

Baár Tamás¹ – Bauer Péter²

REPÜLŐGÉPEN ALKALMAZHATÓ SZÉLBECSLŐ ALGORITMUS VIZSGÁLATA³

A szerzők a dolgozatban először irodalmi áttekintést nyújtanak egy szélbecslő algoritmusról, majd annak megvalósíthatóságát vizsgálják. Az eljárás a GPS sebesség és a Pitot cső által mért sebesség alapján becsli a szél nagyságát és irányát egy kiterjesztett Kálmán szűrő segítségével. A szélbecslő eljárásból a fejlesztés során többféle változatot készítenek és szimulációs eljárásokkal tesztelik azokat. Az ismertetett tesztelési eredmények alapján kiválasztásra kerül a legmegfelelőbb algoritmus, amit a szerzők átültetnek az MTA SZTAKI-ban rendelkezésre álló távirányítású repülőgép fedélzeti szoftverébe. Az így kapott programot valós repülési adatokon tesztelik. Az eredmények bebizonyították, hogy az algoritmus alkalmas a szél irányának és nagyságának megállapítására és a későbbiekben alkalmazható lesz a repülőgép fedélzetén.

THE ANALYSIS OF A POSSIBLE ONBOARD WIND ESTIMATION ALGORITHM

The authors give an overview about a wind estimation algorithm and later analyze its implementation. The solution estimates the wind conditions by data from a GPS receiver, data measured by a Pitot tube and by an Extended Kalman Filter. During the development process the authors made different versions of the algorithm and tested them with simulations. After the comparison of these algorithms, based on the results they choose one to implement onboard a radio controlled airplane, provided by MTA-SZTAKI. As a next step the authors continue with an extended test of the chosen algorithm. They test the algorithm on real flight data. The results showed that the solution is able to estimate wind conditions, and later it can be used onboard the airplane.

SZÉLBECSLÉS SZÜKSÉGESSÉGE

Az MTA SZTAKI-ban rendelkezésre álló E-flite Ultrastick 25e típusú távirányítású repülőgép, a végzett átalakítások után képes önálló repülésre. Ez azt jelenti, hogy térképen megadott útvonalpontok alapján végig tud repülni egy útvonalon. Amennyiben ezek a pontok túlságosan közel vannak egymáshoz és a repülőgép fizikai korlátjai miatt nem tudná a megadott sorrendben érinteni őket, a fedélzeti algoritmus egy új útvonalat számít ki, ami lehetővé teszi a repülési feladat végrehajtását, az adott pontok érintésével. A számítógépes szimulációk bebizonyították, hogy az eljárás szélcsendes időjárás során megfelelően működik. A valóságban azonban ilyen szituáció szinte elképzelhetetlen, a szél hatásával minden repülés során számolni kell.

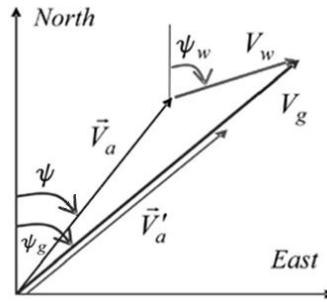
A kérdés az, hogy a fellépő szélzavarás hogyan befolyásolja az említett repülőgép pályáját. A szél a repülőgépet az optimális pályájáról eltéríti, „lefújja”, ezzel pontatlanabbá téve a követési eljárást. A dolgozatban kidolgozott algoritmus a szélnek ezt az eltérítő hatását számítja ki. Fontos megjegyezni, hogy a modell kidolgozása során egyszerűsítésekkel éltünk. A szél hatását csupán 2 dimenzióban, észak-kelet koordináta rendszerben modelleztük, és feltételeztük, hogy a repülés ideje alatt

¹ Közlekedésmérnök hallgató, BME, baartamas@gmail.com

² Tudományos segédmunkatárs MTA SZTAKI, bauer.peter@sztaki.mta.hu

³ Lektorálta: Prof. Dr. Szabolcsi Róbert okl. mk. ezds; egyetemi tanár, Nemzeti közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, szabolcsi.robort@uni-nke.hu

(10–15 perc) az iránya és nagysága alig változik. A szél hatása a következő ábrán látható.



1. ábra Szél hatása a repülési sebességre (az ábra forrása [5])

Itt V_a a repülőgép levegőhöz képesti sebességének nagyságát jelzi. Ezt a sebességet közvetlenül mérni nem tudjuk, számítása a Pitot cső segítségével mért V_{Pitot} sebességből történik [2] alapján.

$$T_{BE} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi - c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_{BE} * \begin{bmatrix} V_{Pitot} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi \\ c\theta s\psi \\ -s\theta \end{bmatrix} V_{Pitot} \quad (2)$$

Ha θ kicsi, $-s\theta \approx 0$.

$$V_a = \sqrt{(c^2\theta c^2\psi + c^2\theta s^2\psi)V_{Pitot}^2} \quad (3)$$

$$V_a = V_{Pitot} * \cos\theta \quad (4)$$

- $c x \cos(x)$;
- $s x \sin(x)$;
- T_{BE} Test-Föld transzformációs mátrix;
- ψ azimut szög;
- θ bólintási szög;
- ϕ bedöntési szög.

V_w a szél nagyságát, ψ_w az irányát, míg V_g a V_a és V_w összegét mutatja, azaz a repülőgép tényleges sebesség vektorát a földhöz képest. Ezt a V_g sebességet tudjuk GPS segítségével érzékelni. Az ábrából kitűnik, hogy erős szél, azaz nagy V_w esetén V_a és V_g jelentősen eltérhet egymástól.

KOORDINÁTA RENDSZEREK ÉS TRANSZFORMÁCIÓK

A számítások során alkalmazott koordinátarendszerek

Repülés közben többféle erő és nyomaték hat a repülőgépre, amiknek a hatására létrejön az elmozdulás. Ezeket az erőket három különböző koordinátarendszerben szokták definiálni.

Föld koordinátarendszer (E)

A Föld koordinátarendszer Z_E tengelye merőleges a Föld adott pontbeli érintősíkjára, X_E északra

mutat Y_E pedig ezekkel jobbsodrású rendszert alkot. Ebben a koordináta rendszerben a repülés során egyetlen erőt értelmezünk, a nehézségi erőt. A számítások során a nehézségi erő nagyságát és irányát állandónak vesszük, és iránya párhuzamos a koordináta rendszer Z_E tengelyével. [8]

Szél koordináta rendszer (W)

Ennek a koordináta rendszernek az X_W tengelye párhuzamos a repülőgép sebesség vektorával. Ez a koordináta rendszer azért fontos, mert a repülőgépre ható összes aerodinamikai erőt ebben a koordináta rendszerben értelmezzük. Ez azért lehetséges, mert az aerodinamikai együtthatókat két csoportba sorolhatjuk. A szél irányával párhuzamosba, és a szél irányára merőlegesbe. Így létezhetnek a szél irányára merőleges erők, például a felhajtóerő (lift) és létezhetnek a szél irányával párhuzamos erők, például az ellenállás erő (drag), ami a repülőgép maximális sebességét csökkenteni igyekszik. Ezeken kívül a koordináta rendszerben értelmezhetünk még nyomatékokat, amiket az előbb említett erők generálnak. Ezek a nyomatékok is hasonlóképpen csoportosíthatók. Az itt említett aerodinamikai erők és nyomatékok arányosak a dinamikai nyomással és a felület nagyságával ami mentén hatnak. [8]

Test koordináta rendszer (B)

Ez a koordináta rendszer a repülőgép testéhez van kapcsolva és ezáltal azzal együtt forog. A koordináta rendszer középpontja a repülőgép tömegközéppontjában van, X_B tengelye párhuzamos a repülőgép hossz tengelyével. Y_B tengelye a repülőgép jobb félszárnyának irányába, Z_B tengelye az előző két tengelyre merőlegesen a repülőgép alsó része felé mutat. Ebben a koordináta rendszerben értelmezzük a tolóerőt. Az X_B tengely és az X_W tengely $X_B Z_B$ síkra vett vetülete által bezárt szög az α állásszög. [8]

Euler szögek

A repülőgép irányítása során a repülőgép orientációját Euler szögek segítségével írjuk le. Ehhez két koordináta rendszert alkalmazunk. A már említett Test és Föld koordináta rendszereket. A két koordináta rendszer átjárható, meghatározott sorrendű forgatásokkal az egyik rendszerben megadott vektor átszámítható a másik rendszerbe [2]. Ezt a meghatározott sorrendű forgatást nevezi a nemzetközi szakirodalom 3-2-1 forgatási sorrendnek, ahol a tengelyek körüli forgatásokat úgynevezett Euler-szögekkel jellemzik. A három Euler-szög a következő: ψ azimut szög ($Z(3)$ tengely körüli forgatás), θ bólintási szög ($Y(2)$ tengely körüli forgatás), ϕ bedöntési szög ($X(1)$ tengely körüli forgatás).

A pályakövető eljárás a repülés során ismert helyzet és orientáció adatokat követel meg a repülőgépre vonatkozóan. Ezért fontos többek között az Euler szögek ismerete. A szükséges adatokat nem tudjuk közvetlenül mérni, csak mért adatokból becsülni. Ehhez kifejtésre került egy orientáció (attitude) becslő algoritmus [1]. A becslő gyorsulást, szögsebességet, mágneses térerősséget (mindhárom Test koordináta rendszerben), barometrikus és Pitot cső nyomást, illetve GPS adatokat használ fel.

Az Euler szögek becslése pusztán a mágneses térerősség, vagy pusztán a GPS-ből származó adatok alapján nem lehetséges, becsléséhez két egymástól független vektornak a mérése szükséges. A két vektor a Föld mágneses terét leíró vektor, illetve a GPS által mért sebesség vektor

az [1]-ben publikált módszer szerint. Repülés közben a becselőben alkalmazott kiterjesztett Kálmán szűrő ezeknek az adatoknak a segítségével, és egy szögsebesség szenzor által mért szögsebességeket felhasználva becsli a szükséges Euler szögeket. A GPS-ből származó adatokat a szél a korábban bemutatott módon befolyásolja. Így a belőlük származtatott Euler szögek és az azokból számított további adatok is hibával terhelték. Az útvonalkövetésben való alkalmazáson túl ezért is volt szükség egy eljárás kidolgozására, aminek segítségével a szél erőssége becsülhető és a pontatlanság csökkenthető.

SZÉLBECSLŐ ALGORITMUS

Az eljárás az [5]-ben ismertetett módszeren alapul. Ez az elgondolás egy GPS vevőt és egy Pitot csövet használ és az 1. ábrán bemutatott szélháromszög segítségével határozza meg a szélirányt és erősséget. A számítások során egy kiterjesztett Kálmán szűrőt alkalmaz. Test rend-

szerben $V_a^B \approx \begin{bmatrix} V_{Pitot} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ a repülőgép levegőhöz képesti sebessége. V_a^B -ben az α állásszög hatását elhanyagoljuk. V_w a szélesebesség, V_g a GPS által mért sebesség. A csúszásmentes repülést szabályozóval közelítőleg garantáljuk ezért a β csúszási szöget elhanyagoljuk. Az 1. ábrából látható, hogy amennyiben a V_g , illetve V_a sebességek ismertek V_w meghatározható az 5. egyenlet segítségével.

$$V_w = V_g - V_a \approx V_g - T_{BE} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * V_{pitot} \quad (5)$$

Amennyiben a repülőgép irányt vált, fordul, a földi sebessége és sokszor a levegőben mért sebessége is változik az időben. Ezeknek a változóknak a segítségével becsülhető a szélirány és szélnagyság. Ahhoz hogy a becselő megbízható adatokat szolgáltatson, szüksége van a repülőgép orientációjának folyamatos változására. Ez a módszer állandó szélirányt és nagyságot feltételez.

A levegőhöz képesti sebességet (V_a x irányú komponensét) egy nyomásmérő segítségével számolhatjuk ki, amit a Pitot csőhöz csatlakoztatunk. A nyomásmérő berendezést kalibrálni kell. Ez az eszköz beépítésekor tehető meg, szélcsatornás mérések segítségével. A kalibráció az alkalmazott repülőgépen is megtörtént. A sebesség négyzete innen Bernoulli egyenletét felhasználva

$$V_{pitot}^2 = K * \frac{2\Delta P}{\rho} \quad (6)$$

- ΔP a dinamikus nyomás,
- ρ a levegő sűrűsége,
- K egy korrekciós tényező.

A Pitot cső ideális, egyenletesen áramló gázt feltételez, a valóságban azonban ez nem így van. A Pitot cső felhelyezésénél is adódhatnak hibák. A korrekciós tényező ezeket a hibákat korrigálja.

A V_a repülési sebesség, és V_{Pitot} Pitot cső által mért sebesség, α az állásszög és β az oldal irányú csúszás közötti közelítő összefüggés:

$$V_{\text{pitot}}^2 \approx |V_a|^2 \quad (7)$$

Ami az előző egyenletet felhasználva írható úgy, hogy

$$V_a^2 = V_{\text{pitot}}^2 = \frac{\Delta P}{\frac{\rho}{2K}} = \frac{\Delta P}{s_f} \quad (8)$$

- s_f egy korrekciós tényező a dinamikus nyomás és a V_{pitot}^2 között.

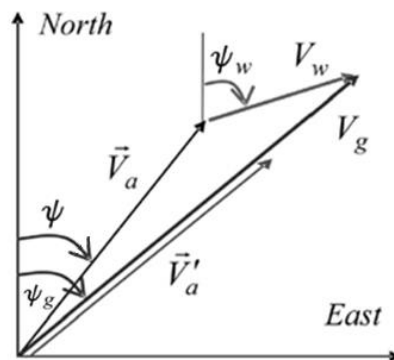
A rendszer dinamika az $x = [V_w \ \psi_w \ s_f]^T$ állapot vektorral és w_k zajjal a következő

$$x_{(k+1)} = Fx_{(k)} + w_k \quad (9)$$

- $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
- $w_k \sim N(0, Q_k)$

Így az állapotokat random walk eljárásként modelleztük. A random walk egy matematikai leíró formula, amivel a valamilyen szinten véletlen által vezérelt folyamatokat szokták leírni. Le lehet írni például így egy gázmolekula útját, ahogy egy áramlásban halad, vagy például egy folyamatosan változó részvény értékét is.

A számításhoz szükséges sebességeket és szögeket a 2. ábra mutatja be. Itt ψ_g a repülőgép földhöz viszonyított haladási irányát adja meg a Föld koordináta rendszer északi tengelyéhez viszonyítva. ψ_w a szél irányát adja meg, szintén a Föld koordináta rendszer északi tengelyéhez viszonyítva.



2. ábra Szélháromszög (az ábra forrása [5])

Ha a szélháromszögre alkalmazzuk a koszinusztételt az alábbi összefüggést kapjuk

$$V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g) = V_a^2 = \frac{\Delta P}{s_f} \quad (10)$$

- V_g a GPS egységből kapott adat;
- ψ_g a GPS egységből kapott adat;
- V_a^2 a Pitot cső segítségével számítható.

A 10. egyenletet átrendezve kapjuk a nemlineáris megfigyelési rendszert, ahol $z_k = V_a^2$

$$z_k = h(x_k) + v_k = sf_k * [V_{gk}^2 + V_{wk}^2 - 2V_{gk}V_{wk} \cos(\psi_{wk} - \psi_{gk})] + v_k \quad (11)$$

- $v_k \sim N(0, R_k)$ a mérési zaj

Ebből a lineáris megfigyelhetőségi mátrix a következőképpen adódik

$$H = \left[\frac{\partial h}{\partial V_w}, \frac{\partial h}{\partial \psi_w}, \frac{\partial h}{\partial sf} \right] \quad (12)$$

Az így nyert adatok segítségével felépíthető a Kálmán szűrő. A kezdő értékeket a szerzők [5]-ben a következőképpen határozták meg. Először képezték egy

$$V'_a = V_a * \frac{V_g}{V_g} \quad (13)$$

vektort, ami V_a nagyságú, de V_g irányába esik. Majd képezték V_g és V'_a különbségét.

$$(V_w)_{init} \approx V_g - V'_a \quad (14)$$

Kezdeti szögnek pedig a GPS sebességvektor irányát vették.

Az elkészített Kalman szűrők

A korábban bemutatott eljárás segítségével három különböző Kálmán szűrőt készítettünk. Ezek különböző szél paramétereket becsülnek, és a becsült értékek segítségével korrekciókat végeznek.

Kalman szűrő V_w , illetve ψ_w tényezők becslésére

Az állapotvektor: $x = [V_w, \psi_w]$

A mérési egyenlet:

$$h(x) = V_g^2 + V_w^2 - 2V_gV_w \cos(\psi_w - \psi_g) \quad (15)$$

A linearizált mérési egyenlet mátrixa:

$$H = \begin{bmatrix} 2(V_w - V_g \cos(\psi_w - \psi_g)) \\ 2V_wV_g \sin(\psi_w - \psi_g) \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

Kalman szűrő V_w , ψ_w , illetve θ_e tényezők becslésére

A korábbi eljárásan változtatva, a szűrő az orientációbecslő által számított θ bólintási szög hibáját is számítja az sf korrekciós tényezőn keresztül. A repülőgép Pitot sebességének vízszintes komponense

$$V_a * \cos(\theta + \theta_e) \quad (17)$$

Ennek négyzetét a (7.) egyenletbe helyettesítve adódik

$$V_a^2 \cos^2(\theta + \theta_e) = \frac{\Delta P}{sf} \quad (18)$$

Ennek segítségével és $\cos^2(\theta + \theta_e) = \frac{1}{sf}$ feltevással sf-ből θ_e számítható, ha θ -t a becslő algoritmus szolgáltatja. Ez az eljárás csak abban az esetben működik, amikor sf értéke egynél kisebb. Ebben az esetben is nehéz az adódó $\pm \theta_e$ értékek között dönteni.

Az állapotvektor: $x = [V_w, \psi_w, \Theta_e]$

A mérési egyenlet:

$$h(x) = [V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g)] \cos(\Theta + \Theta_e)^{-2} \quad (19)$$

A linearizált mérési egyenlet mátrixa:

$$H = \begin{bmatrix} 2(V_w - V_g \cos(\psi_w - \psi_g)) \cos(\Theta + \Theta_e)^{-2} \\ 2V_w V_g \sin(\psi_w - \psi_g) \cos(\Theta + \Theta_e)^{-2} \\ 2[V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g)] \cos(\Theta + \Theta_e)^{-3} \sin(\Theta + \Theta_e) \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

Kalman szűrő V_w , ψ_w , illetve sf tényezők becslésére

Az algoritmus harmadik változata az sf korrekciós tényező értékét becsli, a Θ szög hibájával nem számol.

Az állapotvektor: $x = [V_w, \psi_w, sf]$

A mérési egyenlet:

$$h(x) = sf * [V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g)] \quad (21)$$

A linearizált mérési egyenlet mátrixa:

$$H = \begin{bmatrix} 2 sf (V_w - V_g \cos(\psi_w - \psi_g)) \\ 2 sf V_w V_g \sin(\psi_w - \psi_g) \\ [V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g)] \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

Az algoritmusok segítségével elvégeztük az eredetileg a GPS sebességből becsült ψ azimuth szög korrekcióját is.

$$\psi_a = \text{atan} \left[\frac{v_E - \sin \psi_w * V_w}{v_N - \cos \psi_w * V_w} \right] \quad (23)$$

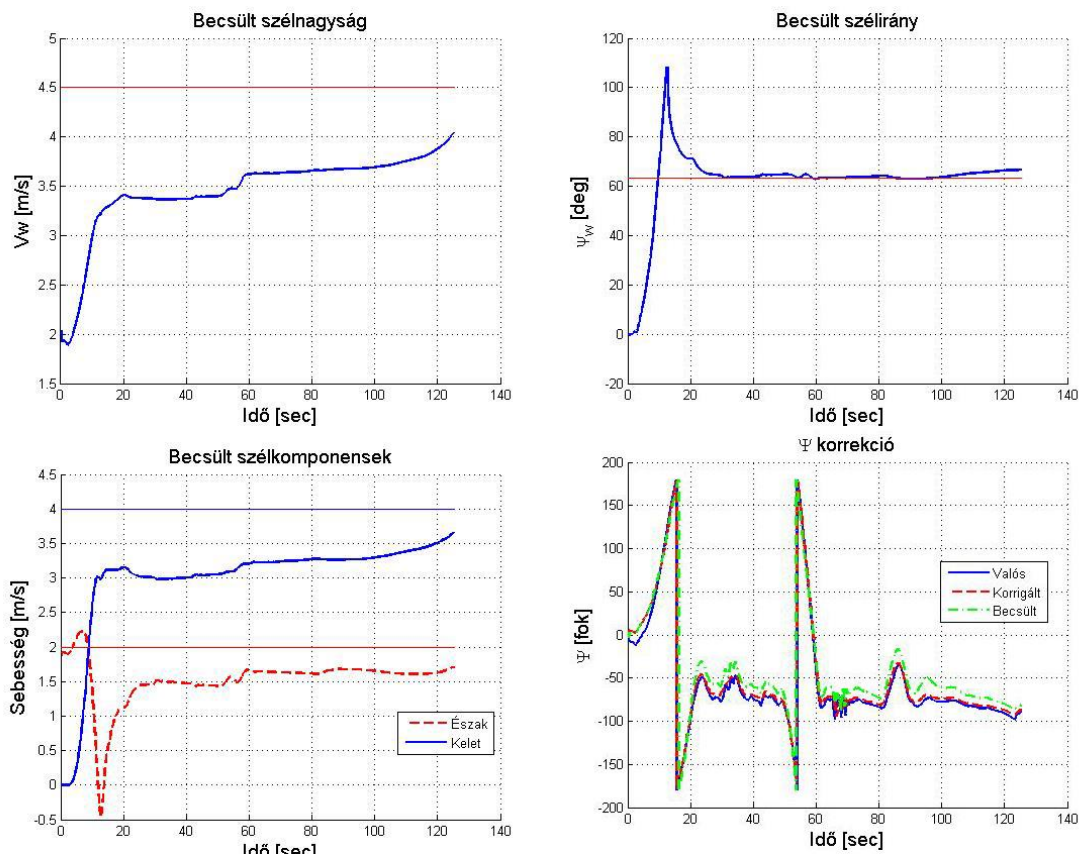
- ψ_a a repülőgép levegőhöz képesti sebességének iránya(ha $\beta=0$);
- v_N a GPS egység által mért sebesség északi irányú komponense;
- v_E a GPS egység által mért sebesség keleti irányú komponense;
- V_w a szélssebesség;
- ψ_w a szélirány.

Tesztelés

A fent bemutatott algoritmusokat szimulációk segítségével, Matlab környezetben teszteltük. A tesztelés során rendelkezésünkre állt az alkalmazott repülőgépnél (E-flite Ultrastick 25e) egy Matlab környezetben felépített modellje, továbbá szimulált repüléseknek az adatai. Voltak fájlok amik széles időjárást szimuláltak, előre megadott, állandó szél nagysággal és széliránnyal. Voltak amik szélszél szimuláltak, illetve voltak olyanok amiknél különböző mérési hibákat is számításba vettünk. Az eljárás lényege az volt, hogy a szél értékeit mi állítottuk be előre, így azok ismertek voltak. A lefutott Matlab algoritmus eredményeit összehasonlítottuk a szí-

mulációkban eltárolt adatokkal. A repülőgépen a GPS adatok frissítése közelítőleg 4Hz-en történik (az egyéb adatoké 50 Hz-en), így a szimulációban szereplő adatok közül csak minden 12. adatot kell számításba venni. Ezért a kód a köztes időben az előző értéket tartja. Ennek hatására a grafikonok lépcsőzetesen változnak, de a becslés megfelelő.

A kibővített Kálmán szűrő zajkovariancia mátrixainak beállítása után, a három algoritmus esetében a szimulációban megadott szélvektor $V_w = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix}$ volt, aminek csak a vízszintes $\begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix}$ komponensét becsültük. A szimulációra a következő eredményt kaptuk.

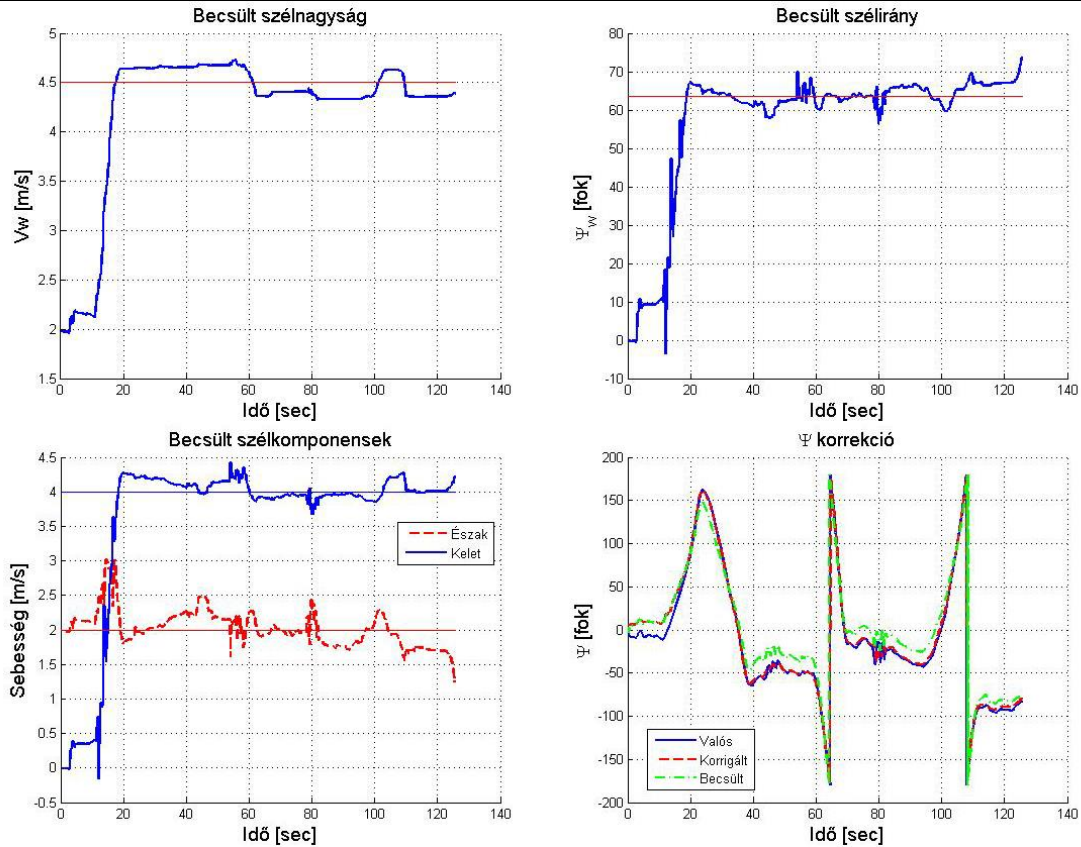


3. ábra Kalman szűrő V_w , illetve ψ_w tényezők becslésére (saját forrás)

A 3. ábrán láthatóak a V_w -t és ψ_w -t becselő algoritmus tesztelésének az eredményei. Az ábrán vízszintes vonal jelzi a beállított értékeket (szélnagyság esetében V_w vízszintes síkban vett abszolútértékét). A szélnagyság becslése során az algoritmus 1 m/s-os eltérésen belül közelíti a kívánt értéket. Az idő előrehaladtával a becslés pontossága javul.

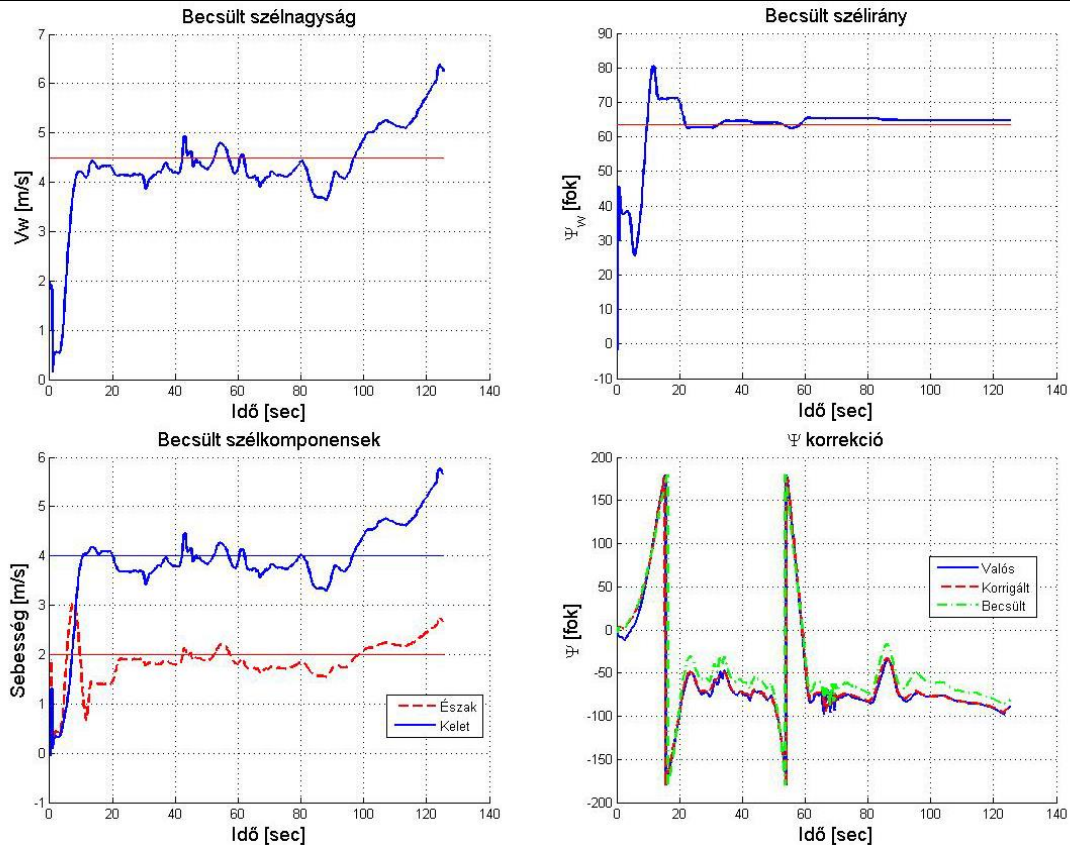
A szélirány becslésére is jó eredményt kaptunk. Az algoritmusnak ahhoz, hogy megfelelő értékeket szolgáltatson 20 másodperc körüli időre volt szüksége. A beállítás után a megadott szélirányt kis ingadozásokkal követi.

A ψ azimuth szög korrekciója során kézzel jelöltük a valós értéket. Zölddel van jelölve a szél hatását figyelmen kívül hagyó algoritmus által számított érték. Piros szín jelöli a szélbecslő algoritmus által pontosított ψ értéket. Látható hogy a korábbi állapotokhoz képest jelentős javulást tudtunk elérni annak ellenére, hogy a szélkomponensek becslése nem a legpontosabb.



4. ábra Kalman szűrő V_w , ψ_w , illetve Θ_e tényezők becslésére (saját forrás)

A 4. ábrán láthatóak a V_w -t, ψ_w -t és Θ_e -t becselő algoritmus tesztelésének az eredményei. Az algoritmus a szélmagasság 4,5 m/s-os értékét jól megtalálta, és viszonylag stabilan követi is. Az északi és keleti szélkomponens értékek is beálltak viszonylag kis ingadozásokkal a megadott értékek köré. A szélirány becslése az előző esetben jobb volt, akkor egy sokkal egyenletesebb görbe adódott. A kapott értékeket felhasználva a korrekció most is sokat javított a ψ szög becslésén. Θ_e -t a számítások során felhasználtuk, de önmagában nem hordoz többlet információt, ezért külön ábrán nem jelenítettük meg.



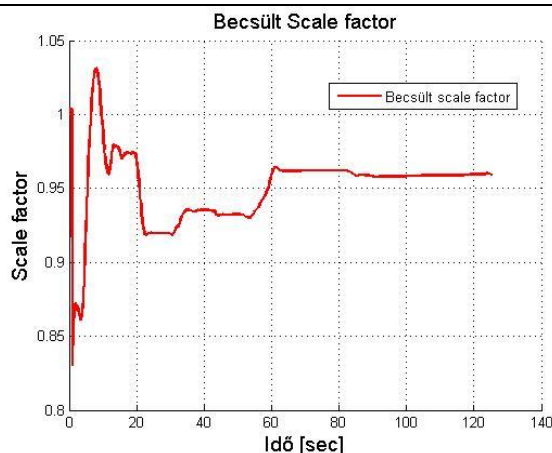
5. ábra Kalman szűrő V_w , ψ_w , illetve Ψ tényezők becslésére (saját forrás)

Az 5. ábra szemlélteti annak az algoritmusnak a teszteredményeit, ami a V_w , ψ_w és Ψ korrekciós tényező értékével számol. Szélgyorság becslése esetén az eljárás 8 másodperc alatt 0,5 m/s-os távolságon belül kerül a beállított értékhez képest, majd e körül az érték körül ingadozik. Az északi és keleti összetevőket is viszonylag pontosan és gyorsan megtalálja.

A mérés századik másodpercétől látható egy jelentős eltérés. Ennek oka, hogy a repülésnek ebben a szakaszában egyenes repülést szimuláltuk, a becslőnek pedig szüksége van a repülőgép orientációjának folyamatos változására.

A szélirány becslése ennél a módszernél a legpontosabb. A szűrő viszonylag hamar mintegy 22 másodperc alatt beáll a kívánt érték köré. Körülbelül 60 másodperctől pedig már ingadozás nélkül 1 fokos eltéréssel becsli a szél irányát.

A szög korrekciója itt bizonyult a legjobbnak. A korrigált értékek a valós értékeket nagyon pontosan követik. A szűrő segítségével jelentős javulást tudtunk elérni.



6. ábra sf korrekciós tényező becslése (saját forrás)

A 20. ábrán az sf korrekciós tényező becslét láthatjuk. Egy perc eltelte után stabilan beáll 0,96-os értékre.

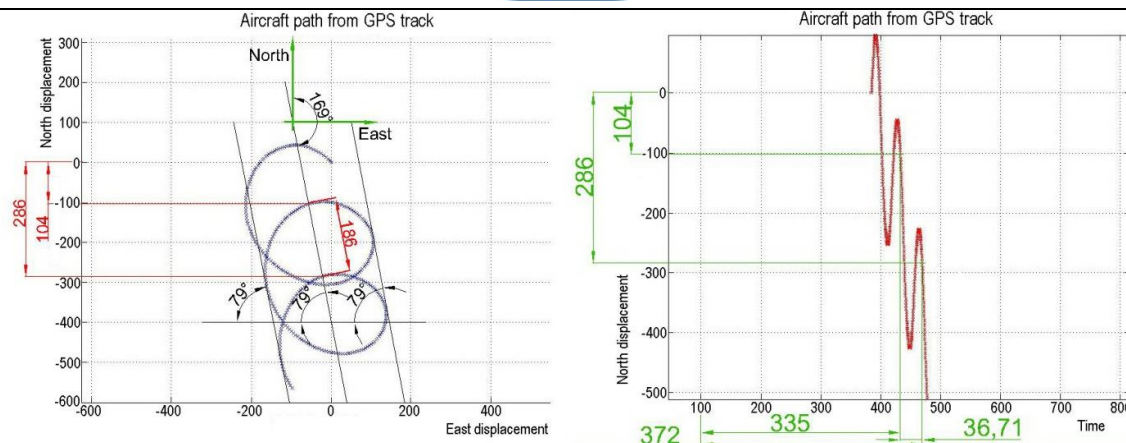
A bemutatott algoritmusok közül a ψ korrekció eredményessége és a szélirány becslés pontossága miatt, úgy döntöttünk, hogy ezt, a legutóbb bemutatott verziót fogjuk alkalmazni a repülőgépen. Az algoritmusról elmondható, hogy a kívánt feltételeket elég jól teljesíti. A megadott értékeket jól közelíti. Körülbelül egy perces beállási idő után megbízható adatokat szolgáltat.

A kiválasztott algoritmus tesztelése C környezetben, valós adatokon

A repülőgép fedélzeti számítógépén egy C program fut. Az előzőekben kiválasztott algoritmust ebbe a C programba építettük bele. Az így kapott kóddal valós adatokon alapuló szimulációt végeztünk. A szimulációhoz szükséges adatokat korábbi valós repülések, elmentett adataiból nyertük. Olyan fájlokat választottunk, amikben az adatokból meg tudtuk határozni a szélirányt és szélnagyságot. A repülőgépen a GPS egység nem mindig működött megfelelően, ezért a saját repüléseinkből nem tudtunk elegendő adatot szerezni. A minnesotai egyetem (University of Minnesota) rendelkezik egy a miénkkel szinte teljes egészében megegyező repülőgéppel, ezért felhasználtuk az ő repülési adataikat is.

Szélirány, szélnagyság megállapítása

A repülési adatokból Matlab fájlokat generáltunk. A fájlok nem tartalmaztak a szélirányra és szélnagyságra vonatkozó adatokat, ezért ezeket nekünk kellett utólag meghatározni. A repülőgép repülése során GPS vevő segítségével rögzíti az útvonalát. Így ezt az útvonalat meg tudtuk jeleníteni Észak-Kelet koordináta rendszerben. Olyan pálya darabokat kerestünk, ahol a repülőgép konstans bedöntéssel, állandó sebességgel köröket repült. Az így repült körök középpontjainak eltolódásából tudtuk becsülni a szél irányát és nagyságát. Ezt mutatja be a következő ábra.



7. ábra Repülési útvonal alapján a szélirány számítása (saját forrás)

Kék szín jelzi az egyes időpillanatokhoz tartozó koordinátákat. A repülőgép északról déli irányba repült. Ebben az esetben az ábrán látható második és harmadik körrel számoltunk. A körök legnyugatabbra és legkeletebbre lévő pontjaihoz érintőket illesztettünk és meghatároztuk a meredekségüket. A meredekségek átlagával felvettünk egy egyenest a két érintő között, mind a kettőtől egyenlő távolságban. A meredekség rögtön megadja a szél irányát. A körök középpontja ezen egyenes mentén tolódik el. Megkerestük azt a pontot mind a két körön ahol az előbb említett egyenes metszi a körvonal északi részét. Ez a két pont a körnek ugyan azon pontja, csak eltolva, így távolságuk megadja az eltolás nagyságát. Így tudhatjuk, hogy a szél hatása miatt egy kör megtétele alatt mennyit tolódott el a kör középpontja.

Következő lépésben meghatároztuk az ehhez az eltolódáshoz tartozó időt. A repülőgép északi pozícióját ábrázoltuk az idő függvényében. Az északi pozíciók alapján az Észak-Kelet koordinátarendszerben kijelölt pontokat könnyen megtalálhatjuk a jobb oldali koordinátarendszerben, a nulla ponttól vett távolságuk alapján. Ezek után az idő tengelyen lemérhetjük a pontokhoz tartozó időket, és számíthatjuk ezek különbségét.

Így ismerjük a középpont elmozdulását és az ehhez tartozó időt. A kettőből számítható az elmozdulás sebessége. A repülőgép végig konstans bedöntéssel repült, így az eltolódás csak a szél hatásának következménye. Ekkor az elmozdulás sebessége egyenlő a szél sebességével. Meghatároztuk a szükséges paramétereket, amivel az algoritmus működésének helyességét vizsgálhatjuk.

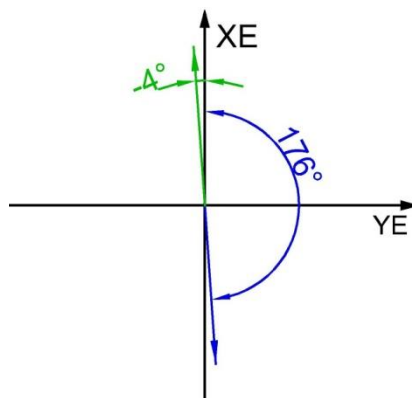
Teszt eredmények

Az algoritmus tesztelését hat repülés adatain végeztük el. A Minnesotából kapott fájlok viszonylag hosszú 500–800 másodperces repüléseket jelentenek. Közülük mindegyikben találhatunk több olyan repülési szakaszt is, ahol a repülőgép konstans bedöntéssel repült. Ezekre külön a már említett számítási módszer segítségével meghatároztuk a szélirányt és szélnagyságot. Az eredményeket a következő táblázat szemlélteti. A táblázat első négy sorában a minnesotai repülések, az utolsó két sorában pedig itthoni repülések szerepelnek. A becslőt az első négy sor adatainak segítségével hangoltuk be.

Szél adatok							
Repülés		Irány [°]	Nagyság [m/s]	Repülés		Irány [°]	Nagyság [m/s]
faser05_1	Számított	176	5,6	faser05_2	Számított	162	5,5
	Becsült	-4	-4,5		Becsült	-14	-4,5
	Eltérés	0	1,1		Eltérés	2	1
faser08_1	Számított	159	7,7	faser08_2	Számított	161	6
	Becsült	-31	-6,1		Becsült	-28	-5,4
	Eltérés	10	1,6		Eltérés	9	0,6
thor59_1	Számított	185	2,4	thor59_2	Számított	210	2
	Becsült	4	-3,1		Becsült	11	-3,1
	Eltérés	1	0,7		Eltérés	19	1,1
thor60_1	Számított	202	1,46	thor60_2	Számított	183	2,5
	Becsült	4	[-6,7 ; -4,5]		Becsült	6	[-6,7 ; -4,5]
	Eltérés	18	[5,24 ; 3]		Eltérés	3	[4,2 ; 2]
convdata2	Számított	169	5,2				
	Becsült	[155 ; 164]	[3,5 ; 4,5]				
	Eltérés	[14 ; 5]	[1,7 ; 0,7]				
convdata WPN1	Számított	~118	-	convdata WPN1	Számított	~115	-
	Becsült	[159 ; 155]	[4,3 ; 3,9]		Becsült	[150 ; 142]	[4,3 ; 3,9]
	Eltérés	[41 ; 37]	-		Eltérés	[35 ; 27]	-

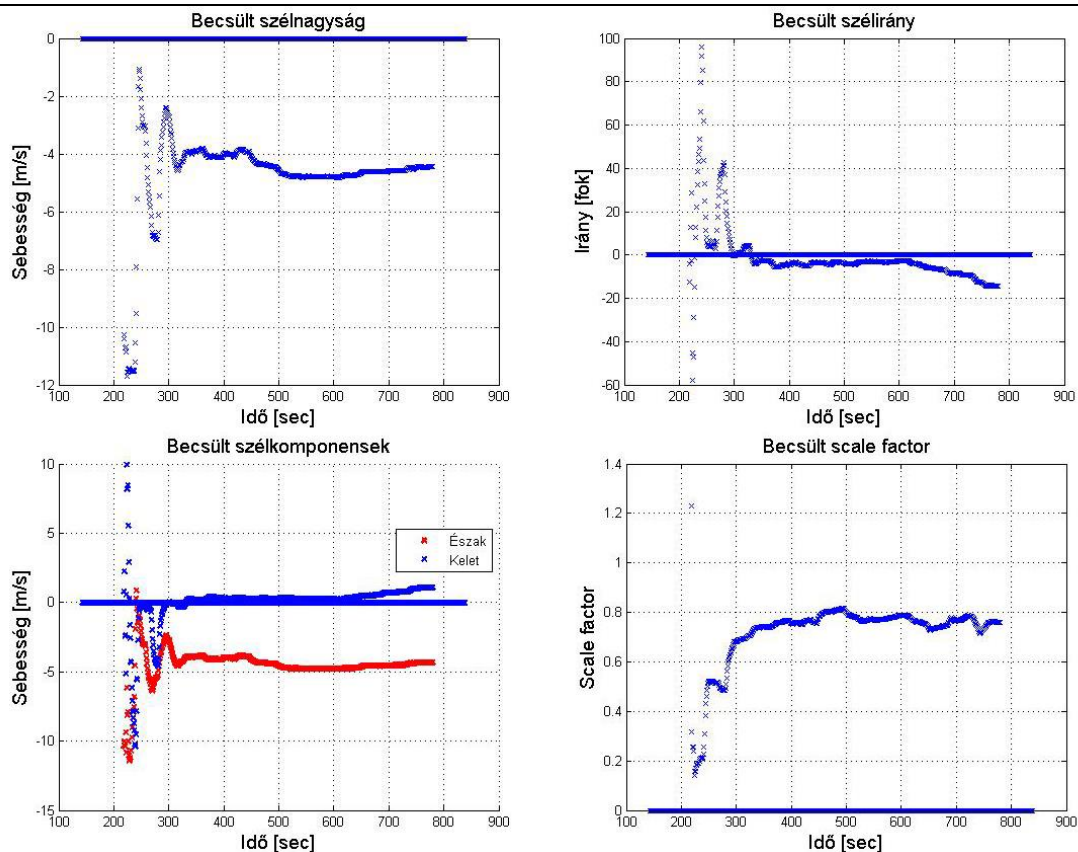
1. táblázat A számított és becsült szélirány és szélnagyság összehasonlítása (saját forrás)

Az adatokból láthatjuk, hogy a becslő a helyes szélirányt és szélnagyságot adja meg, de esetenként ellentétes irányból közelíti azt. Hogy ezt könnyebben megérthessük vizsgáljuk meg a faser05_1-es mérés adatait. Itt 176 fokot kaptunk a számításból a szélirányra, a becslő -4 fok körüli értékeket ad.



8. ábra Számított és becsült szélirány összehasonlítása (saját forrás)

Az ábrából láthatjuk, hogy ugyan arról az egyenesről van szó, csak ellentétes irányból mérjük a szöget. Ha megnézzük a számított és a becsült sebességet láthatjuk, hogy a becslő ott is negatív értéket ad meg. Ez azt jelenti, hogy a fent zöld színnel ábrázolt vektor pont ellentétes irányba mutat, 180 fokkal el van forgatva. Ez esetben pont egy irányba mutat a kék vektorral, amit a mérési adatokból számítottunk. A becslés és a számítás megegyezik. Emiatt a táblázatban a sebesség eltérését mindenhol pozitív előjellel adtuk meg.



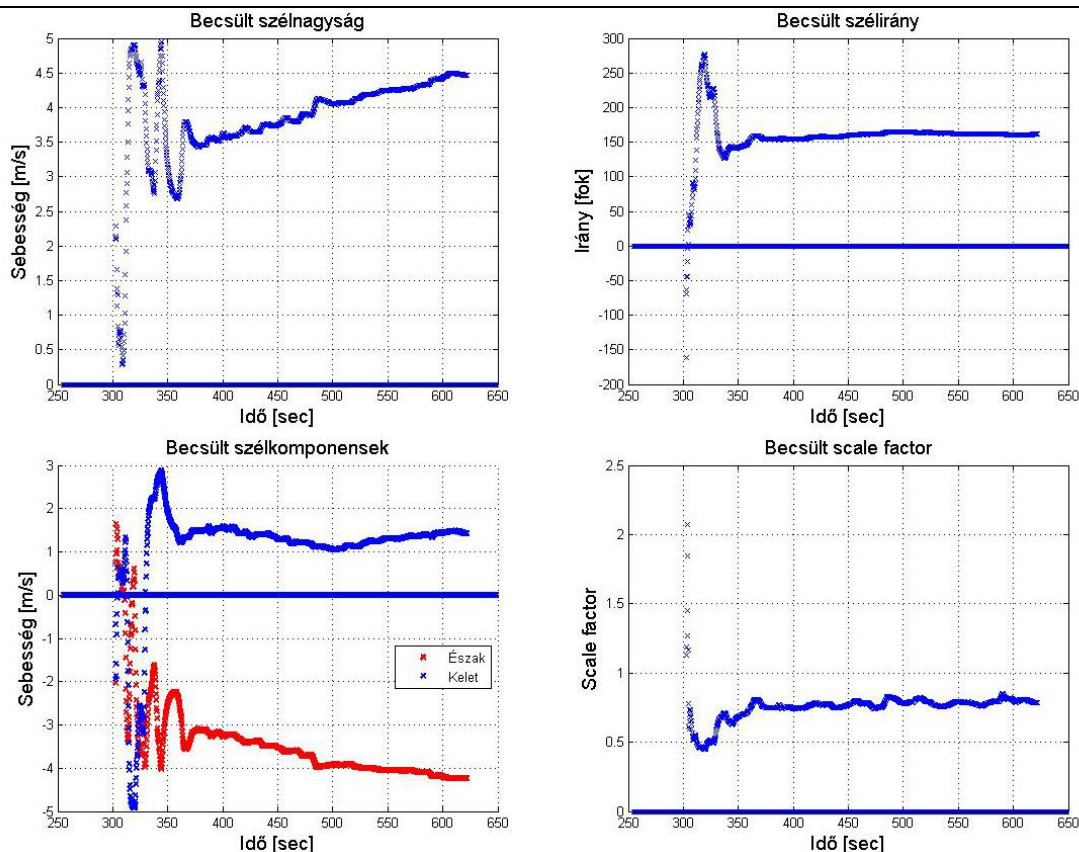
9. ábra A faser 05-ös repülés teszteredményei (saját forrás)

A 9. ábra mutatja, hogy algoritmus által becsült szélkomponensek megfelelnek az előbbi állításnak. Látható, hogy a keleti irányú komponens nagyon kicsi, 0-hoz közeli érték. Ezzel szemben az északi összetevő jelentős.

Az abszolút szélnagyság számításánál a szűrő kezdeti ingadozások után -4 és $-4,6$ közötti értékekre áll be. Ez a számított értéktől $1-1,5$ m/s-os eltérés. A táblázat többi adatával összehasonlítva látható hogy a számított és a becsült értékek között általában ez az $1-1,5$ m/s-os eltérés található meg.

A repülés során a szélirány körülbelül 14 fokot változott. A repülés első szakaszában a már ismertett 176 fokot mértük, amire -4 fokot számított az algoritmus. A repülés második szakaszában a számított szélirány 162 fok volt. Az ábrából látható, hogy a becslő elkezdte ezt az értéket követni. A repülés végére -14 fokot számít, ami 166 foknak felel meg. Tehát az algoritmus nem csak konstans szélirányt tud becsülni, hanem esetenként képes követni a szél irányának lassú változását is.

A korrekciós tényező (Scale factor) becslésére $0,72-0,8$ körüli értékeket kaptunk.

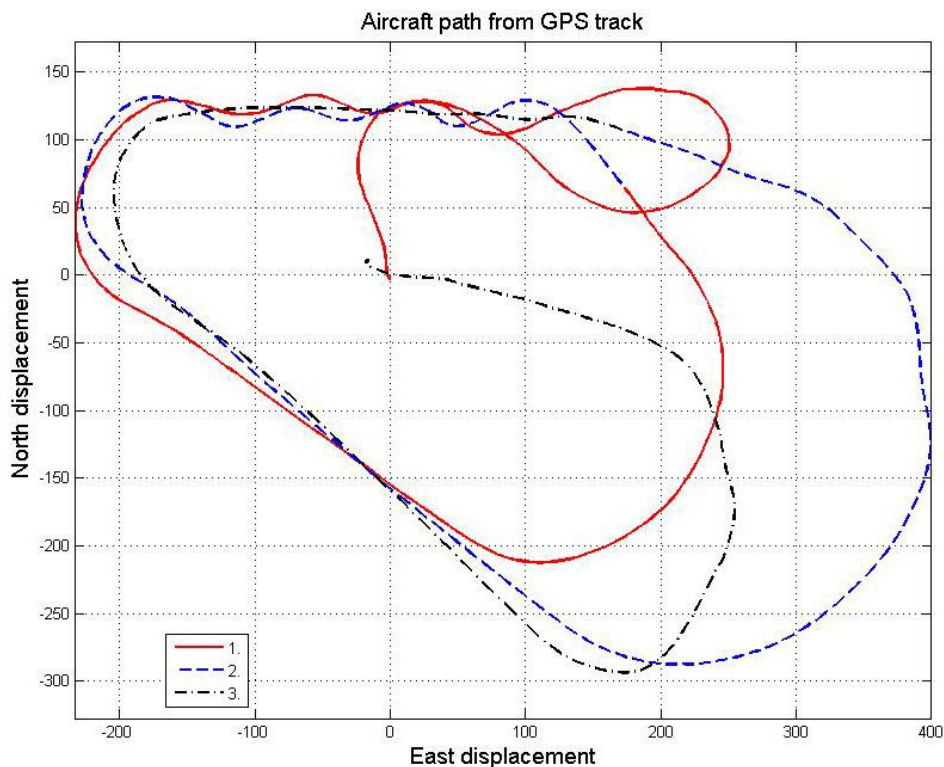


10. ábra A convdata2-es repülés teszt eredményei (saját forrás)

Az előzőekben bemutatott mérések során a szűrő hangolását a minnesotai repülőgép műszereire állítottuk be. A szűrő ugyanezekkel a beállításokkal jól működik a mi repülőgépünkön is. A két repülőgép nagyon hasonló, de a műszereik mérési hibái eltérőek lehetnek. A convdata2 repülést saját repülővel végeztük.

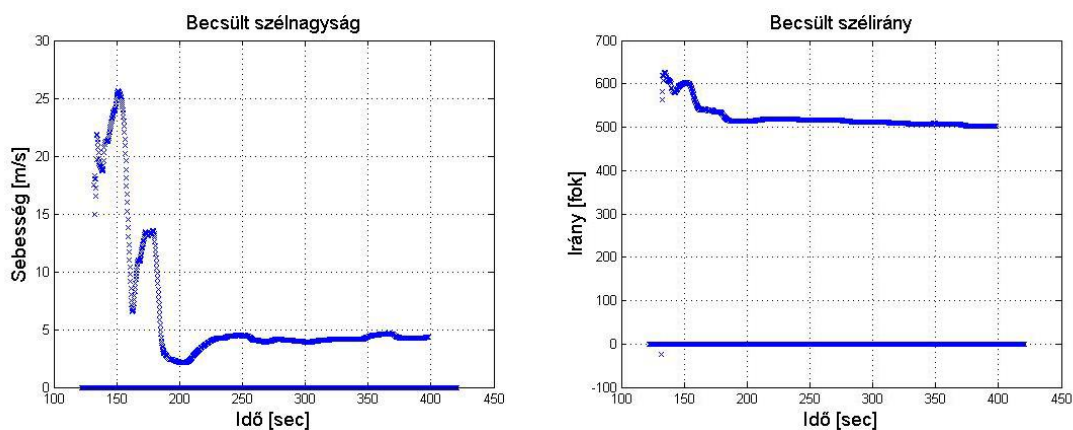
A becsült szélnagyság kezdeti ingadozások után, 3,5 m/s-os értékről folyamatosan növekszik 4,5 m/s-ig. Tehát itt is körülbelül 1–1,5 m/s-ot téved a becslő. A szélirány a kezdeti ingadozások után nagyon szépen beáll 155 és 161 fok közé. A számított érték 169 fok. Az eltérés itt is 10 fokon belül van. A Scale factor az ábrán látható módon, viszonylag stabilan beáll 0,76 körüli értékre. Az ingadozásának mértéke $\pm 0,02$ egység.

Miután a fent említett tesztelésekre megfelelő eredményeket kaptunk, az algoritmust kipróbáltuk egy útvonalkövető repülés adatain is. Az útvonalkövető repülés azt jelenti, hogy a repülőgépnek önállóan kell megadott pontokat érintve végigrepülnie a kijelölt útvonalon. Ennek vizsgálata azért fontos, mert a későbbiekben a szélbecslő algoritmus segítségével a repülőgép pályakövetését szeretnénk pontosítani. A táblázatban ennek a repülésnek az adatait a convdataWPN1 név jelöli.



11. ábra A WPN1 nevű pályakövető repülés útvonala (saját forrás)

A 11. ábra mutatja az útvonalat. A könnyebb áttekinthetőség érdekében az útvonal három színnel van ábrázolva. A repülőgép először a piros (folytonos) görbén repül végig, majd egy újabb kört tesz a kéken (szaggatott), és végül a fekete görbén (pontvonal) leszáll. A pályán látszik, hogy nem tartalmaz konstans bedöntéssel repült szakaszokat, mint ez előzőek, ezért itt más eljárással kellett meghatározni a szélirányt és szélnagyságot az ellenőrzéshez. Ha megnézzük az útvonalat láthatjuk, hogy a Nyugaton végzett fordulók sokkal kisebb ívűek, a keleten végzett fordulók sokkal nagyobb ívűek. Ebből arra következtettünk, hogy nyugati irányból fúj a szél. Ekkor a nyugaton végzett fordulóknál segíti a repülőgépet, kisebb lesz a fordulási sugár, a keleten végzett fordulóknál akadályozza, a pályájáról lesodorni igyekszik. Ezért itt nagyobb lesz a fordulási sugár. Az ábra alapján becsléseket végeztünk szélirányra vonatkozóan. 115–119 fok körüli értéket kaptunk. A becslő 155–159 fokot számít. Ezt szemlélteti a 12. ábra.



2. ábra A convdataWPN1 repülés tesztadatai (saját forrás)

A Szélnagyság kezdeti nagy ingadozások után beáll 4,3 és 3,9 m/s közé és ezt stabilan tartja. Erre a becslőnek körülbelül 60 másodpercre van szüksége. A valós szélirányról és szélnagyságról nincs pontos értékünk, ezek csak a repülési útvonal alapján becsülhetőek a már említett módon. A becslő mindkét esetben konvergál, és ez az érték közel esik a repülési útvonal alapján számított értékhez. Ezért kijelenthetjük, hogy valószínűleg megbízható adatokat szolgáltat.

Az 1. táblázat fennmaradó repülései során a becslő a szélirányt 20 fokos, a szél nagyságot 2,2 m/s-os eltérésen belül szolgáltatta.

A 2. táblázat tartalmazza az egyes repülések esetében szélirányokhoz és szélnagyságokhoz tartozó beállási időket. Beállási időnek nevezzük azt az időt, ami a felszállástól eltelik addig az időpontig amíg a becslő által számított értékek már egy elfogadható határon belül ingadoznak. Ezen idők mellett feltüntettük, hogy az adott beállási idő hány százaléka a teljes repülési időnek.

Repülés	Szükséges idő a beálláshoz				Teljes repülés ideje
	Irány [s]	Irány [%]	Nagyság [s]	Nagyság [%]	
faser05	121	22,04	98	17,85	549
faser08	59	16,81	62	17,66	351
thor59	69	12,87	73	13,62	536
thor60	18	3,27	18	3,27	550
convdata2	53	17,1	58	18,71	310
convdataWPN1	29	11,65	63	25,3	249
Átlag	58,2	14	62	16,1	-

2. táblázat A becslő beállási ideje (saját forrás)

A táblázatból látható, hogy ahhoz hogy a becslő megbízható adatokat szolgáltatson mind szélirány, mind szélnagyság becslés esetén átlagosan körülbelül 1 perces beállási időre van szüksége. A faser05-ös repülés során a beállítás tovább tartott, viszont a később szolgáltatott adatok sokkal pontosabbak voltak.

A beállítások a repülési idő első 20%-ában történtek, ezek után a becslő a repülés fennmaradó 80%-ában használható korrekcióra.

EREDMÉNYEK, TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A dolgozat elején ismertettük a szél hatását egy repülőgép pályájára. Megindokoltuk a kidolgozott szélbecslő eljárás szükségességét.

A megvizsgált eljárás a GPS egységből származó helyzet és sebesség adatokat, valamint a repülőgép Pitot csőve által mért levegőhöz képesti sebesség adatot használja fel. Az algoritmus a 2. ábrán bemutatott szélháromszöget alkalmazza. Egy kibővített Kálmán szűrő segítségével becsli a szél irányát és nagyságát. Az algoritmust először Matlabban leprogramoztuk és többféle változatát elkészítve, szimulált adatokon teszteltük. Az eredmények kielégítőek voltak. A legmegbízhatóbban működő szűrőt kiválasztottuk és C nyelven leprogramozva beépítettük a repülőgépen futó programba. Az így elkészített programon Matlab segítségével valós adatokon történő szimulációt végeztünk. A teszt eredményeket összehasonlítottuk a valós adatokból számított értékekkel. Az eredmények

elemzése bebizonyította, hogy a szűrő kellő megbízhatósággal működik és alkalmas a szélirány és szélnagyság becslésére, illetve a repülőgép pályakövetésének pontosítására.

A későbbiekben a bemutatott eljárást szeretnénk a repülőgép fedélzeti számítógépén futtatni és HIL (Hardware In the Loop) szimulációt, valamint valós repülési tesztek elvégzésére.

Célunk továbbá a szélbecsléssel korrigált orientáció becslő algoritmus alkalmazása és tesztelése a repülőgépen, valamint a becsült széladatok figyelembe vétele az útvonal tervezésben és/vagy követésben.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BAUER Péter és BOKOR József, „Development and Hardware-in-the-Loop Testing of an Extended Kalman Filter for Attitude Estimation” *11th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, 57-62. old., november 18-20., Budapest, 2010
- [2] BAUER Péter, „Koordináta transzformációk Euler szögek alkalmazásával”, 2009.február.17. e-dok. url: http://www.kka.bme.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=161&Itemid=167&lang=hu (2012.03.23)
- [3] William PREMIERLANI, „IMU Wind Estimation (Theory)” 2009.december.12. e-dok. url: <http://www.pdfport.com/view/616410-imu-wind-estimation-theory.html> (2012.06.23)
- [4] BAUER Péter, „A possible wind estimation and Euler angle correction method”, MTA SZTAKI, 2012 Június
- [5] AM CHO, JIHOON KIM, SANGHYO LEE and CHANGDON KEE, „Wind Estimation and Airspeed Calibration using a UAV with a Single-Antenna GPS Receiver and Pitot Tube” *IEEE Seoul National University* August 6, 2009
- [6] BENKŐ Tiborné, TÓTH Bertalan: Programozzuk C nyelven, ComputerBooks, 2010.
- [7] Beard, R. W. & McLain, T. W., *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice* Princeton University Press, 2012
- [8] Angel Cristian ABUSLEME HOFFMAN, *Control Difuso de Vehículo Volador No Tripulado*, Santiago de Chile, 2000
- [9] BAUER Péter: Három üzemmódú kibővített Kalman szűrők repülőgép orientációjának becslésére, *Repüléstudományi Közlemények elektronikus különszám*, 60 éves a szolnoki repülőtisztképzés, Szolnok, 2010. április 16.
- [10] Peter BAUER, Paw Yew CHAI, Luigi IANNELLI, Rohit PANDITA, Gergely REGULA, Bálint VANEK, Gary J. BALAS, Luigi GLIELMO and József BOKOR: UAV Lab, Open Research Platform for Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of the First CEAS Specialists Conference on Guidance Navigation and Control (Euro GNC 2011)*, paper EuroGNC2011_181188_paper, April 13-15, München, Germany, 2011.
- [11] Peter BAUER, Paw Yew CHAI, Luigi IANNELLI, Rohit PANDITA, Gergely REGULA, Bálint VANEK, Gary J. BALAS, Luigi GLIELMO and József BOKOR: UAV Lab, Open Research Platform for Unmanned Aerial Vehicles. Book chapter in *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control (Selected Papers of the First CEAS Specialist Conference on Guidance, Navigation and Control)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-19816-8, DOI 10.1007/978-3-642-19817-5, 2011.
- [12] Peter BAUER and József BOKOR: Multi-Mode Extended Kalman Filter for Aircraft Attitude Estimation, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, pp. 7244-7249, August 28 – September 2, Milano, Italy, 2011.
- [13] Y. C. Paw. *Synthesis and Validation of Flight Control for UAV*. PhD thesis, University of Minnesota, 2009.