



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Kis László

AUTONÓM JÁRMŰVEK NAVIGÁCIÓJA ÉS
IRÁNYÍTÁSA KORSZERŰ ÉRZÉKELŐK
FÚZIÓJÁVAL

Ph. D. értekezés tézisei

NAVIGATION AND CONTROL OF
AUTONOMOUS VEHICLES USING
FUSION OF MODERN SENSORS

Ph.D. Thesis Summary

Témavezető:
Prof. Dr. Lantos Béla

Budapest, 2013. május 7.

1. Bevezetés, célkitűzések

A szabályozáselmélet területén jól ismert vélemény, hogy az irányítási rendszer csak annyira jó, amennyire jó az érzékelő rendszere. Napjaink technikai fejlődése mellett újabb és újabb érzékelési módszerek jelennek meg. A legtöbb szenzor ezek közül csak korlátozott körülmények között használható, de van néhány fejlesztési irány, amely széles körű alkalmazási területeken is használhatónak bizonyul. Minden ilyen eszköznek megvannak az előnyei és hátrányai, amiket a kiválasztásuk és felhasználásuk során figyelembe kell venni.

Mikor egy szenzort felhasználunk egy alkalmazásban, nem elég az érzékelőt körültekintően használni. Szintén fontos az eszközt megfelelően kezelni az elérhető legjobb minőség érdekében. Számos ajánlás és algoritmus található arról, hogy hogyan kell egy szenzort helyesen használni [4, 5]. Általában a legjobb megoldást ezeknek a kombinációja adja.

Másik fontos szempont az érzékelőkkel kapcsolatban, hogy egy szenzorrendszernek milyen előnyei és hátrányai vannak. Gyakran hasznos érzékelőket kombinálni oly módon, hogy azok egymás nemkívánatos tulajdonságait csökkentsék. Például egy mikro-elektro-mechanikus rendszer (MEMS) alapú gyorsulásmérő képes egy mozgó test gyorsulását közvetlenül megmérni, de a sebességet és a pozíciót integrálással lehet meghatározni. Az integrált eredmény az ún. "driftelés" jelenségétől fog szenvedni. Másrészt egy képfeldolgozó rendszer képes egy mozgó test pozícióját mérni, sőt speciális esetekben a sebességét is. A gyorsulás viszont deriválással állítható elő, amely felerősíti a szenzor zajt. Egy teljes és használható gyorsulást, sebességet és szögsebességet tartalmazó állapotvektor előállításához mindkét szenzor használata szükséges. Ezen kívül az egyes szenzorok előnyös tulajdonságai is kiemelhetők. Ez a fajta megközelítés elvezet minket a szenzorfüzió területére.

A különböző szenzorok közti kapcsolat modelleken keresztül írható le. A Kalman szűrő [6] egy optimális megoldást ad a modell aktuális belső állapotaira egy adott modell és ismert zajparaméterek (kovariancia mátrixok) esetére. Ezért a szenzorfüzió csak annyira jó, amennyire jó a használt modell. Ebből következőleg kulcsfontosságú, hogy a fizikai világot a modell olyan precízen írja le, amennyire az az adott feladatnál szükséges.

A PhD tanulmányaim alatt részt vettem egy kutatásban, melynek a célja egy beltéri ember nélküli négyrotoros helikopter kifejlesztése volt. A fejlesztés a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Irányítástechnika és Informatika Tanszékén történt (IIT). A kutatás egyik célkitűzése az volt, hogy a helikopter minden elemét magunk készítjük el, beleértve a mechanikai, elektronikai, irányítástechnikai és informatikai részeket mind a helikopter oldalán, mind a földi oldalon. Általában egyszerű, kereskedelemben is kapható eszközöket használtunk, amelyeket eredetileg más célokra fejlesztettek. Ezekből az eszközökből származó mérési eredmények számos olyan problémától szenvednek, melyek drága, nagy pontosságú szenzorok használatával elhanyagolhatóak lennének. Az értekezés legtöbb új eredményét ez az alacsony költségű megközelítés inspirálta.

Mivel a négyrotoros helikopter-rendszer egyedi fejlesztés, van néhány elvárás, amely nem

tipikus más kutatásokban. Ezért felmerült az igény arra, hogy ezekhez a speciális elvárásokhoz fejlesszünk ki hatékony irányítási algoritmusokat.

A négyrotoros helikopter kutatásának fő irányvonala a beltéri működés. Emellett azonban egy fontos kérdés, hogy miként lehetne a kültéri működést megvalósítani. Ebből az indíttatásból kerültem kapcsolatba a GPS navigációval. Egy ember nélküli kültéri helikopter irányításához a nagy pontosságú pozícionálás elengedhetetlen. Ez a pontosság elérhető az ún. vivőfázis mérésen alapuló GPS (CPGPS) technika alkalmazásával.

Számos olyan alkalmazás van, amely ezt a technikát használja. Ezt a megoldást használják földmérésre, mezőgazdasági alkalmazásokhoz vagy a repülés egyes területein. Mindegyik terület közös tulajdonsága, hogy az inicializálásnál nem kell betartani a szigorú valósídejűséget. A vivőfázis mérésen alapuló technika alkalmazása elvezet az ún. "integer bizonytalanság" problémájához, mely a műhold és a GPS vevő közti vivőjel egész periódusainak számára vonatkozik. A tipikus megoldások vagy magas számítási teljesítményt igényelnek, vagy néhány percnyi mérési adat szükséges a megbízható eredmény meghatározásához [2].

Mobil robotika területén a nem valósídejű megközelítéseket ajánlott elkerülni. Másrésről az integer bizonytalanság tipikus megoldásai csak a GPS méréseket használják. Megmutatható, hogy a mobilis robotok (ember nélküli járművek) más szenzorait is bevonva az integer bizonytalanság probléma gyorsabban megoldható, sőt a valósídejűség is biztosítható. Ezeknek a szenzoroknak a használata ugyan egy speciális eset, de világos, hogy ez az eset nagyon gyakori a mobilis robotok navigációjában.

1.1. Az értekezésben megoldott feladatok

A kutatási feladataim szoros kapcsolatban állnak a BME-IIT négyrotoros helikopter projektjével. Ehhez a területhez kapcsolódóan három fő terület adódik, ahol a hagyományos megoldások nem kielégítőek. Az első ilyen terület a MEMS alapú inerciális (IMU) és mágneses szenzorok. Ezeknek az érzékelőknek a nyers mérési adatai általában nem megbízhatók (a szenzorok belső hibaforrásai miatt), ezért valamilyen kalibrációs folyamat szükséges, hogy biztosítsuk a megbízható mérési adatokat. A szakirodalomban a hagyományos megoldások általában csak a hibaforrások egy részét kezelik, vagy drága eszközöket használnak a precíz kalibrációhoz. A gyakorlati mérések alapján elmondható, hogy a tipikusan elhanyagolt hibaforrásoknak jelentős hatása lehet az egész rendszerre nézve. Ezért az értekezés egyik célja olyan kalibrációs módszerek kifejlesztése, melyek képesek kezelni a hibaforrások széles körét, és ehhez ne legyen szükséges semmilyen drága berendezés.

A második terület, melyet az értekezés érint, a négyrotoros helikopter állapotbecsléséhez és irányításához kapcsolódik. Természetesen itt is a fő motiváció a négyrotoros helikopter projekt volt, ahol az alacsony költségvetésű megközelítés miatt a hagyományos állapotbecslési és irányítási algoritmusok nem kielégítőek. A cél olyan robusztus állapotbecslési és szenzorfüziós eljárások kidolgozása, amelyekkel a helikopter mozgásállapota megbízhatóan

meghatározható. További követelmény, hogy a megoldások legyenek általánosak, hogy egyéb járműnavigációs problémáknál is felhasználhatók legyenek. Az állapotbecslés eredményeihez kapcsolódóan a négyrotoros helikopter irányításának kifejlesztése is szükséges.

A kutatás harmadik területe a precíz kültéri navigációhoz kapcsolódik, ahol a vivófázis mérésen alapuló GPS technikát szükséges használni. A cél olyan algoritmusok kifejlesztése, amelyek olyan szenzorok támogatása mellett képesek megoldani az integer bizonytalanság problémát, melyek rendre megtalálhatók egy autonóm járművön. Elvárás, hogy a megoldás megfeleljen a járműnavigáció szigorú valósidejűségi követelményeinek, ezért az integer bizonytalanság megoldásának az inicializálása is gyors kell, hogy legyen.

1.2. Kutatási módszerek

A kutatás célkitűzései gyakorlati problémákhoz kötődnek, ezért a megoldásoknak a gyakorlatban is alkalmazhatóknak kell lenniük. Emiatt a legtöbb kifejlesztett módszer valódi mérési adatokon alapult, és minden megoldás tesztelése valós körülmények között zajlott.

A kutatás során felhasznált adatokat rögzíteni kellett. A négyrotoros helikopter projekt során a kezdetektől rendelkezésre állt inerciális mérőegység (IMU). A későbbi fázisokban az IMU áttervezésre került és a kalibrációs módszereket az új modellen is teszteltem.

Mivel a négyrotoros helikopter projekt során a teljes mérőrendszer rendelkezésre állt, a helikopter mozgásával valódi méréseket lehetett gyűjteni. Ezeket az adatokat az állapotbecslők kifejlesztése során sikeresen lehetett felhasználni. Fontos megkötés, hogy a helikopteren súlykorlátozást kellett betartani, ezért az összes algoritmust beágyazott processzorokon kellett megvalósítani. Néhány mikroprocesszor programozása során az ún. "gyors prototípus tervezés" módszert használtam, melyet a MATLAB/Simulink támogat. A többi mikrovezérlőt C nyelven programoztam.

Az irányítási algoritmusokat is beágyazott processzoros környezetben fejlesztettem és teszteltem. A fejlesztés első részében az irányítási módszerek tervezése szimulációs környezetben (MATLAB/Simulink) történt, majd ezen módszerek tesztelése valódi repülések keretében történt.

A kültéri GPS alapú navigációs algoritmusok kifejlesztése is valós mérési adatokat használt. Az adatok rögzítéséhez egy adatgyűjtő rendszer készült el, melynek autóra vagy vitorlázó repülőre való rögzítésével valós mérési adatok születtek. Az adatgyűjtő rendszer beágyazott processzorokon futó valósidejű Linux operációs rendszerre épül. A kutatás ezen szakaszában a mérési adatokat valódi járművek mozgása során rögzítettem, majd az adatfeldolgozó és navigációs algoritmusokat MATLAB környezetben, offline fejlesztettem. A fejlesztés során készített algoritmusok könnyen átültethetők beágyazott rendszerekbe.

2. Új tudományos eredmények összefoglalása

2.1. Gyorsulásmérő, szögsebességmérő és mágneses térerősségmérő kalibrációja

Az inerciális és mágneses érzékelők kalibrációja azért válik szükségessé, mert a gyári kalibráció nem kielégítő (a nem kezelt hibaforrások miatt) a robotikai alkalmazásokhoz. A téziscsoport különböző megoldásokat mutat be gyorsulásmérő, szögsebességmérő és mágneses térerősségmérő kalibrációjára.

A konkurens megoldásokkal összehasonlítva elmondható, hogy ezek a megoldások az összes tipikus hibaforrást kezelik. Fontos kiemelni, hogy a módszerek semmilyen speciális eszközt nem igényelnek, ezért bármilyen érzékelő rendszerrel használhatók, még alacsony költségvetésű megoldásokban is.

A gyorsulásmérő kalibrációja egy robusztus, SVD technikát alkalmazó, ellipszoid illesztésen alapuló módszert alkalmaz. Ezáltal az erősítési és ofszet hiba, valamint a tengelyek nem merőleges voltából következő hiba nagysága kompenzálható. A módszer hőmérséklet kompenzációval is kiegészíthető. A kalibrációs módszer a forgatásra nézve bizonytalan. Két különböző megoldást dolgoztam ki ennek a bizonytalanságnak a kezelésére, melyek a különböző alkalmazások eltérő igényeit elégítik ki. Az ofszet hibának a nagysága erősen függ a szenzor aktuális környezetétől. Az értekezés két módszert mutat be, melyek indítás előtti kalibrációként alkalmazhatók.

A szögsebességmérő kalibrációja két lépésből áll. Az elsőben az ofszet és a gyorsulás hatásának kompenzálása történik. A második fázis kezeli az erősítésből és a tengelyek nem merőleges voltából adódó hibát. A módszer kiegészült hőmérséklet kompenzációval.

A mágneses térerősségmérő kalibrációja hasonló ellipszoid illesztésen alapszik, mint a gyorsulásmérő kalibrációja. Ebben az esetben is bevezettem a hőmérséklet kalibrációt. A Föld mágneses mezejének tulajdonságai lehetővé teszik a szenzor mozgás közbeni kalibrációját. A tézis két különböző módszert mutat be, amely két különböző típusú járművön (autó és repülő) alkalmazható.

A zajanalízis (kovariancia mátrix meghatározás) minden bemutatott kalibrációs módszernek része. Ez a megközelítés a későbbi állapotbecslési módszerek esetén szintén fontos lesz a későbbi téziscsoportokban.

1. Téziscsoport. *Szenzorkalibrációs módszereket dolgoztam ki 3D gyorsulásmérőt és 3D szögsebességmérőt tartalmazó inerciális mérőegység (IMU), valamint mágneses térerősségmérő kalibrációjára. A módszerek nem igényelnek további eszközöket, ezért az alkalmazások széles körében használhatók. A szenzor paramétereinek kalibrációja mellett a mérési zajok kovariancia mátrixa is meghatározásra kerül.*

Kapcsolódó publikációk: [S1, S7, S8, S10, S12, S13]

1.1. Tézis. *A gyorsulásmérővel végzett mérésorozat alapján algoritmust dolgoztam ki, mely képes a gyorsulásmérő ofszet és erősítés hibájának kiszámítására, és meghatározza a szenzor tengelyeinek nem merőleges voltából származó hiba nagyságát. Az algoritmushoz kiegészítést adtam, mely képes a paramétereket a hőmérséklet függvényében meghatározni. Kétfajta algoritmust készítettem, amellyel meghatározható a szenzor frissített ofszet hibája és a mérés zajainak kovariancia mátrixa a jármű indításakor.*

1.2. Tézis. *A szögsebességmérővel végzett mérésorozat alapján kalibrációs módszert készítettem, amely képes a szögsebességmérő ofszet hibáját meghatározni, valamint a szenzorra ható gyorsulás okozta hibát kompenzálni. Kiegészítést készítettem, mellyel az erősítés hiba és a tengelyek nem merőleges voltából adódó hiba paraméterei meghatározhatók. A módszereket kiegészítettem hőmérséklet függőség kezeléssel. Módszert dolgoztam ki a jármű indításakor tapasztalható kezdeti ofszet mérésére, valamint a mérési zajok kovariancia mátrixának meghatározására.*

1.3. Tézis. *Kalibrációs módszert dolgoztam ki mágneses térerősségmérő kalibrálására. Az algoritmus képes az erősítés és ofszet hiba meghatározására, valamint a tengelyek nem merőleges volta miatti hiba kiszámítására egy skálázási együttható erejéig. Kiegészítést készítettem, mely képes kezelni ezt a függőséget is. További kiegészítést adtam, mellyel a hőmérséklet függőség kezelhető. Módszert dolgoztam ki zajok kovariancia mátrixának meghatározására. Két különböző módszert dolgoztam ki két különböző típusú jármű (autó és repülő) esetére, amelyekkel a szenzor a jármű mozgása közben is kalibrálható.*

2.2. Négyrotoros helikopter állapotbecslése és irányítása

Egy rendszer belső állapotai kétféleképpen határozhatók meg. Vagy közvetlen méréssel, vagy a rendszer be- és kimeneteit megfigyelve becslési eljárásokkal. A téziscsoport a második esethez kapcsolódóan állapotbecslési eljárásokat mutat be.

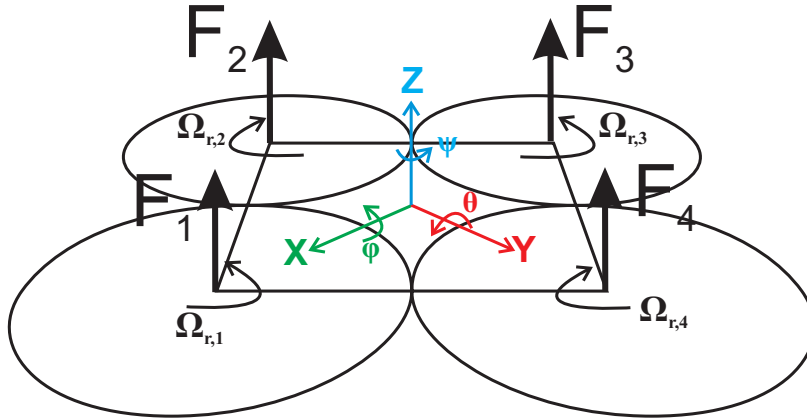
Az állapotbecslés célja egy jármű teljes mozgásállapotának meghatározása, amely tartalmazza az orientációt, szögsebességet, pozíciót és sebességet nagy mintavételi sebesség mellett. A bemutatott állapotbecslési eljárások a mozgó test kinematikai modelljét használják, ezért tetszőleges járműtípusra alkalmazhatók.

Az orientáció becslésre először RPY (roll-pitch-yaw, Euler szög) reprezentáción alapuló megközelítést használtam. Ez a módszer képes megoldani az orientáció becslés problémáját, de a számítási igénye jelentős. Ezért alkalmazásra került egy kvaternióra alapozott orientáció reprezentáció és a hozzá tartozó kinematikai modell. Ez a módszer már képes kezelni a körülfordulás problémáját, amennyiben kisebb módosításokat hajtunk végre a Kalman szűrőben.

A pozíció becslésére először olyan kinematikai modell került bevezetésre, mely a gyorsulást, sebességet és pozíciót is előállítja a helikopter koordináta rendszerében. Ez jól használha-

tó identifikációs és tesztelési célokra. Ehhez azonban szükség van a szöggyorsulás ismeretése. Ezt az információt általában nehéz előállítani, ezért a második változatban a problémát úgy kezeltem, hogy az állapotbecslést a szenzor koordináta-rendszerében végeztem, és az utolsó lépésben csak a pozíciót és a sebességet transzformáltam a jármű koordináta-rendszerébe.

Az állapotbecslő algoritmusoknál használt tesztkörnyezet egy négyrotoros helikopter volt. A helikopter felépítése az 1. ábrán látható. Ennél a rendszernél a pozíció és orientáció mérést egy képfeldolgozó rendszer végzi, amely jelentős késleltetéssel rendelkezik. Ezért olyan állapotbecslési módszert dolgoztam ki, mely képes kezelni ezt a késleltetést is.



1. ábra. A négyrotoros helikopter mechanikai felépítése

Az állapotbecslésre alapozva különböző irányítási algoritmusok készültek a helikopterhez. Első megközelítésben a már létező algoritmusok [1] vizsgálata készült el. A későbbi vizsgálatokban a lineáris szabályzók szerepeltek, amelyek alátámasztották komplexebb algoritmusok szükségességét. Az általános irányításhoz nemlineáris bemenet/kimenet linearizáción alapuló szabályzás készült el. Azokra az esetekre, ahol a pozíciót és orientációt meghatározó rendszer elérhetetlenné válik (pl. a markerek kitakarása miatt), biztonságos leszállást kell megvalósítani. Ehhez H_∞ technikára alapozott robusztus szabályzás készült.

2. Téziscsoport. *Kalman szűrőn (KF) és kiterjesztett Kalman szűrőn (EKF) alapuló állapotbecslő módszereket és szenzorfüziós technikát dolgoztam ki inerciális mérőegységek (IMU) és külső 3D pozíció/orientáció mérőegységek integrálásához, melyek légi és földi járművek irányító rendszerében alkalmazhatók a kinematikai változók állapotbecsléséhez. Az állapotbecslő algoritmusokat használó szabályzási algoritmusokat dolgoztam ki négyrotoros helikopter irányításához. A szabályzási algoritmusok és valósídejű megvalósításaik kiterjednek lineáris LQ, nemlineáris bemenet/kimenet linearizáláson alapuló, valamint H_∞ szintézist alkalmazó technikákra.*

Kapcsolódó publikációk: [S1, S2, S3, S6, S7, S9, S12, S13, S14]

2.1. Tézis. *Állapotbecslési algoritmust fejlesztettem ki, mely képes a mozgó jármű orientációjának és pozíciójának becslésére és az inerciális szenzorok időben változó hibáinak kezelésére.*

Az orientáció becslés kvaterniókra alapozott reprezentációt használ, amely megbízhatóbb állapotbecslést tesz lehetővé, mint a hagyományos RPY (Euler-szög) reprezentáció.

2.2. Tézis. *Különösen a képfeldolgozásra alapozott szenzorok esetén, rendszerint nem hanyagolható el a mérés valódi időpontja valamint a mérési eredményeknek a szabályzási algoritmusban való felhasználása közötti csúszó késleltetés. Módszert fejlesztettem ki az egyes szenzorok késleltetéseinek figyelembe vételére. A módszer segítségével lehetséges a beltéri négyrotoros helikopter pozíciójának és orientációjának megbízhatóbb meghatározása és ezáltal pontosabb szabályzási algoritmusok létrehozása valós időben.*

2.3. Tézis. *Nemlineáris bemenet/kimenet linearizálásra alapozott szabályzási algoritmusokat fejlesztettem ki beltéri négyrotoros helikopter számára. A szabályzás az állapotbecslési algoritmusok kimenetét (a becsült állapotot) használja fel. Az irányítási algoritmusokat a helikopter beágyazott számítógépein készítettem el, és a szabályzás minőségét valós repülések során validáltam.*

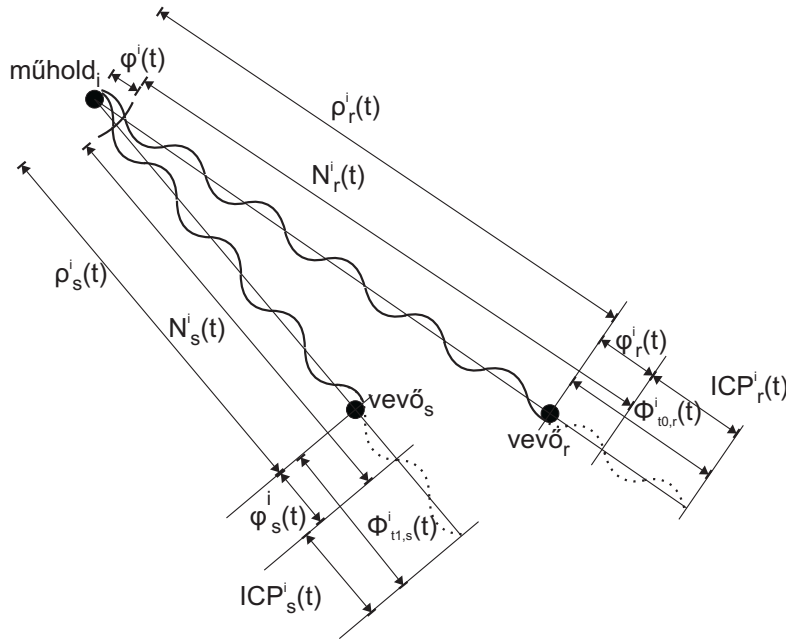
2.4. Tézis. *Az autonóm földi és légi járművek esetén nem zárható ki bizonyos szenzorok végleges kiesése. Ennek ellenére a járművet biztonságosan parkoló helyzetbe kell hozni. Vészhelyzetben alkalmazható irányítási algoritmust dolgoztam ki. A megoldás a külső képfeldolgozó rendszer kiesését képes kezelni. Az irányítást a helikopter fedélzeti számítógépén valósítottam meg, és szimulált vészhelyzetben valós repülési körülmények között validáltam.*

2.3. Vivőfázis mérésen alapuló GPS navigáció

A kültéri navigáció olyan érzékelőt igényel, mely képes a jármű pozícióját és orientációját nagy pontossággal meghatározni. Széles körben elterjedt megoldás a GPS használata. A hagyományos (3-10 méter pontosságú) GPS technikák nem eléggé precízek a pozíció és orientáció szabályzások számára. Ember nélküli járművek esetén olyan kritikus manőverek végrehajtásához, mint ütközés elkerülés, vagy akadályok közötti motgás, különösen fontos a pozíció meghatározás deciméter alatti pontossága. A kutatások egyik célja az ehhez szükséges feltételek megteremtése. Az eredmények alkalmazása a járműirányítás területén jövőbeli kutatási feladat.

Nagy pontosságú navigációhoz a vivőfázis mérésen alapuló differenciális GPS technikák alkalmazhatók. Ez a megoldás a vivőjel aktuális fázisát méri. Mivel a jel hullámhossza körülbelül 19cm, lehetséges a pozíció meghatározása deciméter alatti pontossággal. Emellett a pontosság mellett a jármű orientációjának a pontossága is biztosítható. A GPS jel állapotát egy kimerevített pillanatban és a differenciális GPS struktúra elvét a 2. ábra mutatja.

A vivőfázis mérésen alapuló technika használata az ún. integer bizonytalanság problémához vezet, ahol a cél a műhold és a vevő közti vivőjel periódusai számának meghatározása.



2. ábra. A vivőfázis mérésen alapuló GPS struktúrája

Ennek általános formája:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{N}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3, \quad \mathbf{N} \in \mathbb{Z}^{m-1}$$

ahol \mathbf{y} mérési adatokat tartalmazó vektor, \mathbf{A} és \mathbf{B} ismert rendszer mátrixok, \mathbf{x} és \mathbf{N} ismeretlen változók.

A hagyományos megoldásoknak [2, 7] olyan hátrányaik vannak (nagy számítás igény, lassú újrainicializálás dinamikusan változó látható műholdak esetén), melyek nehézkessé teszi a használatukat általános esetben (ezeket a megoldásokat a gyakorlatban csak speciális esetekben tudják használni).

A téziscsoportban bemutatott módszerek a probléma megoldására olyan további érzékelőket használnak, melyek tipikusan megtalálhatók egy autonóm jármű fedélzetén. Az első megközelítésben két GPS antenna van rögzítve egy járműre és a módszer a gyorsulásmérőt és a mágneses térerősségmérőt használja fel az integer bizonytalanság megoldására. A cél a két antenna közti vektor (bázisvektor) meghatározása a lokális North-East-Down (NED) koordináta-rendszerben. Ebben az esetben az integer bizonytalanság meghatározható egyszeri (vagy zajos mérés esetén néhány) mérés felhasználásával, amely tulajdonság előrelépést jelent a konkurens módszerekhez képest. Ha már az integer bizonytalanság problémája megoldódott, a bázisvektor egyszerűen számítható. Két antenna és egy mágneses térerősségmérő használatával a jármű 3D orientációja is meghatározható. Azonban a mágneses térerősségmérőre alapozott orientáció meghatározásnak szingularitása van, amikor a bázisvektor egybeesik a mágneses térerősség irányával. Ez az eset valós körülmények között is problémát okozhat. A problémát megoldandó, három GPS antenna használatát is bemutatja az értekezés.

Amennyiben a jármű orientációja már meghatározásra került, speciális kinematikai mennyiségek számítására is lehetőség van. A téziscsoportban a támadási szög és az oldalcsúszási szög számítása került bemutatásra. Ezekre az információkra alapozva lehetséges identifikációs és irányítási algoritmusok kidolgozása.

Precíz pozíció meghatározáshoz egy földi állomás (bázisállomás) bevezetésére van szükség. A navigációs paramétereket ehhez az állomáshoz képest lehet meghatározni. A téziscsoportban bizonyításra került, hogy a jármű fedélzeti differenciális mérőegységei nem adnak segítséget az ún. kétszeresen differenciált integer bizonytalanság meghatározásához.

Ebben az esetben a hagyományos integer bizonytalanságot legkisebb négyzetes hiba értelemben megoldó algoritmusokat (LAMBDA [7], MLAMBDA [3]) használtam. A kidolgozott módszerek kihasználják azt az előnyt, hogy a mozgó járművön legalább két GPS antenna el van helyezve, illetve, hogy a köztük lévő integer bizonytalanságot már az orientáció meghatározás megadta. Ily módon a pozíció meghatározás megbízhatóbbá válik, mint a konkurens megoldások, illetve az integer bizonytalanságot is sokkal gyorsabban meg lehet határozni (a gyakorlati esetekben egyszeri mérés elegendő volt).

A folyamatos navigáció megköveteli a felbukkanó és eltűnő műholdak kezelését, illetve annak az esetnek a figyelembevételét, amikor nem látható elég műhold a navigációhoz. Az értekezés bemutat egy módszert a változó műholdak kezelésére. A navigációs adatok számítását kétszintű kiterjesztett Kalman szűrő végzi, amely képes kezelni azt az esetet, amikor a GPS adatok időszakosan nem elérhetőek. A módszer kihasználja, hogy az inerciális szenzoroknak a mintavételi ideje jóval kisebb, mint a GPS vevőé, így a becsült pozíció és orientáció információ az inerciális mérőeszközök mintavételi idejével áll rendelkezésre.

3. Téziscsoport. *Navigációs módszereket dolgoztam ki vivőfázis mérésre alkalmas GPS vevők, inerciális szenzorok és mágneses térerősségmérők használatával. A kidolgozott módszerek képesek a mozgó jármű pozícióját és orientációját megbízhatóan meghatározni. A bemutatott megoldások kiküszöbölik a konkurens megoldások hátrányát, a hosszan tartó inicializálási időt. A módszerekre alapozva állapotbecslési algoritmusokat dolgoztam ki, melyek a vivőfázis méréseit és más szenzorok adatait felhasználva robusztus módon képesek a mozgó jármű pozíciójának és orientációjának meghatározására. A pozíció meghatározás pontossága deciméter alatti tartományba esik, mely szükséges ember nélküli járművek esetén olyan kritikus manőverek végrehajtásához, mint ütközés elkerülés vagy akadályok közötti mozgás.*

Kapcsolódó publikációk: [S4, S5, S8, S10, S11]

3.1. Tézis. *Módszert dolgoztam ki az integer bizonytalanság meghatározására arra az esetre, amikor két GPS antenna van rögzítve a mozgó járműre. A módszer a gyorsulásmérő és szögsebességmérő méréseit is felhasználja. A megoldás előnye, hogy az integer bizonytalanság megbízható meghatározásához csak néhány mérési adatra van szükség.*

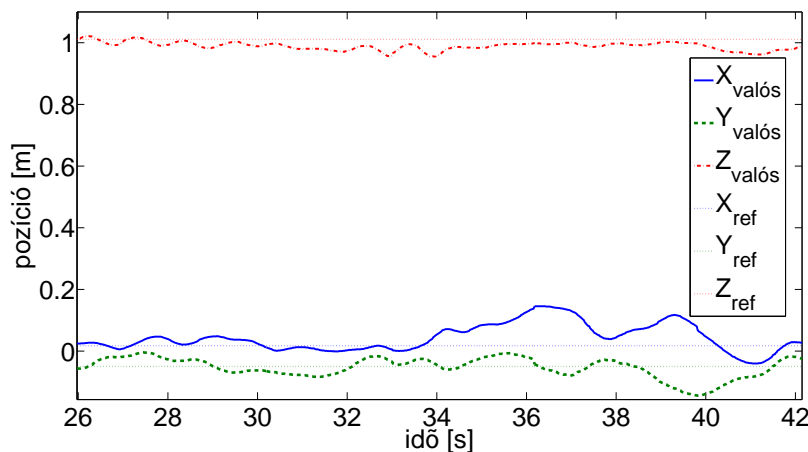
3.2. Tézis. Módszert dolgoztam ki mozgó jármű 3D orientációjának meghatározására, mely vagy két GPS vevőt és egy mágneses térerősségmérőt, vagy három GPS vevőt használ. A módszer használatával olyan speciális kinematikai mennyiségek is meghatározhatók, mint a támadásiszög (állásszög) és az oldalcsúszási szög.

3.3. Tézis. Módszert dolgoztam ki az integer bizonytalanság meghatározására nagypontoságú pozíciómeghatározás esetére. Ez a megközelítés bázisállomást és két mozgó GPS vevő használatát feltételezi. A kidolgozott módszer képes csökkenteni az integer bizonytalanság meghatározásához szükséges inicializálási időt.

3.4. Tézis. Kiterjesztett Kalman szűrőre alapozott szenzorfüziós algoritmust dolgoztam ki, amely több GPS vevőt alkalmaz, melyek mindegyike vivőfázis mérésére alkalmas, továbbá inerciális szenzort és mágneses térerősségmérőt is alkalmaz. A kidolgozott módszer robusztus módon képes a mozgó jármű pozíciójának, sebességének és szögsebességének meghatározására. Az algoritmus képes a GPS vétel időleges kiesését kezelni.

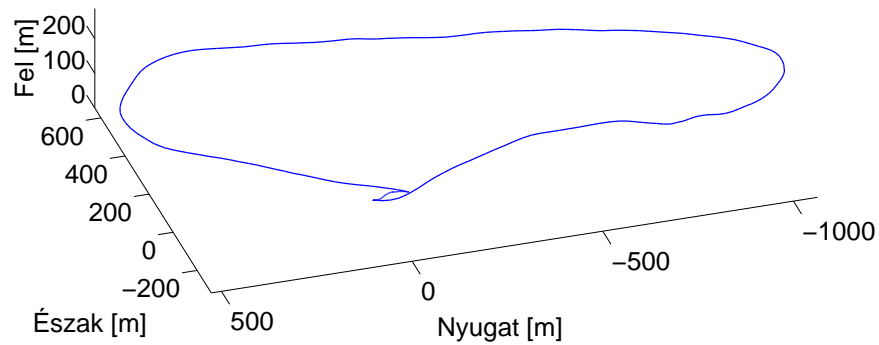
3. Alkalmazások

Az értekezés téziscsoportjai szoros kapcsolatban vannak gyakorlati problémákkal. A fő motivációt a kutatás során a BME-IIT beltéri négyrotoros helikopter projektje jelentette, ami egyben a kidolgozott módszerek fő alkalmazási területe is. Az első téziscsoport kalibrációs módszerei is először ebben a környezetben kerültek felhasználásra. A szenzorkalibrációra alapozott állapotbecslési algoritmusokat, melyek a második téziscsoportban kaptak helyet, szintén ezen a platformon teszteltem. Az egy helyben való lebegés mérési eredményeit mutatja a 3. ábra.

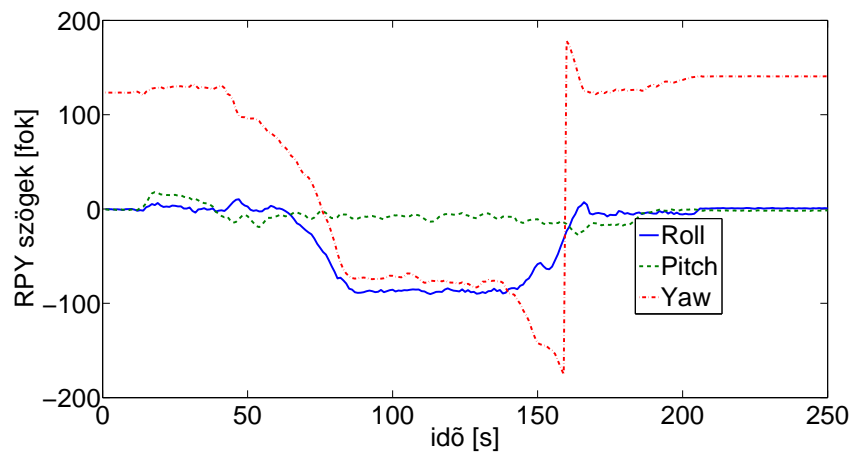


3. ábra. A helikopter pozíciója egy helyben lebegés esetén

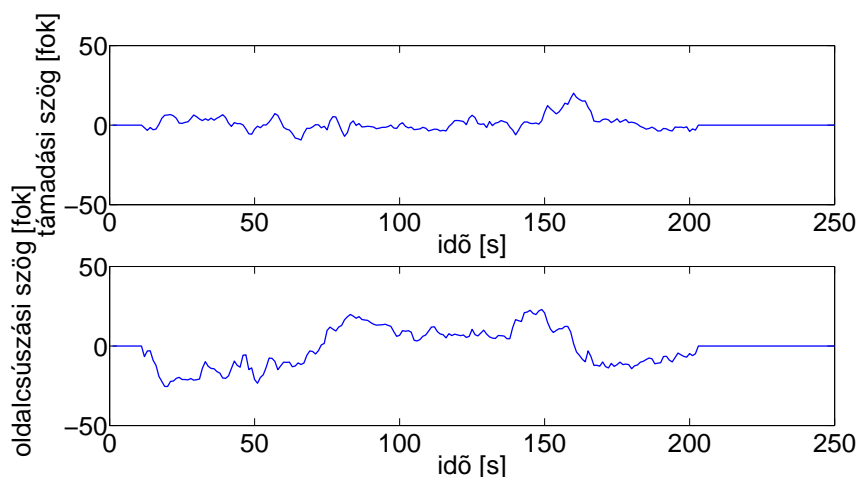
A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok "Autonóm földi, légi, és vízi robotok korszerű irányításmélete és mesterséges intelligencia eszközei" című OTKA K 71762 azonosító számú programja támogatta.



4. ábra. Vitorlázó repülős mérés útvonala



5. ábra. Az RPY szögek alakulása a repülés során



6. ábra. A 3D orientációból számított támadási (állás) és oldalcsúszási szögek

A kültéri navigációval kapcsolatos kutatási eredményeket autóval és vitorlázó repülővel történő mozgás során validáltam. Ebben az esetben a második téziscsoport állapotbecslési

algoritmusait átalakított formában lehetett alkalmazni, ami az eredmények széles körű felhasználási lehetőségeit tükrözi. Az autóval és a repülővel végzett kísérletek megmutatták, hogy a harmadik téziscsoport algoritmusai széles körben alkalmazhatók kültéri járművek esetében, főleg az ember nélküli földi (UGVs) és légi (UAVs) járművek területén.

A 4. ábra egy vitorlázó repülővel készült mérés útvonalát mutatja be. Ehhez kapcsolódóan az 5. ábrán látható a mérés során a GPS mérésekből és a mágneses szenzor adataiból számított 3D orientáció RPY szögekben reprezentálva. Ezekből az adatokból számítható támadásiszög (állásszög) és oldalcsúszási szög értékeket a 6. ábra mutatja be. Az ábrákon a felszállás 10 másodpercnél kezdődik és a leszállás kb. 205 másodpercnél történik meg.

Az oldalcsúszási és támadási szög számítása a NED és BODY koordináta-rendszerek közötti transzformációra épül. Ez egy általános modell, melyet az autóknál és repülőknél is használható. Ebben a megközelítésben a támadási és oldalcsúszási szögek a járműhöz rögzített koordinátarendszerhez képest számíthatódnak. Ha a repülő rendelkezik precíz szélességmérőkkel, akkor azok méréseit is figyelembe lehet venni.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatta.

A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú "Nemzeti Kiválóság Program - Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program" című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

Az értekezés témakörében készült publikációk

- [S1] L. Kis and B. Lantos. Szenzorfüzió alkalmazása beltéri autonóm négyrotoros helikopteren. *Hadmérnök 4:(4)* pp. 191-204, 2009.
- [S2] L. Kis and B. Lantos. Quadrotor control based on partial sensor data. In Proceedings of: *19th IEEE International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. Budapest, Hungary*, pp. 43–48, 2010.
- [S3] L. Kis and B. Lantos. State estimation and control of an indoor quadrotor helicopter. In Proceedings of: *XVII. Magyar Repüléstudományi Napok. Budapest, Magyarország, ISBN: 978-963-313-032-2*, pp. 1–12, 2010.
- [S4] L. Kis and B. Lantos. Aided Carrier Phase Differential GPS for Attitude Determination. In Proceedings of: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings. Budapest, Hungary, ISBN: 978-1-4577-0837-4*, pp. 778–783, 2011.
- [S5] L. Kis and B. Lantos. INS Aided Carrier Phase Differential GPS System for Precise Navigation. In Proceedings of: *20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. Brno, Czech Republic*, pp. 108–115, 2011.
- [S6] L. Kis and B. Lantos. Quadrotor control based on partial sensor data. *International Journal of Mechanics and Control 12:(1)* pp. 43-50, 2011.
- [S7] L. Kis and B. Lantos. Sensor fusion and actuator system of a quadrotor helicopter. *Periodica Polytechnica - Electrical Engineering, 2009:(53/3-4)* pp. 139-150, 2011.
- [S8] L. Kis and B. Lantos. INS and magnetic sensor aided carrier phase differential GPS for attitude determination. In Proceedings of: *Proceedings of the 5th WSEAS World Congress on Applied Computing Conference (ACC'12). Faro, Portugal, 2012.05.02-2012.05.04*, pp. 106–111, 2012. ISBN: 978-1-61804-089-3.
- [S9] L. Kis and B. Lantos. Time-delay extended state estimation and control of a quadrotor helicopter. In Proceedings of: *20th Mediterranean Conference on Control & Automation MED 2012: Conference Digest. Barcelona, Spain, 2012.07.03-2012.07.06.*, pp. 1560–1565, 2012.
- [S10] L. Kis and B. Lantos. GPS based attitude determination using embedded magnetometer calibration. In Proceedings of: *21st Mediterranean Conference on Control and Automation 2013.06.25-28 Crete, Greece - accepted 2013.04.15*, 2013.

- [S11] L. Kis and B. Lantos. High precision multiple antennas GPS positioning using carrier phase technique and sensor fusion. *Periodica Polytechnica - Electrical Engineering*, Submitted for acceptance 2013.02.12, 2013.
- [S12] L. Kis, Z. Prohaszka, and G. Regula. Calibration and testing issues of the vision, inertial measurement and control system of an autonomous indoor quadrotor helicopter. In Proceedings of: *RAAD 17th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Ancona, Italy, ISBN: 978-88-903709-0-8*, pp. 1–10, 2008.
- [S13] L. Kis, Z. Prohaszka, and G. Regula. Calibration and testing issues of the vision, inertial measurement and control system of an autonomous indoor quadrotor helicopter. *International Journal of Mechanics and Control* 10:(1) pp. 29-38, 2009.
- [S14] L. Kis, G. Regula, and B. Lantos. Design and hardware-in-the-loop test of the embedded control system of an indoor quadrotor helicopter. In Proceedings of: *6th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems. Regensburg, Germany, ISBN: 978-3-00-024989-1, DOI: 10.1109/WISES.2008.4623300*, pp. 35–44, 2008.

A téziszűzetben hivatkozott irodalom

- [1] S. Bouabdallah and R. Siegwart. Full control of a quadrotor. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- [2] X. Chang and C.C. Paige. An algorithm for combined code and carrier phase based GPS positioning. *BIT Numerical Mathematics*, 43:915–927, 2003.
- [3] X.-W. Chang, X. Yang, and T. Zhou. MLAMBDA: A Modified LAMBDA Method for Integer Least-squares Estimation. *Journal of Geodesy*, 79:552–565, 2005.
- [4] Jay Farrell and Matthew Barth. *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. McGraw-Hill, 1998.
- [5] Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, and Angus P. Andrews. *Global Positioning System, inertial navigation and integration*. Wiley, 2007.
- [6] R.E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82(D):35–45, 1960.
- [7] P.J.G. Teunissen. Least-square estimation of the integer GPS ambiguities. In *IAG General Meeting pp. 1-16*, Beijing, China, 1993.