

Inerciális érzékelők tesztelése szimulációs környezetben és GNSS/IMU szenzorfüzióban való alkalmazhatóságának vizsgálata

Testing of inertial sensors in a simulation environment and investigation of the applicability in GNSS/IMU sensor fusion

SOMOGYI Huba¹, dr. SOUMELIDIS Alexandros²

¹ Széchenyi István University SZE-JKK Győr, Hungary somogyi.huba@ga.sze.hu

² Számítástechnikai és automatizálási kutatóintézet SZTAKI Budapest, Hungary alexandros.soumelidis@sztaki.hu

Kivonat

Az önvezető járművek közeljövőben várható térhódításának köszönhetően számtalan kutatás folyik a megfelelő algoritmusok és szenzorkészletek megtalálására, amelyek alkalmasak az önvezetés megvalósításához. Erre a szenzorgyártók is felfigyeltek, ezért a piacon nagy számban megtalálhatóak különböző paraméterekkel rendelkező szenzorok egy azon területre. Az önvezetés egyik fontos területe a navigáció, ahol az egyik elterjedt megoldás a műholdas alapú navigáció és az inerciális érzékelők fuzionálása. A cikkben egy szimulációs környezet segítségével igyekszem a megfelelő szenzorparaméterek meghatározására, amelyek megfelelnek az autonóm navigáció követelményeinek.

Kulcsszavak: Inerciális modul, Allan Variancia, szenzorfüzió, jármű intelligencia, önvezető jármű

Abstract

Thanks to the expected spreading of self-driving vehicles in the near future, counting researchers are working on an appropriate algorithm and sensor set, which satisfies the needs of a self-driving. Sensor manufacturers have noted this, and there are a large number of sensors on the market with different parameters in one area. One important area of self-driving is navigation, where satellite-based navigation and fusion of inertial sensors are a common solution. In this article I try to determine the appropriate sensor parameters that meet the requirements of autonomous navigation using a simulation environment.

1. BEVEZETŐ

A járművek következő generációja fejlett vezető/vezetést támogató vagy teljesen önállóan működő rendszereket kínálnak, amelyek egyre pontosabb helyzetinformációt igényelnek minden körülmények között és 100%-os rendelkezésre állással. Egyetlen érzékelő sem képes kielégíteni ezeket a követelményeket, ezért szükséges kombinált szenzorkészlet-megoldást alkalmazni, amely számos különféle, egymással együtt működő érzékelőt tartalmaz. Az abszolút helyzet, a sebesség és az idő egyetlen forrásaként a GNSS kritikus szerepet játszik a következő generációs helymeghatározó rendszerekben. Az autonómia következő szintjeinek (3–5. szint) eléréséhez sávszintű pozicionálás szükséges, amely viszont egy olyan GNSS rendszert igényel, amely centiméteres pontossággal (10 cm) rendelkezik. Ahhoz, hogy elérjük ezt a szintet, több olyan hibaforrást ki kell javítani, amelyek jellemzően korlátozzák a GNSS-sel elérhető pontosságot. Szintén kritikus, hogy ezt a pontosságot robusztusan és hosszú megoldási konvergencia idő nélkül biztosítsuk. Ezenkívül az inerciális navigációs rendszerek technológiájának használata, amelyben a GNSS-információt helyi inerciális mérésekkel bővítik gyorsulásmérőkön és giroszkópokon keresztül, további hasznos információkat szolgáltat, például a jármű irányát, valamint növeli a helyzetinformáció gyakoriságát, simaságát és robusztusságát.

2. INERCIÁLIS ÉRZÉKELŐK TULAJDONSÁGAI ÉS TESZTELÉSE

Az IMU (Inertial Measurement Unit - Inerciális mérőegység) a lineáris gyorsulást és a forgási sebességet méri és esetleg magnetométerrel kiegészítve digitális iránytűként a mágneses pólusokat. Az alacsony költségű IMU-k általában a MEMS technológiát alkalmazzák a miniatűr mechanikai elemek mozgásának mérésére az IMU-n belül. Az IMU-k 1, 2 vagy 3 tengelyben tudnak információt szolgáltatni, de a legtöbb alkalmazáshoz 3 mérési tengelyre van szükség. Ahoz, hogy megkapjuk lineáris és a szöghelyzet becsléseket a nyers IMU adatokat integrálni kell, ez az integrálás folyamatos eltolódást okoz a kapott becslésekben, mivel minden helytelen nyers mérés a sebesség pillanatnyi és állandó hibáját okozza. Számos tényező befolyásolja a gyorsulásmérőkből és giroszkópokból származó nyers mérések pontosságát [1], ideértve:

- **Nem-linearitás:** Az IMU-k nem tökéletesen lineárisak.
- **Mintavételi zaj:** A MEMS elem minden mintájához kapcsolódik mintavételi zaj. Az adatlapokban ezt a zajt [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$] vagy [$^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$] értéként adják meg, ahol Hz a mintavételi frekvencia.
- **Drift:** Az összes zaj és hibaforrás változhat és változik is, a környezeti hőmérséklet, a bemeneti tápfeszültség és az IMU életkora mind megváltoztathatja ezeket a zajokat és hibákat.
- **Bias stabilitás:** Az IMU-nak van egy további hibajellemző, a véletlenszerű elektronikus zaj, amely olyan zajforrást okoz, amely alacsonyabb frekvenciával rendelkezik, mint a mintavételi zaj / ARW (Angle Random Walk) a giroszkópnál vagy VRW (Velocity Random Walk) a gyorsulásmérőnél.

2.1 Allan variancia módszer alkalmazása

Ahogy az várható lenne, a piacon elérhető IMU-kban zaj-, hiba- és drift-osztályozás széles skálája található. A magasabb árú IMU-k jobban teljesítenek, mint az olcsóbb IMU-k, de az ár-teljesítmény görbe meredek. Az *Allan-variancia*- módszer hasznos eszköz lehet a inerciális érzékelő adataiban szereplő véletlenszerű zajterületek időtartománybeli jellemzőinek vizsgálatához [2].

Feltételezve, hogy a mintavételi intervallum T_s és az összes mintavételi idő T , a teljes adatkészletben található adatpontok száma $N = T / T_s$ értékkel adható meg. A teljes adatkészletet n egymást követő adatpont klaszterekre osztják, ahol n ($n = 1, 2, \dots, n_{MAX}, n_{MAX} < N/2$) a klaszter mérete, és n_{MAX} az *Allan-variancia* kiszámításához megengedett maximális klaszterméret. $K = N/n$ az osztott független klaszterek száma, tehát a $K_{MIN} = N / n_{MAX}$ a minimális klaszterek száma.

Ha a giroszkóp pillanatnyi kimenete $\omega(t)$, akkor a $(k + 1)$ - dik klaszter átlagolási művelete a következő:

$$\bar{\omega}_{k+1}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{nk+i} \quad (1)$$

ahol $\tau = nT_s$ az egyes klaszterek átlagolási ideje.

Ezután az *Allan-varianciát* a szögsebesség átlaga alapján lehet meghatározni:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} \left((\bar{\omega}_{k+1}(\tau) - \bar{\omega}_k(\tau))^2 \right). \quad (2)$$

Mivel az *Allan-variancia* az inerciális érzékelők torzítási stabilitását méri, az $\sigma^2(\tau)$ és a belső sztochasztikus folyamatok spektrális teljesítménysűrűsége között integrációs kapcsolat van, ami a következő képlettel írható fel:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\omega}(f) \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (3)$$

ahol $S_{\omega}(f)$ az $\omega(t)$ sztochasztikus folyamat spektrális teljesítménysűrűsége [3].

A (3) egyenletből látszik, hogy az *Allan-variancia* arányos a sztochasztikus folyamat teljes kimenő teljesítményével, amikor áthalad egy $\sin^2 x/x^2$ formájú átviteli funkcióval rendelkező szűrőn, és sávzélessége τ - től függő. Általában az $\sigma(\tau)$ és a τ közötti log-log grafikon közvetlenül jelzi a

sztochasztikus zajok típusait, amelyek megjelennek az inerciális érzékelő adataiban, ahol $\sigma(\tau)$ az *Allan-variancia* négyzetgyöke.

Összességében hét zaj típus kapcsolódik Allan definíciójához és eredményeihez, és egy tipikus log-log $\sigma(\tau)$ és τ összehasonlításának hasonló karakterisztikájú görbével kell rendelkeznie, mint ahogyan az 1. ábra mutatja.



1. ábra Allan karakterisztikus görbe tipikus felépítése

2.2 IMU hibakarakterisztikák összehasonlítása Matlab segítségével

Az Allan eloszlás meghatározása egy módszer az adatsor elemzésére az időtartományban, és lehetővé teszi *mintavételi zaj* és *bias* stabilitás megjelenítését és számszerűsítését. Az összehasonlításhoz választottam egy olcsó (~25EUR) IMU-t melynek a fent leírt módszerrel elkészítettem az Allan eloszlását és egy nagyjából 10-szeres árú IMU adataival hasonlítottam össze.

Az Allan Variancia meghatározásának lépései:

- Az IMU egy hőmérséklet-szabályozott (25°C) kamrába került elhelyezésre, majd 6 órán keresztül a mért gyorsulási és forgási értékeket 150Hz-es mintavételi frekvenciával rögzítettem.
- A rögzített mérések Matlab-ba beolvashatók és az **allanvar** beépített függvény segítségével meghatározható az Allan eloszlás, majd egy log-log ábrán jeleníthető meg.

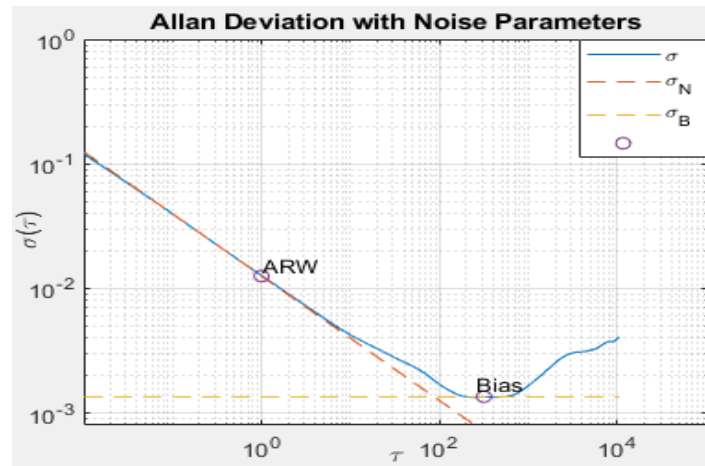
A mérési eredmények alapján a gyorsulási szenzor és a giroszkóp mindhárom tengelyére egy-egy Allan eloszlási görbe felrajzolható, ezek közül egy a 2. ábrán látható. A kapott görbéről az 1. ábra alapján leolvasható értékekből a *Bias* stabilitási, az ARW és a VRW értékeket egy táblázatba gyűjtöttem és ezek alapján hasonlítottam össze a két mérőegységet [3].

IMU-k összehasonlító táblázata

1. táblázat

			Olcsó IMU			Drága IMU		
Mért érték		Mértékegység	X	Y	Z	X	Y	Z
Gyorsulás mérő	Bias Stabilitás	mg	0.029	0.074	0.043	0.022	0.037	0.031
	VRW	mg / $\sqrt{\text{hr}}$	6.6	7.9	8.5	2.8	3.0	2.8
Giroszkóp	Bias Stabilitás	$^{\circ}$ / hr	5.3	4.8	4.0	4.1	4.1	4.7
	ARW	$^{\circ}$ / s / $\sqrt{\text{hr}}$	0.36	0.31	0.30	0.30	0.26	0.30

Az összefoglaló táblázatból egyértelműen látszik, hogy az olcsóbb szenzor rosszabb értékekkel rendelkezik, egyes zaj típusai 2-3 szoros értékűek a drágább szenzorénál. Vannak módszerek az IMU számos zaj- és hibaforrásának kijavítására és kompenzálására. E javítások nélkül az olcsó IMU-k nem rendelkeznek elegendő pontossággal ahhoz, hogy hasznos adatokat szolgáltatassanak a több másodperces GNSS-kiesések során a pontos irányinformációért. Egyik ilyen módszer az Extended Kalman Filter (EKF) használata, amellyel folyamatosan hangolhatók az eltolási és skálázási tényezők az összes tengelyre. Fontos megjegyezni, hogy az online folyamat kritikus, mivel a számos zaj- és hiba-forrást nem lehet függetlenül mérni és elkülöníteni. Ennek az ismeretlen csatolásnak az eredményeként egyetlen gyári kalibrálás sem tudja pontosan korrigálni a nyers méréseket az IMU élettartama alatt [4].



2. ábra A drága giroszkóp egy tengelyének Allan eloszlása

3. KONKLÚZIÓ

Ha az alacsony költségű IMU-kat párosítják a külső helyzet- és sebességforrásokkal egy olyan szűrőn keresztül, mint az EKF, akkor az előállított inerciális navigációs rendszernek (INS) jelentős előnyei vannak, amelyek nem érhetők el csak GNSS vagy csak IMU helyzet meghatározó rendszerrel:

- A nagysebességű (100Hz vagy annál nagyobb) IMU adatfolyam lehetővé teszi a szűrő számára, hogy a helyzetbecsléseket egy nagyságrenddel gyakrabban szolgáltatassa, mint a GNSS rendszerek.
- A kis frekvenciájú (10-20Hz) GNSS adatfolyam globálisan pontos helyzet- és sebességinformációt szolgáltat a szűrőnek, amely lehetővé teszi az IMU skála és torzítás pontos beállítását.
- Mivel az INS-alapú helyzetbecslések elvégezhetők a GNSS-minták között, hasonlóképpen képesek pozícióbecsléseket is szolgáltatni GNSS-adatok hiányában, ennek viszont feltétele a megfelelő becslő algoritmus, ami pedig maga után vonhatja egyéb szenzor fuzionálást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járműrendszerek kutatása a zalaegerszegi autonóm tesztpályához kapcsolódóan (EFOP-3.6.2-16-2017-00002)” projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Warren S. Flenniken IV, John H. Wall, David M. Bevly, Characterization of Various IMU Error Sources and the Effect on Navigation Performance, Institute of Navigation, Long Beach, CA, 2005, pp. 967-978
- [2] El-Sheimy, Naser & Hou, Haiying & Niu, Xiaoji. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance. Instrumentation and Measurement, 2008, IEEE Transactions on. 57. 140 - 149.
- [3] Haiying Hou: Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance, A Thesis, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, 2004
- [4] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015