

Nagy pontosságú GNSS alapú mérőrendszer kifejlesztése nagysebességű járműves tesztek támogatásához

Kardos Gábor*, Fehér Árpád*, Szabó Ádám*, Dr. Aradi Szilárd*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
e-mail: [kardos.gabor, feher.arpad, szabo.adam, aradi.szilard]@kjk.bme.hu

Absztrakt: A cikk egy alacsony költségvetésű helymeghatározó eszköz fejlesztését mutatja be, aminek célja, hogy olyan alternatívát nyújtson az önvezető jármű fejlesztéssel kapcsolatos kutatásokban, ami kiválthatja a költséges, kereskedelemben kapható hasonló eszközöket. Ez nem csupán anyagi szempontból járhat előnyökkel, de a fejlesztésbe bevont mérnökhallgatók is több fronton profitálhatnak belőle. Az alapfunkció egy szenzorfüzióval megvalósított pozíció, sebesség és orientáció becslés, ami Real Time Kinematic (RTK) globális navigációs (GNSS) technológia és inerciális mérőegység (IMU) által biztosított adatokon alapul. A nagyfrekvenciás becslések egy Kálmán-szűrő futtatásával állnak elő, ami egy mikrokontrolleren, beágyazott környezetben fut. A munka folyamán több alkalommal jöttek elő újabb kihívások, amik megoldást igényeltek. Ilyen például a GNSS vevők működéséből adódó késés, amit a becslő algoritmusnak kompenzálnia kell, illetve a szenzorok megfelelő kalibrációja a mérőjárműhöz. Az eszköz kifejlesztése a szoftver mellett a hardver teljes körű megtervezését, legyártását és tesztelését magában foglalja, ami lehetőséget ad az elkészült szoftveregységek nem csak szimulációs, hanem valós környezetben való kipróbálásához is. Tesztelések során számos alkalommal került összehasonlításra a fejlesztett eszköz kimenete kereskedelemben kapható hasonló célú hardverekkel.

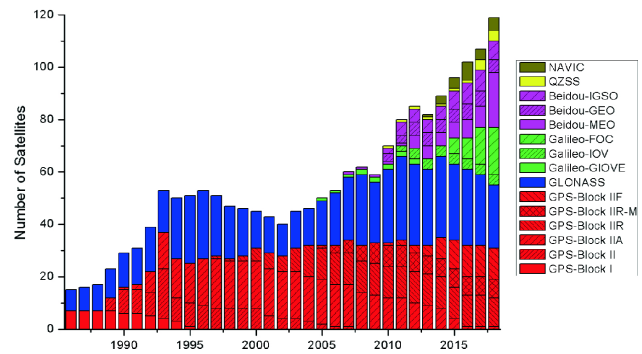
1. BEVEZETÉS

1.1 Motiváció

Napjainkban az autonóm járművek iránti érdeklődés és az újabbnál újabb fejlesztések számának folyamatos növekedésével megjelent az igény a járművek dinamikai állapotának nagy pontosságú mérésére is. Ez magában foglalhatja az aktuális pozíció, gyorsulások, sebességek megfigyelését. A piacon már számos termék felel meg ezeknek a követelményeknek, viszont magas árak miatt sok esetben kizáró ok lehet alkalmazásuk. Jelen publikáció célja egy olyan eszköz hardveres és szoftveres felépítésének bemutatása, ami a kereskedelemben kapható hasonló tulajdonságú társainál alacsonyabb anyagi forrás felhasználásával képes nagy pontosságú és magas frekvenciás pozíció, sebesség és orientáció adatok előállítására.

1.2 GNSS rendszerek története

Az 1. ábrán a felbocsátott és az aktív navigációs műholdak száma látható hosszú évekre visszamenőleg. A 2000-es évek elején például egy csökkenő tendencia látható a műholdszámában, mert egy-egy ilyen GNSS műhold élettartama véges. Eleinte 3-5 év volt, viszont ez a szám folyamatosan növekszik és a legújabb GPS III műholdakat 15 éves élettartamra tervezik. Főleg az új Kínai, Japán és Indiai műholdak fellövése miatt alapvetően egy növekvő trend mutatkozik az aktív műholdak számában.



1. ábra A felbocsátott aktív GNSS műholdak száma 1985-től napjainkig. (forrás: *Satellite Navigation for Digital Earth*.)

A GNSS műholdak több különböző frekvencián vagy sávon sugároznak. A különféle GNSS jelsávok különböző frekvenciákat foglalnak el és eltérő jelstruktúrával és kódolással is bírnak. A többutas és atmoszférikus torzítások által okozott hibák hatását csökkenti a több GNSS sáv használata, amivel nő a pontosság. Eleinte katonai célokra alkalmaztak több frekvenciasávot, de az újabban felbocsátott műholdak számával együtt jelenleg is növekszik azon műholdak száma, amelyek polgári célú többsávú jeleket sugároznak.

1. táblázat: GNSS vevőkben alkalmazott lapkakészletek fejlődése.

| | Megjelenés éve | Konstellációk | Csatornák száma | Frissítési frekvencia | Érzékenység |
|----------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------|
| SiRFstar III chipset | 2005 | GPS | 20 | 1 Hz | -159 dBm |
| U-blox NEO-M8P | 2016 | GPS GLO BeiDou | 72 | 8 Hz | -160 dBm |
| U-blox ZED-F9P | 2018 | GPS GLO GAL BeiDou QZSS | 184 | 20 Hz (RTK: 8 Hz) | -167 dBm |

A civil felhasználású vevők terén 2004-2005 után hosszú évekig a SiRFstar III lapkakészlet (chipset) kvázi etalonnak számított. A cikkben bemutatott hardverben használt aktuális chipsettel a ZED-F9P-vel és elődjével a NEO-M8P-vel jól szemléltethető, hogy mennyit fejlődött azóta a technológia. (1. táblázat) Míg a 20 csatornás SiRFstar III chip 1 műholdrendszer volt képes kezelni és a pozíció adatokat másodpercenként biztosítani, addig a NEO-M8 RTK chip 2016-ban már 72 csatornát kezel és három műholdrendszer adataival tudott számolni sokkal nagyobb pontosság mellett. 2018 második felében a NEO-M8 utódjának szánt ZED-F9P modul már rendszerenként több sáv támogatása mellett annak minden előnyével akár 20 Hz frissítési frekvenciára is képes.

A ZED-F9P megjelenéséig a többsávós (vagy multi-band) vevők 5000 dollár vagy annál drágábbak voltak. Ezeket a precíziós vevőket elsősorban a csúcskategóriás ipari és repülőgépipari alkalmazásokban használták vagy például geodéziai méréseknél, ahol elengedhetetlen a centiméteres pontosság.

1.3 Kapcsolódó irodalom

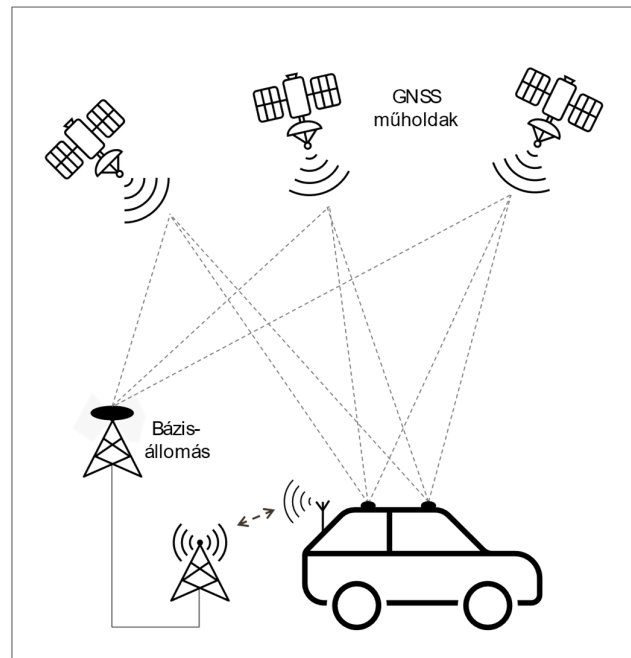
Korábbi kutatómunkánk során több kereskedelmi forgalomban kapható nagy sebességű járműdinamikai mérésekre is felhasználható RTK GPS eszközt is volt lehetőségünk használni. Ezen rendszerek mindegyike több nagyságrenddel többre kerül, mint a jelenleg fejlesztés alatt álló rendszerünk becsült költsége.

A német iMAR Navigation GmbH az egyik vezető navigációs rendszereket gyártó vállalat az autóiipari alkalmazásokon át, katonai tengeralattjáró és repülőipari alkalmazásokon keresztül, a bonyolult föld alatti fűrérendszerek navigációs eszközeivel is foglalkozik. Az egyik közkezdelt termékükkel, az iNAT-M200 típusú INS/GNSS adatfúziós módszerrel 500 Hz-el szolgáltat valós idejű lokalizációs információkat RS232, CAN, vagy Ethernet kapcsolaton keresztül. Több mint 42 állapotú kiterjesztett Kálmán szűrőt alkalmaz és négy GNSS

konstellációt támogat. A jól kalibrált eszköz pontos korrekciós adatokkal kifejezetten stabil működést produkál. A RACELOGIC brit vállalat VBOX 3i két antennás RTK GPS eszköze kevesebb, mint 1 cm pontos pozíciót szolgáltat maximum 100 Hz frissítési frekvenciával. A CAN kimenetein küldött lokalizációs adatokat INS adatfúzió nélkül kizárólag GPS és GLONASS konstellációkra hagyatkozva állítja elő. A két konstelláció arra enged következtetni, hogy egy viszonylag régi chipkészlet található benne. Az eszköz fel van készítve IMU szenzor befogadására is, amivel javítható a megbízhatósága. A konfigurálása lényegesen egyszerűbb, mint az iMAR eszközének. A RACELOGIC vállalatnak kifejezetten a motorsportra kifejlesztett eszközei is szerepelnek a termékpalalettájukon.

Tudományos körökben is különféle megközelítésből igyekeznek a több szenzor fúzióján alapuló helymeghatározás problémáját megvizsgálni. Ezeknek természetesen a fő célja, hogy a kapott pozíció a lehető legpontosabb legyen. Alapvetően a jelenlegi problémához legközelebb álló munka, amely kiindulási alapként szolgált az itt bemutatott Kálmán-szűrős megoldáshoz az R. Mungia által bemutatott Extended Kálmán-szűrő, ahol a becsült állapotok közé tartoznak az inerciális szenzor hibái is. A költségek alacsonyan tartásához több irányból vezethet az út. Például a már mindenkinél megtalálható okostelefonok szenzoraival is megvalósíthatók hasonló megoldások (Yan W, Zhang Q, Wang L et al).

2. A MÉRŐRENDSZER FELÉPÍTÉSE

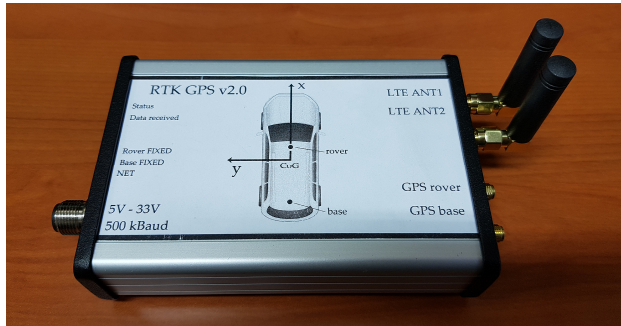


2. ábra A mérőrendszer vázlatos felépítése és a GNSS antennák elhelyezkedése a mérőjárművön.

Ahogy a kereskedelemben kapható, profi eszközöknél ezt megszokhattuk, az itt bemutatott eszköz is két antennát használ a helymeghatározáshoz. Mindegyik antennához kapcsolódik

egy-egy GNSS vevő. A hátsó antenna az úgynevezett mozgó bázis, ami megkapja egy statikus bázisállomástól a korrekciós adatokat az RTK pozíció kiszámításához, illetve maga is korrekciós adatokat szolgáltat a másik vevő felé. A statikus bázisállomás által biztosított korrekciós adatok GSM kapcsolaton keresztül jutnak el a járműben lévő eszközhöz. Az első antennára kötött GNSS modul a korrekciós adatokon túl megkapja a mozgó bázis adatait és meghatározza a relatív állászhöget és a két antenna közötti távolságot.

3. RTK-GPS ESZKÖZ



3. ábra: Az elkészült eszköz dobozólása, benne az áramköri elemekkel.

3.1 Hardverelemek

A hardver számos különböző modulból épül fel a kívánt funkciók megvalósításának érdekében. Tartalmaz két u-blox GNSS vevőt, egy IMU szenzort, egy 4G kompatibilis GSM modemet, egy mikrokontrollert, továbbá ledekert és különböző kommunikációs interfészeket, mint CAN illetve USB kapcsolódási lehetőség. Ahhoz, hogy az említett hardver elemek egy egységként tudjanak együttműködni, szükséges egy nyomtatott áramkör tervezése, ami megvalósítja az elvárt áramköri kapcsolatokat a részegységek között.

A nyomtatott áramkör tartalmaz egy tápáramkört, ami 3,6 és 33 Voltos bemeneti feszültségtartomány mellett képest előállítani a stabil 3,3 Voltos tápfeszültséget a szenzoroknak és a mikrokontrollereknek. Az áramkör védett rövidzár és túlfeszültség ellen, ami fontos tényező, figyelembe véve azt, hogy alapvetően prototípus környezetben lesz használva.

A központi feladatokat végző mikrokontroller, egy 32 bites ARM Cortex-M7 architektúrájú vezérlő, ami a 300 MHz-es maximális órajelével elegendő erőforrást biztosít a szenzoradatok fogadására, feldolgozására és további kommunikációs feladatokra. Az alap funkciók mellett számos interfésszel rendelkezik, mint UART portok, SPI, I2C, vagy az autóiipari kontrollerekre jellemző CAN kommunikációs lehetőség, így egyszerre tudja magas frekvenciával olvasni a szenzorok adatait és továbbítani a nyers, valamint a számolt adatokat más külső eszközöknek.

A hardveren megtalálható két u-blox GNSS vevő, amelyek a pontos pozíció, sebesség és orientáció adatokat biztosítják. Ezek támogatják az RTK technológiát, azaz képesek akár 2

centiméter pontosságú adatok előállítására is. Ehhez viszont szükségesek egy külső bázis állomás által biztosított korrekciós adatok. A pozíció és a sebesség meghatározására elegendő lenne egyetlen vevő is, viszont ahhoz, hogy álló helyzetben is nagy pontosságú orientációt tudjon meghatározni szükséges egy második eszköz is. Ez a két antenna relatív pozíciójából számolja ki a szükséges állászhöget. Ezt a funkciót gyárilag támogatja a választott GNSS eszköz, így nem kell külön implementálni a mikrokontrollerre.

A pontos helymeghatározási adatokhoz szükséges egy távoli bázisállomással való vezeték nélküli kapcsolat, amit egy 4G, LTE kompatibilis GSM modemen keresztül jön létre. A modem felkonfigurálását és a TCP kommunikáció kezelését a mikrokontroller vezérli, ami egy átjáróként is szolgál a korrekciós adatok számára, hogy a GNSS vevők megkapják azokat. A modem Mini PCI Express csatlakozón keresztül kapcsolódik a tervezett áramkörhöz, ami olcsóbb és biztonságosabb megoldás a jelenlegi első verziós áramkörök esetén, mivel egyszerűen átszerelhető egy újabb fejlesztésbe. A modemnek természetesen szüksége van egy SIM kártyára is ahhoz, hogy kommunikálni tudjon, így az áramkör tartalmaz egy micro SIM foglalatot, ami el van látva ESD védelemmel.

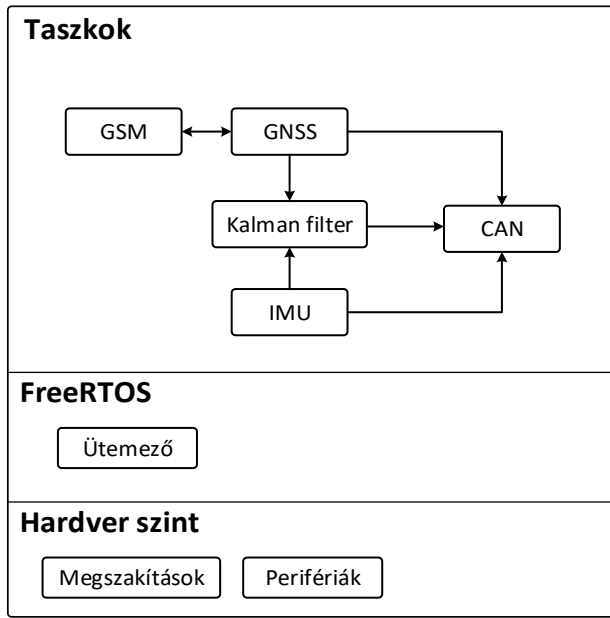
Annak érdekében, hogy az eszköz képes legyen megbecsülni egy jármű állapotát, egy Bosch BMI 085 IMU érzékelő is helyett kapott az áramkörön. Ez egy 6 szabadságfokú szenzor, amely magában foglal egy 3 tengelyes giroszkópot és egy 3 tengelyes gyorsulásmérőt. Az érzékelő képes akár 2000 Hz maximális frekvenciával biztosítani az adatokat a beépített szűrőkonfigurációtól függően. A mikrokontroller SPI interfészen keresztül kommunikál az érzékelővel.

Alapkövetelmény egy járműves környezetbe szánt eszköz esetén, hogy képes legyen CAN hálózaton keresztül kommunikálni a többi ECU-val, hogy azok megfelelően hozzáférhessenek az általa biztosított adatokhoz. A hardver képes néhány alapvető információt küldeni állapotáról, és természetesen közzéteszi a nyers GNSS és IMU adatokat, továbbá a Kálmán-szűrő becsléseit 100 Hz -es frissítéssel.

Az áramkörön helyet kapott egy Micro USB interfész is, amely a mikrokontroller egyik UART interfészével van kapcsolatban. Ennek a csatlakozónak két fő célja van. Főleg a fejlesztés korai szakaszában hasznos hibakeresési interfész, illetve ezen keresztül végezhetőek el az alap kalibrációs műveletek, amivel többek közt a működés során csökkenteni lehet a becslések hibáját.

3.2 Szoftverelemek

A mikrovezérlőn futó beágyazott szoftver magja a FreeRTOS beágyazott operációs rendszer, amely lehetővé teszi több, párhuzamos taszk futtatását valós időben. Ezek a taszkok felelnek az eszköz fő funkcióinak megvalósításáért, mint a helymeghatározási adatok kiolvasása a GNSS vevőkről, inerciális mérések olvasása az IMU-ból, Kálmán-szűrő futtatása, vagy a CAN-es kommunikáció. Ezeknek az időzítését és futását a FreeRTOS ütemezője vezényli.



4. ábra: Az eszközön futó szoftver blokkvázlata.

A FreeRTOS-ben számos független taszk került meghatározásra az érzékelők adatainak kezelésére, az állapotváltozók becslésére és a hozzá csatlakoztatott egységekkel való kommunikációra, amit a 4. ábra szemléltet. Két független taszokra van szükség a GNSS vevő információinak UART-on keresztül történő olvasásához, amely tartalmazza a pozíciót, sebességet, orientációt és egyéb diagnosztikai információkat, például a műholdak számát, a differenciális helymeghatározás állapotát és pontosságát. A mintavételi frekvenciát a vevő konfigurációja adja, amely legfeljebb 8 Hz a két vevős alapkonfigurációban használt u-blox modulok esetén.

Az eszköz minden indításakor fel kell építeni a TCP kapcsolatot az NTRIP szerverrel, amely biztosítja a korrekciós üzeneteket az mozgó bázis GNSS vevő számára. Ehhez készült egy taszk, amely menedzseli a TCP kapcsolatot, fogadja a korrekciós adatokat és ha szükséges, közelítő pozíció adatokkal is ellátja az NTRIP szervert.

Az IMU adatait kezelő szoftvermodul a gyorsulásmérő és a giroszkóp adatait olvassa be a szenzortól, a FreeRTOS taszk konfigurációjában meghatározott frissítési gyakorisággal. Indításkor a taszk inicializálja és meghatározza például az IMU érzékelő beépített szűrőit, amelyek közvetlenül meghatározzák a maximális frissítési frekvenciát.

A CAN kommunikáció is saját taszkban kapott helyet, ahol a buszról való olvasás és az arra való küldés is megvalósul. Más program egységek megosztják adataikat és információikat ezzel a taszkkal, majd minden üzenethez egyedi frissítési gyakoriságot rendelve küldi ki őket. Ezenkívül az adott felhasználástól függően konfigurálhatjuk a hardver által küldött üzeneteket menet közben.

A Kálmán-szűrő, amely a GNSS és az IMU érzékelő adatai alapján becsüli a hardver állapotát 100 Hz -es frissítési gyakorisággal fut, de ha szükséges ez tovább növelhető. A futásért felelős állapotgép magában foglalja az algoritmus inicializálását is.

3.3 Kálmán-szűrő

Mint már korábban említésre került a GNSS vevők maximális frissítési frekvenciája 8 Hz. Emellett a GNSS mérések és az adatok a mikrokontrollerbe jutása között eltelt idő több 10 ms is lehet. Ez a késés a vevőkben lévő korrekciós adatokkal való pontosítást végző algoritmus futásidejéből és a kommunikációs, jelfeldolgozási késésekből tevődik össze. Egy Kálmán-szűrő került implementálásra a cikkben bemutatott eszközbe, ami alapvető fontosságú a frissítési frekvencia növelése és a késés kiküszöbölésének érdekében. Az algoritmus az R. Munguia által leírtakon alapszik, viszont számos egyszerűsítés került alkalmazásra. Ennek oka, hogy első sorban egy működő prototípus elkészítése a cél, ami alap funkcióiban alkalmas egy önvezető demonstrációs jármű kiszolgálására, amit a fejlesztés későbbi szakaszaiban folyamatosan tudunk fejleszteni és pontosítani. Gyorsulás és szögsebesség adatok alapján megbecsüli az eszköz állapotát magas frissítési frekvenciával ezáltal alkalmassá téve az eszközt nagysebességű járműves funkciók fejlesztésére, tesztelésére. Ez egy széles körben használt módszer erre a feladatra, és a kereskedelemben kapható hasonló eszközök is használják saját megoldásaikban. Ebben az esetben kétféle adatforrásunk van, a GNSS vevők és az IMU. Optimális esetben a GNSS vevők elérik az RTK fix differenciális helymeghatározási állapotot, ami azt jelenti, hogy a pozíció hibája körülbelül két centiméteres.

Az állapottér tíz elemű (1), amely tartalmazza a hardverről vagy a járműről szükséges információkat. Az első négy eleme az állásszöveget tartalmazza kvaternió alakban. A fejlesztés jelenlegi szakaszában csak az elfordulás irányával, vagyis a „yaw” állásszöggel foglalkozunk, mivel erre van megfigyelésünk a GNSS vevőkből a két antennának köszönhetően.

A következő három elem az north, east, down (NED) koordináta rendszerben értelmezett pozíciót jelöli, amelyek az eszköz bekapcsolást követő kezdőkoordinátáiból származnak. Ennek az ábrázolásnak az a hátránya, hogy a GNSS vevőkből kiolvasott LLA koordinátákat át kell alakítani NED rendszerbe, majd a prediktált NED koordinátákat a Kálmán-szűrőből LLA formátumba ahhoz, hogy univerzálisan felhasználható koordinátákat küldjön ki az eszköz. Mindazonáltal a NED koordináta -rendszer lehetővé teszi az IMU adatokból történő pozíció és sebesség számítását SI mértékegységekben, úgy, hogy azok könnyen értelmezhetőek, így könnyítve a fejlesztést is.

Az állapotvektor utolsó három eleme a sebességre vonatkozik szintén NED koordinátákban, amely a pozíció esetén leírt előnyökkel rendelkezik, és az alkalmazott u-blox GNSS vevők ezt az információt minden szükséges átalakítás nélkül biztosítják.

$$[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ posN \ posE \ posD \ velN \ velE \ velD] \quad (1)$$

Ahhoz, hogy fel lehessen használni az IMU-ból származó adatokat, szükség van egy matematikai modellre, amely kiszámítja a helyzetet, a sebesség és az irányváltozásokat a gyorsulásból és a szögsebességből. Az ciklikusan futó állapotbecslési eljárás kezdetén, szükség van egy kezdeti állapotra a GNSS vevőkből, ami a predikció első lépéséhez, a koordináta transzformációkhoz szükséges. Az állapotbecslés három fő részre osztható: orientáció, helyzet és sebesség. Az orientációhoz a következő képletet használjuk (2), ahol $\Delta quat$ a giroszkóp által mért szögsebességek kvaternió formátuma világ koordináta rendszerbe transzformálva, ΔT az utolsó előrejelzés óta eltelt idő.

$$\begin{pmatrix} q_0(t) \\ q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_0(t-1) \\ q_1(t-1) \\ q_2(t-1) \\ q_3(t-1) \end{pmatrix} + \Delta t * \Delta quat \quad (2)$$

A pozíció előrejelzése (3) egyszerű módon történik. Az egyenes vonalú egyenletesen változó mozgás egyenletét használjuk fel, de mivel a ΔT 100 Hz-es frissítési frekvencia mellett eleve kis szám, így a gyorsulásra vonatkozó utolsó tagot elhagyjuk egyszerűsítésként, mivel nincs jelentős hatása az eredményre.

$$\begin{pmatrix} posN(t) \\ posE(t) \\ posD(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} posN(t-1) \\ posE(t-1) \\ posD(t-1) \end{pmatrix} + \Delta t \begin{pmatrix} velN(t-1) \\ velE(t-1) \\ velD(t-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Acc_x \\ Acc_y \\ Acc_z \end{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \quad (3)$$

Hogy a következő lépésben a sebesség kiszámítható legyen az IMU gyorsulásmérő adathármasa alapján, amely először a 3D gyorsulásokat mutatja a hardver koordináta rendszerben, szükség van egy olyan forgatásra, amely a mért adatot világ, azaz NED koordináta rendszerbe transzformálja. A forgási mátrix az orientációs kvaternióból származtatott, és a $RotAcc$ jelöli. A gyorsulási mérések elforgatása után ki kell vonni belőle a statikus gravitációs gyorsulást, majd meg lehet szorozni a két IMU -mérés közötti delta -idővel, és hozzá kell adni az utolsó állapotsebességhez. (4)

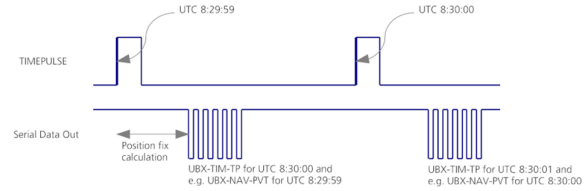
$$\begin{pmatrix} velN(t) \\ velE(t) \\ velD(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} velN(t-1) \\ velE(t-1) \\ velD(t-1) \end{pmatrix} + \Delta t \left(RotAcc \begin{pmatrix} Acc_x \\ Acc_y \\ Acc_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{pmatrix} \right) \quad (4)$$

3.4 Késletelés kompenzáció

A GNSS pozíciómeghatározás alap sajátossága, hogy a műholdakkal történő kommunikációba rengeteg külső zavaró körülmény avatkozik be zajt és késletetést injektálva a

mérésekbe. Ennek egy részét sikeresen orvosolni tudjuk differenciális helymeghatározási módszerekkel, jelen esetben RTK megoldással. Ezzel a pontosságot néhány centiméteres szórás mellett tudjuk meghatározni, viszont ahogy ez korábban említésre került a késletetést tovább növeli, ugyanis további számításokat kell a GNSS vevőknek végezniük a korrekciós adatok felhasználásával. Tapasztalataink alapján ez a késletetés együtt mozog a konstellációk és így a látható műholdak számával, vagyis minél több műhold jeleiből kell számolni a pozíciót, annál több lesz a késletetés. Ez a késletetés főleg a nagy sebességgel mozgó járművek esetén befolyásoló, például egy jávorszarvas teszt alatt. Példaként, ha a pozíció csak 60 milliszekundumot késik, az autó pozíciójába már 70 km/h sebesség esetén már több, mint 1 méter késés kerül, ami már egy szűk manőverezési feladat esetén túl nagy.

Ahhoz, hogy ezt megoldjuk először is meg kell határozni a GNSS adatok aktuális késését. A használt vevők rendelkeznek egy Timepulse kimenettel, ami logikai magas állapotot vesz fel abban a pillanatban, amikor megtörténik a műholdak alapján egy mérés. Ez után fut le a korrekciós adatok felhasználásával az RTK fix pozíció számolása, aminek a futásideje adja a fő késést. A mikroprocesszoron a Timepulse magas jelszintje megszakítást generál, ez elindít egy időmérést, amit addig futtat, amíg meg nem érkezik a következő pozíció adat az UART csatornán. Ez az idő adja az aktuális késletetést.



5.ábra: RTK pozíció számításának időbeli eltolódása a valós méréshez képest (forrás: ZED-F9P Interface Description)

Miután pontosan mérhető a GNSS adatok késése, a Kálmán-szűrő algoritmus módosításával, a posteriori késés kompenzáció módszerével ez a késés kompenzálható. Ehhez elegendő az a priori és a posteriori állapotbecslési egyenleteket vizsgálni:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (5)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (6)$$

A következő két időlépés esetén az a priori becslésben $\hat{x}_{k|k-t}$ kifejtve az alábbi egyenleteket kapjuk:

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_{k+1} (\hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k) + B_{k+1} u_{k+1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_{k+2|k+1} = F_{k+2} (F_{k+1} (\hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k) + B_{k+1} u_{k+1}) + B_{k+2} u_{k+2} \quad (8)$$

A fenti egyenleteket n időlépéssel későbbi állapotra kiterjesztve a mérési adat az alábbi módon vehető figyelembe a $k+n$ posteriori egyenletben:

$$\hat{x}_{k+n|k+n} = \hat{x}_{k+n|k+n-1} + \left(\prod_{i=1}^n F_{k+i} \right) K_k \tilde{y}_k \quad (9)$$

Ennek a megoldásnak a hátránya azonban, hogy a késést a mintavételi idő egész számú többszörösének feltételezi, amivel ronthatunk a becslés pontosságán. Ez alapján célszerűbb megoldás az előző állapotra és az innovációra különböző állapotátmeneti mátrixok alkalmazása:

$$\hat{x}_{k+n|k+n-1} = F_{k+n}(dt)\hat{x}_{k+n-1|k+n-2} + B_{k+1}u_{k+1} \quad (10)$$

$$\hat{x}_{k+n|k+n} = \hat{x}_{k+n|k+n-1} + F_k(t_{delay})K_k\tilde{y}_k \quad (11)$$

3.5 Kalibráció

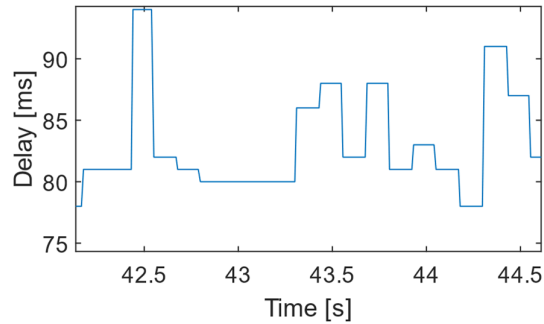
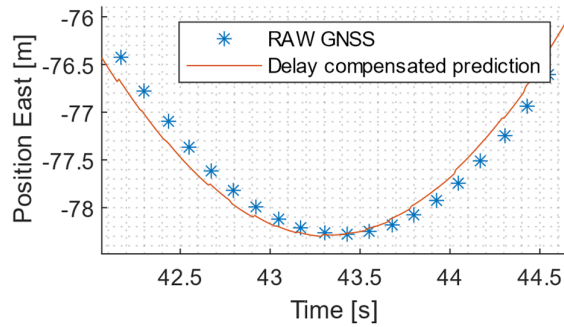
Mivel a jármű állapotára vagyunk elsősorban kíváncsiak, ezért fontos tényező az eszköz járműben való megfelelő rögzítése. Ehhez a szenzor és a jármű koordináta-rendszerének egybe kell esnie úgy, hogy az egymásnak megfelelő tengelyek párhuzamosak legyenek egymással továbbá azonos legyen az előjelük is. Egy másik fontos szempont, ami a GNSS vevőkhöz köthető, az a két antenna megfelelő felhelyezése, amit alapvetően az autó hossztengejére előre és hátra kell rögzíteni, megfelelő távolságra egymástól. Ezekhez vagy precíz rögzítésre van szükség, ami nem egy triviális feladat, vagy lehetővé kell tenni a megfelelő kalibrációt. Ehhez készült egy egyszerű applikáció (ide jöhet egy ábra az alkalmazásról), ami UART interfészen keresztül eléri az alapvető adatokat és különböző teszteseteken keresztül megállapítja a jármű és az eszköz egymásnak megfelelő tengelyeinek egymással bezárt szögét. A számolt paramétereket ez után elküldi a beágyazott szoftvernek, ami felhasználja azokat.

4. EREDMÉNYEK

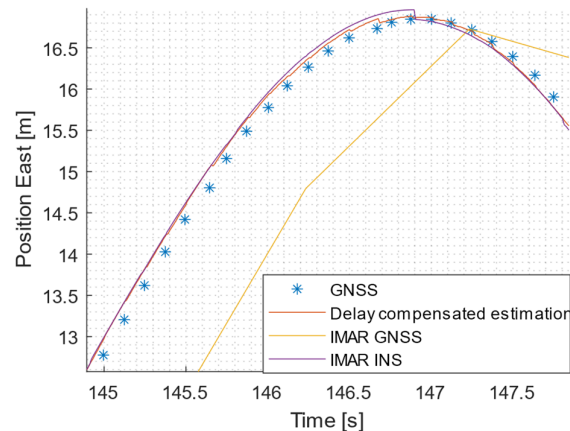
A fejlesztés jelenlegi fázisában elmondható, hogy az eddig végzett munka eredménye elérte a kezdetben kitűzött célokat. Az eszköz alkalmas alacsony sebességű járműplatformon való használatra mind a pozíció, sebesség és orientáció magas frekvenciás meghatározására, továbbá nagysebességű teszteseten is megközelítette egy kereskedelemben kapható hasonló szenzor eredményeit.

A helymeghatározási módszerek sajátosságaiból fakadó késés kompenzálására kidolgozott megoldás megfelelően ellátja a feladatát, ami a 6. ábrán látható. Az alsó diagramon a késés változása látható az idő függvényében, fölül pedig a Kálmán-szűrő kompenzált keleti irányú pozíció kimenete.

A számolt magas frekvenciás kimeneteket ellenőrzésképp összevetettük egy iMAR iNAT-M200 típusú eszköz méréseivel. A 7. ábrán látható, hogy a referencia szenzor nyers GNSS pozíciója 1 Hz-es frissítési frekvenciával elérhető, viszont körülbelül 600 ms késéssel a valós időhöz képest. A fejlesztett hardveren található ZED-F9P vevő által biztosított pozíció ezzel szemben 50-80 ms közötti késéssel biztosítja az adatokat. A Kálmán-szűrő kimenetén mindkét esetben látható, hogy a nyers adatokhoz képest kompenzál a késéssel és a fejlesztett algoritmus eredménye közelít a referenciához.



6. ábra: Késés kompenzálása. Felső ábrán látható a nyers és becsült NED keleti irányú pozíció az idő függvényében. Alsó ábrán az aktuális mért késés jelenik meg.



7. ábra: Nyers és becsült Keleti irányú pozíciók összehasonlítása NED rendszerben az idő függvényében a referencia és a fejlesztett eszköz között.

5. KONKLÚZIÓ

Összességében sikerült mostanra egy működő és járműves teszteseten használható eszközt létrehozni, ami képes 100 Hz-es frissítéssel biztosítani a nagy pontosságú pozíció, állásszög és sebesség adatokat. Ez elsődlegesen magában foglalja a hardver megtervezését, gyártását és üzemeltetését, továbbá a

szoftveres egységek folyamatos fejlesztését és tesztelését. A bemutatott - Kálmán-szűrőt alkalmazó - megoldás a kiindulási alap, amit a következő lépésekben célunk továbbfejlesztteni, és például az IMU hibáinak becslésével javítani a pontosságát. További mérőfüggő a „yaw” állásszög mellett a „pitch” és „roll” adatok megfelelő becslése, és ezek elintegrálásának lehető legnagyobb mértékű csökkentése.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. HIVATKOZÁSOK

R. Munguía (2014). „A GPS-aided inertial navigation system in direct configuration”. *Journal of Applied Research And Technology*, 12(4), 803–814. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70096-3](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70096-3)

Yan W, Zhang Q, Wang L et al. (2020): „A Modified Kalman Filter for Integrating the Different Rate Data of Gyros and Accelerometers Retrieved from Android Smartphones in the GNSS/IMU Coupled Navigation”. *Sensors*, Vol. 20, Page 5208, 20(18), 5208. <https://doi.org/10.3390/S20185208>

Shi, C., & Wei, N. (2020). „Satellite Navigation for Digital Earth.” *Manual of Digital Earth*, 125–160. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_4

„ZED-F9P – u-blox F9 high precision GNSS receiver Interface Description” <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-18010854>

iMAR iNAR-m200: <https://www.imar-navigation.de/en/products/by-product-names/item/inat-m200-advanced-mems-based-navigation-surveying-control-system>

VBOX: <https://www.vboxautomotive.co.uk/index.php/en/product/s/data-loggers/vb3i>