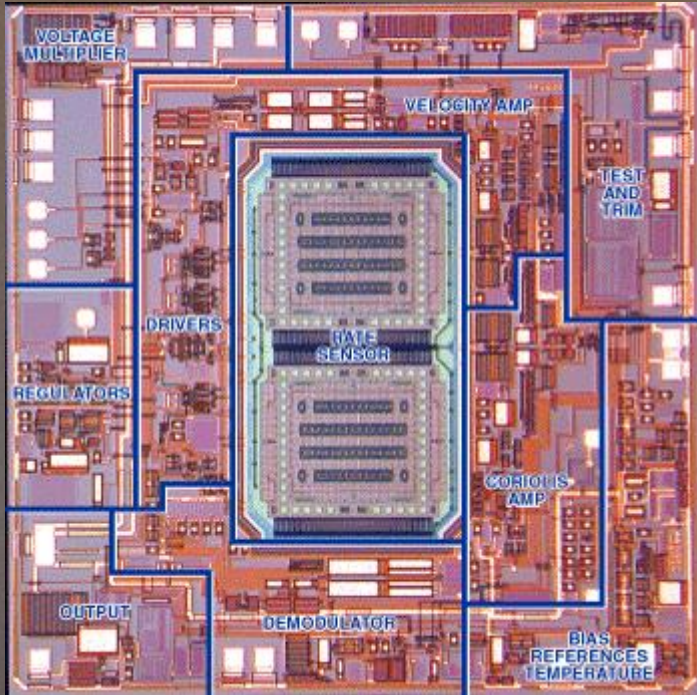
Szilícium kristályon integrált áramkör gyártási technológiával kialakított mikro-méretű elektro-mechanikai rendszer.

Tipikus MEMS áramkörök:

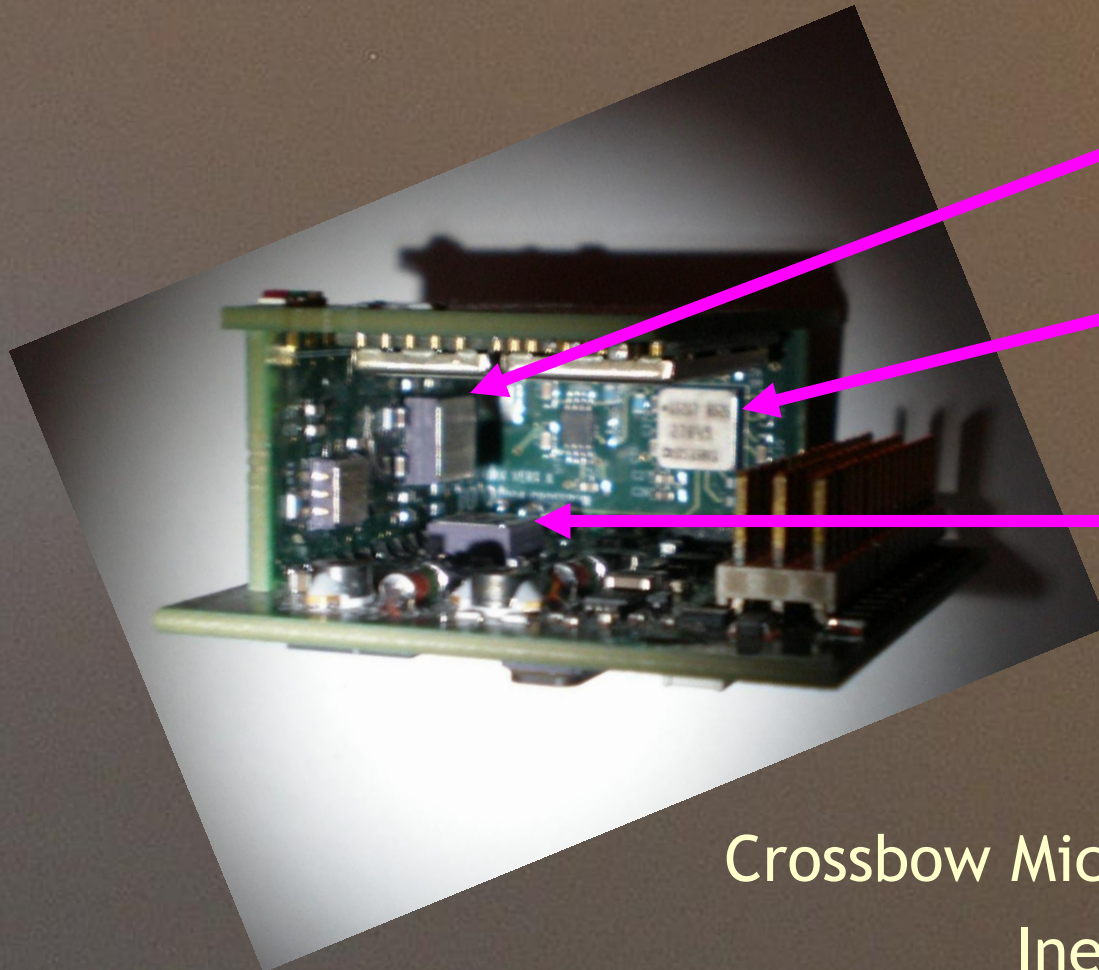
- Optikai áramkörök, pl. adaptív tükörrendszer (DLP)
- Érzékelők: gyorsulás, szögsebesség, nyomás, stb.
- Mikromotorok és hajtások



# MEMS giroszkóp



# MEMS giroszkóp



Y

X

Z

Crossbow MicroNAV - MNAV-100  
Inerciális mérőmodul

# MEMS giroszkóp

## Előnyök:

- Kis méretek - 8 x 8 x 4 mm egy tengelyre
- Környezetállóság
- Nagy megbízhatóság, kis meghibásodási ráta
- Kis fogyasztás
- Minden helyzetben működőképes (nincs „gimbal lock”)

## Hátrányok:

- Áramköri zaj
- Hőmérsékletfüggés

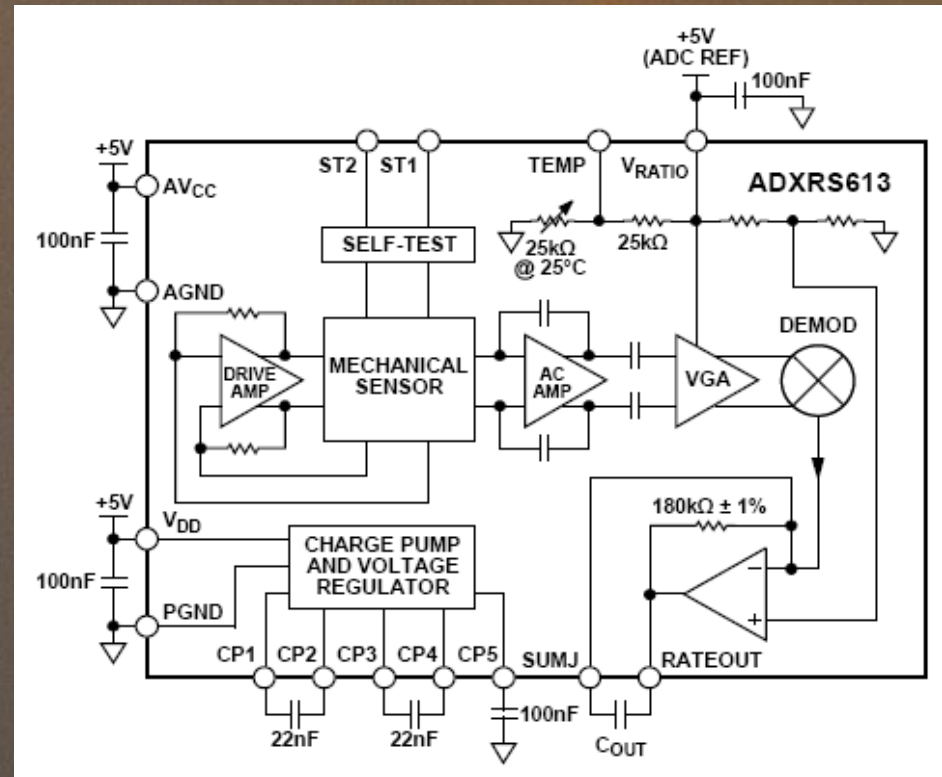
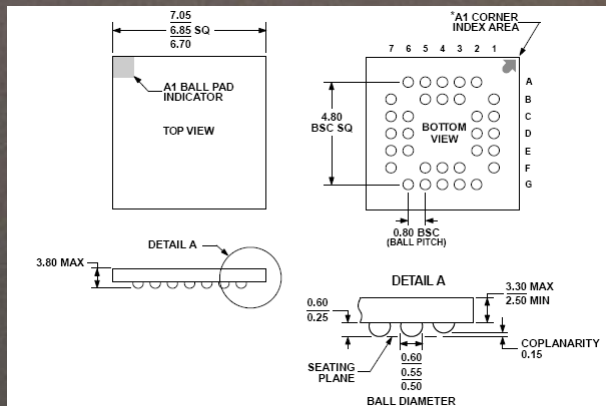
## Jellemző:

- Szögsebességet érzékel

# MEMS giroszkóp

## Analog Devices ADXRS-613 egytengelyű szögsebesség érzékelő

- Méréshatár  $\pm 150^\circ/\text{s}$
- Érzékenység  $12.5\text{mV}/^\circ/\text{s}$
- Hőmérsékleti drift 3%
- Zaj  $0.04^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Sávszélesség  $3\text{kHz}$



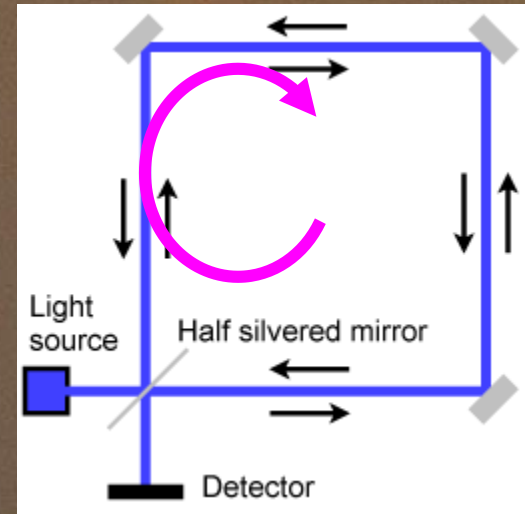
# Lézer giroszkóp

Fizikai alapja:

Sagnac effektus

Georges Sagnac (1869-1928)  
francia fizikus

- A két ellentétes irányú fénysugár interferál egymással.
- Ha a rendszer forgásban van, fáziseltérés lép fel - megváltozik az interferenciakép.



Sagnac interferométer

Mérés: az interferenciacsíkokban bekövetkező eltérések detektálása.

# Lézer giroszkóp

## Típusok:

- Ring Laser Gyroscope (RLG)
- Fiber Optic Gyroscope (FOG)

## Előnyök:

- Nagy pontosság és érzékenység
- Nagyon kis zaj

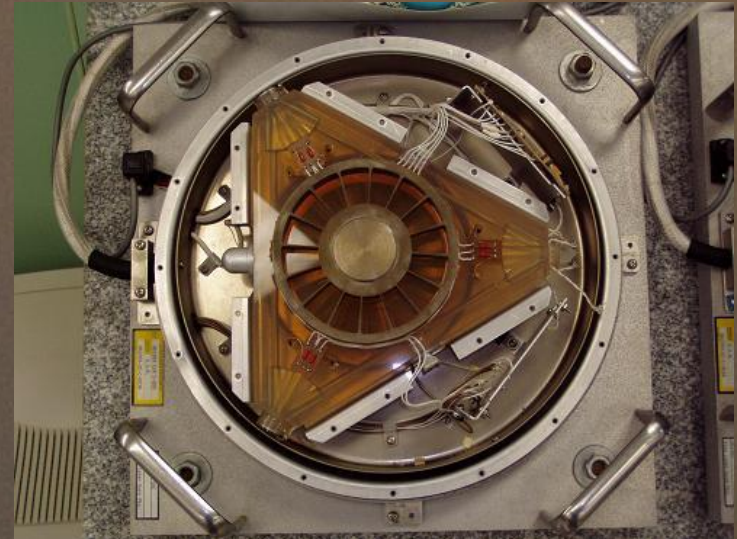
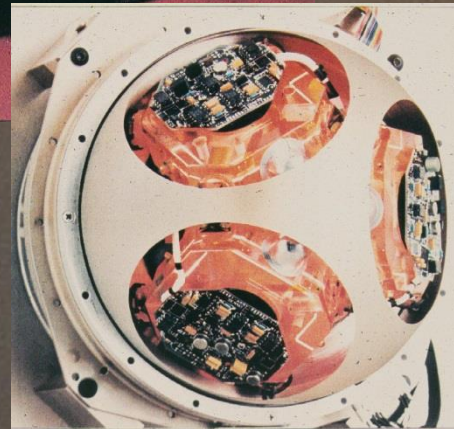
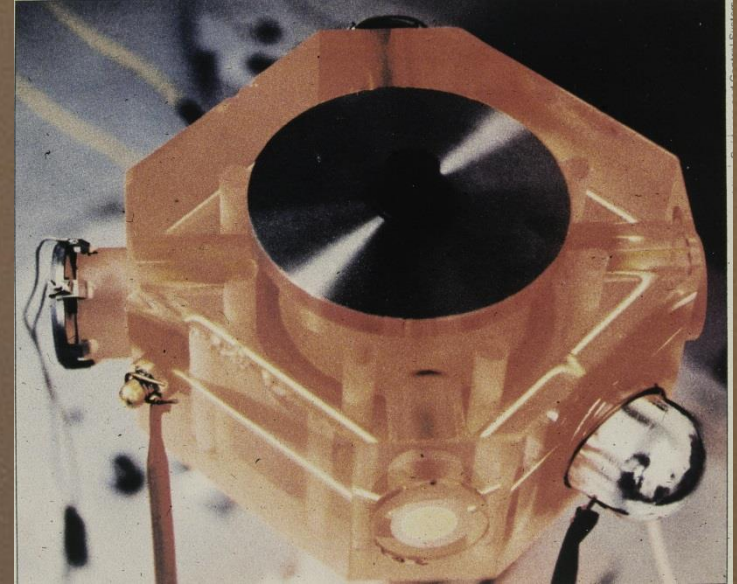
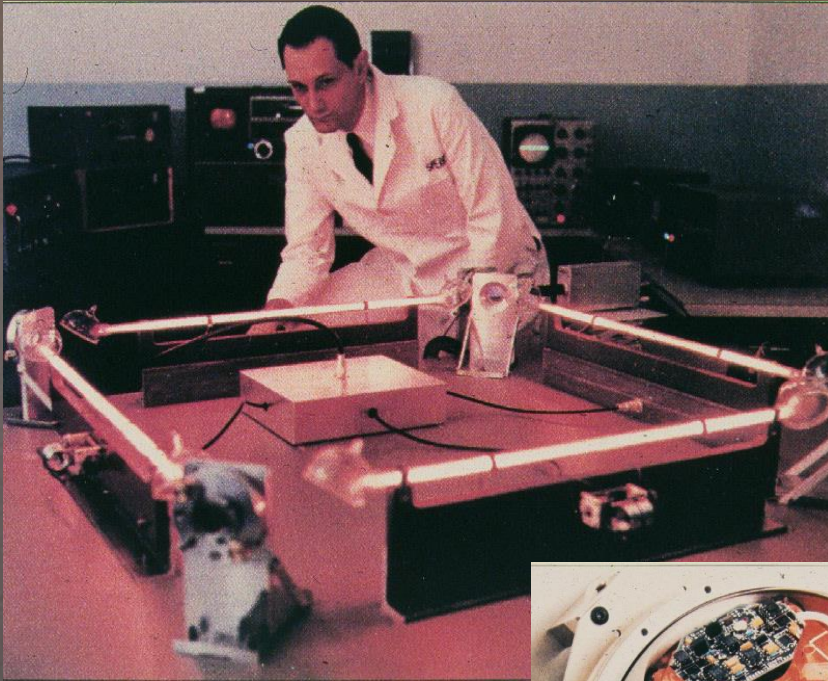
## Hátrányok:

- Igen drága



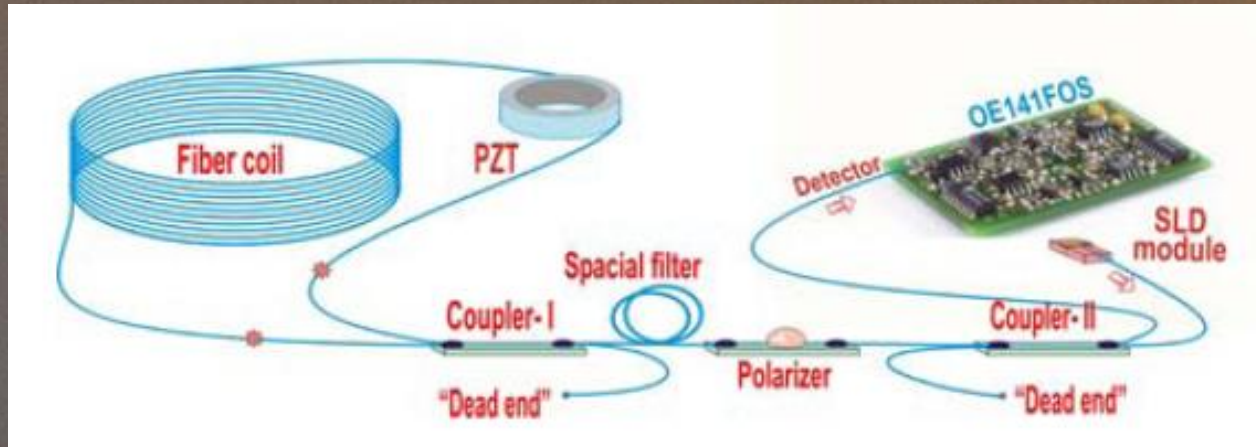
# Lézer giroszkóp

- Ring Laser Gyroscope (RLG)



# Lézer giroszkóp

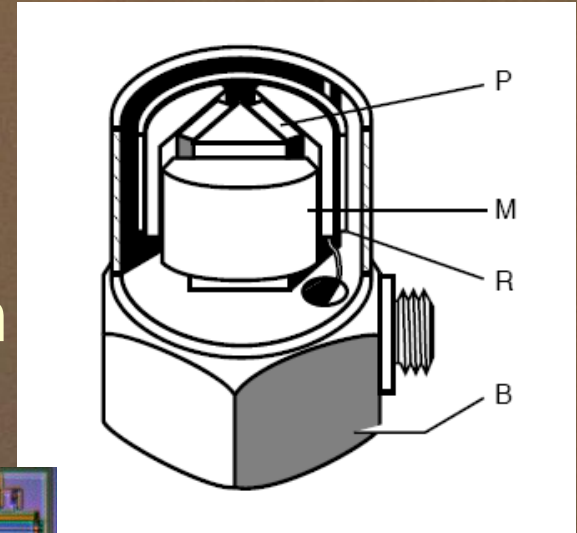
- Fiber Optic Gyroscope (FOG)



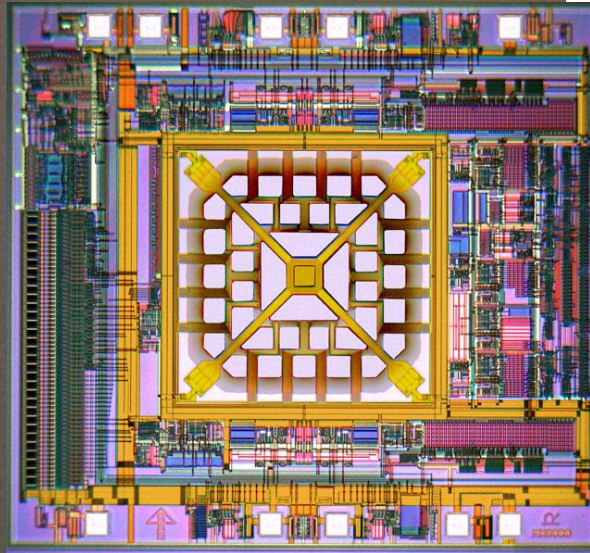
# Gyorsulás érzékelők

Fizikai elv: rugó - tömeg együttes

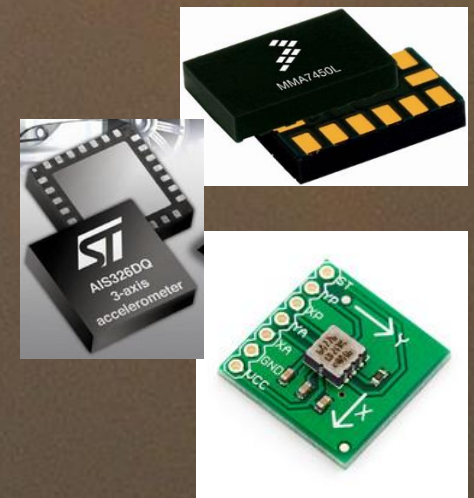
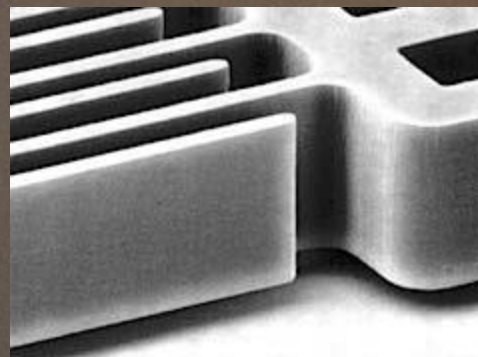
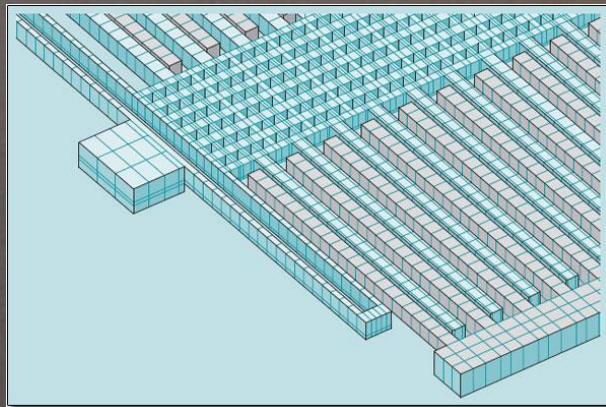
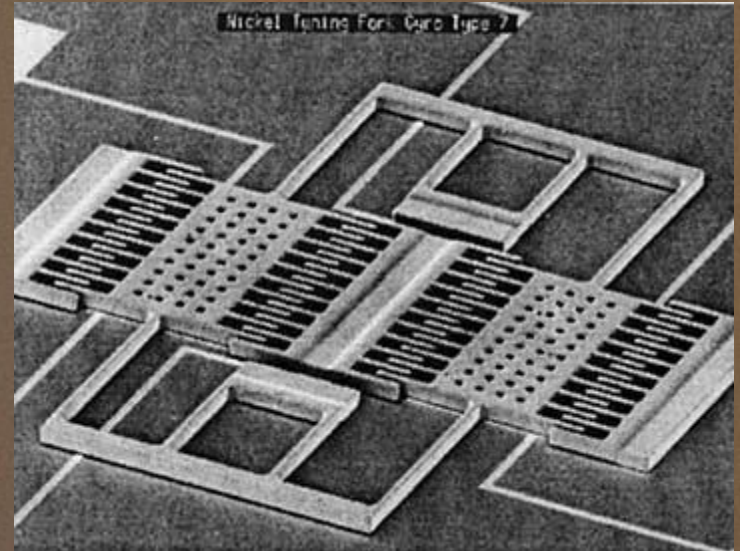
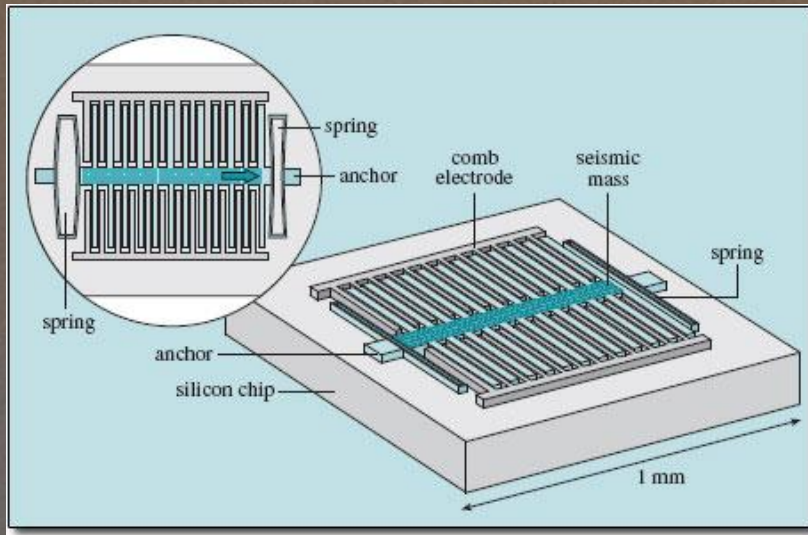
- Piezokeramikus  
Érzékelés piezoelektromos elven



- MEMS  
Érzékelés elve
- Kapacitív
- Termikus



# MEMS gyorsulás érzékelők



# MEMS gyorsulásérzékelők

## Előnyök:

- Kis méretek - 4 x 4 x 1.5 mm (3-tendelyű)
- Környezetállóság
- Nagy megbízhatóság, kis meghibásodási ráta
- Kis fogyasztás
- Egyszerű beépítés
- Alacsony ár

## Hátrányok:

- Áramköri zaj
- Hőmérsékletfüggés

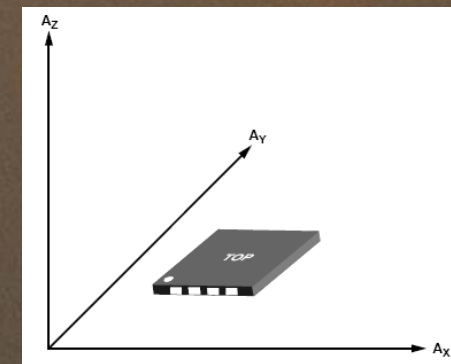
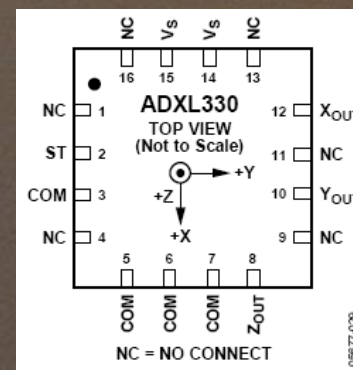
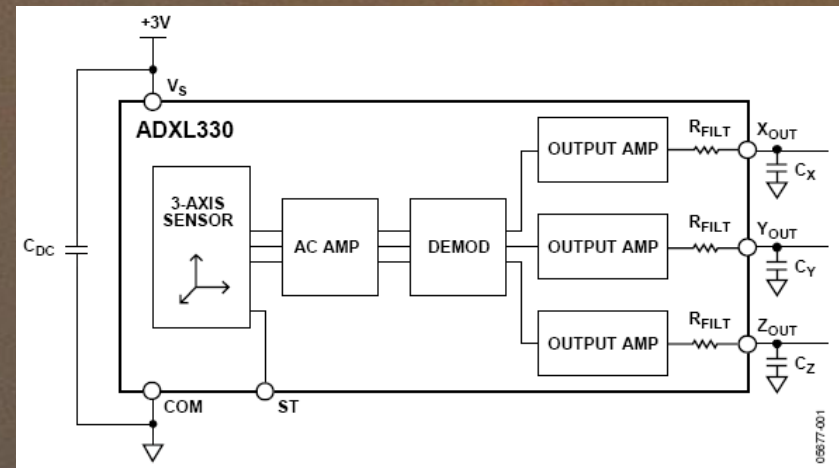
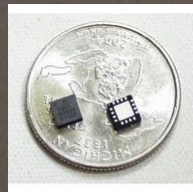
## Jellemző:

- Gyorsulást érzékel:  
pozíció 2 integrálással

# MEMS gyorsulásérzékelő

## Analog Devices ADXL-330 háromtengelyű gyorsulás érzékelő

- Méréshatár  $\pm 3g$
- Érzékenység  $300mV/g$
- Linearitás  $\pm 0.3\%$
- Hőmérsékleti drift  $1mg/^\circ C$
- Zaj  $300 \mu g/\sqrt{Hz}$
- Sávszélesség  $1.6kHz$
- Méret  $4 \times 4 \times 1.45 \text{ mm}$
- Ár  $< 10\$$



# Inerciális Mérőegységek (IMU)

## IMU - Inertial Measurement Unit

- Giroszkópok és gyorsulásérzékelők, esetleg más szenzorok közös feldolgozó egységgel
- Minimálisan mérés, ADC, előfeldolgozás, szűrés
- Skálázás, kalibrálási tényezők alkalmazása, hibakorrekció
- Maximális elvárások: sebesség, pozíció, helyzet (Euler-szögek) meghatározása

### Mai megvalósítás

- Digitális feldolgozás
- Beágyazott mikroszámítógépek alkalmazása

# Inerciális Mérőegységek (IMU)

## Példa: Crossbow MNAV-100

- 6-szabadságfokú inerciális érzékelő rendszer: 3-irányú gyorsulás-, 3-tengelyű szögsebesség érzékelés
- 3D mágneses térérzékelés - magnetométer, iránytű
- Hőmérséklet érzékelés
- Abszolút (barometrikus) és relatív nyomásérzékelés
- GPS
- Atmel ATmega128 8-bites AVR mikrovezérlő
- RS232 kommunikáció





# Inerciális Mérőegységek (IMU)

## Példa: Crossbow MNAV-100

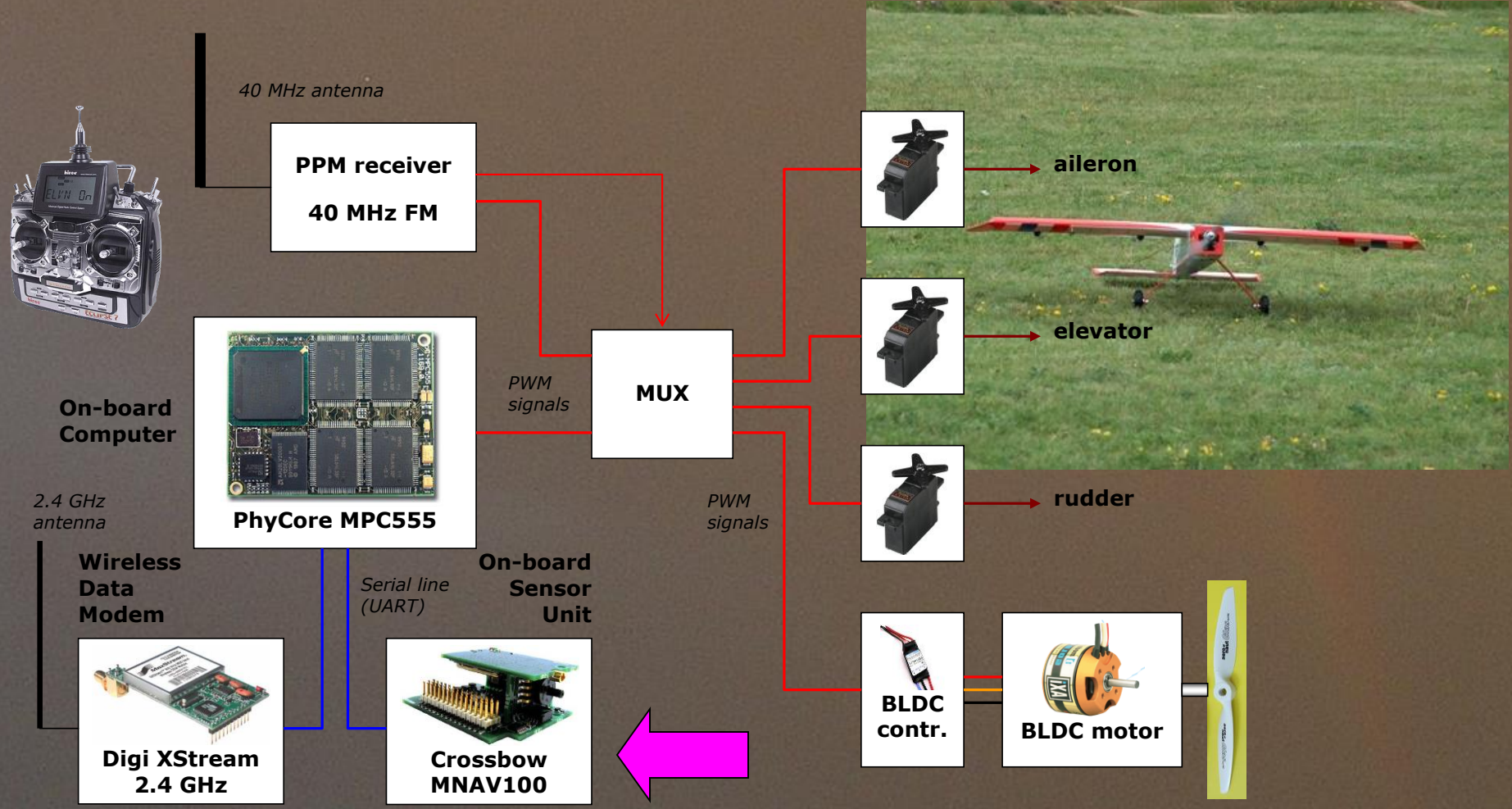
- Mérés: analóg jelkondicionálás, AD konverzió
- Skálázás, kalibrációs konstansok alkalmazása
- Közvetítés az RS-232 vonal felé

- Minden egyéb funkciót a fedélzeti számítógép valósít meg

- Kalibrálás

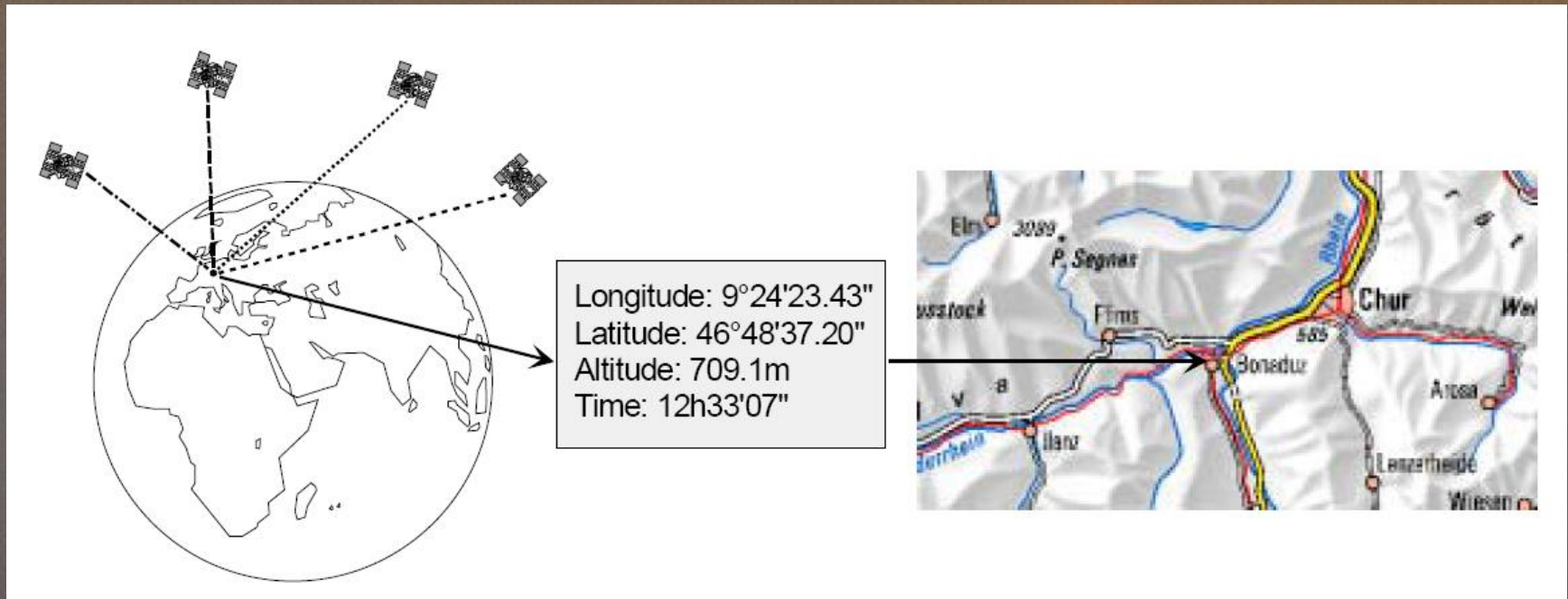


# Inerciális Mérőegységek (IMU)



Crossbow MNAV-100 alkalmazás: UAV modell

# Globális pozícionáló rendszer- GPS

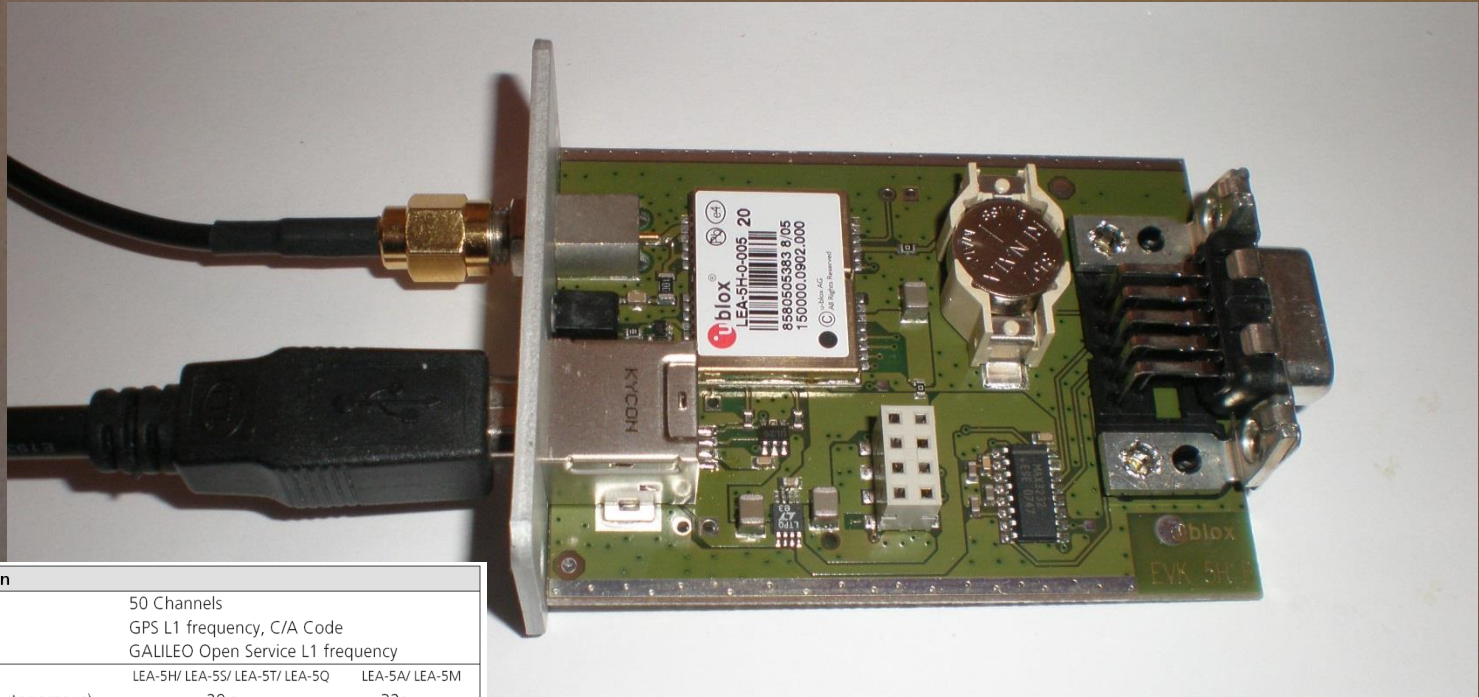


## Problémák:

- Korlátozott pontosság
- Zaj, bizonytalanságok
- Megbízhatóság, rendelkezésre állás

Javasolt irodalom: [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com)  
GPS\_Compedium(GPS-X-02007).pdf

# Globális pozícionáló rendszer- GPS



Parameter	Specification	
Receiver Type	50 Channels GPS L1 frequency, C/A Code GALILEO Open Service L1 frequency	
Time-To-First-Fix <sup>1</sup>	LEA-5H/ LEA-5S/ LEA-5T/ LEA-5Q    LEA-5A/ LEA-5M	
	Cold Start (Autonomous)	29 s    32s
	Warm Start (Autonomous)	29 s    32s
	Hot Start (Autonomous)	<1 s    <1s
Aided Starts <sup>2</sup>	<1 s    <3s	
Sensitivity <sup>3</sup>	LEA-5H/ LEA-5S/ LEA-5T/ LEA-5Q    LEA-5A/ LEA-5M	
	Tracking & Navigation	-160 dBm    -160 dBm
	Reacquisition	-160 dBm    -160 dBm
	Cold Start (Autonomous)	-144 dBm    -143 dBm
Horizontal Position Accuracy <sup>4</sup>	Autonomous	< 2.5 m
	SBAS	< 2.0 m
Accuracy of Timepulse Signal	RMS	30 ns
	99% Compensated <sup>5</sup> (LEA-5T)	<60 ns
	Time Pulse	15 ns <sup>3</sup>
	Configurable: 0.25 ... 1000 Hz	
Max Navigation Update Rate	4 Hz	
Velocity Accuracy <sup>6</sup>	0.1m/s	
Heading Accuracy <sup>5</sup>	0.5 degrees	
Dynamics	≤ 4 g	
Operational Limits	Velocity	515 m/s (1000 knots)

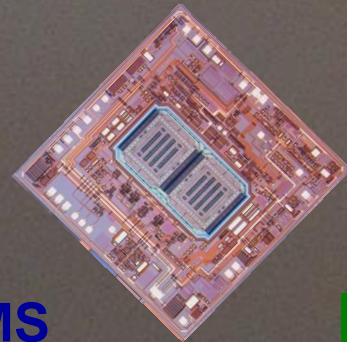
uBlox LEA-5H

50-csatornás GPS vevő

# GPS-INS pozícionáló rendszer

Nagyobb

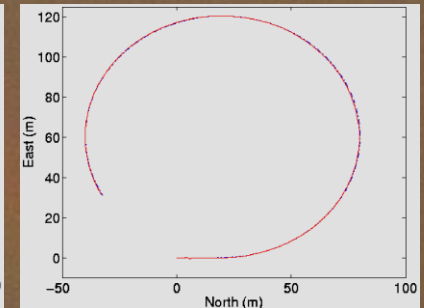
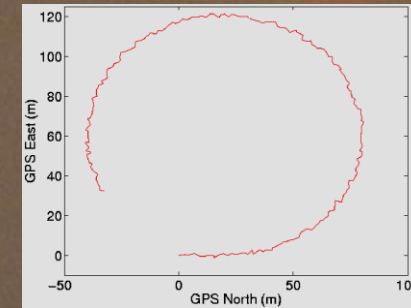
- pontosság
- rendelkezésre állás
- megbízhatóság



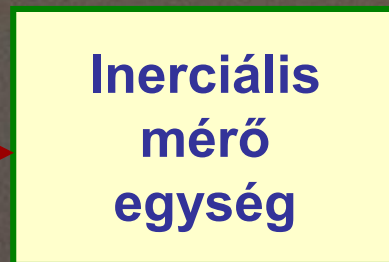
MEMS

- gyorsulás-
- giro-

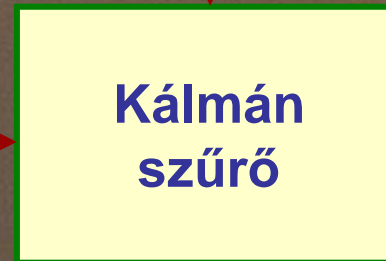
érzékelők



Dinamikus  
jármű-  
modell



$x, y, z,$   
 $v_x, v_y, v_z$



Becsült

$x, y, z$

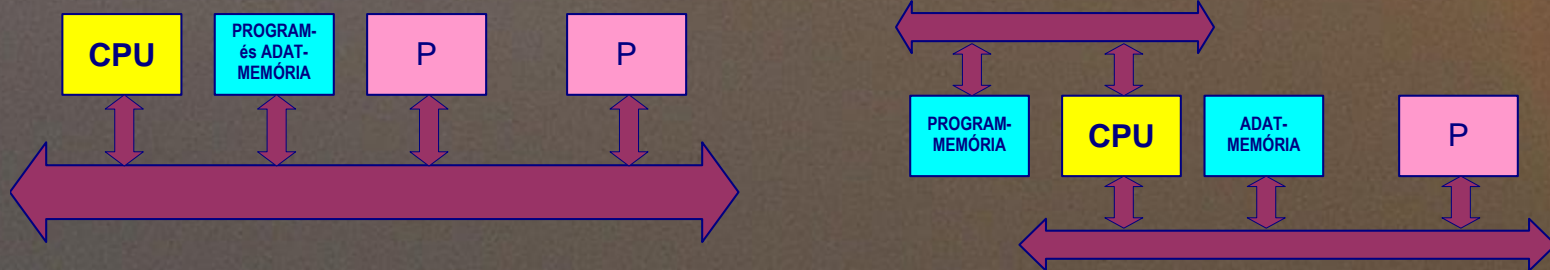
$\varphi, \psi, \theta$

$a_x, a_y, a_z,$   
 $\omega_{yz}, \omega_{xz}, \omega_{xy}$

# Beágyazott számítástechnika

- Számítógép architektúra - általános séma
- A specifikus funkcionalitást a *szoftver* valósítja meg.

## *Neumann és Harvard architektúra*



*Univerzális elrendezés algoritmizálható problémák megoldására.*

# Beágyazott rendszerek

- A kifejezés kb. 10 éve jelent meg.
- Beágyazott rendszerek szórványosan már előtte léteztek.

*Mikroprocesszorok, mikrovezérlők megjelenése:*



**Intel 4004 4-bites mikroprocesszor: 1971**  
az első egy áramköri lapkán megvalósított komplett mikroprocesszor



**Intel 8080 8-bites mikroprocesszor: 1974 április**  
az első iparban elterjedten alkalmazott mikroprocesszor



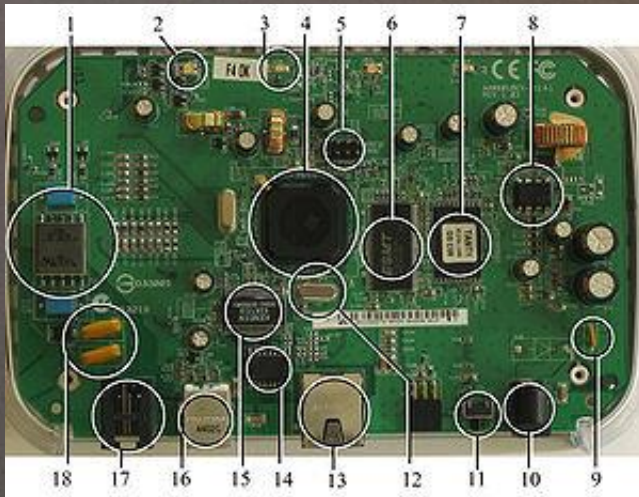
**Intel 8051 8-bites mikrovezérlő: 1980**  
az első egy áramköri lapkán megvalósított teljes Harvard architektúrájú mikrovezérlő - kifejezetten beágyazott rendszerek céljára

# Beágyazott rendszerek ma

- A gyártott mikroprocesszorok 90%-a beágyazott alkalmazásban kerül felhasználásra.
- Beágyazott rendszerek mindenütt: **Mai modern gépjárművek:**  
50-100 beágyazott számítógép: ECU

## Netgear ADSL modem/router:

4: processzor (Texas Instruments),  
6: RAM 8 MB, 7: flash memória

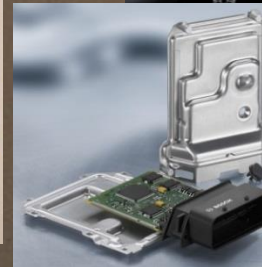


## Mobiltelefonok:



Alapsávi  
processzor

üzemanyagellátás  
ABS/ASR





# Beágyazott rendszerek fejlesztése

- **Komponensek**
  - Mikrovezérlők, mikroszámítógépek
  - Memória elemek - statikus/dinamikus RAM, flash
  - Periféria áramkörök - interfész, tárolás, kommunikáció
- **Fejlesztőeszközök**
  - Tervezés, prototípus előállítás, mérés, tesztelés
  - Hardver-, szoftver- és rendszerfejlesztési eszközök
- **Módszerek**
  - Alapfeladatok, algoritmusok
  - Rendszerrealizálási módszerek
  - Módszertani fejlesztés

# Beágyazott rendszerek komponensei

- Számítógép komponensek
  - Mikrovezérlők - 8-16-32 bites egységek saját adat- és programmemóriával, perifériakészlettel
  - Mikroszámítógépek - 32-64 bites egységek belső és külső memória és periféria meghajtó képességgel
  - Digitális jelfeldolgozó processzorok (DSPk) - speciális utasításkészlettel kiegészített mikrovezérlők
  - Speciális feldolgozó elemek - kommunikációs processzorok, hang- és képfeldolgozó processzorok
  - Programozható logikai tömbök - FPGA - szoft-processzorok

# Beágyazott rendszerek komponensei

- Memória elemek

- Nem felejtő memóriák:

- ROM - maszkprogramozott, PROM - egyszer programozható

- EPROM - törölhető, újraprogramozható

- ma leginkább *flash* memóriák

- elektronikusan nagyon sokszor újraprogramozható

- programtárolásra (Harward architektúra)

- adattárolásra: adatgyűjtés, archiválás

- RAM memóriák:

- statikus

- kis méretű gyors memóriák átmeneti tárolásra

- dinamikus

- adattárolásra (Harward architektúra)

- program- és adattárolásra (Neumann architektúra)

# Beágyazott rendszerek komponensei

- Periféria áramkörök
  - Interfész áramkörök:
    - Analóg jelinterfészek: AD és DA konverterek
    - Logikai jelinterfészek: digitális I/O
    - Fizikai jelinterfészek: érzékelők, mérőeszközök, relék, motorok, különböző fizikai elveken alapuló beavatkozó szervek
    - Kommunikációs interfészek: vezetékes és vezeték nélküli soros vagy hálózati interfészek
  - Adattároló eszközök:
    - Mágneses tároló eszközök: keménylemezes diszkek
    - Optikai tároló eszközök: CD, DVD
    - Félvezető tároló eszközök: multimédia, SD memória kártyák
  - Kommunikációs eszközök:
    - Vezetékes hálózatok: Ethernet, CAN, FlexRay
    - Vezeték nélküli hálózatok: WLAN, ZigBee

# Beágyazott rendszerek fejlesztőeszközei: hardver

- Kiindulópont:

- Modul szint

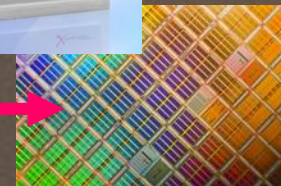


- Integrált áramköri szint



- Áramköri szint

- FPGA realizációk
- Félvezető lapka tervezés



# Beágyazott rendszerek fejlesztőeszközei: szoftver

- Szoftver és rendszerszintű fejlesztő rendszerek:
  - Alacsony szintű fejlesztőeszközök: assemblerek, letöltő programok, kódszintű hibakereső programok
  - Magas szintű programozási nyelvek: compiler, forrás-szintű debugger programok
    - C, C++, C# compilerek, Eclipse környezet
  - Magas szintű rendszerfejlesztési eszközök: szimbolikus, grafikus programgenerálási környezetek, rendszer konfigurációs eszközök
    - Matlab/Simulink (Mathworks)
    - LabView (National Instruments)

# Beágyazott mérőrendszer séma

