

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 koordináta-rendszereket 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 számítógépéből 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 VISION<sup>1</sup> (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 UAV<sup>2</sup>-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 végezhessek a különböző feladataikat, elengedhetetlen a pozícionálási rendszereik folyamatos fejlesztése. Low-cost<sup>3</sup> hardverek felhasználásával ezek a navigációs eszközök is alacsonyabb költségűek lehetnek. Azonban a low-cost MEMS<sup>4</sup> alapú szenzorok pontossága elmarad a taktikai minőségű érzékelőkéhez képest. A gyorsulásmérő és szögsebességmérő szenzorok olyan hibajelenségekkel terheltek, mint a bias, drift, skálázás. Az inerciális (IMU<sup>5</sup>) szenzorok méréseit egyszerűen vagy kétszeresen is integrálni kell. A rosszul becsült hibák az integráció során jelentősen rontják

<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> UAV: Pilóta nélküli légi jármű (Unmanned Aerial Vehicle).

<sup>3</sup> Low-cost: Alacsony árú.

<sup>4</sup> MEMS: Mikroelektromechanikai rendszerek (Micro-Electro-Mechanical Systems).

<sup>5</sup> IMU: Inerciális mérőegység (Inertial measurement unit).

a pontosságot. Azonban az inerciális szenzorok mintavételezési frekvenciái magasak (50–200 Hz). A low-cost GNSS<sup>6</sup> 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.

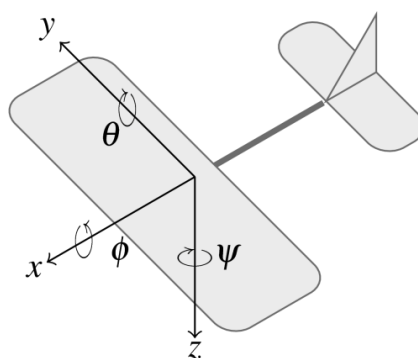
Szenzorfüzió esetén két megvalósítás jöhet szóba, az egyik a loosely coupled megoldás. Ebben az esetben a különböző részrendszerek előfeldolgozott megoldásait, és azok megbízhatóságát kombináljuk. A megoldás során a részrendszerek által szolgáltatott információkat használjuk, magukról a rendszerekről 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 kódmérések, 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 (EKF<sup>7</sup>) 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 ( $\phi$  orsózó,  $\theta$  bólintó,  $\psi$  legyező)

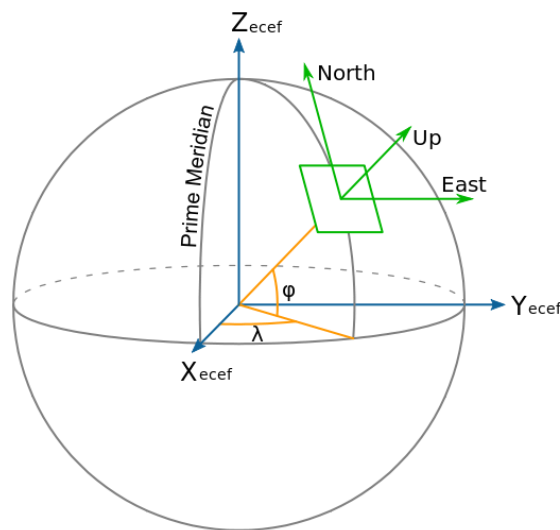
<sup>6</sup> GNSS: Globális navigációs műholdrendszerek (Global Navigation Satellite Systems), GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU, SBAS, QZSS.

<sup>7</sup> 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 ENU<sup>8</sup>, a másik pedig a NED<sup>9</sup>. 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.

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

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

<sup>8</sup> ENU: Kelet-Észak-Fel (East-North-Up).

<sup>9</sup> 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  $\phi_e$  az adott földrajzi pont szélessége  $\lambda_e$  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 ( $\Omega_b$ ) 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 kód méréséhez tartozó egyenlet

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

alakban írható fel [4]. Ahol  $\rho_r^S$  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  $\delta_r$  és  $\delta^S$  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 korrekcióját  $D_{rel}^S$ , a csoportkésés különbséget  $D_{GD}^S$ , a mérési zajt pedig  $\eta_r^S$  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

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

alakú [5], ahol  $\lambda^S$  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,  $\delta^S$  a műholdóra drift,  $\delta_r$  a vevőóra drift,  $\eta_{d_r^S}$  pedig a mérési zaj.

A gyorsulásmérő-szenzor egyenlete

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

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

A szögsebességmérő-szenzor egyenlete

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

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





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



3. ábra A mérést végző UAV és a felhelyezett szenzorok

Az UAV fedélzetén megtalálható egy FCC<sup>10</sup>, 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.

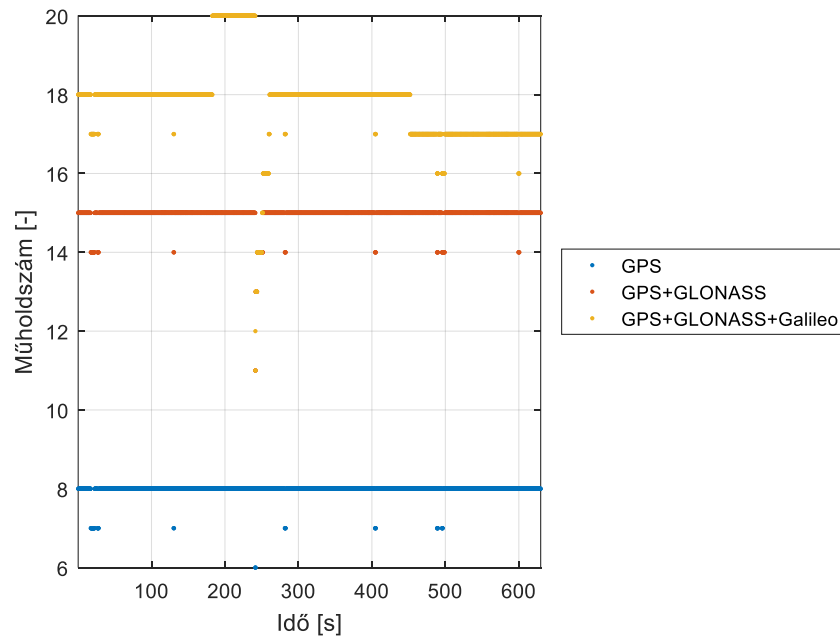
### Mérés kiértékelése

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.

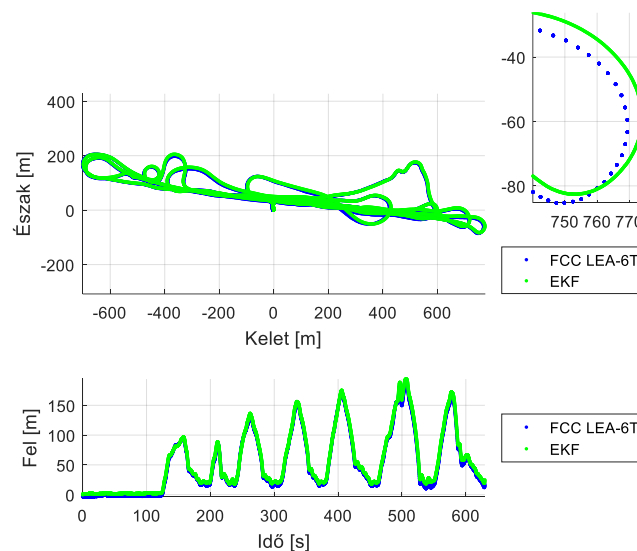
A szenzorok adatait rögzítve és az utólagos feldolgozásukat követően az eredmények a következők. Az EKF algoritmus GLONASS és Galileo műholdak jeleit is felhasználja, minden műholdhoz mindkét vevőből származnak mérések. Ezekből következik, hogy az EKF algoritmus biztosabb információt ad a repülőgép koordinátáiról, 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 információ 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.

<sup>10</sup> FCC: Fedélzeti számítógép (Flight Control Computer).





4. ábra GNSS műholdak száma a mérés során



5. ábra Pozíciók navigációs-koordinátarendszerben

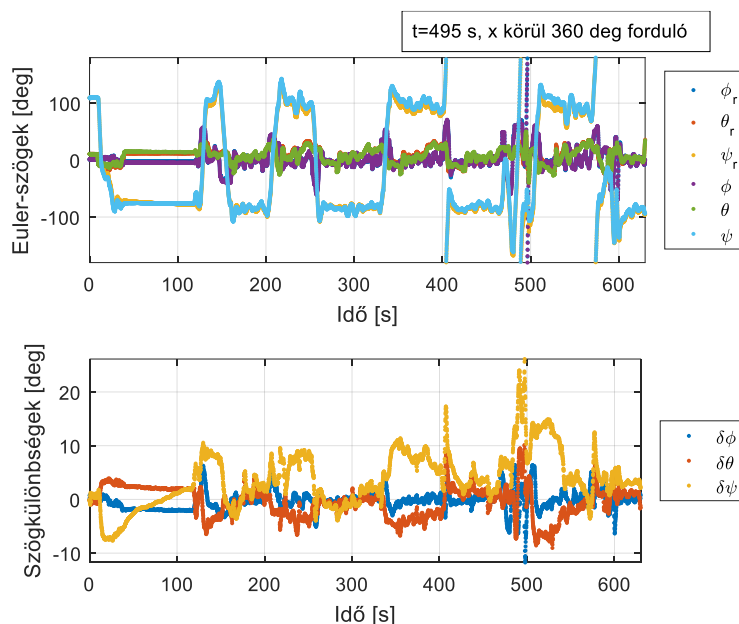
Azokban az időpontokban, amikor a LEA-6T illetve az EKF algoritmus is adott pozíció információt, kiszámítjuk a pozíció eltéréseket. Ezeknek az értékeknek az átlagos eltérését és szórását adja meg az 1. táblázat. Több méteres eltérések láthatók mindhárom koordináta komponensnél. Ez származhat a vevők 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 szögeltérések, 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( $\phi_r, \theta_r, \psi_r$ ), az EKF algoritmus által adott Euler-szögek( $\phi, \theta, \psi$ ) és azok különbségei( $\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$ )

A szögeltérések 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 TOVÁBBLÉPÉSI 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 RTK<sup>11</sup> 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/](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](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.

---

<sup>11</sup> 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 Irányításméleti 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 Irányításméleti 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](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-10-0459_Farkas_M-Vanek_B-Rozsa_Sz.pdf)