

Jevuczó Gábor, Bauer Péter

Mágneses szenzorhibák monokamerakép-alapú detektálása pilóta nélküli légi járműveken valós repülési adatok felhasználásával

A modern inerciális mérőegységekbe integrált magnetométerek alapvető szerepet játszanak a pilóta nélküli légi járművek irányítási és navigációs rendszereiben. Ebből fakadóan a meghibásodásuk detektálása kulcsfontosságú feladat a megbízható navigáció biztosítása és a repülés biztonságának fenntartása érdekében. Ezen feladat megoldására ígéretes megközelítés a fedélzeti kamera használata, ugyanis a mai drónok többsége az IMU- és GNSS-szenzorok mellett kamerával is fel van szerelve különböző funkciók (például felvétel készítése) ellátása céljából. Ebből fakadóan ennek a munkának a célkitűzése egy mágneses szenzormeghibásodást detektáló algoritmus kifejlesztése monokameraképek felhasználásával. A kutatás során egy monokamera képén alapuló IMU-magnetométer-hibadetektálási módszert fejlesztettünk ki, amelyet valós repülési adatokon teszteltünk. A monokamera felvételekből a kamera relatív elfordulását két egymást követő képkocka között a homográfia vagy az esszenciális mátrixok segítségével határoztuk meg. Az így meghatározott kumulált forgatási mátrix felhasználásával egy mágneses szenzorhibák detektálására szolgáló módszert dolgoztunk ki, amely egy fel-le számlálón és határértékeken alapuló döntési mechanizmuson alapul. Az IMU által szolgáltatott valós mágneses mérésekben három különböző típusú, a valóságban is előforduló hibát generáltunk mesterségesen, és a kidolgozott módszer mindhárom hibatípust sikeresen detektálta.

Kulcsszavak: pilóta nélküli légi járművek, inerciális mérőegység, magnetométer-hibadetektálás, monokamera, szenzorhiba-detektálás, valós repülési adatok

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművek (UAV¹-k) biztonságos működésének és megbízható navigációjának egyik kulcsfontosságú eleme a fedélzeti szenzorok helyes működése. Az inerciális mérőegységek (IMU²-k) alapvető szerepet töltenek be a drónok állapotbecslésében, mivel ezek segítségével határozható meg a jármű sebessége, orientációja és pozíciója. A kereskedelembe elérhető

¹ Unmanned Aerial Vehicle: pilóta nélküli légi jármű.

² Inertial Measurement Unit: inerciális mérőegység.

UAV-k többsége MEMS³-alapú, kilenc szabadságfokú inerciális mérőegysége(ke)t alkalmaz, amely háromtengelyes gyorsulásmérőt, giroszkópot és magnetométert tartalmaz [10].

Egy IMU-ban található háromtengelyes magnetométer a Föld mágneses terét három egymásra merőleges tengely mentén méri, ezáltal információt szolgáltat a szenzor környezetében jelen lévő mágneses tér nagyságáról és irányáról. Amennyiben a környezetben érzékelhető mágneses teret nem éri zavarás, abban az esetben a mért értékek a Föld mágneses terének valós komponenseit tükrözik, és felhasználhatók a légi jármű orientációjának meghatározására.

Ugyanakkor ezeket a méréseket torzíthatják a környezetben jelen lévő lokális mágneses anomáliák, a szenzor gyártási pontatlanságai, más elektromos eszközök által keltett elektromágneses terek, valamint maga a szenzor meghibásodása [21]. Az ilyen zavarok ronthatják az UAV-k navigációs és irányítási rendszereinek pontosságát, ami kiemeli a magnetométerek kalibrációjának és hibadetektálásának fontosságát. Jelen munka az utóbbi problémakört vizsgálja, míg a magnetométer kalibrációjáról egy részletes leírás a [18] forrásban található.

Számos orientációbecslő módszer szenzorfüzión és/vagy szűrő algoritmusokat alkalmaz a mágneses zavarok hatásának csökkentése céljából [1], [4], [16], [24]. Azonban ezen módszerek alkalmazása korlátokba ütközhet, amennyiben a zavarok mértéke egy bizonyos szintet meghalad, vagy ha a szenzor meghibásodik, mert ezen esetekben zavarkompensációs képességük jelentősen lecsökken [4], [24]. Ennek következtében a mágneses zavarok és a szenzorhibák detektálása nélkülözhetetlen feladat.

A probléma kezelésének egyik lehetséges megközelítése a mágneses mérések megbízhatatlanságának detektálása. Ennek egyik módszere a mágneses lehajlás (mágneses inklináció) és a mágneses vektor nagyságának felhasználása, valamint ezek várható értékétől való eltérésének folyamatos vizsgálata [5], [15], [22], [23].

A [22] forrásban a szenzort körülvevő mágneses teret három kategóriába sorolják a mágneses lehajlás alapján: standard; stabil, de nem standard; illetve változó zavarokat tartalmazó mágneses tér. Ezt követően a referenciavektort a becslő algoritmus mágneses mérési modelljében, a detektált mágneses tér kategóriájának megfelelően adaptívan módosítják, és ezáltal jobb irányszögbecslést érnek el.

A [5], [15], [23] munkákban a mágneses lehajlást a gyorsulásmérő és/vagy a magnetométer mérései alapján számítják ki, majd az így kapott értéket a World Magnetic Model⁴ (WMM) alapján számított referenciaértékkel hasonlítják össze.

A [24] forrás két szűrőből álló megközelítést alkalmaz: az úgynevezett elsődleges szűrő figyelembe veszi a mágneses méréseket a pozíció-, orientáció- és sebességállapotok becslése során, míg a másodlagos szűrő a mágneses mérések felhasználása nélkül becsüli az állapotokat. Ha pedig mágneses zavart detektálnak, abban az esetben a másodlagos szűrő által szolgáltatott irányszögbecslés felülírja az elsődleges szűrő kimenetén a becsült irányszöget. A zavarok detektálására új döntési algoritmust vezettek be, amely a Mahalanobis-távolságon és a Chi-négyzet-próbán alapul. Továbbá bemutatják azt is, hogy az eredményeik szerint a mágneses zavarok az elsődleges szűrő irányszögbecslésében jelentős becslési hibákat okoznak.

³ *Micro-Electro-Mechanical Systems*: mikro-elektromechanikai rendszerek.

⁴ *World Magnetic Model*: világ mágneses modell.

Neurális hálózatokon alapuló módszerek is léteznek. A [2] forrás egy új, automata mágneses zavar detektálási módszert mutat be, ahol a bemenő adat a mágneses mérés, a kimenet pedig a mágneses zavarok a *poszteriori* valószínűsége egy idősorba rendezve.

Reziduális alapú küszöbölési hibadetektálási módszer is létezik [8]. Ebben a munkában két kiterjesztett Kálmán-szűrőt (EKF⁵) alkalmaznak: az egyiket a pozíció- és sebességállapotok becslésére, míg a másikat az orientáció becslésére. A mágneses szenzorhibák detektálását az orientációbecslő EKF reziduáljának vizsgálatával végzik, amelyet valós adatokon, mesterségesen generált hibák segítségével tesztelnek. A hibadetektálás küszöbértékét a reziduál minimum- és maximumértékei alapján határozzák meg: amennyiben a reziduál meghaladja ezt a küszöbértéket, a szenzort hibásnak tekintik.

Számos orientációbecslő módszer validációja optikai mérőrendszerek alkalmazásával történik [4], [16], [20], [22], amelyek optikai markerek és kamerák segítségével biztosítanak referenciaorientációt. Ugyanakkor a kamera relatív orientációja két egymást követő képkocka között speciális markerek alkalmazása nélkül is meghatározható, kizárólag monokamera-képfelvételek alapján. Ennek megfelelően jelen munka célja egy olyan mágneses szenzorhiba-detektáló algoritmus kidolgozása, amely képes a mágneses szenzorhibák detektálására multikopterrel, valós repülési tesztek során rögzített monokamera-képfelvételek felhasználásával.

A cikk fő hozzájárulása egy új hibadetektálási módszer, amely a monokamera-képfelvételekből meghatározott kumulált forgatási mátrixon alapul. Tudomásunk szerint ez az első olyan tanulmány, amely monokameraképeket használ mágneses szenzorhibák detektálására. A szakirodalomban korábban bemutatott módszerekkel ellentétben a javasolt eljárás nem támaszkodik GNSS⁶-szenzorokra, amelyek érzékenyek mind a szándékos zavarásokra (például *spoofing*⁷ és *jamming*⁸), mind pedig a nem szándékos zavarokra (például GNSS-mentes környezet).

2. Repülési adatok és képfeldolgozás

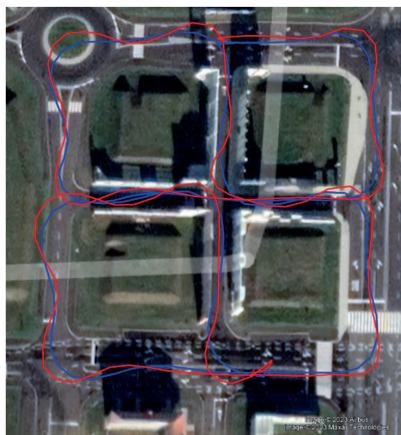
Ebben a munkában két különböző repülés során készült valós kamera- és szenzoradatokat vizsgáltunk, amelyek egy DJI M600 Pro típusú multikopterre rögzített, ferdén előre néző Basler acA2040-35gc kamerával készültek a Zala-ZONE Smart City felett. A két repülés útvonalai az 1. ábrán láthatók. Bár multikopterrel repültünk, azt repülőgépszerű dinamikával bedöntéseket alkalmazva vezettük végig a megadott pályán, hogy a rögzített kamera-képeken nagyobb mozgások legyenek, és így a kidolgozott képfeldolgozási módszerek szélesebb körben alkalmazhatóvá váljanak.

⁵ Extended Kalman Filter.

⁶ Global Navigation Satellite System: a globális műholdas helymeghatározó rendszer.

⁷ GNSS Spoofing: GNSS-jelhamisítás, navigációs rendszer megtévesztése hamis jelekkel.

⁸ GNSS Jamming: GNSS-zavarás, műholdas helymeghatározó jelek zavarása.



1. ábra

A vizsgált repülések útvonalai ZalaZONE Smart City felett, kék vonallal az 539-es repülés és piros vonallal az 540-es repülés [a szerzők Google Earth felhasználásával]

A drón mindkét repülés kezdetén a talajon állt (az 539-es repülés esetében 13 s-ig, az 540-es esetében 31 s-ig). A felszállás után a drón egy rövid ideig a kezdeti pozícióban, a repülési magasságon – amely a repülés időtartama alatt konstans 35 m – lebeg, majd ezt követően megkezdte az előre definiált pályák követését (az 539-es esetében 49 s-től, az 540-es esetében 66 s-től). A hosszirányú sebesség mindkét repülés során konstans 5 m/s. A két repülés közötti különbséget a fordulók során alkalmazott maximális bedöntési szög adja: az 539-es repülés esetében 10° , míg az 540-es repülésnél 15° . Az IMU-méréseket 50 Hz-es mintavételi frekvenciával rögzítettük, majd azokat a 10 FPS⁹ sebességű kamerafelvételekhez igazítva 10 Hz-en mintavételeztük újra.

A javasolt hibadetektálási algoritmushoz szükséges a kamera két egymást követő képkocka közötti relatív elfordulásának becslése. A relatív elfordulás meghatározása többféle módszerrel történhet, attól függően, hogy milyen geometriai viszonyok jellemzik a kamera látómezőjében megjelenő pontokat. Amennyiben a jellemzőpontok egy síkban helyezkednek el, a relatív elfordulás a homográfia mátrixból becsülhető. Ha azonban a jellemzőpontok térbeli eloszlásúak, vagyis nem egy síkra illeszkednek, akkor az esszenciális mátrix alkalmazása indokolt.

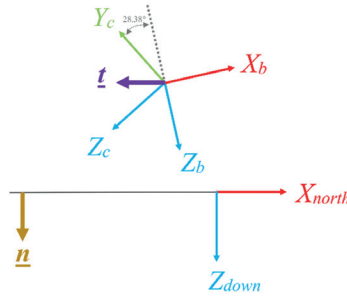
Ezen mátrixok meghatározásához első lépésként jellemzőpontokat detektálunk az első szürkeárnyaltos képen a Shi-Tomasi sarokdetektor segítségével [17]. Ezt követően meghatározzuk, hogy ezek a pontok a következő képkockán hova mozdulnak el, a Lucas–Kanade optikai áramlás algoritmus alkalmazásával [12]. Előfordulhat azonban, hogy ezek a párosítások hibásak, például a pixelintenzitás változása vagy a túl nagy elmozdulások következtében. Ennek a problémának a kezelésére az optikai áramlást visszafelé is kiszámítjuk, és a hibás párosításokat eltávolítjuk [11], majd ezt követően a szűrt jellemzőpontokon elvégezzük a lencsetorzítás korrekcióját.

A szűrt és párosított jellemzőpontok felhasználásával a kamera relatív mozgása kétféleképpen becsülhető. Az egyik lehetőség a homográfiamátrix meghatározása a findHomography

⁹ Frames Per Second: képkocka/másodperc.

OpenCV függvény alkalmazásával, amely a [13] alapján egy forgatási mátrixra és egy transzlációs irányvektorra bontható. Alternatív megoldásként az esszenciális mátrix számítás is alkalmazható a findEssentialMat OpenCV függvény segítségével, amelyet a [3] szerint szintén egy forgatási mátrixra és egy transzlációs irányvektorra bontunk fel.

Ebben a munkában az esszenciális és a homográfiamátrix közötti váltás a repülési magasság alapján történt, azonban a szakirodalomban több megoldás is létezik a kettő közötti automatikus kiválasztásra [6], [19]. A földön állás és a felszállás során az esszenciális mátrixot számítjuk ki. Amint azonban a drón eléri a repülési magasságot, a homográfiamátrixot, mivel ezen a magasságon a jellemzőpontok közelítőleg egy síkban lévőknek tekinthetők a kamera és a pontok közötti megnövekedett távolság következtében.



2. ábra

Az alkalmazott koordináta-rendszerek: a kamerarendszer (C: $Y_c Z_c$), a test koordináta-rendszer (B: $X_b Z_b$), valamint a Földhöz rögzített (North-East-Down) rendszer (E: $X_{north} Z_{down}$) [a szerzők]

A 2. ábra az alkalmazott koordináta-rendszereket szemlélteti. A szokatlan konfiguráció oka, hogy a drón egyszerre több projektben is használva van, ezért további más eszközöket is felszereltek, amelyek egyébként a kamera látóterét kitakarnák. A kamera ezért a jármű hátulja felé van irányítva, így a repülések során a drón végig hátrafelé repült. Viszont ez a koordináta-rendszerek közötti transzformációk megfelelő definiálásával és következetes alkalmazásával nem okoz különösebb problémát.

A kamera két egymást követő képe közötti relatív elfordulás R_{C2C1} (az első kamerahelyzetből az azt követő második kamerahelyzetbe) meghatározását követően ebből – a javasolt hibadetektálási algoritmushoz – egy test- és földrendszer közötti forgatási mátrixot, R_{EB} , állítottunk elő.

A $k + 1$ -edik időpillanatban a test-föld forgatási mátrix, az R_{C2C1} mátrix transzponáltjának felhasználásával az alábbiak szerint írható fel:

$$R_{EB_{k+1}} = R_{EB_k} R_{BC} R_{C1C2_k} R_{CB} = R_{EB_k} \Delta R_k \quad (1)$$

ahol ΔR_k a drón két egymást követő képkocka (a k -edik és $k + 1$ -edik időpillanat) közötti elfordulását jelöli, és ez által az R_{EB_k} mátrix megváltozását fejezi ki. Mivel a kamera mereven van rögzítve – a drón vízszintes tengelyéhez képest $28,38^\circ$ -kal van lefelé döntve – az R_{BC} kamera- és testrendszer közötti forgatási mátrix egy állandó, fix transzformáció. Az R_{EB_k} pedig a test- és földrendszer közötti forgatási mátrix a k -edik időpillanatban.

Hasonlóan az (1)-es egyenlethez, a test-föld forgatási mátrix felírható a $k + 2$ -edik időpillanatra is.

$$R_{EB_{k+2}} = R_{EB_{k+1}} R_{BC} R_{C1C2_{k+1}} R_{CB} = R_{EB_k} R_{BC} R_{C1C2_k} R_{CB} R_{BC} R_{C1C2_{k+1}} R_{CB} \quad (2)$$

Az (1) és (2) egyenletek alapján felírható az N -edik időpillanatra is a test-föld forgatási mátrix, ahol a közbelső $R_{CB} R_{BC} = I$ tagok kiesnek.

$$R_{EB_{k+N}} = R_{EB_k} R_{BC} \left(\prod_{j=0}^{N-1} R_{C1C2_{k+j}} \right) R_{CB} = R_{EB_k} \Delta R_{k+N} \quad (3)$$

A $R_{EB_{k=1}}$ mátrix kezdeti értéke a DJI fedélzeti egysége által becsült Euler-szögekből meghatározható, majd ezt követően 20 s-es időközönként ugyanezen becslések alapján újrainicializálásra kerül, mivel egyébként a kameraadatokból számított kumulált becslés idővel elcsúszna. Mivel a fedélzeti szűrő maga is felhasználja a mágneses méréseket, mágneses hiba jelenléte esetén az újrainicializálás pontatlanná válhat. A probléma kezelésére a jövőben csúszó ablakos megoldás fejlesztésével szeretnénk kiegészíteni az itt bemutatott módszert.

3. Hibadetektáló eljárás

Ebben a fejezetben egy, a korábban meghatározott test-föld forgatási mátrixon alapuló mágneses szenzorhibák detektálására szolgáló módszert mutatunk be.

A kidolgozott módszer alapelve, hogy először meghatározunk egy átlagolt mágneses vektort, amelyet a föld koordináta-rendszerben rögzítünk (ez a rövid repülési távolságok miatt megtehető). Ezt követően minden időlépésben a kameraképből származtatott kumulatív forgatási mátrix segítségével a föld rendszerben rögzített kezdeti mágneses vektort vissza-transzformáljuk test koordináta-rendszerbe. A hibadetektálás minden időpillanatban a mért mágneses vektor és a transzformált mágneses vektor – mindkettő test koordináta-rendszerben kifejezve – összehasonlításán alapul.

3.1. A fix mágneses vektor becslése

Az átlagolt mágneses vektor meghatározása az IMU által testkoordináta-rendszerben mért mágneses vektor felhasználásával történik, miközben a drón a földön, álló helyzetben van. Ezzel párhuzamosan a DJI fedélzeti egysége által becsült Euler-szögek (ϕ, θ, ψ) is átlagolásra kerülnek. Az így kapott átlagolt Euler-szögek segítségével az átlagolt mágneses vektort föld rendszerbe transzformáljuk, ahol a repülés teljes időtartamára rögzítjük. Ezt a lépést kizárólag egyszer szükséges elvégezni, a felszállás előtt, amíg a drón álló helyzetben tartózkodik a földön. Ez kizárólag a rövid repülési pályák feltételezése mellett tehető meg. Hosszabb repülések esetén, például Budapest és Bécs vagy New York között, a kezdeti mágneses vektor jelentősen megváltozna, ugyanakkor a kis méretű drónok jellemzően lokálisan, kis távolságokon repülnek, ahol ez a feltételezés érvényes.

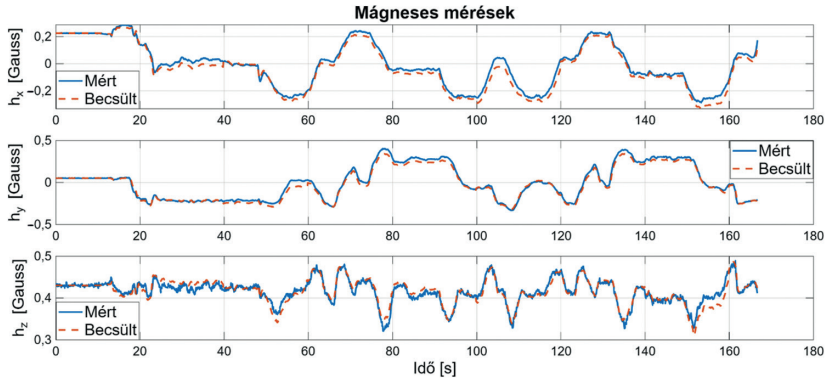
Jelöljük a test rendszerben mért átlagolt mágneses vektort $\bar{H}_{mért}^B$ -el, valamint az átlagolt Euler-szögekből számított forgatási mátrixot $R_{EB}(\bar{\phi}, \bar{\theta}, \bar{\psi})$ -vel, ekkor a föld koordináta-rendszerbe transzformált átlagolt mágneses vektor az alábbiak szerint számítható:

$$\bar{H}_{mért,rögzített}^E = R_{EB}(\bar{\phi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}) \cdot \bar{H}_{mért,rögzített}^B \quad (4)$$

Ezt követően a k -adik időlépésben, a rögzített $\bar{H}_{mért,rögzített}^B$ mágneses vektort a kamera képeiből meghatározott R_{BE_k} kumulált forgatási mátrix transzponáltjával visszatranszformáljuk test koordináta-rendszerbe, amelynek eredményeként megkapjuk a k időpillanatra vonatkozó, test koordináta-rendszerbeli becsült mágneses vektort, $H_{becsült_k}^B$:

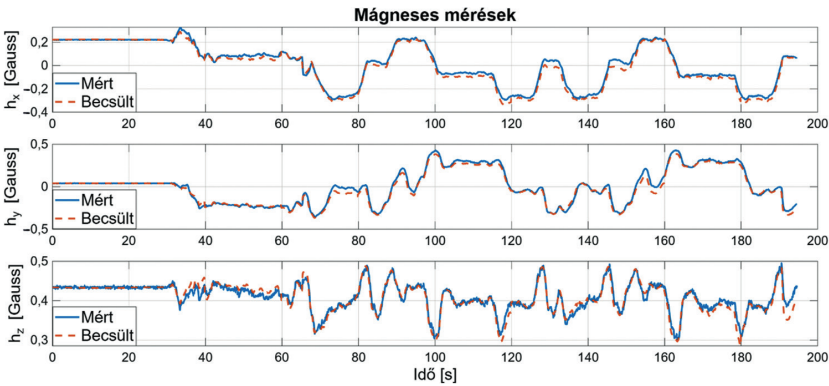
$$H_{becsült_k}^B = R_{BE_k} \cdot \bar{H}_{mért,rögzített}^E \quad (5)$$

Ennek a módszernek az alkalmazásával mesterségesen hozzáadott mágneses hiba nélkül és 20 s-es újrainicializálással, az 539-es repülésre a 3. ábrán, az 540-es repülésre a 4. ábrán látható eredmények adódtak.



3. ábra

A mért és becsült mágneses vektorok komponensei az 539-es repülés során [a szerzők]



4. ábra

A mért és becsült mágneses vektorok komponensei az 540-es repülés során [a szerzők]

1. táblázat
Az 539-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
1%	55,52 (1634)	31,76 (1637)	1,85 (1667)	1329,2	766,1	8,92	0,002	0,013	0,002
5%	34,29 (1446)	18,81 (1513)	1,85 (1667)	298,5	315,3	8,92	0,002	0,013	0,002
10%	17,35 (1128)	11,68 (1386)	1,85 (1667)	127,2	105,2	8,92	0,002	0,013	0,002

2. táblázat
Az 540-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
1%	33,05 (1935)	46,6 (1906)	1,92 (1945)	635,2	1642,7	12,13	0,031	0,008	7,2e-05
5%	24,36 (1867)	15,37 (1741)	1,92 (1945)	258,3	301,5	12,13	0,031	0,008	7,2e-05
10%	17,07 (1713)	13,14 (1294)	1,92 (1945)	128,3	171,9	12,13	0,031	0,023	7,2e-05

A 1. és 2. táblázat mutatja be a teljes repülésre vonatkozóan a mért és a becsült mágneses vektorok komponensei (h_x, h_y, h_z) között számított átlagos relatív hibát, a maximális relatív hibát, valamint a minimális relatív hibát. A relatív hiba számítása során problémát jelent, hogy a nullához közeli mért értékek esetén a nevező nagyon kicsivé válik. Ebből fakadóan a relatív hibát különböző küszöbértékek mellett is kiértékeljük. Egy adott időlépésben a komponenst csak akkor vettük figyelembe, ha annak abszolút értéke meghaladta a mért mágneses vektor hosszának adott százalékát (1%, 5%, 10%). Ez lehetővé teszi annak vizsgálatát, hogy a nullához közeli komponensek milyen mértékben befolyásolják a relatív hibát.

Az 1. és 2. táblázatban az átlagos relatív hibák mellett zárójelben látható azon időlépéseknek a száma is, amelyekben a relatív hibát ténylegesen kiértékeljük. Az összes időlépés száma a h_z komponens mögötti zárójelben látható, mivel ez a komponens egyik repülés során sem vesz fel nulla közeli értéket, így annak relatív hibája nem is függ a választott százaléktól.

3. táblázat
Az 539-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
0,2 [Gauss]	9,05 (598)	9,18 (869)	1,85 (1667)	31,28	23,9	8,92	0,002	0,013	0,002

4. táblázat
Az 540-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
0,2 [Gauss]	5,97 (887)	7,59 (897)	1,92 (1945)	32,24	44,78	12,13	0,031	0,023	7,2e-05

Az átlagos és a maximális relatív hibák nagy értékeit elsősorban a nullához közeli mért értékek, valamint a tranziens szakaszokban – például a drón elfordulásakor a felfutó és lefutó élek mentén – fellépő kismértékű késések okozzák. Ebből fakadóan a relatív hibát 0,2 Gauss feletti tartományban is kiértékeljük – ahol ezek a torzító hatások már nem dominálnak –, azaz csak akkor számítottuk a relatív hibákat, amikor az adott komponens abszolút értéke 0,2 Gauss feletti értéket vett föl. Ennek eredményeit tartalmazza a 3. és 4. táblázat. Az így szűrt adatok alapján megállapítható, hogy a becslések pontossága megfelelő, mivel az átlagos relatív hibák 10% alatt maradnak, ezért ezek a becslések felhasználhatók IMU mágneses mérések hibáinak vizsgálatára. Fontos továbbá ismételtlen megjegyezni, hogy itt a becslés során a test-föld transzformációt 20 s-enként újrainicializáljuk.

3.2. Mágneses szenzorhibák típusai és döntéshozatal

A [8] és [24] irodalmak alapján a következő mágneses szenzorhibákat vizsgáltuk:

1. Szenzor teljes meghibásodása: a hiba beállta után a szenzor kimenete zérus.
2. Szenzor beragadása konstans értéken: a hiba beállta után a szenzor kimenete a legutolsó konstans érték.
3. *Drift* típusú szenzormeghibásodás: a hiba beállta után a szenzor kimenete időben lineárisan, állandó meredekséggel változik (*driftel*).

A fentebb felsorolt hibákat kizárólag egyetlen szenzor mért értékein állítottuk elő mesterségesen, annak ellenére, hogy a DJI M600 Pro drón három egymástól független IMU-szenzorral rendelkezik. Ennek oka, hogy a DJI fedélzeti egysége mindhárom IMU-hoz külön Euler-szöveget becsül, amelyek között jelentős eltérések figyelhetők meg (egyet választ fő forrásnak, a többi igazából csak tartalékként szerepel), és mivel a test-föld transzformáció 20 s-es időközönként ugyanezen becslések alapján újrainicializálódik, a különböző szenzorok adatait felhasználó becslések, ebben az esetben, nem lennének összehasonlíthatók.

A fentebbi hibák detektálására egy fel-le számlálót használó reziduál alapú küszöbölési hibadetektálási módszert alkalmaztunk. Ez a módszer széles körben használt a hibadetektálás területén [7], [11], [14]. A módszer alapelve, hogy minden időpillanatban egy reziduált képezünk a mért $H_{mért}^B = (h_{x,mért}^B, h_{y,mért}^B, h_{z,mért}^B)^T$ és a becsült mágneses vektorok $H_{becsült}^B = (h_{x,becsült}^B, h_{y,becsült}^B, h_{z,becsült}^B)^T$ között. A reziduál a mért és a becsült mágneses vektorok komponensei közötti eltérések abszolút értékeinek összegeként (1-es vektor norma) kerül definiálásra, az alábbi módon:

$$r = |h_{x,mért}^B - h_{x,becsült}^B| + |h_{y,mért}^B - h_{y,becsült}^B| + |h_{z,mért}^B - h_{z,becsült}^B| \quad (6)$$

Ezután a reziduálra bevezetünk egy *Tol1* küszöbértéket, és ha ez a reziduál nagyobb, mint ez a bizonyos határérték, akkor egy számláló értékét növeljük egy előre meghatározott *U* értékkel; viszont, ha kisebb, mint a határérték, csökkentjük az értékét egy előre meghatározott *D* értékkel. Ezeknek az *U* és *D* értékeknek nem kell szükségszerűen azonosnak lenniük. Itt a számlálóra egy zérus alsó korlátot alkalmazunk – azaz nem lehet negatív az értéke –, továbbá egy felső korlát is definiálható, azonban ebben a munkában ezt nem alkalmaztuk.

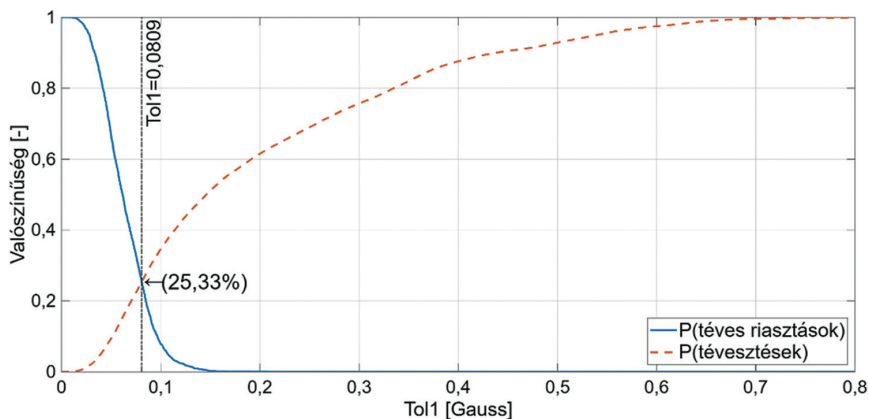
Majd erre a számlálóra is bevezetünk egy $Tol2$ határértéket, és abban az esetben, ha a számláló átlépi ezt az értéket, akkor a szenzort hibásnak tekintjük.

A $Tol1$ reziduál küszöbértéke a hibadetektálás érzékenységét, vagyis a detektálható legkisebb eltérés nagyságát határozza meg, míg a $Tol2$ számláló küszöbértéke a zajokból vagy a becslésben megjelenő hibákból adódó téves riasztások elnyomását szolgálja. Azért előnyös ez a megoldás, mert kisebb hibák detektálására is alkalmas – szemben egy egyszerű határérték használatával –, miközben hatékonyabban szűri a zajokból eredő téves riasztásokat. A következő alfejezet a határértékek hangolását, valamint a hibadetektálási eljárás eredményeit mutatja be.

3.3. Határértékek hangolása

A munka során a képfeldolgozást és a mágneses vektor becslését Python környezetben implementáltuk és futtattuk, míg a küszöbértékek hangolása, a hibák generálása, valamint a hibadetektálás tesztelése MATLAB-környezetben történt. Minden számítást offline végeztünk.

A [9] és [11] alapján a $Tol1$ küszöbérték hangolása a téves riasztások (*False Alarm* [FA]) és a tévesztések (*Missed Detection* [MD]) valószínűségi eloszlásai alapján történt, amely eloszlások a 5. ábrán láthatók.



5. ábra

Téves riasztások és a tévesztések valószínűségi eloszlásai [a szerzők]

A tévesztések arányának meghatározásához bevezettük a $P(data < Tol1 | error)$ valószínűséget, amely azt fejezi ki, hogy milyen gyakorisággal nem lépi át a reziduál a $Tol1$ küszöbértéket, miközben a szenzor hibás. Ez úgy határozható meg, hogy megszámoljuk mindkét repülés esetén, hányszor nem lépi át a hibás reziduál a $Tol1$ értéket, majd ezt elosztjuk azon időlépések számával, amelyekben a hiba fennállt.

A $P(data < Tol1 | error)$ meghatározásához mindkét repülésben „beragadás konstans értéken” típusú hibák lettek mesterségesen előállítva a mágneses vektor mindhárom komponensében egyenként. Az 539-es repülésnél a hibák 70 s és 150 s közötti intervallumban,

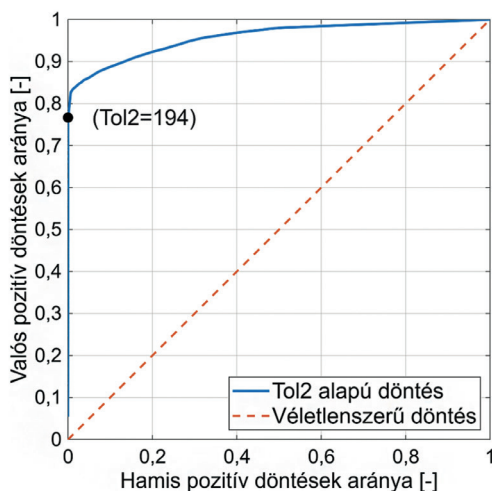
míg az 540-es repülésnél 70 s és 170 s közötti intervallumban lettek előállítva 5 s-ként eltolva a hibaaktiválás idejét. Ennek megfelelően például a h_x komponens esetében az 539-es repülés során összesen 17 hiba történt, tehát első esetben 70 s-nél majd a következő esetben 75 s-nél és így tovább egészen 170 s-ig, 5 s-enként eltolva a hibaaktiválás idejét. A hiba az aktiválást követően a repülés végéig fennmaradt.

Mind a 114 esetre – összesen 114 konstans értéken történő beragadás a két repülés három mágneses vektor komponensében (az 539-es repülés esetén 3×17 eset, az 540-es repülésnél 3×21 eset) – megszámloljuk, hogy a hibás reziduál hányszor nem lépi át a $Tol1$ küszöbértéket, majd ezt elosztjuk az összes olyan időlépés számával, amelyekben a hiba fennállt.

Továbbá a téves riasztások arányának meghatározásához bevezettük a $P(data > Tol1 | no\ error)$ -t, amely azt fejezi ki, hogy milyen gyakorisággal lépi át a reziduál a $Tol1$ küszöbértéket, miközben a szenzor hibamentes. Ez úgy határozható meg, hogy megszámloljuk mindkét repülés esetén, hányszor lépi át a hibamentes reziduál a $Tol1$ értéket, majd ezt elosztjuk az összes időlépés számával.

A $P(data < Tol1 | error)$ és a $P(data > Tol1 | no\ error)$ valószínűségeket több különböző $Tol1$ értékre – 0 és 0,8 Gauss között – kiszámítva az 5. ábrán látható görbék állíthatók elő. Mind a téves riasztások, mind a tévesztések aránya a két görbe metszéspontjában éri el a minimum-értékét, ezért a $Tol1 = 0,0809$ Gauss-érték került kiválasztásra, ahol mind a téves riasztások és tévesztések aránya 22,92%.

A $Tol2$ érték hangolásához egy Receiver Operating Characteristic (ROC) görbét használtunk. Az ROC-görbe a hamis pozitív döntések arányának (*False Positive Rate*, FPR) – azaz amikor a szenzorunk nem hibás, de mégis hibásnak ítéljük – függvényében ábrázolja a valós pozitív döntések arányát (*True Positive Rate*, TPR) –, azaz amikor a szenzorunk hibás, és hibásnak is ítéljük – különböző küszöbértékek mellett.



6. ábra

ROC-görbe az optimális $Tol2$ érték meghatározásához [a szerzők]

A hamis pozitív döntések arányának meghatározásához a hibamentes jel fel-le számlálóján mindkét repülés esetén megszámloljuk, hányszor haladja meg a számláló a $Tol2$ értéket, majd ezt az értéket elosztjuk a hamis pozitív és a valós negatív döntések számának az összegével.

A valós pozitív döntések arányának meghatározásához az eredeti jelen ugyanazon „beragadás konstans értéken” típusú hibák lettek 5 s-es eltolással előállítva mindkét repülésben, amelyeket a $Tol1$ hangolása során már ismertettem. Mind a 114 esetben a hibás jel fel-le számlálóján megszámloljuk, hogy hányszor haladja meg a számláló a $Tol2$ értéket, majd ezt az értéket elosztjuk a valós pozitív és a hamis negatív döntések számának összegével.

Mind a hamis pozitív döntések arányát, mind a valós pozitív döntések arányát $U-2, D-1$ és $Tol1 = 0,0809$ Gauss-paraméterek mellett 0 és 1500 közötti küszöbértékekkel határoztuk meg, amelynek eredményeként a 6. ábrán látható ROC-görbe adódott. A számláló határértékét az y tengely metszéspontjaként definiáltuk, ahol a valós pozitív döntések aránya maximális, miközben a hamis pozitív döntések aránya zérus. Ez a metszéspont a $Tol2 = 194$ értéket adta, amelynél a hamis pozitív arány $FPR = 0$, míg a valós pozitív arány $TPR = 0,7661$.

3.4. A hibadetektálás eredményei

A bemutatott hibadetektálási algoritmust a bemutatott két különböző repülésen teszteltük, $U-2, D-1$ és $Tol1 = 0,0809$ Gauss és $Tol2 = 194$ paraméterek mellett, miközben az algoritmus párhuzamosan futott a hibamentes és a hibás szenzoradatokon. A 5. táblázat tartalmazza a hiba bekövetkezése és a detektálása között eltelt időket.

5. táblázat
Hibadetektálási időtartamok [a szerzők]

Hiba típusa		Repülés 539	Repülés 540
Szenzor teljes meghibásodása	h_x	7,2 s + 0,1 s	13 s + 0,5 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	9,7 s + 0,1 s
	h_z	7,2 s + 0,1 s	19 s + 0,1 s
Konstans értéken beragadás	h_x	7,2 s + 0,1 s	9,7 s + 0,1 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	10,3 s + 0,1 s
	h_z	7,2 s + 0,1 s	8,7 s + 0,0 s
Drift (0,003 [Gauss/s])	h_x	10,2 s + 0,4 s	17,8 s + 0,1 s
	h_y	10,2 s + 0,4 s	17,8 s + 0,1 s
	h_z	15,1 s + 0,6 s	18,4 s + 0,1 s
Drift (0,01 [Gauss/s])	h_x	7,2 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s
	h_z	8,5 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s

Fontos megjegyezni, hogy az előző szakaszban bemutatott hangolás mindkét repülés adatainak felhasználásával történt, és a 5. táblázatban szereplő detektálási idők ehhez a kombinált hangoláshoz tartoznak. Ugyanakkor az 5. táblázat azt is bemutatja, hogyan változnak a detektálási idők, amennyiben az algoritmust kizárólag csak az 539-es repülés (narancsszínnel jelölve) vagy kizárólag az 540-es repülés (kék színnel jelölve) felhasználásával hangoljuk.

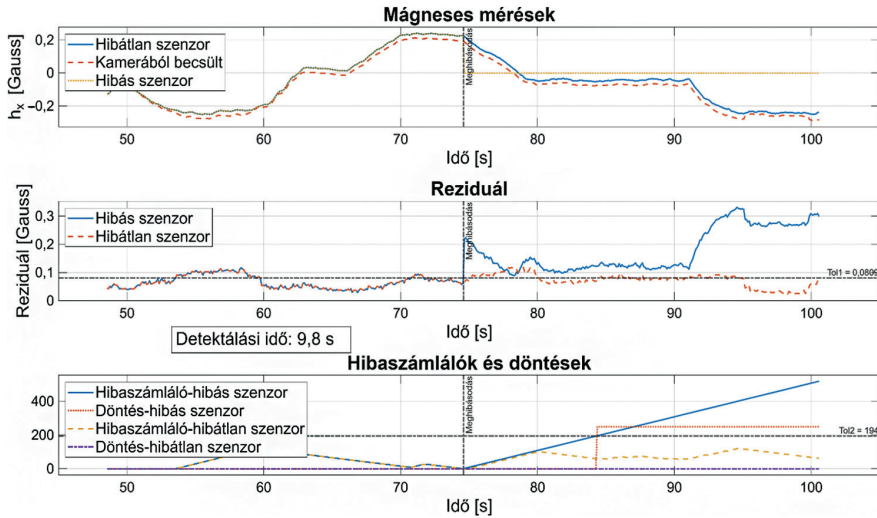
Ha csak az egyik esetre történik hangolás, akkor a másik repülésről az algoritmus nem rendelkezik információval. Ez lehetőséget ad annak vizsgálatára, hogy ilyen körülmények között hogyan változnak a detektálások.

Ebben az esetben természetesen a hangolt paraméterek is eltérnek: az 539-es repülésre hangolás az $U = 2$, $D = 1$, $Tol1 = 0,0794$ Gauss és $Tol2 = 204$ paramétereket eredményezi, míg a 540-es repülésre végzett hangolás az $U = 2$, $D = 1$, $Tol1 = 0,0827$ Gauss és $Tol2 = 194$ paramétereket eredményezi.

Megfigyelhető, hogy amikor az algoritmus hangolása kizárólag egyetlen repülés adatainak felhasználásával történik, akkor a detektálási idők növekednek, de nem jelentős mértékben. Ez összefügg a hangolt paraméterek kismértékű változásával is. Az 539-es repülésre hangolás a kombinált hangolásnál érzékenyebb, ugyanis a $Tol1$ reziduál küszöbérték kisebb, de hosszabb döntési időt igényel, ugyanis a $Tol2$ számláló küszöbértéke nagyobb értéket vesz fel. Ezzel szemben az 540-es repülésre hangolt paraméterek esetén a $Tol1$ nagyobb, ami kevésbé érzékeny, míg a $Tol2$ értéke azonos a kombinált hangolásával, ami így szintén lassabb döntéshozatalt jelent.

Ebből az következik, hogy a csak egy repülésre hangolt küszöbértékek kevésbé általánosíthatók, és egy másik repülés során lassabb hibadetektálást eredményeznek. Természetesen több repülési adat felhasználásával jobban általánosíthatók ezek a küszöbértékek, így gyorsabb detektálást tudnak biztosítani. Ugyanakkor a detektálási idők kismértékű növekedése, valamint a külön-külön hangolt küszöbértékeknek a kombinált hangolás paramétereitől való kismértékű szórása arra utal, hogy a módszer más repülések esetén is megfelelően alkalmazható.

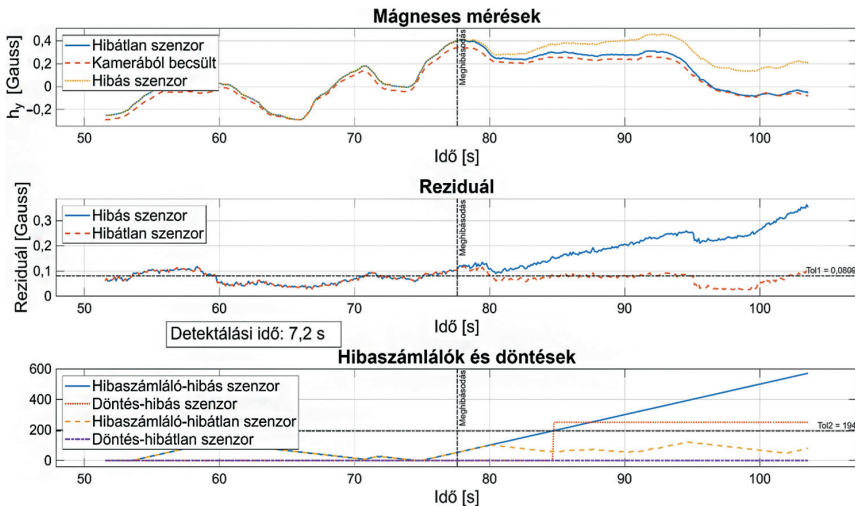
A kidolgozott módszer minden szenzorhibatípust sikeresen detektált. A detektálási idők 7,2 s és 19 s között változnak, és több esetben nagyon hasonlóak, ami annak köszönhető, hogy ha a meghibásodás pillanatában a számláló értéke nulla, és nincs lefelé történő számlálás, akkor a $Tol2 = 194$ érték eléréséhez – a leggyorsabb detektáláshoz – 9,8 s-re van szükség, figyelembe véve az $U = 2$ felfelé számlálási lépésközt és a 10 Hz-es mintavételezést, amely 0,1 s-es időlépéseket eredményez. Egy ilyen detektálás látható a 7. ábrán: egy teljes szenzormeghibásodás az 539-es repülés során. A hiba 74,5 s-nél aktiválódik, hatására a reziduál értéke jelentősen megnő és át is lépi a reziduál küszöbértékét. Ennek következtében a hibás szenzorhoz tartozó számláló nulláról monoton növekszik csökkenés nélkül, és 9,8 s alatt eléri a számláló küszöbértékét és jelzi is, hogy a szenzor meghibásodott.



7. ábra

Szenzor teljes meghibásodása 539-es repülés során a mágneses vektor x komponensében [a szerzők]

Továbbá, mivel minden hiba az adott repülésen belül az összes komponensre ugyanabban az időpillanatban (az 539-es repülés esetén 77,6 s-nél, a 540-es repülés esetén pedig 94,5 s-nél) került előállításra, mindhárom komponens és mindhárom hibatípus jobb összehasonlíthatósága érdekében, a hiba bekövetkezésekor a hibaszámológok azonos kezdőértékről indulnak. Megjegyzendő, hogy a 7. ábrán látható detektálás nem szerepel az 5. táblázatban, mivel ebben az esetben a hiba aktiválási ideje az 539-es repülés során 74,5 s.

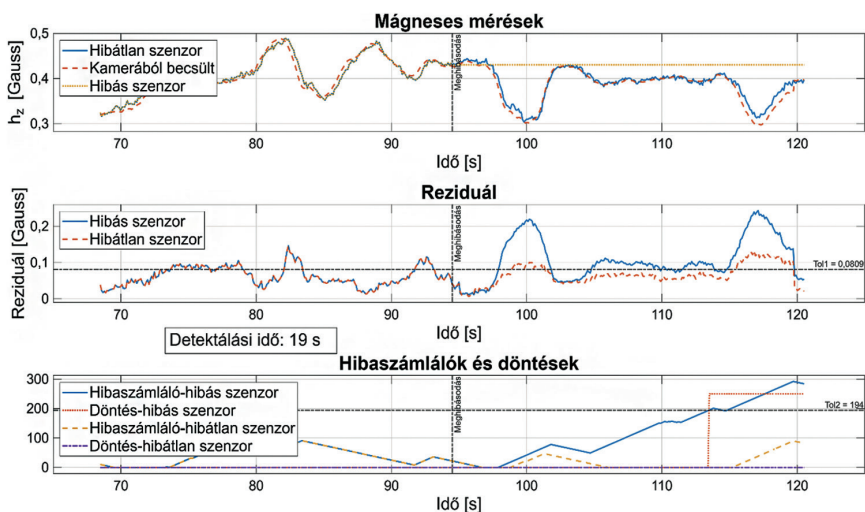


8. ábra

Drift típusú meghibásodás 539-es repülés során a mágneses vektor y komponensében [a szerzők]

Természetesen, ha a számláló egy magasabb értékről indul, akkor az gyorsabb detektálást eredményez, mint ahogy az a 8. ábrán is látható.

A *drift* típusú szenzorhibák esetén is a detektálási idők egymáshoz nagyon közel esnek. Ez abból adódik, hogy a hiba, a konstans *drift* sebesség következtében egyenletes ütemben növekszik. Ezzel szemben egy nagyobb *drift* sebesség esetén a hiba gyorsabban növekszik, ami a detektálási idők csökkenéséhez vezet.



9. ábra

Konstans értéken beragadás típusú meghibásodás 540-es repülés során a mágneses vektor z komponensében
[a szerzők]

A 9. ábra a leghosszabb detektálási esetet szemlélteti. Ebben az esetben egy beragadás konstans értéken típusú hiba lett létrehozva az 540-es repülésben. A hiba aktiválását követően a becsült mágneses vektor z komponense rövid ideig eltér, majd visszatér a hibás (beragadt) érték közelébe. Ekkor a számláló nem növekszik, sőt csökken, és csak a drón újbóli elfordulását követően, a megfelelő gerjesztés hatására válik detektálhatóvá a hiba.

Ez a jelenség a gerjesztés hiányára vezethető vissza. Ilyen esetekben, például egyenes vonalú repülés során, a gerjesztés hiánya megnövekedett detektálási időket eredményezhet. Ugyanakkor ez nem tekinthető a módszer hátrányának, ugyanis ez esetben a hibás szenzor még a valóságnak megfelelő értéket mutatja, és a hiba majd csak akkor válik detektálhatóvá, amikor a hibás érték ténylegesen eltér a valós értéktől, amely hibát a drón újbóli elfordulását követően lehetett detektálni.

4. Összefoglalás

Ebben a munkában egy monokamera képén alapuló IMU-magnetométer-hibadetektálási módszert fejlesztettünk ki, amelyet valós repülési adatokon teszteltünk. A felhasznált teszt-repülések rövid ismertetése után bemutattuk a szükséges képfeldolgozási lépéseket, amelyek a kamera két egymást követő képe közötti relatív elfordulás meghatározásához szükségesek.

A kameraképből nyert kumulált forgatási mátrix felhasználásával egy mágneses szenzorhibák detektálására alkalmas módszert dolgoztunk ki. A vizsgált szenzorhibák ismertetését követően ezeket a hibákat mesterségesen állítottuk elő valós szenzoradatokon, majd egy fel-le számlálót használó reziduál alapú küszöbölési módszerrel detektáltuk. A módszer hangolása a téves riasztások és tévesztések valószínűségi eloszlásai alapján, valamint egy Receiver Operating Characteristic görbe segítségével történt.

A kidolgozott módszer minden szenzorhibatípust sikeresen detektált. A detektálási idők 7,2 s és 19 s között változnak. Ugyanakkor egyes esetekben, amikor a hibás érték nagysága közel esik a mért értékhez, a gerjesztés hiánya hosszabb detektálási időket eredményezhet.

Ugyanakkor ez nem tekinthető a módszer hátrányának, ugyanis ez esetben a hibás szenzor még a valóságnak megfelelő értéket mutatja, és a hiba majd csak akkor válik detektálhatóvá, amikor a hibás érték ténylegesen eltér a valós értéktől, amely hibát a drón újbóli elfordulását követően detektáltuk is.

A módszer egyik korlátja, hogy a kumulált forgatási mátrixot 20 s-enként újra kell inicializálni a drón fedélzeti egysége által becsült Euler-szögekkel, amelyek meghatározására maga is felhasználja a mágneses méréseket. Ebből fakadóan a hibákat egy 20 s-es időablakon belül kell detektálni, amelyet a bemutatott módszer minden esetben teljesített. Ugyanakkor amennyiben a szenzor a 20 s-es időablakon belül hibásodik meg, és az újrainicializálás már a hibás Euler-szögekkel történik, akkor az a mágneses vektor hibás becsléséhez vezet. A jövőben ezt a problémát egy csúszó ablakos megoldással szeretnénk megoldani.

A jövőbeli munka során a homográfia és az esszenciális mátrix becslés közötti automatikus választás bevezetésével tervezzük az algoritmus továbbfejlesztését, illetve tervben van az algoritmus összevetése másfajta hibadetektálási megoldásokkal.

Felhasznált irodalom

- [1] B. Armstrong, E. Wolbrecht, D. B. Edwards, „AUV Navigation in the Presence of a Magnetic Disturbance with an Extended Kalman Filter,” In *Oceans’10 IEEE Sydney*, 2010, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603905>
- [2] E. A. Belalcazar-Bolaños, D. Torricelli, J. Pons, „Automatic Detection of Magnetic Disturbances in Magnetic Inertial Measurement Unit Sensors Based on Recurrent Neural Networks,” *Sensors*, 23. évf. 24. sz. 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/s23249683>
- [3] Q. Cai et al., „Equivalent Constraints for Two-View Geometry: Pose Solution/Pure Rotation Identification and 3D Reconstruction,” *International Journal of Computer Vision*, 127. évf. 2. sz. pp. 163–180. 2019. Online: <https://doi.org/10.1007/s11263-018-1136-9>
- [4] H. Chen, M. Schall, N. Fethke, „Effects of Movement Speed and Magnetic Disturbance on the Accuracy of Inertial Measurement Units,” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61. évf. 1. sz. pp. 1046–1050. 2017. Online: <https://doi.org/10.1177/1541931213601745>
- [5] N. Gao, M. Y. Wang, L. Zhao, „A Novel Robust Kalman Filter on AHRS in the Magnetic Distortion Environment,” *Advances in Space Research*, 60. évf. 12. sz. pp. 2630–2636. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.04.012>

- [6] S. Gauglitz et al., „Live Tracking and Mapping from Both General and Rotation-Only Camera Motion,” In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 13–22. 2012. Online: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402532>
- [7] J. Gertler, M. Costin, „Model-Based Diagnosis of Automotive Engines: Case Study on a Physical Vehicle,” *IFAC Proceedings*, 27. évf. 5. sz. pp. 393–402. 1994. Online: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)48059-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)48059-1)
- [8] G. Gopalratnam, C. Zorn, A. Koch, „Multisensor Data Fusion for Sensor Failure Detection and Health Monitoring,” In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. 2005. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2005-5843>
- [9] T. Grof, P. Bauer, „Voting-Based Fault Detection for Aircraft Position Measurements with Dissimilar Observations,” *IFAC-PapersOnLine*, 53. évf. 2. sz. pp. 14724–14729. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1841>
- [10] J. S. Jang, D. Liccardo, „Automation of Small UAVs Using a Low Cost Mems Sensor and Embedded Computing Platform,” In *2006 IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference*, pp. 1–9. 2006. Online: <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313772>
- [11] G. Jevuczó, P. Bauer, „Optical Flow-Based Vertical Angular Rate Fault Detection on UAVs,” *IFAC-PapersOnLine*, 58. évf. 4. sz. pp. 109–114. 2024. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.202>
- [12] B. Lucas, T. Kanade, „An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI),” In *Conference: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI, 81)*, pp. 121–130. 1981. Online: https://www.researchgate.net/publication/215458777_An_Iterative_Image_Registration_Technique_with_an_Application_to_Stereo_Vision_IJCAI
- [13] E. Malis, M. Vargas, „Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-Based Control,” 2007. Online: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118992441>
- [14] A. A. Ozdemir, P. Seiler, G. J. Balas, „Wind Turbine Fault Detection Using Counter-Based Residual Thresholding,” *IFAC Proceedings*, 44. évf. 1. sz. pp. 8289–8294. 2011. Online: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01758>
- [15] D. Roetenberg et al., „Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 13. évf. 3. sz. pp. 395–405. 2005. Online: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2005.847353>
- [16] A. Sabatini, „Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing,” *Biomedical Engineering, IEEE Transactions*, 53. évf. 7. sz. pp. 1346–1356. 2006. Online: <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.875664>
- [17] S. Jianbo, Tomasi, „Good Features to Track.” In *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593–600. 1994. Online: <https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323794>
- [18] S. Halil, S.-I. Sakai, „Magnetometer Calibration for Advanced Small Satellite Missions,” 2015. Online: <https://bit.ly/4wbsBAm>
- [19] P. Torr, A. W. Fitzgibbon, A. Zisserman, „Maintaining Multiple Motion Model Hypotheses over Many Views to Recover Matching and Structure,” In *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*, pp. 485–491. 1998. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710762>

- [20] W. H. K. Vries, de, et al., „Magnetic Distortion in Motion Labs, Implications for Validating Inertial Magnetic Sensors,” *Gait & Posture*, 29. évf. 4. sz. pp. 535–541. 2009. Online: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.12.004>
- [21] A. Wahdan, et al., „Magnetometer Calibration for Portable Navigation Devices in Vehicles Using a Fast and Autonomous Technique,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15. évf. 5. sz. pp. 2347–2352. 2014. Online: <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2313764>
- [22] X. Wang, et al., „Low-Cost MEMS-Based AHRS Using an Adaptive Robust Error-State Kalman Filter for Motion Capture,” *Measurement*, 251, 2025. Online: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117108>
- [23] N. Yadav, C. Bleakley, „Accurate Orientation Estimation Using AHRS Under Conditions of Magnetic Distortion,” *Sensors*, 14. évf. 11. sz. pp. 20008–20024. 2014. Online: <https://doi.org/10.3390/s141120008>
- [24] W. Youn, „Magnetic Fault-Tolerant Navigation Filter for a UAV,” *IEEE Sensors Journal*, 20. évf. 22. sz. pp. 13480–13490. 2020. Online: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3004133>

Detection of Magnetic Sensor Faults Based on Monocular Camera Images on Unmanned Aerial Vehicles Using Real Flight Data

Modern magnetometers integrated into inertial measurement units play a fundamental role in control and navigation systems of unmanned aerial vehicles. Consequently, detecting their failures is a key task for ensuring reliable navigation and to maintain flight safety. A promising approach to solve this problem is to use the onboard cameras, as most modern drones come equipped not just only with IMU and GNSS sensors but also with cameras for various tasks such as video recordings. Accordingly, the objective of this work is to develop an algorithm for detecting magnetic sensor failures using mono camera images. During this research, we developed an IMU magnetometer fault detection method based on mono camera images and tested on real flight data. The relative rotation of the camera between two consecutive frames was determined using homography and essential matrices derived from the mono camera image sequence. Based on the resulting cumulative rotation matrix, a method for detecting the magnetic sensor faults was developed by applying an up-down counter-based residual thresholding method. Three different types of sensor faults were artificially generated on the IMU's magnetic measurements and the proposed method successfully detected all three fault types.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, inertial measurement unit, magnetometer fault detection, mono camera, sensor fault detection, real flight data*

Jevuczó Gábor, MSc doktori hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar	Gábor Jevuczó, MSc PhD student Budapest University of Technology and Economics Department of Control for Transportation and Vehicle Systems Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Research Associate HUN-REN Institute for Computer Science and Control (SZTAKI) jevuczo.gabor@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0009-0003-6859-8790
Tudományos segédmunkatárs HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) jevuczo.gabor@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0009-0003-6859-8790	
Dr. Bauer Péter, PhD tudományos főmunkatárs, kutató HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) Széchenyi István Egyetem (SZE) bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0000-0002-1925-2270	Péter Bauer, PhD Senior Research Fellow HUN-REN Institute for Computer Science and Control (SZTAKI) University of Győr bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0000-0002-1925-2270

A publikációban szereplő kutatást a HUN-REN SZTAKI és az SZE az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

A TKP2021-NVA-01 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.