

Gulyás Péter

Hardware-in-the-loop tesztkörnyezet
kialakítása inerciamérő MEMS szenzor
validációra

Széchenyi István Egyetem

Villamosmérnöki MSc – Automatizálási Szakirány

2018/19

Konzulens: Dr. Ballagi Áron, tanszékvezető

Győr, 2019

Absztrakt

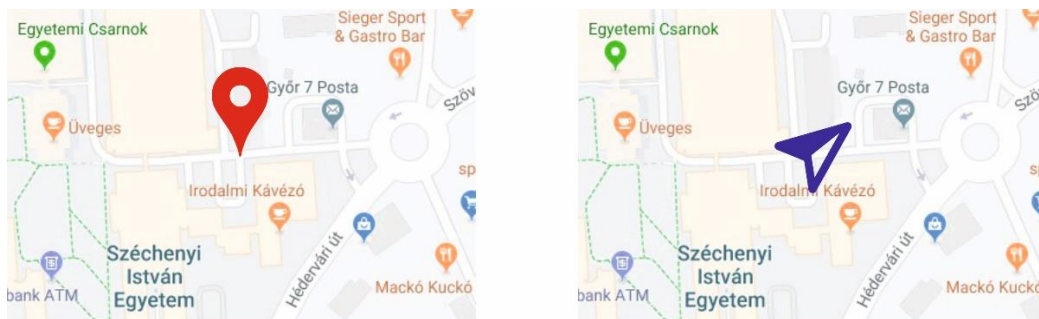
A pozíció meghatározás és navigáció szerepe kulcsfontosságú a jövő önvezető autóinak világában. Az egyetemen működő SZEnergy Team olyan energiahatékony versenyautót fejleszt, ami képes lesz önvezetéshez közeli funkciók megvalósítására, amelyben alapvető szerepet kap a navigáció. A helymeghatározás manapság általában GNSS alapon működik, de ennek komoly határai vannak, ha nincs jó rálátás a műholdakra. Fontos kiemelni az önvezető járművek mögötti azon elképzelést, miszerint ideális esetben, a helyes működéshez nem szükséges semmilyen külső kommunikációból származó információ, azaz infrastruktúra független a navigáció. Ekkor a pozíció meghatározásban segítségünkre lehet egy olcsó és kis méretű inerciamérő is, ha annak jelfeldolgozását képesek vagyunk elég gyorsan megvalósítani és jól tudjuk szűrni. Manapság ezek az egységek már MEMS néven is emlegethetők a gyártási folyamatra utalva, ami lehetővé teszi a nagyszámú és gyors előállítását. Ezeket a szenzorokat nem kifejezetten az autóipar számára készítik, habár gyakran alkalmazzák őket részfeladatokhoz, hanem a teljes elektronikai fejlesztő piacra, így a használhatóságuk további tesztelést igényel. A MEMS szenzorok validációjában gyakran csak olyan tesztesetek vannak meghatározva, melyek a piaci igényeket általánosan lefedik. Esetemben olyan validációs módszer fejlesztése a cél, amely képes a közúti közlekedéshez szükséges pontosság validálására, valamint lehetőséget nyújt a mögöttes jelfeldolgozás fejlesztésére is. Ennek okán a dolgozat során felállításra kerül egy olyan validációs rendszer, mely rendelkezik a közlekedési manővereknek megfelelő tesztesetekkel és kiértékelési rendszerrel. A dinamikus teszteket ABB ipari robotkar segítségével fogom megvalósítani, melynek útvonala programozható és könnyen ismételhető. A robotirányítást, a jelfeldolgozást és a szenzor kiértékelését is az ROS keretrendszeren keresztül fogom megvalósítani, ezzel biztosítva a be- és kimenetek egyszerű követhetőségét és összehasonlíthatóságát.

Tartalom

1. Pozíció és helymeghatározás napjainkban	- 1 -
1.1. GPS/GNSS.....	- 2 -
1.2. GNSS mérések és probléma feltárás.....	- 4 -
2. Inerciális MEMS szenzorok bemutatása	- 5 -
2.1.1. Általános felépítés	- 6 -
2.1.2. Gyorsulásmérő.....	- 7 -
2.1.3. Giroszkóp	- 7 -
2.1.4. Magnetométer	- 8 -
2.1.5. Kvaterniók	- 9 -
2.1.6. Navigáció MEMS szenzorokkal	- 10 -
2.2. Tesztkörnyezetek – validálás az iparban.....	- 11 -
3. MEMS szenzorok alkalmazásának követelményei	- 13 -
3.1. Real-Time jelfeldolgozás	- 13 -
3.2. Adatok szűrése	- 14 -
4. Fejlesztés alatt álló tesztkörnyezet	- 2 -
4.1. Hardware-in-the-loop szűrő optimalizálás.....	- 2 -
4.2. Ipari robotirányítás ROS környezetből	- 4 -
4.2.1. Az ROS bemutatása.....	- 4 -
4.2.2. ABB Robot irányítás ROS-ben.....	- 6 -
4.3. Validációs robotpálya felépítése	- 6 -
4.3.1. TESZT-1.....	- 6 -
4.3.2. TESZT-2.....	- 7 -
4.3.3. TESZT-3.....	- 7 -
4.3.4. TESZT-4.....	- 8 -
4.4. Specifikus, szenzorhoz illeszthető szűrő tervezés.....	- 9 -
5. Összefoglalás	- 10 -
6. További fejlesztési irányok	- 10 -
7. Irodalomjegyzék.....	- 11 -
8. Ábrajegyzék	- 13 -

1. Pozíció és helymeghatározás napjainkban

A probléma mentes közlekedéshez, minden sofőrnek vagy gyalogosnak tudnia kell azt, hogy éppen merre haladjon tovább. Nem az utolsó pillanatban hoz döntést arról, hogy jobbra vagy balra megy, hanem előre elkészít valamilyen optimális útvonalat, amit a közlekedés közben dinamikusan változtat, ha szükséges. Ehhez az útvonaltervezéshez, szükséges a helymeghatározás, valamint a pozíció meghatározás. A hely- és pozíció meghatározás között, viszont szignifikáns különbség áll fenn, hiszen míg a helymeghatározás során csak egy pontot kapunk a térképen, addig a pozíció meghatározás után tudjuk, az irányultságot is, köznapi nyelven fogalmazva, tudjuk azt, hogy merre nézünk. A két módszer közti különbséget az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A helymeghatározás és a pozíció meghatározás közti különbség szemléltetése.

Akár a fejlesztés alatt álló „önvezető” járművek, akár a már navigációs eszközökkel ellátott modern járművek valamilyen műholdas kapcsolattal rendelkeznek, és ennek segítségével válaszolják meg a közlekedés alapvető kérdését, hogy „Merre tovább?”. Ennek megválaszolásához viszont tudniuk kell azt, hogy éppen akkor, hol vannak és ebben ad nekik segítséget a hétköznapiakban csak GPS¹-nek nevezett eszköz, mely nagyfrekvenciás jelekkel kommunikál a műholdakkal.[1] Szakmai oldalról megvilágítva ezt a kifejezést már pontosítani kell a szóhasználatot, mert a GPS rövidítés még az 1973-ban lefektetett amerikai rendszere utal, melyben 24 műhold kering 20180 km-es magasságban a Föld körül, amivel nyílt terepen 4,7m-es pontosságot tud szolgáltatni a rendszer. A mai közlekedési és infrastrukturális környezetben általánosan elmondható, hogy GNSS² rendszert használunk melyben több ország kooperációjának köszönhetően, a civil szféra számára bárhol elérhető a világon.[2]

¹ Global Positioning System – Globális Helymeghatározó Rendszer

² Global Navigation Satellite System – Globális Navigációs Szatellit Rendszer

1.1. GPS/GNSS

A mesterséges holdakként, vagy műholdakként is nevezett szatellitok az első időkben a katonai célú helymeghatározást szolgálták, de kisebb megszorításokkal a kezdetektől rendelkezésre állt a polgári szféra számára is. Elsőként a geodéták használták a Föld alakjának és egyes kiemelt fontosságú pontoknak a felmérésére, majd a kamionos fuvarozó cégek vezették be, hogy nyomon követhessék járműveiket, amik nagy értékű szállítmányokat kézbesítettek. 1994 volt az első év, hogy prémium kategóriás autógyártók feláras extraként szolgáltatták a jármű nyomkövetést a vásárlók számára. Az egyik első irodalmi utalás a GPS-ről egy katonai regényben volt megtalálható, mely egy Bosznia felett lelőtt F-16 vadászpilóta pilótájának történetébe kapcsolódik be, akinek sikeres kimentéséről nagyrészt a GPS-es helymeghatározó készülék gondoskodott.[3] A megnevezett globális rendszerben a nemzetközi összefogásnak köszönhetően jelenleg több mint száz szatellit kering együtt az 1. táblázatban leírt információk szerint, ezzel biztosítva a teljes lefedettséget és a rendszer elérhetőségét 95% - 99,9%-ban.

1. táblázat: GNSS rendszerben működő szatellit hálózatok összehasonlítása.

Tulajdonos	Rendszer neve	Szatellitok száma (db)	Keringési magasság (km)	Állapot
Amerika	GPS	33	20180	Globális Üzemben
Oroszország	GLONASS	27	19100	Globális Üzemben
Kína	BeiDou	42	21150	Globális Üzemben
Európa	GALILEO	26	23222	Tesztüzemben 2020-ig
India	IRNSS	8	36000	Regionális Üzemben
Japán	QZSS	4	32600	Regionális Üzemben

Ez a bonyolult rendszer és a műholdas navigáció több hibalehetőséget is hordoz, azonban a legfontosabb a rálátás hiánya. Ha nincs megfelelő nyílt rálátásunk a műholdakra, azaz zárt térben vagy vasbeton szerkezettel árnyékolt területen vagyunk, akkor nagyfrekvenciás jelek hiányában nincs pontos helymeghatározás

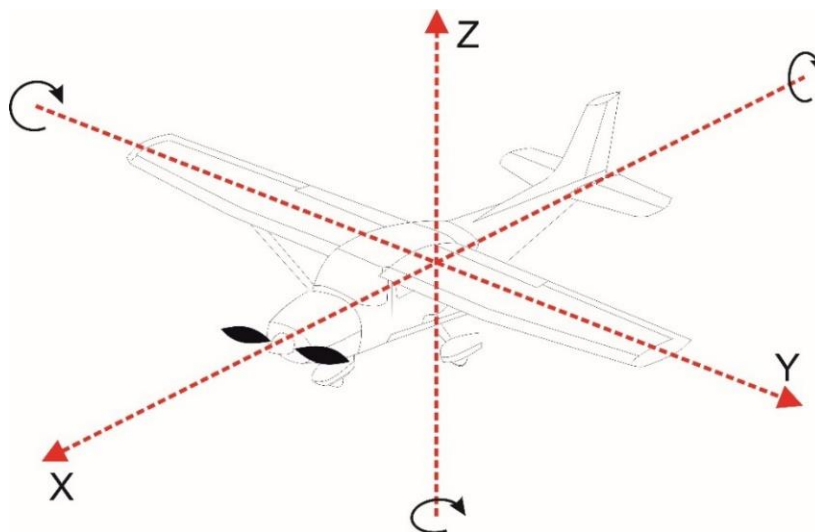
Hogy miként is kell elképzelni egy ilyen sok műholdból álló komplex rendszert, azt a 2. ábra szemlélteti. Itt az Orosz GLONASS szatellitrendszer pillanatképe látható. Jól kivehetők az egymást átfedő pályaszakaszok, és hogy melyik szatellit, épp merre jár az űrben.



2. ábra: A GLONASS szatellitrendszer pillanatképe 2019. 11 08-án 00:46 órakor UTC+3 idő szerint. [A1]

Amikor a navigációról beszélünk, legyen az szatelliteken alapuló valós idejű vagy a csillagok állásából óránként visszaszámolt Dead-reckoning, akkor alapvetően egy fix koordináta-rendszert képzelünk el, melyben három jól ismert tengely - x - y - z helyezkedik el. Ezen tengelyek mentén az elmozdulás egyszerűen megadható és leolvasható. Ezt a példát láthattuk a korábbi 1. ábrán is, ahol kiterített felülnézeti térképként látjuk a Széchenyi István Egyetem környékét. A repülésben és járműiparban [4] ezen a három tengelyen való mozgást az alábbi elnevezésekkel illetik, melyet az 3. ábra szemléltet.

- Heading/Yaw - Z-tengely menti elfordulás
- Roll - X tengely menti borulás
- Pitch - Y tengely menti billenés



3. ábra: Navigációs tengelyek bemutatása.

1.2. GNSS mérések és probléma feltárás

A szatellitelen alapuló navigáció legfőbb problémájának bemutatása a Széchenyi István Egyetem parkolóházában is jól demonstrálható, melyet egy GPSTest nevű alkalmazással végeztem el. A mérés az aktuálisan fogható jelekre koncentrál, a hozzá tartozó szatellit adatait láthatjuk a képernyőn, valamint a jelek által elérhető pontosságot mutatja, sok már paraméter mellett. A tesztet a legalsó szinten (Alt:~103m), illetve a parkolóból kilépve végeztem el, melynek eredményei alább láthatók.(4. ábra)

Lat: 47,6935631° Time: 13:31:14 Long: 17,6277990° TTFF: 1 sec Alt: 0,0 m E Acc: 500,0 m Alt (MSL): 144,6 m # Sats: 2/28 Speed: 0,0 m/s Bearing: S. Acc: B. Acc:						
ID	GNSS	CF	C/N0	Flags	Elev	Azim
6		L1	19,0	AEU	51,5°	260,5°
9		L1	20,0	AEU	81,2°	300,9°
1		L1			14,6°	90,5°
2		L1		AE	27,6°	309,7°
2		L1			65,9°	32,8°
3		L1		AE	32,4°	119,7°
3		L1			38,4°	299,1°
4		L1		A	67,9°	266,9°
4		B1			40,7°	283,3°
5		B1			43,9°	211,3°
7		L1		AE	35,9°	186,1°
7		B1		E	6,5°	144,1°
9		B1		E	81,2°	289,7°
10		L1		A	40,9°	55,7°
10		B1		AE	18,7°	105°
11		L1		A	34,4°	45,6°
11		B1			7,1°	211,2°
12		L1		AE	46,2°	114,6°
13		L1		A	12,9°	165,7°
14		B1		A	77°	59,2°
16		L1	15,0	AE	14,8°	76,9°
17		L1		AE	16,6°	225,7°
18		L1		AE	34,5°	277,9°
19		L1			20,8°	331,7°
22		L1		AE	12,9°	124,2°
23		L1	10,0	AE	61,9°	61,9°
26		L1		AE	13,9°	49,8°
30		L1	10,0	AE	6,3°	201,3°

Lat: 47,6957044° Time: 13:32:01 Long: 17,6274618° TTFF: 1 sec Alt: 104,0 m E Acc: 4,9 m Alt (MSL): 104,0 m # Sats: 13/29 Speed: 0,0 m/s Bearing: 91,1° S. Acc: B. Acc:						
ID	GNSS	CF	C/N0	Flags	Elev	Azim
2		L1	25,0	AEU	27,7°	309,5°
3		L1	22,0	AEU	32,1°	119,9°
3		L1	35,0	U	38,7°	299,4°
6		L1	43,0	AEU	51,4°	260°
7		L1	33,0	AEU	36,3°	186,1°
9		L1	41,0	AEU	81,4°	302,8°
10		L1	24,0	A U	40,7°	55,2°
13		L1	12,0	AEU	13,3°	165,6°
16		L1	19,0	AEU	14,9°	76,6°
17		L1	28,0	AEU	16,3°	225,5°
22		L1	18,0	AEU	12,6°	124,4°
23		L1	30,0	AEU	61,6°	62,1°
26		L1	18,0	AEU	13,9°	49,5°
1		L1			14,3°	90,8°
2		L1	33,0		65,8°	33,7°
2		B1			5,7°	108,6°
3		B1			29,6°	149,8°
4		L1		A	68,2°	267,4°
5		B1			21,7°	131,1°
7		B1		E	23,1°	71°
9		B1		E	8,8°	69,8°
10		B1		AE	24,7°	84,9°
11		L1	22,0	A	34,2°	45,3°
11		B1			6,9°	211,1°
12		L1		AE	46,4°	114,3°
14		B1	34,0	A	76,9°	60°
18		L1	26,0	AE	34,4°	277,4°
19		L1		E	21°	331,4°

4. ábra: Bal: Mélygarázs szinten végzett teszt eredmény. Jobb: Mélygarázsból kilépve végzett teszt eredmény.

A hiba rendkívül látványos, a mérés eredményeit az alábbi 2. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat: A GNSS teszt eredménye.

Mérés helye	„látható” műholdak száma	Helymeghatározás pontossága
Mélygarázs	2 db	500m
Mélygarázsból kilépve	13 db	4,9m

2. Inerciális MEMS szenzorok bemutatása

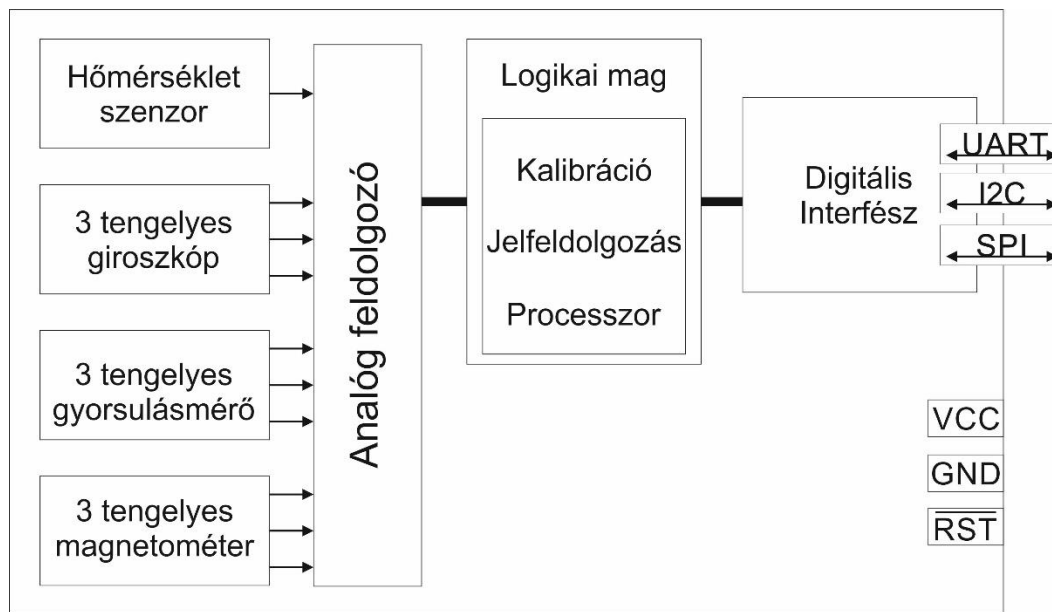
A MEMS³ szenzorok olyan parányi, szilícium kristályon megvalósított integrált áramköri elemek (IC), melyek valamilyen fizikai paramétert képesek mérni a világunkban, mint például a nyomás vagy az elmozdulás, amit aztán digitális jellé formálnak, hogy feldolgozhatóvá tegyék azt a logikai áramkörök számára. A gyártásuk 1962-ig nyúlik vissza, mikor a Honeywell megalkotta az első szilícium alapú nyomás szenzort.[5] Az 1990-es években már az autóipar is nagy hangsúlyt fektetett ezekbe az eszközökbe, melyeket a légzsákok élesítéséhez használtak. A korábbi megoldások egy hiányosságát pótolva, ezeknél a MEMS szenzoroknál már megvolt a lehetőség az „ön-tesztelésre”, ezáltal biztosítva a rendszernek egy ellenőrizhető kimenetet, valamint azt, hogy egy baleset alkalmával a várt kimenetet fogja szolgáltatni.[6] A felhasználói elektronikai eszközök, okosórák és okostelefonok ilyen apró eszközöket használnak manapság. Elterjedésük a Nintendo vállalatnál kezdődött, az első Gameboy-okba építve, majd a telefon gyártók is hamar rájöttek, hogy sok funkcionalitás és kényelmi lehetőség van ezekben az egyszerű billenés érzékelőkben. Ezzel valósítanak meg olyan kényelmi funkciókat, mint például a hívás némítása, mikor képernyőre fordítjuk a telefont, a lépésszámlálás vagy az automatikus képernyő forgatás. A több szabadságfokkal rendelkező mikro-elektromechanikus rendszerek belső felépítése rendkívül bonyolult. Nevükből eredően mikrométeres (10^{-6}) nagyságrendű csíkszélesség jellemző a belső felépítésükre. Ez a kicsiny vonalvezetés határozza meg az elektronikai kommunikáció és az áram folyásának útját. Nemcsak diszkrét elemek, mint például kondenzátor, tekercs, és ellenállás találhatók meg ezekben az eszközökben, hanem komplett logikai kapcsolások, tárolók is. Felépítésük szerint több típusú MEMS szenzor is létezik az alkalmazási célnak megfelelően, de jelen dolgozatban kifejezetten az inercia, azaz tehetetlenség mérésén alapuló szenzorok kerülnek bemutatásra és mérésre, melyeket IMU⁴-nak is szokás nevezni. Ezek az eszközök kivétel nélkül tartalmaznak gyorsulásmérőt és giroszkópot, akár minden navigációs tengelyekre önállóan és sokszor magnetométert is a Föld mágneses terének mérésére, mely az ősidők óta fontos része a különböző tájékozódási módszerek viszonyítási rendszereként.

³ Microelectromechanical Systems - Mikro-elektromechanikus rendszerek

⁴ Inertial Measurement Unit – Inerciális mérőegység

2.1.1. Általános felépítés

Az első időkben, még nem voltak olyan komplex szenzor csomópontok, melyek egyben összefogtak volna több tengelyes méréseket, de a modern inerciamérő egységek alapvető részegységei már mind ortogonális kialakításban három tengelyen valósítják meg ezeket, egy komplett mérőrendszert adva a fejlesztő kezébe. Egy modern inerciamérő egység általánosan elvárt részegységeit az alábbi 5. ábra mutatja be.

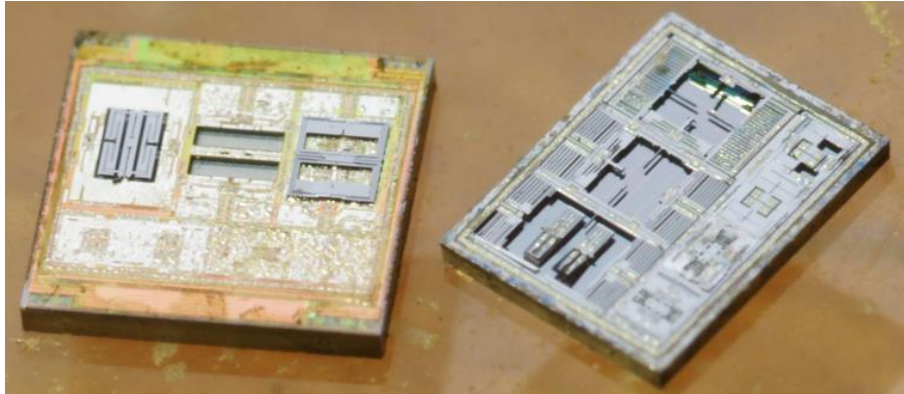


5. ábra: Egy modern inerciamérő általános blokkvázlata.

A három tengelyes mérőegységek így lehetőséget adnak a különböző tengelyek körüli szöggyorsulások és a tengelyek mentén történő lineáris gyorsulások mérésére, valamint az egyes tengelyekre ható mágneses tér mérésére. A szenzortechnika kapcsán állandó hibaforrás a hőmérsékletváltozás, így egy modern IMU-ban mindenféleképpen helyet kap egy hőmérséklet mérő egység is, az egyes szenzorok hőmérsékleti kompenzációjához.[7] Az analóg jelfeldolgozás manapság már legalább 10 biten történik, a részletesebb skálázás érdekében, valamint a kiértékelő logikában sokszor már valamilyen integrált 16 vagy 32 bites mikroprocesszor végzi a számítás igényes feladatokat és a kommunikációs interfészek kezelését. Alapvetően ezek a mikroprocesszorok végzik a kalibrációs és kompenzációs feladatokat is. Ezeket a feladatokat általában külön-külön végzik tengelyenként, aminek eredményeit aztán egy tömbként kezelve mentik vagy valahol a saját belső memória területükön, vagy a kommunikációs vonalakon keresztül, valamilyen felsőbb egységben. A szenzor egységek további részletes ismertetése a következő fejezetben folytatódik.

2.1.2. Gyorsulásmérő

Egy MEMS gyorsulásmérő felépítését tekintve egy rezgésbe hozható tömegeből, és a mögöttes jelfeldolgozó egységből áll. A 6. ábra alapján látható kialakításban a vékony levegőben lógó szálak gyorsulás hatására elhajlanak, ami ellenállás és kapacitás változást produkál a körülötte megvalósított kiértékelő logikai áramkörben, melynek mérésével meghatározható a pillanatnyi gyorsulás. A 6. ábra mutatja egy három-tengelyes gyorsulásmérő MEMS kialakítását.



6. ábra: Egy összetett MEMS szenzor metszete. [A2]

Az 1. egyenlet szerint ennek időszerinti integrálja megadja a pillanatnyi sebességet, aminek időszerinti integrálja (2. egyenlet) már a pozíciót adja vissza, az idő függvényében.

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a dt \quad (1)$$

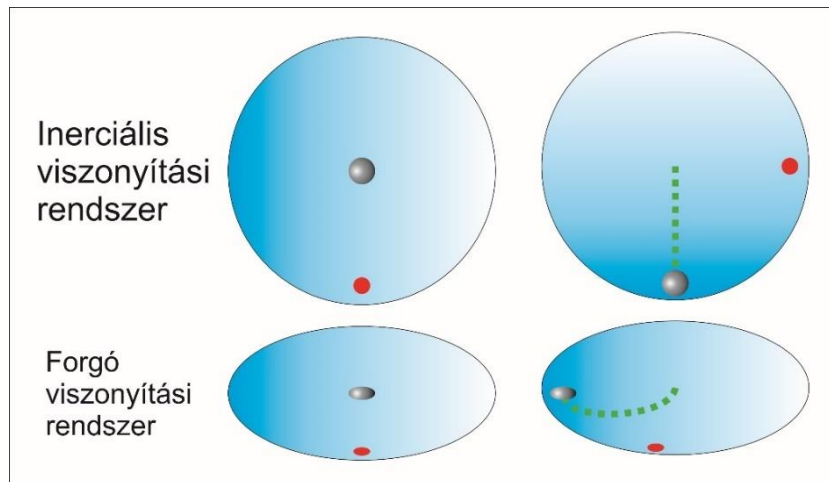
$$y(t) = y_0 + \int_0^t v dt \quad (2)$$

2.1.3. Giroszkóp

A giroszkóp a perdület megmaradás törvényét demonstrálja. A Newton-törvények egy test mozgását inerciarendszerben vizsgálják, melyről tudjuk, hogy nyugalomban van, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Amikor a Newton-törvényeket transzformáljuk egy egyenletesen, ω szögsebességgel forgó vonatkoztatási rendszerbe, megjelenik a Coriolis-erő [8, 9] és centrifugális erő. A Coriolis-erő egy ilyen forgó koordináta-rendszerben ható tehetetlenségi erő, melyet a 7. ábra szemléltet. Ez abból adódik, hogy egy v sebességgel mozgó m tömegű testre plusz gyorsulás hat a forgás tengelyére merőleges mozgás esetén. Ezt az erőt az alábbi, 3. egyenletből számíthatjuk.

$$F_c = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot v \quad (3)$$

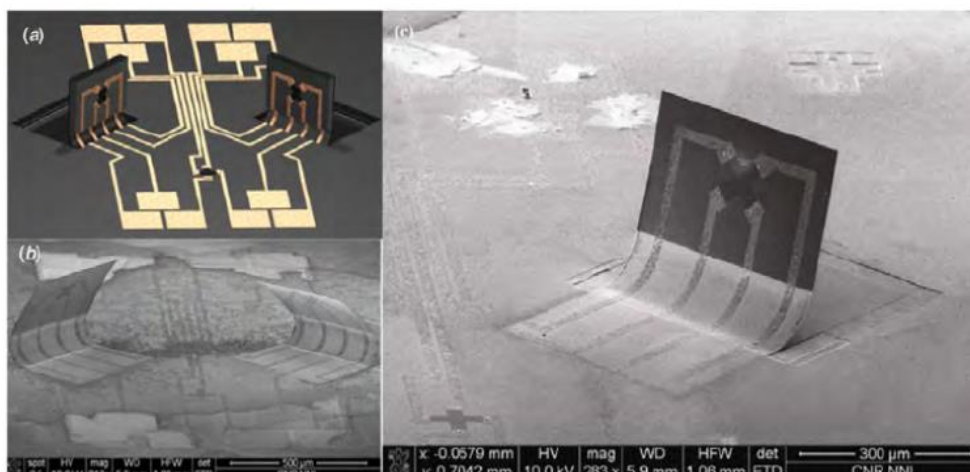
Egy mikro-elektromechanikus szenzor esetén a giroszkóp megvalósítására [10, 11] egy rezgő rendszer van kialakítva a szilícium lapkán, amelyre annak forgatása közben Coriolis-erő hat. A hatást ebben az esetben is ellenállás vagy kapacitás változáson keresztül mérhetjük.



7. ábra. A Coriolis-hatás illusztrációja.

2.1.4. Magnetométer

A magnetométer a Föld vagy bármilyen test mágneses terét hivatott mérni. Felhasználása széleskörű, és ma már több kifejezett típus – felépítés érhető el a piacon az adott feladathoz optimalizálva. Ezek a feladatok és szenzor felépítések a stabilitás és érzékenység kapcsán térnek el leginkább. A MEMS megvalósítását általában egy áramjárta kerettel kivitelezik, akár síkbeli akár out-of-plane⁵ kialakításban. Egy 'out-of-plane' kialakítású Hall szenzor mikroszkopikus nézete az alábbi ábrán látható. (8. ábra)



8. ábra: (a): 3D-s Hall szenzor sematikus terve. (b-c): 'Out-of-plane' Hall szenzor mikroszkopikus nézete. [A3]

⁵ Out of plane – síkból kiálló

A navigációhoz hasznosítható MEMS szenzorok magnetométeres mérései is három tengelyen zajlanak, annak érdekében, hogy a chip bármilyen pozícióba kerül a mozgás során, képes legyen pontos irányultságot meghatározni a föld északi pontjához képest. A különböző szenzor típusok ezen értékek figyelembevételével számolják az abszolút vagy relatív orientációjukat. MEMS eszközöknél kulcsfontosságú a kalibráció, főleg a magnetométer kapcsán, hiszen az elektronikai eszközök elektromágneses kisugárzása is megzavarhatja annak működését. Ofset eltolódás, mágneses tér torzulás, ortogonális hibák és zaj, ezek mind-mind negatívan ható effektek a működést tekintve.[12] Az esetleges gyártói ajánlásokra fontos figyelni, hogy a kalibrációt olyan környezetben végezzük el, ahol később az eszköz üzemelni fog. Ezzel elkerülhető, hogy egy elektromágnesesen tiszta környezetben kalibrált szenzor, egy erősáramú környezetben hibás adatokat szolgáltatson majd. Természetesen figyelni kell a szenzor rendszer olyasfajta beépítésére, amiben minél kevesebb zavart gerjesztünk majd körülötte, de amennyiben van lehetőség a kalibrációra a feladathoz specifikált környezetben, úgy törekedni kell arra, hogy valóban helyben legyen bekalibrálva az eszköz. Vannak olyan intelligens chipek is melyek belső szenzorfüziós algoritmusukkal figyelembe képesek venni a helyi zavarokat, így az adott környezethez valamilyen mértékben, de dinamikusan tudják állítani paramétereiket.

Az űrkutatásban is nagy jelentősége van a magnetométereknek [13], melyekkel az űrben jelenlévő mágneses tereket vizsgálják. Ilyen esetben nem csak egy módszert valósítanak meg, mint amelyet bemutatam (MEMS), hanem atomfizikai elven alapuló proton-processziós és elektrodinamikai elvet követő Flux-gate (fluxus-kapu) mérő egységeket szerelnek fel az űrsiklókra vagy egyéb a világűrben működő vizsgáló berendezésekre.

2.1.5. Kvaterniók

A kvaterniók [14] a háromdimenziós térrel állnak kapcsolatban, mégpedig a komplex számok⁶ leképzéseként. Ha egységnyi hosszú komplex számokkal szorzást végzünk, akkor a síkra vetítve egy forgatást valósítunk meg. Ezen elmélet kiterjesztése a háromdimenziós térre Sir William Rowan Hamilton tollából származik, miszerint a kvaterniók segítségével a forgatást térben is megvalósíthatjuk. A kvaterniók formális alakja: $a + bi + cj + dk$, halmaz jelölése $\mathbb{H}$, valamint igaz rájuk az alábbi összefüggés (4.egyenlet).

$$i^2 = j^2 = k^2 = i \cdot j \cdot k = -1 \quad (4)$$

⁶ Komplex szám: $(a + bi)$ formális kifejezések, melyre teljesül az $i^2 = -1$ összefüggés. Halmaz jelölése: $\mathbb{C}$

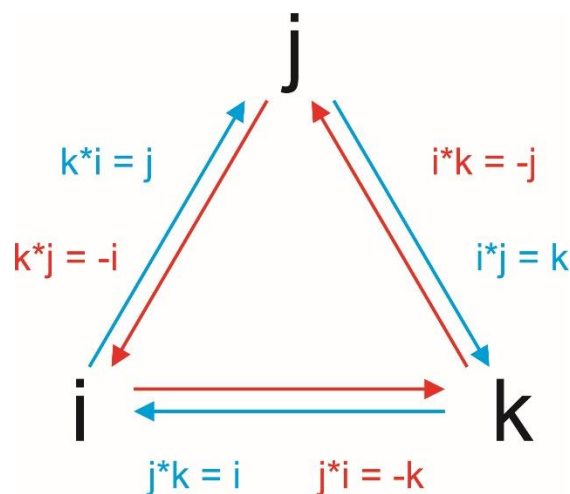
A 4. egyenletből levezetve megadható az elemek önálló értéke, a másik két elem szorzataként, mely az alábbi egyenletek szerint alakul:

$$i \cdot j = k = -ki, \quad (5)$$

$$j \cdot k = i = -kj, \quad (6)$$

$$k \cdot i = j = -ik. \quad (7)$$

Az összefüggés egy önmagába visszatérő szabályt ad, melyet egy háromszög mentén ábrázolhatunk, ahol az óramutató járásával megegyezően szorozva két elem a harmadikat adja eredményül, óramutató járásával ellentétes irányban pedig a harmadik elem negatívját (9. ábra). Ezen elmélet segítségével a térbeli orientáció egy számnégyesként, vagy vektorként kezelhető, mely négy valós számmal adható meg (x,y,z,w). Ennek jelentősége a MEMS szenzoroknál igazán jelentős, hiszen komplex műveletek is gyorsan elvégezhetők a valós számokkal.



9. ábra: A kvaternió formális alakjának képzetes részeinek szorzási szabálya.

2.1.6. Navigáció MEMS szenzorokkal

A korábban leírtak bizonyítják, hogy a pozíció meghatározás, valamekkora hibával, de megvalósítható ilyen szenzorok segítségével is. Lényeges előnyük, hogy ezek az eszközök, már képesek szatellit jelek nélkül információt adni a mozgásunk sebességéről és irányáról is egyaránt, anélkül, hogy bármilyen külső eszközzel - akár földi, akár légi - szükséges legyen a kommunikáció. Az inerciális navigációs eszközöket a rendszer szabadságfokával szokás

jellemezni. A szabadságfok alatt azt érti a szakirodalom, hogy a különböző tengelyeken végzett mérések mennyire függenek egymástól. Annál pontosabb egy szenzorrendszer minél függetlenebb méréseket vagyunk képesek végezni a különböző tengelyeken. Egy ilyen MEMS eszköz felhasználásával megvalósítható az úgynevezett infrastruktúra független navigáció, melynek nincs szüksége GPS/GNSS jelekre, a lokalizációhoz. Ennek következtében a járművek sokkal rugalmasabbak és olcsóbbak lehetnek a jövőben, mert csak a fedélzeti eszközeikre és belső jelfeldolgozásukra fognak tudni támaszkodni a navigációt illetően és nem pedig az éppen elérhető szatellitkre, melyek rálátása vagy elégséges, vagy éppen problémás.

2.2. Tesztkörnyezetek – validálás az iparban

Ipari oldalról a MEMS szenzorok kapcsán már egyszerre több szenzor mérése az alapvető elvárás. A 90-es években erre még nem volt lehetőség, azért is voltak drágábbak ezek az eszközök, de manapság a tömeggyártás és tömeges tesztelés óriási árcsökkenést eredményezett. A piaci állapotok és a még mindig növekvő igények negyedévente 4-5%-os csökkenést mutatnak.[15] Az egyik, kifejezetten tesztgépeket gyártó cég a SPEA kínálatában is megtalálhatók olyan célgépek, melyek képesek egyszerre több MEMS szenzort is mérni. Ez lehet akár inerciális, mágneses, környezeti, nyomás, közelség, fényérzékeny, vagy akár akusztikus szenzor. A méréseket 450°-os tartományban képes elvégezni, $\pm 400^\circ/\text{s}$ sebességgel, ahol a pontossága $\pm 0,01^\circ$. A konkurens cégekhez képest nagy előnye a mérőcellának, hogy egyedi hűtéssel/fűtéssel is rendelkezik, így -40°C -tól $+150^\circ\text{C}$ -ig tesztelhetők a szenzorok. Az alábbi 10. ábra mutatja a SPEA által gyártott összetett mérőcellát.[16]



10. ábra: SPEA H3580 teszt cella MEMS szenzorok méréséhez.[A4]

Példaként említem még a Cohu cég tesztgépét is, mely szintén többszörös chipfoglalatral valósít meg MEMS szenzorteszteket. Ez a célgép kifejezetten inerciális szenzorok mérésére van előkészítve, melynek specifikációját az alábbi táblázatban (3. táblázat) foglaltam össze. A mérőcella, melyet a 11. ábra mutat, ebben az esetben is fűthető, de csak + 125°C-ig.[17]

3. táblázat: Cohu MEMS mérőcella képességei.

Tengely száma	Mozgatási tartomány min	Mozgatási tartomány max	Pontosság	Forgási sebesség max
Billenés Tengely 1	- 180°	+ 90°	0,1°	75°/s
Billenés Tengely 2	- 90°	+ 90°	0,1°	75°/s
Forgás Tengely 3	- 360°	+ 360°	0,1°	700°/s



11. ábra: A Cohu által gyártott MEMS szenzor mérő célgép.[A5]

3. MEMS szenzorok alkalmazásának követelményei

A MEMS szenzorok navigációs alkalmazásának alapvető követelménye, hogy megfelelő pontosságot szolgáltatson a navigációhoz, vagy annak valamely szükséges részéhez. Nem alapvető feltétel, hogy csak ezzel képesek legyünk navigálni az önvezető autók elkövetkező világában, de fontos, hogy GNSS jelek nélkül is 'életképes' maradjon járművünk. Ha nem önállóan, akkor valamely más fedélzeti egységgel összhangban elképzelhető egy egyszerű fúzió például a kerék enkóderek és az inerciamérő között, vagy a fedélzeti kamera és az inerciamérő között, melyből már egy hosszútávon is működőképes navigációs megoldás születhet a közutakra. A szatellit jelek nélküli közlekedésre jó példa az Európában alagutakkal tűzdelt alpesi közlekedési útvonal, valamint a ma már szinte minden nagyvárosban megtalálható mélygarázsok labirintusa. Ezek a közlekedési helyszínek megkövetelik a járművek infrastruktúra független navigációját, melyet a dolgozat elején mérésekkel is bizonyítottam.

3.1. Real-Time⁷ jelfeldolgozás

Az említett feladat elvégzéséhez, a navigációhoz, valós idejű jelfeldolgozásra és kiértékelésre van szükségünk. A 'valós idejű' kifejezés a számítástechnikában kutatók szerint pár milliszekundum nagyságrendhez [18] köthető, mikor egy bemeneti változást a rendszer észlel és dönt a kimenetének valamilyen változtatásáról. A járműiparban a 'valós idejű' kifejezés értelmezését kiterjesztik a sebesség figyelembevételével hiszen belátható, hogy egy parkolóházban 18km/h-s sebességgel a 'valós idejű' kifejezés nem ugyan azt jelenti, mint egy autópályán 108km/h-s sebességnél. Egy szenzor 50Hz-es mintavételezését tekintve előbbi esetben 5 méter megtétele alatt 50 mérést végzünk, melyből kiszámítva egyetlen szenzorértékhez tartozó útszegmens nagysága 10cm. Ezzel ellentétben az autópálya esetén 30 méter megtétele alatt végzünk 50 mérést, mely alapján egy szegmens nagysága már 60 cm. Ez lényegében az is jelenti, hogy amíg a jármű megteszi ezt az adott nagyságú szegmenset, nincs pontosabb/újabb információk a mozgásáról. A navigáció és járműirányítás kapcsán fontos megjegyezni, hogy nem a sebességet kell figyelembe venni, az egyes adatfeldolgozási megoldásoknál, hanem az adott szenzorok képességei szerint kell meghatározni a maximálisan kezelhető biztonságos sebességet. Ennek kapcsán fontos lesz a MEMS szenzorok kategorizálása, hiszen amelyik nem képes 'nagy' mintavételezési frekvenciára, azt nem használhatjuk nagy sebességeknél, ellenben egy elektromos robogóba, még megfelelhet.

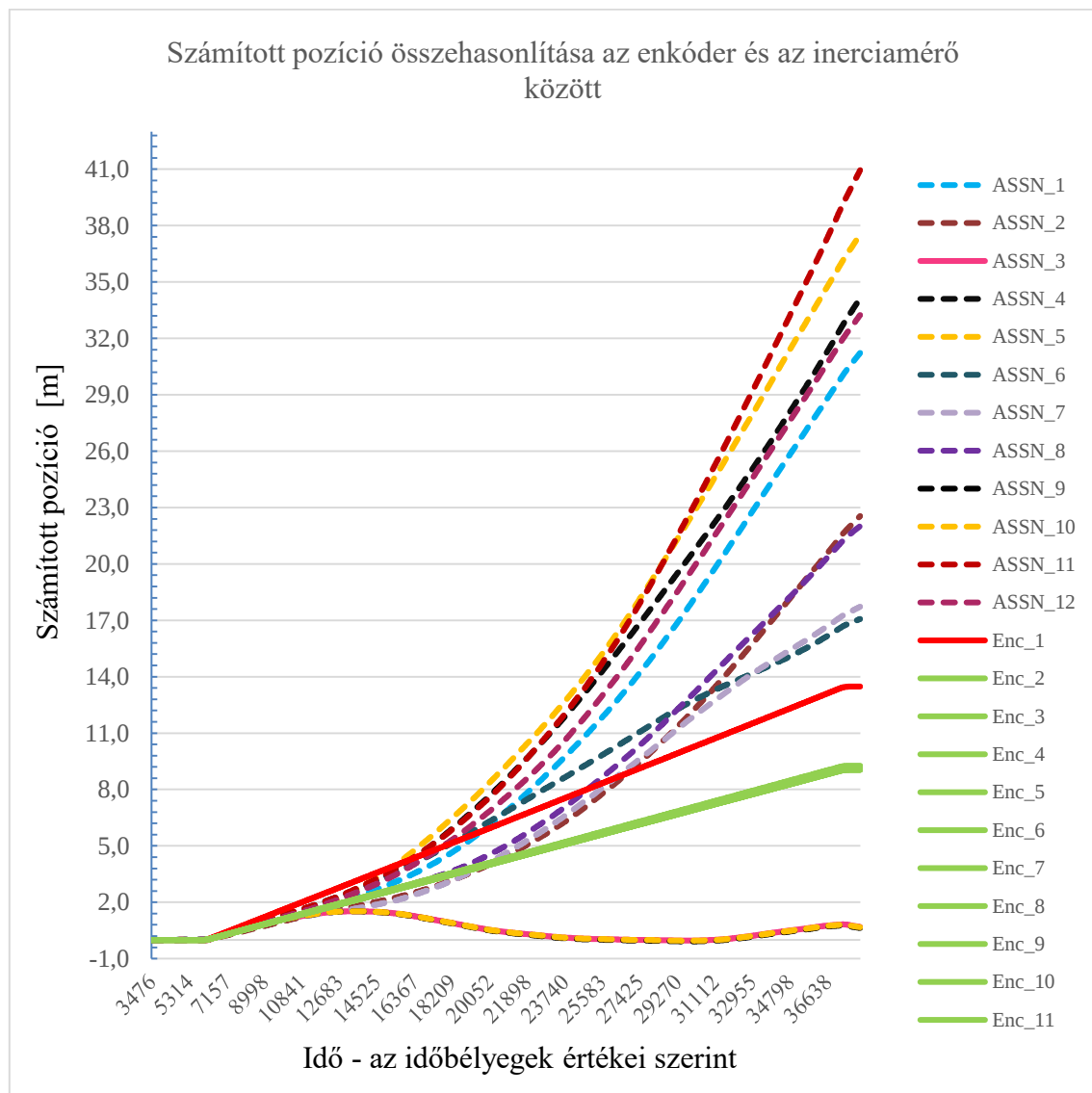
⁷ Real-Time : Valós idejű

3.2. Adatok szűrése

Az inerciális MEMS szenzorokhoz visszatérve fontos gondoskodni a nyers adatok szűréséről és kompenzációjáról, amennyiben az integrált megoldások nem megfelelőek az adott feladathoz. Minden inerciális szenzor valamilyen mértékben rendelkezik az alábbi hibákkal:

- Ofszet eltolódás
- Érzékenységi pontatlanság
- Zaj
- Ofszet stabilitás

Ezek a hibák rendkívüli mértékben el tudják torzítani a mérésből számított pozíciót, melyre a korábbi időszakban végzett IMU és enkóder összehasonlító méréseim(12. ábra) is jó példaként szolgálnak. [19] Ennek magyarázata az integrálás során összeadódó hiba.



12. ábra: Az inerciamérő szenzor hibáiból a pozíciósámításba integrálódott hiba mértéke.

4. Fejlesztés alatt álló tesztkörnyezet

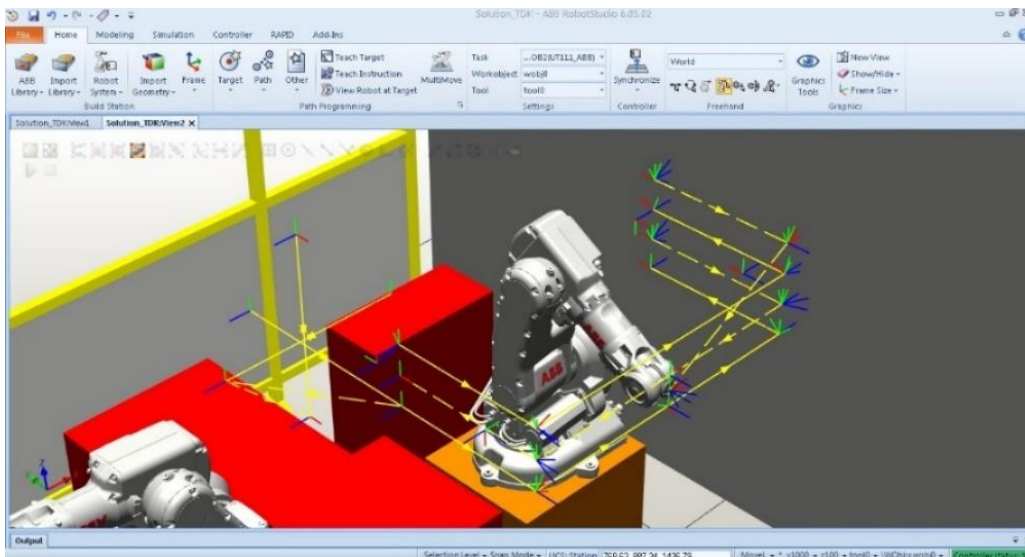
A fejleszteni kívánt tesztkörnyezet, olyan megoldással szolgálna, melyben:

1. közlekedéstechnikai példákra alapuló manőverek sorozatában, célzott mérések mellett bekalibrálható legyen bármilyen MEMS inerciamérő szenzor,
2. a validáció során olyan specifikus szűrő készüljön hozzá, melynek segítségével maximalizálható a pontossága,
3. valamint adott sebesség maximumhoz és önálló megbízható működési szegmenshez lehessen rendelni,

ezáltal gyorsan kategorizálhatóvá téve a szenzorokat kifejezetten navigációs feladatok esetére.

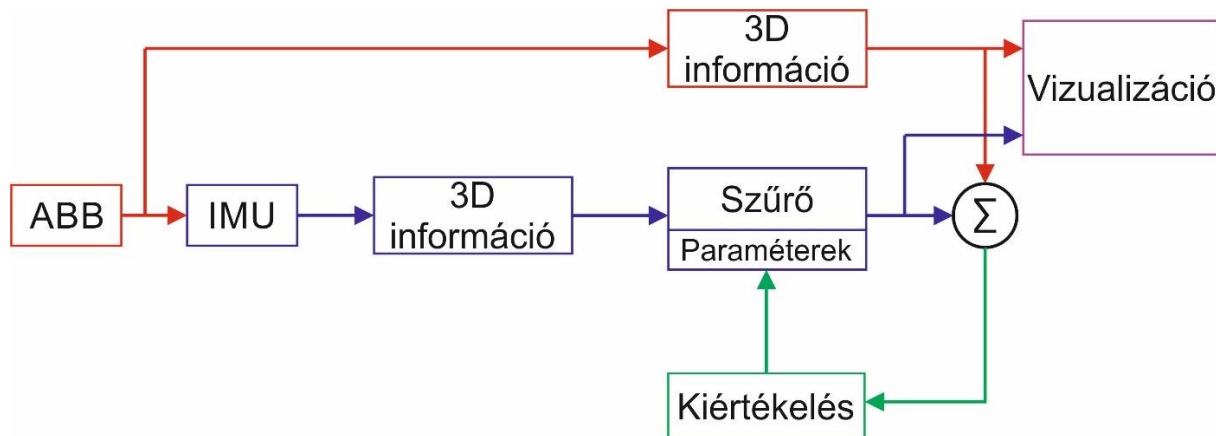
4.1. Hardware-in-the-loop szűrő optimalizálás

A koncepció alapja a mozgás mérése és összehasonlítása, melynek egy precíz ipari robot az egyik legjobb alapjául szolgál. Programozhatóságából adódóan könnyen nyomon követhető a pozíciója és korábbi munkám során [19] már megismerkedtem az Automatizálás Tanszék ABB gyártmányú IRB 140 típusú robotjával, így kézenfekvő ennek további használata. A robot mozgása és elvégzendő műveletei könnyedén szerkeszthetők az ABB RobotStudióban, valamint szimulációra is van lehetőség a teljes sebességgel elvégzett tesztek megelőzően, így biztonságosan felépíthető vele a cellán belüli validációs pálya. A korábbi munkámban készített tesztpályák egyik változata látható az alábbi ábrán.(13. ábra)



13. ábra: ABB RobotStudióban megvalósított szimulációs környezet.

A leprogramozott mozgást követően a robot vezérlője RAPID nyelven értelmezi a műveleteket. A koncepció szerint, a tesztesetek lefutásának végére az adott szenzorhoz olyan szűrő készül el, amivel maximalizálható annak navigációs képessége. A tervezett rendszer alapja az ABB robot programozott mozgása, melyet a következő fejezetben kifejtésre kerülő köztes szoftveren keresztül fogok irányítani. Ez lehetőséget ad arra, hogy a robot megfogójának mozgását három dimenzióban tökéletesen vizualizáljam. Ez fogja megadni a validációs rendszer arany mintáját. A robot megfogójában elhelyezkedő MEMS adatainak kiértékelése, majd szűrése szintén vizualizálom annak pályáját, így szemléletesen összehasonlítható lesz a két nyomvonal, valamint jól láthatóvá válnak majd a hibák is. A háromdimenziós adatok különbségéből, pedig egy kiértékelő logika után módosíthatom a szűrő paramétereit is, ezzel egyre jobban összehangolva az adott MEMS szenzort és a szűrőt. A leírt működési mechanizmus blokkvázlatát az alábbi 14. ábra mutatja.



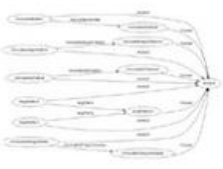
14. ábra: A tervezett rendszer működési vázlata.

4.2. Ipari robotirányítás ROS⁸ környezetből

4.2.1. Az ROS bemutatása

Az ROS egy meta-operációs rendszer, elsősorban robotokhoz fejlesztve.[20] Az ROS keretrendszere 2007 óta van jelen a robotika világában, és növekvő táborra még jobban felgyorsítja a nyílt forráskódú rendszer terjedését. Felépítése nagyban hasonlít az Unix rendszerekhez, és részben ezért megköveteli egy Linux disztribúció alapkörnyezetét. A szolgáltatásai lefedik, amit egy operációs rendszertől elvárunk, de egy másik operációs rendszerre épül. Alább, az 4. táblázatban látható a rendszer áttekintése és funkciói.

4. táblázat: Az ROS áttekintése.

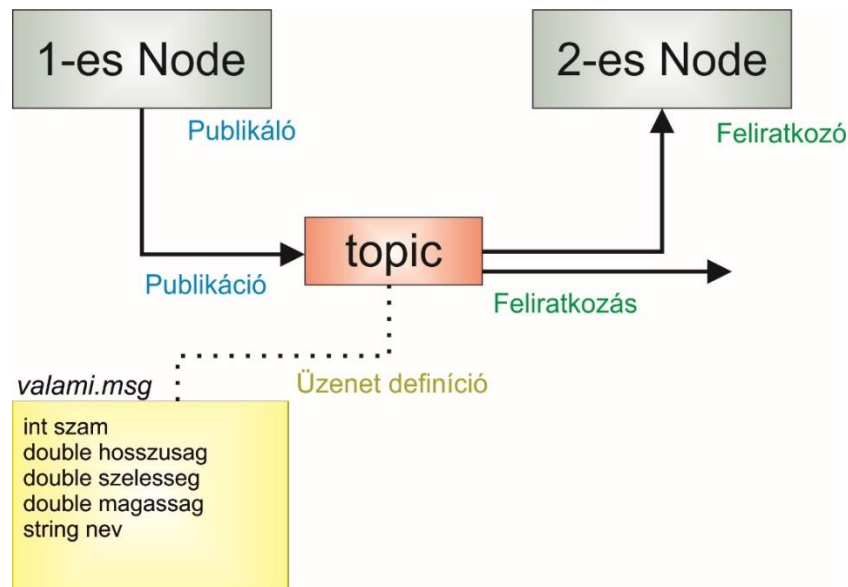
			
Plumbing	Tools	Capabilities	Ecosystem
Folyamat menedzsment	Szimuláció	Szabályzás	Csomag rendszer
Kommunikáció a folyamatok közt	Vizualizáció	Tervezés	Szoftver disztribúció
Eszköz driver-ek	GUI	Érzékelés - Megfigyelés	Dokumentáció
	Naplózás	Térképépítés	Példák - Bemutatók
		Adat kezelés	

Az ROS biztosítja számomra az alsó szintű driver kezelést, közvetett rálátást a hardverekre, általánosan használt függvények implementálását, csomag menedzsmentet és nem utolsósorban a folyamatok közti üzenet közlést. Az ROS futásának folyamatábrája egy Peer-to-Peer⁹ (P2P) hálózathoz hasonlítható, ahol nincs kitüntetett szerver, mindenki egyenrangú fél. Így jelennek meg a rendszerben a folyamatok, akár több számítógép között egységesen. A kommunikáció során szinkron és aszinkron adatkapcsolat kezelésére egyaránt képes. A rendszer a Linuxhoz hasonlóan csomagokból épül fel és ez adja a rendszer egyik legjobb tulajdonságát, a modularitást.

⁸ Robot Operating System - Robot Operációs Rendszer

⁹ Közvetlenül összekötött végpontokkal kiépített hálózat, ahol nincs központi kitüntetett csomópont

Az ROS a publish-subscribe kommunikációs modellt alkalmazza, melynek szemléletes bemutatása (15. ábra) alább látható. A program részei valójában node-okként jelennek meg és topic-okon keresztül zajlik az üzenetközlés, melyekre bárki feliratkozhat (subscribe) illetve azokra bárki publikálhat (publish). Minden üzenetnek, amit kiadnak a keretrendszeren belül meg kell felelnie valamilyen üzenet definíciónak. Ez biztosítja a rendszeren belüli szabványos adatfeldolgozást, és könnyű integrálhatóságot.



15. ábra: A publish-subscribe kommunikációs modell magyarázata.

Az ROS fejlesztése forráskódokban történik, majd egy összerendezett csomagként fordításra kerül. A keretrendszer nagy előnye, hogy nem csak egy programozási nyelv használata engedélyezett. A megfelelő modulok használatával a csomagunk egyes részeit írhatjuk különböző nyelveken, a végen egy egészként összeáll majd, amiről a fordító gondoskodik. Akár C, C++, vagy akár Python nyelven is fejleszthetünk, ezeket mind képes kezelni a fordító, ezzel elősegítve több programozói csapat munkáját, ami egy projekt alapú feladat gyors előrehaladását segíti. Egy összetett robot működtetéséhez sokszor kedvezőbb egy-egy funkciót más nyelven megvalósítani, ahol esetleg a nyelvezetből adódó előnyök megkönnyítik azon funkciók implementálását. Ez lehet akár hardver kezeléssel kapcsolatos funkció, vagy egy sebesség kritikus részegység, esetlegesen egy webszerver szolgáltatás vagy driver elérhetőségi kérdés.

4.2.2. ABB Robot irányítás ROS-ben

Ahhoz, hogy az ABB IRC5 vezérlőjét irányíthassam az ROS-en keresztül szükséges egy ROS szerver telepítése a vezérlőre. Ez a szerver lesz az átjáró a robot beágyazott rendszere és az ROS között. A szerver telepítése [21] hat lépést igényel:

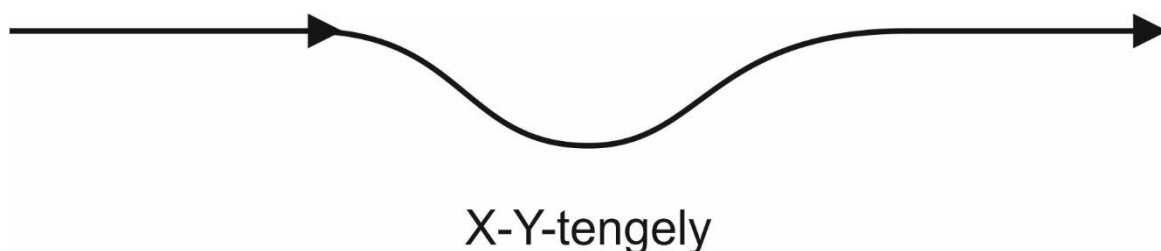
- ABB specifikus könyvtárak másolása az IRC5 vezérlőre:
 - *abb_common/rapid* és *abb_driver/rapid*
- Kontroller beállítása:
 - Feladatok létrehozása
 - Digitális jelek definiálása
 - Definiált jelek bekötése a rendszerbe
 - Feladatokhoz rendelt modulok betöltése
 - Szoftver frissítés - újraindítás

4.3. Validációs robotpálya felépítése

A robotpálya felépítésében olyan teszteseteket kívánok megvalósítani, melyek egy-egy forgalmi szituációt, vagy járműdinamikai problémát reprezentálnak, legyen az egy egyszerű kanyar, vagy egy kikerülő manőver úthibákkal tűzdelt szakaszon.

4.3.1. TESZT-1

Az első tesztesetben egy kikerülő manővert kívánok szimulálni, ahol lineáris mozgás közben egy hirtelen oldalirányú kitérés következik be, majd a jármű visszatér a normál nyomvonalba. Ez a teszt manapság elég jellegzetessé vált a járműgyártók megszorodott magas építésű városi terepjárói miatt, amit 'jávorszarvas-teszt' néven is ismerhetünk. Ez a teszt kiválóan alkalmas lesz a visszatérési pontosság megfigyelésére. Különböző sebességekkel megvalósítva pedig pontos képet kaphatok a szenzor sebesség függő képességeiről, ami fontos figyelembe véve, hogy a menetstabilizáló elektronika többek közt ilyen MEMS szenzorokra is hagyatkozik, persze egy sokkal kifinomultabb szenzorfüzión rendszerben, nem pedig önállóan. Az elkészítendő pálya sematikus rajza alább látható (16. ábra).



16. ábra: Kikerülő manőver sematikus rajza a robotkar megfogó mozgásának bemutatására.

4.3.2. TESZT-2

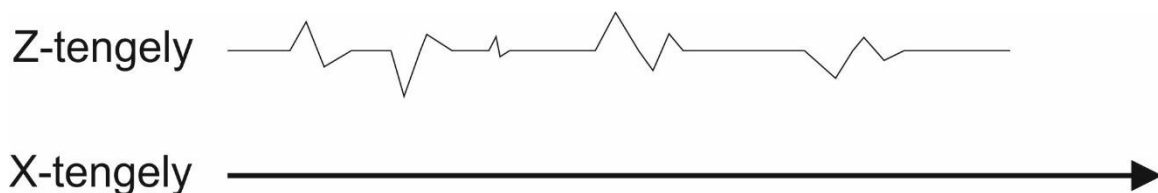
A második tesztetben egy derékszögű kanyarodási manővert kívánok reprezentálni. A kanyar kivitelezése akár konstans akár változó sebességgel is megvalósítható a vizsgálatok kiterjesztésének érdekében. Ez a teszt lehetőséget nyújt a tengelyek közti átmenet vizsgálatára, valamint arra, hogy megmutatkozzon, hogyan kezeli a szenzor a centripetális gyorsulást. Az elkészítendő pálya sematikus rajza alább látható (17. ábra).



17. ábra: 90°-os kanyar szimulálásának sematikus rajza a robotkar megfogó mozgásának bemutatására.

4.3.3. TESZT-3

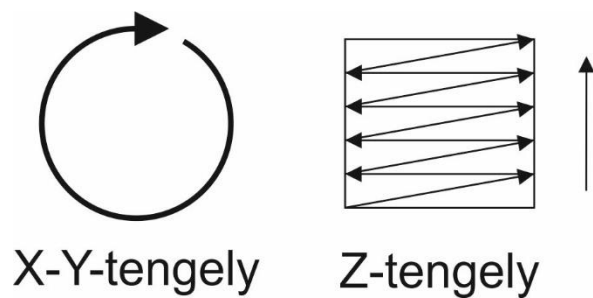
A harmadik tesztetben egy úthibákkal tűzdelt útszakaszt próbálok szimulálni. A járműdinamika szimulációja kapcsán a felfüggesztés átviteli karakterisztikája későbbi pontosításra szorul még, de a jelenlegi sematikus ábrán is egy csillapodó mozgásként reprezentálom. Ez a teszt is lehetőséget nyújt a tengelyek egymástól való függetlenségének vizsgálatára, melyet szintén több különböző sebességgel kívánok tesztelni. Az elkészítendő pálya sematikus rajza alább látható (18. ábra).



18. ábra: Úthibák szimulálásának sematikus rajza a robotkar megfogó mozgásának bemutatására.

4.3.4. TESZT-4

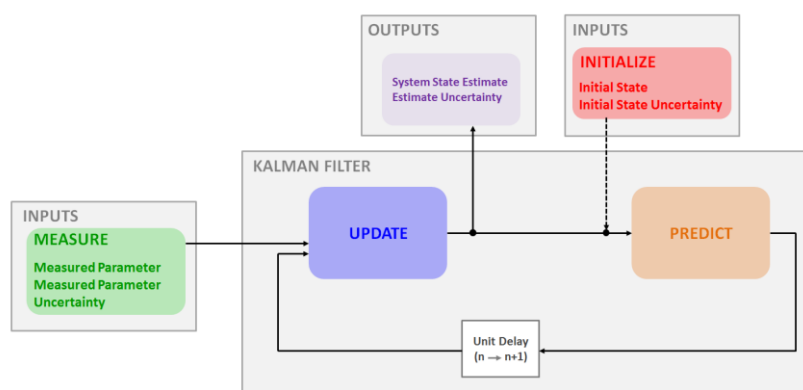
A negyedik teszt esetben egy parkolóház emelkedő spirálját szimulálom a robotkar segítségével. A tesztben fontos szerepet kap majd a visszatérési pontosság, hiszen a robotkar tökéletesen azonos köröket fog leírni és jól összehasonlítható lesz a szenzor eredményeivel. Ez a teszt a legkomplexebb, mindhárom tengelyt érintő változása miatt kifejezetten alkalmas lesz a tengelyek egymástól való függetlenségének vizsgálatára, melyet itt is lesz lehetőségem több sebesség mellett megvizsgálni. Ez a vizsgálat fogja legjobban megmutatni a MEMS szenzor orientációs képességeit, esetleges elcsúszását. Az elkészítendő pálya sematikus rajza alább látható (19. ábra).



19. ábra: Parkolóházban végzett manőver sematikus rajza a robotkar megfogó mozgásának bemutatására.

4.4. Specifikus, szenzorhoz illeszthető szűrő tervezés

A navigáció kapcsán a jelek szűrése nem újkeletű igény, főként, hogy a méréseket csak indirekt módon tudjuk elvégezni. Ebből adódóan valamilyen mérési hibával, szenzor pontatlansággal kell számolni, esetlegesen kommunikációs zavarokból adódott hozzáadott zaj kerül a mérési adataink tartalmába. Járművek navigációja során nem valós pozíciót mérünk, hanem sebességet vagy gyorsulást, melyből matematikai úton számolunk vissza a pozíció információért. Ezzel a problémával korábban is szembesültek már és többek közt az űrverseny során, a 60as években megoldást is találtak a problémára a Kálmán-szűrő formájában. Mi több, az Apollo programban a holdraszállás alkalmával alkalmazták először beágyazott rendszerben a Kálmán-szűrőt, a rendszer irányítása kapcsán, ahol az űrszonda pozícióját és állapotát kellett megbecsülni.[22] A Kálmán-szűrő egy olyan algoritmus mely állapot- és hibabecslő ciklust tartalmaz, amely kifejezetten dinamikus rendszerekhez készült és kidolgozása egy magyar villamosmérnökhöz, Kálmán Rudolf Emilhez kapcsolódik.[23, 24] Működési mechanizmusa az alábbi ábrán látható. (20. ábra)



20. ábra: A Kálmán-szűrő működési mechanizmusa egy dimenziós probléma esetén. [A6]

A mögöttes problémát mára már sokan feldolgozták és az eredeti Kálmán-szűrő több kiterjesztett verziója is publikálásra került, melyet én is szeretnék implementálni a MEMS inerciamérő szenzorok validálásához. Erre a célra kialakításra kerül több olyan ROS node, mely kifejezetten egy adott típusú Kálmán-szűrést valósít majd meg. Ezeket egy felsőbb vizualizációs node kezeli majd, ahol a szűrők eredményének együttes megjelenítésével könnyedén értékelhető lesz az adott szenzor és szűrő kombinációja. A Kálmán-szűrő alábbi verzióit kívánom megvalósítani: [25]

- Extended Kálmán-szűrő EKF
- Unscented Kálmán-szűrő UKF
- Cubature Kálmán-szűrő CKF

5. Összefoglalás

Az infrastruktúra függő navigációs rendszer hibáit szemlélítve az olvasó megbizonyosodhatott arról, hogy a szatellit alapú navigáció önmagában nem elégséges. A MEMS szenzorok felhasználása, komoly előnyökkel jár a gazdasági, és méretbeli kérdések kapcsán, habár a stabilitásuk gyengébb. Ennek a problémának a kiküszöbölésére a kutatás további részében egy olyan szűrő algoritmus felállítását és paraméterezését kívánom megvalósítani melynek következtében ezek a szenzorok is alkalmassá válnak a pontos pozíció meghatározásra. A bemutatott fejlesztés alatt álló rendszer egy olyan validációs rendszert próbál meg létrehozni, mely képes komplex mozgások végrehajtásával vizsgálni MEMS inerciamérő szenzorokat, annak érdekében, hogy képességük és a katalógusban meghatározott paramétereik validálásra kerüljenek. A rendszer egyik kulcsfontosságú feladata lesz, egy olyan optimális szűrő megtalálása, mellyel maximalizálható lesz a pozíciómeghatározás pontossága. A feladat megvalósítása azért is zajlik az ROS keretrendszeren belül, mert az elkészülő és sikeres szűrő node-ok így egyből integrálhatók lesznek a SZE Energy Team önvezető járműfejlesztési feladataihoz.

6. További fejlesztési irányok

A dolgozat jelenlegi kidolgozottsága nagyrészt elméleti, melyet a következő féléves időszakban szeretnék elmélyíteni a Kálmán szűréssel kapcsolatosan, valamint megalkotni a gyakorlatban is, nagy figyelmet fektetve az állapotterezs modell leírásra és a zajmátrixokra.

A dolgozatban korábban említett ABB szimulációs környezetet később V-REP-re is kívánom kiterjeszteni, hogy megvizsgáljam, kiváltható-e, az ipari robotkar digitalizált formában, valamint hogy kiváltható-e tetszőleges MEMS szenzor a modelljének és karakterisztikájának paraméterbevitelével, ezáltal áthelyezve a komplett validációt és szűrőtervezést a virtuális környezetbe.

Köszönetnyilvánítás

A TMDK feladat elkészítését az EFOP-3.6.1-16-2016-00017 azonosító számú, „Nemzetköziesítés, oktatói, kutatói és hallgatói utánpótlás megteremtése, a tudás és technológiai transzfer fejlesztése, mint az intelligens szakosodás eszközei a Széchenyi István Egyetemen” című projekt támogatta.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Hivatalos állami weboldal a GPS-ről:
<https://www.gps.gov/>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [2] Hivatalos az EU által készített 2018-as jelentés a GNSS rendszerről:
<https://galileoignss.eu/wp-content/uploads/2018/10/gnss-user-tech-report-2018.pdf>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [3] Papp-Váry Árpád: *Térképtudomány*
Kossuth kiadó Zrt. (2007), p. 203-204, ISBN: 978-963-09-5511-9
- [4] NovAtel Inc.: *Navigation attitude basics*
<https://www.novatel.com/solutions/attitude/>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [5] P. Rai-Choudhury: *MEMS and MOEMS Technology and Applications*
SPIE Press. (2000), p. 5, ISBN: 9780819437167
- [6] Rob O'Reilly-Huy Tang-Wei Chen: *High-g Testing of MEMS Devices, and Why*
IEEE SENSORS 2008 Conference, p. 148-149
- [7] Inerciális mérőegységek kiértékelése:
https://m.eet.com/media/1166674/26170-tmw_1111_f4_imu.pdf
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [8] Dr. Budó Ágoston: *Kísérleti Fizika I*
Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest (1968), p. 181-186.
- [9] Tél Tamás: *A Coriolis-erő és a modern környezetfizika: A lefolyótól a ciklonokig*
Eötvös Loránd Fizikai Társulat: Fizikai Szemle, LVI. évfolyam, 8.szám p.263.
- [10] A. D. King: *Inertial Navigation – Forty Years of Evolution*
GEC REVIEW, VOL. 13, NO. 3, (1998), pp. 140-149.
- [11] Makan Gergely: *Versenykajak mozgásának mérése és a mért jelalakok analízise*
MSc Diplomamunka: Szegedi Tudományegyetem, Kísérleti Fizika Tanszék, 2012
- [12] NovAtel Inc.: *IMU Errors and Their Effects*
NovAtel Inc., Calgary, Canada (2014), ISBN: 978-0-9813754-0-3, p. 62-65.
- [13] Almár Iván, Horváth András: *Űrhajózási Lexikon*
Akadémiai Kiadó, Budapest, (1984), ISBN: 9633265444, p. 431.
- [14] Tóth Szilvia Ágnes: *Kvaterniók*
BSc Diplomamunka, ELTE, Algebra és Számelmélet Tanszék, 2010
- [15] MEMS szenzorok piaci helyzete:
<http://www1.semi.org/en/sharply-falling-mems-prices-spurring-demand>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.

- [16] SPEA cég által gyártott mérő cella leírása:
<https://www.spea.com/products/integrated-mems-sensors-test-cell/>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [17] COHU cég által gyártott IMU mérő cella leírása:
https://www.cohu.com/wp-content/uploads/2019/06/InGyro_Fact-Sheet-11_2018.pdf
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [18] Wenhong Tian, Yong Zhao: *Big Data Technologies and Cloud Computing*
Optimized Cloud Resource Management and Scheduling, Morgan Kaufmann, 2015
p. 38-39, ISBN 9780128014769
- [19] Gulyás Péter: *Inerciális navigáció egy modelljárművön*
TMDK dolgozat, Széchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék, 2018/19 ősz
- [20] Lentin Joseph: *ROS Robotics Projects*
Packt Publishing, (2017), p 1-20, ISBN: 978-1-78355-471-3
- [21] ROS – ABB szerver telepítés leírása:
<http://wiki.ros.org/abb/Tutorials/InstallServer>
Utolsó látogatás: 2019.november 9.
- [22] Interjú Jack Crenshaw-val:
<http://www.trs-80.org/interview-jack-crenshaw/>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [23] Kálmán-szűrő bevezetése:
<https://towardsdatascience.com/kalman-filter-an-algorithm-for-making-sense-from-the-insights-of-various-sensors-fused-together-ddf67597f35e>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [24] Dr. Bokor József, Dr. Gáspár Péter, Dr. Szabó Zoltán: *Irányításelmélet*
TÁMOP-4.1.2 A1 és a TÁMOP-4.1.2 A2 könyvei, 2014
Diszkrét idejű rendszerek irányítása és a Kalman-szűrő
https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0042_iranyitaselmélet/ch16s04.html
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [25] R.V. Garcia, P.C.P.M. Parda, H.K. Kuga, M.C. Zanardi: *Nonlinear filtering for sequential spacecraft attitude estimation with real data: Cubature Kalman Filter, Unscented Kalman Filter and Extended Kalman Filter*
Advances in Space Research, Volume 63, Issue 2, 2019
p 1038-1040, ISSN 0273-1177,

8. Ábrajegyzék

- [A1] <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [A2] <https://s.septobars.com/mpu6050-HD.jpg>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [A3] Todaro Maria, Sileo Leonardo, Vittorio Massimo: *Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology*, p118 – Figure 16.
https://www.researchgate.net/publication/221927745_Magnetic_Field_Sensors_Based_on_Microelectromechanical_Systems_MEMS_Technology
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [A4] <https://www.spea.com/products/integrated-mems-sensors-test-cell/>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [A5] https://www.cohu.com/wp-content/uploads/2019/06/InGyro_Fact-Sheet-11_2018.pdf
Utolsó látogatás: 2019.november 10.
- [A6] <https://www.kalmanfilter.net/kalman1d.html>
Utolsó látogatás: 2019.november 10.