

Kis László

lkis@iit.bme.hu

Lantos Béla

lantos@iit.bme.hu

SZENZORFÚZIÓ ALKALMAZÁSA BELTÉRI AUTONÓM NÉGYROTOROS HELIKOPTEREN

Absztrakt

A cikk egy beltéri repülésre alkalmas autonóm négyrotoros helikopter szenzor és aktuátor rendszerét mutatja be. A szenzor rendszer két különálló részből áll: az első egy inerciális mérőegység, a második egy külső látórendszer. A két rendszer közötti fúziót kiterjesztett Kalman-szűrők valósítják meg. Bemutatásra kerül az inerciális mérőegység kalibrációja különféle hibaforrásokat feltételezve. A szenzorhibák elemzéséből a mérési zajok statisztikája határozható meg, mely a Kalman-szűrőknél kerül felhasználásra. A helikopter beavatkozó szerveit négy kefe nélküli DC motor képezi. A cikk bemutatja a motorok alacsony szintű fordulatszám szabályozásának tervezési lépéseit. Az állapotbecslés verifikációja valós körülmények között történt. A cikkben bemutatott rendszer egy jelenleg folyó projekt aktuális állapotát mutatja be, melynek végső célja több autonóm négyrotoros helikopter formációban haladásának irányítása.

This article presents the sensory and actuator system of an indoor autonomous quadrotor helicopter. The sensory system has two separate parts. The first is an inertial measurement unit, the second is an external vision system. The fusion between the two systems is solved by extended Kalman filters. The calibration for various types of error of the inertial measurement system is presented. From the analysis of the noises of sensors, correlation can be calculated which is used in the extended Kalman filters. The actuator system of the helicopter is four brushless DC motors. The design steps of the low level control of the motors are presented. Verifications of state estimation were done in real circumstances. The article presents the actual state of a recent project. The main goal is the formation control of a group of quadrotor helicopters.

Kulcsszavak: UAV, beltéri autonóm négyrotoros helikopter, szenzor rendszer, állapotbecslés, beavatkozó rendszer ~ UAV, indoor autonomous quadrotor helicopter, sensory system, state estimation, actuator system

Bevezetés

A kisméretű légi járművek irányítási lehetőségeinek vizsgálata régóta szerepel a tudományos kutatások célkitűzései között. A kisméretű repülőgépeknek szükségük van nagy terekre a felszálláshoz, repüléshez és leszálláshoz. A helikopterek viszont képesek helyből fel- és leszállni és egyhelyben lebegni. Ezen tulajdonságok lehetővé teszik, hogy beltérben alkalmazzuk őket. A helikoptereknek többféle lehetséges megoldása ismert. Ezek közül mechanikailag legegyszerűbb, legrobosztusabb felépítésű az ún. négyrotoros helikopter.

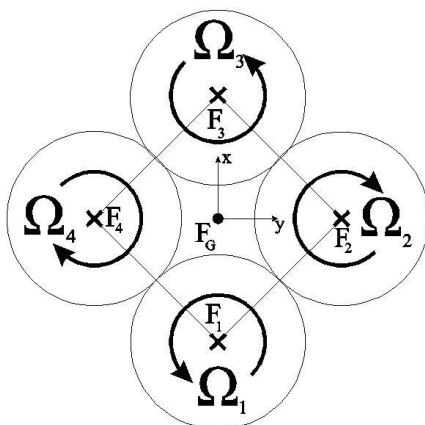
A négyrotoros helikopter koncepciója nem új keletű. Az első ilyen elrendezésű helikoptert 1907-ben készítette Jacques és Louis Breguet. A helikopter a gyors és instabil időállandói miatt nehezen volt irányítható, ezért a koncepció hosszú ideig feledésbe merült. A mai technológia lehetőséget ad elegendően gyors irányítási algoritmusok létrehozására, így az utóbbi időben számos ilyen irányú kutatás jelent meg. Az ezekről szóló leírások megtalálhatóak [1], [2], [3]-ban.

2006-ban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszéke és az MTA SZTAKI Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratóriuma közös projektet indított, melynek célja egy beltéri autonóm működésre képes négyrotoros helikopter létrehozása. A projekt korábbi eredményei megtalálhatók [4],[5],[6]-ban.

A cikk felépítése a következő. A bevezető fejezet után a helikopter bemutatása következik. A harmadik fejezetben a gyorsulásmérő és szögsebességmérő kalibrációja kerül bemutatásra. A negyedik fejezet a képfeldolgozó rendszer ismertetését tartalmazza. Az ötödik fejezet rávilágít a szenzorok és az állapotbecslő kapcsolatára. A hatodik fejezet a beavatkozó szervekről szól. Végül a hetedik fejezet a tesztelés során kapott eredményeket mutatja be.

A helikopter bemutatása

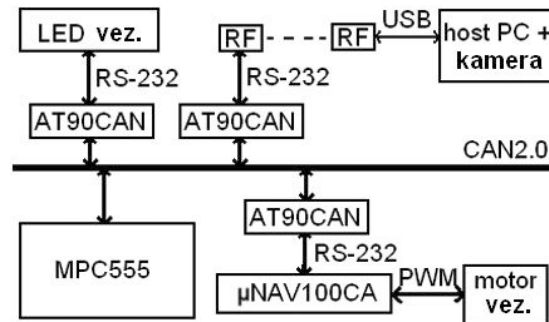
A négyrotoros helikopter működésének fizikai alapját a 1. ábra szemlélteti. Adott négy a helikopter síkjára merőleges tengelyű propeller egy négyzet négy csúcsában elhelyezve. Az egymás melletti propellerek forgásiránya egymással ellentétes, így azonos fordulatszám és felhajtóerő mellett a helikopteren keletkezett nyomatékok kiegyenlítik egymást.



1. ábra: A négyrotoros helikopter működésének fizikai alapja

A helikopter informatikai felépítése a 2. ábrán látható. A központi műveletvégző egység egy Freescale MPC555 típusú mikroszámítógép. Ez az egység futtatja az állapotbecsléshez,

pályaszámításhoz és szabályozáshoz szükséges algoritmusokat. A helikopter fedélzetén kapott helyet egy Crossbow mNAV100CA típusú inerciális mérőegység, melynek a gyorsulás- és szögsebességmérőjét használjuk. A teljes rendszer része egy külső kamera-alapú látórendszer, melynek az algoritmusai egy hoszt PC-n futnak. Ez a gép egy rádiófrekvenciás interfészen keresztül kommunikál a helikopterrel. A képfeldolgozó rendszer aktív markerek segítségével határozza meg a helikopter háromdimenziós pozícióját és orientációját. A markerek különböző színűek, a színeket RGB LED-ek állítják elő, ezért szükség van egy fedélzeti LED vezérlőre. A rendszer fő kommunikációs csatornája egy CAN busz. Azon egységeknél, melyeknél nincs beépített CAN interfész, Atmel AT90CAN128 mikrokontrollerek végzik az interfészek közötti fordítást.



2. ábra: A helikopter elvi felépítése

Az inerciális mérőegység

A helikopteren alkalmazott inerciális szenzorrendszer a Crossbow által gyártott mNAV100CA típusú mérőegység. A modult eredetileg kültéri kisméretű repülő szenzorrendszerének tervezték. Ezért számos különféle önálló szenzort tartalmaz. Az inerciális mérőeszközök közül megtalálható rajta egy háromdimenziós gyorsulásmérő és egy háromdimenziós szögsebességmérő. További szenzorok: a háromdimenziós mágneses térerősségmérő, légnyomásmérő, légáramlásmérő és GPS.

A projekt során a helikopternek beltéri környezetben kell üzemelnie. Beltérben a mágneses térerősség iránya az épületek anyaga miatt erősen ingadozik, így a mágneses térerősségmérő nem alkalmazható. Az épületek árnyékolása miatt a GPS jele nem fogható. A légnyomásmérővel csupán néhány méteres pontossággal lehet a magasságot meghatározni, ami beltérben nem elegendő. A légáramlásmérő pedig a propellerek által keltett légáramlat miatt nem használható sebességmérésre.

A megmaradó szenzorok a gyorsulás- és szögsebességmérők. Az első vizsgálatok során kiderült, hogy a gyári beállítások mellett a mért adatok számos hibát tartalmaznak. Ezért egy kalibrációs folyamat került megvalósításra, melynek eredményeként a valós időben mért jelekből, különböző kompenzációk alkalmazásával a magasabb szintű szabályzás számára alkalmas adatok számíthatók.

Az egyes hibaforrások különféleképp osztályozhatók. Az állandó jellegű hibák kategóriába azok a hibaforrások tartoznak, melyek hosszabb időtartamon keresztül, esetleg a szenzor teljes élettartama alatt állandónak tekinthetők. Ilyen hibaforrások a gyorsulásmérő és szögsebességmérő esetén is a szenzorok tengelyi mérőlegességének hibája, a szenzorok

erősítéshibája és annak függése a hőmérséklettől. További állandó jellegű hiba a szögsebességmérő esetében, a különböző irányú gyorsulások által okozott ofszet hibák. Ezen hibaforrások mértékét elegendő egyszer, a szenzormodul felszerelése előtt kimérni és használat közben a mért értékek alapján végezni a kompenzációt.

A hibaforrások második kategóriája a változó jellegű hibák. Ezek a szenzor bekapcsolásakor ismeretlennek tekinthetők és a hibák nagyságának identifikálása után is legfeljebb a szenzor kikapcsolásig tekinthetők állandónak. A szögsebességmérő és gyorsulásmérő esetében ilyen hibák a tápfeszültség- és hőmérsékletfüggő ofszet hibák.

A harmadik kategória a repülés közben is változó hibaforrások. Ezek mindkét szenzor esetében ofszet jellegű hibának tekinthetők.

A hibaforrások osztályozására alapozva kétlépéses kalibráció került kidolgozásra. Az első lépés egy „offline” kalibráció. Ebben az esetben a szenzormodul nincs felszerelve a helikopterre. Lehetőség van a szenzor tetszőleges orientációba állítására és lehetséges hosszabb ideig tartó mérést végezni. Itt lehet meghatározni az állandó jellegű hibákat.

A második fázis az indítás előtti kalibráció. Ekkor a szenzor már a helikopter fedélzetére van szerelve, egyetlen orientációban lehet mérést végezni és csak rövid ideig tarthat a kalibrációs folyamat. Ekkor lehet kimérni a második kategóriába tartozó hibaforrásokat.

A repülés közben változó hibák mérésére nem készült kalibrációs folyamat, ezen hibaforrások meghatározása az állapotbecslés feladata.

A gyorsulásmérő kalibrációja

A gyorsulásmérő „offline” kalibrációja a következő elven alapul. Ha a szenzort egy alátámasztásra helyezük és mozdulatlan állapotban mérünk, akkor a mért érték a gravitációs vektorral megegyező nagyságú és irányú vektor lesz. Mivel a gyorsulásmérő az értékeket G -ben adja vissza, így a mért érték egy egységvektor lesz. Ha a mérést megismételjük úgy, hogy a szenzort különböző orientációkba állítjuk, akkor a mért egységvektoroknak az egység sugarú, origó középpontú gömb felszínén kell mozognia. Ezek a megállapítások csak akkor igazak, ha a mért értékek nem tartalmaznak hibát. Figyelembe véve a gyorsulásmérő lehetséges hibáit, a bejárt felület egy tetszőleges helyzetű ellipszoidnak tekinthető. Egy ilyen ellipszoid leírható a következő egyenlettel:

$$[a_i^T \ 1]Q[a_i^T \ 1]^T = 0 \quad (1)$$

ahol a_i a mért háromdimenziós gyorsulásvektor és Q egy 4x4-es szimmetrikus, pozitív definit mátrix. A Q mátrixnak tíz független paramétere van. Kerüljenek ezek a paraméterek a p vektorba. Ekkor felírható a következő egyenlet:

$$a_{pi}^T p = 0 \quad (2)$$

ahol $a_{pi}^T = (a_x^2 \ a_y^2 \ a_z^2 \ a_x a_y \ a_x a_z \ a_y a_z \ a_x \ a_y \ a_z \ 1)$. A feladat a mérési adatok alapján a p vektor meghatározása. Mivel az egyenletnek a $p = 0$ triviális megoldása, ezért bevezetendő egy kényszer, mely szerint $p^T p = 1$. Ezt a kényszert betartva a probléma a „total least squares” módszerrel oldható meg.

A p vektor értékeiből a Q mátrix felépíthető. Ezután keressük azt a T transzformációt, mely az általános ellipszoidot az origó középpontú gömbbe transzformálja. Erre a T -re igaz:

$$Q = T^T T \quad (3)$$

Q -t értelmezzük a következő formában:

$$Q = \begin{bmatrix} M & v \\ v^T & c \end{bmatrix} \quad (4)$$

ahol, M egy 3x3-as szimmetrikus mátrix, v egy 3 elemű oszlopvektor és c skalár. Keressük T -t a következő formában:

$$T = \begin{bmatrix} N & -Np_e \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ahol N ortogonális, p_e pedig az origóból az ellipszis középpontjába mutató helyvektor. Belátható, hogy (3) teljesüléséhez $M = N^T N$ teljesülése szükséges, mely probléma megoldható M sajátérték, sajátvektor felbontásával. Ekkor $p_e = -M^{-1}v$, mellyel megkaptuk a T mátrix összes elemét.

T mátrix N részmátrixa ortogonális, ami azt jelenti, hogy felbontható egy ortonormált \tilde{N} ($\tilde{N}^{-1} = \tilde{N}^T$) és egy diagonális S mátrixra. Ekkor az S mátrix tartalmazza a gyorsulásmérő erősítéshibáját. Ez a hibaforrás hőmérsékletfüggő, azonban leírható egy lineáris összefüggéssel, és ezen összefüggés együtthatói állandónak tekinthetők.

Ha az eddig leírt kalibrációs algoritmust több hőmérsékleten elvégezzük és az S mátrix értékeit kiszámítjuk, a diagonális elemekre a legkisebb négyzetes hibák algoritmusával egy lineáris összefüggés illeszthető a következő módon:

$$\begin{bmatrix} s_x & s_y & s_z \end{bmatrix}^T = t_{pill} \begin{bmatrix} s_{mx} & s_{my} & s_{mz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{bx} & s_{by} & s_{bz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ahol s_x, s_y, s_z S diagonális elemei, t_{pill} az aktuális hőmérséklet és a többi változó a lineáris összefüggés konstansai. A (6) összefüggés alapján tetszőleges hőmérsékleten meghatározható az S mátrix.

A T mátrix a Q -val adott ellipszoidot transzformálja az origó középpontú egységgömbbe. Ez a gömb viszont forgatás invariáns, ezért a T transzformáció a mérési adatokat egy olyan koordináta-rendszerbe transzformálja, melynek a szenzorhoz képesti orientációja ismeretlen. Megtehető, hogy a szenzort olyan orientációba állítjuk, melyben a gravitációs vektor egy általunk kívánt koordináta-rendszer tengelyei irányába mutat. Az itt mért és transzformált adatokból felírható egy E ortonormált mátrix, mely minden mért és transzformált gyorsulást a kívánt koordináta-rendszerbe transzformál.

Ezek után a gyorsulásmérő kalibrációs folyamata a következő:

$$\begin{bmatrix} a_{kal} \\ 1 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \tilde{N}S & -\tilde{N}Sp_e \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{mért} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A további levezetésekhez legyen:

$$T_S = E \begin{bmatrix} \tilde{N} & -\tilde{N}p_e \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A szögsebességmérő kalibrációja

A szögsebességmérő kalibrációja két lépésből áll. Az első lépésben a szenzor statikus helyzetben áll és különböző orientációkban mérünk. Itt határozható meg a gyorsulás hatása a szögsebességmérőre. A második lépésben a szenzor elmozdulásából lehet következtetni az erősítéshibára.

Statikus állapotban a szenzor által mért adatra a következő egyenlet igaz:

$$\omega_{mért} = \omega_{valós} + \omega_{ofszet} + K^T a_{kal} \quad (9)$$

Az ω változók a megfelelő szögsebesség értékek, az a_{kal} pedig az előző fejezetben számolt kalibrált gyorsulás. Statikus helyzetben $\omega_{valós} = 0$ feltételezhető. A K 3x3 mátrix és a 3x1-es ω_{ofszet} elegendő számú (minimum 4db), különböző orientációban végzett mérésből a legkisebb négyzetes hibák módszerével számítható.

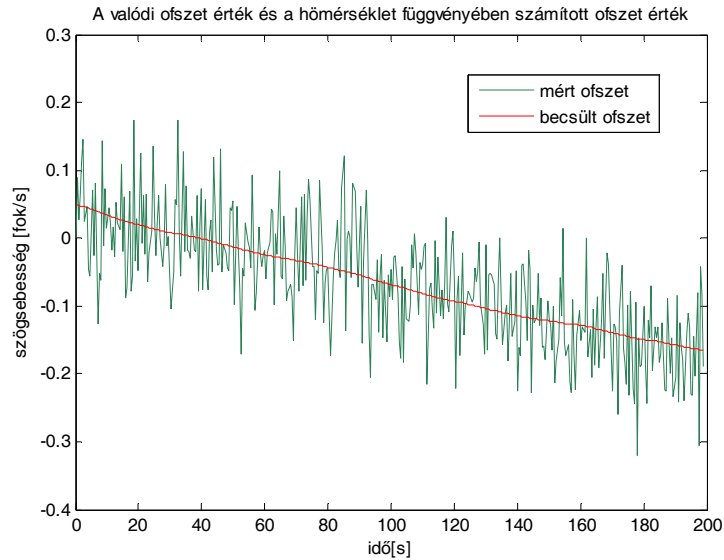
Az így keletkező szögsebességet át kell transzformálni abba a koordinátarendszerbe, melyben a kalibrált gyorsulások értelmezettek. Legyen a Γ T_S mátrix bal felső 3x3-as részmátrixa. A kalibráció második lépése számára legyen az átranszformált szögsebesség:

$$\tilde{\omega} = \Gamma(\omega_{mért} - \omega_{ofszet} - K^T a_{kal}) \quad (10)$$

A szögsebességmérő esetében az ofszet hiba tekinthető hőmérsékletfüggőnek, amelynek alakja

$$\omega_{ofszet} = t_{aktuális} \circ s_{\omega,m} + s_{\omega,b} \quad (11)$$

ahol $t_{aktuális}$ egy 3x1-es vektor, mely a három szögsebességmérő beépített hőmérsékletszenzorának az adatait tartalmazza. $s_{\omega,m}$ és $s_{\omega,b}$ a lineáris összefüggés 3x1-es vektorkonstansai, a \circ szorzás a vektorok elemenkénti szorzását jelenti. Megfelelő számú hőmérsékleti értéken elvégezve a mérést, a konstansok a legkisebb négyzetes hiba módszerével meghatározhatóak. A 3. ábrán egy változó hőmérsékletű környezetben mért valódi és a hőmérséklet értékek alapján becsült ofszet látható.



3. ábra: Hőmérséklettől függő ofszet változása és a becsült ofszet értéke

A második lépésben tengelyenként határozható meg a szögsebességmérő erősítéshibája. Statikus helyzetből indítva a szenzort, forgassuk azt el a mérendő tengely körül, majd helyezzük újra statikus helyzetbe. A két statikus helyzetben számítható a kalibrált gyorsulás vektor. Ezen két vektor által bezárt szög adja az elforgatás szögét (pl. az X tengely esetében φ_{gyors}). Megjegyzendő, hogy a módszer akkor működik, ha a forgatás tengelye a gravitáció irányára merőleges síkban van. A forgatás közben rögzíthetők a mért szögsebesség értékek és (10) alapján transzformálhatók. A szögsebességmérő adataiból is meghatározható az elfordulás, az X tengely esetében pl:

$$\varphi_{szögseb} = \sum_i \tilde{\omega}_{xi} \Delta t \quad (12)$$

A két elfordulás arányából meghatározható a szögsebességmérő erősítéshibája:

$$s_\varphi = \frac{\varphi_{gyors}}{\varphi_{szögseb}} \quad (13)$$

A kalibrált szögsebesség a következő képlettel számítható:

$$\omega_{kal} = \text{diag}(s_\varphi, s_g, s_\psi) \tilde{\omega} \quad (14)$$

ahol ω_{ofszet} az aktuális hőmérséklet alapján számítható (11) szerint.

Indítás előtti kalibráció

Az eddigi kalibrációs folyamat után megmaradt hibák tekinthetők ofszet hibának. Az indítás előtti kalibrációs folyamat során összesen egy orientációban lehet mérni. A helikopter magasabb szintű irányításai számára fontos, hogy a helikopter vízszintes helyzetből induljon. Ezt felhasználva indulás előtt a szögsebesség értéke 0 és a gyorsulás értéke a $(0 \ 0 \ -1)^T$ vektor.

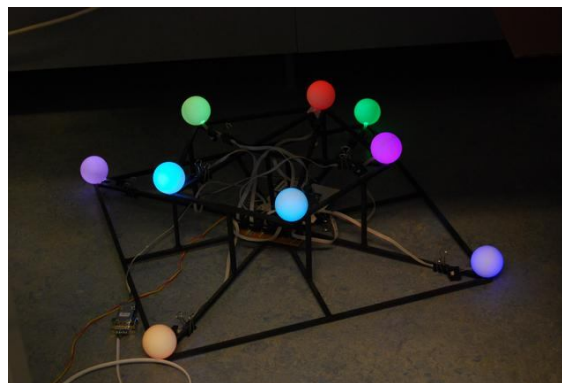
A kalibrációs lépés folyamata a következő: A gyorsulásmérővel és szögsebességmérővel rögzítendő egy néhány másodperces regisztrátum. Ezeken el kell végezni a korábban bemutatott kalibrációs folyamatokat, majd képezni kell a mérési értékek átlagát. Az átlagnak az eltérése a feltételezett értékektől fogja adni az ofszet értéket. Ezt az ofszet értéket a repülés során minden kalibrált értékből le kell vonni.

3D látórendszer

A beltéri repülés során a helikopter pozícióját és orientációját egy külső számítógépen futó képfeldolgozó algoritmus szolgáltatja. A látórendszer működésének alapja a mozgássztereó elvén alapszik.

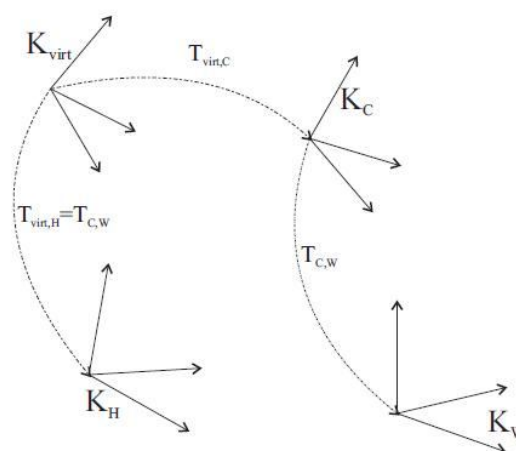
A rendszer központi része az ún. 7 pontos algoritmus [7]. Ez képes két kamera koordináta rendszere közti transzformációt megadni a kamerák képei alapján, amennyiben azokon azonosítható legalább 7 db összetartozó pontpár.

Ahhoz, hogy a pontárok könnyen meghatározhatóak legyenek, a helikopteren elhelyezésre került 9 db aktív marker. Elrendezésük olyan, hogy bármely irányból nézve a helikopter legfeljebb két markert takar ki. A 4. ábrán a kamera által készített kép látható.



4. ábra: A kamerák által látott kép

A képfeldolgozásnál használt koordinátarendszerek az 5. ábrán láthatóak.



5. ábra: A képfeldolgozó rendszerben használt koordinátarendszerek

A K_W keret a világkoordináta-rendszer, K_C az első kamera koordinátarendszere. Ennek a pozíciója és orientációja a világkoordináta-rendszerben nem változik, így $T_{C,W}$ állandónak tekinthető. K_H a helikopter koordinátarendszere. K_{virt} a második kamera koordinátarendszere. A második kamerát tekintjük a világkoordináta-rendszerben mozgó kamerának, mégpedig úgy, hogy K_{virt} és K_H relatív pozíciója és orientációja ne változzon, vagyis $T_{virt,H}$ állandó. A képfeldolgozás folyamata ezek után a következő. A két kamera képén fel kell ismerni a markereket, majd a $T_{virt,C}$ transzformációt a 7 pontos algoritmus kiszámítja.

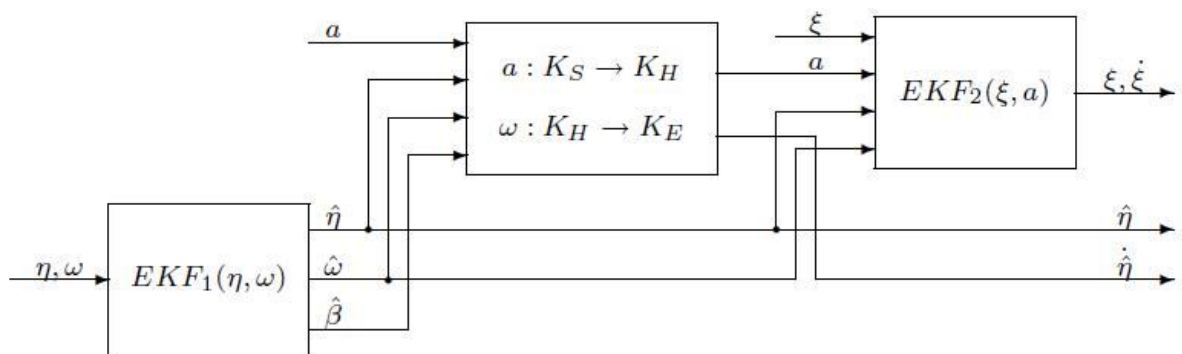
Mivel $T_{virt,H}$ állandó, ezért K_{virt} koordináta rendszerhez kötött kamera képén a markerek pozíciója is állandó. Ezért ez a kamera egy virtuális képpel helyettesíthető (innen a koordináta rendszer elnevezése). Ezt a virtuális képet a kezdeti inicializálás alatt az első kamerával rögzítjük. Ha a világkoordináta-rendszert úgy definiáljuk, hogy az inicializálás alatt megegyezik a helikopter koordináta rendszerével, akkor a $T_{virt,H} = T_{C,W}$ összefüggés igaz lesz. Ezek alapján a helikopter aktuális helyzetét és orientációját a

$$T_{W,H} = (T_{C,W})^{-1}(T_{virt,C})^{-1}T_{C,W} \quad (15)$$

transzformáció tartalmazza. Megjegyzendő, hogy a képfeldolgozás sebessége jelenleg nem elegendően gyors a magasszintű irányítás megvalósításához, ezért van szükség az inerciális szenzor használatára.

Állapotbecslés

Az érzékelés a magasabb szintű irányításokkal az állapotbecslőn keresztül áll kapcsolatban. Az állapotbecslő felépítése a 6. ábrán látható. Az állapotbecslés két lépésben, kiterjesztett Kalman-szűrőkkel történik. Az első blokk (EKF_1) a mért és kalibrált orientáció és szögsebesség alapján számít egy becsült orientációt, szögsebességet és szöggyorsulást. Ezen információk alapján a megfelelő koordináta transzformációk elvégezhetők. A második lépésben szintén egy kiterjesztett Kalman-szűrő (EKF_2) szerepel, mely a mért pozíció és transzformált gyorsulás alapján számítja ki a helikopter becsült pozícióját és sebességét.



6. ábra: Az állapotbecslő elvi felépítése

A Kalman-szűrők belső állapotként tartalmazzák a szögsebesség és gyorsulás szenzorok ofszet értékeit, melyek akár a repülés során is változhatnak. Ezt a változást a szűrők a képfeldolgozás adatai alapján tudják észlelni és pontosítani.

A kiterjesztett Kalman-szűrők állapotegyenletekkel írhatók le [5]. A belső állapotok az első szűrő esetében az orientáció állapota és a szögsebesség ofszet értéke. A második szűrőnél ezek a pozíció és sebesség állapotok és a gyorsulás ofszet értéke. A helyes működéshez szükséges az állapotok kezdőértékeinek helyes beállítása. Mivel a helikoptert a képfeldolgozásnál bemutatott módon a világkoordináta-rendszer origójából indítjuk és az indítás előtti kalibrációval az ofszet értékeket is kinullázzuk, így minden állapotot 0-ból kell indítani.

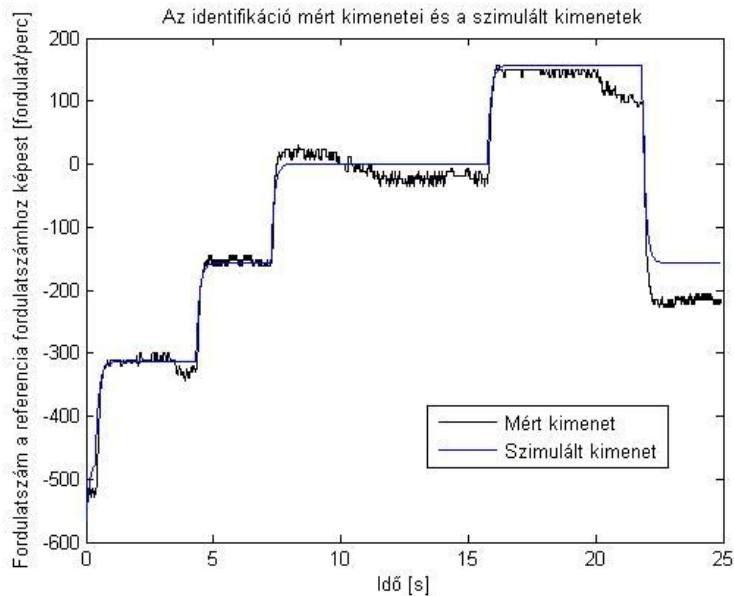
A kiterjesztett Kalman-szűrők azért képesek más állapotbecslésnél pontosabb értéket adni, mert figyelembe veszik a szenzor zajokat. Ezeket korrelációs mátrixokkal írják le, melyeket szintén inicializálni kell. Az indítás előtti kalibráció során rögzítésre kerül egy néhány másodperces regisztrátum, melyből ha levonjuk az ofszet értéket, csak zajt fog tartalmazni. Ezen a zajon végezhető variancia analízis, mellyel megadhatóak a zajok kezdeti korrelációs mátrixai.

Beavatkozó szervek: motorvezérlés

A beavatkozó szervek a helikopter fedélzetén elhelyezett négy darab rotor, melyeket háromfázisú BLDC motorok forgatnak. A magasabb szintű irányítás a motorok elvárt fordulatszámát számítja ki. Szükség van egy alacsony szintű mechanizmusra, mely biztosítja, hogy a motorok az előírt fordulatszámon forogjanak.

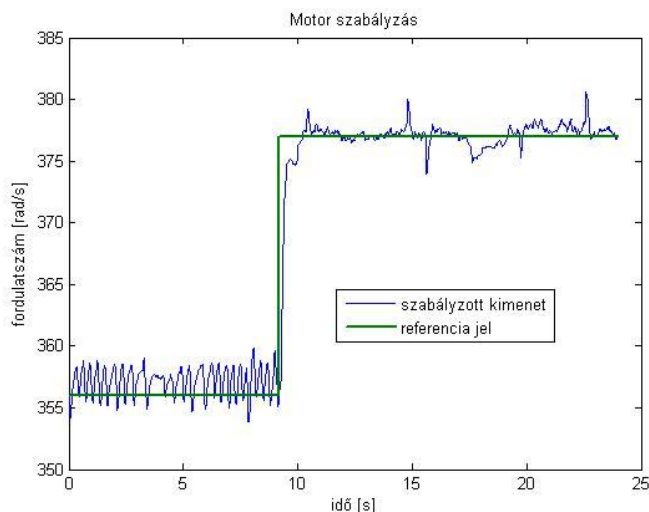
Ennek megvalósítására minden motor mellé beépítésre került egy optikai fordulatszám-mérő, valamint egy kereskedelmi forgalomban megvásárolható Dualsky gyártmányú teljesítményelektronika. Az így összeszerelt rendszer a propeller nemlineáris tulajdonságai és a teljesítményelektronika ismeretlen volta miatt egy „fekete doboznak” tekinthető.

A szabályzás megvalósításához elkészült ennek a rendszernek egy lineáris modellel történő identifikálása. 7. ábrán a linearizált modell és az eredeti rendszer válasza látható ugyanarra a bemenő jelre. A lineáris modell ebben az esetben elsőrendű. Azonban a magasabb rendű modellek sem adtak meggyőzően jobb eredményt. A rendszer tipikus hibái is leolvashatók a 7. ábráról. Látható, hogy a statikus szakaszokon a valós rendszer fordulatszáma nem állandó. Az is látható, hogy ha a bemenetnek egy adott értékét a bemenet növelésével, vagy csökkentésével érjük el a valódi rendszer két különböző fordulatszámra áll be.



7. ábra: Az eredeti és az identifikált modell viselkedése ugyanarra a bemenetre

Az identifikációnál tapasztalt jelenségek alapján és az egyszerűség megtartása érdekében a motorszabályozást egy PI szabályozó végzi. A szabályozott rendszer referencia jelét és kimenetét mutatja a 8. ábra. A megmaradt tipikus hibák jól láthatók ezen az ábrán. Abban az esetben, ha a rendszer elhagyja a linearizálásnál használt munkapontot, a nemlineáris hatások miatt oszcilláció lép fel. Ezen kívül még a munkapont körüli fordulatszámnál is vannak tüskék a jelben, melyet az ismeretlen teljesítményelektronika okoz. Ezeknek a hibáknak a nagyságrendje akkora, hogy a magasabb szintű szabályozások még képesek a helikopter irányítására.



8. ábra: A szabályozott motor viselkedése

A szabályozóval kapcsolatban megjegyzendő, hogy az integráló hatás miatt szükség van biztonsági protokollok alkalmazására. Kritikus pontja a rendszernek az optikai fordulatszám-mérő. Beépítésre került egy mechanizmus, mely abban az esetben, ha egy már forgó motor fordulatszámát 0-nak érzékeljük (vagyis tönkremegy a fordulatszám-mérő), lekapcsolja a szabályozást és a fordulatot egy előre beállított értékre vezérli. Ezen biztonsági

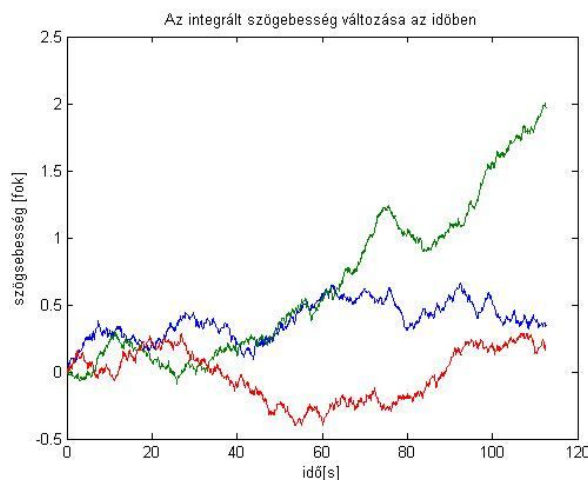
intézkedés nélkül az integrátor ilyen esetben folyamatosan növelné a motor fordulatszámát, ami megjósolhatatlan viselkedést eredményezne.

Eredmények

Kalibrációs eredmények

A gyorsulásmérő kalibrációja előtt a statikus helyzetben mért gravitációs vektor hossza 0.87G és 1.12G között változott. A gyorsulásmérő kalibrációját 18 különböző orientációra alapozva végeztük, melyek az egységgömb felületén egyenletesen voltak elosztva. Minden mérés során 50db regisztrátumnak az átlagát tekintettük egy mérési adatnak. A kalibráció után a különböző orientációkban mért gyorsulásvektorok hossza a [0.98 1.02]G tartományon belülre került. Ez az eredmény a regisztrátumok hosszának növelésével tovább javítható. Ezen kívül ha tudjuk, hogy a szenzort többnyire egy kis orientációs tartományban használjuk (pl. vízszintes helyzet környékén), akkor lehetséges, hogy a kalibrációnál használt orientációkat ebben a tartományban vegyük fel. Ezzel elérhető, hogy ebben a tartományban a szenzor pontossága nagyobb lesz.

A szögsebességmérő értékei a kalibráció előtt statikus helyzetben különböző orientációkban $\pm 2.5^\circ/s$ között mozogtak. A különböző irányú gyorsulásokat figyelembe véve ez az érték a $\pm 0.5^\circ/s$ -os tartományba került kalibrálás után. Az ebben a tartományban mért értékek már tekinthetők 0 középpontú fehérzajnak. Ezt demonstrálandó egy egyszerű orientációbecslést valósítottunk meg, pusztán a szögsebességmérő adatainak numerikus integrálásával. Egy körülbelül két perces futási eredmény látható a 9. ábrán.



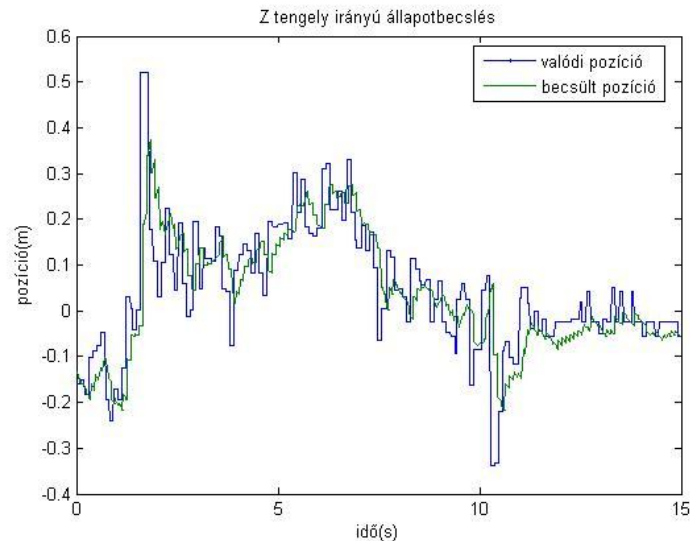
9. ábra: Az integrált szögsebesség változása az idő függvényében

A 9. ábrán megadott grafikon statikus helyzetben készült. Látható, hogy az akkumulálódott hiba két perc után körülbelül 2° . Visszafelé végezve a számításokat azt kapjuk, hogy a valódi ofset és a becsült ofset értéke nem különbözhet jobban, mint $0.0167^\circ/s$, ami nagyságrendileg a szenzor kvantálási szintjének kétszeresével egyezik meg.

Ez az eredmény mutatja, hogy a kamerás képfeldolgozás hibája esetén (kitakarás, stb.) pusztán a szögsebességmérő integrálása alapján elegendő idő van egy veszleszállás megvalósítására.

Az állapotbecslés eredménye

Az állapotbecslő megfelelő inicializálása után a helikopter mozgása közben végzett állapotbecslés eredménye a 10. ábrán látható.



10 ábra: A becst és a valódi magasság a helikopter mozgása során

A helikopter valódi pozícióját a képfeldolgozás mérte. A 10. ábráról leolvasható, hogy az állapotbecslés értéke követi a valódi értéket. Az is látható, hogy a képfeldolgozás adatai jóval lassabbak, mint az állapotbecslés adatai. Az állapotbecslés az inerciális szenzorok adatai alapján képes a becst állapotot két képfeldolgozási adat között is a jó irányba mozdítani.

Összegzés

A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy az inerciális szenzorok, az ismertett kalibrációs algoritmusok alkalmazása mellett, kiegészítve a kamerás képfeldolgozó rendszerrel együttesen képes adatokat szolgáltatni az állapotbecslés számára. Ezek az adatok elegendően pontosak ahhoz, hogy az állapotbecslő kimenetén megfelelő sebességgel rendelkezésre álljon pozíció, sebesség, orientáció és szögsebesség információ a magasabb szintű irányítások számára.

A beavatkozó szervek irányításáról a kísérleti eredmények igazolták, hogy elegendő sebességgel és megfelelő pontossággal képes követni a magasabb szintű irányítások által számított alapjeleket.

A projekt folytatásának következő lépése az első összetettebb repülések megvalósítása. A tervek között szerepel számos magasabb szintű irányítás kipróbálása. A kutatás végső célja egy több egyedből álló helikopterraj formációban való haladásának megvalósítása.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok OTKA K 71762 számú támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] S. Boudallah, R.Siegwart: Backstepping and Sliding –mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2005
- [2] G. Hoffmann, D.G.Rajnarayan, S.L. Waslander, D.Dostal, J. S. Jang, C. J. Tomlin: The Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi Agent Control (Starmac). Digital Avionics Systems Conference 2004
- [3] P. Pounds, R. Mahony, P.Hynes, J. Roberts: Design of a Four-Rotor Aerial Robot, Australian Conference on Robotics and Automation 2002
- [4] Soumelidis A., Gaspar P., Bauer P., Lantos B., Prohaszka Z.: Design of an Embedded Microcomputer Based Mini Quadrotor UAV, European Control Conference 2007
- [5] Kis L., Regula G., Lantos B.: Design and Hardware-in-the-Loop Test of the Embedded Control System of an Indoor Quadrotor Helicopter. 6th Workshop of Intelligent Embedded Systems 2008
- [6] Kis L., Prohaszka Z., Regula G.: Calibration and Testing Issues of the Vision, Inertial Measurement and Control System of an Autonomous Indoor Quadrotor Helicopter. 17th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region 2008
- [7] Hartley R. I., Zisserman A.: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2003