

ÉRZÉKELŐK ÉS BEAVATKOZÓK I.

2. ÉRZÉKELÉS ÉS MÉRÉS



Dr. Soumelidis Alexandros

2020.09.17.



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG

Mivel foglalkozunk?



Ebben a félévben:

Különböző fizikai mennyiségek mérése:

- Példák:
- Kinematikai mennyiségek: távolság, sebesség, gyorsulás
 - Dinamikai mennyiségek: tömeg, tehetetlenségi nyomaték
 - Idő, frekvencia
 - Energetikai mennyiségek: energia, teljesítmény
 - Más fizikai mennyiségek: hőmérséklet, nyomás, rádióaktivitás
 - Villamos mennyiségek: áramerősség, feszültség, mágneses térerősség
 - Fénytani mennyiségek: fényerősség, megvilágítás
 - Kémiai mennyiségek: anyagmennyiség

Mit jelent a mérés?

Valamilyen egységgel való összehasonlítás: a mennyiség és egységnyi mennyiség arányának meghatározása.



Metrológia

A metrológia tudománya foglalkozik a mennyiségek és mértékegységek származtatásával, a mértékegységek fizikai megvalósításával, és mérések elvi megvalósításának problémáival.

SI mértékrendszer (Le Système International d'Unités - Nemzetközi Egységrendszer, 1960):

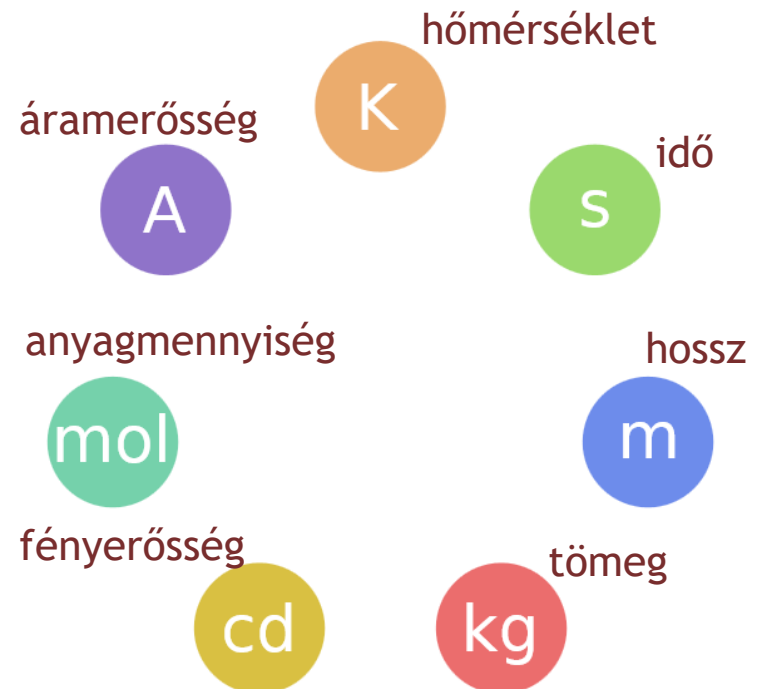
Alapmennyiségek - SI alapegységek:

Minden más: származtatott mennyiségek ill. egységek, pl.

Sebesség - m/s

Nyomás - kg/m²

Villamos feszültség - m²·kg·s⁻³·A⁻¹



Metrológia

Az SI alapegységek definíciója 2019. május 19-ig:

A **méter (m)** annak az útnak a hosszúsága, amelyet a fény vákuumban $1/299,792,458$ másodperc időtartam alatt megtesz.

A **kilogramm (kg)** egyenlő a kilogramm nemzetközi prototípus tömegével.

A **másodperc (s)** az alapállapotú cézium-133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás $9,192,631,770$ periódusának időtartama.

Az **amper (A)** olyan állandó villamos áram erőssége, amely két egyenes, párhuzamos, végtelen hosszúságú, elhanyagolhatóan kicsiny kör-keresztmetszetű és egymástól 1 méter távolságban, vákuumban elhelyezkedő vezetőben fenntartva, e két vezető között méterenként $2 \cdot 10^{-7}$ newton erőt hozna létre.

A **kelvin (K)** a víz hármaspontja termodinamikai hőmérsékletének $1/273.16$ -szorososa.

A **mól (mol)** annak a rendszernek az anyagmennyisége, amely annyi elemi egységet tartalmaz, mint ahány atom van 0.012 kilogramm szén-12-ben.

A **kandela (cd)** az olyan fényforrás fényerőssége adott irányban, amely $540 \cdot 10^{12}$ hertz frekvenciájú monokromatikus fényt bocsát ki és sugárerőssége ebben az irányban $1/683$ watt per szteradián.



Metrológia

Az SI alapegységek definíciója 2019. május 20-tól *kizárólag természeti állandókon* alapul:

- a cézium-133 által kibocsátott fény frekvenciája $\nu = 9\,192\,631\,770$ Hz - másodperc (s)
- a fény sebessége $c = 299\,792\,458$ m/s - méter (m)
- a Planck-állandó $h = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js - kilogramm (kg)
- az elemi töltés $e = 1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C - amper (A)
- a Boltzmann-állandó $k = 1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K - kelvin (K)
- az Avogadro-állandó $N_A = 6.122\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol - mól (mol)
- a spektrális fényhasznosítás értéke 540 1012 frekvenciájú monokromatikus fény esetén 638 lm/W - kandela (cd)



Metrológia

Az SI alapegységek definíciója sokat változott az idő során.

Példa: a méter

Az 1875-ös Párizsi Méteregyezményben a métert a föld egy délköre kerületének 40 milliomod részeként definiálták.

1889-es méter meghatározás egy Párizsban őrzött platina-irídium nemzetközi prototípuson az olvadó jég hőmérsékletén mért hosszán alapult.

1960-ban a métert a krypton-86 spektrumvonal hullámhosszának 1,650,763.73-szereseként határozták meg.

1983-ra a fenti meghatározás már nem volt megfelelő, ezért a métert a fény által vákuumban $1/299,792,458$ másodperc alatt megtett úthosszban határozták meg és ennek megvalósítására jódstabilizált hélium-neon lézer hullámhosszát használták.

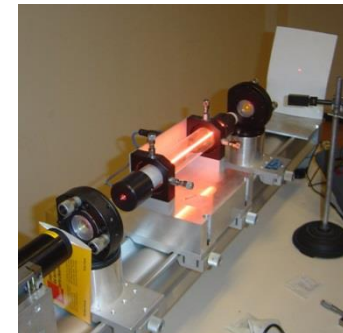
Az újradefiniálásokkal a relatív bizonytalanság 10^{-7} -ről 10^{-11} -re csökkent.



Pt-Ir
prototípus



Krypton-86
lámpa



He-Ne
lézer



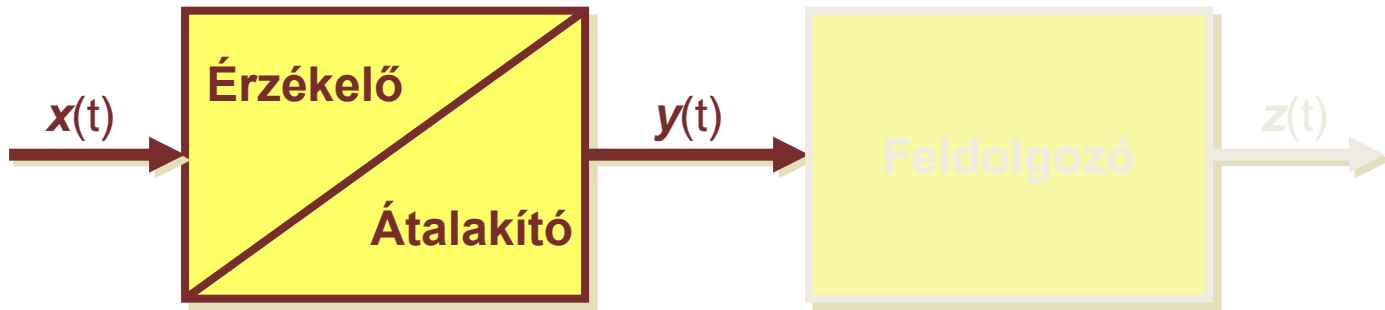
Metrológia

Külön névvel
illetett SI
származtatott
egységek:

Származtatott mennyiség	SI egység név	Jelölés	SI egységekkel kifejezve	SI alapegységekkel kifejezve
frekvencia	hertz	Hz		s^{-1}
erő	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
nyomás	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energia, munka, hőmennyiség	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
teljesítmény, sugárfluxus	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
elektromos töltés, elektromosság egysége	coulomb	C		$s \cdot A$
elektromos potenciál- különbség, elektromotoros erő	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
elektromos kapacitás	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
elektromos ellenállás	ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
elektromos vezeték	siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
mágneses fluxus	weber	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
mágneses indukció, mágneses fluxussűrűség	tesla	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induktivitás	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
fényáram	lumen	lm	$cd \cdot sr$	cd
megvilágítás	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
radioaktivitás	becquerel	Bq		s^{-1}
elnyelt dózis, közölt dózis, fajlagosan átadott energia	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
dózisegyenérték	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
síkszög	radián	rad		$m \cdot m^{-1} = 1$
térszög	steradián	sr		$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
katalitikus aktivitás	katal	kat		$s^{-1} \cdot mol$



Érzékelés, mérés

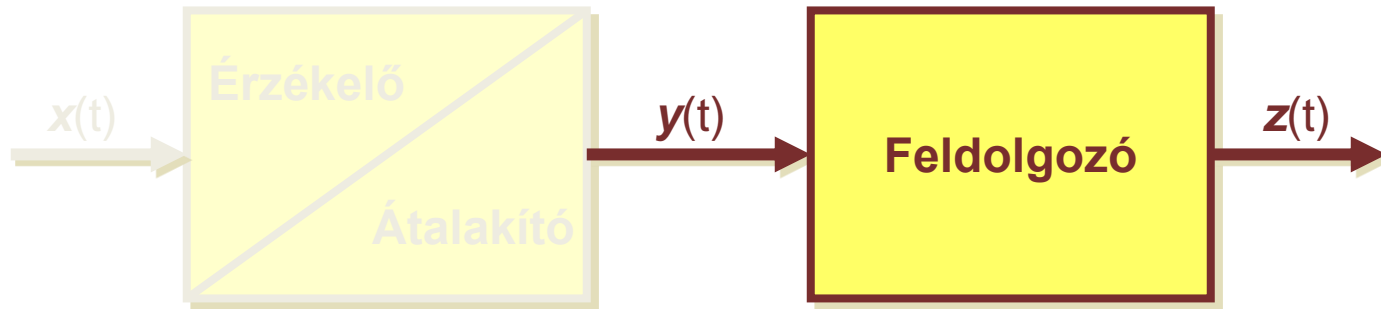


Érzékelő/átalakító (szenzor, távadó):
feldolgozható formára hozza a mért jellemzőt

- 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



Érzékelés, 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.



Érzékelők

Fizikai mennyiségeket

- villamos jellegű mennyiségekre : feszültség, áram, frekvencia, vagy
- Villamos elven mérhető mennyiségekre: ellenállás, kapacitás, induktivitás alakítanak át.

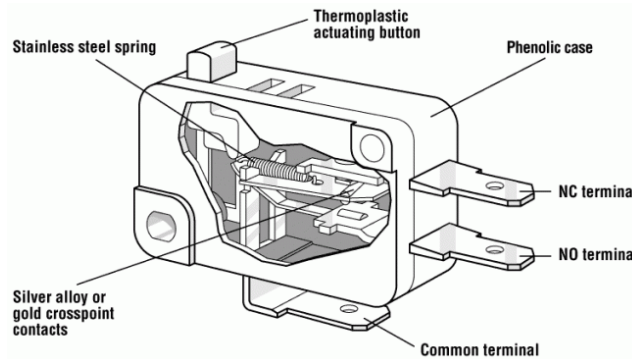
Érzékelők osztályozása a kimenet jellege szerint:

- Analóg kimenetű érzékelők: kimenet folytonos skálán változik.
- Kétállapotú: a kimenet két állapot között változik.
- Digitális: a kimenet diszkrét skálán változik.



Érzékelők

Néhány egyszerű példa érzékelőkre:



Mikrokapcsoló (limit-switch)

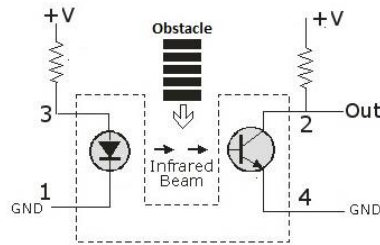
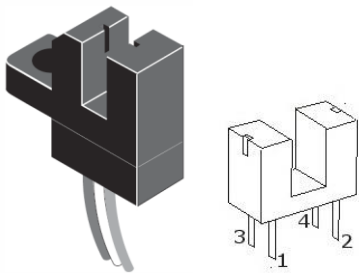


Potenciométer
(szervo potméter)

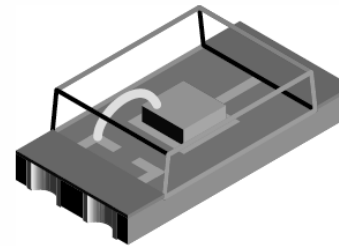


Érzékelők

Néhány egyszerű példa érzékelőkre:



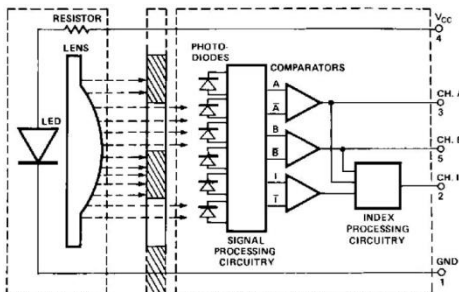
Optokapu (photo-interrupter)



ALS (ambient light sensor)



LDR (light-dependent resistor)



Optikai enkóder (forgó)

Fényintenzitás érzékelők

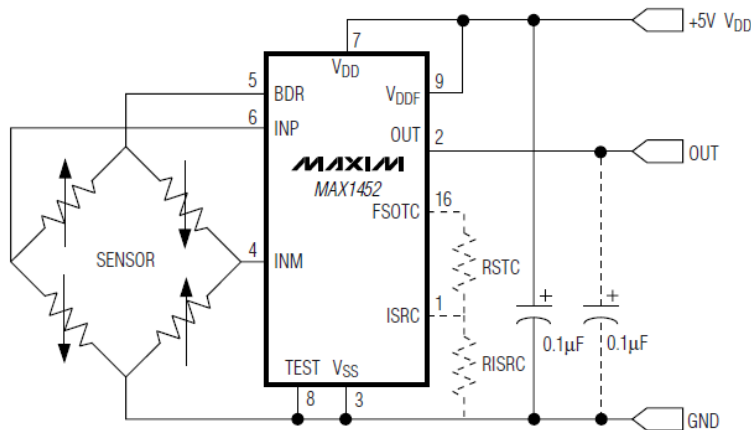
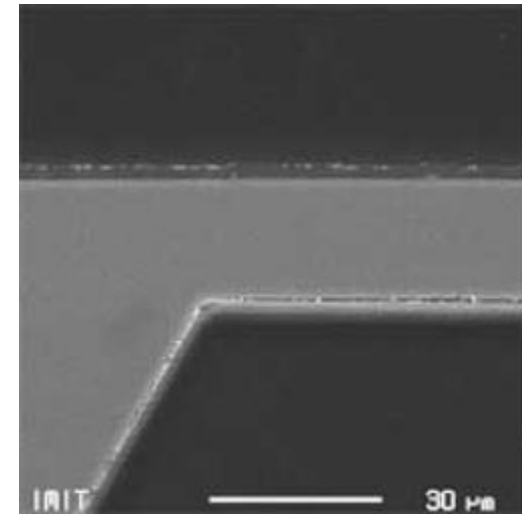
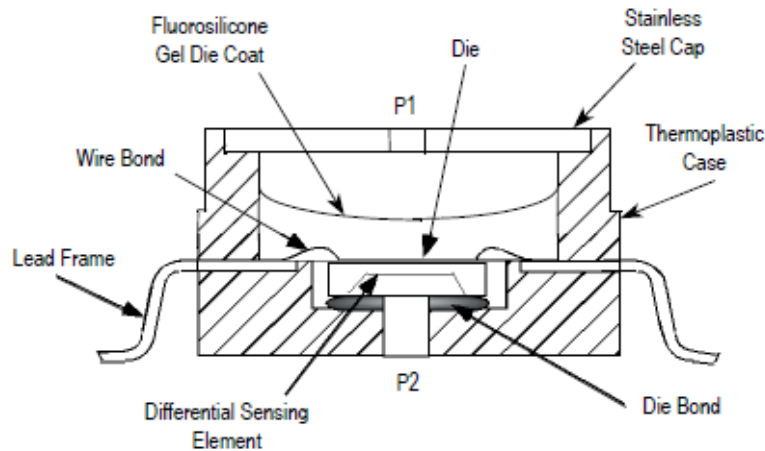


Infravörös távolságmérő szenzor



Érzékelés, mérés

Példa: félvezető nyomásérzékelő



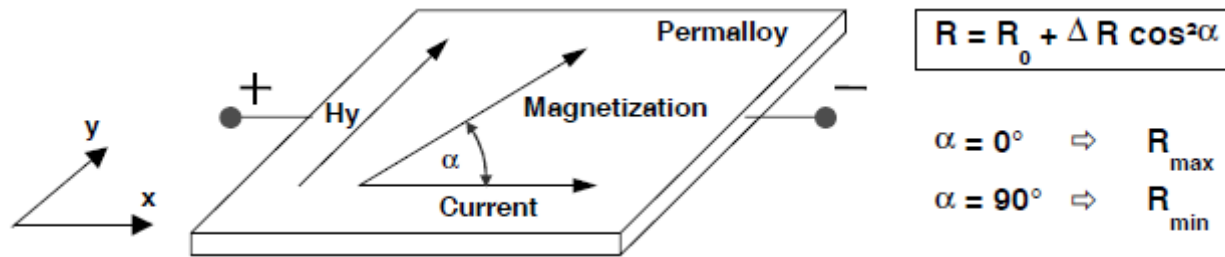
A nyomáskülönbség deformálja a vékony Si lapot.

A deformáció ellenállás változást okoz - villamos módszerrel, pl. mérőhidakkal (Wheatstone-híd) mérhetők.



Érzékelés, mérés

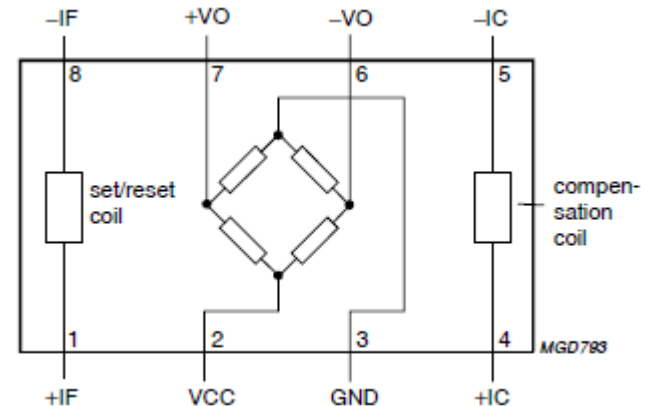
Példa: mágneses térérzékelő



Magnetorezisztív hatás:

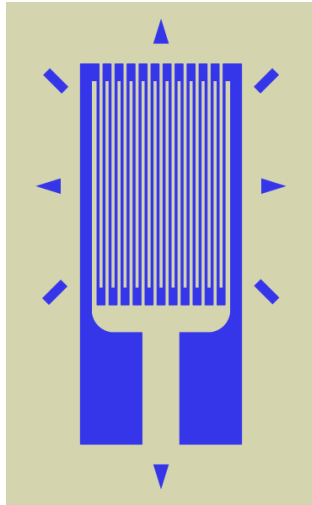
A mágneses tér megváltoztatja a permalloy anyag (egy vasötvözet) ellenállását.

Mérés: Wheatstone-híd.



Érzékelés, mérés

Példa: nyúlásmérő bélyeg



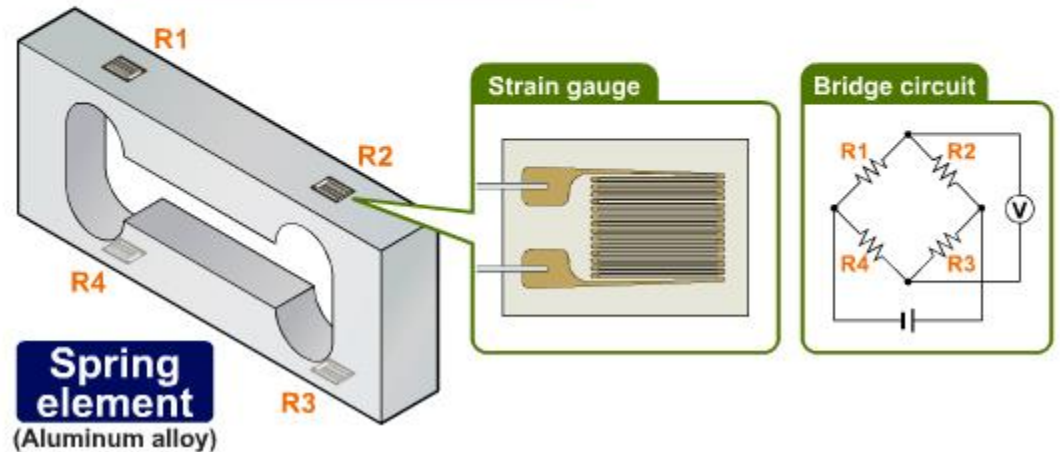
Mechanikai deformáció (nyúlás):

megváltoztatja egy vékony vezető réteg ellenállását.



Alkalmazás: erőmérő cella.

Mérés: Wheatstone-híd.



Hőmérséklet mérés

Hőmérséklet érzékelők típusai:

Kétállapotú hőmérséklet érzékelők (hőmérséklet kapcsolók, termosztátok):

- Bimetál kapcsoló
- Folyadék- vagy gáztöltésű harmonikás kapcsoló

Arányos (analóg) hőmérséklet érzékelők:

- Ellenálláshőmérő (RTD - Resistor Temperature Detector)
- Termoelem (TC - Thermocouple),
- Termisztor
- Félvezető alapú érzékelők
- Érintkezés nélküli infravörös érzékelők



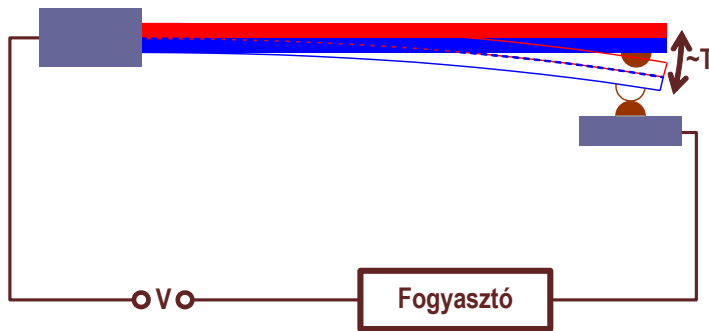
Hőmérséklet mérés

Kétállapotú hőmérséklet érzékelők

(hőmérséklet kapcsolók, termosztátok):

Határoló kapcsolók (limit switch): valamilyen hőmérsékleti szint túllépésekor állapotot vált.

- Bimetál kapcsoló



„Kettősfém” szalag - különböző hőtágulási tényezőjű fémekből összeállítva: az eltérő hossz-növekedés miatt elhajlik.



$$\varepsilon = \frac{L(T) - L(T_0)}{L(T_0)} = \alpha(T - T_0)$$

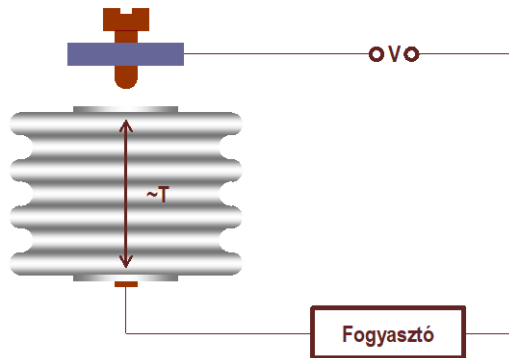
relatív
hosszváltozás

↑
hőmérsékleti tényező



Hőmérséklet mérés

- Gáz- vagy folyadéktöltésű harmonikás kapcsoló



Gázok nyomásának ill. térfogatának hőmérsékletfüggése: $\frac{pV}{T} = const.$ (egyesített gáztörvény)

A harmonika állandó nyomást tart fenn:

$$V(T) - V(T_0) = \frac{k}{p}(T - T_0) \quad L(T) - L(T_0) = \frac{k}{pA}(T - T_0)$$

$V = LA$

Folyadékok térfogatának hőmérsékletfüggése:

relatív térfogatváltozás

$$\varepsilon_V = \frac{V(T) - V(T_0)}{V(T_0)} = \gamma(V - V_0)$$

↑
térfogati hőmérsékleti tényező



Hőmérséklet mérés

Ellenálláshőmérő (RTD - Resistor Temperature Detector)

Alapelv: a vezető anyagok ellenállásának hőmérséklet-függése:

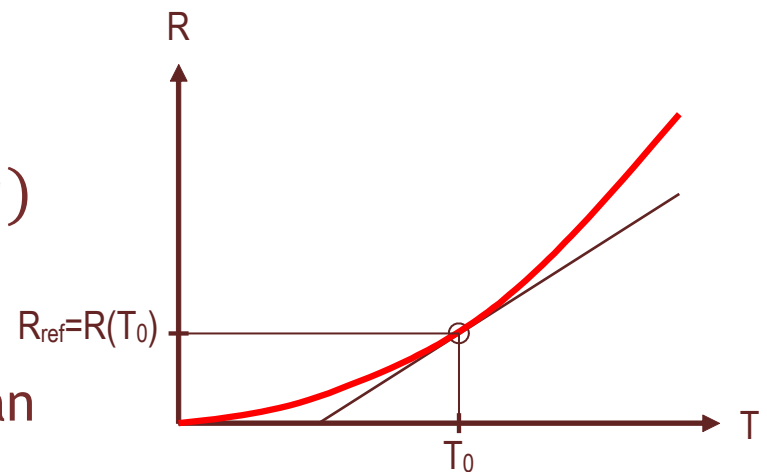
$$\frac{R(T)-R(T_0)}{R(T_0)} = \alpha(T-T_0) \quad R(T) = R(T_0) (1 + \alpha\Delta T)$$

↑
hőmérsékleti tényező (lineáris)

Másodrendű közelítés:

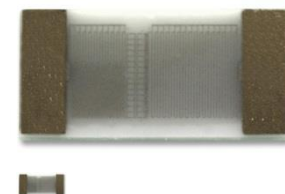
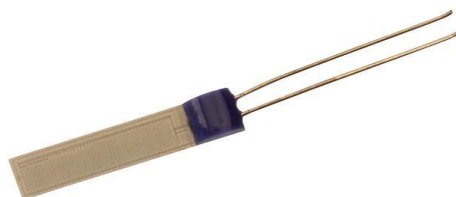
$$R(T) = R(T_0) (1 + \alpha\Delta T + \beta(\Delta T)^2)$$

magasabb rendű közelítések:
az $R(T)$ függvény Taylor-sor alapján



Hőmérséklet mérés

Ellenálláshőmérők: a leggyakoribb Pt100 - 100 Ω platina



Szabvány: DIN IEC 751

Osztályok - tolerancia szerint:

$$A: \pm [(0.15 + 0.002 | t |) ^\circ\text{C}$$

$$B: \pm [(0.30 + 0.005 | t |) ^\circ\text{C}$$

Anyagok:

Platina	0.00385 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	-260 - 850 $^\circ\text{C}$
Réz	0.00427 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	-100 - 260 $^\circ\text{C}$
Nikkel	0.00672 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	-100 - 260 $^\circ\text{C}$



Hőmérséklet mérés

Pt100 RTD jellemzői (IEC751 szabvány szerint):

- Névleges ellenállás 100°C hőmérsékleten: 100Ω.
- Lineáris hőmérsékleti tényező $\alpha=0.00385$ (átlagos meredekség 0 és 100 °C között)
- Pontosabb - nemlineáris - összefüggés:

$$R(T) = R_0 (1 + aT + bT^2 + c(T-100)T^3)$$

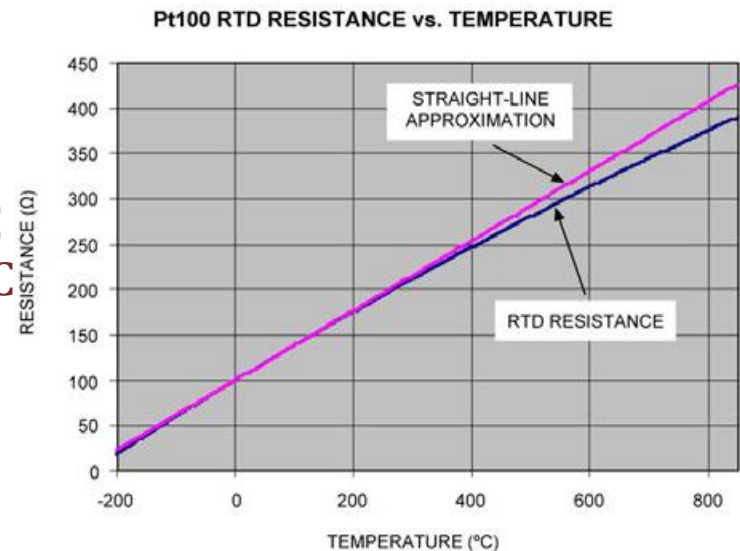
$$a = 3.90830 \times 10^{-3}$$

$$b = -5.77500 \times 10^{-7}$$

$$c =$$

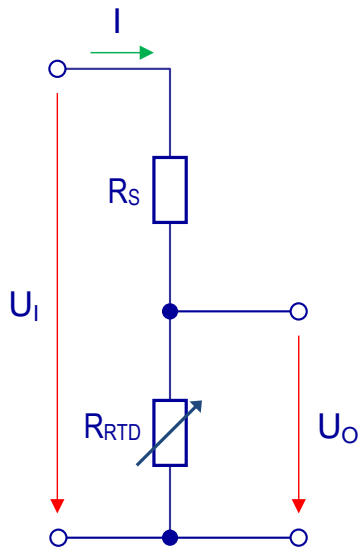
$$\begin{cases} -4.18301 \times 10^{-12} & 200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C} \\ 0 & 0^\circ\text{C} < T < +850^\circ\text{C} \end{cases}$$

(Callendar-Van Dusen összefüggés)



Hőmérséklet mérés

Mérés ellenálláshőmérővel: az RTD-re eső



Feszültséggenerátoros gerjesztés

$$U_0 = U_I \frac{R_{RTD}}{R_S + R_{RTD}} \leftarrow \text{torzító tag} \quad \text{nemlineáris}$$

Áramgenerátoros gerjesztés

$$U_0 = I R_{RTD} \quad \text{lineáris}$$

Állandó árammal való gerjesztés a kedvezőbb:

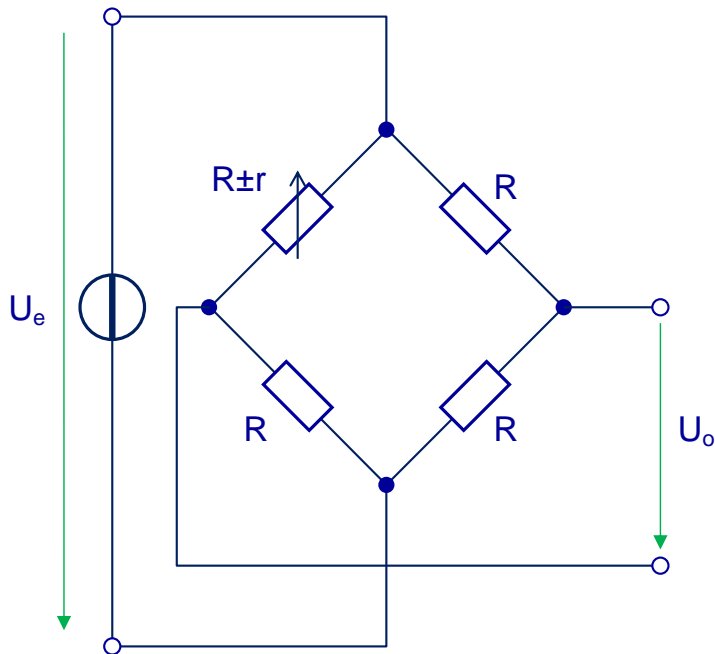
- nincs torzítás,
- a hozzávezetések ellenállása nem játszik szerepet.



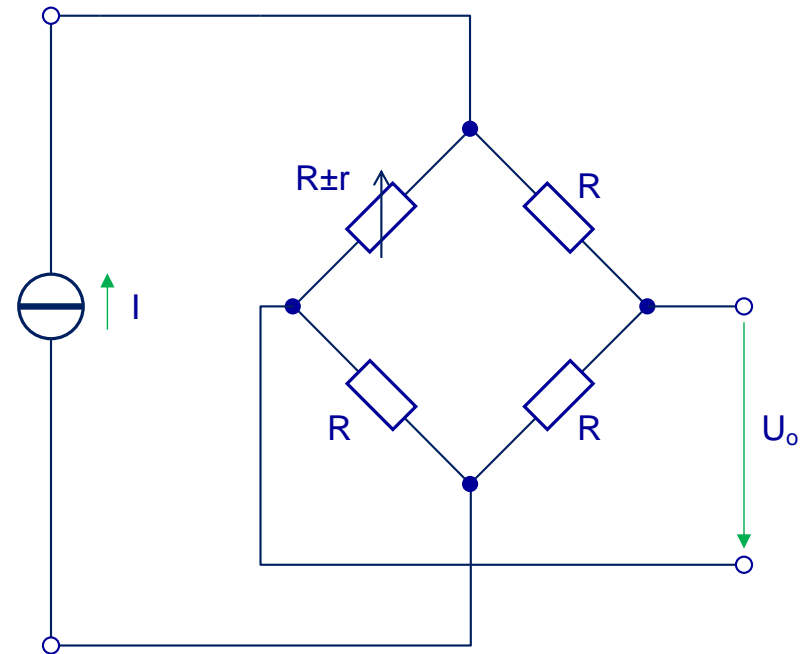
Hőmérséklet mérés

Mérés ellenálláshőmérővel: mérőhíd - egy Wheatston-híd

A híd egyik eleme a változó ellenállású RTD, a többi (legtöbbször azonos) értékű konstans ellenállás. Mérjük U_o kimeneti feszültséget.



Feszültséggenerátoros gerjesztés

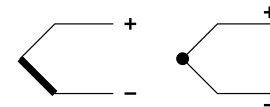


Áramgenerátoros gerjesztés

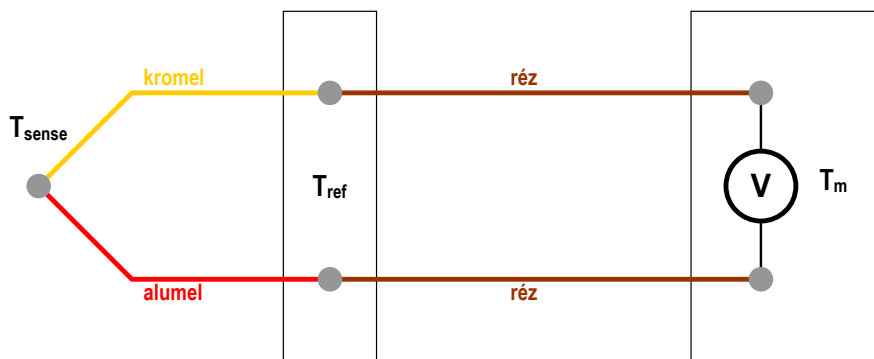


Hőmérséklet mérés

Termoelemek (ThermoCouple - TC)



Termoelektromos hatás (Seebeck effektus): különböző fémekben az elektronok mozgékonyága különböző hőmérsékleten eltérő: ez potenciálkülönbséget kelt, amely mérhető.

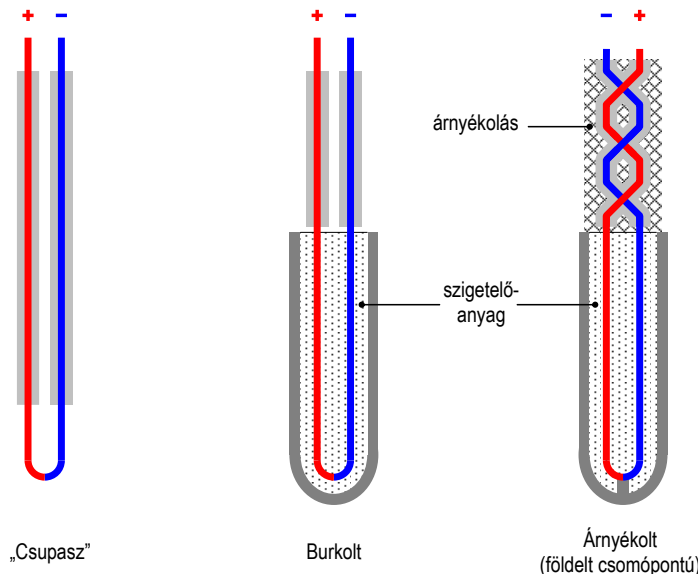


K-jelű termoelem (IEC 584 szerint)

kromel(+) - alumel(-) $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

kromel: nikkel (90%) - króm (10%) ötvözet

alumel: nikkel (95%) - mangán (2%) - alumínium (2%) - szilícium (1%) ötvözet



Hőmérséklet mérés

Termisztorok

Félvezető kerámia anyagokból készült ellenállások:

- NTC - negatív hőmérsékleti tényezőjű ellenállás
- PTC - pozitív hőmérsékleti tényezőjű ellenállás

Általában NTC-t használunk:



$$T = \frac{1}{A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3}$$

(Steinhart-Hart)

A, B, C általában tapasztalati úton nyert konstansok (katalógusadatok)

Hőmérsékletmérés: feszültségmérés

- áramgenerátoros gerjesztéssel vagy feszültségosztóként,
- hídkapcsolásban.

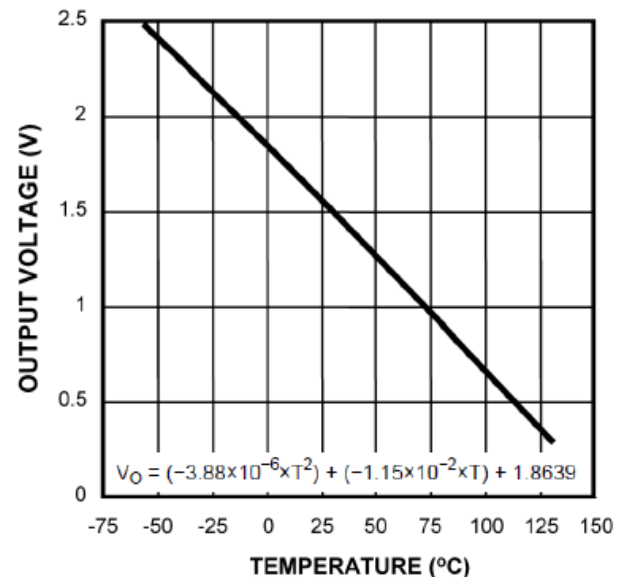
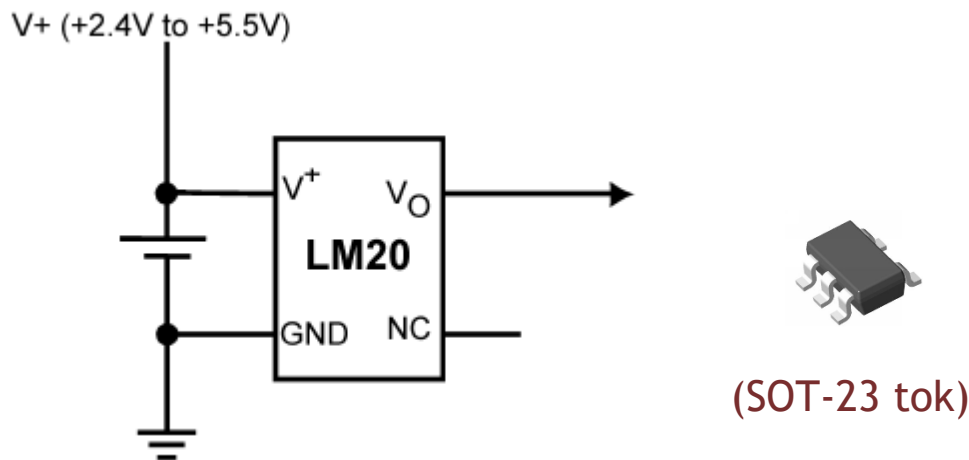


Hőmérséklet mérés

Félvezető hőmérsékletmérő szenzorok, példa: LM20

Si félvezető PN átmenet hőfokfüggését használja ki.

Analóg kimenetű közel lineáris érzékelő: $V_0 = -11.69 \text{ mV}/^\circ\text{C} \cdot T + 1.8663 \text{ V}$



Pontosabb nemlineáris összefüggések:

$$T = -1481.96 + \sqrt{2.1962 \cdot 10^6 + \frac{1.8639 - V_0}{3.88 \cdot 10^{-6}}}$$

$$V_0 = (-3.88 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) + (-1.15 \cdot 10^2 \cdot T) + 1.86399$$



Hely- és helyzetérzékelés

Egy test helye és helyzete egy inerciarendszerben relatív mennyiségek.

Abszolút mennyiségek:

- Gyorsulások - a_x , a_y , a_z
- Szögsebességek - ω_x , ω_y , ω_z

Ezekből pozíció, sebesség és szöghelyzet:

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

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

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

- Határozatlan (kezdeti) paramétereket tartalmaznak
- Meghatározásuk halmozódó hibával lehetséges csak.



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

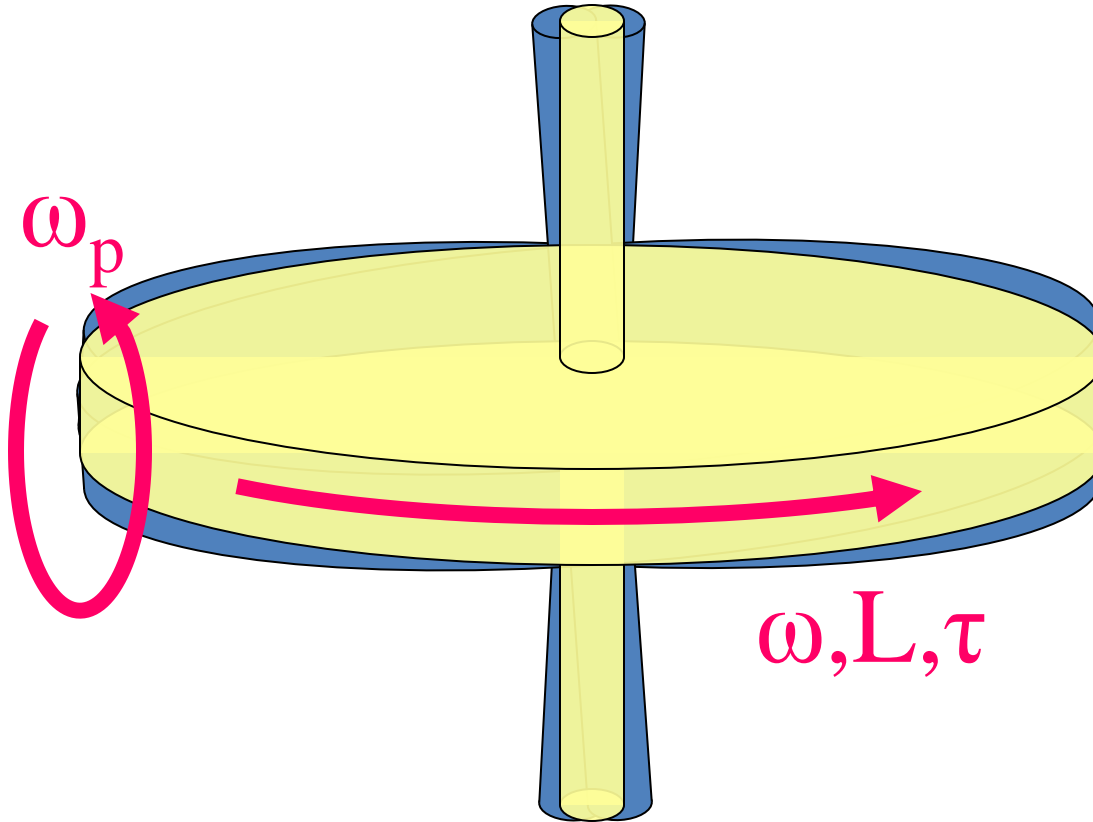
Egy forgásban levő merev test forgás-tengelye stabil egyensúlyi helyzetben van.

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

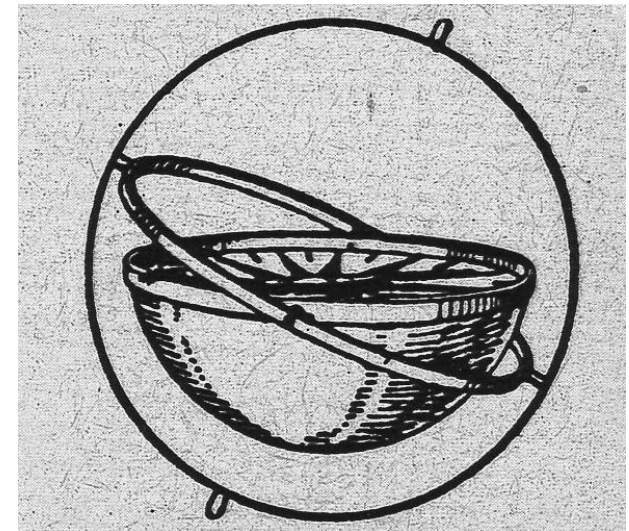
Bizánci Philo (i.e. 280-220) - tintatartó



Ókori lelet Filippiből
(i.e. 350-250) - napóra



(1230 körül)



Gerolamo Cardano
(1501-1576)
kardán-felfüggesztés



Giroszkóp történelem

Léon Foucault
École Polytechnique,
Párizs, 1852

Pierre-Simon Laplace
javaslatára oktatási
segédeszközként
a Föld forgásának
szemléltetésére

A „gyroscope” elnevezés
Foucault-tól származik.



Pörgettyűs iránytű (gyrocompass)

... immár gyakorlati alkalmazásban



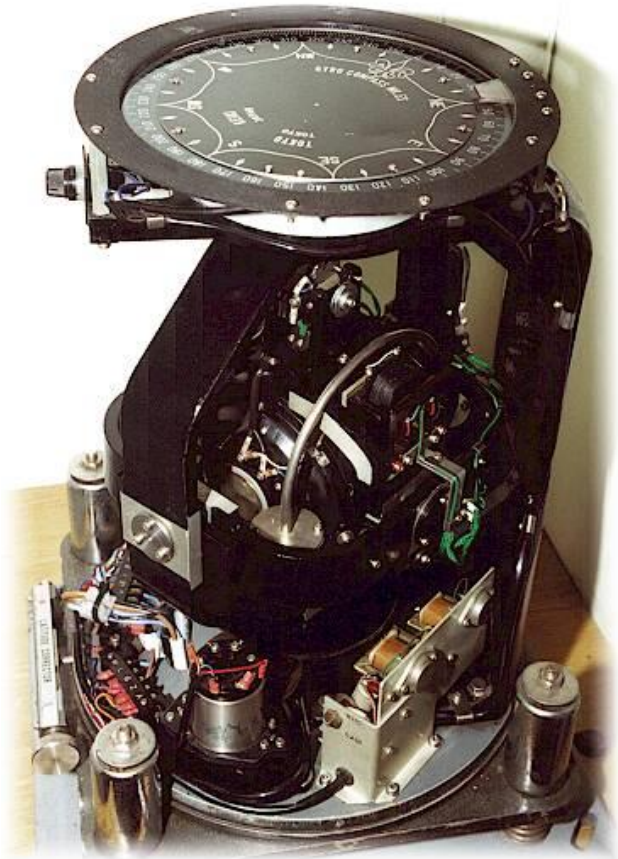
Anschütz-Kaempfe gyrocompass (metszet)

M.G. van den Bos,
Hollandia, 1885

- Motoros meghajtás
- Nagy viszkozitású folyadék csillapítás gyanánt
- Automatikus beállítás az északi irányba (alapelv: a Coriolis erő által keltett nyomaték ilyen helyzetben 0).
- Több szabadalom és elsőbbségi viták fűződik hozzá.
- Iparilag nagy tömegben előállított termék.



Pörgettyűs iránytű (gyrocompass)



Sperry gyrocompass

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



Ma:

- Lézer gyrocompass
- GPS



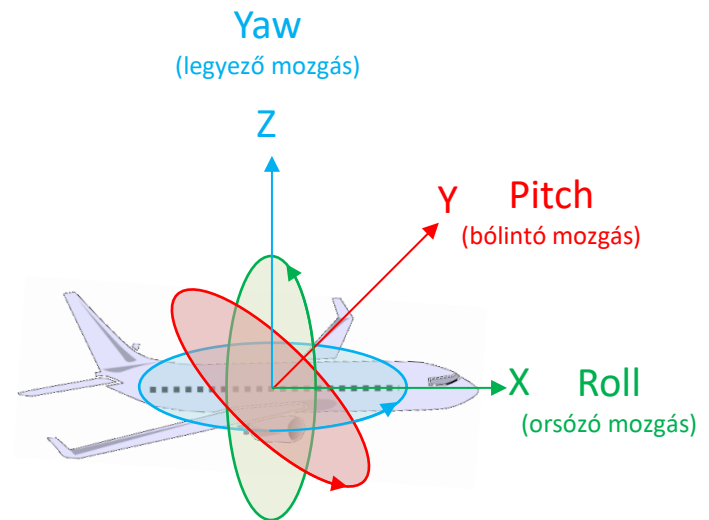
Giroszkópok a repülésben, űrrepülésben

Alkalmazások:

- 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

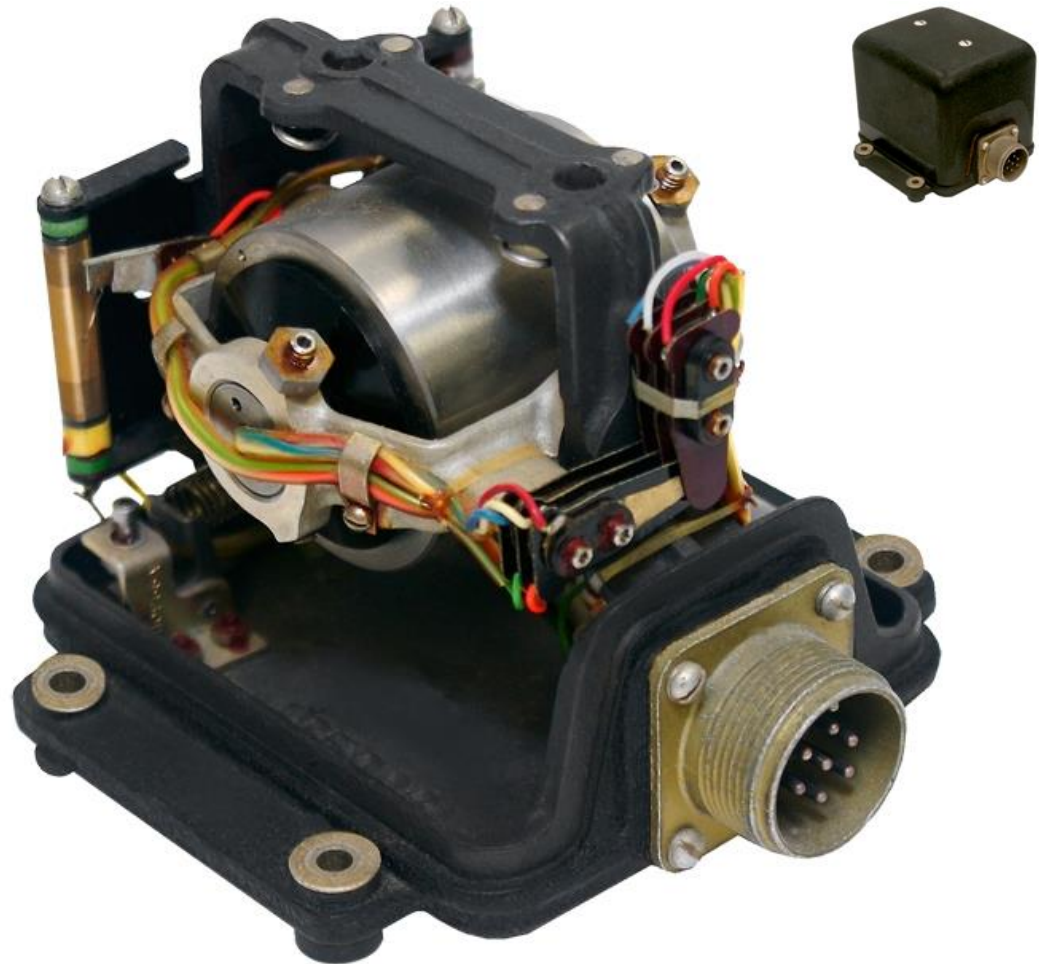
Alkalmazás:

- 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:

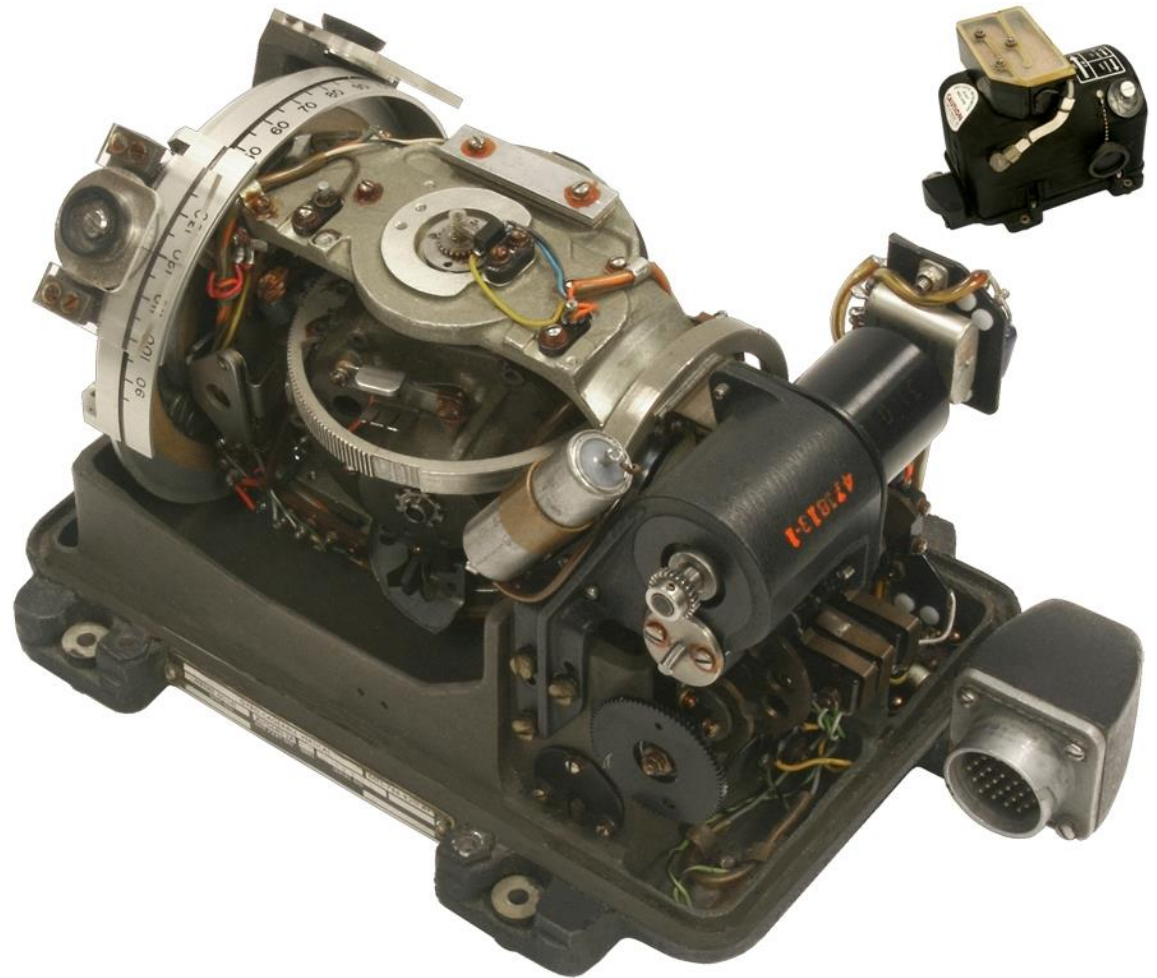
Kétdimenziós
helyzetmeghatározás

Alkalmazás:

- 2D helyzetkijelzés
(műhorizont)
- 2D helyszabályozás

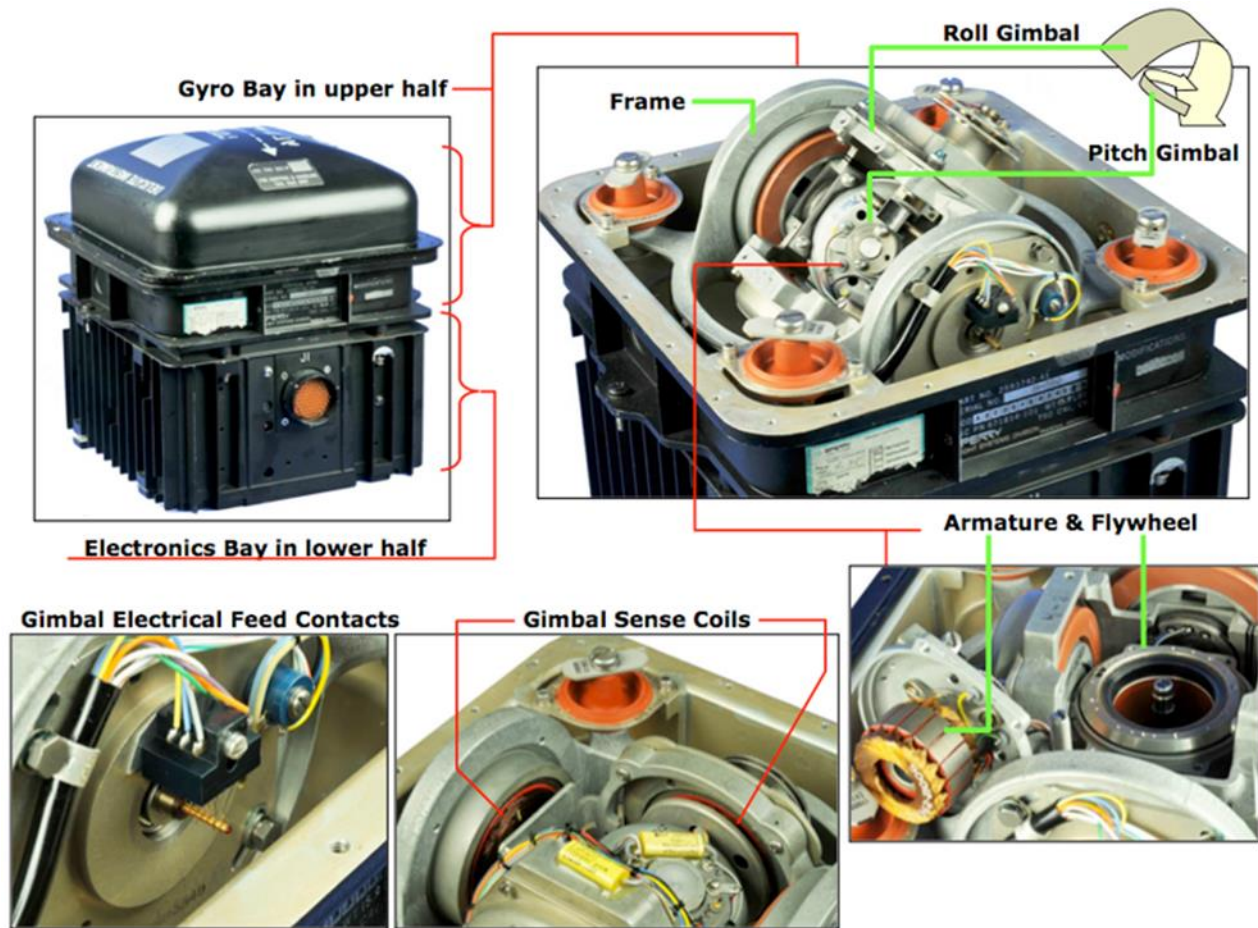
Példa:

Honeywell JG7044N,
1950-es évek



Kéttengelyű pörgettyűs giroszkóp

Boeing 747
Sperry vertikális
giroszkóp
1970-es évek



Háromtengelyű pörgettyűs giroszkóp

Rendeltetés:

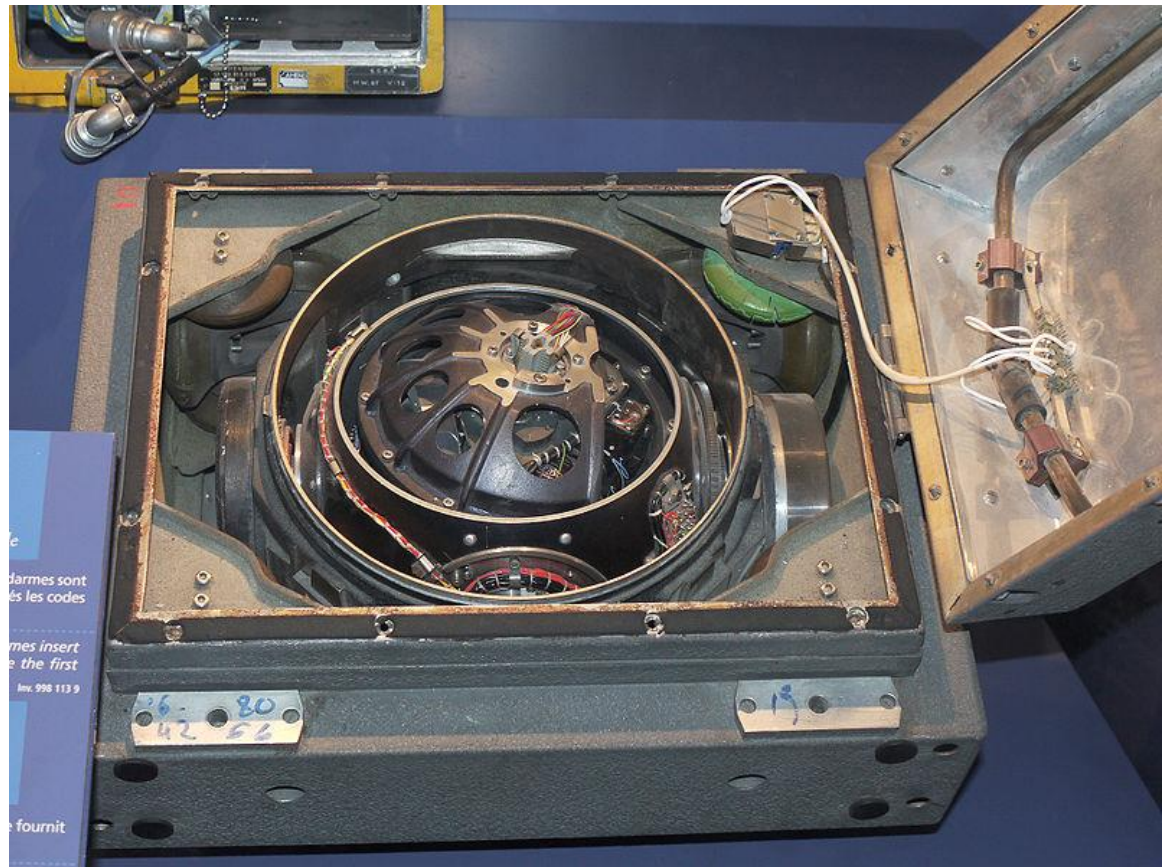
Háromdimenziós
helyzetmeghatározás

Alkalmazás:

- 3D helyszabályozás

Példa:

S3 ballisztikus rakéta
inerciális mérőmodulja,
1966



Háromtengelyű pörgettyűs giroszkóp



... a korai űrkísérletekből (Kennedy Űrközpont)



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?

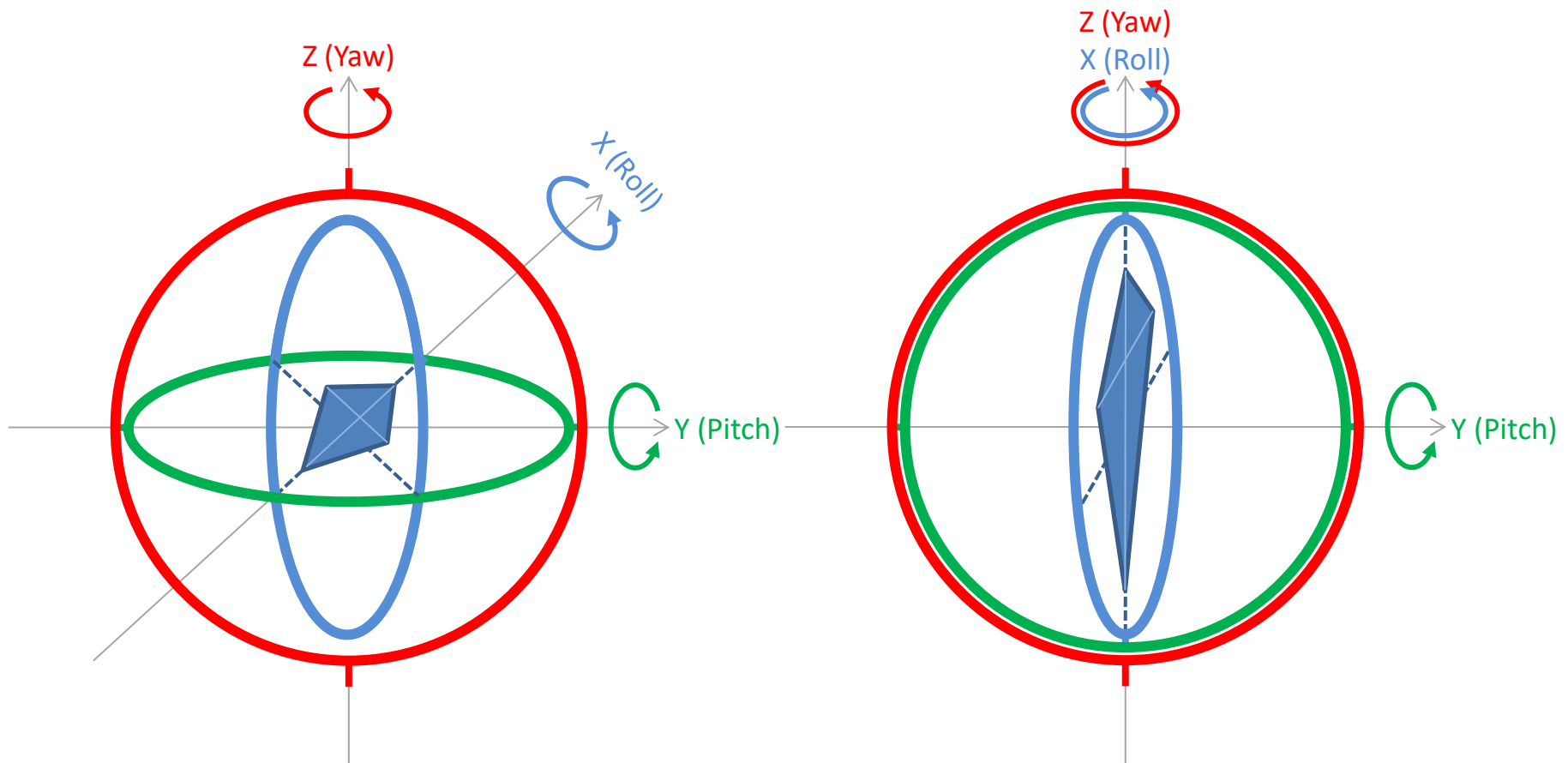
Ha a giroszkóp valamely két forgástengelye egybeesik.

Miért nevezzük „gimbal lock”-nak?

Csak gyűrűs (gimbal) giroszkóppal esik meg.



A „gimbal lock” probléma



Normál állapot.

Az X és a Z forgástengelyek egybeesnek: **gimbal lock** - a „roll” mozgás kontrollálhatatlan.



A „gimbal lock” probléma

Nevezetes eset: az Apollo 11 Hold-expedíciója során majdnem bekövetkezett - 85° -nál a fedélzeti számítógép hibásan beavatkozott, a legénység hárította el a hibát az IMU egység újraindításával.

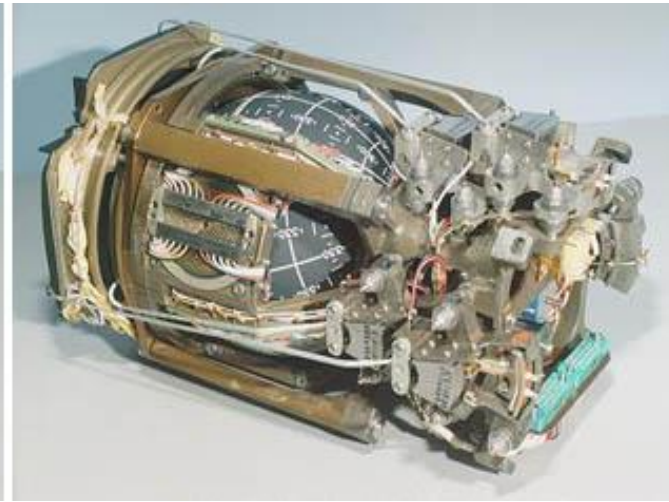
"How about sending me a fourth gimbal for Christmas?" - Mike Collins

A jelenség kiküszöbölése:

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



A nevezetes giroszkóp



FDAI
(Flight Director Attitude
Indicator)



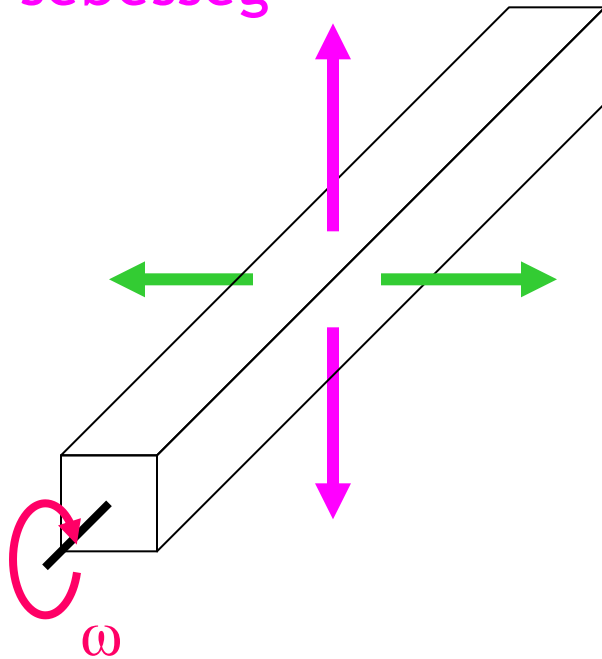
©2000 Bruce M. Yarbro & The Smithsonian Institution



Rezgőelemes giroszkóp

Alapelv: rugalmas rúd

Rákényszerített rezgés
 v_r sebesség



ω szögsebességű forgás esetén

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

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

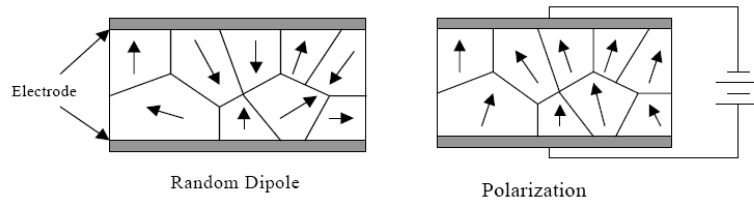


Rezgőelemes giroszkóp

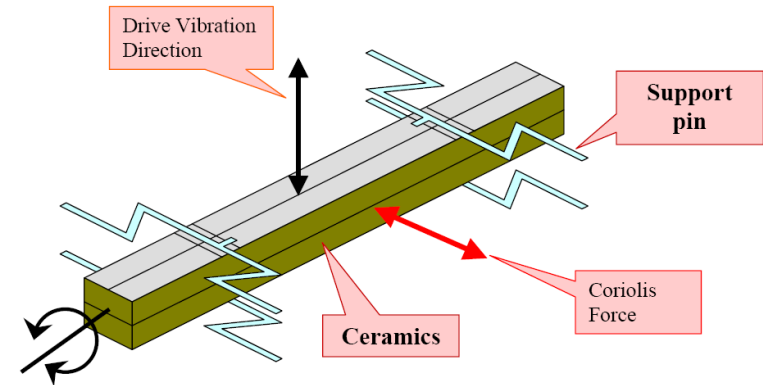
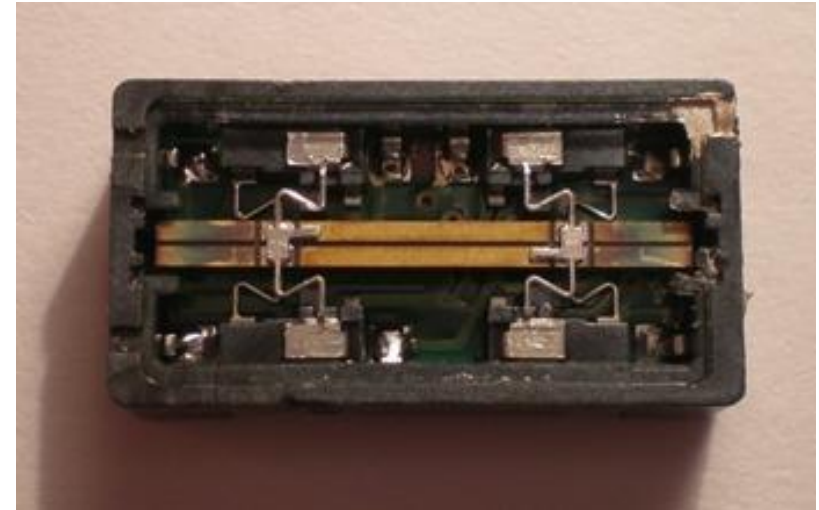
Piezokeramikus kristály

Piezoelektromos hatás:

Deformáció hatására a kristály két ellentétes felületén elektromos feszültség lép fel



Polarizáció: szétválnak az ellentétes töltések.



Ceramics Bimorph vibrator



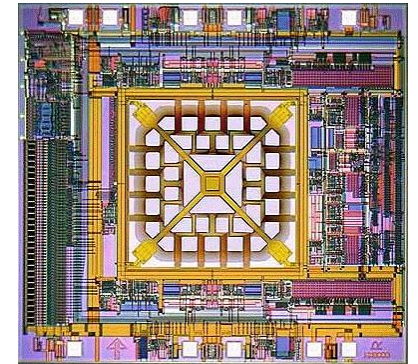
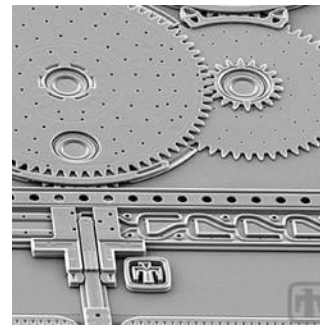
MEMS giroszkóp

MEMS - Micro ElectroMechanical System

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

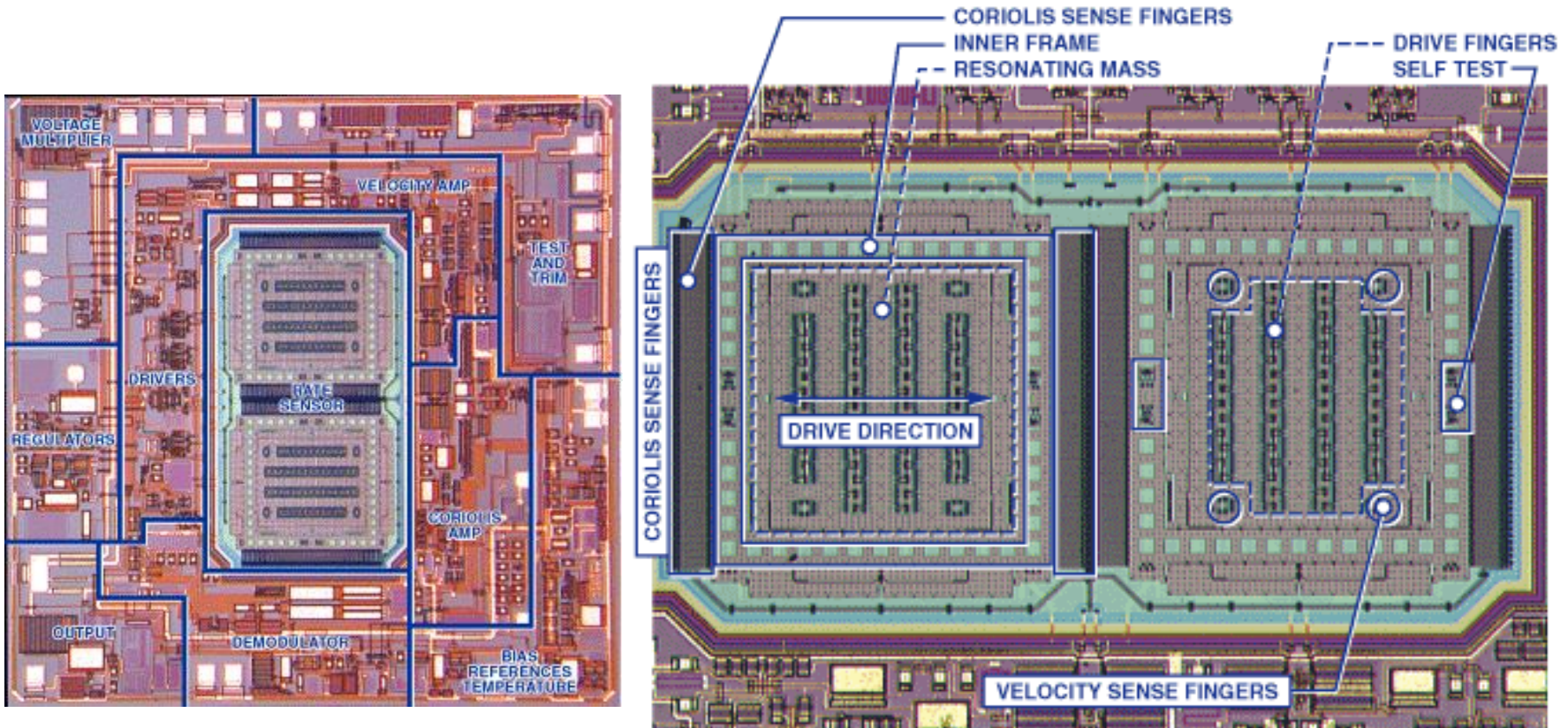
Tipikus MEMS áramkörök:

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



MEMS giroszkóp

A rezgő elem: szilíciumból kialakított rugalmas tartószerkezet.
Elektrosztatikus mozgatás - kapacitív elvű elmozdulás mérés.



MEMS giroszkóp

Előnyök:

- Kis méretek - példa: 4 x 4 x 1 mm
- Környezetállóság, mechanikai stabilitás
- Nagy megbízhatóság, kis meghibásodási ráta
- Kis fogyasztás
- Minden helyzetben működőképes (nincs „gimbal lock”)

Hátrányok:

- Áramköri zaj
- Hőmérsékletfüggés

Jellemző:

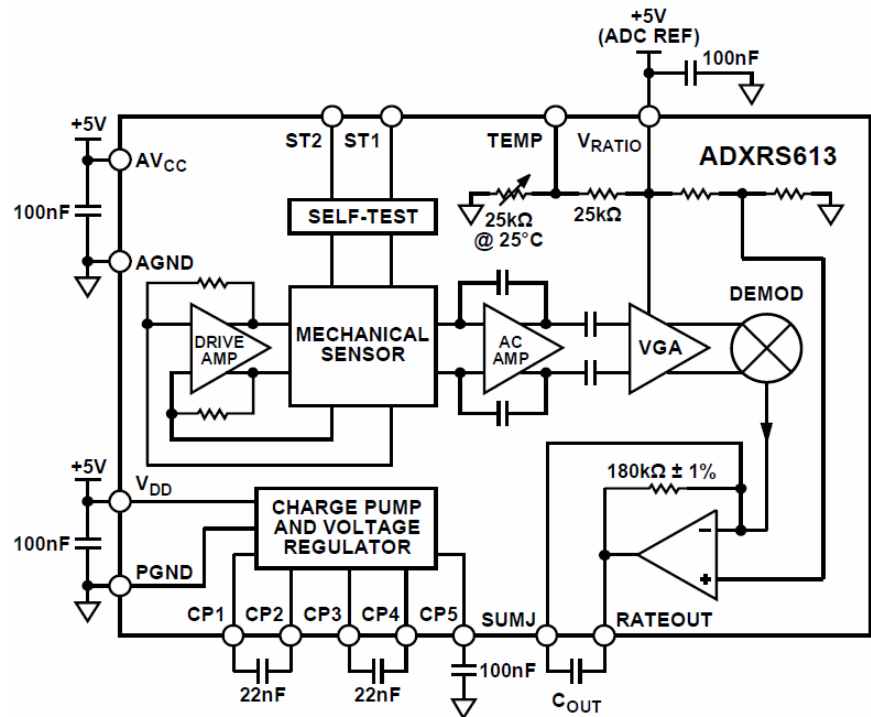
- Szögsebességet érzékel



MEMS giroszkóp

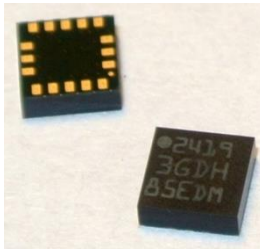
Analog Devices ADXRS-613 - egytengelyű szögsebesség érzékelő

- Méréshatár $\pm 150^\circ/s$
- Érzékenység $12.5\text{mV}/^\circ/s$
- Hőmérsékleti drift 3%
- Zaj $0.04^\circ/s/\sqrt{\text{Hz}}$
- Sávszélesség 3kHz
- $6.85 \times 6.85 \times 3,8 \text{ mm}$

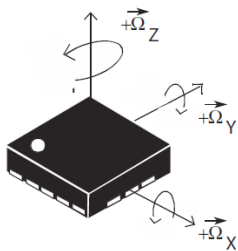


MEMS giroszkóp

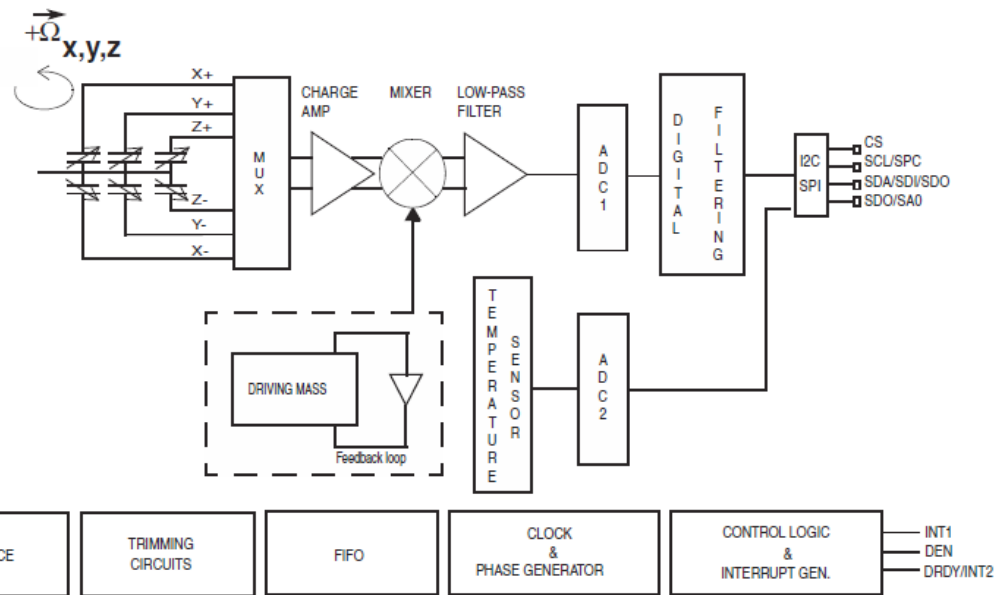
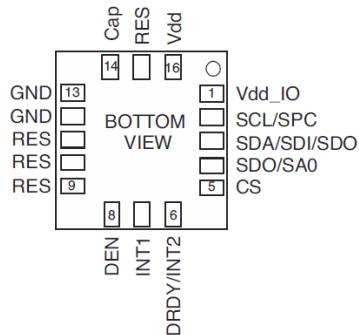
STM L3GD20H 3-tengelyű digitális kimenetű szögsebesség érzékelő



LGA-16 tok 3x3x1 mm



(TOP VIEW)
DIRECTIONS OF THE
DETECTABLE
ANGULAR RATE



- I²C/SPI digitális interfész
- 11.9 - 757.6 Hz adatfrekvencia
- ±245/500/2000 °/s mérés határ
- Hőmérsékleti drift ±2%
- Zaj 0.011 °/s/√Hz
- Linearitási hiba 0.2%

Lézer giroszkóp

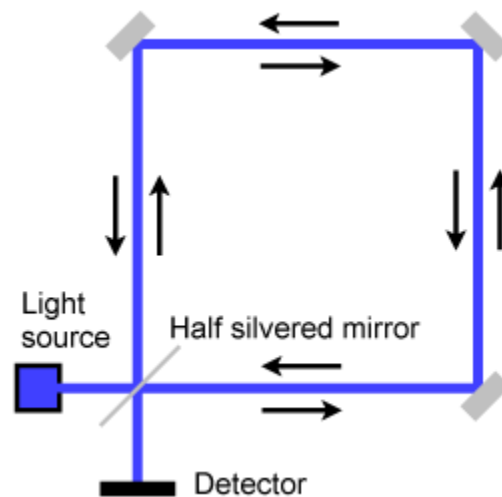
Fizikai alapja:

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.

Lehetséges mérési módszer: az interferenciacsíkokban előálló eltérések detektálása - kamera szenzor alkalmazásával.



Sagnac interferométer



Lézer giroszkóp

Típusok:

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

Előnyök:

- Nagy pontosság és érzékenység
- Nagyon kis zaj

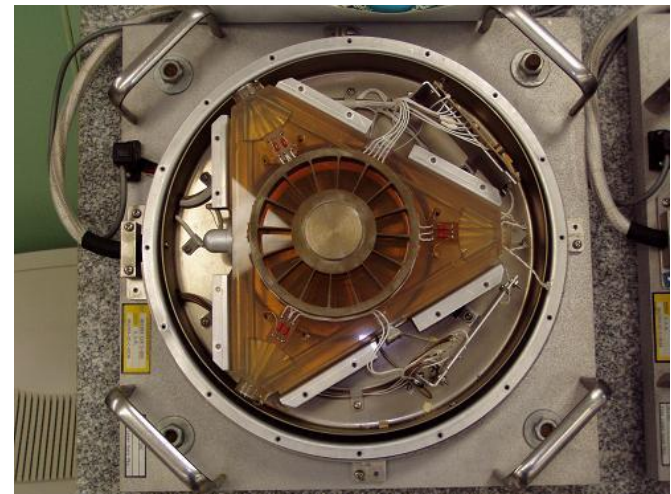
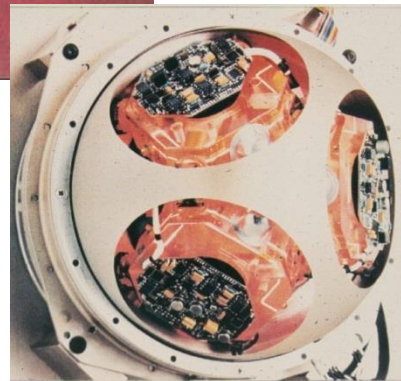
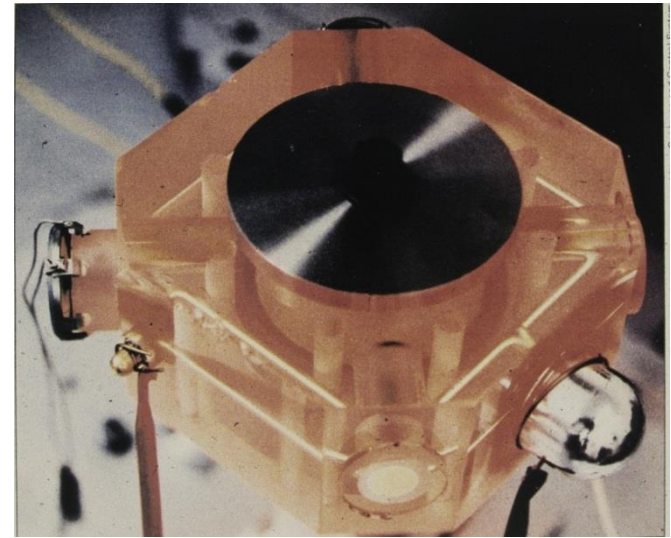
Hátrányok:

- Költséges megoldás



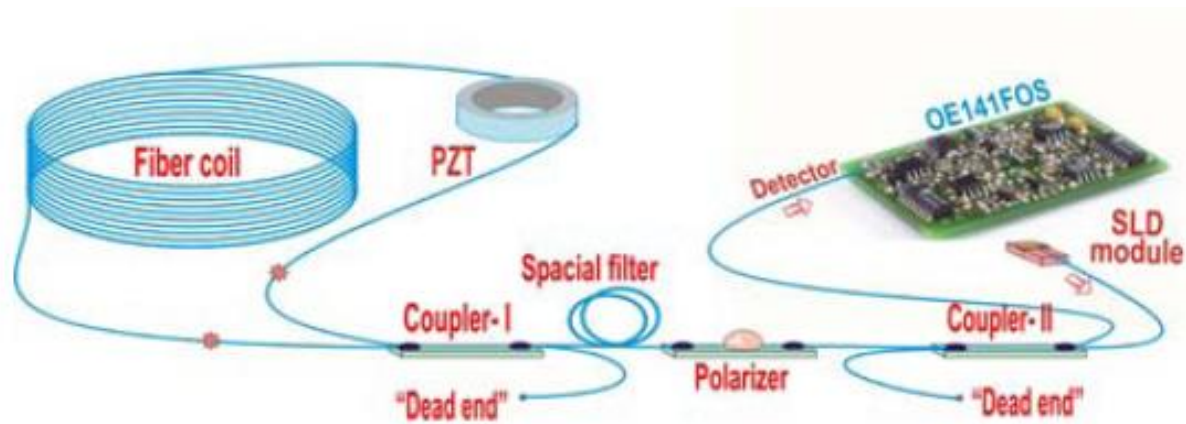
Lézer giroszkóp

- Ring Laser Gyroscope (RLG)



Lézer giroszkóp

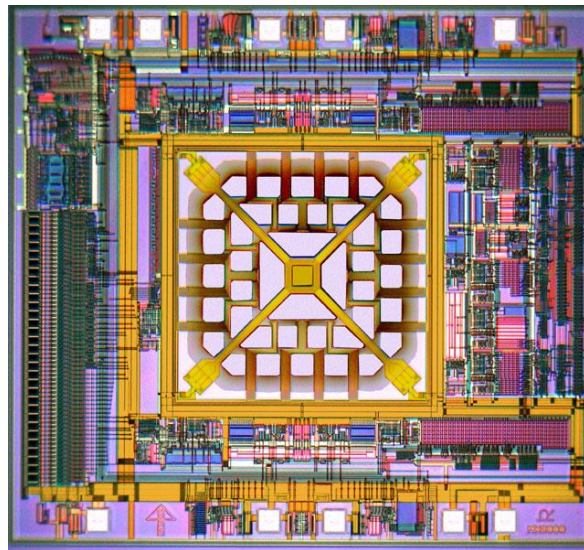
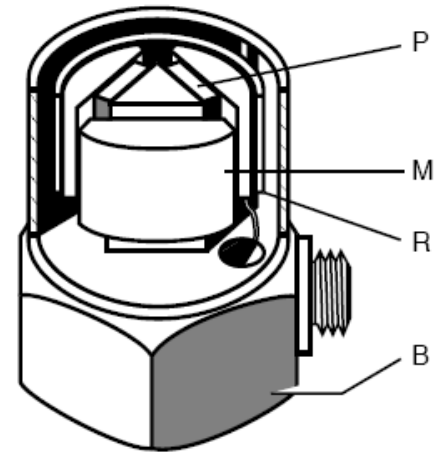
- Fiber Optic Gyroscope (FOG)



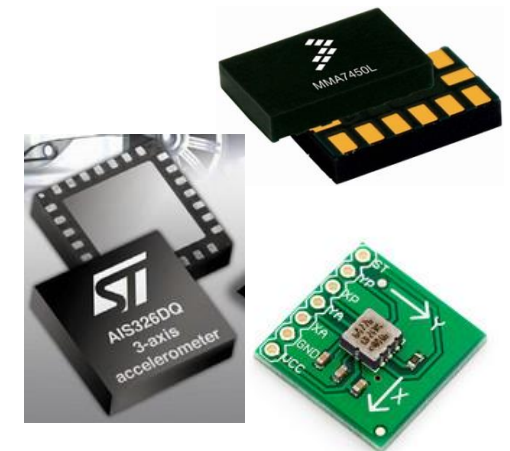
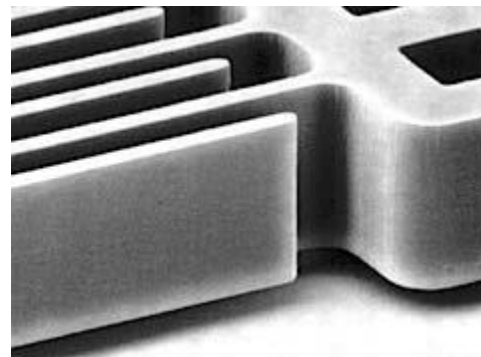
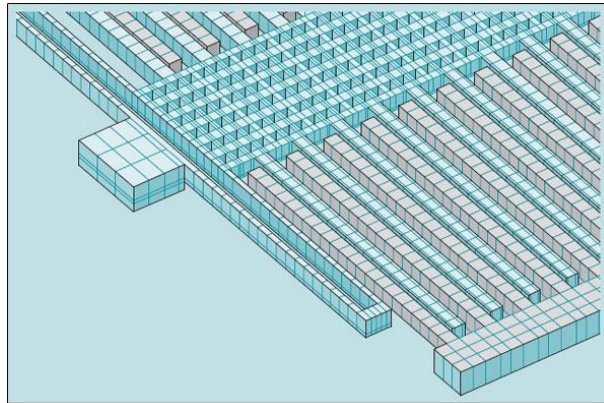
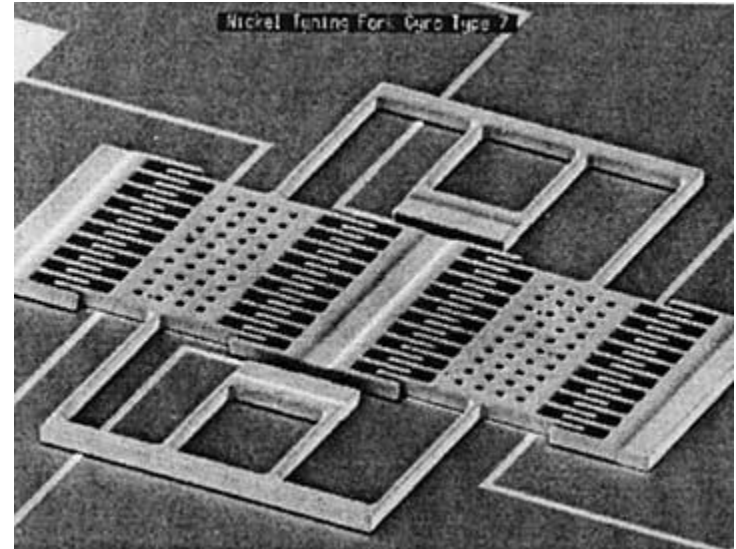
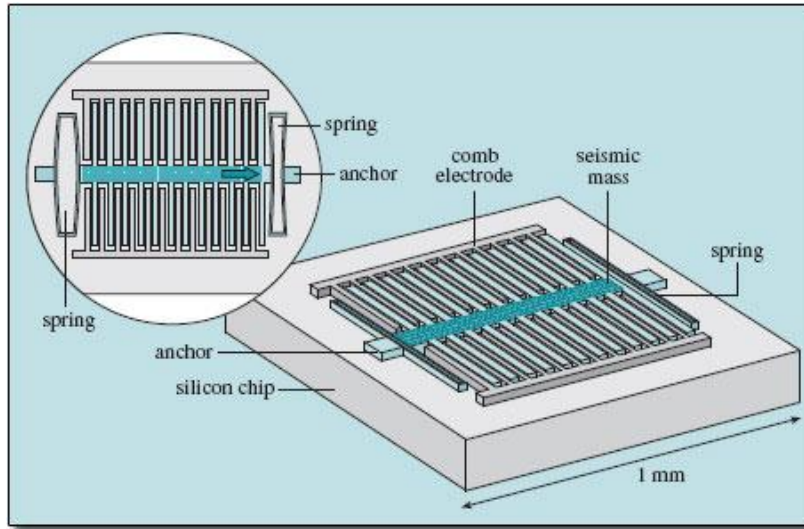
Gyorsulás érzékelők

Fizikai elv: rugó - tömeg együttes

- Piezokeramikus
Érzékelés piezoelektromos elven
- MEMS
Érzékelés elve
 - Kapacitív
 - Termikus



MEMS gyorsulás érzékelők



MEMS gyorsulás érzékelők

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:

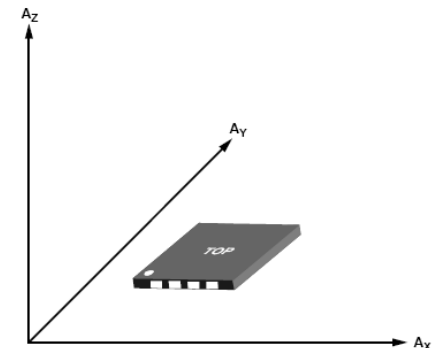
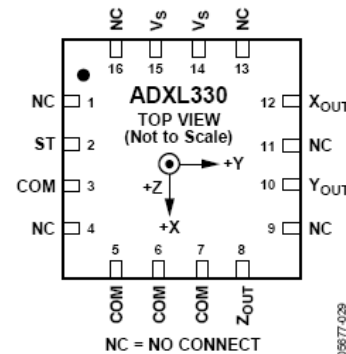
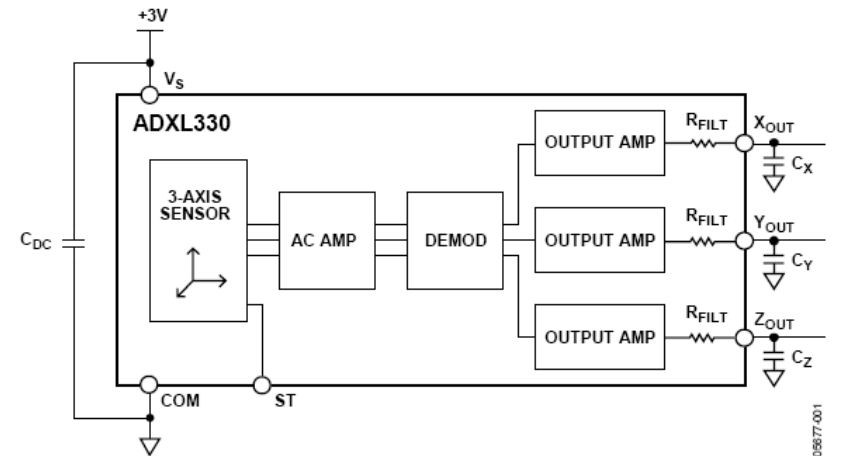
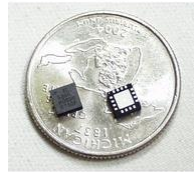
- Gyorsulást érzékel:
pozíció 2 integrálással



MEMS gyorsulás érzékelők

Analog Devices ADXL-330 - háromtengelyű gyorsulásérzékelő

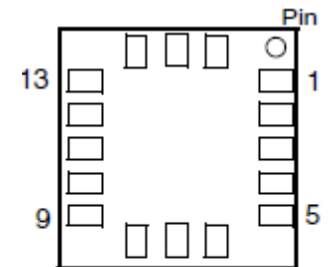
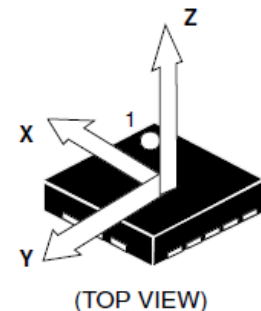
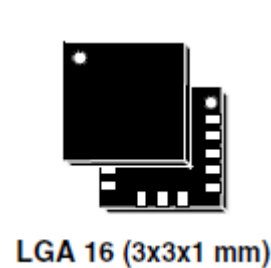
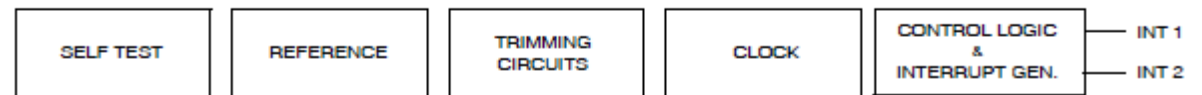
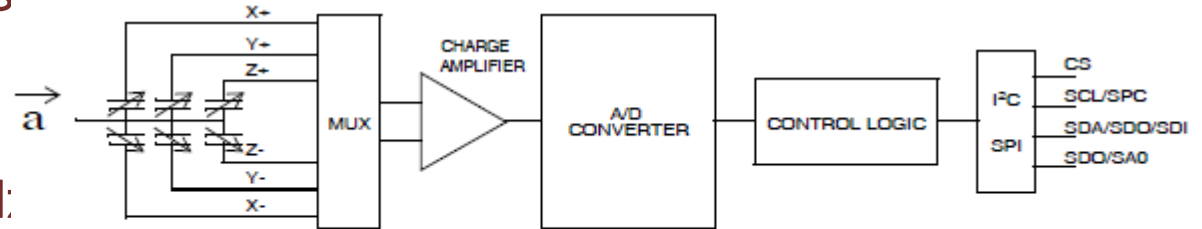
- Méréshatár $\pm 3g$
- Érzékenység $300mV/g$
- Linearitás $\pm 0.3\%$
- Hőmérsékleti drift $1mg/^\circ C$
- Zaj $300 \mu g/\sqrt{Hz}$
- Sávszélesség $1.6kHz$
- Méret $4 \times 4 \times 1.45 \text{ mm}$
- Ár $< 10\text{\$}$



MEMS gyorsulás érzékelők

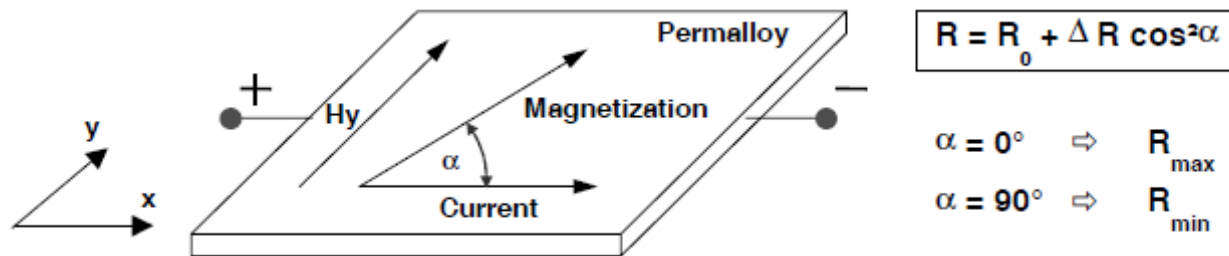
STM LIS331 háromtengelyű digitális kimenetű gyorsulás érzékelő

- Méréshatár $\pm 2/4/8g$
- I²C/SPI digitális interfész (12 bit)
- 50/100/400/1000 Hz data rate
- Érzékenység 1-3.9 mg/LSB
- Hőmérsékleti drift 0.01%/°C
- Zaj 218 $\mu g/\sqrt{Hz}$
- Méret 3 x 3 x 1 mm



Mágneses iránytű

Mágneses térérzékelő

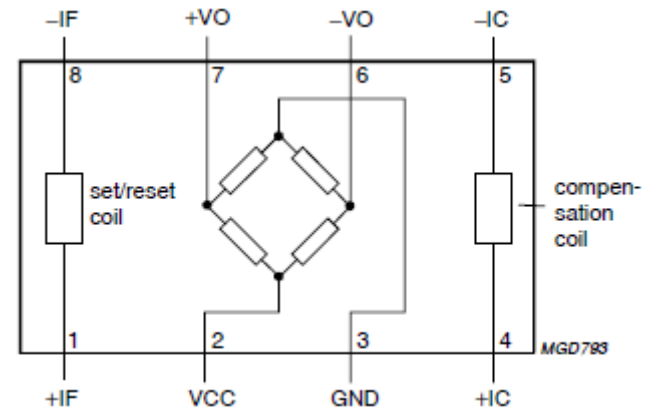


Magnetorezisztív hatás:

A mágneses tér megváltoztatja a permalloy anyag (egy vasötvözet) ellenállását.

Hall effektus:

A mágneses térben az áramló elektronokra Lorentz erő hat, ez potenciálkülönbséget kelt.

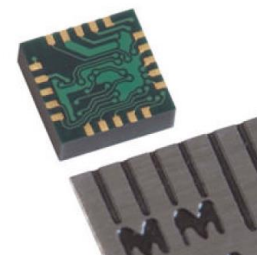
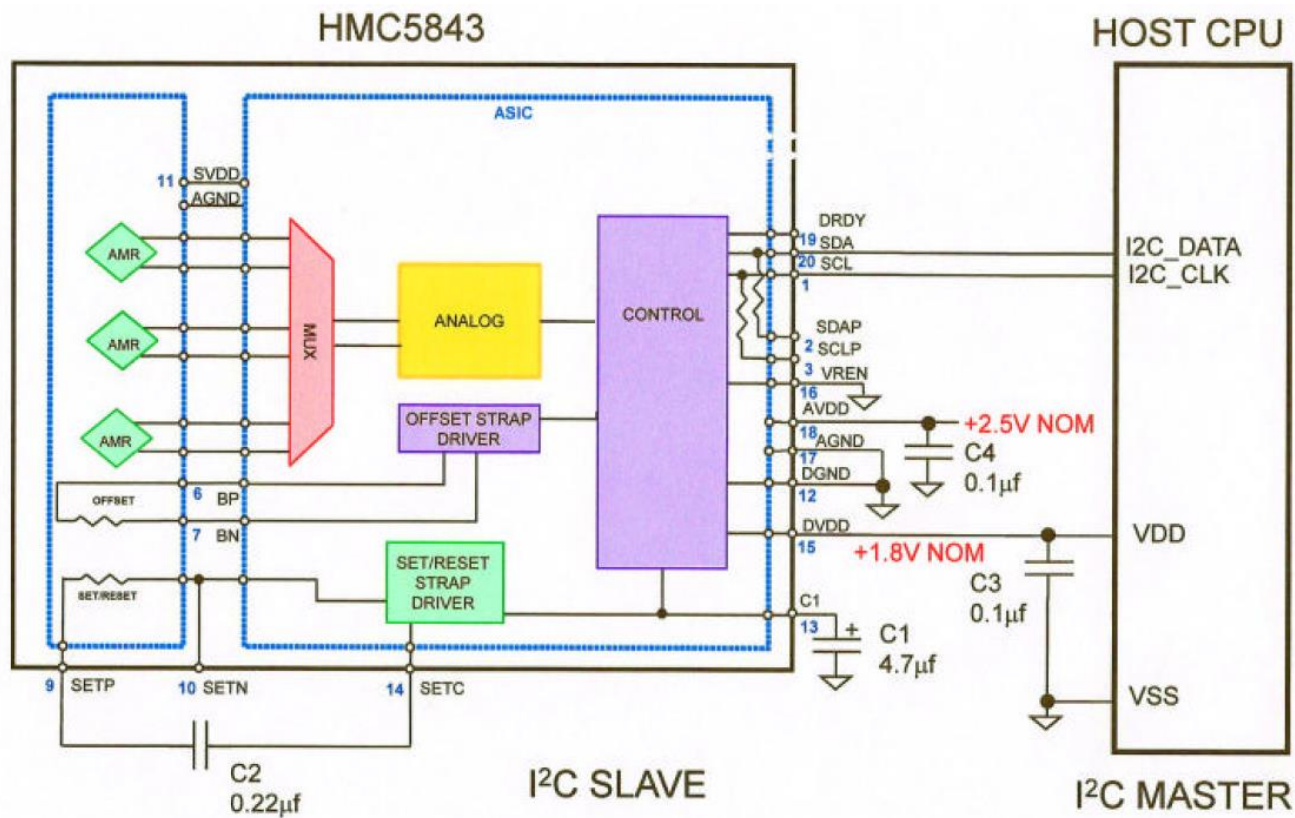


Mérés: Wheatstone-híd.



Mágneses iránytű

Honeywell 3-irányú digitális iránytű HMC5843



4 x 4 x 1.3 mm tok

Digitális interfész

Automatikus
lemágnesezés



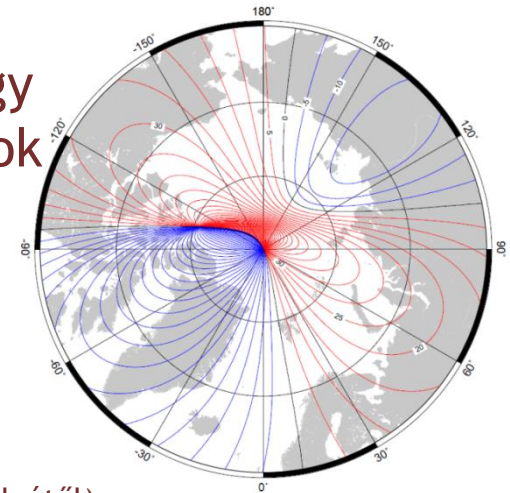
Mágneses iránytű

Problémák:

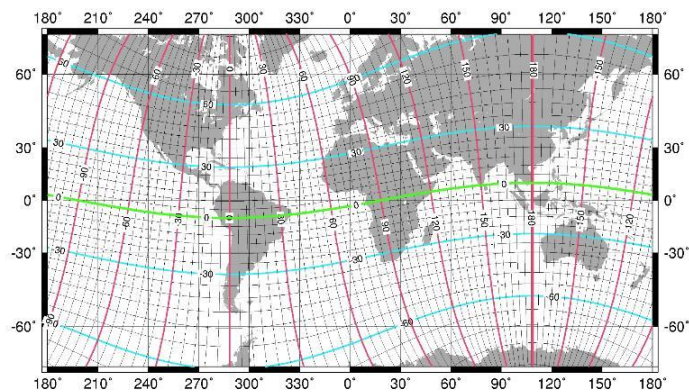
- Zavaró mágneses hatások a környezetben - nagy tömegű ferromágneses tárgyak, villamos áramok
- Deklináció - inklináció
- Korrekció lehetősége: deklinációs térképek, adatbázisok, programok - kalibráció

Deklináció: helyi eltérések a mágneses tér elméleti alakjától.

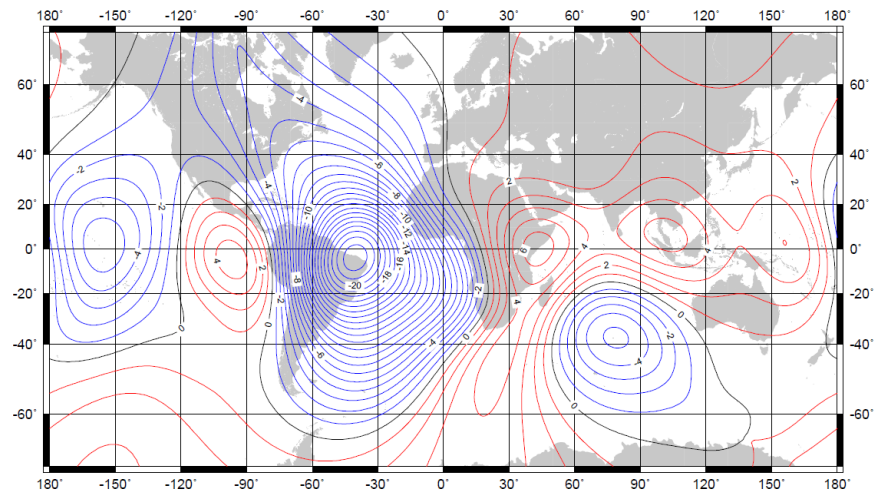
Inklináció: a mágneses É pólus eltérése a geográfiai É iránytól (a Föld forgástengelyétől).



US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000
Geomagnetic Coordinates



Units (Declination) : degrees
Contour Interval : 5 degrees
Map Projection : Mercator



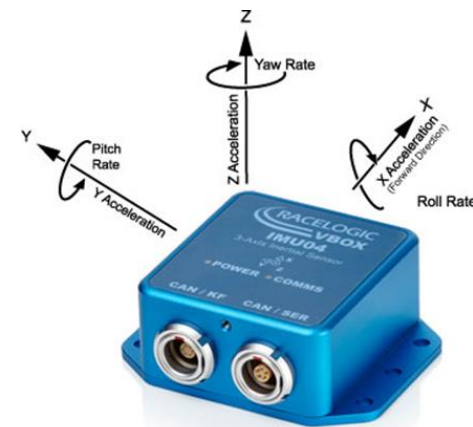
Inerciális Mérőegységek (IMU)

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)

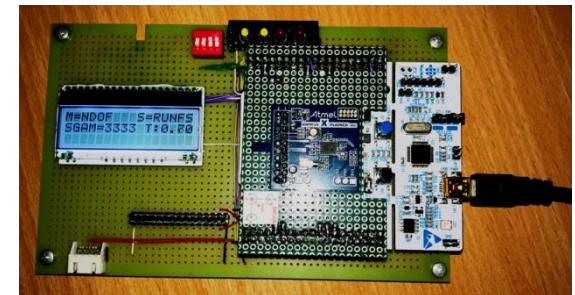
Bosch Sensortec BNO055 Inerciális szenzor

Egy szilícium lapkán:

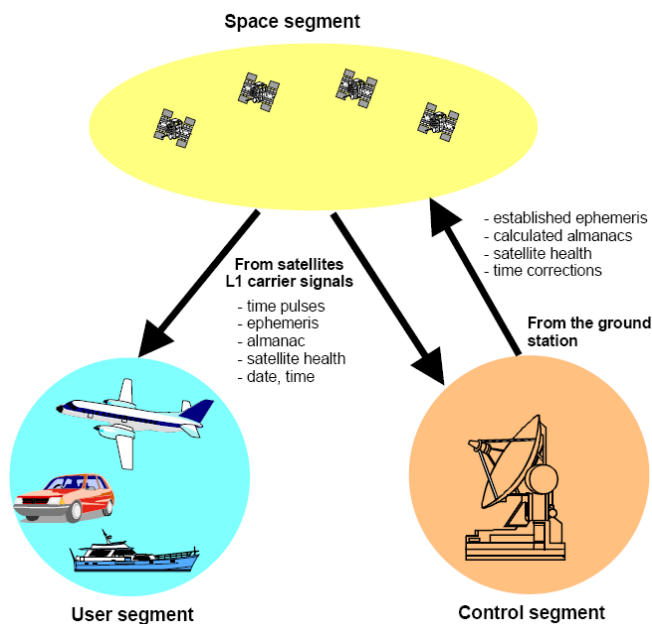
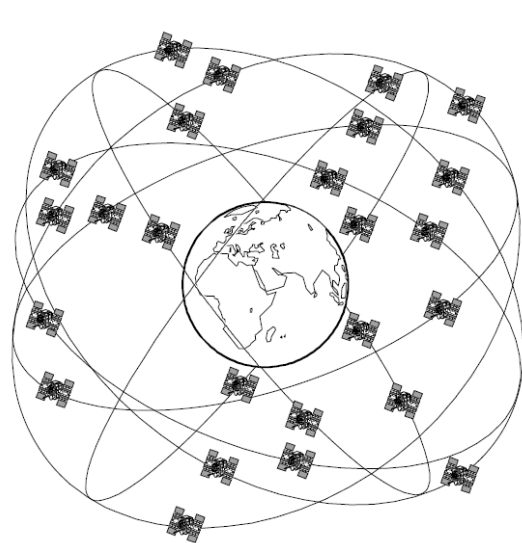
- 3-irányú 14-bites digitális kimenetű gyorsulásérzékelő
- 3-tengelyű 16-bites digitális kimenetű gyorsulásérzékelő
- 3-irányú földmágnesség érzékelő
- 32-bites ARM Cortex M0+ mikrovezérlő Bosch Sensortec szenzorfüziós szoftverrel.

Kiegészítések:

- Host mikrovezérlő - magas szintű digitális feldolgozás, GPS fúzió, Kálmán-szűrő
- Kommunikáció - CAN / USB / Ethernet



Globális pozícionáló rendszer- GNSS



- GPS (USA)
- GLONASS (RU)
- Galileo (EU)
- BeiDou (China)
- IRNSS (India)

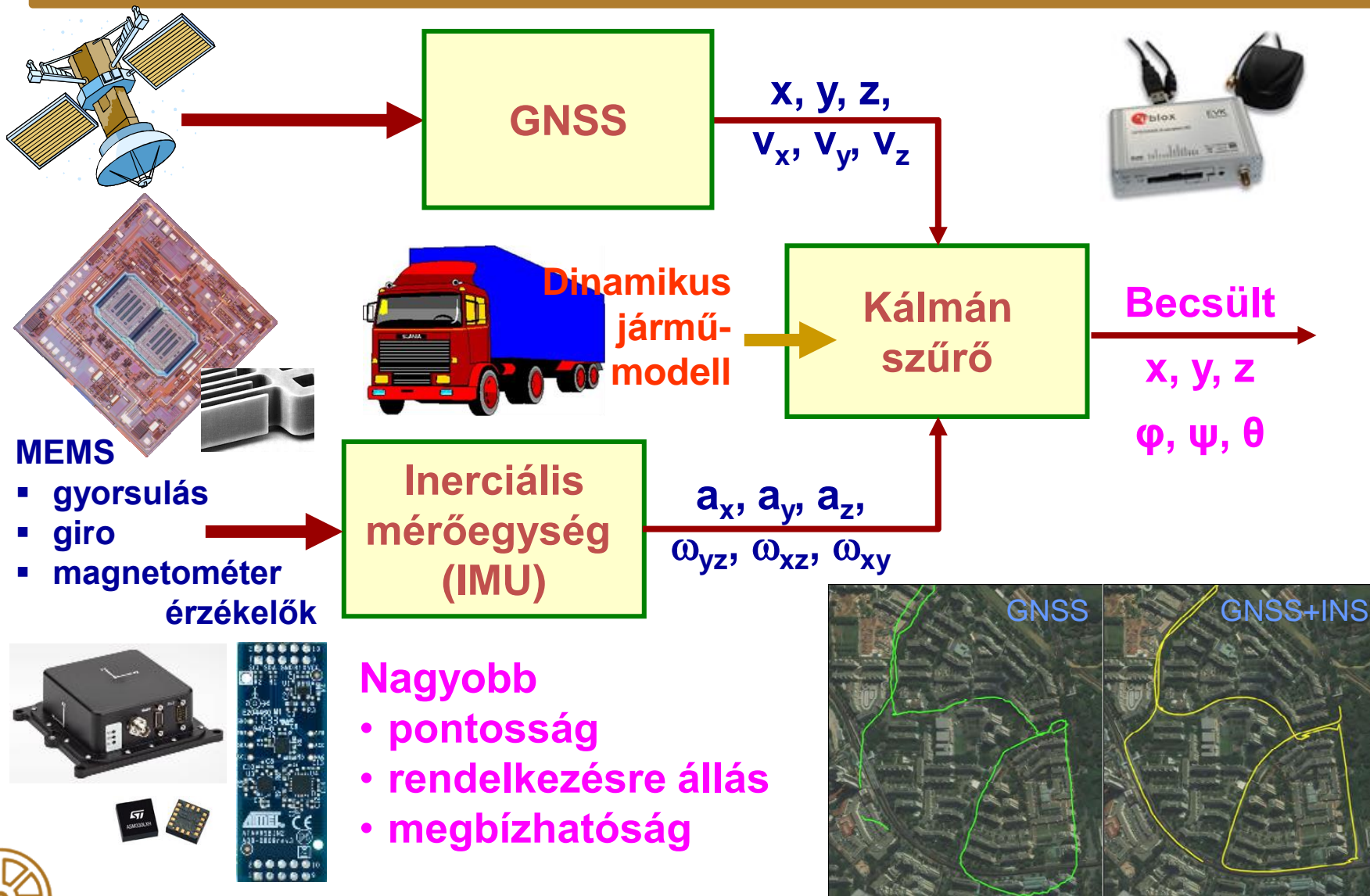


Problémák:

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



GNSS-INS pozicionáló rendszer



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Dr. Soumelidis Alexandros



email: soumelidis@sztaki.hu



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG