



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Zsiga Bálint

**INERCIÁLIS NAVIGÁCIÓS BERENDEZÉS HARDVER- ÉS
SZOFTVERKÖRNYEZETÉNEK KIALAKÍTÁSA**

KONZULENS

Sujbert László - BME MIT

Vanek Bálint - MTA SZTAKI

BUDAPEST, 2013

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract.....	6
1 Bevezetés	7
1.1 A fejlesztés célja	8
2 A fejlesztés hátterének áttekintése	9
2.1 Az inerciális navigáció rövid története	9
2.2 Az inerciális érzékelők.....	9
2.2.1 Koordináta rendszerek	10
2.2.2 A gyorsulásmérők ismertetése	11
2.2.3 A giroszkópok ismertetése.....	12
2.3 Inerciális érzékelők kalibrációja	12
2.3.1 A gyorsulásmérők hibaforrásai	13
2.3.2 A giroszkópok hibaforrásai.....	13
2.4 Kalibrációs eszköz	14
2.4.1 Hasonló alkotások.....	14
2.4.2 Fizikai leírás.....	16
2.4.3 Matematikai leírás.....	18
2.5 SZTAKI szervó bemutatása.....	21
2.6 A kalibrálandó IMU	22
3 A fejlesztés lépései	25
3.1 Mikroszámítógépes megvalósítás	25
3.1.1 A számítógép és a kalibrációs eszköz közti kommunikáció megvalósítása ..	25
3.1.2 A számítógép oldali vezérlő szoftver.....	30
3.2 SZTAKI szervó fejlesztése	36
3.2.1 A mágneses enkóder hibája és annak kompenzálása.....	36
3.3 A kalibrációs algoritmus lépései.....	39
3.3.1 A szenzor hibamodellje	39
3.3.2 A kalibráció.....	41
3.3.3 Az optimalizáció	41
4 Mérések és eredmények.....	44
4.1 A paraméterek meghatározása	44

4.2 A paraméterek tesztelése	49
4.3 Pozíciótól és orientációtól független működés	51
4.4 Hőmérsékletfüggés	55
5 Továbbfejlesztési lehetőségek	57
6 Összefoglalás.....	58
Irodalomjegyzék.....	60

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Zsiga Bálint**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2013. 05. 23.

.....
Zsiga Bálint

Összefoglaló

A kisméretű, önálló működésű járműmodellek fontos részét képezik napjaink kutatás-fejlesztésének. Ezek egyrészt lehetővé teszik új technológiák kipróbálását, a későbbiekben valódi járműveken alkalmazandó megoldások kifejlesztését, tesztelését, másrészt manapság önmagukban is egyre szélesebb körben nyernek alkalmazást. Egy jármű irányításához nélkülözhetetlen pozíciójának és orientációjának pontos ismerete. Ezt a feladatot látja el az inerciális mérőegységet (IMU) tartalmazó navigációs rendszer. A SZTAKI-ban fejlesztett IMU MEMS szenzorokat tartalmaz, melyek előnyei, hogy kisméretűek, kis fogyasztásúak, olcsók és egy tokon belül három tengelyen képesek gyorsulást és szögsebességet mérni. Kimenetük viszont zajjal terhelt és hőmérsékletfüggő, ezért használatuk előtt kalibrálni kell őket. Jelen szakdolgozat egy olyan eszköz fejlesztésének a lépéseit mutatja be, mellyel ez a feladat gyorsan és pontosan elvégezhető.

Ez az eszköz egy két szabadságfokú gimbal, melynek segítségével az IMU tetszőleges orientációba mozgatható. A tengelyeket a SZTAKI saját fejlesztésű aktuátorai forgatják, melyek eredetileg autonóm modellrepülőkhöz készültek. A hozzájuk tartozó szervószabályzó rendszer rendkívül pontos szög és szögsebesség szabályzásra képes, továbbá a beállított pozíciót egy mágneses pozíció jeladón keresztül visszaméri, aminek segítségével lehetőség van a kalibrálandó IMU gyorsulás és szögsebesség referenciájának meghatározására. A referenciák ismeretével pedig elkészíthető egy olyan algoritmus, amellyel a szenzorok kalibrációs paraméterei meghatározhatóak.

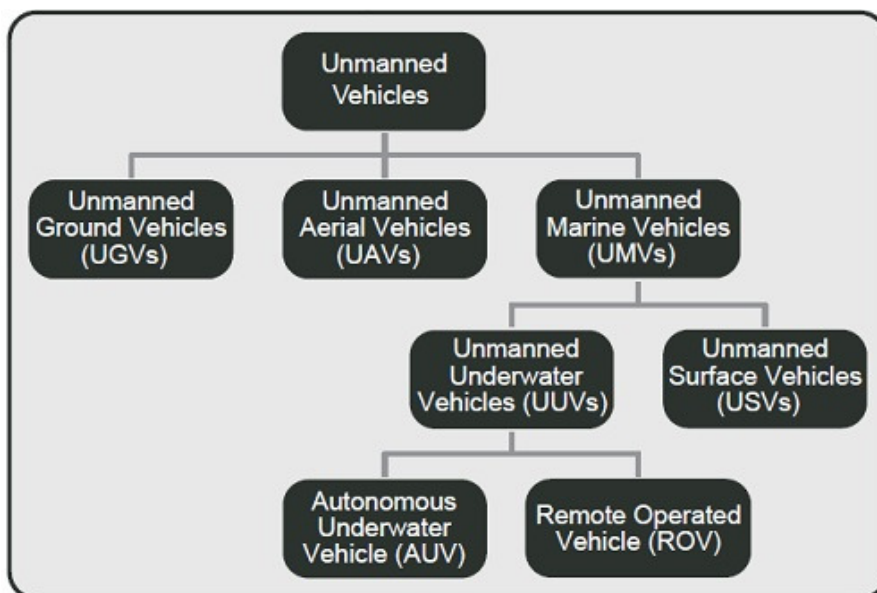
Abstract

Small sized, unmanned vehicle (UV) models are an important part of recent research and development trends. They enable testing new technologies, even those which are used in real vehicles of the future. In addition these UVs are applied in a wide range of applications. In order to guide the vehicle with onboard control algorithms it is essential to know its exact position and orientation. This information is supplied by a navigation system which often contains an inertial measurement unit (IMU). The IMU developed in SZAKI contains MEMS sensors, which have several advantages. They are small-sized, consume low-power, affordable, and able to measure three-dimensional acceleration and angular velocity. However their output is corrupted by noise and depends on the temperature, thus it is essential to calibrate them. This thesis presents the development steps of an active calibration device which is able to perform this task quickly and accurately.

This device is a gimbal, which has two degrees of freedom, so it is able to move the IMU into arbitrary orientation. The so called smart actuators developed in SZTAKI are used to rotate the axes. These actuators are equipped with an excessively accurate position and angular rate control. Furthermore the position of the actuators are measured by a magnetic encoder, so the acceleration and angular velocity reference of the IMU can be calculated. Finally an algorithm can be written with the help of these data to determine the calibrational parameters of the sensors.

1 Bevezetés

Egy inerciális mérőegység (IMU) különféle szenzorokat tartalmaz, köztük gyorsulás- és szögsebességmérőket, melyek arra szolgálnak, hogy egy test mozgásállapotának két időpont közötti relatív változását mérjék. Napjainkban számos modern rendszer navigációjának szolgálnak alapjául, ideértve a pilóta nélküli robot járműveket, akár földön, vízen vagy levegőben, melyek irányításához elengedhetetlen pozíciójuk és orientációjuk pontos ismerete. Emellett alkalmazzák még őket felhasználói felületekhez (távirányító, joystick) és emberi mozgáskövetéshez egyaránt.



1.1. ábra - Unmanned Vehicles [2]

Mindenek előtt egy IMU használatához, feltétlen szükség van kalibrációra. Ez azért fontos, mert a szenzorok érzékenységi tengelyeinek orientációja nagy valószínűséggel eltér az eszköz test koordinátarendszerének tengelyeitől. Ezt egyaránt okozhatják a gyártási (forrasztási) hibák, vagy akár maga a szenzorok tökéletlenségei is. Emellett az érzékelők skálázási (scale factor) és nulla pozíciós (offset) hibái is eltérhetnek a névleges értékektől, így azok meghatározása is szükséges.

Jelen szakdolgozat az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratóriumában folyó földi (autók) és légi (repülő, helikopterek) járművekkel kapcsolatos kutatások keretében mutat be egy olyan eszközt, mellyel IMU egységek kalibrációja gyorsan és egyszerűen kivitelezhető.

1.1 A fejlesztés célja

A fejlesztés célja egy olyan eszköz elkészítése, amely nagyban leegyszerűsíti a SZTAKI-ban jelenleg futó nagy megbízhatóságú pilóta nélküli project keretében Erdő András által tervezett IMU kalibrációját.[1] A berendezés a legújabb mikroelektromechanikus (MEMS) szenzorokat tartalmazza, melyek kis mérete és nagy gyorsasága mellett, számos analóg és digitális áramköri funkciót ellátó egységet tartalmaznak, valamint kimenetük teljesen digitális. Ezen felül egy szenzor már 3 tengelyű mérést is képes megvalósítani a régebbi inerciális szenzorokkal ellentétben, így a három tengely nem ortogonalitásából adódó hibák már sokkal enyhébbek ennél a rendszernél. A MEMS típusú gyorsulásmérő szenzorok általános előnyei, hogy kicsik, alacsony fogyasztásúak, olcsók és viszonylag megbízható eszközök. Azonban mérési eredményük sokszor zajjal terhelt, valamint egyéb paraméterektől is függ, melyek egy része további jelfeldolgozással kompenzálható.

A navigációs rendszer szenzorjainak kalibrálásához szükség van a kalibrációs paraméterek meghatározására. Az eddigiek során a paraméterek meghatározásához nem állt rendelkezésre hatékony eszköz, amellyel a szükséges mérések gyorsan elvégezhetőek lettek volna. Ugyan léteznek különböző módszerek, melyekkel kézzel beállított mérések alapján is meg lehet határozni a kalibrációs paramétereket, de ezek többnyire körülményesek és a kézi beállítások pontatlansága hibákhoz vezethet. Ennek kiküszöbölésére sok mérés elvégzésével csökkenthető a mérési és a beállítási szórásból adódó pontatlanság, azonban ez többnyire igen hosszadalmas és nagy odafigyelést igénylő feladat. Ezekon kívül az eddigi mérések és tapasztalatok azt támasztják alá, hogy a legtöbb kalibrációs paraméter – nem elhanyagolhatóan – hőmérsékletfüggő hatást is mutat. Ahhoz, hogy hőmérsékletre is kalibrálni lehessen, a szükséges méréssort több hőmérsékleten is el kell végezni, melyek még hosszadalmasabbá tennék a mérési procedúrát. Továbbá a későbbiek során több navigációs rendszert is meg szeretnénk valósítani. Ezen problémák megoldásául szolgál a szakdolgozatban bemutatott kalibrációs berendezés.

2 A fejlesztés háttérének áttekintése

2.1 Az inerciális navigáció rövid története

Az inerciális navigáció tudománya jóval a MEMS technológia megjelenése elé nyúlik vissza. Az első inerciális szenzorokat olyan rakétatervezők fejlesztették és tesztelték, mint Robert Goddard és Wernher von Braun a korai 1930-as években. Később a technológiát olyan intézményekben tökéletesítették, mint Draper Labs, ahol megalkották az első inerciális navigációs berendezést. Az űrrepülések nagy részének megvalósulását, többek között az Apollo programét is az inerciális navigáció tette lehetővé.[3]

A MEMS technológia megjelenéséig az inerciális szenzorok finommechanikai giroszkópokból és gyorsulásmérőkből álltak. A magas áruból kifolyólag, az inerciális érzékelés csak a legmodernebb repülőgép-ipari alkalmazások kiváltsága volt. Azonban az évek múlásával a MEMS inerciális szenzor technológia megjelenésével, azok olcsó és elérhető alternatíváivá váltak a régebbi mechanikus inerciális szenzoroknak. Ugyan a MEMS alapú szenzorok alacsonyabb összeteljesítményt nyújtottak mechanikus alternatíváiknál, méretük, fogyasztásuk és áruk viszont jelentősen alacsonyabb volt.[3]

2.2 Az inerciális érzékelők

Az inerciális navigáció inerciális mennyiségek mérésén és ezek feldolgozásán alapul. Inercia-rendszer az a koordináta-rendszer, amelyben érvényesek Newton mozgástörvényei, vagyis az a rendszer, amelyik nem gyorsul és nem forog. Inerciális mennyiségeknek nevezzük az előbbi koordináta-rendszerben értelmezett gyorsulásokat, szöggyorsulásokat és szögsebességeket. Az inerciális navigáció alapja, hogy a pozíció és az orientáció ezek idő szerinti integrálásával meghatározható. Az orientációt kivéve, a rendelkezésre álló érzékelőink a testek mozgásállapotát jellemző inerciális mennyiségek mérésére szolgálnak (földi navigáció esetén a Föld középpontjába képzelt koordináta-rendszer tekinthető inercia-rendszernek)[7][8]:

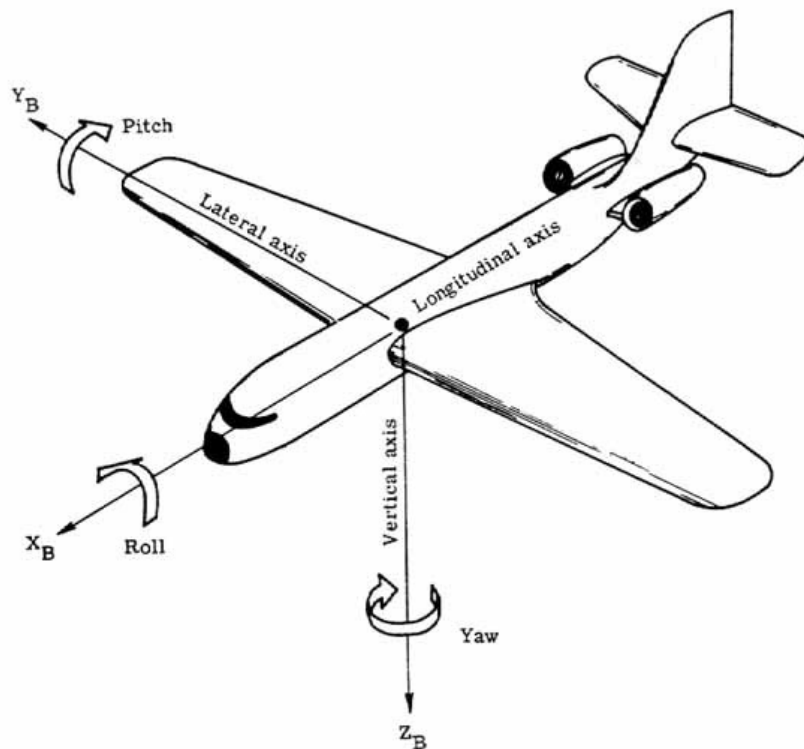
- Gyorsulásérzékelők szolgálnak a haladó mozgás gyorsulásának mérésére
- Giroszkópok szolgálnak a forgó mozgás szögsebességének mérésére

Ezeket összefoglalóan inerciális érzékelőknek nevezzük.[4]

2.2.1 Koordináta rendszerek

Az inerciális mennyiségek egy adott vonatkoztatási rendszerben érvényesek, ahol érvényesülnek a klasszikus fizika törvényei. Földfelszíni vagy légköri mozgások esetén tekinthetjük a Földet is inercia-rendszerként.

Földfelszíni alacsony sebességű mozgások esetén közelíthetjük a Föld felszínét síkkal. Ekkor egy adott pontban az északi, a keleti és a Föld középpontja felé mutató vektor egy inercia-rendszert határoz meg. Ezt a vonatkoztatási-rendszert nevezzük NED-nek (North-East-Down), melynek az origója a földfelszínen van. Légköri mozgások esetén használatos az ECI (Earth-Centered Inertial) inercia-rendszer. Ennél a leírásnál a Föld gömbnek tekintett, ahol az origó a gömb középpontja, és a Föld tengelye a távoli csillagokhoz van rögzítve. Ennek egy egyszerűsített rendszere a Földdel együtt forgó ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) rendszer. Itt az Északi-sark irányába mutat a Z tengely, az erre merőleges, az egyenlítő egy pontján átmenő irány az X tengely, továbbá az X és a Z tengelyt jobbsodrású rendszerré kiegészítő irány az Y tengely. Ezen kívül gyakran használatos még a WGS-84 (World Geodetic System), ami a földet már ellipszoid modellként tekinti. Ebben a rendszerben egy objektum pozícióját földrajzi koordinátákkal, és a tengerszint feletti magasságával definiálhatjuk.[1]



2.1. ábra - Test-koordinátarendszer

A navigáció során a feladat az inercia-rendszer és a vizsgált objektum egymáshoz viszonyított pozíciójának és sok esetben az orientációjának a meghatározása. Ennek leírásához szükséges definiálni egy az objektumhoz rögzített test-koordinátarendszert. Ennek középpontját az objektum középpontjában szokás meghatározni, továbbá a járművek esetében az alábbi megfeleltetés vált érvényessé: az X tengely az általános haladási irány felé (előre) mutat. Az e tengely menti forgást nevezzük orsózásnak (roll). Az Y tengely erre merőlegesen, a test jobb oldala felé mutat, e tengely menti forgást nevezzük bólintásnak (pitch). Továbbá a Z tengely az X és Y tengelyt jobb sodrású rendszerré egészíti ki, tengely menti forgását pedig legyezésnek (yaw) nevezzük (2.1. ábra - Test-koordinátarendszer). A választott inercia-koordinátarendszerrel és a test-koordinátarendszerrel már meghatározható az objektum térbeli pozíciója, és orientációja.

2.2.2 A gyorsulásmérők ismertetése

A főbb gyorsulásérzékelő-kialakítások, azok előnyei és hátrányai a következők [4]:

Piezokeramikus gyorsulásérzékelő: működési alapja, hogy a piezokeramikus kristályban nyomás, vagy nyírás hatására az erőhatással arányos mennyiségű töltés keletkezik, amely mérhető. Kisméretű, kis tömegű, viszont statikus gyorsulások mérését nem teszi lehetővé, ezért pontos pozíció-meghatározásra nem alkalmas.

Függő gyorsulásérzékelő: egy csukóra rögzített tömeget tartalmaz, amely gyorsulás hatására a gyorsulással ellentétes irányába igyekszik elmozdulni. Ennek megakadályozásához egy ezzel ellentétes erő kifejtése szükséges, amely arányos a tömegre ható gyorsulással.

Mikromegmunkálású (MEMS) gyorsulásérzékelő: működési elve egy szilíciumkristályon kialakított rezgő tömeg által, a gyorsulás hatására előidézett ellenállás- vagy kapacitásváltozás detektálásán alapul. Statikus gyorsulások mérésére is alkalmas. Előnye, hogy kisméretű, kis fogyasztású, nagy megbízhatóságú, viszonylag olcsó eszköz. További előnye, hogy egy eszköz több, akár három tengely irányában történő mérésre is alkalmas. Hátránya lehet, hogy kimenete zajjal terhelt és hőmérsékletfüggő.

2.2.3 A giroszkópok ismertetése

A főbb giroszkóp-kialakítások, azok előnyei és hátrányai a következők [4]:
Mechanikus giroszkóp: működése egy gyűrűrendszer (gimbal) belsejében elhelyezett, forgómozgást végző test (pörgettyűs) impulzusmomentumának megmaradásán alapul. Ez volt az első formája a giroszkópoknak. Precíziós formában drága, nagyméretű és érzékeny szerkezet, ezért közúti járművekben ritkán alkalmazzák, hajókon, repülőgépeken viszont elterjedt.

Rezgőelemes giroszkóp: alapelve, hogy egy rezgésbe hozott rugalmas, piezokeramikus rúd forgatása esetén a fellépő Coriolis-erő a rákényszerített rezgésre merőleges irányú deformációt okoz. A deformáció hatására fellépő elektrosztatikus töltés mérhető.

Lézer-giroszkóp: működése egy szolenoid alakban feltekercselt optikai száliba két irányból bebocsátott lézersugarak interferenciaképének detektálásán alapul, amely a szolenoid forgatási sebességével változik. Ma a legpontosabb szögsebesség-érzékelés, ezzel a típussal érhető el. Ára elég magas, így inkább csak mérő-kalibráló eszközként, valamint a repülésben és hadiiparban használatos.

Mikromegmunkálású (Micro Electromechanical Systems – MEMS) giroszkóp: működési elve az, hogy egy szilícium kristályon, integrált áramkört gyártástechnológiával kialakított mikroméretű elektromechanikai rezgő rendszer forgatása közben arra Coriolis-erő hat. A hatás ellenállás- vagy kapacitás-változáson keresztül detektálható. Előnye, hogy kisméretű, kis fogyasztású, nagy megbízhatóságú, viszonylag olcsó eszköz. Hátránya lehet, hogy kimenete zajjal terhelt és hőmérsékletfüggő.

2.3 Inerciális érzékelők kalibrációja

Jelen szakdolgozatban a SZTAKI-ban fejlesztett inerciális mérőegységen tetszőleges pozícióban és orientációban elhelyezett gyorsulás- és szögsebességmérő szenzorok kalibrálása a cél. A kalibrálás ebben az esetben a nulla pozíciós (offset), skálázási (scale factor) és orientációs hiba meghatározása az egyes szenzoroknál.

2.3.1 A gyorsulásmérők hibaforrásai

A gyorsulásmérők szisztematikusnak tekinthető hibaforrásai lehetnek állandó, vagy változó jellegűek. Állandó jellegű hibának tekinthetők a szenzorok felépítéséből származó hibák. A háromdimenziós gyorsulásmérők esetében az egyik legfontosabb ilyen hibaforrás lehet, hogy a mérési tengelyek nem tökéletesen merőlegesek egymásra. Az egyes tengelyek közötti mérésben ez áthallást eredményez (misalignment). Az ortogonalitás hiányának következményeként, a nem ideális irányú tengelyek mérési eredményeiben, lineáris függéssel megjelennek más tengelyek mérési eredményeinek komponensei is. (Több egytengelyű szenzort tartalmazó áramkörökön ezt a hibát a szenzorok elhelyezési és forrasztási pontatlansága is okozhatja.) A mérés erősítése is lehet állandó jellegű hibaforrás, mely meredekségi hibákat okoz (scale). (Kisebb mértékben ez is függ más változóktól, például a tápfeszültség és a hőmérséklet értékétől.). Általában a MEMS típusú gyorsulásmérők erősítési hibájának nem linearitása elhanyagolható. A háromdimenziós gyorsulásmérőkben a különböző tengelyek különböző nagyságú erősítési hibájának következtében, a mért eredő gyorsulás értéke függ az orientációtól. Egyes hibák nem tekinthetőek állandó jellegűnek, ezek változó hibák, de sok esetben egyéb mérhető mennyiségektől való függésük állandó. Ilyen hibának tekinthető az nulla pozíciós (offset) hiba, melynek a forrása lehet a szenzor tápfeszültségének vagy hőmérsékletének változása. Az offset ezekről való függése sokszor kisebb változásokat mutat, de a gyakorlatban, adott intervallumokban állandónak tekinthető.[1]

2.3.2 A giroszkópok hibaforrásai

A gyorsulásmérőkkel analóg módon, a MEMS giroszkópok is tartalmaznak nulla pozíciós (offset) hibákat. Esetükben ezek hatása tekinthető a legnagyobb mértékűnek. Nagyságuk hőmérsékletfüggő, melytől való függésük a gyakorlatban lineárisnak tekinthető. Az offset hatása hibát eredményez a szögsebesség integrálási eredményéből becsülhető orientációban, mely az idővel folyamatosan nő. A gyakorlatban kisebb mértékű hibának tekinthető a MEMS giroszkópok erősítési hibája. Ennek értéke is hőmérsékletfüggő, melytől való függése nemlineáris. Az giroszkópok erősítési hibájának hatása legnagyobb mértékben a dinamikus manőverek lekövetésének becsléseiben okoz hibát. A gyártási hibából adódóan, a nem egytengelyűség itt is további relatíve kisebb mértékű hibákhoz vezet. A szögsebességmérők kialakításától

függően különböző irányból ható gyorsulások különböző mértékű hibákat okoznak. Ez alapvetően a MEMS giroszkópok struktúrájából ered, melyben a „mérőtestre” a gyorsulás miatt erő hat, ami befolyásolja szögsebességmérés eredményét. Mivel felépítésükből következően nem gömbszimmetrikus elemeket tartalmaznak, különböző gyorsulási irányokra és nagyságokra különböző mértékű mérési változást eredményeznek. Amennyiben ennek a karakterisztikája ismert, valamint ha a gyorsulás nagysága és iránya is ismert, ez a hiba kompenzálható. A szükséges kompenzáció mértéke a gyakorlatban állandónak tekinthető, így ez a hibaforrás is állandó jellegű hibának tekinthető. Ennek hatása is ofszet hibát okoz.[1]

2.4 Kalibrációs eszköz

Az egy szabadságfokú gimbal egy olyan eszköz, amely biztosítja egy objektum szabad forgását egy tengelye körül. A több szabadságfokú gimbalok egymásba ágyazott gimbalok, melyek forgástengelyei ortogonálisak egymásra. Amennyiben egy három szabadságfokú gimbal forgástengelyei egymástól függetlenül vezérelhetőek, a gimbalon elhelyezett objektum már tetszőleges orientációba állítható, ezáltal forgatható is egy tetszőleges tengelye körül.[1] A szakdolgozatban egy két szabadságfokú gimbal kerül bemutatásra.

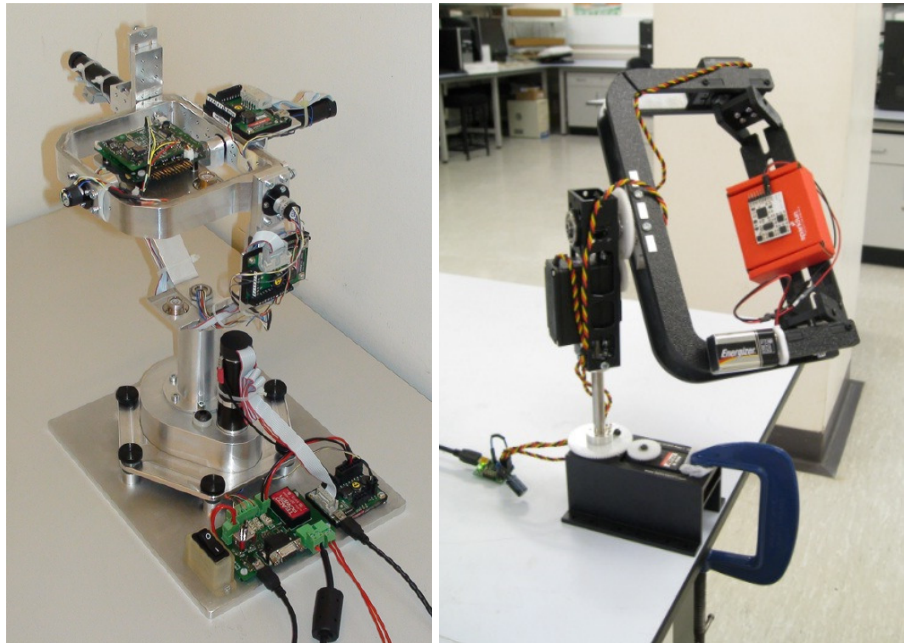
2.4.1 Hasonló alkotások

A kereskedelmi forgalomban elérhető iparban is alkalmazott, hitelesített kalibrációs berendezések ára igen magas.[10] Ezekon kívül más elérhető eszközök, amelyek a feladatra alkalmazhatóak lennének, olyan hiányosságokkal rendelkeznek, melyek egyértelművé teszik a fejlesztés aktualitását. Vannak olyanok, melyek mérési pontossága nem megfelelő, vagy szerkezetük úgy lett kialakítva, hogy folyamatos forgatás nem kivitelezhető velük.[11][12][13] Sebastian O.H. Madgwick tanulmányában például egy olyan rendszert mutat be, melynek hátránya a pozícionálhatóság limitáltsága.[12][14]



2.2. ábra - Acutronic kalibrációs berendezés

Vannak rendszerek, melyek a mozgáshoz lineáris aktuátorokat használnak, de ezek szerkezetének és vezérlésének megalkotása bonyolult feladat. Előnyük, hogy a kalibrálandó eszközök lineárisan mozgathatóak velük, így lehetőség nyílik $1g$ -nél nagyobb gyorsulás elérésére, ami a forgáson alapuló rendszereknél csak a centripetális gyorsulás segítségével valósítható meg.[15] Az forgó aktuátorokat tartalmazó gimbal berendezések jellemzőbbek a feladat elvégzésére, de szerkezetük változó, általában 1-3 szabadsági fokkal rendelkeznek. Ezeknél a rendszereknél a gravitációs erő segítségével kalibrálják a gyorsulásmérőket.[5][6]



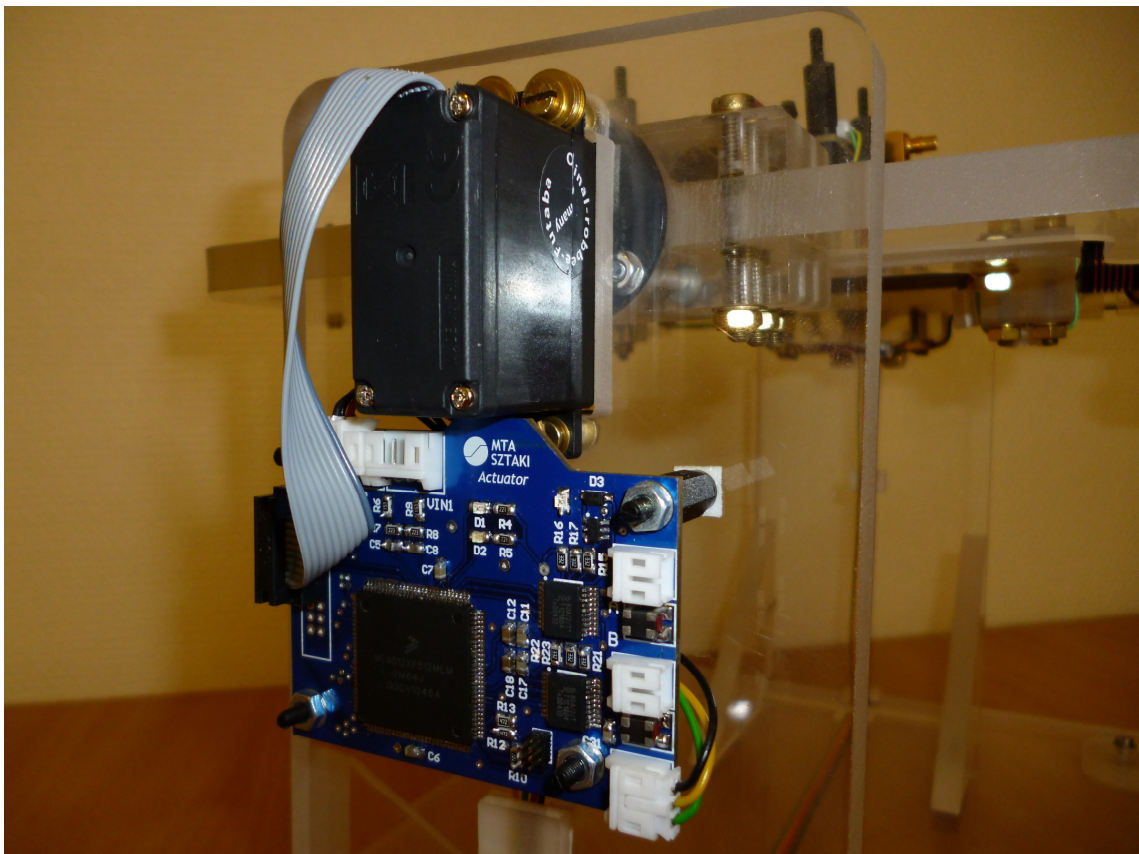
2.3. ábra – Bal: Madwick tanulmányában bemutatott készülék[14]

Jobb: ETH Zurich Autonomus Systems Lab Gimbal[5]

Egy teljesen más platformon alapuló módszer, mikor a kalibrálandó IMU-n markereket helyeznek el, manuálisan mozgatják azt és képfeldolgozás segítségével végzik el a paraméterek meghatározásához szükséges méréseket.[16][17]

2.4.2 Fizikai leírás

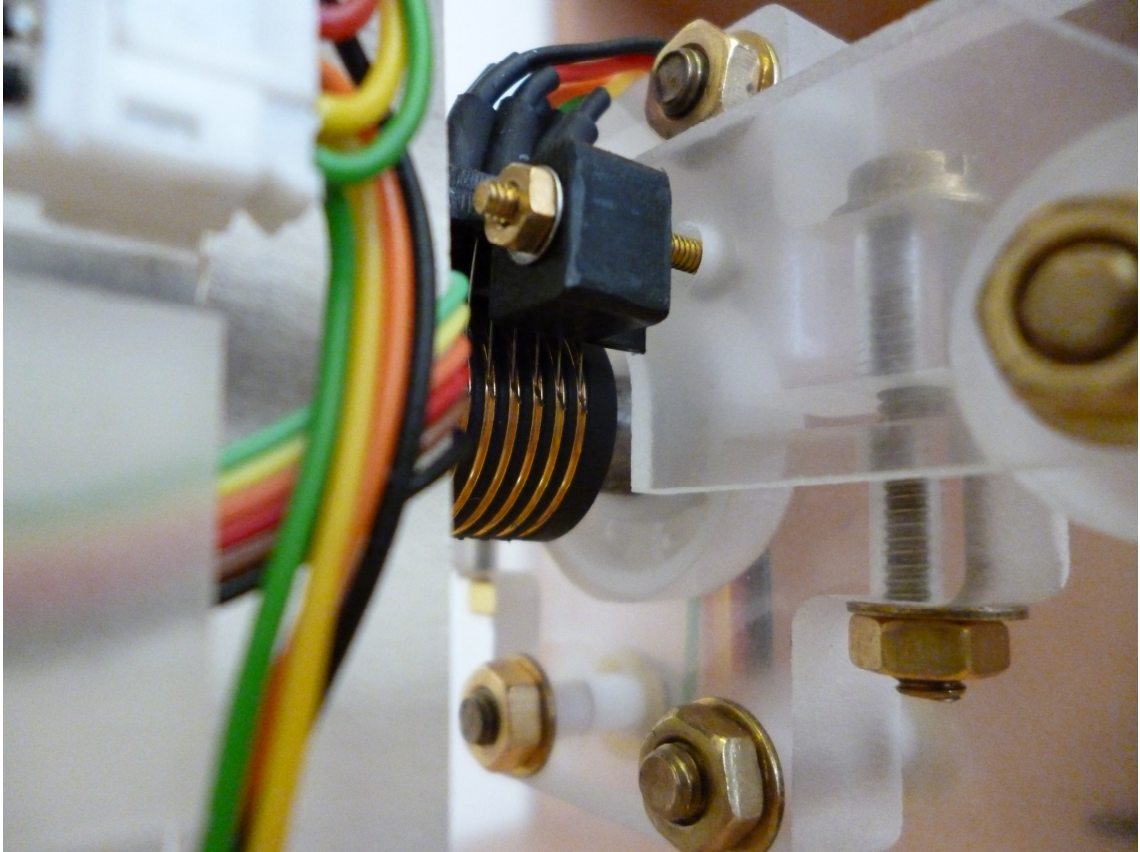
A szakdolgozat témájául szolgáló két szabadságfokú gimbal legfontosabb alkotóelemei, a tengelyeket forgató aktuátorok, azaz a SZTAKI-ban fejlesztett átalakított szervók és szervószabályzók, melyek eredetileg autonóm modellrepülőkhöz készültek. Ez a szervószabályzó rendszer rendkívül pontos szög és szögsebesség szabályzásra képes. CAN és FlexRay kommunikációs interfészeket keresztül vezérelhető, továbbá a beállított pozíciót egy mágneses pozíció jeladón keresztül visszaméri, majd a CAN és FlexRay buszra helyezi. Részletesebb bemutatása a 2.5 pontban található.



2.4. ábra – A külső forgórészt mozgó SZTAKI aktuátor

A két tengely tetszőleges számú szabad körfordulása érdekében, a belső tengelyt forgató aktuátoroknál és a gimbalon elhelyezett navigációs rendszernél csúszógyűrűk látják el a forgó és az álló részek közötti elektromos kapcsolatot. A

feladatot egy LPS-06 típusú csúszógyűrű látja el (2.5. ábra), melynek hat elszeparált gyűrűje van és ezek mindegyike 2A áramig terhelhető, valamint maximálisan százas percenkénti fordulatszámom üzemeltethető.



2.5. ábra - A csúszógyűrű

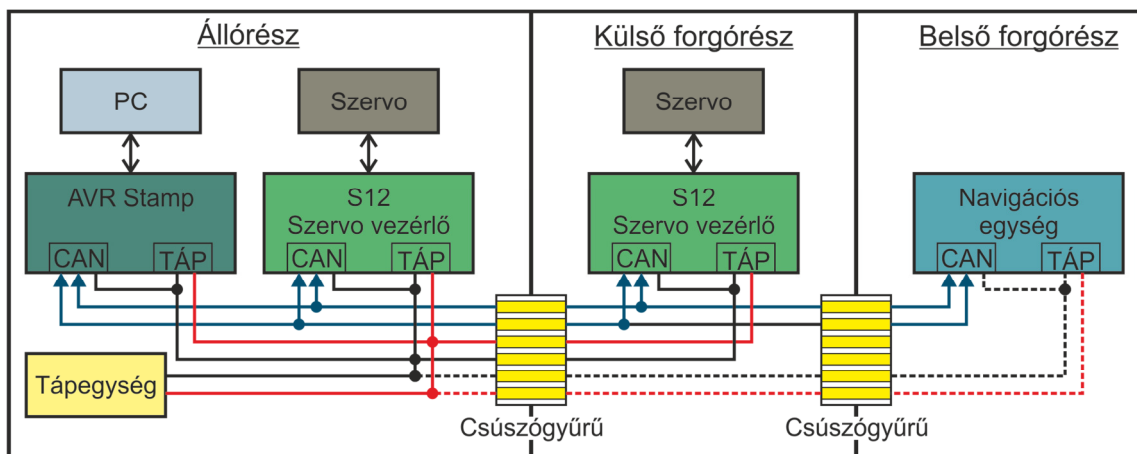
A gimbal szerkezetéhez felhasznált anyagok nem ferromágnesesek (műanyag csapágyak, sárgaréz csavarok és anyák), így lehetővé teszik a mágneses szenzorok esetleges kalibrációját. A ház 1 cm vastagságú plexiből, a tengelyek saválló acélből készültek.

A tervezés során az egyik legfontosabb szempont, az egytengelyűség szem előtt tartása volt. Ez azt jelenti, hogy a gimbalban ugyanahhoz a forgástengelyhez tartozó tengelyrészek tengelyvonalai pontosan egymásba kell, hogy essenek. A belső forgórész esetében ez nem jelent problémát, mert ott egy darab rúdból áll a tengely, mely a két végpontján van felfüggesztve. Az egyik oldalon egy műanyag csapággal, a másik oldalon a szervó rögzítésével. A külső forgórészt azonban nem lehetett megoldani egy tengelyből, mert akkor a belső forgórészt keresztezte volna. Így a két darab tengelyrész egytengelyűsége úgy lett biztosítva, hogy a külső forgórész összeszerelésénél a két tengely összeállítása egy darab egybefüggő tengellyel történt, majd a megfelelő

rögzítések után a tengely belső részét – ahol a belső forgórész van – ki kellett vágni. Ezáltal a két tengely egytengelyűsége biztosított.

A gimbal pontos vízszintbe állításához a szerkezet négy sarkán állítható talpak lettek elhelyezve.

A gimbal elektronikus rendszerének topológiája a 2.6. ábrán látható. A csúszógyűrűk által különválasztott három rész a gimbal álló része, a külső forgórésze, valamint a belső forgórésze.



2.6. ábra – Gimbal rendszer struktúra

A gimbal belső forgórészén helyet foglaló navigációs rendszer, valamint a két aktuátor vezérlő CAN interfészei egy buszra vannak kötve csúszógyűrűkön keresztül. Az aktuátorok, és a navigációs rendszer tápellátása külön szeparált tápvonalakon keresztül történik.

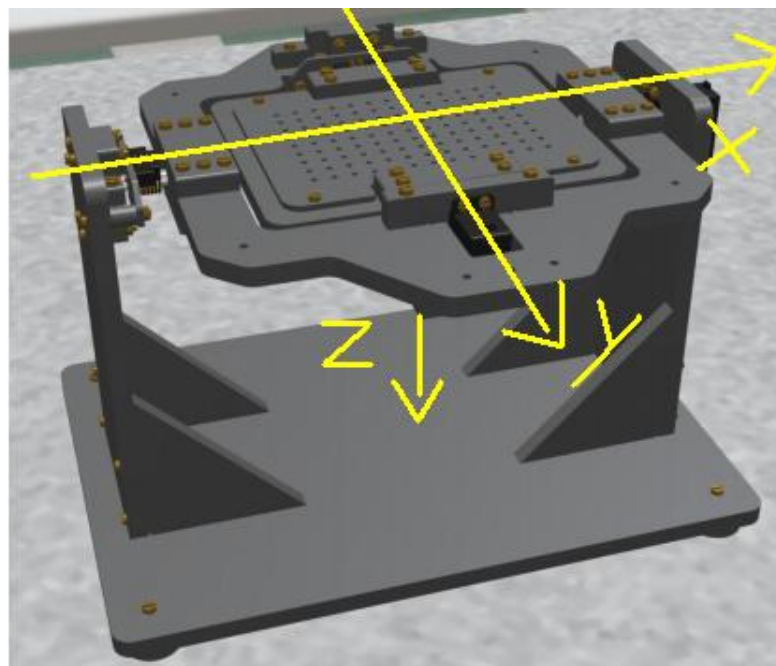
A gimbalon akár egyszerre több navigációs rendszer, vagy más mérőrendszer is elhelyezhető és használható, amennyiben azok CAN címtartományai nem ütköznek egymással. A jövőben a modellrepülőben használt kamerarendszer kalibrálását is ezen a gimbalon tervezik elvégezni. A CAN busz másik felén a gimbal rendszer vezérlése foglal helyet. Ezt a feladatot egy AVRStamp panel végzi, melynek részletes bemutatása 3.1.1-es fejezetben olvasható.

2.4.3 Matematikai leírás

A SZTAKI-ban készült gimbal két koncentrikus forgórészből áll. A belső forgórészre csavarok segítségével lehet felerősíteni a kalibrálandó inerciális mérőegységet tetszőleges pozícióban és orientációban. Az eszköz forgatására használt

aktuátorok képesek a tengelyek közötti szögek mérésére, melyek segítségével meghatározhatóak a valódi szögsebesség és gyorsulás adatok, melyek egyfajta referenciaként szolgálnak a kalibráció során.

A több szenzort tartalmazó IMU a mérések alatt rögzítve van egy **S** szenzor koordináta-rendszeren és a mozgását a gimbal rögzített **W** koordináta-rendszerében vizsgáljuk. A gyorsulásmérők és a giroszkópok szintén egy fix pozícióban és orientációban vannak rögzítve az **S** koordináta-rendszerben. A jobbkezes koordináta-rendszerek úgy lettek megválasztva, hogy a belső forgórész forog az $Y (0, 1, 0)^T$ a külső pedig az $X (1, 0, 0)^T$ tengely körül.



2.7. ábra – A gimbal rögzített **W** koordináta-rendszere

A kalibráció szempontjából lényeges, hogy az IMU a **W** koordináta-rendszerhez viszonyítva legyen felhelyezve, mert a folyamat során a paraméterek azok szerint lesznek meghatározva. A kiszámított referenciákkal pedig az IMU mozgása lesz szimulálva, ezért fontos, hogy azok az **S** koordináta-rendszerben legyenek meghatározva.

2.4.3.1 A valós szögsebesség meghatározása

Mivel a szögsebesség értéke egy adott forgórészen pozíciójától függetlenül ugyanakkora, a szögsebesség kiszámításánál az IMU pozíció vektorával nem kell foglalkozni, a gyorsulás számításával ellentétben. A kérdéses szögsebességeket pedig a

forgórészeket mozgató aktuátorok mérik, tehát az IMU referencia szögsebessége a θ'_{in} belső és θ'_{out} külső forgástengelyek szögsebességeiből adódik. Amire még szükség van, az egy olyan $R_{out \rightarrow S}$ forgatási mátrix, mely a külső forgórészt az **S** koordináta-rendszerre forgatja, melyen az IMU rögzítve van. Ez megegyezik a belső forgórésszel, tehát $R_{out \rightarrow S} = R_{out \rightarrow in}$.

$$\omega_{true}^{\vec{}} = \theta'_{in} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{out \rightarrow in} \cdot \theta'_{out} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A külső forgórész eltérése a belsőtől a θ_{in} szög az y tengely körül, tehát $R_{out \rightarrow in}$ az y tengely körüli θ_{in} forgatás.

$$\omega_{true}^{\vec{}} = \theta'_{in} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R_y(\theta_{in}) \cdot \theta'_{out} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

2.4.3.2 A valós gyorsulás meghatározása

Mivel **S** és **W** nem inerciális koordináta-rendszerek, ezért az $A_{true}^{\vec{}}$ valós gyorsulást haladó és forgó mozgások komponenseiből lehet megadni. A haladó mozgásokból adódó gyorsulás a gravitációs gyorsulásból $G_W^{\vec{}} = (0, 0, -9.81)^T$ és a \vec{h} lineáris gyorsulás komponenseiből adódik össze. A forgó mozgásból adódó, pedig a $C_{\alpha_S}^{\vec{}}$ centripetális és az $\alpha_S^{\vec{}}$ szöggyorsulásból, amelyek a szenzor **S** rendszerbe forgatott pozíció vektora $D_S^{\vec{}} = (d_x, d_y, d_z)^T$ mentén fejtik ki hatásukat ($D_W^{\vec{}}$).

$$A_{true}^{\vec{}} = G_S^{\vec{}} + \vec{h} + (\alpha_S^{\vec{}} \times D_S^{\vec{}}) + C_{\alpha_S}^{\vec{}}$$

A centripetális gyorsulás kifejezhető az IMU $\omega_S^{\vec{}}$ szögsebességének függvényében, aminek képlete az előző pontban lett felírva.

$$A_{true}^{\vec{}} = G_S^{\vec{}} + \vec{h} + (\alpha_S^{\vec{}} \times D_S^{\vec{}}) + (\omega_S^{\vec{}} \times (\omega_S^{\vec{}} \times D_S^{\vec{}}))$$

Mivel a gimbal szerkezete úgy lett kialakítva, hogy az egytengelyűség teljesül, az IMU csak forgó mozgást végez a gimbalban, így $\vec{h} = 0$. Haladó mozgás hiányában pedig az **S** és **W** rendszer koncentrikus marad, így $|D_S^{\vec{}}| = |D_W^{\vec{}}|$. Ahhoz, hogy az **S** koordináta-rendszerben vett gyorsulást az IMU-t bármely orientációba forgatva ki lehessen számolni, szükség van egy $R_{W \rightarrow S}$ forgatási mátrixra, amely a **W**-ben megadott gravitációs gyorsulást az **S**-re forgatja.

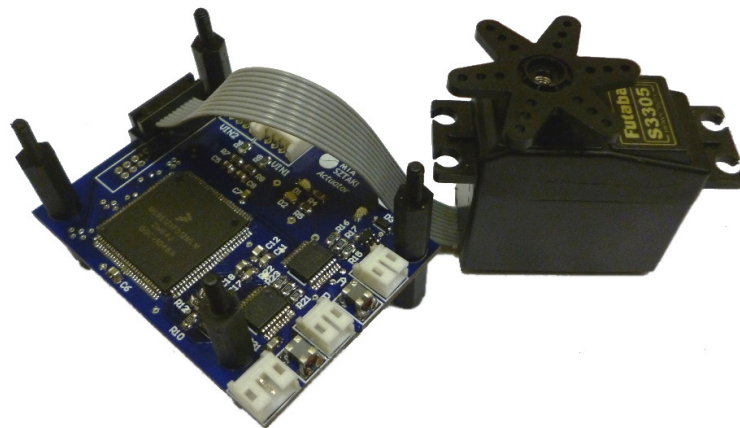
$$A_{true}^{\vec{}} = R_{W \rightarrow S} \cdot G_W^{\vec{}} + (\alpha_S^{\vec{}} \times D_S^{\vec{}}) + (\omega_S^{\vec{}} \times (\omega_S^{\vec{}} \times D_S^{\vec{}}))$$

Mivel a kalibráció során a forgatórészek egyenletes sebességgel lesznek mozgatva és az aktuátorok szögsebesség szabályozásából adódó egyenletlenségek is elhanyagolhatóak, a képletben a szöggyorsulással adott komponensre sincs szükség. $R_{W \rightarrow S}$ pedig a gimbal szerkezetéből és a rögzített koordináta tengelyeiből adódóan megegyezik egy Y körüli θ_{in} és egy X körüli θ_{out} forgatással.

$$A_{true}^{\vec{}} = \omega_{true}^{\vec{}} \times \left(\omega_{true}^{\vec{}} \times \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \right) + R_y(\theta_{in}) \cdot R_x(\theta_{out}) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

2.5 SZTAKI szervó bemutatása

A motorok belső elektronikája a SZTAKI saját fejlesztésű paneljével lett helyettesítve, amely a motor házán belül kapott helyet. Ez tartalmaz egy teljesítményelektronikát, amelyet kívülről egy PWM-jellel és egy irányválasztó logikai jellel lehet vezérelni, valamint egy mérőelektronikát. Egy-egy analóg csatornán keresztül lehet mérni a back EMF-jeleket és a pillanatnyi áramfelvételt, valamint egy mágneses enkóder segítségével mérhetjük a kimeneti tengely szöghelyzetét. Az enkóder SPI-interfészen keresztül tud kommunikálni.



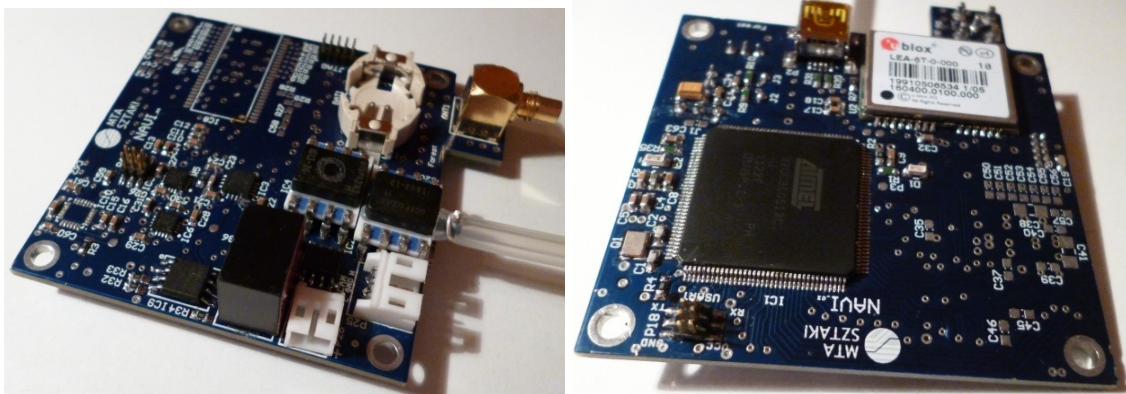
2.8. ábra - SZTAKI aktuátor

A szabályozás egy külső egységen, egy úgynevezett intelligens aktuátor panelen fut, amely szintén a SZTAKI saját fejlesztésű panelja, egy Freescale S12FX FlexRay-képes mikrovezérlő található rajta. A panel végzi az analóg csatornák mintavételezését és az SPI-vonal kezelését, futtatja a szabályozási kör számításait és vezérli a

teljesítményelektronikát. Az egység FlexRay és CAN hálózaton keresztül fogadja a referencia jeleket.[9]

2.6 A kalibrálandó IMU

A szakdolgozat folyamán kalibrálandó Erdő András által tervezett navigációs rendszer a 2.9. ábrán látható. Az áramkör négyrétegű nyomtatott huzalozással lett elkészítve.



2.9. ábra - Az inerciális navigációs berendezés

A navigációs rendszer digitális szenzorokból, GPS modulból, flash memóriából, sdram-ból, CAN illesztőből, egy vezérlőegységből és a hozzájuk tartozó kiegészítő áramkörökből áll:

Atmel **AT32UC3C0512C** 32 bites mikrokontroller

InvenSense **MPU-6050** digitális háromtengelyű gyorsulásmérő és giroszkóp

STMicroelectronics **LIS331DLH** digitális háromtengelyű gyorsulásmérő

STMicroelectronics **L3G4200D** digitális háromtengelyű giroszkóp

Honeywell **HMC5583** digitális háromtengelyű magnetométer

Honeywell **HSCMRRN001PD2A3** digitális differenciális légnyomásmérő

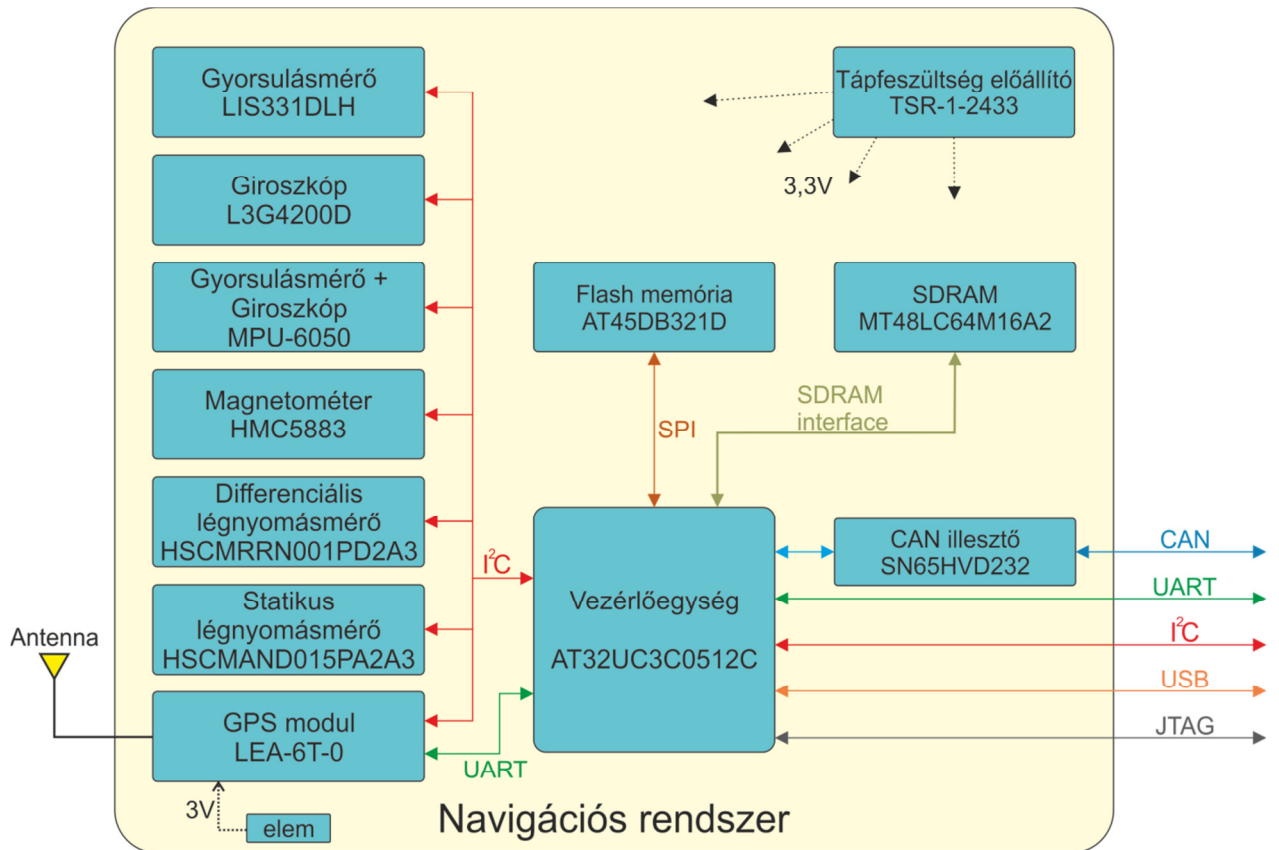
Honeywell **HSCMAND015PA2A3** digitális statikus légnyomásmérő

U-blox **LEA-6T-0** GPS modul

Atmel **AT45DB321D** 4MB flash memória

Texas Instruments **SN65HVD232** CAN illesztő

Micron **MT48LC64M16A2** 256 Mbit-es SDRAM.



2.10. ábra - Navigációs rendszer blokkvázlata

A vezérlő egység egy 32 bites Atmel AVR UC3C családjának AT32UC3C0512C típusú mikrokontrollere, mely beépített lebegőpontos számítási egységet (FPU) tartalmaz, így egy koprocesszor segítségével a 32 bites lebegőpontos szorzásokat és osztásokat egy-két órajel periódus alatt képes megvalósítani. A rendszer 3,3V-os tápfeszültség szintről működik, melyet egy TSR-1-2433 kapcsolóüzemű DC/DC konverter állít elő.

A szenzorok és a mikrokontroller egy közös I²C buszon kommunikálnak, ahol a mikrokontroller a master, valamint a szenzorok a slave egységek. A GPS modul is csatlakozik erre az I²C buszra, továbbá UART interfészen keresztül is lehetőség van vele kommunikálni. A flash memóriát SPI interfészen, az SDRAM-ot egy külön SDRAM vezérlőn (SDRAMC) keresztül tudja vezérelni a mikrokontroller. A GPS modulra külső antennát szükséges csatlakoztatni, valamint opcionálisan egy gombot is fel lehet használni a GPS modulban lévő memória tartalmának megtartása végett. A mikrokontroller JTAG porton keresztül programozható és debuggolható.

A navigációs rendszer a külvilággal CAN, UART, I²C, és USB interfészeken keresztül kommunikálhat. A CAN kommunikációhoz egy külön CAN illesztő van az áramkörben, továbbá a kimenetnél lezáró ellenállások és kondenzátor van elhelyezve, melyek egy forrasztható jumper-en keresztül választhatók le a buszról.[1]

3 A fejlesztés lépései

3.1 Mikroszámítógépes megvalósítás

3.1.1 A számítógép és a kalibrációs eszköz közti kommunikáció megvalósítása

A feladat része volt egy USB-CAN gateway kialakítása, mely biztosítja a kommunikációt a vezérlő PC és a szervó szabályzását végző Freescale S12FX-es panel között, mely flexray és CAN hálózaton keresztül képes fogadni a referencia jeleket.

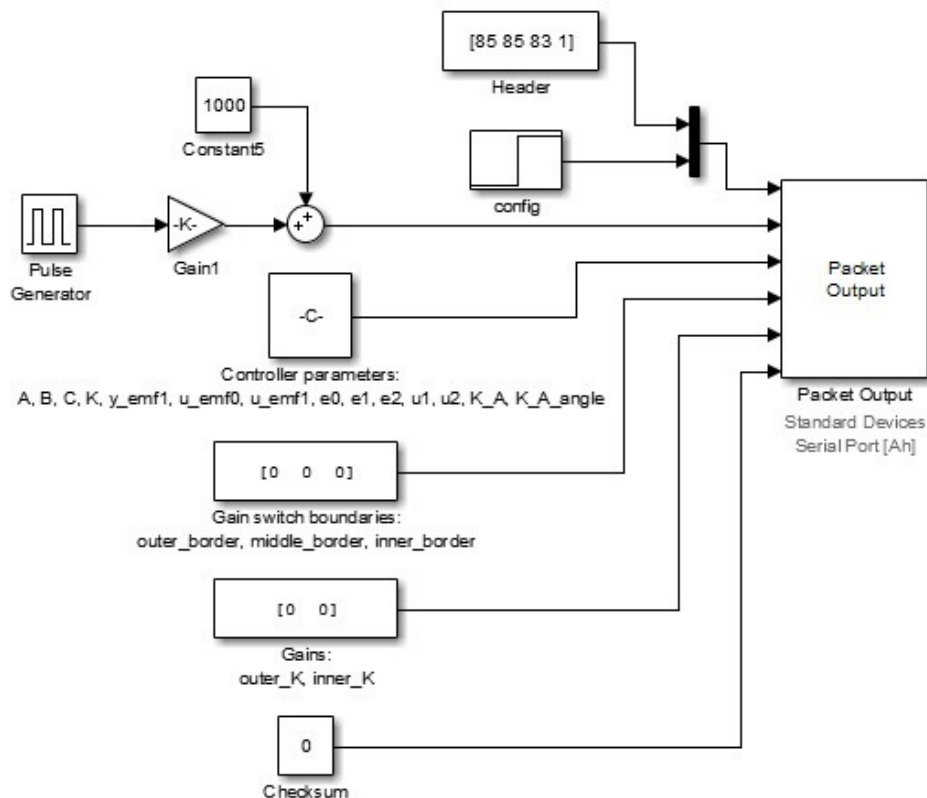
A célra az ePOSZ Kft. Avr Can Stamp modulja bizonyult megfelelőnek több szempontból is. Először is a termék rendelkezésre állt, így költségkímélő megoldás. Másodsor minden olyan hardver elemet tartalmaz, ami a feladathoz szükséges, így nem kell új nyákot tervezni, ami jelentős időt és energiát takarít meg. A fejlesztőpanelen helyet kapott egy at90can128-as CAN kommunikációra képes 8 bites mikrovezérlő, a CAN kommunikációhoz elengedhetetlen ATA6660 High-speed CAN Transceiver, valamint egy FTDI chip amely a virtuális soros porthoz szükséges.

A kommunikáció tehát a számítógép és a fejlesztőpanel között UART protokoll segítségével történik, a nyákon elhelyezett USB csatlakozón keresztül. A mikrokontroller kimenetei a panel alján vannak kivezetve, ehhez egy próba nyákra lett felforrasztva két sín, amelyre azok csatlakoztathatók. A CAN kommunikációhoz szükséges föld, can high, can low jelek eléréséhez a próba nyákon helyet kapott még két csatlakozó, amelyre a két szervó panellel lehet csatlakozni.

A fejlesztést a számítógép oldali kezelőfelület hiányában, egy már korábban elkészült Matlab Simulink modell alapján kezdtem. Ennek a fájlnak a segítségével végezték korábban a szervók szabályozását, így ennek az adatkezelési protokollnak átvétele bizonyult a legkedvezőbbnek. Ezt a szempontot követve, az elkészült gateway kis változtatással több dologra is használható. Először is a szakdolgozat témájaként a kalibráló berendezés vezérlésére kezelőfelületből, másod sorban az átalakított szervók továbbfejlesztéséhez a Matlab programmal.

3.1.1.1 A gateway működése a simulink modellel

Az alábbi ábrán látható a simulink modell soros port kimenete, mely minden kiküldési periódusban elküld egy headert, egy config impulzust, a referenciát és a szabályzó paramétereit. A header negyedik bájtja adja meg a szabályzás típusát, vagyis hogy a szervónak pozíciót vagy szögsebességet kell tartania, vagy hagyományos PWM jel kiküldésére is lehetőség van. A config impulzusra azért van szükség, mert az indítás után a modell minden periódusban kiküldi a szabályzás paramétereit, de a szervó felkonfigurálására csak az indításkor van szükség. Ennek segítségével tehát a gateway érzékelné tudja az egyes újraindításokat és csak ilyen alkalmakkor konfigurálja a szervót.



3.1. ábra – Matlab Simulink Serial Output

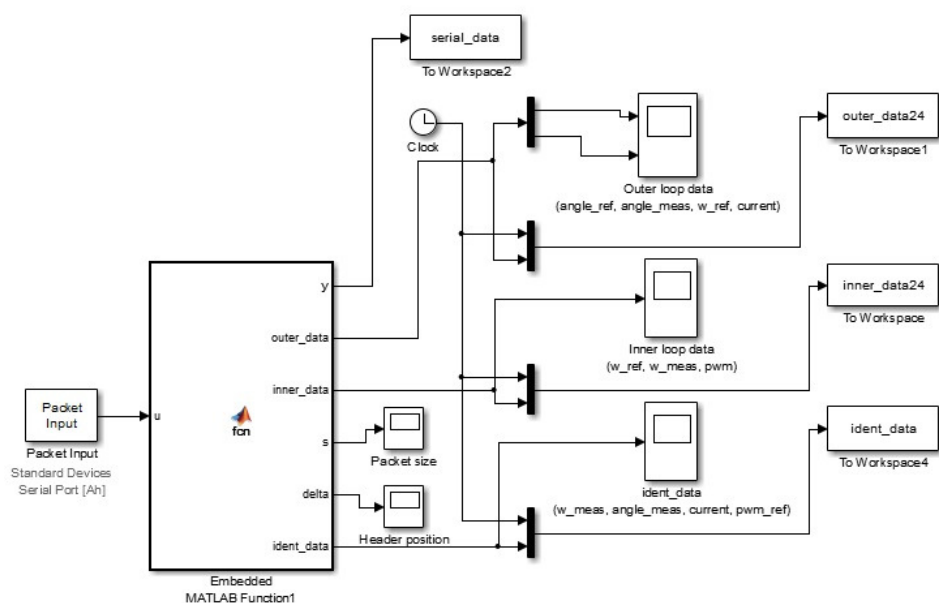
Az avr stamp UART fogadó interruptban fogadja a 115200bit/s baud rate-es soros kapcsolaton érkező adatokat és egy cirkuláris bufferben tárolja őket. Az adatok feldolgozása a main ciklusban fut. A feldolgozás során az adatcsomagok sikeres összeállítás esetén, az adatok bájt-sorrendje megcserélődik. Erre azért van szükség, mert az avr és a szabályzást végző controller memóriakezelése eltérő (little endian, big endian). A beérkezett config bájt-tól függően a program értelmezi, hogy az első vagy

már többedik adatcsomag van-e soron. Abban az esetben, ha ez az első adatcsomag, megtörténik az S12-esen kialakított protokoll szerint az 1MHz-es CAN vonalon a szervó felkonfigurálása. Ellenkező esetben a referencia és a szabályozás típusát jelző bájt kerül továbbítása a szervó panel felé, mely maximum 250Hz-es fogadásra képes.

Miután a szervók megkapták az első referencia adatokat, 250Hz-en elkezdnek adatokat küldeni a CAN vonalra. Az adatok között megtalálhatóak az átalakított szervók által mért pozíciók, szögsebességek, áramerősségek és pwm jelek. A későbbi mérések szempontjából elengedhetetlen, hogy az adatok konzisztensek legyenek, ezért a mért adatokon kívül az S12-es panel a referencia jeleket is visszaküldi az avr stamp felé, így megelőzve a referenciák és a mért adatok elcsúszását.

A stamp CAN interruptban fogadja az egyes címekre kiküldött adatokat, megcseréli a bájtokat a már említett memóriakezelési probléma miatt, és egy egész csomag beérkezése esetén engedélyezi az UART küldő interruptot, mely a csomag sikeres kiküldése esetén tiltódik az újabb csomag beérkezéséig.

A 3.2. ábrán látható a simulink input modellje, mely fogadja a stampról soros vonalon kiküldött referencia- és visszamért adatokat. A bejövő nyers adatok egy Embedded Matlab Function blockban kerülnek feldolgozásra. Az előjeles adatok avr-ről való kiküldése úgy lett megoldva, hogy a típusaik középértéke önmagukhoz lett adva, így a simulinkben bájtanként lehet fogadni és összeállítani a csomagokat header ellenőrzéssel, majd a középértékeket levonva az adatok értelmezhetőek.



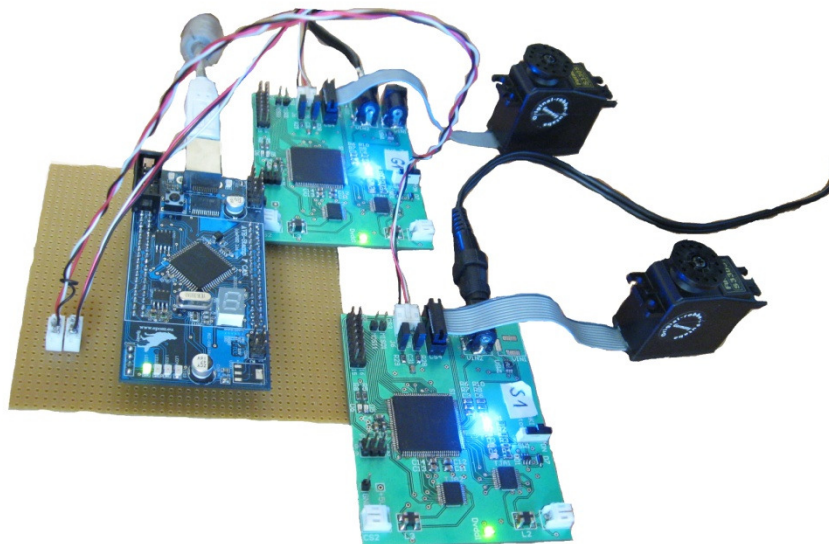
3.2. ábra – Matlab Simulink Serial Input

A csomagok beérkezése után egy Clock segítségével időadatok kerülnek hozzáadásra a mérésekhez és több tömbben eltárolásra kerülnek a workspace-en, ahol utána dolgozni lehet velük.

3.1.1.2 A gateway működése a számítógépes kezelőfelülettel

A gateway számítógépes kezelőfelülettel való működése nagyjából megegyezik a Matlabbal való működéssel. A lényegi különbség, hogy a panelnak ez esetben már két szervót kell tudnia kezelni, mivel a kalibráló mechanika két tengelyen tud majd forogni. Ehhez szükség volt két olyan s12-es panelra, melyek más-más címeken fogadják a működéshez szükséges referenciákat és küldik a visszamért értékeket. Ebben az esetben a szervó panelek által visszaküldött adatok közül, már csak a pozíció és szögsebesség adatok szükségesek a kalibráció szempontjából.

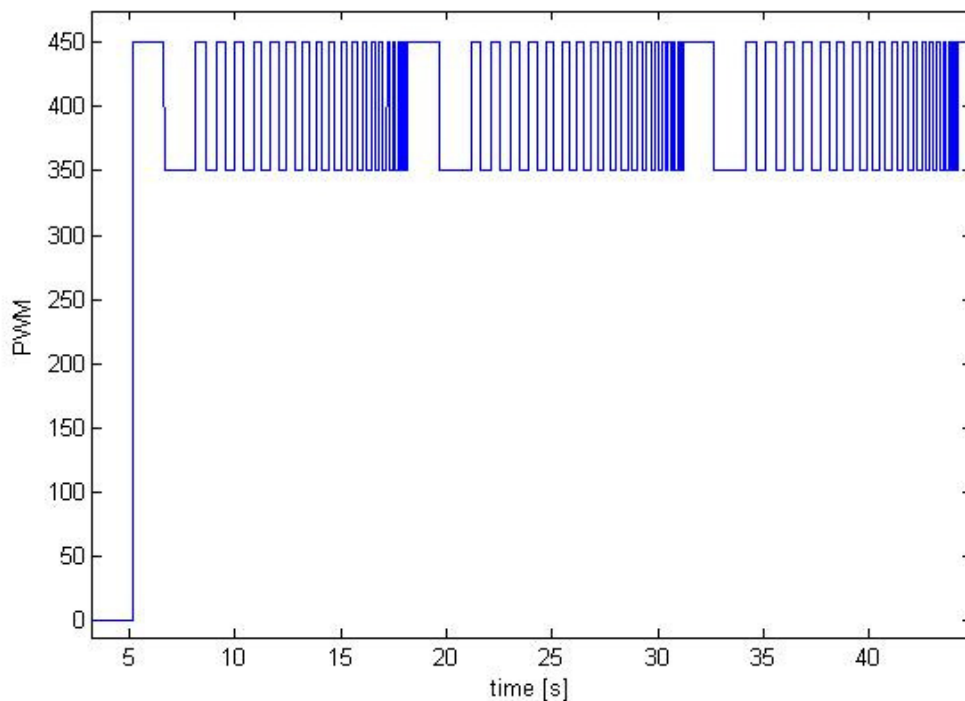
A gateway szinten tehát annyi változtatásra volt szükség, hogy soros vonalon a szervók konfigurációs adatait nem kell fogadni és felkonfigurálásukkal sem kell foglalkozni, mivel a helyes szabályzó paraméterek már implementálva vannak rajtuk. Valamint elég csak a szögsebesség és pozíció visszamért értékeit fogadni a CAN vonalon. Viszont annyi kiegészítésre szükség volt, hogy több címről működjön a CAN vonalon a küldés és fogadás.



3.3. ábra - Mérési elrendezés két aktuátorral

3.1.1.3 Paraméterezzhető referencia megvalósítása

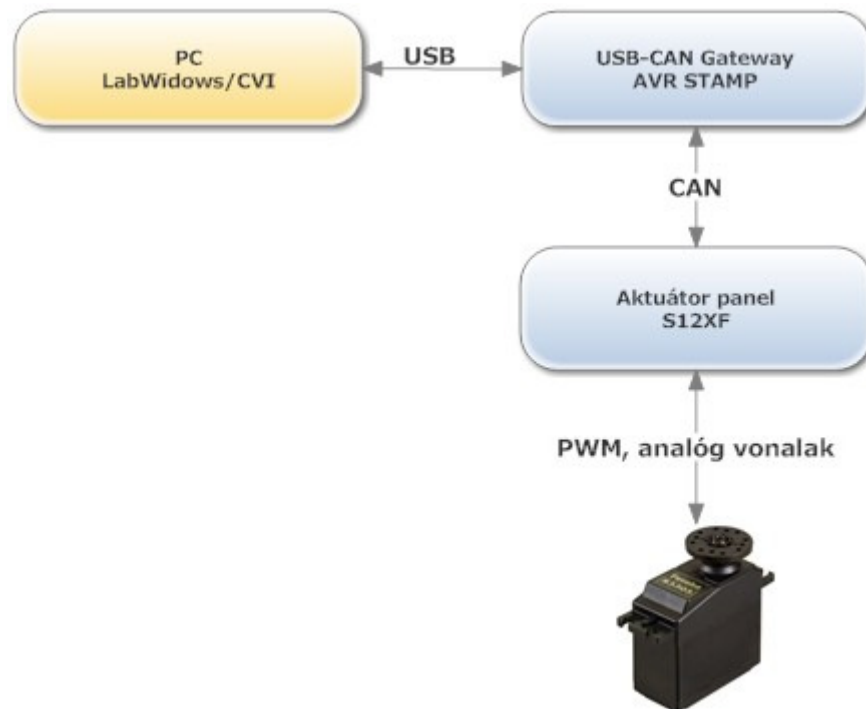
A későbbi identifikációhoz szükséges mérésekhez elengedhetetlen volt egy olyan referencia jel választása, melyre a válasz lineáris viselkedést mutat. Ezen okból az AVR STAMP-en implementálásra került egy olyan referenciaképző algoritmus, mely a Matlab Simulink modellből paraméterezzhető. A Stamp egy folyamatosan csökkenő periódus idejű négyszög jelet ad ki, melynek minimális-maximális értéke, minimális-maximális periódus ideje, a jel ideje és a referencia jel periódusok ismétlésének száma megadható a modellből. A referencia jel első periódusa mindig két másodperccel hosszabb a megadott maximumnál a szervó beállása érdekében. Lehetőség van a szervó periódusok ismétlésére, így zajos válasz esetén jelátlagolással növelhető a jel-zaj viszony, ideális esetben arányosan a mérések számának négyzetgyökével. A 3.4. ábrán a STAMP által előállított négyszögjel referencia látható a következő paraméterekkel: A jel minimuma: 350, maximuma: 450, a maximális periódus ideje: 1s, a minimális periódus ideje: 0.1s, az egész referencia ideje: 10s és háromszoros az ismétlés.



3.4. ábra - Stamp referencia

3.1.2 A számítógép oldali vezérlő szoftver

A kalibrációs mechanika működtetéséhez el kell készíteni egy PC oldali vezérlő szoftvert, amely segítségével egy egyszerű felhasználói felületen keresztül irányítható a kalibrációs folyamat. A szoftver a LabWindows/CVI fejlesztőkörnyezetben készült.

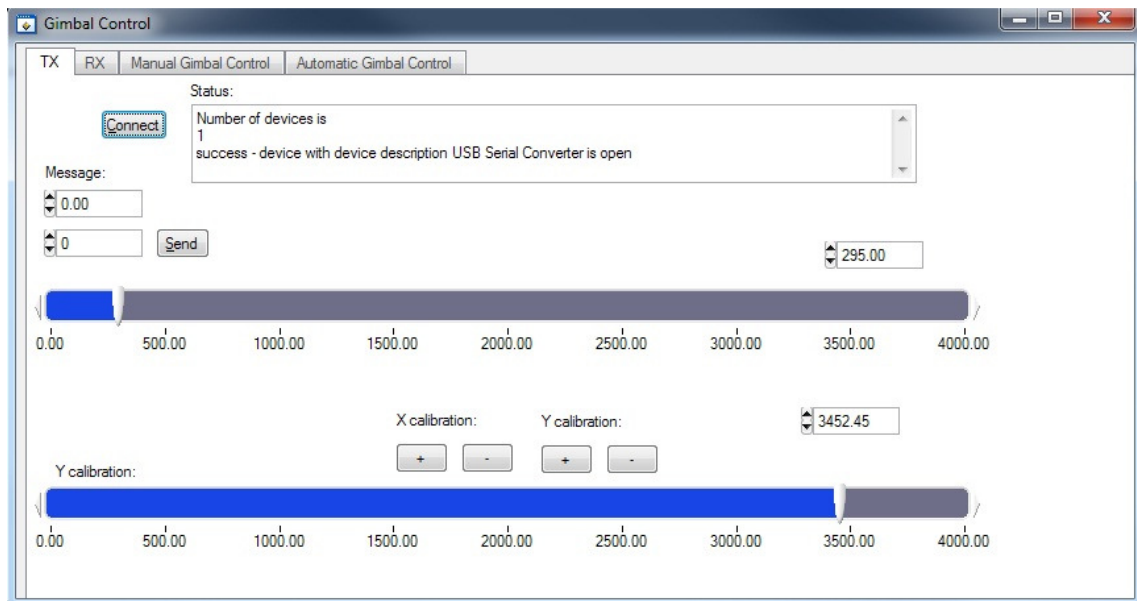


3.5. ábra - Mérési elrendezés

A program lehetőséget nyújt a gimbalt mozgató szervók referenciájának eltérő módokon való biztosítására. Emellett fogadni, megjeleníteni és Matlab-bal futtatható fájlba menteni képes a két aktuátor és a kalibrálandó IMU mérési adatait.

3.1.2.1 A szoftver működése

A szoftver funkciók szerint szétválogatva, 5 tab panelen nyújt szolgáltatást. Az első *TX* tab-on a *Connect* gomb megnyomásával megtörténik a csatlakozás a boardhoz a 115200 baud-os UART vonalon. Ekkor a *Status* panelen a sikeres csatlakozás esetén erről nyugtát kapunk „Number of devices is 1” „success - device with device description USB Serial Converter is open”, ellenkező esetben hiba üzenetet „failure”.

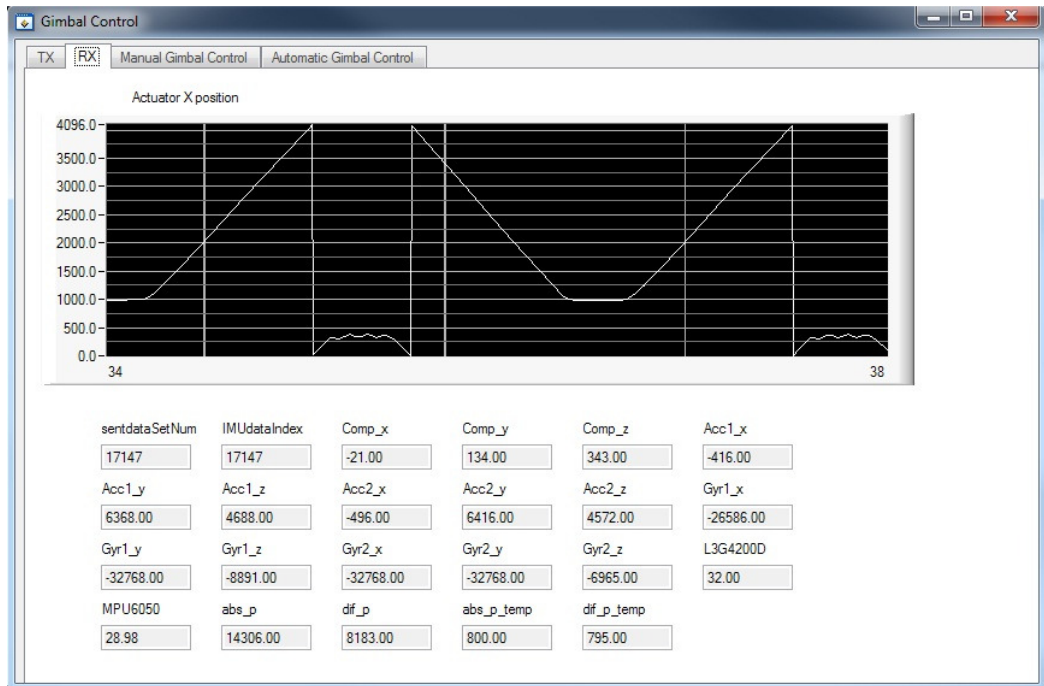


3.6. ábra - TX tab

A **Send** gomb megnyomásával a mellette elhelyezkedő **Message** értéke kerül kiküldésre pozíció referencia formájában a két szervóra. Ugyanekkor történik egy **20Hz-es timer** indítása, mely callback-jében fogadja a stamp mérési adatait. A függvény minden lefutáskor egy cirkuláris bufferbe menti az érkező adatokat, majd a feldolgozáskor egy header és checksum ellenőrzés után menti a két aktuátor pozíció és szögsebesség adatait, valamint az IMU szenzorai általi méréseket.

A TX tabon még található két **numeric slide**. Az elsővel szintén pozíció érték küldhető a szervókra, a második viszont a gimbal belső forgórészének vízszintes helyzetbe állítására szolgál. Ahova állítjuk vele az aktuátort, annak ott lesz a nulla pontja. A külső forgórésznel erre azért nincs szükség, mert annak éppen ott van a nulla pozíciója. A későbbiekben viszont egy ilyen funkció beépítésére még szükség lehet.

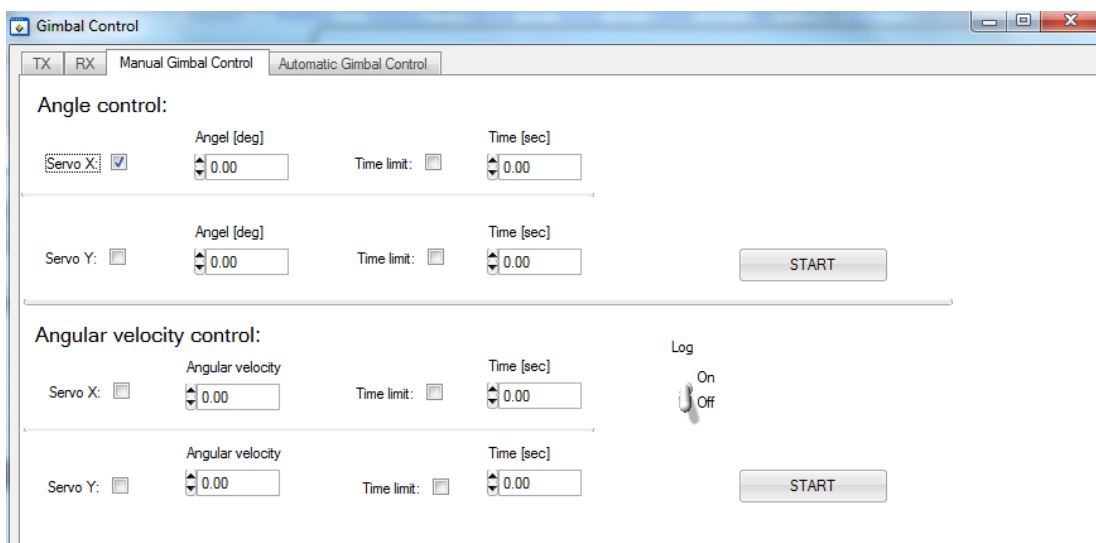
A következő **RX** tab panel a szoftver által fogadott és feldolgozott adatok megjelenítésére szolgál. Alapvetően ez a funkció a fejlesztés során volt fontos, hogy ellenőrizhető legyen, hogy az adatok megfelelően érkeznek. Található rajta egy Strip Chart, amely az egyik szervó pozíció értékeinek ábrázolására szolgál és 23 darab numerikus doboz, amelyeken az IMU szenzorjainak adatai kerülnek megjelenítésre.



3.7. ábra - RX tab

A *Manual Gimbal Control* tab-on lehetőség nyílik a szervók egyfajta manuális vezérlésére. A tab két részre van bontva, pozíció és szögsebesség szabályozásra. Ezek működése megegyezik. Check box-okban kell bejelölni a vezérelendő szervókat, majd megadni a referenciát. A *Time limit* check box bejelölésével beállíthatunk neki egy idő limitet, amíg a szervónak tartania kell a megadott referenciát.

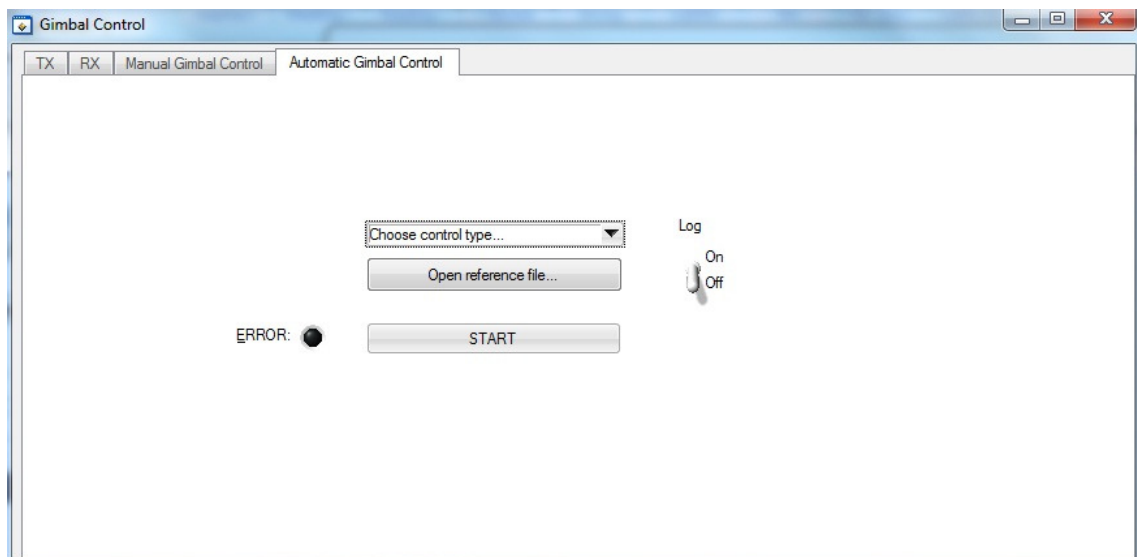
A *Start* gomb megnyomása esetén indul a szabályzás. Idő limit megadása esetén a *Start* gomb helyén *Stop* gomb jelenik meg a limit lejártáig, de akár az előtt is leállítható vele a szabályzás.



3.8. ábra - Manual Gimbal Control tab

Az *Automatic Gimbal Control* tabon egy legördülő menüben lehet választani a három fajta automatikus vezérlés közül, majd egy a kiválasztott vezérlésnek megfelelő előre megírt vagy generált text fájlt kell megadni. Mindegyik fájl egy a szabályozás típusának megfelelő ID-val kezdődik annak érdekében, hogy ellenőrizhető legyen, hogy a helyes fájl lett-e kiválasztva. Rossz fájl kiválasztása esetén a **START** gomb megnyomásakor egy **ERROR** elnevezésű piros led indikátor gyullad fel és a vezérlés nem indul el.

Megfelelő fájl megadása esetén a **START** gomb megnyomásakor indul a vezérlés. A folyamat alatt a **START** gomb helyett **STOP** gomb látható, amellyel megszakítható a vezérlés. Ha a vezérlést nem szakítjuk meg, annak lejárta után a **STOP** gomb helyén ismét a **START** gomb látható.



3.9. ábra - Automatic Gimbal Control tab

Az első lehetőség a *Periodical Servo Control*, a vezérlő fájl felépítése az alábbi táblázatban látható. Az első oszlopban az Indexek vannak megadva, a második oszlopban megadhatjuk az X szervó referenciájának típusát (pozíció, szögsebesség vagy nincs) és a következő oszlopban adhatjuk meg a hozzá tartozó referenciát. A következő oszlopban ugyanezeket az adatokat adhatjuk meg az y szervónak és az utolsó oszlopban kell megadni azt az időt, amíg a sorban megadott szabályzási paramétereket a két szervónak tartani kell.

	Servo X		Servo Y		
Index	Control mode	Value	Control mode	Value	Time
n	Angular velocity	deg/sec	Angular velocity	deg/sec	sec
n	Angle	deg	Angle	deg	sec
n	None	-	None	-	sec

3.1. táblázat – Periodical Servo Control vezérlő fájl

A következő lehetőség a *Sequential Angel Control*, mely 250Hz-en küldi ki a fájlban megadott pozíció referencia értékeket. A fájl szerkezete az alábbi táblázatban látható.

Index	X angle	Y angle
n	deg	deg

3.2. táblázat – Sequential Angel Control vezérlő fájl

Az utolsó vezérlési mód a *Sequential Angular Velocity Control*, mely az előző módhoz hasonlóan 250Hz-el küldi ki a referenciát, csak ez esetben szögsebesség referenciát.

Index	X ang rate	Y ang rate
n	deg/sec	deg/sec

3.3. táblázat – Sequential Angular Velocity Control vezérlő fájl

Lehetőség nyílik az adatok fájlba való kiírására a *Log* binary switch bekapcsolásával. Ez a switch megtalálható a *Manual Gimbal Control* és az *Automatic Gimbal Control* tabon egyaránt. Ilyenkor a két szervó és az IMU méréseinek értékei íródnak ki egy .m fájlba. A fájl elnevezése a pontos dátum és idő és a forrásfájl mappájában a *matlab* könyvtárba mentődik. A fájl matlabban való megnyitása és fordítása után az egyes adatok tömbökbe válogatva megjelennek a Workspace-en.

A megjelenő tömbök:

- t – idő
- x_control_mode – a szabályzás típusa:
 - 0 – nincs szabályzás
 - 1 – pozíció szabályzás

- 2 – szögsebesség szabályzás
- x_w_ref – az x szervó szögsebesség referenciája
- x_angle_ref – az x szervó pozíció referenciája
- x_w_meas – x szervó visszamért szögsebessége
- x_angle_meas – x szervó visszamért pozíciója
- y_control_mode – a szabályzás típusa:
 - 0 – nincs szabályzás
 - 1 – pozíció szabályzás
 - 2 – szögsebesség szabályzás
- y_w_ref – az x szervó szögsebesség referenciája
- y_angle_ref – az x szervó pozíció referenciája
- y_w_meas – x szervó visszamért szögsebessége
- y_angle_meas – x szervó visszamért pozíciója
- IMU_Acc1 – 1-es gyorsulásmérő értékei
- IMU_Acc2 – 2-es gyorsulásmérő értékei
- IMU_Comp – mágneses szenzor értékei
- IMU_Gyr1 – 1-es giroszkóp értékei
- IMU_Gyr2 – 2-es giroszkóp értékei
- IMU_data_index – a CAN vonalon küldött IMU adatok indexe
- IMU_L3G4200D_temp – szenzor hőmérséklet
- IMU_MPU6050_temp – szenzor hőmérséklet
- IMU_SentDataSetNum – a stamp-re megérkezett IMU üzenetek száma
- IMU_abs_p_temp – szenzor hőmérséklet
- IMU_diff_p_temp – szenzor hőmérséklet
- IMU_abs_p

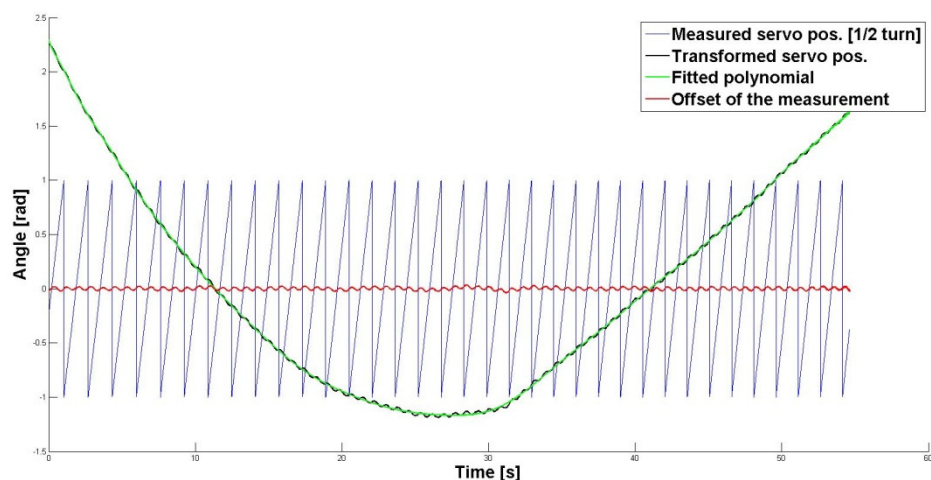
- IMU_diff_p

A *Log* switch kikapcsolásával leáll a fájlba való kiírás.

3.2 SZTAKI szervó fejlesztése

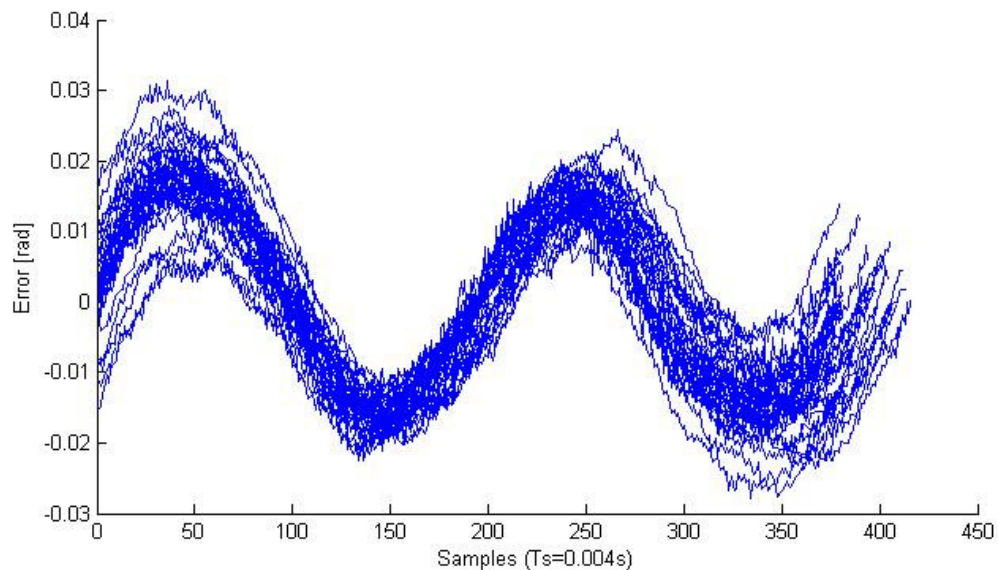
3.2.1 A mágneses enkóder hibája és annak kompenzálása

Az identifikációhoz való adatgyűjtés során felfedezésre került egy periodikus ofszet hiba az aktuátor által visszamért pozíció adatokban, amit a mágneses enkóder illesztésének hibája okoz. Ennek kiméréséhez és kompenzációjához egy megfelelő hosszúságú mérés lett elvégezve, mialatt az aktuátor egyenletes sebességgel forog. A mért pozíció adatokon két transzformációt kell elvégezni a vizsgálatokhoz. Először szükség van a Matlab unwrap függvényének használatára, mely a teljes átfordulások miatti ugrásokat távolítja el. Ehhez a $\pm 2\pi$ többszöröseit adja az értékekhez, ha két egymást követő minta közötti ugrás meghaladja a megadott toleranciát. Ez után szükség van az alapjel eltávolítására, amihez a detrend függvény lett felhasználva. Így a Matlab az adathalmazból a rá leginkább illeszkedő lineáris görbét kivonja, tehát egy olyan függvényt kapunk, amely megmutatja az egyenletes forgástól való eltéréseket. A transzformációk végeztével látható, hogy a jel tartalmaz egy periodikus komponenst, melynek periódusa megegyezik a tengely körbefordulásával (Transformed servo pos.). A hiba mértékének meghatározásához először egy polinom lett illesztve (Fitted polynomial) a transzformált jelre, majd ez le lett vonva belőle (Offset of the measurement).



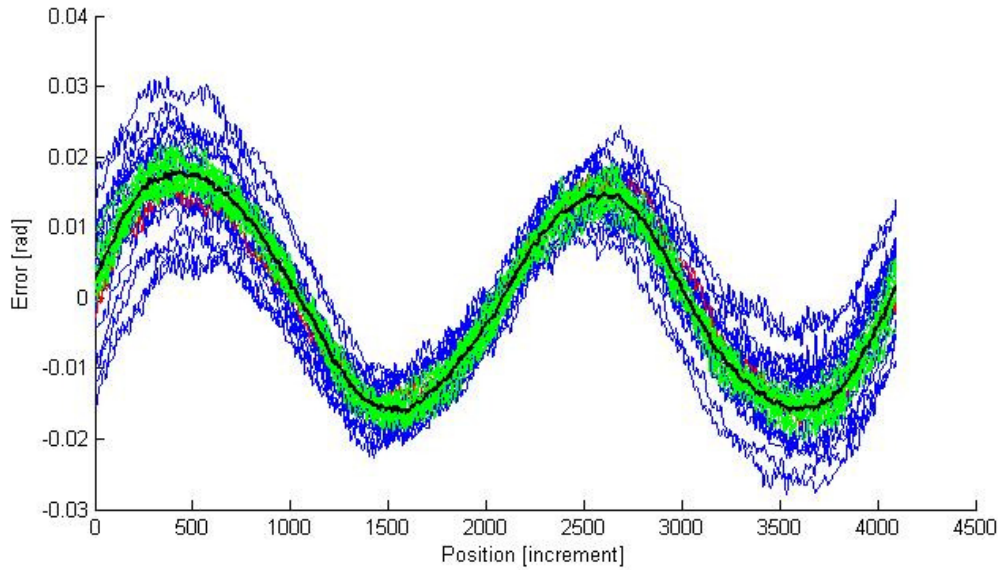
3.10. ábra - Mágneses enkóder kompenzáció

Ez után az egyes periódusok ki lettek vágva, majd egymásra lettek helyezve. Ahogy az a Transformed pos. függvényen is látható, a szervó mozgása nem volt teljesen egyenletes, ezért a kivágott periódusok hossza nem megegyező. Ezen különbségek megszüntetéséhez, a kivágott periódusok újra lettek mintavételezve 4096 darab mintával, mivel a pozíció felbontása 4096. Így a 3.12. ábra, már a pozíció függvényében ábrázolja a hiba mértékét.



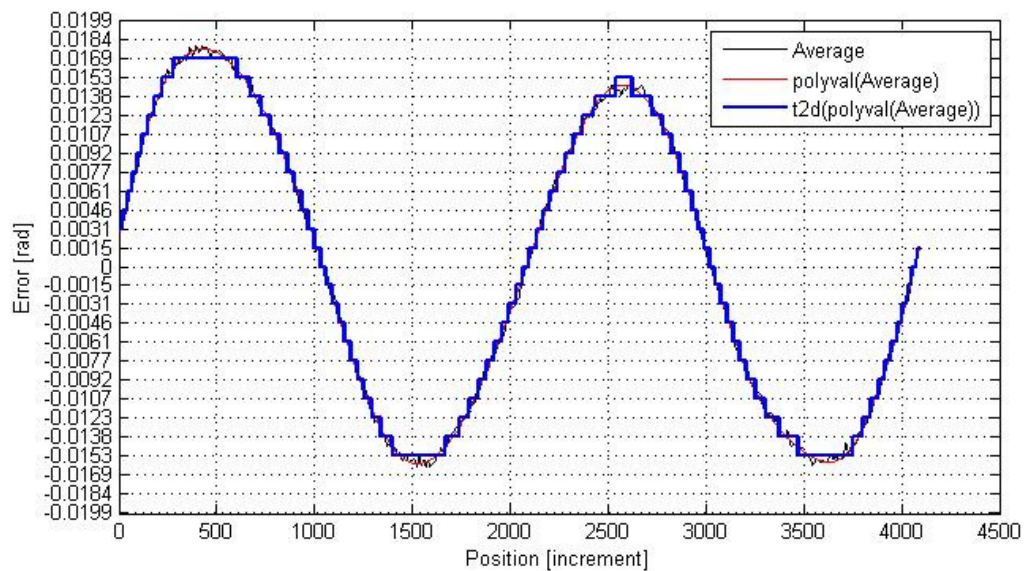
3.11. ábra - Kivágott periódusok

Mivel a még transzformált adatokra illesztett polinom nem illeszkedhetett tökéletesen a függvényre, a hibaperiódusok között előfordulnak olyanok, amelyek ezen hiba miatt eltérnek a valós hiba mértékétől. Emiatt annak mértékét nem célszerű meghatározni egyszerű átlagolással. Erre a következő módszer lett alkalmazva, átlagolás után, azok a hibaperiódusok melyek mértéke 80%-nál kevésbé egyezett az átlaggal, el lett dobva a mérésből és a maradékból lett folytatva az előzőekben leírt módszer. Ez a folyamat addig ismétlődött, még voltak olyan periódusok, melyeket el kellett dobni. A 3.12. ábrán különböző színnel vannak jelölve az egyes szakaszokban megtartott adatok és feketével a végül utolsó átlagolással kapott érték.



3.12. ábra – Újra mintavételezett periódusok

Mivel ez az érték még mindig zajos volt, erre is egy polinom lett illesztve a polyval függvény segítségével, amelyet a t2d függvény segítségével kvantálni kellett, így létrehozva egy olyan táblázatot, melyet az aktuátort vezérlő panelen implementálni lehet, a hiba kompenzálására.



3.13. ábra - Kompenzációs paraméterek

A kompenzációval az abszolút pozíciómérés pontossága jelentősen nőtt 2° -ról 0.15° -ra.[9]

3.3 A kalibrációs algoritmus lépései

Jelen szakdolgozatban a SZTAKI-ban fejlesztett inerciális mérőegységen tetszőleges pozícióban és orientációban elhelyezett gyorsulás- és szögsebességmérő szenzorok kalibrálása a cél. A kalibrálás ebben az esetben az ofszet, skálázás és orientáció meghatározása az egyes szenzoroknál.

3.3.1 A szenzor hibamodellje

A kalibrálandó szenzorokat tartalmazó IMU a mérések alatt rögzítve van egy **S** szenzor koordináta-rendszeren és a mozgását a **W** globális koordináta-rendszerben vizsgáljuk. A gyorsulásmérők és a giroszkópok szintén egy fix pozícióban és orientációban vannak rögzítve az **S** koordináta-rendszerben. A SZTAKI-ban fejlesztett IMU-n a szenzorok digitális kimenetekkel rendelkeznek, melyekhez tartozik valamilyen ofszet és skálázás (scale factor), amivel a nyers adatok valamilyen mértékegységbe konvertálhatóak (pl.: m/sec^2 vagy rad/sec). A kalibráció során szükséges még a szenzor orientációjának meghatározása, amely forrasztási vagy maga a szenzor hibájából adódóan térhet el a test koordináta-rendszerétől.

3.3.1.1 A gyorsulásmérő hibamodellje

A háromtengelyű MEMS gyorsulásmérő az IMU lineáris gyorsulásának ($A_S^{\vec{}}$) mind a három komponensét méri az IMU koordináta-rendszerében. A szenzor az **S** koordináta-rendszeren helyezkedik el, a következő paraméterekkel:

- orientáció $V_{aS}^{\vec{}} = (\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z)^T$
- scale factor $S_{aS}^{\vec{}} = (s_x, s_y, s_z)^T$
- offset $O_{aS}^{\vec{}} = (o_x, o_y, o_z)^T$
- output $Y_{aS}^{\vec{}} = (y_x, y_y, y_z)^T$

Az orientáció vektor tartalmazza a forgatáshoz szükséges euler szögeket, ezért ezt a képletben egy DCM irány koszinusz mátrixszá kell még konvertálni. Az $A_{aS}^{\vec{}} = (a_x, a_y, a_z)^T$ kalibrált gyorsulást tehát a következő képlet alapján lehet felírni:

$$A_{aS}^{\vec{}} = S_{aS}^{\vec{}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot DCM(V_{aS}^{\vec{}}) \cdot Y_{aS}^{\vec{}} + O_{aS}^{\vec{}}$$

A DCM irány koszinusz mátrix megegyezik egy X, Y és Z tengelyen a hozzájuk tartozó orientációs szögekkel való forgatással[18]:

$$DCM(V_S^{\rightarrow}) = R_x(\vartheta_x) \cdot R_y(\vartheta_y) \cdot R_z(\vartheta_z)$$

$$R_x(\vartheta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\vartheta_x) & \sin(\vartheta_x) \\ 0 & -\sin(\vartheta_x) & \cos(\vartheta_x) \end{bmatrix}$$

$$R_y(\vartheta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_y) & 0 & -\sin(\vartheta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\vartheta_y) & 0 & \cos(\vartheta_y) \end{bmatrix}$$

$$R_z(\vartheta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_z) & \sin(\vartheta_z) & 0 \\ -\sin(\vartheta_z) & \cos(\vartheta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.1.2 A giroszkóp hibamodellje

A háromtengelyű MEMS szögsebességmérő az IMU szögsebességének (ω_S^{\rightarrow}) mind a három komponensét méri a globális koordináta-rendszerben. A giroszkóp az S koordináta-rendszeren helyezkedik el, a következő paraméterekkel:

- orientáció $V_{\omega S}^{\rightarrow} = (v_x, v_y, v_z)^T$
- scale factor $S_{\omega S}^{\rightarrow} = (s_x, s_y, s_z)^T$
- offset $O_{\omega S}^{\rightarrow} = (o_x, o_y, o_z)^T$
- output $Y_{\omega S}^{\rightarrow} = (y_x, y_y, y_z)^T$

A gyorsulásmérőhöz hasonlóan az orientáció vektor tartalmazza a forgatáshoz szükséges euler szögeket, ezért ezt a képletben egy DCM irány koszinusz mátrixszá kell még konvertálni. Az $A_{\omega S}^{\rightarrow} = (a_x, a_y, a_z)^T$ kalibrált szögsebességet tehát a következő képlet alapján lehet felírni:

$$A_{\omega S}^{\rightarrow} = S_{\omega S}^{\rightarrow} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot DCM(V_{\omega S}^{\rightarrow}) \cdot Y_{\omega S}^{\rightarrow} + O_{\omega S}^{\rightarrow}$$

A DCM irány koszinusz mátrix a gyorsulásmérőhöz hasonlóan megegyezik egy X, Y és Z tengelyen a hozzájuk tartozó orientációs szögekkel való forgatással.

3.3.1.3 A hibakomponensek számítási sorrendje

Az eddigi mérések során kiderült, hogy nem mindegy az egyes hibaparaméterek hozzáadásának sorrendje a nyers adatokhoz. Ez jellemzően a giroszkóp kalibrálására igaz. Egy mérés alatt az IMU két giroszkópjának kalibrálásakor előfordul, hogy más-

más sorrendű számítással éri el az optimalizáció a legjobb eredményt. A két számítási mód, amivel eddig a legjobb eredmények adódtak:

$$1. \quad A_{\vec{S}} = S_{\omega S}^{\vec{}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (DCM(V_{\vec{S}}^{\vec{}}) \cdot Y_{\vec{S}}^{\vec{}} + O_{\vec{S}}^{\vec{}})$$

$$2. \quad A_{\vec{S}} = S_{\omega S}^{\vec{}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot DCM(V_{\vec{S}}^{\vec{}}) \cdot Y_{\vec{S}}^{\vec{}} + O_{\vec{S}}^{\vec{}}$$

A jövőben elképzelhető, hogy érdemes lenne egy olyan algoritmus implementálása, amely a lehető összes sorrenddel lefuttatja az optimalizációt és végül azokat a paramétereket adja meg, amelyekkel a legkisebb hibát számította. Ennek hátránya, hogy a folyamat meglehetősen időigényessé válna.

3.3.2 A kalibráció

A kalibráció azon az elven alapul, hogy a gimbal mozgató aktuátorok segítségével pontos pozíciókat tudunk visszaolvasni a gimbal állásáról. Ezekből a pozíciókból a 2.4.3-as pontban leírtak alapján ki lehet számolni az IMU valós szögsebességét és gyorsulását, melyek referenciaként szolgálnak a folyamat során. A szenzorok hibamodellje és referenciája alapján felírható egy olyan képlet, amelyből a 9 paraméter meghatározható. Ehhez az algoritmus a legkisebb négyzetek módszerét használja a szögsebességmérő és a gyorsulásmérő hibájának meghatározására egyaránt.

$$Error_A = \sum_{i=0}^n (A_{aSi}^{\vec{}}(V_{aSi}^{\vec{}}, S_{aSi}^{\vec{}}, O_{aSi}^{\vec{}}) - a_{truei})^2$$

$$Error_{\omega} = \sum_{i=0}^n (A_{\omega Si}^{\vec{}}(V_{\omega Si}^{\vec{}}, S_{\omega Si}^{\vec{}}, O_{\omega Si}^{\vec{}}) - \omega_{truei})^2$$

Az algoritmus Matlab környezetben fut és a számítógépes vezérlő program által gyűjtött 250Hz-en mintavételezett adatokat dolgozza fel. A kalibráció során a Matlab egy beépített optimalizáló függvénye keresi azokat a paramétereket, amelyek a fenti képletek alapján a legkisebb hibát adják. Vagyis az algoritmus működése esetén, a végső paraméterekkel transzformált szenzor output fogja a referencia jelekre leginkább illeszkedő viselkedést mutatni.

3.3.3 Az optimalizáció

A matematikai optimalizáció a legjobb elem kiválasztását jelenti a matematikában, a statisztikában, a számítástechnikában és az alkalmazott tudományokban. A legjobb elemet az alternatívák egy halmazából választják ki.

A legegyszerűbb esetben az optimalizáció egy valós függvény maximumának, vagy minimumának meghatározását jelenti. A feladat egy egyszerű (de nem optimális) megoldása az, hogy az algoritmus végigpróbálgatja a megengedett halmaz elemeit, mindegyikhez kiszámítva a függvény értékeit. Az optimalizáció elméletének és technikájának általánosítása az alkalmazott matematika egy külön fejezetét alkotja. Általánosabban, az optimalizáció egy adott megengedett tartományon keresi egy függvény legjobb értékét, ahol mind a megengedett tartomány, mind a függvény sok különböző típusba tartozhat.[19]

A matematikai optimalizációs feladat így írható fel:

$f_0(x)$ minimalizációja

$f_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m.$ függvényében

Ahol $x = (x_1, \dots, x_n)$ az optimalizációs változó, az $f_0: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ a célfüggvény, $f_i: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}, i = 1, \dots, m,$ a korlát függvény és b_1, \dots, b_m konstansok pedig a határértékek.

Az optimalizációs probléma leképezése annak a feladatnak, mikor a lehető legjobb vektort kell kiválasztani \mathbf{R}^n -ben egy halmaz lehetséges opció közül. Az x változó képviseli a választott paramétert; $f_i(x) \leq b_i$ pedig a határozott követelményeket vagy specifikációkat, melyek limitálják a lehetséges választásokat, $f_0(x)$ pedig az x választás költségét. Az optimalizáció megoldása egy olyan választás, amellyel minimális költség (vagy maximális haszon) érhető el, a megadott feltételek teljesülésével.

Az optimalizációnak több alkalmazási területe és van, erre egy példa a *portfolió optimalizáció*, amellyel egy befektetés legoptimálisabb összetételét lehet meghatározni egy adott kockázati szint mellett, hogy az maximális profitot termeljen.

Egy másik példa az elektronikus tervezésnél az *eszközméretezés*. Itt a változók az alkatrészek szélessége és hossza, az előírás pedig a gyártás során felmerülő követelmények összessége, beleértve a termék méretbeli előírásait, a gyártósor alkatrész kompatibilitását és az energiatakarékossági szempontokat.

Egy harmadik példa az *adat illesztés*, aminek a feladata egy modell megalkotása, ami a lehető legjobban illeszkedik egy bizonyos adatsorra. Ennél a feladatnál a változók a modell paraméterei, az előírás pedig valamilyen előzetes információ (pl.: előírt határértékek) a paraméterekkel kapcsolatban. A feladat célja

olyan paraméterek meghatározása, amelyek konzisztensek az előírásokkal és segítségükkel a modell a legkisebb eltérést mutatja a bizonyos adatsortól. [20]

Jelen esetben ez a fajta optimalizáció szükséges a szenzorok paramétereinek meghatározásához. Tehát a változó ebben az esetben a nulla helyzeti hiba, a skálázási hiba és az orientációs hiba. Az adatsor, pedig amire a paraméterezett nyers mérési adatoknak a leginkább illeszkednie kell, az előállított szögsebesség és gyorsulás referencia. Ehhez a legkisebb négyzetek módszere lett felhasználva az algoritmusban és a Matlab `fminunc` függvénye keresi a legjobb paramétereket.

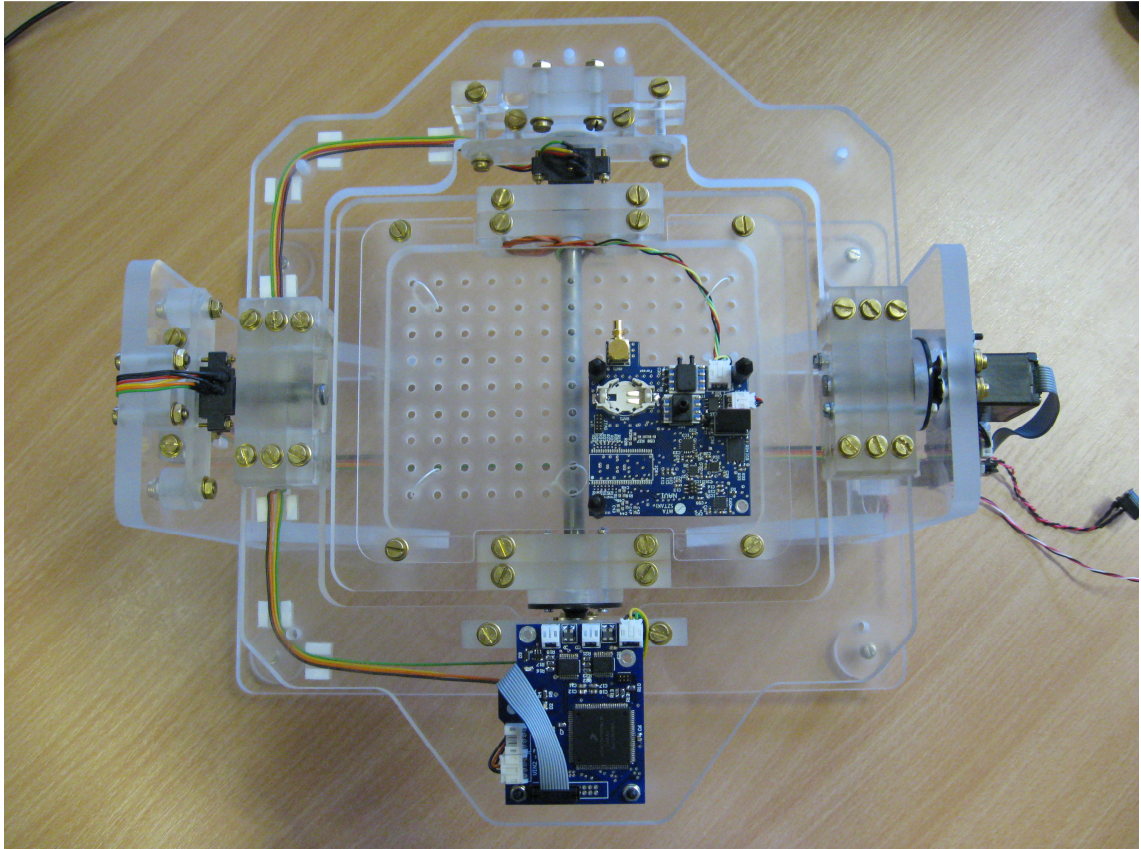
Azt még fontos tudni, hogy a megoldandó problémák általában nem konvexek, így ez a fajta optimalizáció nem feltétlen a globális minimumot találja meg. Tehát a legjobb eredmény eléréséhez érdemes több kezdeti értékkel is lefuttatni a folyamatot, így megtalálva a globális minimumot.

4 Mérések és eredmények

4.1 A paraméterek meghatározása

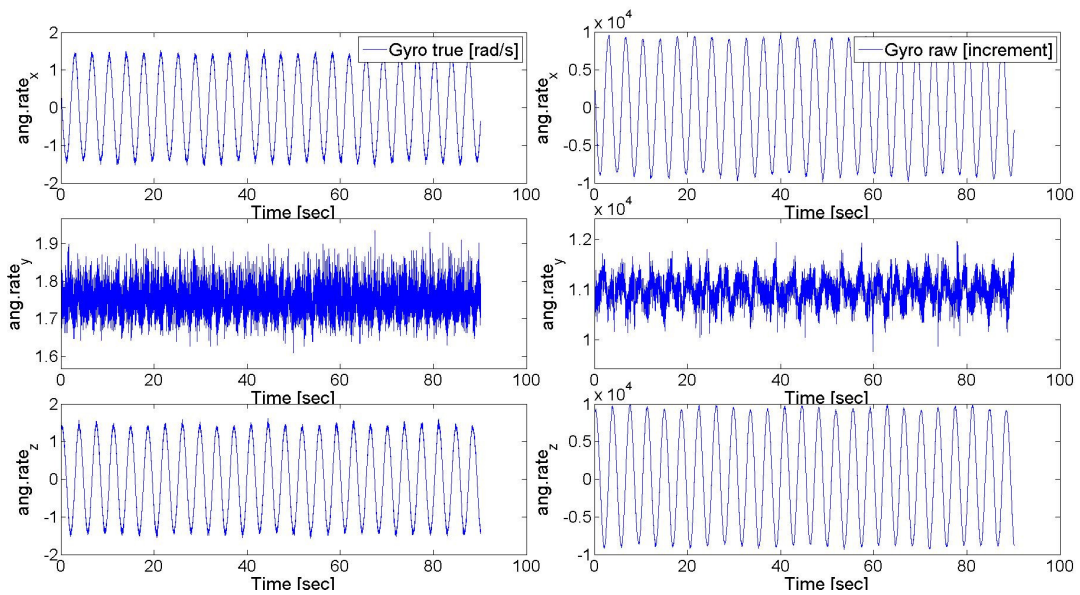
A paraméterek meghatározásához egy olyan mérésre volt szükség, ahol a gimballal egy olyan mozgást szimulálunk, aminek később az IMU használata során ki lesz téve. A mérés tehát egy olyan mozgással lett elvégezve, amikor a gimbal belső forgórésze $80^\circ/\text{sec}$, a külső pedig $100^\circ/\text{sec}$ szögsebességgel forog. Ezek az értékek nagyjából egy repülőn mérhető adatok extrémális értékei és a két tengelyen való forgatásnak köszönhetően, mind a három koordináta-tengelyen mérhetőek szögsebességek és gyorsulások.

Mivel a SZTAKI-ban használt IMU a szenzorok adatait már konzisztensen helyezi a CAN vonalra, így az olyan orientációban lett felhelyezve a gimbalra, hogy tengelyeik ortogonálisak legyenek. A gyorsulásmérő kalibrálása miatt pedig fontos szempont, hogy a gyorsulásmérésnél a gravitációs komponensen kívül, a centripetális komponens is megjelenjen, ezért olyan pozíció választására volt szükség, hogy a gyorsulásmérő minél messzebb legyen a gimbal középpontjától. Mindezen szempontok teljesüléséhez az IMU rögzítésének és pozíciója és orientációja a következő képen látható (4.1. ábra - Mérési elrendezés).



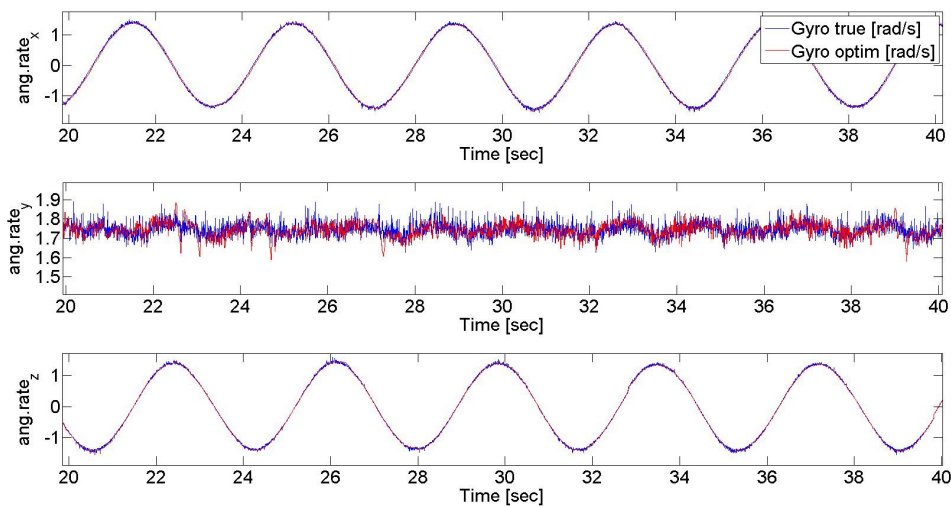
4.1. ábra - Mérési elrendezés

Ezeket az adatokat az optimalizáció előtt frissíteni kell annak kódjában. Mivel a szögsebesség értéke nem függ a körmozgás sugarától, a giroszkóp pozíciójának megadására nincs szükség. A mérés elvégeztével a szenzorokból nyert nyers adatok szignifikánsan nagyobbak a számított referenciánál. Ez figyelhető meg a 4.2. ábrán, ahol a bal oldalon látható a számított szögsebesség referencia adatsor a három tengelyére, a jobb oldalon pedig az egyik giroszkóp nyers adatai. Amint ez az ábrán látható, az adatok jellegre megegyeznek, a tengelyek stimmelnek, viszont a nyers adatok 4 nagyságrenddel nagyobbak a referenciánál.



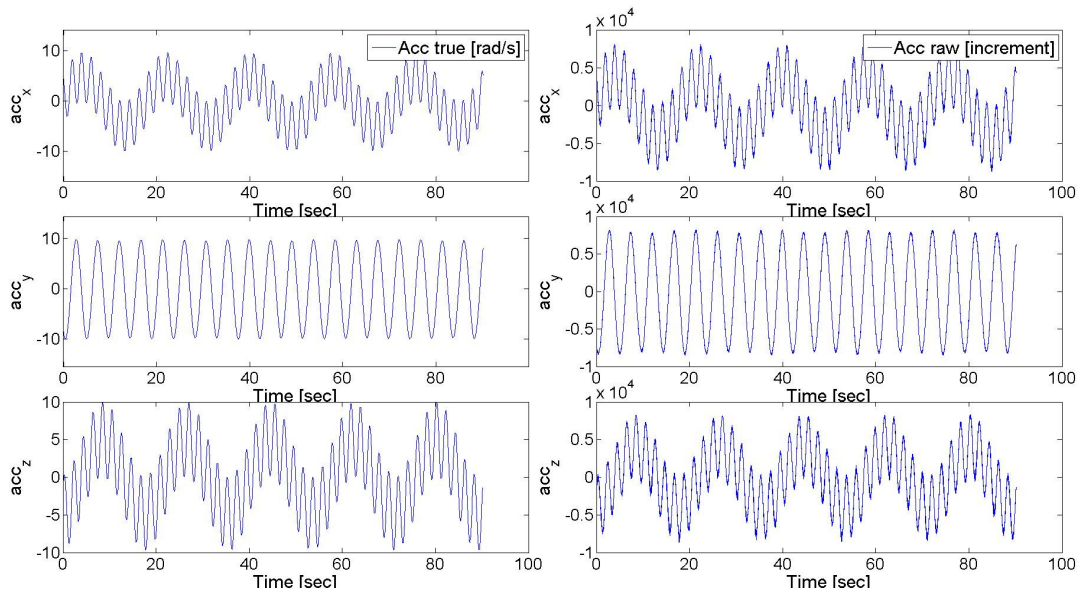
4.2. ábra - Szögsebesség referencia (bal) és a nyers adatok (jobb)

A következő (4.3. ábra) ábrán már az optimalizáció után látható az előzővel megegyező méréshez tartozó referencia jelre rajzolt kalibrált adatok. Kékkel a valós szögsebesség és pirossal a paraméterezett szenzor adatok.



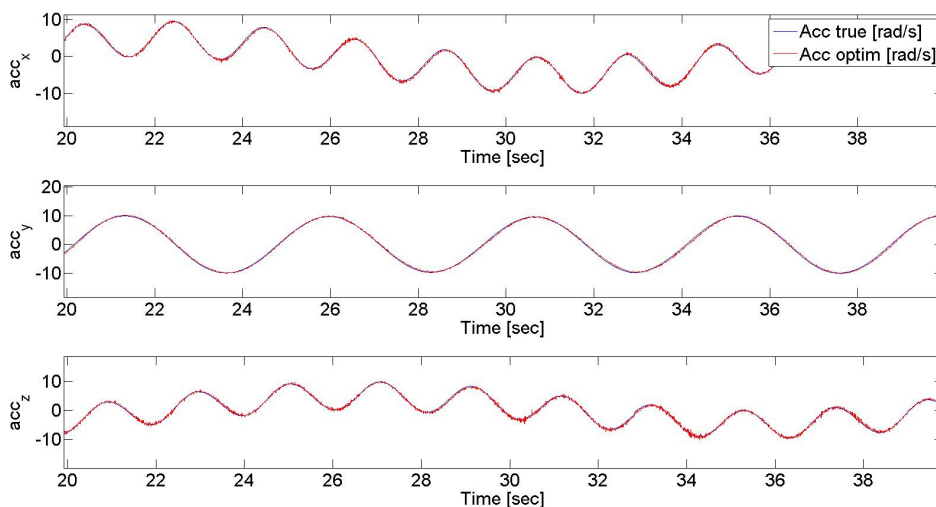
4.3. ábra - Szögsebesség referencia (kék) és a kalibrált adatok (piros) nagyítva

A következő két ábrán az egyik gyorsulásmérő adatai láthatóak. Nagyjából a szögsebességmérőnél leírtak jellemzik ezt a mérést is. A jelleg itt is megegyező, a skálázásbeli eltérés jelentős.



4.4. ábra - Gyorsulás referencia (bal) és a nyers adatok (jobb)

A 4.5. ábra az optimalizáció utáni összehasonlítást szemlélteti. Ez alapján látszik, hogy a gyorsulásmérő szenzor adatai valamivel zajosabbak, mint a szögsebességmérőé, de a referencia és a paraméterezett adatsor itt is jól fedik egymást.



4.5. ábra - Gyorsulás referencia (kék) és a kalibrált adatok (piros) nagyítva

Az alábbi táblázatban vannak csoportosítva a négy szenzorra meghatározott paraméterek. Mivel a meghatározott scale factor paraméterekkel a nyers adatok szorzódnak, ezért ahogy az már a fenti ábrákon is látszott mind a négy szenzornál ez a legjelentősebb. Az ofszetre és az orientációra kapott eredmények minimálisnak mondhatóak. A táblázatban még megtalálható az egyes mérések referencia és kalibrált adatsora közti abszolút hiba átlag.

	Pozíció ($D_S^{\vec{}}$)	Orientáció ($V_S^{\vec{}}$)	Offset ($O_S^{\vec{}}$)	Skálázás ($S_S^{\vec{}}$)	Abszolút hiba átlag
Gyro1	-	2.641e-2	-5.608e-3	1.523e-4	0.038 rad/s
		2.241e-2	2.103e-4	1.587e-4	0.031 rad/s
		-1.148e-2	-1.240e-2	1.529e-4	0.021 rad/s
Gyro2	-	2.361e-2	9.015e-3	1.394e-4	0.022 rad/s
		1.098e-2	2.983e-4	1.372e-4	0.040 rad/s
		1.394e-2	-9.667e-3	1.388e-4	0.027 rad/s
Acc1	0.043m	2.422e-2	-2.950e-2	1.199e-3	0.227 m/s ²
	0.035m	2.392e-2	1.425e-1	1.225e-3	0.264 m/s ²
	-0.027m	-1.845e-3	8.430e-2	1.205e-3	0.261 m/s ²
Acc2	0.052m	1.854e-2	-1.322e-1	1.182e-3	0.228 m/s ²
	0.046m	2.506e-2	5.670e-2	1.191e-3	0.244 m/s ²
	-0.027m	-7.211e-3	1.1571	1.164e-3	0.300 m/s ²

4.1. táblázat – A szenzorok paramétereit és hibáit

4.2 A paraméterek tesztelése

A paraméterek meghatározás után szükség van azok tesztelésére. Ez egyelőre úgy lehetséges, hogy további méréseket végzünk a gimbalon más szögsebességekkel és ellenőrizzük rajtuk az előzőekben meghatározott paramétereket. Fontos, hogy az IMU a mérések alatt ugyanabban az orientációban legyen felhelyezve, mint ahogyan a paraméterek meg lettek határozva. A teszthez két mérés lett elvégezve, amelyek eredményei (abszolút átlagos hibái) az alábbi táblázatban láthatóak. A paraméterek az $\omega_x = 80^\circ/s$, $\omega_y = 100^\circ/s$ –os méréssel lettek meghatározva, tehát az első sorban ennek az adatsornak a saját hibái vannak feltüntetve.

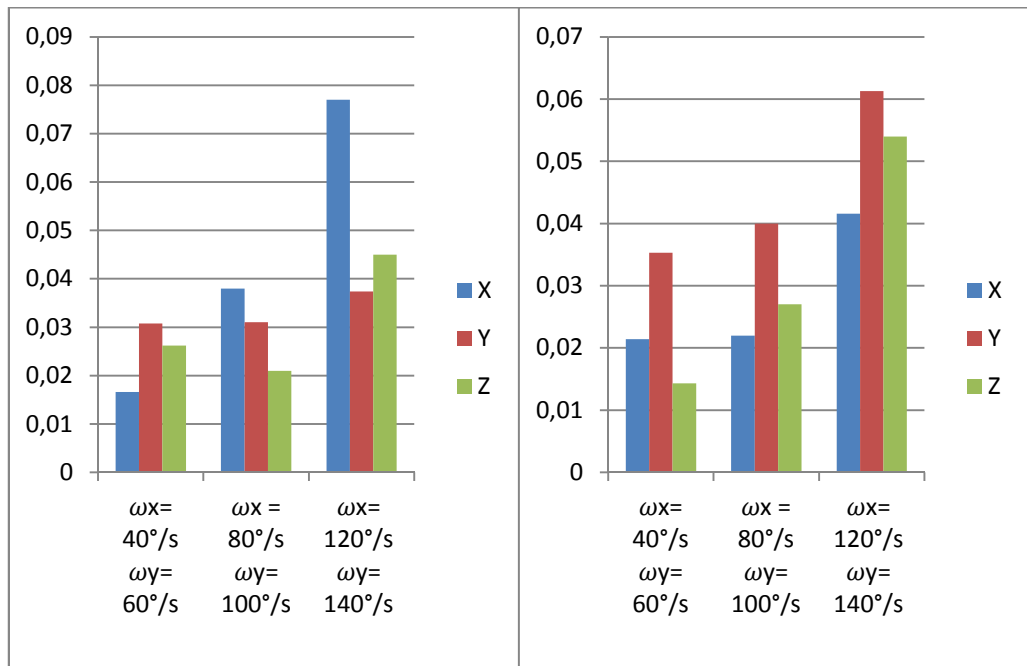
	Gyro1 [rad/s]	Gyro2 [rad/s]	Gyorsulásmérő1 [m/s ²]	Gyorsulásmérő2 [m/s ²]
$\omega_x = 80^\circ/s$	0.038	0.022	0.227	0.228
$\omega_y = 100^\circ/s$	0.031	0.040	0.264	0.244
	0.021	0.027	0.261	0.300
$\omega_x = 40^\circ/s$	0.0166	0.0214	0.1754	0.1592
$\omega_y = 60^\circ/s$	0.0308	0.0353	0.1658	0.1445
	0.0262	0.0143	0.2104	0.2476
$\omega_x = 120^\circ/s$	0.0770	0.0416	0.2881	0.3544
$\omega_y = 140^\circ/s$	0.0374	0.0613	0.3162	0.3236
	0.0450	0.0540	0.3242	0.4442

4.2. táblázat – A szenzorok abszolút hiba átlagai

A szemléletesség kedvéért az egyes hibák diagramon is meg lettek jelenítve szenzoronként. Az eredményekből látszik, hogy a kis sebességű mérésnél a referenciától kisebb eltérés lett mérve, mint annál a mérésnél, amelynél a paraméterek meg lettek határozva.

Gyro1:

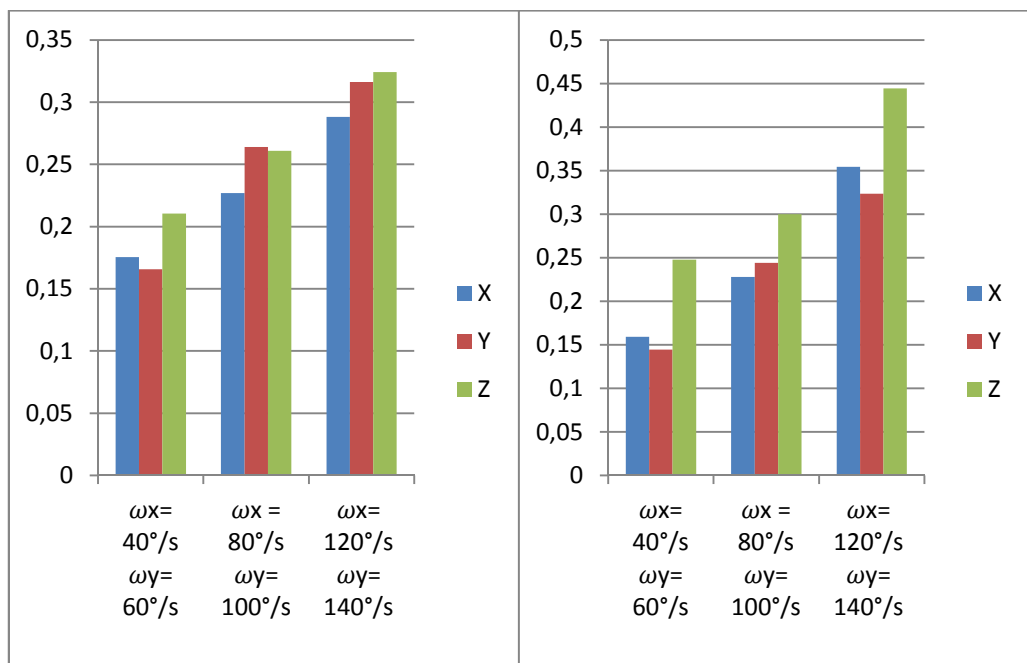
Gyro2:



4.6. ábra - Gyro1 és Gyro2 átlagos eltérései a referenciától

Acc1:

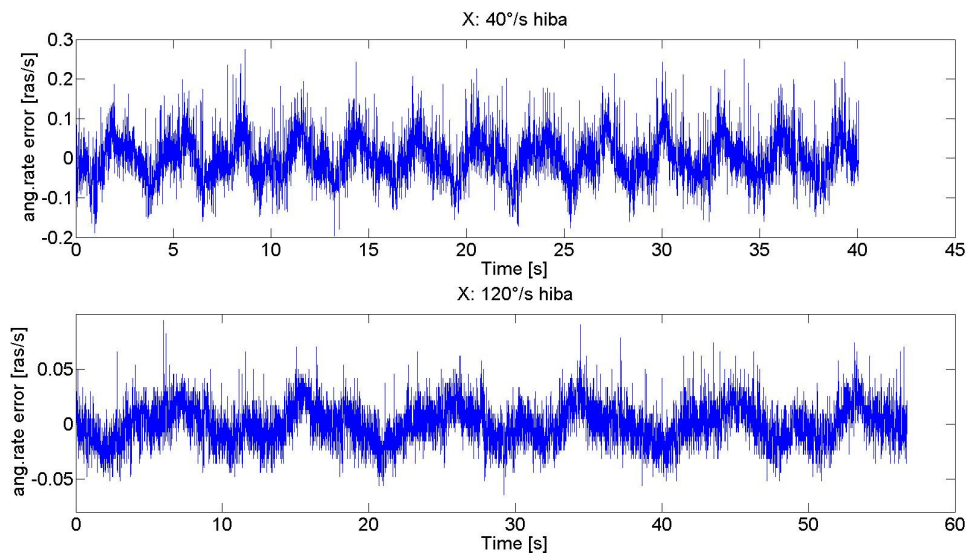
Acc2:



4.7. ábra - Acc1 és Acc2 átlagos eltérései a referenciától

Az eredményeket Matlabbal kirajzolva egyértelműen látszik, hogy a kalibrált jelek minden mérésnél jól illeszkednek a referencia jelre. A sebességgel növekvő hiba

oka az aktuátorok szabályozásában keresendő. Minél nagyobb az adott szervó szögsebessége, annál zajosabb mérési eredményeket kapunk. Az X tengely szervóján mért $40^\circ/\text{s}$ -os és $120^\circ/\text{s}$ -os sebességek hibái az alábbi ábrán láthatóak rad/s-ban, ahol a hibának egyfajta periodikus viselkedése is megfigyelhető.



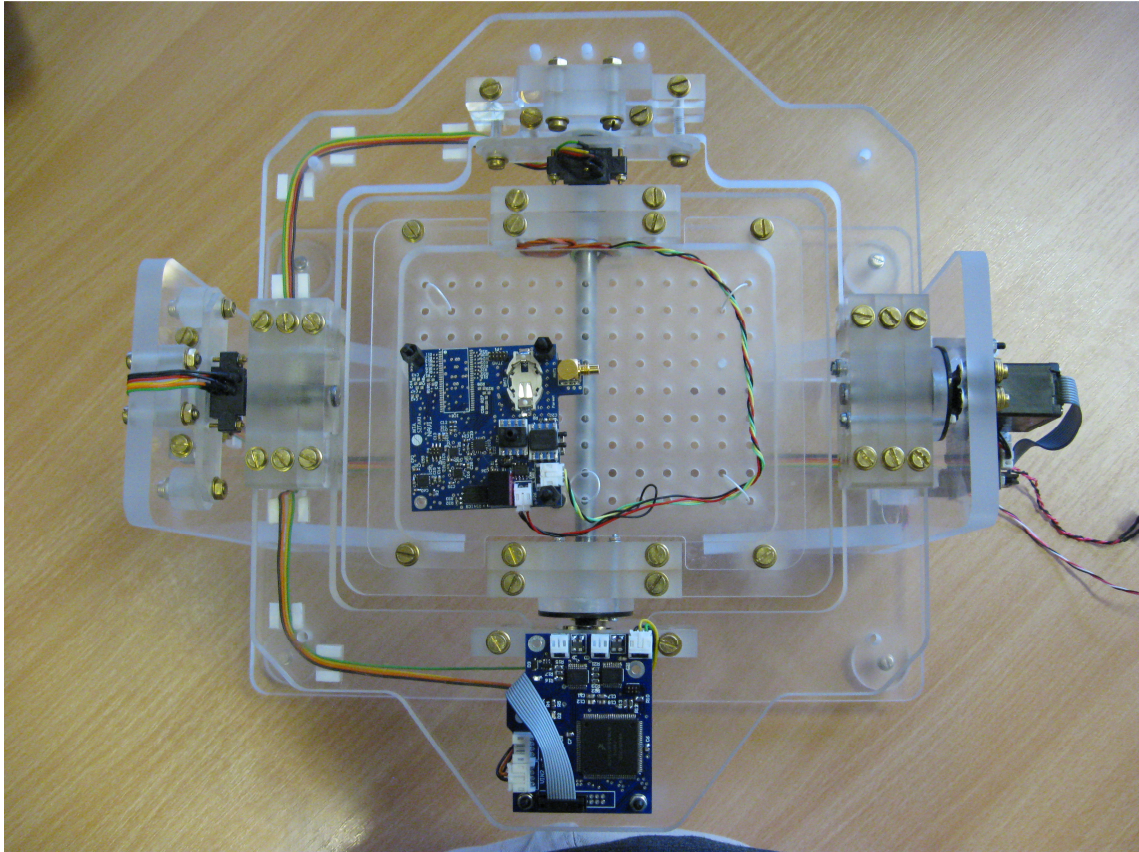
4.8. ábra - Szögsebesség hiba

A kiszámolt RMS érték a két mérésre vonatkozóan: $\text{RMS}_{40}=0.6984\text{rad/s}$, $\text{RMS}_{120}=2.0948\text{rad/s}$, ami igazolja az előző állításokat.

A mérés szempontjából pedig a teszt sikeresnek mondható, a korábban meghatározott paraméterek kielégítően működnek más mérésekkel is.

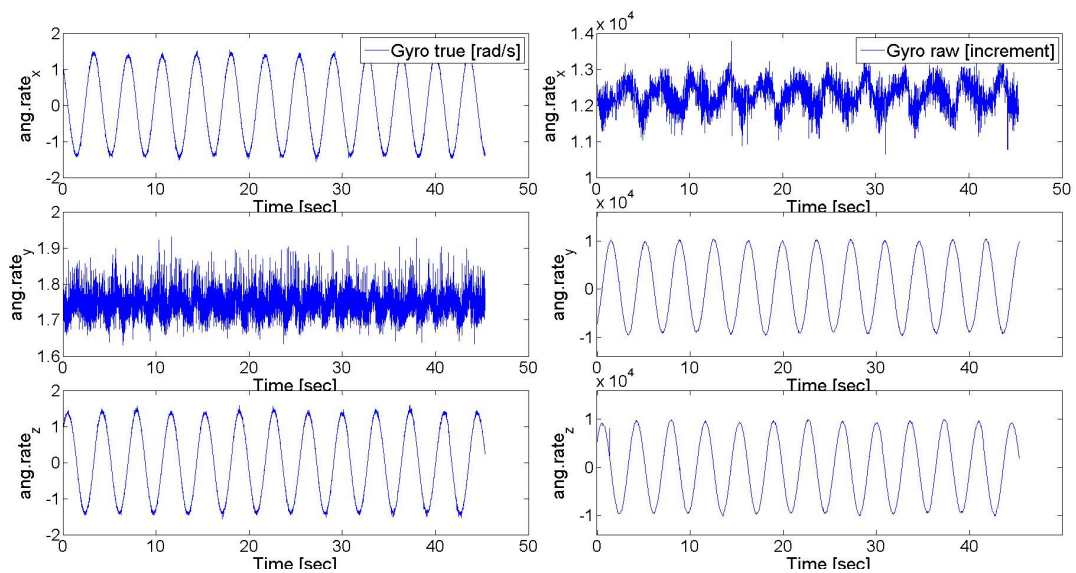
4.3 Pozíciótól és orientációtól független működés

A 4.1-es pontban kiszámított paraméterek mérésénél az IMU szenzorjainak tengelyei nagyjából egybeestek a gimbal koordináta-tengelyeivel. Ahhoz, hogy lássuk, hogy az optimalizáció jól működik, szükség volt egy olyan mérésre, ahol a navigációs berendezés orientációja lényegesen eltér a kalibrációs berendezésétől. Így az optimalizációnak lényegesen nagyobb hibát kell kikompenzálnia. Ahogy az az elrendezésen is látszik, a méréshez az IMU most át lett helyezve a belső forgórész bal fél síkjára és el is lett forgatva, így a tengelyek megcserélődtek és a felhelyezés szemmel láthatóan nem ortogonális a gimbalra.

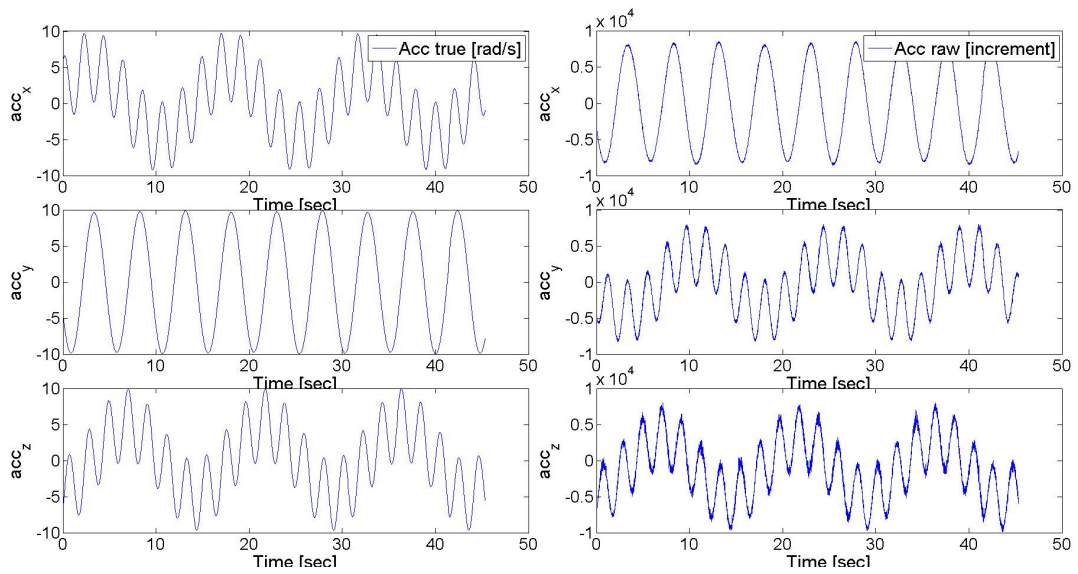


4.9. ábra - Mérési elrendezés

A mérés elvégztével látható, hogy a referencia és a nyers adatok ismét hasonló jellegűek, de az X és Y tengely egyértelműen fel van cserélődve.

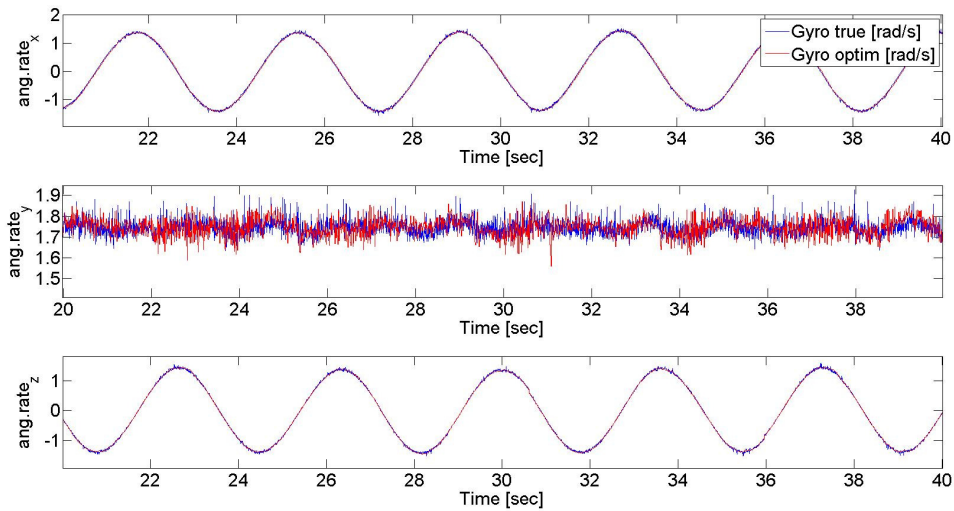


4.10. ábra - Szögsebesség referencia (bal) és a nyers adatok (jobb)

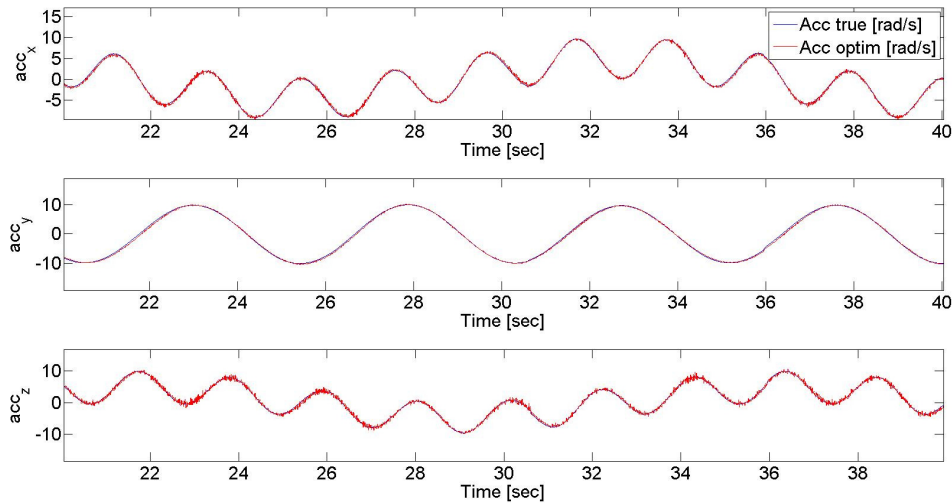


4.11. ábra - Gyorsulás referencia (bal) és a nyers adatok (jobb)

Az optimalizáció után pedig látható, hogy a paraméterek meghatározása sikeres volt, a kalibrált adatok jól fedik a referenciát.



4.12. ábra - Szögsebesség referencia (kék) és a kalibrált adatok (piros) nagyítva



4.13. ábra - Gyorsulás referencia (kék) és a kalibrált adatok (piros) nagyítva

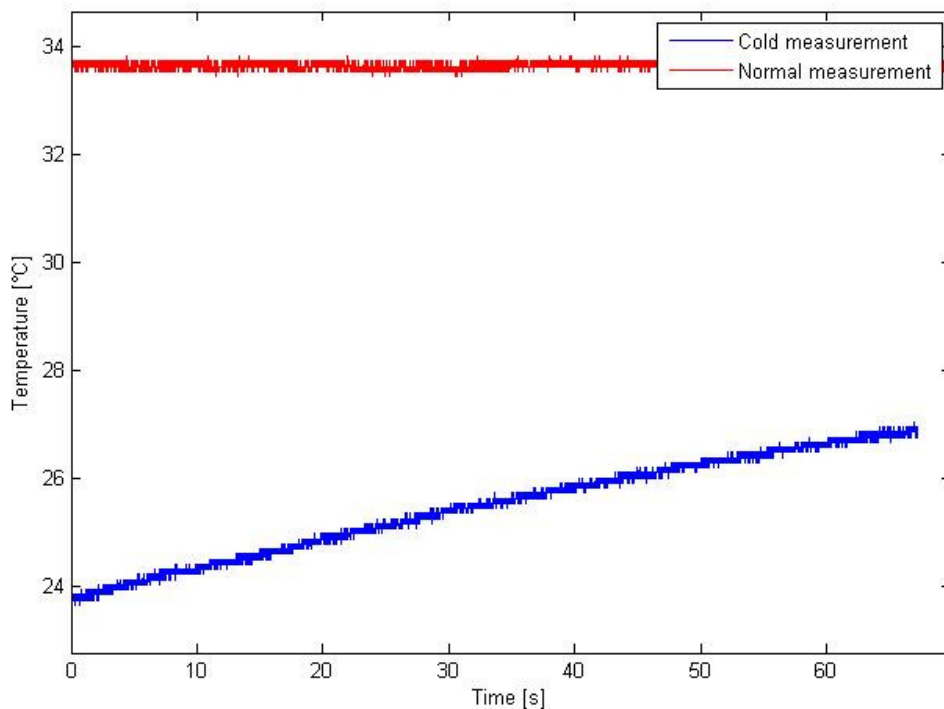
A táblázatban vannak feltüntetve az így meghatározott paraméterek és az átlagos hibák, amik szemmel láthatóan hasonlóak az előző mérés hibáihoz.

	Pozíció ($D_S^{\vec{}}$)	Orientáció ($V_S^{\vec{}}$)	Offset ($O_S^{\vec{}}$)	Skálázás ($S_S^{\vec{}}$)	Abszolút hiba átlag
Gyro1	-	1.590e-1	-1.213	1.906e-4	0.061 rad/s
	-	1.196e-1	1.679	6.282e-6	0.031 rad/s
	-	-9.602e-1	1.042e-3	1.604e-4	0.062 rad/s
Gyro2	-	1.572e-3	-1.673e-6	1.450e-4	0.034 rad/s
	-	3.939e-2	1.252e-4	1.420e-4	0.038 rad/s
	-	-1.534	1.024e-5	1.461e-4	0.020 rad/s
Acc1	0.052m	2.494e-2	9.106e-3	1.204e-3	0.229 m/s ²
	0.047m	2.136e-2	6.870e-2	1.209e-3	0.265 m/s ²
	-0.027m	-1.458e-2	-1.5388	1.204e-3	0.258 m/s ²
Acc2	-0.037m	1.909e-2	-2.886e-1	1.184e-3	0.208 m/s ²
	0.015m	2.441e-2	-2.393e-1	1.194e-3	0.205 m/s ²
	-0.027m	-6.747e-3	-8.916e-1	1.163e-3	0.351 m/s ²

4.3. táblázat – A szenzorok paraméterei és hibái

4.4 Hőmérsékletfüggés

Az elkészült kalibrációs mechanika egyik előnye, hogy a kézi kalibrációtól eltérően, most már egyszerűen végezhetőek mérések a szenzorok hőmérsékletfüggésének megállapításához. Az alábbi teszthez az IMU két óra hosszára egy 6°C-os hűtőszekrénybe lett helyezve. Ez után egy mérés lett vele elvégezve ugyanolyan mozgásra (az $\omega_x = 80^\circ/\text{s}$, $\omega_y = 100^\circ/\text{s}$), mint amilyennel a paraméterek meg lettek határozva. A következő ábrán a két mérés alatt, a szenzorok hőmérsékletének alakulása látható. A két mérés alatti átlagos szenzor hőmérséklet 33.64°C és 25.45°C volt.

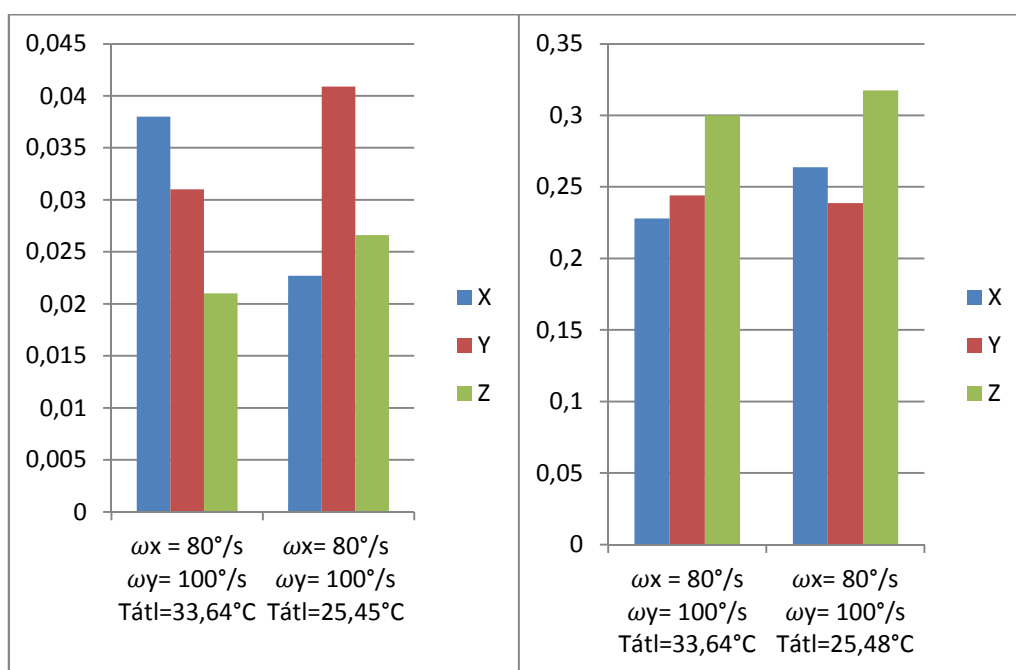


4.14. ábra - A két mérés alatti szenzor hőmérséklet

A hideg mérés elvégzése után, a begyűjtött adatok kalibrálva lettek a normál hőmérsékleten (4.1) végzett mérés optimalizációjának paramétereivel. A következő két diagramon az egyik giroszkóp és gyorsulásmérő kalibrált adatainak átlagos abszolút eltérései láthatóak a referenciáktól. Elmondható, hogy ugyan mind a két szenzor esetében a hibák nagyobbak a hideg mérésnél, de mindkét szenzor esetében van olyan koordináta-tengely is, ahol kisebb.

Gyro2:

Acc2:



4.15. ábra – Gyro2 és Acc2 átlagos eltérései a referenciától

A szögsebességmérő esetében az Y tengelyen látható a legnagyobb romlás a két mérés hibái között, ami 0.01 rad, azaz 0.5° . Ez a különbség pedig kisebb, mint az egy mérés alatti, különböző tengelyeken eső hibák különbségei. Elmondható tehát, hogy a hőmérsékletfüggésből adódó hibák kisebbek, mint a mérés alatti zaj, így ez ebben az esetben elhanyagolható. Ez a megállapítás igaz a gyorsulásmérőre is.

5 Továbbfejlesztési lehetőségek

A paraméterek vizsgálatánál (4.2) kiderült, hogy az aktuátorok minél nagyobb szögsebességen vannak vezérelve annál zajosabb adatokat szolgáltatnak. A hibának egy fajta periodikus viselkedése is megfigyelhető volt. Habár a meghatározott paraméterek így is elég pontosak, ezen hiba kiküszöbölésével a kalibráció még javítható. Ehhez szükség van a gimbal identifikációjára.

Az eddigi mérések során kiderült, hogy nem mindegy az egyes hibaparaméterek hozzáadásának sorrendje a nyers adatokhoz. Ez jellemzően a giroszkóp kalibrálására igaz. Egy mérés alatt az IMU két giroszkópjának kalibrálásakor előfordul, hogy más-más sorrendű számítással éri el az optimalizáció a legjobb eredményt. Célszerű lenne egy olyan algoritmus implementálása, amely a lehető összes sorrenddel lefuttatja az optimalizációt és végül azokat a paramétereket adja meg, amelyekkel a legkisebb hibát számította.

A tervek között szerepel még a kalibráció teljesen automatikussá tétele. Ehhez az optimalizációs algoritmust implementálni kell LabWindows környezetben és az IMU-t is képesnek kell tenni arra, hogy a meghatározott paramétereket fogadni tudja.

A jövőben érdemes lenne több mérést végezni a szenzorok hőmérsékletfüggésének pontosabb meghatározásához. Ehhez szükség lenne mérésekre eltérő hőmérsékleteken.

A szakdolgozat folyamán a SZAKI-ban fejlesztett IMU mágneses szenzorjai nem lettek kalibrálva, a jövőben szükséges erre a feladatra egy módszer kialakítása.

6 Összefoglalás

A szakdolgozatom elkészítése során megismerkedtem az inerciális navigáció alapjaival és az ehhez szükséges MEMS gyorsulásmérők és giroszkópok tulajdonságaival. A feladatomban volt egy már elkészült kalibrációs mechanika vezérlésének és egy olyan algoritmusnak a kialakítása mellyel a SZTAKI-ban fejlesztett inerciális navigációs berendezés MEMS technológiájú szögsebesség- és gyorsulásmérőinek kalibrációs paraméterei meghatározhatóak.

Az eszköz egy két szabadságfokú gimbal, aminek működéséhez két szinten SZTAKI-ban fejlesztett flexray és CAN kommunikációra képes aktuátor lett felhasználva. Ehhez elkészítettem egy olyan hardvert, amely a két szervóval CAN vonalon, a számítógéppel UART protokoll segítségével kommunikál. A hardverre két szoftver is készült, az egyikkel a Matlabon keresztül lehetséges az aktuátorok szabályzó paramétereinek változtatása, azok későbbi fejlesztéséhez. A másik pedig a kalibrációs mechanika vezérlését látja el, vagyis irányítja a két aktuátort és fogadja azok és a kalibrálandó IMU mérési adatait. Az eredeti tervek között ugyan szerepelt a szervók identifikációja, de az előzetes tesztek alapján azok a már meglévő szabályzással is kielégítően működtek. Ezek alapján az identifikációval nem lehetett volna elérni akkora javulást a kalibrációban, hogy azzal érdemes legyen foglalkozni a szakdolgozat keretében.

A vezérléshez és a mérési adatok feldolgozásához szükség volt egy számítógép oldali kezelőfelület elkészítésére is. Ez LabWindows/CVI környezetben készült. A program UART protokollon keresztül képes a mechanika működéséhez fontos referenciák kiadására és a kalibrációhoz szükséges mérési adatok fogadására. Továbbá képes az említett adatok feldolgozására és megjelenítésére, valamint azok fájlba mentésére. Az adatok egy .m fájlba íródnak, melyet a Matlab futtatni képes és az egyes jelek strukturáltan tömbökbe rendeződve jelennek meg a workspace-en.

Az előzetes tervek alapján egy már a SZAKI-ban korábban is használt kalibrációs algoritmus átültetése lett volna a feladat a LabWindows/CVI környezetbe, azonban a munka során érdekesebbnek látszott egy új optimalizáció alapú algoritmus implementálása a Matlabban, amivel valószínűleg jobb eredmények érhetőek el. Tehát a szakdolgozat keretében elkészítettem a paraméterek meghatározásához és azok

ellenőrzéséhez szükséges új algoritmust. Ehhez szükség volt az aktuátorok adatai alapján az IMU referencia gyorsulásának és szögsebességének kiszámítására, valamint az optimalizáció implementálására, amihez a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam. Meghatároztam az IMU két-két szögsebességmérőjének és gyorsulásmérőinek paramétereit, beleértve a nulla helyzeti hibát, skálázási hibát és az orientációs hibát. A paraméterek helyességét több méréssel is ellenőriztem és igazoltam.

Irodalomjegyzék

- [1] Erdő András, *Navigációs modul tervezése és készítése autonóm rendszerekhez*, BME-EET Szakdolgozat, Budapest, 2012.
- [2] Cleantech magazine: *Military and Fuel Cell Adoption*, <http://www.cleantechinvestor.com/portal/fuel-cells/6449-military-and-fuel-cell-adoption.html> (2013. április)
- [3] Vectornav, *Inertial Measurement Units and Inertial Navigation*, <http://www.vectornav.com/support/library?id=76> (2013 május)
- [4] Bakos Ádám, *Navigációs célú inerciális mérőegység tervezése*, BME-IIT Diplomaterv, Budapest, 2009.
- [5] Benjamin Peter, *Development of an Automatic IMU Calibration System*, ETH-ASL Master Thesis, Zürich, 2011.
- [6] Goutam Reddy, *Using a Gimbal to Calibrate an Inertial Measurement Unit*, MIT Master Thesis, Cambridge, 2005.
- [7] Wikipedia: *Inertial measurement unit*, http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit (2013. április)
- [8] Wikipedia: *Inertial navigation system*, http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_guidance_system (2013. április)
- [9] István Réti, Márk Lukátsi, Bálint Vanek, István Gőzse, Ádám Bakos, József Bokor: *Smart Mini Actuators for Mobile Robots*, European Conference on Mobile Robots, Barcelona, 2013 (beadva)
- [10] Autrotonic, <http://www.acutronic.com/ch/products.html> (2013 április)
- [11] The Modal Shop, *Turnkey Accelerometer Calibration Workstation*, <http://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=77> (2013 április)
- [12] Accelerometer, magnetometer & gyroscope calibration, <http://www.youtube.com/watch?v=XqQCbkncVYI> (2013 április)
- [13] Servocity, <http://www.servocity.com> (2013 április)
- [14] Sebastian O.H. Madgwick, *Automated calibration of accelerometers, magnetometers and gyroscopes*, Feasability study, September 2010.
- [15] J.J. Hall, R.L. Williams II, and F. Grass: *Inertial measurement unit calibration platform*, Journal of Robotic Systems, 17(11):623-632, 2000.
- [16] A. Kim and MF Golnaraghi. *Initial calibration of an inertial measurement unit using an optical position tracking system*. In Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004, pages 96-101. IEEE, 2004.

- [17] Laszlo Kis, Zoltan Prohaszka, Gergely Regula: *Calibration and Testing Issues of The Vision, Inertial Measurement and Control System of An Autonomous Indoor Quadrotor Helicopter*. INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICS AND CONTROL 10:(1) pp. 29-38., 2009.
- [18] Csepregi Szabolcs, *Forgatás*:
http://www.geo.info.hu/gisopen/cd_2002/dokumentum/doc_html/csepregi_sz.htm
(2013 április)
- [19] Wikipedia: *Matematikai optimalizálás*,
http://hu.wikipedia.org/wiki/Matematikai_optimalizálás (2013 május)
- [20] Stephen Boyd: *Convex Optimization*, Cambridge University Press 2004, ISBN 0-521-83378-7