

Farkas Márton, Vanek Bálint, Rózsa Szabolcs

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA LOW-COST GNSS, INERCIÁLIS ÉS MÁGNESES SENZOROK TIGHTLY COUPLED INTEGRÁCIÓJÁVAL

A cikkben bemutatunk egy műholdas (GNSS), inerciális (IMU) és mágneses szenzorokat integráló eljárást, melynek feladata pilóta nélküli repülőgépek (UAV) pozíciójának és orientációs Euler-szögeinek becslése. Ismertetjük a számításokhoz szükséges koordinátarendszereket és az ezekhez kapcsolódó transzformációkat és a felhasznált GNSS-es, gyorsulásmérő, szögsebességmérő és magnetométer szenzoregyenleteket. A becslést kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF) felhasználásával valósítjuk meg, melynek számítási lépéseit szintén bemutatjuk. A szenzorfüzítés algoritmust valódi repülési teszt adatsoron offline teszteltük. Az becslés eredményeit a repülőgép fedélzeti számítógépből származó referencia adatokkal hasonlítjuk össze.

Kulcsszavak: UAV, GNSS, IMU, szenzorfüzítés, EKF, pozícióbecslés, orientációbecslés

BEVEZETÉS

Szenzorfüzítés eljárások egyre fontosabbá válnak a kereskedelmi repülésben, különösen a kritikus repülési fázisokban, például landolási során. A navigációs rendszerek komplexitásának folyamatos növekedése mellett is biztosítani kell a megbízhatóságot és a performanciát. Ez a bonyolultság növekedésével egyre nehezebb, mivel az egyes szenzortípusok más-más hibajelenségeket mutatnak a különböző környezeti feltételek mellett. A VISION¹ (EU H2020 690811) projekt [1] célja a repülésbiztonság fejlesztése integrált, biztonsági szempontból továbbfejlesztett intelligens repülési szabályozó és navigációs rendszerek validálásával.

A pilóta nélküli légi járművek napjainkban egyre elterjedtebbek. Az UAV²-k a hadi felhasználás mellett egyre több polgári célú feladatot is képesek ellátni. Az elmúlt években, ahogy ezek a járművek egyre elérhetőbbek lettek, úgy fejlődtek olyan alkalmazási területek, mint a precíziós mezőgazdaság, a fotogrammetria, a térképészet, a földmérés, a különböző ipari folyamatok monitorozása és elemzése. Ahhoz, hogy ezen járművek megbízhatóan és biztonságosan végezhesek a különböző feladataikat, elengedhetetlen a pozicionálási rendszereik folyamatos fejlesztése. Low-cost³ hardverek felhasználásával ezek a navigációs eszközök is alacsonyabb költségűek lehetnek. Azonban a low-cost MEMS⁴ alapú szenzorok pontossága elmarad a taktikai minőségű érzékelőkéhez képest. A gyorsulásmérő és szögsebességmérő szenzorok olyan hibajelenségekkel terheltek, mint a bias, drift, skálázás. Az inerciális (IMU⁵) szenzorok méréseit egyszerűen vagy kétszeresen is integrálni kell. A rosszul becsült hibák az integráció során jelentősen rontják

¹ A kutatás, amely ezekhez az eredményekhez vezetett a VISION projekt része. Ez a projekt az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programjából kapja a támogatást (grant agreement No 690811).

² UAV: Pilóta nélküli légi jármű (Unmanned Aerial Vehicle).

³ Low-cost: Alacsony árú.

⁴ MEMS: Mikroelektromechanikai rendszerek (Micro-Electro-Mechanical Systems).

⁵ IMU: Inerciális mérőegység (Inertial measurement unit).

a pontosságot. Azonban az inerciális szenzorok mintavételezési frekvenciái magasak (50–200 Hz). A low-cost GNSS⁶ vevők csak egy mérési frekvencián működnek, a kódmérési eljárással pedig 3–5 méteres pozíciópontosság érhető el. A legnagyobb mintavételezési frekvencia alacsonyabb, mint az IMU-k esetén, általában 5 Hz. Azonban a műholdas mérések abszolút megoldást adnak, az eredmények további integrálására nincs szükség. A szenzorok fúziójának célja, hogy a különböző hibajelenségek hatásait csökkentsük és előálljon a megbízható, magas frekvenciájú navigációs információ, melyet irányításra lehet alkalmazni.

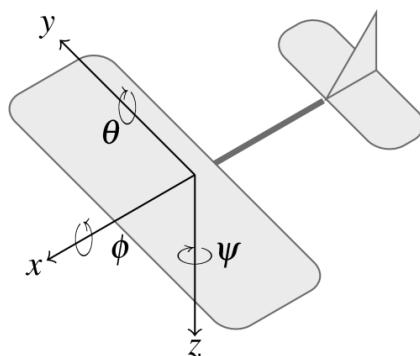
Szenzorfüzió esetén két megvalósítás jöhet szóba, az egyik a loosely coupled megoldás. Ebben az esetben a különböző részrendszerek előfeldolgozott megoldásait, és azok megbízhatóságát kombináljuk. A megoldás során a részrendszerek által szolgáltatott információkat használjuk, magukról a rendszerekről kevés információ is elegendő. A másik, összetettebb megoldás a tightly coupled integráció, amikor részrendszerek nyers méréseit integráljuk. A cikkben szereplő számítási eljárás a második integrációs típust alkalmazza. A GNSS vevőkből származó kódérések, Doppler-mérések, az inerciális érzékelőkből származó gyorsulások, szögsebességek és a magnetométerből kapott a mágneses térerősség mérések kerülnek alkalmazásra a szenzorfüziós eljárás során.

A cikkben bemutatjuk a különböző koordinátarendszereket és a közöttük értelmezett transzformációkat, a méréseket végző szenzorok modelljeit, valamint a becslést végző kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF⁷) algoritmust. Az ezt követő részben pedig egy valós mérési adatsor feldolgozásának eredményeit mutatjuk be.

KOORDINÁTARENDSZEREK

A különböző mérések más-más koordinátarendszerben vannak értelmezve. Ahhoz, hogy a szenzorok fúziója megfelelően működhessen, ezeket a koordinátarendszereket és a transzformációkat megfelelően kell definiálni.

Test-koordinátarendszer



1. ábra Test-koordinátarendszer és Euler-szögek (ϕ orsózó, θ bólintó, ψ legyező)

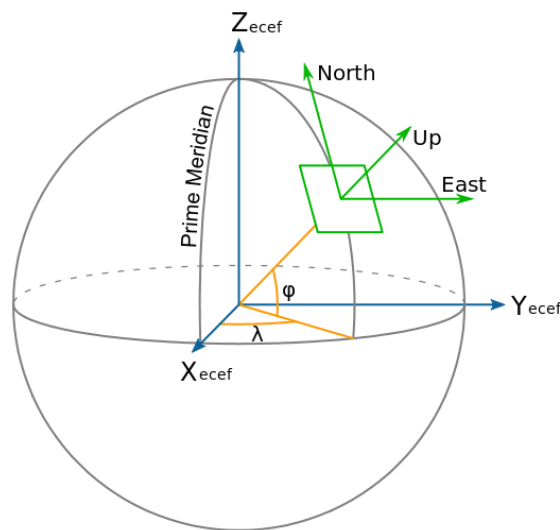
⁶ GNSS: Globális navigációs műholdrendszerek (Global Navigation Satellite Systems), GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU, SBAS, QZSS.

⁷ EKF: Kiterjesztett Kálmán-szűrő (Extended Kálmán Filter).

A testhez rögzített koordinátarendszer origója a jármű egy tetszőleges pontja, általában az x tengely előre, z tengely lefelé, y tengely pedig az $x - z$ síkra merőlegesen jobbra mutat. Ezen tengelyek körüli elfordulások határozzák meg a jármű Euler-szögeit (x – orsózó, y – bólintó, z – legyező). Az inerciális szenzorok mérései ebben a koordinátarendszerben vannak értelmezve.

Navigációs-koordinátarendszer

Ebben a koordinátarendszerben értelmezhető a jármű navigációs feladata. A Föld egy tetszőleges pontjára érintősíkot helyezve, az érintési pontban kapjuk a rendszer origóját. Kétféle tengelyelhelyezés terjedt el ennél a koordinátarendszer típusnál az egyik az ENU⁸, a másik pedig a NED⁹. A cikkben és a számítási algoritmusban is a továbbiakban a navigációs-koordinátarendszer NED-ben van értelmezve.



2. ábra Navigációs- és Földközéppontú, Földhöz rögzített koordinátarendszerek [1]

Föld középpontú, Földhöz rögzített koordinátarendszer (ECEF)

Ennek a koordinátarendszernek az origója a Föld középpontjához van rögzítve, az X tengely a fő meridiánon halad át, a Z tengely az északi pólusba mutat, Y tengely pedig az $X - Z$ síkra merőleges úgy, hogy balsodrású rendszert alkosson. Ez a koordinátarendszer a Földhöz rögzítve, azzal együtt forog. A GNSS-es mérések ebben a koordinátarendszerben vannak értelmezve.

Koordinátarendszerek közötti transzformációk

A koordinátarendszerek közötti transzformációt egy-egy forgatási mátrix írja le, R_a^b forgatási mátrix a -ból b rendszerbe forgat. Ezen mátrixoknak a transzponáltjai írják le a fordított irányú transzformációt.

$$R_a^a = R_a^{b^T} \quad (1)$$

A test-koordinátarendszerből a navigációs-koordinátarendszerbe történő transzformációt az Euler-szögek határozzák meg a következőképpen [3],

⁸ ENU: Kelet-Észak-Fel (East-North-Up).

⁹ NED: Észak-Kelet-Le (North-East-Down).

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & 0 & -\sin(-\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\theta) & 0 & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\phi) & \sin(-\phi) \\ 0 & -\sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ez három forgatás szorzata, egy z körüli $-\psi$ legyezőszögű, egy y körüli $-\theta$ bólintószögű és egy x körüli $-\phi$ orsószögű forgatásé.

ECEF rendszerből a navigációs-koordináta-rendszerbe történő forgatás

$$R_e^n = \begin{bmatrix} \cos(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \lambda_e & \sin \lambda_e & 0 \\ -\sin \lambda_e & \cos \lambda_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

alakú [3]. Ez egy y körüli és egy z körüli forgatás szorzata, ahol ϕ_e az adott földrajzi pont szélessége λ_e pedig a hosszúsága.

A test-koordináta-rendszerből az ECEF rendszerbe történő transzformáció

$$R_b^e = R_e^n R_b^n \quad (4)$$

alakban írható fel.

A GNSS antenna és az inerciális szenzorok között található test-koordináta-rendszerben értelmezett kart jelölje $\vec{b}_{IMU}^{GNSS}$, ekkor az antenna pozíciója ($\vec{X}_r$) és sebessége ($\vec{V}_r$) megadható az inerciális szenzor pozíciójának ($\vec{p}_e$), sebességének ($\vec{v}_e$) és szögsebességéből képzett ferdén szimmetrikus mátrixának (Ω_b) az ismeretében [3].

$$\vec{X}_r = \vec{p}_e + R_b^e \vec{b}_{IMU}^{GNSS} \quad (5)$$

$$\vec{V}_r = \vec{v}_e + R_b^e \Omega_b \vec{b}_{IMU}^{GNSS} \quad (6)$$

SZENZOR MODELLEK

A GNSS vevő kódmeréséhez tartozó egyenlet

$$\rho_r^S = \vec{E}_r^S (\vec{X}_r - \vec{X}^S) + c(\delta_r - \delta^S) + I_r^S + T_r^S - cD_{rel}^S - cD_{GD}^S + \eta_r^S \quad (7)$$

alakban írható fel [4]. Ahol ρ_r^S a vevő és a műhold között mért távolság,

$$\vec{E}_r^S = \frac{(\vec{X}_r - \vec{X}^S)}{\|(\vec{X}_r - \vec{X}^S)\|} \quad (8)$$

a vevő-műhold irányú egységvektor, $\vec{X}^S$ a műhold pozíciójának vektora ECEF koordináta-rendszerben. A vevő- és a műholdra hibákat δ_r és δ^S jelöli, az ionoszféra és a troposzféra késleltetéseket pedig I_r^S és T_r^S , melyeket Klobuchar és Saastamoinen légköri modellek felhasználásával számítunk ki. A relativisztikus hatásokat D_{rel}^S , a csoportkésés különbséget D_{GD}^S , a mérési zajt pedig η_r^S jelöli. Egyes modellezett tagok időben vannak értel-

mezve, ezeket meg kell szorozni a jel terjedésének sebességével (fénysebesség, c), hogy távolságként jelentkezzenek az egyenletben.

A GNSS vevő Doppler-méréséhez tartozó egyenlet

$$-\lambda^S d_r^S = \vec{E}_r^{S^T} (\vec{V}_r - \vec{V}^S) + c(\dot{\delta}_r - \dot{\delta}^S) + \eta_{d_r^S} \quad (9)$$

alakú [5], ahol λ^S a műhold sugárzási frekvenciájához tartozó hullámhossz, d_r^S a vevő és a műhold között mért Doppler-érték, $\vec{V}^S$ a műhold sebessége ECEF rendszerben, w_e^i a Föld forgási sebessége, $\dot{\delta}^S$ a műholdóra drift, $\dot{\delta}_r$ a vevőóra drift, $\eta_{d_r^S}$ pedig a mérési zaj.

A gyorsulásmérő-szenzor egyenlete

$$\vec{f}^b = R_b^{e^T} (\vec{a}^e) + \vec{b}_a^b - R_b^{n^T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + R_b^{e^T} (\Omega_e^i \vec{v}_e) + \eta_f \quad (10)$$

alakban írható fel [3], melyben $\vec{f}^b$ a gyorsulásmérő által mért értékek test-koordináta-rendszerben. A sebesség- és gyorsulásvektor $\vec{v}_e$ és $\vec{a}_e$, $\vec{b}_a^b$ a gyorsulásmérő-bias vektora, g a nehézségi gyorsulás, Ω_e^i a Föld szögsebesség-vektorából képzett ferdén szimmetrikus mátrix, η_f a mérési zaj.

A szögsebességmérő-szenzor egyenlete

$$\vec{\omega}^b = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix}^{-1}}_{R_{Euler}^{-1}} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \vec{b}_\omega^b + R_b^{e^T} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_e^i \end{bmatrix} + \vec{\omega}_{en}^e \right) + \eta_\omega \quad (11)$$

alakú [3], amelyben $\vec{\omega}^b$ a szenzor által mért értékeket tartalmazza, R_{Euler} mátrix a nemlineáris kapcsolatot írja le a test-koordináta-rendszer szögsebessége és a navigációs-koordináta-rendszer között. A szögsebességek $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, $\vec{b}_\omega^b$ pedig a szögsebességmérő-bias vektora, η_ω a mérési zaj. A navigációs-koordináta-rendszer és az ECEF koordináta-rendszer szögsebessége közötti kapcsolatot írja le az

$$\vec{\omega}_{en}^e = \begin{bmatrix} \frac{\sin \lambda_e [\sin \phi (v_x \cos \lambda_e + v_y \sin \lambda_e) - v_z \cos \phi_e]}{R_M + h_e} \\ \frac{\cos \lambda_e [\sin \phi (v_x \cos \lambda_e + v_y \sin \lambda_e) - v_z \cos \phi_e]}{R_M + h_e} \\ - \frac{v_x \sin \lambda_e - v_y \cos \lambda_e}{\cos \phi (R_N + h_e)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

összefüggés, ahol h_e a forgási ellipszoid feletti magasság, valamint

$$R_N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_e)^{\frac{1}{2}}}, \quad (13)$$

$$R_M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_e)^{\frac{3}{2}}}. \quad (14)$$

A fenti egyenletekben a az ellipszoid excentricitása, e a fél nagytengelyének hossza.

A magnetométer-szenzor egyenlete

$$\vec{m}^b = R_b^{nT} \vec{H}^n + \eta_m, \quad (15)$$

amelyben $\vec{m}^b$ vektor a szenzor által mért értékeket tartalmazza, $\vec{H}^n$ a Föld lokális mágneses-tér vektora navigációs-koordinátarendszerben értelmezve, η_m a mérési zaj.

KITERJESZTETT KÁLMÁN-SZŰRŐN ALAPULÓ BECSLŐ ALGORITMUS FELÉPÍTÉSE

A tightly coupled szenzorfüzió megvalósítása egy kiterjesztett Kálmán-szűrő felhasználásával történik [6]. Az állapotvektor

$$x = \left[\vec{p}^{eT} \quad \vec{v}^{eT} \quad \vec{a}^{eT} \quad \underbrace{\phi \quad \theta \quad \psi}_{\vec{\phi}_x^T} \quad \underbrace{\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}}_{\vec{\omega}_x^T} \quad \vec{b}_a^{bT} \quad \vec{b}_\omega^{bT} \quad \vec{b}_{GNSS}^T \quad \vec{d}_{GNSS}^T \right]^T, \quad (16)$$

melyben a paraméterek:

- $\vec{p}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU pozíció [m];
- $\vec{v}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU sebesség [m/s];
- $\vec{a}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU gyorsulás [m/s²];
- ϕ : orsózószög [rad];
- θ : bólintószög [rad];
- ψ : legyezőszög [rad];
- $\dot{\phi}$: Orsózó-szögsebesség [rad/s];
- $\dot{\theta}$: bólintó-szögsebesség [rad/s];
- $\dot{\psi}$: legyező-szögsebesség [rad/s];
- $\vec{b}_a^b$: gyorsulásmérő-bias [m/s²];
- $\vec{b}_\omega^b$: szögsebességmérő-bias [rad/s];
- $\vec{b}_{GNSS}$: GNSS vevő órahiba vevőkre és konstellációkra bontva [m];
- $\vec{d}_{GNSS}$: GNSS vevő óradrift vevőkre és konstellációkra bontva [m/s].

Diszkrét időben a predikciós lépés során az állapotvektor az előző időpontban vett állapot (x_{t-1}^+) és az állapot átmeneti mátrix (Φ_{t-1}^t) felhasználásával módosul. A két mérési időpont között eltelt időt Δt jelöli. Az x_{t-1}^+ és Φ_{t-1}^t értékek a

$$\Phi_{t-1}^t = \begin{bmatrix} I_3 & \Delta t I_3 & \frac{\Delta t^2}{2} I_3 & & & & & & \\ & I_3 & \Delta t I_3 & & & & & & \\ & & I_3 & & & & & & \\ & & & I_3 & \Delta t I_3 & & & & \\ & & & & I_3 & & & & \\ & & & & & I_3 & & & \\ & & & & & & I_3 & & \\ & & & & & & & I_6 & \Delta t I_6 \\ & & & & & & & & I_6 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$x_t^- = \Phi_{t-1}^t x_{t-1}^+ \quad (18)$$

egyenletek segítségével határozhatóak meg. Az állapotvektorhoz tartozó kovariancia mátrix (P) is módosul

$$P_t^- = \Phi_{t-1}^t P_{t-1}^+ \Phi_{t-1}^{t-1T} + Q_{t-1}^t \quad (19)$$

alapján, ahol Q_{t-1}^t a folyamat zaj kovariancia mátrix

$$Q_{t-1}^t = \begin{bmatrix} \sigma_p^2 I_3 & & & & & & \\ & \sigma_v^2 I_3 & & & & & \\ & & \sigma_a^2 I_3 & & & & \\ & & & \sigma_{\phi_x}^2 I_3 & & & \\ & & & & \sigma_{\omega_x}^2 I_3 & & \\ & & & & & \sigma_{b_a}^2 I_3 & \\ & & & & & & \sigma_{b_\omega}^2 I_3 \\ & & & & & & & \sigma_{b_{GNSS}}^2 I_6 \\ & & & & & & & & \sigma_{a_{GNSS}}^2 I_6 \end{bmatrix} \Delta t. \quad (20)$$

A különböző σ értékek az egyes állapotok folyamat zajainak szórásait jelölik.

A Kálmán-erősítés mátrix számítható

$$K_t = P_t^- H(x_t^-) (H(x_t^-) P_t^- H(x_t^-)^T + R_t)^{-1} \quad (21)$$

összefüggés alapján, ahol R_t a mérési zaj kovariancia mátrix,

$$H(x_t^-) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_t^-} \quad (22)$$

pedig a mérési egyenletekből származó Jacobi-mátrix. Ezután a szűrő frissíti az állapotvektort és a kovariancia mátrixot az aktuális időpontbeli becslési értékekre [6]. A mérési vektorban (y_t) találhatóak a gyorsulások, szögsebességek, mágneses térerősségek, valamint a GNSS vevők által mért kódtávolságok és Doppler-értékek.

$$x_t^+ = x_t^- + K_t (y_t - h(x_t^-)) \quad (23)$$

$$P_t^+ = (I - K_t H(x_t^-)) P_t^- \quad (24)$$

TESZTELÉS VALÓS MÉRÉSI ADATOKON

Ebben a fejezetben a tesztmérés és az algoritmus által adott eredményeket mutatjuk be. Ezek az eredmények a valós mérési adatok utófeldolgozásából származnak.

A mérés bemutatása

Az MTA SZTAKI által fejlesztett 3 méter szárnyfeszítávolságú pilótanélküli repülőgép fedélzetén elhelyezésre került egy U-blox LEA-6T GPS, két U-blox NEO-M8T GNSS vevő, egy LIS331DLH gyorsulásmérő, egy L3G4200D szögsebességmérő és egy HMC5883 magnetométer. A két NEO-M8T GNSS vevő 5 Hz-es mérési frekvencián, Tallysman TW4721 antennák felhasználásával rögzítették a GPS, GLONASS és Galileo műholdak jeleit. Az inerciális

és magnetométer szenzorok 100 Hz-es mérési frekvencián rögzítették a méréseiket. A szenzorfúziós algoritmus a felsorolt szenzorok által rögzített méréseket dolgozza fel.



3. ábra A mérést végző UAV és a felhelyezett szenzorok

Az UAV fedélzetén megtalálható egy FCC¹⁰, mely a LEA-6T vevő, a gyorsulásmérő, a szögsebességmérő és a magnetométer adatait felhasználva számítja az Euler-szögeket, melyek a kiértékelésben referenciaként szerepelnek majd. A pozíció referencia pontok pedig a LEA-6T vevőből származó koordináták lesznek.

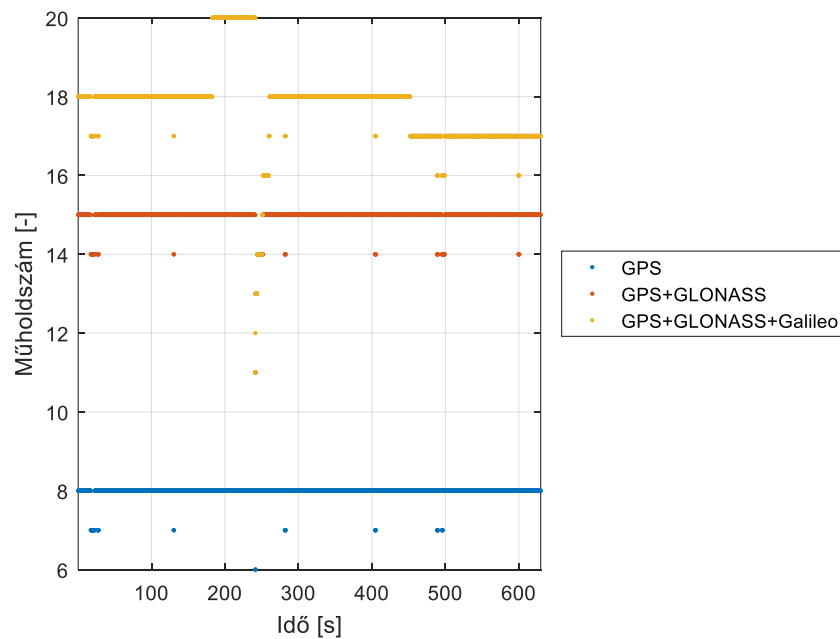
A VISION projekt keretén belül a repülés adott magassági eltolással rendelkező szimulált leszállásokat tartalmazott, melyeket az FCC szabályozott. A köztes időszakokban pedig kézi vezérlésben repült az UAV.

Mérés kiértékelése

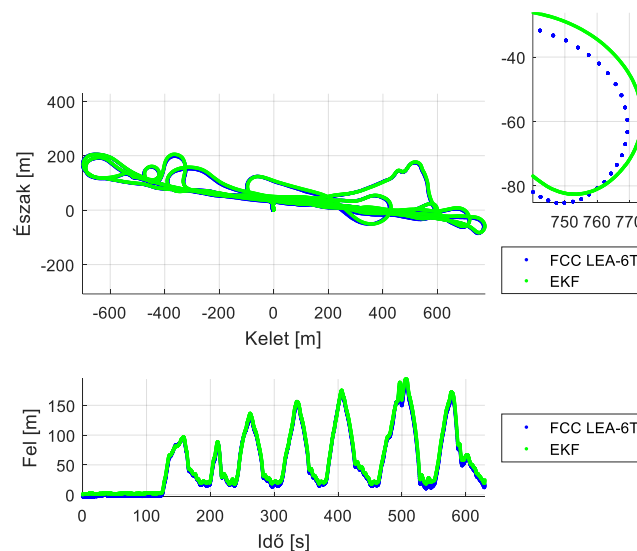
A repülés során a két U-blox NEO-M8T vevő rögzítette a GPS, a GLONASS és a Galileo műholdakhoz tartozó nyers kód- és Doppler-méréseket. Az EKF algoritmus számításába csak azok a műholdak kerülhettek bele, amelyeknek magassági szöge 15 fok felett volt és adott időpontban mindkét vevő rögzített hozzá méréseket. A 4. ábrán látható a konstellációkra bontott műholdszám az idő függvényében.

A szenzorok adatait rögzítve és az utólagos feldolgozásukat követően az eredmények a következők. Az EKF algoritmus GLONASS és Galileo műholdak jeleit is felhasználja, minden műholdhoz mindkét vevőből származnak mérések. Ezekből következik, hogy az EKF algoritmus biztosabb információt ad a repülőgép koordinátáiról, mint a LEA-6T GPS vevő. A pozíciókat vizsgálva egy fontos különbség, hogy a csak GPS-es mérésekhez képest sokkal sűrűbb megoldást kapunk. Látható az 5. ábrán is, hogy az 5 Hz-en működő LEA-6T vevő megoldásai között is van információnk az UAV pozíciójáról az inerciális adatok integrációjának köszönhetően. A kiemelt részleten egy fordulót vizsgálva olvasható le a két megoldás közötti különbség. A fordulóban a gép nagyobb bedöntési szögei miatt rosszabb lehet a műhold-vevő kapcsolat, emiatt romolhat a műholdas helymeghatározás pontossága. Ebben az esetben az inerciális szenzorokból származó információ növeli a megbízhatóságot.

¹⁰ FCC: Fedélzeti számítógép (Flight Control Computer).



4. ábra GNSS műholdak száma a mérés során



5. ábra Pozíciók navigációs-koordinátarendszerben

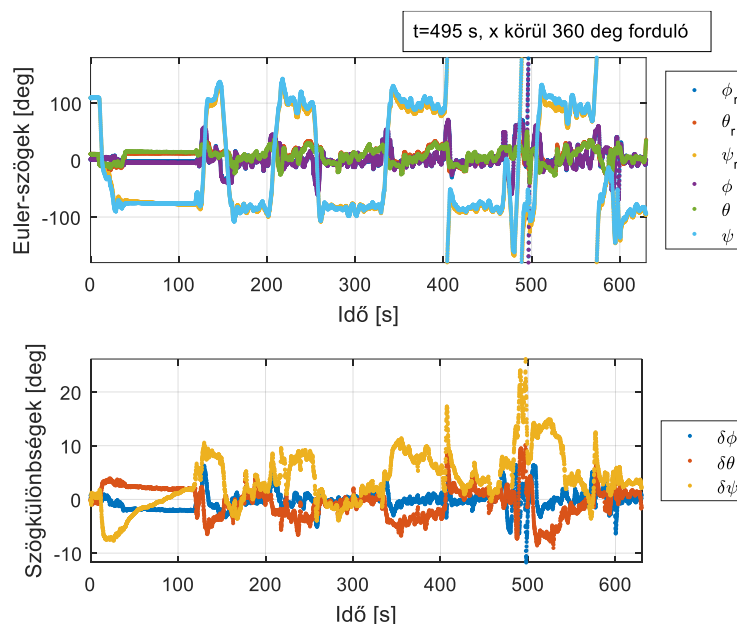
Azokban az időpontokban, amikor a LEA-6T illetve az EKF algoritmus is adott pozíció információt, kiszámítjuk a pozíció eltéréseket. Ezeknek az értékeknek az átlagos eltérését és szórását adja meg az 1. táblázat. Több méteres eltérések láthatók mindhárom koordináta komponensnél. Ez származhat a vevők által használt GNSS rendszer különbségekből, a mérésben felhasznált nagyobb műholdszámból, a két külön vevő alkalmazásából, illetve az inerciális szenzor integrációból.

	Észak	Kelet	Le
Átlagos eltérés [m]	3,047	1,581	-3,997
Szórás [m]	3,057	2,033	2,202

1. táblázat Átlagos eltérések és szórások a NED koordináták között

Az 6. ábra bemutatja az FCC és az EKF algoritmus által számított Euler-szögeket, illetve az ezek közötti eltéréseket. A felső diagramon jól látható, hogy a trendek hasonlóak mindkét megoldás esetén. Bővebb információt a két megoldás közötti különbség ad. A mérés 30. és

130. másodperce között a földön állt az UAV. A referencia megoldásban itt megjelenik egy drift a legyezőszögben, ami az EKF-es megoldásban nincsen. Ebben az intervallumban ezért látható folyamatos változás. Az ezt követő repülési szakaszban 10 fok alatt maradnak a szögeeltérések, kivéve a mérés 495. másodpercének környékét, amikor az UAV egy teljes fordulatot tett meg az x tengelye körül. Itt szintén a legyezőszögben látható egy nagyobb, 20 fokos eltérés. Biztosra mondható, hogy mindkét megoldás rendelkezik valamekkora hibával a valódi értékekhez képest. A különböző szűrő dinamikák és számítási eljárások miatt azonban más eredményt ad a két algoritmus. Nagy pontosságú referencia hiányában nehezen megállapítható, hogy melyik algoritmus megoldása áll közelebb a valódi értékhez.



6. ábra Referencia szögek(ϕ_r, θ_r, ψ_r), az EKF algoritmus által adott Euler-szögek(ϕ, θ, ψ) és azok különbségei($\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$)

A szögeeltérések átlagos eltéréseit és szórásait foglalja össze a 2. táblázat. Az orsózó- és bólintószögekhez tartozó átlagos eltérések 1 fok alattiak, a legyezőszögnél ez az érték 3,71 fok. A szórások szintén az x és az y tengely körüli elfordulásoknál alacsonyabbak.

	Orsózószög	Bólintószög	Legyezőszög
Átlagos eltérés [deg]	-0,264	-0,46	3,71
Szórás [deg]	1,771	2,866	5,078

2. táblázat Átlagos eltérések és szórások az Euler-szögek között

ÖSSZEGZÉS ÉS TOVÁBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A cikkben bemutattuk a GNSS, inerciális és mágneses szenzorok tightly coupled integrációjához kapcsolódó koordinátarendszereket és a köztük levő transzformációkat. Ismertettük az egyes szenzorokhoz tartozó mérési modelleket. A bemutatott szenzorfüziós eljárást egy kiterjesztett Kálmán-szűrő felhasználásával valósítottuk meg és ezt követően az EKF algoritmust egy valós repülési adatsoron teszteltük. A tesztmérés utólagos feldolgozásából kapott eredményeket összehasonlítottuk az UAV fedélzeti számítógépe által számított adatokkal. Itt látható volt, hogy a szenzorfüzió a pozíció megoldásban abszolút javulást hozott. A csak GPS rend-

szert felhasználó LEA-6T vevő pozíciójához képest sokkal sűrűbb és feltehetően megbízhatóbb eredményt adott az EKF algoritmus a több GNSS konstellációt használó két NEO-M8T vevőnek és az inerciális szenzorok integrációjának köszönhetően. Az orientációbecslés eredménye nagyon hasonló volt a referencia és az EKF megoldás között. A legnagyobb eltérések leginkább a legyezőszögben voltak megfigyelhetőek.

A jövőbeli tervek között szerepel, hogy ezt a számítási eljárást kibővítsük egy már működő két antennás, differenciális műholdas fázisméréseken alapuló RTK¹¹ orientációbecsléssel [7], ezzel növelve a becslés megbízhatóságát. Egy másik fejlesztési lépés pedig a pozíció számítás RTK alapokra való helyezése. A mozgó és a telepített GNSS bázisállomás közötti differenciális fázisméréseket felhasználva növelnénk a szenzorfüzións algoritmus pozíció megoldásának pontosságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] VISION PROJECT (Validation of Integrated Safety-enhanced Intelligent flight cONtrol), (online) url: http://w3.onera.fr/h2020_vision/ (2017.03.17.)
- [2] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA North east down, (online) url: https://en.wikipedia.org/wiki/North_east_down (2017.03.17.)
- [3] Michele IAFRANCESCO: GPS/INS Tightly coupled position and attitude determination with low-cost sensors. MSc tézis, (online) url: <https://anavs.de/pdfs/Iafrancesco-Michele-Tightly-coupled-position-and-attitude-determination-with-low-cost-sensors.pdf> (2017.03.17.)
- [4] ÁDÁM József - RÓZSA Szabolcs - TAKÁCS Bence: GNSS elmélete és alkalmazása. Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék
- [5] Dr. Bernhard HOFMANN-WELLENHOF - Dr. Herbert LICHTENEGGER - Dr. Elmar WASLE: GNSS - Global Navigation Satellite Systems. 2008, ISBN: 9783211730126
- [6] Gary BISHOP, Greg WELCH: An introduction to the Kálmán Filter. (2001) Proc of SIGGRAPH, Course 8(27599-23175):41
- [7] Márton FARKAS - Szabolcs RÓZSA - Bálint VANEK: Multi-GNSS attitude estimation of UAVs during landing. International Association of Geodesy Symposia, Elbírálás alatt, beküldve: 2017. október 29.

¹¹ RTK: Real Time Kinematic pozícionálási eljárás, mely felhasználja a GNSS-es kód- és fázisméréseket is.

UNMANNED AERIAL VEHICLES POSITION AND ATTITUDE ESTIMATION USING TIGHTLY COUPLED SENSOR FUSION OF LOW-COST GNSS, INERTIAL AND MAGNETIC SENSORS

This paper presents a tightly coupled sensor fusion method based on low-cost GNSS, inertial (IMU) and magnetic sensors. This method is used to estimate UAVs position and attitude. Different coordinate systems and transformations are presented. The used GNSS, accelerometer, gyroscope, magnetometer sensor model equations are described in details. The estimation is based on an Extended Kalman Filter (EKF), which equations are also explained. The algorithm is tested on a real UAV flight data, and the results of the post-processing are compared to the reference data.

Keywords: UAV, GNSS, IMU, sensor fusion, EKF, position estimation, attitude estimation

Farkas Márton (MSc) Tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989	Márton Farkas (MSc) Research associate Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989
Vanek Bálint (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725	Bálint Vanek (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725
Rózsa Szabolcs (PhD) Egyetemi docens, Tanszékvezető Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455	Szabolcs Rózsa (PhD) Associate Professor, Head of Department Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering Department of Geodesy and Surveying rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-10-0459_Farkas_M-Vanek_B-Rozsa_Sz.pdf